

توسعه یک روش کارآمد عیب‌یابی سازه‌های در سکوه‌های فراساحلی شابلونی با استفاده از الگوریتم فراابتکاری اجتماع ذرات

شهریار بایبوردی^۱ و علیرضا مجتهدی^{۲*}

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

* نویسنده مسئول

دریافت ۹۴/۱۰/۱۲ پذیرش ۹۵/۴/۱۲

چکیده

امروزه استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌یابی بر اساس روش‌های فراابتکاری با توجه به انعطاف‌پذیری و سرعت بالای پردازش از اهمیت خاصی برخوردار شده است. در مطالعه حاضر، جهت انجام عیب‌یابی در سازه‌های شابلونی فراساحل، فرآیند عیب‌یابی به صورت یک مسئله بهینه‌یابی مطرح و از الگوریتم اجتماع ذرات جهت حل مسئله استفاده می‌گردد. پروسه عیب‌یابی با رصد پارامترهای مودال همانند فرکانس و توابع پاسخ فرکانسی سازه انجام می‌پذیرد. بدین منظور، بعد از مدل‌سازی سکوی شابلونی در محیط نرم‌افزار ANSYS مبادرت به برداشت پارامترهای مودال سازه شده سپس کدهای اجزای محدود جهت انجام تحلیل مودال در MATLAB طرح‌ریزی می‌شود. در این مطالعه، وقوع خرابی به صورت کاهش در سختی، بدون تغییر در جرم سازه تعریف می‌گردد. به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، سناریوهای مختلف خرابی در مدل اجزای محدود سازه شابلونی اعمال و فرکانس‌های طبیعی و توابع پاسخ فرکانسی سازه معیوب برداشت می‌گردند. پارامترهای اندازه‌گیری شده در این مرحله به عنوان ورودی الگوریتم اجتماع ذرات جهت حل مسئله بهینه‌یابی مبتنی بر فرکانس و توابع پاسخ‌های فرکانسی سازه وارد می‌شوند تا عملکرد الگوریتم تهیه شده در شناسایی درصد و محل وقوع خرابی بررسی گردد. نتایج حاصله مبین این حقیقت هستند که الگوریتم پیشنهادی در تشخیص سناریوهای خرابی کاملاً موفق عمل کرده است و همچنین دقت الگوریتم در شناسایی شدت خرابی‌ها در حالت توابع هدف مبتنی بر توابع پاسخ فرکانسی سازه نسبت به فرکانس بالا است.

واژگان کلیدی: عیب‌یابی، بهینه‌یابی، پارامترهای مودال، الگوریتم اجتماع ذرات، توابع پاسخ فرکانسی، فرکانس طبیعی.

۱- مقدمه

تلاش برای به دست آوردن معیاری برای شناسایی وجود، موقعیت و شدت خرابی به کمک اطلاعات قابل اندازه‌گیری از سیستم سازه‌ای می‌باشد. از جمله اطلاعات قابل اندازه‌گیری سیستم سازه‌ای اطلاعات مودال سازه یا مشخصه‌های دینامیکی سازه اعم از فرکانس‌های طبیعی، شکل‌های مودی و توابع پاسخ فرکانسی می‌باشد. رصد تغییرات مودال سیستم جهت عیب‌یابی سازه نقطه کانونی بیشتر تحقیقات انجام شده و در حال انجام می‌باشد. در بخش به چند نمونه از تحقیقات انجام شده اشاره می‌گردد. تحقیقات عیب‌یابی سازه‌ها بر اساس مشخصه‌های مودال در سال ۱۹۷۹ در پژوهش‌های Adams و Cawley آغاز گردید [۱]. آن‌ها بر اساس تغییرات فرکانس‌های طبیعی به شناسایی آسیب در یک تیر کامپوزیت پرداختند.

Yeun [۲] استفاده از تغییرات در اشکال مودی و پارامتر شیب شکل‌های مودی را جهت عیب‌یابی در یک تیر کنسولی پیشنهاد داد.

دستیابی و ایجاد بسترهای لازم جهت رسیدن به روش‌های قابل اعتماد در برآورد و تشخیص عیوب سازه‌ای از مهم‌ترین اهداف پژوهش‌های انجام شده در چند سال اخیر در این حوزه بوده است. با توجه به این موضوع که هر سازه ویژگی‌های خاص خود را دارا می‌باشد دستیابی به روش‌های با قابلیت اطمینان بالا در حوزه مهندسی عمران با چالشی جدی روبرو است. با در نظر گرفتن این موضوع و با عنایت به حجم وسیع سرمایه گذاری‌های انجام شده در حوزه ساخت و سازه‌های دریایی و تلفات جانی و مالی ناشی از فروپاشی این سازه‌ها، تحقیقات عیب‌یابی در این شاخه از علم مهندسی عمران از جایگاه ممتازی برخوردار است.

با توجه به مطالب بالا، تحقیقات فراوانی در حوزه پایش سلامتی سازه‌ها و همچنین سازه‌های دریایی مانند سازه‌های شابلونی^۱ انجام پذیرفته است. نقطه مشترک تمام این تحقیقات

به منظور اطمینان از هم‌گرایی گام‌های به روزرسانی تصادفی بهره بردند.

Yang و همکاران [۱۴] از روش طیف فوریه جهت تخمین منحنی مودال دو بعدی، به منظور شناسایی خرابی در مصالح کامپوزیت بهره بردند. آن‌ها مشاهده نمودند استفاده از تبدیل فوریه دقت منحنی دو بعدی مودال را بالا برده و این افزایش دقت به افزایش دقت در شناسایی و تشخیص مکان و شدت خرابی منجر می‌گردد.

Idilson و همکاران [۱۵] از توسعه الگوریتم ترکیبی پینکوس- نیلدر- مید (P-NMA) برای شناسایی خرابی مبتنی بر مشخصات ارتعاشی در یک المان تیر یکسر گیردار، خرابی صفحه‌ای و قاب پرتال بهره بردند. اصلاح پیشنهادی آن‌ها شامل کاهش دامنه نمونه‌گیری از فرمول پینکوس با مشخص نمودن حداکثر تعداد المان‌های آسیب دیده سازه بود.

با توجه به گسترش روز افزون الگوریتم‌های فراابتکاری و انعطاف‌پذیری و قدرت بسیار بالای آن‌ها در حل مسائل بهینه‌سازی با ابعاد بالا، در پژوهش حاضر نیز به منظور عیب‌یابی سکوها فراساحل از این الگوریتم‌ها استفاده می‌گردد. در این مطالعه، جهت تشخیص و برآورد خرابی از فرکانس‌های طبیعی و توابع پاسخ فرکانسی^۲ سازه با حل مسئله بهینه‌سازی ترکیبی توسط الگوریتم اجتماع ذرات^۳ (PSO) بهره گرفته می‌شود. بعد از مدل‌سازی نمونه یک سکوی جکته در محیط ANSYS مبادرت به استخراج پارامترهای مودال می‌شود. سپس کدهای اجزای محدود در MATLAB جهت انجام تحلیل مودال طرح ریزی می‌شود. معیار خرابی برای الگوریتم مطالعه حاضر به صورت کاهش در سختی، بدون تغییر در جرم سازه تعریف می‌گردد. سناریوهای مختلف خرابی را در ANSYS اعمال کرده، پارامترهای مودال مربوط به هر سناریو برداشت و به عنوان ورودی به الگوریتم داده می‌شوند. توابع هدف مبتنی بر فرکانس و توابع پاسخ فرکانسی سازه جهت رسیدن به حداقل اختلاف از اندازه‌گیری‌های نرم‌افزار ANSYS و پارامترهای محاسبه شده از MATLAB توسط الگوریتم PSO حل می‌شوند. در نهایت، نحوه عملکرد و کارایی الگوریتم طراحی شده در تشخیص محل و شدت خرابی مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد.

Kim و همکاران [۳] در سال ۱۹۹۲، استفاده از منحنی اشکال مودی به همراه معیار تضمین مودی^۱ (MAC) را در پروسه شناسایی خرابی به کار بردند. از منحنی اشکال مودی در مطالعات محققین دیگری نیز استفاده شده است [۴، ۵].

Sampaio و همکاران [۶] در سال ۱۹۹۹، از تغییرات تابع پاسخ فرکانسی و رصد تغییرات منحنی تابع پاسخ فرکانسی بهره گرفتند.

Huajun و همکاران [۷] با استفاده از روش روزرسانی مودال در مدل اجزای محدود سکوها دریایی و استفاده از سه مد ارتعاشی موفق به تشخیص آسیب وارده به سکو شدند.

Golafshani و همکاران [۸] از مجموعه توابع پاسخ فرکانسی با به کارگیری حداقل مرتبه تئوری آشفستگی در سازه‌های تحت نیروی برشی موفق به تشخیص خرابی در یک قاب سازه‌ای شدند.

Elshafey و همکاران [۹] جهت عیب‌یابی سکوها شابلونی از ترکیب شبکه عصبی با یک تکنیک کاهش تصادفی استفاده کردند. آن‌ها تکنیک کاهش تصادفی را جهت استخراج خرابی در سازه شابلونی در حال سرویس‌دهی به کار بردند.

Mojtahedi و همکاران [۱۰] با به کارگیری سیستم منطبق فازی به مطالعه تأثیر عوامل عدم قطعیت در فرآیند عیب‌یابی سازه‌های فراساحل پرداختند. آن‌ها با استفاده از انجام تحلیل مودال بر روی مدل مقیاس شده یک سازه شابلونی، نشان دادند که در نظر گرفتن تأثیر عدم قطعیت در مطالعه تجربی و مدل‌سازی عددی درصد موفقیت الگوریتم‌های مطالعه رفتار دینامیکی چنین سازه‌ها را افزایش می‌دهد.

Majumdar و همکاران [۱۱] جهت ارزیابی خرابی در یک سازه خرابی، الگوریتم کلونی مورچگان بر پایه تغییرات فرکانس طبیعی را طرح‌ریزی کردند.

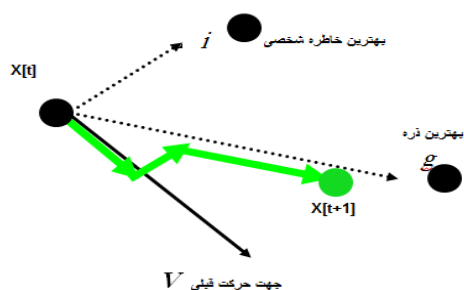
Kianian و همکاران [۱۲] با اندازه‌گیری دامنه فرکانس‌های سکوی شابلونی و استفاده از حداقل مرتبه تئوری آشفستگی به تشخیص خرابی پرداختند. آن‌ها از نسبت انرژی کرنشی مودال برای هر المان در فرکانس‌های طبیعی مختلف جهت مشخص کردن دامنه حساسیت فرکانس‌ها در عیب‌یابی سکو استفاده کردند. عیب‌یابی بر اساس روش‌های احتمالاتی در تحقیقات Yalan و همکاران [۱۳] مطرح گشت. آن‌ها از روش به روزرسانی مدل بر اساس انتشار پیش رونده عدم قطعیت‌های مؤثر استفاده کرده و از یک الگوریتم بهینه‌سازی بهبود داده شده

2- Frequency response function

3- Particle swarm algorithm

1- Modal assurance criterion

مقدار $f^{i,best}$ برای انجام مقایسه‌های بعدی، ضروری است. در هر تکرار x' و v' جدیدی به دست می‌آید منظور از اجرای الگوریتم، بهتر کردن $x',best$ است (شکل (۱)).



شکل ۱- نحوه حرکت ذرات در الگوریتم PSO

بهترین موقعیتی که به وسیله همه ذرات پیدا شده به صورت $x^{g,best}$ نشان داده می‌شود، که با مقایسه مقادیر $f^{i,best}$ به ازای همه ذرات و از میان $x^{i,best}$ ها انتخاب می‌شود. مقدار تابع هدف در $x^{g,best}$ به صورت $f^{g,best}$ نشان داده می‌شود. در مرحله ابتدایی الگوریتم، ذرات با موقعیت‌ها و سرعت‌های تصادفی ایجاد می‌شوند و در طی اجرای الگوریتم، موقعیت و سرعت هر ذره در مرحله $t+1$ ام از الگوریتم، از روی اطلاعات مرحله قبلی ساخته می‌شود [۱۶]:

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

$$x_j^i[t+1] = x_j^i[t] + v_j^i[t+1] \quad (2)$$

در این روابط، w ضریب اینرسی، r_1 و r_2 اعدادی تصادفی و مثبت 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 تنوع در جواب‌ها به وجود بیاید و به این نحو جستجوی کاملی روی فضا انجام پذیرد. c_1 ضریب یادگیری مربوط به تجارب شخصی هر ذره است و در مقابل c_2 ضریب یادگیری مربوط به تجارب کل جمع می‌باشد. برای کنترل سرعت‌ها نیز یک حدود بالا و پایین برای سرعت منظور می‌گردد [۱۶]. برای مسئله عیب‌یابی مقادیر پارامترها بدین صورت در نظر گرفته شده‌اند. مقدار w برابر با 0.7 ، مقدار c_1 برابر 2 و c_2 برابر با $1/7$ می‌باشد. حد بالا و پایین سرعت‌ها نیز برابر 0.75 قرار داده می‌شود. تعداد ذرات و تعداد تکرار بسته به سناریوی مورد نظر به ترتیب بین 50 تا 80 و 80 تا 120 خواهد بود. تعداد متغیرهای تصمیم برابر تعداد

۲- الگوریتم اجتماع ذرات

الگوریتم اجتماع ذرات، یک الگوریتم بهینه‌سازی فرااکتشافی است که از حرکت گروهی حیواناتی نظیر پرندگان که زندگی جمعی دارند، الگو گرفته شده است. در این الگوریتم هر پاسخ مسئله به صورت یک ذره که دارای یک مقدار و همچنین میزان تناسب است مدل می‌شود. الگوریتم اجتماع ذرات برای اولین بار در سال ۱۹۹۵ توسط کندی و ابرهارت^۱ در قالب یک مقاله کنفرانس ارائه گردید [۱۶]. از آنجا که این الگوریتم مبتنی بر رفتار گروهی و جمعی است، شبیه به الگوریتم‌های تکاملی است؛ ولی تفاوت اصلی در این است که در الگوریتم اجتماع ذرات هر فرد از اطلاعات گذشته خود سود می‌برد، در حالی که چنین رفتاری در الگوریتم‌های تکاملی نیست. در این الگوریتم هر عضو از جامعه موقعیت خود را با توجه به تجربیات شخصی و تجربیات کل جامعه تغییر می‌دهد.

از مزایای این الگوریتم قابلیت اجرای آسان آن است. همچنین عملگرهای ریاضی را به کار می‌برد و نتایج خوبی در محیط‌های ثابت، نویزی و پیوسته در حال تغییر، فراهم می‌کند. در این الگوریتم هر ذره در حال جستجو برای نقطه بهینه و در حال جابجایی و دارای سرعت است و همه ذرات در فضای جستجو حرکت می‌کنند. هر ذره دارای یک هوش ذاتی است که در هر مرحله بهترین موقعیتی را که داشته به خاطر سپرده و در گروه، تبادل اطلاعات می‌کند [۱۶]. حرکت هر ذره بستگی به چند عامل دارد:

(۱) موقعیت فعلی ذره،

(۲) بهترین موقعیتی که ذره تا حال داشته است،

(۳) سرعت ذرات، و

(۴) بهترین موقعیتی که کل ذرات تاکنون داشته‌اند.

هر ذره در الگوریتم PSO از سه بردار d بعدی تشکیل شده است که d بعد فضای جستجو می‌باشد. برای ذره i ام سه بردار عبارتند 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' 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 $x',best$ ذخیره می‌گردد. f' مقدار تابع هدف در $x',best$ ، $f^{i,best}$ مقدار تابع هدف در $x',best$ است که عناصر شکل دهنده هر ذره به حساب می‌آیند. ذخیره کردن

جهت مدل کردن اعضای لوله‌ای سکو از المان PIPE288 و برای عرشه از المان سه بعدی Shell 4 Node 188 استفاده می‌گردد. شکل (۲) مدل ساخته شده در نرم‌افزار را به همراه شماره گذاری اعضا را نشان می‌دهد.

۳- انجام تحلیل مودال تئوری در MATLAB

با توجه به نوع شیوه اتخاذ شده در این مطالعه در راستای عیب‌یابی سازه شابلونی باید تمام اقدامات لازم جهت انجام تحلیل مودال و استخراج پارامترهای مودال را در قالب کدنویسی در محیط MATLAB انجام دهیم. لذا لازم است در این قسمت تئوری پایه ارتعاشات توسط اجزای محدود به صورت کامل بیان و کدهای اجزای محدود در محیط MATLAB بر اساس آن‌ها پیاده گردند. روش اجزای محدود ابزار بسیار قوی در تحلیل عددی مسائل مربوط به سازه‌های قابی شکل و پیوسته می‌باشد، زیرا با استفاده از این روش می‌توان سازه‌های با خصوصیات پیچیده هندسی و شرایط بارگذاری‌های مختلف را به طور دقیق تجزیه تحلیل نمود [۱۷]. از جمله این سازه‌های پیچیده، سازه شابلونی می‌باشد که هر یک از اعضای سازه شابلونی در معرض نیروی محوری، بارگذاری جانبی، گشتاورهای خمشی و پیچشی قرار می‌گیرند. معادله حرکت سیستم در این بررسی بدون میرایی در نظر گرفته شده است؛ فلذا معادله دینامیکی سیستم به صورت زیر خواهد بود.

$$[M]\{\ddot{D}\} + [S]\{D\} = \{0\} \quad (3)$$

در رابطه فوق $[M]$ ماتریس جرم و $[S]$ ماتریس سختی سازه می‌باشد. ماتریس جرم و سختی توسط کدنویسی در محیط نرم‌افزار MATLAB با توجه به ساختار هندسی سازه تولید می‌گردند. در این مطالعه جهت انطباق بهتر نتایج با سازه واقعی هر شش درجه آزادی در گره‌ها در نظر گرفته شده‌اند. در نتیجه ماتریس‌های هر المان از مرتبه 12×12 و ماتریس کل سازه از مرتبه 96×96 خواهد بود. صحت ماتریس‌های جرم و سختی تولید شده، بر اساس نتایج تحلیل مودال و همچنین مقایسه با ماتریس‌های جرم و سختی تولید شده توسط ANSYS حاصل از تحلیل زیرسازه^۱ سنجیده می‌شود. هدف از انجام تحلیل زیر سازه مقایسه ماتریس‌های جرم و سختی تولید شده توسط ANSYS

المان‌های سازه و حد پایین و بالا نیز به ترتیب برابر با صفر برای حالت سالم و یک برای حالت کاملاً خراب در نظر گرفته می‌شود.

۳- مدل سازی عددی

برای بررسی عددی مدل مورد نظر و انجام آنالیز مودال از نرم‌افزار ANSYS به همراه کد نویسی‌های لازم جهت انجام آنالیز مودال تئوری در MATLAB نیز استفاده می‌شود. جهت بررسی مسئله خرابی در این مطالعه از یک نمونه سکوی شابلونی در مقیاس آزمایشگاهی که تحت آنالیز مودال تجربی نیز قرار گرفته استفاده می‌گردد [۷]. سکو دارای چهار پایه اصلی با مهاربندی‌های افقی و قطری می‌باشد. مدول یانگ مصالح برابر 207GPa است. پایه‌های اصلی در طبقه اول دارای قطری به اندازه ۱۸ میلی‌متر و ضخامت $2/5$ میلی‌متر و در سه طبقه بعدی دارای ۱۴ میلی‌متر قطر و $2/5$ میلی‌متر ضخامت می‌باشد. مهاربندی افقی با قطر ۱۰ میلی‌متر، ضخامت ۲ میلی‌متر، مهاربندی قطری در صفحه قائم دارای ۸ میلی‌متر قطر و $1/5$ میلی‌متر ضخامت، در صفحه افقی دارای قطر ۱۰ میلی‌متر می‌باشد. ارتفاع کلی سازه $2/4$ متر، طول و عرض سازه در پلان در پایین‌ترین تراز به ترتیب برابر با $0/6$ متر و $0/4$ متر و در بالاترین تراز برابر $0/375$ متر و $0/25$ متر و ضخامت عرشه نیز برابر ۲۰ میلی‌متر می‌باشد (شکل (۲)).



شکل ۲- سکوی شابلونی مورد مطالعه جهت عیب‌یابی

$$M'_{kj} = \frac{\rho AL}{420} \begin{bmatrix} 70 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 0 & 0 & 0 & 13L \\ 0 & 0 & 54 & 0 & -13L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 70r_g^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 13L & 0 & -3L^2 & 0 \\ 0 & -13L & 0 & 0 & 0 & -3L^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$M'_{kk} = \frac{\rho AL}{420} \begin{bmatrix} 140 & & & & & \\ 0 & 156 & & & & Sym. \\ 0 & 0 & 156 & & & \\ 0 & 0 & 0 & 140r_g^2 & & \\ 0 & 0 & 22L & 0 & 4L^2 & \\ 0 & -22L & 0 & 0 & 0 & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

در ماتریس‌های بالا، A سطح مقطع المان‌های لوله‌ای، ρ چگالی فولاد و r_g^2 شعاع ژیراسیون برابر $\frac{I}{A}$ است. z ممان اینرسی قطبی اعضا می‌باشد. در نتیجه ماتریس‌های جرم و سختی المان در مختصات کلی از روابط زیر قابل محاسبه است [۱۷]:

$$K = \hat{R}^T K' \hat{R} \quad (12)$$

$$M_{el} = \hat{R}^T M' \hat{R} \quad (13)$$

ماتریس \hat{R} یک ماتریس 12×12 است که جهت انتقال سختی و جرم از دستگاه مختصات محلی به دستگاه مختصات کلی به کار می‌رود. برای تولید ماتریس جرم و سختی عرشه از تحلیل زیرسازه در محیط ANSYS استفاده کرده و این ماتریس‌ها را به MATLAB انتقال می‌دهیم. ماتریس جرم و سختی عرشه از مرتبه 24×24 می‌باشد. با تعیین ماتریس‌های جرم و سختی و انتقال هر المان در مختصات کلی می‌توانیم ماتریس جرم و سختی کل سازه قابی شکل را در مختصات کلی به دست آوریم:

$$S = \sum_{i=1}^{n_e} K_i \quad (14)$$

$$M = \sum_{i=1}^{n_e} (M_{el})_i \quad (15)$$

S ماتریس سختی کل سازه، M ماتریس جرم کل سازه و n_e تعداد المان‌های سازه می‌باشد. معادله ارتعاشی سازه راه حل زیر را دارد که با جایگذاری در معادله و ساده‌سازی به معادله مشخصه سازه می‌رسیم [۱۷]:

$$D_i = \phi_i \sin(\omega_i t + \alpha_i), \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (16)$$

و کدهای MATLAB می‌باشد. همچنین ماتریس سختی و جرم المان عرشه توسط این تحلیل استخراج می‌گردد. ماتریس‌های جرم و سختی در مختصات محلی از روابط زیر حساب می‌گردند [۱۷]:

$$[K'] = \begin{bmatrix} K'_{jj} & K'_{jk} \\ K'_{kj} & K'_{kk} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$K'_{jj} = \frac{E}{L^3} \begin{bmatrix} r_1 I_x & & & & & \\ 0 & 12I_z & & & & Sym. \\ 0 & 0 & 12I_y & & & \\ 0 & 0 & 0 & r_2 L^2 I_y & & \\ 0 & 0 & -12L I_y & 0 & 4L^2 I_y & \\ 0 & 6L I_z & 0 & 0 & 0 & 4L^2 I_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$K'_{kj} = \frac{E}{L^3} \begin{bmatrix} -r_1 I_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -12I_z & 0 & 0 & 0 & -6L I_z \\ 0 & 0 & -12I_y & 0 & 6L I_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -r_2 L^2 I_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -6L I_y & 0 & 2L^2 I_y & 0 \\ 0 & 6L I_z & 0 & 0 & 0 & 2L^2 I_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$K'_{kk} = \frac{E}{L^3} \begin{bmatrix} r_1 I_z & & & & & \\ 0 & 12I_z & & & & Sym. \\ 0 & 0 & 12I_y & & & \\ 0 & 0 & 0 & r_2 L^2 I_y & & \\ 0 & 0 & 6L I_y & 0 & 4L^2 I_y & \\ 0 & -6L I_z & 0 & 0 & 0 & 4L^2 I_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

در روابط فوق r_1 برابر $\frac{AL^2}{I_z}$ و r_2 برابر $\frac{GI_x}{EI_y}$ می‌باشند. L طول المان، E مدول الاستیسیته و I_x ، I_y ، I_z به ترتیب ممان اینرسی حول محورهای x ، y و z می‌باشند. ماتریس جرم نیز طبق روابط زیر و کدنویسی در محیط MATLAB به دست می‌آید [۱۷]:

$$M' = \begin{bmatrix} M'_{jj} & M'_{jk} \\ M'_{kj} & M'_{kk} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$M'_{jj} = \frac{\rho AL}{420} \begin{bmatrix} 140 & & & & & \\ 0 & 156 & & & & Sym. \\ 0 & 0 & 156 & & & \\ 0 & 0 & 0 & 140r_g^2 & & \\ 0 & 0 & -22L & 0 & 4L^2 & \\ 0 & 22L & 0 & 0 & 0 & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Φ_{Ni} ماتریس مودال نرمال شده یا مودهای نرمال شده می‌باشد. مقدار C_i نیز به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$C_i = \pm \sqrt{\Phi_i^T M \Phi_i} \quad (23)$$

C_i ماتریس ضرایب ثابت به منظور نرمال کردن مودشکل‌ها می‌باشد. تابع پاسخ فرکانسی نسبت پاسخ جابجایی به نیروی ورودی تعریف می‌گردد. این نسبت اغلب با $\alpha(\omega)$ یا $H(\omega)$ نشان داده می‌شود:

$$\alpha(\omega) = H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} \quad (24)$$

در حالت کلی برای یک سیستم چند درجه آزادی تابع پاسخ فرکانسی به صورت یک ماتریس تعریف می‌گردد که این ماتریس متقارن به ماتریس پاسخ فرکانسی معروف است. برای یک مؤلفه از ماتریس پاسخ فرکانسی داریم [۱۸]:

$$H_{jk}(\omega) = \frac{\Phi_{j1}\Phi_{k1}}{\omega_1^2 - \omega^2} + \frac{\Phi_{j2}\Phi_{k2}}{\omega_2^2 - \omega^2} + \dots + \frac{\Phi_{jn}\Phi_{kn}}{\omega_n^2 - \omega^2} \quad (25)$$

Φ_{ji} درایه‌های ماتریس مودال سازه می‌باشند. ω_i ها فرکانس‌های طبیعی سیستم و ω ها فرکانس‌های تحریک سیستم هستند.

۴- تعریف خرابی

فرضیه اساسی پشت روش‌های عیب‌یابی مبتنی بر ارتعاشات، تغییرات سختی است. دلیل اصلی استفاده از سختی به خاطر حساسیت کمتر جرم به تغییرات و دشواری مدل‌سازی با میرایی می‌باشد. در مطالعه حاضر نیز خرابی به عنوان کاهش در سختی اعضا تعریف می‌گردد که به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$K_{ed} = (1 - \beta_i)K_e \quad (26)$$

در رابطه فوق، K_{ed} ماتریس سختی المان در حالت خراب، K_e ماتریس سختی المان در حالت سالم و β_i درصد خرابی در المان می‌باشد. در مطالعه حاضر از تغییرات جرم به علت ناچیز بودن صرف‌نظر می‌گردد. سختی کل در حالت خراب (S_d) طبق رابطه (۲۷) به صورت زیر محاسبه و معادله حرکت

$$(S - \omega_i^2 M)\Phi_i = 0 \quad (17)$$

n برابر تعداد درجات آزادی سازه، Φ_i مودشکل غیر نرمال نام و ω_i فرکانس نام می‌باشد. داشتن جواب‌های غیر صفر مستلزم آن است که دترمینان ماتریس $(S - \omega_i^2 M)$ برابر صفر باشد. با استفاده از روابط زیر و به کار بردن دستور چولسکی^۱ به راحتی می‌توان فرکانس و اشکال مودی را حساب کرد. ماتریس سختی یک ماتریس مثبت-معین می‌باشد و این ویژگی ماتریس کلید اساسی در حل معادله مقادیر ویژه می‌باشد [۱۷].

$$U = \text{chol}(S) \rightarrow S = U^T U \rightarrow (U^T U - \omega_i^2 M)\Phi_i = 0 \quad (18)$$

U یک ماتریس بالا مثلثی است، با پیش‌ضرب طرفین معادله فوق در U^{-T} و با عنایت به این که $I = U^{-1}U$ داریم:

$$U^{-T}(U^T U - \omega_i^2 M U^{-1} U)\Phi_i = 0 \rightarrow (M_U - \lambda_i I)\Phi_{Ui} = 0 \quad (19)$$

در واقع قسمت دوم معادله فوق حالت استاندارد معادله مقادیر ویژه می‌باشد. با توجه به روش مورد استفاده در این مطالعه در این حالت توان دوم فرکانس‌های طبیعی برابر مقادیر ویژه معادله (۱۹) نخواهد بود. فرکانس‌های طبیعی و مودشکل‌ها که به ترتیب متناظر با مقادیر ویژه و بردارهای ویژه معادله استاندارد مقادیر ویژه می‌باشد، به صورت زیر قابل محاسبه است [۱۷]:

$$M_U = U^{-T} M U^{-1} \rightarrow \omega_i = \frac{1}{\sqrt{\lambda_i}} \quad (20)$$

$$\Phi_i = U^{-1} \Phi_{Ui} \quad (21)$$

مودهای مستخرج از رابطه (۲۱) به صورت غیر نرمال بوده و با مقادیر حاصل از نرم‌افزار تفاوت خواهد داشت؛ لذا لازم است این مودها را با جرم نرمال کنیم:

$$\Phi_{Ni}^T M \Phi_{Ni} = I \rightarrow \Phi_{Ni} = \frac{\Phi_i}{C_i} \quad (22)$$

ارتعاشی سیستم در حالت خراب یا معیوب به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S_d = \sum_{i=1}^{n_e} (K_{ed})_i \quad (27)$$

مرتبه‌های تحریک سازه می‌باشد که بسته به نتایج تحلیل مودال تعیین خواهد شد. M تعداد فرکانس‌های تحریک جهت محاسبه تابع هدف می‌باشد که در این مطالعه مقدار ۶۰ در نظر گرفته شده است. در مطالعه حاضر تحریک سازه در راستای درجه آزادی انتقالی محور Y (یعنی مقدار k برابر ۲) بوده و تغییرات پاسخ سازه در ۵ گره برداشت می‌گردد. تابع هدف در این حالت نیز به صورت اختلاف پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری شده از سکوی در حال سرویس (که قطعاً پاره‌ای از المان‌های آن دچار خرابی شده‌اند) که توسط سنسورها و شتاب‌نگارها ثبت می‌گردد و پاسخ محاسبه شده توسط الگوریتم با توجه به ساختار سکو می‌باشد.

۶- نتایج

سناریوهای خرابی مختلفی شامل ترکیبی از المان‌های قطری، پایه، مهاربندی افقی و المان عرشه برای اطمینان از عملکرد صحیح الگوریتم در پروسه عیب‌یابی طرح‌ریزی شده بود. در این مقاله به منظور ارزیابی الگوریتم مورد مطالعه، نتایج دو سناریوی خرابی اعمال شده روی مدل ارائه می‌گردد. در سناریوی اول دو المان پایه به شماره ۱ و شماره ۱۳ به ترتیب به اندازه ۶۰٪ و ۸۰٪ دچار خرابی می‌شوند. در سناریوی دوم، یک المان از نوع پایه به شماره ۱ و یک المان از نوع مهاربندی افقی به شماره ۲۲ و یک المان از نوع مهاربندی قطری در صفحه قائم به شماره ۴۱ دچار خرابی می‌شوند. سناریوهای خرابی در مدل اجزای محدود سکو در نرم‌افزار ANSYS اعمال و نسبت به برداشت فرکانس‌های طبیعی و توابع پاسخ فرکانسی اقدام می‌گردد. داده‌های مودال مربوط به هر سناریو برداشت شده به عنوان ورودی به الگوریتم در محیط MATLAB داده می‌شوند.

۶-۱- سناریوی اول

در این سناریو خرابی ۶۰٪ در المان شماره ۱ و خرابی ۸۰٪ در المان شماره ۱۳ اعمال می‌گردد. نتایج مربوط به فرکانس‌های اندازه‌گیری شده و پاسخ‌های فرکانسی سازه در جدول (۱) و شکل (۳) نشان داده شده است. جهت استخراج نمودارهای

ارتعاشی سیستم در حالت خراب یا معیوب به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S_d = \sum_{i=1}^{n_e} (K_{ed})_i \quad (27)$$

$$M\ddot{D} + S_d D = 0 \quad (28)$$

۵- توابع هدف

یکی از ارکان اصلی هر مسئله بهینه‌یابی تعریف مناسب تابع هدف می‌باشد. در مطالعه حاضر نیز برای بیان عیب‌یابی به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی باید توابع هدف مبتنی بر فرکانس و توابع پاسخ فرکانسی سازه به نحو مناسبی تعریف گردند. تابع هدف مبتنی بر فرکانس و پاسخ‌های فرکانسی سازه جهت رسیدن به حداقل اختلاف از پارامترهای اندازه‌گیری شده و محاسبات به صورت‌های زیر قابل تعریف هستند:

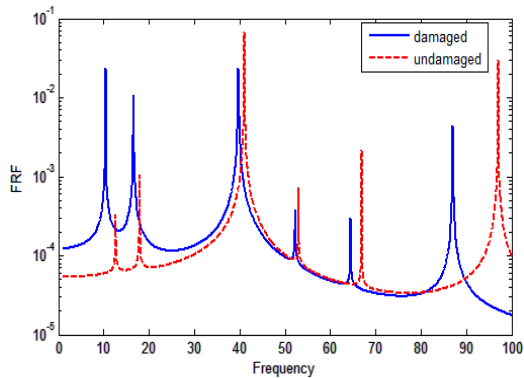
$$f(x) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i^m - f_i^c)^2} \quad (29)$$

رابطه (۲۹) تابع هدف بر حسب اختلاف فرکانس‌های اندازه‌گیری شده (سازه در حال سرویس یا متناظر با سناریوی خرابی اعمالی) و محاسبه شده (توسط الگوریتم اجتماع ذرات) را بیان می‌دارد و با تعداد ۴ فرکانس طبیعی اول عمل بهینه‌سازی انجام می‌شود. در واقع در تابع هدف فوق f_i^m فرکانس‌های طبیعی سکوی در حال سرویس می‌باشد که توسط سنسورها در هنگام عملیات پایش سلامتی توسط تحلیل مودال تجربی برداشت می‌گردد. f_i^c فرکانس‌های محاسبه شده توسط الگوریتم با توجه به انجام تحلیل مودال تئوری می‌باشد. در واقع الگوریتم سعی در نزدیک کردن مقدار f_i^c به مقدار f_i^m با اعمال ضرایب کاهش روی سختی المان‌ها دارد.

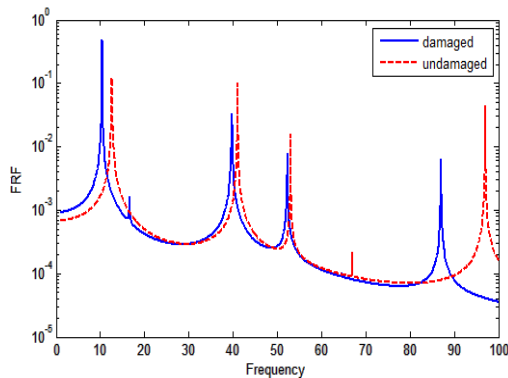
$$E(\alpha) = \sum_{a=1}^R \sum_{p=1}^M \frac{|H_{ak}(\omega_p, \alpha) - H_{ak}^m(\omega_p)|}{\max(H_{ak}^m(\omega_p))} \quad (30)$$

→ Minimiz($E(\alpha)$)

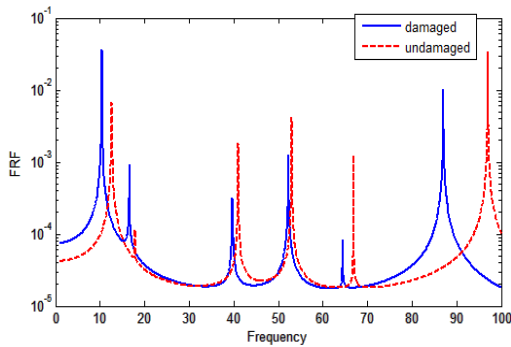
رابطه (۳۰) بیانگر تابع هدف مبتنی بر تابع پاسخ فرکانسی است. در این تابع k مشخص کننده راستای درجه آزادی مورد نظر می‌باشد که پاسخ‌ها در آن راستا برداشت می‌گردند.



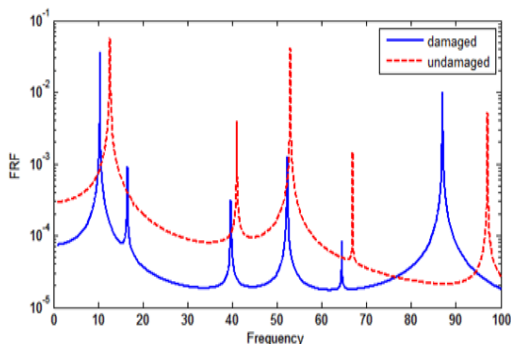
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۳- نمودار تغییرات پاسخ فرکانسی در حالت خراب نسبت به حالت سالم برای سناریوی اول: (الف) H_{12} ، (ب) H_{22} ، (ج) H_{32} ، (د) H_{42}

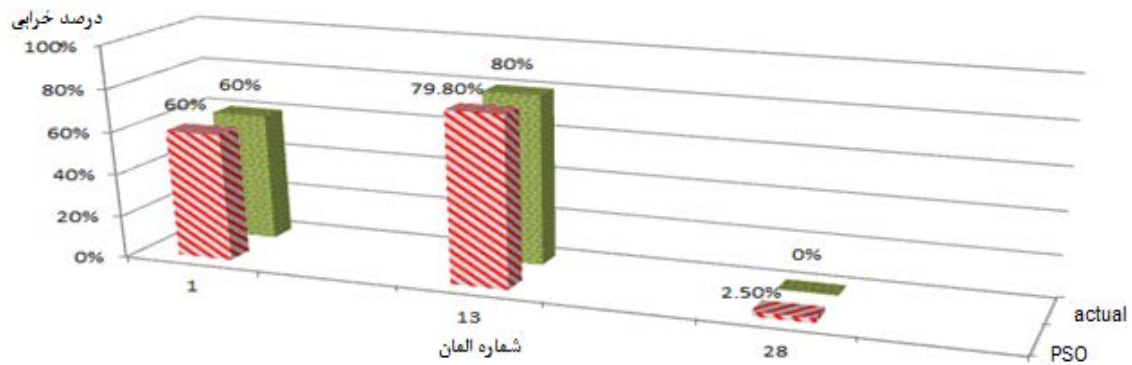
مربوط به پاسخ فرکانسی سازه مورد نظر با فرکانسهای تحریک در محدوده ۱ تا ۱۰۰ با گامهای به اندازه ۰/۱ مورد تحریک قرار گرفت. دلیل انتخاب محدوده فرکانسی فوق پوشش کامل ۶ فرکانس طبیعی اول سازه سکو بوده است. در شکل (۳) تفاوت چهار پاسخ فرکانسی سازه در حالت سالم و خراب نشان داده شده است. در نمودارهای مربوط به تابع پاسخ فرکانسی مشاهده می‌گردد که اعمال سناریوی خرابی، پاسخهای سازه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. نمودارها مبین تأثیرگذاری بیشتر خرابی روی پاسخ اول و پاسخ چهارم سازه می‌باشد.

جدول ۱- مقادیر فرکانس در حالت سالم و خراب در سناریوی

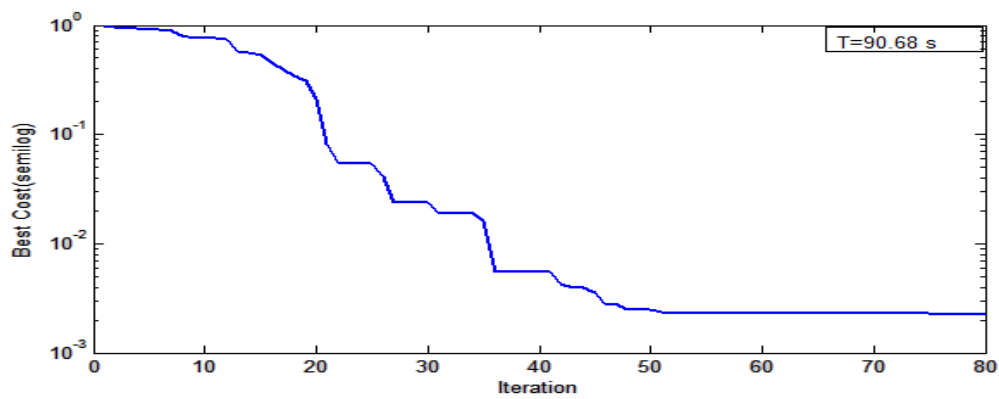
اول

شماره مود	حالت سالم (Hz)	حالت معیوب (Hz)
۱	۱۲/۶۱۱	۱۰/۳۹۰
۲	۱۷/۸۳۷	۱۶/۵۷۶
۳	۴۰/۹۹۱	۳۹/۷۴۱
۴	۵۲/۸۸۵	۵۲/۲۲۲

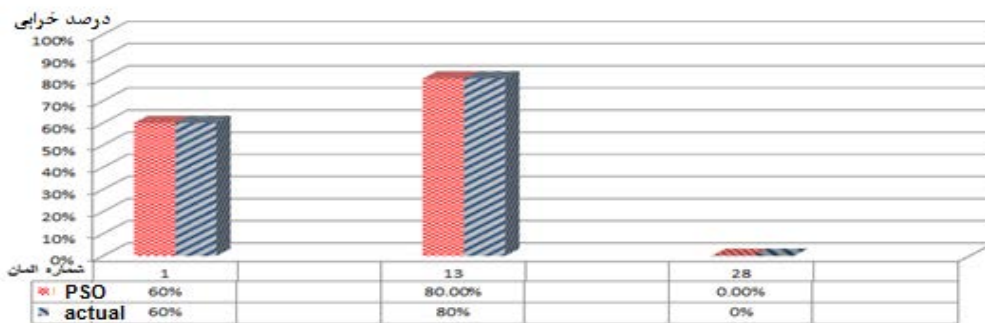
شکل (۴) بیانگر مقادیر واقعی خرابی و مقادیر محاسبه شده توسط الگوریتم در حالت تابع هدف مبتنی بر فرکانس را نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است الگوریتم در تشخیص مکانهای خرابی به درستی عمل کرده و شدت‌های خرابی را در المان شماره یک به درستی و در المان شماره ۱۳ با اختلاف ۰/۲٪ محاسبه کرده است. در این حالت برای المان کاملاً سالم شماره ۲۸ الگوریتم خرابی ناچیزی در حدود ۲/۵٪ محاسبه کرده است. نحوه همگرایی و زمان اجرای الگوریتم در شکل (۵) نشان داده شده است. شکل (۶) بیانگر نتایج الگوریتم در حالت تابع هدف مبتنی بر پاسخهای فرکانسی سازه می‌باشد. الگوریتم در این حالت بدون هیچ خطایی هم محل خرابی و هم شدت خرابی را به درستی تشخیص داده است. همچنین در این حالت الگوریتم المان کاملاً سالم شماره ۲۸ که در حالت تابع هدف مبتنی بر فرکانس خرابی در حدود ۲/۵٪ محاسبه کرده بود به صورت کاملاً سالم تشخیص داده است که این بیانگر افزایش دقت و بهتر شدن نتایج در حالت تابع هدف مبتنی بر پاسخ فرکانسی را نشان می‌دهد. نحوه همگرایی تابع هدف نیز در هر تکرار الگوریتم در شکل (۷) مشخص است



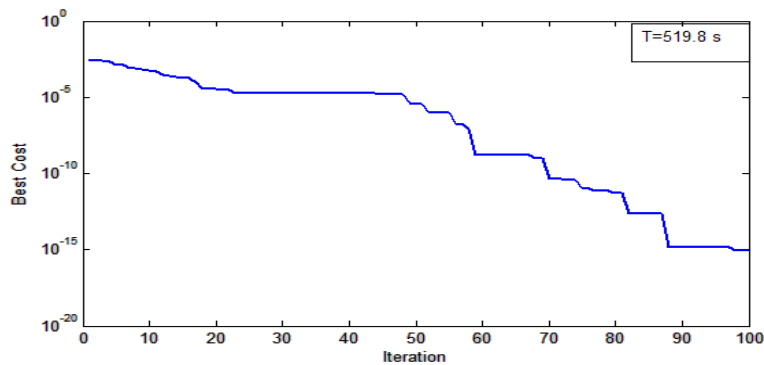
شکل ۴- مقادیر محاسبه شده درصدهای خرابی المان‌ها توسط الگوریتم برای سناریوی اول با تابع هدف مبتنی بر فرکانس



شکل ۵- نحوه همگرایی تابع هدف در هر تکرار الگوریتم برای سناریوی اول در حالت مبتنی بر فرکانس



شکل ۶- مقادیر محاسبه شده درصدهای خرابی المان‌ها توسط الگوریتم برای سناریوی اول با تابع هدف مبتنی بر پاسخ فرکانسی



شکل ۷- نحوه همگرایی تابع هدف در هر تکرار الگوریتم برای سناریوی اول در حالت مبتنی بر پاسخ فرکانسی

۶-۲- سناریوی دوم

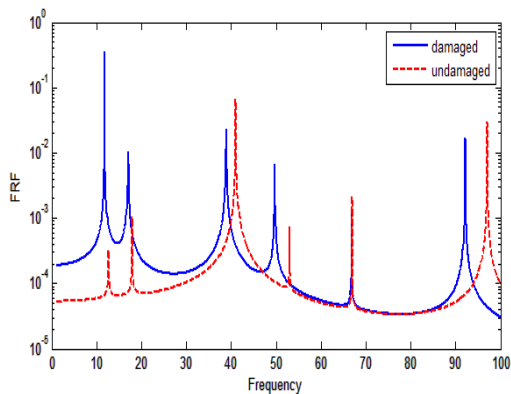
با توجه به سرویس‌دهی سکوه‌های دریایی در شرایط نامناسب دریایی احتمال این که چندین المان از سکو هم‌زمان دچار خرابی شده باشند بسیار بالا است. فلذا برای ارزیابی کارایی الگوریتم اجتماع ذرات در تشخیص خرابی‌های که به صورت هم‌زمان در چند المان از سکو ایجاد شده باشند سناریوی دوم که شامل خرابی در سه المان است طرح‌ریزی گردید. در این سناریو خرابی‌های ۴۵٪، ۵۵٪ و ۴۰٪ به ترتیب در عضوهای شماره ۱، ۲۲ و عضو شماره ۴۱ اعمال می‌گردد. نتایج مربوط به فرکانس‌های اندازه‌گیری شده و پاسخ‌های فرکانسی اندازه‌گیری شده از سازه در این سناریو به ترتیب در جدول (۲) و شکل (۸) ارائه شده است. در این سناریو نیز جهت استخراج پاسخ سازه سکو از فرکانس‌های تحریک در محدوده ۱ تا ۱۰۰ با گام‌های به اندازه ۰/۱ استفاده شد. نتایج مربوط به پاسخ‌های سازه در دو حالت سالم و خراب در شکل (۸) نشان داده شده است.

جدول ۲- مقادیر فرکانس در حالت سالم و خراب در سناریوی

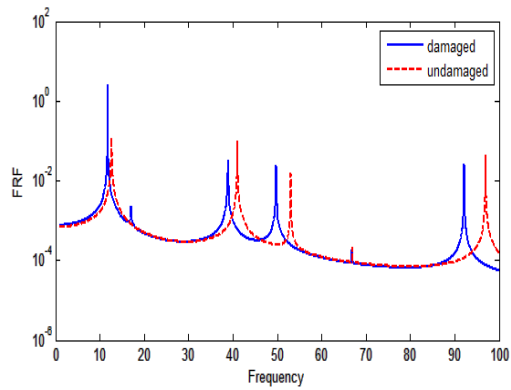
دوم

شماره مود	حالت سالم (Hz)	حالت معیوب (Hz)
۱	۱۲/۶۱۱	۱۱/۷۹۸
۲	۱۷/۸۳۷	۱۷/۰۳۹
۳	۴۰/۹۹۱	۳۸/۸۶۷
۴	۵۲/۸۸۵	۴۹/۱۷۹

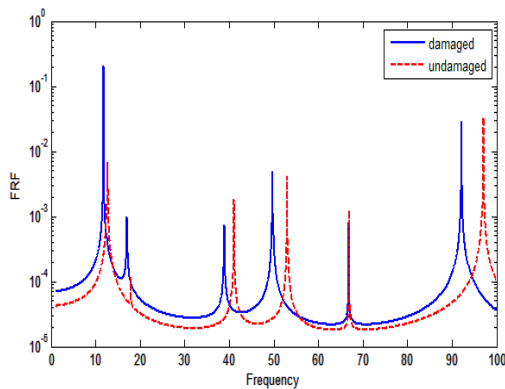
در این حالت، با توجه به شکل (۹) مشخص است که الگوریتم در حالت تابع هدف مبتنی بر فرکانس در تشخیص مکان خرابی‌های عمده بسیار موفق عمل کرده و لیکن در مورد تشخیص شدت‌های خرابی با اندک خطایی همراه است. همچنین در این حالت برای پاره‌ای از عضوهای کاملاً سالم خرابی‌های اختصاص داده شده که هرچند مقدار آن‌ها کم است. ولی در مورد المان شماره ۴۳ مقدار خرابی در حدود ۸٪ محاسبه شده که نسبتاً بالا است. شکل (۱۰) نحوه همگرایی تابع هدف را در ۱۱۰ تکرار با جمعیت ۸۰ ذره‌ای در حالت مبتنی بر فرکانس نشان می‌دهد.



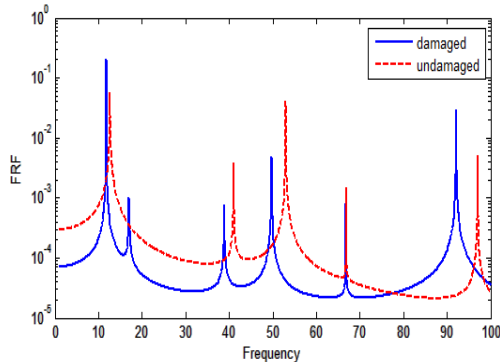
(الف)



(ب)



(ج)

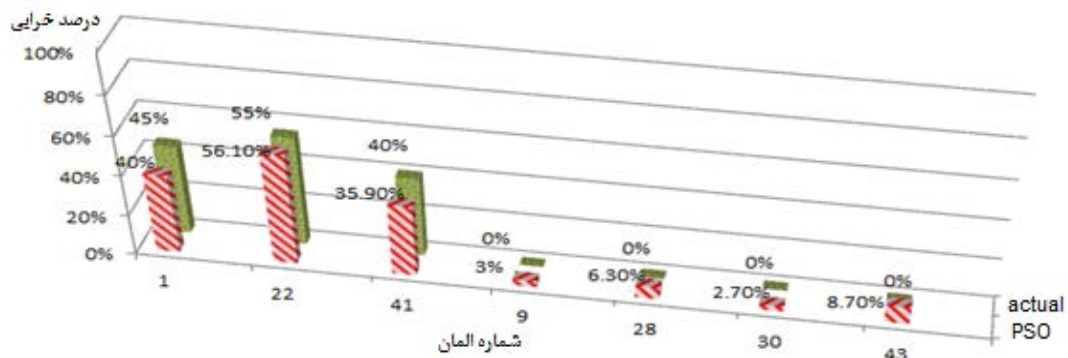


(د)

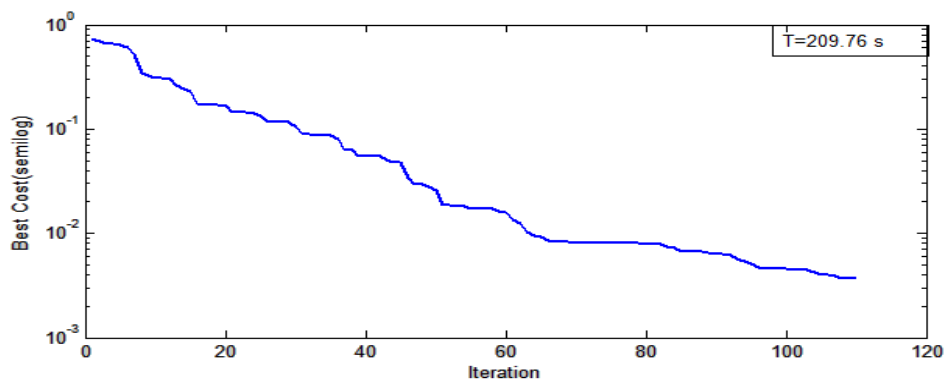
شکل ۸- نمودار تغییرات توابع پاسخ‌های فرکانسی سازه در

حالت خراب نسبت به حالت سالم برای سناریوی دوم:

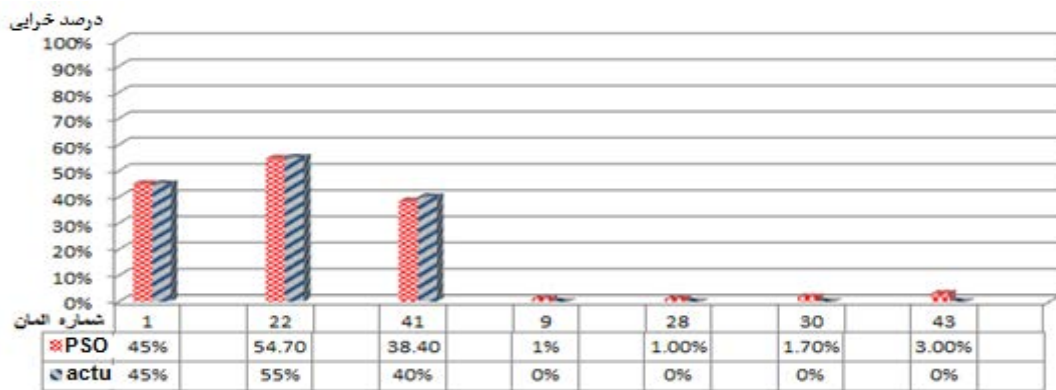
(الف) H_{12} ، (ب) H_{22} ، (ج) H_{32} ، (د) H_{42}



شکل ۹- مقادیر محاسبه شده درصدهای خرابی المان‌ها توسط الگوریتم برای سناریوی دوم با تابع هدف مبتنی بر فرکانس



شکل ۱۰- نحوه همگرایی تابع هدف در هر تکرار الگوریتم برای سناریوی دوم در حالت مبتنی بر فرکانس



شکل ۱۱- مقادیر محاسبه شده درصدهای خرابی المان‌ها توسط الگوریتم برای سناریوی دوم با تابع هدف مبتنی بر پاسخ فرکانسی

تخمین زده شده است که البته نسبت به حالت تابع هدف مبتنی بر فرکانس این خرابی‌ها بسیار نزدیک به صفر می باشند. نحوه همگرایی الگوریتم به پاسخ نیز در شکل (۱۲) نشان داده شده است. مسئله مهم در حالت مبتنی بر پاسخ فرکانسی افزایش چشم‌گیر زمان اجرای برنامه می‌باشد که ناشی از حجم بالای عملیات ریاضی با توجه به ماهیت مسئله است.

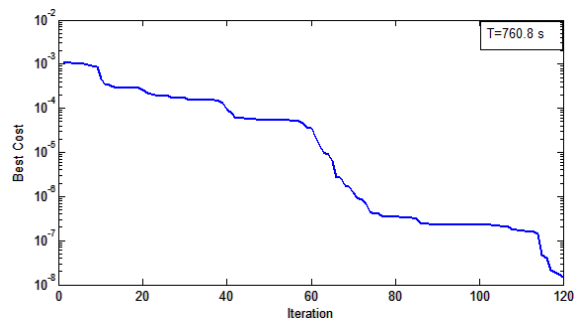
نتایج الگوریتم اجتماع ذرات در حالت مبتنی بر پاسخ‌های فرکانسی سازه در شکل (۱۱) نشان داده شده است. با توجه به این شکل الگوریتم در این حالت نیز در بحث تشخیص مکان خرابی بسیار موفق عمل کرده و شدت‌های خرابی بسیار نزدیک به مقادیر واقعی و با اختلاف حداکثر ۱/۵٪ محاسبه شده است. در این حالت نیز برخی المان‌های کاملاً سالم با خرابی اندکی

المان‌های ۱، ۲۲ و ۴۱ خرابی‌های ۰.۴۰٪، ۰.۵۶/۱٪ و ۰.۳۵/۹٪ محاسبه نمود. میزان خرابی محاسبه شده برای المان شماره ۱ با مقدار واقعی ۰.۵٪ و در المان شماره ۴۱ نیز تقریباً ۰.۵٪ تفاوت دارد. ولی در مورد المان شماره ۲۲ نزدیک به مقدار واقعی برآورد شده است. در حالت توابع هدف مبتنی بر توابع پاسخ فرکانسی برای سناریوی دوم بهبود در پاسخ الگوریتم کاملاً مشهود است، طوری که میزان خرابی در المان‌های ۱ و ۲۲ برابر مقادیر واقعی برآورد شده است برای المان شماره ۴۱ نیز با اختلاف کمتر از ۰.۲٪ میزان خرابی محاسبه شده است. در تفسیر نتایج و پاسخ‌های الگوریتم مشاهده می‌گردد که الگوریتم در حالت توابع هدف مبتنی بر فرکانس در بحث تشخیص مکان خرابی‌های عمده کاملاً موفق و در برآورد شدت خرابی با خطای حداکثر ۸/۷٪ که مربوط به عضو کاملاً سالم شماره ۴۳ می‌باشد عمل کرده است. نتایج مربوط به حالت توابع هدف مبتنی بر تابع پاسخ فرکانسی مبین کارکرد صحیح الگوریتم هم در بحث تشخیص مکان خرابی و هم در بحث برآورد و تخمین شدت خرابی می‌باشد. در این حالت نتایج الگوریتم بسیار نزدیک به مقادیر واقعی و حداکثر خطا نیز به میزان ۰.۳٪ که در المان کاملاً سالم ۴۳ می‌باشد. افزایش دقت الگوریتم در حالت تابع هدف مبتنی بر پاسخ فرکانسی به علت بهینه‌سازی هم‌زمان فرکانس‌های طبیعی و مودشکل‌های سازه می‌باشد که این بهینه‌سازی هم‌زمان در واقع اعمال تقیّد بیشتر بر مسئله می‌باشد.

با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده گردید که الگوریتم اجتماع ذرات از قدرت بسیار خوبی در تشخیص محل و شدت خرابی برخوردار است. لذا در مسائل مربوط به تعمیرات و تعویض المان‌ها می‌توان از این روش‌ها به عنوان یکی از گزینه‌های تشخیصی در جهت هرچه بهتر و هدفمند کردن بازرسی‌ها و تعمیرات استفاده کرد. از طرفی پیشنهاد می‌گردد که در مرحله طراحی و ساخت سازه‌ها حتی‌الامکان برای سازه‌های بزرگ و مهم همانند سکوه‌های شابلونی، مدل اجزای محدود سکو به صورت یک مدل اجزای محدود پایه تهیه و نگهداری گردد تا در مواقع لزوم مثل پروسه عیب‌یابی بتوان به آن‌ها رجوع کرد.

۸- مراجع

- [1] Cawley, P., Adams, R. D., "The Locations of Defects in Structures from Measurements of Natural Frequencies", *Journal of Strain Analysis*, 1979, 14 (2), 49-57.
- [2] Yuen, M., "A Numeral Study of The Eigen Parameters of Damaged Cantilever", *Journal*



شکل ۱۲- نحوه همگرایی تابع هدف در هر تکرار الگوریتم برای سناریوی دوم در حالت مبتنی بر پاسخ فرکانسی

۷- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، عیب‌یابی سکوی شابلونی با رصد تغییرات مشخصه‌های مودال و ارتعاشی سکو صورت پذیرفت. تغییرات مشخصه‌های مودال به صورت توابع هدف مبتنی بر فرکانس‌های طبیعی سکو و توابع پاسخ فرکانسی تعریف گردیدند. در واقع مطالعه حاضر یک روش محاسباتی مبتنی بر استفاده از الگوریتم فراابتکاری اجتماع ذرات را پیشنهاد می‌دهد که هزینه‌ها و خطرات مربوط به بازرسی و آزمایشات محلی را ندارد. روش پیشنهادی این پژوهش نسبت به روش‌های عیب‌یابی قبلی نیاز به انجام تحلیل حساسیت نداشته و در نتیجه کاهش فضای جستجو نیز لازم نمی‌باشد. در نتیجه عملاً کل سکو مورد پایش قرار می‌گیرد. ورودی‌ها الگوریتم حاضر از اندازه‌گیری فرکانس‌های طبیعی و توابع پاسخ فرکانسی سازه در حال سرویس‌دهی فراهم می‌شود.

جهت ارزیابی کارایی الگوریتم در این پژوهش دو سناریو خرابی روی سازه مورد نظر اعمال گردید. سناریوهای خرابی شامل کاهش در سختی اعضا تعریف شدند. در سناریوی اول خرابی ۰.۶۰٪ و ۰.۸۰٪ به ترتیب در المان‌های شماره ۱ و ۱۳ اعمال شدند. الگوریتم با توابع هدف مبتنی بر فرکانس‌های طبیعی و توابع پاسخ فرکانسی شروع به حل مسئله بهینه‌سازی نمود. الگوریتم اجتماع ذرات در حالت تابع هدف مبتنی بر فرکانس‌های طبیعی میزان خرابی در المان شماره یک را درست و المان شماره ۱۳ را به میزان ۰.۷۹/۸٪ محاسبه نمود. همچنین الگوریتم در حالت تابع هدف مبتنی بر توابع پاسخ فرکانسی میزان خرابی در هر دو المان را درست و دقیق تشخیص داد. الگوریتم یک بار هم با سناریوی دوم که شامل خرابی در سه المان ۱ و ۲۲ و ۴۱ به ترتیب برابر ۰.۴۵٪، ۰.۵۵٪ و ۰.۴۰٪ مورد ارزیابی قرار گرفت. در حالت توابع هدف مبتنی بر فرکانس الگوریتم به ترتیب برای

- Structures Using Frequency Domain Selective Measurements", *Journal of Marine Science*, 2013, 12, 193-199.
- [13] Yalan, X., Yu, Q., Jianjun, C., Gangbing, S., "Probability-Based Damage Detection Using Model Updating With Efficient Uncertainty Propagation", *Journal of Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, 60, 958-970.
- [14] Yang, Z. B., Chen, X. F., Xie, Y., Zhang, X. W., "The Hybrid Multivariate Analysis Method for Damage Detection", *Structural Control and Health Monitoring*, 2016, 23, 123-43.
- [15] Idelson, A., Rafael, H. L., Leandro, F. M., "An Improved Hybrid Optimization Algorithm for Vibration Based-Damage Detection", *Journal of Advances in Engineering Software*, 2016, 93, 47-64.
- [16] Kennedy, J., Eberhart, R., "Particle Swarm Optimization", *IEEE International Conference of Neural Network*, 1995.
- [17] Weaver, W. J., Johnston, P. R., "Structural Dynamics by Finite Elements", Prentice-Hall, Inc., 1994.
- [۱۸] ضیائی‌راد، س.، "آنالیز مودال"، مؤسسه علمی دانش-پژوهان برین، انتشارات ارکان، ۱۳۸۴.
- of Sound and Vibration, 1985, 1085 103 (3), 301-310.
- [3] Kim, J. H., Jeon, H. S., Lee, C. W., "Application of the Modal Assurance Criteria for Detection and Locating Structural Faults", 10th International Modal Analysis Conference, 1992, pp 536-540.
- [4] Hamey, C. S., Lestari, W., Qiao, P., Song G., "Experimental Damage Identification of Carbon/Epoxy Composite Beams Using Curvature Mode Shapes", *Structural Health Monitoring*, 2004, 3 (3), 33-53.
- [5] Lestari, Q. W., Hanagud, P. S., "Curvature Mode Shape-Based Damage Assessment of Carbon/Epoxy Composite Beams", *Journal Intelligent Material Systems and Structures*, 2007, 18:189-208.
- [6] Sampaio, R. P., Maia, N. M., Silva, J. M., "Damage Detection Using The Frequency Response Function Curvature Method", *Journal of Sound and Vibration*, 1992, 266, 1029-1042.
- [7] Huajun, L., Shuqing, W., Hezhen, Y., "Modal Strain Energy Decomposition Method for Damage Detection of an Offshore Structure Using Modal Testing Information", *Third Chinese-German Joint Symposium on Coastal and Ocean Engineering*, 2006.
- [8] Golafshani, A. A., Kianian, M., Godrati, E., "Health Monitoring of Structures Using Few Frequency Response Measurements", *Journal of Civil Engineering*, 2010, 17, 493-500.
- [9] Elshafey, A. A., Haddara, M. R., Marzouk, H., "Damage Detection in Offshore Structures Using Neural Networks", *Marine Structures*, 2010, 23, 131-145.
- [10] Mojtahedi, A., Lotfollahi-Yaghin, M. A., Etefagh, M. M., Fujikubo, M., "Detection of Nonlinearity Effects in Structural Integrity Monitoring Methods for Offshore Jacket-Type Structures Based on Principal Component Analysis", *Marine Structures*, 2013, 33, 100-119.
- [11] Majumdar, A., Maiti, D. K., Maity, D. "Damage Assessment of Truss Structures from Changes in Natural Frequencies Using Ant Colony Optimization", *Journal of Marine Science*, 2013, 12, 193-199.
- [12] Kianian, M., Golafshani, A. A., Ghodrati, E., "Damage Detection of Offshore Jacket

EXTENDED ABSTRACT

Developing a Robust Damage Detection Method for Offshore Jacket Platform Using Particle Swarm Optimization Algorithm

Shahriar Baybordi, Alireza Mojtahedi *

Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz 5166616471, Iran

Received: 02 January 2016; **Accepted:** 02 June 2016

Keywords:

Damage detection, Optimization, Modal parameters, Particle swarm algorithm, Frequency response function, Natural frequency

1. Introduction

Creation the necessary conditions to achieve reliable methods to estimate and detect structural damages of the main objectives of the research has been done in recent years. Due to the fact that each structure has its own characteristics, achieving to high reliable methods in the field of civil engineering is faced with a serious challenge [1, 2]. A number of researchers have proposed several methods based on different parameters and indices. But, vibration-based damage detection has been significantly developed in the past several decades but it has yet to be fully realized for large-scale structures and its technology is still developing rapidly [3]. In the vibration-based damage detection, the most widely used condition indices are modal parameters. In this research, new damage detection method based on combination optimization problem is introduced. In this study, modal parameters (Frequency, Frequency Response Function) used to detect and quantify damage with solving the inverse problem of optimization by particle swarm optimization (PSO) algorithm. Different damage scenarios apply on model and modal parameters is extracted and insert to the algorithm. According to results of solution the suitable parameter is introduced. Also, about the algorithm ability to detect damage scenarios discussed.

2. Methodology

2.1. Numirecal modeling

The multi-purpose FEM-based software package, ANSYS and MATLAB was used for the numerical modeling and analysis. ANSYS element type PIPE 288 was used to model the legs and braces and SHELL 4 NODE 188 was used to model the deck. Neglecting the damping of the structure, its dynamic equation can be expressed as:

$$[M]\{\ddot{D}\} + [S]\{D\} = \{0\} \quad (1)$$

Where, $[M]$ and $[K]$ are the masses, and stiffness matrices of the jacket respectively.

2.2. Damage formulation

Damage in the present study is considered as reduction in stiffness only, without any change in mass of the structure. When damage occurs in a structure, the stiffness matrix of the damaged element, donated as $[k_{ed}]$, the stiffness matrix of the damaged structure can be expressed as the sum of damaged element stiffness matrix.

$$k_{ed} = (1 - \beta_i)k_e \quad (2)$$

* Corresponding Author

E-mail addresses: Sh.baybordi@gmail.com (Shahriar Baybordi), mojtahedi@tabrizu.ac.ir (Alireza Mojtahedi).

2.3. PSO algorithm

Particle Swarm Optimization (PSO) is a population-based stochastic optimization technique developed by Kennedy and Eberhart (1995) based on the social behavior of bird flocks [4]. PSO for solving problem utilizes a population (called swarm) of particles in the search space. The particles update status according to the following equations:

$$V_j^i [t + 1] = wv_j^i [t] + c_1r_1(x_j^{i,best} [t] - x_j^i [t]) + c_2r_2(x_j^{g,best} [t] - x_j^i [t]) \tag{3}$$

c_1 and c_2 are personal and social learning factors. r_1 and r_2 are random numbers between zero and one.

3. Results and discussion

To evaluate the performance of PSO algorithm for the diagnosis of location and severity of the damage, two different scenarios apply on the structure. In the first scenario applies damage in two elements, 60% stiffness reduction in element 1 and 80% in element 13. Fig. 1 shows the performances of PSO for detecting two elements damage cases using first five frequencies and Fig. 2 shows the performances of PSO for detecting with frequency response function. Scenario 2 is contains 55% damage in element 1, 45% and 40% in elements 22 and 41 respectively.

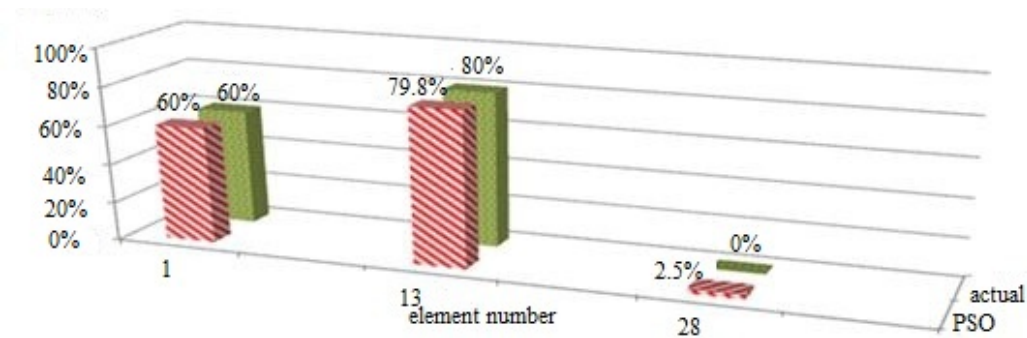


Fig. 1. Comparison of PSO results with actual damage scenario in frequency based objective function.

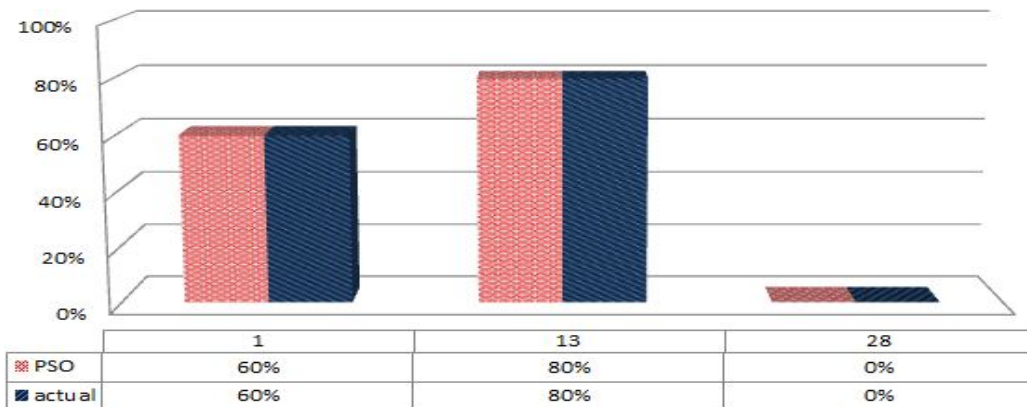


Fig. 2. Comparison of PSO results with actual damage scenario in frequency response function based objective function.

4. Conclusions

A simple but robust methodology is presented here to locate and quantify damages in the structures using frequency and FRF as input response in PSO algorithm. The algorithm is tested on jacket type structure, with two different damage scenarios. It is observed that PSO is more reliable in predicting damages. PSO with FRF as input response shows better accuracy than PSO with frequencies. This is because FRF contains data related to mode shape in addition to natural frequencies.

5. References

- [1] Cawely, P., Adams, R. D., "The Locations of Defects in Structures from Measurements of Natural Frequencies", *Journal of Strain Analysis*, 1979, 14 (2), 49-57.
- [2] Kim, J. H., Jeon, H. S., Lee, C. W., "Application of the Modal Assurance Criteria for Detection and Locating Structural Faults", *10th International Modal Analysis Conference*, 1992, pp 536-540.
- [3] Sampaio, R. P., Maia, N. M., Silva, J. M., "Damage Detection using the Frequency Response Function Curvature Method", *Journal of Sound and Vibration*, 1992, 266, 1029-1042.
- [4] Kennedy, J., Eberhart, R., "Particle Swarm Optimization", *IEEE International Conference of Neural Network*, 1995.