

چکیده

هنگامی که سازه‌ها تحت بارهای متوسط تا شدید محیطی آسیب می‌بینند، مشخصات فیزیکی آنها مانند سختی، میرایی و در نتیجه شکل مودهای ارتعاشی آنها تغییر می‌نماید. تقریباً همه روش‌های عددی موجود برای شناسایی آسیب سازه‌ها از مؤلفه‌های انتقالی شکل مودی برای برآورد آسیب استفاده می‌نمایند. در این مقاله با استفاده از مؤلفه‌های انتقالی و دورانی اشکال مودی و تعریف توابع هدف مختلف بر این اساس، به شناسایی آسیب پرداخته شده است. به این منظور، یک الگوریتم به‌روزرسانی اتوماتیک تکرار شونده در نرم‌افزار MATLAB ایجاد شده که از نرم‌افزار OpenSees به‌عنوان موتور تحلیل اجزای محدود استفاده می‌کند. جهت ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، دو سازه فلزی با قاب خمشی و مهاربندی برای سه سناریوی مختلف آسیب آنالیز گردیدند. برداشت داده‌ها به سه صورت مؤلفه‌های انتقالی شکل مودی، مؤلفه‌های دورانی و کل مؤلفه‌های شکل مودی انجام گرفته است. تفاضل فرکانس‌های طبیعی و اشکال مودی، معیار ارزیابی شاخص مودی و ماتریس نرمی به‌عنوان توابع هدف مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج تحلیل‌های گسترده نشان می‌دهد که استفاده از مؤلفه‌های دورانی در تعیین دقیق موقعیت و شدت آسیب‌ها تأثیر به‌سزایی دارد. همچنین بررسی نتایج تحلیل حاکی از کارآمدی روش در شناسایی آسیب حتی با داده‌های آغشته به نوفه می‌باشد.

واژگان کلیدی: روش به‌روزرسانی، بهینه‌سازی تکرار شونده، روش شناسایی آسیب، درجات آزادی انتقالی، درجات آزادی دورانی.

تأثیر مؤلفه‌های دورانی شکل‌های مودی در شناسایی آسیب سازه‌های سه‌بعدی

زهرا تورنگ

دانشجوی دکتری، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه
بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

امید بهار (نویسنده مسئول)

دانشیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و
مهندسی زلزله، تهران، ایران، omidbahar@iiees.ac.ir

۱- مقدمه و تاریخچه تحقیقات

فیزیکی سازه می‌گردد که بر رفتار دینامیکی آن تأثیرگذار است؛ بنابراین، روش‌های زیادی بر پایه ارتعاش برای شناسایی آسیب در ادبیات فنی ارائه گردیده که قابلیت شناسایی آسیب با سرعت و هزینه مناسب را دارند. برخی از این روش‌ها بر پایه یافتن میزان حداقل یک تابع هدف یا خطا بنا نهاده شده که این تابع اختلاف بین مقادیر داده‌های ارتعاشی حاصل از آزمایش‌های مودال و نتایج تحلیلی را بیان می‌کند.

طی دو دهه اخیر به‌طور گسترده‌ای از داده‌های ارتعاشی و مودال جهت شناسایی، تعیین محل و شدت آسیب در سازه‌ها استفاده شده است.

ارزیابی آسیب‌های سازه‌ای و پایش سلامت در دهه‌های اخیر گسترش قابل توجهی یافته است. شناسایی آسیب وارد بر یک سازه تحت بارهای عملکردی، بار ضربه، زلزله، فرسایش یا اتفاق‌های دیگر در سازه، می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در خصوص شرایط سازه‌ای و عملکردی آن فراهم کند. روش‌های سنتی تعیین آسیب، چه روش‌های موضعی تجربی و چه روش‌های چشمی، نیاز به این دارند که اطراف محل آسیب شناخته شده و قابل رؤیت باشد که این در سازه‌های پیچیده غیرممکن است. لذا، وجود روش‌های کاربردی بدون نیاز به تخریب در این گونه سازه‌ها ضروری می‌باشد. پر واضح است که وجود آسیب موجب تغییر در مشخصات

هدف دیگر می‌توان به روش معرفی شده توسط قدرتی و همکاران [۲۱] اشاره نمود. آنها با استفاده از مؤلفه‌های قطری و یادقطری ماتریس نرمی کلی سازه آسیب‌دیده و مدل تحلیلی به‌خوبی توانستند سازه‌های موجود را به‌روزرسانی نمایند. سلطانی و صباهر [۲۲] از اختلاف انحنای مودی برای تشخیص آسیب در سازه بتنی با دیوار برشی استفاده کردند و نتایج تحقیقات آنها نشان داد که این فاکتور برای تشخیص آسیب‌های بزرگ خیلی خوب عمل می‌کند اما در شناسایی آسیب‌های ضعیف مؤثر نیست.

قنادی و همکاران [۲۳] در سال ۲۰۲۰ مطالعاتی روی شناسایی آسیب در سازه‌ها انجام دادند که به مقایسه دو تابع هدف معیار ارزیابی شاخص مودی و یک تابع دیگر که ترکیبی از معیار ارزیابی شاخص مودی و بسامد زاویه‌ای^۲ بود پرداختند. همچنین دقت نتایج سه روش بهینه‌ساز چندرسانه‌ای^۳، الگوریتم سینوسی کسینوسی^۴ و بهینه‌سازی هریس هواک^۵ را ارزیابی نمودند. ایشان با بررسی دو مدل مطالعاتی و نمونه آزمایشگاهی یک قاب برشی سه‌طبقه نشان دادند که استفاده از تابع هدف ترکیبی معیار ارزیابی شاخص مودی و بسامد زاویه‌ای به همراه الگوریتم بهینه‌سازی چندرسانه‌ای در بین روش‌های مقایسه شده، منجر به نتایج دقیق‌تری در شناسایی آسیب گردیده و خطای کمتری در تشخیص المان‌های سالم داشته است.

احمدی ندوشن و همکاران [۲۴] در سال ۲۰۲۰ طی مقاله‌ای یک روش برای تشخیص آسیب ارائه کردند که با تعریف یک شاخص آسیب متشکل از انرژی کرنشی مودال المان‌ها و اعضای قطری ماتریس نرمی سازه و به کمک الگوریتم بهبودیافته بهینه‌سازی مبتنی بر یادگیری المان‌های آسیب‌دیده و میزان آسیب آنها را شناسایی می‌نماید. آنها با مطالعه مثال‌های عددی عملکرد این روش را با الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر یادگیری مقایسه نمودند که نتایج حاکی از دقت کافی روش بهبود یافته پیشنهادی ایشان بود.

گومز و همکاران [۲۵] در سال ۲۰۲۰ طی مطالعاتی به شناسایی آسیب در سازه‌های صفحه‌ای پرداختند. در این تحقیق با استفاده از مشخصه‌های مودال سازه و به کارگیری الگوریتم بهبود یافته گل

روش‌های مختلف بر اساس تعریف تابع هدفشان، پارامترهای مودال مختلفی را به کار گرفتند. برخی از آنها مانند روش‌های ارائه شده توسط ونگ و همکاران [۱]، اسماعیل و همکاران [۲]-۴، فیاح و همکاران [۵]، صرفاً بر روی تغییرات فرکانس‌های طبیعی تکیه کرده‌اند، درحالی‌که توابع هدف به کار گرفته شده در تحقیقات رحمان و همکاران [۶-۱۰] و اسماعیل و همکاران [۱۱] به اطلاعات مودی دیگر، مانند اشکال مودی، میرایی و غیره نیاز دارند. از بین روش‌های موجود در ادبیات فنی می‌توان به روش‌های بر پایه معیار ارزیابی مشخصه مودی^۱ [۱۲]، انرژی کرنشی مودی [۱۳]، تجزیه انرژی کرنشی مودی [۱۴-۱۵] و ماتریس نرمی دینامیکی نیز اشاره کرد.

در واقع، روش ماتریس نرمی بر این اساس بنا نهاده شده که یک عضو آسیب‌دیده نرمی درجات آزادی وابسته به خود را تغییر می‌دهد. پندی و بیسواس [۱۶] در سال ۱۹۶۴ یک روش برای شناسایی و تعیین محل آسیب بر اساس تغییرات نرمی مودال سازه ارائه کردند. نتایج بررسی‌های تجربی و عددی آنها نشان داد که این روش قادر است با استفاده از چند مود اول سازه موقعیت آسیب را به‌خوبی شناسایی کند. آنها ثابت نمودند که استفاده از نرمی مودال که فرکانس‌های طبیعی و اشکال مودی را هم‌زمان با هم به کار می‌گیرد از کارایی بیشتری نسبت به روش‌هایی که فقط از یکی از این دو مشخصه استفاده می‌کنند، برخوردار است. یان [۱۷] و جایشیا [۱۸] نیز در تحقیقات خود عملکرد ماتریس نرمی و سختی مودال را در شناسایی آسیب سازه‌ها بسیار مؤثر یافتند.

در تحقیقی دیگر، نجفی و همکاران [۱۹] تلاش کردند با استفاده از انحنای ماتریس نرمی مودال آسیب المان‌های تیر را تشخیص دهند و نتایج تحقیقات آنها نشان داد که این مشخصه معیار خوبی در شناسایی آسیب می‌باشد. در یک مطالعه گسترده الکایم و همکاران [۲۰] توابع هدف مختلفی را برای مقایسه مشخصات دینامیکی مدل تحلیلی و سازه آزمایشی ارائه کردند و با آنالیز اجزای محدود و استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف سازه‌های آسیب‌دیده را به‌روزرسانی نمودند و با بررسی یک نمونه آزمایشی، مؤثر بودن روش خود را نشان دادند. به‌عنوان یک تابع

قاب‌های سه‌بعدی مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا یک برنامه اتوماتیک به‌روزرسانی سازه که به روش تکرارشونده عمل می‌کند در فضای نرم‌افزار MATLAB ایجاد گردید که از نرم‌افزار اجزای محدود OpenSees برای تحلیل سازه، بهره می‌گیرد. به منظور شناسایی آسیب در این تحقیق توابع هدف مختلفی مورد استفاده قرار گرفتند که در تعریف آنها شکل‌های مودی تجربی و تحلیلی به کار گرفته شده است. این توابع ترکیبی از معیار ارزیابی مودی، تفاضل اشکال مودی، تفاضل ماتریس نرمی مودال و تفاضل فرکانس‌های طبیعی سازه آسیب‌دیده موجود و مدل تحلیلی می‌باشند. برای بررسی عملکرد هر دسته از مؤلفه‌های مودی در به‌روزرسانی مدل سه روش داده‌برداری مختلف شامل: الف) مؤلفه‌های انتقالی اشکال مودی، ب) مؤلفه‌های دورانی اشکال مودی و پ) تمامی مؤلفه‌های مودی در درجات آزادی سازه در نظر گرفته شده است. تحلیل‌های عددی بر روی دو قاب فولادی انجام گردید که یکی قاب سه‌بعدی خمشی و دیگری قاب سه‌بعدی دارای مهاربند می‌باشد و برای هر یک از قاب‌ها سه سناریوی آسیب تعریف شده است که در آنها آسیب به‌صورت درصد کاهش سختی المان‌ها مشخص می‌گردد. در ادامه مقاله روش به‌کار گرفته شده تشریح و نتایج تحلیل‌ها ارائه شده است.

۲- برنامه به‌روزرسانی مدل

به‌منظور تحلیل سازه‌ها و به‌روزرسانی مدل، یک روش تکرار شونده خودکار در نرم‌افزار MATLAB برنامه‌نویسی شده که از نرم‌افزار OpenSees به‌عنوان موتور تحلیلی اجزای محدود خود استفاده می‌کند. این برنامه داده‌های تجربی را که همان مقادیر شکل مودهای اندازه‌گیری شده از سازه آسیب‌دیده و فرکانس‌های طبیعی آن در سناریوی آسیب مورد نظر هستند، به‌عنوان ورودی دریافت می‌کند. روند شناسایی المان آسیب‌دیده و شدت آسیب در این برنامه به نحوی است که در ابتدا سازه سالم با توجه به نقشه‌های عین ساخت ساختمان موجود، در نرم‌افزار اجزای محدود مدل می‌گردد به صورتی که ضرایب سختی المان‌ها قابل تغییر باشد. در هر گام از تحلیل، شکل‌های مودی و فرکانس‌های طبیعی سازه

آفتابگردان آسیب‌های صفحات به‌خوبی شناسایی گردید و نشان دادند که این الگوریتم در شناسایی آسیب از الگوریتم ژنتیک متداول دقیق‌تر و کارآمدتر است. رضوی و حدادی [۲۶] در سال ۲۰۲۰ جهت یافتن آسیب در سازه‌های بزرگ با پیچیدگی‌های هندسی از آنالیز اجزای محدود بر پایه حساسیت استفاده کردند. در تحقیق مذکور دو مدل تحلیلی شامل یک شبکه دولایه مسطح و یک گنبد دولایه بررسی گردید. ایشان تابع هدف را با داده‌های پاسخ شتاب تعریف نمودند که نتایج حاکی از مؤثر بودن روش در شناسایی آسیب بود. گوناییدین و همکاران [۲۷] در سال ۲۰۱۸ با مطالعه عددی و آزمایش بر روی یک قاب دو طبقه بتنی با مقیاس یک‌دوم، تأثیر مثبت به‌روزرسانی مدل را روی تحلیل لرزه‌ای و تعیین مشخصات دینامیکی سازه مانند شکل‌های مودی، فرکانس‌های طبیعی و میرایی نشان دادند. آنها در تحلیل‌های خود از داده‌های مربوط به ارتعاش محیطی استفاده کردند. چالیور و همکاران [۲۸] در سال ۲۰۲۰ یک روش پایش سلامت به نام سیستم پایش پذیرش امیدانس بی‌سیم^۶ ارائه نمودند که می‌تواند با اندازه‌گیری پاسخ فرکانسی یک سازه نشانه‌های اولیه آسیب مانند ترک‌های بتن یا تسلیم فولاد را تشخیص دهد.

مرور ادبیات فنی و بررسی نتایج تحقیقات مذکور، حاکی از مؤثر بودن استفاده از اطلاعات مودی در تشخیص سازه‌ها می‌باشد. در حالت کلی، بردارهای شکل مودی در سازه‌ها شامل مؤلفه‌های دورانی و انتقالی در درجات آزادی سازه می‌باشند. با توجه به اینکه اندازه‌گیری مؤلفه‌های شکل مودی در درجات آزادی دورانی تقریباً غیرممکن می‌باشد، در اکثر تحقیقات انجام شده فقط از مؤلفه‌های انتقالی شکل مود در تشکیل توابع هدف استفاده شده است. البته رثوفی و بهار [۲۹] در سال ۲۰۱۳ با استفاده از تبدیل موجک به شناسایی موقعیت آسیب در سازه‌ها پرداختند. آنها در تحلیل‌های خود از مؤلفه دورانی شکل مود در گره‌ها استفاده نمودند، لیکن در آن تحقیق فقط قاب‌های دو بعدی بررسی گردید.

در این تحقیق تأثیر مؤلفه‌های دورانی شکل مود در افزایش کارایی روش‌های به‌روزرسانی و تدقیق موقعیت و میزان آسیب در

مدل سازه‌ای است. معادلاتی که باید کمینه گردند، توابع هدف‌اند که در بخش‌های بعدی به‌طور کامل تشریح می‌گردند. در این مسئله بهینه‌سازی با مجموعه غیرخطی از توابع هدف $F_i(x)$ روبه‌رو هستیم که هر یک از آنها می‌بایست حداقل گردند. در واقع تابع حداقل مربعاتی که باید کمینه گردد به‌صورت زیر تعریف می‌گردد [۳۰].

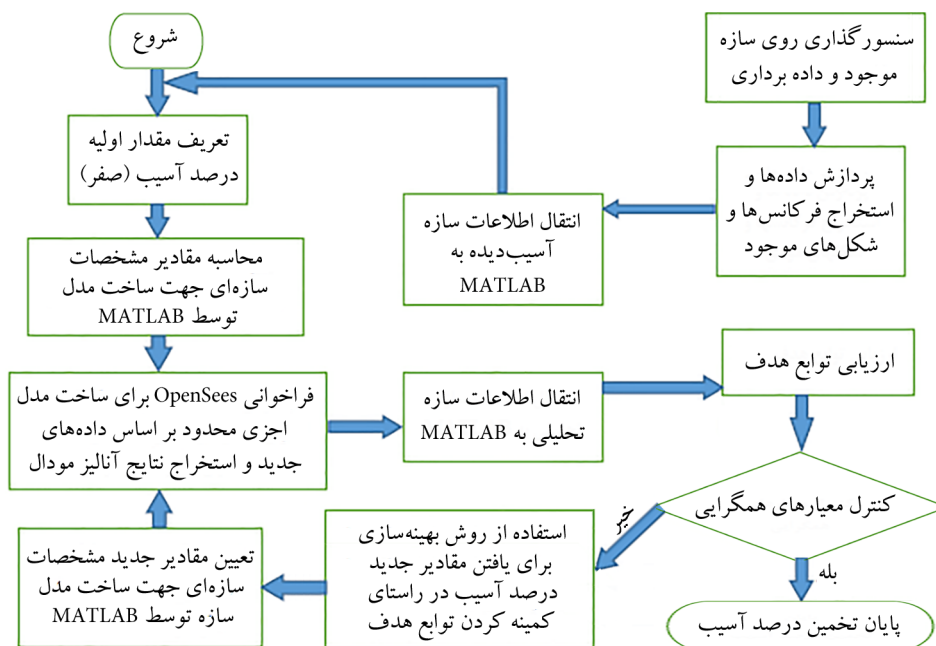
$$F(x) = \begin{Bmatrix} F_1(x) \\ F_2(x) \\ \vdots \\ F_n(x) \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\min f(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (F_i(x))^2 \quad (2)$$

در روند تحلیل، توابع هدف که در بخش ۲-۱ به تفصیل شرح داده شده است، با استفاده از روش حداقل مربعات غیرخطی^۷ در نرم‌افزار MATLAB بهینه‌سازی می‌گردند. در هر گام از برنامه برای انتخاب مختصات نقطه جدید که در مطالعه حاضر همان ضرایب سختی المان‌ها می‌باشند، از الگوریتم ناحیه امن بازتابنده^۸ استفاده می‌گردد. در این پژوهش برای هر کدام از سازه‌ها سه سناریوی آسیب بررسی شده است. آسیب در کلیه سناریوهای مورد نظر به‌صورت کاهش در میزان سختی المان آسیب‌دیده لحاظ شده که به شکل درصدی از سختی اولیه المان سالم تعریف می‌شود.

محاسبه و برای بررسی توابع هدف به نرم‌افزار MATLAB منتقل می‌گردد. پس از بررسی و کنترل توابع هدف، توسط الگوریتم بهینه‌سازی ضرایب سختی جدیدی تخمین زده می‌شود. در گام بعدی آنالیز، با توجه به ضرایب حاصل از محاسبات نرم‌افزار MATLAB برای سختی المان‌ها، مدل سازه‌ای در نرم‌افزار اجزای محدود به‌روزرسانی می‌گردد، در واقع یک مدل سازه‌ای جدید با ضرایب جدید محاسبه شده برای سختی ساخته می‌شود. پس از تحلیل و استخراج اطلاعات مودی توابع هدف مورد نظر مجدداً محاسبه و بررسی می‌گردند. تکرار تحلیل‌ها تا زمانی ادامه می‌یابد که معیارهای همگرایی تعریف شده برای توابع هدف ارضا شوند. جهت شفافیت موضوع، روند کار برنامه شناسایی آسیب در قالب یک فلوچارت در شکل (۱) ارائه گردیده است.

روش‌های بهینه‌سازی بسیاری وجود دارند که به‌طور گسترده در مهندسی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، یکی از آنها که برای مهندسی سازه و به‌روزرسانی مدل مناسب است روش حداقل مجموع مربعات غیرخطی می‌باشد. این روش یکی از روش‌های متداول در حل مسائلی است که در آنها تعداد معادلات بیش از مجهولات می‌باشد. از آنجایی که در این تحقیق درصد آسیب المان‌ها به‌عنوان مجهول مسئله می‌باشد، در هر مدل تعداد مجهولات برابر با تعداد المان‌های



شکل (۱): فلوچارت نحوه عملکرد برنامه شناسایی آسیب.

داده‌های تجربی نیز یکی از توابع خطای مورد استفاده در به‌روزرسانی سازه‌ها می‌باشند که تابع مربوطه طبق رابطه (۴) محاسبه می‌گردد. در این تابع ϕ_A بردار مودی حاصل از تحلیل و ϕ_E بردار مودی تجربی می‌باشد.

$$EF2 = [\phi_A] - [\phi_E] \quad (4)$$

۲-۱-۳- تابع خطای سوم

معیار ارزیابی شاخص مودی (MAC) نیز یک تابع هدف متداول در شناسایی آسیب می‌باشد که توسط محققان بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است. این تابع مقیاسی از سازگاری اشکال مودی تحلیلی و تجربی فراهم می‌کند که برای شکل مود i ام تحلیلی و مود j ام تجربی یا آزمایشی به شکل زیر تعریف می‌شود.

$$MAC(\phi_{Ai}, \phi_{Ej}) = \frac{|\phi_{Ai}^T \cdot \phi_{Ej}|^2}{(\phi_{Ai}^T \cdot \phi_{Ai}) \cdot (\phi_{Ej}^T \cdot \phi_{Ej})} \quad (5)$$

تابع خطای سوم بر اساس معادله (۵) به‌صورت زیر بیان می‌گردد.

$$EF3 = [I] - MAC(\phi_{Ai}, \phi_{Ej}) \quad (6)$$

۲-۱-۴- تابع خطای چهارم

آخرین تابع خطا به‌صورت تفاضل ماتریس‌های نرمی سازه آسیب‌دیده واقعی و تحلیلی به شکل زیر می‌باشد که با استفاده از فرکانس‌های طبیعی و اشکال مودی محاسبه می‌گردد.

$$F4 = ([\phi_A] \times [\Lambda_A]^{-1} \times [\phi_A]^T) - ([\phi_E] \times [\Lambda_E]^{-1} \times [\phi_E]^T) \quad (7)$$

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، بر اساس این چهار تابع خطا سه تابع هدف در این تحقیق تعریف شده که به ترتیب، (۱) به‌عنوان یک معیار متداول (EF1 و EF2)، (۲) استفاده از EF1 و EF3 و در آخر (۳) تفاضل ماتریس نرمی مودال یا همان EF4 را شامل می‌گردند. در ادامه عملکرد این سه تابع هدف مورد بررسی قرار گرفته است.

۳- بررسی قاب خمشی پنج طبقه فولادی

به‌منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی برای شناسایی آسیب سازه، تحلیل‌های متعددی روی یک سازه قاب خمشی سه‌بعدی پنج طبقه فولادی انجام شده است. این سازه پیش‌تر توسط محققانی

با توجه به اینکه در این مقاله از داده‌های آزمایشگاهی یا اطلاعات جمع‌آوری‌شده از یک سازه واقعی استفاده نگردیده است، سازه‌های آسیب‌دیده بر اساس سناریوهای مورد نظر در نرم‌افزار اجزای محدود مدل شده و اطلاعات مودی استخراج و به‌عنوان داده‌های تجربی مورد استفاده قرار گرفته است.

۲-۱-۲- توابع هدف

توابع هدف در واقع به‌عنوان وسیله‌ای برای اندازه‌گیری تفاضل داده‌های تجربی با پیش‌بینی‌های حاصل از نتایج تحلیل‌های عددی به کار گرفته می‌شوند. در ادبیات فنی انواع مختلفی از توابع هدف مورد استفاده قرار گرفته است. در این مقاله چهار تابع ارزیابی خطا تعریف شده به‌نحوی که در برخی تحلیل‌ها برای تشخیص آسیب، دو تا از این توابع به‌عنوان تابع هدف به حداقل رسانده شده است. داده‌های مورد استفاده در این تحلیل‌ها فرکانس‌های طبیعی و اشکال مودی سازه‌های سه‌بعدی مورد مطالعه هستند و توابع خطای تعریف شده به شرح زیر می‌باشند. شایان‌ذکر است، هرکدام از این توابع به‌صورت بردار یا ماتریسی هستند که هر یک از مؤلفه‌های آنها مانند $f(x)$ یک $F_i(x)$ در رابطه (۲) در نظر گرفته می‌شوند و در نهایت مینیمم می‌گردد.

۲-۱-۱- تابع خطای اول

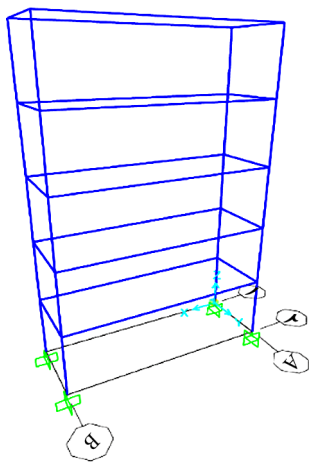
یکی از پرکاربردترین توابع هدف که تقریباً در تمامی روش‌های شناسایی آسیب مورد استفاده قرار گرفته است به‌نحوی تعریف می‌گردد که در آن فرکانس‌های مودی حاصل از آنالیز پیش‌رونده سازه با فرکانس‌های حاصل از آزمایش بر روی سازه‌های آسیب‌دیده مقایسه می‌شوند. اگر Λ_A و Λ_E به ترتیب ماتریس‌های قطری باشند که مجذور بسامد زاویه‌ای مودهای تحلیلی و تجربی عناصر قطری آنها را تشکیل می‌دهند، تابع خطای اول به شکل زیر بیان می‌گردد.

$$EF1 = \frac{([\Lambda_A] - [\Lambda_E])}{[\Lambda_E]} \quad (3)$$

۲-۱-۲- تابع خطای دوم

اختلاف بین مؤلفه‌های اشکال مودی حاصل از تحلیل و

شده که در سناریوی اول آسیب‌های جزئی در المان‌های تیر و ستون ایجاد گردیده، در سناریوی دوم، میزان آسیب‌ها نسبتاً زیاد و فقط در تیرها می‌باشد و در نهایت در سناریوی سوم، ترکیبی از آسیب‌های جزئی و شدید مورد بررسی قرار گرفته است. سناریوهای آسیب مورد نظر بر اساس محورهای قاب نشان داده شده در شکل (۲) و شماره‌های ارائه شده در نمودارهای نتایج، در جداول (۱) الی (۳) ارائه گردیده است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، آسیب در این تحقیق به صورت درصد کاهش سختی المان تعریف شده است.



شکل (۲): قاب خمشی پنج طبقه فولادی.

چون ونگ و همکاران در سال ۲۰۰۷، به کمک روشی به نام Cross-Model Cross-Mode و به اختصار CMCM که یک روش مستقیم می‌باشد، مورد به‌روزرسانی قرار گرفته است [۳۱]. در این سازه یک دهانه، طول دهانه در راستای محور x ها ۳ متر و در راستای محور y ها ۱ متر می‌باشد، ارتفاع طبقات نیز برابر با ۱ متر در نظر گرفته شده است. همچنین مدول یانگ (E) برای تمام اعضا $11 \times 10^4 / 2$ پاسکال است. سطح مقطع و ممان اینرسی اعضای این سازه به ترتیب برابر با $A = 2.825 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ و $I = 2.89 \times 10^{-6} \text{ m}^4$ می‌باشد. مدول الاستیسیته برشی و ثابت پیچشی نیز برای تمام اعضا به ترتیب برابر با $G = 8.08 \times 10^9 \text{ kg/m}^2$ و $J = 7.58 \text{ m}^4$ در نظر گرفته شدند. شکل (۲) تصویر قاب مورد نظر را نشان می‌دهد.

۳-۱- سناریوهای آسیب

در این تحقیق برای شناسایی آسیب در سازه سناریوهایی تعریف شده که با توجه به عدم وجود مدل آزمایشی، در ابتدا یک سازه با این آسیب‌ها در نرم‌افزار OpenSees مدل شده و مشخصات مودی آن به‌عنوان برداشت‌های سازه آسیب‌دیده موجود مورد استفاده قرار گرفته است. تحلیل‌ها برای سه سناریوی مختلف انجام

جدول (۱): سناریوی اول، آسیب‌های جزئی در قاب خمشی پنج طبقه فولادی.

موقعیت المان در شکل (۱)	B1 ستون طبقه اول	A2-B2 تیر طبقه اول	B1 ستون طبقه دوم	B1-B2 تیر طبقه دوم	A1 ستون طبقه سوم	A1-A2 تیر طبقه سوم	B2 ستون طبقه چهارم	A1-B1 تیر طبقه پنجم
شماره المان در نمودارهای نتایج	۲	۶	۱۰	۱۶	۱۷	۲۳	۲۸	۳۷
میزان آسیب (درصد کاهش سختی)	۹	۱۰	۸	۴	۷	۸	۶	۵

جدول (۲): سناریوی دوم، آسیب‌های شدید در قاب خمشی پنج طبقه فولادی.

موقعیت المان در شکل (۱)	A1-B1 تیر طبقه اول	A2-B2 تیر طبقه اول	A1-A2 تیر طبقه دوم	B1-B2 تیر طبقه دوم	A1-A2 تیر طبقه سوم	B1-B2 تیر طبقه سوم	B1-B2 تیر طبقه چهارم	A1-B1 تیر طبقه پنجم
شماره المان در نمودارهای نتایج	۵	۶	۱۵	۱۶	۲۳	۲۴	۳۲	۳۷
میزان آسیب (درصد کاهش سختی)	۳۵	۳۰	۲۵	۲۵	۲۰	۳۵	۲۰	۳۰

جدول (۳): سناریوی سوم، ترکیب آسیب‌های جزئی و شدید در قاب خمشی پنج طبقه فولادی.

موقعیت المان در شکل (۱)	B1 ستون طبقه اول	A1-B1 تیر طبقه اول	B2 ستون طبقه دوم	B1-B2 تیر طبقه دوم	A1 ستون طبقه سوم	B1-B2 تیر طبقه سوم	B2 ستون طبقه چهارم	A1-B1 تیر طبقه پنجم
شماره المان در نمودارهای نتایج	۲	۵	۱۲	۱۶	۱۷	۲۴	۲۸	۳۷
میزان آسیب (درصد کاهش سختی)	۵	۳۵	۱۰	۲۵	۱۵	۲۰	۲۵	۱۵

۲-۳- بررسی نتایج آنالیزها

همان‌طور که در بخش مقدمه ذکر گردید، در این تحقیق سه روش داده‌برداری مختلف بدین شرح مورد بررسی قرار گرفته: الف) مؤلفه‌های انتقالی اشکال مودی، ب) مؤلفه‌های دورانی اشکال مودی و ج) تمامی مؤلفه‌های مودی در کلیه درجات آزادی سازه. شایان‌ذکر است، شکل‌های مودهای استفاده شده در هر سه روش داده‌برداری یکسان است و تفاوت تنها در استفاده از مؤلفه‌های شکل مود در درجات آزادی دورانی یا انتقالی یا هر دو می‌باشد. همچنین سه تابع هدف مختلف مورد بررسی قرار گرفته که در بند ۲-۱ به‌طور مفصل معرفی گردیدند. لذا، با توجه به ترکیب روش‌های داده‌برداری و توابع هدف، برای هر یک از سناریوهای آسیب معرفی شده در بند ۳-۱ تعداد ۹ آنالیز انجام شده که نتایج در ادامه به‌صورت نمودارهای میله‌ای ارائه گردیده است. در این نمودارها محور افقی شماره المان و محور قائم میزان آسیب یا همان کاهش سختی را در روش‌های مختلف داده‌برداری نشان می‌دهد. در این تحلیل‌ها از شکل‌های مودی و فرکانس شش مود اول سازه استفاده گردید که فرکانس‌های هر شش مود برای سازه سالم و آسیب‌دیده تحت سناریوهای مورد نظر در جدول (۴) ارائه گردیده است.

۳-۲-۱- سناریوی آسیب جزئی در قاب خمشی فولادی

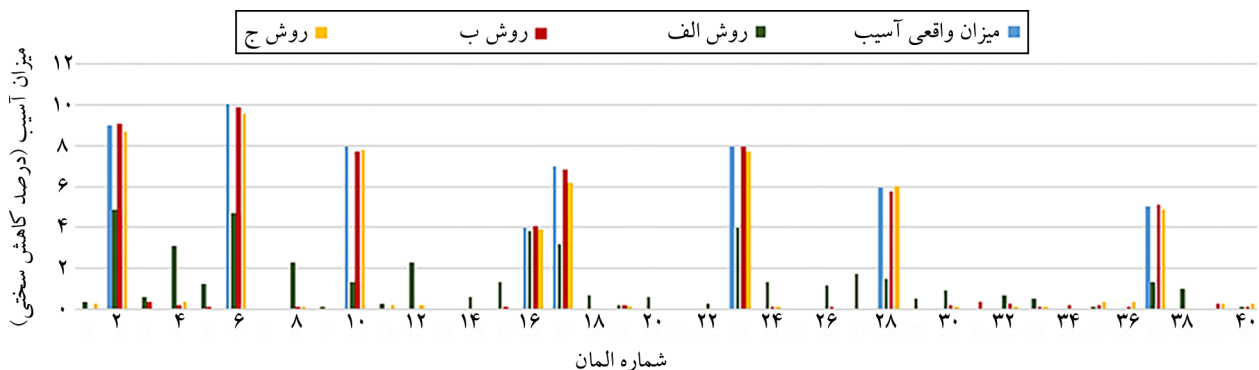
شکل (۳) نتایج شناسایی آسیب در سناریوی آسیب‌های نسبتاً ضعیف با استفاده از تابع هدف اول که همان تفاضل شکل‌های مودی می‌باشد را ارائه می‌نماید. دقت در این چارت نشان می‌دهد که در این سناریو داده‌های انتقالی به‌تنهایی قادر به شناسایی آسیب نیستند،

جدول (۴): فرکانس مودهای قاب خمشی پنج طبقه فولادی.

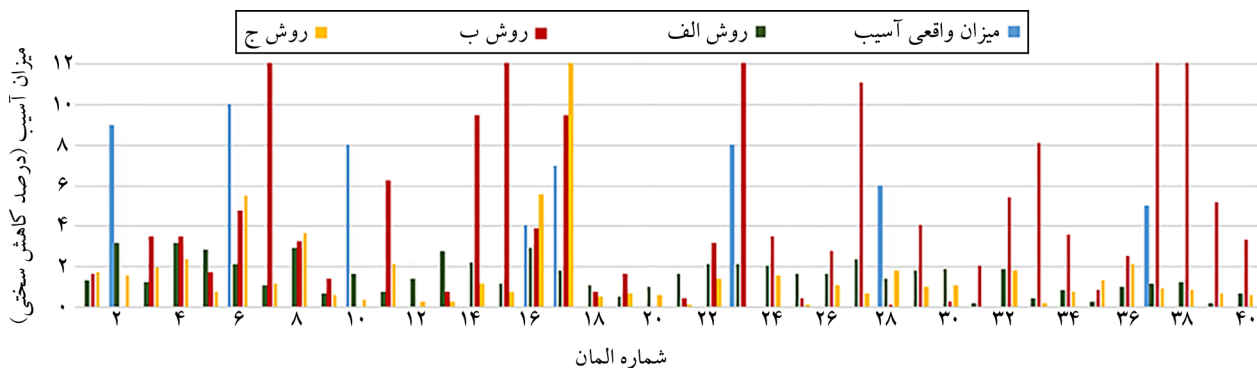
شماره مود	سازه سالم	سناریوی آسیب جزئی	سناریوی آسیب شدید	سناریوی آسیب ترکیبی
۱	۲/۴۵	۲/۴۳	۲/۳۷	۲/۴۲
۲	۲/۷۱	۲/۶۹	۲/۶۰	۲/۶۵
۳	۳/۴۸	۳/۴۴	۳/۲۸	۳/۳۲
۴	۶/۴۲	۶/۴۱	۶/۲۹	۶/۴۰
۵	۸/۴۳	۸/۳۷	۸/۱۸	۸/۲۵
۶	۱۱/۰۴	۱۰/۹۴	۱۰/۶۳	۱۰/۷۷

در برخی موارد به نظر می‌رسد موقعیت آسیب شناسایی شده اما مقدار آن درست نیست. لیکن وقتی داده‌های دورانی به‌تنهایی یا به همراه داده‌های انتقالی مورد استفاده قرار گرفتند، موقعیت و شدت آسیب بسیار دقیق شناسایی می‌گردد و در المان‌های سالم نیز آسیب قابل توجهی گزارش نمی‌شود. در واقع برنامه ارائه شده عملکرد بسیار مناسبی در شناسایی آسیب با تابع هدف تعریف شده بر اساس شکل مودها و با استفاده از داده‌های دورانی دارد.

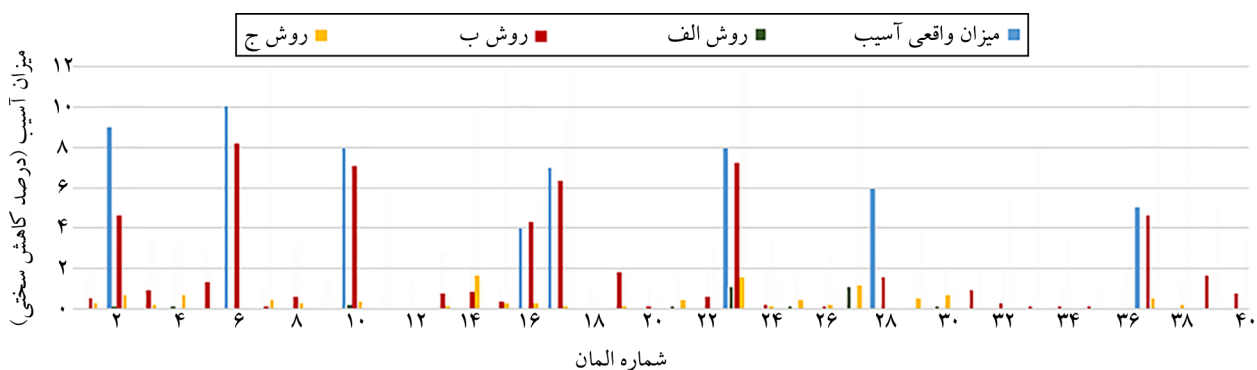
شکل (۴) نتایج تحلیل با تابع هدف دوم را نشان می‌دهد که حاکی از عدم کفایت معیار ارزیابی شاخص مودی در به‌روزرسانی مدل می‌باشد. هنگامی که از تفاضل ماتریس‌های نرمی مودال به‌عنوان تابع هدف استفاده شده استفاده از مؤلفه‌های دورانی به‌تنهایی قادر به شناسایی دقیق محل آسیب گردیده و میزان آسیب در المان شماره ۲ کمتر از میزان واقعی و در المان شماره ۲۸ بیش از آن تخمین زده شده است. لیکن در باقی المان‌ها شدت آسیب گزارش شده تقریباً دقیق می‌باشد. این نتایج به‌خوبی در شکل (۵) قابل مشاهده می‌باشند.



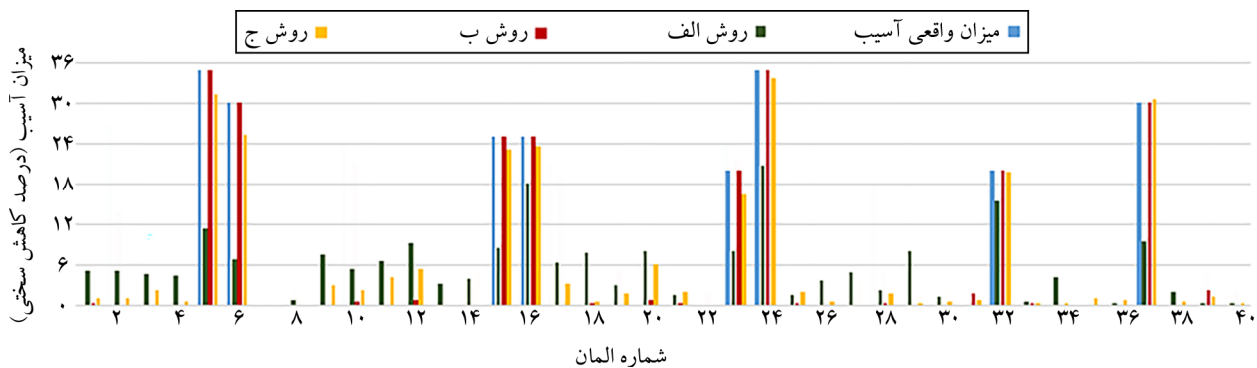
شکل (۳): نتایج شناسایی آسیب قاب خمشی برای سناریوی آسیب اول و تابع هدف اول.



شکل (۴): نتایج شناسایی آسیب قاب خمشی برای سناریوی آسیب اول و تابع هدف دوم.



شکل (۵): نتایج شناسایی آسیب قاب خمشی برای سناریوی آسیب اول و تابع هدف سوم.



شکل (۶): نتایج شناسایی آسیب قاب خمشی برای سناریوی آسیب دوم و تابع هدف اول.

شدت آنها قابل اغماض می‌باشند. درحالی‌که داده‌های انتقالی گرچه در برخی موارد در تشخیص موقعیت آسیب مؤثر بوده لیکن در برآورد شدت آسیب بسیار ضعیف عمل می‌نمایند و در بسیاری از المان‌های سالم به خطا آسیب گزارش شده است. در این سناریو نیز همان‌طور که در شکل (۷) مشخص است، معیار ارزیابی شاخص مودی در شناسایی آسیب اصلاً موفق نبوده است. استفاده از تفاضل ماتریس نرمی مودال (شکل ۸) نیز زمانی که از داده‌های دورانی به‌تنهایی استفاده شده نتایج بسیار خوبی داشته

۲-۲-۲- سناریوی آسیب شدید در قاب خمشی فولادی

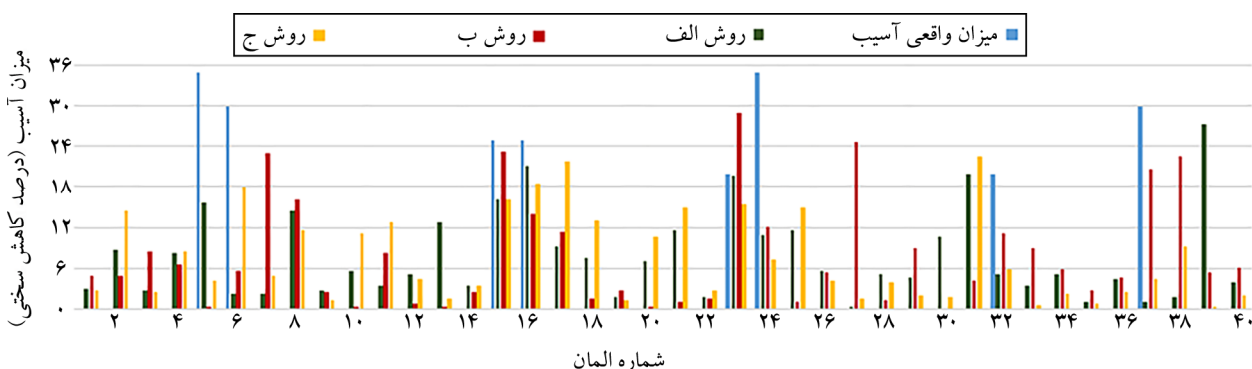
با یک نگاه کلی در شکل (۶) که نتایج شناسایی آسیب مربوط به سناریوی آسیب شدید در مدل با تابع هدف اول را نشان می‌دهد، مشخص می‌گردد که در این سناریو نیز، روش داده‌برداری ب و ج که از اطلاعات مؤلفه‌های دورانی نیز استفاده می‌کنند به‌خوبی محل و شدت آسیب را شناسایی می‌کنند. البته وقتی از کلیه مؤلفه‌های دورانی و انتقالی برای شناسایی آسیب استفاده شده، مقادیری از آسیب در المان‌های سالم گزارش شده که با توجه به کم بودن میزان

المان‌های آسیب‌دیده و شدت آسیب در آنها با دقت قابل ملاحظه‌ای برآورد شده است. همچنین خطای گزارش آسیب در المان‌های سالم بسیار ناچیز است. نتایج ارائه شده در شکل (۱۰) حاکی از این است که تابع هدف دوم در هیچ کدام از روش‌های داده‌برداری شناسایی مناسبی از وضع سازه موجود ارائه ننموده است. با بررسی اطلاعات ارائه شده در شکل (۱۱) می‌توان گفت، موقعیت آسیب‌ها با استفاده از تفاضل ماتریس‌های نرمی مودال شناسایی شده اما در المان‌های شماره ۵، ۱۷ و ۲۸ با مقادیر واقعی اختلاف قابل توجهی دارند.

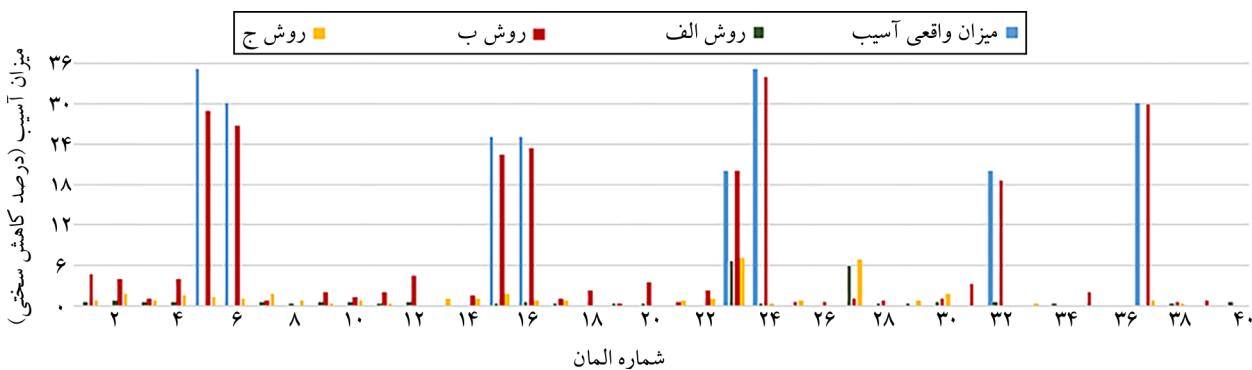
به‌نحوی که به‌جز در مورد سه المان شماره ۵، ۶ و ۱۵ که حدود ۲ تا ۶ درصد تفاوت بین میزان آسیب تخمین زده شده و واقعی وجود دارد در باقی المان‌ها شدت آسیب به‌خوبی تشخیص داده شده است.

۳-۲-۳- سناریوی آسیب ترکیبی در قاب خمشی فولادی

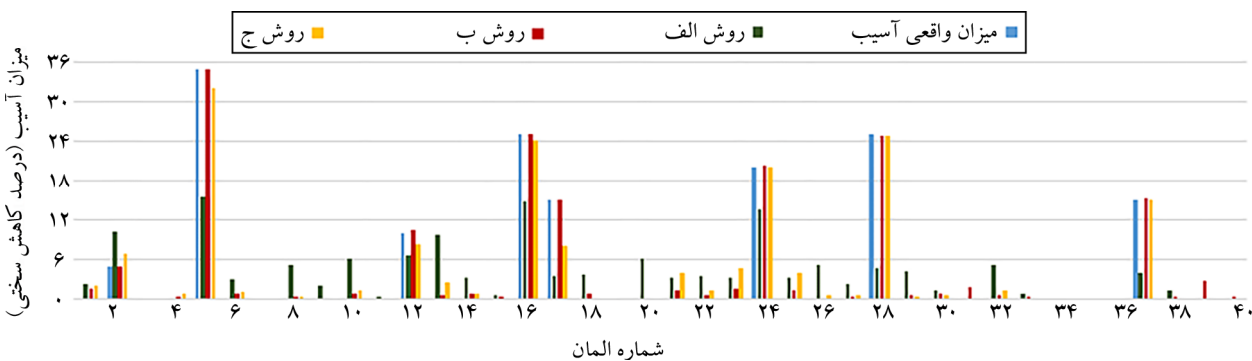
نتایج آنالیزهای مربوط به سناریوی ترکیبی آسیب‌های شدید و ضعیف در نمودارهای شکل‌های (۹) تا (۱۱) ارائه شده است. در این حالت نیز بهترین پاسخ‌ها مربوط به تابع هدف اول و حالتی که با داده‌های دورانی و کل داده‌ها کار شده می‌باشد که موقعیت



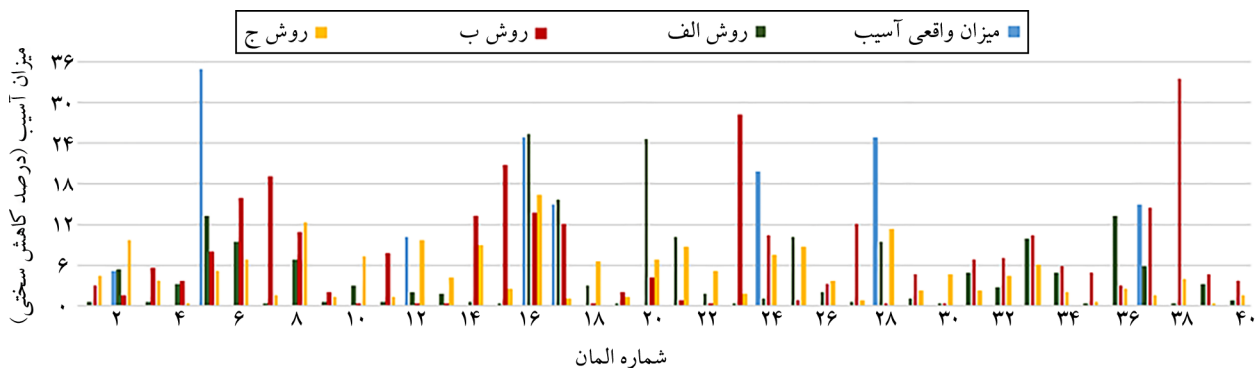
شکل (۷): نتایج شناسایی آسیب قاب خمشی برای سناریوی آسیب دوم و تابع هدف دوم.



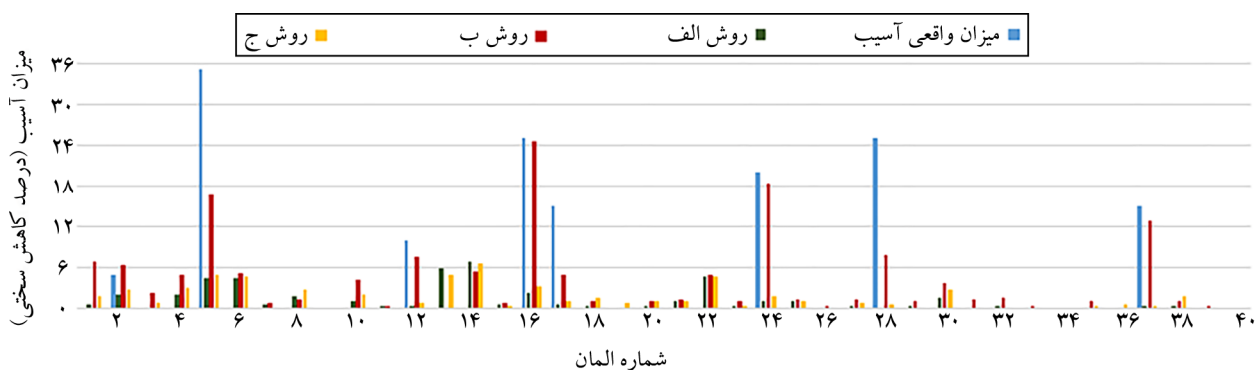
شکل (۸): نتایج شناسایی آسیب قاب خمشی برای سناریوی آسیب دوم و تابع هدف سوم.



شکل (۹): نتایج شناسایی آسیب قاب خمشی برای سناریوی آسیب سوم و تابع هدف اول.

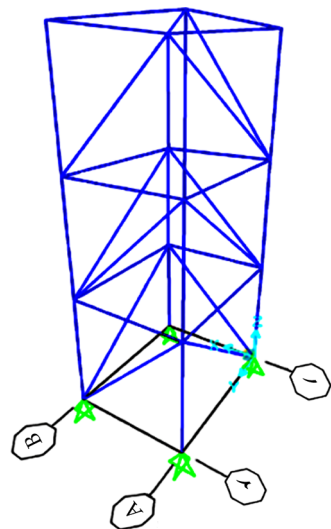


شکل (۱۰): نتایج شناسایی آسیب قاب خمشی برای سناریوی آسیب سوم و تابع هدف دوم.



شکل (۱۱): نتایج شناسایی آسیب قاب خمشی برای سناریوی آسیب سوم و تابع هدف سوم.

سناریوی دوم، میزان آسیب‌ها نسبتاً زیاد می‌باشد و در نهایت در سناریوی سوم، ترکیبی از آسیب‌های جزئی و شدید مورد بررسی قرار گرفته است. سناریوهای آسیب مورد نظر بر اساس محورهای قاب نشان داده شده در شکل (۱۲) و شماره‌های ارائه شده در نمودارهای نتایج، در جداول (۵) الی (۷) ارائه گردیده است.



شکل (۱۲): قاب مهاربندی سه طبقه فولادی.

۴- بررسی قاب مهاربندی سه طبقه فولادی

به منظور بررسی بیشتر عملکرد روش پیشنهادی در شناسایی آسیب، یک قاب سه طبقه فولادی نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. این سازه دارای اتصالات تیر به ستون صلب می‌باشد و در هر دهانه یک المان مهاربند مورب نیز وجود دارد. عرض دهانه قاب در راستای محور xها و yها ۴ متر و ارتفاع طبقات نیز برابر با ۳ متر در نظر گرفته شده است. همچنین مدول یانگ (E) برای تمام اعضا برابر با 2.1×10^{11} پاسکال است. مقطع المان‌های ستون و تیر به ترتیب IPB 200 و IPE220 می‌باشد و برای مهاربندها از دوپل ناودانی 2UNP 100 به صورت قوطی استفاده شده است. شکل (۱۲) تصویر قاب مورد نظر را نشان می‌دهد.

۴-۱- سناریوهای آسیب

در این سری از آنالیزها نیز همانند قاب خمشی پنج طبقه، سه سناریوی مختلف تعریف شده که در سناریوی اول آسیب‌های جزئی در المان‌های تیر، ستون و مهاربند ایجاد گردیده، در

جدول (۵): سناریوی اول، آسیب‌های جزئی در قاب مهاربندی سه‌طبقه فولادی.

A1-A2 مهاربند طبقه سوم	A1-B1 تیر طبقه سوم	A1-B1 مهاربند طبقه دوم	A2-B2 تیر طبقه دوم	A2 ستون طبقه دوم	B2-A2 مهاربند طبقه اول	B1 ستون طبقه اول	A1-A2 مهاربند طبقه سوم	موقعیت المان در شکل (۱۱)
۳۶	۲۹	۲۱	۱۸	۱۵	۱۱	۲	۳۶	شماره المان در نمودارهای نتایج
۱۰	۸	۸	۶	۵	۱۰	۵	۱۰	میزان آسیب (درصد کاهش سختی)

جدول (۶): سناریوی دوم، آسیب‌های شدید در قاب مهاربندی سه‌طبقه فولادی.

A1-B1 تیر طبقه سوم	B2 ستون طبقه سوم	A1-A2 مهاربند طبقه دوم	A1-B1 تیر طبقه دوم	A1-A2 مهاربند طبقه اول	B2-B1 مهاربند طبقه اول	موقعیت المان در شکل (۱۱)
۲۹	۲۸	۲۴	۱۷	۱۲	۱۰	شماره المان در نمودارهای نتایج
۱۵	۳۰	۳۰	۲۰	۲۵	۲۰	میزان آسیب (درصد کاهش سختی)

جدول (۷): سناریوی سوم، ترکیب آسیب‌های جزئی و شدید در قاب مهاربندی سه‌طبقه فولادی

B2 ستون طبقه سوم	A1 ستون طبقه سوم	A1-B1 مهاربند طبقه دوم	A1-A2 تیر طبقه دوم	A1-A2 مهاربند طبقه اول	B2-A2 مهاربند طبقه اول	A1-B1 مهاربند طبقه اول	A1-B1 تیر طبقه اول	موقعیت المان در شکل (۱۱)
۲۸	۲۵	۲۱	۱۹	۱۲	۱۱	۹	۵	شماره المان در نمودارهای نتایج
۱۵	۵	۱۵	۵	۲۰	۱۵	۱۰	۶	میزان آسیب (درصد کاهش سختی)

۴-۲-۱- سناریوی آسیب جزئی در قاب مهاربندی فولادی

نتایج تحلیل‌های انجام شده برای شناسایی آسیب‌های جزئی در قاب مهاربندی فولادی در شکل‌های (۱۳) الی (۱۵) نمایش داده شده است. در این حالت تابع هدف اول تقریباً با تمامی روش‌های داده‌برداری قادر به شناسایی موقعیت آسیب بوده، لیکن در حالت‌هایی که از داده‌های دورانی استفاده شده، پاسخ‌ها بسیار دقیق است و تقریباً هیچ المان سالمی، آسیب‌دیده گزارش نشده است. تابع هدف MAC در این حالت نیز در کل نتایج مناسبی ارائه نکرده است. نتایج ارائه شده در شکل (۱۵) نشان می‌دهد، تابع هدف سوم با داده‌های دورانی میزان و موقعیت آسیب‌ها را به‌خوبی شناسایی کرده، لیکن در باقی حالات داده‌برداری نتایج مناسب نیستند.

۴-۲-۲- سناریوی آسیب شدید در قاب مهاربندی فولادی

با توجه به شکل‌های (۱۶) تا (۱۸) که نتایج مربوط به شناسایی آسیب در سناریوی آسیب‌های شدید در قاب مهاربندی را ارائه می‌نمایند، مشخص می‌گردد بهترین پاسخ مربوط به تابع هدف اول با داده‌های دورانی می‌باشد که هم موقعیت و هم

۴-۲-۲- بررسی نتایج آنالیزها

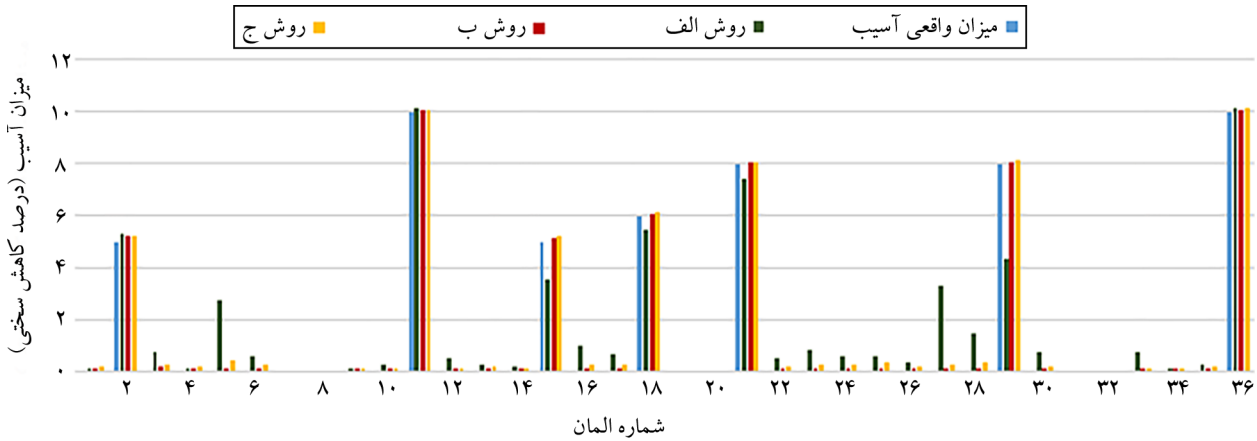
به‌روزرسانی قاب مهاربندی شده مورد نظر برای سه سناریوی تعریف شده توسط برنامه ایجاد شده در نرم‌افزار MATLAB انجام شد که نتایج تحلیل بر اساس سناریوهای آسیب در بخش‌های بعدی ارائه می‌گردد. در این تحلیل‌ها از شکل‌های مودی و فرکانس هشت مود اول سازه استفاده گردید که فرکانس‌های هر هشت مود برای سازه سالم و آسیب‌دیده تحت سناریوهای مورد نظر در جدول (۸) ارائه شده است.

جدول (۸): فرکانس مودهای قاب مهاربندی سه‌طبقه.

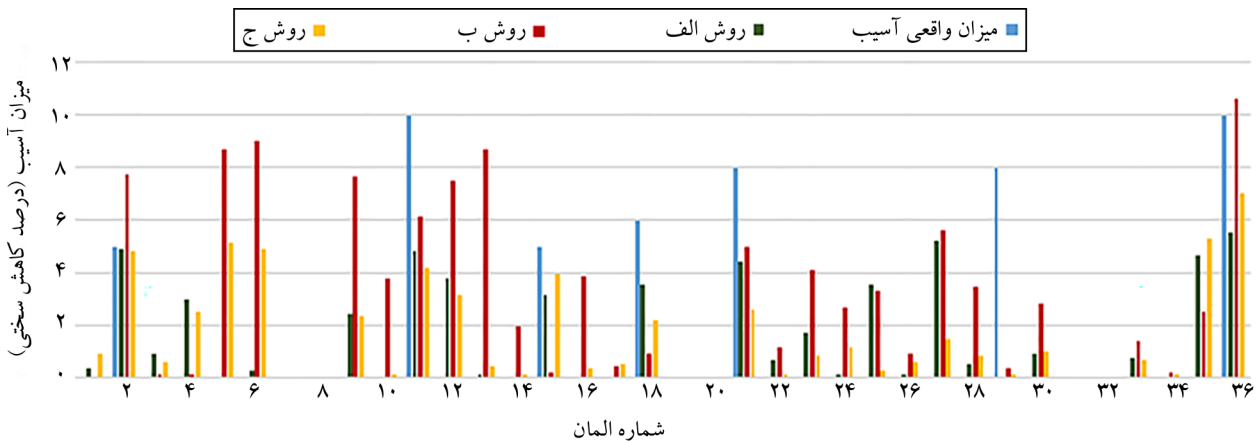
شماره مود	سازه سالم	سناریوی آسیب جزئی	سناریوی آسیب شدید	سناریوی آسیب ترکیبی
۱	۱۱/۴۱	۱۱/۲۹	۹/۷۳	۱۰/۹۸
۲	۱۱/۶۳	۱۱/۵۰	۱۱/۰۲	۱۱/۴۱
۳	۱۳/۱۸	۱۳/۰۶	۱۲/۲۲	۱۲/۸۲
۴	۱۳/۹۳	۱۲/۷۹	۱۳/۰۱	۱۳/۵۹
۵	۳۴/۶۷	۳۴/۲۹	۳۰/۴۸	۳۴/۱۸
۶	۳۶/۳۱	۳۶/۰۰	۳۳/۷۲	۳۶/۰۰
۷	۳۷/۰۵	۳۶/۶۲	۳۶/۲۹	۳۶/۲۳
۸	۴۰/۱۰	۳۹/۶۶	۳۷/۹۸	۳۹/۲۴

نرمی هم با استفاده از مؤلفه‌های دورانی به‌خوبی قادر به شناسایی آسیب بوده است. همانند موارد قبلی در این حالت نیز معیار ارزیابی شاخص مودی در به‌روزرسانی سازه کارایی مناسبی نداشته است.

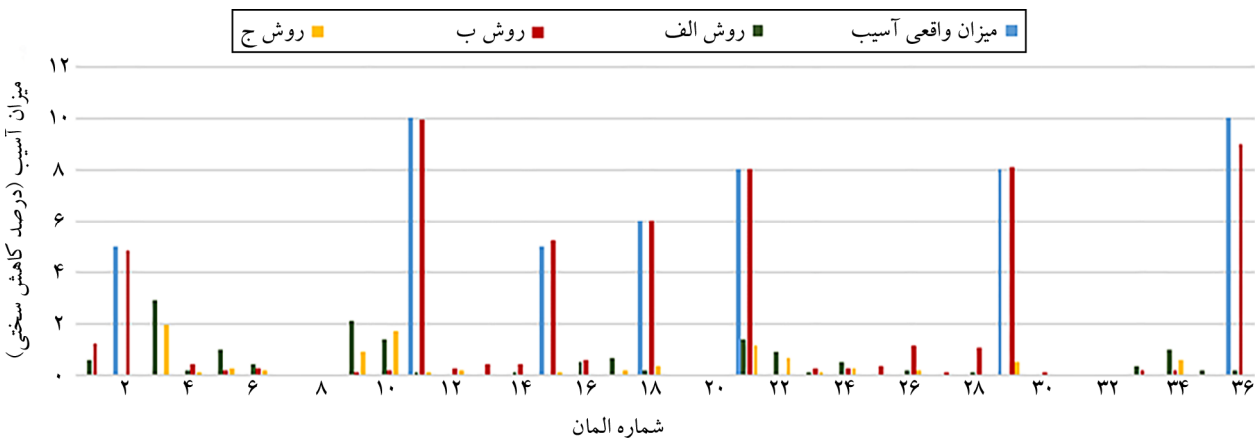
میزان آسیب در اعضای آسیب‌دیده به‌خوبی شناسایی شده و در المان‌های سالم نیز آسیب‌های جزئی گزارش گردیده است. این تابع هدف وقتی از کل مؤلفه‌های مودی استفاده شده نیز نتایج قابل قبولی دارد. در این سناریو تابع هدف متشکل از ماتریس



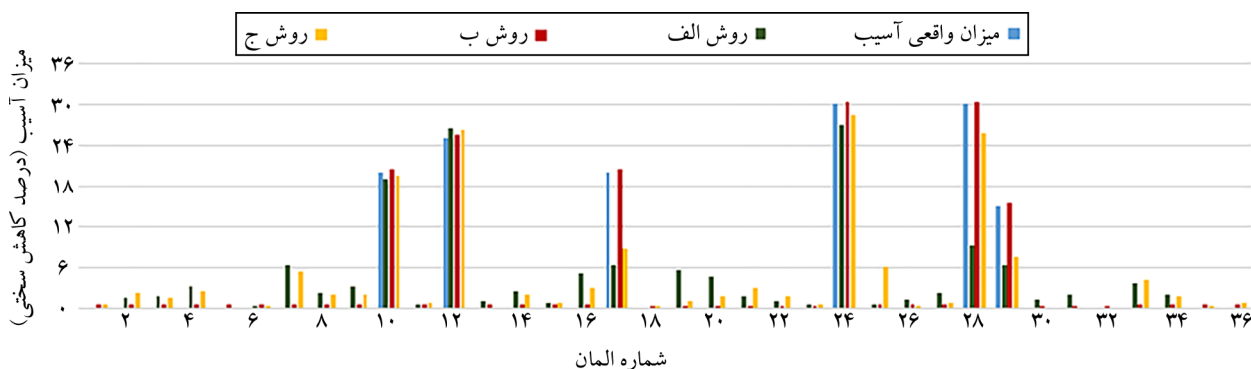
شکل (۱۳): نتایج شناسایی آسیب قاب مهاربندی برای سناریوی آسیب اول و تابع هدف اول.



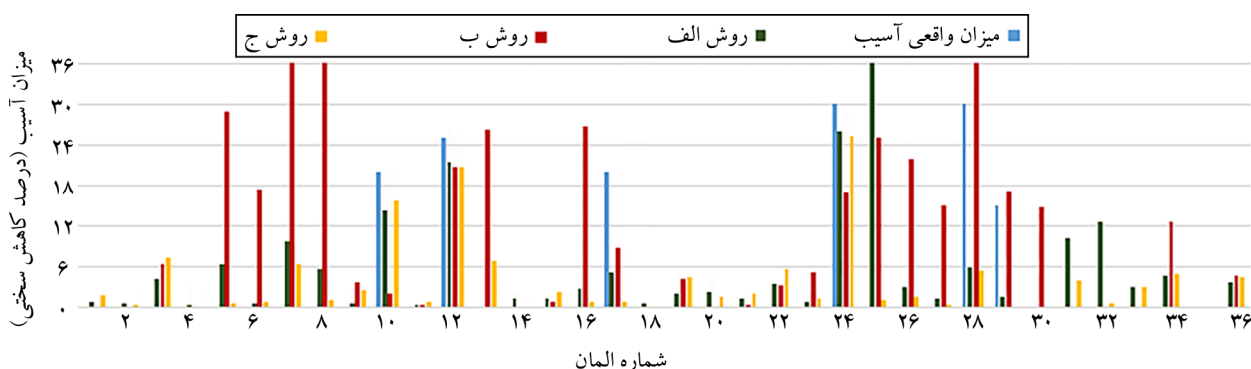
شکل (۱۴): نتایج شناسایی آسیب قاب مهاربندی برای سناریوی آسیب اول و تابع هدف دوم.



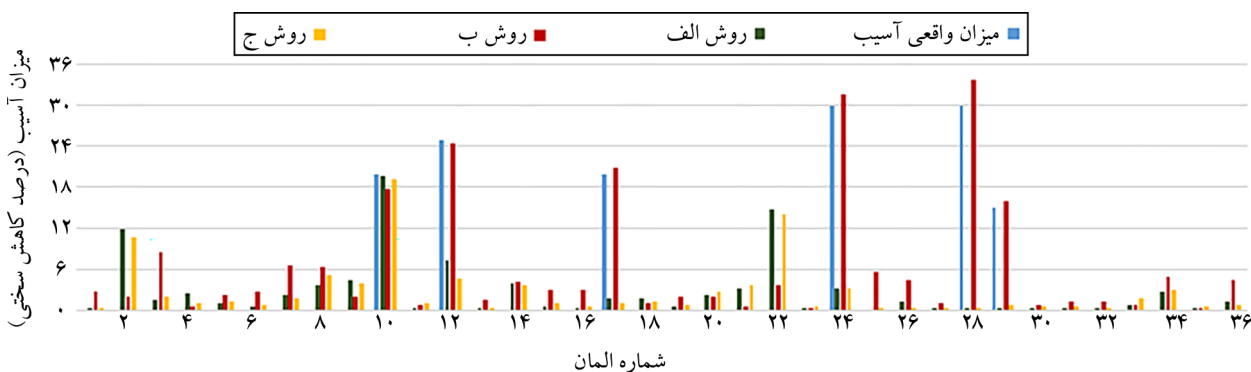
شکل (۱۵): نتایج شناسایی آسیب قاب مهاربندی برای سناریوی آسیب اول و تابع هدف سوم.



شکل (۱۶): نتایج شناسایی آسیب قاب مهاربندی برای سناریوی آسیب دوم و تابع هدف اول.



شکل (۱۷): نتایج شناسایی آسیب قاب مهاربندی برای سناریوی آسیب دوم و تابع هدف دوم.



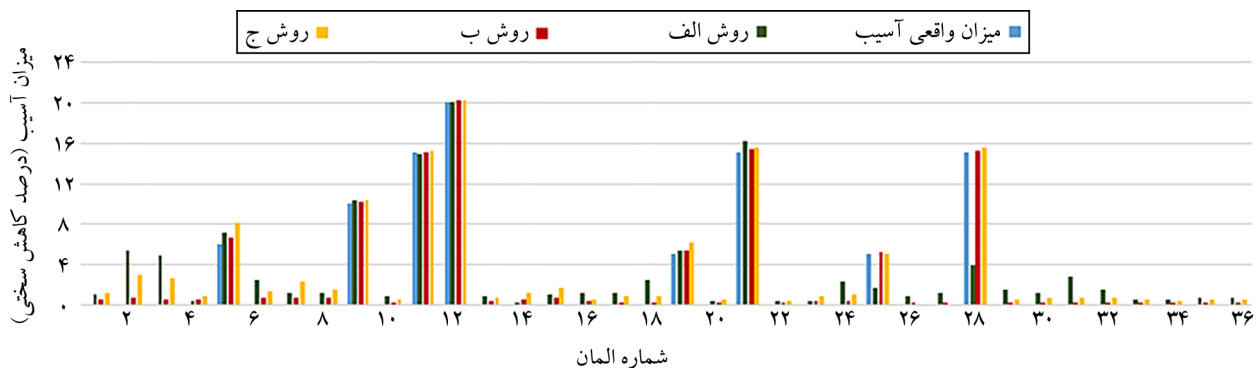
شکل (۱۸): نتایج شناسایی آسیب قاب مهاربندی برای سناریوی آسیب دوم و تابع هدف سوم.

نشده است.

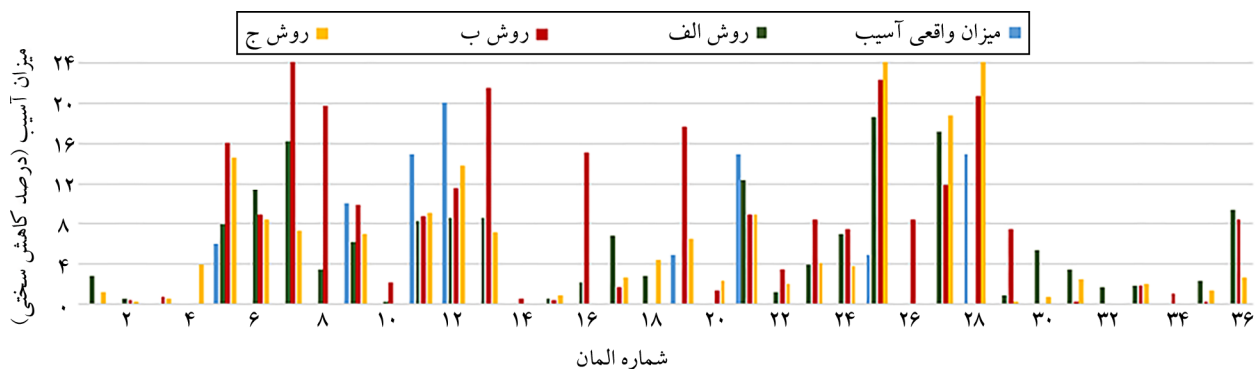
البته در این سناریو، داده‌های انتقالی نیز در شناسایی المان‌های آسیب‌دیده خوب عمل کردند لیکن میزان آسیب گزارش شده در المان‌های شماره ۲۵ و ۲۸ که هر دو در طبقه آخر هستند کمتر از آسیب واقعی می‌باشد. در این سناریو نیز تابع هدف دوم عملکرد خوبی نداشته و تابع هدف سوم با استفاده از مؤلفه‌های دورانی شکل مود با دقت قابل قبولی سازه را به‌روزرسانی کرده است.

۳-۲-۴- سناریوی آسیب ترکیبی در قاب مهاربندی فولادی

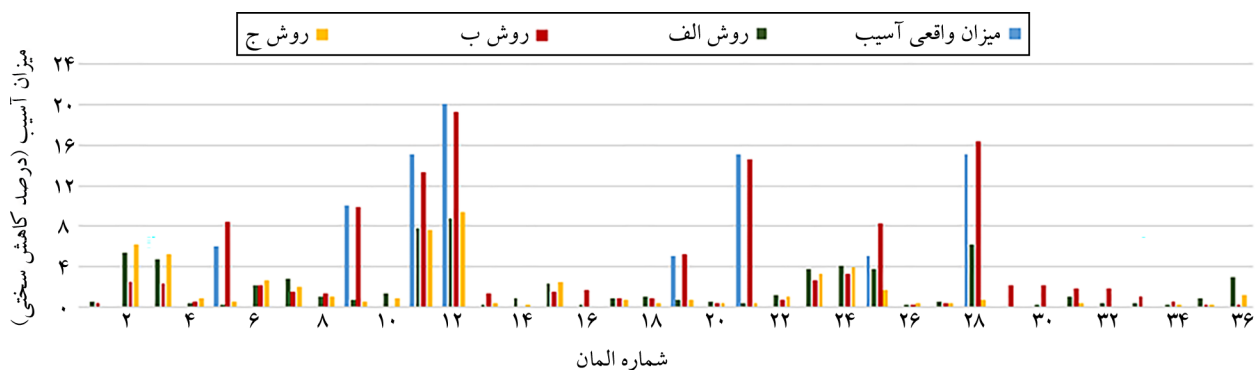
نمودارهای نتایج آنالیزهای شناسایی آسیب‌های ترکیبی در قاب مهاربندی مورد مطالعه در شکل‌های (۱۹) تا (۲۱) ارائه گردیده است. در این حالت تابع هدف یک با روش داده‌برداری ب و ج که از داده‌های دورانی نیز استفاده می‌کند، بهترین پاسخ‌ها را داشته به‌نحوی که موقعیت و میزان آسیب را به‌خوبی شناسایی کرده و در المان‌های سالم تقریباً هیچ آسیبی گزارش



شکل (۱۹): نتایج شناسایی آسیب قاب مهاربندی برای سناریوی آسیب سوم و تابع هدف اول.



شکل (۲۰): نتایج شناسایی آسیب قاب مهاربندی برای سناریوی آسیب سوم و تابع هدف دوم.



شکل (۲۱): نتایج شناسایی آسیب قاب مهاربندی برای سناریوی آسیب سوم و تابع هدف سوم.

۵- بررسی اثر نوفه

خدایاری و بهار [۳۲] در سال ۲۰۱۹ نتایج جالبی حاصل گردید. آنها پاسخ شتاب طبقات را اندازه گیری نموده و به آن سطوح مختلفی از نوفه را وارد نمودند و با استفاده از روش زیرفضای تصادفی^۹ به شناسایی شکل های مودی، فرکانس و ماتریس سختی سازه پرداختند. نتایج حاصله حاکی از دقت بالای روش زیرفضای تصادفی در شناسایی مشخصات سازه بود به نحوی که حتی در نوفه های حدود ۲۰ درصد در داده های برداشت شده، خطای

نظر به اینکه برداشت اطلاعات از سازه های واقعی و استخراج مشخصه های دینامیکی شامل شکل های مودی و فرکانس طبیعی سازه ممکن است با دقت کافی انجام نگیرد، جهت لحاظ نمودن این عدم دقت، در پروژه های تحقیقاتی به داده های تحلیلی نوفه اعمال می نمایند تا داده های اولیه از حالت بسیار دقیق خارج شده و کمی به واقعیت نزدیک گردند. در بررسی های انجام شده توسط

توانمندی روش در شناسایی المان‌های آسیب‌دیده و میزان آسیب آنها با وجود نوفه می‌باشد.

۶- بررسی همگرایی الگوریتم شناسایی آسیب

در توابع بهینه‌سازی همواره لازم است یک سری پارامترهای کنترلی و معیارهای همگرایی برای خاتمه آنالیز تعریف گردد. در روش حداقل مجموع مربعات غیرخطی نیز می‌توان برخی از این فاکتورها را تعریف نمود یا از فرضیات برنامه استفاده کرد. در این تحقیق با توجه به اینکه ضریب سختی المان‌ها متغیر بهینه‌سازی می‌باشد که توسط برنامه مشخص می‌گردد، حد بالایی آن یک (برابر با صد درصد سختی) و حد پایین آن صفر تعریف شده است. در نقطه شروع تحلیل نیز ضریب سختی کل المان‌ها یک فرض شده که معادل سازه سالم می‌باشد. در این روش می‌توان حداکثر تعداد گام‌ها و حداکثر تعداد برآوردهای توابع هدف را تعیین نمود. جهت بررسی همگرایی الگوریتم، یکی از حالات تحلیلی فوق که سناریوی آسیب ترکیبی برای قاب خمشی می‌باشد در نظر گرفته شده است. تابع هدف اول که بر اساس تفاضل شکل مودها تعریف شده برای حالتی که از کل مؤلفه‌های دورانی و انتقالی استفاده می‌شود انتخاب شده است. در این مورد خاص با توجه به شش درجه آزادی در هر یک از بیست گره قاب و لحاظ نمودن شش شکل مود، ۷۲۰ تابع هدف داریم. در شکل (۲۳) مجموع مقادیر این توابع هدف در تعداد دفعات برآورد توابع هدف نشان داده شده است. با یک نگاه کلی مشخص می‌گردد که با افزایش تکرارها، مجموع

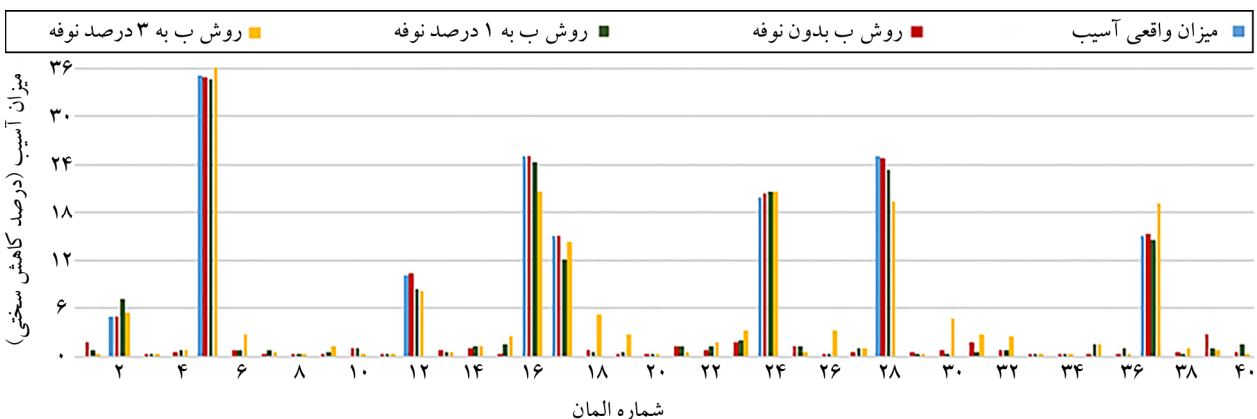
محاسبه فرکانس و شکل مودی حدود یک درصد می‌باشد [۳۲]. در این مقاله برای بررسی اثر نوفه و توانمندی روش پیشنهادی در شناسایی آسیب هنگامی که داده‌ها دقیق نیستند، یکی از حالات بررسی شده در بخش‌های قبلی، مورد مطالعه قرار گرفته است. در این راستا، قاب خمشی پنج طبقه برای سناریوی آسیب ترکیبی آنالیز گردیده و جهت شناسایی آسیب از تابع هدف اول استفاده شده است. روش داده‌برداری ب یا همان برداشت مؤلفه‌های دورانی شکل‌های مودی می‌باشد. نوفه با استفاده از معادله (۸) به شکل‌های مودی و فرکانس‌های سازه اعمال گردیده است.

$$A^n = A \cdot (1 + \partial \cdot R) \quad (8)$$

در رابطه (۸)، A می‌تواند هر یک از فرکانس‌های سازه و یا مؤلفه‌های اشکال مودی باشد که A_n نشانگر همان مؤلفه پس از اعمال نوفه است. R یک مقدار رندوم بین منفی یک و یک می‌باشد و ∂ درصد نوفه وارد به داده‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه در برنامه MATLAB عدد تصادفی بین صفر و یک به صورت خودکار با دستور rand تولید می‌شود میزان R از رابطه (۹) به دست آمده است.

$$R = -1 + 2 * \text{rand} \quad (9)$$

با توجه به نتایج تحقیقات خدایاری و بهار [۳۳]، در این تحلیل میزان نوفه برابر با یک و سه درصد لحاظ گردید. در واقع مؤلفه‌های شکل‌های مودی و فرکانس‌های سازه به این نوفه آغشته گردیدند. نتایج شناسایی آسیب با اعمال نوفه و بدون نوفه جهت مقایسه در شکل (۲۲) ارائه گردیده که نشان‌دهنده‌ی



شکل (۲۲): نتایج شناسایی آسیب قاب خمشی برای سناریوی آسیب سوم و تابع هدف اول و اثر نوفه.



شکل (۲۳): بررسی همگرایی الگوریتم شناسایی آسیب.

تعریف شده با استفاده از معیار ارزیابی شاخص مودی در هیچ یک از موارد قادر به شناسایی دقیق موقعیت و میزان آسیب نبوده است. استفاده از داده‌های انتقالی به تنهایی در هیچ موردی منجر به شناسایی دقیق محل و میزان آسیب نمی‌گردد و حتی در مواردی که المان‌های آسیب‌دیده تشخیص داده می‌شوند میزان آسیب گزارش شده در المان‌های سالم نیز قابل ملاحظه است. به‌طور کلی بررسی تحلیل‌های انجام شده نشان می‌دهد که استفاده از داده‌های دورانی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر نتایج شناسایی آسیب دارد به نحوی که میزان و موقعیت آسیب با دقت بیشتری مشخص می‌گردد و در المان‌های سالم نیز آسیب بسیار کمی گزارش می‌شود که قابل چشم‌پوشی می‌باشد.

همچنین برنامه ارائه شده با تابع هدف اول که تفاضل شکل‌های مودی را نشان می‌دهد در همه سناریوها عملکرد خوبی در شناسایی آسیب داشته است.

همچنین نتایج تحلیل‌های انجام شده روی داده‌هایی که نوفه به آنها وارد شده، حاکی از توانایی روش ارائه شده در شناسایی آسیب حتی با وجود استفاده از داده‌های اولیه غیر دقیق می‌باشند.

بررسی‌های صورت گرفته روی نتایج تحلیل‌های گسترده، نشان می‌دهد که روش ارائه شده برای شناسایی آسیب با تابع هدف تفاضل شکل‌های مودی از همگرایی بسیار خوبی برخوردار است.

نظر به اهمیت داده‌های دورانی در شناسایی آسیب و با توجه به اینکه برداشت مؤلفه‌های دورانی شکل مودی از سازه‌های موجود

مقادیر توابع سیر نزولی دارد و در این مورد خاص، از حدود ۳۵۰۰ بار برآورد توابع میزان توابع هدف تغییر خاصی نمی‌کنند و عملاً افزایش تکرارها بیش از این تعداد، تأثیر چندانی ندارد. بدیهی است، کاهش پیوسته مجموع مقادیر توابع هدف نشان‌دهنده همگرایی روش می‌باشد. خاطر نشان می‌سازد، شناسایی آسیب با این الگوریتم برای سازه‌های مورد بررسی کمتر از یک ساعت زمان نیاز دارد. شایان ذکر است در این تحقیق تحلیل‌ها با یک کامپیوتر با پردازشگر Intel (R) Core (TM) i7- 8550U CPP @ 1.8GHz 1.99GHz حافظه اصلی ۱۲ گیگابایت انجام شده است.

۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مطالعه جهت به‌روزرسانی مدل در سازه‌های سه‌بعدی و شناسایی آسیب یک برنامه اتوماتیک تکرار شونده در فضای نرم‌افزار MATLAB ایجاد گردید که با بهینه‌سازی توابع هدف موقعیت المان‌های آسیب‌دیده و شدت آسیب آنها را تعیین می‌نماید. به‌منظور بررسی تأثیر مؤلفه‌های دورانی شکل‌های مودی در شناسایی آسیب، سه روش داده‌برداری شامل استفاده از داده‌های انتقالی، دورانی و کل مؤلفه‌های دورانی و انتقالی لحاظ گردید. تحلیل‌های متعددی روی دو قاب فولادی با سه سناریوی مختلف آسیب و سه تابع هدف انجام و نتایج زیر حاصل گردید:

- نتایج تحلیل‌های انجام شده حاکی از این است که تابع هدف

9. Rahman, A.G.A., Ismail, Z., Noroozi, S., and Chao, O.Z. (2013) Study of open crack in rotor shaft using changes in frequency response function phase. *International Journal of Damage Mechanics*, **22**(6), 791-807.
10. Rahman, A.G.A., Chao, O.Z., and Ismail, Z. (2011) Enhancement of coherence functions using time signals in Modal Analysis. *Measurement*, **44**(10), 2112-2123.
11. Ismail, Z., Razak, H.A., and Rahman, A.G.A. (2006) Determination of damage location in RC beams using mode shape derivatives. *Engineering Structures*, **28**(11), 1573-1566.
12. Fox, C. (1992) The location of defects in structures-A comparison of the use of natural frequency and mode shape data. in imac.
13. Stubbs, N., Kim, J.-T., and Farrar, C. (1995) Field verification of a nondestructive damage localization and severity estimation algorithm, in *Proceedings-SPIE The International Society for Optical Engineering*. SPIE International Society for Optical.
14. Cha, Y.J. and O. Buyukozturk, (2015). *Structural damage detection using modal strain energy and hybrid multiobjective optimization*. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **30**(5), 347-358.
15. Shi, Z., Law, S., and Zhang, L. (1998) Structural damage localization from modal strain energy change. *Journal of Sound and Vibration*, **21**(5), 825-844.
16. Pandey, A. and Biswas, M. (1994) Damage detection in structures using changes in flexibility. *Journal of Sound and Vibration*, **169**(1), 3-17.
17. Yan, A. and Golinval, J.-C. (2005) Structural damage localization by combining flexibility and stiffness methods. *Engineering Structures*, **27**(12), 1752-1761.
18. Jaishi, B. and Ren, W.-X. (2006) Damage detection by finite element model updating using modal flexibility residual. *Journal of Sound and Vibration*, **290**(1-2), 369-387.
19. Nadjafi, S., Ghodrati Amiri, G., Zare Hosseinzadeh, A., and Seyed Razzaghi, S.A. (2020) An effective

تقریباً امکان‌پذیر نیست، در ادامه تحقیقات باید روش‌های مناسبی برای گسترش داده‌ها و تولید مؤلفه‌های دورانی شکل مودی با استفاده از داده‌های انتقالی برداشت شده ارائه گردد.

مراجع

1. Hwang, H. and C. Kim, (2004) Damage detection in structures using a few frequency response measurements. *Journal of Sound and Vibration*, **270**(1-2), 1-14.
2. Ismail, Z. (2012) Application of residuals from regression of experimental mode shapes to locate multiple crack damage in a simply supported reinforced concrete beam. *Measurement*, **45**(6), 1455-1461.
3. Ismail, Z., Ibrahim, Z., Chao, O.Z., and Rahman, A.G.A. (2012) Approach to reduce the limitations of modal identification in damage detection using limited field data for nondestructive structural health monitoring of a cable-stayed concrete bridge. *Journal of Bridge Engineering*, **17**(6), 867-875.
4. Ismail, Z. and Chao, O.Z. (2012) Honeycomb damage detection in a reinforced concrete beam using frequency mode shape regression. *Measurement*, **45**(5), 950-959.
5. Fayyadh, M., Razak, H.A., and Ismail, Z. (2011) Combined modal parameters-based index for damage identification in a beamlike structure: theoretical development and verification. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **11**(3), 587-609.
6. Rahman, A.G.A., Ismail, Z., Noroozi, S., and Chao, O.Z. (2014) Enhancement of impact-synchronous modal analysis with number of averages. *Journal of Vibration and Control*, **20**(11), 1645-1655.
7. Chao, O.Z., Rahman, A.G.A., and Ismail, Z. (2012) Determination of damage severity on rotor shaft due to crack using damage index derived from experimental modal data. *Experimental Techniques*, **38**, doi: 10.1111/j.1747-1567.2012.00823.x.
8. Rahman, A.G.A., Chao, O.Z., and Ismail, Z. (2011) Effectiveness of impact-synchronous time averaging in determination of dynamic characteristics of a rotor dynamic system. *Measurement*, **44**(1), 34-45.

- (2018) Ambient vibration based structural evaluation of reinforced concrete building model. *Earthquakes and Structures*, **15**(3), 335-350.
28. Chalioris, C.E., Voutetaki, M.E., and Liolios, A.A. (2020) Structural health monitoring of seismically vulnerable RC frames under lateral cyclic loading. *Earthquakes and Structures*, **19**(1), 29-44.
29. Raufi, F. and Bahar, O. (2012) A new wavelet based-method for damage detection of moment-resisting frame. *Sharif Civil Engineering Journal*, **29**, 127-136 (in persain).
30. Nocedal, J. and Wright, S.J. (1999) *Numerical Optimization*. Springer-Verlag New York, Inc.
31. Hu, S.-L.J., Li, H., and Wang, S. (2007) Cross-model cross-mode method for model updating. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **21**(4), 1690-1703.
32. Khodayari, R. and Bahar, O. (2019) Identification of story stiffness of shear buildings under ambient vibration tests with highly noise polluted data. *Amirkabir Journal of Civil Engineering* (in persain).

واژه‌نامه

- 1- معیار ارزیابی مشخصه مودی Modal Assurance Criterion
- 2- معیار ارزیابی شاخص مودی و بسامد زاویه‌ای Modified Total Modal Assurance Criterion
- 3- روش بهینه‌ساز چندرسانه‌ای Multiverse Optimizer
- 4- الگوریتم سینوسی کسینوسی Sine Cosine Algorithm
- 5- بهینه‌سازی هریس هواک Harris Hawks Optimization
- 6- سیستم پایش پذیرش امیدانس بی‌سیم Wireless Impedance/ Admittance Monitoring System
- 7- روش حداقل مربعات غیرخطی Nonlinear Least Square
- 8- الگوریتم ناحیه امن بازتابنده Trust-Region-Reflective Algorithm
- 9- روش زیرفضای تصادفی Stochastic Subspace Identification

- approach for damage identification in beam-like structures based on modal flexibility curvature and particle swarm optimization. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, **8**(1), 109-120.
20. Alkayem, N.F., Cao, M., Zhang, Y., Bayat, M., and Su, Z. (2018) Structural damage detection using finite element model updating with evolutionary algorithms: a survey. *Neural Computing and Applications*, **30**(2), 389-411.
21. Ghodrati Amiri, G., Zare Hosseinzadeh, A., and Seyed Razzaghi, S.A. (2015) Generalized flexibility-based model updating approach via democratic particle swarm optimization algorithm for structural damage prognosis. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, **5**(4), 445-464.
22. Soltani, A., Sabamehr, A., Chandra, A., and Bagchi, A. (2018) *System Identification and Vibration-Based Damage Detection in a Concrete Shear Wall System. in Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Echanical, and Aerospace Systems 2018*. International Society for Optics and Photonics.
23. Ghannadi, P. and Kourehli, S.S. (2020) Multiverse optimizer for structural damage detection: Numerical study and experimental validation. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **29**(13), p. e1777.
24. Ahmadi-Nedushan, B. and Fathnejat, H. (2020) A modified teaching-learning optimization algorithm for structural damage detection using a novel damage index based on modal flexibility and strain energy under environmental variations. *Engineering with Computers*, 1-28.
25. Gomes, G.F. and de Almeida, F.A. (2020) Tuning metaheuristic algorithms using mixture design: Application of sunflower optimization for structural damage identification. *Advances in Engineering Software*, **149**, p. 102877.
26. Razavi, M. and Hadidi, A. (2020) Assessment of sensitivity-based FE model updating technique for damage detection in large space structures. *Structural Monitoring and Maintenance*, **7**(3), 261-281.
27. Gunaydin, M., Adanur, S., and Altunisik, A.C.

Influence of Rotational Components of Mode Shapes in Damage Detection of Three Dimensional Structures

Zahra Toorang¹ and Omid Bahar^{2*}

1. Ph.D. Candidate, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran
2. Associate Professor, Structural Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran, *Corresponding Author, email: omidbahar@iiees.ac.ir

Damage in structural elements causes obvious changes in their physical properties such as stiffness and damping. These changes affect the stiffness and damping matrices of whole building so its mode shapes change. Therefore, mode shapes of existing building are widely used in damage detection methods. Since vibration test can only provide translational components of mode shapes, previous methods mostly worked with this type of data. This paper focused on considering the importance of using some rotational/translational components of the mode shapes to detect damages in structural frames. In order to analyze the frames and update them, an automatic iterative model updating program is developed in MATLAB software that works with OpenSees for conducting finite element analysis. The iterative program evaluates a set of objective functions in each step and tries to optimize them by means of nonlinear least square method. Objective functions are defined based on the combination of two criteria of these four items: comparison between frequencies and/or mode shapes of two situations, the modal assurance criteria (MAC), and the modal flexibility matrices. In each step of the analysis, based on optimization results, a new frame will be modeled in OpenSees software that its elements stiffness is changed according to new sets of data, then finite element analysis will be done and new modal data will be extracted and optimization process will be repeated by new data. To verify the effectiveness of the developed program, two three-dimensional steel structures are modeled and evaluated, one of them is a five-story moment resisting frame and the other one is a three-story brace frame. It has been considered that these frames suffered damages which are defined by three different scenarios for each of them. Damage scenarios consist of minor, severe and both minor and severe damages. Actually, in this study, damages are defined by reduction in elements' stiffness. In fact, damage is a percentage of reduction of stiffness in damaged element in comparison with its healthy condition. Mode shape components and natural frequencies of damaged structures are the only needed input data for the program. To investigate the influence of rotational components in model updating, frames have been analyzed with three types of data in each scenario, all translational or rotational components, and all components of mode shapes. Extensive analyses show that among employed objective function, the one which compares mode shapes is the most successful one in damage detection, also modal flexibility can be effective when it works by only rotational components of mode shapes. The findings indicated that the translational components of mode shapes are not capable of detecting damages accurately. Results of model updating by use of only translational components of mode shapes indicate that not only the damages' location and their intensities could not be predicted, but also several false damages are reported in undamaged elements. It can be concluded that using rotational data leads to more precise results in determining both damages' locations and their intensities. Besides, the number of false damage detection has been decreased by use of rotational components. It means, when the rotational components are employed, the methods report no damage in healthy elements or the amount of detected damage is very small that can be ignored. Real data extracted from existing building are always polluted by noises due to human or machine faults or sometimes errors in numerical methods lead to inexact input data. Since the data employed in this study are exact numerical data, to consider the effects of these errors, analytical modal data has been polluted by some noises. These noises are generated by use of random function in MATLAB software. Surprisingly, the results show that even with noisy data, the proposed method can detect damages precisely.

Keywords: Model Updating Method, Iterative Optimization Method, Damage Detection Method, Rotational DOFs, Translational DOFs.