

Identification of Damage Location in Double Layer Space Structures Using Structural Dynamic Response and Bayesian Theory

Neda Heshmati Shahbulaghi¹, Elham Ghandi^{2*}, Shirin Esmacili³

1- Master Graduate, Faculty of Engineering, University of Mahagheh Ardabili, Ardabil, Iran

2,3- Associate Professor, Faculty of Engineering, University of Mahagheh Ardabili, Ardabil, Iran

ABSTRACT

In the last two decades, identifying the location and severity of damage in structures has become one of the essential areas of research for civil engineers. This aids in increasing the lifespan of structures and controlling damage. Typically, damages occur due to factors like seismic forces, fatigue, unexpected loads, and more. If these damages aren't identified and repaired, it can significantly alter the overall performance of the structural system, leading to potentially irreparable consequences. Damage induces changes in the dynamic properties of structures, making it possible to trace the location and extent of these impairments by examining these alterations. Due to the high sensitivity of dynamic data to damage, these methods have garnered substantial attention from researchers. Among the dynamic methods reliant on modal frequencies, which are fundamental vibrational characteristics of a structure, the modal strain energy method is notable. This approach combines the dynamic properties of a structure with Bayesian statistical theory in both intact and damaged conditions to identify the location of damage. This article utilizes a combination of the modal strain energy method and Bayesian theory to more accurately determine the damaged elements and reduce the likelihood of misidentifying undamaged components as damaged ones. The obtained results demonstrate that this method is highly accurate in detecting single and multiple damages in space structures.

ARTICLE INFO

Receive Date: 09 September 2024

Revise Date: 07 December 2024

Accept Date: 15 December 2024

Keywords:

Damage identification
Space structure
Bayesian theory
Dynamic response
Modal strain energy

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.474942.3506](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.474942.3506)

*Corresponding author: Elham Ghandi
Email address: ghandi@uma.ac.ir

شناسایی محل آسیب در سازه‌های فضاکار دولایه با تعداد اعضای زیاد با استفاده از پاسخ دینامیکی سازه و تئوری احتمالاتی بیزین

ندا حشمتی شاه‌بلاغی^۱، الهام قندی^{۲*}، شیرین اسماعیلی نیاری^۳

۱- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۳- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

در دو دهه‌ی اخیر، تشخیص محل و شدت خرابی در سازه‌ها از جمله ضروری‌ترین زمینه‌های تحقیقاتی مورد توجه مهندسان عمران می‌باشد که به افزایش عمر سازه و کنترل خرابی کمک می‌کند. عموماً خرابی‌ها در اثر عواملی مانند نیروی زلزله، خستگی، اعمال بارگذاری-های بیش از حد انتظار و ... در سازه‌ها ظاهر می‌شوند. در صورت عدم شناسایی و ترمیم این آسیب‌ها، عملکرد سیستم سازه به طور کلی تغییر می‌کند که می‌تواند تبعات جبران‌ناپذیری را به همراه داشته باشد. آسیب، تغییرات در خصوصیات دینامیکی سازه را به دنبال دارد لذا می‌توان با بررسی این تغییرات به وجود، محل و میزان این خرابی‌ها پی برد. به دلیل حساسیت بالای داده‌های دینامیکی نسبت به خرابی، این روش‌ها بیشتر مورد توجه محققان قرار گرفته است. از جمله روش‌های دینامیکی مبتنی بر مودال وابسته به فرکانس‌های طبیعی که یکی از اساسی‌ترین خصوصیات ارتعاشی یک سازه هستند، روش انرژی کرنشی مودال می‌باشد. در این روش از ترکیب خصوصیات دینامیکی سازه با تئوری آماری بیزین در دو حالت سالم و آسیب‌دیده در شناسایی محل آسیب استفاده می‌شود. در این مقاله از ترکیب روش انرژی کرنشی و تئوری آماری بیزین برای تعیین با دقت بیشتر المان‌های آسیب‌دیده و همچنین کاهش میزان خطای تشخیص نادرست اعضای آسیب‌دیده به عنوان اعضای آسیب‌دیده، استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان دادند که روش فوق، با دقت بالایی قادر به تشخیص آسیب‌های تکی و چندگانه در سازه‌های فضاکار می‌باشد.

کلمات کلیدی: شناسایی آسیب، سازه فضاکار، تئوری بیزین، پاسخ دینامیکی سازه، انرژی کرنشی مودال، تئوری بیزین، شکل مود، محل آسیب

| شناسه دیجیتال: | | سابقه مقاله: | | | | |
|----------------|--|--------------|------------------|------------|-----------------|------------|
| doi: | 10.22065/jsce.2024.474942.3506 | چاپ | انتشار آنلاین | پذیرش | بازنگری | دریافت |
| | https://doi.org/10.22065/jsce.2024.474942.3506 | ۱۴۰۴/۰۱/۳۱ | ۱۴۰۳/۰۹/۲۵ | ۱۴۰۳/۰۹/۲۵ | ۱۴۰۲/۰۹/۱۷ | ۱۴۰۲/۰۶/۱۹ |
| | | | الهام قندی | | *نویسنده مسئول: | |
| | | | ghandi@uma.ac.ir | | پست الکترونیکی: | |

۱- مقدمه

از موثرترین عوامل در پیشرفت و توسعه‌ی کشورها، سازه‌های عمرانی هستند. در سال‌های اخیر، شناسایی آسیب‌های سازه‌ای از طریق ویژگی‌های دینامیکی سازه‌ها به دلیل سادگی در اجرا، برای محققان جوامع مهندسی عمران، مکانیک و هوافضا بسیار جذاب شده است. نظارت بر سلامت سازه^۱ یک ابزار ارزیابی آسیب است که می‌تواند برای جلوگیری از شکست سازه و جلوگیری از مشکلات جدی فاجعه‌آمیز مورد استفاده قرار گیرد [۱]. ایده اصلی تشخیص آسیب مبتنی بر ارتعاش این است که آسیبی که به شکل کاهش سختی موضعی در سازه ایجاد می‌شود، منجر به تغییر در ویژگی‌های دینامیکی آن؛ مانند فرکانس‌های طبیعی، اشکال مودی و میرایی مودال و ... می‌شود. برای این منظور در ادبیات فنی، روش‌های متعددی برای تشخیص آسیب در سازه‌ها با استفاده از داده‌های مودال پیشنهاد و پیاده‌سازی شده‌اند [۲]. که در میان آنها تکنیک مبتنی بر ارتعاش مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است [۳]. روش‌های تشخیص آسیب سازه‌ای مبتنی بر ارتعاش را می‌توان عمدتاً به دو دسته طبقه‌بندی کرد: (۱) روش‌های مبتنی بر تغییر در خواص مکانیکی سازه‌ها، مانند روش‌های مبتنی بر تغییر در فرکانس مودال [۴]، انحنای شکل مودی [۵]، ماتریس نرمی سازه [۶]، ماتریس سختی [۷]، انرژی کرنشی مودال^۲ [۸]، و تابع انتقال [۹]؛ و (۲) روش‌های مبتنی بر تغییر در سیگنال‌های اندازه‌گیری برخط، مانند روش‌های مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی [۱۰]، تجزیه مود تجربی و تبدیل هیلبرت-هوانگ [۱۱]، تجزیه موجک [۱۲]، و مدل میانگین متحرک رگرسیون خودکار [۱۳]. سیدپور و منتظر در سال ۲۰۱۶، یک روش تشخیص آسیب دو مرحله‌ای با استفاده از شاخص بردار باقی‌مانده مودال و الگوریتم تکامل تفاضلی برای تعیین موقعیت و شدت آسیب‌های متعدد در سازه‌های خرپایی پیشنهاد کردند [۱۴]. روش تشخیص آسیب سازه‌ای مبتنی بر انرژی کرنشی مودال معمولاً به اطلاعات در هر درجه آزادی نیاز دارد. به دلیل تعداد محدود سنسورها و دشواری در اندازه‌گیری ارتعاش چرخشی، توسعه مودال اغلب برای انطباق با درجات آزادی بین مدل‌های تحلیلی و تجربی اتخاذ می‌شود که باعث ایجاد خطا می‌شود. وو^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۷، یک روش تشخیص آسیب سازه‌ای مبتنی بر انرژی کرنشی مودال پیشنهاد کردند که در آن انرژی کرنشی مودال اولیه مطابق با مدهای کرنشی دوباره فرموله و تنظیم می‌شود. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به روش تشخیص آسیب سازه‌ای مبتنی بر انرژی کرنشی مودال با مود جایابی و روش توسعه مودال دارد [۱۵]. در سال ۲۰۱۸، یک روش تشخیص آسیب سه مرحله‌ای برای سازه‌های فضاکار شبکه‌ی دولایه و چلیک دولایه در مقیاس بزرگ ارائه شد که مشخص گردید این روش پیشنهادی برای تشخیص آسیب سازه‌های فضایی در مقیاس بزرگ با تعداد اعضای بالا بسیار کارآمد بوده و در موقعیت‌های عملی قابل استفاده است [۱۶]. بهشتی و همکاران در سال ۲۰۱۹، یک روش پایش سلامت سازه‌ای لرزه‌ای مبتنی بر سیگنال را برای تشخیص آسیب و ارزیابی شدت آسیب یک قاب چند طبقه در معرض یک رخداد زلزله ارائه دادند. با بهره‌گیری از تکنیک‌های پردازش سیگنال و هوش مصنوعی، تشخیص آسیب سازه‌ها در سه سطح شامل آسیب، شدت آسیب و محل آسیب با موفقیت انجام شد [۱۷]. نیو^۴ در سال ۲۰۲۰، بر اساس نظریه آماری بی‌زین^۵ و داده‌های ناقص^۶ FRF، یک الگوریتم تشخیص آسیب احتمالی ارائه داد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که روش پیشنهادی دارای ایمنی و مقاومت نویزی^۷ قدرتمند است [۱۸]. تیموری و همکاران در سال ۲۰۲۰، یک روش دو مرحله‌ای برای تعیین محل و میزان شدت آسیب در شبکه‌های دولایه پیشنهاد کردند و نتایج نشان داد که روش دو مرحله‌ای پیشنهادی کارایی و دقت بالایی در تعیین مکان و شدت آسیب در شبکه دولایه با استفاده از تعداد محدودی فرکانس طبیعی و شکل مود دارد. اوسی^۸ و همکاران در سال ۲۰۲۱، یک مقاله‌ی مروری از روش‌های شناسایی آسیب بر پایه‌ی ارتعاش در سازه‌های مهندسی عمران ارائه داده‌اند، نویسندگان در این

¹ SHM

² MSE

³ Wu

⁴ Niu

⁵ Bayesian

⁶ Frequency Response Function

⁷ noise

⁸ Onur Avci

مقاله، تقریباً همه‌ی روش‌های موجود در شناسایی آسیب بر پایه روش‌های قدیمی تا روش‌های نوین بر اساس یادگیری ماشین^۹ و کاربردهای یادگیری عمیق^{۱۰} را طبقه‌بندی کرده‌اند، در این تحقیق ایشان حدود ۲۱۰ مقاله را مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۹]. تغییر در انرژی کرنش مودال یکی از شاخص‌هایی است که برای تشخیص آسیب در سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما در سازه‌هایی با تعداد درجات آزادی بالا، مانند شبکه‌های دولایه فضاکار، این روش به تعداد نسبتاً زیادی از شکل‌های مود نیاز دارد که در عمل تعیین آن دشوار است؛ بنابراین، لازم است تعداد شکل‌های مود مورد نیاز کاهش یابد. تیموری و همکاران در سال ۲۰۲۱، در یک مطالعه، یک روش تشخیص آسیب مبتنی بر انرژی کرنش مودال و نظریه شوهد دمپستر-شفر^{۱۱} برای مکان‌یابی آسیب در شبکه‌های دولایه تنها با استفاده از تعداد محدودی از اشکال مود ارائه کردند. نتایج عددی نشان داد که با استفاده از پنج شکل مود، روش ارائه شده می‌تواند تا سه عنصر آسیب‌دیده با شدت آسیب‌های مختلف را در بخش‌های مختلف شبکه با دقت مناسب (احتمال ۹۲/۳ درصد) شناسایی کند. با توجه به این واقعیت که روش کلاسیک انرژی کرنش مودال قادر به تشخیص حتی یک عنصر آسیب‌دیده در شبکه دولایه نیست، نتیجه پیشرفت قابل توجهی را نشان می‌دهد [۲۰]. ژانگ^{۱۲} و همکاران در سال ۲۰۲۲، یک روش شناسایی آسیب موثر بر مبنای شاخص انرژی کرنش ترکیبی در یک تحقیق ارائه کردند تا موقعیت اعضای آسیب‌دیده در چنین سازه‌هایی شناسایی شود. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی دقت بالایی در مکان‌یابی در مقایسه با روش‌های سنتی و مقاومت نوین اندازه‌گیری دارد [۲۱].

یکی از شاخص‌هایی که برای شناسایی آسیب در سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد تغییرات انرژی کرنش مودال سازه قبل و بعد از خرابی است. با این وجود در سازه‌هایی با تعداد اعضای بالا مانند سازه‌های فضاکار، این روش به تعداد شکل‌های مود زیادی نیاز دارد که در عمل تعیین تعداد بالای شکل مود کار دشواری می‌باشد. در کارهای گذشته این روش فقط با استفاده از شکل‌های ابتدایی انجام گرفته شده که در این مقاله از ترکیب روش انرژی کرنش و تئوری آماری بیزین در سازه‌های شبکه‌ای، گنبدی و چلیک دولایه با تعداد اعضای زیاد، برای تعیین با دقت بیشتر المان‌های آسیب‌دیده و همچنین کاهش میزان خطای تشخیص نادرست اعضای آسیب‌دیده به عنوان اعضای آسیب‌دیده، استفاده شده است. با توجه به اینکه روش بیان شده بر روی سازه‌های با تعداد اعضای بالا و شکل‌های هندسی متفاوت انجام شد و مشاهده گردید که استفاده از شکل‌های اولیه در رسیدن به نتیجه مطلوب، فاقد توانایی و کارایی لازم است و به همین دلیل در روش پیشنهادی جهت کاهش خطای مذکور در نهایت از ترکیب تعداد محدودی شکل مودهای غیر پیوسته‌ی غیرابتدایی استفاده شد.

چارچوب کلی مقاله به این صورت می‌باشد که در هشت بخش تنظیم شده است. در بخش اول اشاره کوتاهی به مقدمه، ادبیات فنی و نتایج تحقیقات گذشته محققان شده است. در بخش دوم به طور کلی به اهمیت پایش سلامت سازه پرداخته می‌شود. در بخش‌های سوم، چهارم و پنجم مروری بر مراحل روش تحقیق و روابط مربوط به آن و در بخش ششم، نحوه مدل‌سازی و صحت‌سنجی ارائه می‌شود. به منظور بررسی کارایی روش‌های ارائه شده در بخش‌های قبلی، نتایج بررسی مثال‌های عددی در سازه‌های مورد مطالعه در بخش هفتم ارائه می‌شود. در بخش هشتم نیز نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای کارهای آتی بیان می‌شود.

۲- اهمیت پایش سلامت سازه

نظارت بر سلامت سازه یک زمینه تحقیقاتی امیدوارکننده است که پتانسیل بهبود عملکرد سازه‌ای را با ارزیابی مستمر و دوره‌ای ایمنی از مقاومت و پایداری سازه فراهم می‌کند. معمولاً هنگامی که به نظر می‌رسد سازه‌ای آسیب دیده است، باید بررسی شود که آیا آن سازه برای سرویس‌دهی مجدد ایمن است یا باید اقدامات لازم برای بازیابی عملکرد آن با اتخاذ برخی از طرح‌های مقاوم سازی قابل اعتماد

⁹ Machine Learning

¹⁰ Deep Learning

¹¹ Dempster - Shafer

¹² Zhang

انجام شود [۲۲].

به طور کلی، چهار مرحله اصلی برای پایش سلامت سازه‌ها را می‌توان به شرح زیر بیان کرد: تعیین وجود و محل آسیب، تعیین کمیت و شدت آسیب و پیش بینی طول عمر باقی‌مانده سازه آسیب‌دیده. وجود، محل و شدت آسیب در سازه‌ها با استفاده از مقایسه مشخصات سازه در دو حالت سالم و آسیب‌دیده تعیین می‌شود [۲۳]. اخیراً در مطالعات، توجه ویژه‌ای به کنترل خرابی ناگهانی اجزای سازه با تشخیص آسیب در سازه‌ها در مراحل اولیه معطوف شده است. خرابی‌ها عامل اصلی شکست سازه بوده و ممکن است در قسمت‌های مختلف آن رخ دهد. ریزش غیرمنتظره سازه‌ها می‌تواند در تلفات عظیم اقتصادی و جانی موثر باشد؛ بنابراین، سازه‌ها همواره باید از ایمنی کافی در طول عمر عملکرد سازه‌ای خود برخوردار باشند و به همین دلیل انگیزه اصلی برای شروع تحقیقات در این حوزه، در نقاط مختلف دنیا بوده است. تشخیص آسیب‌ها و رفع آن‌ها در زمان مناسب می‌تواند باعث افزایش طول عمر سازه و همچنین جلوگیری از فروریزش کامل آن شود.

۳- آنالیز مودال تئوری

آنالیز مودال تئوری بر مبنای یک مدل فیزیکی از مشخصات دینامیکی سیستم مورد نظر، که این مشخصات شامل فرکانس‌های طبیعی، اشکال مودی و ضرایب میرایی است، انجام می‌گیرد که رابطه ریاضی آن بصورت رابطه (۱) می‌باشد [۲۴]:

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

که در آن K و M به ترتیب ماتریس‌های سختی و جرم سازه؛ ω_i و φ_i به ترتیب فرکانس‌های طبیعی و اشکال مودی مربوط به مود i ام و ndf نیز تعداد درجات آزادی می‌باشد. معمولاً اشکال مود با توجه به ماتریس جرم نرمال می‌شوند و بنابراین روابط (۲) و (۳) را می‌توان به شکل زیر برقرار کرد:

$$\varphi_i^T M \varphi_i = 1 \quad (2)$$

$$\varphi_i^T K \varphi_i = \omega_i^2 \quad (3)$$

۴- انرژی کرنشی مودال

شکل مودی تحت یک بارگذاری مشخص دارای میزان مشخصی انرژی کرنشی مودال می‌باشد. در اثر وقوع آسیب در سازه، میزان این انرژی، تغییر می‌کند. با بررسی تغییرات انرژی کرنشی مودال در دو حالت سازه سالم و آسیب‌دیده، می‌توان موقعیت آسیب را مشخص کرد. از آنجایی که بردارهای شکل مودی، معادل جابجایی‌های گرهی سازه هستند، بنابراین در هر عضو سازه انرژی کرنشی ذخیره می‌شود. هنگامی که در حالت ارتعاش آزاد به سازه نیرویی وارد نمی‌شود مقدار انرژی کرنشی مودال هر عضو را می‌توان با استفاده از تحلیل دینامیکی و حل روابط ریاضی موجود به دست آورد. انرژی کرنشی عضو e ام در مود i ام بصورت زیر به دست می‌آید:

$$mse_i^e = \frac{1}{2} \varphi_i^{eT} K^e \varphi_i^e \quad ; \quad i = 1 \dots ndf \quad ; \quad e = 1 \dots nte \quad (4)$$

که در آن K^e ماتریس سختی المان e ام سازه، φ_i^e بردار جابجایی گرهی متناظر المان e ام در مود i ام و nte تعداد المان‌های سازه است. انرژی کرنشی مودال کل سازه در مود i ام را نیز می‌توان با جمع انرژی کرنشی تمام اعضا تعیین کرد که به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$mse_i = \sum_{e=1}^{nte} mse_i^e \quad ; \quad i = 1 \dots ndf \quad (5)$$

برای هدف محاسباتی، بهتر است رابطه (5) نرمال سازی شود؛ بنابراین انرژی کرنشی اعضا به انرژی کرنشی مودال کل سازه به صورت زیر نرمالیزه می شود:

$$nmse_i^e = \frac{mse_i^e}{mse_i} \quad (6)$$

که در آن $nmse$ انرژی کرنشی نرمالیزه شده عضو e در مود i ام سازه است. میانگین معادله (6) برای nm مود اول را می توان به عنوان یک پارامتر موثر انتخاب کرد:

$$mnmse^e = \frac{\sum_{i=1}^{nm} nmse_i^e}{nm} \quad ; \quad e = 1 \dots nte \quad (7)$$

به طور کلی، زمانی که آسیب در یک عضو سازه رخ می دهد، می توان با کاهش یکی از پارامترهای سختی عنصر مانند مدول الاستیسیته، سطح مقطع، ممان اینرسی و غیره آن را شبیه سازی کرد. بنابراین وقوع آسیب منجر به افزایش انرژی کرنشی عضو و در نتیجه پارامتر موثر $mnmse^e$ می شود. در نتیجه با تعیین پارامتر موثر $mnmse^e$ برای هر عضو از سازه های سالم و آسیب دیده که در اینجا به ترتیب با $(mnmse^e)^h$ و $(mnmse^e)^d$ نشان داده شده اند، شاخصی موثر برای برآورد وجود و شدت آسیب در عنصر می توان تعریف کرد. این شاخص به عنوان شاخص مبتنی بر انرژی کرنشی مودال نامیده می شود و می تواند به صورت زیر تعیین شود [۲۵]:

$$MSEBI^e = \max \left[0, \frac{(mnmse^e)^d - (mnmse^e)^h}{(mnmse^e)^h} \right] \quad ; \quad e = 1 \dots nte \quad (8)$$

لازم به ذکر است که محل آسیب در سازه آسیب دیده ناشناخته است، بنابراین برای این مورد از ماتریس سختی عضو سازه سالم برای تخمین پارامتر $(mnmse^e)^d$ استفاده می شود. با توجه به رابطه (8)، برای یک عضو سالم شاخص برابر با صفر ($MSEBI^e=0$) و برای یک عضو آسیب دیده، شاخص بزرگ تر از صفر خواهد بود ($MSEBI^e>0$).

۵- تئوری بیزین

یکی از روش های ترکیب اطلاعات، استفاده از تئوری بیز می باشد. این روش می تواند اطلاعات حاصل از چندین منبع اطلاعاتی مختلف را ترکیب کند تا دقت نتایج نسبت به حالتی که تنها از یک منبع اطلاعاتی استفاده شده را بهبود دهد [۲۶]. فرض کنید دو منبع اطلاعاتی S_1 و S_2 با n شی یا گزاره با نام های A_1, A_2, \dots, A_n وجود دارد. در ترکیب اطلاعات، احتمال پیشین هر گزاره به روش تئوری بیز به شکل $p(A_i)$ است. احتمال شرطی هر شی A_i که همان $p(S_1, S_2 | A_i)$ است موجود می باشد. بر پایه تئوری بیز ترکیب اطلاعات به صورت زیر می باشد:

$$p(A_i | S_1, S_2) = \frac{p(S_1, S_2 | A_i) p(A_i)}{\sum_{j=1}^n p(S_1, S_2 | A_j) p(A_j)} \quad (9)$$

هنگامی که تصمیمات منابع اطلاعاتی نسبت به یکدیگر مجزا باشند، رابطه فوق به شکل زیر درمی آید:

$$p(A_i | S_1, S_2) = \frac{p(S_1 | A_i) p(S_2 | A_i) p(A_i)}{\sum_{j=1}^n p(S_1 | A_j) p(S_2 | A_j) p(A_j)} \quad (10)$$

در صورت وجود L منبع اطلاعاتی مستقل، ترکیب اطلاعات به روش بیز به صورت زیر انجام می گیرد:

$$p(A_i | S_1, S_2, \dots, S_K) = \frac{\prod_{K=1}^L p(S_K | A_i) p(A_i)}{\sum_{j=1}^n \prod_{K=1}^L p(S_K | A_j) p(A_j)} \quad (11)$$

۱-۵- ترکیب انرژی کرنشی مودال و تئوری آماری بیزین

در روش انرژی کرنشی مودال جهت تشخیص محل آسیب در سازه‌ها، پاسخ‌های مودال سازه به کار گرفته می‌شوند. از معایب این روش، تشخیص برخی از اعضای سالم سازه به عنوان اعضای آسیب‌دیده به ویژه در سازه‌های با تعداد اعضای بالا می‌باشد. جهت افزایش دقت و بهبود نتایج می‌توان از ترکیب اطلاعات به روش بیز بهره گرفت. اگر S_1 و S_2 دو منبع اطلاعاتی در دسترس باشند که مقادیر هر کدام از اعضای آن‌ها نشان دهنده‌ی شاخص انرژی کرنشی مودال با استفاده از i و $i+1$ مود اول باشد:

$$S_1 = \{MSEBI_{11}, MSEBI_{12}, \dots, MSEBI_{1j}\} \quad , \quad j = 1 \dots n \quad (12)$$

$$S_2 = \{MSEBI_{21}, MSEBI_{22}, \dots, MSEBI_{2j}\} \quad , \quad j = 1 \dots n \quad (13)$$

با توجه به این که در این روش، ترکیب بر اساس اطلاعات دارای توزیع احتمال صورت می‌گیرد، لذا با تقسیم شاخص انرژی کرنشی مودال عضو با استفاده از i مود اول بر شاخص انرژی کرنشی مودال تمام اعضا با استفاده از i مود اول، احتمال آسیب‌دیدگی عضو در حالت استفاده از i مود اول مربوط به شاخص مذکور به صورت زیر به دست می‌آید:

$$p_1(A_i) = \frac{MSEBI_{1j}}{\sum_{j=1}^n MSEBI_{1j}} \quad , \quad j = 1 \dots n \quad (14)$$

$$p_2(A_i) = \frac{MSEBI_{2j}}{\sum_{j=1}^n MSEBI_{2j}} \quad , \quad j = 1 \dots n$$

که $p_1(A_i)$ و $p_2(A_i)$ به ترتیب احتمال آسیب‌دیدگی عضو A_i حاصل از منبع اطلاعاتی اول و دوم می‌باشند. پس از آن می‌توان، با ترکیب احتمال آسیب‌دیدگی به دست آمده از مرحله‌ی قبل به روش بیز، احتمال آسیب‌دیدگی ترکیبی هر یک از اعضا را مشخص نمود:

$$p(A_i | S_1, S_2) = \frac{p(S_1 | A_i) p(S_2 | A_i) p(A_i)}{\sum_{j=1}^n p(S_1 | A_j) p(S_2 | A_j) p(A_j)} \quad (15)$$

در رابطه فوق $p(A_i | S_1, S_2)$ احتمال آسیب‌دیدگی عضو A_i است که حاصل ترکیب داده‌های به دست آمده از منبع اطلاعاتی اول و دوم می‌باشد. $p(S_2 | A_i)$ و $p(S_1 | A_i)$ نیز همان $p_2(A_i)$ و $p_1(A_i)$ است. همچنین احتمال آسیب‌دیدگی پیشین عضو A_i می‌باشد که به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$p(A_i) = \frac{1}{m} \quad (16)$$

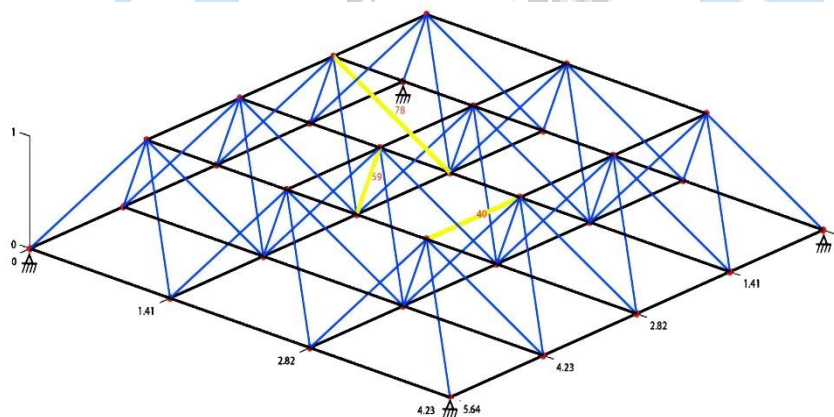
که m تعداد اعضای سازه می باشد. در صورتی که نیاز به ترکیب اطلاعات چندین منبع اطلاعاتی جهت رسیدن به نتیجه دقیق و مطلوب باشد، می توان با استفاده از رابطه (۱۱) چندین منبع اطلاعاتی را ترکیب کرد. معیار آسیب دیدگی در این روش اعضای دارای بیشترین احتمال می باشند که آن ها به عنوان اعضای آسیب دیده انتخاب می شوند.

۶- صحت سنجی

در این مقاله برای اطمینان از صحت مدل سازی، از مدل شبکه دولایه فضاکار ارائه شده در مقاله تیموری و داوودی استفاده شده است [۲۷]. مشخصات شبکه مربوطه در شکل ۱ و جدول ۱ نشان داده شده است. این شبکه دارای چهار تکیه گاه مفصلی در گره های ۱، ۵، ۱۶ و ۲۰ واقع در گوشه های لایه پایین می باشد. در تکیه گاه ها جابه جایی در سه راستای X ، Y و Z مهار شده است. جهت مدل سازی سازه آسیب دیده، در المان های شماره ۴۰، ۵۹ و ۷۸ به ترتیب آسیب به میزان ۲۰، ۱۰ و ۴۰ درصد اعمال گردیده است. مدل سازی در نرم افزار SAP2000 و آنالیز مودال با استفاده از OpenSEES صورت گرفته است.

جدول ۱: مشخصات شبکه دولایه ۹۶ عضوی [۲۷]

| ارتفاع (m) | تعداد اعضا | تعداد گره | سطح مقطع اعضا (m ²) | طول اعضا (m) | وزن مخصوص اعضا (kg/m ³) | مدول الاستیسیته (Gpa) |
|------------|------------|-----------|---------------------------------|--------------|-------------------------------------|-----------------------|
| ۱ | ۹۶ | ۳۲ | ۰/۰۰۴ | ۱/۴۱ | ۷۸۰۰ | ۲۰۰ |

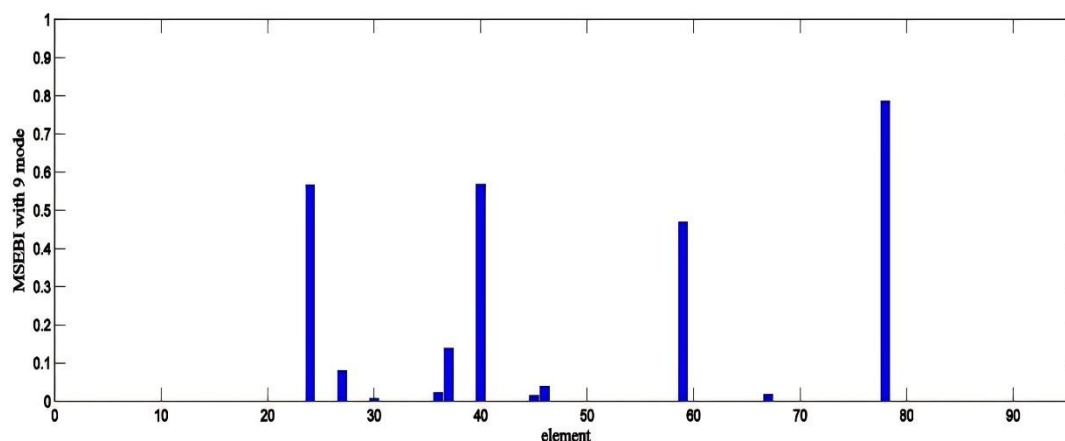


شکل ۱: شبکه دولایه ۹۶ عضوی [۲۷]

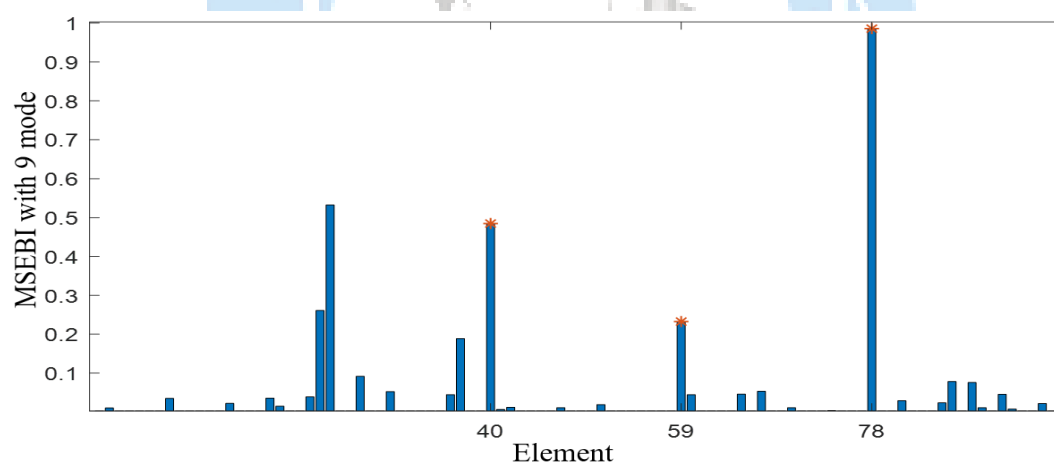
یکی از نتایج مقاله تیموری و داوودی [۲۷] برای روش انرژی کرنشی مودال به ازای نه شکل مود، در شکل ۲ آورده شده است که در این نمودار، انرژی کرنشی المان های آسیب دیده بیشتر از سایر اعضا می باشد. هر چند ایشان در این نمودار المان های آسیب دیده با مقدار غیر صفر را شناسایی کرده اند؛ اما شاخص $MSEBI$ برای تعدادی از المان های سالم هم مقدار غیر صفر را نشان داده که نمایانگر این است که استفاده از روش انرژی کرنشی مودال به تنهایی کفایت نمی کند و برای کاهش خطا از ترکیب تئوری بیزین باید استفاده شود.

در شکل ۳ نمودار انرژی کرنشی مودال حاصل از مدل سازی شبکه دو لایه در مقاله حاضر به ازای نه شکل مود، برای صحت سنجی ارائه شده است و همانطور که مشاهده می شود، در این مقاله نیز علاوه بر تعیین المان های آسیب دیده، تعدادی از المان های سالم نیز

به اشتباه به عنوان المان‌های آسیب‌دیده تشخیص داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که نتیجه تحلیل حاصل از صحت‌سنجی، مشابه با نتیجه مقاله مرجع [۲۷] و حاکی از صحت مدل‌سازی روش در تشخیص آسیب می‌باشد. ذکر این نکته الزامیست که به دلیل وجود اختلاف جزئی اعداد و داده‌ها در مقادیر ورودی مانند مدول الاستیسیته که در مقاله انجام شده به صورت دقیق‌تر وارد شده و مقادیر خروجی همانند مقادیر شکل‌مودها باعث ایجاد اختلاف جزئی بین مقادیر انرژی کرنشی مودال پژوهش انجام شده و مقاله مرجع گردیده است؛ اما ضروری‌تر این است که المان‌های آسیب‌دیده به درستی تشخیص داده شده باشند و می‌توان نسبت به این اختلاف و مقادیر انرژی کرنشی مودال کمتر از ۰.۱ چشم‌پوشی نمود؛ زیرا خللی در محاسبات بعدی وارد نمی‌کند.



شکل ۲: نمودار مقادیر شاخص انرژی کرنشی مودال با استفاده از نه شکل مود [۲۷]



شکل ۳: نمودار مقادیر شاخص انرژی کرنشی مودال با استفاده از نه شکل مود در مقاله حاضر

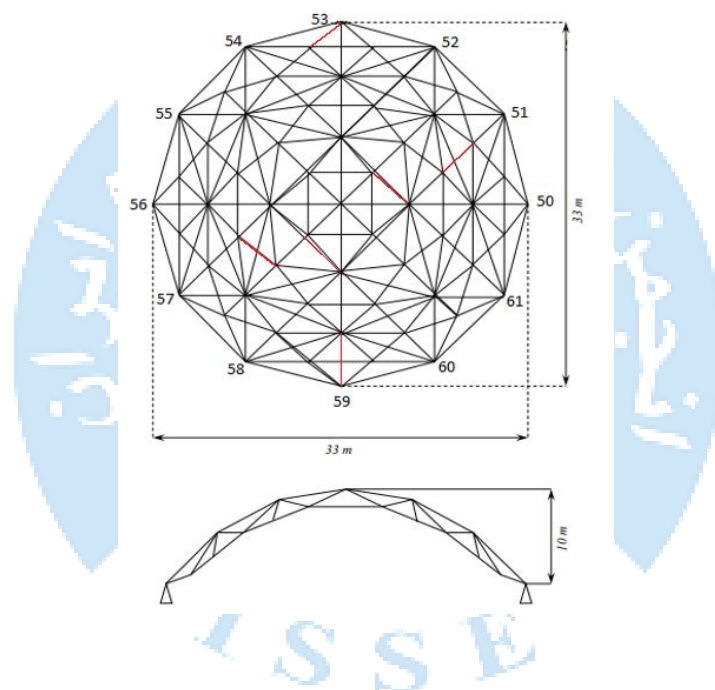
۷- مدل‌های عددی

اینک به مطالعه تاثیر روش پیشنهادی در تشخیص محل آسیب، بر روی سازه‌های گنبدی، چلیک و شبکه دولایه پرداخته می‌شود. همانطور که در بخش ۴ ذکر شد؛ به طور کلی، زمانی که آسیب در یک عضو سازه رخ می‌دهد، می‌توان با کاهش یکی از پارامترهای سختی عنصر مانند مدول الاستیسیته، سطح مقطع، ممان اینرسی و غیره آن را شبیه‌سازی کرد. در مدل‌های مقاله حاضر، از هر دو پارامتر مدول الاستیسیته و سطح مقطع، بصورت مجزا و ترکیبی استفاده شده و انتخاب هر روش برای هر سازه صرفاً بصورت رندوم می‌باشد؛ از طرفی برای استخراج مقادیر شکل مود و فرکانس‌ها از دو نرم‌افزار OpenSEES و Matlab2021 که هر دو از دقت بالایی برخوردار هستند نیز

بصورت رندوم در سازه‌ها استفاده شده که نشان دهد این روش در شرایط بهره‌گیری از سایر روش‌های گفته شده در بالا که بر روی سه سازه متفاوت به لحاظ شکل هندسی با تعداد اعضای زیاد اعمال می‌شود، تبعیت می‌کند. به علاوه تمام محاسبات عددی در نرم‌افزار Matlab2021، و ترسیم سازه‌ها جهت انتقال مختصات گره‌ها به نرم‌افزارهای استخراج مقادیر شکل مود، در نرم‌افزار Formian صورت گرفته شد.

۷-۱- گنبد دولایه

به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، ابتدا یک گنبد دولایه مورد بررسی قرار گرفته که مشخصات آن در شکل ۴ و جدول ۲ نشان داده شده است. این گنبد دارای ۱۲ تکیه‌گاه مفصلی در گره‌های ۵۰ تا ۶۱ می‌باشد. در تکیه‌گاه‌ها جابه‌جایی در سه راستای x ، y و z مهار شده است و سازه دارای ۱۴۷ درجه آزادی فعال می‌باشد. جهت مدل‌سازی آسیب، دو حالت آسیب تکی و چندگانه مطابق جدول ۳ اعمال شده و آسیب به روش کاهش در سطح مقطع صورت گرفته است. مدل‌سازی در نرم‌افزار SAP2000 بوده و آنالیز مودال با استفاده از



Matlab صورت گرفته است.

شکل ۴: گنبد دولایه ۲۱۶ عضوی

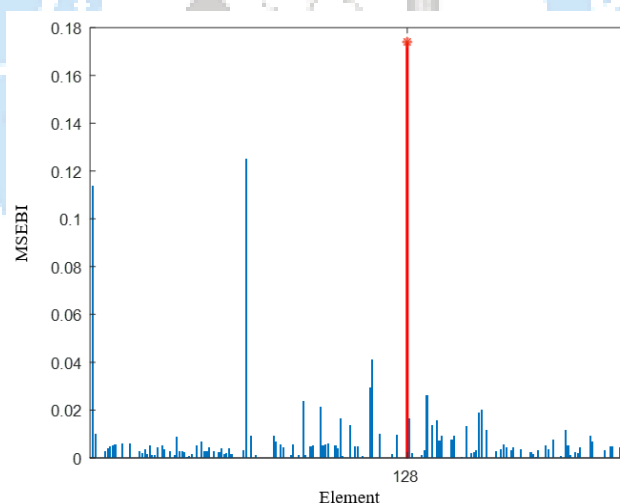
جدول ۲: مشخصات گنبد دولایه ۲۱۶ عضوی

| مدول الاستیسیته (Gpa) | وزن مخصوص اعضا (kg/m ³) | سطح مقطع اعضا (m ²) | تعداد گره | تعداد اعضا | ارتفاع کل (m) |
|--------------------------|--|------------------------------------|-----------|------------|------------------|
| ۲۰۰ | ۷۸۰۰ | ۰/۰۰۵ | ۶۱ | ۲۱۶ | ۱۰ |

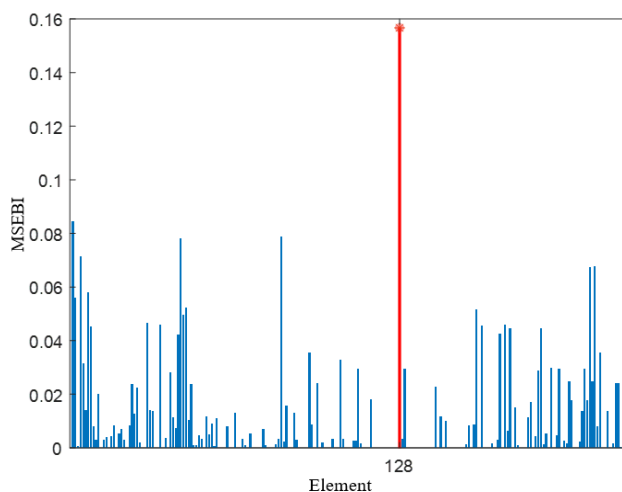
جدول ۳: مشخصات حالت‌های آسیب در گنبد دولایه ۲۱۶ عضوی

| حالت | شماره المان | شدت آسیب (درصد) |
|------|-------------|-----------------|
| ۱ | ۱۲۸ | ۲۰ |
| | ۲۲ | ۲۰ |
| | ۳۲ | ۳۰ |
| ۲ | ۹۵ | ۳۰ |
| | ۱۴۰ | ۲۰ |
| | ۲۰۰ | ۳۵ |

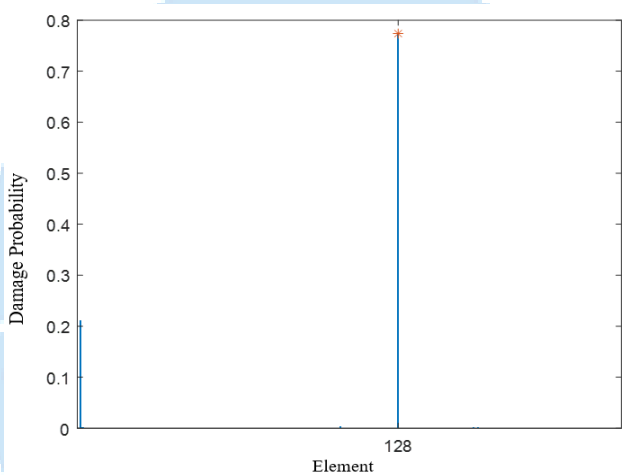
نمودارهای مربوط به هر دو حالت آسیب و مقادیر شاخص انرژی کرنشی مودال و احتمال آسیب دیدگی برای اعضا به دست آمده و همان طور که در شکل های ۵ و ۶ ملاحظه می گردد المان آسیب دیده ۱۲۸ به ترتیب با استفاده از دو و پنج شکل مود به خوبی شناسایی گردیده که در حالت استفاده از پنج شکل مود، میزان شاخص MSEBI برای المان های سالم کاهش یافته که می توان از آن صرف نظر کرد. نتایج احتمال آسیب دیدگی در شکل های ۷ و ۸ برای حالت اول آسیب آورده شده که در شکل ۸ میزان خطا تقریباً صفر می باشد. برای حالت دوم آسیب نیز، مطابق شکل های ۹ و ۱۰ واضح است روش MSE و تئوری بیزین، در تعیین المان های آسیب دیده به دقت عمل نموده و در کل از نتایج حاصله می توان استنباط کرد که با توجه به نمودارها در تشخیص محل آسیب های چندگانه به تعداد مودهای بالاتری نیاز می باشد و همچنین در حالت دوم که تعداد المان های آسیب دیده بیشتر است، استفاده از شکل مودهای انتخابی (بصورت آزمون و خطا) همانند ۹، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ نتیجه دقیق تری را در تشخیص محل آسیب و کاهش خطا ارائه می دهد. در برخی شکل ها برای تمایز راحت تر اعضای آسیب دیده از اعضای سالم، از رنگ قرمز استفاده شده است.



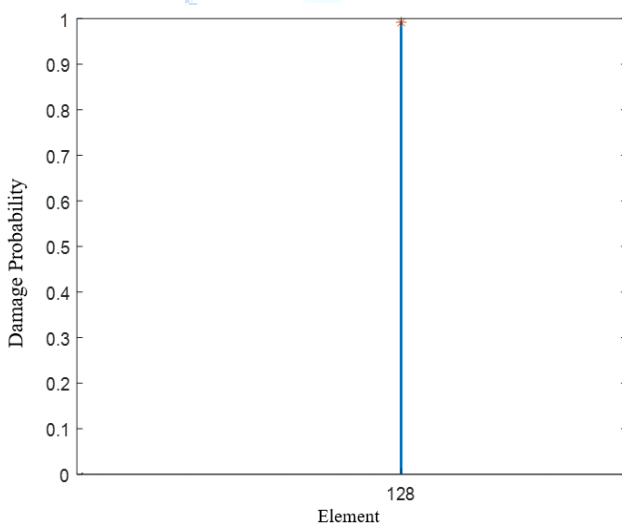
شکل ۵: نمودار مقادیر شاخص آسیب انرژی کرنشی مودال اعضا در حالت ۱ آسیب با استفاده از اثر دو شکل مود (مودهای ۱ و ۲)



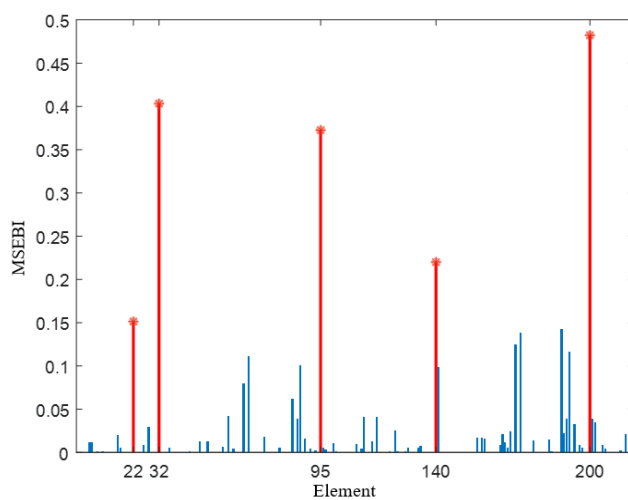
شکل ۶: نمودار مقادیر شاخص آسیب انرژی کرنشی مودال اعضا در حالت ۱ با استفاده از اثر پنج شکل مود (مودهای ۱ تا ۵)



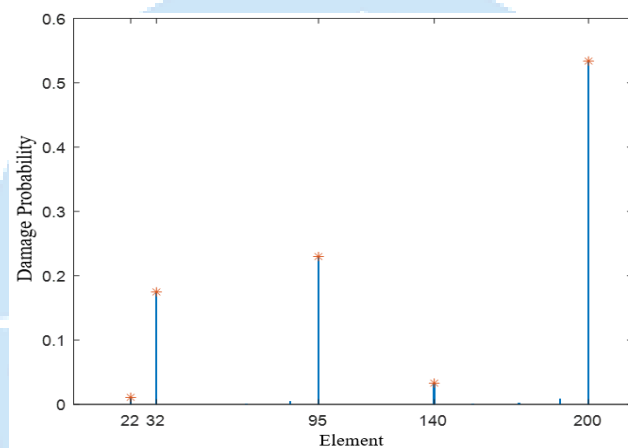
شکل ۷: احتمال آسیب دیدگی اعضا در حالت ۱ با استفاده از ترکیب اثر شکل مودهای ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۷ و ۸



شکل ۸: احتمال آسیب دیدگی اعضا در حالت ۱ با استفاده از ترکیب اثر شکل مودهای ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۷، ۸ و ۹



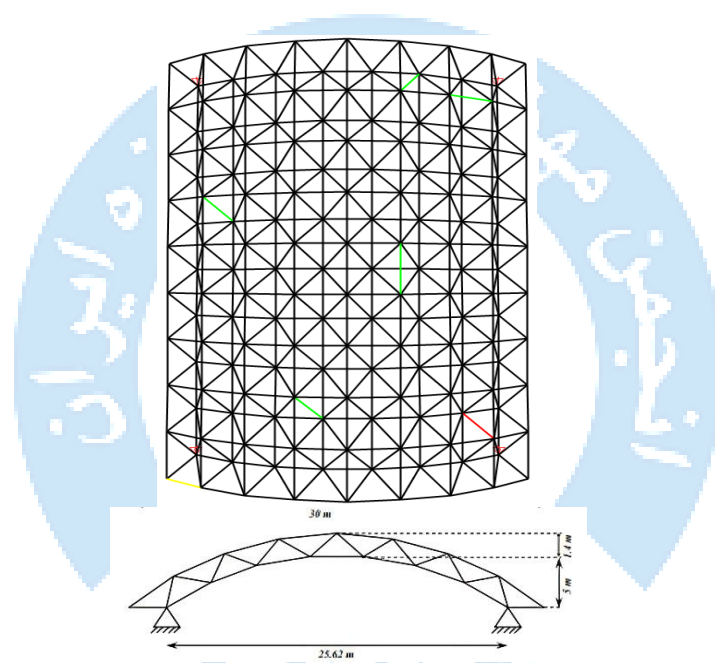
شکل ۹: نمودار مقادیر شاخص آسیب انرژی کرنشی مودال اعضا در حالت ۲ آسیب با استفاده از اثر هفت شکل مود (مودهای ۱ تا ۷)



شکل ۱۰: احتمال آسیب دیدگی اعضا در حالت ۲ آسیب با استفاده از ترکیب اثر شکل مودهای ۹، ۱۰، ۱۲ و ۱۴

۷-۲- چلیک دولایه

در مدل عددی دوم، تشخیص محل المان آسیب دیده به روش انرژی کرنشی مودال و روش تئوری بیزین بر روی چلیک دولایه ۵۷۶ عضوی انجام شده است. این سازه دارای ۱۶۲ گره، ۵۷۶ عضو و ارتفاع ۱/۴ متر و سطح مقطع برای اعضای لایه بالا، پایین و مورب به ترتیب $۳۹/۵۲$ ، $۳۰/۳۴$ و $۲۶/۷۵$ سانتی متر مربع می باشد. مشخصات، محل و شماره اعضای آسیب دیده چلیک مورد نظر در شکل ۱۱ نشان داده شده است. این چلیک دارای چهار تکیه گاه مفصلی در گوشه های لایه پایین می باشد و در تکیه گاهها جابه جایی در سه راستای x ، y و z مهار شده است و دارای ۴۷۴ درجه آزادی فعال می باشد. جهت مدل سازی سازه آسیب دیده، سه حالت آسیب طبق جدول ۴ اعمال گردیده است. آسیب به هر دو روش کاهش در مدول الاستیسیته و سطح مقطع، مدل سازی در نرم افزار **SAP2000** و آنالیز مودال با استفاده از نرم افزار **Matlab** صورت گرفته است.

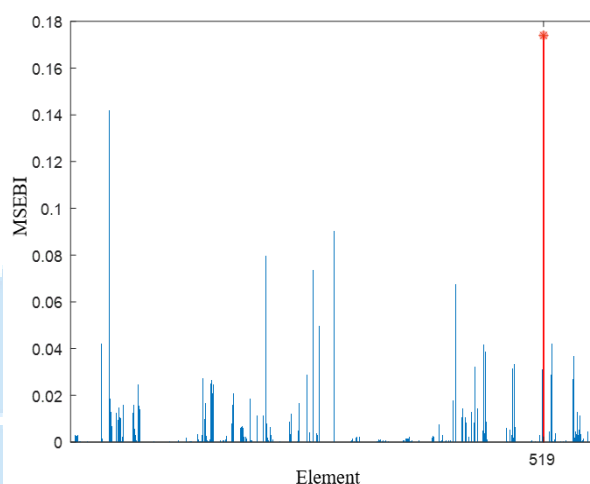


شکل ۱۱: مشخصات و محل اعضای آسیب دیده در چلیک دولایه ۵۷۶ عضوی

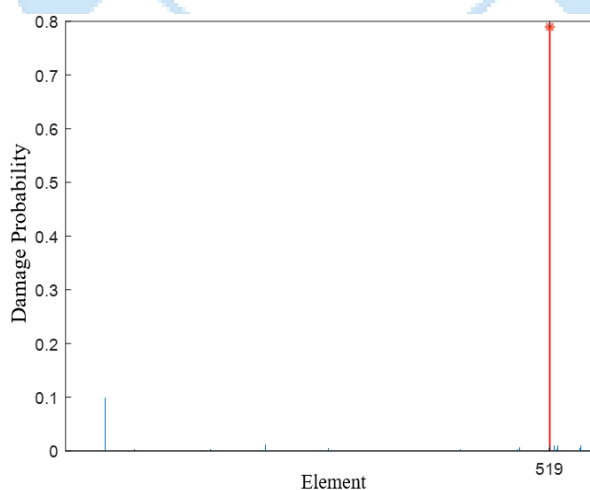
جدول ۴: مشخصات حالت های آسیب در چلیک دولایه ۵۷۶ عضوی

| حالت | شماره المان | شدت آسیب (درصد) |
|------|-------------|-----------------|
| ۱ | ۵۱۹ | ۲۰ |
| ۲ | ۸۰ | ۳۰ |
| | ۱۰ | ۲۰ |
| | ۱۲۰ | ۳۰ |
| ۳ | ۳۰۰ | ۳۰ |
| | ۴۱۰ | ۴۰ |
| | ۵۳۰ | ۲۰ |

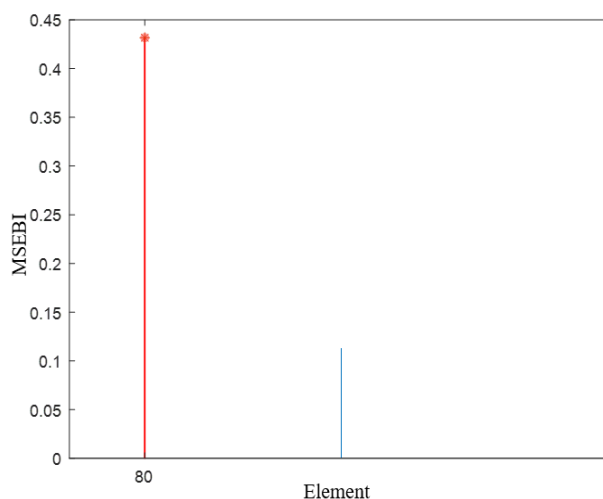
نمودارهای مربوط به هر سه حالت و مقادیر شاخص انرژی کرنشی مودال و احتمال آسیب دیدگی برای اعضا به دست آمده و همان طور که ملاحظه می گردد؛ شکل ۱۲ و ۱۴ مقادیر شاخص انرژی کرنشی مودال اعضا را در حالت ۱ و ۲ که آسیب تکی می باشند، نشان می دهد و المان آسیب دیده در حالت ۱ و ۲ به ترتیب با استفاده از سه و پنج شکل مود با دقت مناسب تشخیص داده شده اند. در شکل ۱۳ و ۱۵ احتمال آسیب دیدگی المان های شماره ۵۱۹ و ۸۰ آورده شده است. المان های آسیب دیده در حالت سوم آسیب نیز، در شکل ۱۶ با استفاده از چهارده شکل مود شناسایی شده اند و همچنین شکل ۱۷ احتمال آسیب دیدگی اعضای آسیب دیده در حالت سوم را نشان می دهد که با دقت بالا مشخص هستند و دو المان سالم نیز به طور اشتباه با مقدار شاخص بیشتر از ۰.۱۵ انتخاب شده اند. دو حالت اول آسیب تکی، با موقعیت های متفاوت و حالت سوم آسیب، چندانکه می باشد که نتایج ارائه شده در شکل ۱۶، نشان می دهند که استفاده از اثر چهارده شکل مود به طور پیوسته علاوه بر تشخیص اعضای آسیب دیده، شامل خطای تشخیص نادرست نیز می باشد که در شکل ۱۷ برای رفع این خطا و برای تشخیص دقیق تر آسیب های چندانکه با استفاده از تئوری بیزین، از شکل مودهای بالاتر ولی فقط با انتخاب و ترکیب اثر تعداد محدودی از آنها استفاده شده است.



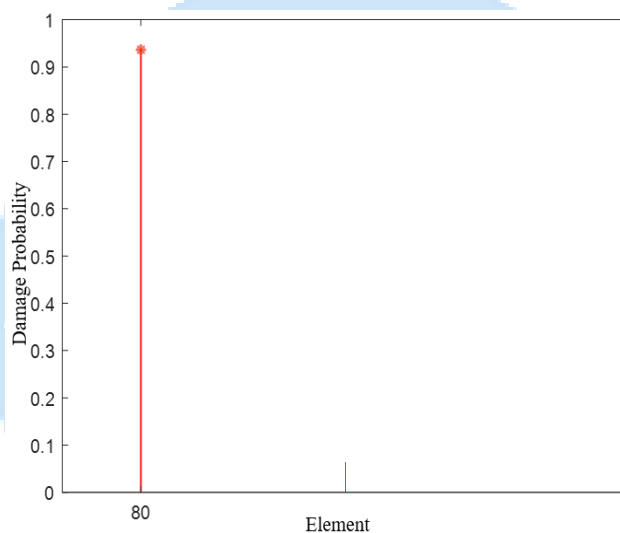
شکل ۱۲: نمودار مقادیر شاخص انرژی کرنشی مودال اعضا در حالت ۱ با استفاده از اثر سه شکل مود



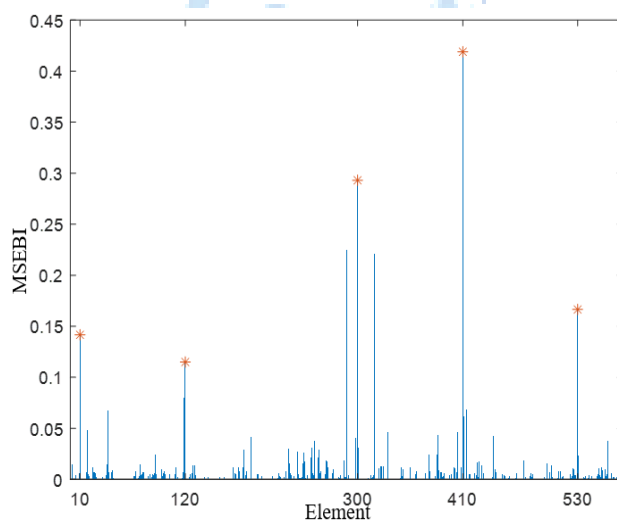
شکل ۱۳: احتمال آسیب دیدگی اعضا در حالت ۱ با استفاده از ترکیب اثر چهار شکل مود



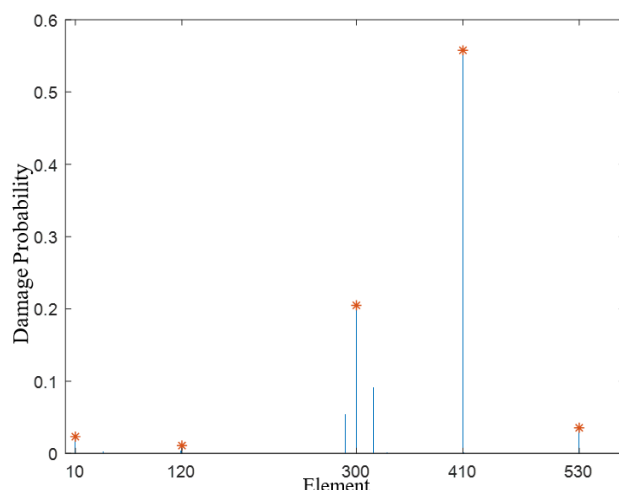
شکل ۱۴: نمودار مقادیر شاخص آسیب انرژی کرنشی مودال اعضا در حالت ۲ با استفاده از اثر پنج شکل مود



شکل ۱۵: احتمال آسیب دیدگی اعضا در حالت ۲ با استفاده از ترکیب اثر چهار شکل مود



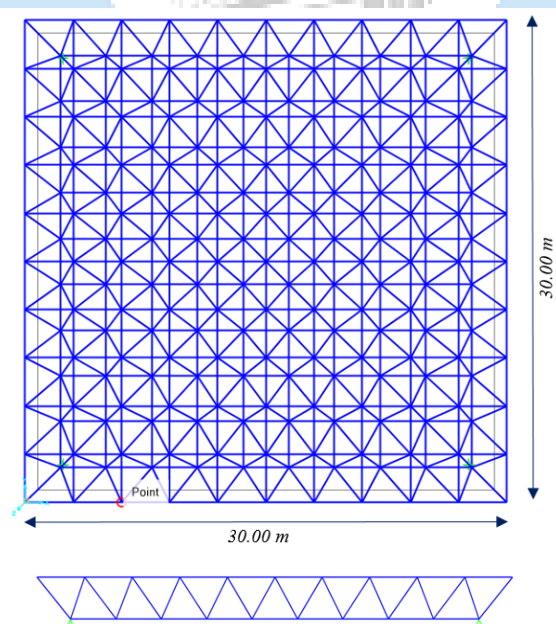
شکل ۱۶: نمودار مقادیر شاخص آسیب انرژی کرنشی مودال اعضا در حالت ۳ با استفاده از اثر چهارده شکل مود



شکل ۱۷: احتمال آسیب دیدگی اعضا در حالت ۳ با استفاده از ترکیب اثر شکل مودهای ۱۴، ۱۶ و ۱۸

۳-۷- شبکه دولایه

آخرین مدل عددی در بررسی تشخیص آسیب، شبکه دولایه دارای ۲۲۱ گره و ۸۰۰ عضو و ارتفاع ۲ متر می‌باشد. مشخصات شبکه مورنظر در شکل ۱۸ نشان داده شده است. این شبکه دارای چهار تکیه‌گاه مفصلی واقع در گوشه‌های لایه پایین، سطح مقطع برای اعضای لایه بالا، پایین و مورب به ترتیب ۰/۰۰۱۸، ۰/۰۰۱۲ و ۰/۰۰۱ مترمربع، مدول الاستیسیته $2/1 \times 10^2$ گیگاپاسکال و وزن مخصوص اعضا ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. در تکیه‌گاه‌ها جابه‌جایی در سه راستای X، Y و Z مهار شده است. این سازه دارای ۶۵۱ درجه آزادی فعال می‌باشد. جهت مدل‌سازی سازه آسیب‌دیده، دو حالت آسیب مطابق جدول ۵ اعمال شده و مدل‌سازی آسیب به هر دو روش کاهش در مدول الاستیسیته و سطح مقطع، مدل‌سازی در نرم‌افزار SAP2000 و آنالیز مودال با استفاده از نرم‌افزار Matlab صورت گرفته است.

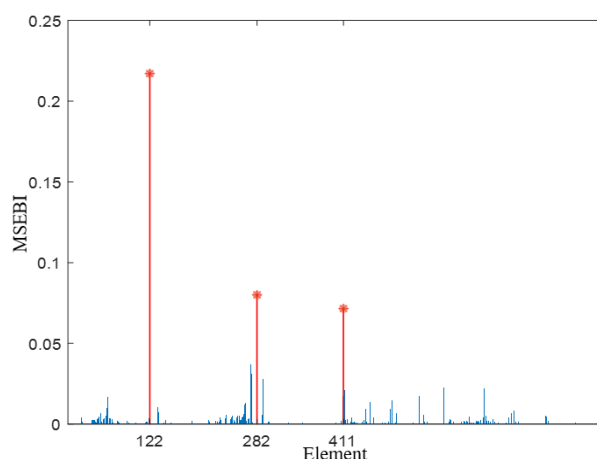


شکل ۱۸: شبکه دولایه ۸۰۰ عضوی

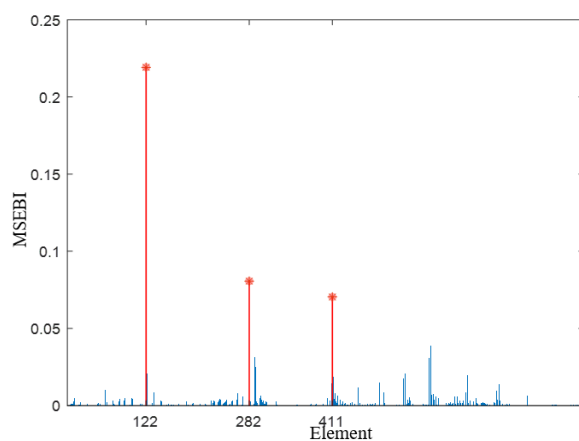
جدول ۵: مشخصات حالت‌های آسیب در شبکه دولایه ۸۰۰ عضوی

| حالت | شماره المان | شدت آسیب (درصد) |
|------|-------------|-----------------|
| ۱ | ۱۲۲ | ۲۰ |
| | ۲۸۲ | ۱۵ |
| | ۴۱۱ | ۱۰ |
| ۲ | ۱۲۸ | ۲۰ |
| | ۱۶۸ | ۲۰ |
| | ۴۱۸ | ۱۵ |
| | ۵۴۳ | ۳۰ |
| | ۷۰۴ | ۲۵ |
| | ۷۷۰ | ۳۰ |

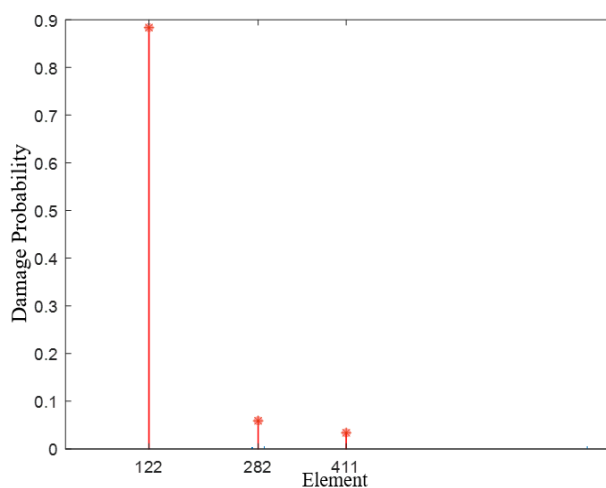
در حالت آسیب اول، سه المان که هر کدام در لایه بالا، پایین و مورب سازه قرار دارند، با شدت آسیب نزولی به صورت ۲۰، ۱۵ و ۱۰ درصد تحت آسیب قرار گرفته‌اند. با توجه به شکل‌های ۱۹، ۲۰ و ۲۱ که مربوط به حالت اول می‌باشند؛ مقادیر شاخص انرژی کرنشی مودال و احتمال آسیب‌دیدگی برای اعضا به دست آمده و همان‌طور که ملاحظه می‌گردد المان‌های آسیب‌دیده با استفاده از چهار و شش شکل مود تشخیص داده شدند که با مقایسه دو نمودار اول نیز مشهود است که در حالت استفاده از ۶ شکل مود با دقت مناسب‌تری شناسایی شده و میزان خطا کمتر می‌باشد. در شکل ۲۱ نیز احتمال آسیب‌دیدگی اعضا با استفاده از ترکیب شکل مودهای ۱۶، ۱۹ و ۲۰ حاصل شده که ملاحظه می‌شود المان‌های آسیب‌دیده به طور دقیق شناسایی شده‌اند. در سناریو دوم، تعداد بیشتری از المان‌ها نسبت به حالت اول، به طور رندوم به عنوان المان‌های آسیب‌دیده انتخاب شده‌اند. با توجه به شکل‌های ۲۲ و ۲۳ مشخص است که برای تشخیص المان‌های آسیب‌دیده با تعداد اعضای بالا، نیاز به شکل مودهای بیشتری می‌باشد و همچنین برای افزایش دقت و کاهش خطا نیز در مودهای بالاتر یعنی ۲۰ مود نتیجه‌ی بهتری حاصل می‌گردد؛ در حالی که برای تشخیص المان‌های آسیب‌دیده با تعداد اعضای کم، استفاده از فرکانس‌های اولیه کفایت می‌کند. در نهایت نیز با استفاده از ترکیب شکل مودهای ۲۰ و ۲۲ نتیجه نشان می‌دهد که تشخیص آسیب با کمترین خطا و بیشترین دقت صورت گرفته است.



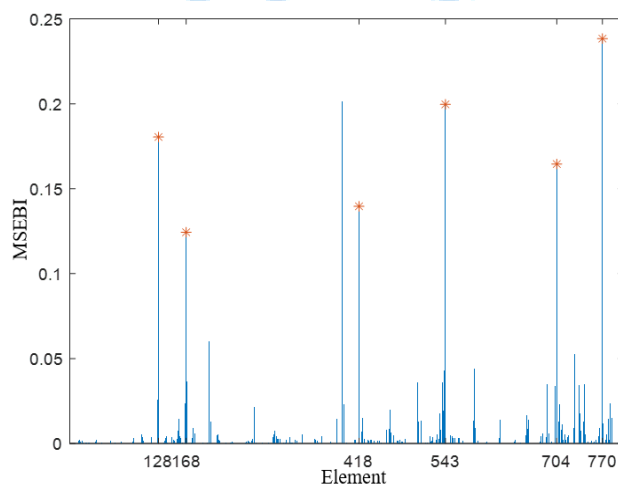
شکل ۱۹: نمودار مقادیر شاخص انرژی کرنشی مودال اعضا در حالت ۱ با استفاده از اثر چهار شکل مود



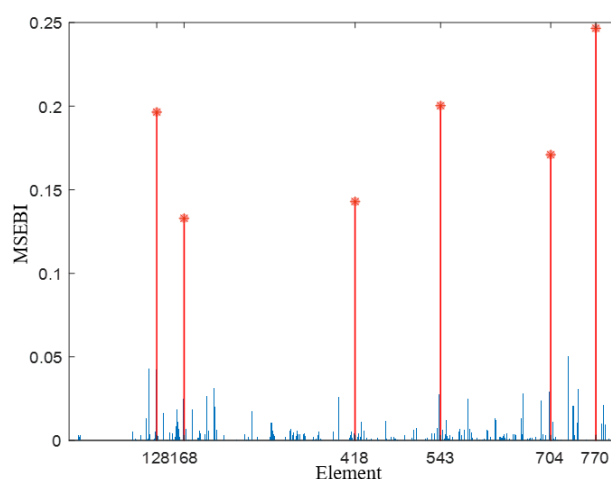
شکل ۲۰: نمودار مقادیر شاخص آسیب انرژی کرنشی مودال اعضا در حالت ۱ با استفاده از اثر شش شکل مود



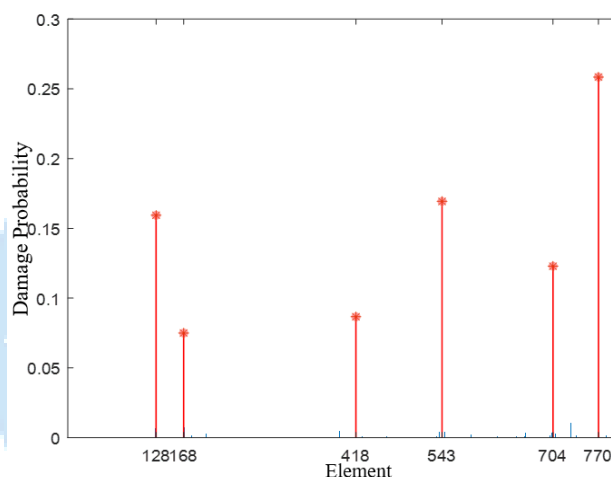
شکل ۲۱: احتمال آسیب دیدگی اعضا در حالت ۱ با استفاده از ترکیب اثر شکل مودهای ۱۶، ۱۹ و ۲۰



شکل ۲۲: نمودار مقادیر شاخص انرژی کرنشی مودال اعضا در حالت ۲ با استفاده از اثر دوازده شکل مود



شکل ۲۳: نمودار مقادیر شاخص انرژی کرنشی مودال اعضا در حالت ۲ با استفاده از اثر بیست شکل مود



شکل ۲۴: احتمال آسیب دیدگی اعضا با استفاده از ترکیب اثر شکل مودهای ۲۰ و ۲۲

۸- نتیجه گیری

- در این مقاله، لزوم پیشبرد موضوع تشخیص محل آسیب، به عنوان شاخه‌ای تحت گسترش جهت جلوگیری از فروریزش سازه‌ها و پیش‌بینی خرابی در آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور مراحل زیر طی شد و برخی نتایج حاصله در ادامه آورده شد.
- روش پیشنهادی ترکیب انرژی کرنشی مودال که یکی از انواع روش‌های دینامیکی است، با تئوری احتمالاتی بی‌زین به اجمال معرفی و بیان شد و برای نیل به هدف صحت و دقت کارائی روش مذکور، بر روی سه سازه شبکه، گنبد و چلیک دولایه که از انواع سازه‌های فضاکار محسوب می‌شوند، بررسی شد.
 - نتایج نشان دادند با توجه به اینکه در نمودارهای شاخص آسیب انرژی کرنشی مودال، شدت نسبی اعضای آسیب‌دیده قابل ملاحظه می‌باشد، لذا روش انرژی کرنشی مودال در شدت‌های بسیار کم و ناچیز همانند ۱۰ درصد، حساسیت کمتری داشته و تشخیص آن به علت تغییرات کم مشخصات مودال سازه ممکن است دارای خطای بیشتری نسبت به شدت‌های بیشتر باشد.
 - در سایر موارد به علت محسوس بودن تغییرات پارامترهای مودال در شدت آسیب بالاتر، روشن است که این روش برای حالت‌های با شدت بزرگ‌تر در شناسایی محل آسیب، عملکرد مطلوبی از خود نشان داده است.

• از طرفی با نظر به نتایج نمودارهای شاخص آسیب انرژی کرنشی مودال جهت تشخیص محل آسیب‌های چندگانه به تعداد مودهای بالاتری نیاز می‌باشد و همچنین برای تشخیص دقیق‌تر در تئوری بیزین نیز از مودهای بالاتر استفاده شده اما در حالت‌های آسیب تکی مودهای اولیه می‌تواند پاسخگوی تعیین محل آسیب با دقت بالا باشد، علاوه بر این؛ در حالتی که تعداد المان‌های آسیب‌دیده بیشتر است، استفاده از ترکیب غیرپیوسته برخی از شکل مودهای انتخابی بر اساس روش آزمون و خطا، نتیجه دقیق‌تری را در تشخیص محل آسیب و کاهش خطا ارائه می‌دهد.

با توجه به اینکه بخشی از نتایج از طریق آزمون و خطا بدست آمده، و ترکیب مودهای پیوسته پاسخگو نبوده، لذا در تحقیقات آتی نسبت به بررسی دقیق‌تر این روش پرداخته خواهد شد. پیشنهاد می‌شود در ادامه، این تحقیق بر روی سازه‌های فضاکار از نوع تک لایه با اتصالات غیرمفصلی انجام شود و همچنین با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مناسب علاوه بر محل آسیب، شدت آسیب نیز تشخیص داده شود.

۹- منابع و مراجع

- [1] Zenzen, R., Belaidi, I., Khatir, S. and Wahab, M.A. (2018). A damage identification technique for beam-like and truss structures based on FRF and Bat Algorithm. *Comptes Rendus Mécanique*, 346(12), 1253-1266.
- [2] Altunışık, A.C., Okur, F.Y., Karaca, S. and Kahya, V. (2019). Vibration-based damage detection in beam structures with multiple cracks: modal curvature vs. modal flexibility methods. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 34(1), 33-53.
- [3] Alvandi, A. and Cremona, C. (2006). Assessment of vibration-based damage identification techniques. *Journal of sound and vibration*, 292(1-2), 179-202.
- [4] Cawley, P. and Adams, R.D. (1979). The location of defects in structures from measurements of natural frequencies. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 14(2), 49-57.
- [5] Pandey, A., Biswas, M. and Samman, M. (1991). Damage detection from changes in curvature mode shapes. *Journal of sound and vibration*, 145(2), 321-332.
- [6] Pandey, A. and Biswas, M. (1994). Damage detection in structures using changes in flexibility. *Journal of sound and vibration*, 169(1), 3-17.
- [7] Yan, A. and Golinval, J. C. (2005). Structural damage localization by combining flexibility and stiffness methods. *Engineering Structures*, 27(12), 1752-1761.
- [8] Shi, Z., Law, S. and Zhang, L. (1998). Structural damage localization from modal strain energy change. *Journal of sound and vibration*, 218(5), 825-844.
- [9] Park, N. G. and Park, Y.S. (2005). Identification of damage on a substructure with measured frequency response functions. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 19, 1891-1901.
- [10] Kao, C. and Hung, S. L. (2003). Detection of structural damage via free vibration responses generated by approximating artificial neural networks. *Computers & Structures*, 81(28-29), 2631-2644.
- [11] Yang, J.N., Lei, Y., Lin, S. and Huang, N. (2004). Hilbert-Huang based approach for structural damage detection. *Journal of engineering mechanics*, 130(1), 85-95.
- [12] Law, S., Li, X., Zhu, X. and Chan, S.L. (2005). Structural damage detection from wavelet packet sensitivity. *Engineering structures*, 27(9), 1339-1348.
- [13] Nair, K.K., Kiremidjian, A.S. and Law, K.H. (2006). Time series-based damage detection and localization algorithm with application to the ASCE benchmark structure. *Journal of Sound and Vibration*, 291(1-2), 349-368.
- [14] Seyedpoor, S.M. and Montazer, M. (2016). A two-stage damage detection method for truss structures using a modal residual vector based indicator and differential evolution algorithm. *Smart Structures and Systems*, 17(2), 347-361.
- [15] Wu, S., Zhou, J., Rui, S. and Fei, Q. (2017). Reformulation of elemental modal strain energy method based on strain modes for structural damage detection. *Advances in Structural Engineering*, 20(6), 896-905.
- [16] Ghiasi, R., Fathnejat, H. and Torkzadeh, P. (2019). A three-stage damage detection method for large-scale space structures using forward substructuring approach and enhanced bat optimization algorithm. *Engineering with Computers*, 35, 857-874.
- [17] Beheshti Aval, S.B., Ahmadian, V., Maldar, M. and Darvishan, E. (2020). Damage detection of structures using signal processing and artificial neural networks. *Advances in Structural Engineering*, 23(5), 884-897.
- [18] Niu, Z. (2020). Frequency response-based structural damage detection using Gibbs sampler. *Journal of Sound and Vibration*, 470, 115160.

- [19] Avci, O., Abdeljaber, O., Kiranyaz, S., Hussein, M., Gabbouj, M. and Inman, D.J. (2021). A review of vibration-based damage detection in civil structures: From traditional methods to Machine Learning and Deep Learning applications. *Mechanical systems and signal processing*, 147, 107077.
- [20] Teimouri, H., Davoodi, M.R., Mostafavian, S.A. and Khanmohammadi, L. (2021). Damage Detection in Double Layer Grids with Modal Strain Energy Method and Dempster-Shafer Theory. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 54(2), 253-266.
- [21] Zhang, Y., Luo, Y., Guo, X. and Li, Y. (2022). A new damage detection method of single-layer latticed shells based on combined modal strain energy index. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 172, 109011.
- [22] Roy, K. (2017). Structural damage identification using mode shape slope and curvature. *Journal of Engineering Mechanics*, 143(9), 04017110.
- [23] Rytter, A. *Vibrational based inspection of civil engineering structures*, (1993). Ph.D.-Thesis defended publicly at the University of Aalborg.
- [24] Chopra, A.K. (1995). *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering*, Prentice-Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics Prentice-Hall International, Inc, Des Moines, IA. xxvi, 729 pp. ISBN: 0-13-521063-1.
- [25] Seyedpoor, S. (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*, 47(1), 1-8.
- [26] Guo, H. and Li, Z. (2012). Structural damage identification based on Bayesian theory and improved immune genetic algorithm. *Expert Systems with Applications*, 39(7), 6426-6434.
- [27] Davoudi, M. (2013). Application of structural modal strain energy in determining the location of structural damage in double-layer grid, In: *8th National Civil Engineering Congress*. Babol Noshirvani University of Technology.

