

مجله علمی - پژوهشی
مهندسی عمران مدرس
دوره ۲۳، شماره ۶، سال ۱۴۰۲
صفحات ۱۴۹ تا ۱۶۰

شناسایی آسیب در محیط‌های دوبعدی به کمک روش المان محدود توسعه یافته و الگوریتم‌های بهینه یابی گرگ خاکستری و ژنتیک

علی فاخری کوزه کنان^۱، ناصر خاجی^{۲*}

۱. کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
۲. استاد مهندسی عمران، دانشکده علوم و فناوری‌های پیشرفته، دانشگاه هیروشیما، هیگاشی هیروشیما، ژاپن

Email: nkhaji@hiroshima-u.ac.jp

تاریخ پذیرش ۱۴۰۲/۰۷/۱۶

تاریخ دریافت ۱۴۰۲/۰۴/۱۹

چکیده

شناسایی و بررسی انواع آسیب‌ها در سازه یکی از موضوعات چالش برانگیز در حوزه مهندسی به شمار می‌رود. در این مقاله، ردیابی آسیب در سازه‌های دوبعدی، به عنوان یک مسئله ارزیابی غیرمخرب، با استفاده از روش المان محدود توسعه یافته و کلاسیک به همراه روش بهینه یابی الگوریتم ژنتیک و گرگ خاکستری بررسی شده است. روش المان محدود توسعه یافته و کلاسیک برای مدلسازی سازه حاوی ترک و حفره و روش بهینه یابی ژنتیک و گرگ خاکستری برای تعیین موقعیت آسیب استفاده شده است. روش المان محدود توسعه یافته ابزاری قوی برای تحلیل سازه حاوی آسیب بدون مش بندی مجدد است و بنابراین برای یک فرایند تکراری در تحلیل سازه مناسب است. همچنین در این مسائل به دلیل گسترده بودن پارامترها، استفاده از روش‌های ریاضی بسیار پرهزینه و زمان‌بر است. به همین دلیل روش‌های فراابتکاری گسترش یافته اند، که روش‌های بهینه یابی گرگ خاکستری و ژنتیک از جمله الگوریتم‌های برتر و هوشمند برای حل مسئله معکوس در روش‌های رایج غیرگرادیانی هستند. این مسئله طوری تنظیم شده که الگوریتم بهینه یاب، مختصات آسیب موجود را با کمینه کردن یک تابع خطا براساس مقادیر اندازه گیری شده به وسیله حسگرهایی که روی سازه نصب شده اند، پیدا می‌کند. در نهایت، سه نمونه عددی نیز برای بررسی قابلیت و دقت روش پیشنهادی آورده شده است.

واژه‌های کلیدی: روش المان محدود توسعه یافته، مسئله معکوس، الگوریتم فراابتکاری، شناسایی آسیب، روش‌های بهینه یابی

۱- مقدمه

در بیشتر سازه‌های عمرانی مثل ساختمان‌های بلندمرتبه، برج‌ها، سدها و سازه‌های دریایی، آسیب‌ها به تدریج در طول عمر سرویس‌دهی آنها تجمع می‌یابند و یا ممکن است سازه‌ها به دلایل گوناگون مانند زلزله‌های شدید، طوفان‌ها، استفاده نادرست و خوردگی در معرض آسیب قرار گیرند [1]. هر ساله هزینه بسیاری برای بازسازی و یا ساخت مجدد آن‌ها صرف می‌شود. بنابراین از نقطه نظر سرویس‌دهی و ایمنی، شناسایی آسیب‌ها در سازه‌ها یک موضوع مهم است [2, 3]. ترک‌ها یکی از شاخص‌های اصلی دوام و آسیب‌های احتمالی سازه‌ها به شمار می‌روند [4-9]. بیشتر کشورهای توسعه‌یافته ارزیابی منظم آسیب در انواع سازه‌ها را به عنوان بخشی از نگهداری زیرساخت‌ها انجام می‌دهند [9]. در حال حاضر بسیاری از سازه‌های مهم کشور در حال نزدیک شدن به پایان عمر طراحی خود هستند و پایش سلامت آنها برای تشخیص زودهنگام خرابی دارای اهمیتی روزافزون است [10-12].

اگر این خرابی‌ها تشخیص داده نشوند، ممکن است ایمنی سازه‌های حیاتی و مهمی مانند فضاپیماها و پل‌ها کاهش و در نتیجه احتمال خرابی کل سازه بالا رود که منجر به خطرهای جانی و مالی برای افراد شود. از این رو اهمیت تشخیص این آسیب‌ها بیش از پیش خود را نشان می‌دهد.

برای غلبه بر معایب بازرسی رایج چشمی، الگوریتم‌های بهینه‌یابی فراابتکاری به عنوان یک روش جایگزین امیدوارکننده برای بررسی و نظارت بر آسیب‌ها معرفی شدند [13]. بطور کلی در این الگوریتم‌ها از روند تکرار و کمینه‌سازی تابع هدف برای شناسایی آسیب‌های موجود استفاده می‌شود که منجر به حصول اطلاعاتی مانند وجود یا عدم وجود آسیب در صفحه، موقعیت، اندازه و شعاع آسیب‌ها می‌شود.

در طیف وسیعی از این روش‌ها، ترک موجود در سازه معمولاً با مقایسه پاسخ انتشار موج در حوزه زمان سازه موجود با پاسخ سازه سالم، شناسایی می‌شود. بنابراین، با استفاده از این روش‌ها، موقعیت آسیب با بررسی پارامترهای موج پراکنده شده از آسیب تعیین می‌شود. بنابراین، با استفاده از این روش‌ها، موقعیت آسیب با بررسی پارامترهای موج پراکنده شده از آسیب تعیین

می‌شود. [14, 15]. روش‌های عددی به کار گرفته شده برای تشخیص آسیب نیاز به حل مسئله معکوس دارد که سرانجام با تعریف یک مسئله بهینه‌یابی حل می‌شود. جواب این مسائل یکتا نبوده و گاهی الگوریتم بهینه‌یابی ممکن است به جواب محلی همگرا شود که جواب بهینه واقعی نباشد. علاوه بر این، این نوع مسائل اغلب به صدها تکرار برای همگرایی نیاز دارند. از طرفی در روش‌های مرسوم المان محدود نیاز به مش‌بندی مجدد در هر تکرار بهینه‌یابی است که حجم محاسبات را بالا می‌برد [16].

به تازگی روش‌های جدیدی با استفاده از الگوریتم ژنتیک و گرگ خاکستری به عنوان روش بهینه‌یابی و روش المان محدود توسعه‌یافته برای حل مسئله پایش رو به کار گرفته و توسعه داده شده است [17-21].

شایان ذکر است که روش معرفی شده در این پژوهش و بارگذاری آن استاتیکی است. به بیان دیگر، حل مسئله معکوس با استفاده از الگوریتم ژنتیک و گرگ خاکستری، این امکان را فراهم کرده است که بدون استفاده از روش‌های انتشار امواج بتوان موقعیت آسیب را شناسایی کرد؛ چرا که اینگونه روش‌ها بدون قید تابع هدف را کمینه می‌کنند. همچنین، چندین پژوهش جدیدتر در زمینه یافتن آسیب انجام شده است که در آن‌ها نیز از روش المان محدود توسعه یافته استفاده شده است [22].

24

در این مقاله، ردیابی ترک در محیط‌های دوبعدی با ترکیب روش المان محدود توسعه‌یافته و الگوریتم‌های بهینه‌یابی ژنتیک و گرگ خاکستری، برای اولین بار ارائه شده است. بنابراین، هدف این مقاله استفاده از روش بهینه‌یابی ژنتیک و گرگ خاکستری برای حل دقیقتر و سریعتر مسئله است. برای این منظور، یک مسئله بهینه‌یابی به عنوان مسئله معکوس برای ارزیابی غیرمخرب سازه‌ها تعریف می‌شود. ترک به وسیله روش المان محدود توسعه‌یافته [25-29]، مدل شده که زمان محاسباتی را به دلیل عدم نیاز به مش‌بندی مجدد در هر تکرار کاهش می‌دهد. مسئله اینطور تنظیم شده که الگوریتم‌های بهینه‌ساز مورد استفاده، مختصات ترک را با کمینه کردن تابع خطا بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده به وسیله حسگرها

حاکم بنیادی تحلیل الاستیک ترک مرور خواهد شد. یک جسم با حوزه Ω و مرز خارجی Γ را می‌توان در نظر گرفت که تحت نیروی حجمی b و نیروی سطحی Γ_t قرار دارد. شرایط مرزی جابه‌جایی در سطح جسم نیز Γ_u است. بنابراین، شرایط مرزی به صورت کلی $\Gamma = \Gamma_t + \Gamma_u$ نوشته می‌شود. مرز سطح ترک نیز با Γ_c نشان داده می‌شود. مرز ترک به صورت سطح آزاد تنش فرض می‌شود و به دو بخش Γ_c^+ و Γ_c^- تقسیم می‌شود. جزئیات حوزه Ω و مرز Γ در شکل (۲) نشان داده شده است.

شکل ۲. جسم تحت بار با ترک داخلی

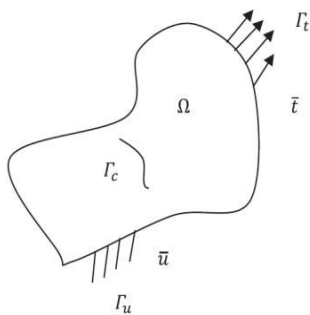


Fig. 2. Loaded object with internal crack.

معادله تحلیلی تعادل حاکم به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\nabla \cdot \sigma + b = 0 \quad (1)$$

که در آن، σ تانسور تنش کوشی، و b بردار نیروهای حجمی

است. شرایط مرزی جسم به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma \cdot n = \bar{f} \quad \text{on} \quad \Gamma_t \quad (2)$$

$$\sigma \cdot n = 0 \quad \text{on} \quad \Gamma_c^+ \quad (3)$$

$$\sigma \cdot n = 0 \quad \text{on} \quad \Gamma_c^- \quad (4)$$

$$u = \bar{u} \quad \text{on} \quad \Gamma_u \quad (5)$$

که در آنها، n بردار واحد عمود بر سطح است و $\bar{f}$ و $\bar{u}$ نشان دهنده کشش و جابه‌جایی هستند و با در نظر گرفتن تغییر شکل‌های کوچک رابطه تنش-کرنش به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\varepsilon = \nabla_s u \quad (6)$$

که در آن ε تانسور کرنش خطی، ∇_s عملگر گرا دیانی متقارن و u بردار تغییر مکان است. برای ناپیوستگی قوی، توابع شکل توسط توابع غنی‌ساز $H(x)$ و $F_j(x)$ به صورت زیر غنی‌سازی می‌شوند:

جستجو می‌کند. سه نمونه عددی نیز برای نشان دادن توانایی این روش حل و بررسی می‌شود.

۲- روش المان محدود توسعه یافته

روش المان محدود توسعه یافته تقریب جدیدی از روش المان محدود را ارائه می‌دهد که دارای توانایی در نظر گرفتن ناپیوستگی‌های ضعیف و قوی می‌باشد. همچنین این روش می‌تواند ناپیوستگی را به طور مستقل از مش‌بندی مدل نماید. ناپیوستگی‌ها به وسیله مجموعه‌ای از توابع پیوسته و ناپیوسته که توابع غنی‌ساز نامیده می‌شوند، مدل می‌شوند. غنی‌سازی یکی از کارآمدترین تکنیک‌هایی است که می‌تواند برای محاسبه ناپیوستگی‌های ضعیف یا قوی استفاده شود. غنی‌سازی قصد دارد دقت تقریبی را با افزودن اطلاعات راه‌حل تحلیلی افزایش دهد. این تکنیک یک رویکرد قدرتمند و دقیق است که برای مدل‌سازی اختلالات ضعیف و قوی بدون در نظر گرفتن هندسه آن‌ها استفاده می‌شود.

شکل ۱. مدل‌سازی انواع ناپیوستگی در المان محدود کلاسیک و توسعه

یافته (الف) ناپیوستگی ضعیف و قوی (ب) مش المان محدود که مطابق با هندسه ناپیوستگی تغییر می‌کند (ج) مش‌بندی المان محدود توسعه یافته که یکسان و بدون توجه به هندسه ناپیوستگی می‌باشد. [30]

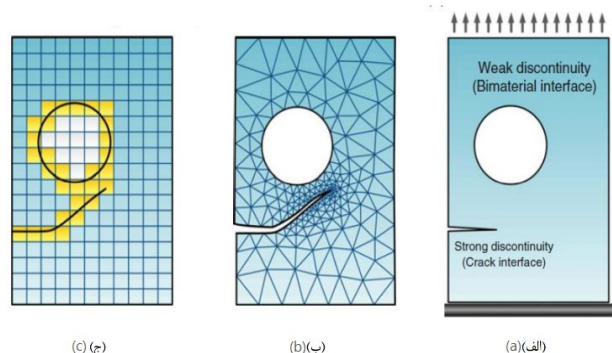


Fig. 1. Modeling types of discontinuity in classic and Extended finite element (a) weak and strong discontinuity (b) Finite element mesh that changes according to the geometry of the discontinuity (c) Extended finite element meshing that is the same regardless of the geometry of the discontinuity [30].

برای حل مسئله پیش‌رو مورد نظر، از روش المان محدود کلاسیک و توسعه یافته استفاده می‌شود. در این بخش معادلات

$$u^h(x) = \sum_{i=1}^n N_i(x)u_i + \sum_{i=1}^{n_j} N_i(x)H(x)a_i + \sum_{i=1}^{n_T} [N_i(x) \sum_{j=1}^4 F_j(x)b_{ji}]_i \quad (7)$$

که در آن، N_i توابع شکل استاندارد روش المان محدود است. همچنین $H(x)$ تابع غنی‌ساز پله‌ای واحد برای میدان ناپیوستگی در طول ترک و a_i و b_{ji} توابع غنی‌ساز اختصاص یافته به گره‌های غنی‌سازی شده هستند.

۳- روش بهینه‌یابی ژنتیک

الگوریتم ژنتیک روشی است برای بهینه‌یابی، که امروزه کاربرد زیادی پیدا کرده است. پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک، معمولاً با تولید جمعیتی از کروموزوم‌ها (جمعیت اولیه از کروموزوم‌ها در الگوریتم‌های ژنتیک، معمولاً تصادفی تولید می‌شود و مقید به حد بالا و پایین متغیرهای مسئله هستند) آغاز می‌شود. در مرحله بعد، ساختارهای داده‌ای تولید شده (کروموزوم‌ها) ارزیابی می‌شوند و کروموزوم‌هایی که به شکل بهتری می‌توانند جواب بهینه مسئله مورد نظر (هدف) را نمایش دهند، شانس بیشتری برای تولید مثل نسبت به جواب‌های ضعیف‌تر پیدا می‌کنند. به عبارت دیگر، فرصت‌های تولید مثل بیشتری به این دسته از کروموزوم‌ها اختصاص داده می‌شود. میزان خوب بودن یک جواب، معمولاً نسبت به جمعیت، جواب‌های کاندید فعلی سنجیده می‌شود. اصول کاری الگوریتم ژنتیک، در ساختار فلوجارت زیر نمایش داده شده است.

شکل ۳. فلوجارت روند حل مسائل در الگوریتم ژنتیک

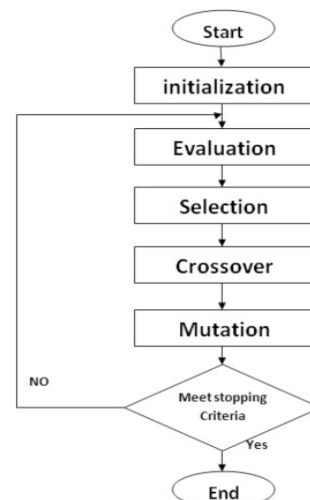


Fig. 3. Flowchart of problem-solving process in genetic algorithm.

مهمترین گام لازم برای پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک عبارتند از: تولید جمعیت (اولیه) از جواب‌های یک مسئله، مشخص کردن تابع هدف و به کار گرفتن عملگرهای ژنتیک برای ایجاد تغییرات در جمعیت جواب‌های مسئله.

اصول کاری الگوریتم ژنتیک عبارتست از:

- ۱- فرموله کردن جمعیت ابتدایی متشکل از جواب‌های مسئله
- ۲- مقداردهی اولیه و تصادفی جمعیت ابتدایی متشکل از جواب‌های مسئله
- ۳- حلقه تکرار:

۳-۱- ارزیابی تابع هدف مسئله

۳-۲- انجام عملیات روی جمعیت متشکل از جواب‌های مسئله با استفاده از عملگرهای ژنتیک

۳-۲-۱- عملگر تولید (Reproduction)

۳-۲-۲- عملگر ادغام (Crossover): برای باز ترکیب دو رشته یا کروموزوم استفاده می‌شود. این کار، با هدف تولید رشته‌ها یا کروموزوم‌های بهتر انجام می‌شود.

۳-۲-۳- عملگر جهش (Mutation): در عملگر جهش، به شکل تصادفی، اطلاعات جدیدی به فرایند جستجو در الگوریتم ژنتیک اضافه می‌شود.

۴- تا زمانی که شرط توقف ارضا شود. [17-19].

۴- روش بهینه‌یابی گرگ خاکستری

الگوریتم گرگ خاکستری الهام گرفته از زندگی گروهی گرگ‌ها است [31]. آن‌ها دارای یک ساختار سلسله‌مراتبی می‌باشند. که در این ساختار از بالا به پایین حاکمیت کاهش می‌یابد. رهبر گروه آلفا می‌باشد و گرگ‌های دیگر موظف به اطاعت از او می‌باشند. دومین سطح قدرت در ساختار سلسله‌مراتبی، بتا نام دارد. بتاها گرگ‌های مطیع هستند که به گرگ آلفا در تصمیم‌گیری کمک می‌کنند. رده بعدی از ساختار قدرت مربوط به گرگ‌های دلتا می‌باشد. این گرگ‌ها از دستورات آلفا و بتا پیروی می‌کنند و به گرگ‌های سطح پایین‌تر دستور می‌دهند. پایین‌ترین رده گرگ‌ها نیز گرگ‌های امگا می‌باشند. گرگ‌های امگا نقش طعمه را بازی می‌کنند و از سایر گرگ‌های گروه پیروی می‌کنند.

متغیرهای بهینه‌یابی در نظر گرفته شده، تا روش بهینه‌یابی گرگ خاکستری و ژنتیک، در فضای جستجو، آنها را به جواب بهینه همگرا کند، که منجر به کمینه شدن تابع هدف می‌شود. به عنوان نمونه، می‌توان از یک تابع هدف مطابق رابطه زیر استفاده کرد:

$$r(\beta_i) = \frac{\|\varepsilon(\beta_i) - \varepsilon^0\|}{\|\varepsilon^0\|} \quad (12)$$

$$O(v) = \frac{\|U(\beta_i) - U^0\|}{\|U^0\|} \quad (13)$$

که در آن $\|\cdot\|$ ، یک نرم $L2$ (نرم اقلیدسی) می‌باشد. نرم یکی از مفاهیم ریاضی است که کاربرد مهمی در زمینه‌های مختلف علوم مهندسی دارد. نرم بیشتر برای ارزیابی خطای یک مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مفهوم، تابعی است که یک بردار را به یک مقدار مثبت می‌نگارد. همچنین، U^0 و ε^0 مقادیر جابه‌جایی و کرنش سازه موجود در محل حسگرها، U و ε مقادیر جابه‌جایی و کرنش سازه تولید شده توسط روش بهینه‌سازی الگوریتم مورد نظر در همان مختصات می‌باشد، که تابعی از متغیرهای بهینه‌سازی β_i است. متغیرهای بهینه‌سازی مزبور در هر تکرار بهینه‌سازی تغییر می‌کنند. برنامه الگوریتم بهینه‌سازی در نرم‌افزار متلب نوشته شده است، تا با برقراری ارتباط آن با برنامه‌های FEM و XFEM مدل شده در نرم‌افزار آباکوس بتواند مسئله معکوس برای ردیابی آسیب را حل نماید. به دلیل اهمیت هزینه محاسباتی، انتخاب الگوریتم هوشمند مطابق با خواسته مسئله بسیار مهم است. به دلیل استفاده از روش المان محدود توسعه یافته، برای تحلیل سازه در هر تکرار برای موقعیت‌های مختلف ترک، نیاز به مش‌بندی مجدد نبوده و حجم محاسباتی را نسبت به روش المان محدود کلاسیک پایین می‌آورد. همچنین روش بهینه‌یابی ژنتیک و گرگ خاکستری توانایی خود را در مسائل مختلف بهینه‌یابی نشان داده اند [18, 19, 30]. و از این رو به عنوان ابزار بهینه‌یابی در این مقاله استفاده شده اند.

همان‌گونه که در بخش‌های بعدی با جزئیات بیشتری ملاحظه می‌شود، در پیاده‌سازی روش تشخیص آسیب‌های پیشنهادی، ابتدا سازه حاوی ترک با مش‌بندی منظم به کمک روش المان محدود توسعه یافته مدل شده، و بعد مدلسازی صفحه دارای یک و سه حفره مدل شده است و مقادیر جابه‌جایی‌ها استخراج شده است. سپس، سازه‌ای با مقادیر مجهول آسیب، مدل شده

به منظور مدلسازی ریاضی سلسله مراتب اجتماعی گرگ‌ها (GWO) مناسب‌ترین گزینه را به عنوان آلفا در نظر می‌گیریم. به دنبال آن دومین و سومین جواب خوب بتا و دلتا نامیده می‌شوند. بقیه جواب‌های کاندید فرض می‌شود که امگا نام دارند. در الگوریتم بهینه‌یابی، شکار به وسیله گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا انجام می‌شود. گرگ‌های امگا نیز از این سه گرگ پیروی می‌کنند. مدلسازی ریاضی رفتار حلقه زدن دور طعمه (محاصره) با استفاده از روابط (۸ و ۹) انجام می‌شود:

(۸)

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)|$$

(۹)

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D}$$

که t نشان دهنده تکرار فعلی، A و C بردارهای ضرایب، $\vec{X}_p$ موقعیت طعمه و $\vec{X}$ نشان دهنده بردار موقعیت گرگ می‌باشد. بردارهای $\vec{A}$ و $\vec{C}$ به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (10)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (11)$$

که مولفه $\vec{a}$ به صورت خطی از ۲ تا صفر در هنگام تکرارهای متوالی کاهش می‌یابد. $\vec{r}_1$ و $\vec{r}_2$ نیز بردارهای تصادفی بین [۰ و ۱] می‌باشند. به منظور شبیه‌سازی ریاضیاتی، رفتار گرگ‌های خاکستری، فرض می‌شود که آلفا (بهترین کاندید جواب) بتا و دلتا دانش بهتری در خصوص موقعیت بالقوه طعمه دارند.

۵- روند الگوریتم شناسایی آسیب

همان‌گونه که پیشتر عنوان شد، در این مقاله، الگوریتم شناسایی ترک به کمک روش المان محدود توسعه یافته به همراه الگوریتم بهینه‌یابی ژنتیک و گرگ خاکستری آورده شده است. یک مسئله‌ی تشخیص ترک عددی معمولاً به صورت یک رویکرد بهینه‌یابی مطرح می‌شود. در این رویکرد تابع هدف برابر مقدار اختلاف بین پاسخ در سازه موجود و پاسخ سازه‌ای که روش بهینه‌یابی ژنتیک و گرگ خاکستری در هر گام موقعیت ترک آن را حدس می‌زند، بوده و متغیرها در نقاط مشخصی که همان مختصات حسگرها است، در نظر گرفته می‌شوند. در این مقاله، مختصات نوک ترک و مختصات مرکز و شعاع سوراخ به عنوان

نقطه، برداشت شده است مختصات نوک ترک برابر $X_{tip1} = -1$ ، $X_{tip2} = 0$ ، $Y_{tip1} = 0$ و $Y_{tip2} = 1$ در نظر گرفته شد و از یک مش 40×40 مانند شکل (۵) برای مدل روش المان محدود توسعه یافته استفاده شده است. موقعیت حسگرها نیز در نقاط مرزی صفحه در نظر گرفته شده است و در ادامه تاریخچه همگرایی الگوریتم روش بهینه‌یابی ژنتیک و گرگ خاکستری به همراه جدول نتایج دو الگوریتم آورده شده است.

شکل ۴. هندسه صفحه و الگوی بارگذاری روی آن

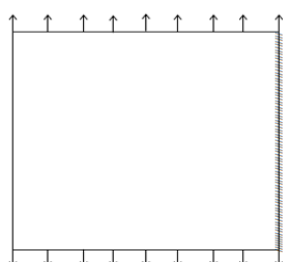


Fig. 4. Geometry of plate and pattern of loading.

شکل ۵. موقعیت ترک و آرایش مش‌بندی صفحه در نمونه اول

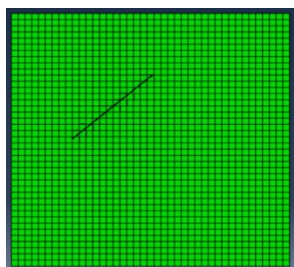


Fig. 5. Location of the crack and the meshing in the first model.

شکل ۶. تاریخچه همگرایی الگوریتم ژنتیک در شناسایی مختصات ترک

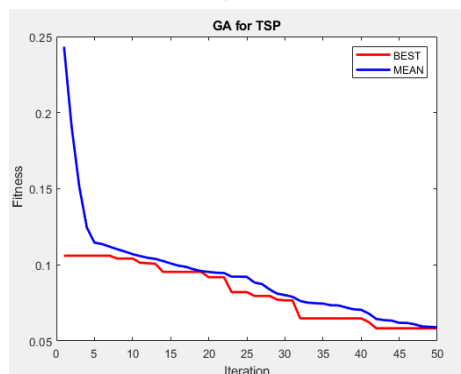


Fig. 6. Convergence of the Genetic algorithm in the identification of crack coordinates.

و با بهینه‌یابی تابع هدف مربوطه توسط الگوریتم‌های فراابتکاری، آسیب‌ها تشخیص داده می‌شوند. در روش پیشنهادی، برای مدل سازه با آسیب مجهول نیز از همان مش‌بندی سازه آسیب‌دیده بهره گرفته شده است. برای پیاده‌سازی هر دو مش‌بندی فوق می‌توان از روش المان محدود کلاسیک نیز بهره گرفت که منجر به بار محاسباتی بسیار بیشتری خواهد شد. دلیل این افزایش بار محاسباتی آن است که در گام‌های مختلف روش‌های بهینه‌یابی، موقعیت آسیب عوض می‌شود و در روش المان محدود کلاسیک که مش وابسته به موقعیت ترک است، باید مش جدید تولید شود که زمان زیادی را از محاسبات به خود اختصاص می‌دهد. اما روش المان محدود توسعه یافته، به دلیل مستقل بودن مش از موقعیت ترک، در همه گام‌ها از همان مش اولیه استفاده می‌کند، که زمان اجرای برنامه را بسیار کم می‌کند.

۶- نمونه‌های عددی

در این قسمت عملکرد روش پیشنهادی را روی دو مدل صفحه با ابعاد و بارگذاری متفاوت بررسی می‌کنیم. نمونه اول مربوط به سازه اول حاوی ترک داخلی است و نمونه دوم صفحه دارای یک حفره و نمونه سوم صفحه دارای سه حفره است که برای هر کدام از نمونه‌ها از هر دو الگوریتم ژنتیک و گرگ خاکستری برای شناسایی آسیب‌ها استفاده خواهد شد. همچنین آرایش سنسورها برای ثبت جابه‌جایی و کرنش‌های لازم در محاسبه تابع هدف در اطراف مرزهای سازه به تعداد ۶ الی ۸ عدد بسته به نوع مسئله و پیچیدگی آن پخش می‌شود.

۶-۱- سازه حاوی ترک در نمونه اول

در نمونه اول مطابق شکل (۴) یک صفحه با ابعاد 1×1 متر، که از سمت راست گیردار بوده و در دو لبه بالا و پایین تحت بارکشی قرار گرفته است را مدلسازی کرده ایم.

یک تابع خطا به عنوان تابع هدف مطابق رابطه زیر مدنظر است:

$$O(v) = \frac{\|v(\beta_i) - v^0\|}{\|v^0\|} \quad (14)$$

ورق صفحه مدل شده از جنس آلومینیوم با مدول الاستیسیته 70 GPa و ضریب پواسون 0.33 است، برای انجام تشخیص آسیب پاسخ حسگرها در راستای قائم در سازه اصلی در 7

جدول ۱. مقایسه مختصات تخمین زده شده چهار پارامتر در مقایسه با مختصات واقعی ترک (الگوریتم ژنتیک)

Under observation Model	Case of observation	X_1	Y_1	X_2	Y_2	
Two-dimensional plate with cracks	Actual structure values	-1.00	0.00	0.00	1.00	0.002898
	GA algorithms values	-1.03	0.02	0.03	0.94	

Table 1. Comparison of the estimated coordinates of the crack four parameters compared to the actual crack coordinates (GA)

جدول ۲. مقایسه مختصات تخمین زده شده چهار پارامتر ترک در مقایسه با مختصات واقعی ترک (الگوریتم گرگ خاکستری)

Under observation Model	Case of observation	X_1	Y_1	X_2	Y_2	Fitness Function
Two-dimensional plate with cracks	Actual structure values	-1.00	0.00	0.00	1.00	0.001349
	GWO algorithms values	-1.00	0.031	0.0028	1.010	

Table 2. Comparison of the estimated coordinates of the crack four parameters compared to the actual crack coordinates (GWO)

تاریخچه همگرایی الگوریتم فراابتکاری ژنتیک و گرگ خاکستری به ترتیب در اشکال (۱۰ و ۱۱) آورده شده است. همچنین جدول مقایسه خروجی‌های الگوریتم‌ها و مقایسه آن با مقادیر مدل مرجع در جداول (۳ و ۴) آورده شده است.

۳-۶- سازه حاوی سه سوراخ نامنظم در نمونه سوم

در شکل شماره (۹) مدل صفحه دارای سه سوراخ مرکزی آورده شده است. در نمونه سوم مختصات سه حفره دایره‌ای نامنظم در صفحه با مختصات $X_{Hole1}=0.25$ ، $Y_{Hole1}=0.25$ ، $D_{Hole1}=0.1$ و $X_{Hole2}=0.5$ ، $Y_{Hole2}=1$ ، $D_{Hole2}=0.3$ و $X_{Hole3}=0.7$ ، $Y_{Hole3}=1.7$ ، $D_{Hole3}=0.2$ در نظر گرفته شده است و در نرم‌افزار آباکوس از تکنیک مش‌زنی آزاد برای مدل روش المان محدود استفاده شده است. در این نمونه نیز می‌توان علاوه بر شناسایی مختصات مرکز حفره‌ها مقادیر شعاع آن‌ها را نیز توسط برنامه نوشته شده شناسایی کرد.

تاریخچه همگرایی الگوریتم ژنتیک و گرگ خاکستری به ترتیب در اشکال (۱۲ و ۱۳) نشان داده شده است. همچنین جدول مقایسه خروجی‌های الگوریتم‌ها و مقایسه آن با مقادیر مدل مرجع در جداول (۵ و ۶) آورده شده است.

شکل ۷. تاریخچه همگرایی الگوریتم گرگ خاکستری در شناسایی مختصات ترک

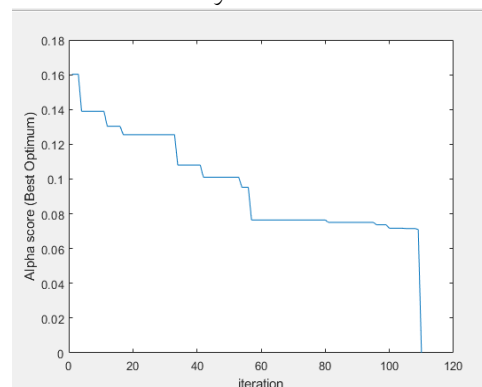


Fig. 7. Convergence of the grey wolf algorithm in the identification of crack coordinates.

۲-۶- سازه حاوی یک سوراخ مرکزی در نمونه دوم

در شکل (۸) مدل صفحه دارای سوراخ مرکزی آورده شده است. مختصات مرکز حفره دایره‌ای در مرکز و شعاع آن برابر $D_{Hole}=0.25$ ، $X_{Hole}=0.5$ ، $Y_{Hole}=1$ در نظر گرفته شده است و در نرم‌افزار آباکوس از تکنیک مش‌زنی آزاد برای مدل روش المان محدود استفاده شده است. مشخصات صفحه مدل شده نیز مشابه نمونه مورد آزمایش اول می‌باشد.

شکل ۸. هندسه، موقعیت حفره و الگوریتم مش زنی صفحه

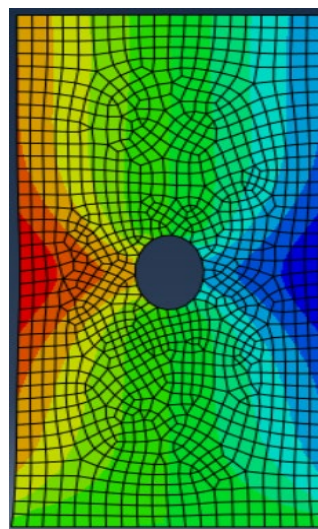


Fig. 8. Geometry, Location of the hole and meshing pattern of plate.

شکل ۹. هندسه، موقعیت سه حفره و الگوریتم مش زنی صفحه

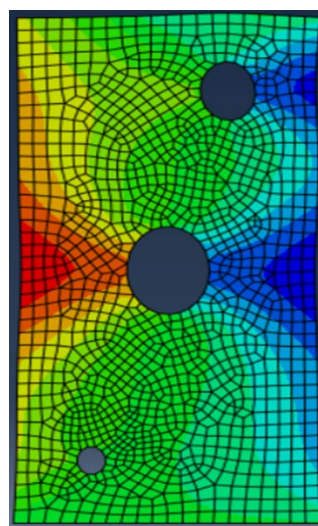


Fig. 9. Geometry, Location of three hole and meshing pattern of plate.

شکل ۱۰. تاریخچه همگرایی الگوریتم ژنتیک در شناسایی حفره

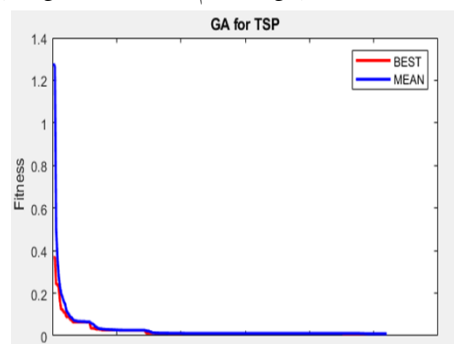


Fig. 10. Convergence of the Genetic algorithm in the detection of hole coordinates.

شکل ۱۱. تاریخچه همگرایی الگوریتم گرگ خاکستری در شناسایی

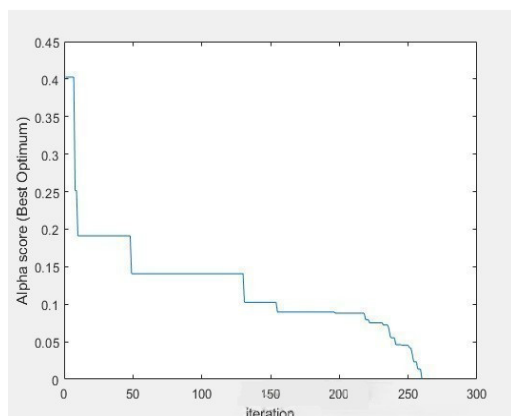


Fig. 11. Convergence of the Grey wolf algorithm in the detection of hole coordinates.

شکل ۱۲. تاریخچه همگرایی الگوریتم ژنتیک در شناسایی ۳ حفره

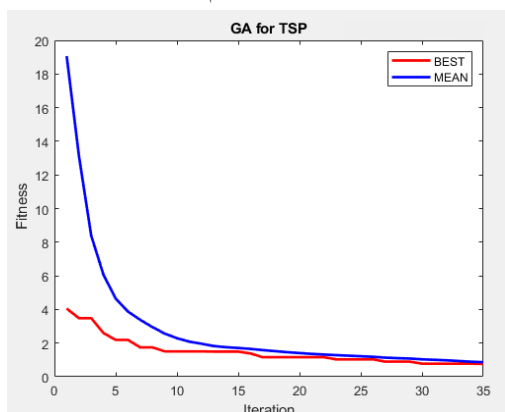


Fig. 12. Convergence of the Genetic algorithm in the detection of 3 holes coordinates.

شکل ۱۳. تاریخچه همگرایی الگوریتم گرگ خاکستری در شناسایی ۳ حفره

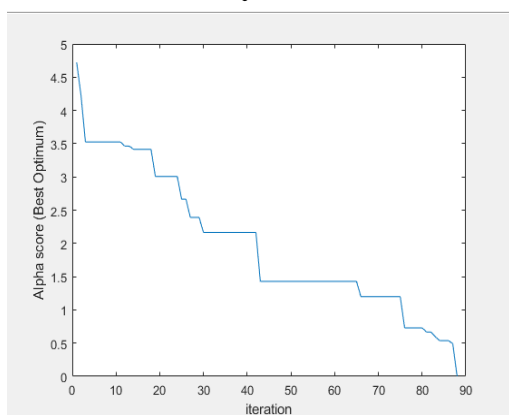


Fig. 13. Convergence of the grey wolf algorithm in the detection of 3 holes coordinates.

جدول ۳. مقایسه مختصات تخمین زده شده سه پارامتر حفره در مقایسه با مختصات واقعی حفره (الگوریتم ژنتیک)

Under observation model	Case of observation	X_1	Y_1	D_1	Fitness Function
Two-dimensional plate with one Hole	Actual structure values	1.00	0.5	0.25	0.097
	GA algorithms values	0.99	0.499	0.246	

Table 3. Comparison of the estimated coordinates of the hole three parameters compared to the actual hole coordinates (GA)

جدول ۴. مقایسه مختصات تخمین زده شده سه پارامتر حفره در مقایسه با مختصات واقعی حفره (الگوریتم گرگ خاکستری)

Under observation model	Case of observation	X_1	Y_1	D_1	Fitness Function
Two-dimensional plate with one Hole	Actual structure values	1.00	0.5	0.25	0.0135
	GWO algorithms values	0.998	0.498	0.248	

Table 4. Comparison of the estimated coordinates of the hole three parameters compared to the actual hole coordinates (GWO)

جدول ۵. مقایسه مختصات تخمین زده شده سه پارامتر سه حفره در مقایسه با مختصات واقعی حفره‌ها (الگوریتم ژنتیک)

Under observation model	Case of observation	D_1	X_1	Y_1	D_2	X_2	Y_2	D_3	X_3	Y_3	Fitness Function
Two-dimensional plate with one Hole	Actual values	0.1	0.25	0.25	0.3	0.5	1.00	0.2	0.65	1.6	0.1764
	GA algorithms values	0.1	0.26	0.312	0.29	0.501	0.97	0.195	0.67	1.66	

Table 5. Comparison of the estimated coordinates of the 3holes three parameters compared to the actual holes coordinates (GA)

جدول ۶. مقایسه مختصات تخمین زده شده سه پارامتر سه حفره در مقایسه با مختصات واقعی حفره‌ها (الگوریتم گرگ خاکستری)

Under observation model	Case of observation	D_1	X_1	Y_1	D_2	X_2	Y_2	D_3	X_3	Y_3	Fitness Function
Two-dimensional plate with one Hole	Actual values	0.1	0.25	0.25	0.3	0.5	1.00	0.2	0.65	1.6	0.1764
	GWO algorithms values	0.1	0.26	0.301	0.285	0.47	1.00	0.211	0.749	1.609	

Table 6. Comparison of the estimated coordinates of the 3holes three parameters compared to the actual holes coordinates (GWO)

المان محدود کلاسیک نیاز به مش‌بندی مجدد بوده و زمان محاسباتی بالا می‌رود. در نتیجه، روش المان محدود توسعه‌یافته به همراه روش بهینه‌یابی ژنتیک و گرگ خاکستری، ترکیب قابل قبولی برای شناسایی آسیب در این نوع از سازه‌های دوبعدی می‌باشد. می‌توان با ترکیب‌های دیگری از این روش‌ها برای انواع دیگری از سازه‌ها از قبیل پوسته‌ها، قاب‌ها، تیرها و غیره، روش‌های ردیابی ترک مشابه را توسعه داد.

۸- مراجع

- [1] C. Ghee Koh, L. Ming See, T. Balendra, Damage detection of buildings: numerical and experimental studies, Journal of structural engineering, 121(8) (1995)1155-1160.
- [2] Y.-L. Xu, J. He, Smart civil structures, CRC Press, 2017.
- [3] J.P. Amezquita-Sanchez, H. Adeli, Signal processing techniques for vibration-based health monitoring of smart structures, Archives of Computational Methods in Engineering, 23(1) (2016) 1-15.
- [4] L. Qiu, S. Yuan, C. Boller, An adaptive guided wave Gaussian mixture model for damage monitoring under time-varying conditions: Validation in a full-scale aircraft fatigue test, Structural health monitoring, 5(16) (2017)517-501.
- [5] P. Liu, H.J. Lim, S. Yang, H. Sohn, C.H. Lee, Y. Yi, D. Kim, J. Jung, I.-h. Bae, Development of a "stick-and-detect" wireless sensor node for fatigue crack detection, Structural Health Monitoring, 2(16) (2017) 163-153.
- [6] J. Xu, Z. Fu, Q. Han, G. Lacidogna, A. Carpinteri, Microcracking monitoring and fracture evaluation for crumb rubber concrete based on acoustic emission techniques, Structural Health Monitoring, 4(17) (2018) 958-946.
- [7] D. Reagan, A. Sabato, C. Niezrecki, Feasibility of using digital image correlation for unmanned aerial vehicle structural health monitoring of bridges, Structural Health Monitoring, 5(17) (2018) 1072 1056.
- [8] W.-H. Hu, S. Said, R.G. Rohrmann, Á. Cunha, J. Teng, Continuous dynamic monitoring of a prestressed concrete bridge based on strain, inclination and crack measurements over a 14-year span, Structural Health Monitoring, 5(17) (2018) 1094-1073.
- [9] H. Kim, E. Ahn, M. Shin, S.-H. Sim, Crack and noncrack classification from concrete surface images using machine learning, Structural Health Monitoring, 3(18) (2019) -725 738.
- [10] J. Valença, D. Dias-da-Costa, E. Júlio, H. Araújo, H. Costa, Automatic crack monitoring using photogrammetry and image processing, Measurement, 1(46) (2013) 441-433.
- [11] D. Dias-da-Costa, J. Valença, E. Júlio, H. Araújo, Crack propagation monitoring using an image

شکل ۱۴. فلوچارت روند حل مسئله و نحوه ارتباط آن با الگوریتم‌های فراابتکاری

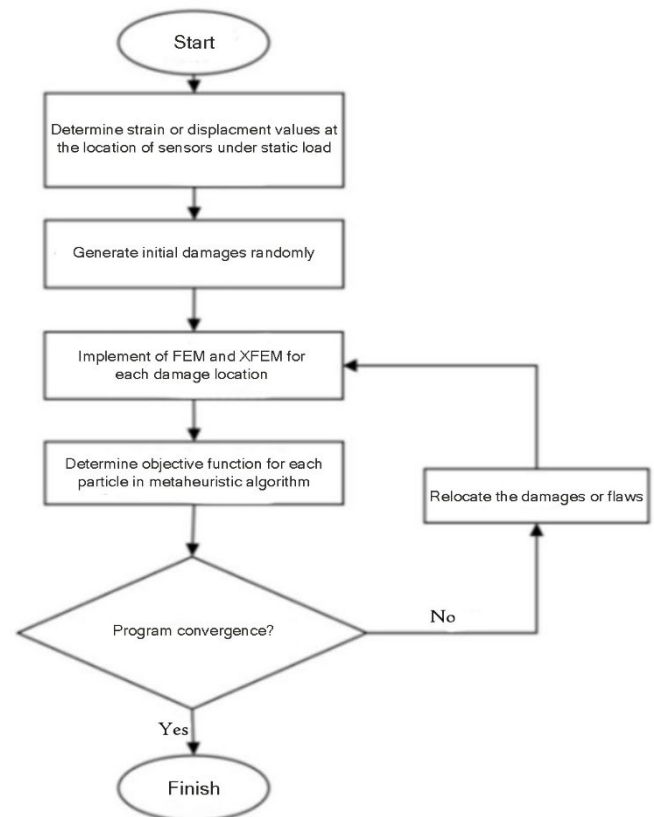


Fig. 14. Flowchart of the problem-solving process and the relation with metaheuristic algorithms.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش شبیه‌سازی استاتیکی برای ردیابی آسیب در محیط دوبعدی، به عنوان یک آزمایش غیر مخرب سازه‌ای، ارائه و بررسی شد. در این روش، مسئله معکوس با استفاده از روش بهینه‌یابی ژنتیک و گرگ خاکستری حل شد و تحلیل سازه در هر گام به وسیله‌ی روش المان محدود توسعه‌یافته با یک مش ثابت که فقط موقعیت ترک در آن تغییر می‌کند، حل شد. همچنین، عملکرد این روش در سه نمونه با موقعیت‌های مختلف ترک و حفره بررسی شد. نتایج نشان داد که روش بهینه‌یابی ژنتیک و گرگ خاکستری می‌تواند به‌طور مناسبی مسئله را حل کند و با حجم محاسباتی مطلوبی موقعیت آسیب از نوع ترک و یا حفره را شناسایی کند. علاوه بر این، روش المان محدود توسعه‌یافته با یک مش ثابت قادر به تحلیل سازه با موقعیت‌های مختلف ترک است، در حالی که در روش

- [22] Livani, M.A., Khaji, N. & Zakian, P. Identification of multiple flaws in 2D structures using dynamic extended spectral finite element method with a universally enhanced meta-heuristic optimizer. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 57 (2018), Volume 57, Issue 2, pp 605–623.
- [23] Zhao, Wenhui & Du, Chengbin & Li, Xinzhu, "Flaw detection in concrete media using XFEM and an improved artificial fish swarm algorithm,". IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, April 2020, V. 780
- [24] Faisal Al Thobiani, Samir Khatir, Brahim Benaissa, Emad Ghandourah, Seyedali Mirjalili, Magd Abdel Wahab, A hybrid PSO and Grey Wolf Optimization algorithm for static and dynamic crack identification, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Volume 118, 2022.
- [25] Mohammadi S. 2002 *Extended Finite Element Method*. Wiley/Blackwell Publishing, the UK.
- [26] Moran B., Sukumar N., Moes N. & Belytschko T. 2000 Extended finite element method for three dimensional crack modelling. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 48 1549–1570.
- [27] Dolbow J., Sukumar N., Daux C., Moes N. & Belytschko T. 2000 Arbitrary branched and intersecting cracks with the extended finite element method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 48 1741–1760.
- [28] Kaveh A., Bakhshpoori T. & Afshari E. 2014 An efficient hybrid Particle Swarm and Swallow Swarm Optimization algorithm. *Computers and Structures*, 143 40–45.
- [29] Kaveh A. 2014 *Advances in Metaheuristic Algorithms for Optimal Design of Structures*. Springer Verlag, Switzerland.
- [30] Khoei, Amir. (2015). *Extended Finite Element Method: Theory and Applications*. *Extended Finite Element Method: Theory and Applications*.
- [31] S. Mirjalili, S.M. Mirjalili, A. Lewis, Grey wolf optimizer, *Advances in engineering software*, 2014.
- deformation approach, *Structural Control and Health Monitoring*, 10(24) (2017) e1973.
- [12] T. H. Yi, H. N. Li, M. Gu, Experimental assessment of high-rate GPS receivers for deformation monitoring of bridge, *Measurement*, 1(46) (2013) 432–420
- [13] A. Mohan, S. Poobal, Crack detection using image processing: A critical review and analysis, *Alexandria Engineering Journal*, 2(57) (2018) 798–787.
- [14] Ostachowicz W, M, 2008 Damage detection of structures using spectral finite element method. *Computers and Structures*, 86 454–462.
- [15] Khaji N. & Kazemi Nourini H. 2012 Detection of a through-thickness crack based on elastic wave scattering in plates, Part II: Inverse Solution. *Asian Journal of Civil Engineering*, 13 433–454.
- [16] Yang Z. L., Liu G. R. & Lam K. Y. 2002 An inverse procedure for crack detection using integral strain measured by optical fibers. *Smart Materials and Structures*, 11 72–78.
- [17] Rabinovich D., Givoli D. & Vigdergauz S. 2009 Crack identification by 'arrival time' using XFEM and a genetic algorithm. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 77 337–359.
- [18] Waisman H., Chatzi E. & Smyth A. W. 2010 Detection and quantification of flaws in structures by the extended finite element method and genetic algorithms. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 82 303–328.
- [19] Chatzi E. N., Hiriyyur B., Waisman H. & Smyth A.W. Experimental application and enhancement of the XFEM-GA algorithm for the detection of flaws in structures. *Computers and Structures*, 89 556–570, 2011.
- [20] P. da S. L. Alexandrino, G. F. Gomes, and S. S. Cunha, "A robust optimization for damage detection using multiobjective genetic algorithm, neural network and fuzzy decision making," *Inverse Probl. Sci. Eng.*, vol. 28, no. 1, pp. 21–46, Jan. 2020.
- [21] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, "Grey Wolf Optimizer," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 69, pp. 46–61, Mar. 2014.

Detection of irregular flaws in 2D domains using extended finite element method and metaheuristic algorithms, GA and GWO

A. Fakheri Kouzekanan¹, N. Khaji^{2*}

1- M.Sc. in Structural Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University

2- Professor of Civil Engineering, Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University, Japan

nkhaji@hiroshima-u.ac.jp

Abstract

Nowadays, one of the important issues in the industry is the failure of parts due to the presence of holes or cracks. Among the numerical calculation tools, the classical and Extended finite element method is known as the most useful numerical tools in solving engineering science problems.

Identifying and investigating the types of cracks, flaws and cavities in structures is one of the most challenging issues in the field of engineering. In this article, the crack detection of two-dimensional (2D) structures using the Extended finite element method (XFEM) along with genetic algorithm (GA) and grey wolf optimization method (GWO) to detect the existing crack and flaws by minimizing an error function which is also called as objective function that the evaluation of it, is based on difference between sensor measurements and suggested structure responses in each try of the algorithm. Damage detecting in 2D domains, as a non-destructive evaluation problem, is investigated using the Extended finite element method along with the optimization method of genetic algorithm and grey wolf. The Extended finite element method has been used to model the structure containing cracks and holes in the ABAQUS program, and genetic optimization and grey wolf method have been used to determine the location of the damage in which the codes were in MATLAB program. The Extended finite element method is a powerful tool for the analysis of structures containing cracks without remeshing and is therefore suitable for an iterative process in structural analysis. Also, in these problems, due to the wide range of parameters, it is not logical and rational to use mathematical methods. For this reason, meta heuristic methods have been developed, and grey wolf optimization methods and genetic algorithm are among these common non-gradient methods that are suitable for solving the inverse problem. This problem is set so that the optimizer algorithm finds the existing crack coordinates or holes coordinates by minimizing an objective function based on the values measured by the sensors installed on the structure. Among the limitations of the classical finite element method in the investigation of various problems in the field of fault and crack detection, we can point out the dependence of the crack or cavity on the finite element mesh, re-meshing and in other special cases the use of singular elements, which are completely removed by using the Extended finite element. In this research, in order to identify the damage, the genetic optimization algorithm and the gray wolf have been used. These algorithms are designed in such a way to determine the characteristics of the damage by minimizing an error function. The defined error function is defined as the difference between the response obtained from the algorithm analysis and the response recorded in the main structure modeled in ABAQUS software, at the location of the sensors. Finally, three reference numerical examples have been solved to evaluate the capability and accuracy of the proposed method, and the result of the results shows a reduction in the cost of solving and an increase in the accuracy of the results.

Keywords: Extended finite element method, Flaw detection, Metaheuristic algorithms, Inverse problem.