

برآورد میزان آسیب در اتصالات صلب قاب‌های خمشی فولادی با استفاده از روش تجزیه‌ی متعامد سره و الگوریتم بهینه‌یابی ازدحام ذرات

Original Article

طه تیموری* (دانشجوی دکتری)

موسی محمودی صاحبی (دانشیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

یکی از مسائل مهم در شناسایی آسیب سازه‌ها، تعیین میزان آسیب در اتصالات آنهاست. سرعت و دقت در تعیین میزان آسیب، شدیداً به وجود نویز در اندازه‌گیری پاسخ‌های سازه بستگی دارد. در این تحقیق روشی پیشنهاد می‌شود که با استفاده از آن، دقت و سرعت تعیین میزان آسیب با وجود مقادیر نویز افزایش می‌یابد. در روش پیشنهادی به جای استفاده از چندین شکل مود طبیعی فقط یک شکل مود متعامد سره استفاده می‌شود و میزان آسیب در اتصالات صلب قاب‌های خمشی با دقت قابل قبولی محاسبه می‌شود. برای اثبات عملکرد این روش چندین مثال عددی و یک نمونه‌ی آزمایشگاهی بررسی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که این روش از دقت و سرعت قابل قبولی برای تخمین میزان آسیب در اتصالات صلب قاب‌های خمشی فولادی برخوردار است.

واژگان کلیدی: شناسایی آسیب، میزان آسیب، تجزیه‌ی متعامد سره، الگوریتم بهینه‌یابی ازدحام ذرات، اتصالات صلب قاب‌های خمشی فولادی.

t.teimoori@sru.ac.ir
m.mahmoudi@sru.ac.ir

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر پژوهش‌های با ارزشی در زمینه‌ی پایش سلامت سازه‌ها^۱ صورت گرفته است. یکی از مراحل مهم پایش سلامت سازه، شناسایی آسیب^۲ در سازه است. شناسایی آسیب در سازه‌ها به معنای تشخیص وجود آسیب، موقعیت‌یابی و همچنین تعیین میزان آسیب وارد شده به سازه است. روش‌های مختلفی برای شناسایی آسیب در سازه‌ها ارائه شده است. این روش‌ها به‌طور کلی به دو دسته‌ی مخرب^۳ و غیرمخرب^۴ تقسیم می‌شوند. روش‌های غیرمخرب، بدون نیاز به نمونه برداری، امکان پایش سلامت پیوسته‌ی سازه را فراهم می‌کنند. با توجه به پیشرفت‌های اخیر علوم رایانه و حسگرها، این روش‌ها بسیار ساده‌تر و ارزان‌تر شده‌اند. روش‌های غیرمخرب را می‌توان به سه دسته‌ی استاتیکی، مودال و سیگنالی تقسیم‌بندی کرد.^۱

به‌طور خلاصه روش‌های استاتیکی بر اساس کرنش‌ها و جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده از سازه تحت بارهای استاتیکی‌اند. این روش‌ها با استفاده از به‌روزرسانی مدل اجزای محدود تغییرات خیز، سختی و ظرفیت باربری را به دست می‌آورند. مثال‌هایی از این روش‌ها توسط بار و همکاران^۲ و کاردینال^۳ ارائه شده است. در روش‌های مودال از تغییرات پارامترهای مودال اندازه‌گیری شده استفاده می‌شود. بسامد، شکل مود و میرایی از جمله‌ی این پارامترها هستند. مشتقات این پارامترها نیز به عنوان نشانه‌ی تغییرات مشخصات فیزیکی - دینامیکی در سازه (سختی، جرم و میرایی) *

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۶/۱۵، اصلاحیه ۱۳۹۹/۱۰/۱۳، پذیرش ۱۳۹۹/۱۰/۲۷

DOI:10.24200/J30.2021.56426.2827

Archive of SID

سره^۹ در روش مدل به‌روزشوندهی اجزای محدود برای تخمین میزان آسیب در اتصالات صلب قاب خمشی فولادی است. در این تحقیق، تابع هدف، اختلاف شکل مود POM سازه در نظر گرفته می‌شود. در روش پیشنهادی شکل مود اول POM سازه آسیب‌دیده با شکل مود اول POM سازه‌ی مرجع (مدل تحلیل) مقایسه می‌شود. همچنین، استفاده از روش بهینه‌شدهی پردازش تصویر^{[۲۶] و [۲۷]} برای ثبت جابه‌جایی‌های سازه تحت ارتعاش در مدل آزمایشگاهی برای کاهش اثرات نویز مورد استفاده قرار گرفته است.

الکایم و همکاران^[۲۸] با استفاده از روش ترکیبی اجزای محدود و روش‌های تکاملی، با استفاده از تابع هدف مبتنی بر انرژی کرنشی مودال و باقی‌مانده‌های شکل مود، در یک سازه‌ی سه‌بعدی اقدام به شناسایی آسیب کرده‌اند. ایشان در مقاله‌ی دیگر^[۲۹] با استفاده از تابع هدف مبتنی بر انرژی کرنشی مودال و انحنای شکل مود، شناسایی آسیب در یک سازه‌ی سه‌بعدی نامنظم را مطالعه کرده‌اند.

۲. روش پژوهش

با در دست داشتن محل دقیق اتصال آسیب‌دیده از یکی از روش‌های متداول همچون روش ارائه شده توسط تیموری و محمودی^[۲۵]، می‌توان در ادامه به برآورد میزان آسیب به هر یک از اتصالات آسیب‌دیده پرداخت. روش پیشنهادی در این مقاله بر مشخصات دینامیکی سازه استوار است. تعیین شدت آسیب در هر یک از اتصالات به صورت یک مسئله‌ی بهینه‌یابی غیرخطی مقید مدل می‌شود. در این مسئله ضرایب کاهش مدول الاستیسیته به عنوان پارامترهای به‌روزشونده در نظر گرفته می‌شوند. تابع هدف بر اساس انطباق نقطه‌ی بردارهای شکل مود POM در دو حالت مرجع و آسیب‌دیده پیاده‌سازی می‌شود. تابع هدف به صورت رابطه‌ی ۱ ارائه شده است.

$$E\{d_1, d_2, \dots, d_N\} = \left\| \varphi_{POM}^d - \varphi_{POM}^a \right\| \quad (1)$$

در این رابطه، $\| \cdot \|$ نشان‌دهنده‌ی نرم اقلیدسی^{۱۱} است و φ_{POM}^d و φ_{POM}^a به ترتیب شکل مود POM اول سازه‌ی آسیب‌دیده و سازه‌ی مرجع هستند. ضرایب d_1 تا d_N ضرایب مجهول میزان آسیب در اجزای ۱ تا N می‌باشند. در مدل عددی، میزان آسیب به صورت کاهش مدول الاستیسیته مدل‌سازی می‌شود و در ادامه شرح داده می‌شود.

در این تابع هدف برای حالت مرجع به جای استفاده از مشخصات دینامیکی سازه‌ی سالم از مشخصات دینامیکی مدل تحلیلی اجزای محدود سازه استفاده می‌شود. این امر سبب کاهش اندازه‌گیری‌های میدانی می‌شود که به تبع آن خطاها بسیار کاهش می‌یابند.

میزان آسیب در هر جزء عددی بین صفر و یک خواهد بود و مسئله‌ی بهینه‌یابی میزان آسیب به صورت رابطه‌ی ۲ تعریف می‌شود.

$$\text{find } d \text{ that minimize } E \quad (2)$$

d ماتریس مجهولات است که میزان آسیب در هر یک از اتصالات آسیب‌دیده را نشان خواهد داد. تابع هدف با حرف E نمایش داده شده است. مسئله‌ی بهینه‌یابی حاضر بدین صورت بیان می‌شود که ماتریس d ای که اختلاف شکل مود POM اول سازه‌ی آسیب‌دیده و مرجع را کمینه می‌کند، جواب مسئله خواهد بود.

و همکاران^[۱۶] تغییرات بسامد طبیعی را به عنوان پارامتر حساس برای شناسایی آسیب در تیرها در نظر گرفتند. چا و بوبوکوزتوک^[۱۷] با استفاده از یک الگوریتم ژنتیک و انرژی کرنشی مودال، محل و شدت آسیب در سازه‌های فولادی را مطالعه کرده‌اند. سیدپور و منتظر^[۱۸] با استفاده از تابع هدف بر پایه‌ی شکل مود طبیعی و الگوریتم بهینه‌یابی تکاملی تفاضل به شناسایی آسیب‌های چندگانه در مدل خرابی پرداخته‌اند. ایشان از شاخص احتمال آسیب بر پایه‌ی نرمی بهره برده‌اند. الکیم و همکاران^[۱۹] در مقاله‌ی خود روش‌های مبتنی بر مدل به‌روزشوندهی اجزای محدود را به دو دسته‌ی مستقیم و غیرمستقیم (سعی و خطایی) تقسیم کرده‌اند. ایشان در مقاله‌ی خود علاوه بر دسته‌بندی زیرشاخه‌های مربوط به روش به‌روزشوندهی اجزای محدود و ارائه‌ی خلاصه‌ی از محاسن و معایب هر یک از روش‌ها با استفاده از یک روش الگوریتم تکاملی اقدام به شناسایی آسیب در قاب مهاربندی شده چهارطبقه نموده‌اند. روش‌های مبتنی بر بهینه‌یابی در یک مدل اجزای محدود به‌روزشونده برای مدل‌های غیرخطی و پیچیده مناسب‌اند.^[۱۹] الگوریتم‌های بهینه‌یابی متعددی برای شناسایی آسیب با استفاده از مدل اجزای محدود به‌روزشونده استفاده شده‌اند. روش ساده شده‌ی نیلدر - مید برای شناسایی آسیب در یک تیر دوسر مفصل متقارن استفاده شده است.^[۲۰] روش کمینه‌کننده‌های محلی^۶ برای شناسایی آسیب در یک تیر بتنی استفاده شده است.^[۲۱] پارک و همکاران^[۲۲] در مقاله خود با استفاده از نسبت مشارکت مودی برای مدل عددی یک قاب چهار طبقه با چهار درجه آزادی تحت تحریک محیطی اقدام به شناسایی آسیب نموده‌اند. پارک و همکاران^[۲۳] در مقاله‌ی دیگر با استفاده از سیستم اندازه‌گیری بصری و روش به‌روزشوندهی اجزای محدود پارامترهای مودال یک مدل آزمایشگاهی را محاسبه کرده‌اند.

یکی از مشکلات مهم در روش مدل به‌روزشوندهی اجزای محدود اثرات نویز در مثال‌های واقعی و آزمایشگاهی است. برای غلبه بر این مشکل روش‌هایی توسط دانشمندان ارائه شده است. استفاده از ترکیب چند شکل مود و روش‌های بهینه‌یابی نوین از جمله‌ی این روش‌هاست. در اغلب این روش‌ها برای تخمین میزان آسیب از ترکیب کمینه سه شکل مود اول سازه استفاده می‌شود.

گالواتر و ویولاریس^[۲۴] در مقاله‌ی خود با استفاده از شبیه‌سازی عددی روش جدیدی بر پایه‌ی POD^۷، برای تعیین موقعیت آسیب در سازه‌ها ارائه کرده‌اند. آنها در مقاله‌ی خود با استفاده از نمودار اختلاف شکل مود MOP^۸ سازه در دو حالت سالم و آسیب‌دیده موفق به شناسایی محل تقریبی آسیب در مدل‌های عددی شبیه‌سازی شده پرداختند. آنها دو مدل عددی از تیر کنسول و تیر دوسر مفصل به طول تقریبی ۱۸ سانتی‌متری را با استفاده از روش اجزای محدود مدل‌سازی کردند. نشانه‌ی آسیب، اختلاف شکل مود POM در دو حالت سالم و آسیب‌دیده بود و اثرات نویز با استفاده از تابع awgn در برنامه‌ی متلب در نظر گرفته شد. آنها در سناریوهای مختلف برای این دو مدل موفق به موقعیت‌یابی تقریبی محل آسیب‌ها شده‌اند. در این تحقیق فقط شناسایی محل آسیب بررسی شد و تعیین میزان آسیب ارزیابی نشد.

تیموری و محمودی^[۲۵] با استفاده از روش اختلاف انحنای شکل مود بهبود یافته، محل دقیق اتصال آسیب‌دیده در قاب‌های خمشی فولادی را تعیین کردند. آنها با استفاده از تلفیق روش انحنای شکل مود و روش POD توانستند محل دقیق اتصالات آسیب‌دیده در قاب خمشی هفت‌طبقه‌ی سه‌دهانه را گزارش کنند. در این تحقیق نیز فقط شناسایی محل آسیب مورد بررسی قرار گرفت و تعیین میزان آسیب مد نظر قرار نگرفت.

هدف این پژوهش استفاده از شکل مود حاصل از تجزیه‌ی متعامد (POD)

۱.۲. روش تجزیه‌ی متعامد سره (POD)

روش POD که اغلب با نام روش تجزیه‌ی Karhunen-Loeve شناخته می‌شود، ابزار آزمایشی قدرتمندی در زمینه‌ی دینامیک و ارتعاش است.^[۳۰] این روش، پایه‌ی برای تجزیه و تحلیل مودی از یک مجموعه از توابع، مانند داده‌های به دست آمده در طول آزمایش فراهم می‌کند. نکته‌ی قابل توجه این روش بهینه بودن آن است، بدین معنی که، این روش کارآمدترین روش برای ثبت مؤلفه‌های غالب یک فرایند ابعادی بی نهایت^{۱۲} با استفاده از تعداد زیادی مود محدود یا در اغلب موارد تعداد اندکی مود محدود است.^[۳۰] شکل مودهای متعامد سره (POMs) ^{۱۳} دارای بیشترین جذب انرژی برای هر شکل مود شناخته شده نسبت به دیگر روش‌های متعامد با مبنای کامل است و برای سیستم‌های غیرخطی و پیچیده به راحتی قابل اجراء است. علاوه بر این، توزیع انرژی بین POM ها، که توسط POV ^{۱۴} های مرتبط با آن شکل مودها تعریف می‌شود، می‌تواند به شناسایی مهم‌ترین مودها کمک کند.^[۳۰-۳۲]

این روش می‌تواند برای مقداردهی به سیستم‌های فضایی وابسته در مسائل پیچیده و نامعلوم^[۳۰-۳۲] و ارتعاش سازه‌ها با تعداد زیاد حسگرها^[۳۳] استفاده شود. روش POD ارتباط زیادی با روش تجزیه‌ی مقادیر تکین^[۳۴] و روش تحلیل مؤلفه‌ی اصلی^[۳۵] دارد؛ این دو روش تاکنون برای شناسایی آسیب استفاده شده‌اند. در این مقاله روش POD با شبکه‌ی مترامک از حسگرها (نشانگرهای روش پردازش تصویر) استفاده شده است. بدین صورت که مقادیر جابه‌جایی توسط نشانگرها در طول ارتعاش آزاد سازه اندازه‌گیری و شکل مود POM سازه ترسیم می‌شود.

کاربرد روش POD برای یک سازه نیازمند تحصیل جابه‌جایی‌ها در N موضع از سیستم ارتعاشی است. مقادیر جابه‌جایی ثبت شده در زمان t به صورت $d_1(t), d_2(t), \dots, d_N(t)$ نام‌گذاری می‌شوند. جابه‌جایی‌ها برای تعداد M گام زمانی نمونه‌برداری می‌شوند و آرایه‌های تاریخچه‌ی جابه‌جایی برای گره‌های $i=1, 2, \dots, N$ به صورت $d_i = (d_i(t_1), d_i(t_2), \dots, d_i(t_M))^T$ متشکل می‌شوند. در انجام POD، این تاریخچه‌ی جابه‌جایی با کم کردن مقدار متوسط \bar{d}_i نرمال می‌شود. بدین صورت بردار a_i مطابق رابطه‌ی زیر شکل می‌یابد.

$$a_i = d_i - \bar{d}_i \quad (۳)$$

در این رابطه، i برداری با ابعاد M است که تمام درایه‌های آن برابر واحد هستند. بردار a_i به صورت ماتریس $M \times N$ زیر شکل داده می‌شود:

$$A = [a_1, a_2, \dots, a_N] \quad (۴)$$

هر ردیف در A موقعیت‌های مختلف نقاط ضبط شده در سازه را در یک لحظه‌ی خاص از زمان نشان می‌دهد، به همین دلیل غالباً عکس فوری خوانده می‌شود. ماتریس هم‌بستگی به صورت زیر تشکیل می‌شود:

$$R = \left(\frac{1}{M} \right) A^T A \quad (۵)$$

R ، برداری حقیقی و متقارن است، در نتیجه بردارهای ویژه‌ی آن تشکیل یک مبنای متعامد می‌دهد. بردارهای ویژه‌ی R همان POM ها و مقادیر ویژه‌ی آن، POV های سیستم ارتعاشی است.^[۲۴]

۲.۲. الگوریتم بهینه‌یابی ازدحام ذرات

ازدحام ذرات^{۱۷} یک الگوریتم بهینه‌یابی مبتنی بر جمعیت است. از این نظر شبیه به الگوریتم ژنتیک است. مجموعه‌ی ذرات در یک منطقه در مراحل حرکت

می‌کنند. در هر مرحله، الگوریتم عملکرد ذره را در تابع هدف ارزیابی می‌کند. پس از این ارزیابی، الگوریتم در مورد سرعت جدید هر ذره تصمیم می‌گیرد. ذرات حرکت می‌کنند، سپس الگوریتم دوباره ارزیابی می‌شود.^[۳۶]

این الگوریتم از حرکت دسته‌جمعی پرندگان که به دنبال غذا می‌گردند، الهام گرفته شده است. هر ذره تا حدی به بهترین مکانی که تاکنون پیدا کرده است و به بهترین مکانی که هر یک از اعضای این ازدحام پیدا کرده‌اند، جذب می‌شود. پس از چند مرحله، جمعیت می‌تواند در اطراف یک مکان با هم منسجم شود، یا می‌تواند در اطراف چند مکان تجمع کند یا می‌تواند به حرکت خود ادامه دهد. هر ذره یک مقدار شایستگی دارد که توسط یک تابع شایستگی محاسبه می‌شود. هر چه ذره در فضای جستجو، به هدف (غذا در مدل حرکت پرندگان) نزدیک‌تر باشد، شایستگی بیشتری دارد. همچنین هر ذره دارای یک سرعت است که هدایت حرکت ذره را بر عهده دارد. هر ذره با دنبال کردن ذرات بهینه در حالت فعلی، به حرکت خود در فضای مسئله ادامه می‌دهد.

در الگوریتم PSO، موقعیت و سرعت ذرات به صورت تصادفی به وجود می‌آیند و با به‌روز کردن نسل‌ها راه‌حل بهینه یافته می‌شود. در هر گام، هر ذره با استفاده از دو بهترین مقدار به‌روز می‌شود. اولین مقدار، بهترین موقعیتی است که تاکنون ذره موفق به رسیدن به آن شده است. موقعیت مذکور شناخته و نگهداری می‌شود که این بهترین مقدار نوستالژی آن ذره نیز نامیده می‌شود و آن را با $pbest$ نمایش می‌دهند. بهترین مقدار دیگری که توسط الگوریتم مورد استفاده قرار می‌گیرد، بهترین موقعیتی است که تاکنون توسط جمعیت ذرات به دست آمده است و آن را $gbest$ می‌نامند (هوش جمعی). پس از یافتن بهترین مقادیر، سرعت و مکان هر ذره به ترتیب از رابطه‌های ۶ و ۷ محاسبه می‌شوند.

$$v(t+1) = v(t) + c_1 \times rand(t) \times$$

$$(pbest(t) - position(t)) + c_2 \times rand(t) \times$$

$$(gbest(t) - position(t)) \quad (۶)$$

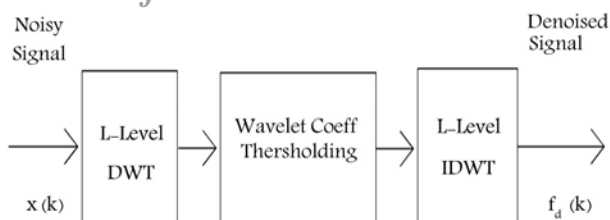
$$position(t+1) = position(t) + v(t+1) \quad (۷)$$

در این رابطه‌ها، v ، سرعت و ضرایب شتاب c_1 و c_2 ، دو عدد ثابت مثبت موسوم به ضرایب یادگیری‌اند و به ترتیب ضریب یادگیری شناختی و ضریب یادگیری اجتماعی نام دارند. ادامه‌ی عملیات بهینه‌یابی مطابق روندنمای شکل ۱ ادامه می‌یابد تا همگرایی حاصل شود و مقدار یا مقادیر بهینه گزارش شوند.

۳.۲. پردازش تصویر

برای ثبت جابه‌جایی‌های سازه در مدل آزمایشگاهی از فیلم‌برداری و سپس پردازش تصویر با استفاده از روش میانگین‌گیری، با همکاری حواریان و محمودی^[۲۷] استفاده شده است. با پیشرفت‌های روز افزون این فناوری و با توجه به هزینه‌های کمتر نسبت به نصب انواع حسگرها استفاده از این روش می‌تواند به کاهش هزینه‌های پایش سلامت سازه‌ها منجر شود. در این روش با استفاده از روش تصویربرداری نزدیک^[۲۶] تغییرات سریع در ویژگی‌های تصویر سنجیده می‌شود. برای بهبود دقت اندازه‌گیری و کاهش میزان نویز، از میانگین‌گیری چند نقطه در هر نشانگر^{۱۸} استفاده می‌شود. تصاویر از فیلم استخراج می‌شود و هر تصویر به مقیاس خاکستری تبدیل می‌شود. برای ثبت جابه‌جایی‌های سازه، ردیابی پیکسل‌های هر یک از نشانگرهای نصب شده در روی سازه، برای تصاویر پی‌درپی مورد استفاده قرار می‌گیرند. نویزهای موجود در تاریخچه‌ی جابه‌جایی‌های هر یک از پیکسل‌ها، با استفاده از تبدیل موجک به کمینه

Archive of SID



شکل ۲. طرح کلی کاهش نویز با استفاده از تبدیل موجک.

در این رابطه a پارامتر مقیاس، b پارامتر زمان، $\Psi(t)$ تابع موجک، $\Psi^*(\bullet)$ مزدوج موهومی $\Psi(\bullet)$ می‌باشند. در تبدیل فوریه گسسته (DWT)، پارامتر مقیاس و زمان مطابق روابط زیر گسسته می‌شوند. [۳۸]

$$a = a_0^m, \quad b = n a_0^m b_0 \quad (9)$$

در این روابط m و n اعداد صحیح هستند. در نتیجه تابع موجک پیوسته $\Psi_{a,b}(t)$ در رابطه‌ی ۸ به تابع موجک گسسته‌ی زیر تبدیل می‌شود.

$$\psi_{m,n}(t) = a_0^{-\frac{m}{2}} \psi(a_0^{-m} t - n b_0) \quad (10)$$

گسسته‌سازی پارامترهای مقیاس و زمان منجر به تعریف تبدیل موجک گسسته به صورت زیر می‌شود.

$$W_x(m, n, \psi) = a_0^{-\frac{m}{2}} \int x(t) \psi^*(a_0^{-m} t - n b_0) dt \quad (11)$$

طرح کلی کاهش نویز با استفاده از موجک به صورت شکل ۲ است. تاکنون روش‌های متنوعی برای به دست آوردن آستانه λ ارائه شده است، از جمله معیار Minimax، معیار Sqrtwolog، معیار Rigrsure، معیار Heursure. و رما این روش‌های محاسبه‌ی آستانه را به صورت زیر جمع‌بندی کرده است. [۳۸] در معیار Sqrtwolog مقادیر آستانه (λ) مطابق رابطه‌ی ۱۲ با استفاده از روش آستانه‌ی مرجع (square root log) محاسبه می‌شوند. [۳۸]

$$\lambda_j = \sigma_j \sqrt{2 \log(N_j)} \quad (12)$$

در این رابطه N_j طول سیگنال حاوی نویز در j^{th} مقیاس و σ_j میان‌قدرمطلق انحراف 21 در j^{th} مقیاس مطابق رابطه‌ی ۱۳ است.

$$\sigma_j = \frac{MAD_j}{0.6745} = \frac{\text{median}(|\omega|)}{0.6745} \quad (13)$$

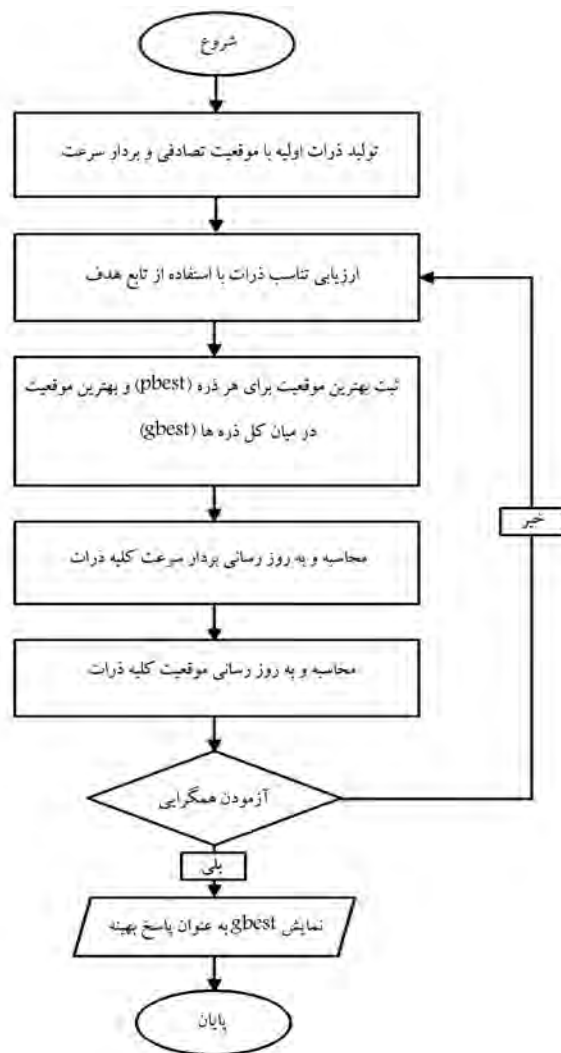
که ω ضرایب موجک در مقیاس j است.

معیار Rigrsure یک ارزیابی کننده‌ی آستانه‌ی نرم است. فرض کنید برداری شامل مربع ضرایب موجک از کوچک به بزرگ باشد. مقدار کمیته $r_b(b^{th} r)$ را از بردار ریسک مطابق رابطه‌ی ۱۴ برای مقدار ریسک استفاده کنید. [۳۸]

$$R = \{r_i\}_{i=1,2,\dots,N} = \frac{[N - 2i + (N - i)\omega_i + \sum_{k=1}^i \omega_k]}{N} \quad (14)$$

آستانه‌ی انتخاب شده، $\lambda = \sigma \sqrt{\omega_b}$ است که ω_b در آن برابر با امین مربع ضریب موجک (ضریب در ریسک کمیته) است که از بردار W انتخاب شده است و σ انحراف معیار سیگنال حاوی نویز است.

در روش Heursure آستانه توسط ترکیبی از دو روش Sqrtwolog و Rigrsure انتخاب می‌شود. اگر آستانه‌ی به دست آمده از روش Sqrtwolog برابر λ_1 و آستانه‌ی



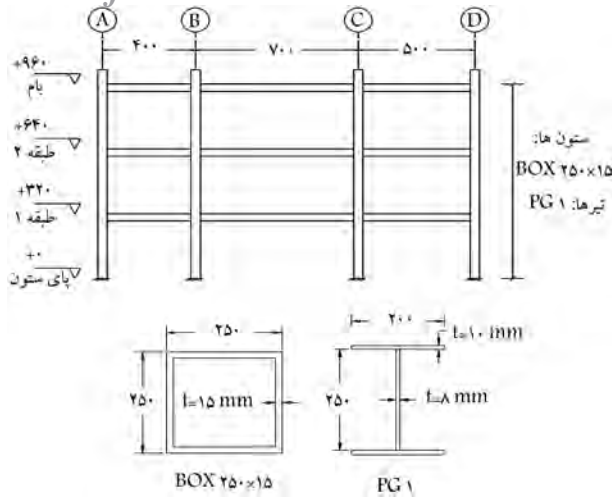
شکل ۱. روندنمای روش بهینه‌یابی ازدحام ذرات.

رسانده می‌شود و سپس میانگین جابه‌جایی‌های پیکسل‌های هر یک از نشانگرها به عنوان جابه‌جایی آن نشانگر ثبت می‌شود. برای از بین بردن نویزهای تاریخی جابه‌جایی‌ها، از موجک Coiflets در سطح ۵ استفاده شده است. همچنین روش Heursure برای محاسبه‌ی آستانه، در رویه‌ی حذف نویزها استفاده شده است.

۴.۲. تبدیل موجک

تبدیل موجک ابزاری برای تجزیه‌ی سیگنال‌های پیوسته به مؤلفه‌های بسامدی آنهاست که وضوح (رزولوشن) هر مؤلفه برابر با مقیاس آن است، سپس هر مؤلفه را با وضوح مطابق با مقیاس آن مطالعه می‌کند. تبدیل موجک، تجزیه‌ی یک تابع بر مبنای توابع موجک است. موجک‌ها نمونه‌های انتقال‌یافته و مقیاس شده‌ی یک تابع (موجک مادر) با طول متناهی و نوسانی شدیداً میرا هستند. گراسمن و همکارش رابطه‌ی ۱ را برای تبدیل موجک پیوسته ارائه دادند و تبدیل معکوس این تبدیل را کشف کردند. [۳۷]

$$W_x(a, b, \psi) = a^{-1/2} \int x(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (8)$$



شکل ۳. مشخصات قاب خمشی فولادی مورد مطالعه.

الاستیسیته (E) در جزء انتهایی تیر کوتاه ($E^{damaged} = (1 - n)E^{intact}$) و کاهش سختی انتهای این جزء، که به ستون متصل است، انجام شده است. کاهش سختی انتهایی نیز توسط ضریب اصلاح‌کننده مدول الاستیسیته در رابطه ی سختی $k_{PARTIAL} = \frac{(1-n)}{n} \frac{rEI}{L}$ ، برای محاسبه ی سختی خمشی $E^{damaged}$ مدول الاستیسیته ی جزء آسیب دیده، انجام شده است. در این رابطه E^{intact} مدول الاستیسیته ی جزء سالم و n میزان کاهش مدول الاستیسیته است. بدین منظور از دستورگرداری نسبی^{۲۳} در نرم افزار SAP ۲۰۰۰ استفاده شده است. این کاهش سختی توسط کاهش مدول الاستیسیته به عنوان پارامتر به روزشونده انجام شده است.

۱.۳. مدل عددی

برای بررسی کارایی رویه ی ارائه شده برای تخمین میزان آسیب در اتصالات صلب قاب های خمشی، قاب خمشی دوبعدی سه طبقه با مشخصات مندرج در شکل ۳، مورد مطالعه قرار گرفته است. این قاب به عنوان بخشی از یک سازه ی سه طبقه با در نظر گرفتن الزامات آیین نامه ی ASCE 7-10 با استفاده از آیین نامه ی 10-36 AISC طراحی شده است. فولاد مصرفی از نوع St-37 با حد جاری شده ۲۴۰ مگاپاسکل و حد نهایی ۳۷۰ مگاپاسکل است. بار مرده ی سقف ها ۶۰۰ و زنده ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع در نظر گرفته شده است. قاب مورد مطالعه دارای سه دهانه با ابعاد ۴۰۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ سانتی متر است. ارتفاع طبقات ۳۲۰ سانتی متر است.

هر دو سازه ی سالم و آسیب دیده توسط یک نرم افزار اجزای محدود مدل سازی شده اند. در این مثال تمام تیرها و ستون ها به ۱۰ جزء مساوی تقسیم شده اند. این ده قسمت می توانند معرف حسگرهای تغییر مکان برای تعیین تغییر شکل های سازه باشند. برای ارتفاع و دهانه های متعارف این تعداد جزء دقت کافی برای شناسایی آسیب در سازه را ارائه داده است. آسیب دیدگی در اتصالات توسط کاهش مدول الاستیسیته در جزء انتهایی تیر و در محل اتصال به ستون، انجام شده است.

از بین سناریوهای متعدد مطالعه شده، دو سناریو برای نشان دادن توانایی رویه ی ارائه شده برای تعیین میزان آسیب ارائه می شود. تمام سناریوها در سه سطح نویزی SNR^{۲۴} برابر ۳۰، ۴۰ و ۵۰ مطالعه شده اند. نویز توسط تابع awgn^{۲۵} در نرم افزار

به دست آمده از روش Rigrsure برابر λ_2 باشد، آنگاه Heursure آستانه را مطابق رابطه ی ۱۵ ارائه می دهد.^[۲۷]

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_1 & A > B \\ \min(\lambda_1, \lambda_2) & A \leq B \end{cases} \quad (15)$$

در این رابطه $A = \frac{s-N}{N}$ و $B = (\log_2 N)^{\sqrt{N}}$ و N طول بردار ضرایب موجک و s برابر مجموع مربعات ضرایب موجک مطابق رابطه ی $s = \sum_{i=1}^N \omega_i^2$ است.

تخمین صحیح و مناسب آستانه نقش مهمی در از بین بردن نویزها دارد. چنانچه آستانه بیش از حد کوچک در نظر گرفته شود، نویزها در سیگنال باقی می ماند و اگر آستانه بیش از حد بزرگ در نظر گرفته شود ممکن است جزئیات مهمی از سیگنال حذف شود. از میان انواع مختلف موجک ها شامل Haar, Daubechies, Coiflets, Symlet, Biorthogonal و ... برای از بین بردن نویزهای تاریخیچه ی جابه جایی ها، از موجک Coiflets در سطح ۵ استفاده شده است. همچنین روش Heursure برای محاسبه ی آستانه در رویه ی حذف نویزها استفاده شده است.

۵.۲. مراحل تخمین میزان آسیب

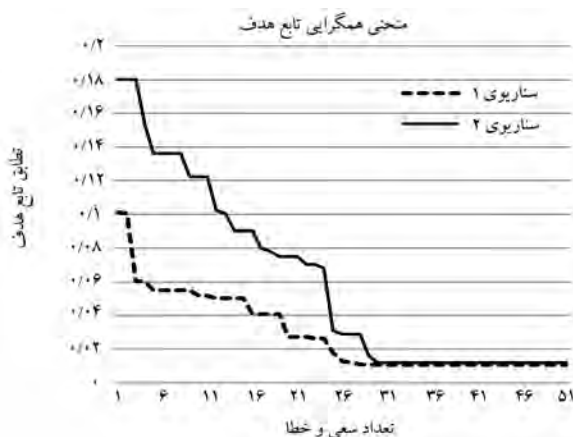
به صورت خلاصه مراحل تخمین میزان آسیب در اتصالات سازه های فولادی را می توان به شرح زیر بیان کرد:

- ۱- به دست آوردن محل دقیق اتصال آسیب دیده با استفاده از روش بهینه شده ی انحنای شکل مود POM.^[۲۵]
- ۲- به دست آوردن تاریخیچه ی جابه جایی های سازه ی آسیب دیده (مدل تحلیلی یا مدل آزمایشگاهی) تحت ارتعاش آزاد.
- ۳- استفاده از الگوریتم بهینه یابی برای کمینه سازی نرم اقلیدسی تفاوت شکل مود POM سازه ی آسیب دیده و مدل اجزای محدود (تابع هدف) با در دست داشتن محل دقیق اتصالات آسیب دیده.

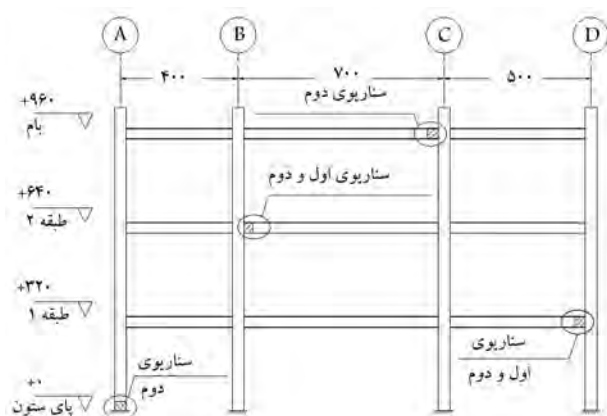
۳. مطالعات موردی

برای اجزایی کردن روش پیشنهادی در این تحقیق از دو مدل عددی و آزمایشگاهی استفاده شده است. مدل عددی یک قاب سه طبقه ی دوبعدی سه دهانه و مدل آزمایشگاهی یک قاب سه طبقه ی یک دهانه است. سناریوهای مختلف آسیب برای ارزیابی دقت روش پیشنهادی بررسی شده اند. در این مقاله برای مدل سازی عددی سازه ها از روش اجزای محدود استفاده شده است. بدین منظور از ترکیب نرم افزار SAP ۲۰۰۰^[۲۹] و محیط برنامه نویسی نرم افزار Matlab، استفاده شده است. بدین منظور از قابلیت رابط برنامه نویسی نرم افزاری (API) در نرم افزار SAP ۲۰۰۰ استفاده می شود. این قابلیت ابزاری قدرتمند است که به کاربران امکان می دهد بسیاری از فرایندهای مورد نیاز برای ساخت، تجزیه و تحلیل و طراحی مدل ها را به صورت خودکار انجام دهند.^[۲۹] برای مدل سازی تیرها و ستون ها از جزء تیر استفاده شده است و هر یک از تیرها و ستون ها به ۱۰ جزء کوچک تر تقسیم شده اند. برای مدل سازی اتصالات نیمه صلب در این نرم افزار از روش بین و همکارانش^[۳۰] استفاده شده است. بین و همکارانش^[۳۰] در مقاله ی خود از جزء تیر کوتاه برای مدل سازی اتصالات نیمه صلب استفاده کرده اند. آسیب دیدگی در اتصالات توسط کاهش مدول

شماره سناریو	موقعیت اتصال آسیب‌دیده	درصد آسیب (کاهش E)	درصد آسیب محاسبه شده (تابع هدف POD)			روش شکل مود طبیعی
			Snr = 5°	Snr = 4°	Snr = 3°	
۱	طبقه ۱ محور D	۲۰٪	۳/۴٪	۳/۵٪	۵/۱٪	درصد آسیب ۱۷/۶۵۸٪
	طبقه ۲ محور B	۳۰٪	۵۶٪	۶۶٪	-۶۴٪	درصد آسیب ۸/۹٪
۲	طبقه ۱ محور D	۲۰٪	۴/۵٪	۴/۸٪	۵/۳٪	درصد آسیب ۱۶/۵۴۷٪
	طبقه ۲ محور B	۳۰٪	۳/۲۳٪	۳/۲٪	۴/۴٪	درصد آسیب ۲۶/۶۹۵٪
	پای ستون محور A	۱۵٪	۲/۵۶٪	۲۸٪	۳/۱٪	درصد آسیب ۱۶/۵۴۲٪
	بام محور C	۲۵٪	۱/۸٪	۱/۷٪	۲/۷٪	درصد آسیب ۲۲/۸۲۲٪



شکل ۵. منحنی همگرایی بهینه‌یابی در مدل عددی.



شکل ۴. اتصالات آسیب‌دیده در دو سناریوی عددی.

طبیعی اول سازه استفاده شده است. برای ترکیب آثار مودها از وزن‌دهی با استفاده از نسبت بسامد سازه‌ی سالم به بسامد سازه‌ی آسیب‌دیده برای هر شکل مود استفاده شده است.

مطابق جدول ۱ روش متداول تعداد سعی و خطای بیشتر و دقت کمتری در محاسبه میزان آسیب دارد.

۲.۳. مدل آزمایشگاهی

حواران و محمودی روش تصویربرداری نزدیک برای کالیبره کردن دوربین‌های تجاری را برای پردازش تصاویر ارائه کرده‌اند. ایشان همچنین روش تصویری دوبعدی را برای ثبت جابه‌جایی‌های سازه تحت ارتعاش استفاده کرده‌اند.^[۲۶، ۲۷] ایشان در مقاله‌ی خود یک قاب سه‌طبقه مطابق شکل ۶ را که از ورق فولادی تشکیل شده است، مطالعه کرده‌اند. تیرها و ستون‌های آن از ورق به طول $L = 500$ میلی‌متر، عرض $100 = b$ میلی‌متر و ضخامت $t = 8$ میلی‌متر است. به منظور ایجاد بسامد طبیعی نزدیک‌تر به بسامد طبیعی سازه‌ی واقعی، چهار وزنه‌ی اضافی با ابعاد $50 \times 50 \times 100$ میلی‌متر و وزن $2/5$ کیلوگرم در هر طبقه برای افزایش جرم مؤثر نمونه استفاده شده است. علاوه‌بر نشانگرهای نصب شده روی مدل از سه شتاب‌سنج برای صحت‌سنجی داده‌های به دست آمده از پردازش استفاده می‌شود (شکل ۶).

متلب ایجاد و به تاریخچه‌ی جابه‌جایی‌های سازه اضافه شده است. سناریوی اول فقط شامل دو اتصال آسیب‌دیده در طبقات اول و دوم است. در سناریوی دوم علاوه بر این دو اتصال، یک اتصال آسیب‌دیده در بام و یک اتصال پای ستون نیز در نظر گرفته شده است.

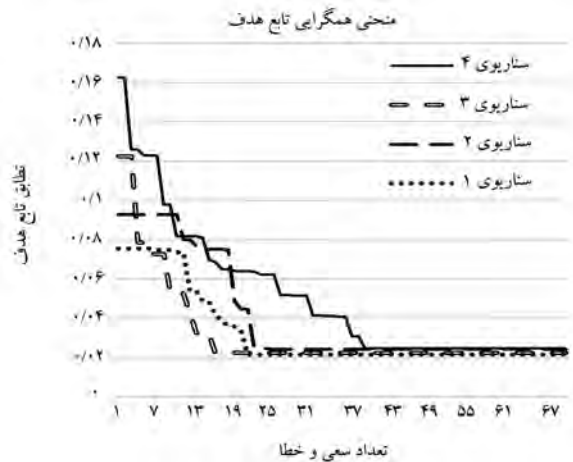
دو سناریوی عددی مطابق شکل ۴ به ترتیب شامل دو و چهار اتصال آسیب‌دیده هستند. میزان آسیب در هر یک از اتصالات مقادیر بین ۱۵ تا ۳۰ درصد انتخاب شده است. در این بخش نتایج این سناریوها برای میزان نویز $snr=30$ ارائه می‌شود. منحنی‌های همگرایی برای دو سناریوی عددی در شکل ۵ ترسیم شده است. این منحنی نشان می‌دهد که سناریوی اول بعد از حدود ۲۵ سعی و خطا و سناریوی دوم بعد از حدود ۳۰ سعی و خطا به همگرایی رسیده است.

در جدول ۱ میزان آسیب در هر اتصال و میزان تخمین زده شده‌ی آسیب توسط روش بیان شده در این مقاله، ارائه شده است. میزان خطا در میزان نویز $snr=30$ در حدود ۵ درصد است که رقم قابل قبولی است.

برای بررسی میزان تأثیر استفاده از شکل مود POM و همچنین کاهش نویز داده‌ها در سرعت همگرایی و همچنین دقت تابع هدف، سناریوی دوم سناریو یکبار با استفاده از تابع هدفی متشکل از تفاوت شکل مود طبیعی سازه، مورد مطالعه قرار گرفته است. منحنی‌های همگرایی برای این سناریوی عددی که با تابع هدف تفاوت شکل مود طبیعی و بدون کاهش نویز به دست آمده است، نشان‌دهنده‌ی همگرایی در ۴۹ سعی و خطا می‌باشد. بدین منظور مطابق روش‌های متداول از سه شکل مود



شکل ۸. نمونه‌یی از اتصال آسیب دیده در مدل آزمایشگاهی.



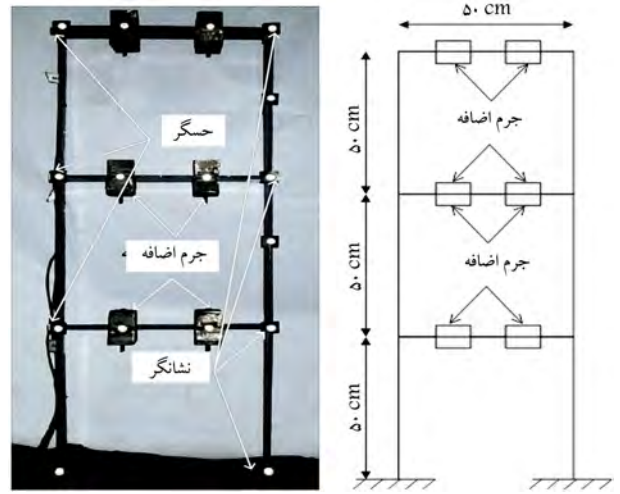
شکل ۹. منحنی همگرایی بهینه‌یابی در مدل سازی آزمایشگاهی.

سازه‌ی مرجع (مدل عددی) تحت ارتعاش آزاد توسط نرم‌افزار اجزای محدود محاسبه می‌شود.

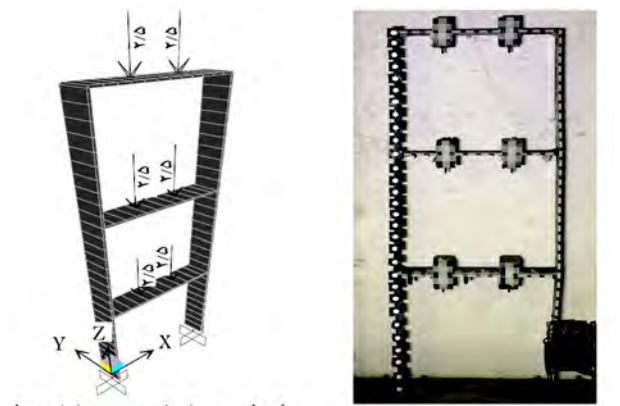
در ادامه چهار سناریوی آسیب به اتصالات، مورد مطالعه می‌گیرند. در این سناریوها یک، دو، یا سه اتصال مورد آسیب قرار گرفته‌اند. در هر یک از سناریوها در طرفین اتصال تیر به ستون برش به طول کمینه ۱۵ میلی‌متر ایجاد شده است تا در مجموع از طول ۱۰۰ میلی‌متری اتصال تیر به ستون، بیشینه ۳۰ میلی‌متر بریده شود. برش‌های دقیق برای ایجاد آسیب در اتصالات انجام شده است تا کمینه خطا در تعیین دقت این روش در برآورد میزان آسیب ایجاد شود.

سختی خمشی جزء تیر $(k_{\theta} = EI/L)$ و سختی دورانی اتصال مستقیم تیر به ستون $(k_{\theta} = \alpha EI/L)$ رابطه‌ی مستقیم با ممان اینرسی $(I = bh^3/12)$ مقطع اتصال، فقط عرض تیر (b) کاهش می‌یابد. به صورت خلاصه $k_{\theta} \propto b$. در این رابطه‌ها E مدول الاستیسیته، L طول جزء، h ارتفاع مقطع تیر و α ضریب ثابتی است که سختی خمشی تیر را به سختی دورانی اتصال مرتبط می‌سازد.

مدل آزمایشگاهی در چهار سناریو مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این چهار سناریو تعداد یک، دو، یا سه اتصال از اتصالات صلب مدل آزمایشگاهی آسیب دیده‌اند. آسیب در اتصالات مدل آزمایشگاهی به ترتیب از سناریوی اول تا چهارم



شکل ۶. قاب سه طبقه‌ی آزمایشگاهی به همراه نشانگرها و حسگرهای شتاب.



شکل ۷. مدل آزمایشگاهی و مدل اجزاء محدود بر اساس مدل آزمایشگاهی مورد مطالعه؛ (الف) مدل آزمایشگاهی مورد مطالعه؛ (ب) مدل عددی اجزای محدود بر اساس مدل آزمایشگاهی مورد مطالعه.

شکل ۷. مدل آزمایشگاهی و مدل اجزاء محدود نمونه آزمایشگاهی.

برای ترسیم شکل مود POM از تاریخچه‌ی جابه‌جایی‌های سازه تحت ارتعاش آزاد میرا با جابه‌جایی اولیه‌ی ۵ سانتی‌متری در بام استفاده شده است. بدین منظور به تراز بام به اندازه‌ی ۵ سانتی‌متر تغییر شکل اولیه اعمال شده است و پس از رها سازی، با استفاده از روش بهینه‌ی پردازش تصویر، تاریخچه‌ی جابه‌جایی‌های سازه در طول مدت ارتعاش ثبت شده است.

در این پژوهش این مدل آزمایشگاهی همراه با تعداد ۱۰ نشانگر برای هر ستون و ۱۲ نشانگر برای هر تیر مطالعه شده است (شکل ۷ - الف). مدل عددی اجزای محدود این نمونه‌ی آزمایشگاهی در شکل ۷ - ب نشان داده شده است. این مدل عددی هم برای صحت‌سنجی مدل آزمایشگاهی و هم به عنوان حالت مرجع برای تخمین میزان آسیب در اتصالات استفاده می‌شود. آسیب‌دیدگی در اتصالات توسط بریدن قسمتی از اتصال تیر به ستون، در نمونه‌ی آزمایشگاهی اعمال شده است. نمونه‌ی از ایجاد آسیب به اتصال تیر به ستون در شکل ۸ نشان داده شده است. در نتیجه پارامتر به‌روزشونده در مدل عددی، عرض تسمه تیر در نظر گرفته شده است. آسیب‌ها در اتصالات از ۵ میلی‌متر آغاز و با گام‌های ۵ میلی‌متری و به صورت متقارن در طرفین اتصال افزایش می‌یابند. تاریخچه‌ی جابه‌جایی‌های سازه‌ی آسیب‌دیده (مدل آزمایشگاهی) تحت ارتعاش آزاد با استفاده از پردازش تصاویر، با همکاری حواریان و محمودی^[۲۶] ثبت شده‌اند. تاریخچه‌ی جابه‌جایی‌های

شماره سناریو	موقعیت اتصال آسیب‌دیده	میزان برش (کاهش b) (mm)	درصد آسیب	درصد آسیب محاسبه شده (کاهش b)	درصد خطا
۱	تراز دوم سمت راست	۱۵	٪۱۵	٪۱۴/۳۵۵	٪۴/۳
۲	تراز دوم سمت راست	۱۵	٪۱۵	٪۱۳/۸۷۴	٪۷/۵
۳	تراز اول سمت چپ	۱۵	٪۱۵	٪۱۴/۳۷۲	٪۴/۲
	تراز دوم سمت راست	۳۰	٪۳۰	٪۲۹/۵۵۲	٪۱/۵
	تراز اول سمت چپ	۱۵	٪۱۵	٪۱۳/۷۶۶	٪۸/۲
	تراز دوم سمت راست	۳۰	٪۳۰	٪۲۹/۷۳۴	٪۰/۹
۴	تراز اول سمت چپ	۱۵	٪۱۵	٪۱۳/۶۷۹	٪۸/۸
	تراز سوم سمت راست	۱۵	٪۱۵	٪۱۳/۸۶۵	٪۷/۶

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله یک رویه‌ی قابل اطمینان برای تخمین میزان آسیب در اتصالات صلب قالب‌های خمشی ارائه شده است. این رویه مبتنی بر مدل به‌روزشونده‌ی اجزای محدود با به‌کارگیری مستقیم شکل مود POM است. تابع هدف بر اساس انطباق نقطه‌ی بردارهای شکل مود POM در دو حالت مرجع و آسیب‌دیده پیاده‌سازی شده است. الگوریتم ازدحام ذرات برای بهینه‌یابی تابع هدف استفاده شده است. این روش بر روی مدل عددی قاب فولادی سه‌طبقه‌ی سه‌دهانه با ابعاد واقعی و مدل آزمایشگاهی از قاب سه‌طبقه با یک دهانه مطالعه و راستی‌آزمایی شد. تابع هدف ارائه شده برخلاف روش‌های متداول، فقط از شکل مود POM اول سازه برای تخمین میزان آسیب استفاده می‌کند. نتایج نمونه‌ی عددی در مقیاس قاب خمشی را در میزان نویز $\text{snr}=3^\circ$ ، برای آسیب‌های بزرگتر از ۱۵ درصد، با خطای کمتر از ۶ درصد گزارش کند. همچنین در مدل آزمایشگاهی این روش میزان آسیب در اتصالات صلب نمونه آزمایشگاهی را با کمتر از ۹ درصد خطا تخمین می‌زند. نتایج مطالعات عددی و آزمایشگاهی نشان‌دهنده‌ی مقاومت بالای روش ارائه شده به نویز، سرعت بالای همگرایی تابع هدف و دقت قابل قبول این روش در تخمین میزان آسیب‌های وارده در اتصالات صلب قالب‌های خمشی است.

توسط برش جوش اتصال‌دهنده‌ی تیر به ستون انجام شده است. آسیب‌ها طوری انتخاب شده‌اند که در هر سناریو نسبت به سناریوی قبل تعداد یا میزان آسیب‌ها افزایش یابند. در این مقاله فرض بر این است که محل اتصال‌های آسیب‌دیده از قبل مشخص است. مثلاً برای تعیین محل دقیق اتصال‌های آسیب‌دیده می‌توان از روش بهینه‌ی شده‌ی انحنای شکل مود^[۲۵] POM استفاده کرد. سازه‌ی سالم تحت ارتعاش آزاد با تغییر مکان اولیه‌ی ۵ سانتی‌متری در بام با استفاده از روش بهینه‌ی پردازش تصویر^[۲۶] مورد مطالعه قرار گرفته است. تاریخچه‌ی جابه‌جایی‌های مدل اجزای محدود با تاریخچه‌ی جابه‌جایی‌های سازه‌ی سالم آزمایشگاهی همگام‌سازی شده است. منحنی‌های همگرایی برای این چهار سناریو در شکل ۹ ترسیم شده‌اند. مطابق شکل ۹، بهینه‌یابی در این چهار سناریو در کمتر از ۵۰ سعی و خطا همگرا شده است که نشان‌دهنده‌ی سرعت همگرایی بالای این روش است. به دلیل وجود نویز این همگرایی هیچ‌گاه به سمت صفر مطلق نخواهد بود.

محل و میزان آسیب‌های اعمال شده به مدل آزمایشگاهی، در جدول ۲ ارائه شده است. مطابق میزان خطای روش ارائه شده برای تخمین میزان آسیب در اتصالات صلب قالب‌های خمشی زیر ۹ درصد است. این میزان خطا ناشی از وجود نویز، خطاهای اندازه‌گیری و شرایط آزمایشگاهی است. این میزان خطا با توجه به تقریب وارد شده در آزمایش بر اثر میزان برش ایجاد شده در اتصال آسیب‌دیده قابل قبول است.

پانویس‌ها

1. structural health monitoring
2. damage detection
3. destructive damage detection
4. non-destructive damage detection
5. finite-element model updating
6. coupled local minimizers
7. proper orthogonal decomposition (POD)
8. proper orthogonal mode shape
9. proper orthogonal decomposition (POD)

10. image processing
11. Euclidean norm
12. infinite-dimensional process
13. proper orthogonal modes
14. proper orthogonal values
15. singular value decomposition
16. principal component analysis
17. particle swarm
18. marker
19. complex conjugate
20. threshold
21. median absolute deviation (MAD)

22. application programming interface
23. partial fixity
24. signal to noise ratio
25. add white gaussian noise

(References) منابع

1. Long, Qiao, Asad, Esmaily. "An overview of signal-based damage detection methods". *Applied Mechanics and Materials*, **94-96**, pp. 834-851 (2011).
2. Barr, P.J., Woodward, B, Najera, B. and et l. "Long-term structural health monitoring of the san ysidro bridge", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, *ASCE*, **20**(1) , pp. 14 (2006).
3. Cardinale, G. and Orlando, M. "Structural evaluation and strengthening of a reinforced concrete bridge", *Journal of Bridge Engineering*, *ASCE*, **9**(1), pp. 35 (2004).
4. Kosmatka, J.B. and Ricles, J.M. "Damage detection in structures by modal vibration characterization", *Journal of Structural Engineering*, **125**(12), pp. 1384 (1999).
5. Ren, W.X. and Roeck, G.D. "Structural damage iidentification using modal data. I: simulation verification", *Journal of Structural Engineering*, **128**(1), pp. 87 (2002).
6. Shi, Z.Y., Law, S.S. and Zhang, L.M. "Structural damage detection from modal strain energy change", *Journal of Engineering Mechanics*, *ASCE*, **126**(12), pp. 1216 (2000).
7. Kim, J.T., Ryu, Y.S., Cho, H.M. and et al. "Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method", *Engineering Structures*, **25**, pp. 57 (2003).
8. Staszewski, W.J. "Identification of non-linear system using multi-scale ridges and skeletons of the wavelet transform", *Journal of Sound and Vibration*, **214**(4), pp. 639 (1998).
9. Kijewski, T. and Kareem, A. "Wavelet transforms for system identification in civil Eengineering", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **18**, pp. 339 (2003).
10. Yang, J.N., Lei, Y., Lin, S. and et al. "Hilbert-huang based approach for structural damage detection", *Journal of Engineering Mechanics*, **130**(1), pp. 85 (2004).
11. Huang, C.S., Huang, S.L., Lin, C.I. and et al. "A wavelet-based approach to identifying structural modal parameters from seismic response and free vibration data", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **20**, pp. 408 (2005).
12. Hou, Z., Hera, A. and Shinde, A. "Wavelet-based structural health monitoring of earthquake excited structures", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **21**, pp. 268 (2006).
13. Chen, H.G., Yan, Y.J. and Jiang, J.S. "Vibration-based damage detection of composite wingbox structures using improved hilbert-huang transform", *Key Engineering Materials*, **324-325**, pp. 539 (2006).
14. Yan, B. and Miyamoto, A. "A comparative study of modal parameter identification based on wavelet and hilbert-huang transform", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **21**, pp. 9 (2006).
15. Bijaya, Jaishi. and Wei-Xin, Ren. "Structural finite element model updating using ambient vibration test results". *Journal of structural engineering*, *ASCE*, APRIL, 617 (2005).
16. Saada Mohamed, M., Arafa Mustafa, H. and Nassef Ashraf, O. "Finite element model updating approach to damage identification in beams using particle swarm optimization", *Engineering optimization*, **45**(6), pp. 677-696 (2013).
17. Cha, Young-Jin. and Buyukozturk, Oral. "Structural damage detection using modal strain energy and hybrid multiobjective optimization", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **30**(5), pp. 347-358 (2015).
18. Seyedpoor, S.M. and Montazer, M. "A damage identification method for truss structures using a flexibility-based damage probability index and differential evolution algorithm", *Inverse Problems in Science and Engineering*, **24**(8), pp. 1303-1322 (2016).
19. Nizar, F.A., Maosen, Cao., Yufeng, Z. and et al. "Structural damage detection using finite element model updating with evolutionary algorithms: a survey", *Neural Computing and Applications*, **30**, pp. 389-411 (2018).
20. Marwala, T. "Finite element model updating using computational intelligence techniques", *Springer, London* (2010).
21. Teughels, A., Roeck, G. and Suykens, J. "Global optimization by coupled local minimizers and its application to FE model updating". *Comput Struct*, **81**(24-25), pp. 2337-2351 (2003).
22. Hyo, S.P., Yeessock, K. and Byung, K.O. "A model updating method with strain measurement from impact test for the safety of steel frame structures". *Measurement*, **102**, pp. 220-229 (2017).
23. Byung, K.O., Doyoung, K. and Hyo, S.P. "Modal response-based visual system identification and model updating methods for building structures". *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **32**, pp. 34-56 (2017).
24. Ugo, G. and George, V. "Numerical investigation of a new damage detection method based on proper orthogonal decomposition". *Mechanical Systems and Signal Processing* **21**, pp. 1346-1361 (2007).
25. Teimoori, T. and Mahmoudi, M. "Damage detection in connections of steel moment resisting frames using proper orthogonal decomposition and wavelet transform". *Measurement* **166**(C), 108188 (2020).
26. Havarani, A. and Mahmoudi, M. "Extracting structural dynamic properties utilizing close photogrammetry method". *Measurement*, **150**, 107092 (2020).
27. Havarani, A. and Mahmoudi, M. "Utilizing an average method to extract the dynamic properties of structures with image processing". *Modares Civil Engineering Journal (M.C.E.J)*, **19**(5), (June 2019).
28. Nizar Faisal, A. and Cao, M. "Damage identification in three-dimensional structures using single-objective evolutionary algorithms and finite element model updating: evaluation and comparison", *Engineering Optimization*, **50**(10), pp.1695-1714 (2018).

29. Nizar Faisal, A., Cao, M. and Ragulskis, M. "Damage localization in irregular shape structures using intelligent FE model updating approach with a new hybrid objective function and social swarm algorithm", *International Journal of Applied Soft Computing*, **83**, 105604, (ctober 2019).
30. Holmes, P., Lumley, J.L. and Bekooz, G. "Turbulence, coherent structures, dynamical systems and symmetry", *Cambridge University Press*, Cambridge (1996).
31. Lumley, J.L. "Stochastic Tools in Turbulence, Academic Press", New York (1970).
32. Sirovich, L. "Turbulence and dynamics of coherent structures". *Part 1: Coherent structures*, *Quarterly of Applied Mathematics*, **45**(3), pp. 561-571 (1987).
33. Cusumano, J.P., Sharkady, M.T. and Kimble, B.W. "Experimental measurements of dimensionality and spatial coherence in the dynamics of a flexible beam", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, **347**, pp. 421-438 (1994).
34. Ruotolo, R. and Surace, C. "Using SVD to detect damage in structures with different operational conditions", *Journal of Sound and Vibration* **226**, pp. 425-439 (1999).
35. Soon, H., Czarnecki, J.A. and Farrar, C.R. "Structural health monitoring using statistical process control", *Journal of Structural Engineering*, **126**(11), pp. 1356-1363 (2000).
36. James, K. and Russell, E. "Particle swarm optimization", *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks* (1995).
37. Grossmann, A., Kronaland-Matinet, R. and Morlet, J. "Reading and understanding continuous wavelet transforms", *Wavelets. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg*, pp. 2-20 (1990).
38. Neema Verma, A. K. VERMA. "Performance analysis of wavelet thresholding methods in denoising of audio signals of some Indian musical instruments", *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, **4**(05), pp.2047-2052 (May 2012).
39. SAP2000. "Integrated finite element analysis and design of structures". *Berkeley (CA, USA): Computers and Structures, Inc* (1997).
40. Tao, Yin., Qing-Hui, Jiang. and Ka-Veng, Yuen. "Vibration-based damage detection for structural connections using incomplete modal data by bayesian approach and model reduction technique", *Engineering Structures*, **132**, pp. 260-277 (2017).