

نشریه مهندسی سازه و ساخت (علمی - پژوهشی)

www.jsce.ir

تعیین محل و شدت آسیب در شبکه دولایه توسط روش انرژی کرنشی مودال و ترکیب اطلاعات

حامد تیموری^۱، محمدرضا داودی^{۲*}، سید امین مصطفویان^۳

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

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

۳- استادیار، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

چکیده

تغییرات انرژی کرنشی مودال سازه قبل و بعد از آسیب یکی از شاخص‌هایی است که برای تشخیص آسیب در سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این وجود در سازه‌هایی با تعداد اعضای زیاد مانند شبکه‌های دولایه، این روش به تعداد شکل مود زیادی نیاز دارد که در عمل تعیین تعداد زیادی شکل مود کار مشکلی است. برای غلبه بر این مشکل، در این مقاله یک روش دومرحله‌ای برای تعیین محل و شدت آسیب در شبکه‌های دولایه پیشنهاد شده است. یک شبکه دولایه با ۱۵۳۶ عضو تحت چند سناریوی آسیب مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. ابتدا شاخص آسیب مبتنی بر انرژی کرنشی مودال با در نظر گرفتن اثر یک شکل مود تعیین شد. سپس شاخص‌های آسیب به دست آمده به عنوان منابع اطلاعاتی مستقل در نظر گرفته شدند و به کمک تئوری بیز ترکیب شدند تا اعضای آسیب‌دیده شبکه دولایه به صورت دقیق تعیین شوند. در مرحله بعد، با استفاده از روش بهینه‌یابی سیستم ذرات باردار تابع هدفی متشکل از پنج فرکانس طبیعی اول شبکه دولایه بهینه گردید و شدت آسیب اعضایی که در مرحله قبل به عنوان اعضای آسیب‌دیده معرفی شده بودند، تعیین شد. نتایج نشان داد روش دومرحله‌ای پیشنهادی به خوبی قادر است با در نظر گرفتن تعداد محدودی شکل مود و فرکانس طبیعی، محل و شدت آسیب در شبکه دولایه را تعیین نماید

کلمات کلیدی: تشخیص آسیب، تئوری بیز، انرژی کرنشی مودال، شبکه دولایه، سیستم ذرات باردار

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/jsce.2018.126917.1518	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/jsce.2018.126917.1518	۱۳۹۹/۰۴/۰۱	۱۳۹۹/۰۴/۰۱	۱۳۹۷/۰۷/۱۰	۱۳۹۷/۰۵/۲۰	۱۳۹۷/۰۱/۲۳
محمدرضا داودی			*نویسنده مسئول:		
davoodi@nit.ac.ir			پست الکترونیکی:		

Detecting damage location and severity in a double layer grid using modal strain energy method and data fusion

Hamed Teimouri¹, Mohammad Reza Davoodi^{2*}, Seyedamin Mostafavian³

1- Phd student, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

2- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

3- Assistant professor, Department of Civil Engineering, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran

ABSTRACT

Changes in modal strain energy of elements before and after damage is a robust damage detection index. However, in structures like double layer grids which have large number of elements, this method has some problems. First, In large structures this method needs more mode shapes to detect damage through modal strain energy method which in practice is difficult to determine. Second, this method introduce some healthy elements as damaged element. To overcome these problems, in this paper a two stage damage detection technique based on modal strain energy method is presented for detecting damage in double layer grids. First, the Modal Strain Energy Based Index (MSEBI) for each mode shape is determined. Then a data fusion technique based on Bayesian theory is used to combine MSEBI values obtained from each mode shape to find damaged elements. Then Charged System Search (CSS) optimization method which is a powerful optimization method is employed to optimize an objective function based on natural frequency to determine damage severity of damaged elements. To demonstrate the performance of the proposed method, a large double layer grid with 1536 elements and different single and multiple damage cases is considered. Numerical results show that the proposed method can successfully find damaged elements and their severities using only few first numbers of mode shapes and frequencies.

ARTICLE INFO

Receive Date: 12 April 2018

Revise Date: 11 August 2018

Accept Date: 02 October 2018

Keywords:

Damage detection

Modal strain energy method

Bayesian Theory

Double layer grid

Charged system search

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.126917.1518

*Corresponding author: Mohammad Reza Davoodi

Email address: davoodi@nit.ac.ir

۱- مقدمه

شبکه‌های دولایه یک خانواده مهم از سازه‌های فضاکار هستند که برای پوشش دهانه‌های بزرگ استفاده می‌شوند [۱]. این سازه‌ها معمولاً تعداد اعضای زیاد و درجه آزادی بالا دارند. در شبکه‌های دولایه معمولاً نیروی محوری غالب است و این سازه‌ها مانند خرپاهای فضایی رفتار می‌کنند. شبکه‌های دولایه مانند انواع دیگر سازه‌ها، در معرض آسیب‌دیدگی قرار دارند. در صورتی که آسیب در سازه‌ها به موقع تشخیص داده نشود می‌تواند منجر به خرابی پیش‌رونده یا کلی سازه شود و خسارت‌های مالی و جانی زیادی را موجب شود. در رابطه با شبکه‌های دولایه، می‌توان با تشخیص به موقع آسیب‌دیدگی، اعضای آسیب‌دیده را با اعضای سالم جایگزین نمود.

آسیب در سازه‌ها مشخصات فیزیکی سازه (جرم، سختی و میرایی) را تغییر می‌دهد و از آنجایی که مشخصات فیزیکی یک سازه با مشخصات دینامیکی آن (فرکانس‌های طبیعی، شکل‌های مودی و درصد‌های میرایی) مرتبط است، می‌توان از مشخصات دینامیکی سازه برای تشخیص آسیب استفاده نمود. در دهه‌های اخیر روش‌های تشخیص آسیب مختلفی بر پایه مشخصات دینامیکی سازه‌ها توسعه داده شدند [۲-۶]. یکی از روش‌های دینامیکی که برای تشخیص آسیب در سازه‌ها استفاده می‌شود، روش انرژی کرنشی مودال است. این روش با مقایسه انرژی کرنشی مودال سازه قبل و بعد از آسیب و معرفی یک شاخص آسیب، اعضای آسیب‌دیده سازه را تشخیص می‌دهد.

کراسکو و همکاران در سال ۱۹۹۷ از روش انرژی کرنشی مودال برای تشخیص آسیب در یک خرپای فضایی با ۳۰۰ عضو استفاده کردند [۷]. آن‌ها توانستند محل آسیب در حالت آسیب‌های تکی و دوتایی با شدت ۵۰٪ و بالاتر را به کمک این روش تشخیص دهند. شی و همکاران در سال ۱۹۹۸ از روش انرژی کرنشی برای تشخیص آسیب در سازه‌ها استفاده کردند [۸]. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که شاخص انرژی کرنشی مودال بیشترین مقدار را در عضو آسیب‌دیده دارد. مقدار این شاخص برای اعضای مجاور عضو آسیب‌دیده کوچک‌تر از شاخص آسیب عضو آسیب‌دیده است و برای اعضای دورتر از عضو آسیب‌دیده نیز بسیار کوچک است. بعلاوه آن‌ها نشان دادند برای اعضای مرتبط با نقاط گرهی شکل مود، مقادیر شاخص آسیب خیلی کوچک یا خیلی بزرگ است که ممکن است منجر به تشخیص اشتباه موقعیت آسیب شود. آن‌ها پیشنهاد نمودند برای غلبه بر این مشکل از تغییرات انرژی کرنشی مودال در چند مود برای تشخیص آسیب استفاده شود. سرینیواس و همکاران در سال ۲۰۱۰ از روشی دومرحله‌ای مبتنی بر انرژی کرنشی مودال برای تشخیص محل و شدت آسیب در یک تیر دو سر ساده و یک خرپای دوبعدی استفاده کردند [۹]. در مرحله تشخیص محل آسیب آن‌ها مشاهده کردند شاخص انرژی کرنشی برای اعضای آسیب‌دیده مقدار بزرگ دارد، و همچنین برخی اعضای مجاور عضو آسیب‌دیده نیز شاخص آسیب قابل ملاحظه اما با مقدار کمتر دارند. بنابراین آن‌ها در مرحله تشخیص محل آسیب به‌ناچار تمام اعضای دارای شاخص بزرگ (شامل اعضای آسیب‌دیده و اعضای مجاور آن‌ها) را به‌عنوان اعضای آسیب‌دیده احتمالی در نظر گرفتند. ما و همکاران در سال ۲۰۱۴ از یک روش دومرحله‌ای مبتنی بر روش انرژی کرنشی مودال و بهینه‌یابی ازدحام ذرات برای تشخیص آسیب در یک قاب ۷ طبقه استفاده کردند [۱۰]. از آنجایی که شاخص آسیب برای برخی اعضای سالم نیز دارای مقادیر قابل ملاحظه بود، آن‌ها پیشنهاد استفاده از یک حد آستانه برای تفکیک اعضای سالم و آسیب‌دیده را ارائه کردند. به‌عنوان مثال آن‌ها مقدار حد آستانه برای قاب ۷ طبقه مورد بررسی را ۰/۱۳ محاسبه نمودند و تنها اعضای که شاخص انرژی کرنشی مودال بزرگ‌تر از ۰/۱۳ داشتند را به‌عنوان اعضای آسیب‌دیده در نظر گرفتند. وی و همکاران در سال ۲۰۱۶ از روش انرژی کرنشی مودال برای تشخیص آسیب در صفحه استفاده کردند [۱۱]. آن‌ها مشاهده کردند اعضای که در مجاورت عضو آسیب‌دیده هستند نیز دارای شاخص آسیبی کمتر از عضو آسیب‌دیده هستند، اما همچنان مقادیر شاخص آسیب این اعضا از شاخص آسیب اعضای دور از محل آسیب بزرگ‌تر است و این سبب هشدار اشتباه در مورد آسیب‌دیدگی این اعضا می‌شود. آن‌ها برای غلبه بر اثر مجاورت در صفحات شاخص انرژی کرنشی وزن‌دار ارائه دادند. سیدپور در سال ۲۰۱۲ روشی دومرحله‌ای مبتنی بر انرژی کرنشی مودال برای تشخیص محل و شدت آسیب در سازه‌ها ارائه داد [۱۲]. او از این روش برای تعیین آسیب در یک خرپای دوبعدی با ۲۵ درجه آزادی استفاده نمود که با توجه به درجات آزادی کم خرپای مذکور، برای این کار به تعداد نسبتاً قابل توجه ۵ شکل مود نیاز داشت. با وجود استفاده از ۵ شکل مود برای تعیین شاخص آسیب، باز هم تعدادی از اعضای سالم مقادیر شاخص آسیب قابل ملاحظه داشتند، بنابراین با در نظر گرفتن ۰/۰۵ به‌عنوان حد آستانه برای خرپای مذکور تنها اعضای که شاخص انرژی کرنشی مودال در آن‌ها بزرگ‌تر از ۰/۰۵ بود را به‌عنوان اعضای آسیب‌دیده احتمالی معرفی نمود. ترک‌زاده و همکاران در سال ۲۰۱۳ روشی دومرحله‌ای مبتنی بر انرژی کرنشی مودال برای تشخیص آسیب در شبکه

دولایه ارائه دادند [۱۳]. آن‌ها برای تشخیص آسیب در شبکه دولایه به روش مذکور به تعداد نسبتاً قابل توجهی از شکل مودها نیاز داشتند، به‌عنوان مثال برای تشخیص اعضای آسیب‌دیده در یک شبکه دولایه با ۵۷۶ عضو آن‌ها حداقل به ۱۶ شکل مود نیاز داشتند.

در سازه‌هایی مانند شبکه‌های دولایه که تعداد اعضای زیاد دارند، برای تشخیص آسیب به کمک روش انرژی کرنشی مودال به تعداد شکل مودهای زیادی نیاز است. علاوه بر این تشخیص آسیب در زمانی که چند عضو به‌صورت هم‌زمان آسیب دیده‌اند به تعداد شکل مودهای بیشتری نیاز دارد. تعیین تعداد زیاد شکل مود در عمل مشکل است، لذا استفاده از چند منبع مختلف اطلاعاتی و ترکیب اطلاعات برای تشخیص آسیب در این سازه‌ها ضروری به نظر می‌رسد. ترکیب اطلاعات روشی برای ترکیب اطلاعات به‌دست‌آمده از منابع اطلاعاتی مختلف برای دستیابی به یک تصمیم بهینه است. جیو و همکاران در سال ۲۰۱۱ از تئوری شواهد دمپستر-شافر برای ترکیب اطلاعات به‌دست‌آمده از روش انرژی کرنشی مودال و روش تغییرات فرکانس استفاده کردند [۱۴]. گراند و همکاران در سال ۲۰۱۲ از تئوری شواهد دمپستر-شافر برای ترکیب اطلاعات به‌دست‌آمده از مودهای مختلف در روش انرژی کرنشی مودال استفاده کردند تا آسیب در یک تیر دوسرگردار را تشخیص دهند [۱۵]. جیو و همکاران در سال ۲۰۱۲ از تئوری بیز برای ترکیب اطلاعات به‌دست‌آمده از روش انرژی کرنشی مودال و روش تغییرات فرکانس و تشخیص آسیب استفاده کردند [۱۶].

تعیین شدت آسیب در سازه‌ها معمولاً به کمک بهینه‌یابی انجام می‌شود. درصد آسیب‌دیدگی اعضا به‌عنوان متغیر بهینه‌سازی در نظر گرفته شده و با بهینه کردن تابع هدفی متشکل از مشخصات دینامیکی سازه درصد آسیب‌دیدگی اعضا تعیین می‌شود. از آنجایی که با افزایش تعداد متغیرها مسائل بهینه‌یابی پیچیده می‌شوند، معمولاً برای تشخیص درصد آسیب‌دیدگی اعضا در سازه‌ها از روش‌های دومرحله‌ای استفاده می‌شود. در مرحله اول اعضای آسیب‌دیده به کمک روش‌های مختلف دینامیکی یا استاتیکی تعیین می‌شود. در مرحله بعد برای بهینه‌یابی و تعیین درصد آسیب تنها اعضای که در مرحله اول آسیب‌دیده تشخیص داده شدند به‌عنوان متغیر بهینه‌یابی در نظر گرفته می‌شوند که این کار تعداد متغیرهای بهینه‌یابی را به‌شدت کاهش می‌دهد و منجر به تشخیص صحیح‌تر شدت آسیب‌دیدگی اعضا می‌شود. انتخاب روش بهینه‌یابی نیز یکی از چالش‌های تشخیص شدت آسیب می‌باشد. هرچه روش بهینه‌یابی مورد استفاده قدرتمندتر باشد احتمال گیرکردن در نقاط بهینه محلی و جواب اشتباه کاهش می‌یابد. الگوریتم بهینه‌یابی سیستم ذرات باردار (CSS) که یکی از قدرتمندترین الگوریتم‌های فرا کاوشی بهینه‌یابی می‌باشد در سال ۲۰۱۰ توسط کاوه معرفی گردید [۱۷]. این الگوریتم در مقالات متعددی برای تشخیص شدت آسیب استفاده شده است [۱۸-۲۰].

در این مقاله از روش انرژی کرنشی مودال به همراه تئوری بیز که از تکنیک‌های ترکیب اطلاعات می‌باشد برای تشخیص آسیب در یک شبکه دولایه با ابعاد ۳۰ متر در ۴۰ متر و تعداد ۱۵۳۶ عضو استفاده شده است. شاخص‌های آسیب به‌دست‌آمده از تغییرات انرژی کرنشی مودال اعضا برای مودهای مختلف به‌عنوان منابع اطلاعات در نظر گرفته شده است. سپس نتایج به‌دست‌آمده از منابع اطلاعاتی مختلف توسط تئوری بیز ترکیب گردید تا نتیجه قابل‌اعتمادتری به دست آید و اعضای آسیب‌دیده تعیین شوند. در مرحله بعد برای تعیین شدت آسیب اعضای که در مرحله اول آسیب‌دیده تشخیص داده شده بودند، از روش بهینه‌یابی سیستم ذرات باردار استفاده شد.

۲- تشخیص محل آسیب به روش انرژی کرنشی مودال

انرژی کرنشی مودال عضو j ام در مود i ام سازه با استفاده از رابطه زیر تعریف می‌شود [۸]:

$$MSE_{ij} = \varphi_i^T K_j \varphi_i \quad (1)$$

که در آن K_j ماتریس سختی عضو j ام، φ_i بردار شکل مود i ام سازه و MSE_{ij} انرژی کرنشی مودال عضو j ام در مود i ام سازه است. انرژی کرنشی مودال کل برای هر مود سازه با جمع کردن انرژی‌های کرنشی مودال تمام اعضا در آن مود تعیین می‌شود:

$$MSE_i = \sum_{j=1}^n MSE_{ij} \quad , \quad j = 1, \dots, n \quad (2)$$

در این رابطه MSE_i انرژی کرنشی مودال کل مود i ام و n تعداد اعضای سازه می‌باشد. با تقسیم MSE_{ij} بر MSE_i ، انرژی کرنشی مودال نرمال شده عضو j در مود i به دست می‌آید:

$$NMSE_{ij} = \frac{MSE_{ij}}{MSE_i} \quad , \quad j = 1, \dots, n \quad (3)$$

که $NMSE_{ij}$ انرژی کرنشی مودال نرمال شده عضو j در مود i است. جهت تشخیص محل آسیب به روش انرژی کرنشی مودال، شاخص آسیبی به صورت اختلاف انرژی کرنشی مودال اعضا در دو حالت سالم ($NMSE_{ij}^u$) و آسیب دیده ($NMSE_{ij}^d$) تعریف می‌شود. این شاخص برای عضو j در مود i از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$MSEBI_{ij} = \max \left[0, \frac{NMSE_{ij}^d - NMSE_{ij}^u}{NMSE_{ij}^u} \right] \quad (4)$$

که در این رابطه $MSEBI_{ij}$ شاخص آسیب‌دیدگی عضو j در مود i است. شاخص آسیب‌دیدگی برای اعضای سالم عدد صفر و برای اعضای آسیب‌دیده عددی بزرگ‌تر از صفر را نشان می‌دهد. از آنجایی که در عمل ماتریس سختی سازه آسیب‌دیده موجود نیست، برای تعیین انرژی کرنشی مودال هر عضو در حالت آسیب‌دیده از ماتریس سختی آن عضو در حالت سالم استفاده می‌شود [۲۱]. هر چه شاخص آسیب‌دیدگی عضوی بزرگ‌تر باشد، احتمال آسیب‌دیده بودن آن عضو نیز بیشتر است. با توجه به این که آسیب‌دیدگی یک عضو بر روی انرژی کرنشی اعضای دیگر نیز اثر می‌گذارد، ممکن است شاخص آسیب برای تعدادی از اعضای سالم نیز عددی بزرگ‌تر از صفر را نشان دهد.

در روش کلاسیک انرژی کرنشی مودال برای تشخیص آسیب معمولاً از شاخص انرژی کرنشی مودال میانگین چند شکل مود اول به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$MSEBI_j = \max \left[0, \frac{\sum_{i=1}^{nm} NMSE_{ij}^d - \sum_{i=1}^{nm} NMSE_{ij}^u}{\sum_{i=1}^{nm} NMSE_{ij}^u} \right] \quad , \quad i = 1, \dots, nm \quad (5)$$

که در آن $MSEBI_j$ شاخص انرژی کرنشی مودال کلاسیک برای عضو j است که از nm مود اول برای تعیین آن استفاده شده است.

۳- روش بیز برای تشخیص محل آسیب

۳-۱- تئوری روش بیز

تئوری بیز یکی از تکنیک‌های ترکیب اطلاعات است که می‌تواند اطلاعات به‌دست‌آمده از منابع اطلاعاتی مختلف را ترکیب کند، تا دقت نتایج نسبت به حالتی که تنها از یک منبع اطلاعاتی استفاده می‌شود افزایش یابد [۱۶]. دو منبع اطلاعاتی S_1 و S_2 شامل n شیء یا گزاره با نام‌های A_1, A_2, \dots, A_n را در نظر بگیرید. در ترکیب اطلاعات به روش تئوری بیز، احتمال قبلی هر شیء به صورت $P(A_i)$ است. احتمال شرطی هر گزاره A_i که همان $P(S_1, S_2 | A_i)$ می‌باشد نیز معلوم است. بر اساس تئوری بیز ترکیب اطلاعات با استفاده از رابطه زیر قابل انجام است:

$$P(A_i | S_1, S_2) = \frac{P(S_1, S_2 | A_i) P(A_i)}{\sum_{j=1}^n P(S_1, S_2 | A_j) P(A_j)} \quad (۶)$$

زمانی که تصمیمات منابع اطلاعاتی نسبت به هم مستقل باشند رابطه بالا به صورت زیر قابل بیان است:

$$P(A_i | S_1, S_2) = \frac{P(S_1 | A_i) P(S_2 | A_i) P(A_i)}{\sum_{j=1}^{NE} P(S_1 | A_j) P(S_2 | A_j) P(A_j)} \quad (۷)$$

در صورت وجود L منبع اطلاعاتی مستقل ترکیب بیزی به صورت رابطه زیر قابل انجام است:

$$P(A_i | S_1, S_2, \dots, S_L) = \frac{\prod_{k=1}^L P(S_k | A_i) P(A_i)}{\sum_{j=1}^{NE} \prod_{k=1}^L P(S_k | A_j) P(A_j)} \quad (۸)$$

۳-۲- کاربرد تئوری بیز در تشخیص محل آسیب

روش انرژی کرنشی مودال از اطلاعات مودال سازه برای تعیین محل آسیب در سازه‌ها استفاده می‌کند. در سازه‌های با درجات آزادی بالا و یا اعضای زیاد، روش انرژی کرنشی مودال تعداد زیادی از اعضای سالم را نیز آسیب‌دیده معرفی می‌کند. برای کاهش تعداد اعضای سالمی که در روش انرژی کرنشی مودال به‌عنوان عضو آسیب‌دیده معرفی می‌شوند می‌توان از ترکیب اطلاعات به روش تئوری بیز استفاده نمود.

فرض کنید S_1 و S_2 دو منبع اطلاعاتی باشند که اعضای آن‌ها به ترتیب شاخص انرژی کرنشی مودال به‌دست‌آمده از مودهای اول و دوم را نشان می‌دهند.

$$\begin{aligned} S_1 &= \{MSEBI_{11}, MSEBI_{12}, \dots, MSEBI_{1j}\} \\ S_2 &= \{MSEBI_{21}, MSEBI_{22}, \dots, MSEBI_{2j}\} \end{aligned} \quad , \quad j = 1, \dots, n \quad (9)$$

با توجه به این که ترکیب به روش تئوری بیز بر روی داده‌های دارای توزیع احتمال انجام می‌شود با تقسیم شاخص انرژی کرنشی مودال هر عضو در مود i بر مجموع شاخص انرژی کرنشی تمام اعضا در مود i احتمال آسیب‌دیدگی اعضا در هر مود تعیین می‌شود:

$$\begin{aligned} P_1(A_i) &= \frac{MSEBI_{1j}}{\sum_{j=1}^n MSEBI_{1j}} \\ P_2(A_i) &= \frac{MSEBI_{2j}}{\sum_{j=1}^n MSEBI_{2j}} \end{aligned} \quad , \quad j = 1, \dots, n \quad (10)$$

$P_1(A_i)$ و $P_2(A_i)$ به ترتیب احتمال آسیب‌دیدگی عضو A_i به دست‌آمده از منبع اطلاعاتی اول و دوم هستند. پس از تعیین احتمال آسیب‌دیدگی اعضا که از شاخص‌های انرژی کرنشی مودال تعیین شده است، می‌توان با ترکیب احتمال آسیب‌دیدگی به دست‌آمده از مود اول و مود دوم به روش تئوری بیز، احتمال آسیب‌دیدگی ترکیبی اعضا را تعیین نمود:

$$P(A_i|S_1, S_2) = \frac{P(S_1|A_i)P(S_2|A_i)P(A_i)}{\sum_{j=1}^{NE} P(S_1|A_j)P(S_2|A_j)P(A_j)} \quad (11)$$

احتمال آسیب‌دیدگی عضو A_i است که از ترکیب اطلاعات به دست‌آمده از منبع اطلاعاتی S_1 و S_2 به دست‌آمده است. $P(S_1|A_i)$ و $P(S_2|A_i)$ همان $P_1(A_i)$ و $P_2(A_i)$ هستند. احتمال آسیب‌دیدگی قبلی عضو A_i است که به صورت زیر فرض می‌شود:

$$P(A_i) = \frac{1}{m} \quad , \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (12)$$

که در این رابطه m تعداد اعضای سازه است. در صورتی که نیاز به ترکیب اطلاعات بیشتری باشد می‌توان اطلاعات به دست‌آمده از مود اول، دوم و سوم را با استفاده از رابطه (۸) ترکیب کرد. ترکیب اطلاعات تا رسیدن به جواب مطلوب می‌تواند ادامه پیدا کند. پس از اتمام مرحله ترکیب اطلاعات، اعضای دارای بیشترین احتمال آسیب‌دیدگی به عنوان اعضای آسیب‌دیده در نظر گرفته می‌شوند.

۴- تعیین شدت آسیب

بعد از تشخیص محل آسیب به کمک روش انرژی کرنشی مودال و ترکیب بیز، باید شدت آسیب برای اعضای آسیب دیده تعیین شود. معمولاً آسیب در سازه‌ها به صورت کاهش در سختی اعضای آسیب دیده در نظر گرفته می‌شود. در اینجا آسیب به صورت کاهش مدول الاستیسیته در نظر گرفته شده است.

$$E_j^d = (1 - \alpha_j) E_j^u \quad (13)$$

که در آن E_j^u مدول یانگ عضو j ام در حالت سالم، E_j^d مدول یانگ عضو j ام در حالت آسیب دیده و α_j درصد کاهش مدول یانگ عضو j ام است. در این مرحله شدت آسیب دیدگی برای اعضای که در مرحله اول آسیب دیده تشخیص داده شدند محاسبه می‌شود. تعیین شدت آسیب دیدگی اعضا با استفاده از بهینه‌سازی قابل انجام است. تابع هدف در نظر گرفته شده در این مقاله مستخرج از اطلاعات فرکانس طبیعی به صورت زیر می‌باشد:

$$F(x) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_i^m - f_i^c(x)}{f_i^m} \right)^2 \quad (14)$$

که در آن $f_i^c(x)$ و $f_i^m(x)$ به ترتیب i امین فرکانس اندازه‌گیری شده و محاسباتی می‌باشند و n تعداد فرکانس‌های در نظر گرفته شده است.

۴-۱- الگوریتم بهینه یابی سیستم ذرات باردار (CSS)

الگوریتم بهینه یابی سیستم ذرات باردار یک الگوریتم بهینه یابی فراکاوشی مبتنی بر جمعیت است که توسط کاوه و طلعت اهری در سال ۲۰۱۰ معرفی شد [۱۷]. این الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر قوانین فیزیک الکترواستاتیک و مکانیک نیوتونی است. مانند تمامی الگوریتم‌های بهینه یابی در این الگوریتم نیز جمعیت اولیه‌ای به صورت تصادفی در فضای مسئله ایجاد می‌شود. سپس تابع هدف برای هر کدام از این جمعیت‌های اولیه تعیین می‌شود. به هر جمعیت اولیه بر اساس مقدار تابع هدف آن و قوانین فیزیک الکترواستاتیک، بار الکتریکی اختصاص می‌یابد. جمعیت اولیه که حالا ذرات باردار هستند بر اساس قوانین فیزیک الکترواستاتیک به هم نیرو وارد می‌کنند. این نیرو منجر به ایجاد شتاب در ذرات می‌شود و ذرات بهینه‌تر سایر ذرات را به سمت خود می‌کشند. حرکت ذرات به سمت ذرات بهینه‌تر با استفاده از قوانین مکانیک نیوتونی است. در پایان این مرحله جمعیت اولیه ذرات آرایش جدیدی به خود می‌گیرند. فرآیند تعیین تابع هدف و مقدار بار ذرات و حرکت آن‌ها به سمت ذره بهینه تا رسیدن به معیار خاتمه الگوریتم ادامه می‌یابد.

• شروع

برای شروع کار الگوریتم بهینه یابی سیستم ذرات باردار یک بردار از ذرات باردار با موقعیت رندم و سرعت صفر ایجاد می‌شود. مقدار تابع هدف برای هر کدام از این ذرات تعیین می‌شود. برای هر ذره یک بار الکتریکی که به مقدار تابع هدف آن وابسته است اختصاص داده می‌شود:

$$q_i = \frac{fit(i) - fit_{worst}}{fit_{best} - fit_{worst}} \quad (15)$$

که در آن fit_{best} و fit_{worst} به ترتیب بهترین و بدترین توابع هدف در بین کل ذرات هستند. $fit(i)$ تابع هدف ذره i ام و q_i مقدار بار ذره i ام است. فاصله هر ذره مثل i از ذره j با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$r_{ij} = \frac{X_i - X_j}{\frac{X_i + X_j}{2} - X_{best} + \varepsilon} \quad (16)$$

که در آن X_i و X_j به ترتیب موقعیت ذرات i و j هستند. X_{best} موقعیت بهترین ذره و r_{ij} فاصله بین ذرات i و j را نشان می‌دهد. ε یک مقدار مثبت کوچک برای جلوگیری از تکینگی است. در این مرحله تمامی ذرات بر اساس مقدار تابع هدف و به صورت صعودی مرتب می‌شوند. با در نظر گرفتن یک فضا برای حافظه چند ذره باردار اول که دارای تابع هدف کمتری هستند در این حافظه ذخیره‌سازی می‌شوند.

• جستجو

در این مرحله بردار نیروی جذب‌کننده هر ذره با استفاده از قوانین الکترواستاتیک به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F_j = q_i \sum_{i, i \neq j} \left(\frac{q_i}{a^3} \cdot i_1 + \frac{q_i}{r_{ij}^2} \cdot i_2 \right) P_{ij} (X_i - X_j) \quad , \quad \begin{aligned} i_1 = 0, i_2 = 1 &\Leftrightarrow r_{ij} < a \\ i_1 = 1, i_2 = 0 &\Leftrightarrow r_{ij} \geq a \end{aligned} \quad (17)$$

a شعاع هر ذره باردار و F_j نیروی وارد بر ذره j ام می‌باشد. P_{ij} احتمال حرکت هر ذره به سمت ذره دیگر می‌باشد که با استفاده از تابع احتمالاتی زیر تعیین می‌شود:

$$P_{ij} = \begin{cases} 1 & \Leftrightarrow fit(j) > fit(i) \quad \vee \quad \frac{fit(i) > fit_{best}}{fit(j) > fit(i)} > rand \\ 0 & \Leftrightarrow else \end{cases} \quad (18)$$

که در آن $rand$ یک عدد تصادفی بین صفر و یک است. بعد از تعیین نیروی اعمال‌شده به هر ذره موقعیت و سرعت جدید هر ذره با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$X_{j,new} = rand_{j1} \cdot k_a \cdot \frac{F_j}{m_j} \cdot \Delta t^2 + rand_{j2} \cdot k_v \cdot V_{j,old} \cdot \Delta t + X_{j,old} \quad (19)$$

$$V_{j,new} = \frac{X_{j,new} - X_{j,old}}{\Delta t}$$

$rand_{j1}$ و $rand_{j2}$ دو عدد رندم با توزیع یکنواخت بین صفر و یک هستند. m_j جرم ذره j ام است که در این مقاله برابر با یک در نظر گرفته شده است. Δt فاصله زمانی است که در این مقاله یک در نظر گرفته شده است. k_a ضریب شتاب و k_v ضریب سرعت است که با استفاده از روابط زیر تعیین می‌شوند:

$$k_a = 0.5 \left(1 + \frac{iter}{iter_{max}} \right)$$

$$k_v = 0.5 \left(1 - \frac{iter}{iter_{max}} \right) \quad (19)$$

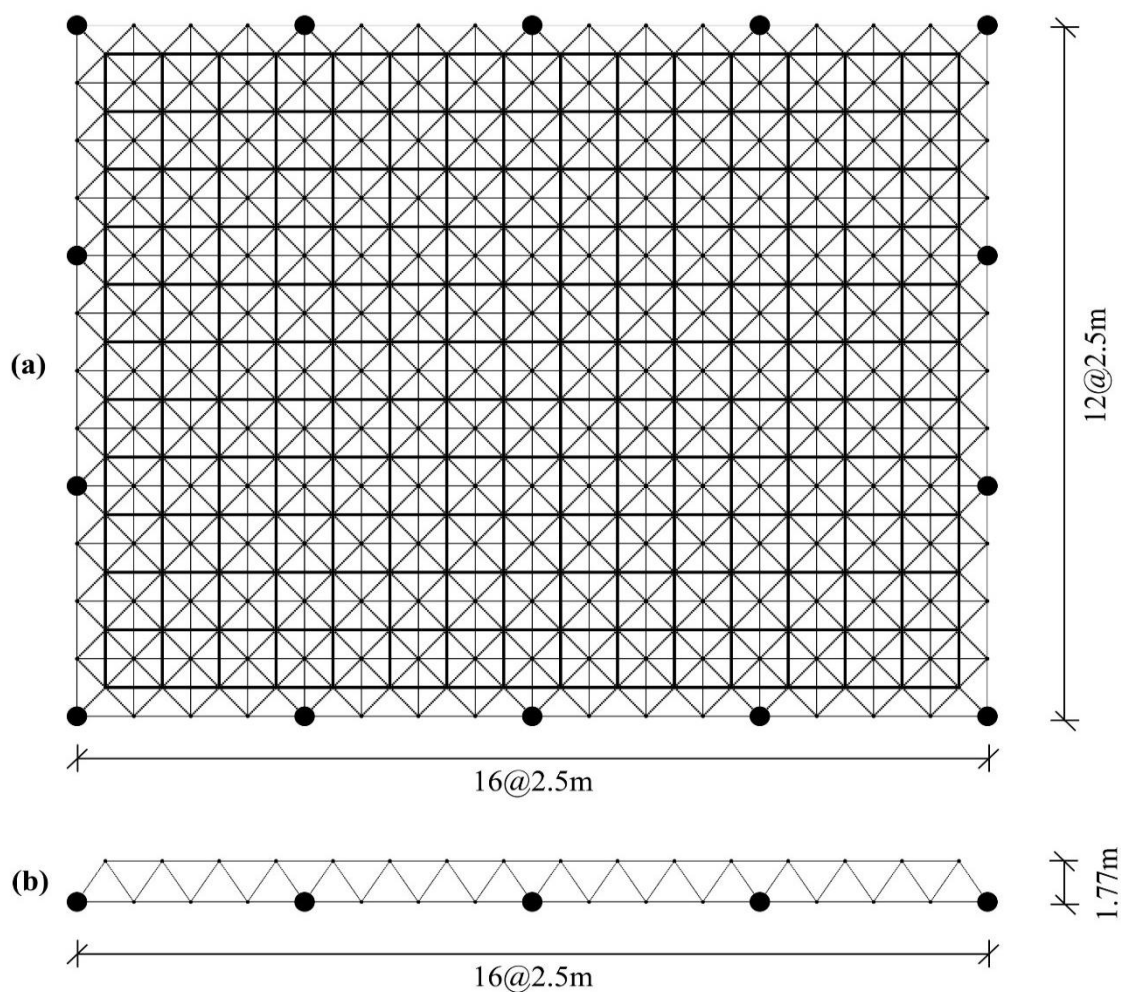
که در آن $iter$ شماره تکرار و $iter_{max}$ حداکثر تکرار الگوریتم است. در پایان هر مرحله جست‌وجو بار دیگر ذرات باردار به صورت صعودی مرتب می‌شوند و حافظه ذخیره‌سازی بهترین ذرات آپدیت می‌شود. عملیات جست‌وجو تا زمان رسیدن الگوریتم بهینه یابی به معیار خاتمه الگوریتم ادامه می‌یابد.

۲-۴- پارامترهای بهینه یابی و تعیین شدت آسیب

در این مقاله از روش بهینه یابی سیستم ذرات باردار برای تعیین شدت آسیب استفاده شده است. برای تشکیل تابع هدف مطابق با رابطه شماره ۱۴ از پنج فرکانس طبیعی اول سازه استفاده شد. در فرآیند بهینه یابی شعاع هر ذره باردار برابر با ۱ و تعداد تکرار الگوریتم ۵۰۰ در نظر گرفته شد. با توجه به این که هدف از بهینه یابی تعیین شدت آسیب می‌باشد، متغیرهای بهینه یابی شدت آسیب اعضا هستند که در این مقاله محدوده این متغیرها بین ۰ تا ۵۰ در نظر گرفته شده است.

۵- شبکه دولایه مورد مطالعه

یک شبکه دولایه با ۴۱۳ گره، ۱۵۳۶ عضو، ابعاد ۳۰ متر در ۴۰ متر و ارتفاع ۱/۷۷ متر در نظر گرفته شده است. پلان و نمای جانبی شبکه در شکل شماره ۱ نشان داده شده است.



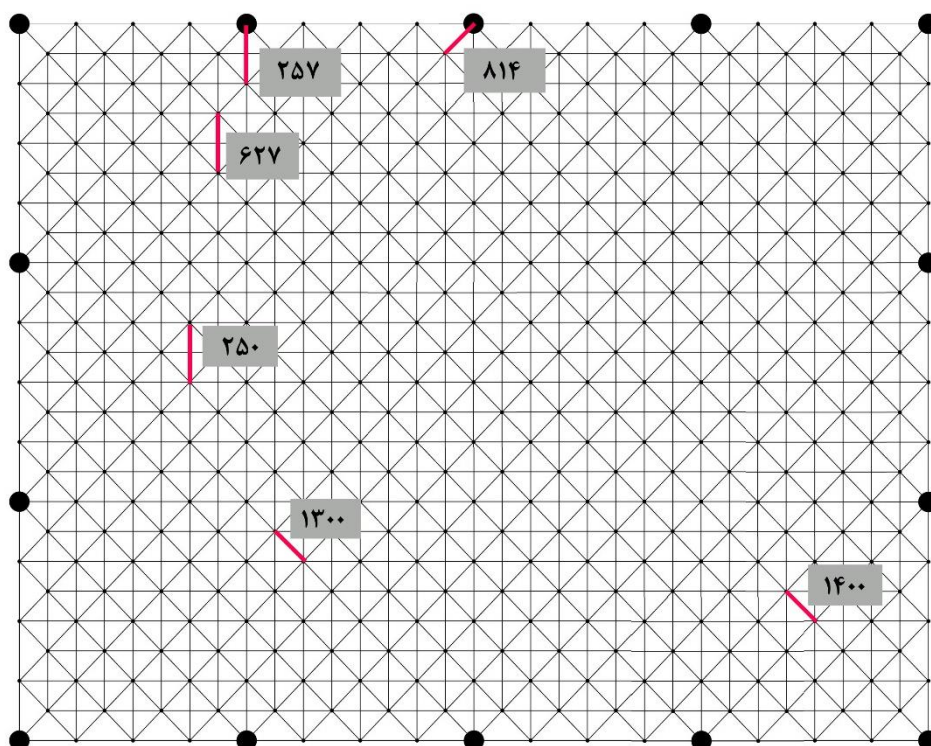
شکل ۱: شبکه دولایه مورد بررسی

در پلان اعضای لایه بالایی به صورت خطوط ضخیم، لایه میانی با خط چین و لایه پایینی به صورت خطوط باریک نشان داده شده است. هر عضو شبکه دارای $2/5$ متر طول و $0/04$ متر مربع سطح مقطع است. مدول الاستیسیته 200 گیگا پاسکال و چگالی جرمی مصالح 7850 کیلوگرم بر مترمکعب است. شبکه دارای 14 تکیه‌گاه در اطراف است که در شکل شماره 1 با نقاط توپر نمایش داده شده است. هر گره از شبکه دارای 3 درجه آزادی انتقالی است که در نقاط تکیه‌گاهی تمامی این درجات آزادی مهار شده‌اند. سه سناریوی آسیب‌دیدگی برای این شبکه دولایه مطابق جدول شماره 1 در نظر گرفته شده است.

جدول ۱: سناریوهای آسیب‌دیدگی

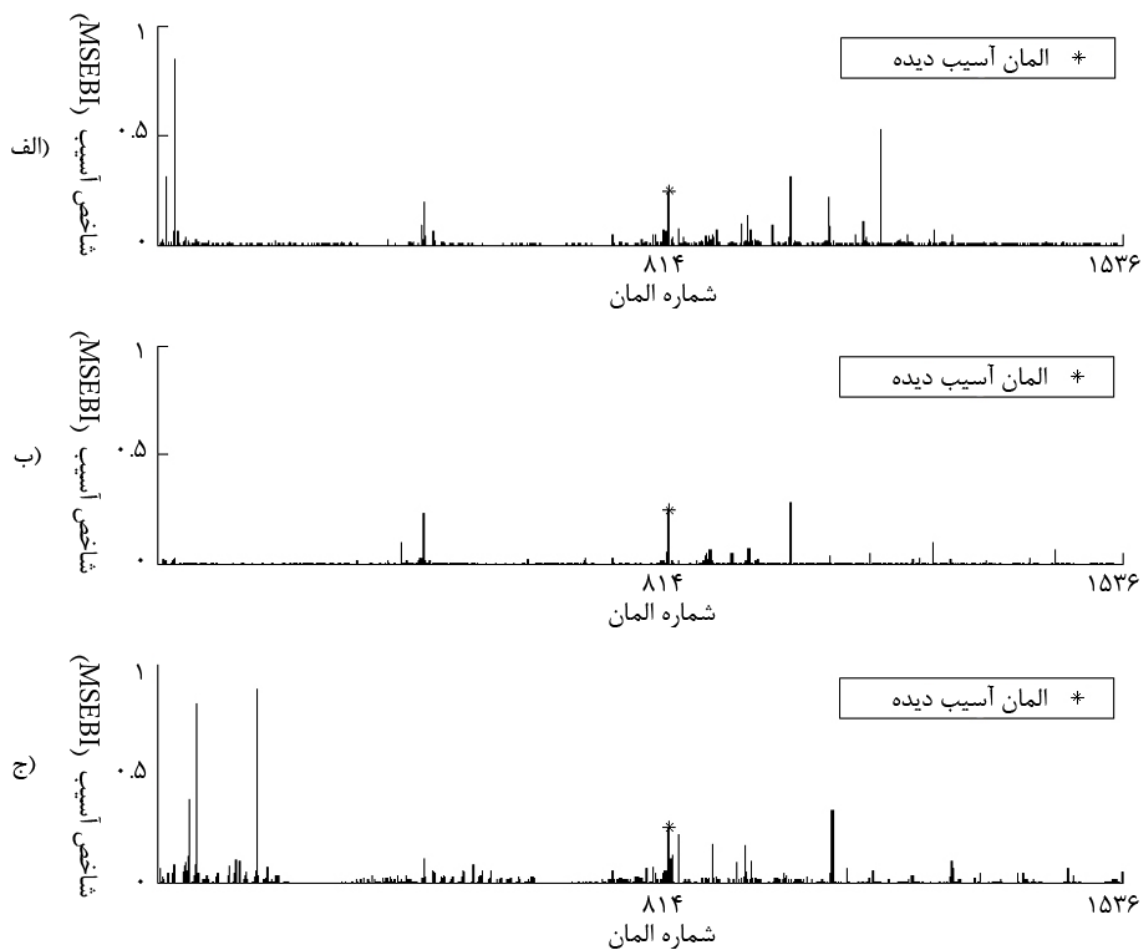
شماره سناریو	شماره اعضای آسیب‌دیده و درصد آسیب
۱	عضو 814 با شدت 15%
۲	عضو 250 با شدت 15% ، عضو 1300 با شدت 20%
۳	عضو 257 با شدت 20% ، عضو 627 با شدت 15% ، عضو 1400 با شدت 20%

شکل شماره 2 اعضای آسیب‌دیده در سناریوهای مختلف و محل قرارگیری آن‌ها را نشان می‌دهد.



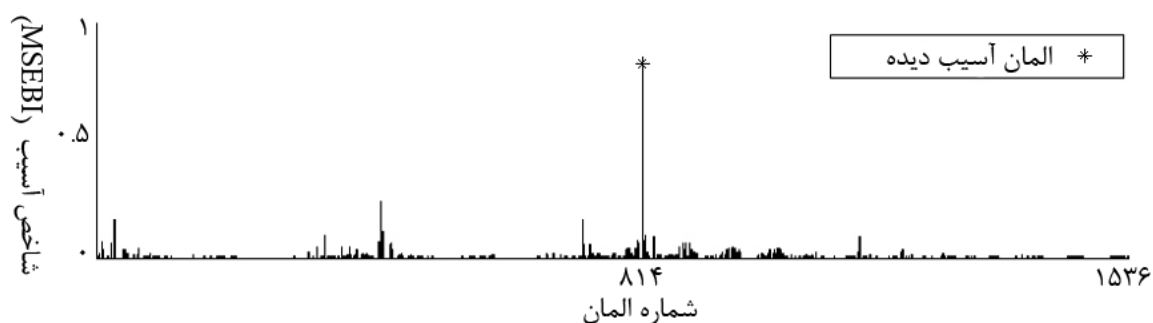
شکل ۲: محل و شماره اعضای آسیب دیده در شبکه دولایه

اولین سناریوی انتخاب شده، آسیب دیدگی عضو شماره ۸۱۴ با شدت ۱۵٪ است. این عضو مربوط به لایه پایینی شبکه می باشد. با توجه به اینکه آسیب منجر به تغییر انرژی کرنشی مودال اعضا در مودهای مختلف می شود، مطابق با رابطه شماره ۴ برای هر شکل مود یک شاخص آسیب قابل محاسبه است. شکل شماره ۳ (الف تا ج) به ترتیب نمودار شاخص آسیب دیدگی اعضای شبکه به دست آمده از مودهای ۱ تا ۳ را برای سناریوی آسیب شماره ۱ نشان می دهد.



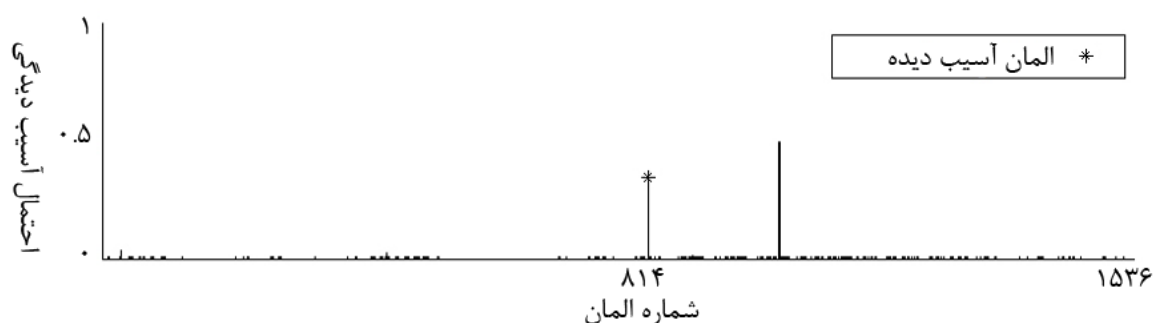
شکل ۳: شاخص‌های آسیب به دست آمده از یک شکل مود برای سناریو آسیب شماره ۱ (الف- شکل مود ۱. ب- شکل مود ۲. ج- شکل مود ۳)

همان‌طور که از شکل شماره ۳ مشخص است، استفاده از یک شکل مود به‌تنهایی عضو آسیب‌دیده را نشان می‌دهد اما تعداد زیادی از اعضای سالم را نیز به‌عنوان عضو آسیب‌دیده معرفی می‌کند. بنابراین استفاده از یک شکل مود به‌تنهایی برای تشخیص اعضای آسیب‌دیده به کمک روش انرژی کرنشی مودال کافی نمی‌باشد. شاخص انرژی کرنشی می‌تواند با در نظر گرفتن چند شکل مود اول و به کمک رابطه شماره ۵ محاسبه شود. شکل شماره ۴ شاخص آسیب به دست آمده از روش انرژی کرنشی مودال برای سناریوی شماره ۱ را نشان می‌دهد که برای محاسبه آن از اثر سه شکل مود اول استفاده شده است.



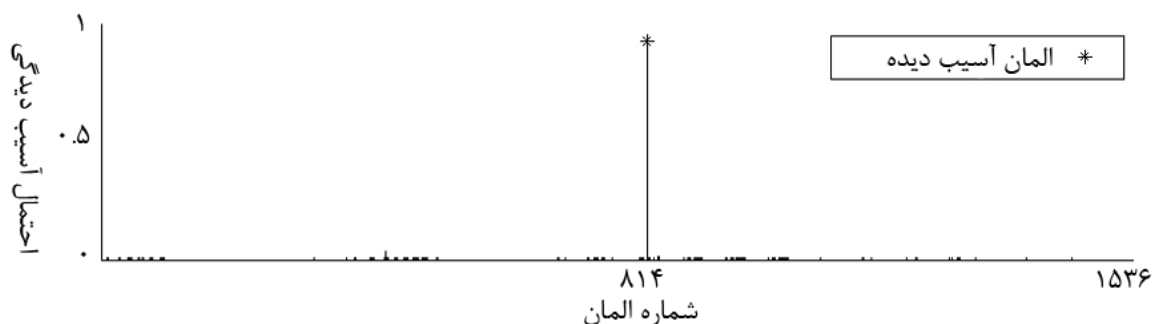
شکل ۴: شاخص آسیب به دست آمده از روش انرژی کرنشی مودال با در نظر گرفتن اثر ۳ شکل مود اول برای سناریو آسیب شماره ۱

همان طور که در شکل شماره ۴ نشان داده شده است شاخص آسیب مبتنی بر انرژی کرنشی مودال که از اثر سه شکل مود اول برای محاسبه آن استفاده شده است، نتایج به مراتب بهتری از شاخصی که از اثر تنها یک مود در محاسبه آن استفاده شده است ارائه می دهد. با این وجود همچنان برخی از اعضای سالم شاخص آسیب قابل ملاحظه دارند که منجر به تشخیص اشتباه می شود. برای رسیدن به نتایج بهتر می توان شاخص های آسیب به دست آمده از مودهای مختلف را به کمک تئوری بیز با هم ترکیب نمود. شکل شماره ۵ احتمال آسیب دیدگی اعضای شبکه دولایه برای سناریوی آسیب شماره ۱ را نشان می دهد که از ترکیب نتایج به دست آمده از روش انرژی کرنشی مودال برای مودهای اول و دوم به کمک تئوری بیز به دست آمده است.



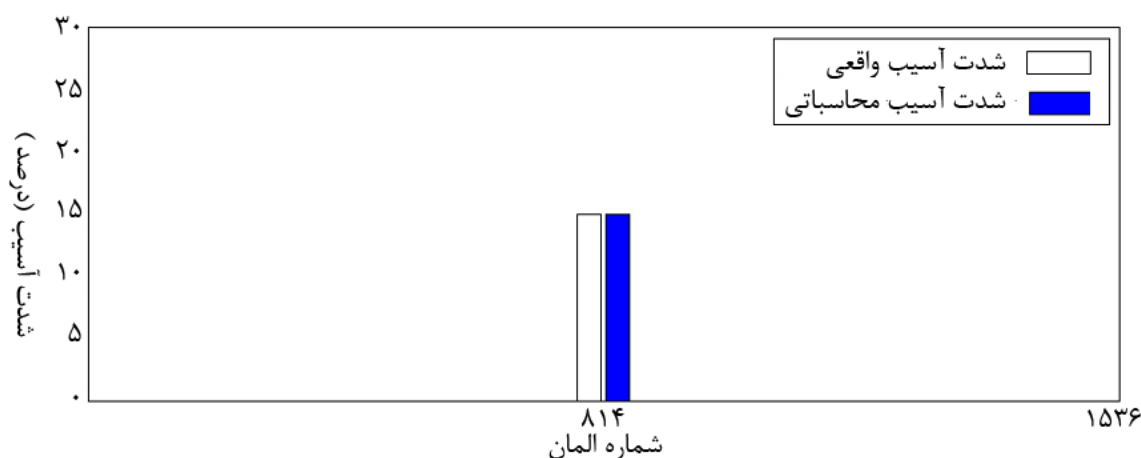
شکل ۵: احتمال آسیب دیدگی اعضا از ترکیب شاخص های آسیب به دست آمده از شکل مودهای اول و دوم به کمک تئوری بیز برای سناریو آسیب شماره ۱

برای بهبود نتایج می توان شاخص های آسیب به دست آمده از شکل مودهای اول، دوم و سوم را با هم ترکیب نمود. شکل شماره ۶ احتمال آسیب دیدگی اعضای شبکه دولایه برای سناریوی آسیب شماره ۱ را نشان می دهد که از ترکیب نتایج به دست آمده از روش انرژی کرنشی مودال برای مودهای اول، دوم و سوم به کمک تئوری بیز به دست آمده است.



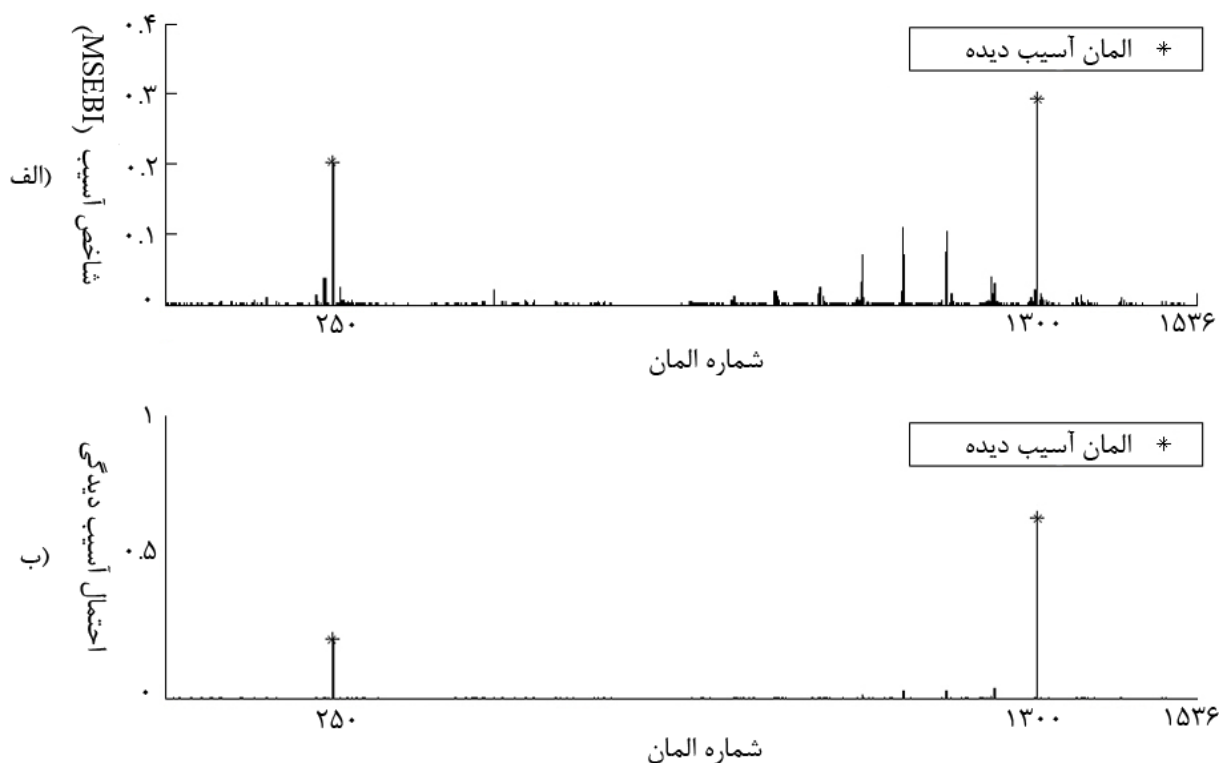
شکل ۶: احتمال آسیب دیدگی اعضا از ترکیب شاخص های آسیب به دست آمده از شکل مودهای اول، دوم و سوم به کمک تئوری بیز برای سناریو آسیب شماره ۱

همان طور که از شکل شماره ۶ مشخص است ترکیب اطلاعات به دست آمده از شکل مود اول، دوم و سوم به کمک تئوری بیز عضو ۸۱۴ را به عنوان عضو آسیب دیده معرفی می کند و هیچ عضو دیگری احتمال آسیب دیدگی قابل توجهی ندارد. از نظر کمی نیز نتایج حاصل از ترکیب اطلاعات به روش تئوری بیز احتمال آسیب دیدگی هستند و مجموع این احتمالات آسیب دیدگی برابر با ۱ می باشد. در سناریو شماره ۱ بعد از ترکیب اطلاعات حاصل از ۳ شکل مود به کمک تئوری بیز احتمال آسیب دیدگی عضو شماره ۸۱۴ برابر با $96/46\%$ به دست آمده است و جمع احتمال آسیب دیدگی ۱۵۳۵ عضو دیگر برابر با $3/54\%$ می باشد که عددی کوچک و قابل صرف نظر کردن است، بنابراین نیاز به ترکیب بیشتر نمی باشد. در ادامه به کمک روش بهینه یابی سیستم ذرات باردار درصد آسیب دیدگی عضو ۸۱۴ که به عنوان عضو آسیب دیده شناسایی شده بود، تعیین شد. برای تعیین درصد آسیب دیدگی از روش بهینه یابی سیستم ذرات باردار استفاده شد و درصد آسیب دیدگی عضو شماره ۸۱۴ به عنوان متغیر بهینه یابی در نظر گرفته شد شکل شماره ۷ درصد آسیب دیدگی عضو شماره ۸۱۴ را نشان می دهد که به کمک روش بهینه یابی سیستم ذرات باردار تعیین شده است.



شکل ۷: شدت آسیب به دست آمده از روش بهینه یابی سیستم ذرات باردار برای سناریوی آسیب شماره ۱

همان طور که از شکل شماره ۷ مشخص است روش بهینه یابی سیستم ذرات توانست به صورت دقیق درصد آسیب عضو شماره ۱۴ را تعیین کند. در سناریوی آسیب دیدگی شماره ۲، آسیب دیدگی هم زمان دو عضو از شبکه دولایه بررسی شده است. در این سناریو اعضای شماره ۲۵۰ و ۱۳۰۰ به ترتیب با درصد آسیب دیدگی 15% و 20% در نظر گرفته شدند. در این سناریو نیز ابتدا از چند شکل مود اول به تنهایی برای تعیین شاخص انرژی کرنشی مودال استفاده شد که به مانند سناریوی آسیب شماره ۱ جوابها قابل قبول نبودند و تعدادی از اعضای سالم نیز به عنوان عضو آسیب دیده معرفی می شدند. در ادامه شاخص انرژی کرنشی با استفاده از میانگین ۳ شکل مود اول و سپس احتمال آسیب دیدگی با ترکیب شاخص های انرژی کرنشی مودال مربوط به شکل مود اول، دوم و سوم به کمک روش ترکیب بیز به دست آمد. شاخص انرژی کرنشی مودال با در نظر گرفتن اثر ۳ شکل مود اول و احتمال آسیب دیدگی اعضا به دست آمده از ترکیب شاخص های انرژی کرنشی مودال ۳ شکل مود اول برای سناریوی آسیب دیدگی شماره ۲ در شکل شماره ۸ نشان داده شده است.



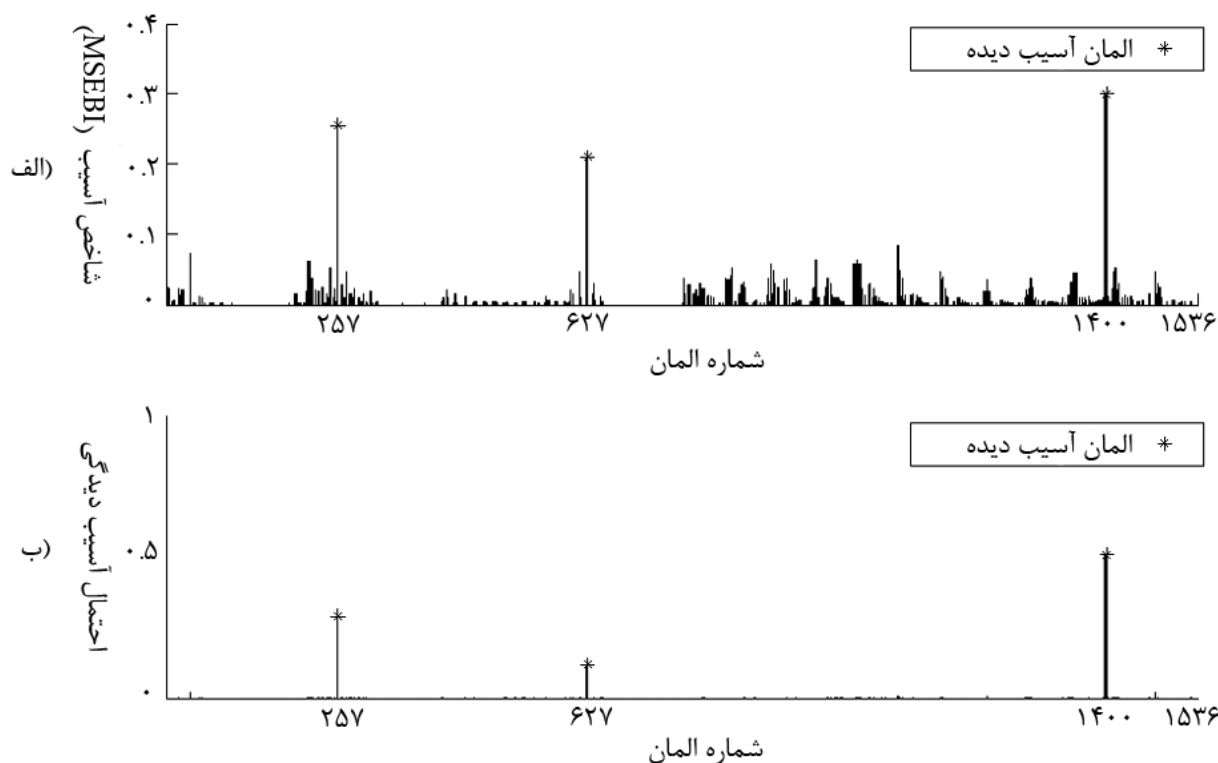
شکل ۸-الف: شاخص آسیب به دست آمده از روش انرژی کرنشی مودال با در نظر گرفتن اثر ۳ شکل مود اول برای سناریو آسیب شماره ۲. ب: احتمال آسیب دیدگی اعضا به دست آمده از ترکیب شاخص های آسیب شکل مودهای اول، دوم و سوم به کمک روش ترکیب بیز برای سناریو آسیب شماره ۲

همان طور که از شکل شماره ۸-الف مشخص است شاخص آسیب مبتنی بر روش انرژی کرنشی مودال که با در نظر گرفتن اثر ۳ شکل مود اول در نظر گرفته شده است اعضای آسیب دیده را به خوبی نشان می دهد اما تعدادی از اعضای سالم را نیز به عنوان عضو آسیب دیده معرفی می کند. شکل شماره ۸-ب نشان می دهد در صورت محاسبه شاخص انرژی کرنشی مودال با استفاده از شکل مود اول، دوم و سوم به صورت مجزا و سپس ترکیب این شاخص ها به روش ترکیب بیز اعضای آسیب دیده به خوبی تشخیص داده شدند و هیچ عضو سالمی نیز احتمال آسیب دیدگی قابل توجهی ندارد. از نظر کمی نیز مجموع احتمال آسیب دیدگی اعضای ۲۵۰ و ۱۳۰۰ برابر با ۹۱/۷۴٪ می باشد و مجموع احتمال آسیب دیدگی ۱۵۳۴ عضو دیگر ۸/۲۶٪ می باشد که عددی کوچک و قابل صرف نظر کردن است. در ادامه و برای تعیین شدت آسیب برای اعضای ۲۵۰ و ۱۳۰۰ که به عنوان اعضای آسیب دیده تشخیص داده شدند، درصد آسیب دیدگی این دو عضو به عنوان متغیر بهینه یابی در نظر گرفته شد و به کمک روش بهینه یابی سیستم ذرات باردار شدت آسیب این اعضا تعیین شد. شکل شماره ۹ درصد آسیب دیدگی اعضای ۲۵۰ و ۱۳۰۰ را که به کمک بهینه یابی به روش سیستم ذرات باردار تعیین شدند را نشان می دهد.



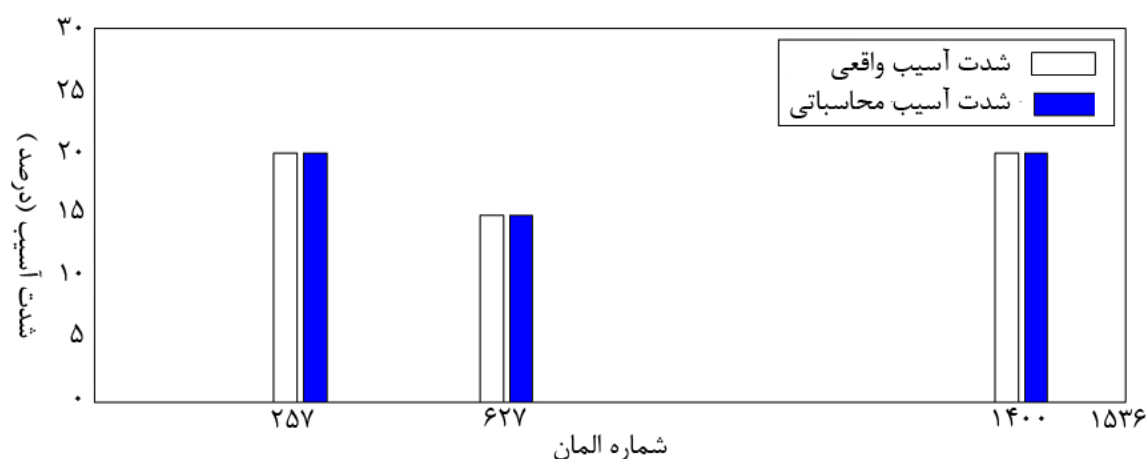
شکل ۹: شدت آسیب به دست آمده از روش بهینه یابی سیستم ذرات باردار برای سناریوی آسیب شماره ۲

همان طور که از شکل شماره ۹ مشخص است روش بهینه یابی سیستم ذرات توانست به صورت دقیق درصد آسیب اعضای آسیب دیده در سناریو آسیب شماره ۲ را تعیین کند. در آخرین سناریوی آسیب دیدگی، آسیب دیدگی همزمان سه عضو از شبکه دولایه بررسی شده است. در این سناریو اعضای شماره ۲۵۷، ۶۲۷ و ۱۴۰۰ به ترتیب با درصد آسیب دیدگی ۲۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ در نظر گرفته شدند. در این سناریو نیز تعیین شاخص آسیب مبتنی بر انرژی کرنشی مودال با استفاده از یک شکل مود برای تعیین اعضای آسیب دیده نتایج خوبی نداشت و تعدادی از اعضای سالم نیز به عنوان عضو آسیب دیده معرفی شدند. شاخص انرژی کرنشی با استفاده از میانگین ۴ شکل مود اول و سپس احتمال آسیب دیدگی با ترکیب شاخص های انرژی کرنشی مودال مربوط به شکل مود اول، دوم، سوم و چهارم به کمک روش ترکیب بیز به دست آمد. شاخص انرژی کرنشی مودال با در نظر گرفتن اثر ۴ شکل مود اول و احتمال آسیب دیدگی اعضا به دست آمده از ترکیب شاخص های انرژی کرنشی مودال ۴ شکل مود اول برای سناریوی آسیب دیدگی شماره ۳ در شکل شماره ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰- الف : شاخص آسیب به دست آمده از روش انرژی کرنشی مودال با در نظر گرفتن اثر ۴ شکل مود اول برای سناریو آسیب شماره ۳. ب : احتمال آسیب دیدگی اعضا به دست آمده از ترکیب شاخص های آسیب شکل مودهای اول، دوم، سوم و چهارم به کمک روش ترکیب بیز برای سناریو آسیب شماره ۳

همان طور که از شکل شماره ۱۰-الف مشخص است شاخص آسیب مبتنی بر روش انرژی کرنشی مودال که با در نظر گرفتن اثر ۴ شکل مود اول در نظر گرفته شده است اعضای آسیب دیده را به خوبی نشان می دهد اما تعدادی از اعضای سالم را نیز به عنوان عضو آسیب دیده معرفی می کند. شکل شماره ۱۰-ب نشان می دهد در صورت محاسبه شاخص انرژی کرنشی مودال با استفاده از شکل مود اول، دوم، سوم و چهارم به صورت مجزا و سپس ترکیب این شاخص ها به روش ترکیب بیز اعضای آسیب دیده به خوبی تشخیص داده شدند و هیچ عضو سالمی نیز احتمال آسیب دیدگی قابل توجهی ندارد. از نظر کمی نیز مجموع احتمال آسیب دیدگی اعضای شماره ۲۵۷، ۶۲۷ و ۱۴۰۰ برابر با ۹۳/۲۱٪ و مجموع احتمال آسیب دیدگی سایر ۱۵۳۳ عضو برابر ۶/۷۹٪ می باشد که قابل صرف نظر کردن است. در ادامه و برای تعیین شدت آسیب برای اعضای ۲۵۷، ۶۲۷ و ۱۴۰۰ که به عنوان اعضای آسیب دیده تشخیص داده شدند، درصد آسیب دیدگی این سه عضو به عنوان متغیر بهینه یابی در نظر گرفته شد و به کمک روش بهینه یابی سیستم ذرات باردار شدت آسیب این اعضا تعیین شد. شکل شماره ۱۱ درصد آسیب دیدگی اعضای ۲۵۷، ۶۲۷ و ۱۴۰۰ را که به کمک بهینه یابی به روش سیستم ذرات باردار تعیین شدند را نشان می دهد.



شکل ۱۰: شدت آسیب به دست آمده از روش بهینه یابی سیستم ذرات باردار برای سناریوی آسیب شماره ۳

همان طور که از شکل شماره ۱۱ نیز مشخص است روش بهینه یابی سیستم ذرات باردار برای این سناریو نیز به صورت دقیق شدت آسیب دیدگی اعضای آسیب دیده را تعیین نمود.

۱۰- نتیجه گیری

در این مقاله یک روش دومرحله‌ای برای تعیین محل و شدت آسیب در شبکه‌های دولایه با تعداد اعضای زیاد و درجات آزادی بالا معرفی شد. یک شبکه دولایه با ۱۵۳۶ عضو و ۳ سناریوی آسیب دیدگی مختلف در نظر گرفته شد. ابتدا از اطلاعات یک شکل مود به تنهایی برای تعیین شاخص آسیب دیدگی به روش انرژی کرنشی مودال استفاده شد و مشخص شد استفاده از یک شکل مود نمی‌تواند به خوبی اعضای آسیب دیده را تعیین نماید و تعداد زیادی از اعضای سالم نیز به عنوان عضو آسیب دیده معرفی می‌شوند. در گام بعد از اثر سه شکل مود اول به صورت هم‌زمان برای تعیین شاخص آسیب مبتنی بر انرژی کرنشی مودال استفاده شد و مشخص شد استفاده از اثر سه شکل مود به صورت هم‌زمان موجب بهبود نتایج می‌شود اما هنوز تعدادی از اعضای سالم به عنوان عضو آسیب دیده معرفی می‌شوند.

ترکیب اطلاعات روشی است که برای ترکیب اطلاعات به دست آمده از منابع اطلاعاتی مختلف استفاده می‌شود تا نتایج نسبت به استفاده از تنها یک منبع اطلاعاتی بهبود یابند. در ادامه از روش ترکیب بیز برای ترکیب شاخص‌های آسیب دیدگی به دست آمده از هر شکل مود استفاده شد. شاخص‌های آسیب به دست آمده از هر شکل مود به عنوان منبع اطلاعاتی مستقل در نظر گرفته شد و نتایج آن‌ها با استفاده از تئوری بیز ترکیب شد تا موقعیت اعضای آسیب دیده با دقت بالاتری تعیین شود. در حالت‌های آسیب تکی و دوتایی از شاخص‌های آسیب بدست آمده از شکل مود اول، دوم و سوم در مرحله ترکیب اطلاعات استفاده گردید. در حالت آسیب دیدگی سه عضو به صورت هم‌زمان، با توجه به افزایش تعداد اعضای آسیب دیده شاخص‌های آسیب بدست آمده از شکل مودهای اول، دوم، سوم و چهارم برای ترکیب اطلاعات استفاده شدند. نتایج نشان داد استفاده از تئوری بیز و ترکیب اطلاعات موجب بهبود نتایج می‌شود و اعضای آسیب دیده به صورت دقیق قابل شناسایی هستند و هیچ عضو سالمی به عنوان عضو آسیب دیده معرفی نمی‌شود. در هر سه سناریوی بررسی شده مجموع احتمال آسیب دیدگی اعضای آسیب دیده بالای ۹۰٪ و مجموع احتمال آسیب دیدگی سایر اعضا که بالای ۱۵۰۰ عضو بودند کمتر از ۱۰٪ به دست آمد که قدرت این روش در تشخیص اعضای آسیب دیده را نشان می‌دهد.

پس از تعیین اعضای آسیب دیده در مرحله بعد با معرفی تابع هدفی تشکیل شده از پنج فرکانس طبیعی اول شبکه دولایه و به کمک روش بهینه یابی سیستم ذرات باردار، شدت آسیب دیدگی اعضای قبل به عنوان اعضای آسیب دیده تشخیص داده شده

بودند تعیین شد. نتایج نشان داد شدت آسیب اعضای آسیب دیده با استفاده از روش بهینه یابی سیستم ذرات باردار قابل تعیین است و تابع هدف معرفی شده برای بهینه یابی کارایی مناسبی در تشخیص شدت آسیب دارد.

مراجع

- [1] Arekar VA, Patil YD, Patil HS. Development of a new connector for double layer space grids. *Perspect. Sci.* [Internet]. 2016;8:525–528. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2213020916301495>.
- [2] Cawley P, Adams RD. The location of defects in structures from measurements of the natural frequencies. *J. Strain Anal.* 1979;2:49–57.
- [3] Salawu O. S. Detection of structural damage through changes in frequency: a review. *Eng. Struct.* 1997;19:718–723.
- [4] Ding ZH, Yao RZ, Huang JL, et al. Structural damage detection based on residual force vector and imperialist competitive algorithm. *Struct. Eng. Mech.* 2017;62:709–717.
- [5] Wei Z, Liu J, Lu Z. Structural damage detection using improved particle swarm optimization. *Inverse Probl. Sci. Eng.* 2017;1–19.
- [6] Pedram M, Esfandiari A, Khedmati MR. Frequency domain damage detection of plate and shell structures by finite element model updating. *Inverse Probl. Sci. Eng.* 2018;26.
- [7] Carrasco CJ, Osegueda RA, Ferregut CM, et al. Damage localization in a space truss model using modal strain energy. *Proc. 1997 15th Int. Modal Anal. Conf. Part 2 (of 2)*. 1997;2:1786–1792.
- [8] Shi ZY, Law SS, Zhang LM. Structural damage localization from modal strain energy change. *J. Sound Vib.* 1998;218:825–844.
- [9] Srinivas V, Ramanjaneyulu K, Jeyasehar CA. Multi-stage approach for structural damage identification using modal strain energy and evolutionary optimization techniques. *Struct. Heal. Monit. An Int. J.* [Internet]. 2011;10:219–230. Available from: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1475921710373291>.
- [10] Ma S-L, Jiang S-F, Weng L-Q. Two-Stage Damage Identification Based on Modal Strain Energy and Revised Particle Swarm Optimization. *Int. J. Struct. Stab. Dyn.* [Internet]. 2014;14:1440005. Available from: <http://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0219455414400057>.
- [11] Wei ZT, Liu JK, Lu ZR. Damage identification in plates based on the ratio of modal strain energy change and sensitivity analysis. *Inverse Probl. Sci. Eng.* 2016;24:265–283.
- [12] Seyedpoor SM. A two stage method for structural damage detection using a modal strain energy based index and particle swarm optimization. *Int. J. Non. Linear. Mech.* [Internet]. 2012;47:1–8. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020746211001818> <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020746211001818>.
- [13] Torkzadeh P, Goodarzi Y, Salajegheh E. A TWO-STAGE DAMAGE DETECTION METHOD FOR LARGE-SCALE STRUCTURES BY KINETIC AND MODAL STRAIN ENERGIES USING HEURISTIC PARTICLE SWARM OPTIMIZATION. *Int. J. Optim. Civ. Eng.* 2013;3:465–482.
- [14] Guo HY, Li ZL. Two-stage multi-damage detection method based on energy balance equation. *J. Nondestruct. Eval.* 2011;30:186–200.
- [15] Grande E, Imbimbo M. A multi-stage data-fusion procedure for damage detection of linear systems based on modal strain energy. *J. Civ. Struct. Heal. Monit.* 2014;4:107–118.
- [16] Guo HY, Li ZL. Structural damage identification based on Bayesian theory and improved immune genetic algorithm. *Expert Syst. Appl.* 2012;39:6426–6434.
- [17] Kaveh A, Talatahari S. A novel heuristic optimization method: Charged system search. *Acta Mech.* 2010;213:267–289.
- [18] Kaveh A, Maniat M. Damage detection in skeletal structures based on charged system search optimization using incomplete modal data. *Int. J. Civ. Eng.* 2014;12:291–298.
- [19] Kaveh a., Zolghadr A. An improved CSS for damage detection of truss structures using changes in natural frequencies and mode shapes. *Adv. Eng. Softw.* 2014;Article in.
- [20] Tabrizian Z, Ghodrati Amiri G, Hossein Ali Beigy M. Charged system search algorithm utilized for structural damage detection. *Shock Vib.* 2014;2014.
- [21] Shi ZY, Law SS, Zhang LM. Structural Damage Detection from Modal Strain Energy Change. *J. Eng. Mech.* [Internet]. 2002;128:377. Available from: http://scitation.aip.org/journals/doc/JENMDT-ft/vol_128/iss_3/377_1.html.