

چکیده

امروزه در اختیار داشتن یک مدل تحلیلی دقیق از سازه که بتواند رفتار حقیقی آن را در هنگام بارگذاری‌های شدید نشان دهد بسیار حائز اهمیت است. به این روند به روز رسانی مدل اجزای محدود سازه گفته می‌شود که از طریق آن موقعیت و شدت آسیب‌های وارده به سازه را نیز می‌توان مشخص نمود. هدف این مقاله، به روز رسانی مدل اجزای محدود سازه سه‌بعدی از طریق یک روش بهینه‌سازی تکرار شونده مبتنی بر حساسیت، موسوم به روش ناحیه اطمینان گاوس نیوتن است که به منظور کاهش تعداد پارامترهای به روز رسانی با رویکردی جدید طی چندین مرحله‌ی تکرار شونده، به شیوه‌ی تصحیح ماتریس سختی هر یک از المان‌های مدل تحلیلی سازه از طریق کمینه نمودن اختلاف میان فرکانس‌ها و شکل‌های مدی سازه‌ی حقیقی و مدل عددی آن انجام پذیرفته است. برای اطمینان از صحت عملکرد روند پیشنهادی، این مدل بر روی چندین الگوی آسیب از یک سازه‌ی فولادی سه‌طبقه با سیستم دوگانه قاب خمشی و قاب مهاربندی پیاده‌سازی شد. نتایج ارزیابی‌ها حاکی از صحت و دقت روش پیشنهادی در تشخیص المان‌های سالم، محل و شدت آسیب‌های وارده به سازه با حداقل خطای ممکن می‌باشد.

واژگان کلیدی: به‌روز رسانی مدل اجزای محدود، سازه سه‌بعدی، روش مبتنی بر حساسیت، الگوریتم بهینه‌سازی ناحیه اطمینان، داده‌های مدی، تشخیص آسیب.

به‌روز رسانی مدل اجزای محدود سازه سه‌بعدی با روش بهینه‌سازی بهبود یافته مبتنی بر حساسیت

پویان فرهادی یگانه

کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، گروه مهندسی عمران - مهندسی سازه، قزوین، ایران

امید بهار (نویسنده مسئول)

استادیار، عضو هیئت‌علمی پژوهشگاه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران، omidbahar@iiees.ac.ir

۱- مقدمه

جلوگیری نموده [۴-۵] و از آن به‌عنوان یک روش کاربردی در پایش سلامت، تشخیص آسیب، کنترل، ارزیابی و بررسی رفتار سازه‌های عمرانی استفاده کرد [۲، ۶].

به‌طور کلی تمامی روش‌هایی که از سال‌های ۱۹۹۰ تا به امروز در راستای به روز رسانی مدل اجزای محدود سازه‌های عمرانی گوناگون توسعه یافته اند همگی در قالب دو گروه اصلی شامل روش‌های مستقیم و روش‌های غیرمستقیم یا تکرار شونده، دسته‌بندی می‌شوند [۷-۸]. روش‌های مستقیم که ماتریس‌های جرم و سختی سازه را مستقیماً طی یک مرحله و بدون توجه به تغییر پارامترهای فیزیکی به روز رسانی می‌کنند، با وجود دقت نسبتاً قابل قبول، پارامترهای تصحیح شده توسط آنها فاقد مفهوم فیزیکی بوده و مرتبط نمودن آنها به المان‌های متناظر در مدل اصلی بسیار دشوار است که این امر سبب عدم تشخیص دقیق

منظور از به روز رسانی مدل یک سازه فرآیندی است که در آن مدل عددی سازه که معمولاً بر اساس روش اجزای محدود ساخته می‌شود، با توجه به داده‌های آزمایشگاهی که حاوی مشخصه‌های ارتعاشی سازه می‌باشند، تصحیح می‌شود [۱]. فرآیند تصحیح شامل پارامترهایی نظیر جرم، سختی و میرایی در راستای ایجاد تطابقی بهتر میان نتایج عددی و داده‌های آزمایشگاهی است [۲]. از این‌رو انجام هر تحلیلی بر روی مدل به روز رسانی شده سازه می‌تواند رفتار دینامیکی سازه حقیقی را بهتر و دقیق‌تر پیش‌بینی نماید [۳]. از سوی دیگر از آنجایی که آسیب‌های سازه‌ای نیز از طریق مقایسه تفاوت بین مدل به روز رسانی شده و مدل مرجع قابل تشخیص می‌باشند، از این‌رو می‌توان با شناسایی دقیق، تعمیر و یا تعویض المان‌های آسیب‌دیده از گسترش آسیب و ایجاد خرابی‌های بزرگ

مدل تحلیلی و نتایج آزمایش تصحیح می‌گردد؛ اما از آنجایی که پیاده‌سازی این شیوه مستلزم اختصاص یک ضریب تصحیح بدون بعد، تحت عنوان پارامتر به روز رسانی به هر یک از ماتریس‌های سختی المان‌های مدل اجزای محدود سازه است، از این رو این شیوه در مواجهه با مدل سازه‌هایی که دارای تعداد المان‌ها و درجات آزادی زیادتری هستند (همچون سازه‌های سه‌بعدی)، ناکارآمد عمل کرده، زیرا در این گونه مسائل به دلیل افزایش تعداد پارامترهای به روز رسانی، روند حل مسئله بهینه‌سازی، کمینه نمودن تابع هدف و یافتن مقادیر ضرایب تصحیح مجهول، با خطاهای عددی و حتی در برخی موارد با واگرایی در نتایج روبه‌رو می‌شود. در نتیجه پیاده‌سازی این روش در مورد چنین سازه‌هایی صرفاً مستلزم مطالعات و اصلاحات بیشتری می‌شد [۱۱-۱۲، ۱۴-۲۰].

در این مقاله به منظور رفع نقیصه مذکور و همچنین بهبود و افزایش دقت روش و نیز ضمن توسعه آن از حالت دو بعدی به حالت سه‌بعدی، از یک رویکرد جدید و ابتکاری بهره گرفته شده است. در این رویکرد به منظور کاهش تعداد پارامترهای به روز رسانی در راستای جلوگیری از بروز خطاهای عددی معمول در روند حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده، فرآیند به روز رسانی با رویکردی جدید طی چندین مرحله و در قالب روندی از تحلیل‌های متوالی برای یافتن ضرایب تصحیح مجهول پیاده‌سازی می‌شود. در این روند برای کاهش حجم محاسبات و پرهیز از تشخیص‌های نادرست، در هر مرحله اعضای سازه‌ای که ضرایب تصحیح شناسایی شده آنها سالم یا بسیار نزدیک به سالم شناسایی نموده کنار گذاشته شده و تحلیل مجددی تحت عنوان تحلیل دوم با تعداد ضرایب تصحیح مجهول کمتر انجام می‌پذیرد. این فرآیند تا مرحله‌ای ادامه می‌یابد که نتایج حاصل از دو تحلیل آخر در حد خطاهای قابل قبول، بسیار به یکدیگر نزدیک شده باشند. در ادامه به منظور بررسی و ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، از مدل یک سازه‌ی سه‌طبقه‌ی سه‌بعدی فولادی با سیستم دوگانه‌ی قاب خمشی - قاب مهاربندی استفاده شده

موقعیت هندسی المان‌های آسیب‌دیده می‌شود. در مقابل روش‌های تکرار شونده که برای به روز رسانی مدل سازه‌ها از حساسیت و تغییرات پارامترهای فیزیکی استفاده می‌نمایند، سبب حفظ مفهوم فیزیکی پارامترهای تصحیح شده می‌شوند و علاوه بر به روز رسانی و تصحیح پارامترهای فیزیکی مدل اجزای محدود سازه قادر به شناسایی و نمایش دقیق‌تر نواحی آسیب‌دیده‌ی مدل نیز می‌باشند. به همین دلیل امروزه در میان محققان روش‌های به روز رسانی تکرار شونده نسبت به روش‌های مستقیم از مقبولیت بیشتری برخوردار هستند. در این شیوه به دلیل وجود یک رابطه‌ی غیرخطی میان داده‌های مدی و پارامترهای فیزیکی، مسئله به روز رسانی به یک مسئله حداقل مربعات غیرخطی تبدیل می‌گردد که می‌بایست با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی تکرار شونده حل شود. این روش‌ها خطاهای میان نتایج عددی و آزمایشگاهی را به عنوان تابع هدف مسئله بهینه‌سازی قرار داده و سپس با ایجاد تغییر در برخی از پارامترهای فیزیکی از پیش تعیین شده در مدل اجزای محدود، سعی در کمینه نمودن آن می‌نمایند [۲، ۹-۱۲]. از جمله مطالعات انجام پذیرفته در این زمینه می‌توان به مطالعات توگلز و دوروک [۱۱، ۱۵]، توگلز و همکاران [۱۳-۱۴] و بکر و همکاران [۱۶] طی سال‌های اخیر در به روز رسانی مدل اجزای محدود سازه‌هایی چون یک تیر بتنی مسلح، پل بتنی پیش‌تنیده بزرگراهی به نام پل Z24 واقع در کشور سوئیس (پلی با سه دهانه و متکی بر دو پایه میانی که هر یک مجموعه‌ای متشکل از سه ستون می‌باشند)، [۱۱، ۱۴] و یک قاب بتنی مسلح دو بعدی [۱۵-۱۶]، اشاره نمود که در مورد به روز رسانی همه آنها از یک روش به روز رسانی بهینه‌سازی تکرار شونده مبتنی بر حساسیت موسوم به روش گاوس نیوتن که به منظور همگرایی بهتر با رویکرد ناحیه اطمینان نیز تقویت شده، بهره گرفته شده است. در روش پیشنهادی این محققین ماتریس سختی هر یک از المان‌های مدل اجزای محدود اولیه سازه از طریق اختصاص یک ضریب تصحیح بدون بعد مجهول به آنها و سپس کمینه نمودن اختلاف میان فرکانس‌ها و شکل‌های مدی

انتخاب پارامترهای مناسب یکی از دیگر عوامل مهم در فرآیند به روز رسانی می باشد [۱۸]، به طوری که می توان اذعان نمود میزان موفقیت یک روش تا حد زیادی در گرو انتخاب پارامترهای آن است [۹]. پارامترهای به روز رسانی می بایست با هدف تصحیح خطاهای مدل سازی انتخاب شوند. اگر فقط حساسیت مورد نظر باشد، بهترین روش برای انتخاب پارامترهای به روز رسانی اختصاص یک پارامتر به هر یک از اعضای سازه است که دارای خطاهای مدل سازی هستند [۱۸]. برای این منظور از یک ضریب تصحیح بدون بعد در راستای تصحیح مشخصه فیزیکی مجهول و فاقد قطعیت مانند X هر یک از المان ها نسبت به مقدار مرجع که در اغلب موارد همان مقدار اولیه پارامتر می باشد، استفاده می شود. اختلاف نسبی در پارامتر X در المان e توسط پارامتر به روز رسانی بدون بعد a^e به صورت زیر بیان می شود:

$$X^e = X_0^e(1 - a^e) \quad (1)$$

طبق رابطه (۱) می توان گفت مقدار هر متغیر مجهول X^e از ضرب مقدار اولیه متغیر X_0^e در ضریب تصحیح محاسبه شده توسط پارامتر به روز رسانی بدون بعد a^e حاصل می شود. در این شیوه ماتریس های سیستم در تمامی المان هایی که پارامترهای فیزیکی آنها دارای خطا می باشند، تصحیح می شوند. خواص فیزیکی مجهول و فاقد قطعیت از مدل عددی در واقع همان متغیرهای سختی در مسئله به روز رسانی مدل اجزای محدود می باشند؛ و از آنجایی که در این مقاله سازه به صورت سه بعدی مدل می گردد، لذا منظور از پارامترهای مجهول سختی در واقع همان پارامترهای سختی محوری (EA)، سختی خمشی (EI) و سختی پیچشی (GJ) سازه هستند؛ زیرا آسیب همواره سبب کاهش سختی در برخی از اعضای سازه های عمرانی می شود. لازم به ذکر است در این مقاله فرض بر این است که آسیب سبب ایجاد تغییر در خواص جرم سازه نمی شود. از طرفی با توجه به اینکه جرم یک سازه در طول عمر خود کمتر دچار تغییر می شود، در نتیجه در نظر گرفتن این فرض چندان هم دور از واقعیت نیست. در ادامه چنانچه مشخصه های فیزیکی مجهول و

است. همچنین برای نمایش میزان کارایی روش در تشخیص آسیب های سازه ای سعی بر آن بوده تا الگوهای متنوعی از آسیب اعم از آسیب های خفیف، آسیب های شدید، تلفیقی از آسیب های خفیف و شدید و همچنین آسیب هایی با توزیع هندسی پراکنده و متمرکز در سازه در نظر گرفته شده است.

۲- تئوری روش

مدل تحلیلی یک سازه بر اساس روش اجزای محدود ساخته می شود [۹، ۱]. ماتریس های اولیه جرم، سختی و میرایی و نیز داده های مدی محاسباتی سازه که شامل مقادیر فرکانس و شکل مدهای اصلی آن می باشد و از طریق حل معادله ی مشخصه ی سیستم سازه ای به روش عددی یا با استفاده از روش بردارهای ریتز به دست می آیند، از جمله مهم ترین خروجی های مورد نیاز از این مدل ها هستند. داده های مدی آزمایشگاهی نیز از انجام آزمایش های دینامیکی بر روی سازه ی حقیقی به دست می آید [۱۵]. در این فرآیند پاسخ های سازه ی تحریک شده اندازه گیری شده و اطلاعات دینامیکی مدهای ارتعاشی سازه از آنها استخراج می شوند [۱۰]؛ اما لازم به ذکر است در این پژوهش مطابق با روال مرسوم در کارهای پژوهشی این چینی به دلیل عدم امکان انجام آزمایش دینامیکی بر روی سازه حقیقی و استخراج داده های حاصل از آن، فرآیند به روز رسانی میان مدل های اجزای محدود دو سازه سالم و آسیب دیده انجام می شود. به طوری که داده های حاصل از مدل اجزای محدود سازه سالم، به عنوان نتایج حاصل از مدل تحلیلی و داده های حاصل از مدل اجزای محدود سازه آسیب دیده، به عنوان نتایج آزمایشی تجربی انجام گرفته بر روی سازه حقیقی تلقی می شوند. در نتیجه مطابق با اصول معمول در روش های به روز رسانی این مدل اجزای محدود سازه سالم است که باید به منظور مطابقت با نتایج حاصل از مدل اجزای محدود سازه آسیب دیده تصحیح و به عبارتی به روز رسانی شود، به گونه ای که پس از انجام این روند، مدل اجزای محدود به روز رسانی شده باید بتواند نتایج حاصل از مدل اجزای محدود سازه آسیب دیده را به طور دقیق مجدداً تولید نماید.

که در آن $r(a)$ بردار باقیمانده، r_f اختلاف فرکانس های طبیعی و r_s اختلاف شکل های مدی می باشند. در این رابطه m_s و m_f به ترتیب معرف تعداد فرکانس های ویژه و شکل مدهای شناسایی شده ای می باشند که قرار است در فرآیند به روز رسانی مورد استفاده قرار گیرند [۲، ۹، ۱۰، ۱۵-۱۷] در مسائل به روز رسانی، اغلب اطلاعات چند مد نخست سازه مورد استفاده قرار می گیرند [۱۸]. مقادیر فرکانس های طبیعی و شکل های مدی مورد استفاده در فرآیند به روز رسانی را می توان در یک بردار به صورت زیر تعریف نمود:

$$\vartheta(a) = [\lambda_1, \dots, \lambda_{mf}, \dots, \varphi_1^T, \dots, \varphi_{mm}^T]^T \quad (5)$$

که در آن $\omega_j^2 = \lambda_j$ معرف مقادیر ویژه و همچنین بردارهای φ_j نشان دهنده شکل های مدی سازه هستند [۱۶].

رابطه ی مسئله حداقل مربعات این اجازه را می دهد که باقیمانده ها هر یک به طور جداگانه و برحسب اهمیت و مقدار نوفه ی خود وزن دار شوند [۱۱]. اعمال ضرایب وزنی سبب نزدیک تر شدن مقادیر عددی بردارها به یکدیگر و نیز بهبود همگرایی مسئله بهینه سازی می شود [۱۶]؛ بنابراین بردار باقیمانده ی وزن دار شده ی رابطه (۵) به صورت زیر مجدداً بازنویسی می شود:

$$r(a) = w(\tilde{v} - v(a)) = w \begin{bmatrix} \tilde{\lambda}_1 - \lambda_1 \\ \vdots \\ \tilde{\lambda}_{mf} - \lambda_{mf} \\ \tilde{\varphi}_1 - \varphi_1 \\ \vdots \\ \tilde{\varphi}_{mm} - \varphi_{mm} \end{bmatrix} \quad (6)$$

که در آن $\tilde{\lambda}$ معرف مقادیر ویژه ی اندازه گیری شده، $\tilde{\varphi}$ معرف مدهای ویژه اندازه گیری شده، λ معرف مقادیر ویژه محاسبه شده و φ نیز معرف مدهای ویژه محاسبه شده می باشند. در رابطه ی (۶)، ماتریس وزن W یک ماتریس قطری است که مقادیر ویژه را به مقادیر اندازه گیری شده و مقدار حداکثر شکل های مدی را به عدد یک، به صورت زیر مقیاس می نماید:

فاقد قطعیت با ماتریس سختی هر یک از المان های مدل دارای ارتباط خطی باشند، آنگاه ماتریس سختی به روز رسانی شده هر المان از مدل را می توان به صورت زیر تعیین نمود:

$$K^e = K_0^e(1 - a^e) \quad (2)$$

و در نتیجه در حالت کلی برای ماتریس سختی کل سازه نیز خواهیم داشت:

$$K = K^u + \sum_{e=1}^n K_0^e(1 - a^e) \quad (3)$$

که در عبارت فوق K_0^e و K^e به ترتیب ماتریس سختی اولیه و ماتریس سختی به روز رسانی شده هر المان e می باشند. همچنین K ماتریس سختی کل سازه K^u و نیز معرف ماتریس سختی المان هایی است که خواص آنها بدون تغییر باقی مانده است. n نیز معرف تعداد المان های به روز رسانی شده است [۱۱، ۱۵-۱۶].

هدف از حل مسئله به روز رسانی مدل تحلیلی، در حقیقت یافتن مقادیر مجهول ضرایب تصحیح بدون بعد a^e در رابطه (۳) است که به ازای آنها اختلاف میان نتایج مدی تحلیلی و اندازه گیری شده به حداقل رسانده می شود [۲]. از طرفی به دلیل وجود رابطه غیر خطی میان داده های مدی و پارامترهای فیزیکی، مسئله به روز رسانی در واقعیت مسئله حداقل مربعات غیر خطی است که می بایست با استفاده از روش های بهینه سازی مقید غیر خطی تکرار شونده حل شود. این روش ها خطاهای میان نتایج تحلیلی و اندازه گیری شده را به عنوان تابع هدف مسئله بهینه سازی منظور نموده و سپس با ایجاد تغییر در برخی از پارامترهای فیزیکی از پیش تعیین شده در مدل اجزای محدود، سعی در حداقل نمودن آن دارند [۹]. در مسائل به روز رسانی مدل اجزای محدود، تابع هدف به طور معمول از طریق تعریف یک بردار باقیمانده ی انعطاف پذیری مدی که در واقع ترکیبی از باقیمانده های فرکانس های طبیعی و باقیمانده های شکل های مدی متناظر می باشد، به صورت زیر تشکیل می شود:

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

که در آن Z معرف بردار گام از نقطه a ، پارامتر Δ_k شعاع ناحیه اطمینان (بعدتر تعریف می شود) و $\nabla^2 f_s, \nabla f_s, f_s$ به ترتیب مقادیر تابع، گرادیان و هسیان برای تابع f می باشند. بعد از طی یک فرآیند تکرار شونده، مقدار کمینه، یعنی a^* ، برای تابع $f(a)$ برای حالتی که $\nabla f(a^*) = 0$ شود، به دست می آید. در واقع برای بهینه سازی، گرادیان تابع هدف برابر صفر گذارده شده است و این امر در کنار استفاده از روش نیوتن برای حل، منجر به خطی سازی شده است. در این رابطه، گرادیان و هسیان تابع هدف $f(a)$ نیز به ترتیب بر اساس روابط زیر تعریف می شوند:

$$\nabla f(a) = \sum_{j=1}^k r_j(a) \nabla r_j(p) = J_a(a)^T r(a) \quad (12)$$

که $J_a(a)$ ماتریس ژاکوبین یا همان ماتریس حساسیت است که شامل مشتقات جزئی مرتبه ی اول بردارهای باقیمانده r_j (یعنی r_s و r_f) نسبت به پارامتر a به صورت زیر می باشد:

$$\Delta r_j = \sum_{e=1}^n \frac{\delta r_j}{\delta a^e} \Delta a^e \quad (13)$$

و در شکل کلی، ماتریس ژاکوبین به صورت زیر بیان می شود:

$$J]_{m \times p} = \begin{bmatrix} \frac{\delta r_1}{\delta a_1} & \frac{\delta r_1}{\delta a_2} & \frac{\delta r_1}{\delta a_3} & \dots & \frac{\delta r_1}{\delta a_p} \\ \frac{\delta r_2}{\delta a_1} & \frac{\delta r_2}{\delta a_2} & \frac{\delta r_2}{\delta a_3} & \dots & \frac{\delta r_2}{\delta a_p} \\ \frac{\delta r_3}{\delta a_1} & \frac{\delta r_3}{\delta a_2} & \frac{\delta r_3}{\delta a_3} & \dots & \frac{\delta r_3}{\delta a_p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\delta r_m}{\delta a_1} & \frac{\delta r_m}{\delta a_2} & \frac{\delta r_m}{\delta a_3} & \dots & \frac{\delta r_m}{\delta a_p} \end{bmatrix} \quad (14)$$

که در آن $m = m_f + m_s$ است و p تعداد پارامترهای به روز رسانی می باشد.

در واقع در روش ناحیه اطمینان گاوس- نیوتن، الگوریتم در هر تکرار k ام، ناحیه ای پیرامون نقطه فعلی (حدس اولیه) a_k تعیین می نماید که در آن مدل معرفی شده در رابطه (۱۱) در واقع مدل محلی تابع هدف اصلی است و اصطلاحاً ناحیه اطمینان مدل محلی نامیده می شود. ناحیه اطمینان، کره ای با شعاع Δ_k است که

$$w = \text{diag}\left(\frac{1}{\lambda_1}, \dots, \frac{1}{\lambda_{mf}}, \omega_{\phi_1}, \dots, \omega_{\phi_m}\right) \quad (7)$$

در محاسبات تحلیلی شکل های مدی نسبت به ماتریس جرم نرمال می شوند، اما زمانی که از آزمایش ارتعاشات محیطی برای استخراج پارامترهای مدی استفاده شده باشد، شکل های مدی مقیاس نشده هستند. لذا بردار باقیمانده شکل های مدی وزن دار شده $r_s(a)$ به صورت زیر تعیین می شود:

$$r_s(a) = \frac{\phi_j^1(a)}{\phi_j^f(a)} - \frac{\tilde{\phi}_j^1}{\tilde{\phi}_j^f} = \omega_j^1 (\phi_j^1 - \tilde{\phi}_j^1) \quad (8)$$

که در آن ω_j^1 به ترتیب بر یک درجه آزادی اختیاری و یک درجه آزادی مرجع از شکل مودی ϕ_j (یا $\tilde{\phi}_j$) دلالت می نمایند و عناصر قطری برای ماتریس وزن متناظر با شکل های مدی، یعنی ضرب ω_j در رابطه (۸)، به صورت زیر تعریف می شود:

$$\omega_j^1 = \frac{(\phi_j^1(a)\tilde{\phi}_j^f - \tilde{\phi}_j^1\phi_j^f(a))}{\phi_j^f(a)\tilde{\phi}_j^f(\phi_j^1(a) - \tilde{\phi}_j^1)} \quad (9)$$

در نتیجه با تعیین شدن ماتریس وزن، کمینه سازی تابع هدف متشکل از باقیمانده ها، تحت عنوان یک مسئله حداقل مربعات وزن دار شده به صورت زیر حل می شود [۱۶]:

$$\text{Minimize: } \frac{1}{2} r(a)^T W r(a) = \frac{1}{2} \|W^{\frac{1}{2}} r(a)\|^2 \quad (10)$$

در این مقاله برای کمینه نمودن تابع هدف، از روش گاوس- نیوتن استفاده شده است که به منظور همگرایی بهتر در فرآیند بهینه سازی با استراتژی ناحیه اطمینان تقویت شده است. به طور کلی خانواده ی روش های ناحیه اطمینان، یک خانواده ی بسیار مهم از الگوریتم ها برای حل مسائل بهینه سازی غیرخطی مقید می باشند که اطلاعات گردآوری شده در مورد تابع هدف را برای ساخت یک مدل محلی خطی درجه دوم ساده تر، از طریق بسط ناقص سری تیلور برای تابع هدف، مورد استفاده قرار می دهند. مدل محلی خطی درجه دوم $m(z)$ از طریق بسط ناقص سری تیلور برای تابع هدف $f(a)$ به صورت زیر تعریف می شود:

$$\text{Minimize: } m_z(z) = f_s + [\nabla f_s]^T z + \frac{1}{2} z^T [\nabla^2 f_s] z \text{ where } \|z\| \leq \Delta_k \quad (11)$$

امکان تغییر جهت را نیز برای آنها فراهم می‌نماید؛ بنابراین اتخاذ استراتژی ناحیه اطمینان عملاً پایداری روش گاوس- نیوتن را افزایش داده و تلفیق و پیاده‌سازی هم‌زمان این دو روش با یکدیگر در قالب یک روش واحد به نام روش ناحیه اطمینان گاوس- نیوتن سبب بهتر شدن همگرایی مسئله بهینه‌سازی می‌شود [۲، ۱۱، ۱۵-۱۶، ۲۱].

۲-۱- رویکرد ابتکاری

افزایش تعداد پارامترهای به روز رسانی سبب می‌شود بردار باقیمانده‌ها و به عبارت بهتر تابع هدف مسئله بهینه‌سازی به علت افزایش ضرایب مجهول پیچیده‌تر شود و در نتیجه ماتریس ژاکوبین و یا همان ماتریس حساسیت حاصل از آن نیز دچار شرایط ناموزونی^۱ شود. این امر می‌تواند به نوبه‌ی خود بر روند حل مسئله بهینه‌سازی، بر روی فرآیند کمینه نمودن تابع هدف و به عبارتی همگرایی نتایج مسئله بهینه‌سازی تأثیر نامطلوبی داشته باشد و سبب واگرایی و عدم حفظ مفهوم فیزیکی آنها شود [۱۱]. در این مقاله رویکرد جدیدی برای اجرای فرآیند به روز رسانی مدل تحلیلی سازه‌های سه‌بعدی در قالب دنباله‌ای از تحلیل‌های متوالی پیشنهاد شده است. در رویکرد پیشنهادی در نخستین تحلیل از فرآیند به روز رسانی مطابق با روال متعارف، ضرایب تصحیح مجهول به همه‌ی ماتریس‌های سختی المان‌های مدل اجزای محدود سازه اختصاص داده می‌شوند. به دنبال آن با انجام فرآیند بهینه‌سازی، المان‌های سالم و آسیب‌دیده شناسایی شده و از هم تفکیک می‌شوند. از این‌رو می‌توان در ادامه با خارج نمودن و کنار گذاشتن آنها از روند به روز رسانی، مجدداً تحلیل دیگری را تحت عنوان تحلیل دوم و این بار با تعداد ضرایب تصحیح مجهول کمتر تکرار نمود. این تحلیل‌ها در مراحل بعدی بسته به ابعاد سازه، پیچیدگی ارتباط‌های المانی، پراکندگی آسیب‌ها و تغییرات قابل توجه در شدت‌های آسیب می‌تواند به صورت دنباله‌ای از تحلیل‌های متوالی ادامه یابد. در واقع طی روند تحلیل‌های متوالی، رویکرد پیشنهادی هر بار با

متغیرهای طراحی را به $\Delta_k \leq \|a\|$ محدود می‌نماید؛ بنابراین به جای اینکه تابع هدف اصلی مسئله که تابعی غیرخطی و فاقد راه‌حل تحلیلی است کمینه گردد، الگوریتم در هر تکرار مدل محلی را که تابعی خطی است را در داخل ناحیه اطمینان کمینه می‌نماید. در ادامه چنانچه انتخاب فعلی کاهش مؤثری در تابع هدف ایجاد نماید، انتخاب جدید به عنوان یک تکرار جدید از فرآیند تکرارها پذیرفته خواهد شد. در غیر این صورت نتیجه گرفته می‌شود که ناحیه انتخابی بزرگ‌تر از حد معمول بوده و در نتیجه در تکرار بعدی، الگوریتم از طریق کاهش شعاع ناحیه اطمینان روند حل مسئله را مجدداً برای ناحیه‌ای کوچک‌تر تکرار می‌نماید. از این‌رو می‌توان نتیجه گرفت در یک روند متوالی از تکرارها، الگوریتم هر بار رفته‌رفته با کاهش شعاع ناحیه اطمینان، در حال نزدیک و نزدیک‌تر نمودن تابع هدف به مقدار کمینه‌ی خود است. در واقع، در این فرآیند این شعاع Δ_k است که هر بار در میان تکرارها تنظیم و به روز رسانی می‌شود، به طوری که توافق خوبی میان کاهش واقعی و کاهش پیش‌بینی شده در تابع که به کمک نسبت ρ_k به صورت زیر اندازه‌گیری می‌شود، به دست آید.

$$\rho_k = \frac{f(a_k) - f(a_k + z_k)}{f(a_k) - m_k(z_k)} \quad (15)$$

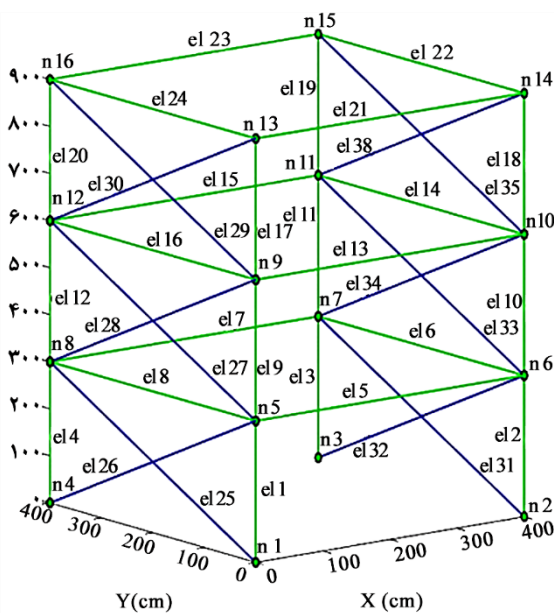
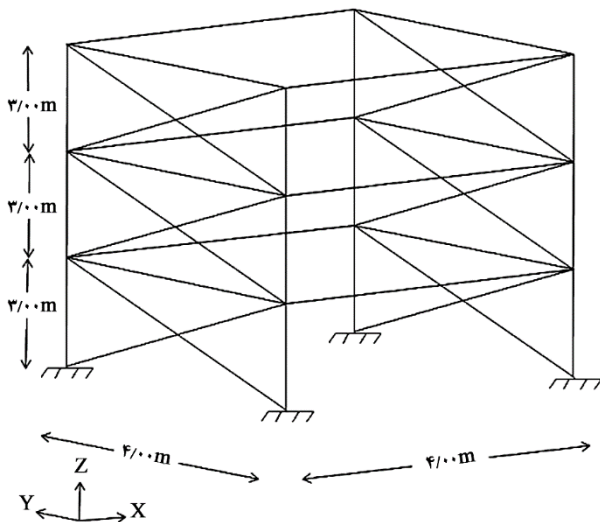
هنگامی که توافق خوبی برقرار شود، ρ_k نزدیک به عدد ۱ شده و Δ_k افزایش می‌یابد. چنانچه توافق ضعیف باشد، ρ_k مقداری کوچک و یا منفی خواهد شد که در این حالت Δ_k نیز کاهش می‌یابد. در غیر این صورت Δ_k بدون هیچ‌گونه تغییری باقی خواهد ماند. حساسیت‌های مدی نسبت به ضرایب تصحیح a^e را نیز می‌توان با استفاده از تفاضل محدود محاسبه نمود. مشتق جزئی هر باقیمانده‌ی فرکانسی Γ_f و هر باقیمانده‌ی شکل مدی Γ_s نسبت به a به ترتیب برابرند با:

$$\frac{\delta \Gamma_s}{\delta a^e} = \frac{1}{\varphi_j^f} \frac{\delta \varphi_j^f}{\delta a^e} - \frac{\varphi_j^f}{(\varphi_j^f)^2} \frac{\delta \varphi_j^f}{\delta a^e} \quad (16)$$

$$\frac{\delta \Gamma_f}{\delta a^e} = \frac{1}{\tilde{\lambda}_j} \frac{\delta \tilde{\lambda}_j}{\delta a^e}$$

در واقع می‌توان گفت، روش ناحیه اطمینان علاوه بر اینکه اجازه می‌دهد گام‌های روش گاوس- نیوتن کوتاه‌تر شوند،

از روی مدل نقشه های چون ساخت^۲ سازه مورد نظر تهیه شده است که از این پس آن را مدل سازه سالم می نامیم. در سازه ی مورد نظر (شکل ۱)، همان طور که مشاهده می شود، طول تمام اعضای سازه در دو راستای افقی و نیز در راستای قائم به ترتیب برابر با ۴ متر، ۴ متر و ۳ متر می باشند.



شکل (۱): سازه قاب فولادی سه طبقه با سیستم ترکیبی قاب فضایی خمشی و مهاربند، (بالا) ابعاد هندسی، (پایین) مشخصه ها و شماره های المانی.

این سازه در دو سمت شرقی و غربی با استفاده از سیستم بادبندهای همگرا، مهاربندی شده است. همه مشخصه های اعضا و مقاطع این سازه در جدول (۱) ارائه شده است.

خارج نمودن المان هایی که در تحلیل قبل سالم شناسایی شده اند در حال کاهش تعداد ضرایب مجهول و به عبارتی پارامترهای به روز رسانی مسئله بهینه سازی برای اجرای تحلیل بعدی است. ادامه روند تحلیل های متوالی می تواند تا همگرایی هر چه بیشتر نتایج تا زمانی ادامه یابد که بر اساس دقت مورد انتظار کاربر، به یک مقدار مشخص از خطا میان نتایج واقعی و نتایج پیش بینی شده دست یافته شود. نکته بسیار مهمی در روند تحلیل های به روز رسانی وجود دارد که لازم است به آن اشاره شود. لازم به ذکر است این نکته حاصل از مطالعات انجام پذیرفته در این مقاله می باشد. از آنجایی که نتایج حاصل از تحلیل در هر مرحله همواره با خطاهای عددی همراه است، کاربر نیاز به معیاری دارد تا بتواند المان های سالم و آسیب دیده را از هم تفکیک نماید. از آنجایی که یکی از اهداف این مقاله شناسایی آسیب های با شدت کم می باشد، برای سالم قلمداد نمودن المان ها از نسبت آسیب دیدگی کمتر از یک و نیم درصد استفاده شده است. به عبارت دیگر چنین المانی نیاز به تصحیح ندارد و باید از روند حل مسئله ی تشخیص آسیب خارج شود. در رابطه با چگونگی انتخاب این معیار لازم به ذکر است که انتخاب آن بر اساس یک روند سعی و خطایی، در طی یک روند صعودی از صفر (که معرف سالم بودن المان است) بوده است. از این رو چه بسا بتوان یا تغییر آن دقت روش را در تشخیص آسیب حتی بالاتر برد.

۳- مثال عددی

در این بخش به منظور ارزیابی میزان کارایی روش پیشنهادی، از یک سازه ی سه بعدی، سه طبقه ی فولادی با سیستم ترکیبی قاب فضایی خمشی و مهاربند استفاده شده است. همچنین به منظور بررسی میزان کارایی و دقت روش پیشنهادی در تشخیص محل و مقدار آسیب های سازه ای، الگوهای متنوعی از آسیب از حیث تنوع در شدت و از حیث پراکندگی در اعضای سازه ای، در نظر گرفته شده است. مدل سازه ی سالم، به اصطلاح

یک از اعضای مهارى نیز در سیستم مختصات محلى خود از مرتبه ۶×۶ خواهند بود. همچنین از آنجا که چهار گره از این قاب، گره‌های ۱، ۲، ۳، ۴ در شکل (۱- بالا)، بر روی تکیه‌گاه گیردار قرار دارند، مدل اجزای محدود این سازه در مجموع ۷۲ درجه آزادی خواهد داشت [۲۵-۲۶]. در شکل (۱- پایین)، طرحی شماتیک از مدل اجزای محدود این سازه که متشکل از ۳۶ المان، ۱۶ گره و ۷۲ درجه آزادی می‌باشد، ارائه شده است [۲۱].

۳-۲- الگوهای آسیب سازه‌ی سه‌بعدی فولادی

با در اختیار داشتن مدل سازه‌ی سالم در فضای برنامه متلب، می‌توان به آسانی با در نظر گرفتن درصد یا نسبت‌هایی از آسیب برای هر یک از المان‌ها، به مدل سازه‌ی آسیب‌دیده و داده‌های مورد نیاز حاصل از آن دست یافت. چنانچه عضوی ۱۰۰ درصد آسیب‌دیده باشد، نسبت آسیب آن ۱ و چنانچه دچار هیچ‌گونه آسیب‌دیدگی نشده باشد نسبت آسیب آن ۰ (صفر) در نظر گرفته می‌شود. محدوده‌ی ۰ و ۱ در واقع معرف قید مسئله بهینه‌سازی مقید می‌باشد. لازم به ذکر است برای این سازه الگوهای مختلفی از آسیب در نظر گرفته شده است که در ادامه به تشریح هر یک از این حالات پرداخته می‌شود:

الگوی آسیب اول: در الگوی آسیب اول فرض بر این است که تمامی ستون‌ها و مهاربندهای طبقه اول، هر یک به مقدار مشخصی آسیب دیده‌اند. این الگو معرف آسیب‌های متمرکز در یک طبقه است که می‌تواند برای نمونه در اثر آتش‌سوزی در آن طبقه‌ی خاص اتفاق افتاده باشد. همچنین در این الگو شدت آسیب‌دیدگی هر یک از اعضای آسیب‌دیده در حد متوسط و با سه رقم اعشار، مقادیری حدود ۲۰٪ - ۱۰٪، در نظر گرفته شده است. در جدول (۲) شماره و درصد آسیب‌دیدگی هر یک از المان‌های آسیب‌دیده‌ی سازه آورده شده‌اند.

جدول (۲): الگوی آسیب اول.

شماره المان	۱	۲	۳	۴	۲۵	۲۶	۳۱	۳۲
درصد آسیب	۰/۱۲۸	۰/۱۳۲	۰/۱۲۵	۰/۱۱۹	۰/۱۸۵	۰/۱۹۵	۰/۱۸۴	۰/۱۷۶

جدول (۱): مشخصات اعضا و مقاطع سازه قاب فولادی سه‌طبقه با سیستم ترکیبی قاب فضایی خمشی و مهاربند.

عضو	ستون‌ها	تیرها	بادبندی‌ها
سطح مقطع (A) بر حسب (m ²)	IPB 200	IPE 220	2UNP 100
ضریب الاستیسیته (E) بر حسب (pa)	۷۸/۱	۳۳/۴	۲۷
ممان اینرسی جهت قوی (I _y) بر حسب (m ⁴)	۵۷۰۰	۲۷۷۰	-
ممان اینرسی جهت ضعیف (I _z) بر حسب (m ⁴)	۲۰۰۰	۲۰۵	-
ضریب الاستیسیته برشی (G) بر حسب (kg/m ²)	۲۱۰۰۰۰	۲۱۰۰۰۰	۲۱۰۰۰۰
ثابت پیچشی (J) بر حسب (m ⁴)	۸۰۸۰۰۰	۸۰۸۰۰۰	-
وزن مخصوص فولاد بر حسب (kg/m ³)	۴۹/۱۳۱	۷/۰۹۱	-

۳-۱- مدل اجزای محدود سازه‌ی سه‌بعدی فولادی

در نخستین مرحله، به‌منظور دستیابی به اطلاعات سازه‌ی سالم از جمله ماتریس‌های اولیه جرم و سختی، فرکانس‌های طبیعی و بردارهای شکل مدی مورد نیاز، سازه‌ی سه‌بعدی مورد نظر متشکل از المان‌های قاب و خربایی با استفاده از روش اجزای محدود [۲، ۲۲-۲۳] در فضای برنامه‌نویسی متلب^۳ مدل‌سازی می‌شود [۲۴]. در این نمونه، هر یک از اعضای تیر و ستون‌های سازه‌ی سه‌بعدی با یک المان قاب فضایی مدل شده است. المان قاب فضایی یک المان خطی از نوع تیر-ستون، دارای دو گره می‌باشد که هر گره از آن دارای ۳ درجه آزادی انتقالی و ۳ درجه آزادی دورانی است. لذا در سیستم مختصات محلی، ماتریس‌های جرم و سختی هر یک از اعضای تیر و ستون در قاب فضایی از مرتبه ۱۲×۱۲ خواهند بود؛ اما با توجه به اینکه اتصال همه اعضای مهارى به قاب خمشی در سازه‌ی مدل، به‌صورت مفصلی در نظر گرفته شده‌اند، هر عضو مهارى با یک المان خربای فضایی مدل‌سازی می‌شود. المان خربای فضایی نیز یک المان خطی دو گره‌ای است که هر گره از آن صرفاً دارای سه درجه آزادی انتقالی است؛ بنابراین ماتریس‌های جرم و سختی هر

الگوی آسیب چهارم: در الگوی آسیب چهارم فرض بر این است که برخی از اعضای سازه به‌صورت تصادفی، هر یک به مقدار مشخصی آسیب دیده‌اند. این الگو معرف آسیب‌هایی با توزیع هندسی کاملاً پراکنده و بی‌نظم می‌باشد. همچنین در این الگو، شدت آسیب‌دیدگی هر یک از اعضای آسیب‌دیده به‌صورت تلفیقی از شدت‌های کم تا متوسط، مقادیری حدود ۲۵-۵ درصد، در نظر گرفته شده است. در جدول (۵) شماره و درصد آسیب‌دیدگی هر یک از المان‌های آسیب‌دیده سازه آورده شده‌اند.

۳-۳- به‌روز رسانی مدل اجزای محدود سازه‌ی سه‌بعدی فولادی
اکنون با در اختیار داشتن داده‌های مورد نیاز به‌دست آمده از مدل‌های اجزای محدود دو سازه‌ی سالم و آسیب‌دیده در هر مرحله، می‌توان تابع هدف مسئله بهینه‌سازی را بر اساس روش پیشنهادی، ارائه شده در بخش (۲)، تشکیل داده و سپس در راستای تعیین ضرایب تصحیح اختصاص داده شده به هر یک از اعضای سازه‌ی، آن را کمینه نمود. در اولین مرحله‌ی تحلیل، ضرایب تصحیح المانی به تمامی اعضای سازه اختصاص داده می‌شود؛ اما در مراحل بعدی، با توجه به نتایج مرحله‌ی پیشین،

الگوی آسیب دوم: در الگوی آسیب دوم فرض بر این است که تمامی مهاربندهای طبقات اول، دوم و سوم هر یک به مقدار مشخصی آسیب دیده‌اند. این الگو معرف رویداد زلزله‌ی بزرگی است که طی آن اعضای مشخصی از سازه، یعنی مهاربندها، دچار آسیب متمرکز شده‌اند. همچنین در این الگو، شدت آسیب‌دیدگی هر یک از اعضای آسیب‌دیده به‌صورت تلفیقی از شدت‌های کم تا متوسط، مقادیری حدود ۲۰-۲/۵ درصد، در نظر گرفته شده است. در جدول (۳) شماره و درصد آسیب‌دیدگی هر یک از المان‌های آسیب‌دیده سازه آورده شده‌اند.

الگوی آسیب سوم: در الگوی آسیب سوم فرض بر این است که تمامی تیرهای طبقات اول، دوم و سوم هر یک به مقدار مشخصی آسیب دیده‌اند. این الگو معرف آسیب ناشی از اثر بارهای سنگین ثقلی در طی دوره‌های طولانی زمان می‌باشد که توزیع هندسی آن فقط بر روی المان‌های باربر ثقلی سازه متمرکز شده‌اند. همچنین در این الگو، شدت آسیب‌دیدگی هر یک از اعضای آسیب‌دیده به‌صورت تلفیقی از شدت‌های کم تا متوسط، مقادیری حدود ۲۵-۵ درصد، در نظر گرفته شده است. در جدول (۴) شماره و درصد آسیب‌دیدگی هر یک از المان‌های آسیب‌دیده سازه آورده شده‌اند.

جدول (۳): الگوی آسیب دوم.

شماره المان	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰	۳۱	۳۲	۳۳	۳۴	۳۵	۳۶
درصد آسیب	۰/۱۶۳	۰/۱۷۳	۰/۱۱۷	۰/۱۲۳	۰/۰۶۵	۰/۰۷۳	۰/۱۷۸	۰/۱۶۹	۰/۱۱۹	۰/۱۲۸	۰/۰۶۸	۰/۰۷۶

جدول (۴): الگوی آسیب سوم.

شماره المان	۵	۶	۷	۸	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۲۱	۲۳	۲۴
درصد آسیب	۰/۲۳۶	۰/۲۴۵	۰/۲۲۸	۰/۲۳۹	۰/۱۷۵	۰/۱۸۲	۰/۱۷۸	۰/۱۸۸	۰/۰۸۹	۰/۰۷۸	۰/۰۸۵

جدول (۵): الگوی آسیب چهارم.

شماره المان	۳	۵	۷	۱۲	۱۴	۱۶	۲۱	۲۵	۲۹	۳۲	۳۴
درصد آسیب	۰/۱۲۵	۰/۲۳۶	۰/۲۲۵	۰/۰۸۶	۰/۱۷۴	۰/۱۶۵	۰/۰۸۵	۰/۱۷۹	۰/۱۳۲	۰/۱۸۵	۰/۱۶۴

حقیقی به دست آمده است. این مسئله خصوصاً در المان‌های ۳۱ و ۳۶ با میزان خطای به ترتیب ۲۱ درصد و ۷۱ درصد بسیار مشهود است. از طرف دیگر، در المان‌هایی که ضریب تصحیح المانی در آنها کمتر از مقدار حقیقی برآورد شده نیز به میزان خطای ۶۳ درصد در المان ۳۵ برمی‌خوریم. به نظر می‌رسد، با افزایش تعداد المان‌های سازه و تخصیص ضرایب تصحیح بیشتر به اعضایی که در واقع آسیبی در آنها وجود ندارد، روش ناحیه اطمینان گاوس- نیوتن در مسیر بهینه‌سازی تابع هدف، علاوه بر شناسایی مقادیر آسیب‌های بسیار بزرگ‌تر از مقادیر حقیقی آسیب، تعداد المان‌های بیشتری را با ضرایب شناسایی شده‌ی بالاتر از مقادیر واقعی شناسایی می‌کند. این مسئله، با حذف ضرایب المان‌های با آسیب کوچک و انجام مرحله دوم شناسایی تا اندازه‌ی زیادی برطرف می‌شود، اما از این مرحله به بعد، انجام تکرارهای بعدی تغییر قابل ملاحظه‌ای در نتایج ایجاد نمی‌کنند. این نتایج، مندرج در ستون‌های سوم تا هشتم جدول (۷)، مؤید این نکته هستند که در مواردی، مانند وجود آسیب در اعضای مهاربندی، سطح دسترسی به نتایج بسیار دقیق حتی با تکرارهای بسیار زیاد نیز قابل حصول نخواهد بود.

ارزیابی الگوی آسیب چهارم: نتایج تحلیل به روزرسانی بر روی مدل سازه‌ی سالم در این الگوی آسیب در جدول (۷) ارائه شده است. همان‌گونه که پیش از این بیان شد، در این الگو اعضای مختلفی از جمله تیر، ستون و اعضای مهاربندی آسیب دیده‌اند. نتایج تحلیل اول، ستون سوم در جدول (۷)، نشان می‌دهند که همه آسیب‌ها اعم از آسیب‌های تیر، ستون یا مهاربند با دقت قابل قبولی به‌خوبی شناسایی شده‌اند. از تحلیل دوم به بعد فقط تغییرات اندکی در تصحیح ضرایب آسیب اعضای مهاربند مشاهده می‌شود. با انجام اولین آسیب در اعضای سازه‌ای چه سالم و چه آسیب دیده با دقت قابل قبولی شناسایی شده‌اند. انجام مرحله‌ی دوم دریافت تأکید بهتر بر تشخیص میزان آسیب بوده است. مقایسه‌ی تشخیص آسیب این مرحله و مرحله‌ی پیشین، مؤید این نکته است که تشخیص آسیب در اعضای خمشی سریع‌تر و دقیق‌تر از اعضای با عملکرد محوری شناسایی می‌شود.

تعداد این ضرایب به سرعت کاهش می‌یابند. در این مقاله، تابع هدف مسئله‌ی بهینه‌سازی بر اساس باقیمانده‌ی تمام فرکانس‌ها و سه بردار نخست شکل مد سازه تشکیل شده است. در این روش الگوریتم بهینه‌سازی که برای کمینه نمودن تابع هدف مورد استفاده قرار گرفته، روش ناحیه اطمینان گاوس- نیوتن می‌باشد که روشی تکرار شونده و مبتنی بر حساسیت بوده و به صورت پیش فرض در دستور کمینه مربعات غیرخطی^۴ برنامه متلب، تعریف شده است. تعداد تکرارهای مجاز در هر گام بهینه‌یابی برای هر چهار الگوی آسیب ده هزار تکرار منظور شده و تعداد دفعات محاسبه‌ی تابع هدف برای رسیدن به بهترین تقریب از ضرایب تصحیح برای سه الگوی اول تا سوم آسیب، هشتاد هزار بار و برای الگوی چهارم آسیب که پیچیده‌تر بوده یک صد و بیست هزار بار منظور شده است. همچنین لازم به ذکر است به دلیل محدودیت فضای مقاله در ادامه فقط نتایج آسیب‌های دوم و چهارم ارائه خواهد شد.

ارزیابی الگوی آسیب دوم: با انجام اولین تحلیل به روز

رسانی مدل سازه‌ی سالم آغاز می‌شود. این مقادیر در وهله‌ی اول ناشی از تابع هدف تعریف شده، یعنی تعداد فرکانس‌ها و شکل مدها و در وهله‌ی دوم ناشی از روش اتخاذ شده در تعیین ضرایب تصحیح، یعنی روش ناحیه اطمینان گاوس- نیوتن مبتنی بر حساسیت، است. طبق نتایج ارائه شده در جدول (۶) مقادیر بزرگ ضریب تصحیح المانی در المان‌های سالم، مقدار ۱/۷۶ درصد در المان ۲۱ یا مقدار ۱/۲۵ درصد در المان ۹ بوده است. در بقیه المان‌های سالم این ضریب نزدیک به صفر یا منفی است که در مرحله‌ی دوم ضرایب تصحیح کوچک‌تر از یک و نیم درصد (۱/۵) که شامل موارد منفی نیز می‌شود، از روند محاسبات کنار گذاشته می‌شوند. در المان‌های آسیب دیده نیز ضرایب تصحیح المانی تا اندازه‌ی زیادی توانسته‌اند مقادیر حقیقی آسیب‌ها را برآورد نمایند؛ اما در چند مورد نتایج قابل تأمل هستند؛ از ۱۲ مورد آسیب (المان‌های ۲۵ تا ۳۶)، در پنج مورد (المان‌های ۲۸، ۲۹، ۳۱، ۳۳ و ۳۶) مقادیری بالاتر از مقادیر

جدول (۶): به روز رسانی مدل اجزای محدود برای الگوی آسیب دوم.

عضو	شماره المان	آسیب واقعی	آسیب تشخیص داده شده با استفاده از به روز رسانی مدل اجزای محدود								
			تحلیل اول	تحلیل دوم	تحلیل سوم	تحلیل چهارم	تحلیل پنجم	تحلیل ششم	تحلیل هفتم	تحلیل هشتم	
ستون‌های طبقه اول	۱	۰	۰/۰۰۴۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۲	۰	۰/۰۰۳۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۳	۰	۰/۰۰۸۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۴	۰	۰/۰۰۲۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
تیرهای طبقه اول	۵	۰	-۰/۰۰۵۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۶	۰	۰/۰۰۳۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۷	۰	-۰/۰۰۸۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۸	۰	۰/۰۰۴۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
ستون‌های طبقه دوم	۹	۰	۰/۰۱۲۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۱۰	۰	۰/۰۰۲۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۱۱	۰	۰/۰۰۰۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۱۲	۰	-۰/۰۰۷۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
تیرهای طبقه دوم	۱۳	۰	-۰/۰۰۳۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۱۴	۰	۰/۰۰۱۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۱۵	۰	۰/۰۰۶۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۱۶	۰	۰/۰۰۲۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
ستون‌های طبقه سوم	۱۷	۰	-۰/۰۰۲۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۱۸	۰	-۰/۰۱۷۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۱۹	۰	-۰/۰۰۰۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۲۰	۰	۰/۰۰۹۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
تیرهای طبقه سوم	۲۱	۰	۰/۰۱۷۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۲۲	۰	۰/۰۰۵۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۲۳	۰	-۰/۰۱۳۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۲۴	۰	۰/۰۰۱۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
بادبند‌های تمامی طبقات	۲۵	۰/۱۶۳	۰/۱۳۷۸	۰/۱۶۱۹	۰/۱۶۱۹	۰/۱۶۱۹	۰/۱۶۱۹	۰/۱۶۱۹	۰/۱۶۱۵	۰/۱۶۱۴	۰/۱۶۱۴
	۲۶	۰/۱۷۳	۰/۱۶۱۰	۰/۱۷۲۹	۰/۱۷۲۹	۰/۱۷۲۸	۰/۱۷۲۹	۰/۱۷۳۲	۰/۱۷۳۳	۰/۱۷۳۳	۰/۱۷۳۳
	۲۷	۰/۱۱۷	۰/۱۰۵۱	۰/۱۲۴۱	۰/۱۲۴۱	۰/۱۲۴۳	۰/۱۲۴۲	۰/۱۲۵۰	۰/۱۲۵۳	۰/۱۲۵۳	۰/۱۲۵۳
	۲۸	۰/۱۲۳	۰/۱۵۲۳	۰/۱۲۷۲	۰/۱۲۷۲	۰/۱۲۷۲	۰/۱۲۷۱	۰/۱۲۶۴	۰/۱۲۶۰	۰/۱۲۶۰	۰/۱۲۶۰
	۲۹	۰/۰۶۵	۰/۰۶۹۱	۰/۰۶۸۴	۰/۰۶۸۴	۰/۰۶۸۶	۰/۰۶۸۷	۰/۰۶۸۷	۰/۰۶۸۸	۰/۰۶۸۸	۰/۰۶۸۸
	۳۰	۰/۰۷۳	۰/۰۵۱۳	۰/۰۶۹۶	۰/۰۶۹۷	۰/۰۶۹۶	۰/۰۶۹۵	۰/۰۶۹۷	۰/۰۶۹۶	۰/۰۶۹۶	۰/۰۶۹۶
	۳۱	۰/۱۷۸	۰/۲۱۹۱	۰/۱۷۶۵	۰/۱۷۶۵	۰/۱۷۶۵	۰/۱۷۶۴	۰/۱۷۶۴	۰/۱۷۶۴	۰/۱۷۶۴	۰/۱۷۶۴
	۳۲	۰/۱۶۹	۰/۱۳۶۲	۰/۱۷۱۷	۰/۱۷۱۸	۰/۱۷۱۷	۰/۱۷۱۸	۰/۱۷۱۹	۰/۱۷۱۹	۰/۱۷۱۹	۰/۱۷۱۹
	۳۳	۰/۱۱۹	۰/۱۴۱۳	۰/۱۲۲۵	۰/۱۲۲۵	۰/۱۲۲۳	۰/۱۲۲۴	۰/۱۲۲۸	۰/۱۲۲۵	۰/۱۲۲۵	۰/۱۲۲۵
	۳۴	۰/۱۲۸	۰/۰۸۱۴	۰/۱۱۳۱	۰/۱۱۳۰	۰/۱۱۳۳	۰/۱۱۳۳	۰/۱۱۳۰	۰/۱۱۳۱	۰/۱۱۳۱	۰/۱۱۳۱
	۳۵	۰/۰۶۸	۰/۰۲۴۶	۰/۰۵۹۰	۰/۰۵۹۵	۰/۰۵۹۷	۰/۰۵۹۸	۰/۰۶۰۰	۰/۰۶۰۰	۰/۰۶۰۰	۰/۰۶۰۳
	۳۶	۰/۰۷۶	۰/۱۳۱۷	۰/۰۸۴۹	۰/۰۸۴۳	۰/۰۸۴۰	۰/۰۸۴۰	۰/۰۸۳۵	۰/۰۸۳۲	۰/۰۸۳۲	۰/۰۸۳۲

جدول (۷): به روز رسانی مدل اجزای محدود برای الگوی آسیب چهارم.

عضو	شماره المان	آسیب واقعی	آسیب تشخیص داده شده با استفاده از به روز رسانی مدل اجزای محدود			
			تحلیل اول	تحلیل دوم	تحلیل سوم	تحلیل چهارم
ستون‌های طبقه اول	۱	۰	۰/۰۰۲۱	۰	۰	۰
	۲	۰	-۰/۰۰۳۳	۰	۰	۰
	۳	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵۰	۰/۱۲۵۱	۰/۱۲۵۰	۰/۱۲۵۰
	۴	۰	۰/۰۰۰۹	۰	۰	۰
تیرهای طبقه اول	۵	۰/۲۳۶	۰/۲۳۶۷	۰/۲۳۶۷	۰/۲۳۶۰	۰/۲۳۶۰
	۶	۰	-۰/۰۰۲۸	۰	۰	۰
	۷	۰/۲۲۵	۰/۲۲۴۳	۰/۲۲۴۴	۰/۲۲۵۰	۰/۲۲۵۰
	۸	۰	۰/۰۰۲۹	۰	۰	۰
ستون‌های طبقه دوم	۹	۰	-۰/۰۰۸۰	۰	۰	۰
	۱۰	۰	۰/۰۰۶۶	۰	۰	۰
	۱۱	۰	-۰/۰۰۰۵	۰	۰	۰
	۱۲	۰/۰۸۶	۰/۰۸۷۳	۰/۰۸۷۴	۰/۰۸۶۰	۰/۰۸۶۰
تیرهای طبقه دوم	۱۳	۰	-۰/۰۰۰۲	۰	۰	۰
	۱۴	۰/۱۷۴	۰/۱۷۷۲	۰/۱۷۷۲	۰/۱۷۴۰	۰/۱۷۴۰
	۱۵	۰	۰/۰۰۰۴	۰	۰	۰
	۱۶	۰/۱۶۵	۰/۱۶۱۶	۰/۱۶۱۶	۰/۱۶۵۰	۰/۱۶۵۰
ستون‌های طبقه سوم	۱۷	۰	۰/۰۰۴۶	۰	۰	۰
	۱۸	۰	-۰/۰۰۲۸	۰	۰	۰
	۱۹	۰	-۰/۰۰۱۱	۰	۰	۰
	۲۰	۰	-۰/۰۰۰۳	۰	۰	۰
تیرهای طبقه سوم	۲۱	۰/۰۸۵	۰/۰۸۴۸	۰/۰۸۴۸	۰/۰۸۵۰	۰/۰۸۵۰
	۲۲	۰	۰/۰۰۰۸	۰	۰	۰
	۲۳	۰	۰	۰	۰	۰
	۲۴	۰	-۰/۰۰۰۵	۰	۰	۰
بادبند‌های تمامی طبقات	۲۵	۰/۱۷۹	۰/۱۵۱۶	۰/۱۵۱۶	۰/۱۷۹۰	۰/۱۷۹۰
	۲۶	۰	-۰/۰۱۵۲	۰	۰	۰
	۲۷	۰	۰/۰۱۹۰	۰/۰۱۹۰	۰	۰
	۲۸	۰	-۰/۰۱۰۷	۰	۰	۰
	۲۹	۰/۱۳۲	۰/۱۳۱۵	۰/۱۳۱۵	۰/۱۳۲۰	۰/۱۳۲۰
	۳۰	۰	۰/۰۰۰۷	۰	۰	۰
	۳۱	۰	۰/۰۳۴۱	۰/۰۳۴۱	۰	۰
	۳۲	۰/۱۸۵	۰/۱۹۳۵	۰/۱۹۳۵	۰/۱۸۵۰	۰/۱۸۵۰
	۳۳	۰	-۰/۰۱۱۶	۰	۰	۰
	۳۴	۰/۱۶۴	۰/۱۶۷۴	۰/۱۶۷۴	۰/۱۶۴۰	۰/۱۶۴۰
	۳۵	۰	-۰/۰۰۵۱	۰	۰	۰
	۳۶	۰	۰/۰۰۴۸	۰	۰	۰

۳-۴- گزارشی از نتایج ارزیابی الگوی آسیب اول و سوم

همان طور که پیش از این نیز اشاره شد با توجه به فضای محدود مقاله امکان ارائه نتایج حاصل از ارزیابی هر چهار الگوی آسیب در نظر گرفته شده به صورت کامل امکان پذیر نبوده، لذا در ادامه تنها به ارائه گزارشی از نتایج حاصل از دو الگوی آسیب اول و سوم اکتفا می شود.

۳-۴-۱- گزارشی از نتایج ارزیابی الگوی آسیب اول

بررسی نتایج حاصل از به روز رسانی در مرحله ی اول الگوی آسیب اول، نشان داد ضرایب تصحیح با دقت بالایی توانسته اند تا اندازه ی زیادی موقعیت و حدود شدت آسیب را شناسایی نمایند. ضریب آسیب دیدگی المان های آسیب دیده در بهترین حالت در المان ۲، یعنی شناسایی شدت آسیب ۱۳ درصد و در بدترین حالت در المان های ۳ و ۴، یعنی شناسایی شدت آسیب ۹ درصد به جای ۱۲ درصد، تعیین شد. در المان هایی که در واقع سالم بودند این ضریب از مقادیر منفی تا ۳/۵ درصد در المان ۷ متغیر بود. در مرحله ی دوم، تغییرات رخ داده در ضرایب تصحیح المان هایی که در مرحله ی قبل شدت آسیب در آنها به خوبی تشخیص داده شده بودند، مانند المان های ۱ و ۲، بسیار اندک بود؛ اما برای دیگر المان های آسیب دیده، مانند المان های ۳ و ۲۵، این تغییرات قابل توجه بودند. نکته ی حائز اهمیت در این روش، افزایش ضرایب تصحیح در المان های آسیب دیده و کاهش چشمگیر ضرایب تصحیح در المان های سالم است که موفقیت روش پیشنهادی را تضمین می نماید. در مرحله ی سوم، با حذف مجدد ضرایب تصحیح اضافی المان های سالم، سرعت همگرایی روش در دستیابی به مقادیر صحیح تر آسیب در المان های آسیب دیده ی حقیقی باز هم بیشتر شد.

۳-۴-۲- گزارشی از نتایج ارزیابی الگوی آسیب سوم

با انجام اولین تحلیل به روز رسانی مدل سازه ی سالم،

مقادیر بزرگ ضریب تصحیح المانی در المان های سالم، مقدار ۱/۷۶ درصد در المان ۲۱ یا مقدار ۱/۲۵ درصد در المان ۹ بوده است. در بقیه ی المان های سالم این ضریب نزدیک به صفر یا منفی است که در مرحله ی دوم از روند محاسبات کنار گذاشته می شوند. در المان های آسیب دیده نیز ضرایب تصحیح المانی تا اندازه ی زیادی توانستند مقادیر حقیقی آسیب ها را برآورد نمایند؛ اما در چند مورد نتایج قابل تأمل بودند؛ از ۱۲ مورد آسیب (المان های ۲۵ تا ۳۶)، در پنج مورد (المان های ۲۸، ۲۹، ۳۱، ۳۳ و ۳۶) مقادیری بالاتر از مقادیر حقیقی به دست آمد. این مسئله خصوصاً در المان های ۳۱ و ۳۶ با میزان خطای به ترتیب ۲۱ و ۷۱ درصد بسیار مشهود بود. از طرف دیگر، در المان هایی که ضریب تصحیح المانی در آنها کمتر از مقدار حقیقی برآورد شد نیز به میزان خطای ۶۳ درصد در المان ۳۵ برمی خوریم. به نظر می رسد، با افزایش تعداد المان های سازه و تخصیص ضرایب تصحیح بیشتر به اعضایی که در واقع آسیبی در آنها وجود ندارد، روش ناحیه اطمینان گاوس- نیوتن در مسیر بهینه سازی تابع هدف، علاوه بر شناسایی مقادیر آسیب های بسیار بزرگ تر از مقادیر حقیقی آسیب، تعداد المان های بیشتری را با ضرایب شناسایی شده ی بالاتر از مقادیر واقعی شناسایی می کند. این مسئله، با حذف ضرایب المان های با آسیب کوچک و انجام مرحله دوم شناسایی تا اندازه ی زیادی برطرف می گردد، اما از این مرحله به بعد، انجام تکرارهای بعدی تغییر قابل ملاحظه ای در نتایج ایجاد نمی کنند. این نتایج، مؤید این نکته هستند که در مواردی، مانند وجود آسیب در اعضای مهاربندی، سطح دسترسی به نتایج بسیار دقیق حتی با تکرارهای بسیار زیاد نیز قابل حصول نخواهد بود.

اما آنچه در نتایج حاصل از به روز رسانی مدل این سازه با الگوهای چهارگانه آسیب مشهود است، میزان اثربخشی رویکرد پیشنهادی مبنی بر انجام تحلیل های متوالی در بهبود و همگرا نمودن نتایج تحلیل هاست. به طوری که مشاهده شد

تأثیرگذار باشد، موقعیت هندسی و شدت آسیب‌های احتمالی موجود در سازه است؛ زیرا همواره نقطه شروع بهینه‌سازی و جهت آن در همگرایی نتایج تأثیر بسیار زیادی دارد. به طوری که در روند حل مثال ارائه شده در این پژوهش مشاهده شد هر چه توزیع هندسی آسیب‌ها در سازه دارای الگوی پراکنده‌تری باشد، روش در شناسایی آنها دقیق‌تر عمل می‌نماید. همچنین روش نشان داده است در پیش‌بینی مقادیر آسیب دیدگی‌های بزرگ‌تر، نسبت به آسیب دیدگی‌های خفیف دارای عملکرد بهتری است.

اما در پایان باید به این نکته مهم نیز اشاره نمود، از آنجایی که در این شیوه از دستور کمینه مربعات غیرخطی استفاده می‌شود، لذا می‌توان با مراجعه به تنظیمات بهینه‌سازی^۵ که برای تنظیم دقت کمینه مربعات غیرخطی در بهینه‌سازی تعریف شده است، ضمن تنظیم بهینه پارامترهای بهینه‌سازی شامل تلورانس تابع هدف، تلورانس متغیرهای تابع هدف، تعداد دفعات تکرار الگوریتم بهینه‌یابی و تعداد دفعات ارزیابی شدن‌های تابع هدف در هر تکرار، دقت برآورد نتایج را تا حد مورد انتظار خود افزایش داد.

۳-۶- ارزیابی فرکانس و بردارهای شکل مدی سازه‌ی شناسایی شده

به منظور ارزیابی میزان دقت روش در شناسایی مدل تحلیلی حقیقی سازه‌ی آسیب‌دیده، لازم است مقایسه‌ای میان فرکانس‌های طبیعی و بردارهای مدی در دو حالت اندازه‌گیری شده و محاسبه شده صورت پذیرد. مقادیر فرکانسی سه مد اول سازه برای هر چهار الگوی آسیب در جدول (۴) ارائه شده است. از آنجا که در طی فرآیند به روز رسانی از این مقادیر فرکانسی برای انطباق مدل تحلیلی سازه استفاده شده است، طبیعی است مقادیر فرکانس‌های مدل تحلیلی سازه‌ی سالم پس از طی فرآیند به روز رسانی کاملاً با مقادیر اندازه‌گیری شده منطبق باشند. نتایج ارائه شده در جدول (۸) نیز همین مطلب را نشان می‌دهد.

روش هر بار با خارج نمودن المان‌های سالم شناسایی شده در هر مرحله از تحلیل، قادر است طی یک روند متوالی از تحلیل‌های پی‌درپی به تدریج ضمن کاهش پارامترهای به روز رسانی یا همان ضرایب تصحیح مجهول، اختصاص داده شده به ماتریس‌های سختی هر یک از المان‌های مدل اجزای محدود سازه، خطاهای عددی معمول در حل مسائل بهینه‌سازی سازه‌های بزرگ‌مقیاس را به پایین‌ترین سطح ممکن کاهش دهد.

۳-۵- تعداد گام‌های تحلیل

اما موضوع مهم دیگری که در روند حل مسئله به روز رسانی برای هر یک از الگوهای آسیب چهارگانه مشاهده شد، متفاوت بودن تعداد تحلیل‌های انجام پذیرفته در هر یک از این حالات بود. به‌طور کلی عوامل متعددی وجود دارند که می‌توانند بر تعداد تحلیل‌های مورد نیاز در راستای همگرا نمودن نتایج تأثیرگذار باشند. برای مثال از آنجایی که در این شیوه پارامترهای به روز رسانی، در نخستین تحلیل به تمام ماتریس‌های سختی اعضای مدل اجزای محدود سازه اختصاص داده می‌شوند، از این رو هر چه یک سازه با تعداد المان‌های بیشتری مدل شده باشد، به دلیل افزایش تعداد پارامترهای به روز رسانی، میزان بروز خطاهای عددی در روند حل مسئله بهینه‌سازی آن نیز افزایش خواهد یافت. از این رو برای کاهش تعداد پارامترهای به روز رسانی و حصول همگرایی بهتر نتایج، روش پیشنهادی نیاز به پیاده‌سازی تعداد تحلیل‌های متوالی بیشتری خواهد داشت. از سوی دیگر باید این انتظار را نیز داشت که در مورد مسائل بزرگ‌مقیاس و یا در مورد مسائلی که تعداد اعضای آسیب‌دیده در آنها زیادتر باشند، به دلیل افزایش تعداد پارامترهای به روز رسانی، میزان کارایی روش در گروه تحقق تعداد تحلیل‌های متوالی بیشتری خواهد بود. همچنین عامل دیگری که می‌تواند به نوبه خود در تعداد تحلیل‌های متوالی برای رسیدن به همگرایی بهتر در نتایج

جدول (۸): مقایسه فرکانس های طبیعی مدل اجزای محدود سازه قاب فضایی سالم، آسیب دیده و به روز رسانی شده.

الگوی آسیب	شماره مد	سالم $f_n(H_z)$	آسیب دیده $f_n(H_z)$	به روز رسانی شده $f_n(H_z)$
اول	۱	۵/۴۶	۵/۳۶	۵/۳۶
	۲	۶/۷۴	۶/۶۴	۶/۶۴
	۳	۱۴/۲۶	۱۴/۲۴	۱۴/۲۴
دوم	۱	۵/۴۶	۵/۴۵	۵/۴۵
	۲	۶/۷۴	۶/۷۳	۶/۷۳
	۳	۱۴/۲۶	۱۴/۲۵	۱۴/۲۵
سوم	۱	۵/۴۶	۵/۱۳	۵/۱۳
	۲	۶/۷۴	۶/۳۲	۶/۳۲
	۳	۱۴/۲۶	۱۲/۸۳	۱۲/۸۳
چهارم	۱	۵/۴۶	۵/۲۲	۵/۲۲
	۲	۶/۷۴	۶/۷۳	۶/۷۳
	۳	۱۴/۲۶	۱۳/۷۹	۱۳/۷۹

کامل میان مدهای سازه‌ی به روز رسانی شده و سازه‌ی آسیب دیده بوده و حاکی از انطباق کامل مدل تحلیلی با سازه‌ی آسیب دیده‌ی حقیقی است.

جدول (۹): مقایسه مقدار شاخص (MAC) میان مدهای به دست آمده از مدل اجزای محدود سازه قاب فضایی سالم، آسیب دیده و به روز رسانی شده.

الگوی آسیب	شماره مد	MAC(%) قبل از به روز رسانی	MAC(%) بعد از به روز رسانی
اول	۴	۹۹/۸۴	۱۰۰
	۵	۹۹/۸۴	۱۰۰
	۶	۹۹/۹۳	۱۰۰
دوم	۴	۹۹/۹۹	۱۰۰
	۵	۹۹/۹۹	۱۰۰
	۶	۹۹/۹۸	۱۰۰
سوم	۴	۹۹/۹۶	۱۰۰
	۵	۹/۵۶	۱۰۰
	۶	۹۹/۹۸	۱۰۰
چهارم	۴	۹۹/۵۲	۱۰۰
	۵	۹۹/۵۲	۱۰۰
	۶	۹۹/۹۲	۱۰۰

در مرحله‌ی به روز رسانی مدل تحلیلی از سه شکل مد اول سازه استفاده شده است، لذا برای مقایسه‌ی شکل مد مدل تحلیلی از مدهای ۴ الی ۶ استفاده شده است. برای این ارزیابی از معیار ارزیابی مشخصه مدی (MAC) برای نمایش همبستگی بین مدها بهره گرفته شده است. شاخص (MAC) نشان دهنده‌ی همبستگی بین دو گروه از شکل های مدی است که با رابطه‌ی زیر بیان می شود.

$$MAC(\varphi_i, \tilde{\varphi}_j) = \frac{|\varphi_i^T \tilde{\varphi}_j|^2}{(\varphi_i^T \varphi_i)(\tilde{\varphi}_j^T \tilde{\varphi}_j)} \quad (17)$$

مقدار شاخص (MAC) همواره بین دو مقدار صفر و یک در حال تغییر است. چنانچه مقدار این شاخص نزدیک به عدد ۱ باشد، نشان دهنده‌ی همبستگی مناسب میان دو گروه از شکل های مدی خواهد بود و چنانچه مقدار آن نزدیک به عدد صفر باشد، نشان دهنده‌ی عدم همبستگی میان آنها است [۱۵].

معیار (MAC) برای شکل مدهای ۴ الی ۶ مدل سازه‌ی آسیب دیده‌ی حقیقی نسبت به مدل سازه‌ی سالم (پیش از به روز رسانی) و مدل سازه‌ی به روز رسانی شده در جدول (۹) ارائه شده است. نسبت ۱۰۰ درصد این معیار نشان دهنده‌ی همبستگی

داشتن خطاهای روش الگوریتم به روز رسانی بر روی مدلی یک‌بعدی و حداکثر دو بعدی با صرف نظر از درجات آزادی دورانی بررسی شود. به جز در موارد بررسی شده در مراجع [۸] و [۱۱] که به ترتیب شامل یک سازه قاب فضایی سه‌بعدی فلزی و پل بزرگراهی می‌باشند، کمتر مشاهده شده است که یک روش بر روی مدلی کامل از یک سازه حقیقی پیاده‌سازی شود. ضمن ساده‌سازی و ایده‌آل‌سازی‌های انجام گرفته بر روی مدل این دو سازه مذکور از جمله صرف نظر از درجات آزادی دورانی، خطاهای عددی روش‌ها غیر قابل چشم‌پوشی است. خطاهایی که مختص الگوریتم خاصی نبوده و در اغلب روش‌های عددی وجود دارند. با همه این تفاسیر در این پژوهش سعی شد تا با به کارگیری یک رویکرد ابتکاری نقص روش‌های عددی در برخورد با مسائلی که دارای تعداد مجهولات بسیاری هستند برطرف شود و به‌نوعی این روش‌ها مجدد احیا شوند. به‌منظور نمایش کارآیی روش برخلاف روال مرسوم در پژوهش‌های اخیر روشی برای به روز رسانی مدل اجزای محدود سازه‌های سه‌بعدی در ابعاد و اندازه واقعی، ضمن در نظر گرفتن تمام درجات آزادی، یعنی هر ۶ درجه آزادی برای هر گره که می‌تواند مدل‌سازی بسیار نزدیکی به سازه حقیقی باشد ارائه شد که طی آن با استفاده از یک روش بهینه‌سازی تکرارشونده مبتنی بر حساسیت، موسوم به روش ناحیه اطمینان گاوس نیوتن، ماتریس سختی هر یک از اعضای مدل تحلیلی سازه را از طریق کمینه نمودن اختلاف میان فرکانس‌ها و شکل‌های مدی اندازه‌گیری شده و محاسباتی تصحیح می‌نماید. از آنجا که در سازه‌های سه‌بعدی با افزایش تعداد اعضای سازه‌ای و به تبع افزایش تعداد پارامترهای به روز رسانی، حل مسئله بهینه‌سازی و حداقل نمودن تابع هدف و یافتن مقادیر ضرایب تصحیح دچار خطاهای عددی قابل ملاحظه‌ای می‌شود، رویکرد چند مرحله‌ای در قالب روندی از تحلیل‌های متوالی پیشنهاد شد. در روش پیشنهادی در نخستین تحلیل، ضرایب تصحیح مجهول به همه اعضای سازه‌ای تخصیص می‌یابد. پس از انجام فرآیند به روز

این نتایج حاکی از آن است که روش پیشنهادی توانسته با اتخاذ رویکردی مبنی بر انجام تحلیل‌های متوالی، اختلاف موجود میان مقادیر و بردارهای ویژه دو مدل سازه سالم و آسیب‌دیده را به حداقل میزان ممکن برساند و به عبارتی مدل سازه سالم را به‌منظور تطبیق با نتایج حاصل از مدل سازه آسیب‌دیده به‌دقت هر چه تمام‌تر اصلاح و به روز رسانی نماید. به گونه‌ای که پس از طی فرآیند به روز رسانی مدل تحلیلی حاصل توانسته است نتایج حاصل از مدل سازه آسیب‌دیده را با دقت بسیار بالایی تولید نماید. از آنجایی که در این مقاله، به روز رسانی مدل سازه صرفاً با هدف تصحیح ماتریس سختی هر یک از المان‌های مدل اجزای محدود سازه تحقق یافته است، لذا می‌توان اذعان نمود پس از انجام فرآیند به‌روزرسانی ماتریس‌های سختی هر یک از المان‌های مدل اجزای محدود سازه به کمک این شیوه نسبت به ماتریس‌های سختی المان‌های متناظر مدل اجزای محدود سازه‌ی آسیب‌دیده به‌طور کامل تصحیح و به روز رسانی شده‌اند.

۴- نتیجه‌گیری

پژوهش‌های اخیر در حوزه به روز رسانی مدل اجزای محدود سازه‌ها نشان می‌دهد روش‌های جدید در حال گذار از روش‌های عددی به سوی روش‌های غیر عددی و فرا ابتکاری از جمله الگوریتم ژنتیک و غیره می‌باشند. روش‌های عددی نشان داده‌اند در مورد سازه‌های پیچیده که دارای تعداد اجزای زیادی هستند و اغلب مجهولات مسائل به روز رسانی آنها زیادتر از حد معمول است کارایی چندانی ندارند؛ زیرا هر چه مجهولات مسئله به روز رسانی افزایش می‌یابد به همان نسبت همگرا شدن نتایج برای روش عددی در روند حل مسئله بهینه‌سازی دشوارتر می‌شود تا آنجا که حتی در برخی موارد نتایج به‌طور کامل واگرا می‌گردد. به همین دلیل اغلب روش‌های عددی پیشنهادی در ادوار گذشته بر روی سازه‌هایی با حداقل ابعاد ممکن پیاده‌سازی شده‌اند. در این گونه مسائل سعی بر آن بوده تا برای مخفی نگاه

- finite element model updating using modal flexibility residual. *Journal of Sound and Vibration*, **290**, 369–387.
3. CHA, P.D. and GU, W. (2000) Model updating using an incomplete set of experimental modes. *Journal of Sound and Vibration*, **233**(4), 587-600.
 4. Giurgiutiu, V. (2014) *Structural Health Monitoring with Piezo Electric Wafer Active Sensors (second edition)*. University of South Carolina, Department of Mechanical Engineering, Columbia, SC, USA.
 5. Farrar, C.R. and Doebling, S.W. (1997) *An Overview of Modal Based Damage Identification Methods*. Engineering Analysis Group, Los Alamos National Laboratory.
 6. Chakraborty, S. and Sen, A. (2014) Adaptive response surface based efficient Finite Element Model Updating. *Finite Elements in Analysis and Design*, **80**, 33–40.
 7. Friswell, M.I. and Mottershead, J.E. (1995) *Finite Element Model Updating in Structural Dynamics*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands.
 8. Hu, S-L.J. and Li, H. and Wang, S. (2007) Cross-model cross-mode method for model updating. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **21**, 1690–1703.
 9. Jaishi, B. and Ren, W-X. (2007) Finite element model updating based on eigenvalue and strain energy residuals using multiobjective optimisation technique. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **21**, 2295–2317.
 10. Marwala, T. (2010) *Finite-element-model Updating Using Computational Intelligence Techniques: Applications to Structural Dynamics*. Springer-Verlag, Springer, London.
 11. Teughels, A. and De Roeck, G. (2004) Structural damage identification of the highway bridge Z24 by FE model updating. *Journal of Sound and Vibration*, **278**, 589–610.
 12. Petersen, Ø.W. (2017) Sensitivity-based finite element model updating of a pontoon bridge. *Journal of Engineering Structures*, **150**(1),

رسانی با خارج نمودن ضرایب تصحیح مجهول اعضایی که در تحلیل نخست سالم شناسایی شده بودند کنار گذاشته شده و تحلیل دوم با تعداد ضرایب تصحیح مجهول کمتر انجام می پذیرد. این فرآیند تا مرحله ای ادامه می یابد که نتایج حاصل از دو تحلیل آخر کاملاً مشابه یکدیگر باشند. این امر حاکی از آن است که ادامه روند تحلیل های متوالی دیگر سبب بهبود نتایج نشده و می توان نتایج حاصل از آخرین تحلیل را به عنوان نتیجه نهایی حاصل از به روز رسانی پذیرفت. نتایج حاصل از پیاده سازی این روش بر روی مدل سازه ای سه بعدی تحت عنوان سازه ی قاب فضایی فولادی مهاربندی شده ی سه طبقه، به خوبی نشان داد که این شیوه قادر است ضمن بهبود و رفع نقص روش های پیشین در مواجهه با مسائل پیچیده (با تعداد اعضا و درجات آزادی بسیار زیاد) و به طور هم زمان توسعه آن به حالت سه بعدی، ابتدا مدل اجزای محدود سازه را به دقت به روز رسانی کند و سپس با تشخیص المان های سالم و آسیب دیده در مدل، محل و میزان آسیب های احتمالی موجود در سازه را با کمینه نمودن خطای ممکن تا حتی چهار رقم اعشار نیز پیش بینی نماید. در پایان لازم است به این نکته نیز اشاره شود، از آنجایی که پیاده سازی این روش خصوصاً در مورد سازه های سه بعدی و با تعداد اعضای زیاد، مستلزم انجام تحلیل های متوالی بیشتر و نیز افزایش دقت تنظیمات بهینه سازی از جمله افزایش تعداد دفعات ارزیابی شدن های تابع هدف مسئله ی بهینه سازی در هر تکرار الگوریتم به روز رسانی است، لذا باید انتظار داشت حل مسئله به روز رسانی به کمک این روش در مقایسه با سایر روش های توسعه یافته تا حدودی با صرف زمان بیشتری همراه باشد.

مراجع

1. Meruane, V. (2013) Model updating using antiresonant frequencies identified from transmissibility functions. *Journal of Sound and Vibration*, **332**, 807–820.
2. Jaishi, B. and Ren, W-X. (2006) Damage detection by

23. Ferreira, A. (2009) *MATLAB Codes for Finite Element Analysis of Solid Mechanics and its Applications*. **157**, Springer Verlag, Berlin.
24. Farhadi Yegane, P. (2016) *Three-Dimensional Structural Model updating using Optimization algorithms*. M.Sc. Thesis on Civil Engineering-Structural Trend, Islamic Azad University, Qazvin Branch, Qazvin (in Persian).
25. Logan, D.L. (2011) *A First Course in the Finite Element Method*. 4th Edition, PWS, Boston.
26. Bhatti, M.A. (2005) *Fundamental Finite Element Analysis and Applications: with Mathematical and Matlab computations*. New Jersey: John Wiley & Sons, 472-5.
- November, 573-584.
13. Teughels, A. and Maeck, J., and De Roeck, G. (2002) Damage assessment by FE model updating using damage functions. *Computers and Structures*, **80**, 1869–1879.
14. Teughels, A. and De Roeck, G., and Suykens, J.A.K. (2003) Global optimization by coupled local minimizers and its application to FE model updating. *Computers and Structures*, **81**, 2337–2351.
15. Teughels, A. and De Roeck, G. (2005) Damage detection and parameter identification by finite element model updating. *Archives of Computational Methods in Engineering*. **12**(2), 123-164.
16. Bakir, P.G. and Reynders, E., and De Roeck, G. (2007) Sensitivity-based finite element model updating using constrained optimization with a trust region algorithm. *Journal of Sound and Vibration*, **305**, 211–225.
17. Fang, S-E. and Perera, R., and De Roeck, G. (2008) Damage identification of a reinforced concrete frame by finite element model updating using damage parameterization. *Journal of Sound and Vibration*, **313**, 544–559.
18. Shan, D., Li, Q., Khan, I., and Zhou, X. (2015) A novel finite element model updating method based on substructure and response surface model. *Journal of Engineering Structures*, **103**, 147–156.
19. Sarmadi, H., Karamodin, A., Entezami, A. (2016) A new iterative model updating technique based on least squares minimal residual method using measured modal data. *Applied Mathematical Modelling*, **40**(23–24), 10323-10341.
20. Kim, G-H. and Park, Y-s. (2008) An automated parameter selection procedure for finite-element model updating and its applications. *Journal of Sound and Vibration*, **309**, 778–793.
21. Bader, B.W. (2009) *Constrained and Unconstrained Optimization*. Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA, Published by Elsevier B.V.
22. Kattan, P.I. (2010) *MATLAB Guide to Finite Elements: an Interactive Approach*. Springer, Berlin Heidelberg, New York.

واژه‌نامه

Ill-Conditioned	۱- شرایط ناموزون
As Built	۲- چون ساخت
MATLAB	۳- نرم افزار برنامه نویسی متلب
Nonlinear Least-Squares	۴- کمینه مربعات غیرخطی
Optimum Set	۵- تنظیمات بهینه سازی

Finite Element Model Updating Method for 3D Structures Using Improved Sensitivity-Based Optimization Methods

Pouyan Farhadi Yeganeh¹ and Omid Bahar^{2*}

1. M.Sc. Student, Islamic Azad University, Structural Engineering Department, Qazvin Branch, Qazvin, Iran
2. Assistant Professor, Structural Engineering Research Centre, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran, *Corresponding Author, email: omidbahar@iiees.ac.ir

Roughly since the 1990s, the model updating problem in fields such as design, construction, repair and maintenance of mechanical systems and civil structures has been a very important, challenging, and developing subject. In general, in the model updating methods, an analytical model of a structure, which is usually formed based on its as built data by using of the finite element method, is corrected considering a set of experimental measured data obtained from vibration of the concerned structure. In fact, the main purpose of the model updating methods is to correct some structural parameters such as mass, stiffness, and damping, in order to achieve a better compromise between analytical and experimental data. We expected that a correctly updated analytical model of a structure predict dynamic behaviour of the real structure better and more accurately than its initial model. In this way, considering the structural model changes with respect to a previously constructed reference model would be measurable. On the other hand, if a structure suffers damages through some extraordinary loadings, this will also be recognizable through comparing the difference between the updated model and its reference model. In this view point, the model updating methods may be a good substitution for traditional methods of damage detection and be generally applied methods for the structural health monitoring, also seismic control and performance/behaviour evaluation of civil structures. Many methods have been developed so far in order to update finite element model of civil structures, which are generally categorized in two main groups including direct and indirect or iterative methods. In the direct methods, mass and stiffness matrices of the structure are directly updated during one step. In these methods, there is no direct relation between elements of the structural matrices and structural physical parameters. Therefore, although the updated matrices obtained from these methods have a relatively acceptable accuracy in predicting linear structural behaviour, today they are rarely used in updating the model of real structures. On the other hand, among the researchers, the iterative methods, because directly use of sensitivity and variations of structural physical parameters to update structural models are more acceptable. Modal parameters of the structure including the natural frequencies and mode shapes are one of the most widely used data in these methods. However, since there is always a non-linear relationship between the modal data and physical parameters, the updating problem in this method is turned into a non-linear least squares problem that must be solved using the iterative optimization methods. In these methods, the errors between the numerical results and the measured ones are considered as the objective function of the optimization problem. By minimizing the objective function by changing some pre-determined physical structural parameters of the initial analytical finite element model, through an iterative updating method, location and severities of damages are detected, as well as the correct physical parameters.

This study aims at updating the finite element model of 3D structures performed through a sensitivity-based iterative optimization method known as the trust region Gauss-Newton method. This is done through finding the best values for the elemental stiffness parameters in analytical model through minimizing the difference between the frequencies and mode shapes of the real and damaged structure. Moreover, in order to reduce the number of updating parameters and avoid singularity problems due to usual numerical errors in the process of solving large-scale optimization problems, a new

updating process has been implemented through several iterative stages via sequential analysis to find unknown correction factors. This process continues until the results from the two final analyses are very close during an acceptable accuracy. In order to examine performance of the proposed procedure, it is implemented for detection of several damage scenarios of a 3D three-story steel dual system of an MR structure equipped by a bracing system. Extensive analyses show that, the proposed method is a powerful model updating method to detect location and severity of sparse/minor damages of large-scale structures with the minimum possible error.

Keywords: Finite Element Model Updating, 3D Structural Model, Sensitivity-Based Method, Trust Region Optimization Algorithm, Modal Data, Damage Detection