

ردیابی مستقیم و هندسی اعضاء قطری ماتریس نرمی تعمیم یافته با کمک روند بهینه یابی برای شناسایی آسیب در سازه ها

علی زارع حسین زاده (کارشناس ارشد)

غلامرضا قدرتی امیری* (استاد)

دانشکده ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

کاظم شاکری (دانشیار)

شروین گل آرا (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده ی فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۶ (۳۰-۲۱)
دوری ۲-۳۳، شماره ۱/۱، ص. ۳۰-۲۱

در این نوشتار، دو روش جدید برای تشخیص آسیب در سازه ها با کمک اطلاعات مودال ارائه شده است. اساس روش ها بر پایه ی تعریف مسئله به صورت یک مسئله ی بهینه یابی استوار است. ماتریس نرمی تعمیم یافته، به عنوان عامل اصلی ایجاد ارتباط بین اطلاعات مودال و آسیب رخ داده در سازه ها معرفی شده است. سپس دو تابع هدف پیشنهاد شده است، که به ترتیب بر پایه ی تطابق نقطه یی عناصر قطری ماتریس نرمی تعمیم یافته و سنجش میزان انطباق هندسی بردار متشکل از این عناصر استوار هستند. در ادامه، مسئله ی بهینه یابی با کمک الگوریتم بهینه یابی رقابت استعماری حل شده است. کارایی توابع پیشنهادی با مطالعه ی الگوهای آسیبی مختلف روی ۳ مثال عددی از سازه های مهندسی بررسی و چالش هایی نظیر تأثیرات نطفه ها مطالعه شده است. همچنین مطالعاتی پیرامون دقت توابع هدف پیشنهادی و میزان همگرایی الگوریتم بهینه یابی در اجراهای مختلف صورت پذیرفته و مقایسه یی بین روش های پیشنهادی و یکی از روش های موجود انجام شده است. نتایج به دست آمده بیانگر دقت بالا و کارایی بهتر تابع هدف دوم هستند.

واژگان کلیدی: تشخیص آسیب در سازه ها، ماتریس نرمی تعمیم یافته، معیار

سنجش میزان اطمینان مودی، الگوریتم بهینه یابی رقابت استعماری، سازه های مهندسی.

ali.hoseinzade@civileng.iust.ac.ir
ghodrati@iust.ac.ir
shakeri@uma.ac.ir
shervin.golara1@gmail.com

۱. مقدمه

و اساس تمام آن ها بر پایه ی تحریک سازه و آنالیز عکس العمل های ثبت شده از این تحریک استوار است.^[۱] گرچه تحریک سازه به دو طریق استاتیکی و دینامیکی امکان پذیر است، اما به طور کلی، دشواری های تحریک استاتیکی و صعوبت ثبت پاسخ های متناظر با آن باعث شده است تا بیشتر پژوهشگران به دنبال توسعه ی روش هایی باشند که از طریق تحریک دینامیکی و ثبت اطلاعات ارتعاشی سازه (نظیر بسامدهای طبیعی و اشکال مودی) به آشکارسازی آسیب می پردازند.

روش های آشکارسازی مبتنی بر پاسخ های ارتعاشی را در حالت کلی به ۲ دسته می توان تقسیم کرد:

سازه های مهندسی در طول عمر خود، شرایط مختلفی را تجربه می کنند، که ممکن است تحت شرایط مذکور آسیب های مختلفی در آن ها ایجاد شود. مثلاً بارگذاری های ناگهانی، نظیر بار زلزله و ضربه، و یا شرایط محیطی نظیر فرسایش و هوازگی می توانند آسیب هایی را به وجود آورند. گرچه امکان دارد پاره یی از این آسیب ها بسیار جزئی باشند و در رفتار کلی سازه، مشکلی را به وجود نیاورند، اما عدم شناسایی به موقع آن ها می تواند در آینده وقایع ناگواری را به دنبال داشته باشد. بر همین اساس، پژوهشگران روش های مختلفی را جهت آشکارسازی زود هنگام آسیب های رخ داده در سازه های مهندسی ارائه کرده اند. فرض اصلی روش های مذکور آن است که آسیب باعث تغییرات سختی در اعضاء آسیب دیده می شود

۱. روش هایی که با راهبرد مستقیم^۱، به شناسایی آسیب می پردازند و بسیار متنوع هستند. روش های مبتنی بر محاسبات نرم^[۲-۴] و یا روش های مبتنی بر پردازش

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۹/۱۵، اصلاحیه ۱۳۹۴/۱/۲۲، پذیرش ۱۳۹۴/۴/۸.

سیگنال^۲ها،^[۶] جزء مهم ترین روش های این دسته هستند. در کنار آن ها، پاره‌ی از پژوهشگران با ارائه‌ی روش های محاسباتی نوین اقدام به تشخیص مستقیم آسیب در سازه‌ها کرده‌اند.^[۷-۱۱]

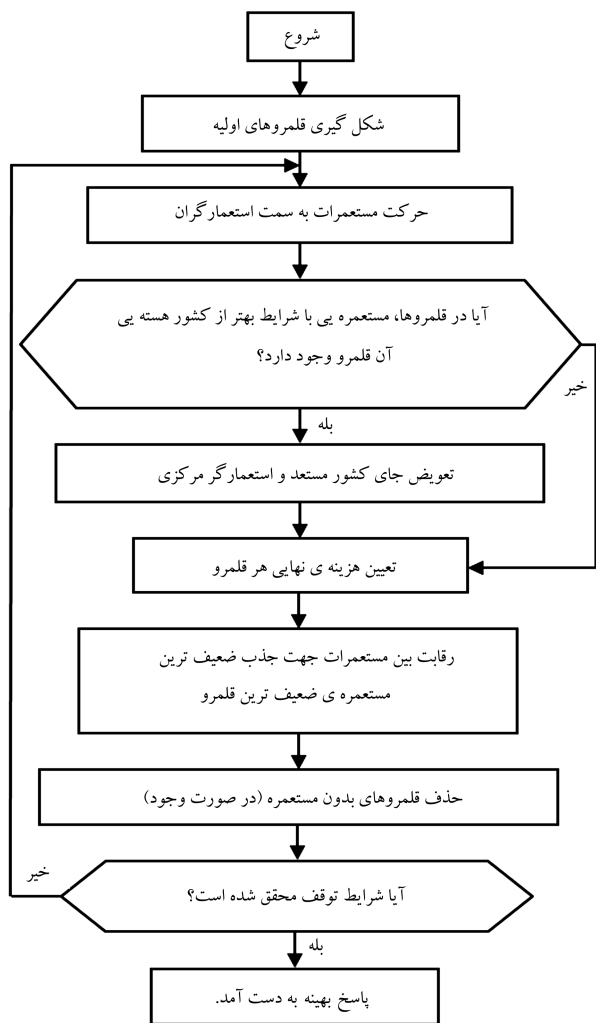
۲. روش هایی که مسئله‌ی تشخیص آسیب را به صورت یک مسئله‌ی معکوس^۳ معرفی کرده‌اند و لذا، با تعریف پارامتریک آسیب در مدل عددی سازه‌ی مونتور شده، به ارائه‌ی روشی جهت آشکارسازی آسیب پرداخته‌اند. علی‌رغم اینکه برخی از پژوهشگران برای حل چنین مسئله‌ی، از روش های عددی مبتنی بر آزمون و خطای مستقیم نظیر منظم سازی ریاضی^۴ بهره برده‌اند،^[۱۲، ۱۳] عدم هم‌گرایی دقیق به پاسخ مورد انتظار، که ناشی از ماهیت ناهمگون وار^۵ فضای پاسخ مسئله به واسطه‌ی عدم قطعیت های متداول است، پژوهشگران را به سمت تعریف مسئله‌ی معکوس با کمک تابع هزینه^۶ حساس به رخداد آسیب و حل آن با کمک الگوریتم های بهینه‌یابی جدید سوق داده است. در این راستا، دو بحث مهم وجود دارد: ۱. ارائه‌ی تابع هدفی با حساسیت مناسب به رخداد آسیب؛ ۲. استفاده از الگوریتم بهینه‌یابی با دقت و سرعت هم‌گرایی بالا. استفاده از روش های بهینه‌یابی کلاسیک به واسطه‌ی نیاز به محاسبات سنگین ریاضی، عموماً با اقبال زیادی روبه‌رو نشده است. از جمله مطالعاتی که از الگوریتم های بهینه‌یابی کلاسیک به تشخیص آسیب پرداخته‌اند، می‌توان به پژوهشی در سال ۲۰۰۵ اشاره کرد.^[۱۴] این در حالی است که استفاده از بهینه‌یابی های نوین و الهام‌گرفته از طبیعت، طرفداران زیادی دارد.^[۱۵-۲۰] در کنار این قضیه، ارائه‌ی تابع هدف حساس نیز بسیار مهم است. در سال ۲۰۰۹،^[۱۵] ضمن بهره‌گیری از تغییرات نرمال شده‌ی بسامدهای طبیعی و شکل های مودی، تابع هدف چندگانه‌ی برای شناسایی آسیب معرفی و با کمک الگوریتم بهینه‌یابی ژنتیک^۷ حل شده است. همچنین با کمک معادله‌ی مشخصه‌ی ارتعاش آزاد و با استفاده از الگوریتم های بهینه‌یابی جستجوی الگو^۸ و ژنتیک، به تشخیص آسیب در پلیت‌ها پرداخته و نشان داده شده است که الگوریتم بهینه‌یابی ژنتیک، پایداری بیشتری دارد.^[۱۷] در سال ۲۰۱۳، نیز با کمک بردار شبه‌نیروی سازه‌ی و الگوریتم بهینه‌یابی جستجوی گرانشی^۹، به تشخیص محل و شدت آسیب در تیرها پرداخته شده است.^[۱۸] همچنین در پژوهش دیگری در همان سال، به منظور شناسایی آسیب در قاب های برشی، روشی دو مرحله‌ی با بهره‌گیری از شیپ شکل مود اول سازه‌ها ارائه و در گام اول، محل آسیب (های) احتمالی شناسایی، و در گام دوم با ارائه‌ی تابع هدف مبتنی بر ضرایب خاکستری^{۱۰}، شدت آسیب در المان های مشکوک تعیین شده است.^[۲۱] به تازگی، نیز با الگوریتم بهینه‌یابی جستجوی سیستم باردار شده^{۱۱} و با استفاده از اطلاعات مودال، آسیب (های) رخ داده در سازه‌های مهندسی شناسایی شده و حساسیت نسبتاً کم به نوبه^{۱۲} های اتفاقی، مهم ترین مزیت روش پیشنهادی مذکور بوده است.^[۲۲]

علی‌رغم موفقیت روش های مذکور در شناسایی محل و شدت آسیب‌ها، پژوهشگران کماکان به دنبال روش هایی هستند که ضمن استفاده از اطلاعات مودال محدود، بتوانند محل و شدت آسیب را با سرعت بالایی تشخیص دهد. در این نوشتار، با استفاده از ماتریس نرمی تعمیم یافته^{۱۳}، دو تابع هدف جدید جهت رابطه‌سازی مسئله‌ی شناسایی آسیب به عنوان یک مسئله‌ی بهینه‌یابی ارائه شده است. این تذکر لازم است که ماتریس نرمی تعمیم یافته، امکان ارائه‌ی تصویری کلی از معکوس ماتریس سختی سازه را فقط با کمک اطلاعات تعداد محدودی از مودهای پایین تر سازه فراهم می‌آورد. توابع هدف ارائه شده، به ترتیب بر پایه‌ی راهبرد انطباق نقطه‌ی و روند تطابق هندسی اعضاء روی قطر اصلی ماتریس نرمی تعمیم یافته استوار هستند. برای حل مسئله‌ی بهینه‌یابی از الگوریتم بهینه‌یابی رقابت استعماری^{۱۴} استفاده شده

است. این الگوریتم بر مبنای اصول آمار و احتمالاتی استوار است و لذا، در قیاس با سایر الگوریتم های بهینه‌یابی تکاملی^{۱۵}، سرعت هم‌گرایی بسیار بالایی دارد.^[۲۳، ۲۴] به منظور بررسی کارایی روش های پیشنهادی، ۳ مثال عددی شامل: یک قاب ۳ طبقه، یک خرپای ۱۵ عضوی، و یک تیر ساده‌ی ۲۰ المانه تحت الگوهای آسیبی مختلف مورد بررسی قرار گرفته و چالش های مختلفی نظیر تأثیرات وجود نوبه در اطلاعات اولیه و تأثیرات تعداد مودهای در دسترس مطالعه شده است. همچنین، مقایسه‌ی بین دقت و سرعت هم‌گرایی الگوریتم بهینه‌یابی رقابت استعماری و ژنتیک صورت پذیرفته است. نتایج به دست آمده حاکی از کارایی روش های ارائه شده در شناسایی آسیب در سازه‌های مهندسی هستند. همچنین، مقایسه‌ی انجام شده بین دقت توابع هدف ارائه شده، بیانگر حساسیت کم تابع هدف دوم به وجود نوبه های اتفاقی است.

۲. الگوریتم بهینه‌یابی

الگوریتم بهینه‌یابی مورد استفاده در این نوشتار، الگوریتم بهینه‌یابی رقابت استعماری است. فلوجارت کلی این الگوریتم در شکل ۱ نشان داده شده است. این الگوریتم که نخستین بار در سال ۲۰۰۷ مطرح شده است، بر پایه‌ی یک پدیده‌ی اجتماعی



شکل ۱. روند کلی الگوریتم بهینه‌یابی رقابت استعماری.

که در آن، f_m^l ماتریس نرمی تعمیم یافته مرتبه l است، که با اطلاعات m مود اول سازه محاسبه شده است. با قراردادن رابطه‌ی ۱ در رابطه‌ی ۲ و اندکی محاسبات ریاضی، می‌توان رابطه‌ی ۲ را به صورت رابطه‌ی ۳ بازنویسی کرد:

$$\mathbf{f}_m^l = \Phi \Gamma^{-1-l} \Phi^T, \quad l = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

بدیهی است که اگر در رابطه‌ی ۳، $l = 0$ باشد، در این صورت، ماتریس نرمی استاندارد به دست می‌آید. در این نوشتار، از ماتریس نرمی تعمیم یافته مرتبه‌ی اول استفاده شده است ($l = 1$). الگوریتم‌های پیشنهادی در این نوشتار، بر مبنای تعریف مسئله به صورت یک مسئله‌ی بهینه‌یابی استوارند. لذا در ادامه، به معرفی توابع هدف پیشنهادی پرداخته شده است.

۲.۳. روش پیشنهادی ۱

روش‌های پیشنهادی در این نوشتار، بر مبنای واری اعضاء قطری ماتریس نرمی تعمیم یافته استوار هستند. الگوریتم پیشنهادی ۱، بر پایه‌ی ارائه‌ی تابع خطای مستقیم رابطه‌بندی شده است. این روند، با کمک راهبرد انطباق نقطه‌ی قابل پیاده‌سازی است. نمونه‌هایی از توابع هدف مبتنی بر انطباق نقطه‌یابی را می‌توان در برخی مطالعات، [۲۶، ۲۷] مشاهده کرد. راهبرد انطباق نقطه‌یابی، به ارائه‌ی رابطه‌ی ساده، جهت تطبیق نقطه به نقطه‌ی پارامتر مورد بررسی می‌پردازد. فرض می‌شود که درایه‌های روی قطر اصلی ماتریس نرمی تعمیم یافته مرتبه‌ی اول، با بردار \mathbf{v} نشان داده شود (رابطه‌ی ۴):

$$\mathbf{v} = \{v_1 \quad v_2 \quad \dots \quad v_{N_d}\}^T, \quad v_i = \mathbf{f}_m^1(i, i) \quad (4)$$

تابع هدف را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۵ ارائه کرد:

$$J_1(d_1, d_2, \dots, d_{N_e}) = \|\mathbf{v}_d - \mathbf{v}_m\| = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_d} (v_d(i) - v_m(i))^2} \quad (5)$$

که در آن، علامت $\|\cdot\|$ ، نشان دهنده‌ی نرم اقلیدسی، و اندیس‌های d و m ، به ترتیب نشان دهنده‌ی بردار \mathbf{v} محاسبه شده بر اساس داده‌های به دست آمده از حدس سطوح آسیب و داده‌های اندازه‌گیری شده از سازه‌ی تحت بررسی هستند. ضرایب d_1 تا d_{N_e} ، ضرایب مجهول آسیب برای المان‌های اول تا N_e هستند. یادآور می‌شود که با توجه به تعریف آسیب به صورت کاهش سختی المان‌های آسیب دیده، ضرایب d_i در تشکیل ماتریس سختی المان‌ها دخالت دارند. به عنوان مثال، ماتریس سختی المان j ام با سطح آسیب مجهول d_j ، به صورت رابطه‌ی ۶ خواهد بود:

$$\mathbf{K}_j^d = (1 - d_j) \mathbf{K}_j \quad (6)$$

با توجه به اینکه آسیب هر المان به صورت عددی بین ۰ و ۱ است، لذا، مسئله‌ی بهینه‌یابی تشخیص آسیب، به صورت رابطه‌ی ۷ تعریف می‌شود:

$$\text{Find } \mathbf{d} = \{d_1 \quad d_2 \quad \dots \quad d_{N_e}\}^T \Rightarrow \text{Minimize } J_1 \\ \text{Subject to : } 0 \leq d_i \leq 1, \quad (7)$$

در ادامه، این تابع با کمک الگوریتم بهینه‌یابی رقابت استعماری مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته و پاسخ‌های بهینه‌ی تابع، به عنوان جواب‌های مسئله‌ی آشکارسازی آسیب معرفی شده است. همان‌طور که واضح است، تابع هدف J_1 ، بر مبنای کنترل مستقیم اعضاء قطری ماتریس نرمی تعمیم یافته مرتبه‌ی اول استوار است. در بخش بعدی، تابع هدف دیگری پیشنهاد شده است، که در آن از راهبرد کنترل هندسی جهت معرفی تابع هدف استفاده می‌شود.

استوار است و جزء الگوریتم‌های تکاملی دسته‌بندی می‌شود. [۲۴، ۲۵] همانند سایر الگوریتم‌های بهینه‌یابی، این الگوریتم هم کار خود را با اتخاذ تعدادی جمعیت اولیه، به نام «کشورهای اولیه» آغاز می‌کند. سپس، تعدادی از مناسب‌ترین کشورها (جمعیت نخبه)، انتخاب و به عنوان «کشورهای استعمارگر» در نظر گرفته می‌شوند. بقیه‌ی کشورها هم در نقش مستعمره ظاهر شده و بر حسب قدرت استعمارگران بین آن‌ها تقسیم می‌شوند. به این ترتیب، قلمروهای اولیه شکل می‌گیرند. قدرت هر قلمرو، به صورت مجموعه‌ی از قدرت استعمارگر مرکزی آن قلمرو و مستعمرات مربوط محاسبه می‌شود. در ادامه، فرایند رقابت جهت جذب مستعمرات از قلمروی حاضر و نیز از قلمروهای مجاور آغاز می‌شود. بدیهی است هر قلمرویی که نتواند موفق عمل کند، از صحنه‌ی رقابت حذف می‌شود. بنابراین بقای یک قلمرو، به قدرت آن در جذب مستعمرات قلمروهای رقیب بستگی خواهد داشت. در نتیجه، در جریان رقابت‌های استعماری، به تدریج بر قدرت قلمروهای بزرگ‌تر افزوده و بالتبع، قلمروهای ضعیف‌تر حذف خواهند شد. با گذشت زمان، مستعمرات از لحاظ قدرت به استعمارگران موجود نزدیک‌تر خواهند شد و عرصه‌ی رقابت، شاهد یک نوع هم‌گرایی کلی خواهد بود. پایان بخش این رقابت زمانی است که یک قلمروی واحد با مستعمراتی بسیار نزدیک به موقعیت کشور استعمارگر مرکزی به وجود آید. [۲۴، ۲۵] لازم به توضیح است که رقابت‌های ذکر شده در این الگوریتم، بر پایه‌ی محاسبات آماری و احتمالاتی رابطه‌سازی شده‌اند؛ و لذا، عدم نیاز به محاسبات مبتنی بر مشتق‌گیری، یکی از عوامل اصلی سرعت بالای این الگوریتم در جستجوی فضای پاسخ است.

۳. جزئیات روش‌های پیشنهادی

۳.۱. ماتریس نرمی تعمیم یافته

در این قسمت، به معرفی ماتریس نرمی تعمیم یافته پرداخته شده است. فرض شده است سازه‌ی مورد مطالعه، سازه‌ی با N_e المان و N_d درجه آزادی است. ماتریس نرمی این سازه را می‌توان به عنوان معکوس ماتریس سختی مطابق رابطه‌ی ۱ در نظر داشت:

$$\mathbf{F} = \Phi \Gamma^{-1} \Phi^T \quad (8)$$

که در آن، \mathbf{F} ماتریس نرمی، Φ ماتریس شامل بردارهای شکل مودی m مود اول سازه و Γ ماتریسی قطری است، که درایه‌های روی قطر اصلی آن برابر مربع بسامدهای طبیعی m مود است. مهم‌ترین مشخصه‌ی ماتریس نرمی آن است که می‌توان با کمک اطلاعات فقط چند مود اول سازه، دیدگاه مناسبی را نسبت به ماتریس سختی سازه تجسم کرد. این درحالی است که اگر بخواهیم با معکوس کردن رابطه‌ی ۱، رابطه‌ی مستقیم بین ماتریس سختی و اطلاعات مودال سازه به دست آوریم، عملاً به خاطر محدودیت‌های مرتبه‌ی ماتریس‌ها، نیاز به اطلاعات مودال تمامی مودها خواهیم داشت. علی‌رغم قابلیت بالای ماتریس نرمی در بررسی وضعیت سازه با کمک اطلاعات چند مود پایین سازه، در پژوهشی در سال ۲۰۱۰ [۲۵] با معرفی ماتریس نرمی تعمیم یافته سعی شده است تا میزان وابستگی ماتریس نرمی به اطلاعات مودال شدیداً کاهش داده شود و فقط با کمک اطلاعات ۱ یا ۲ مود اول، تخمین مناسبی از معکوس ماتریس سختی ارائه شود. ماتریس نرمی تعمیم یافته را می‌توان با پس ضرب کردن عبارت $^l(\mathbf{MF})$ در رابطه‌ی ۱ به دست آورد (رابطه‌ی ۲):

$$\mathbf{f}_m^l = \mathbf{F}(\mathbf{MF})^l \quad (2)$$

۳.۳. روش پیشنهادی ۲

روش پیشنهادی ۲، بر پایه بررسی انطباق هندسی اعضاء قطری ماتریس نرمی تعمیم یافته مرتبه اول استوار است. برای بررسی انطباق هندسی، از معیار سنجش مودی (MAC) استفاده می‌شود. این پارامتر، در ابتدا فقط به عنوان شاخصی جهت اطمینان از صحت اطلاعات مودال به دست آمده از آنالیز پاسخ‌های حوزه‌ی بسامدی بسط داده شد، [۲۸، ۲۷] و بعدها، برای تشخیص سلامت سازه‌ها استفاده شده است. [۲۹] فرض می‌شود دو بردار \mathbf{a} و \mathbf{b} موجود است. معیار سنجش اطمینان برای این دو بردار، به صورت رابطه‌ی ۸ تعریف می‌شود:

$$MAC = \frac{|\mathbf{a}^T \mathbf{b}|^2}{(\mathbf{a}^T \mathbf{a})(\mathbf{b}^T \mathbf{b})} \quad (8)$$

بنابراین، ضریب MAC، می‌تواند میزان تطابق دو بردار را بسنجد و عددی بین ۰ و ۱ را به عنوان مشخصه‌ی که میزان تطابق دو بردار را نشان می‌دهد، بیان کند. بدیهی است که اگر شاخص مذکور مساوی ۱ باشد، دو بردار \mathbf{a} و \mathbf{b} بر هم منطبق خواهند بود. تابع هدفی که در این بخش بیان شده است، بر مبنای سنجش انطباقی دو بردار \mathbf{v}_m و \mathbf{v}_d استوار است. این بردارها، در بخش ۲.۳ تعریف شده‌اند و شاخص MAC برای آن‌ها به صورت رابطه‌ی ۹ تعریف می‌شود:

$$MAC_v = \frac{|(\mathbf{v}_d)^T \mathbf{v}_m|^2}{((\mathbf{v}_d)^T \mathbf{v}_d)((\mathbf{v}_m)^T \mathbf{v}_m)} \quad (9)$$

نهایتاً، تابع هدف پیشنهادی ۲ به صورت رابطه‌ی ۱۰ بیان می‌شود:

$$J_T(d_1, d_2, \dots, d_{N_e}) = |17^\circ - MAC_v| \quad (10)$$

که در آن، علامت $| \cdot |$ ، نماد قدرمطلق است. همانند روش پیشنهادی اول و با توجه به تعریف ارائه شده در بخش پیشین، مسئله‌ی تشخیص آسیب به صورت یک مسئله‌ی بهینه‌یابی مقید تعریف می‌شود (رابطه‌ی ۱۱):

$$\text{Find } \mathbf{d} = \{d_1 \quad d_2 \quad \dots \quad d_{N_e}\}^T \Rightarrow \text{Minimize } J_T$$

$$\text{Subject to : } 0 \leq d_i \leq 17^\circ \quad (11)$$

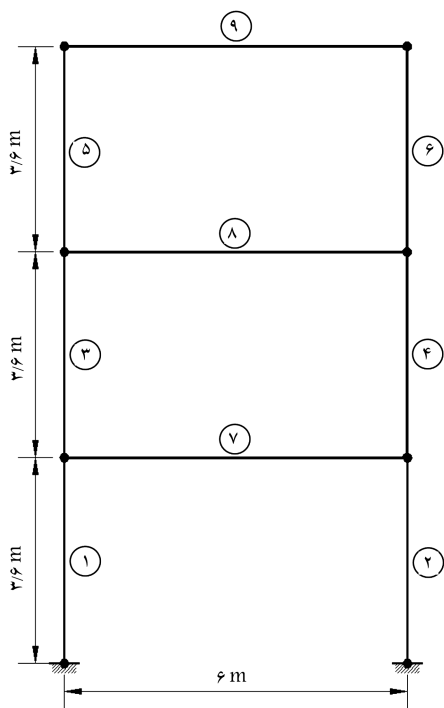
بعد از تشکیل تابع هدف با کمک اطلاعات مودال ثبت شده، الگوریتم بهینه‌یابی رقابت استعماری جهت ارزیابی تابع هدف و تعیین جواب‌های بهینه استفاده می‌شود.

۴. مطالعات عددی

در این بخش، به ارزیابی روش‌های پیشنهادی جهت آشکارسازی آسیب در سازه‌ها پرداخته شده است. در ادامه، ۳ مثال عددی از سازه‌های مهندسی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

۱.۴. قاب دوطبقه‌ی ۳ طبقه

این مثال، به مطالعه‌ی یک قاب فولادی دوطبقه‌ی ۳ طبقه اختصاص دارد. مطابق شکل ۲، مدل اجزاء محدود این قاب، شامل ۹ المان است. چگالی و مدول کشسانی کلیه‌ی اعضاء، به ترتیب برابر با 7850 kg/m^3 و 200 GPa هستند. همچنین، وزن واحد طول، سطح مقطع، و ممان اینرسی برای ستون‌ها، به ترتیب برابر



شکل ۲. مدل اجزاء محدود قاب ۳ طبقه.

جدول ۱. الگوهای آسیبی مربوط به قاب دوطبقه‌ی ۳ طبقه.

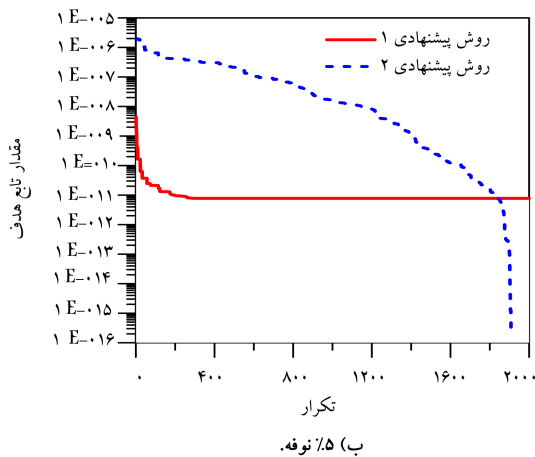
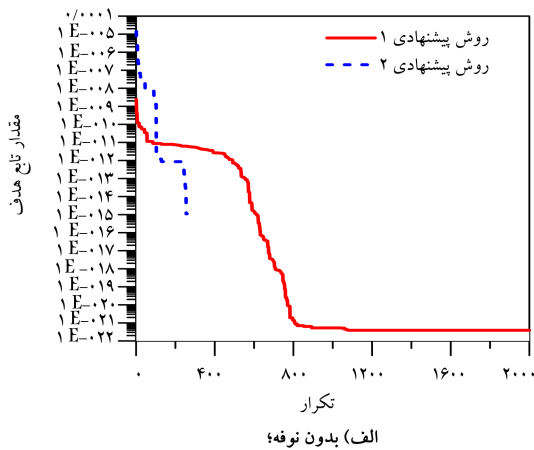
الگوی آسیب ۲		الگوی آسیب ۱	
المان آسیب (%)	۲	المان آسیب (%)	۴
۱۰	۲	۱۵	۴
۵	۵	۱۰	۷
۲۰	۹		

با 117.7 kg/m و 15° cm^2 و $3 \times 10^{-4} \text{ cm}^4$ ، و برای تیرها، به ترتیب برابر با 119.32 kg/m و 152 cm^2 و $3.69 \times 10^{-4} \text{ cm}^4$ در نظر گرفته می‌شود. به منظور بررسی کارایی روش‌های پیشنهادی در شناسایی آسیب‌ها، دو الگوی آسیبی به صورت آنچه که در جدول ۱ ارائه شده است، در نظر گرفته می‌شود. با مدل‌سازی آسیب‌ها در فضای نرم‌افزار متلب، اطلاعات مورد نیاز از سازه‌ی آسیب دیده تولید می‌شود و در نهایت، با پیاده‌سازی روش‌های پیشنهادی و مقایسه‌ی نتایج به دست آمده با الگوهای مدل‌سازی شده، پیرامون کارایی و دقت روش‌های ارائه شده قضاوت می‌شود. لازم به توضیح است که در این مثال، از اطلاعات فقط یک مود (مود اول) استفاده شده است. همچنین، پارامترهای الگوریتم بهینه‌یابی به این صورت اتخاذ شده‌اند: تعداد جمعیت اولیه = ۲۰۰، تعداد جمعیت نخبه (کشورهای استعمارگر اولیه) = ۲۰ و تعداد تکرار = ۲۰۰۰.

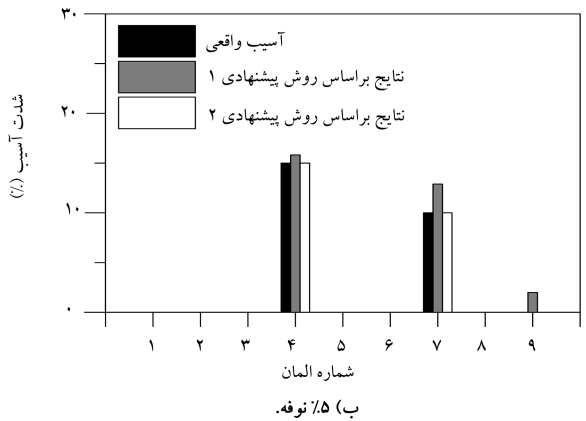
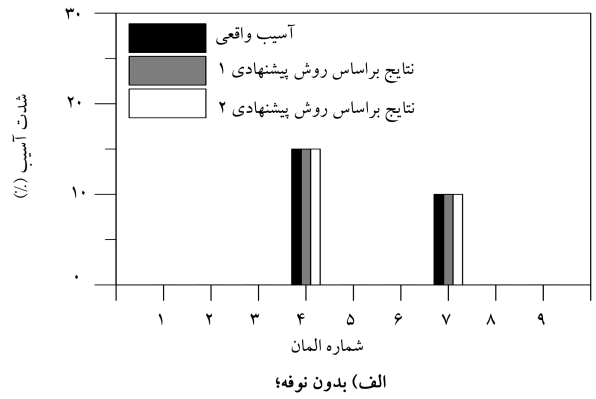
نتایج به دست آمده، برای حالتی که اطلاعات ثبت شده از سازه‌ی آسیب دیده، عاری از هرگونه نوفه باشند، در شکل‌های ۳ الف و ۴ الف، به ترتیب برای الگوهای آسیبی ۱ و ۲ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، روش‌های پیشنهادی قادرند تا محل و شدت آسیب را کاملاً دقیق شناسایی کنند. به منظور مدل‌سازی شرایط واقعی و اعمال عدم قطعیت‌های موجود در داده‌های ثبت شده توسط حسگرها، نوفه‌های تصادفی با شدت ۵٪ به بسامدهای طبیعی مربوط به سازه‌ی آسیب دیده افزوده و کارایی روش‌های ارائه شده بررسی شده است. نتایج به دست آمده در این

حالت، برای الگوهای آسیبی ۱ و ۲، به ترتیب در شکل های ۳ و ۴ ترسیم شده است.

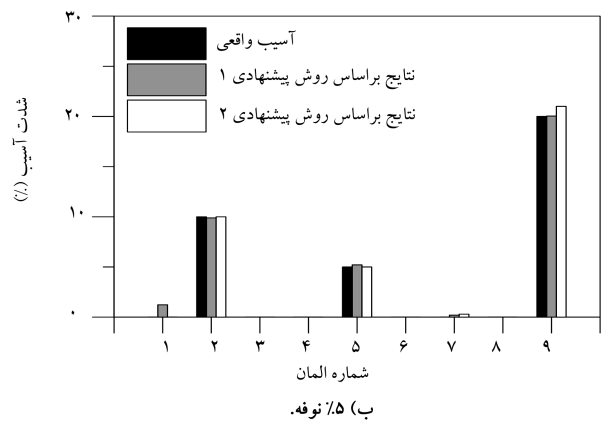
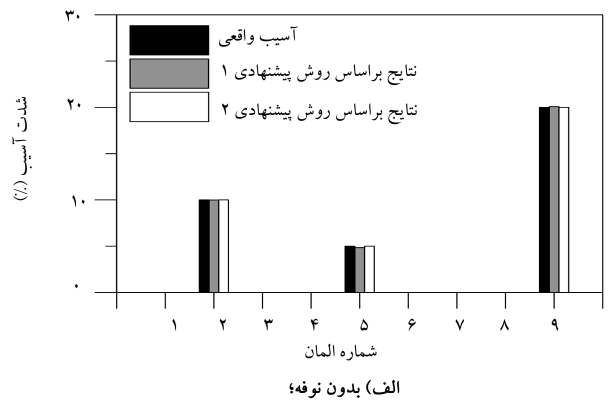
مشاهده می شود که در حالت نوفه دار، برخی از المان های سالم به اشتباه به عنوان المان آسیب دیده گزارش شده اند. البته، شدت آسیب در این دسته از المان ها بسیار کم است و لذا مشکلی در کارایی روش های پیشنهادی به وجود نمی آید. لازم به توضیح است که تأثیرات نامطلوب نوفه در روش پیشنهادی اول به مراتب بیشتر از روش پیشنهادی دوم است. دلیل این ادعا، دقت بالای نتایج به دست آمده از پیاده سازی روش پیشنهادی دوم در حالات نوفه دار است. در ادامه، به بررسی منحنی های همگرایی الگوریتم بهینه یابی پرداخته شده است. برای نمونه در شکل ۵، منحنی های همگرایی مربوط به الگوی آسیب اول، در حالات مختلف تحت بررسی ترسیم شده است؛ که در آن ها محور قائم، مقیاس لگاریتمی دارد. همان طور که ملاحظه می شود، در حالت بدون نوفه، تابع هدف اول به عددی بسیار نزدیک به صفر همگرا شده است. این در حالی است که تابع هدف دوم، بعد از تعدادی تکرار (حدوداً بعد از ۲۵۰ تکرار) به عدد صفر مطلق همگرا شده است. توجه شود که با عنایت بر راهبرد تطبیقی به کار برده شده در رابطه سازی توابع هدف، مقدار کمینه ی آن ها برابر با عدد صفر مطلق خواهد بود. لذا بدیهی است که هر چه مقدار توابع هدف به عدد صفر نزدیک تر شود، از دیدگاه مفاهیم ریاضی، متغیرهای مسئله با دقت بیشتری به نقطه ی کمینه ی مطلق توابع نزدیک خواهند شد. در مسئله ی طرح شده در این نوشتار، مفهوم فیزیکی نزدیک تر شدن هر چه بیشتر مقدار تابع هدف به صفر مطلق به صورت تشخیص



شکل ۵. منحنی های همگرایی گام های مختلف بهینه یابی برای الگوی آسیب ۱ مربوط به قاب ۳ طبقه.



شکل ۳. نتایج شناسایی آسیب مربوط به الگوی آسیب ۱، مربوط به قاب ۳ طبقه.

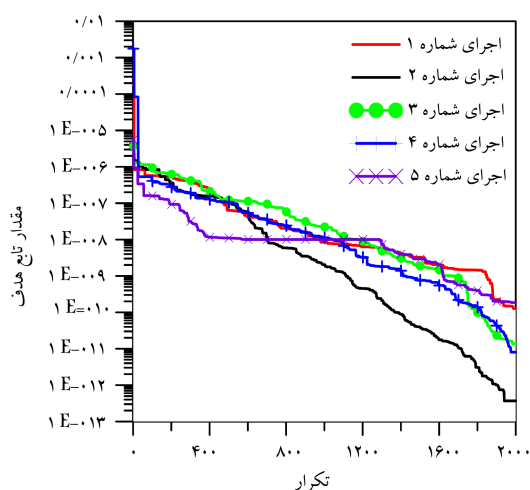


شکل ۴. نتایج شناسایی آسیب مربوط به الگوی آسیب ۲، مربوط به قاب ۳ طبقه.

است. همان طوری که ملاحظه می‌شود، بهینه‌یاب توانسته است در تمامی حالات، به نقطه‌ی بسیار نزدیکی به عدد صفر هم‌گرا شود و علی‌رغم شروع بهینه‌یاب با حدس‌های مختلفی از جواب‌های اولیه (که منجر به شروع این منحنی‌ها از اعداد متفاوتی شده است)، الگوریتم توانسته است نقطه‌ی کمیته‌ی مطلق را با دقت قابل قبولی تشخیص دهد. این موضوع به دلیل روند خاصی است که در این الگوریتم جهت جستجوی فضای پاسخ استفاده شده است. البته باید توجه داشت که در حالت وجود نوفه، روش پیشنهادی دوم هم به عدد صفر مطلق هم‌گرا نشده است، ولی دقت بهینه‌یابی با توجه به شدت آسیب‌های تخمین زده شده قابل قبول است، که حاکی از قدرت بالای روش ارائه شده در شناسایی آسیب در حالت وجود نوفه است.

۲.۴. خرابی دو بُعدی ۱۵ عضو

در دومین مطالعه‌ی عددی، یک خرابی ۱۵ عضو مورد بررسی قرار گرفته است. مدل اجزاء محدود این خرابی در شکل ۷ نشان داده شده است. چگالی و مدول کشسانی سازی مذکور برابر با مقادیر مشابه برای قاب مطالعه شده در بخش ۱.۴ است. جرم واحد طول و سطح مقطع به ترتیب برای المان‌های افقی و قائم برابر با



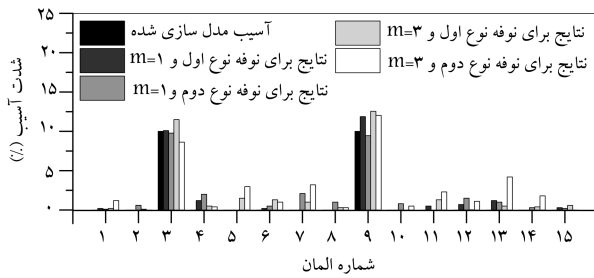
شکل ۶. منحنی‌های هم‌گرایی بهینه‌یاب رقابت استعماری برای ۵ اجرای مختلف روش پیشنهادی ۲ بر روی الگوی آسیب ۲ مربوط به قاب ۳ طبقه در حالت وجود ۵٪ نوفه.

دقیق‌تر مقادیر واقعی آسیب‌های ایجاد شده در سازه (با کمترین خطا در تخمین محل و شدت آسیب‌ها) قابل بیان است. این کاهش و نزدیکی به صفر مطلق با توجه به پیچیدگی فضای پاسخ و تعدد نقاط اکسترمم نسبی، مهم‌ترین عامل نمایان‌کننده‌ی هم‌گرایی به پاسخ بهینه‌ی مسئله است. لذا، با توجه به نکات مذکور ملاحظه می‌شود که تابع هدف دوم توانسته است دقیقاً به نقطه‌ی کمیته‌ی مطلق مورد انتظار هم‌گرا شود. این در حالی است که تابع هدف اول، به نزدیکی نقطه‌ی مذکور (البته با خطای بسیار کم) رسیده است. چنین شرایطی در حالات نوفه‌دار هم قابل ملاحظه است (شکل ۵ ب). بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که تابع هدف دوم در جستجوی دقیق دامنه‌ی جواب و یافتن نقطه‌ی کمیته‌ی مطلق به‌عنوان پاسخ بهینه‌ی پایدارتر است. به بیان دیگر، روش پیشنهادی دوم علی‌رغم حساسیت بالا به رخداد آسیب، حساسیت بسیار کمی به نوفه دارد. این قضیه، با توجه به ماهیت توابع هدف پیشنهادی قابل توجیه است. نظر به اینکه تابع هدف دوم بر مبنای سنجش هندسی بردارها استوار است، لذا، نوفه‌ی تصادفی، تأثیر زیادی در روند جستجوی الگوی بردارها نخواهد داشت.

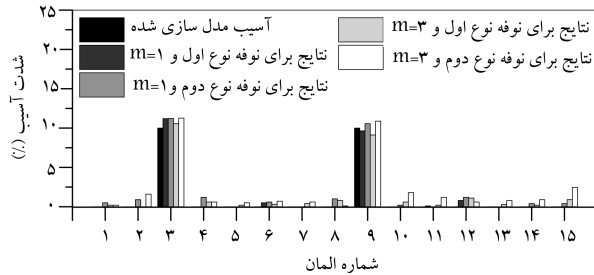
در ادامه‌ی این بخش، به منظور بررسی دقت و کارایی الگوریتم بهینه‌یابی استفاده شده، مقایسه‌ی بین الگوریتم بهینه‌یابی رقابت استعماری و الگوریتم بهینه‌یابی ژنتیک انجام شده است. برای این منظور، الگوی آسیب شماره ۲ مربوط به قاب ۳ طبقه، تحت شرایطی که ۵٪ نوفه‌ی تصادفی در بسامدهای طبیعی وجود دارد و از تابع هدف پیشنهادی دوم برای حل مسئله استفاده شود، مورد بررسی قرار گرفته است. هر کدام از الگوریتم‌های بهینه‌یابی، ۵ بار اجرا و نتایج به دست آمده، در جدول ۲ خلاصه شده است. لازم به توضیح است که بیشینه‌ی تعداد تکرار در بهینه‌یابی ژنتیک، ۱۰۰۰۰ تکرار در نظر گرفته شده است. در جدول مذکور، علاوه بر نتایج مربوط به هر یک از اجراهای پنج‌گانه (برای هر کدام از الگوریتم‌های بهینه‌یابی)، میانگین شدت آسیب‌های تخمین زده شده هم بیان شده است. از بررسی جدول ۲ ملاحظه می‌شود که الگوریتم رقابت استعماری، در تمام اجراها، به جواب تقریباً یکسانی از پاسخ بهینه‌ی مسئله دست یافته است. این در حالی است که الگوریتم ژنتیک، در برخی از اجراها، به دلیل گرفتاری در نقاط کمیته‌ی نسبی به جواب‌های نادرست منتهی شده است. به طوری که از بررسی میانگین نتایج به دست آمده از الگوریتم ژنتیک، المان سالم هفتم، المانی آسیب دیده با شدت آسیب ۵/۵٪ گزارش شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم رقابت استعماری در قیاس با الگوریتم ژنتیک، پایدارتر است و گرفتار نقاط کمیته‌ی نسبی موجود در دامنه نمی‌شود. منحنی هم‌گرایی اجراهای پنج‌گانه‌ی مربوط به بهینه‌یاب رقابت استعماری، در شکل ۶ ترسیم شده

جدول ۲. مقایسه‌ی الگوریتم‌های بهینه‌یابی رقابت استعماری و ژنتیک در تشخیص آسیب با روش پیشنهادی ۲ (شدت آسیب بر حسب درصد).

شماره‌ی المان	نتایج مربوط به الگوریتم رقابت استعماری					نتایج مربوط به الگوریتم ژنتیک				
	اجرای ۱	اجرای ۲	اجرای ۳	اجرای ۴	اجرای ۵	اجرای ۱	اجرای ۲	اجرای ۳	اجرای ۴	اجرای ۵
۱	۰	۰/۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۱۰/۱	۱۰/۲	۹/۹	۱۰	۹/۸	۱۰/۵	۱۲/۱	۱۰/۲	۰/۲	۹/۴
۳	۰	۰	۰	۰	۰	۱/۵	۰	۰	۰/۱	۰
۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۳	۲/۱
۵	۵/۲	۴/۸	۵/۱	۴/۹	۵/۳	۳/۴	۱/۱	۶/۳	۵/۵	۴/۱
۶	۰/۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱/۵	۰	۰
۷	۱/۲	۰/۳	۰/۷	۰/۵	۰/۱	۰	۸/۱	۰/۲	۱۹/۱	۰/۱
۸	۰	۰	۰	۰	۰/۲	۰	۰	۰	۰	۰/۲
۹	۱۹/۷	۲۰/۱	۱۹/۸	۲۰/۳	۲۰/۲	۱۷/۴	۱۹/۲	۱۹/۴	۱۸/۵	۱۷/۷

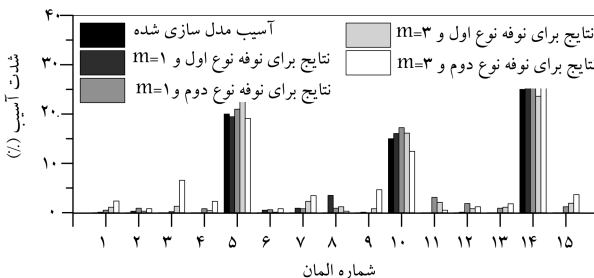


الف) روش پیشنهادی ۱

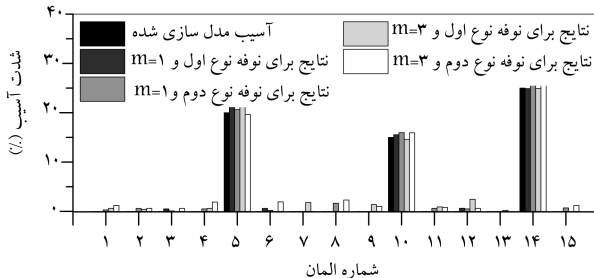


ب) روش پیشنهادی ۲

شکل ۸. نتایج شناسایی آسیب مربوط به الگوی آسیب ۱ در خرپای ۱۵ المانه.



الف) روش پیشنهادی ۱

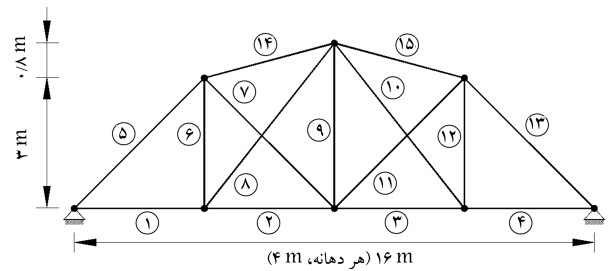


ب) روش پیشنهادی ۲

شکل ۹. نتایج شناسایی آسیب مربوط به الگوی آسیب ۲ در خرپای ۱۵ المانه.

تفاضل ماتریس نرمی تعمیم یافته در حالات سازه‌ی سالم و آسیب دیده، ارائه شده است. سپس، مساله با کمک روش کمینه‌ی مربعات حل شده و کارایی روش، با مطالعه‌ی سناریوهایی بر روی یک تیر ساده‌ی ۲۰ المانه، در حالتی که فقط از اطلاعات درجات آزادی قائم تیر در مود اول ارتعاش آزاد استفاده شده باشد، مورد ارزیابی قرار گرفته است. جزئیات بیشتر پیرامون روش مذکور و مثال‌های مطالعه شده را می‌توان در مرجع [۲۵] مطالعه کرد؛ لذا در این بخش، به منظور مقایسه‌ی آن‌ها، مثال مرجع مذکور تحت سناریوهای مدل‌سازی شده در آن مورد مطالعه قرار گرفته است. مدل اجزاء محدود تیر استفاده شده در مرجع [۲۵]، در شکل ۱۰ نشان داده شده است، که مشخصات آن به این شرح است: [۲۵]

مدول کشسانی و چگالی، به ترتیب برابر با 200 GPa و 7800 kg/m^3 ؛ سطح



شکل ۷. مدل اجزاء محدود خرپای ۱۵ المانه.

جدول ۳. الگوهای آسیبی مربوط به خرپای ۱۵ المانه.

الگوی آسیب ۲		الگوی آسیب ۱	
المان	آسیب (%)	المان	آسیب (%)
۲۰	۵	۱۰	۳
۱۵	۱۰	۱۰	۹
۲۵	۱۴		

$45/50 \text{ kg/m}$ و $78/50 \text{ kg/m}$ و 100 cm^2 ، برای المان‌های مورب کناری برابر با $45/50 \text{ kg/m}$ و 80 cm^2 ، و برای المان‌های مورب داخلی برابر با $62/80 \text{ kg/m}$ و 80 cm^2 است. دو الگوی آسیبی مانند آنچه که در جدول ۳ بیان شده است، در نظر گرفته شده است. در این مطالعه، به منظور بررسی تأثیرات تعداد مودهای در دسترس در قابلیت روش‌های پیشنهادی، دو حالت در نظر گرفته شده است:

۱. حالتی که در آن اطلاعات فقط یک مود اول در دسترس است،

۲. حالتی که اطلاعات سه مود اول سازه در دسترس هستند.

در مثال قبلی (بخش ۱.۰.۴)، به منظور بررسی تأثیرات شرایط واقعی فقط بسامدهای طبیعی، نوبه‌دار شده بودند. این در حالی است که در واقعیت هم بسامدهای طبیعی و هم شکل‌های مودی نوبه‌دار هستند. در این مثال دو نوع نوبه تعریف شده است: نوع اول: ۷٪ نوبه در بسامدهای طبیعی؛ نوع دوم: ۲٪ نوبه در بسامدهای طبیعی و ۲٪ نوبه در شکل‌های مودی.

لازم به توضیح است که پارامترهای بهینه‌یابی، مشابه با مثال قبل در نظر گرفته شده‌اند. در نتایج به دست آمده، که در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده‌اند، m نشان‌گر تعداد مودهای استفاده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، روش‌های پیشنهادی در مجموع قادرند تا محل و شدت آسیب‌های رخ داده را به خوبی تشخیص دهند. با وجود این مشاهده می‌شود که در هر دو روش مذکور، با افزایش تعداد مودهای استفاده شده، تأثیرات نوبه‌ها بیشتر شده و برخی از المان‌های سالم هم آسیب دیده معرفی شده‌اند. البته لازم به توضیح است که شدت آسیب‌های ذکر شده نسبتاً کم است و مشکلی در تشخیص المان‌های آسیب دیده به وجود نمی‌آید. همچنین، بررسی نتایج حاکی از آن است که حساسیت روش پیشنهادی دوم نسبت به نوبه‌های اتفاقی کمتر از روش پیشنهادی اول است. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی دوم، پایداری بیشتری در برابر شرایط واقعی از خود نشان می‌دهد. این قضیه، در هر دو نوع نوبه‌ی مدل‌سازی شده قابل مشاهده است.

۳.۴. تیر ساده‌ی ۲۰ عضوی

مثال حاضر، به مقایسه‌ی دقت روش‌های پیشنهادی در این نوشتار و روش پیشنهادی در تحقیقات انجام شده [۲۵] اختصاص دارد، که در آن ضمن معرفی ماتریس نرمی تعمیم یافته، رابطه‌ی تقریبی برای تخمین آسیب در سازه‌ها با کمک بسط تیلور و

این مهم، با توجه به راهبرد به‌کاررفته در توابع هدف پیشنهادی در نوشتار حاضر، قابل توجیه است. به‌علاوه، نتایج این مطالعه هم مؤید دقت بالای تابع هدف پیشنهادی دوم در قیاس با تابع هدف اول است.

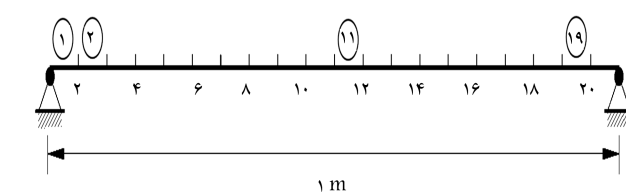
۵. نتیجه‌گیری

در این نوشتار، دو روش جدید جهت تشخیص آسیب در سازه‌ها با کمک اعضای روی قطر اصلی ماتریس نرمی تعمیر‌یافته ارائه شده است. این روش‌ها بر پایه‌ی تعریف مسئله به‌صورت مسئله‌ی بهینه‌یابی استوار هستند. در روش اول، تابع هدف براساس راهبرد انطباق نقطه‌ی ارائه شده است. این در حالی است که تابع هدف دوم، بر مبنای سنجش تطابق هندسی دو بردار رابطه‌سازی شده است. برای حل مسئله‌ی بهینه‌یابی، از الگوریتم تکاملی رقابت استعماری استفاده شده است. این الگوریتم، سرعت اجرایی بالایی دارد و به‌خاطر استفاده از روابط آماری و احتمالاتی، فضای پاسخ را با راهبرد یکنواختی مورد بررسی قرار داده است. به‌منظور بررسی کارایی روش‌های پیشنهادی، ۳ مثال عددی با الگوهای آسیب‌ی مختلف ارزیابی و چالش‌های مختلفی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده، به این شرح هستند:

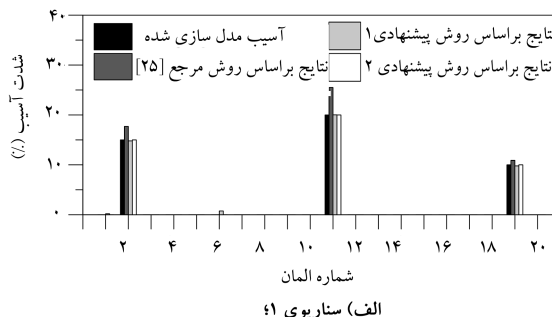
۱. هر دو تابع هدف پیشنهادی قادرند تا محل و شدت آسیب را با دقت بسیار بالایی تشخیص دهند.
۲. هر دو روش قادرند تا با کمک اطلاعات فقط مود اول، تخمین مناسبی از محل و شدت آسیب ارائه دهند.
۳. حساسیت کلی روش‌های پیشنهادی به نوفه‌های اتفاقی نسبتاً کم است. به‌طور کلی، با افزایش تعداد مودهای استفاده‌شده، تأثیرات نوفه‌ها تشدید می‌شود.
۴. به‌منظور مقایسه‌ی توابع هدف پیشنهادی ۱ و ۲، معیارهایی چون حساسیت تابع هدف به نوفه‌های اتفاقی و هم‌گرایی به صفر مطلق مورد بررسی قرار گرفته و ملاحظه شده است که تابع هدف پیشنهادی ۲، پایداری بیشتری دارد. می‌توان نتیجه گرفت که تابع هدف دوم، براساس بررسی میزان انطباق هندسی دو بردار استوار است و لذا، حضور نوفه‌های تصادفی، مشکلی در برقراری انطباق کلی به‌وجود نمی‌آورند.
۵. الگوریتم رقابت استعماری در قیاس با الگوریتم ژنتیک، پایدارتر است و گرفتار نقاط کمینه‌ی نسبی نمی‌شود. همچنین، روند آمار و احتمالاتی به‌کاررفته در این الگوریتم، نه فقط وابستگی الگوریتم را به پاسخ‌های حدس زده‌شده در شروع عملیات بهینه‌یابی متنی کرده است، بلکه باعث سرعت هم‌گرایی بالاتر آن نیز شده است.

پانویس‌ها

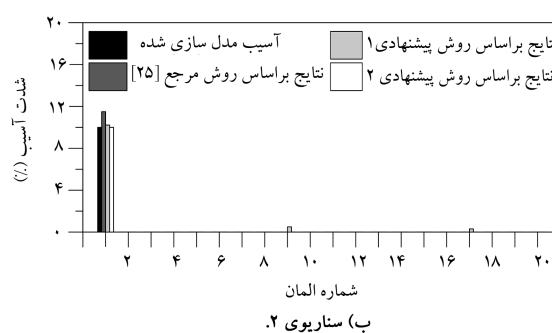
1. direct strategy
2. signal processing
3. inverse problem



شکل ۱۰. مدل اجزاء محدود تیر ساده‌ی ۲۰ عضوی.



الف) سناریوی ۱



ب) سناریوی ۲

شکل ۱۱. نتایج شناسایی آسیب مربوط به تیر ۲۰ المانه.

مقطع و ممان اینرسی، به‌ترتیب برابر با $10 \times 50 \text{ mm}$ و $4.717 \times 10^{-9} \text{ m}^4$. همچنین، دو سناریوی مطالعه‌شده به این شرح هستند: الف) ۱۵٪ آسیب در المان دوم، ۲۰٪ آسیب در المان یازدهم، و ۱۰٪ آسیب در المان نوزدهم؛ ب) ۱۰٪ آسیب در المان اول.

نتایج به‌دست‌آمده براساس روش‌های پیشنهادی در این نوشتار و روش مذکور در مرجع [۲۵] در شکل ۱۱ نشان داده شده است. یادآور می‌شود که در پیاده‌سازی روش‌های پیشنهادی، به‌منظور فراهم‌آوردن شرایط مقایسه‌ی مناسب، مطابق مرجع [۲۵]، از اطلاعات متناظر با درجات آزادی قائم فقط مود اول در حالت بدون نوفه استفاده شده است. همچنین، پارامترهای بهینه‌یابی، مانند مثال‌های قبلی است. ملاحظه می‌شود که روش‌های پیشنهادی در این نوشتار توانسته‌اند با دقت بیشتری نسبت به روش اشاره‌شده در مرجع [۲۵]، شدت آسیب‌های مدل‌سازی‌شده را تشخیص دهند؛ که

4. mathematical regularization
5. ill-condition
6. cost function
7. genetic algorithm (GA)
8. pattern search optimization algorithm (PSOA)

9. gravitational search optimization algorithm (GSOA)
10. grey coefficients
11. charged system search (CSS)
12. Noise
13. generalized flexibility matrix (GFMT)
14. imperialist competitive optimization algorithm (ICOA)
15. evolutionary optimization algorithm
16. modal assurance criterion (MAC)

منابع (References)

1. Fan, W. and Qiao, P. "Vibration-based damage identification methods: A review and comparative study", *Struct. Health Monit.*, **10**(1), pp. 83-111 (2011).
2. Chandrashekhar, M. and Ganguli, R. "Uncertainty handling in structural damage detection using fuzzy logic and probabilistic simulation", *Mech. Syst. Signal Process.*, **23**(2), pp. 384-404 (Feb. 2009).
3. Vinayak, H.K., Kumar, A., Agarwal, P. and Thakkar, S.K. "Neural network-based damage detection from transfer function changes", *J. Earth. Eng.*, **14**(5), pp. 771-787 (2010).
4. Benna, P. and Ganguli, R. "Structural damage detection using fuzzy cognitive maps and Hebbian learning", *Applied Soft Computing*, **11**(1), pp. 1014-1020 (2011).
5. Kim, H. and Melhem, H. "Damage detection of structures by wavelet analysis", *Eng. Struct.*, **26**(3), pp. 347-362 (2004).
6. Bagheri, A., Ghodrati Amiri, G., Khorasani, M. and Bakhshi, H. "Structural damage identification of plates based on modal data using 2D discrete wavelet transform", *Struct. Eng. Mech.*, **40**(1), pp. 13-28 (2011).
7. Xia, Y. and Hao, H. "Statistical damage identification of structures with frequency changes", *J. Sound Vib.*, **263**(4), pp. 853-870 (2003).
8. Yang, Q.-W. and Liu, J.-K. "Damage identification by the eigenparameter decomposition of structural flexibility change", *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, **78**(4), pp. 444-459 (2009).
9. Godarzi, Y., Torkzadeh, P. and Salajegheh, E. "The application of the flexibility matrix in structural damage localization via strain energy", *6th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering*, Iran, pp. 1-7 (in Persian) (16-28 May 2011).
10. Yan, W.-J., Ren, W.-X. and Huang, T.-L. "Statistic structural damage detection based on the closed-form of element modal strain energy sensitivity", *Mech. Syst. Signal Process.*, **28**, pp. 183-194 (2012).
11. Abbasnia, R. and Sadri, Gh. "Assessment and comparison of damage localization indices in three dimensional reinforced concrete frames", *Sharif J. Sci. Tech., Transaction on: Civil Engineering*, **28-2**(3), pp. 69-77 (in Persian) (2012).
12. Amini, F. and Shahidzadeh, M.S. "Damage detection using a new regularization method with variable parameter", *Arch. Appl. Mech.*, **80**(3), pp. 255-269 (2010).
13. Rucevskis, S., Sumbatyan, M.A., Akishin, P. and Chate, A. "Tikhonov's regularization approach in mode shape curvature analysis applied to damage detection", *Mech. Res. Commun.*, **65**, pp. 9-16 (April 2015).
14. Teughels, A. and DeRoeck, G. "Damage detection and parameter identification by finite element model updating", *Arch. Comput. Meth. Engng.*, **12**(2), pp. 123-164 (2005).
15. Perera, R., Fang, S.-E. and Huerta, C. "Structural crack detection without updated baseline model by single and multiobjective optimization", *Mech. Syst. Signal Process.*, **23**(3), pp. 752-768 (2009).
16. Sandesh, S. and Shankar, K. "Application of a hybrid of particle swarm and genetic algorithm for structural damage", *Inverse Probl. Sci. Eng.*, **18**(7), pp. 997-1021 (2010).
17. Ghodrati Amiri, G., Seyed Razzaghi, S.A. and Bagheri, A. "Damage detection in plates based on pattern search and genetic algorithms", *Smart Struct. Syst.*, **7**(2), pp. 117-132 (2011).
18. Guo, H.Y. and Li, Z.L. "Structural damage identification based on bayesian theory and improved immune genetic algorithm", *Expert Syst. Appl.*, **39**(7), pp. 6426-6436 (2012).
19. Sokhangou, F., Daei, M. and Hejazi, M. "Presenting a two-stage method for structural damage localization and quantification via structural dynamic properties and gravitational search optimization algorithm", *7th National Congress on Civil Engineering*, Iran, pp. 1-8, (in Persian) (7-8 May 2013).
20. Kaveh, A., Javadi, S.M. and Maniat, M. "Damage assessment via modal data with a mixed particle swarm strategy, ray optimizer, and harmony search", *Asian J. Civil Eng. (BHRC)*, **15**(1), pp. 95-106 (2014).
21. Zare Hosseinzadeh, A., Bagheri, A. and Ghodrati Amiri, G. "Two-stage method for damage localization and quantification in high-rise shear frames based on the first mode shape slope," *Int. J. Opt. Civil Eng.*, **3**(4), pp. 653-672 (2013).
22. Tabrizian, Z., Ghodrati Amiri, G. and Hossein Ali Beygi, M. "Charged system search algorithm utilized for structural damage detection", *Shock Vib.*, **2014**, 13 p. (2014).
23. Atashpaz-Gargari, E. and Lucas, C. "Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition", *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Singapore, pp. 4661-4667 (2007).
24. Kabbazi, A., Atashpaz-Gargari, E. and Lucas, C. "Imperialist competitive algorithm for minimum bit error rate

- beam forming”, *Int. J. Bio-Inspired Comp.*, **1**(1-2), pp. 125-33 (2009).
25. Li, J., Wu, B., Zeng, Q.C. and Lim, C.W. “A generalized flexibility matrix based approach for structural damage detection”, *J. Sound Vib.*, **329**(22), pp. 4583-4587 (2010).
26. Ge, M., Lui, E.M. and Khanse, A.C. “Non-proportional damage identification in steel frames”, *Eng. Struct.*, **32**(2), pp. 523-533 (2010).
27. Allemang, R.J. and Brown, D.L. “A correlation coefficient for modal vector analysis”, *1st International Modal Analysis Conference*, pp. 110-116 (1982).
28. Randall, J.A. “The modal assurance criterion – twenty years of use and abuse”, *J. Sound Vib.*, **37**(8), pp. 14-21 (August 2003).
29. West, W.M. “Illustration of the use of modal assurance criterion to detect structural changes in an orbiter test specimen”, *Proceedings of Air Force Conference on Aircraft Structural Integrity*, pp. 1-6 (1984).