

تشخیص خرابی در سازه‌ها، با استفاده از مشخصه‌های دینامیکی به وسیله الگوریتم اجتماع ذرات خود پیکربند

جعفر آئینی^۱، محمد صابری^{۲*}، سعید جواهرزاده^۳

۱- دانشجوی کارشناس ارشد مهندسی زلزله - دانشگاه آزاد اسلامی واحد شبستر، Aeinijafar@gmail.com

۲- استادیار گروه عمران (سازه - زلزله) - دانشگاه آزاد اسلامی واحد شبستر، saberi11@yahoo.com

۳- استادیار گروه عمران (سازه - زلزله) - دانشگاه آزاد اسلامی واحد شبستر، sjavahezade@yahoo.com

چکیده

آسیب‌های سازه‌ای، باعث تغییر در مشخصه‌های دینامیکی شامل فرکانس‌های طبیعی و اشکال مودی می‌گردند. تعیین خرابی و پایش سلامت سازه با مقایسه مشخصه‌های دینامیکی سازه آسیب‌دیده با مشخصه‌های سازه سالم صورت می‌گیرد. این مقایسه از طریق تعریف یک مسئله بهینه‌یابی انجام می‌گیرد و جهت حل این مسئله بهینه‌یابی الگوریتم اجتماع ذرات PSO استفاده شده است. جهت جلوگیری از سعی و خطا در تعیین پارامترهای شتاب‌دهنده این الگوریتم جهت تعیین خرابی از یک الگوریتم اجتماع ذرات خود پیکربند استفاده شده است. برای ارزیابی روش ذکر شده مثال‌های متعددی در این مطالعه بررسی شده است که نتایج به دست آمده برای حالت‌های مختلف خرابی، حاکی از تطابق خوب نتایج با مقادیر واقعی در تعیین موقعیت و میزان خرابی حتی با وجود نوفه و داده‌های ناقص مودال دارد.

واژه‌های کلیدی: تشخیص خرابی، مشخصه دینامیکی، الگوریتم اجتماع ذرات PSO، داده ناقص، نوفه.

۱-مقدمه:

تشخیص خرابی^۱ ذهن بسیاری از محققین و دانشمندان رشته‌های عمران، مکانیک و هوافضا را به خود مشغول کرده است. صنایع عمران، مکانیک و هوانوردی علاقمند به توسعه روش‌شناسی‌های تشخیص خرابی غیر مخرب به منظور ارزیابی کلی سازه‌هایشان هستند. وقوع خرابی در ساختمان‌ها و به طور کلی تمام سیستم‌های سازه‌ای در طول عمر سازه امری اجتناب‌ناپذیر است. پایش سلامتی سازه به منظور تصمیم‌گیری برای استفاده، ترمیم و یا عدم استفاده از سیستمی که تحت بارهای دینامیکی از جمله زلزله قرار گرفته ضروری است. این تصمیم‌گیری بر اساس موقعیت، میزان خرابی و برآورد درجه ایمنی سیستم انجام می‌شود. برای دستیابی به روش‌های کلی تشخیص خرابی، یعنی روش‌هایی که به کمک آن بتوان خرابی را در کل سازه مشاهده نمود، اهمیت بررسی تغییرات در مشخصه رفتار دینامیکی سازه‌ها را لازم می‌سازد. یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در بررسی آسیب و تشخیص خرابی پیش‌رو داشتن مدلی کامل و واقع‌گرایانه است که بتواند به درستی خصوصیات سازه‌ای مرتبط به سازه مورد بحث مانند ممان اینرسی، چگالی و خصوصیات اتصال را به عنوان شرایط مسئله دریافت کرده و بتواند پارامترهای دینامیکی مورد نیاز شامل فرکانس‌های طبیعی و اشکال مودی را جهت بررسی آسیب و به روز آوری مدل به درستی تولید کند. روش اجزای محدود یک ابزار قوی برای حل عددی محدوده وسیعی از مسائل مهندسی است. دامنه کاربرد آن شامل طیف وسیعی از تحلیل تنش و تغییر شکل برای سازه ساختمان، پل، هواپیما، اتومبیل تا حل مسائل انتقال حرارت، میدان

¹ Damage Detection

مغناطیسی، نشت و سایر مسائل جریان سیالات می‌شود. در این مقاله جهت مدل کردن سازه تیر سراسری که به عنوان مثال در نظر گرفته شده است از برنامه متلب جهت کد نویسی استفاده گردید. مفهوم تشخیص خرابی ماهیتاً با مفهوم شناسایی سیستم^۲ ارتباط بنیادی دارد به طوری که بدون شناسایی سیستم، عملاً تشخیص مقدار و خصوصیت خرابی امکان‌پذیر نیست. پس ابتدا امر باید به منظور شناخت و تشخیص خرابی اقدام به شناخت و شناسایی سیستم نمود.

رایتر^۳ تشخیص خرابی را در چهار تراز دسته‌بندی می‌کند:

تراز یک: تعیین اینکه خرابی در سازه وجود دارد. تراز دو: حالت یک + تعیین موقعیت هندسی خرابی.

تراز سه: حالت دو + تعیین مقدار خرابی تراز چهار: حالت سه + پیش‌بینی عمر باقی‌مانده سازه

عمده روش‌های موجود و حتی روش‌های مبتنی بر تحلیل مودی تشخیص خرابی در حالت دو می‌باشند. برخی از روش‌ها در کنار مدل‌سازی‌های سازه‌ای در حالت سه قرار می‌گیرند [۱].

در سال ۱۹۵۰ که تامسون روش ماتریسی بر اساس تغییرات را برای تعیین فرکانس‌های طبیعی تیری با مقطع متغیر ابداع کرد. هدف اصلی او در واقع بررسی ارتباط خرابی تیر با فرکانس‌های طبیعی آن بود. ریچاردسون و منان در سال ۱۹۹۱ ارتباط میان تغییرات در مشخصات مکانیکی سازه (جرم، میرایی و سختی) و تغییرات حاصله در خصوصیات مودی را فرموله کردند و تابعی به نام «تابع حساسیت» را که بیانگر این تغییرات بود تعریف نمودند [۱]. بخش بزرگی از تحقیقات در زمینه تشخیص خرابی بر اساس بکارگیری وسیع روش اجزای محدود قرار دارد. فرض کلی در این روش‌ها این است که می‌توان با بررسی اختلاف بین ماتریس‌های مشخصه سیستم (جرم، میرایی و سختی) سازه مدل شده و ماتریس مشابه اندازه‌گیری شده سازه واقعی به وجود موقعیت و حتی مقدار خرابی پی برد [۱].

دی روک^۴ و همکارانش در سال ۲۰۰۰ پل هوایی با دهانه ۳۰ متری بزرگراه برن-زوریخ را مونتورینگ کرده و با تحلیل تغییرات در فرکانس‌های طبیعی و اشکال مودی موقعیت و میزان خرابی در آن را بررسی نمودند [۱].

غفوری آشتیانی و صابری حقیقی [۲] در سال ۲۰۰۰ با بررسی چندگونه مختلف از سازه‌های خمشی و بادبندی شده و نیز دال موقعیت خرابی را توسط شبکه عصبی مصنوعی مشخص نمودند.

Begambra و Laier (۲۰۰۹) ضمن بررسی یک خرپای صفحه‌ای به عنوان مثال عددی با استفاده از یک الگوریتم ترکیبی (PSOS) از بهینه یابی اجتماع ذرات و الگوریتم سیمپلکس نمودند. آن‌ها معتقدند که نتایج به دست آمده از این روش پیشنهادی، ثبات و قابلیت اطمینان بالایی داشته و مستقل از برآوردهای اولیه پارامترهای ابتکاری روش بهینه یابی است [۳]. گودرزی و ترک زاده [۴] (۲۰۱۱) به بررسی یک سازه‌ی خرپای سقفی با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات پرداختند. آن‌ها با استفاده از انرژی کرنشی مودال در عیب‌یابی سازه با کمک الگوریتم اجتماع ذرات به این نتیجه رسیدند که در اثر خرابی در سازه، انرژی کرنشی مودال در اعضای آسیب‌دیده بیشتر از اعضای سالم خواهد بود. همچنین می‌توان از تغییرات کرنشی در کل سازه، قبل و بعد از آسیب به عنوان معیار مناسب جهت تشخیص و تعیین آسیب استفاده کرد. از طرف دیگر استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات برای تعیین موقعیت خرابی با توجه به نتایج حاصله بسیار مناسب است.

خمسه و ترکزاده [۵] (۲۰۱۱) با بررسی یک خرپای صفحه‌ای و طبق نتایج بدست آمده از عملکرد شاخص آسیب با استفاده از این شاخص یک روش تکمیلی با بکارگیری الگوریتم بهینه یابی اجتماع ذرات جهت شناسایی دقیق‌تر خرابی و افزایش کارایی شاخص‌های آسیب ارائه دادند. مهم‌ترین مزیت روش ارائه‌شده ارزیابی دقیق شدت خرابی است.

Villalba و Laier [۵] (۲۰۱۲) چندین خرپای صفحه‌ای را بر اساس روش الگوریتم ژنتیک و پارامترهای دینامیکی بررسی نمودند. در این مقاله آن‌ها استفاده از یک الگوریتم ژنتیک خود تطبیق چند کروموزوم (SAMGA)^۵ را برای موقعیت‌یابی و

² System Identification

³ Rytter

⁴ De Roeck

⁵ Self-Adaptive Multi-Chromosome Genetic Algorithm

میزان آسیب در سازه‌ها پیشنهاد دادند. نتایج نشان داد که روش‌شناسی پیشنهادی می‌تواند قابلیت اعتماد در تعیین جزءهای واقعی آسیب دیده و میزان آسیب برای سناریوهای مختلف آسیب را داشته باشد.

شجاعی، ترکزاده و سروی [۷] (۲۰۱۲) ضمن بررسی یک سازه خرپایی صفحه‌ای، عملگر بهبود دهنده جدیدی را به الگوریتم اجتماع ذرات بعد از هر گام معمول الگوریتم اضافه نمودند. در هر مرحله از الگوریتم اجتماع ذرات، بر اساس روابط الگوریتم بردار شاخص خرابی به هر ذره اختصاص داده شده و سپس با استفاده از عملگر جدید بردار شاخص خرابی بهترین ذره با حل خطی توسط آنالیز حساسیت بهبود داده می‌شود. در مجموع تمام نتایج حاصله از حل مثال عددی بیانگر دقت و عملکرد مناسب این الگوریتم بهبود یافته برای شناسایی خرابی در سازه است.

همان‌گونه مشاهده می‌شود، استفاده از روش‌شناسی‌ها مبتنی بر استفاده انواع مختلف روش‌های فرا ابتکاری از یک و یا ترکیبی از این روش‌ها به منظور شناسایی آسیب دارای فراوانی بوده و این رویکرد در حال توسعه کمی و کیفی مطالعات ارائه شده است. در بیشتر این مسائل مسئله تشخیص آسیب بصورت یک مسئله بهینه یابی در نظر گرفته شده است که انتخاب یک حل کننده مناسب می‌تواند راهبردی جهت تعیین پاسخ مناسب مسئله باشد. در ادامه به تشریح تشخیص آسیب با استفاده از مشخصه های مودی که در اینجا فرکانس‌های طبیعی و اشکال مودی است بوسیله بهینه یاب اجتماع ذرات پرداخته می‌شود و کارایی این روش در سازه انتخابی تیر سراسری مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این بررسی خرابی بصورت کاهش سختی در المان‌های تیر با کاهش در ممان اینرسی عضو آسیب دیده در نظر گرفته شده است.

۲- الگوریتم اجتماع ذرات خود بیکربند

جیمز کندی^۶ و راسل سی ابره‌ارت^۷، صاحبان اصلی ایده‌ی الگوریتم PSO^۸ می‌باشند. در الگوریتم PSO، تعدادی از موجودات وجود دارند، که آن‌ها را ذره می‌نامیم و در فضای جستجوی تابعی که قصد بهینه کردن مقدار آن را داریم، پخش شده‌اند. هر ذره در الگوریتم PSO از سه بردار d بعدی تشکیل شده است که d بعد فضای جستجو است. برای ذره‌ی i ام این سه بردار عبارت‌اند از: x^i موقعیت فعلی ذره، v^i سرعت حرکت ذره و $x^{i,best}$ بهترین موقعیتی که ذره تا به حال تجربه کرده است. x^i مجموعه‌ای از مختصات است که، موقعیت فعلی ذره را نمایش می‌دهد. در هر مرحله‌ای که الگوریتم تکرار می‌شود، x^i به عنوان یک جواب برای مسئله محاسبه می‌شود. اگر این موقعیت بهتر از جواب‌های پیشین باشد، در $x^{i,best}$ ذخیره می‌شود. f^i مقدار تابع هدف در x^i مقدار تابع هدف در $x^{i,best}$ است که هر دو از عناصر تشکیل دهنده‌ی هر ذره به حساب می‌آیند. ذخیره کردن مقدار $f^{i,best}$ برای انجام مقایسه‌های بعدی، ضروری است. اما ذخیره کردن مقدار f^i ضروری نیست. در هر تکرار x^i و v^i جدیدی به دست می‌آیند و طبعاً منظور از اجرای الگوریتم، بهتر کردن $x^{i,best}$ و احتمالاً x^i است.

در مرحله‌ی ابتدایی الگوریتم، ذرات با موقعیت‌ها و سرعت‌ها تصادفی ایجاد می‌شوند. در طی اجرای الگوریتم، موقعیت و سرعت هر ذره در مرحله‌ی $t+1$ ام از الگوریتم، از روی اطلاعات مرحله‌ی قبلی ساخته می‌شوند. روابط (۱) و (۲) بیانگر مفاهیم ذکر شده سرعت و تغییر موقعیت ذرات می‌باشند.

$$v_j^i[t+1] = wv_j^i[t] + c_1r_1(x_j^{i,best}[t] - x_j^i[t]) + c_2r_2(x_j^{g,best}[t] - x_j^i[t]) \quad (۱)$$

$$x_j^i[t+1] = x_j^i[t] + v_j^i[t+1] \quad (۲)$$

در این روابط، w ضریب اینرسی، r_1 و r_2 اعداد تصادفی در بازه $[0,1]$ با توزیع یکنواخت و همچنین c_1 و c_2 ضرایب یادگیری هستند. r_1 و r_2 باعث می‌شوند که نوعی گوناگونی در جواب‌ها به وجود بیاید و به این نحو جستجوی کامل تری روی فضا انجام

⁶ James Kennedy

⁷ Russell C. Eberhart

⁸ Particle Swarm Optimization

پذیرد. c_1 ضریب یادگیری مربوط به تجارب شخصی هر ذره است و در مقابل c_2 ضریب یادگیری مربوط به تجارب کل جمع است.

به منظور بالا رفتن سرعت همگرایی در الگوریتم با توجه به مسئله بهینه یابی، پیش رو و پرهیز از سعی و خطا جهت یافتن بهترین مقادیر برای ضرایب c_1 و c_2 ساز و کاری تعبیه شده که این ضرایب توسط خود الگوریتم تطبیق داده شود به عبارت دیگر الگوریتم به پیکربندی خود بپردازد. روش‌های مختلفی جهت پیکربندی الگوریتم PSO مانند سیستم های فازی، خود تطبیقی و انطباق تعینی بر اساس P_{Best} و g_{Best} می‌تواند به کار گرفته شود. در این مقاله یک روش ساده و کارآمد جهت تطبیق پارامترهای PSO بکار گرفته شده است. هر ذره در جمعیت با پارامترهای شتاب مربوط خودش در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای شناختی برای i مین ذره در تکرار $t+1$ ، که برابر با c_{1i}^{t+1} است طبق رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$c_{1i}^{t+1} = c_{1i}^t + r_3 \times (c_{1Best}^{t+1} - c_{1i}^t) \quad (3)$$

c_{1Best} مقدار c_1 برای بهترین ذره در جمعیت در تکرار قبلی است و r_3 مقداری تصادفی بین صفر و یک است. مقادیر اولیه برای c_{1i} با تولید تصادفی و با توزیع یکنواخت بین اعداد $1/8$ و $2/2$ تعریف می‌گردد. با توجه به تعریف پارامترهای شتاب‌دهنده در تعاریف PSO مجموع ضرایب c_1 و c_2 جهت کنترل سرعت بهتر است برابر چهار گردد. جهت تأمین این مورد مقدار c_{2i} از رابطه (۴) تعیین می‌شود.

$$c_{2i}^{t+1} = 4 - c_{1i}^{t+1} \quad (4)$$

ضریب اینرسی w بر روی همگرایی الگوریتم PSO تأثیر مستقیم دارد. در واقع می‌توان به واسطه‌ی ضریب اینرسی، تأثیر سرعت‌های گذشته را بر سرعت‌های زمان حال کنترل نمود. برای محاسبه ضریب اینرسی بهتر است جهت افزایش توانایی کلی جستجو PSO در آغاز فرایند تکرار شونده مقدار بیشتر و در انتهای فرایند تکرار جهت یک جستجوی محلی مقداری کمتر را داشته باشد. جهت پیاده‌سازی موارد گفته‌شده از رابطه (۵) جهت تعریف ضریب اینرسی در الگوریتم استفاده می‌نماییم.

$$w = w_1 - \frac{(w_1 - w_2)}{Max_{it}} It \quad (5)$$

Max_{it} حداکثر تعداد تکرار و It شماره تکرار در بهینه یاب است. مقدار w_1 و w_2 به ترتیب برابر با $1/2$ و $0/4$ در نظر گرفته می‌شود. برای اطمینان از اینکه الگوریتم می‌تواند به جستجوی کامل تری از فضا بپردازد اقدام به کنترل گام‌های هر مرحله می‌نماییم. در این الگوریتم عملگر جهش نیز بکار گرفته شده است تا بتواند به صورت موازی با پردازش متغیر تولیدشده برای هر ذره به جواب‌هایی در همسایگی آن متغیر نیز دست پیدا کرد که ضمن بهبود نتایج به دست آمده همگرایی بالایی را در تعیین جواب به وجود آورده است.

۳- تأثیر خرابی بر پارامترهای مودال

همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، پارامترهای دینامیکی یک سازه با وقوع آسیب ناشی از تغییرات خصوصیات سازه‌ای تغییر می‌کنند. در ادامه چگونگی مدل کردن سازه آسیب‌دیده و چگونگی تأثیر آن بر پارامترهای دینامیکی را توصیف می‌کنیم. با این فرض که مدل المان محدودی که بیانگر رفتار سازه سالم، نامیرا در نظر گرفته می‌شود. بنابراین لازم است برای محاسبه ماتریس‌های سختی K_{str} و جرم M_{str} مربوط به سازه مانند روابط (۶) و (۷) عمل کنیم.

$$K_{str} = \sum_{i=1}^{NElem} k_i \quad (6)$$

$$M_{str} = \sum_{i=1}^{NElem} m_i \quad (7)$$

k_i و m_i به ترتیب ماتریس‌های سختی و جرم برای i امین المان و $NElem$ تعداد المان‌های سازه‌ای است. پارامترهای دینامیکی یک سازه نامیرا به صورت معادله رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$(K_{str} - \omega^2 M_{str})\phi = 0 \quad (8)$$

ω فرکانس طبیعی و ϕ شکل مودی است. برای مدل کردن آسیب، ماتریس جرم بعد از آسیب ثابت در نظر گرفته شده و آسیب توسط کاهش در ممان اینرسی عضو آسیب دیده که این کاهش با β_i نشان داده شده است اعمال می شود. این مقدار بیانگر صفر برای سازه سالم و مقدار یک برای سازه کاملاً آسیب دیده است. k_{di} سختی عضو آسیب دیده مطابق رابطه (۹) به دست می آید. پس از در نظر گرفتن میزان خرابی موجود در تمام اعضا سازه، سختی کل سازه آسیب دیده K_{Dam} مانند رابطه (۱۰) محاسبه و پارامترهای مودال سازه طبق رابطه (۱۱) انجام می گیرد.

$$k_{di} = \frac{E_i I_i (1 - \beta_i)}{L_i^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L_i & -12 & 6L_i \\ 6L_i & 4L_i^2 & -6L_i & 2L_i^2 \\ -12 & -6L_i & 12 & -6L_i \\ 6L_i & 2L_i^2 & -6L_i & 4L_i^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$K_{Dam} = \sum_{i=1}^{NElem} k_{di} \quad (10)$$

$$(K_{Dam} - \omega_d^2 M_{str}) \phi_d = 0 \quad (11)$$

که ω_d و ϕ_d به ترتیب فرکانس های طبیعی و اشکال مودی پس از در نظر گرفتن آسیب در سازه می باشند.

۵- تشخیص خرابی

در این بررسی، موقعیت و میزان آسیب با استفاده از مفاهیم رفتار دینامیکی سازه انجام گرفته است. روش شناسی تشخیص خرابی بر اساس ارتعاش بنا شده که خصوصیات دینامیکی یک سازه با مشخصه های سازه ای آن (جرم و سختی) در ارتباط است. هر تغییری در ماتریس های سیستم سختی، جرم و میرایی یک تغییر در فرکانس های طبیعی و اشکال مودی سیستم تولید خواهد کرد. یکی از راه های به کارگیری این مفاهیم در تشخیص خرابی به وسیله تدوین یک مسئله بهینه یابی است که در آن تفاوت میان پارامترهای دینامیکی مدل عددی که بیانگر سازه آسیب دیده است و آن هایی که از تست دینامیکی واقعی سازه به دست آمده را بهینه نماید.

از روش های بروز رسانی مدل برای تشخیص آسیب های سازه ای می توان بهره گرفت. روش های بروز رسانی مدل با استفاده از اطلاعات مودی را می توان به دو گروه اصلی تقسیم نمود: روش های مستقیم و روش های تکرارشونده. در روش بروز رسانی مستقیم، با حل یک مسئله بهینه سازی مقید ماتریس های بروز شده به دست می آیند. مشخصه مهم روش های مستقیم بازسازی صحیح اطلاعات اندازه گیری شده است، همچنین این روش ها نیاز به تکرار نداشته و در نتیجه امکان واگرایی در محاسبات و حجم عملیاتی زیاد وجود ندارد. از معایب اصلی روش های مستقیم این است که پارامترهای مدل اغلب دارای مفهوم فیزیکی نبوده و تغییر در ماتریس های جرم و سختی را نمی توان به تغییرات فیزیکی در المان های مدل اصلی وابسته نمود. علاوه بر این، ماتریس های بروز شده با استفاده از روش های مستقیم به طور کامل پر می شوند در حالی که ماتریس های اولیه کاملاً پر نبوده و فقط شامل المان های غیر صفر در یک نوار در طول قطر می باشند. از طرف دیگر، در روش های بروز رسانی تکرارشونده فرآیند اصلی شامل حل یک مسئله بهینه سازی است که در آن اختلاف بین مشخصه های دینامیکی تحلیلی و اندازه گیری شده با استفاده از تنظیم مشخصه های مجهول مدل، به حداقل رسانده می شود. به عنوان مثال، مشخصه های دینامیکی عبارت از پارامترهای مودی مانند فرکانس ها و اشکال مودی هستند و مشخصه های مجهول مدل، پارامترهای بروز رسانی که معمولاً ضرایب تصحیح بدون بعد برای هر جزء می باشند. در این روش ها باید مودهای تحلیلی و اندازه گیری شده به طور صحیح باهم جفت شوند. روش های تکراری نسبت به روش های مستقیم، قابل قبول ترند زیرا که پارامترهای بروز شده در این روش ها از لحاظ فیزیکی دارای معانی ملموس تری می باشند. با این وجود، این روش ها نیاز به زمان و حجم محاسباتی بسیار بیشتری دارند و امکان واگرایی در محاسبات نیز وجود دارد [۸].

با توجه به مطالب ذکر شده روش مبتنی بر تکرار انتخاب شد تا بتوان در بروز آوری‌های انجام گرفته در مدل اولیه نتایج ملموس - تری از نظر ماتریس‌های مشخصه‌ی سیستمی (سختی و جرم) به دست دهد. تا از این دیدگاه به هدف بررسی که همان میزان و موقعیت خرابی است رسید. در این مورد لازم است تا متغیرهای بهینه یابی تعریف شده تا در حل کننده و تابع هدف بکار رود. متغیرهای بهینه یابی با توجه به نوع خرابی که در سیستم در نظر گرفته شده تعیین می‌شوند. در بیشتر بررسی‌های صورت گرفته، خرابی‌ها می‌تواند به صورت کلی ضریبی کاهش از سختی جزء محدود یا با توجه به عملکرد سازه‌ای، عضو در نظر گرفته شده کاهش در سختی خمشی، محوری یا برشی باشد. ماتریس جرم سازگار در جزء محدودهای آسیب دیده همان ماتریس جرم در جزء محدود سالم است و ثابت در نظر گرفته می‌شود. محققین در بررسی اعضای خرابی کاهش سختی را با کاهش در مدول الاستیسیته (E) جزء محدود که بیانگر کاهش در سختی محوری است در نظر گرفته‌اند. در جزء محدودهای اعضای تیرها می‌توان علاوه بر کاهش در سختی کل جزء محدود از کاهش در ممان اینرسی (I) جزء محدود نیز برای اعمال و تعریف آسیب در آن استفاده نمود. برای یک نوع خرابی در تیر سراسری در این بررسی، متغیرهای بهینه یابی برابر با ممان اینرسی های کاهش یافته در هر جزء در نظر گرفته شده‌اند و مقدار آن در باز $[I_0 \text{ و } I_1]$ قرار می‌گیرد بدین صورت که این متغیرها برای جزء سالم برابر I_0 و برای جزئی که دچار خرابی ۱۰۰ درصد شده است به صورت ۰ تخصیص داده شده است. تعداد این متغیرها برابر با تعداد جزءهای سازه‌ای در نظر گرفته شده در مدل است.

انتخاب الگوریتمی که بتواند مسئله بهینه یابی را حل کند یکی از کلیدهای اطمینان از منظر تشخیص صحیح آسیب است. الگوریتمی که راهبرد حل مسئله تشخیص خرابی را توصیف می‌کند، در شکل (۲-۱) نمایش داده شده است.

شروع
۱- تعریف مدل المان محدود FEM از سازه سالم
۲- تعیین پارامترهای دینامیکی آسیب دیدگی؛ فرکانس‌های طبیعی و اشکال مودی
۳- تعریف تابع هدف
۴- بکار بردن بهینه‌ساز اجتماع ذرات خودپیکربند
۵- نمایش نتایج
پایان

شکل (۲-۱): روش‌شناسی تشخیص خرابی

اولین مرحله در روش‌شناسی مطرح شده از تعریف و تشکیل مدل جزء محدودی برای سازه سالم است که بیانگر مجاز بودن شرایط نامیرا باشد. مدل، توسط بروز آوری مدل شرایط آسیب را که در این مورد ماتریس سختی است به دست می‌دهد. در مرحله دوم، پارامترهای دینامیکی آسیب به صورت تجربی تعیین می‌شود. این پارامترها توسط ارزیابی دینامیکی سازه اندازه‌گیری و استخراج می‌شوند. به منظور این ارزیابی‌ها سازه را مورد تحریک قرار می‌دهند. روش‌های تحریک برای این سازه‌ها می‌تواند به دو گروه عمده تحریک محیطی و تحریک ناشی از نیروهای وارد شده توسط وسایل تحریک به سازه تقسیم شوند. با توجه به اینکه این تحقیق به صورت عددی انجام گرفته است، پارامترهای دینامیکی به دست آمده از رابطه (۱۰) به وسیله محاسبه ماتریس سختی آسیب برای سناریوهای آسیبی که به دنبال آن هستیم به دست می‌آید. به جهت تلاش برای شبیه‌سازی شرایطی که در تست واقعی ممکن است به وجود آید، این پارامترهای به صورت عددی دارای اختلال ۱٪ برای فرکانس‌های طبیعی و ۳٪ برای اشکال مودی به منظور در نظر گرفتن وقوع نوفه (نویز) در اندازه‌گیری‌ها متغیر است [۹].

$$\omega_{dr} = \omega_d \times (\text{random}(-1,1) \times 0.01) \quad (12)$$

$$\phi_{ij dr} = \phi_{ij d} \times (\text{random}(-1,1) \times 0.03) \quad (13)$$

اشاره dr به شرایط اغتشاش است. همچنین در سناریوهای آسیبی که مد نظر قرار گرفته است، مقایسه‌ای هم با وجود اطلاعات کامل پارامترهای دینامیکی و هم داده ناقص پارامترها مربوط به چند درجه آزادی موجود در سازه نیز انجام گرفته است. پارامترهای انتخابی برای شکل دادن تابع هدف باید نسبت به آسیب در سازه حساس باشند، بنابراین در این بررسی تابع هدف بر اساس فرکانس‌های طبیعی و اشکال مودی بنا شده است. این تابع هدف برگرفته از تابع هدفی است که Villalba و Laier در تحقیقات اخیر خود [۳] به بررسی آن در سازه‌های مختلف نموده‌اند. نکته قابل توجه در این تابع هدف موضوع وجود دو تابع برای بهینه‌یابی است یکی مربوط به فرکانس‌های طبیعی و دیگری مربوط به اشکال مودی است. یکی از راه‌های مواجهه با بهینه‌سازی‌های چند هدفه روش‌های دی‌کامپوزیشن^۹ است که مقصود تبدیل مسئله بهینه‌یابی به بهینه‌یابی تک هدفه است. بدین منظور در این بررسی از روش مجموع وزن دار^{۱۰} جهت تبدیل استفاده گردیده است.

$$F = \sum_{j=1}^{nm} \left(\left| \frac{\omega_j^{ps0} - \omega_j^{ex}}{\omega_j^{ex}} \right| + w \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{ndf} (\phi_{ij}^{ps0} - \phi_{ij}^{ex})^2}{\sum_{i=1}^{ndf} (\phi_{ij}^{ex})^2}} \right) \quad (14)$$

در اینجا nm اشاره به تعداد مودهای در نظر گرفته شده است. ndf تعداد درجات آزادی با اطلاعات موجود است. بالا نویس PSO اشاره به مقادیر یافته شده توسط بهینه‌یاب اجتماع ذرات و بالا نویس ex شاخص‌های نتایج تجربی است. ω_j ، j امین فرکانس طبیعی و ϕ_{ij} مقدار j امین شکل مودی از درجه آزادی i ام است. w ضریب اینرسی است که در بررسی پیشنهادی مؤلف آن مقدار ۲ پیشنهاد داده شده است. تابع هدف بکار رفته برای احتراز از هر دو مدل‌های کاهش‌ی یا مد روش‌های بسط دادن نیازمند اطلاعات کامل مودی نیست. که این خود می‌تواند با توجه به ارزیابی سازه‌ها و تحریک صورت گرفته بر روی آن‌ها و این که این تحریک‌ها عموماً نمی‌تواند تمام فرکانس‌های طبیعی را به دست دهد، مشکل پردازش داده‌های ناقص به وجود آمده را جهت تشخیص آسیب را تا حدودی بهبود ببخشد.

۶- مثال عددی

در این قسمت یک سازه تیر سراسری بر اساس روش پیشنهادشده مورد بررسی قرار می‌گیرد. این بررسی برای هر حالت آسیب در سازه تحت ۴ شرایط کلی انجام گرفته، این چهار شرایط برای هر حالت آسیب عبارت‌اند از:

الف- تشخیص خرابی در حالت عدم وجود نوفه و با شرکت تمام مودهای دینامیکی.

ب- تشخیص خرابی در حالت وجود نوفه و با شرکت تمام مودهای دینامیکی.

پ- تشخیص خرابی در حالت عدم وجود نوفه و با شرکت ۷ مود اول دینامیکی.

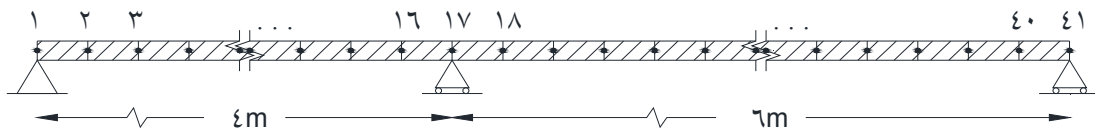
ت- تشخیص خرابی در حالت وجود نوفه و با شرکت ۷ مود اول دینامیکی.

سازه تیر شکل ۱ با سه تکیه‌گاه (دو دهنه) با ۱۰ متر طول و ۴۰ جزء محدود که طول هر جزء ۲۵ سانتی‌متر مورد نظر است. سطح مقطع هر جزء برابر با $A = 0/004264 m^2$ ؛ ممان اینرسی آن $I = 0/000065724 m^4$ ؛ چگالی $\rho = 7850 kg/m^3$ و مدول الاستیسیته $E = 200 \times 10^{10} kg/m^2$ در نظر گرفته شده است. برای مدل کردن سازه یک

جزء محدود تیر نوع برنولی به کار گرفته شده است. برای هر جزء دو گره با دو درجه آزادی (یک درجه دورانی و یک درجه انتقالی) در هر گره در نظر گرفته شده است. فرارگیری (هم بندی) گره‌ها در شکل (۵-۱) نشان داده شده است.

⁹ Decomposition

¹⁰ Weighted Sum



شکل ۱: سازه تیر سراسری

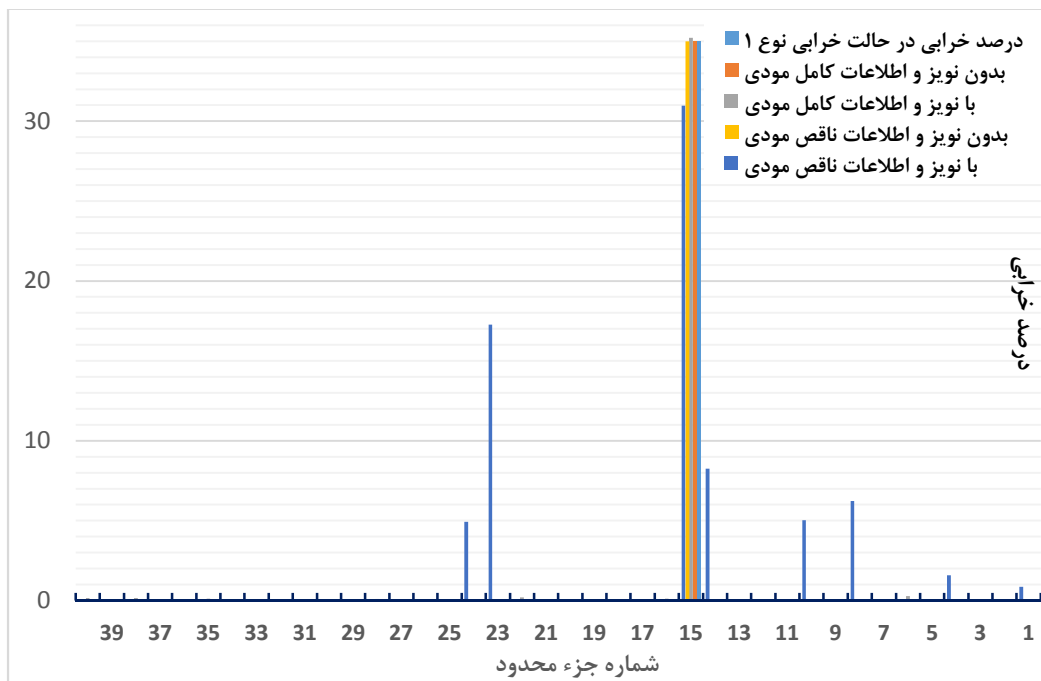
PSO استفاده شده دارای ویژگی‌هایی از قرار، جمعیت شامل ۱۰۰ ذره و حداکثر تعداد مجاز تکرار برابر ۲۰۰ است. همان‌گونه که پیش از این اشاره شد دیگر پارامترهای شتاب‌دهنده اجازه داده شده است که در ضمن تکرار پردازش و تطبیق داده - شود. ضریب اینرسی در بازه $[0/4, 1/2]$ قرار دارد و طی تکرارها با نرخ ثابت به صورت کاهشی با توجه به حداکثر تکرار اعمال می‌شود.

حالت‌های آسیب در جدول ۱ نشان داده شده است، با توجه به شرایط کلی که پیش از این ذکر شد مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

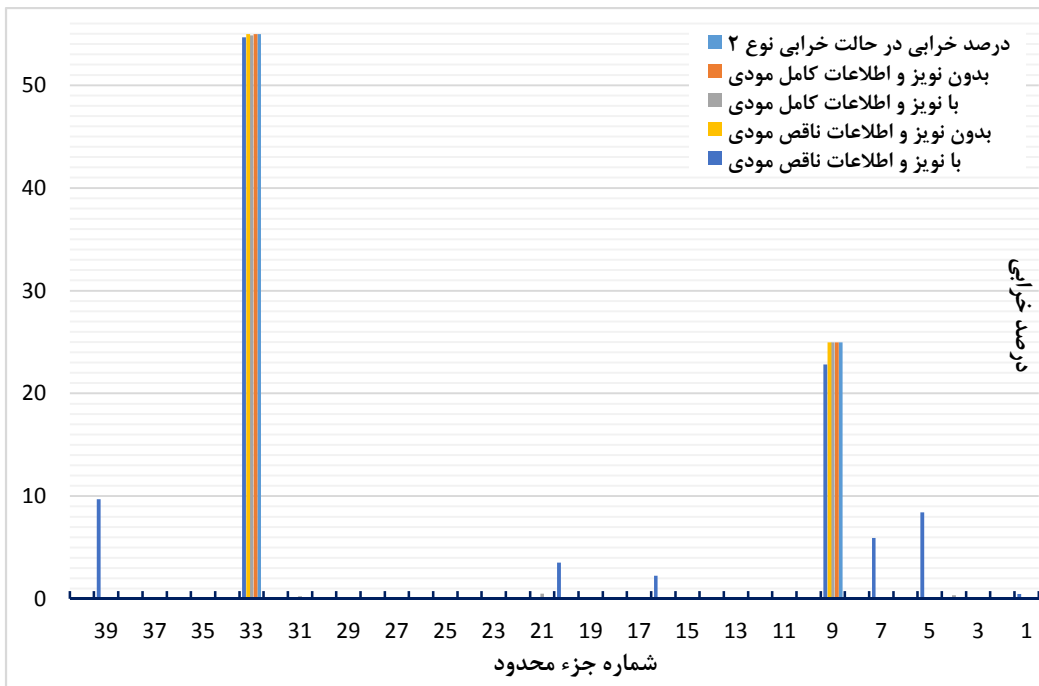
جدول ۱: حالت‌های خرابی مورد بررسی در تیر سراسری

۳				۲		۱	حالت خرابی
۳۸	۲۵	۱۳	۴	۳۳	۹	۱۵	جزء آسیب‌دیده
۶۵	۲۵	۴۰	۱۵	۵۵	۲۵	۳۵	درصد خرابی جزء آسیب‌دیده

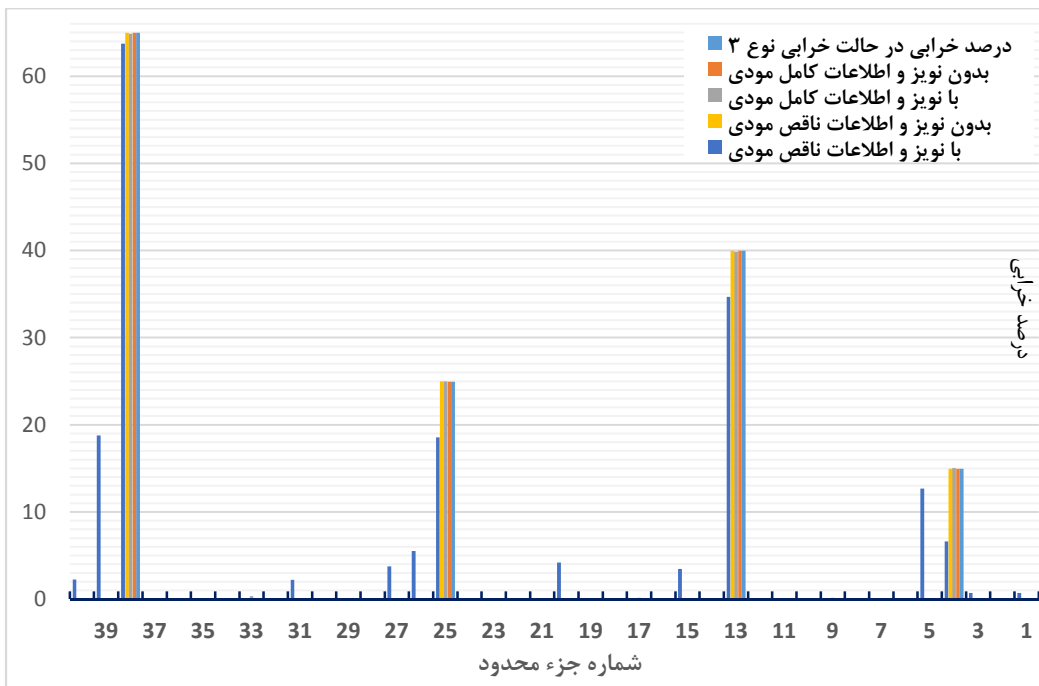
پس از اجرای PSO برای سه حالت خرابی گفته شده و شرایط مختلف نتایج گرفته شده در شکل‌ها ۲، ۳ و ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۲: نتایج تحلیل حالت خرابی نوع اول تحت شرایط گفته شده



شکل ۳: نتایج تحلیل حالت خرابی نوع دوم تحت شرایط گفته شده



شکل ۴: نتایج تحلیل حالت خرابی نوع سوم تحت شرایط گفته شده

۷- نتیجه‌گیری

نتایج تحلیل انجام‌گرفته بر روی سه حالت خرابی، بیانگر آن است که روش پیشنهادی در صورت عدم وجود نوفه در دو شرایط شرکت تمام پارامترهای مودی و داده‌های ناقص مودی دارای جواب‌های قطعی است و حل‌کننده توانسته است موقعیت و میزان آسیب را به خوبی و بدون خطا تعیین نماید. با ورود نوفه به شرایط مسئله و با شرکت تمام پارامترهای مودی مقدار کمی خطا در تعیین میزان آسیب در نتایج دیده می‌شود که در حالت خرابی نوع سوم خطای کمی نیز در تعیین موقعیت‌یابی آسیب نیز به چشم می‌خورد. در شرایطی که مسئله با وجود داده‌های ناقص مودی و نوفه تحلیل‌شده میزان خطا در تعیین میزان و موقعیت آسیب افزایش چشم‌گیری یافته است با توجه به این نتایج نوفه زدایی به خصوص با در نظر گرفتن داده‌های ناقص مودی در شرایط مسئله ضروری به نظر می‌رسد. چون با توجه به نتایج به دست آمده در دیگر شرایط مسئله در همان حالت خرابی حل‌کننده توانسته جواب‌های قابل‌قبولی در تعیین موقعیت و میزان آسیب ارائه نماید.

مراجع

- [۱] غفوری آشتیانی م.، خان لری ک.: توسعه روش‌های شناسایی و تشخیص خرابی در سازه‌ها. گزارش. پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ۱-۹۰-پ-۲۹۳-۱۳۹۰.
- [۲] غفوری آشتیانی م.، صابری حقیقی ک.: تشخیص خرابی در ساختمان‌های آسیب‌دیده با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک. پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ۲-۲۰۰۰-۷۹-۱۳۸۷.
- [3] Laier J.E., Villalba J.D.: Influence of Incomplete Modal Data on the Performance of a Vibration-Based Damage Detection Methodology, International Conference on Computational Technology, 2012.
- [۴] گودرزی ی.، ترکزاده پ.: تشخیص خرابی در سازه‌ها با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات. کنفرانس زلزله، سازه و روش-های محاسباتی. ۱۳۹۰.
- [۵] خمسه م.، ترکزاده پ.: بهبود شاخص‌های آسیب جهت شناسایی دقیق خرابی سازه‌ها با کمک الگوریتم بهینه یاب اجتماع ذرات. کرمان؛ کنفرانس زلزله، سازه و روش‌های محاسباتی. ۱۳۹۰.
- [6] Laier J.E., Villalba J.D.: Localising and quantifying damage by means of a multi-chromosome genetic algorithm. *Advances in Engineering Software* 50 (2012) 150–157
- [۷] شجاعی س.، ترکزاده پ.، سروی ف.: بهبود الگوریتم اجتماع ذرات توسط آنالیز حساسیت جهت تشخیص خرابی سازه‌ها. کرمان؛ سومین کنفرانس ملی زلزله و سازه. ۱۳۹۱.
- [۸] دلپذیر م.، بهار ا.: روش جدید به‌روز رسانی مدل سازه سه بعدی با تلفیق روش مستقیم و تکرارشونده. پنجمین کنگره مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد. ۱۳۸۹.
- [9] Chen B, Nagarajaiah S. Flexibility-based structural damage identification using Gauss-Newton method. In: *Proceedings of SPIE – sensors and smart structures, technologies for civil, mechanical, and aerospace systems, San Diego, USA, vol. 6529 Part 1, paper 65291L; 2007.*