

شناسایی آسیب‌های پراکنده در قاب‌های دوبعدی فولادی با کمک روش ارتقایافته‌ی به‌روزرسانی مدل

مجید کسایی (کارشناس ارشد)

مهندسان مشاور پتروآسماری بین‌الملل

امید بهار* (استادیار)

پژوهشکده‌ی مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۹ (۱۳-۳)
دوری ۲ - ۳۶، شماره ۱/۲، ص. ۱۳-۳

امروزه روش به‌روزرسانی مدل اجزاء محدود به‌درستی به عنوان روشی دقیق و قابل‌اعتماد برای تشخیص میزان و محل آسیب شناخته شده است که می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های سنتی محسوب شود. در نوشتار حاضر، متدولوژی برای به‌روزرسانی مدل تحلیلی سازه‌های دوبعدی فولادی پیچیده و نامنظم خمشی/مهاربندی که آسیب‌های پراکنده با شدت‌های مختلف دارند، ارائه شده است. متدولوژی اشاره شده از روشی تکرارشونده مبتنی بر حساسیت با به کارگیری بهینه‌یابی غیرخطی مقید مبتنی بر الگوریتم ناحیه‌ی امن نیوتن استفاده می‌کند. پارامترهای به‌روزرسانی، ضرایب کاهش سختی اعضا یا قطعه‌هایی از اعضا سازه هستند که در حین کمیته‌سازی تفاوت میان بسامدها و شکل‌های مدی اندازه‌گیری شده و تحلیلی به‌دست می‌آیند. به منظور افزایش کارایی روش مذکور و به‌دست آوردن نتایج دقیق‌تر، به‌روزرسانی در دو مرحله انجام شده است. نتایج حاصل از ارزیابی متدولوژی پیشنهادی بر روی مدل‌های متنوع ارائه شده نشان می‌دهد: روش مذکور قابلیت شناسایی آسیب در ۳ سطح از مباحث پایش سلامت، یعنی: تشخیص آسیب در سازه، تشخیص عضو آسیب‌دیده و تعیین شدت آسیب وارده به عضو را هر چند کوچک، به‌درستی و با دقت بسیار بالایی دارد.

واژگان کلیدی: به‌روزرسانی، شناسایی آسیب، بهینه‌یابی مقید، سازه‌ی فولادی دوگانه، الگوریتم نیوتن، قاب دوبعدی، مدل اجزاء محدود.

majid.kasae@gmail.com
omidbahar@iiees.ac.ir

۱. مقدمه

بسیاری از زیرساخت‌های عمرانی، همانند: برج‌های بلند شهری، پل‌های بزرگراهی و راه‌آهن، شریان‌های حیاتی، همچون: خطوط انتقال آب، گاز و نفت، دکل‌های انتقال انرژی و سازه‌های دریایی، به دلایل گوناگون نیازمند بررسی مقاومت و سختی اعضا در طول عمر خدمت‌رسانی خود هستند. این عوامل می‌توانند شامل مواردی از قبیل: کهنسالی، کاربری نادرست، عدم تعمیر، نگهداری نامناسب و یا به دلیل عدم مطابقت با استانداردهای جدید باشند، به‌طوری که برای تأمین نیازهای جدید طراحی نشده‌اند. اولین قدم در بررسی عملکرد واقعی سازه‌ها، داشتن مدل تحلیلی مناسب و کارآمدی است که بتوان از آن برای ارزیابی یا تحلیل رفتار سیستم سازه‌ی بهره‌جست. برای دستیابی به چنین مدلی در اختیار داشتن نقشه‌هایی مانند ساخت یا دانستن ابعاد و جزئیات اعضا کفایت نمی‌کند. بلکه لازم است مدل تحلیلی موردنظر

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۸/۷، اصلاحیه ۱۳۹۷/۵/۳، پذیرش ۱۳۹۷/۵/۲۳.

DOI:10.24200/J30.2018.5024.2201

هرگونه تغییر در خصوصیات مصالح و یا خصوصیات هندسی سازه‌ها یا تغییر

خطر نیز بسیار لازم و ضروری است.^{[۱] [۵]}

در شرایط مرزی اعضا که سبب بروز تنش‌ها، جابه‌جایی‌ها و ارتعاشات نامطلوب در سازه می‌شوند، به عنوان آسیب‌سازیهی شناخته می‌شوند. روش‌های به‌روزرسانی مدل اجزاء محدود، از جمله روش‌های تشخیص آسیب در سازه‌هاست که به دو گروه اصلی تقسیم می‌شوند: روش‌های مستقیم و روش‌های تکرارشونده. در روش‌های مستقیم، نیاز به مدل‌سازی و اندازه‌گیری‌های دقیق از مدل است و بروز خطا در اندازه‌گیری‌ها منجر به نتایج اشتباه در تشخیص آسیب می‌شود.^[۷۶] از طرف دیگر، در روش‌های به‌روزرسانی تکرارشونده، فرایند اصلی شامل حل یک مسئله‌ی بهینه‌یابی است که در آن اختلاف بین مشخصه‌های دینامیکی تحلیلی و اندازه‌گیری با در نظر گرفتن پارامترهای به‌روزرسانی مجهول کمینه می‌شوند. اخیراً روش‌های به‌روزرسانی مدل اجزاء محدود بر پایه‌ی حساسیت توانسته است بر محدودیت‌های روش‌های مستقیم غلبه کند.^[۹۸] معمولاً بسیاری از روش‌های تشخیص آسیب و به‌روزرسانی مدل تحلیلی در طیف خاصی از سازه‌ها، مثلاً خرپاهای دارای آسیب‌های با شدت بالا نتایج قابل‌قبولی دارند. اما ارائه‌ی روشی که بتواند در سازه‌های متعارف مهندسی عمران با پیچیدگی بیشتر مانند قاب‌های برشی یا خمشی که آسیب‌های پراکنده با شدت‌های کوچک تا بزرگ دارند، کارایی و عملکرد خوبی داشته باشد، اهمیت بسیاری می‌یابد. لذا در نوشتار حاضر به مسئله‌ی مذکور پرداخته شده است: ارائه‌ی متدولوژی جدیدی برای ارتقاء توانمندی روش به‌روزرسانی مدل اجزاء محدود مبتنی بر حساسیت برای تشخیص آسیب در سازه‌های بزرگ‌مقیاس، با آسیب‌های پراکنده که شدت آسیب اعضاء آن نیز مقادیر متنوعی از کوچک تا بزرگ را داشته باشد.^[۱۰] به منظور شناسایی توانمندی‌ها و نقاط ضعف متدولوژی پیشنهادی، مثال‌های مختلفی با در نظر گرفتن الگوهای متفاوتی از آسیب بررسی شده است. روش مذکور بر روی مدل اجزاء محدود چند قاب دو بعدی فولادی در نظر گرفتن آسیب‌های پراکنده ارزیابی شده است و در آن باید یک مسئله‌ی بهینه‌یابی به منظور به‌روزرسانی ماتریس‌های سختی اعضا حل شود. بهینه‌یابی با کمک الگوریتم ناحیه‌ی امن نیوتن انجام شده است که به منظور هم‌گرایی بهتر، نتایج قیده‌های لازم نیز برای مسئله تعریف شده است. وجود آسیب‌های پراکنده با شدت‌های مختلف آسیب و همچنین اعمال ضرایب مجهول به همه‌ی اعضا، باعث افزایش پیچیدگی مسئله می‌شود. برای رفع مشکل مطرح شده، از حل مسئله‌ی کمترین مربعات غیرخطی مقید استفاده شده است. نتایج حاصل از ارزیابی روش موردنظر بر روی مدل‌های مختلف اجزاء محدود نشان داده است که روش مذکور، قابلیت تشخیص درست ۳ سطح شناسایی آسیب از سطوح پایش سلامت سازه‌ی را دارد:

۱. تشخیص و تفکیک اعضاء سالم و آسیب‌دیده، ۲. تعیین شدت آسیب اعضاء آسیب‌دیده هر چند کوچک و همچنین، ۳. موقعیت و محل وقوع آسیب در اعضاء آسیب‌دیده.^[۱۱]

۲. روش به‌روزرسانی مدل اجزاء محدود مبتنی بر

حساسیت

روش به‌روزرسانی مدل اجزاء محدود مبتنی بر حساسیت، از جمله روش‌های متداول در به‌روزرسانی مدل است که با به‌کارگیری شکل‌های مدی و بسامدهای اندازه‌گیری شده‌ی سیستم سازه‌ی و مقایسه‌ی مستقیم آنها با مقادیر مشابه در مدل تحلیلی اولیه، مدل اجزاء محدود سازه را اصلاح می‌کند.^[۱۲] طیف گسترده‌ی از روش‌های به‌روزرسانی مدل با ایجاد یک مسئله‌ی بهینه‌یابی اقدام به حل مسئله می‌کنند. در نوشتار حاضر، به‌روزرسانی ماتریس سختی سازه بر پایه‌ی حل مسئله‌ی بهینه‌یابی

مقید انجام شده است. در علم ریاضیات، بهینه‌یابی به عمل یافتن مقادیر کمینه یا بیشینه‌ی یک تابع هدف که از خصوصیات موردنظر طراح در سازه شکل گرفته است و در صورت لزوم تحت اعمال شرایط قیده‌های لازم قرار می‌گیرد، اطلاق می‌شود. اولین قدم برای حل یک مسئله‌ی بهینه‌یابی، ساخت مدلی مناسب است که از آن به عنوان مهم‌ترین مرحله نام برده می‌شود. پس از تعریف مدل، با کمک یک الگوریتم بهینه‌یابی مناسب می‌توان به حل مسئله پرداخت. در مواجه با مسائل بهینه‌یابی، نمی‌توان از یک الگوریتم بهینه‌یابی عمومی برای حل هر نوع مسئله استفاده کرد. در واقع یک مجموعه از الگوریتم‌ها وجود دارند که هر کدام از آن‌ها برای یک مسئله‌ی بهینه‌یابی خاص مناسب هستند. انتخاب اخیر، تأثیر مستقیم در روند حل مسئله و یا سرعت حل آن دارد و در مواردی، یک انتخاب نادرست می‌تواند باعث شود که اصلاً جوابی برای مسئله یافت نشود.^[۱۳]

الگوریتم‌های بهینه‌یابی، همگی یک فرایند تکرارشونده دارند. بهینه‌یابی با اعمال یک حدس اولیه از متغیرهایی که X نامیده شده‌اند، آغاز می‌شود و با ایجاد دنباله‌ی از تخمین‌های بهبودیافته که در واقع تکرار نامیده می‌شوند، تا رسیدن به جواب نهایی ادامه پیدا می‌کند. رویکردی که برای حرکت از یک تکرار به تکرار بعدی در الگوریتم‌های مختلف به کار می‌رود، متفاوت از یکدیگرند. بیشتر رویکردها از مقادیر تابع هدف، توابع قید و یا مقادیر مشتق‌های اول و دوم توابع ذکر شده برای پیشبرد محاسبات استفاده می‌کنند. بعضی از الگوریتم‌ها از مقادیر به دست آمده در تکرار قبلی استفاده می‌کنند و بعضی دیگر از مقادیر حاصل از تکرار فعلی استفاده می‌کنند. برای حرکت از نقطه‌ی فعلی، مثل X_k به تکرار جدید یعنی X_{k+1} ، دو رویکرد اصلی وجود دارد:

۱. جست‌وجوی خط ۱، ۲. ناحیه‌ی امن ۲. در رویکرد جست‌وجوی خط، الگوریتم ابتدا یک جهت مانند (P_k) را انتخاب می‌کند و در راستای آن شروع به جست‌وجو از نقطه‌ی فعلی X_k برای یک تکرار جدید با مقدار تابع کمتر می‌کند و این کار را تا رسیدن به جواب نهایی ادامه می‌دهد. فاصله‌ی حرکت در راستای P_k می‌تواند با حل تقریبی مسئله‌ی کمینه‌سازی یک بعدی (رابطه‌ی ۱) برای پیدا کردن طول گام مناسب به دست آید:

$$\min f(X_K + \alpha P_K) \quad (1)$$

از طریق حل دقیق معادله‌ی ۱، می‌توان به بالاترین دقت برای جهت انتخابی P_K رسید. اما از آنجایی که حل دقیق معادله‌ی ۱ دشوار و گاه غیرضروری است، می‌توان به جای حل دقیق آن از الگوریتم‌های جست‌وجوی خط بدین‌گونه بهره جست که تعداد محدودی از طول گام‌های آزمایشی ایجاد شود تا طول گامی که نزدیک‌ترین تقریب به معادله‌ی ۱ را داشته باشد، از میان آن‌ها انتخاب شود. در ادامه‌ی روند ذکر شده، در نقطه‌ی جدید، یک جهت جدید انتخاب، طول گام‌ها محاسبه و عملیات به طور مرتب تکرار می‌شود. در رویکرد دوم، یعنی رویکرد ناحیه‌ی امن، اطلاعات جمع‌آوری شده یا همان داده‌های تابع f ، برای ساخت مدل m_k که رفتاری شبیه به تابع هدف واقعی در نقطه‌ی فعلی یعنی X_K دارند، استفاده می‌شود. از آنجا که ممکن است تابع m_k تقریب خوبی از f ارائه ندهد (در حالتی که X خیلی دورتر از X_K باشد)، کمینه‌کننده‌ی m_k در محدوده‌ی در اطراف X_K محدود می‌شود. به عبارت دیگر، مقدار پیشنهادی جدید برای گام P با حل تقریبی مسئله‌ی ۲ به دست می‌آید که $X_K + P$ در داخل محدوده‌ی امن قرار می‌گیرد:

$$\min m_k(X_K + P) \quad (2)$$

اگر انتخاب موردنظر نتواند باعث کاهش مؤثر در تابع f شود، می‌توان نتیجه گرفت که محدوده‌ی بزرگی انتخاب شده است و با کوچک‌تر کردن محدوده‌ی مذکور

عددی بردارها به یکدیگر نزدیک و از بروز خطاهای عددی جلوگیری شود. در این صورت رابطه‌ی ۵ به دست می‌آید:

$$r(a) = W(\tilde{v} - v(a)) = W \begin{bmatrix} \tilde{\lambda}_1 - \lambda_1 \\ \vdots \\ \tilde{\lambda}_{mf} - \lambda_{mf} \\ \tilde{\phi}_1 - \phi_1 \\ \vdots \\ \tilde{\phi}_{m_m} - \phi_{m_m} \end{bmatrix} \quad (5)$$

که در آن، علامت \sim نشانگر مشخصه‌های اندازه‌گیری شده هستند و W ماتریس قطری مقادیر وزن متناظر با پارامترهای بردار باقیمانده است که به صورت رابطه‌ی ۶ تعریف می‌شود:

$$W = \text{diag}\left(\frac{1}{\tilde{\lambda}_1}, \dots, \frac{1}{\tilde{\lambda}_{mf}}, w_{\phi_1}, \dots, w_{m_s}\right) \quad (6)$$

با مشاهده‌ی مقادیر رابطه‌ی ۶ مشخص می‌شود که بردارهای باقیمانده‌ی مقادیر مشخصه نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده مقیاس شده‌اند، اما در مورد شکل‌های مدی مسئله اندکی تفاوت دارد. معمولاً در محاسبات مدل تحلیلی اجزاء محدود، شکل‌های مدی نسبت به ماتریس جرم نرمال می‌شوند. اما زمانی که بردارهای ذکر شده از آزمایش‌های ارتعاش محیطی استخراج می‌شوند، شکل‌های مدی نرمال نشده باقی می‌مانند. لذا برای این‌گونه موارد از مقیاس کردن هر بردار شکل مدی نسبت به یک مؤلفه‌ی مرجع ثابت (مؤلفه‌ی r ام) به صورت رابطه‌ی ۷ استفاده می‌شود:

$$r_s(a) = \frac{\phi_j^l(a)}{\phi_j^r(a)} - \frac{\tilde{\phi}_j^l}{\tilde{\phi}_j^r} = w_j^l(\phi_j^l - \tilde{\phi}_j^l) \quad (7)$$

که در آن، l و r درجه آزادی اختیاری و مرجع برای شکل‌های مدی هستند. وزن دار کردن مقادیر ذکر شده باعث هم‌گرایی بهتر مسئله‌ی بهینه‌یابی نیز می‌شود. اگر معادله‌ی ۷ را در معادله‌ی ۵ جایگذاری کنیم، عناصر قطری ماتریس وزن (w_ϕ) که متناظر با مقادیر شکل‌های مدی هستند، به صورت رابطه‌ی ۸ به دست می‌آیند:

$$w_j^l = \frac{(\phi_j^l(a)\tilde{\phi}_j^r - \tilde{\phi}_j^l\phi_j^r(a))}{\phi_j^r(a)\tilde{\phi}_j^r(\phi_j^l(a) - \tilde{\phi}_j^l)} \quad (8)$$

از طرفی، در میان داده‌های تجربی، بسامدهای به دست آمده از آزمایش، دقت بالاتری نسبت به شکل‌های مدی شناسایی شده دارند و حساسیت بالاتری نیز نسبت به تغییر خصوصیات فیزیکی سازه از خود نشان می‌دهند؛ از طرفی دیگر، خطای مقادیر شناسایی شده‌ی شکل‌های مدی حاصل از آزمایش می‌تواند پایداری مسئله‌ی بهینه‌یابی را نیز کاهش دهد، لذا می‌توان مقادیر وزن متناظر با شکل‌های مدی را به منظور کاهش اهمیت آن‌ها نسبت به بسامدها تغییر داد.^[۱۵] البته ضرایب وزن فقط در مواردی که تعداد معادلات یا بردارهای باقیمانده از تعداد مجهولات مسئله بیشتر باشد، بر روی نتایج مسئله تأثیرگذارند. در ادامه، به‌روزرسانی مدل با کمینه‌سازی باقیمانده‌ها به صورت رابطه‌ی ۹ ادامه می‌یابد:

$$\text{Min}\left[\frac{1}{\nu}r(a)^T.W.r(a)\right] = \frac{1}{\nu}\|W^{\frac{1}{\nu}}.r(a)\|^2 \quad (9)$$

عموماً وقوع آسیب در سازه‌های عمرانی باعث کاهش سختی (خمشی، برشی، پیچشی و محوری) اعضاء آن می‌شود. در ارزیابی‌های متناظر با انجام آزمایش‌های

مسئله دوباره حل می‌شود.^[۹] معمولاً ناحیه‌ی امن بیضی‌گون یا کره‌ی است. در واقع، رویکردهای ناحیه‌ی امن و جست‌وجوی خط از نظر انتخاب جهت و گام حرکتی برای رفتن به تکرار بعدی با یکدیگر متفاوت هستند. رویکرد جست‌وجوی خط با ثابت نگه داشتن جهت P_K آغاز می‌شود و به شناسایی فاصله‌ی مناسب که در واقع طول گام نامیده می‌شود و با α_K نشان داده شده است، می‌پردازد. در حالی که در رویکرد ناحیه‌ی امن، در ابتدا بیشترین فاصله انتخاب می‌شود (شعاع ناحیه‌ی امن Δ_K) و سپس جهت و فاصله‌ی گام را تا رسیدن به بهترین مقدار که محدود به این محدودیت فاصله است، جست‌وجو می‌کند. اگر نتیجه‌ی این مرحله به صورت رضایت‌بخش نباشد، فاصله را کاهش می‌دهد (Δ_K) و مراحل دوباره تکرار می‌شود.^[۱۴]

در نوشتار حاضر، دو دلیل برای انتخاب روش ناحیه‌ی امن برای حل مسئله‌ی بهینه‌یابی وجود داشته است: الف) روش‌های دیگر حساسیت مشخصه بر پایه‌ی تقریب مرتبه‌ی اول از خصوصیات مدل اجزاء محدود که از روش‌های جست‌وجوی خط استفاده می‌کنند، نمی‌توانند محدود یا قیدی برای پارامترها در نظر بگیرند و از طرفی وجود یک خطای کوچک در روش‌های جست‌وجوی خط نیز منجر به طی کردن طول گام‌های بزرگ و در نهایت عدم هم‌گرایی مسئله می‌شود، ب) رویکرد ناحیه‌ی امن، شرایط ماتریس ژاکوبین را بهبود می‌بخشد، زیرا شعاع ناحیه‌ی امن در هر تکرار به‌روز می‌شود و می‌تواند دقت تقریب را از تابع مدل بالا ببرد و همچنین به‌کارگیری ناحیه‌ی امن باعث می‌شود بتوان محدودی‌ی خاص را برای مقدار پارامترها تعریف کرد که کمک زیادی به پایداری مسئله و هم‌گرایی بهتر بهینه‌یابی می‌کند.^[۱۴] هر چند ممکن است در روش مذکور، سرعت عملیات بهینه‌یابی کاهش یابد، اما در جایی که دقت و صحت پارامترها اهمیت دارند، می‌توان از محدودیت ذکر شده در مقایسه با دقت نتایج صرف‌نظر کرد.

۳. بیان تئوری و معادلات روش به‌روزرسانی

اولین قدم برای تحلیل و بررسی یک سازه، حل معادله‌ی مشخصه‌ی حاکم بر رفتار آن است. با در اختیار داشتن ماتریس‌های سختی و جرم، مقادیر بسامدهای ارتعاشی و شکل‌های مدی به دست می‌آیند. این مقادیر می‌توانند در یک بردار به صورت رابطه‌ی ۳ تعریف شوند:

$$v(a) = [\lambda_1, \dots, \lambda_{mf}, \phi_1^T, \dots, \phi_{m_s}^T]^T \quad (3)$$

که در آن، $\omega_j^2 = \lambda_j$ مقدار مشخصه، w_j بسامد زاویه‌یابی، v_j بسامد سیستم سازه‌یابی که از رابطه‌ی $\lambda_j = (2\pi v_j)^2$ محاسبه می‌شود و ϕ_j هم نشان‌دهنده‌ی بردارهای مشخصه‌ی مدل است. اندیس‌های m_f و m_s نیز به ترتیب، تعداد بسامدها و شکل‌های مدی شناسایی شده‌ی مورد نیاز در فرایند به‌روزرسانی هستند. با محاسبه‌ی مقادیر ذکر شده از مدل اجزاء محدود و داشتن مقادیر متناظر اندازه‌گیری شده‌ی آن‌ها، بردار باقیمانده‌ها (r) به صورت تفاضل بین مقادیر متناظر به صورت رابطه‌ی ۴ تعریف می‌شود:

$$r(a) = \begin{bmatrix} r_f(a) \\ r_s(a) \end{bmatrix}, r_f : R^n \rightarrow R^{mf}, r_s : R^n \rightarrow R^{ms} \quad (4)$$

از آنجایی که پارامترهای بسامد و شکل مدی از لحاظ مقداری با یکدیگر تفاوت بسیار دارند، لازم است بردار باقیمانده‌ها به صورت وزن دار تعریف شود تا مقادیر

که در آن، $m = m_f + m_s$ و P تعداد پارامترهای به‌روزرسانی هستند. همان‌گونه که بیان شده است، در نوشتار حاضر، از رویکرد ناحیه‌ی امن به منظور هم‌گرایی بهتر استفاده شده است. در رویکرد ناحیه‌ی امن، الگوریتم در ابتدا تابع مدلی مثل m_k ، که رفتاری شبیه به تابع هدف واقعی f در نزدیکی نقطه‌ی فعلی a_k دارد، ایجاد می‌کند و با تعیین محدوده‌ی در اطراف a_k اقدام به حل مسئله خواهد کرد. ناحیه‌ی امن در واقع کره‌ی به شعاع Δ_k است که محدود به متغیرهای طراحی است، به صورتی که $\|a\| \leq \Delta_k$. شعاع در Δ_k هر تکرار به گونه‌ی تنظیم می‌شود تا توافق خوبی بین کاهش بیش‌بینی شده و مقدار واقعی تابع که به وسیله‌ی نسبت ρ_k اندازه‌گیری شده است، صورت پذیرد (رابطه‌ی ۱۷):

$$\rho_k = \frac{f(a_k) - f(a_k + z_k)}{f(a_k) - m_k(z_k)} \quad (17)$$

زمانی که توافق خوبی بین مقادیر پیش‌بینی و مقدار واقعی تابع صورت پذیرد، مقدار ρ_k برابر ۱ خواهد شد و Δ_k افزایش خواهد یافت و اگر توافق خوبی صورت نپذیرفته باشد، ρ_k کوچک و یا حتی منفی خواهد شد که در این حالت Δ_k کاهش خواهد یافت. در غیر دو مورد ذکر شده نیز Δ_k بدون تغییر باقی خواهد ماند. حساسیت‌های مودی نسبت به پارامترهای تصحیح a^e می‌توانند با به‌کارگیری تفاضل‌های محدود نیز محاسبه شوند. مشتقات جزئی مرتبه‌ی اول هر کدام از بردارهای باقیمانده برای بسامد و شکل‌های مودی نسبت به a به صورت رابطه‌های ۱۸ و ۱۹ بیان می‌شوند:

$$\frac{\delta r_f}{\delta a^e} = \frac{1}{\lambda_j} \frac{\delta \lambda_j}{\delta a^e} \quad (18)$$

$$\frac{\delta r_s}{\delta a^e} = \frac{1}{\phi_j^r} \frac{\delta \phi_j^r}{\delta a^e} - \frac{\phi_j^l}{(\phi_j^r)^2} \frac{\delta \phi_j^l}{\delta a^e} \quad (19)$$

لازم به ذکر است، از آنجا که الگوریتم ناحیه‌ی امن نیوتن بر پایه‌ی بهینه‌یابی مقید است، مقدار پارامترها یا ضریب سختی اعضا بین صفر (آسیب کامل) و یک (کاملاً سالم) محدود شده‌اند که این محدودیت به عنوان قید به برنامه معرفی شده است. در نوشتار حاضر، برای به‌روزرسانی مدل اجزاء محدود با استفاده از روش ناحیه‌ی امن برای سازه‌های بزرگ‌مقیاس، برای حل مسئله‌ی بهینه‌یابی غیرخطی از روش کمترین مربعات استفاده شده است. روش کمترین مربعات رویکردی استاندارد برای حل تقریبی سیستم‌هایی است که در آن‌ها تعداد معادلات از تعداد مجهولات بیشتر باشد. کمترین مربعات، یعنی پاسخ کلی که مجموع مربعات خطی ایجاد شده در هر کدام از معادلات را به میزان کمینه می‌رساند. در روش کمترین مربعات، که نخستین بار توسط فردریش گاوس در سال ۱۷۹۴ میلادی ارائه شده است، بهترین مدل برازش شده برابر مجموعه‌ی از داده‌های مدلی است که در آن مجموع مربعات باقیمانده‌ها کمینه باشد. مسائل کمترین مربعات خود به دو دسته‌ی کلی خطی و غیرخطی تقسیم می‌شوند. در واقع اگر بردارهای باقیمانده نسبت به همه‌ی مجهولات رابطه‌ی خطی داشته باشد، مسئله کمترین مربعات خطی است و در غیر این صورت مسئله از نوع کمترین مربعات غیرخطی است. مسائل کمترین مربعات خطی در تجزیه و تحلیل‌های آماری برازش رخ می‌دهند و حل بسته دارند. اما مسائل کمترین مربعات غیرخطی حل بسته ندارند و معمولاً به وسیله‌ی یک فرایند تکراری حل می‌شوند. در این حالت در هر تکرار، مدل می‌تواند به وسیله‌ی بسط سری تیلور مرتبه‌ی اول خطی‌سازی شود.^[۱۹، ۱۸] بنابراین مفهوم کلی محاسبات در هر دو حالت یکسان است.

دینامیکی بر روی سازه‌های حقیقی، اگرچه تغییر در خصوصیات مانند ممان اینرسی و یا سطح مقطع می‌تواند معرف بهتری از آسیب اعضا باشند، اما عموماً برای سهولت و افزایش سرعت ارزیابی از معیار کاهش مدول کشسانی اعضا استفاده می‌شود. با این انتخاب، ارزیابی آسیب اعضا می‌تواند با اعمال یک ضریب خطی، نشانگر کاهش سختی اعضا آسیب دیده‌ی سازه منظور شود. بنابراین پارامترهای فیزیکی مجهول مدل عددی در واقع همان ضرایب ماتریس سختی عضو در مسئله‌ی به‌روزرسانی مدل اجزاء محدود هستند.^[۱۶، ۱۷] مقادیر به‌روز شده‌ی سختی اعضا در مدل به صورت رابطه‌ی ۱۰ بیان می‌شود:

$$K^e = K_0^e (\lambda - a^e) \quad (10)$$

و ماتریس سختی کلی سازه، با استفاده از رابطه‌ی ۱۱ به دست می‌آید:

$$K = K^u + \sum_{e=1}^n K_0^e (\lambda - a^e) \quad (11)$$

که در آن، K ماتریس سختی کلی و K^u ماتریس سختی اعضایی است که خصوصیات آن‌ها بدون تغییر باقی مانده‌اند. همچنین K^e و K_0^e به ترتیب ماتریس‌های به‌روز شده و مقادیر اولیه‌ی ماتریس سختی هستند. پارامتر n نیز نشانگر تعداد اعضایی است که ماتریس سختی آن‌ها در روند به‌روزرسانی نیاز به اصلاح دارند.^[۱۷] الگوریتم بهینه‌یابی که برای کمینه‌سازی تابع هدف استفاده شده است، روش نیوتن با رویکرد ناحیه‌ی امن است که یک روش تکرارشونده‌ی مبتنی بر حساسیت است. مدل درجه دوم $m_z(z)$ به وسیله‌ی سری ناقص تیلور برای تابع هدف $f(a)$ به صورت رابطه‌ی ۱۲ تعریف می‌شود:

$$\text{Min}[m_z(z)] = f_s + [\nabla f_s]^T z + \frac{1}{2} z^T [\nabla^2 f_s] z \quad (12)$$

که در آن، $\|z\| \leq \Delta_s$ در جایی که z نشان‌دهنده‌ی بردار گام برای a است. علائم ∇f_s ، f_s و $\nabla^2 f_s$ به ترتیب معرف تابع هدف، گرادیان و هسیان^۲ تابع هدف هستند. بعد از طی یک فرایند تکراری، مقدار کمینه‌ی a^* برای تابع هدف $f(a)$ به گونه‌ی به دست می‌آید که گرادیان تابع هدف در مقدار مذکور برابر یا بسیار نزدیک به صفر است. توابع گرادیان و هسیان نیز به صورت رابطه‌های ۱۳ و ۱۴ تعریف می‌شوند:

$$\nabla f(a) = \sum_{j=1}^k r_j(a) \nabla r_j(a) = J_a(a)^T r(a) \quad (13)$$

$$\nabla^2 f(a) = J_a(a)^T J_a(a) + \sum_{j=1}^k r_j(a) \nabla^2 r_j(a) \approx J_a(a)^T J_a(a) \quad (14)$$

که در آن‌ها، J_a ماتریس ژاکوبین (یا ماتریس حساسیت) است که شامل مشتقات جزئی مرتبه‌ی اول بردارهای باقیمانده نسبت به پارامتر r_j است (رابطه‌ی ۱۵):

$$\Delta r_j = \sum_{e=1}^n \frac{\delta r_j}{\delta a^e} \Delta a^e \quad (15)$$

و در شکل کلی (رابطه‌ی ۱۶):

$$[J]_{m \times n} = \begin{bmatrix} \frac{\delta r_1}{\delta a_1} & \frac{\delta r_1}{\delta a_2} & \frac{\delta r_1}{\delta a_3} & \dots & \frac{\delta r_1}{\delta a_p} \\ \frac{\delta r_2}{\delta a_1} & \frac{\delta r_2}{\delta a_2} & \frac{\delta r_2}{\delta a_3} & \dots & \frac{\delta r_2}{\delta a_p} \\ \frac{\delta r_r}{\delta a_1} & \frac{\delta r_r}{\delta a_2} & \frac{\delta r_r}{\delta a_3} & \dots & \frac{\delta r_r}{\delta a_p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\delta r_m}{\delta a_1} & \frac{\delta r_m}{\delta a_2} & \frac{\delta r_m}{\delta a_3} & \dots & \frac{\delta r_m}{\delta a_p} \end{bmatrix} \quad (16)$$

که در آن، ξ و ε به ترتیب درصد مقدار نوفه و عددی تصادفی با توزیع نرمال استاندارد هستند که به صورت رابطه‌ی ۲۶ نشان داده می‌شود:

$$\varepsilon \sim N(0, I) \quad (26)$$

همچنین در معادله‌ی ۲۵، R و R_n به ترتیب پاسخ سازه‌ی آسیب‌دیده و پاسخ سازه‌ی آسیب‌دیده‌ی آلوده به نوفه هستند.

۲.۱.۳. اصلاح داده‌های نوفه‌دار

با استفاده از داده‌های حاصل از تحلیل سازه‌ی سالم به عنوان داده‌ی کمکی و داده‌های آلوده به نوفه می‌توان وزن‌هایی برای داده‌های کمکی به دست آورد که از ضرب آن‌ها در داده‌های کمکی تخمینی از داده‌های اصلی و بدون نوفه به دست می‌آید. اگر V_n و V_a به ترتیب داده‌های کمکی و داده‌های نوفه‌دار باشند، وزن بهینه (W) با استفاده از رابطه‌ی ۲۷ به دست می‌آید:

$$W = \frac{\sum_{k=1}^j V_n(k) V_a(k)}{\sum_{k=1}^j V_a^T(k)} \quad (27)$$

با استفاده از وزن به دست آمده، داده‌های بدون نوفه با اندکی خطا به صورت رابطه‌ی ۲۸ به دست می‌آیند:

$$Z(k) = W V_a(k) \quad (28)$$

که در آن، $Z(k)$ داده‌های بدون نوفه از سازه‌ی آسیب‌دیده و $V_a(k)$ داده‌های کمکی از سازه‌ی سالم هستند.

۲.۲. فشرده‌سازی استاتیکی

برای حذف آن دسته از درجه‌های آزادی سازه که جرمی در آن امتداد وجود ندارد، می‌توان از روش‌های فشرده‌سازی استفاده کرد. یکی از پرکاربردترین روش‌های فشرده‌سازی، روش تراکم استاتیکی است. در مدل‌های تحلیلی که جرم سازه به صورت متمرکز در محل‌گره‌ها در نظر گرفته شده است، عناصر روی قطر اصلی ماتریس جرم که مرتبط با درجه‌های آزادی دورانی هستند، مقادیر صفر دارند. برای پرهیز از مشکلات عددی در هنگام تحلیل‌های دینامیکی، می‌توان با احتساب آثار ناشی از درجه‌های آزادی ذکر شده در ماتریس‌های سازه‌ی، آن‌ها را به کمک روش فشرده‌سازی استاتیکی کنار گذاشت. به این ترتیب معادله‌ی حرکت برای سازه‌ی بدون میرایی در شکل افزای شده به صورت رابطه‌ی ۲۹ در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{bmatrix} m_{tt} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{u}_t \\ \bar{u}_\theta \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{tt} & k_{t\theta} \\ k_{\theta t} & k_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_t \\ u_\theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p_t(t) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (29)$$

که در آن، u_θ درجه آزادی بدون جرم است که از معادلات مستقیم کنار گذاشته می‌شود و u_t درجه آزادی باقیمانده است که پاسخ‌های آن‌ها قابل محاسبه و اندازه‌گیری خواهد بود. با انجام اندکی محاسبات ساده ریاضی، تصحیح ماتریس سختی با احتساب سختی درجه‌های آزادی دورانی گره‌ها به صورت رابطه‌ی ۳۰ خواهد بود:

$$\hat{k}_{tt} = k_{tt} - k_{t\theta}^T k_{\theta\theta}^{-1} k_{\theta t} \quad (30)$$

که در آن، \hat{k}_{tt} ماتریس سختی متراکم یا فشرده شده است. به این ترتیب، معادله‌ی جنبش دینامیکی سازه به فرم رابطه‌ی ۳۱ درخواهد آمد:

$$m_{tt} \ddot{u}_{tt} + \hat{k}_{tt} u_t = p_t(t) \quad (31)$$

۱.۳. اثر نوفه بر داده‌های آزمایشگاهی

در آزمایش‌های محیطی، همواره داده‌های اندازه‌گیری شده به نوفه آلوده‌اند. از جمله عواملی که سبب ایجاد نوفه در داده‌ها می‌شوند، می‌توان به این موارد اشاره کرد: نوفه‌های ناشی از ثبت داده‌ها، نوفه‌های فرایند جمع‌آوری و انتقال داده‌ها و خطاهای ناشی از تحلیل‌های عددی. برای مواجهه با داده‌های آلوده به نوفه و هموار ساختن داده‌ها، روش‌های مختلفی وجود دارد که از جمله می‌توان به گسسته‌سازی داده‌ها، رگرسیون خطی و غیرخطی، خوشه‌بندی و روش‌های ترکیبی بازرسی اشاره کرد.^[۱۸] عموماً حذف کامل نوفه به دلایل متعدد بسیار دشوار است. در دسترس نبودن تخمین دقیق مقدار نوفه، تغییرات نوفه با زمان در حین داده‌برداری، ضعف روش‌های تخمین دقیق داده‌ها و وجود خطا در روش‌های تخمین در حوزه‌ی بسامد. با توجه به اینکه همواره ممکن است به دلیل وجود نوفه در سنجش‌گر، خطاهایی در برداشت داده‌ها به وجود آید، مشخص است که تغییرات بسیار کوچک در بردار پاسخ می‌تواند در نتیجه‌ی حاصل شده، تأثیرگذاری بالایی داشته باشد. علت این امر را می‌توان به این صورت بیان کرد که اگر ماتریس S غیرمفرد باشد، می‌توان رابطه‌ی ۲۰ را نوشت:

$$\delta = S^{-1} \delta \lambda \quad (20)$$

اگر $\delta \lambda$ شامل نویز یا خطاهای محاسباتی ناشی از گرد کردن محاسباتی مانند ε_λ باشد، در این صورت این خطا به صورت رابطه‌ی ۲۱ در پاسخ ظاهر خواهد شد:

$$\delta + \varepsilon_\delta = S^{-1} (\delta \lambda + \varepsilon_\lambda) \quad (21)$$

پس می‌توان رابطه‌ی ۲۲ را نوشت:

$$\varepsilon_\delta = S^{-1} \varepsilon_\lambda \quad (22)$$

با استفاده از خواص نرم ماتریس‌ها و محاسبه‌ی نرم رابطه‌ی اخیر، می‌توان رابطه‌ی ۲۳ را نوشت:

$$\|\varepsilon_\delta\| \leq \|S^{-1}\| \|\varepsilon_\lambda\| \quad (23)$$

از رابطه‌ی ۲۳ می‌توان استنباط کرد که اگر $\|S^{-1}\|$ کوچک باشد، یعنی تغییرات کم در $\delta \lambda$ ، برای مقدار کوچک $\|\varepsilon_\lambda\|$ ، مقدار $\|\varepsilon_\delta\|$ نیز کوچک خواهد بود. ولی برای مقادیر بزرگ $\|S^{-1}\|$ ، مقدار $\|\varepsilon_\delta\|$ بزرگ خواهد بود، حتی اگر $\|\varepsilon_\lambda\|$ مقدار کوچکی داشته باشد. پس ابتدا باید تشخیص داده شود که دستگاه معادله‌ی ۲۳ خوش حالت است یا بد حالت. به همین منظور، عدد وضعیت به صورت رابطه‌ی ۲۴ تعریف می‌شود:

$$\kappa = \|S\| \|S^{-1}\| \quad (24)$$

با استفاده از معادله‌ی ۲۴ نتیجه می‌شود که اگر عدد κ کوچک باشد، نشان‌دهنده‌ی این است که ماتریس S و دستگاه معادله‌ی ۲۳، خوش حالت است و اگر عدد κ خیلی بزرگ باشد، بیانگر آن است که ماتریس S نزدیک به مفرد شدن است و آن را بد حالت می‌گویند و خطای محاسباتی زیاد خواهد بود.

۱.۱.۳. اعمال نوفه بر روی داده‌ها

با فرض اینکه در برداشت داده‌ها، سنجش‌گرها خطای اندکی داشته باشند، اثر نوفه در داده‌ها را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۲۵ در نظر گرفت:^[۲۰]

$$R_n = R + \xi \times \varepsilon \times R \quad (25)$$

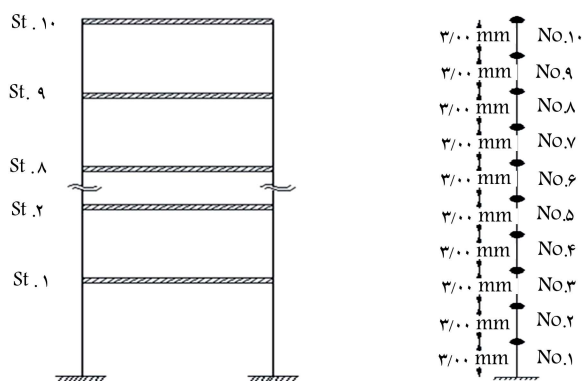
۴. تحلیل عددی سازه‌های مدل

برای استفاده از روش تحلیل عددی ذکر شده به منظور اعمال ضرایب مجهول به روزرسانی نیاز به در اختیار داشتن ماتریس‌های سختی کلیه اعضا و نیز ماتریس سختی کلی سازه است. بدین منظور برای ایجاد مدل و تحلیل اولیه‌ی سازه‌ی سالم، نرم‌افزاری در برنامه‌ی متلب ایجاد شد تا کلیه‌ی ماتریس‌های سختی اعضا در دسترس باشند. از صحت نرم‌افزار متلب از طریق مقایسه‌ی نیروها و تغییرمکان‌های به دست آمده از آن با مدل ایجاد شده در برنامه‌ی SAP2000 اطمینان حاصل شد. پس از اطمینان از صحت نتایج، ضرایب مجهول به ماتریس سختی هر یک از اعضا اختصاص داده شدند.

۱.۴. تشخیص آسیب در یک سازه‌ی برشی ۱۰ طبقه

در نمونه‌ی حاضر، یک سازه‌ی برشی ۱۰ طبقه در نظر گرفته شده است. هدف از حل مسئله‌ی کنونی، تعیین آسیب‌های کلی طبقه و شدت آن‌ها برای مواردی است که تعداد آسیب‌ها، زیاد و شدت آن‌ها بالاست (شکل ۱). لذا سازه‌ی برشی مذکور با یک ستون طره با جرم‌های متمرکز معادل‌سازی شده است. مقطع عرضی در نظر گرفته شده برای اعضا در مثال کنونی، ۲IPE140 است که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است. با مشخص بودن مشخصات مقاطع و جرم‌ها می‌توان اطلاعات مودی سازه‌ی سالم را به دست آورد. برای این منظور، در هر گره، دو درجه آزادی یعنی حرکت در راستای افقی و قائم در نظر گرفته شده و از درجه آزادی دورانی صرف‌نظر شده است. در ادامه، با انجام فشرده‌سازی استاتیکی، فقط درجه‌های آزادی افقی برای تحلیل مودی منظور شده و لذا درجه‌های آزادی ماتریس سختی سازه به عدد ۱۰ کاهش یافته است. پس از به دست آوردن بسامد و شکل‌های مدی سازه‌ی سالم، یک الگوی آسیب برای سازه در نظر گرفته شد. برای این منظور سختی هر یک از اعضا به میزان مشخصی کاهش یافته (جدول ۲)، و دوباره تحلیل مدی، این بار بر روی سازه‌ی آسیب‌دیده انجام پذیرفته است. مقادیر بسامدی سازه‌ی سالم و آسیب‌دیده در جدول ۳ ارائه شده است.

در این مرحله با در اختیار داشتن اطلاعات مدی برای سازه‌ی سالم و همچنین



شکل ۱. سازه‌ی معادل برشی.

جدول ۱. مشخصات اعضا برای سازه‌ی برشی معادل.

نوع	مقطع	سطح مقطع	مان اینرسی	مدول کشسانی	اعضا
					کلیه‌ی اعضا
		cm^2	cm^4	kg/cm^2	۲IPE140
			۱۰۸۲	2.1×10^6	

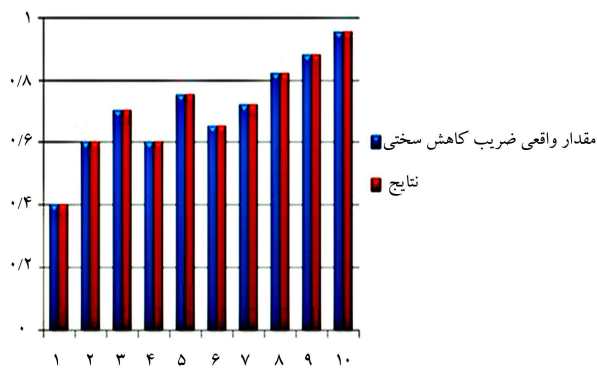
سازه‌ی آسیب‌دیده با کمک نرم‌افزارهای تهیه شده در فضای برنامه‌ی متلب به روزرسانی مدل انجام شده است. همان‌طور که قبلاً بیان شده است، در ابتدا ضرایب مجهولی به عنوان ضرایب کاهش سختی به همه‌ی اعضا اختصاص داده شد. در پایان به روزرسانی مدل، میزان کاهش سختی در هر عضو و همچنین شماره‌ی آن عضو، که سختی آن کاهش یافته است، در اختیار است. بدین ترتیب علاوه بر به روزرسانی مدل تحلیلی سازه، شماره‌ی اعضا آسیب‌دیده (تعیین محل آسیب) و همچنین میزان کاهش سختی اعضا (شدت آسیب هر عضو) مشخص می‌شود. پس از انجام فرایند به روزرسانی، مقدار ضرایب مطابق شکل ۲ به دست آمده‌اند. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، مقادیر به دست آمده از به روزرسانی، با دقت بسیار بالایی کلیه‌ی آسیب‌ها اعم از موقعیت وقوع و شدت آن‌ها را به خوبی شناسایی کرده است، که بیانگر توانمندی روش مذکور است.

جدول ۲. میزان کاهش سختی در اعضا.

اعضا	شماره ضریب کاهش سختی	اعضا	شماره ضریب کاهش سختی
۰٫۶۵	۶	۰٫۴	۱
۰٫۷۲	۷	۰٫۶	۲
۰٫۸۲	۸	۰٫۷	۳
۰٫۸۸	۹	۰٫۶	۴
۰٫۹۵	۱۰	۰٫۷۵	۵

جدول ۳. بسامدهای سازه‌ی برشی ۱۰ درجه آزادی.

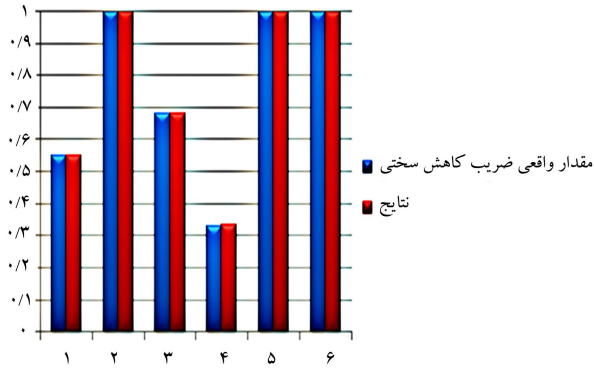
شماره‌ی مد	بسامدهای سازه	
	سالم	آسیب‌دیده
۱	۱۹٫۳۶	۷٫۳۵
۲	۱۷۹٫۳۵	۴۶٫۸۴
۳	۵۰۹٫۲۳	۱۱۰
۴	۹۹۴٫۰۸	۱۸۲٫۴۴
۵	۱۵۹۰٫۲۰	۳۰۰٫۸۳
۶	۲۲۳۶٫۳۷	۴۱۶٫۳۲
۷	۲۸۶۳٫۹۴	۶۱۲٫۲۸
۸	۳۴۰۵٫۵۲	۹۳۱٫۹۸
۹	۳۸۰۲٫۷۳	۱۱۰۴٫۳۵
۱۰	۴۰۱۲٫۶۷	۱۲۹۹٫۶۵



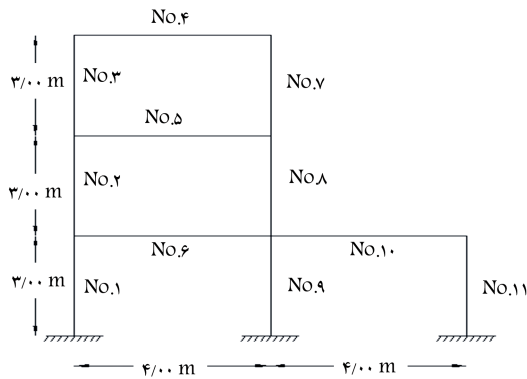
شکل ۲. ارزیابی آسیب در اعضا سازه‌ی برشی ۱۰ درجه آزاد.

جدول ۶. سه بسامد اول قاب خمشی فولادی دو طبقه.

شماره‌ی مد	بسامدهای سازه	
	سالم	آسیب دیده
۱	۳۸۵٫۷۳	۲۸۵٫۵۴
۲	۲۶۴۳٫۸۶	۱۸۴۲٫۰۲
۳	۸۸۱۰۹٫۶۲	۵۴۸۵۲٫۶۱



شکل ۴. مقایسه‌ی ضرایب کاهش سختی با نتایج به دست آمده از تحلیل.



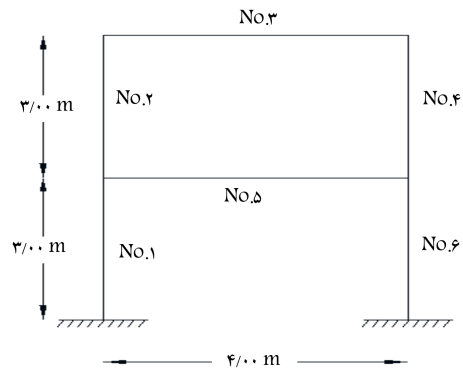
شکل ۵. قاب در نظر گرفته شده برای قاب نامنظم و ضرایب کاهش سختی.

۳.۴. تشخیص آسیب در یک قاب خمشی فولادی نامنظم ۳ طبقه

در مثال حاضر، یک قاب خمشی فولادی ۳ طبقه با هندسه نامنظم در نظر گرفته شده است (شکل ۵). هر عضو از قاب مستقلاً منظور شده است. جرم‌های سازه‌ی مذکور در گره‌های اتصال اعضا به یکدیگر به صورت متمرکز در نظر گرفته شده‌اند. مقطع عرضی در نظر گرفته شده برای اعضا IPE۱۴۰ بوده است.

برای هر گره سه درجه آزادی یعنی حرکت در سه راستای افقی، قائم و دورانی در نظر گرفته شده، با انجام فشرده‌سازی استاتیکی برای حذف درجه‌های آزادی دورانی گره‌ها، ابعاد ماتریس سختی سازه به عدد ۱۴ کاهش داده شد. برای الگوی آسیب، میزان کاهش سختی اعضا و همچنین بسامدهای سازه‌ی سالم و آسیب دیده در جدول‌های ۷ و ۸ ارائه شده است. در مثال کنونی، برای به‌روزرسانی فقط از سه بسامد و اطلاعات یک شکل مد استفاده شده است.

با در اختیار داشتن اطلاعات سازه‌ی سالم و آسیب دیده می‌توان مدل تحلیلی را به‌روزرسانی کرد. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از به‌روزرسانی مدل تحلیلی با نتایج مورد انتظار کاملاً تفاوت ندارند. برای رفع مشکل مذکور و به منظور توزیع جرم در نقاط بیشتری از سازه و همچنین افزایش بردارهای



شکل ۳. قاب ۲ طبقه‌ی فولادی در نظر گرفته شده.

جدول ۴. ضرایب کاهش سختی در اعضا.

شماره‌ی اعضا	ضریب کاهش سختی
۱	۰٫۵۵
۳	۰٫۶۸
۴	۰٫۳۳

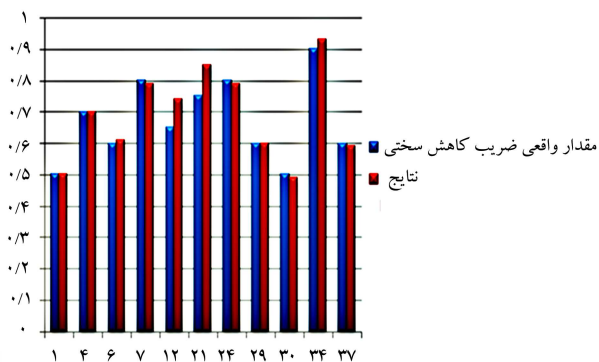
جدول ۵. مشخصات اعضا برای قاب خمشی فولادی دو طبقه.

نوع اعضا	سطح مقطع ممان اینرسی مدول کشسانی		
	مقطع	(cm^2)	(kg/cm^2)
کاپیه‌ی تیرها و ستون‌ها IPE۱۴۰	۱۶٫۴	۵۴۱	$۲٫۱ \times ۱۰^۶$

۲.۴. تشخیص آسیب در یک قاب خمشی فولادی ۲ طبقه

در مثال حاضر، یک قاب خمشی فولادی ۲ طبقه در نظر گرفته شده است (شکل ۳). هر عضو از قاب به عنوان یک عضو مستقل و جرم‌ها در گره‌های محل اتصال اعضا به یکدیگر به صورت متمرکز در نظر گرفته شده‌اند. مقطع عرضی در نظر گرفته شده برای مثال حاضر برای اعضا، IPE۱۴۰ بوده است که مشخصات آن در جدول ۴ ارائه شده است.

با مشخص بودن مشخصات مقاطع و جرم‌ها می‌توان اطلاعات مدی سازه‌ی سالم را به دست آورد. برای هر گره سه درجه آزادی، حرکت در سه راستای افقی، قائم و دورانی در نظر گرفته شده است. با انجام فشرده‌سازی استاتیکی درجه‌های آزادی به منظور حذف درجه‌های آزادی دورانی در گره‌ها، ماتریس سختی سازه به عدد ۸ کاهش داده شده است. پس از به دست آمدن بسامدها و شکل‌های مدی سازه‌ی سالم، الگوی آسیب به صورت کاهش سختی اعضا ۱، ۳ و ۴ منظور شده است. میزان کاهش سختی اعضا و همچنین سه بسامد اول سازه‌ی سالم و آسیب دیده به ترتیب در جدول‌های ۵ و ۶ ارائه شده است. در مثال حاضر، برای به‌روزرسانی مدل تحلیلی، فقط از سه بسامد اول و اطلاعات یک شکل مد استفاده شده است. با در اختیار داشتن اطلاعات سازه‌ی سالم و آسیب دیده، نتایج تحلیل مدل به‌روزرسانی به دست می‌آید. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، مقادیر به دست آمده از به‌روزرسانی با ضرایب اعمال شده به سازه مطابقت خوبی دارد.



شکل ۸. مقایسه‌ی ضرایب کاهش سختی با نتایج به‌دست آمده از تحلیل.



شکل ۹. مقایسه‌ی ضرایب کاهش سختی با نتایج به‌دست آمده از تحلیل دوم.

نقاط در نظر گرفته شده به عنوان جرم متمرکز در سازه‌ی مذکور سبب می‌شود اطلاعات دقیق‌تری از تغییرات بسامدی و شکل مدی اعضاء سازه به‌دست آید. نمای مدل جدید و مقایسه‌ی نسبت تعداد معادلات به تعداد مجهولات در شکل ۷ ارائه شده است. ضرایب کاهش سختی و شماره‌ی اعضاء آسیب‌دیده برای مدل جدید و همچنین نتایج حاصل از به‌روزرسانی بر روی مدل مذکور در شکل ۸ مشاهده می‌شود.

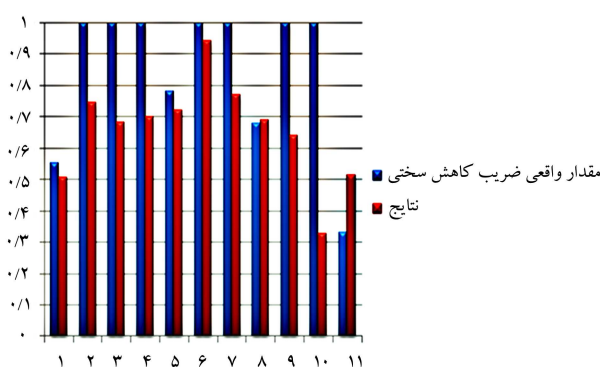
همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، روش تحلیلی موردنظر توانسته است در حالت دوم اعضاء آسیب‌دیده را به درستی شناسایی و مقادیر آسیب را تعیین کند. اما اگرچه در بیشتر اعضاء، نتایج کاملاً دقیق است، برخی اعضاء، مانند اعضاء ۱۲ و ۲۱ هستند که این روش به خوبی نتوانسته شدت آسیب را در آن‌ها تعیین کند. همچنین در تعیین ضرایب اعضاء سالم که انتظار می‌رود کلیه‌ی ضرایب برابر ۱ باشند، مشاهده شد که ضرایب بین ۰٫۹۴ تا ۱ متغیر هستند. برای رفع مشکل ذکر شده از رویکردی جدید استفاده شده است. بدین منظور به‌جای انجام یک تحلیل بر روی سازه، دو تحلیل پیاپی برای یافتن ضرایب مجهول انجام شده است. در تحلیل ابتدایی، ضرایب مجهول به همه اعضاء اعمال و در ادامه، پس از انجام بهینه‌یابی مرحله‌ی اول، اعضاء سالم و آسیب‌دیده شناسایی و از هم تفکیک شدند. بدین معنی که با خارج کردن اعضاء با آسیب کمتر از ۵٪ از روند بهینه‌یابی، تعداد ضرایب مجهول کاهش پیدا کرده است؛ در حالی که تعداد بردارهای باقیمانده، همچنان ثابت باقی مانده است. لازم به ذکر است در آسیب‌های کمتر از ۵٪، عملاً مقادیر تغییرات در ماتریس‌های سختی بسیار جزئی خواهد بود. با طی روند ذکر شده مشاهده می‌شود که علاوه بر هم‌گرایی بهتر مسئله و به‌دست آوردن نتایج دقیق‌تر، سرعت انجام تحلیل نیز به‌طور قابل‌ملاحظه‌ی کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از به‌روزرسانی که از حذف

جدول ۷. ضرایب کاهش سختی در اعضا.

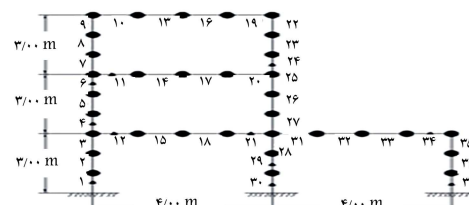
شماره‌ی اعضا	ضریب کاهش سختی
۱	۰٫۵۵
۵	۰٫۷۸
۸	۰٫۶۸
۱۱	۰٫۳۳

جدول ۸. بسامدهای مثال شماره‌ی سه.

شماره‌ی مد	بسامدهای سازه	سالم	آسیب‌دیده
۱	۱۹۵٫۴۵	۱۱۷	۱۱۷
۲	۱۲۰۶٫۷۵	۷۴۵	۷۴۵
۳	۲۵۲۲٫۷۵	۱۷۲۴	۱۷۲۴



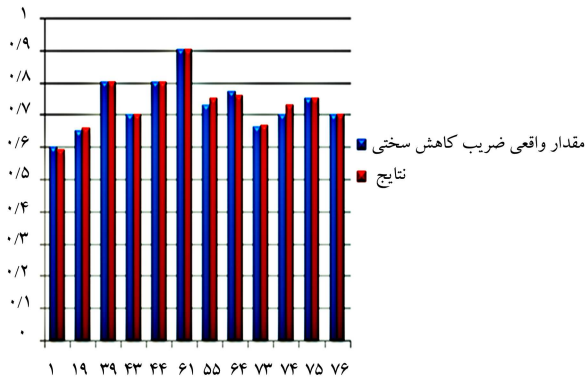
شکل ۶. مقایسه‌ی ضرایب کاهش سختی با نتایج به‌دست آمده از تحلیل.



حالت دوم	حالت اول	
۲	۲	تعداد مدهای به‌کار رفته در تحلیل
۶۶	۱۴	تعداد مؤلفه‌های هر مد
۳۷	۱۱	تعداد مجهولات
۱۳۴	۳۰	تعداد بردارهای باقیمانده
۳/۶۲	۲۲/۷۶	نسبت تعداد معادلات به مجهولات

شکل ۷. نمای مدل و مقایسه‌ی برخی پارامترها در مدل اولیه و مدل جایگزین قاب نامنظم.

باقیمانده‌ی هر تیر به ۴ عضو و هر ستون به ۳ عضو، مطابق شکل ۷ تقسیم‌بندی می‌شوند. از آنجا که حل مسئله با کمک روش کمترین مربعات غیرخطی صورت پذیرفته است، افزایش تعداد معادلات نسبت به تعداد مجهولات می‌تواند کمک زیادی به هم‌گرایی بهتر مسئله و به‌دست آمدن نتایج دقیق‌تر کند. با افزایش تعداد اعضاء از ۱۱ به ۳۷، تعداد درجه‌های آزادی و بردارهای باقیمانده یعنی بسامدها و مؤلفه‌های شکل‌های مدی نیز افزایش می‌یابند. همچنین افزایش



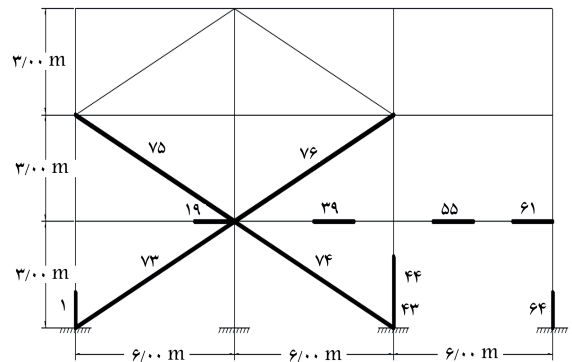
شکل ۱۱. مقایسه‌ی ضرایب کاهش سختی با نتایج به دست آمده از تحلیل.

جدول ۱۰. بسامدهای آلوده به نوفه و بدون نوفه برای قاب با سیستم ترکیبی.

شماره	بسامدهای سازی آسیب دیده	
	واقعی	با ۱٫۵ درصد نوفه / با ۴ درصد نوفه
۱	۴۰٫۸۴	۴۰٫۷۲
۲	۶۱٫۸۵	۶۲٫۰۹
۳	۶۴٫۰۷	۶۴٫۹۹
۴	۶۵٫۷۹	۶۶٫۸۸
۵	۶۶٫۷۲	۶۶٫۰۶
۶	۶۷٫۷۸	۶۶٫۹۷
۷	۶۸٫۱۵	۶۸٫۸۵
۸	۶۸٫۴۳	۶۹٫۱۶
۹	۶۸٫۵۶	۶۹٫۰۷
۱۰	۶۸٫۷۲	۶۹٫۲۱

دوم، داده‌ها به ۴٪ نوفه آلوده هستند. به منظور مقایسه و مشاهده‌ی اثر نوفه در بسامدهای سازی آسیب دیده در جدول ۱۰، ده بسامد اول سازه در حالت بدون نوفه، ۱٫۵٪ نوفه و ۴٪ نوفه ارائه شده است.

به منظور ایجاد داده‌های تصادفی با توزیع نرمال استاندارد از دستور Randn در برنامه‌ی متلب استفاده شده است. با در اختیار داشتن داده‌های آلوده به نوفه می‌توان با کمک روش پیشنهادی اقدام به تعیین ضرایب مجهول و به‌روزرسانی مدل کرد. به منظور مقایسه‌ی هر چه بهتر نتایج به دست آمده از به‌روزرسانی مدل تحلیلی با استفاده از داده‌های آلوده به ۱٫۵٪ نوفه و ۴٪ نوفه، نتایج مذکور با مقادیر شناسایی شده‌ی بدون نوفه و همچنین مقادیر آسیب‌های واقعی در شکل ۱۲ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با مقایسه‌ی نتایج مشاهده می‌شود، در حالت ۱٫۵٪ نوفه، مقادیر آسیب اعضا آسیب دیده در بیشتر موارد به درستی شناسایی شده است. اما در حالت مذکور، خطای شناسایی مثبت است، یعنی معرفی عضو آسیب دیده در حالتی که آن عضو سالم است، نیز در ۴ عضو دیگر مشاهده می‌شود. لذا در حالت ۱٫۵٪ نوفه، خطای شناسایی منفی است، یعنی عدم تشخیص آسیب در اعضا حقیقتاً آسیب دیده مشاهده نمی‌شود. اگرچه در خطای شناسایی مثبت تا حدود ۸٪ اختلاف مشاهده می‌شود، مقادیر آسیب شناسایی شده‌ی واقعی کمتر از ۵٪ با مقدار واقعی تفاوت دارند. با توجه به اینکه از نوفه به صورت تصادفی در داده‌ها استفاده شده است، بنابراین طبیعی است در اعضایی که حقیقتاً آسیبی وجود نداشته است، به دلیل وجود نوفه‌ی اعوجاجی در شکل‌های مدی نمود یافته باشد که روش پیشنهادی در مقایسه با شکل مد حقیقی و خالص سازه، آن را به آسیب نسبت داده باشد.



شکل ۱۰. قاب در نظر گرفته شده با سیستم ترکیبی.

جدول ۹. مشخصات مقاطع برای قاب با سیستم ترکیبی.

نوع	سطح مقطع		
	مقطع	مان اینرسی (cm^4)	مدول کشسانی (kg/cm^2)
کلیه‌ی تیرها	IPE ۱۴۰	۵۴۱	21×10^6
کلیه‌ی ستون‌ها	۲IPE ۱۴۰	۱۰۸۲	21×10^6
کلیه‌ی بادبندها	UNP ۱۰۰	۱۳٫۵	21×10^6

ضرایب مجهول اعضا سالم حاصل شده است، در شکل ۹ مشاهده می‌شود.

۴.۴. تشخیص آسیب در یک قاب فولادی با سیستم ترکیبی قاب

خمشی و مهاربند

در مثال حاضر، یک قاب خمشی فولادی ۳ طبقه همراه با مهاربند مطابق شکل ۱۰ منظور شده است، که در آن، هر تیر به ۴ عضو، و هر ستون به ۳ عضو تقسیم بندی شده و هر مهاربند نیز به دلیل اتصال مفصلی یک عضو در نظر گرفته شده است. جرم‌های سازه در گره‌ها به صورت متمرکز در نظر گرفته شده است. مشخصات مقاطع در نظر گرفته شده برای مثال کنونی در جدول ۹ ارائه شده است. در شکل ۱۰، اعضایی که به عنوان اعضا آسیب دیده در نظر گرفته شده‌اند، به صورت پررنگ تر مشاهده می‌شوند. برای هر گره، سه درجه آزادی یعنی حرکت در سه راستای افقی، قائم و دوران در نظر گرفته شده و در حین تحلیل، فشرده‌سازی استاتیکی صورت پذیرفته است. میزان کاهش سختی اعضا و همچنین شماره‌ی اعضا آسیب دیده در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. برای به‌روزرسانی فقط از ۳ بسامد و اطلاعات یک شکل مد استفاده شده است. پس از انجام به‌روزرسانی با رویکردی که در بخش قبل تشریح شد، نتایج بسیار قابل قبولی از حل مسئله به دست آمده است که نشان‌دهنده‌ی کارآمد بودن روند پیشنهادی است. در مسئله کنونی، علاوه بر تعداد بیشتر، آسیب‌ها به صورت پراکنده و با مقادیر مختلف در نظر گرفته شده‌اند. نتایج حاصل از به‌روزرسانی در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود.

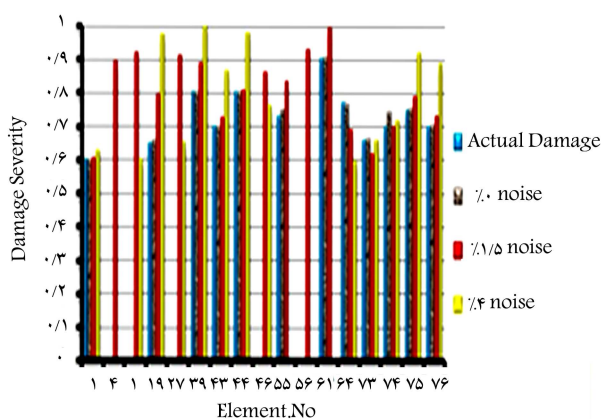
۵.۴. تشخیص آسیب در یک قاب فولادی با سیستم ترکیبی قاب

خمشی و مهاربند با استفاده از داده‌های آلوده به نوفه

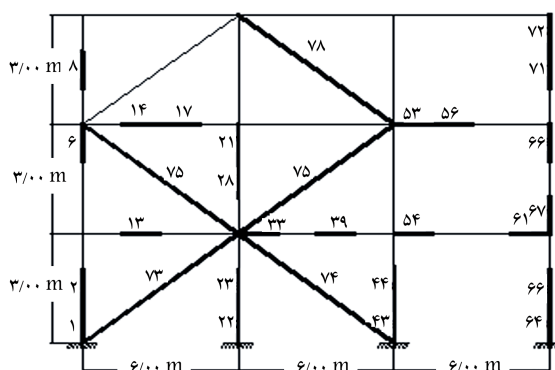
در مسئله کنونی، از داده‌ها و الگوی آسیب مسئله‌ی قبل استفاده شده است. اما بسامدها و شکل‌های مدی سازی آسیب دیده طبق آنچه در قسمت ۱٫۳ شرح داده شد، به نوفه آلوده شده‌اند. بدین منظور دو سطح از نوفه برای داده‌ها در نظر گرفته شده است. در حالت اول، داده‌ها آلوده به ۱٫۵٪ نوفه (نوفه‌ی خفیف) و در حالت

جدول ۱۱. ضرایب کاهش سختی اختصاص داده شده به المان‌ها.

شماره‌ی المان ضرایب کاهش سختی	شماره‌ی المان	ضرایب کاهش سختی	شماره‌ی المان ضرایب کاهش سختی
۰٫۸۵	۵۳	۰٫۸۵	۱
۰٫۸۶	۵۴	۰٫۸۷	۲
۰٫۸۵	۵۶	۰٫۹۲	۶
۰٫۸۵	۶۱	۰٫۸۶	۸
۰٫۹۳	۶۴	۰٫۹	۱۳
۰٫۹۱	۶۵	۰٫۹	۱۴
۰٫۹۵	۶۷	۰٫۸۵	۱۷
۰٫۹	۶۹	۰٫۹۲	۲۲
۰٫۹۴	۷۱	۰٫۸۷	۲۳
۰٫۹۲	۷۲	۰٫۹۵	۲۶
۰٫۹	۷۳	۰٫۹۱	۲۷
۰٫۸۵	۷۴	۰٫۸۵	۳۳
۰٫۸۸	۷۵	۰٫۸۸	۳۹
۰٫۹	۷۶	۰٫۹۵	۴۳
۰٫۹۳	۷۸	۰٫۹۲	۴۴
		۰٫۹۵	۵۰



شکل ۱۲. مقایسه‌ی نتایج حاصل از به‌روزرسانی با داده‌های آلوده به نوفه.



شکل ۱۳. قاب در نظر گرفته شده با سیستم ترکیبی.

نمایش داده شده‌اند. مقادیر کاهش سختی در نظر گرفته شده در جدول ۱۱ ارائه شده است.

با در اختیار داشتن یک الگوی آسیب و به‌دست آوردن پارامترهای دینامیکی سازه‌ی آسیب‌دیده، می‌توان مدل سازه‌ی را به‌روزرسانی کرد و المان‌های آسیب‌دیده را مشخص کرد. در مرحله‌ی اول، ضرایب مجهول به‌همه‌ی المان‌ها اختصاص داده شده است. با انجام فرایند به‌روزرسانی، نتایج حاصل از آن در جدول ۱۲ ارائه شده است. با مقایسه‌ی جدول‌های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود که با اختصاص دادن ضرایب مجهول به‌همه‌ی المان‌ها، اگرچه روش موردنظر در شناسایی المان‌های سالم و آسیب‌دیده موفق بوده است، اما در تعیین مقدار آسیب اندکی خطا وجود دارد. هر چند که اختلاف نتایج به‌دست آمده با مقدار موردانتظار در حدود ۵٪ و کمتر است؛ اما به‌منظور به‌دست آوردن نتایج دقیق‌تر، در تحلیل دوم ضرایب المان‌های سالم حذف شدند و دوباره فرایند به‌روزرسانی طی شده است. نتایج حاصل از تحلیل دوم، در جدول ۱۳ ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۱۳ مشاهده می‌شود، نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل دوم، با دقت بسیار بالایی با نتایج موردانتظار مطابقت دارد. در تحلیل دوم، به دلیل اینکه تعداد ضرایب مجهول کاهش داده شده است، تعداد تکرارهای طی شده توسط برنامه و به دنبال آن زمان سپری شده نیز کاهش پیدا کرده است. نتایج حاصل از مثال کنونی نشان داد که روش پیشنهادی این قابلیت را دارد که آسیب‌های متعدد با مقادیر جزئی را نیز به خوبی شناسایی و تعیین کند.

۵. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، به شرح تفصیلی یکی از روش‌های تشخیص آسیب در سازه‌ها با عنوان روش به‌روزرسانی مدل اجزاء محدود بر پایه‌ی حساسیت با به‌کارگیری الگوریتم

در حالت دوم که مقدار نوفه ۴٪ بوده است، خطای شناسایی منفی در دو عضو آسیب‌دیده‌ی ۵۵ و ۶۱ مشاهده می‌شود. مقادیر آسیب‌های شناسایی شده نیز در حدود ۵٪ تا ۱۸٪ با مقادیر واقعی تفاوت دارند. به‌عنوان یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان گفت که روش ذکر شده با توجه به اینکه از مقایسه‌ی مستقیم بسامدها و شکل‌های مدی استفاده می‌کند، نسبت به دقت اطلاعات برداشت شده بسیار حساس است. لذا هر چه مقدار خطا در داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی مدی کمتر باشد، می‌توان نتایج بهتری را انتظار داشت. البته این مشکل را می‌توان با استفاده از روش‌های دقیق‌تری مانند روش شناسایی زیرفضای تصادفی (SSI) در استخراج دقیق و عاری از نوفه، مقادیر بسامد و شکل‌های مدی کاملاً برطرف کرد.

۶.۴. تشخیص آسیب در یک قاب فولادی با سیستم ترکیبی قاب

خمش و مهاربند با تعداد آسیب‌های زیاد

در مثال حاضر، از قاب خمشی- فولادی مثال ۴-۴ مطابق شکل ۱۳، اما با الگوی آسیب متفاوت برای تحلیل استفاده شده است. در مثال کنونی، هر تیر به ۴ المان و هر ستون به ۳ المان تقسیم‌بندی شده و نیز هر مهاربند، یک المان در نظر گرفته شده است مشخصات مقاطع عرضی در نظر گرفته شده همانند مثال ۴-۴ است. هدف از حل مسئله‌ی حاضر، بررسی توانمندی روش موردنظر در شناسایی آسیب‌های پراکنده و با تعداد زیاد در سازه است. به همین منظور الگوی آسیبی که برای مسئله در نظر گرفته شده است، مقادیر کاهش سختی بین ۵٪ تا ۱۵٪ بوده است که به ۳۱ المان از مجموع ۷۸ المان مدل اختصاص داده شده است. در شکل ۱۳، المان‌های آسیب‌دیده به صورت پررنگ‌تر همراه با شماره‌ی المان‌ها

جدول ۱۲. ضرایب کاهش سختی به دست آمده از به روزرسانی.

شماره المان	مقادیر به دست آمده از به روزرسانی	شماره المان	مقادیر به دست آمده از به روزرسانی
۱	۰٫۸۳	۵۳	۰٫۸۸۴
۲	۰٫۸۵	۵۴	۰٫۸۴
۶	۰٫۹	۵۶	۰٫۸۹۳
۸	۰٫۸۴	۶۱	۰٫۸۳۳
۱۳	۰٫۸۶۶	۶۴	۰٫۹
۱۴	۰٫۸۷۷	۶۵	۰٫۸۸
۱۷	۰٫۸۳۶	۶۷	۰٫۹۲
۲۲	۰٫۹	۶۹	۰٫۸۷
۲۳	۰٫۸۵۲	۷۱	۰٫۹۱
۲۶	۰٫۹۲۸	۷۲	۰٫۸۹۷
۲۷	۰٫۸۸۹	۷۳	۰٫۸۸۱
۳۳	۰٫۸۳۶	۷۴	۰٫۸۳۳
۳۹	۰٫۸۵۲	۷۵	۰٫۸۶۳
۴۳	۰٫۹۳۳	۷۶	۰٫۸۷۹
۴۴	۰٫۹۰۴	۷۸	۰٫۹۱۲
۵۰	۰٫۹۳۱		

جدول ۱۳. نتایج حاصل از تحلیل دوم.

شماره المان	مقادیر به دست آمده از به روزرسانی	شماره المان	مقادیر به دست آمده از به روزرسانی
۱	۰٫۸۵	۵۳	۰٫۸۸
۲	۰٫۸۶۹۹	۵۴	۰٫۸۶
۶	۰٫۹۱۹۹	۵۶	۰٫۸۵
۸	۰٫۸۶	۶۱	۰٫۸۵
۱۳	۰٫۹۰	۶۴	۰٫۹۳
۱۴	۰٫۹۰	۶۵	۰٫۹۰
۱۷	۰٫۸۵	۶۷	۰٫۹۴۹۹
۲۲	۰٫۹۲	۶۹	۰٫۸۹۹
۲۳	۰٫۸۶۹۹	۷۱	۰٫۹۳۹
۲۶	۰٫۹۵	۷۲	۰٫۹۱۹
۲۷	۰٫۹۰	۷۳	۰٫۹۰
۳۳	۰٫۸۵	۷۴	۰٫۸۴۹
۳۹	۰٫۸۸	۷۵	۰٫۸۷۹
۴۳	۰٫۹۵	۷۶	۰٫۹۰
۴۴	۰٫۹۲	۷۸	۰٫۹۳
۵۰	۰٫۹۵		

ناحیه ای امن نیوتن پرداخته شده است. به منظور شناسایی نقاط قوت و ضعف روش مذکور، مثال‌های عددی مختلفی با شرایط متفاوت در نظر گرفته شده است. در مثال‌های ذکر شده، با منظور کردن آسیب‌های پراکنده در سازه با شدت‌های متنوع از ضعیف تا قوی، توانمندی روش پیشنهادی در حل مسائل بزرگ و پیچیده ارزیابی شده است. در حل مثال‌های متعدد نشان داده شد که تقسیم‌بندی اعضا به قطعات کوچک‌تر و توزیع جرم در طول اعضا تا چه حد می‌تواند در نتایج تأثیرگذار باشد و باعث بهبود شناسایی سیستم سازه‌ای شود. همچنین در سازه‌هایی که اعضاء بیشتری (مجهولات بیشتر) داشتند، از رویکردی جدید استفاده شد که علاوه بر کاهش تعداد تکرارها و زمان حل مسئله بهینه‌یابی، نتایج دقیق‌تری حاصل شده است. در رویکرد جدید اشاره شده، در تحلیل اولیه، اعضاء سالم و آسیب‌دیده شناسایی می‌شوند و سپس با حذف اعضاء سالم (اعضایی که کمتر از حد مشخصی مانند ۰٫۵٪ آسیب دیده‌اند)، ضرایب مجهول مربوط به آن‌ها حذف می‌شوند و در تکرار بعدی ظاهر نمی‌شوند. در رویکرد ذکر شده، در واقع به جای انجام یک تحلیل، دو تحلیل و در صورت لزوم با تعداد بیشتر بر روی سازه انجام می‌شود. تفاوت

عمده‌ی رویکرد اشاره شده نسبت به مطالعات پیشین، استفاده از تحلیل‌های متوالی به تعداد دلخواه و به‌کارگیری آن در سازه‌های با تعداد المان بیشتر به منظور بهبود نتایج به دست آمده است. باید توجه کرد که روند مذکور اگرچه درکل باعث افزایش زمان تحلیل برای حل مسئله‌ی به‌روزرسانی و به دست آوردن پارامترهای مجهول مدل می‌شود، اما صحت و دقت نتایج را بسیار بالا می‌برد. روش ذکر شده بر روی مدل‌های مختلف قاب‌های دوبعدی بررسی و ارزیابی شد. نتایج حاصل از ارزیابی نشان داد که روش موردنظر این قابلیت را دارد که در آسیب‌هایی در حدود ۱۰٪ و بیشتر با دقت بسیار خوبی، سه سطح از سطوح پایش سلامت سازه‌ی، یعنی: (۱) تشخیص سالم یا آسیب‌دیده بودن سازه، (۲) تشخیص موقعیت اعضاء آسیب‌دیده و درنهایت، (۳) تعیین میزان شدت آسیب اعضا، را به درستی و با دقت بسیار بالایی شناسایی کند. آسیب‌های با شدت پایین (۰٫۷٪ و کمتر) در اعضاء سازه‌ی به آغاز و رشد نقصی در سازه اشاره دارد، که شناسایی در بدو پیدایش می‌تواند به رفع آسیب کمک کند. اما از طرف دیگر، شناسایی اعضاء با آسیب‌های بزرگ بیشتر به دلیل اینکه در عمل نیاز به مقاوم‌سازی و یا جایگزینی دارند، اهمیت بالاتری دارند.

پانویس‌ها

1. line search
2. trust region

3. Hessian

(References) منابع

1. Razani, R. and Danaei, M. "Structural health monitoring methods and comparing their effectiveness in protecting structures during their lifetime", *The 6th Conference of the National Building Regulations*, (In Persian)(2014).
2. Bahar, O. and Sadeghi, R. "Damage detection by using higher modes via the modified strain energy method", *The 8th National Conference of Structure & Steel*, (In Persian) (2017).
3. Mirsha, R., Nigam, M. and Dixit A. "Experimental study on structural damage detection based on column like structure using natural frequencies", *International Journal of Engineering Development and Research*, **4**(2), pp. 1378- 1380 (2016).
4. Doebling, S.W., Farrar, C.R., Prime, M.B. and et al. "Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review", Los Alamos National Laboratory is Operated by the University of California for the United States Department (1996).
5. Chakraborty, S. and Sen, A. "Adaptive response surface based efficient finite element model updating", *Finite Elements in Analysis and Design*, **80**, pp. 33-40 (2014).
6. Friswell, M.I. and Mottershead, J.E. "Finite element model updating in structural dynamics", Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (1995).
7. Sanda, S.M., Turcotte, G.O., Turcotte, N., Talbot, M. and et al. "Efficient finite elements model updating for damage detection in bridges", *Experimental Vibration Analysis for Civil Structure*, pp. 293-305 (2017).
8. Datta, B.N. "Finite element model updating, eigenstructure assignment and eigenvalue embedding techniques for vibrating systems", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **16**(1), pp. 83-96 (2001).
9. Jaishi, B. and Ren, W.X. "Damage detection by finite element model updating using modal flexibility residual", *Journal of Sound and Vibration*, **290**(1-2), pp. 369-387 (2006).
10. Friswell, M.I. "Damage identification using inverse methods", *Philosophical Transactions of the Royal Society, A*, **365**, pp. 393-410 (2007).
11. Kasaie, M. "Damage assesment of structure Using optimization and updating algorithms", MSc Thises, SR-BIAU University (In Persian) (2012)
12. Bakir, P.G., Reynders, E. and De Roeck, G. "Sensitivity-based finite element model updating using constrained optimization with a trust region algorithm", *Journal of Sound and Vibration*, **305**(1-2), pp. 211-225 (2007).
13. Nocedal, J. and Wright, S.J. "Numerical optimization", Springer Science & Business Media, LLC. 2nd Edition (2006).
14. MATLAB, Global Optimization Toolbox, User's Guide, Available: <http://www.mathworks.com>
15. Jaishi, B. and Ren, W.X. "Structural finite flement model updating using ambient vibration test results", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **131**(4), pp. 617-628 (2005).
16. Kim, G.-H. and Park, Y.-S. "An Automated parameter selection procedure for finite-element model updating and its applications", *Journal of Sound and Vibration*, **309**(3-5), pp. 778-793 (2008).
17. Teughels, C. and De Roeck, G. "Damage detection and parameter identification by finite element model updating", *Archives of Computational Methods in Engineering*, **12**(2), pp. 123-164 (2005).
18. Kelley, C.T. "Iterative Methods for Optimization", Siam Frontiers in Applied Mathematics, pp.180 (1999).
19. Messina, A., Williams, E.J. and Contursi, T. "Structural damage detection by a sensitivity and statistical-based method", *Journal of Sound and Vibration*, **216**(5), pp. 794-808 (1998).
20. Strang, G., *Introduction to Linear Algebra*, Wellesley Cambridge Press, 3ed. Edition (2003).