

تشخیص آسیب در سازه‌های فلزی با استفاده از اطلاعات خیز استاتیکی و الگوریتم ژنتیک

زهرا تبریزیان^۱، مرتضی حسینعلی بیگی^۲ و غلامرضا قدرتی امیری^{۳*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله:	
پذیرش مقاله:	
واژگان کلیدی:	
پل قوسی فلزی،	تشخیص زود هنگام محل و شدت آسیب های رخ داده در سازه ها با کمک روش-
پل خرپایی،	های غیر مخرب از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در این مقاله به تشخیص آسیب
اطلاعات استاتیکی،	در سازه ها با استفاده از اطلاعات استاتیکی پرداخته شده است. مدل سازی آسیب،
الگوریتم بهینه یابی ژنتیک،	به صورت کاهش در پارامترهای سازه ای انجام شده است. ابتدا نیروهای استاتیکی
تشخیص آسیب.	به برخی درجات آزادی سازه اعمال شده و پاسخ استاتیکی همان درجات ثبت
	گردیده است. نهایتاً، تابع هدفی بر اساس اختلاف بین بردارهای جابجایی در حالت
	سازه سالم و آسیب دیده تعریف شده است، بطوریکه جواب بهینه این تابع، مبین
	آسیب های بوجود آمده در سازه می باشد. برای حل مسئله ی بهینه یابی، از
	الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. به منظور بررسی کارایی روش ارائه شده، مدلی
	از پل قوسی فلزی و همچنین پل خرپایی در نظر گرفته شده و سناریو های آسیب
	مختلفی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که
	الگوریتم ژنتیک با تابع هدف ارائه شده، قادر است تا با دقت قابل قبولی، حتی در
	حضور نوفه های تصادفی، مکان و مقدار آسیب های احتمالی را شناسایی کند.

۱- مقدمه

شدت های متفاوت اتفاق می افتند. بنابراین تعیین محل دقیق و مقدار آسیب موجود در سازه ها و اقدام به موقع در جهت ترمیم آسیب دیدگی های موجود، امری ضروری به نظر می رسد. در سال های اخیر تحقیقات زیادی برای تشخیص آسیب در انواع مختلف سازه ها انجام گرفته است. هدف اصلی محققین، تلاش جهت افزایش دقت و سرعت تشخیص آسیب در سازه ها بوده است. اکثر روش های تشخیص آسیب، بر مبنای ثبت و آنالیز اطلاعات مودال سازه ها استوار می باشند. به عبارت دیگر، ارتباط تنگاتنگ موجود بین آسیب ها و مشخصات دینامیکی سازه ها، دست مایه اکثر روش های شناسایی آسیب بوده است. خلاصه جامعی از این روش ها، در مراجع [۱ و ۲] آمده است. برخی از روش های شناسایی آسیب، با ارائه شاخصی بر اساس

سازه های مختلف از قبیل ساختمان ها، پل ها و سدها، در طول زمان بهره برداری خود در معرض آسیب دیدگی قرار می گیرند. عواملی از قبیل خستگی، بارگذاری های ناگهانی و شرایط محیطی، از مهم ترین عوامل رخداد این آسیب ها می باشند. این آسیب دیدگی ها گرچه در ظاهر سازه مشکلی بوجود نمی آورند، اما ممکن است بهره برداری سازه را کاملاً مختل سازند و در آینده باعث خسارات عمده و جدی گردند. آسیب ها در مکان های مختلف و با

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: ghodrati@iust.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران
 ۲. استادیار، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران
 ۳. استاد، قطب علمی مطالعات بنیادین در مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

حالاتی که اطلاعات تعداد محدودی از مودها در دسترس باشد، انجام دادند.

تبریزیان و همکاران در سال ۲۰۱۳، روشی جدید جهت تشخیص محل و شدت آسیب در سازه‌های مهندسی ارائه دادند. روش آنها، بر مبنای تعریف تابع هدف بر اساس شاخص آسیب چند گانه استوار بود که پاسخ‌های بهینه این تابع، با کمک الگوریتم بهینه‌یابی Big Bang-Big Crunch (BB-BC) محاسبه می‌شد. مهم‌ترین ویژگی این بهینه‌یاب را می‌توان در رویکرد تلفیقی آن دانست، بطوریکه جستجوی فضای پاسخ، با یک روند منطقی ادامه می‌یابد و همگرایی الگوریتم بسیار سریع‌تر حاصل می‌گردد [۹].

در کنار استفاده از اطلاعات مودال، برخی از محققین، با کمک تحریک استاتیکی سازه‌ها، اقدام به تشخیص آسیب در سازه‌ها کرده‌اند. تحریک استاتیکی، به نسبت ساده‌تر می‌باشد و امکان رخداد آسیب‌های ناخواسته در حین تحریک سازه نیز به مراتب کمتر می‌باشد.

صنایعی و همکاران روش‌های مختلفی جهت تشخیص آسیب از طریق تحریک استاتیکی سازه‌ها، ارائه دادند. آنها روش‌های خود را به صورت مطالعات تئوری و آزمایشگاهی مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند [۱۰، ۱۱ و ۱۲]. هلمستاد و شین، روش جدیدی جهت تشخیص آسیب، از طریق انجام آنالیزهای حساسیت بر روی پاسخ‌های استاتیکی، بیان نمودند [۱۳]. مهم‌ترین مزیت روش آنها این بود که به داده‌های اندازه‌گیری شده بسیار کمی نیاز داشت، ولی حجم بالای محاسبات لازم جهت تشخیص آسیب، از جمله معایب اصلی محسوب می‌شد.

علی رغم موفقیت روش‌های اشاره شده در تشخیص آسیب در سازه‌ها، تلاش جهت ارائه روش‌هایی ساده‌تر و سریع‌تر ادامه دارد. همچنین، با توجه به محدودیت‌های عملی موجود در تجهیز و تحریک سازه‌ها، روش‌هایی که بتوانند با کمک تحریک درجات آزادی محدودتری به جواب برسند، از اهمیت زیادی برخوردار هستند. با توجه

مشخصات دینامیکی، وجود آسیب را تشخیص داده‌اند. از جمله این مطالعات می‌توان به مراجع [۳، ۴ و ۵] اشاره کرد. گرچه این روش‌ها در تشخیص محل آسیب موفق عمل می‌نمایند، اما قادر به تعیین شدت آسیب‌ها نیستند. به منظور ارائه روش‌هایی که قادر به تشخیص محل و شدت آسیب‌های محتمل در سازه‌ها باشند، برخی از محققین، مساله تشخیص آسیب را از دیدگاه یک مساله بهینه‌یابی مورد بررسی و ارزیابی قرار داده‌اند.

فریسول و پنی تلاش کردند تا با ترکیب الگوریتم ژنتیک و الگوریتم حساسیت ویژه، روشی برای تعیین موقعیت خرابی در یک تیر طره ارائه نمایند [۶]. روش آنها با صحت سنجی بر روی نمونه آزمایشگاهی، نتایج قابل قبولی داشت.

برنشتین و ریشتر، تابع هدفی را بر اساس تغییرات مدول یانگ معرفی کردند که در واقع کاهش مدول یانگ، شاخصی برای کاهش سختی و خرابی، در نظر گرفته شد [۷]. آنها تلاش کردند تا با کمک الگوریتم ژنتیک تابع هدف پیشنهادی شان را بهینه کنند. به عبارت دیگر، آنها با ارائه مدلی اولیه از سازه مطالعه شده، به بروزرسانی پارامترهای سازه بر اساس اطلاعات ثبت شده از تحریک سازه مطالعه شده پرداختند. از این روش برای شناسایی خرابی در یک تیر و یک صفحه استفاده شد. تیر مطالعه شده، یک تیر دوازده المانی بود که مدول یانگ المان نهم آن کاهش داده شده بود. نتایج بدست آمده، حاکی از توانایی روش این محققین در تشخیص محل و شدت آسیب بود.

قدرتی امیری و همکاران، با کمک اطلاعات مودال سازه آسیب دیده و با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌یابی ژنتیک و جستجوی الگو، روشی جهت تشخیص آسیب در صفحات ارائه دادند. آنها کارآیی روش خود را از طریق بررسی سناریوهای مختلف مورد ارزیابی قرار دادند [۸]. همچنین، مطالعاتی پیرامون قابلیت روش ارائه شده در

۲- الگوریتم بهینه یابی ژنتیک

فلسفه اصلی روش‌های بهینه یابی را می‌توان در رویکرد جستجویی آنها خلاصه کرد. این روش‌ها، به دنبال یافتن پاسخ‌های بهینه یک تابع، از طریق جستجوی منطقی دامنه پاسخ‌های محتمل، می‌باشند که در بیشتر موارد، هدف از پاسخ‌های بهینه، محاسبه نقاط اکسترمم مطلق یک تابع می‌باشد. الگوریتم ژنتیک در سال ۱۹۷۵ توسط هالند و به انگیزه رسیدن به یک الگوریتم قوی برای بهینه یابی پایه ریزی شده است [۱۵]. این الگوریتم، یک روش جستجویی و بهینه سازی بر پایه اصول علم ژنتیک و انتخاب طبیعی می‌باشد. به بیان دیگر، در این الگوریتم، رویکرد منطقی جستجوی دامنه پاسخ‌ها، بر اساس مبانی علم ژنتیک و وراثت، صورت می‌پذیرد. به این صورت که ابتدا جمعیتی متشکل از چند نمونه تصادفی انتخاب می‌شوند. سپس با کمک مبانی علم ژنتیک، برازندگی سیستم به سمت مقدار اکسترمم نمو پیدا می‌کند.

برخی از مهم‌ترین مزایای الگوریتم ژنتیک به شرح زیر می‌باشد:

- سازگاری خوبی با انواع متغیرهای پیوسته و گسسته، دارد.

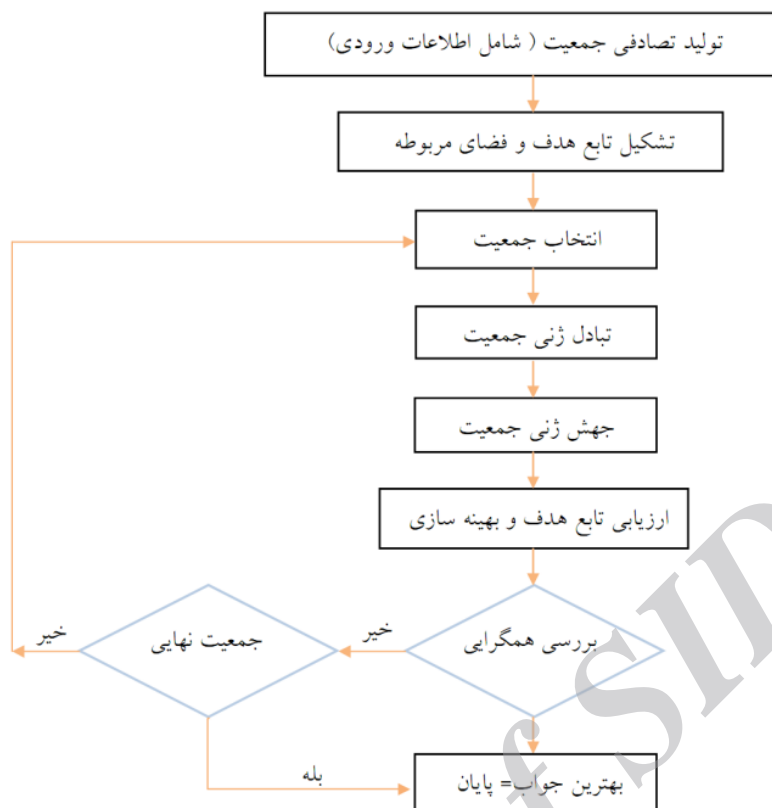
- نیاز به اطلاعات و محاسبات فرعی ندارد.

- دارای انعطاف پذیری مناسب جهت بهینه یابی در توابع پیچیده می‌باشد.

- هماهنگی و سازگاری مناسبی جهت کار با اطلاعات عددی، آزمایشگاهی و تحلیلی دارد.

فلوچارت و روال کلی الگوریتم بهینه یابی ژنتیک در شکل ۱ ارائه شده است.

به اقداماتی که در گذشته صورت گرفته بود، ماوسن و همکاران در سال ۲۰۱۱ حساسیت شکل‌های مدی اصلی و تغییر شکل‌های استاتیکی را برای شناسایی آسیب در یک تیر طره‌ای بررسی نمودند. در این تحقیق آنها بر روی رابطه اساسی بین شکل مدی و تغییر شکل استاتیکی تیرها بحث نمودند. تیر مورد بحث آنها تیر طره اولر - برنولی دارای ترک بود. نتایج نشان داد، حساسیت کلی سیستم شامل تئوری خاص برای بهینه نمودن شناسایی آسیب در تیر طره می‌باشد [۱۴]. در این مقاله، روشی جدید بر اساس تحریک استاتیکی برخی از درجات آزادی سازه‌ها ارائه شده است. برای این منظور، تابع هدفی بر اساس پاسخ‌های استاتیکی درجات تحریک شده، تعریف و با کمک الگوریتم بهینه یابی ژنتیک، پاسخ‌های بهینه این تابع محاسبه گردیده است. اساس کار، بر پایه تحریک استاتیکی تعداد محدودی از درجات آزادی سازه استوار می‌باشد. به منظور بررسی کارایی روش ارائه شده در تشخیص آسیب در سازه‌ها، سناریوهای مختلفی از سازه‌هایی نظیر خرپا و پل قوسی فلزی، مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین، کارایی روش ارائه شده در تشخیص آسیب در حالت‌های واقعی‌تر، از طریق افزودن سطوح مختلفی از نوفه‌های اتفاقی به پاسخ‌های استاتیکی سازه آسیب دیده، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده حاکی از سرعت و دقت بالای روش ارائه شده در تشخیص محل و شدت آسیب‌های رخ داده در سازه‌ها می‌باشد. همچنین، دقت بالای موجود در نتایج مربوط به اطلاعات نوفه دار، بیانگر پایداری روش ارائه شده در تشخیص آسیب در حالات عملی می‌باشد.



شکل ۱- فلوچارت کلی الگوریتم بهینه یابی ژنتیک.

الگوریتم جهت بهینه یابی تابع هدف ارائه شده در بخش بعدی، استفاده می‌گردد.

۳- تئوری تشخیص آسیب

همانطوری که قبلاً هم اشاره شده است، در این مقاله، مسالهی تشخیص آسیب بصورت یک مسالهی بهینه یابی تعریف می‌گردد. در این بخش جزئیات تابع هدف تعریف شده ارائه می‌گردد.

آسیب معمولاً بصورت کاهش ضرایب سختی تعریف می‌گردد. اگر ماتریس سختی سازه‌ی سالم با $[K^{ud}]$ نشان داده شود، در اینصورت، ماتریس سختی سازه‌ی آسیب دیده $([k^d])$ را بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$[K^d] = [K^{ud}] + [\Delta K] \quad (1)$$

که در آن، $[\Delta K]$ ، ماتریس تغییرات سختی می‌باشد. برای کاهش سختی و اعمال آن در ماتریس سختی، روش‌های مختلفی موجود است که از آن جمله می‌توان به کاهش

اولین مرحله در الگوریتم ژنتیک کد کردن متغیرهاست. این عمل که ساختار کروموزوم را مشخص می‌سازد به اشکال مختلف می‌تواند انجام پذیرد. پس از تشکیل کروموزوم‌ها الگوریتم ژنتیک به طور خلاصه با استفاده از سه عملگر زیر به جستجوی پاسخ می‌پردازد:

۱- عملگر تکثیر

۲- عملگر پیوند

۳- عملگر جهش

از دیدگاه نظری و تجربی ثابت شده است که الگوریتم ژنتیک قابلیت جستجوی فضا‌های پیچیده، نظیر فضا‌های دارای نقاط اکسترمم نسبی متعدد را دارا می‌باشد.

نخستین کاربرد الگوریتم ژنتیک در طراحی بهینه سازه‌ها، توسط گلدبرگ انجام شد. او سطح مقطع خرپا را با اعمال محدودیت تنش بهینه کرد [۱۶].

پس از آن، محققین متعددی از این روش جهت طراحی بهینه سازه‌ها استفاده کرده‌اند. در این مقاله، از این

(۵-الف) و (۵-ج) و انجام عملیات ساده سازی ریاضی، می توان جابجایی استاتیکی متناظر با سازه های سالم و آسیب دیده را بصورت زیر تعریف کرد:

$$\{u^{ud}\} = [K^{ud}]^{-1} \{F\} \quad (۶)$$

(۷)

$$\{u^d\} = ([K^{ud}]^{-1} - [K^{ud}]^{-1}[\Delta K^{ud}][K^{ud}]^{-1} + [K^{ud}]^{-1}[\Delta K^{ud}][K^{ud}]^{-1}[\Delta K^{ud}][K^{ud}]^{-1})\{F\}$$

اختلاف جابجایی استاتیکی بین حالات سازه ی سالم و آسیب دیده، بصورت زیر تعریف می گردد:

$$\{\Delta u\} = \{u^{ud}\} - \{u^d\} \quad (۸)$$

تابع هدف پیشنهادی، بصورت زیر تعریف می شود:

$$f(d_1, d_2, \dots, d_{N_e}) = \sum_{i=1}^n \alpha \left\| \{\Delta u\}^m - \{\Delta u\}^a \right\|^2 \quad (۹)$$

که در آن، N_e ، تعداد المان های سازه؛ n ، تعداد گره هایی که تغییر مکان آنها ثبت شده است؛ و α ، ضریب وزنی برای یافتن مقدار تابع هدف مناسب، می باشد. همچنین، $\{\Delta u\}^m$ ، بردار اختلاف جابجایی استاتیکی سازه ی سالم و آسیب دیده (محاسبه شده با کمک اطلاعات ثبت شده از سازه ی پایش شده) و $\{\Delta u\}^a$ ، بردار اختلاف جابجایی سازه ی سالم و مدل آنالیزی سازه ی آسیب دیده با ضرایب آسیب مجهول (محاسبه شده با کمک روابط (۷) و (۸)) می باشد. لازم به ذکر است که نماد $\|\cdot\|$ ، به معنای نرم دوم آرگومان داخل، می باشد. پس از تشکیل تابع هدف، با کمک روند بهینه یابی اشاره شده در بخش قبلی، پاسخ های بهینه ی این تابع شناسایی می گردند. این پاسخ ها، مبین آسیب بوجود آمده در المان های سازه خواهد بود.

۴- اعمال اثرات نوفه در تشخیص آسیب

معمولا عواملی نظیر شرایط محیطی (مثل تاثیرات درجه حرارت، باد و ...) باعث می شود تا اطلاعات ثبت شده از سازه ها، خالص و دقیق نباشند. بررسی ها نشان داده است که در دقیق ترین و محافظت شده ترین شرایط هم همواره

ابعاد عضو و یا کاهش مدول الاستیسیته اشاره نمود. در این مطالعه از کاهش مدول الاستیسیته در المان برای کاهش سختی مطابق رابطه ی (۲) استفاده شده است:

$$E_i^d = E_i^{ud} - \Delta E_i \quad (۲)$$

در این معادله، E_i^d و E_i^{ud} به ترتیب مدول الاستیسیته - آیین المان در حالت آسیب دیده و سالم است. ΔE_i مقدار کاهش در مدول الاستیسیته که نشان دهنده ی میزان آسیب در المان i -ام است که به صورت زیر تعریف می گردد:

$$\Delta E_i = d_i E_i^{ud}, \quad 0 \leq d_i \leq 1 \quad (۳)$$

d_i ، شاخصی است که میزان شدت آسیب المان i -ام را تعریف می کند. بدیهی است که مقدار این شاخص برای المان های سالم برابر با صفر و برای المان های با آسیب صد درصدی، برابر با ۱ می باشد.

اگر به سازه، نیروی استاتیکی $\{F\}$ ، اعمال گردد، پاسخ استاتیکی نظیر این نیرو، از طریق رابطه ی زیر قابل محاسبه می باشد:

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad (۴)$$

که در آن، $[K]$ و $\{u\}$ ، به ترتیب بیانگر ماتریس سختی و بردار پاسخ استاتیکی می باشند. رابطه ی (۴)، می تواند به ترتیب برای حالت سازه ی سالم و آسیب دیده بصورت روابط (۵-الف) و (۵-ب)، فرمول بازنویسی شود:

$$[K^{ud}]\{u^{ud}\} = \{F\} \quad (۵-الف)$$

$$[K^d]\{u^d\} = \{F\} \quad (۵-ب)$$

یادآور می شود که در این روابط، بالانویس های ud و d ، به ترتیب برای نشان دادن اطلاعات مربوط به سازه های سالم و آسیب دیده، بکار رفته اند. رابطه ی (۵-ب)، با کمک رابطه ی (۱)، می تواند بصورت زیر بازنویسی شود:

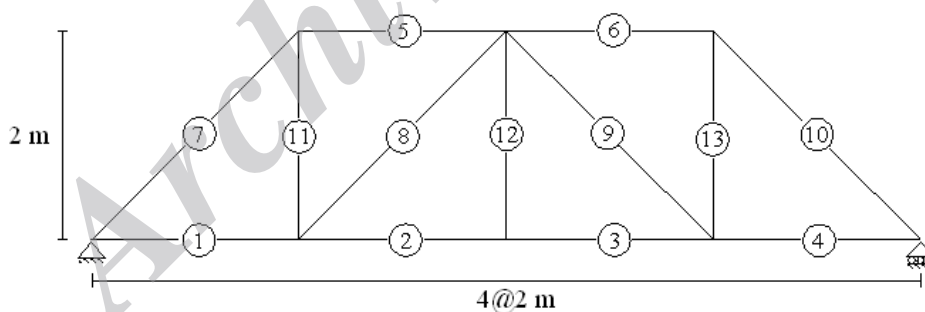
$$([K^{ud}] + [\Delta K])\{u^d\} = \{F\} \quad (۵-ج)$$

همانطوریکه قبلا اشاره شد، تابع هدف ارائه شده در این مقاله، بر مبنای اختلاف جابجایی استاتیکی بین سازه ی سالم و آسیب دیده، تحت شرایط یکسان اعمال بار استاتیکی، استوار می باشد. بر این اساس، با کمک روابط

تشخیص آسیب‌های بوجود آمده در سازه‌ها، پرداخته می‌شود. سناریوهای مختلفی از آسیب‌های منفرد و چندگانه، با شدت‌های متفاوت و تحت شرایط مختلف، بر روی دو نوع سازه‌ی متفاوت، مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد. انتخاب دو نوع مختلف سازه با عملکرد متفاوت سازه‌ای برای بررسی کارایی روش صورت پذیرفته است. جزئیات بیشتر مثالها، به همراه نتایج حاصله در ادامه همین بخش ارائه می‌گردد.

۵-۱- خرابی دو بعدی فولادی

در مثال اول، یک خرابی فولادی دو بعدی، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. جزئیات المان بندی این خرپا، در شکل (۲) نشان داده شده است. سازه‌ی مذکور دارای ۱۳ المان و ۸ گره می‌باشد که هر کدام از گره‌ها دارای دو درجه آزادی (انتقال در راستای قائم و انتقال در راستای افق) است. چگالی و مدول الاستیسیته مصالح موجود در این سازه برابر با $\rho=7860 \text{ kg/m}^3$ و $E=2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ می‌باشد.



شکل ۲- مدل اجزای محدود خرپای فلزی دو بعدی.

شدت ۱، ۳ و ۷ درصد) به اطلاعات ثبت شده از سازه‌ی آسیب دیده اضافه شده است.

جدول ۱- سطح مقطع اعضای خرپا

اعضای قائم	سطح مقطع (مترمربع)
اعضای مورب	50×10^{-4}
اعضای افقی	80×10^{-4}
	100×10^{-4}

خطاهایی هر چند جزئی در اطلاعات خام اولیه وجود دارد. لذا لحاظ نمودن خطاهای مصنوعی در مثالهای عددی، برای سنجش مناسب بودن الگوریتم و تابع هدف انتخابی ضروری است. بدیهی است که هر چقدر حساسیت روشی به این خطاها کمتر باشد، به همان اندازه کارایی و دقت روش ارائه شده بیشتر خواهد بود. در این مطالعه، خطاهای موجود در داده‌های اولیه، به صورت نوفه‌های تصادفی مدلسازی می‌گردند. این نوفه‌ها، با کمک رابطه‌ی زیر به پاسخ‌های استاتیکی سازه آسیب دیده افزوده می‌شوند:

$$\Delta_i^n = \Delta_i (1 + \alpha f(n)) \quad (10)$$

که در آن Δ_i^n تغییرمکان اندازه گیری شده در گره i -ام در حالت دارای نوفه، Δ_i تغییرمکان اندازه گیری شده در گره i -ام در حالت بدون نوفه، α میزان نوفه موجود و $f(n)$ تابع تصادفی تولیدکننده نوفه می‌باشد.

۵- مطالعات عددی

در بخش‌های قبلی جزئیات روش پیشنهادی، ارائه گردید. در این بخش به بررسی کارایی روش پیشنهادی در

همچنین، سطح مقطع المانهای مختلف این سازه، در جدول ۱ ارائه شده است. سه سناریوی آسیب مختلف بر روی این سازه مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است که جزئیات این سناریوها در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین با توجه به اینکه در داده‌های واقعی نوفه موجود است، لذا سطوح مختلفی از نوفه‌ها (شامل نوفه‌هایی با

که در این مثال، تنها بر درجات آزادی قائم در عضوهای ۲ و ۵ بارهای استاتیکی گسترده به شدت ۲۵۰۰۰ و ۴۰۰۰- نیوتن بر متر اعمال شده است که در نهایت، این بارها به گره‌های مجاور این اعضا باربر انتقال می‌یابد. لازم به ذکر است درجات آزادی انتخابی با توجه به نوع بارگذاری‌های معمول انتخاب شده است. نتایج بدست آمده در اشکال ۳ الی ۵ نشان داده شده است. همانطوری که ملاحظه می‌گردد، در حالت بدون نوفه، روش پیشنهادی توانسته است محل و شدت آسیب‌های رخ داده را کاملاً دقیق تشخیص دهد. در حالت وجود نوفه هم، نتایج بدست آمده حاکی از دقت بسیار بالا در تخمین شدت آسیب‌ها می‌باشد.

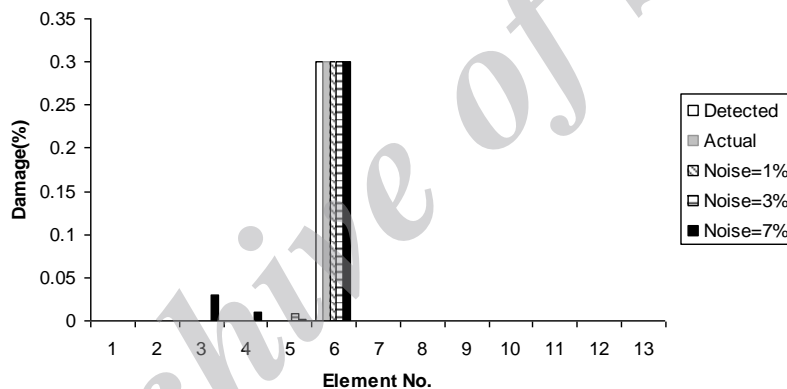
جزئیات نحوه‌ی اعمال این نوفه‌ها، در بخش ۴ توضیح داده شده است. لازم به ذکر است که کلیه مدلسازی‌ها و محاسبات در فضای نرم افزار MATLAB صورت گرفته است.

جدول ۲- سناریوهای آسیب مربوط به خرپای فلزی

سناریوی شماره (۱)		سناریوی شماره (۲)		سناریوی شماره (۳)	
آسیب المان (%)	المان	آسیب المان (%)	المان	آسیب المان (%)	المان
۳۰	۳	۴۰	۲	۶۰	۱
		۶۰	۱۰	۱۵	۷
				۳۵	۱۳

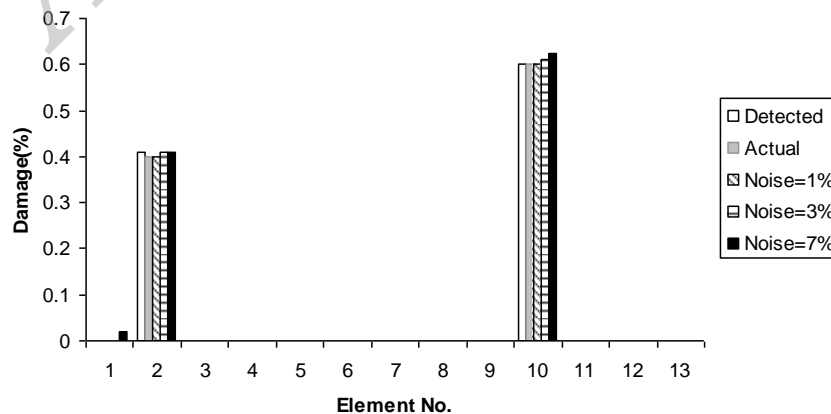
در ادامه، با کمک روش پیشنهادی، به تشخیص محل و شدت آسیب‌های احتمالی پرداخته می‌شود. گفتنی است

Scenario 1



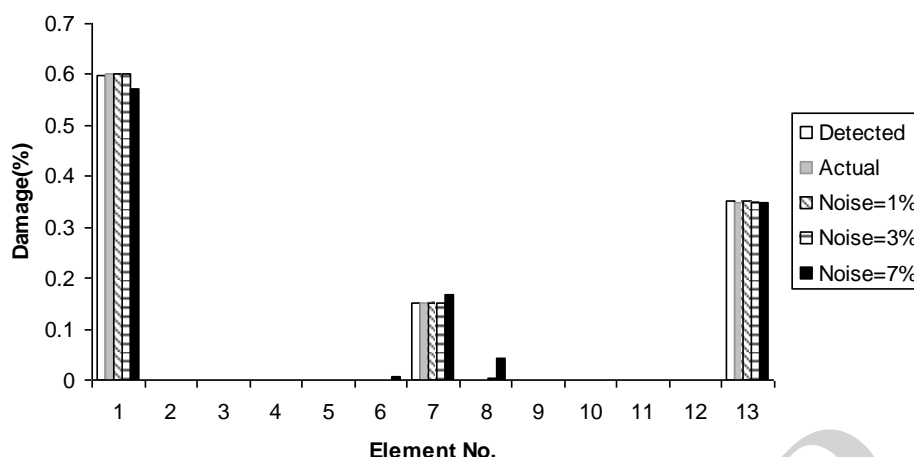
شکل ۳- نتایج تشخیص آسیب در خرپای فلزی دو بعدی (سناریوی (۱)).

Scenario 2



شکل ۴- نتایج تشخیص آسیب در خرپای فلزی دو بعدی (سناریوی (۲)).

Scenario3



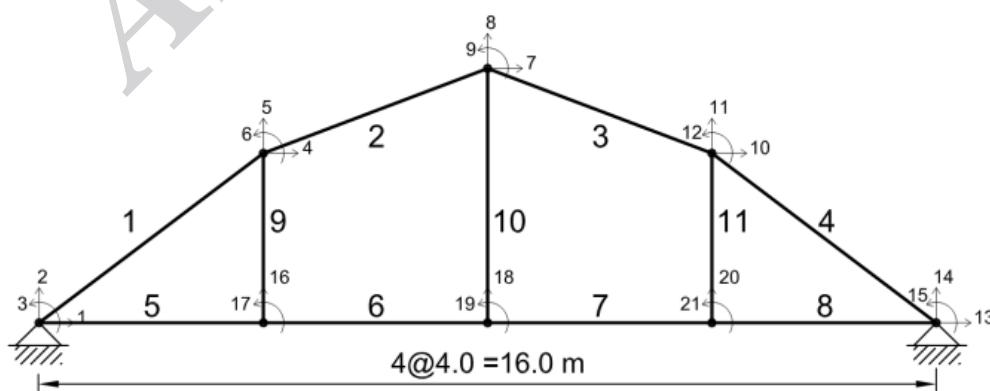
شکل ۵- نتایج تشخیص آسیب در خرپای فلزی دو بعدی (سناریوی (۳)).

المان هفتم نداشته و آسیب این المان هم بادقت بسیار بالایی تعیین شده است.

۵-۲- پل قوسی فولادی

در این بخش به بررسی قابلیت روش ارائه شده در تشخیص آسیب در یک پل قوسی فولادی دو بعدی پرداخته می‌شود. مدل اجزای محدود این سازه، به همراه جزئیات شماره گذاری المان‌ها و درجات آزادی در شکل ۶ نشان داده شده است.

گفتنی است که در شدت نوفه‌ی ۷٪، خطاهایی در نتایج ملاحظه می‌شود؛ به عنوان مثال در شکل (۳)، المان سالم شماره‌ی سه، آسیب دیده گزارش شده است، لیکن، شدت آسیب به دست آمده بسیار ناچیز می‌باشد و لذا هیچ ایرادی بر کلیت و پایداری روش ارائه شده وارد نمی‌کند. همچنین، نتایج ارائه شده در شکل (۵)، بیانگر حساسیت روش ارائه شده به رخداد آسیب‌های ترکیبی با شدت‌های کاملا متفاوت می‌باشد. همانطوریکه مشاهده می‌شود، آسیب‌های شدید رخ داده در المانهای اول و سیزدهم، هیچ تأثیری بر روی تخمین شدت آسیب متوسط رخ داده در



شکل ۶- مدل اجزای محدود پل قوسی فلزی.

گردیده است. در این مثال، بارهای استاتیکی مطابق جدول ۵ به درجات آزادی ارائه شده، اعمال شده است.

جدول ۴- سناریوهای آسیب مربوط به پل قوسی

سناریوی شماره (۳)		سناریوی شماره (۲)		سناریوی شماره (۱)	
آسیب المان (%)	المان	آسیب المان (%)	المان	آسیب المان (%)	المان
۵۰	۲	۱۵	۶	۳۰	۱
۵۰	۶	۲۰	۹		
۵۰	۱۰				

جدول ۵- بارهای استاتیکی اعمالی به درجات آزادی

بار اعمال شده	درجه آزادی
(KN)100	۲
(KN.m)66.66667	۳
(KN)200	۱۶
(KN)200	۱۸
(KN)200	۲۰
(KN)100	۱۴
(KN.m)66.6667	۱۵

نتایج در شکل‌های ۷ الی ۹ براساس سناریوهای ذکر شده در جدول ۴ ارائه شده است.

سازه مذکور دارای ۳ المان قائم، ۴ المان مورب و ۴ المان افقی و ۸ گره می‌باشد. مشخصات مصالح به کار رفته در این مثال، مطابق جدول ۳ می‌باشد.

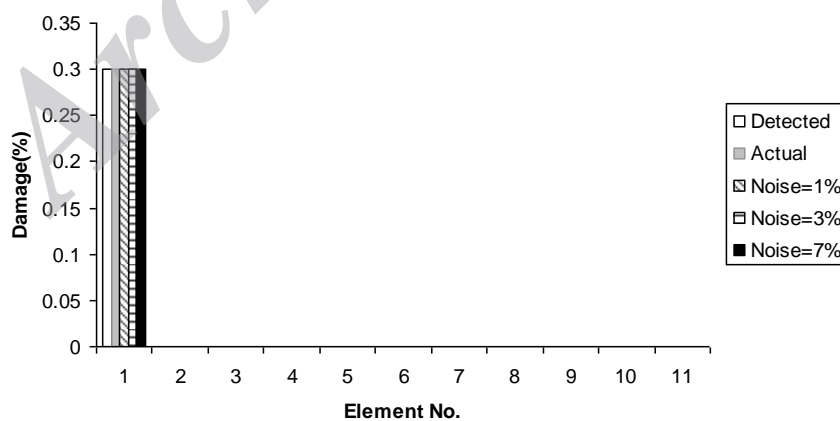
جدول ۳- مشخصات مقاطع اعضای پل قوسی

ممان اینرسی (m^4)	سطح مقطع (مترمربع)	اعضای قائم
189813.3×10^{-8}	280×10^{-4}	اعضای قائم
-	150×10^{-4}	اعضای مورب
189813.3×10^{-8}	-	اعضای افقی

برای تشخیص آسیب در این سازه قوسی سه سناریوی آسیب در نظر گرفته شده است. این آسیبها به صورت آسیب منفرد، زوج آسیب و آسیب ترکیبی با مقادیر مختلف و در اعضای متفاوت در نظر گرفته شده است. میزان آسیب در هر یک از اعضای قائم، افقی و مورب مطابق جدول ۴ در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به اینکه در داده‌های واقعی نوفه موجود است لذا نوفه‌هایی به شدت ۱، ۳ و ۷ درصد به پاسخهای سازه‌ی آسیب دیده، اضافه شده است.

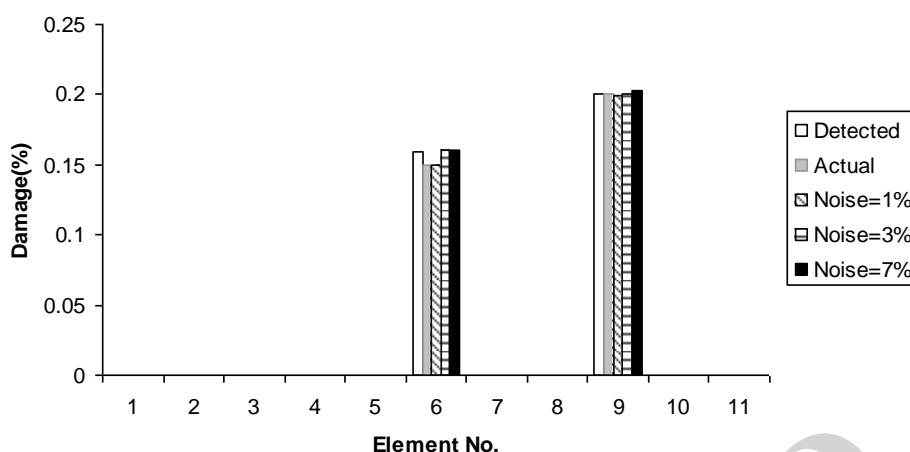
در ادامه برای تشخیص آسیب از تابع هدف استاتیکی که بر اساس سختی و تغییر مکان نوشته شده است، استفاده

Scenario 1



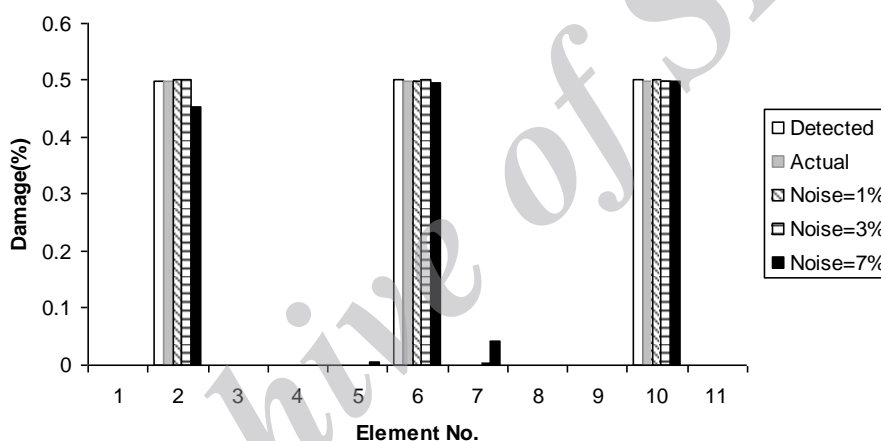
شکل ۷- نتایج تشخیص آسیب در پل قوسی دو بعدی (سناریوی ۱).

Scenario 2



شکل ۷- نتایج تشخیص آسیب در پل قوسی دو بعدی (سناریوی (۲)).

Scenario3



شکل ۸- نتایج تشخیص آسیب در پل قوسی دو بعدی (سناریوی (۳)).

لذا مشکلی در نتیجه گیری پیرامون المان‌های آسیب دیده و یا شدت آنها بوجود نمی‌آید.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله روشی جهت آشکارسازی آسیب در سازه‌ها بر اساس جابجایی استاتیکی سازه‌ها، ارائه گردید. برای این منظور، تابع هدفی بر اساس اختلاف جابجایی استاتیکی سازه سالم و آسیب دیده پیشنهاد شد، بطوریکه پاسخ بهینه این تابع، مبین سطوح آسیب بوجود آمده در المان - های مختلف سازه باشد. روند بهینه یابی این تابع، با کمک

همانگونه که در شکل ۷ مشاهده می‌گردد در آسیب منفرد مقدار آسیب واقعی و آسیب شناسایی شده، حتی در حالت وجود نوفه با شدت‌های مختلف، با دقت بسیار بالایی شناسایی شده است. همچنین در شکل‌های ۸ و ۹، مشاهده می‌گردد که با وجود آسیب‌های ترکیبی، مقدار آسیب‌های شناسایی شده با دقت بسیار بالایی با سناریوهای پیاده سازی شده مطابقت دارد. البته در حالت وجود نوفه خطای بسیار کمی در شدت آسیب‌های محاسبه شده دیده می‌شود که مشابه بحث انجام شده در نتایج بخش قبلی، شدت این خطاها بسیار کم می‌باشد و

پیشنهادی قادر به تشخیص آسیب‌ها با شدت‌های مختلف (کم یا زیاد) می‌باشد.

۳- در حالتی که اطلاعات استاتیکی سازه‌ی آسیب دیده فاقد نوفه باشد، تشخیص آسیب با دقت بسیار زیادی انجام می‌گردد.

۴- با افزودن نوفه در داده‌های استاتیکی سازه‌ی آسیب دیده، روش کماکان پایدار مانده و محل و شدت آسیب با دقت بسیار بالایی شناسایی شده است. بنابراین، نتیجه گیری می‌شود که روش ارائه شده، نسبت به نوفه‌های اتفاقی حساسیت کمی را دارد و لذا، قابلیت استفاده در موارد عملی طرح پایش سلامتی سازه‌ها را دارا می‌باشد. با توجه به دقت مشاهده در این روش می‌توان از آن در سایر سازه‌های فولادی نیز بهره جست.

الگوریتم بهینه یابی ژنتیک صورت پذیرفت. سرعت بالا، عدم نیاز به تحریک همه‌ی درجات آزادی و تشکیل تابع هدف تنها با کمک اطلاعات تعداد محدودی از درجات آزادی تحریک شده، جزء نقاط قوت روش پیشنهادی می‌باشد. به منظور بررسی کارایی روش ارائه شده، سناریوهای آسیب مختلفی شامل سناریوهای آسیب منفرد و سناریوهای با آسیب‌های چندگانه بر روی دو مثال عددی (شامل خرپا و پل قوسی دو بعدی) مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج به دست آمده به شرح زیر ارائه می‌گردد:

۱- روش ارائه شده، قادر به تشخیص سناریوهای آسیبی مختلف (اعم از سناریوهای منفرد و چندگانه) می‌باشد.

۲- تابع هدف ارائه شده، حساسیت خوبی به رخداد آسیب با سطوح مختلف دارد. به عبارت دیگر، روش

۷- مراجع

- [1] Carden, E. P., and Fanning, P., (2004). Vibration based condition monitoring: a review. *Struct. Health Monit.* 3(4) 355-377.
- [2] Fan, W., and Qiao, P., (2011). Vibration-based damage identification methods: a review and comparative study. *Struct. Health Monit.* 10(1) 83-111.
- [3] Bagheri, A., Ghodrati Amiri, G., Khorasani, M., and Bakhshi, H. (2011). Structural damage identification of plates based on modal data using 2D discrete wavelet transform. *Struct. Eng. Mech.* 40(1) 13-28.
- [4] W. Bayissa, N. Haritos, S. Thelandersson, (2008). Vibration-based structural damage identification using wavelet transform, *Mechanical Systems and Signal Processing.* 22(5) 1194-1215.
- [5] Y.J. Yan, L.H. Yam, (2002). Online detection of crack damage in composite plates using embedded piezoelectric actuators/sensors and wavelet analysis, *Composite Structures*, 58(1) 29-38.
- [6] Friswell, M. L, Penny, J. E. T., Garvey, S. D.A. (1998). Combined Genetic and Eigensensitivity Algorithm for the Location of Damage in Structures. *Computers and Structures*, 69, 547-556
- [7] Bernstein, S., Richter. M. "The Use of Genetic Algorithms in Finite Element Model Identification," Bauhaus - Universitat at Weimar, Mathematische Optimierung, Coudraystr. 13B, 99421 Weimar, Germany, 2003.
- [8] G. Ghodrati Amiri, Seyed Razzaghi, S.A., Bagheri, A. 2011., Damage detection in plates based on pattern search and genetic algorithms. *Smart Structures and Systems*, 7(2)117-132.
- [9] Tabrizian, Z., Afshari, E., Ghodrati A., Gh., H. A. Beigy, M., Pourhoseini N., S. M., (2013). A new damage detection method: Big Bang-Big Crunch (BB-BC) algorithm. *Shock and Vibration*; 20(4) 633-648, .
- [10] Sanayei, M., and Onipede, O., (1991). "Damage Assessment of Structures Using Static Test Data," *AIAA Journal*, 29(7)1174-1179.
- [11] Sanayei, M., and Scampoli, S., (1991). "Structural Element Stiffness Identification from Static Test Data," *ASCE, Journal of Engineering Mechanics*, 117(5) 1021-1036.
- [12] Sanayei, M., and Saletnik, M. J., (1996). "Parameter Estimation of Structures from Static Strain Measurements; II: Error Sensitivity Analysis," *ASCE, Journal of Structural Engineering*, 122(5) 563-572.

- [13] Hjelmstad KD, Shin S, (1997). "Damage detection and assessment of structures from static response", J Eng Mech, 123(6) 568–576.
- [14] Maosen Cao, L.Y., Limin Zhou, Zhongqing Su, Runbo Bai Sensitivity of fundamental mode shape and static deflection for damage identification in cantilever beams. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011. 25: p. 13.
- [15] Holland J.H., Adaptation in Natural and Artificial Systems, University of Michigan Press, Michigan. S., 1975.
- [16] Goldberg, D.E.a.S., Manohar P. , Engineering optimization via genetic algorithm, in Ninth Conference on Electronic Computation, 1986, ASCE: New York, N.Y., 471-478.

Archive of SID