



دانشکده مهندسی عمران

گروه مهندسی سازه و زلزله

شناسایی خرابی سازه‌ها بر اساس پاسخ‌های دینامیکی با استفاده از مدل اجزا
محدود به‌روز شونده

دانشجو :

شاهرخ اسفراینی

استاد راهنما :

دکتر علی کیهانی

پایان‌نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

اسفند ۱۳۹۳

دانشکده مهندسی عمران

گروه مهندسی سازه و زلزله

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای شاهرخ اسفرائینی

تحت عنوان: شناسایی خرابی سازه‌ها بر اساس پاسخ‌های دینامیکی با استفاده از مدل

اجزا محدود به روز شونده

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
	نام و نام خانوادگی :		

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تقدیم به :

پدر فداکار و مادر مهربانم، آنها که :

من، این نوشته و بسی ناگفته‌های دیگر، وامدار تلاش‌های وصف ناشدنی‌شان می‌باشد. و همه آنهایی که در راستای تعالی علم و دانش قدمی برداشته‌اند.

(اگر ما در اوج ایستاده‌ایم به‌خاطر این است که بر روی شانه‌های گذشته‌گان ایستاده‌ایم)

تشکر و قدردانی:

حمد و سپاس بی‌کران بر خداوند یکتا و آفریننده جهان که او به برترین مخلوق خود توانایی یادگیری و یاد دادن عطا فرمود.

وقت سپاس است و قدر شناختن از آنان که دست در میان آتش داشتند و رنج راه را همراهی ایشان گنج نمود. سپاس فراوان از استاد محترم آقای دکتر علی کیهانی که در مدت انجام این پژوهش، کمک‌ها و راهنمایی‌های ایشان همواره یاری‌گر اینجانب بوده است.

از پدر و مادر بزرگوار و مهربانم که تمام زندگی خود را مرهون حمایت‌های عاشقانه ایشان هستم، بی‌نهایت سپاسگزارم. همچنین از خواهر و برادر عزیزم که همواره مشوق و امید دهنده در مراحل زندگی‌ام بوده‌اند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

تعهدنامه

اینجانب **شاهرخ اسفرائینی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی عمران - سازه** دانشکده **مهندسی عمران** دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **شناسایی خرابی سازه‌ها بر اساس پاسخ‌های دینامیکی با استفاده از مدل اجزا محدود به روز شونده** تحت راهنمایی **دکتر علی کیهانی** متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافته‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه‌های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد.

چکیده:

عیب‌یابی یکی از شاخه‌های کنترل سلامت سازه‌ها می‌باشد که در دو دهه اخیر توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. امروزه، تحقیقات بر روی روش‌های عیب‌یابی سازه‌ها بر پایه پاسخ‌های دینامیکی، بسیار گسترش یافته است زیرا از این روش‌ها می‌توان به‌عنوان روش‌های بررسی دائمی و بهنگام سازه‌ها استفاده کرد و از به‌وجود آمدن آسیب‌های بیشتر در سازه‌ها جلوگیری کرد. در این پایان‌نامه یک روش دو مرحله‌ای جدید برای عیب‌یابی سازه‌های پرعوضو مانند سازه‌های فضاکار ارائه می‌شود. در اثر خرابی یک سازه، ویژگی‌های استاتیکی و دینامیکی سازه تغییر کرده، که با در نظر گرفتن نحوه این تغییرات می‌توان مکان و شدت خرابی را در سازه‌ها شناسایی کرد.

در این پژوهش، تشخیص محل و شدت خرابی در سازه‌های فضاکار با استفاده از تغییرات انرژی کرنشی مودال المان‌های سازه (MSEBI) و الگوریتم بهینه‌سازی خفاش (BA) بررسی شده است. الگوریتم خفاش یک الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری جدید می‌باشد که در این پژوهش برای اولین بار در مبحث عیب‌یابی سازه‌ها به‌کار گرفته می‌شود. بدین منظور در مرحله اول با استفاده از تغییرات انرژی کرنشی مودال المان‌ها، اندیس خرابی هر المان به‌دست آمده و با توجه به آنها محل المان‌های محتمل خرابی تعیین می‌شود. در مرحله دوم با استفاده از اندیس خرابی مبتنی بر اختلاف بین فرکانس‌های سازه خراب واقعی و سازه بروز شونده به‌عنوان تابع هدف الگوریتم بهینه‌سازی خفاش، شدت خرابی در المان‌های سازه مشخص می‌شود.

برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی چند سازه فضاکار مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که روند دو مرحله‌ای ارائه شده به‌طور موفقیت آمیزی محل وقوع و شدت خرابی را در سازه‌های فضاکار، حتی در صورت وجود چند المان معیوب، با دقت بسیار خوبی تعیین می‌کند. همچنین با مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم خفاش (BA) با الگوریتم اجتماع ذرات (PSO) مشخص شد که این الگوریتم دقت و سرعت همگرایی بیشتر در بحث عیب‌یابی سازه‌ها دارد. به‌علاوه بررسی‌ها نشان داد، استفاده از شاخص انرژی کرنشی مودال به‌منظور تشخیص المان‌های مشکوک به خرابی دقت بالاتری در کاهش فضای جستجو و انتخاب المان‌های خراب نسبت به شاخص باقی‌مانده نیروی مودی دارد.

واژه‌های کلیدی: عیب‌یابی سازه‌های فضاکار، الگوریتم بهینه‌سازی خفاش، الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات، انرژی کرنشی مودال، شدت و مکان خرابی

لیست مقالات:

اسفرائینی ش.، کیهانی ع.؛ "عیب‌یابی سازه‌های فضاکار با استفاده از روش دو مرحله‌ای مبتنی بر انرژی کرنشی مودال و الگوریتم بهینه‌سازی خفاش"، دومین کنگره بین‌المللی سازه، معماری و توسعه شهری، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز ۲۶ الی ۲۸ آذر ماه ۱۳۹۳.

فهرست مطالب:

فصل اول: مقدمه

- ۱-۱ مقدمه..... ۲
- ۲-۱ عیب‌یابی سازه..... ۲
- ۱-۲-۱ روش‌های مخرب عیب‌یابی..... ۲
- ۲-۲-۱ روش‌های غیر مخرب عیب‌یابی..... ۳
- ۳-۲-۱ روش محاسبه معکوس در عیب‌یابی..... ۳
- ۳-۱ پاسخ سازه..... ۵
- ۴-۱ روش‌های بهینه‌سازی و دو مرحله‌ای در عیب‌یابی..... ۷
- ۵-۱ خرابی..... ۷
- ۱-۵-۱ خرابی مقطع..... ۸
- ۲-۵-۱ خرابی به علت ناپایداری..... ۸
- ۶-۱ هدف پروژه..... ۸
- ۷-۱ چارچوب کلی تحقیق..... ۹
- فصل دوم: مروری بر تحقیقات گذشته..... ۱۱**
- ۱-۲ مقدمه..... ۱۲
- ۲-۲ عیب‌یابی سازه به صورت تئوری..... ۱۲
- ۱-۲-۲ عیب‌یابی سازه‌ها با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی..... ۱۲
- ۲-۲-۲ عیب‌یابی سازه‌ها با استفاده از روش‌های دومرحله‌ای عیب‌یابی..... ۱۳

- ۳-۲-۲ عیب‌یابی سازه‌ها با استفاده از داده‌های نویزی.....۱۴
- ۴-۲-۲ عیب‌یابی سازه‌ها با استفاده از داده‌های استاتیکی.....۱۴
- ۵-۲-۲ عیب‌یابی سازه‌ها با استفاده ترکیبی از داده‌های استاتیکی و دینامیکی.....۱۴
- ۶-۲-۲ عیب‌یابی سازه‌ها با استفاده از روش‌های آنالیز مویک.....۱۵
- ۷-۲-۲ عیب‌یابی سازه‌ها با استفاده از الگوریتم هوش مصنوعی شبکه عصبی و ماشین بردار پشتیبان.....۱۵
- ۳-۲ سلامت‌سنجی سازه‌ها با تحقیقات آزمایشگاهی.....۱۷
- ۴-۲ سلامت‌سنجی سازه‌ها با تحقیقات میدانی.....۱۸
- فصل سوم: الگوریتم‌های بهینه‌سازی.....۱۹
- ۱-۳ مقدمه.....۲۰
- ۲-۳ الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند.....۲۰
- ۳-۳ الگوریتم بهینه‌سازی خفاش (BA).....۲۰
- ۱-۳-۳ ایده کلی الگوریتم خفاش.....۲۱
- ۲-۳-۳ انعکاس صدا.....۲۲
- ۳-۳-۳ الگوریتم خفاش.....۲۲
- ۴-۳-۳ حرکت خفاش‌های مجازی.....۲۵
- ۵-۳-۳ بلندی و رتبه انتشار موج.....۲۵
- ۴-۳ الگوریتم جامعه پرندگان (PSO).....۲۶
- ۱-۴-۳ فرمول‌بندی الگوریتم (PSO).....۲۷

فصل چهارم: روش دو مرحله‌ای پیشنهادی برای شناسایی خرابی..... ۳۱

۱-۴ مقدمه..... ۳۲

۲-۴ مرحله اول..... ۳۲

۳-۴ باقی مانده نیروی مودال..... ۳۴

۴-۴ مرحله دوم..... ۳۵

۵-۴ صورت کلی روند پیشنهادی برای عیب‌یابی سازه‌های فضاکار..... ۳۶

۶-۴ تابع هدف..... ۳۷

فصل پنجم: مثال‌های موردی..... ۳۸

۱-۵ مقدمه..... ۳۹

۲-۵ سازه فضاکار دولایه چلیک با نقش دوراه روی دوراهه ۷۲۱ عضوی..... ۴۱

۳-۵ سازه فضاکار شبکه تخت دولایه ۸۰۰ عضوی..... ۴۷

۴-۵ سازه فضاکار دولایه چلیک با نقش دوراه روی دوراهه ۲۸۸ عضوی..... ۵۱

۵-۵ سازه فضاکار گنبد دیاماتیک ۲۱۶ عضوی..... ۵۵

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات..... ۶۵

۱-۶ نتیجه‌گیری..... ۶۶

۲-۶ ارائه پیشنهادات..... ۶۷

منابع..... ۶۹

فهرست اشکال:

- شکل ۱-۱: سازه خرابایی تحت دو نیروی استاتیکی ۴
- شکل ۲-۱: تغییر شکل شماتیک در اثر اعمال بار ۴
- شکل ۳-۱: تاثیر خرابی در تغییر مکان گره‌ها ۴
- شکل ۴-۱: نحوه افزایش تغییر شکل گره‌ها به صورت شماتیک ۵
- شکل ۵-۱: شکل شماتیک از انواع نوپز در عیب‌یابی ۷
- شکل ۱-۳: مراحل الگوریتم BA ۲۴
- شکل ۲-۳: فرآیند الگوریتم PSO ۲۹
- شکل ۱-۴: روند کلی تعیین شدت خرابی با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز ۳۷
- شکل ۱-۵: هندسه چلیک دو لایه با نقش دوره روی دوره ۷۲۱ عضوی ۴۱
- شکل ۲-۵: نمایش سناریوی خرابی بر روی سازه: (الف): سناریوی اول، (ب): سناریوی دوم ۴۳
- شکل ۳-۵: المان‌های محتمل خرابی به‌ازای سناریوی اول ۴۴
- شکل ۴-۵: المان‌های محتمل خرابی به‌ازای سناریوی دوم ۴۴
- شکل ۵-۵: شدت خرابی در المان‌های سازه به‌ازای سناریوی اول ۴۵
- شکل ۶-۵: شدت خرابی در المان‌های سازه به‌ازای سناریوی دوم ۴۶
- شکل ۷-۵: نمودار تاریخچه همگرایی الگوریتم BA ۴۶
- شکل ۸-۵: هندسه سازه فضاکار شبکه تخت دولایه ۸۰۰ عضوی ۴۷
- شکل ۹-۵: نمایش سناریوی خرابی بر روی سازه: (الف): سناریوی اول، (ب): سناریوی دوم ۴۹
- شکل ۱۰-۵: المان‌های محتمل خرابی به‌ازای سناریوی اول ۴۹
- شکل ۱۱-۵: المان‌های محتمل خرابی به‌ازای سناریوی دوم ۵۰
- شکل ۱۲-۵: شدت خرابی در المان‌های سازه به‌ازای سناریوی اول ۵۰
- شکل ۱۳-۵: شدت خرابی در المان‌های سازه به‌ازای سناریوی دوم ۵۱

شکل ۵-۱۴: هندسه سازه فضاکار چلیک دولایه با نقش دوراوه روی دوراوه ۲۸۸ عضوی۵۲

شکل ۵-۱۵: المان‌های محتمل خرابی۵۳

شکل ۵-۱۶: شدت خرابی تشخیص داده شده در المان‌های سازه با استفاده از BA و PSO۵۴

شکل ۵-۱۷: مقایسه تاریخچه همگرایی دو الگوریتم BA و PSO۵۵

شکل ۵-۱۸: هندسه سازه فضاکار گنبد دیاماتیک دو لایه ۲۱۶ عضوی۵۶

شکل ۵-۱۹: نمایش سناریوی خرابی بر روی سازه: (الف): سناریوی اول، (ب): سناریوی دوم۵۸

شکل ۵-۲۰: مکان المان‌های محتمل خرابی در سناریوی اول با استفاده از شاخص MSEBI۵۸

شکل ۵-۲۱: مقدار باقی‌مانده نیروی مودی در درجات آزادی جهت X در سناریوی اول۵۹

شکل ۵-۲۲: مقدار باقی‌مانده نیروی مودی در درجات آزادی جهت Y در سناریوی اول۵۹

شکل ۵-۲۳: مقدار باقی‌مانده نیروی مودی در درجات آزادی جهت Z در سناریوی اول۶۰

شکل ۵-۲۴: مکان المان‌های محتمل خرابی در سناریوی اول با استفاده از شاخص باقی‌مانده نیروی

مودال۶۰

شکل ۵-۲۵: مکان المان‌های محتمل خرابی در سناریوی دوم با استفاده از شاخص MSEBI۶۱

شکل ۵-۲۶: مقدار باقی‌مانده نیروی مودی در درجات آزادی جهت X در سناریوی دوم۶۲

شکل ۵-۲۵: مقدار باقی‌مانده نیروی مودی در درجات آزادی جهت Y در سناریوی دوم۶۲

شکل ۵-۲۸: مقدار باقی‌مانده نیروی مودی در درجات آزادی جهت Z در سناریوی دوم۶۳

شکل ۵-۲۹: مکان المان‌های محتمل خرابی در سناریوی دوم با استفاده از شاخص باقی‌مانده نیروی

مودال۶۳

شکل ۵-۳۰: شدت خرابی در المان‌های سازه به‌ازای سناریوی اول۶۴

شکل ۵-۳۱: شدت خرابی در المان‌های سازه به‌ازای سناریوی دوم۶۴

فهرست جداول:

- جدول ۱-۵ : مقادیر پارامترهای تنظیمی الگوریتم خفاش (BA) ۴۰
- جدول ۲-۵: شماره و مقدار خرابی المان‌ها در سازه فضاکار دولایه چلیک با نقش دوراه روی دوراهه
۷۲۱ عضوی ۴۲
- جدول ۳-۵: شماره و مقدار خرابی المان‌ها در سازه فضاکار شبکه تخت دولایه ۸۰۰ عضوی ۴۸
- جدول ۴-۵: شماره و مقدار خرابی المان‌ها در سازه فضاکار چلیک دولایه با نقش دوراهه روی دوراهه
۲۸۸ عضوی ۵۳
- جدول ۵-۵ : مقادیر پارامترهای تنظیمی الگوریتم جامعه پرندگان PSO ۵۴
- جدول ۶-۵ : شماره و مقدار خرابی المان‌ها در سازه فضاکار گنبد دیاماتیک دو لایه ۲۱۶ عضوی ۵۷

۱- فصل اول:

مقدمه

نگهداری و اطمینان از سلامت سازه (سد، ساختمان، پل، راه و...) در بحث مهندسی از اهمیت خاصی برخوردار است. اهمیت تعمیر و نگهداری سازه در مقابل ساخت سازه‌های جدید، بخصوص در کشورهای توسعه یافته آنقدر افزایش پیدا کرده است که دهه اخیر را می‌توان دهه تعمیر و نگهداری سازه نام‌گذاری کرد. زیرا که با دانستن خرابی‌های موضعی سازه و رفع آن می‌توان از خرابی کل سازه و خسارت‌های مالی و جانی جبران ناپذیر و وقوع یک فاجعه جلوگیری کرد. روش‌های قدیمی برای بررسی سلامت سازه، مشاهده چشمی در محل از سازه، روش‌های مخرب مانند سونداژ کردن و ضربه زدن و نفوذ رنگ و همچنین روش‌های غیرمخرب مانند روش‌های مغناطیسی، اشعه X، اسکن الکترونی، آلتراسونیک و آزمایش پرتونگاری مورد استفاده قرار می‌گرفت. که در برخی موارد درصد خطای بالایی داشته‌اند و حتی امکان شناسایی خرابی غیر ممکن بوده است.

۱-۲- عیب‌یابی سازه

روش‌هایی که در حال حاضر برای تعیین آسیب دیدگی مورد استفاده قرار می‌گیرد، اغلب روش‌های تجربی و به‌صورت چشمی و موضعی می‌باشد. از این روش‌ها می‌توان به روش مغناطیسی و پرتونگاری اشاره کرد. امکان تماس و نزدیک شدن به سازه و پیش‌بینی تقریبی محل آسیب دیدگی از محدودیت‌های عمده این روش‌ها می‌باشد که عملاً باعث شده است، روش‌های فوق به روش‌هایی وقت‌گیر و پرهزینه تبدیل شود.

اصولاً روش‌های عیب‌یابی به سه بخش اصلی زیر تقسیم می‌شود:

۱- روش‌های مخرب (DT^1)

۲- روش‌های غیرمخرب (NDT^2)

۳- روش‌های غیرمستقیم و معکوس (IM^3)

۱-۲-۱- روش‌های مخرب عیب‌یابی

روش‌های مخرب به آزمایش‌هایی گفته می‌شود که پس از انجام آنها نمونه آزمایش شده بلااستفاده می‌گردد. آزمایش‌های مخرب اغلب به‌منظور بررسی تعیین خواص مکانیکی و یا کنترل کیفیت مواد با استفاده از نمونه‌برداری از قطعه مورد نظر به کار می‌رود.

¹ Destructive Test

² Non-Destructive Test

³ Inverse Methods

معمولاً در آزمایش، خراب کردن یک عضو سازه‌ای هزینه زیادی صرف می‌شود. به‌طور کلی معایب روش‌های مخرب عبارت‌اند از:

۱- سرعت پایین

۲- پرهزینه بودن

۳- ارائه اطلاعات فقط مربوط به نمونه‌های آزمایش شده

۱-۲-۲- روش‌های غیرمخرب عیب‌یابی

در مقابل روش‌های مخرب، روش‌های غیرمخرب قرار دارند. تست‌های غیرمخرب، روش‌های غیر تهاجمی در تشخیص درستی اجزای یک ماده یا ساختار یا اندازه‌گیری برخی کمیت‌های فیزیکی از عضو است. به عبارت دیگر روش‌های غیرمخرب به روش‌هایی اطلاق می‌شود که در آنها کارایی یک عضو بدون ایجاد خرابی و نیز بدون آسیب پوشش سطحی در آن مورد بررسی قرار گیرد.

در ادامه به چند نمونه از روش‌های غیرمخرب اشاره می‌شود:

۱- بازرسی چشم (VT)

۲- بازرسی به روش مایع نافذ (LPT)

۳- بازرسی با ذرات مغناطیسی (MT)

۴- بازرسی آلتراسونیک (UT)

۵- بازرسی رادیوگرافی با امواج (RT)

۶- بازرسی الکترومغناطیسی (EMT)

که با توجه به اهداف آزمون و محدودیت‌های هر کدام از روش‌های فوق، یکی یا چند مورد از این روش‌ها برای تست انتخاب می‌گردد.

به‌طور کلی معایب موجود در روش‌های غیرمخرب مستقیم را می‌توان در دو مورد زیر بیان نمود:

۱- محدودیت‌های موجود در هر روش مانند نیاز به تماس و نزدیک شدن به سازه و پیش‌بینی

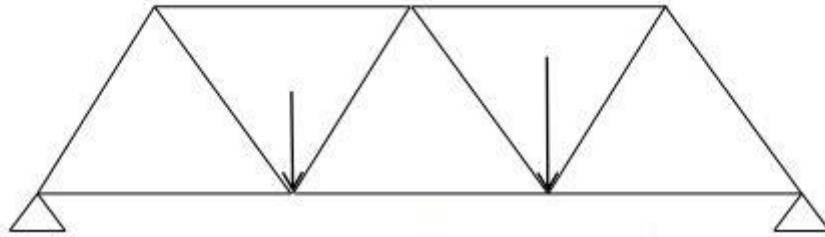
تقریبی محل آسیب‌دیدگی

۲- پرهزینه بودن این روش‌ها

۱-۲-۳- روش محاسبه معکوس در عیب‌یابی

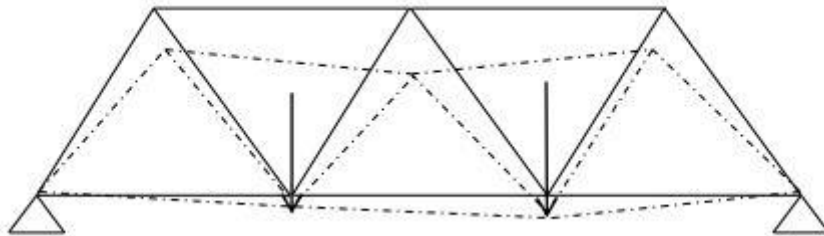
در اثر خرابی سازه، پارامترهای سازه‌ای تغییر می‌کنند. به‌عنوان مثال در اثر خرابی المان‌ها سختی کل سازه کاهش پیدا می‌کند. در این روش با استفاده از تغییرات پاسخ مورد بررسی، به سلامت یا خرابی سازه پی می‌بریم. نحوه عملکرد این روش را در طی مثالی بررسی می‌کنیم.

سازه خرپایی زیر را در نظر بگیرید که تحت دو نیروی استاتیکی قرار گرفته است (شکل (۱-۱)).



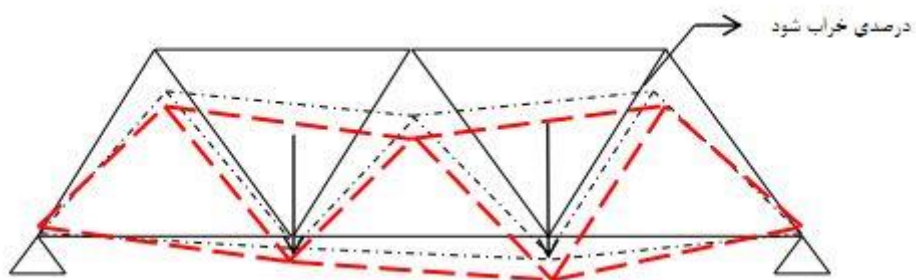
شکل ۱-۱: سازه خرپایی تحت دو نیروی استاتیکی

در اثر اعمال نیرو سازه تغییر شکل داده، شکل (۲-۱).



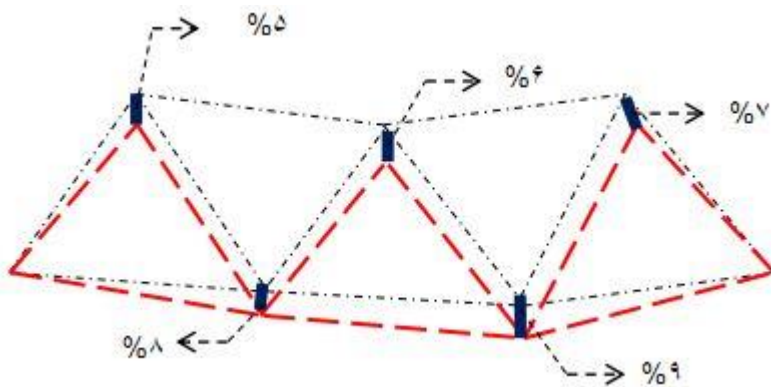
شکل ۲-۱: تغییر شکل شماتیک در اثر اعمال بار

در صورتی که یکی از اعضای سازه خراب شود، سختی کل سازه کاهش پیدا می کند و تغییر شکل سازه نسبت به حالت سالم افزایش پیدا می کند، شکل (۳-۱)



شکل ۳-۱: تاثیر خرابی در تغییر مکان گرهها

با استفاده از نحوه افزایش تغییر مکان گرهها می توان به سلامت سازه پی برد. شکل (۴-۱)



شکل ۱-۴: نحوه افزایش تغییر شکل گره‌ها به صورت شماتیک

روش‌های غیرمستقیم که امروزه استفاده می‌شود را می‌توان به صورت زیر تقسیم کرد:

- ۱- روش‌های مبتنی بر تغییر فرکانس^۱
 - ۲- روش‌های مبتنی بر تغییر تابع پاسخ فرکانسی^۲
 - ۳- روش‌های مبتنی بر تغییر مدشکل‌ها^۳
 - ۴- روش‌های مبتنی بر انحنا^۴
 - ۵- روش‌های مبتنی بر انرژی کرنشی^۵
 - ۶- روش‌های مبتنی بر آنالیز حساسیت^۶
 - ۷- روش‌های مبتنی بر آنالیز موجک^۷
 - ۸- روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی^۸
- ۱-۳- پاسخ سازه

پاسخ‌های مورد استفاده را می‌توان به سه نوع پاسخ تقسیم کرد:

- ۱- پاسخ استاتیکی: که شامل تغییر مکان استاتیکی در جهت‌های مختلف مختصات اصلی در اثر بار خارجی ساکن می‌باشد.
- ۲- پاسخ دینامیکی: که می‌توان از فرکانس و مودشکل‌های سازه و تابع پاسخ فرکانس (FRF^۱) نام

^۱ Frequency change methods

^۲ FRF change methods

^۳ Mode shape change methods

^۴ Mode shape curvature methods

^۵ Strain energy methods

^۶ Sensitivity analyse

^۷ Wavelet analyse

^۸ Artificial intelligence methods

برد.

۳- پاسخ از طریق آنالیز تاریخچه زمانی: که در هر لحظه از زمان امکان دستیابی به پاسخ سازه (تغییر مکان گره و...) می‌باشد.

باید توجه کرد در صورت استفاده از سنسور برای ثبت پاسخ های سازه نکات متعددی باید مورد توجه قرار گیرد زیرا وجود جریان هوا، تابش نور خورشید، پرنده‌ها و اشیای متحرک و منابع گرما موجب ایجاد آلام‌های متعدد خطا می‌شود. اگرچه در محیط داخل ساختمان با دقت در طراحی و نصب می‌توان از این آلام‌های خطا تا حد زیادی پیشگیری نمود اما به هنگام نصب سنسور در محیط بیرون مقابله با این تاثیرات اجتناب ناپذیر است.

می‌توان علت خطا در سنسورها را به دلایل زیر دانست:

۱- فرسوده بودن وسایل اندازه‌گیری

۲- کالیبره نبودن سنسورها

۳- نوسانات برق که در وسایل الکتریکی وارد می‌شود و غیره...

نحوه ثبت پاسخ‌ها توسط یکسری سنسورهایی که در درجات آزادی مختلفی از سازه قرار دارند، می‌باشد. پاسخ‌هایی که از طریق سنسورها به دست می‌آید به دلیل خطاهایی که در اندازه‌گیری وجود دارد دارای نویز می‌باشند.

به‌طور کلی می‌توان وجود نویز در مسائل عیب‌یابی را ناشی از عوامل سه‌گانه زیر دانست:

۱- نویزی که در اثر داده‌های ورودی^۲ (مانند بار اعمالی به سازه) ایجاد می‌شوند.

۲- نویزی که در اثر مدل کردن سازه^۳ (مانند خطی فرض کردن رفتار سازه) به آنالیز وارد می‌شود.

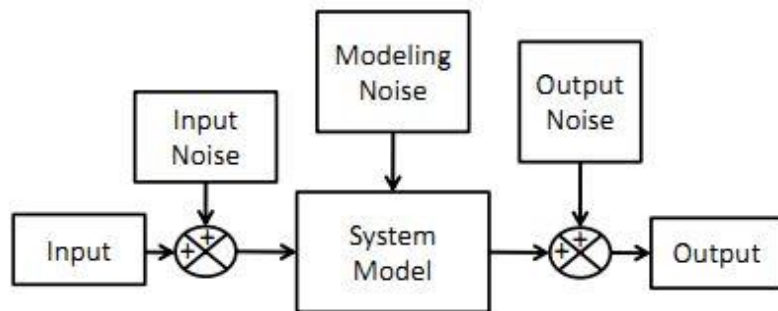
۳- نویزی که از خروجی^۴ سنسورها در ثبت پاسخ به تحلیل وارد می‌شود.

^۱ Frequency Response Function

^۲ Input Noise

^۳ Modeling Noise

^۴ Output Noise



شکل ۱-۸: شکل شماتیک از انواع نویز در عیب‌یابی

۴-۱- روش‌های بهینه‌سازی و دو مرحله‌ای در عیب‌یابی

در اثر خرابی یک سازه پارامترهای سازه‌ای تغییر می‌کند. به‌عنوان مثال خرابی باعث کاهش سختی و فرکانس سازه می‌شود که با بررسی نحوه تغییر پارامترهای سازه‌ای (تغییر مکان استاتیکی، فرکانس، مودشکل و...) می‌توان به محل و شدت خرابی دست پیدا کرد. حل مسائل عیب‌یابی غیرمخرب به‌طور کلی به دو روش، حل مستقیم و حل با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی تقسیم می‌شود که در حل توسط روش‌های مستقیم در مسائل با متغیرهای بالا، کاری زمان‌بر و گاهی غیر ممکن می‌باشد. در روش بهینه‌سازی با حداقل کردن اختلاف بین پاسخ واقعی که از سازه به‌دست آمده با پاسخی که از تحلیل روش بهینه‌سازی به‌دست آمده، می‌توان به محل و شدت خرابی رسید.

یکی از روش‌هایی که از آن در مسائل عیب‌یابی استفاده بسیاری می‌شود، روش دو مرحله‌ای می‌باشد. این روش به این صورت عمل می‌کند که در مرحله اول محل المان‌های خراب پیدا شده و در مرحله دوم مقدار و شدت خرابی را محاسبه می‌کند. البته در مسائلی که تعداد المان‌های سازه زیاد باشد و یا تعداد المان‌های خراب زیاد باشد، مرحله اول فقط تعداد المان‌ها را کاهش داده و در انتهای مرحله اول با تعدادی المان مشکوک به خرابی که المان‌های خراب بین آنها قرار دارد به‌جای کل المان‌های سازه سروکار داریم.

۵-۱- خرابی

اطمینان از سازه به‌عنوان یک اصل برای مهندسانی که مسؤول طراحی پروژه‌های عمرانی هستند، مطرح بوده است. مکانیزم‌های مختلفی موجب خرابی در سازه می‌شوند. در یک سازه به‌علت حادثه یا ضعف در طراحی و اجرا، یک یا تعدادی از اعضا خراب شده و پس از آن در صورت عدم ترمیم سازه، کل سازه خراب می‌شود. دو نوع از مهمترین مکانیزم‌های خرابی شامل موارد زیر است:

۱- خرابی مقطع

۲- خرابی به علت ناپایداری

۱-۵-۱- خرابی مقطع

یک تیر تحت خمش یا آرماتور تحت نیروی کششی را در نظر بگیرید. وقتی قسمتی از سطح مقطع از بین می‌رود نیرو بین باقی سطح مقطع پخش می‌شود. بر این اساس افزایش نیروی مقطع می‌تواند باعث گسیختگی مقطع شود. براساس مکانیسم شکست، تنش‌ها در اطراف ترک با کمتر شدن فاصله به بی‌نهایت میل می‌کنند. البته در سیستم‌های سازه‌ای المان‌ها از هم فاصله دارند و فواصلشان صفر نیست. ولیکن با این حال تمرکز نیرو در اعضا مجاور عضو آسیب دیده وجود دارد.

۱-۵-۲- خرابی به علت ناپایداری

به‌طور معمول سازه‌ها طوری طراحی می‌شوند که ناپایدار نشوند. شکست المان‌های مهاربندی می‌تواند باعث ناپایداری سازه و ایجاد خرابی شود. این حالت می‌تواند در خرپا یا تیر سازه اتفاق بیافتد. به‌طوری که المان‌های مهاربندی که برای پایداری المان‌های فشاری به کار می‌روند دچار شکست شوند. حالت دیگر، خرابی ورق سخت کننده است که باعث ناپایداری موضعی و در نهایت منجر به خرابی کلی می‌شود. در این حالت یک اتفاق کوچک منجر به خرابی گسترده می‌شود. البته کمانش ستون نیز می‌تواند باعث ناپایداری کلی سازه شود و در پی آن خرابی سازه اتفاق بیافتد.

۱-۶- هدف پژوهش

سازه فضاکار یک سیستم خرپای سه بعدی است که دهانه‌های آن در دو جهت گسترش یافته‌اند و اعضای آن فقط تحت تاثیر کشش و فشار قرار دارند. این سازه‌ها از مدول‌های یکسان و تکرار شونده با لایه‌های موازی در بالا و پایین (مشابه میله‌های فوقانی و تحتانی خرپا) تشکیل می‌گردند. سازه فضاکار، به مجموعه سازه‌های مشابهی اطلاق می‌شود که شامل شبکه‌ها، طاق‌ها، برج‌ها، شبکه‌های کابلی، سیستم‌های پوسته‌ای و غشایی، سازه‌های تا شونده و ترکیبات کش بستی می‌شود. این تعریف، یک تعریف ریخت شناسانه از سازه‌های فضا کار است. از مهمترین مزیت‌های سازه فضاکار رفتار لرزه‌ای خوب به جهت سبک وزنی آنها، درجه نامعینی زیاد و نیز مزیت‌هایی برای پوشش دهانه‌های زیاد بدون نیاز به ستون و نیز جنبه معماری از دیگر مزیت‌های اینگونه سازه‌ها می‌باشد که باعث می‌شود از اینگونه سقف‌ها برای مکان‌هایی همچون سالن‌های صنعتی، آشیانه هواپیما، نمایشگاه و ... استفاده گردد. سازه‌های فضاکار معمولاً به سه گروه عمده تخت، گنبد و چلیک تقسیم می‌شوند. شبکه‌های تخت به ترکیب یک سیستم یا چند وجهی با لایه‌های واحد، گفته می‌شود. شبکه مسطح ترکیبی از یک دووجهی که با تیرهای واحد متصل شده است می‌باشد.

هدف اصلی از این پژوهش عیب‌یابی سازه‌های فضاکار با استفاده از ردیابی تغییرات به‌وجود آمده در پاسخ‌های دینامیکی آنها در اثر خرابی می‌باشد.

اغلب تحقیقات انجام شده در زمینه تشخیص خرابی محدود به مدل‌های ساده می‌باشد. هنگامی که تعداد درجات آزادی و اعضای سازه بالا می‌رود حل مسأله با مشکل روبه‌رو می‌شود. در این تحقیق سعی بر آن شده است که روشی پیشنهاد گردد که قادر به حل سازه‌های بزرگ باشد.

۱-۷- چارچوب کلی تحقیق

در حال حاضر، مسأله سلامت‌سنجی سازه‌ها به‌طور کلی و سلامت‌سنجی سازه‌های پرعضو و مهم به‌طور خاص یکی از مسائل مهم در حوزه تحقیقات است که با چالش‌های زیادی مواجه می‌باشد. در فصل اول به مفهوم عیب‌یابی و روش‌های مختلف در این موضوع و خرابی سازه‌ها اشاره شد. در فصل دوم بر تحقیقات انجام شده توسط محققان در ارتباط با عیب‌یابی مروری شده است. در فصل سوم با مفهوم بهینه‌سازی هوشمند و الگوریتم خفاش^۱ و اجتماع ذرات^۲ توضیحاتی شرح داده می‌شود. در فصل چهارم روش دو مرحله‌ای مورد استفاده شده در این پایان‌نامه برای عیب‌یابی سازه‌های فضاکار و توابع هدف مرتبط بیان می‌شود. در فصل پنجم چندین مثال با روش پیشنهادی در این پایان‌نامه ارزیابی و با روش‌های دیگر مقایسه می‌شوند. در نهایت در فصل ششم در مورد نتایج بحث می‌شود و چند پیشنهاد برای تحقیقات آینده ارائه می‌گردد.

^۱ Bat Algorithm

^۲ Particle Swarm

۲- فصل دوم:

تاریخچه تحقیق

در دو دهه اخیر تحقیقات متنوعی در ارتباط با عیب‌یابی صورت گرفته است. دلیل اهمیت این موضوع از اهمیت سلامت سازه و محافظت از جان و مال انسان‌ها در برابر وقوع یک فاجعه الهام می‌گیرد. در بحث عیب‌یابی سازه‌ای پر عضو مانند سازه‌های فضاکار تحقیقات مفصلی صورت نگرفته است، زیرا که این سازه‌ها به دلیل زیاد بودن اعضا دارای متغیرهای بسیاری در بحث عیب‌یابی می‌باشند و هنوز دامنه وسیعی برای تحقیق و پژوهش در این زمینه وجود دارد. در ادامه مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه عیب‌یابی سازه‌ها صورت می‌گیرد. این تحقیقات از نظر روش مطالعه و روش شناسایی قابل مقایسه می‌باشد.

تحقیقات عیب‌یابی سازه‌ها از نقطه نظر روش مطالعه، در سه شاخه تحقیقات تئوری، تحقیقات آزمایشگاهی و تحقیقات میدانی قابل بررسی می‌باشد.

۲-۲- عیب‌یابی سازه به صورت تئوری

در این تحقیق، مدل تئوریک یک سازه ساخته می‌شود. سپس در مدل تئوریک خرابی ایجاد می‌شود و سعی می‌گردد، روشی ارائه شود که خرابی ایجاد شده مورد شناسایی قرار گیرد.

این نوع تحقیقات دارای شاخه‌های مختلفی می‌باشد که در زیر به روش‌های مهم در این زمینه اشاره می‌شود:

- ۱- عیب‌یابی سازه‌ها با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی
- ۲- عیب‌یابی سازه‌ها با استفاده از روش‌های دو مرحله‌ای
- ۳- عیب‌یابی سازه‌ها با استفاده از داده‌های نویزی
- ۴- عیب‌یابی سازه‌ها با استفاده از داده‌های استاتیکی
- ۵- عیب‌یابی سازه‌ها با استفاده ترکیبی از پاسخ‌های دینامیکی و استاتیکی
- ۶- عیب‌یابی سازه‌ها با استفاده از روش‌های آنالیز موجک
- ۷- عیب‌یابی سازه‌ها با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی، شبکه عصبی و ماشین بردار پشتیبان

۲-۲-۱- عیب‌یابی سازه‌ها با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی

آقایان یو و سو در سال ۲۰۱۱ از الگوریتم جامعه مورچگان در فضای گسسته برای عیب‌یابی قاب یک دهانه پرتال استفاده کردند [۲]. ناصر علوی و همکاران با استفاده از آنالیز حساسیت و به کار بردن الگوریتم ژنتیک پیوسته به شناسایی خرابی در یک سازه خرابی و یک تیر پرداختند. آنها عیب‌یابی را توسط اندازه‌گیری فرکانس‌ها و پاسخ جابه‌جایی انجام دادند [۳].

گودرزی و ترکزاده با ارائه تابع هدفی براساس انرژی کرنشی مودال و حل آن با کمک الگوریتم اجتماع ذرات، محل و شدت خرابی را در یک سازه خرابی تعیین کردند [۴]. نتایج نشان داد که در اثر آسیب، انرژی کرنشی اعضا تغییر می‌کند و نسبت تغییرات انرژی کرنشی مودال در اعضای آسیب دیده بیشتر از اعضای سالم خواهد بود. همچنین می‌توان از تغییرات انرژی کرنشی در کل سازه، قبل و بعد از آسیب به‌عنوان معیاری مناسب جهت تشخیص و تعیین آسیب استفاده کرد.

گریست و همکاران یک شاخص خرابی براساس تغییرات انرژی کرنشی مودال تعریف کردند و نزدیک‌ترین شاخص به شاخص واقعی را به‌وسیله الگوریتم ژنتیک تشخیص دادند و بدین صورت محل و شدت خرابی را در یک تیر یک سر گیردار تعیین نمودند [۵]. سروی و همکاران برای عیب‌یابی سازه‌های بزرگ مقیاس از الگوریتم لونبرگ-مارکوارت استفاده کردند که نتایج بیان‌گر دقت بسیار خوب این روش در عیب‌یابی سازه‌ها، حتی در صورت وجود نویز، می‌باشد [۶].

نوبهاری و سیدپور در سال ۲۰۱۱ از روش مبتنی بر شاخص تفاوت فرکانس سازه سالم و سازه خراب و الگوریتم ژنتیک برای عیب‌یابی سازه‌ها استفاده کردند [۷].

۲-۲-۲- عیب‌یابی سازه‌ها با استفاده از روش‌های دو مرحله‌ای عیب‌یابی

آقایان هی و هوانگ در سال ۲۰۰۷ از یک روش دو مرحله‌ای استفاده کردند که در مرحله اول فضای جستجو را کاهش داده و در مرحله دوم محل و مقدار خرابی را شناسایی کردند [۸]. آقایان گوو و لی در سال ۲۰۰۹ در مرحله اول با استفاده از پاسخ فرکانس و مدشکل مکان المان‌های خراب را شناسایی کردند و در مرحله دوم توسط الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک شدت خرابی را به‌دست آوردند [۹]. سیدپور یک روش دو مرحله‌ای بر مبنای انرژی کرنشی و فرکانس با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات برای تعیین و تشخیص خرابی در سازه‌ها معرفی نمود [۱۰].

ترک زاده و همکاران در سال ۲۰۱۳ با استفاده از روش دو مرحله‌ای مبتنی بر انرژی کرنشی مودال و جنبشی و الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات کاوشی به عیب‌یابی سازه‌های بزرگ مقیاس پرداختند [۱۱]. در این تحقیق در مرحله اول با استفاده از انرژی کرنشی جنبشی المان‌های محتمل خرابی پیدا شده و در مرحله دوم با استفاده از تابع هدف مبتنی بر انرژی کرنشی مودال به‌وسیله الگوریتم HPSO شدت خرابی در سازه‌های بزرگ مقیاس مانند شبکه دو لایه ۸۰۰ عضوی با دقت خوبی تعیین شده است.

پیروزی و همکاران از روش دو مرحله‌ای مبتنی بر آنالیز حساسیت و الگوریتم فراکاوشی فاخته برای عیب‌یابی سازه‌ها استفاده کردند [۱۲]. همچنین ناصرعلوی و همکاران در سال ۲۰۱۱ از یک روش دو مرحله‌ای که در مرحله اول با استفاده از آنالیز حساسیت متغیرها را محدود کرده و در مرحله بعدی المان‌های خراب را همراه با شدت خرابی پیدا می‌کند، برای عیب‌یابی یک سد وزنی استفاده

کردند [۱۳].

در سال ۲۰۱۱ ضیایی، ناصرعلوی و سلاجقه یک روش دو مرحله‌ای برای عیب‌یابی سازه‌های پرعضو مانند سازه‌های فضاکار تحت بار استاتیکی ارائه کردند. در مرحله اول توسط آنالیز حساسیت و بهینه‌سازی توسط الگوریتم جامعه مورچگان در فضای گسسته و یک تابع هدف منحصر به فرد، فضای جستجو را کاهش داده و در مرحله دوم مکان دقیق و مقدار خرابی المان‌ها از بین المان‌های محدود شده در مرحله اول به دست می‌آید [۱۴].

۲-۲-۳- عیب‌یابی سازه‌ها با استفاده از داده‌های نویزی

نویزها که از طریق فرآیند تصادفی ایجاد می‌شوند دارای توزیعی گوسی یا نرمال می‌باشند. آقای جیمستان و همکاران در سال ۱۹۹۷ از داده‌های نویزی سنسورها بدون نویز بار استاتیکی برای عیب‌یابی یک خرپای مسطح استفاده کردند [۱۵]. در سال ۲۰۰۵ بختیاری نژاد و همکاران با استفاده از داده‌های نویزی استاتیکی خرپایی را عیب‌یابی کردند [۱۶]. وبر و همکاران در سال ۲۰۰۹ از طریق فیلتر کردن داده‌ها توسط قضیه تیخونوف و کمک گرفتن از آنالیز حساسیت، سازه خود را عیب‌یابی کردند [۱۷].

۲-۲-۴- عیب‌یابی سازه‌ها با استفاده از داده‌های استاتیکی

آقای گو و همکاران در سال ۲۰۱۱ خرابی را در تیر طره‌ای توسط پاسخ استاتیکی شناسایی کردند [۱۸]. آقایان بودا و کادمی یک تیر بتنی اوپلر- برنولی را با روش بهینه‌سازی و استفاده از پاسخ استاتیکی عیب‌یابی کردند [۱۹]. چو و قابوسی با استفاده از پاسخ جابه‌جایی اندازه‌گیری شده سازه معیوب و به کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک به تعیین محل و شدت آسیب پرداختند [۲۰].

۲-۲-۵- عیب‌یابی سازه‌ها با استفاده ترکیبی از پاسخ‌های دینامیکی و استاتیکی

در برخی تحقیقات، محققان از هر دو پاسخ استاتیکی و دینامیکی جهت عیب‌یابی استفاده کردند.

ونگ و همکاران یک الگوریتم دو مرحله‌ای جهت شناسایی آسیب با استفاده از فرکانس‌های طبیعی و تغییر شکل‌های استاتیکی ارائه نمودند [۲۱]. در مرحله اول این تحقیق، با استفاده از پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی محل آسیب را مشخص کردند سپس مسأله عیب‌یابی را به صورت یک مسأله بهینه‌سازی غیر مقید حل کردند.

آه و ژانگ با استفاده از ترکیب داده‌های استاتیکی و انحنای مودشکل‌ها در سازه‌ها به شناسایی خرابی پرداختند [۲۲].

۲-۲-۶- عیب‌یابی سازه‌ها با استفاده از روش‌های آنالیز موجک

بیشتر روش‌های ارزیابی خرابی براساس ارتعاش، به مشخصات مودال از سیگنال موقت که به‌وسیله تبدیل فوریه به‌دست می‌آید، نیازمند می‌باشند. البته اخیراً از آنالیز موجک و کرولت (curvelet) نیز در این زمینه استفاده شده است.

به‌طور مثال لوتریدیس و همکاران در سال ۲۰۰۵، تبدیل موجک دو بعدی را برای تعیین خرابی در صفحات خمشی استفاده کردند [۲۳]. مد ارتعاشی صفحه خمشی ترک خورده به حوزه موجک منتقل شده و سپس موقعیت و امتداد ترک را با دقت از پاسخ تبدیل شده، به‌دست آوردند. همچنین عمق ترک را با استفاده از مقادیر حداکثر و محتوای انرژی ضرایب موجک تخمین زدند.

همچنین خردمند و سلاجقه بعد از اعمال تبدیل موجک برای تعیین موقعیت خرابی در صفحات خمشی با سنسورگذاری در نقاط اطراف مکان تشخیص داده شده و حل ماتریس حساسیت ایجاد شده با الگوریتم اجتماع ذرات شدت خرابی‌المان‌ها را نیز مشخص کردند [۲۴]. در سال ۲۰۱۳ فرخی و ترکزاده با روش تبدیل موجک و الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب اقدام به شناسایی آسیب در سازه‌های پیوسته کردند [۲۵].

عطایی‌اعظم در پایان‌نامه خود با عنوان تعیین موقعیت خرابی و ترک در صفحات خمشی با استفاده از تبدیل (curvelet) و شبکه عصبی، محل ترک‌ها در صفحات خمشی را با استفاده از پاسخ‌های تحلیل مودال و تحلیل تنش استاتیکی فون مایسز تشخیص داده است. علاوه بر آن برای حذف نویز و خطا از پاسخ‌های تحلیل سازه، از الگوریتم‌های هوش مصنوعی استفاده کردند [۲۶].

الگوریتم مورد استفاده شبکه عصبی، تابع بنیادی شعاعی است که با آموزش آن به‌طور صحیح، نویزها و خطاها تا حد بسیار زیادی از داده‌ها حذف شده‌اند. این کار باعث شده که بعد از استفاده از این داده‌ها در تبدیل (curvelet)، امکان استفاده از سطوح تجزیه بالاتر در این تبدیل فراهم شده و منجر به تشخیص دقیق‌تر جهت، شکل و عرض ترک‌ها در محل‌های مختلف و شدت‌های مختلف خرابی در نواحی نزدیک و دور از تکیه‌گاه شده است.

۲-۲-۷- عیب‌یابی سازه‌ها با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی شبکه عصبی و ماشین

بردار پشتیبان

این الگوریتم‌ها عمدتاً به‌عنوان ابزاری برای انجام نگاشت بین الگوهای ورودی و الگوهای خروجی متناظر با شرایط عیب سازه‌ای به‌کار می‌رود. این روش‌ها باعث افزایش قابل توجه سرعت پروسه عیب‌یابی می‌شود.

در سال ۱۹۹۹م. محمود از شبکه عصبی رگرسیون تعمیم یافته ($GRNN^1$) برای عیب‌یابی یک تیر کنسول استفاده کردند [۲۷]. شش فرکانس نخست تیر را به‌عنوان ورودی شبکه و محل و عمق ترک را به‌عنوان خروجی شبکه به‌کار برد. در سال ۲۰۰۸ مهرجو و همکاران گره‌های یک پل خرابی را با شبکه عصبی انتشار بازگشتی عیب‌یابی کردند [۲۸]. فرکانس به‌اضافه مودشکل خرابی را به‌عنوان ورودی شبکه و محل و درصد خرابی گره‌ها را به‌عنوان خروجی شبکه به‌کار برد. در عیب‌یابی پل خرابی از ساختار زیرسازه استفاده شد. در سال ۲۰۱۲ رسولی و همکاران به مقایسه پاسخ‌های مختلف در عیب‌یابی گنبد‌ها با استفاده شبکه عصبی تابع بنیادی شعاعی پرداختند و نتیجه گرفتند پاسخ مدشکل به‌همراه فرکانس، کمترین خطا را در شناسایی شدت خرابی در گنبد‌ها دارد [۲۹].

سعید و همکاران برای عیب‌یابی یک تیر انحنای دار سه‌بعدی ۵۹۱۰ المانی از شبکه عصبی BP و $ANFIS^2$ استفاده شده است. عیب به‌صورت ترک در تیر در موقعیت‌ها و اندازه‌های مختلف مدل شده است. در تحلیل نصف تیر مورد بررسی قرار گرفته و به‌ازای ۱۴ موقعیت مختلف و ۲۰ اندازه متفاوت که در مجموع می‌شود ۲۸۰ سناریوی خرابی سازه تحلیل شده است. برای ورودی شبکه عصبی و $ANFIS$ از فرکانس، فرکانس به‌علاوه تابع پاسخ فرکانسی و تابع پاسخ فرکانسی به‌تنهایی استفاده شده است. نتایج بیان‌گر دقت بالاتر شبکه عصبی در حالت بدون نویز و دقت بالاتر $ANFIS$ با وجود نویز ۰/۱ و ۰/۵ و ۱ درصد است، برای کاهش تعداد داده‌های ورودی به شبکه از روش PCA^3 استفاده شده است [۳۰].

نوری و همکاران از SVM^4 برای عیب‌یابی مدل یک قاب سه طبقه فولادی استفاده کرد و نتیجه گرفت این الگوریتم نسبت به نویز نیز مقاوم است [۳۱]. بخاری و همکاران از شبکه عصبی مصنوعی با تکنیک زیرسازه‌ای چند مرحله‌ای، برای پیدا کردن موقعیت و وسعت خرابی استفاده کردند [۳۲]. آنها از پارامترهای مودال مثل فرکانس و مودشکل‌ها به‌عنوان ورودی ANN^4 استفاده کردند همچنین از دو سازه دال پیوسته دو دهانه و یک قاب پرتال سه طبقه بهره گرفتند و به‌وسیله کاهش دادن سختی محلی المان‌های انتخاب شده در موقعیت‌های متفاوت سازه، سناریوهای متفاوت خرابی انتخاب شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که با تقسیم سازه کامل به چند زیرسازه و آنالیز هر کدام به‌طور مستقل خرابی محلی می‌تواند بهتر شناخته شود. این روش خرابی را به‌طور مستقیم از پارامترهای مودال سازه شناسایی می‌کند.

در سال ۲۰۱۳ قیاسی و همکاران از روش دو مرحله‌ای مبتنی بر انرژی کرنشی مودال و ماشین بردار پشتیبان حداقل مربعات برای عیب‌یابی سازه‌های فولادی استفاده کردند [۳۳]. همچنین این محققان در سال ۲۰۱۴ به مقایسه الگوریتم‌های ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی در عیب‌یابی

¹ Generalized Regression Neural Network

² Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System

³ Principal Component Analysis

⁴ Artificial Neural Network

⁴ Support vector machines

سازه‌های اسکلتی پرداخته و نتیجه گرفتند ماشین بردار پشتیبان از سرعت و دقت بالاتری نسبت به شبکه عصبی شعاع مبنا در این زمینه برخوردار است [۳۴].

لیو و همکاران از ترکیب ANN^1 با WPT^2 به منظور عیب‌یابی سازه چهار طبقه پنج‌مارک عیب‌یابی دانشگاه British Columbia استفاده کردند [۳۵]. بدین منظور انرژی بسته موجکی به‌عنوان ورودی ANN در نظر گرفته شده است. برای ترکیب داده‌های حاصل از چندین سنسور از روش Data fusion استفاده شده است.

فتح نجات و همکاران در سال ۲۰۱۴ برای عیب‌یابی سازه‌ها از روش دو مرحله‌ای مبتنی بر شبکه عصبی و انرژی کرنشی مودال استفاده کردند [۳۶].

۲-۳- سلامت‌سنجی سازه‌ها با تحقیقات آزمایشگاهی

در این نوع تحقیق، مدل مقیاس شده‌ای از اجزای سازه‌ای مثل تیر، ستون، دال، قاب، خرپا و غیره در آزمایشگاه ساخته می‌شود. سپس خرابی بر آنها اعمال می‌شود. با فناوری‌های مختلف پاسخ سازه مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرد و سعی می‌شود با پردازش اطلاعات جمع‌آوری شده، خرابی سازه مورد شناسایی قرار گیرد.

پندی و بیسواس یک تیر دو سر مفصل را در آزمایشگاه مورد آزمایش قرار دادند. یک شکاف در وسط تیر ایجاد شد و ۳۳ نقطه بر روی تیر مورد نظر اندازه‌گیری شد. نتایج تحقیق نشان داد که شناسایی تغییر در ماتریس نرمی در یافتن محل خرابی کارا می‌باشد [۳۷].

سنایی و همکاران یک مدل کوچک از یک قاب دو طبقه یک دهانه فلزی را مورد آزمایش استاتیکی قرار دادند و رویکرد پیشنهادی خود را برای تخمین پارمترها به کار بردند. ارتفاع هر طبقه ۳۵۰ میلی‌متر و دهانه قاب ۶۰۰ میلی‌متر بود. نیرو قائم و افقی با آویزان کردن وزنه از قاب یا با کشیدن وارد می‌شد [۳۸]. یک قاب فلزی بزرگ توسط شی و همکاران آزمایش شد [۳۹]. ایشان تغییرات انرژی کرنشی مودی را قبل و بعد از خرابی مورد بررسی قرار دادند. آزمایش ضربه جهت اندازه‌گیری پارامتر ارتعاش مورد استفاده قرار گرفت. نتایج بیان‌گر آن بود که آزمایش ضربه در مکان‌یابی عیب کارا است لیکن به‌میزان نوبز حساس است، مخصوصاً وقتی که چندین عیب در سازه وجود دارد.

¹ Artificial Neural Network

² Wavelet Packet Transform

۲-۴- سلامت سنجی سازه با تحقیقات میدانی

در این نوع تحقیق، یک سازه واقعی مورد آزمایش استاتیکی قرار می‌گیرد. بارگذاری بر سازه اعمال می‌شود و رفتار سازه با فن‌آوری‌های مختلف مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرد. با پردازش اطلاعات جمع‌آوری شده، خرابی سازه مورد نظر شناسایی می‌شود. تحقیقات میدانی سازه واقعی بسیار پیچیده‌تر از مدل‌سازی آزمایشگاهی می‌باشد.

بخت و جگر یافته‌های ارزشمند خود را از آزمایش استاتیکی و دینامیکی بیش از ۲۲۵ پل در انتاریوی کانادا گزارش کرده‌اند [۴۰]. یافته‌های ایشان عبارت است از: پل‌های با سیستم تیر و دال که سخت‌تر از مدل محاسباتی هستند و سیستم عرشه خرپایی در سختی سازه مشارکت می‌نمایند و اغلب ظرفیت باربری واقعی بیش از ظرفیت باربری محاسباتی می‌باشد.

نگوین و لی در سال ۲۰۱۰ از نزدیک‌ترین همسایگی برای عیب‌یابی موتور القاگر^۱ استفاده کردند. بدین منظور از خصوصیات آماری ارتعاش موتور به‌عنوان ورودی سیستم و از الگوریتم ژنتیک برای انتخاب بهینه خصوصیات ورودی استفاده شد. بنا به نتایج این تحقیق نزدیک‌ترین همسایگی دقت بالاتری از SVM استاندارد در عیب‌یابی موتور القاگر دارد [۴۱].

¹ Induction Motor

۳- فصل سوم:

الگوریتم‌های بهینه‌سازی

بهینه‌سازی به معنی تمایل به ساخت بهترین کیفیت زندگی با استفاده از منابع در دسترس می‌باشد. بهینه‌سازی به اوایل قرن نوزدهم برمی‌گردد و چند دهه است که در مهندسی عمران یکی از مهمترین بحث‌های مورد بررسی می‌باشد که هنوز دامنه پیشرفت دارد. به‌طور کلی مسائل بهینه‌سازی شامل یک تابع هدف که شامل یکسری متغیرها و در صورت لزوم دارای قیودی که روی تابع هدف و متغیرها حاکم است، می‌باشد. هدف در این مسائل کمینه کردن تابع هدف در صورت ارضا شدن قیود می‌باشد. به‌عنوان مثال اگر یک مسأله بهینه‌سازی سازه‌ای را در نظر بگیریم، در طراحی آن هدف ایجاد بیشترین کارایی با استفاده از کمترین مصالح است و قیودهای طرح آن، نسبت تنش در اعضا و پایداری در برابر بارهای وارده است.

روش‌های مختلف طرح چنین سازه‌ای به شرح زیر است:

- ۱- روش آزمایشگاهی، یعنی ساخت سازه‌های مختلف و آزمایش آنها، که این روش بسیار گران بوده و علاوه بر هزینه زیاد آن از دقت بالایی برخوردار نیست.
 - ۲- مدل‌سازی ریاضی، یعنی استفاده از مشتق‌گیری از تابع هدف که معمولاً به‌دلیل پیچیدگی زیاد تابع هدف، تعریف چنین تابعی غیر ممکن خواهد بود.
 - ۳- روش‌های عددی در مدل‌سازی که با پیشرفت گسترده کامپیوترها جایگزین روش‌های قبلی شده‌اند.
- در این روش‌ها مدل‌های مختلفی از طرح مورد نیاز ساخته شده و مورد بررسی قرار می‌گیرند. در نهایت بهترین طرح از بین آنها انتخاب می‌گردد. این روش شامل دو دسته هستند. یک دسته از آنها برای حل مسائل خاص به کار می‌روند؛ مانند: برنامه‌ریزی خطی^۱، برنامه‌ریزی درجه دوم^۲، برنامه‌ریزی دینامیکی^۳، برنامه‌ریزی هندسی^۴. دسته دوم این روش‌ها برای کلیه مسائل بهینه‌سازی کاربرد دارند که از جمله آنها می‌توان به روش برنامه‌ریزی غیرخطی^۵ و یا روش‌های مبتنی بر الگوریتم‌های هوشمند بهینه‌سازی اشاره نمود. در پژوهش حاضر از روش‌های هوشمند فراابتکاری بهینه‌سازی^۶ به منظور عیب‌یابی سازه‌های فضاکار استفاده شده است.

۳-۲- الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند

مسائل بهینه‌سازی را می‌توان به روش دقیق ریاضی که مستلزم مشتقات جزئی و با گرادینان تابع

^۱ Linear programming

^۲ Quadratic programming

^۳ Dynamic programming

^۴ Geometric programming

^۵ Nonlinear programming

^۶ Meta heuristic optimization algorithms

هدف نسبت به متغیرهای مسأله باشد، در یک حلقه با چند بار تکرار حل کرد. در صورتی که مسأله دارای تابع هدف پیچیده و تعداد متغیرهای زیاد باشد، حل مسأله با روش دقیق ریاضی کاری با هزینه محاسباتی بالا و زمان بر می‌باشد.

یکی از شاخه‌های بهینه‌سازی، الگوریتم تکاملی می‌باشد که از طبیعت الهام گرفته‌اند. به‌طور کلی در طبیعت هر موجود جاندار که توانسته است به حیات خود ادامه دهد از یک پروسه بهینه برای بقای خود استفاده کرده است. محققان روش‌های مختلفی مانند ژنتیک وراثتی^۱ که از اصول تقسیم سلولی استفاده می‌کند و الگوریتم تبرید^۲ که از سرد شدن فلزات الهام گرفته و همچنین الگوریتم جامعه پرندگان^۳ که از رفتار گروهی پرندگان برای پیدا کردن غذا نشأت گرفته است، استفاده کرده‌اند که نتایج قابل قبولی به همراه داشته و دیگر نیاز به محاسبات پیچیده ریاضی نمی‌باشد.

یکی دیگر از الگوریتم‌های تکاملی جدیدی که از طبیعت الهام گرفته است الگوریتم بهینه‌سازی خفاش می‌باشد که در این پژوهش به‌عنوان الگوریتم اصلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین در این پژوهش از الگوریتم جامعه پرندگان به‌منظور مقایسه نتایج با الگوریتم خفاش استفاده می‌شود. از این رو در ادامه توضیحاتی در مورد این دو الگوریتم داده می‌شود.

۳-۳- الگوریتم بهینه‌سازی خفاش (BA^۴)

۳-۳-۱- ایده کلی الگوریتم خفاش

خفاش‌ها حیوانات جالبی هستند. آنها تنها پستانداران با بال هستند و همچنین دارای قدرت فوق‌العاده و پیشرفته انعکاس صدا هستند. تخمین زده می‌شود که حدود ۹۹۶ گونه مختلف خفاش در طبیعت وجود دارد که این تعداد درصد بالایی از پستانداران را تشکیل می‌دهد. محدوده اندازه آنها از خفاش زنبور عسل کوچک (در حدود ۱/۵ تا ۲ گرم) تا خفاش غول‌پیکر با طول بال در حدود ۲ متر و وزن تا حدود ۱ کیلوگرم می‌باشد. بسیاری از خفاش‌ها از انعکاس صدا با درجه خاصی استفاده می‌کنند. در میان تمام خفاش‌ها، خفاش میکرو^۵ یک مثال مشهور برای استفاده از انعکاس صدا هستند در حالی که خفاش‌های بزرگ از انعکاس صدا استفاده چندانی نمی‌کنند. اغلب خفاش‌های میکرو حشره هستند. خفاش‌های میکرو از یک نوع سونار (دستگاه کاشف زیردریایی به‌وسیله امواج صوتی) استفاده می‌کنند که برای تشخیص طعمه و اجتناب از برخورد با موانع و رد شدن از شکاف لانه حتی در تاریکی استفاده می‌کنند. این خفاش‌ها یک پالس با صدای بسیار بلند منتشر می‌کنند و به بازگشت صدا از اشیای اطراف گوش می‌دهند. پالس منتشر شده در گونه‌های مختلف متفاوت است که با

^۱ Genetic Algorithm

^۲ Simulated Annealing

^۳ Particle Swarm

^۴ Bat Algorithm

^۵ Micro

استراتژی شکار آنها در ارتباط است. بسیاری از خفاش‌ها از فرکانس با طول موج کوتاه استفاده می‌کنند. این در حالی است که دیگران در اغلب موارد از سیگنال‌های با فرکانس ثابت برای انعکاس صدا استفاده می‌کنند. پهنای باند این سیگنال‌ها متفاوت است و با تغییر نوع گونه عوض می‌شود [۴۳].

۳-۳-۲- انعکاس صدا

اگر چه هر پالس فقط چند هزارم ثانیه (۸ تا ۱۰ میلی ثانیه) به طول می‌انجامد با این وجود یک فرکانس ثابتی است که معمولاً در محدوده ۲۵ کیلو هرتز تا ۱۵۰ کیلو هرتز قرار دارد.

محدوده فرکانسی برای بسیاری از گونه‌ها بین ۲۵ تا ۱۵۰ کیلو هرتز است، هر چند بعضی از گونه‌ها می‌توانند فرکانس‌های بالاتر از ۱۵۰ کیلو هرتز را نیز تولید کنند. هر انفجار مافوق صوت ممکن است به صورت معمول ۵ تا ۲۰ میلی‌ثانیه طول بکشد و خفاش‌های میکرو حدود ۱۰ تا ۲۰ انفجار صوتی در هر ثانیه منتشر می‌کنند. در هنگام شکار زمانی که در نزدیکی شکار هستند سرعت انتشار پالس می‌تواند تا حدود ۲۰۰ پالس در ثانیه برسد. چنین انفجارهای با صدای کوتاه این مفهوم را که خفاش‌ها توانایی فوق‌العاده‌ای در قدرت پردازش سیگنال دارند را می‌رساند. در واقع مطالعات نشان می‌دهند زمان ادغام گوش خفاش به طور معمول حدود ۳۰۰ تا ۴۰۰ میکرو ثانیه است. همان‌طور که سرعت صوت در هوا به طور معمول $v = 340 \frac{m}{s}$ است، طول موج انفجار λ صدای مافوق صوت با فرکانس ثابت f ارائه شده است $\lambda = v/f$ که در طیف وسیعی از ضخامت ۲ میلی‌متر تا ۱۴ میلی‌متر با محدوده فرکانس معمولی از ۲۵ تا ۱۵۰ کیلو هرتز قرار دارد. به طور شگفت‌انگیزی، پالس ساطع شده می‌تواند به اندازه ۱۱۰ دسی‌بل باشد و خوشبختانه از منبع فرو صوت هستند. خفاش وقتی به دنبال شکار می‌گردد در پی صدای بلندتر و هنگامی که از شکار بر می‌گردد در پی صدای آرام‌تر می‌رود. معمولاً مسافتی که این موج‌های کوتاه طی می‌کنند کمترند و بستگی به فرکانس واقعی دارد. خفاش‌های میکرو می‌توانند از موانعی به کوچکی و باریکی یک تار موی انسان رد شوند. مطالعات نشان می‌دهند که خفاش‌های میکرو از تأخیر زمان بین انتشار و تشخیص استفاده می‌کنند، اختلاف زمان بین ۲ گوش آنها و تفاوت بلندی اکو باعث می‌شود که یک نمایش سه بعدی از محیط اطراف پیدا کنند. آنها می‌توانند فاصله و گرایش هدف را تشخیص دهند، نوع شکار و حتی سرعت شکار به کوچکی یک حشره را تشخیص می‌دهند. مشخص است که بعضی از خفاش‌ها دید و یا حس بویایی نسبتاً خوبی دارند و طبیعتاً از ترکیب این احساسات برای تشخیص و حمله آرام به شکار استفاده می‌کنند. اگرچه ما تنها به رفتارهای انعکاسی و مرتبط به آن علاقه داریم. این‌گونه رفتار انعکاسی خفاش‌های میکرو می‌تواند به گونه‌ای فرمول‌بندی شود که با مرتبط کردن آن با تابع هدف بهینه شود، و امکانی ایجاد کرده که بتوان الگوریتم بهینه‌سازی جدیدی را فرمول‌بندی کرد.

۳-۳-۳- الگوریتم خفاش

الگوریتم بهینه‌سازی خفاش که در سال ۲۰۱۰ برای نخستین بار توسط یانگ و گندمی ارائه شد [۴۳]،

الهامی از خصوصیات ردیابی خفاش‌های میکرو در جستجوی شکار است. اگر ما برخی از ویژگی انعکاس صدا خفاش‌های میکرو را به صورت ایده‌آل درآوریم، می‌توانیم از الگوریتم‌های مختلف خفاش الهام گرفته یا الگوریتم خفاش را توسعه دهیم. برای سادگی، ما در حال حاضر از قوانین تقریبی یا آرمانی زیر استفاده می‌کنیم [۴۴]:

۱- همه خفاش‌ها از انعکاس صدا برای تعیین فاصله استفاده می‌کنند، و همچنین تفاوت بین مواد غذایی، شکار و موانع پیش رو را به صورت خارق‌العاده‌ای می‌دانند.

۲- پرواز خفاش‌ها به صورت تصادفی با سرعت V_i و در مکان x_i با فرکانس ثابت f_{min} و طول موج مختلف λ و بلندی صدا A_0 برای جستجوی طعمه صورت می‌گیرد و می‌توانند به‌طور خودکار طول موج (یا فرکانس) امواج پخش شده خود را تنظیم کنند، و نرخ امواج انتشار R_2 با توجه به نزدیکی هدف خود را تنظیم کنند.

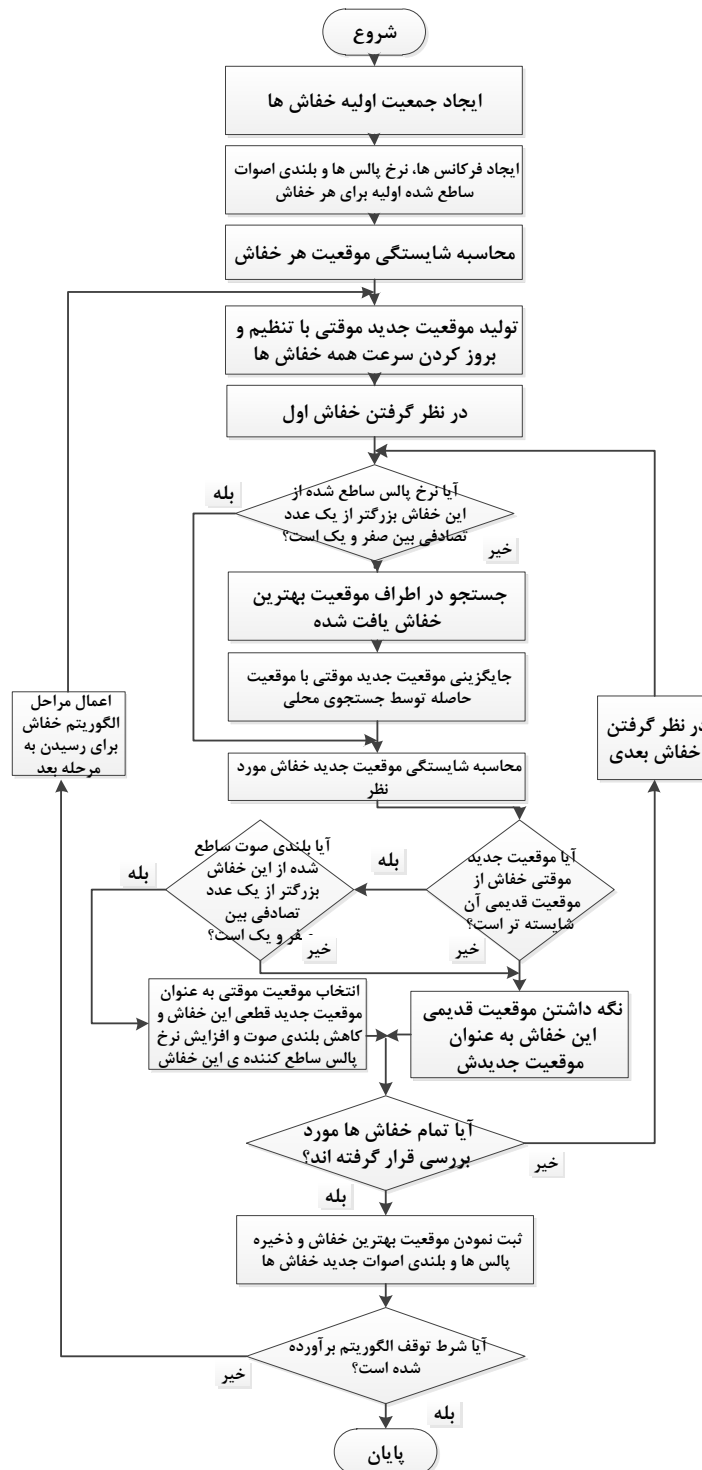
۳- اگر چه بلندی صدا می‌تواند در بسیاری جهات متفاوت باشد اما فرض می‌کنیم که بلندی صدا از A_0 با مقادیر بزرگ (مثبت) به مینیمم مقدار ثابت (A_{min}) قابل تغییر است.

یک نگاه ساده دیگر این است که نشان می‌دهد یک اشعه ردیابی برای برآورد تاخیر زمان و توپوگرافی سه‌بعدی وجود دارد. اگر چه این ممکن است یکی از ویژگی‌های خوب برای برنامه‌های کاربردی در هندسه محاسباتی باشد با این حال، ما از آن به‌عنوان محاسباتی گسترده‌تر در موارد چند-بعدی استفاده نمی‌کنیم. به‌علاوه در این فرضیات، برای سادگی تقریب زیر را استفاده می‌کنیم. به‌طور کلی فرکانس f در محدوده $[f_{min}, f_{max}]$ مربوط می‌شود به بازه طول موج $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$. برای مثال یک فرکانس در بازه $[20, 500]$ کیلو هرتز به یک بازه از طول موج‌های $[0.7, 17]$ میلی‌متر نظیر می‌شود.

این‌گونه رفتار انعکاسی خفاش‌های میکرو می‌تواند به‌گونه‌ای فرمول‌بندی شود که با مرتبط کردن آن با تابع هدف بهینه شود و امکانی ایجاد کرده که بتوان الگوریتم بهینه‌ساز جدیدی را فرمول‌بندی کرد. در ادامه به نحوه فرمول‌بندی الگوریتم خفاش و سپس به پیاده‌سازی و مقایسه جزئیاتی آن می‌پردازیم. در پیاده‌سازی واقعی ما می‌توانیم برای تنظیم بازه از تنظیم طول موج (یا فرکانس) استفاده کنیم و بازه مشخص شده (یا بزرگترین طول موج) باید انتخاب شود، به‌گونه‌ای که با اندازه دامنه مورد نظر قابل مقایسه باشد و بعد بازه را کوچک‌تر می‌کنیم. به همین خاطر، ما الزاماً مجبور نیستیم از طول موج استفاده کنیم و به‌جای آن ما می‌توانیم فرکانس را در حین درست کردن طول موج تغییر دهیم. این به این خاطر است که λ و F به هم مربوط‌اند، از طریق فرمول اثبات شده‌ای که $F \times \lambda$ ثابت است که ما در ادامه از آن در پیشرفت پیاده‌سازی استفاده می‌کنیم. برای راحتی ما فرض می‌کنیم، می‌دانیم که فرکانس‌های بالاتر طول موج پایین‌تر دارند و مسیر کمتری را طی می‌کنند.

برای خفاش‌ها عموماً این بازه مسافت، چند متری بیش نیست. نرخ موج می‌تواند به راحتی در بازه

صفر و یک باشد که صفر یعنی اصلاً موجی وجود ندارد و ۱ یعنی بیشترین نرخ انتشار موج. براساس این فرضیات و نظریات، روند الگوریتم خفاش شکل ۳-۱ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱: مراحل الگوریتم BA

۳-۳-۴- حرکت خفاش‌های مجازی

در شبیه‌سازی‌ها ما معمولاً از خفاش‌های مجازی استفاده می‌کنیم. ما باید قوانین را تعریف کنیم چگونه مکان‌ها و سرعت‌ها در یک جستجوی مکان بعدی تغییر کنند. راه حل‌ها با V_i^t و X_i^t های جدید در بازه زمانی T به صورت زیر به دست می‌آیند.

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min}) \quad (۱-۳)$$

$$V_i^t = V_i^{t-1} + (X_i^t - X_i^*) f_i \quad (۲-۳)$$

$$X_i^t = X_i^{t-1} + V_i^t \quad (۳-۳)$$

در پیاده‌سازی الگوریتم از $f_{min} = 0$ و $f_{max} = 100$ استفاده خواهیم کرد که بزرگی دامنه بستگی به مشکل مورد نظر دارد. در آغاز به هر خفاشی به صورت تصادفی یک فرکانس انتصاب داده می‌شود که این فرکانس به صورت مشابه از بازه $[f_{min}, f_{max}]$ انتخاب می‌شود. برای قسمت جستجوی محلی، وقتی یک راه حل از بین بهترین راه‌های فعلی انتخاب می‌شود یک راه حل جدید برای هر کدام از خفاش‌ها به صورت محلی تولید می‌شود با استفاده از گردش تصادفی:

$$X_{new} = X_{old} + \epsilon A^t \quad (۴-۳)$$

که اینجا $\epsilon \in [-1, 1]$ یک عدد تصادفی است که برای محدود کردن گام‌های گردش تصادفی به کار گرفته شده است. در رابطه فوق $A^t = A_i^t$ میانگین بلندی اصوات تمام خفاش‌ها در تکرار t ام تعریف می‌شود.

۳-۳-۵- بلندی و رتبه انتشار موج

تغییر سرعت و مکان خفاش‌ها شباهتی به رویه بهینه‌سازی استاندارد فوج زنبورهای ریز دارد. در حالی که این f_i ها هستند که لزوماً گام‌ها و بازه حرکت فوج زنبورهای ریز را کنترل می‌کند. تا حدی، الگوریتم خفاشی می‌تواند به عنوان ترکیب بالانس شده از بهینه‌سازی استاندارد فوج زنبورهای ریز و جستجوی محلی فشرده که توسط رتبه بلندی موج کنترل می‌شود در نظر گرفته شود. از سوی دیگر، بلندی A_i و رتبه انتشار موج r_i طبیعتاً مادامی که دوره تکرار می‌شود باید تغییر کنند. همین‌طور که معمولاً وقتی خفاش شکار خود را پیدا می‌کند بلندی کاهش می‌یابد در هنگامی که رتبه انتشار موج افزایش می‌یابد. بلندی می‌تواند همانند هر متغیر دلخواه دیگر انتخاب شود. برای مثال، ما می‌توانیم از $A_0 = 100$ و $A_{min} = 1$ استفاده کنیم برای سهولت ما همچنین می‌توانیم از $A_{min} = 0$ و $A_0 = 1$ استفاده کنیم، فرض $A_{min} = 0$ به این معناست که خفاش همین الان شکار را پیدا کرده و موقتاً از انتشار هر صدایی خودداری می‌کند. الان ما داریم [۴۵]:

$$A_i^{t+1} = \alpha A_i^t \quad (5-3)$$

$$r_i^{t+1} = r_i^0 [1 - \exp(-\gamma t)] \quad (6-3)$$

جایی که α و γ ثابتاند برای هر $0 < \alpha < 1$ و $0 < \gamma$ داریم:

$$A_i^t \rightarrow 0 \quad r_i^t \rightarrow r_i^0 \quad \text{as } t \rightarrow \infty \quad (7-3)$$

در راحت‌ترین حالت ما از $\alpha = \gamma = 90$ استفاده می‌کنیم و در شبیه‌سازی از $\alpha = \gamma = 90$ استفاده کردیم. انتخاب پارامترها نیاز به مقداری آزمایش دارد. در آغاز، هر خفاش باید بلندی و رتبه انتشار موج خود را داشته باشد که به این منظور باید از تصادفی کردن آنها استفاده کنیم. برای مثال بلندی آغازین می‌تواند عموماً بین ۱ و ۲ باشد درحالی‌که رتبه انتشار آغازین معمولاً اطراف صفر یا در صورت لزوم در بازه صفر و یک باشد. این بلندی و رتبه انتشار تغییر می‌کنند تنها در صورتی که یک راه حل جدید بهبود یابد که به این معناست که این خفاش‌ها در حال حرکت به سمت راه حل بهینه هستند. دادن مقدار اولیه به A_i و r_i به تجربیات فراوان نیاز دارد که از طریق آزمون و خطا به دست می‌آید. با دادن هر مقدار به A_i و r_i سرعت رسیدن به جواب تغییر می‌کند.

۳-۴- الگوریتم جامعه پرندگان (PSO¹)

اخیراً گروهی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی براساس شبیه‌سازی تعامل اجتماعی یک گروه خاص از موجودات زنده برای دستیابی به منابع غذایی به وجود آمده‌اند. الگوریتم جامعه پرندگان که در سال ۱۹۹۵ توسط آبرهات و کندی معرفی شد از این گروه می‌باشد [۴۶]. این الگوریتم بهینه‌سازی از نحوه زندگی پرندگان و ماهی‌ها الهام گرفته شده است که به صورت گروهی زندگی می‌کنند و بسیاری از احتیاجات خود، از جمله جستجوی غذا را به صورت دسته جمعی و با کمک یکدیگر و با استفاده از خرد جمعی انجام می‌دهند. در این الگوریتم فرض شده است که پرندگان در جستجوی غذا به صورت غریزی فاصله خود تا غذا را حس می‌کنند درحالی‌که از مکان آن اطلاعی ندارند؛ علاوه بر این، فرض شده است که تمام پرندگان با به اشتراک گذاشتن اطلاعات خود موقعیت نزدیک‌ترین پرنده به غذا را می‌دانند و موقعیت خود را در فضای جستجو را بر مبنای آن اصلاح می‌کنند.

فرآیند حرکت پرندگان به سمت منبع غذا یک پدیده اتفاقی طبیعی است که باعث می‌شود هر پرنده در گروه با سرعت و جهت خاص خود حرکت کند و موقعیت اولیه خود را در گروه بهبود دهد، بردار سرعت براساس حافظه ذخیره شده به وسیله هر پرنده بهبود می‌یابد که این حافظه اطلاعات شخصی هر فرد می‌باشد و از طرف دیگر موقعیت هر ذره در گروه با توجه به رفتار کلی گروه بهبود می‌یابد و گروه در مسیر جستجوی خود به مناطق بهتری دست می‌یابد و این چرخه بهبود موقعیت هر ذره و متعاقباً بهبود موقعیت کل گروه ادامه دارد تا گروه به بهترین نقطه (منبع غذا) برسد.

¹ Particle Swarm Optimization

الگوریتم PSO در بین الگوریتم‌های مشابه خود بسیار قوی ظاهر شده است و به آسانی می‌تواند با متغیرهای پیوسته، ناپیوسته و اعداد صحیح کار کند. الگوریتم PSO در مقایسه با روش‌های بهینه‌سازی مشابه دیگر بسیار موثرتر است و برای رسیدن به نتایج بهتر و یا مشابه دیگر الگوریتم‌ها، به فراخوانی تابع کمتری نیاز دارد. از جمله مزایای دیگر الگوریتم می‌توان به پیاده‌سازی کامپیوتری آسان آن اشاره کرد که به آسانی با شرایط قیود و متغیرها در یک حالت خاص منطبق می‌شود [۴۷].

۳-۴-۱- فرمول‌بندی الگوریتم PSO

در این الگوریتم هر جواب مسأله، یک پرنده در فضای جستجو است که ذره^۱ نام دارد و هر ذره دارای یک مقدار شایستگی است که توسط تابع شایستگی مسأله به دست می‌آید، بر این اساس پرنده‌ای که به منبع غذا نزدیک‌تر است، شایستگی بیشتری دارد. همچنین هر پرنده دارای یک بردار سرعت است که جهت حرکت پرنده و میزان سرعت را نشان می‌دهد و در فرآیند بهینه‌سازی هر پرنده جهت خود را براساس تجربه شخصی^۲ و تجربه جامعه^۳ اصلاح می‌کند.

در فرمول‌بندی الگوریتم، ذره i ام در موقعیت x و در تکرار $k + 1$ به وسیله رابطه ۳-۸ موقعیت خود را بهبود می‌بخشد، که در این رابطه v_{k+1}^i سرعت اصلاح شده ذره i ام است که از رابطه ۳-۹ حاصل شده است و Δt گام زمانی می‌باشد [۴۷] که با استفاده از رابطه ۳-۱۰ تعیین می‌شود. البته در این پژوهش مقدار Δt برابر واحد فرض شده است.

$$x_{k+1}^i = x_k^i + v_{k+1}^i \Delta t \quad (۸-۳)$$

$$v_{k+1}^i = wv_k^i + c_1 r_1 \frac{(p_k^i - x_k^i)}{\Delta t} + c_2 r_2 \frac{(p_k^g - x_k^g)}{\Delta t} \quad (۹-۳)$$

$$\Delta t = \frac{1}{k_{max}} \quad (۱۰-۳)$$

در روابط فوق v_k^i مقدار بردار سرعت در تکرار k ام، r_1 و r_2 دو عدد تصادفی بین صفر و یک و p_k^i نشان دهنده بهترین موقعیت ذره i ام و p_k^g موقعیت بهترین ذره در تمام جامعه تا تکرار k ام می‌باشد و دیگر ضرایب پارامترهای وابسته به مسأله هستند. برای مثال c_1 (پارامتر cognitive) و c_2 (پارامتر social) پارامترهای اعتماد نامیده می‌شوند و تعیین کننده میزان اطمینان ذرات و حرکت جامعه می‌باشد و w پارامتر لختی وزن نامیده می‌شود که در ادامه بیشتر توضیح داده خواهد شد. همچنین k_{max} حداکثر تعداد تکرار است که توسط کاربر برای برنامه تعریف می‌شود.

پارامتر w نقش مهمی را در رفتار همگرایی الگوریتم PSO بر عهده دارد به طوری که مقدارهای زیاد باعث افزایش مقدار بردار سرعت می‌شود و در هر تکرار گام‌های بزرگتری برداشته خواهد شد و با کوچک شدن w این گام‌ها کوچک‌تر می‌شود که برای رسیدن به بهینه در گام‌های آخر مفید می‌باشد،

¹ Particle

² Cognition

³ Social Part

از این رو با قرار دادن یک رابطه به جای مقدار ثابت برای w می توان به این مهم دست یافت. در این پژوهش از رابطه ارائه شده در [۴۸] استفاده شده است.

$$w_{k+1} = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{k_{\max}} k \quad (11-3)$$

همان طور که در مرجع [۴۸] عنوان شده است مقادیر w_{\max} و w_{\min} بترتیب برابر با $0/9$ و $0/4$ می باشند. همچنین در مراجع [۴۷] عنوان شده است که بهترین مقادیر برای پارامترهای c_1 و c_2 برابر با 2 می باشد.

در الگوریتم PSO موقعیت اولیه پرندگان به صورت تصادفی در فضای مجاز طراحی $[x^u \ x^l]$ انتخاب می شود. سپس سرعت اولیه پرندگان V_1 در بازه $[v_{\min} \ v_{\max}]$ به طور تصادفی مقدار دهی می شود. در این ماتریس p تعداد ذرات و n تعداد متغیرهای طراحی می باشد، v_{\min} و v_{\max} با استفاده از رابطه ۳-۱۲ و V_1 با استفاده از رابطه ۳-۱۳ تعیین می شوند.

$$v_{\min} = -\frac{1}{2}(x^u - x^l), \quad v_{\max} = \frac{1}{2}(x^u - x^l) \quad (12-3)$$

$$V_1 = v_{\min} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_{1,1} & \dots & r_{1,i} & \dots & r_{1,n} \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ r_{p,1} & \dots & r_{p,i} & \dots & r_{p,n} \end{bmatrix}_{p \times n} \cdot (v_{\max} - v_{\min}) \quad (13-3)$$

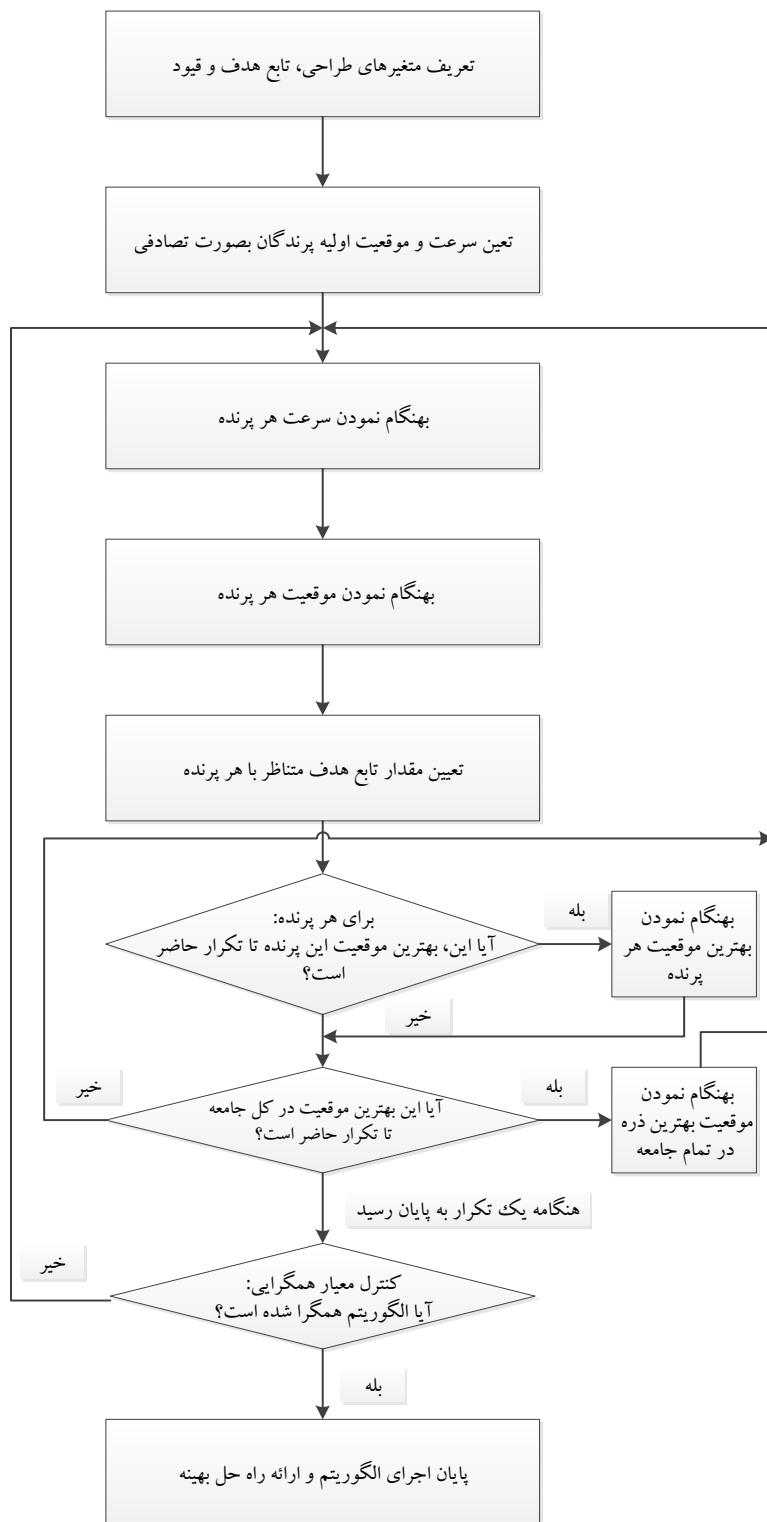
در رابطه ۳-۱۳، $r_{p,n}$ مقادیر تصادفی بین صفر و یک می باشند.

در به هنگام نمودن موقعیت پرندگان باید مقدار جدید به دست آمده برای x^i ها در شرط (۳-۱۴) صدق نماید. در غیر این صورت باید این حدود جایگزین مقدار جدید گردند.

$$x^l \leq x^i \leq x^u \quad (14-3)$$

جهت به هنگام کردن مقدار p_k^i کمترین مقدار تابع هدف برای هر ذره تا تکرار k ام به عنوان p_k^i ثبت می شود به همین ترتیب برای متغیر p_k^g بهترین موقعیت به دست آمده در جامعه تا تکرار k ام گرفته می شود.

در شکل ۳-۲ فرآیند الگوریتم PSO نشان داده شده است.



شکل ۳-۲: فرآیند الگوریتم PSO

۴- فصل چهارم:

روش دو مرحله‌ای پیشنهادی برای شناسایی خرابی

روش‌های شناسایی سلامت سازه‌ها موضوع تحقیقات گسترده‌ای می‌باشد که تاکنون مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته و روش‌های تشخیص آسیب در سازه‌ها به دلیل اهمیت زیاد در شکست‌های سازه‌ای، در زمره این روش‌ها طبقه‌بندی می‌شوند. به‌طور کلی تعیین آسیب در سازه بر اساس مقایسه مشخصات بین دو سازه سالم و سازه آسیب‌دیده صورت می‌گیرد. مسأله عیب‌یابی در سازه‌های پر عضو مانند سازه‌های فضاکار، کاری دشوار و زمان‌بر می‌باشد. برای رفع این مشکل در این پژوهش از یک روش دو مرحله‌ای استفاده شده است. در این روش در مرحله اول فضای جستجو را کاهش داده و در انتهای مرحله اول فقط المان‌هایی که مشکوک به خرابی هستند از بین تمامی المان‌ها باقی می‌مانند و در مرحله دوم محل و شدت دقیق خرابی در المان‌های معیوب مشخص می‌شود. بدین منظور در مرحله اول از شاخص انرژی کرنشی مودال المان‌های سازه استفاده می‌شود و در مرحله دوم با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی خفاش و تابع هدفی مبتنی بر تفاوت فرکانسی، مکان دقیق و شدت خرابی در المان‌ها مشخص می‌شود. در ادامه فصل روند پیشنهادی تشریح می‌شود.

قابل توجه است که محققان دیگری نیز از روش دو مرحله‌ای به منظور عیب‌یابی سازه‌ها استفاده کرده‌اند. آقایان هی و هوانگ در سال ۲۰۰۷ از یک روش دو مرحله‌ای استفاده کردند که در مرحله اول فضای جستجو را کاهش داده و در مرحله دوم محل و مقدار خرابی را شناسایی کردند [۸]. آقایان گوو و لی در سال ۲۰۰۹ در مرحله اول با استفاده از پاسخ فرکانس و مدشکل مکان المان‌های خراب را شناسایی کردند و در مرحله دوم توسط الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک شدت خرابی را به دست آوردند [۹]. سیدپور یک روش دو مرحله‌ای بر مبنای انرژی کرنشی و فرکانس با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات برای تعیین و تشخیص خرابی در سازه‌ها معرفی نمود [۱۰]. پیروزی و همکاران از روش دو مرحله‌ای مبتنی بر آنالیز حساسیت و الگوریتم فراکاوشی فاخته برای عیب‌یابی سازه‌ها استفاده کردند [۱۲]. همچنين ناصرعلوی و همکاران در سال ۲۰۱۱ از یک روش دو مرحله‌ای که در مرحله اول با استفاده از آنالیز حساسیت متغیرها را محدود کرده و در مرحله بعدی المان‌های خراب را همراه با شدت خرابی با استفاده از الگوریتم ژنتیک پیدا می‌کند، برای عیب‌یابی یک سد وزنی استفاده کردند [۱۳].

۴-۲- مرحله اول

زمانی که سازه دچار آسیب می‌گردد، پارامترهای سازه دچار تغییر شده که این خود باعث تغییر در فرکانس‌های نوسان سازه، اشکال مودی، خاصیت میرایی، استهلاک انرژی، ماتریس سختی و نرمی سازه می‌شود [۵۰]. بنابراین جهت تعیین خرابی از پاسخ‌های دینامیکی، استاتیکی و یا ترکیبی از آنها استفاده می‌شود [۵۱]. خرابی در یک سازه معمولاً موجب کاهش سختی سازه می‌شود و بر ماتریس جرم سازه تاثیر نمی‌گذارد. معادله مقدار ویژه حاکم بر یک سازه سالم n درجه آزادی نامیرا توسط رابطه زیر بیان می‌شود:

$$K \phi_i = \lambda_i M \phi_i \quad (1-4)$$

این رابطه برای سازه خراب به صورت زیر است:

$$K^d \phi_i^d = \lambda_i^d M \phi_i^d \quad (2-4)$$

که در آن K ، λ^i و ϕ_i به ترتیب ماتریس سختی، i امین مقدار ویژه و بردار ویژه سازه سالم هستند. K^d ، λ_i^d و ϕ_i^d به ترتیب ماتریس سختی، i امین مقدار ویژه (فرکانس سازه) و بردار ویژه (مدشکل) سازه خراب هستند و اطلاعات مودال سازه از آنالیز عددی به دست می آیند. اندیس d بیان گر سازه خراب است. وقوع خرابی در یک سازه را می توان به صورت ایجاد یک تغییر کوچک در سازه سالم به صورت زیر بیان کرد:

$$K^d = K + \sum_{j=1}^n \Delta K_j = K + \sum_{j=1}^n \alpha_j K_j \quad (-1 < \alpha_j \leq 0) \quad (3-4)$$

$$\lambda_i^d = \lambda^i + \Delta \lambda^i \quad ; \quad \phi_i^d = \phi_i + \Delta \phi_i \quad (4-4)$$

که n تعداد اعضا خراب و α_j شدت خرابی j امین عضو سازه و نشان دهنده نسبت تغییرات ماتریس سختی آن عضو است. با توجه به اینکه پاسخ سازه خراب موجود نیست، به طور تقریبی از ماتریس سختی سازه سالم به جای ماتریس سختی سازه خراب استفاده می کنیم [۵۲]

از آنجایی که بردار مودشکلها متناسب با تغییر شکل های ارتعاشی سازه هستند، بنابراین در هر المان از سازه انرژی کرنشی ذخیره می شود. انرژی کرنشی سازه ناشی از بردار مودشکلها، انرژی کرنشی مودال (MSE^1) نامیده می شود و می توان در عیب یابی آن را پارامتر با ارزشی در نظر گرفت. انرژی کرنشی مودال در e امین المان از i امین مود سازه را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$mse_i^e = \frac{1}{2} \phi_i^{eT} K^e \phi_i^e \quad ; \quad i = 1, \dots, ndf \quad ; \quad e = 1, \dots, nte \quad (5-4)$$

که K^e ماتریس سختی e امین المان سازه، ϕ_i^e بردار متناظر تغییر شکل های گره ای المان e در مود i و nte تعداد کل المانها است. همچنین ndf تعداد درجات آزادی کل سازه است. کل انرژی کرنشی مودال i امین مود از سازه را می توان با جمع MSE همه المانها به صورت زیر تعیین کرد:

$$mse_i = \sum_{e=1}^{nte} mse_i^e \quad ; \quad i = 1, \dots, ndf \quad (6-4)$$

برای هدف مورد نظر بهتر است MSE المانها را نسبت به کل MSE سازه به صورت زیر نرمال کنیم:

¹ Modal strain energy

$$nmse_i^e = \frac{mse_i^e}{mse_i} \quad (7-4)$$

که در آن $nmse_i^e$ نرمال شده MSE مربوط به e امین المان از i امین مود سازه است. حال برای mn امین مود می توان پارامتر موثری را به صورت زیر انتخاب کرد:

$$mnmse^e = \frac{\sum_{i=1}^{nm} nmse_i^e}{nm} ; e = 1, \dots, nte \quad (8-4)$$

به عنوان یک نتیجه از این مطالعه، با تعیین پارامتر موثر $mnmse^e$ برای هر المان سالم و معیوب از سازه که به ترتیب با $(mnmse^e)^h$ و $(mnmse^e)^d$ نشان داده شده است، یک شاخص موثر برای تخمین حضور و شدت عیب در المان می توان تعریف کرد. این شاخص در اینجا شاخص انرژی کرنشی مودال ($MSEBI^e$) نامیده شده و می توان آن را به صورت زیر تعیین کرد:

$$MSEBI^e = \max \left[0, \frac{(mnmse^e)^d - (mnmse^e)^h}{(mnmse^e)^h} \right] ; e = 1, \dots, nte \quad (9-4)$$

باید توجه کنیم که در کاربردهای واقعی محل عیب های سازه ای از قبل مشخص نیست که بتوانیم ماتریس سختی سازه معیوب را مشخص کنیم، بنابراین برای این حالت از ماتریس سختی المان سازه سالم برای تخمین پارامتر $(mnmse^e)^d$ استفاده شده است. طبق معادله (۹-۶) برای المان سالم شاخص معادل صفر ($MSEBI^e = 0$) و برای المان معیوب شاخص بزرگتر از صفر ($MSEBI^e > 0$) خواهد بود [۱۰].

۴-۳- باقی مانده نیروی مودال

با استفاده از فرکانس طبیعی و مودشکل ها در تمام درجات آزادی سازه و مسأله مقدار ویژه می توان باقیمانده نیروی مودی را بدین شکل مطرح نمود.

$$(K^d - \lambda_m^d M) \phi_m^d = 0 \quad (10-4)$$

$$(K^h - \lambda_m^d M) \phi_m^d = d \quad (11-4)$$

رابطه (۱۰-۴) و (۱۱-۴) به ترتیب مسأله مقدار ویژه و باقیمانده نیروی مودی می باشد. در روابط فوق، d نیروی باقی مانده مودی، K^h و K^d به ترتیب ماتریس سختی سازه سالم و آسیب دیده، λ_m^d و ϕ_m^d به ترتیب فرکانس و مودشکل های سازه خراب در مود m ام می باشند و M ماتریس جرم سازه می باشد.

¹ Modal strain energy based index

با بررسی معادله (۴-۱۱) مشخص است که i امین عضو از بردار d وقتی صفر است که i امین ردیف از ماتریس سختی سازه سالم با i امین ردیف از ماتریس سختی سازه آسیب دیده یکسان باشد. بنابراین اعضای که مربوط به درجات آزادی هستند که درایه بردار باقی مانده متناظر با آنها صفر می باشد، اعضای خراب تلقی می شوند [۶].

۴-۴- مرحله دوم

از جمله پاسخ های دینامیکی که در روش های عیب یابی و به خصوص در روش های مبتنی بر هوش مصنوعی از آن استفاده می شود، فرکانس ها می باشند. فرکانس ها به مشخصات فیزیکی سیستم بستگی داشته و از معادله حرکت یک سیستم چند درجه آزادی به صورت زیر به دست می آیند. پس از محاسبه ماتریس جرم و سختی سازه سالم و معیوب در برنامه ی هدف و محاسبه مقادیر ویژه به صورت زیر، فرکانس ها و مدشکل ها محاسبه می شوند:

$$[M][\ddot{y}] + [K][y] = [F] \quad (۴-۱۲)$$

$$[K]\{\phi_i\} - \lambda_i [M]\{\phi_i\} = 0 \quad (۴-۱۳)$$

$$\lambda_i = \omega_i^2 \quad (۴-۱۴)$$

که λ_i مقدار ویژه i ام و ϕ_i بردار ویژه متناظر نرمال شده است. مقادیر ویژه و بردارهای ویژه برای سازه معیوب به صورت زیر محاسبه می شود:

$$[K_d]\{\phi_{id}\} - \lambda_{id} [M]\{\phi_{id}\} = 0 \quad (۴-۱۵)$$

که λ_{id} مقادیر ویژه i ام و ϕ_{id} بردار ویژه متناظر نرمال شده برای سازه معیوب می باشد. کاهش مدول الاستیسیته در اعضای سازه باعث تغییراتی در فرکانس های آن خواهد شد، که با استفاده از همین تغییرات به شناسایی محل و شدت عیب در سازه ها پرداخته خواهد شد. بنابراین پروسه عیب یابی از نوعی روش معکوس برای شناسایی عیب استفاده می کند.

تعیین میزان همبستگی ما بین فرکانس های اندازه گیری شده و پیش بینی شده از مدل تحلیلی سازه می تواند شاخص مناسبی در جهت تعیین مکان و شدت آسیب های سازه ای باشد [۱۰]. دو بردار پارامتری جهت ارزیابی ضرایب همبستگی مورد استفاده قرار می گیرد. یک بردار شامل n_f فرکانس اول سازه که ΔF را بر حسب میزان عیب سازه تغییر می دهد:

$$\Delta F = \frac{F_h - F_d}{F_h} \quad (۴-۱۶)$$

که در آن F_d و F_h به ترتیب بردارهای فرکانس سازه سالم و معیوب می باشند. به همین ترتیب بردار پارامتری متناظر پیش بینی شده از مدل تحلیلی به صورت زیر تعریف می شود:

$$\delta F(X) = \frac{F_h - F(X)}{F_h} \quad (17-4)$$

که در آن $F(X)$ بردار فرکانس پیش‌بینی شده از مدل تحلیلی می‌باشد و $X^T = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_n\}$ بردار متغیرهای خرابی شامل شدت خرابی $(x_i ; i = 1, \dots, n)$ n امین المان سازه می‌باشد. با معلوم بودن بردارهای پارامتری بالا، می‌توان میزان همبستگی را به روش‌های مختلفی به‌دست آورد. یکی از روش‌های کارآمد، محاسبه شاخص همبستگی با نام شاخص تضمین مکان‌یابی عیوب چندگانه ($MDLAC^1$) که در زیر بیان شده، می‌باشد [۱۰]:

$$MDLAC(X) = \frac{|\Delta F^T \cdot \delta F(X)|^2}{(\Delta F^T \cdot \Delta F)(\delta F^T(X) \cdot \delta F(X))} \quad (18-4)$$

شاخص $MDLAC$ ، بردار تغییرات فرکانس به‌دست آمده از سازه تست شده را با بردار تغییرات فرکانس حاصل از مدل تحلیلی مورد مقایسه قرار می‌دهد. مقدار $MDLAC$ از ۰ تا ۱ متغیر است و زمانی برابر ۱ خواهد بود که فرکانس‌های سازه تحلیلی با فرکانس‌های حاصل از تست سازه معیوب یکسان شوند.

۴-۵- صورت کلی روند پیشنهادی برای عیب‌یابی سازه‌های فضاکار

با توجه به دو گام تشریح شده در بالا روند کلی پیشنهادی در این پژوهش برای عیب‌یابی سازه‌های فضاکار به‌صورت زیر است:

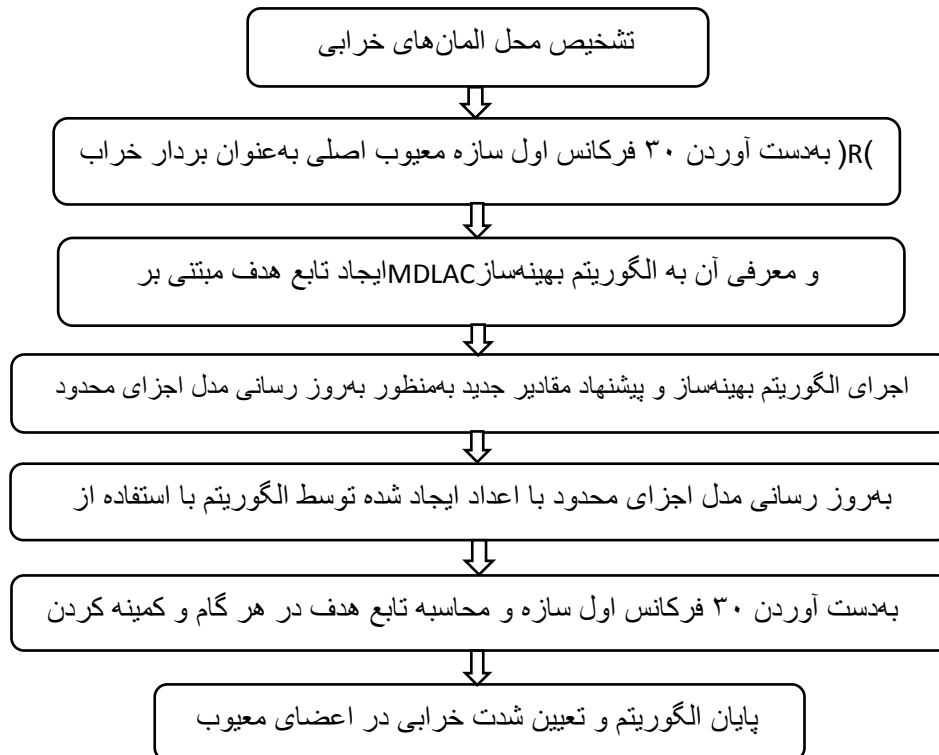
پس از تعیین المان‌های محتمل خرابی با استفاده از شاخص انرژی کرنشی مودال هدف یافتن شدت خرابی در المان‌های واقعاً خراب و حذف المان‌های سالمی که در مرحله اول اشتباهی خراب تشخیص داده شده است، می‌باشد. بدین منظور دستگاهی تشکیل می‌شود که درصد المان‌های خراب، مجهولات آن و ۳۰ فرکانس اول سازه معیوب به‌عنوان معلومات آن تعریف می‌گردد. در این پژوهش برای به‌دست آوردن شدت خرابی، از برداری شامل ۳۰ فرکانس اول سازه فضاکار معیوب اصلی و همچنین از بردار پاسخ‌های مدل اجزای محدود سازه به‌روز شونده، که در هر مرحله مدول الاستیسیته المان‌های خراب در آن با توجه به فرآیند عیب‌یابی در الگوریتم بهینه‌ساز عوض می‌شود، استفاده می‌گردد. بدین منظور در هر مرحله سازه فضاکار با استفاده از نرم افزار OpenSees تحلیل می‌شود و ۳۰ پاسخ اول فرکانسی آن به‌دست می‌آید و از طریق مقایسه آن با پاسخ سازه معیوب اصلی با استفاده از تابع هدف ارائه شده در بخش بعد شدت خرابی به‌دست می‌آید.

همان‌طور که توضیح داده شد از نرم افزار OpenSees به‌عنوان نرم افزار به‌روز رساننده مدل اجزای محدود در هر مرحله از دستگاه بهینه‌ساز استفاده شده است. که از این نرم افزار به‌دلیل سرعت بالا در تجزیه و تحلیل سازه‌های فضاکار و به‌دست آوردن پاسخ‌های سازه در سریع‌ترین زمان ممکن و

¹ multiple damage localizing assurance criterion

همچنین قابلیت تبادل اطلاعات با نرم‌افزار متلب و استفاده از آنها در فرآیند برنامه نویسی استفاده شده است.

در شکل ۴-۱ روند عیب‌یابی با استفاده از الگوریتم خفاش به صورت نموداری نشان داده شده است.



شکل ۴-۱: روند کلی تعیین شدت خرابی با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز

۴-۶- تابع هدف

پس از یافتن المان‌های محتمل خرابی در مرحله نخست، برای مشخص شدن شدت آسیب در المان‌های محتمل خرابی از الگوریتم بهینه‌سازی خفاش استفاده می‌شود. بدین منظور، برای یافتن متغیرهای خرابی (شدت خرابی) تابع هدف زیر توسط الگوریتم BA مینیمم می‌شود:

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n] \quad \text{To minimize: } w(X) = 1 - MDLAC(X) \quad (4-19)$$

شدت خرابی می‌تواند مقدار پیوسته‌ای بین ۰ و ۱ را دارا باشد. در این تحقیق متغیرهای خرابی میزان کاهش مدول الاستیسیته (E_i) هر المان را نشان می‌دهند.

۵- فصل پنجم:

مطالعات موردی

۵-۱-مقدمه

جهت نشان دادن عملکرد روش پیشنهادی برای بررسی و شناسایی محل خرابی در سازه‌ها، به طرح چند مسأله عیب‌یابی و حل آن می‌پردازیم. به دلیل دسترسی نداشتن به اطلاعات آزمایشگاهی ابتدا به صورت تصادفی تعدادی المان از سازه را با درصد معلوم خراب می‌کنیم (خرابی توسط کاهش مدول الاستیسیته به المان‌های سازه اعمال می‌شود)، و در انتهای روش باید به همان المان‌های خراب با درصد خرابی که قبلاً اعمال شده‌اند دست یابیم. نحوه خرابی سازه و اجرای الگوریتم‌های بهینه‌سازی توسط برنامه متلب کدنویسی شده‌اند و همچنین با برنامه تحلیل‌گر OpenSees ارتباط داده شده‌اند. مدول الاستیسیته برای تمام اعضا در تمام مثال‌ها برابر $E = 2.1 \times 10^6 \frac{Kg}{cm^2}$ است، مشخصات هندسی و سطح مقطع اعضای سازه در هر مثال مشخص شده است.

در این بخش به بررسی چهار سازه فضاکار می‌پردازیم. در انتهای هر مثال به مکان و شدت خرابی سازه با روشی که توضیح داده شد، می‌رسیم. شاخص استفاده شده برای مرحله اول انرژی کرنشی مودال می‌باشد. پس از مشخص شدن المان‌های محتمل خرابی در مرحله اول در مرحله دوم از الگوریتم بهینه‌سازی خفاش برای پیدا کردن شدت خرابی در المان‌ها استفاده می‌شود.

دو مثال اول این بخش به بررسی روند پیشنهادی به منظور عیب‌یابی دو سازه فضاکار با ابعاد مختلف می‌پردازد. در مثال سوم دقت الگوریتم بهینه‌سازی خفاش با الگوریتم PSO مقایسه می‌شود و در مثال آخر شاخص MSEBI با شاخص باقی‌مانده نیروی مودال مقایسه خواهد شد.

پارامترهای تنظیمی مربوط به الگوریتم خفاش در تمام مثال‌های بررسی شده برابر با مقادیر جدول ۵-۱ در نظر گرفته شده است.

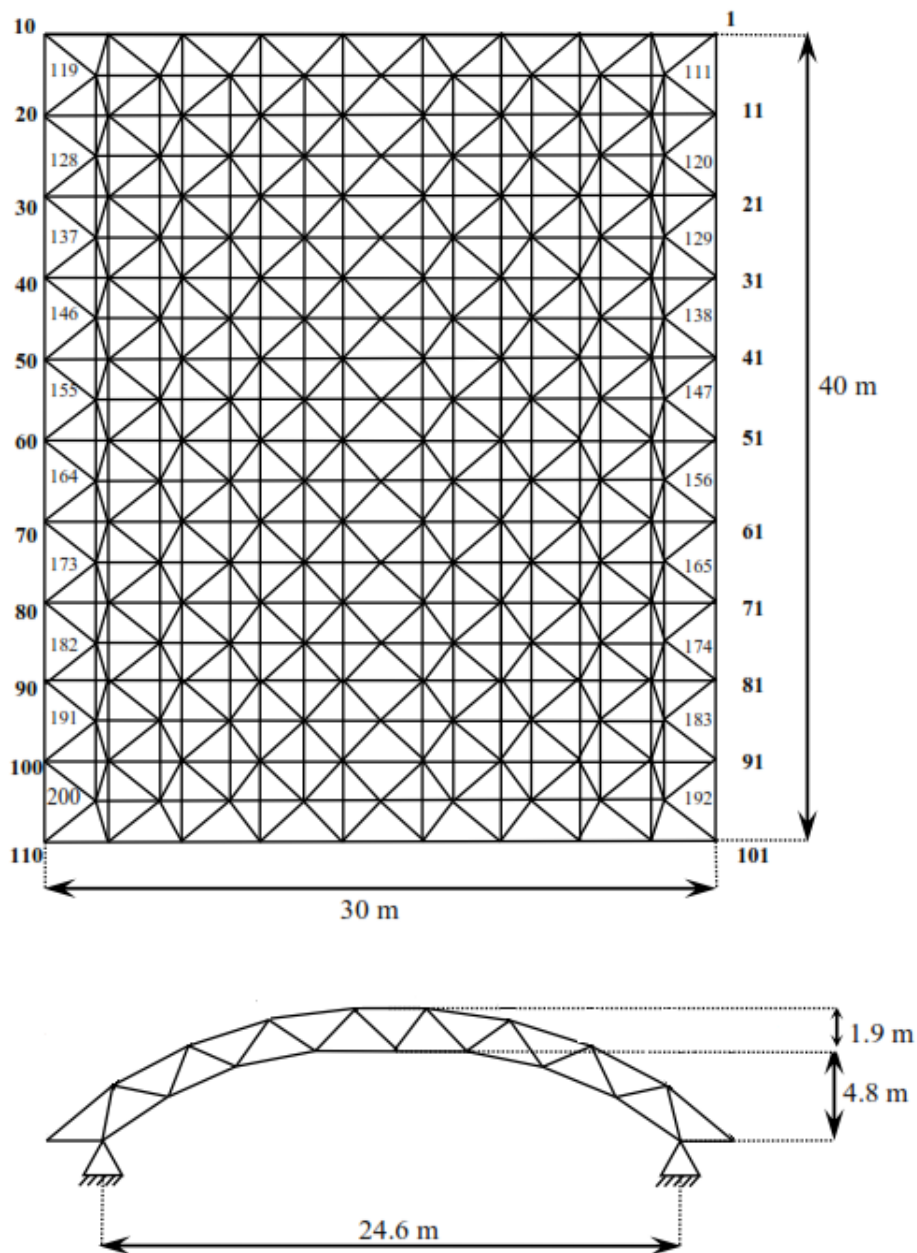
جدول ۵-۱: مقادیر پارامترهای تنظیمی الگوریتم خفاش

مقدار	توصیف	پارامتر
۵۰	تعداد جمعیت	μ
۰	کمترین فرکانس	f_{min}
۱	بیشترین فرکانس	f_{max}
۱	بلندی صدای اولیه	$l_i^0 = l_{max}$
۰.۹۵	پارامتر تنظیمی بلندی صدا	α
۰.۵	نرخ پالس اولیه	$r_i^0 = r_{min}$
۰.۹۸	پارامتر تنظیمی نرخ پالس	γ
۲	انحراف از معیار استاندارد	σ
۱	ضریب جریمه	p

۵-۲- سازه فضاکار دولایه چلیک با نقش دوراھه روی دوراھه ۷۲۱ عضوی

سازه مورد بررسی چلیک دولایه ۷۲۱ عضوی و ۲۰۰ گره‌ای می‌باشد. سطح مقطع تمام اعضا برابر ۴۰ سانتی‌متر مربع می‌باشد. هندسه سازه در شکل ۵-۱ نشان داده شده است. برای ارزیابی روش از دو سناریوی خرابی مطابق جدول ۵-۲ استفاده شده است.

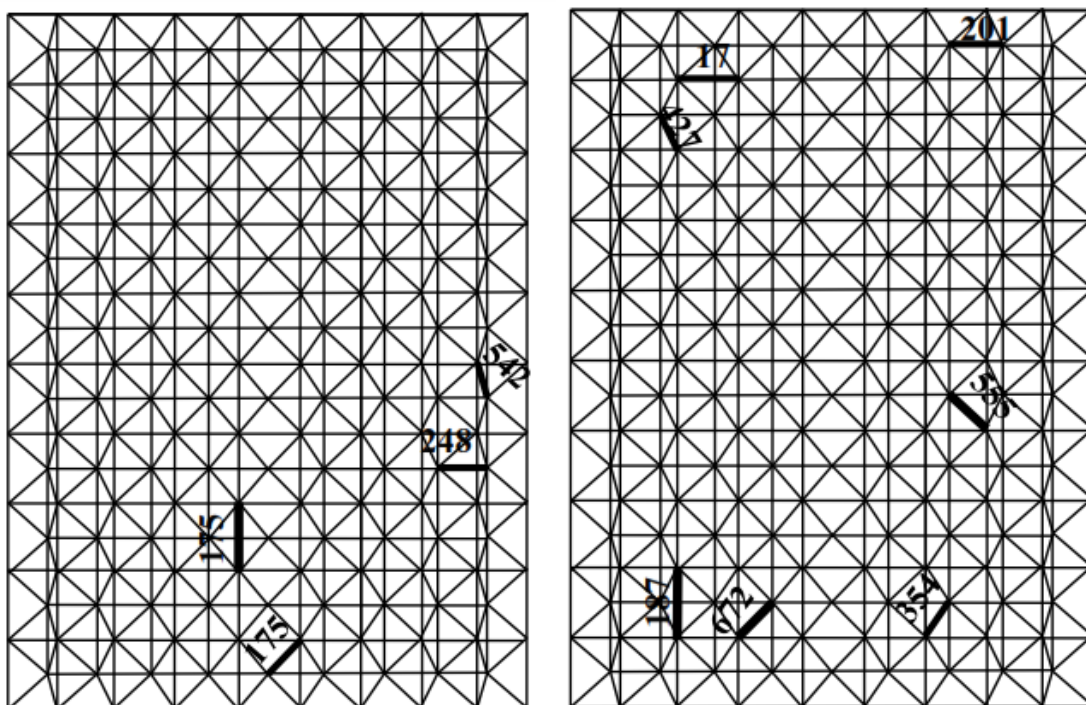
همچنین مکان المان‌های معیوب فرض شده در هر سناریوی خرابی بر روی سازه اصلی در شکل‌های ۵-۲ الف و ب نشان داده شده است.



شکل ۵-۱: هندسه چلیک دولایه با نقش دوراھه روی دوراھه ۷۲۱ عضوی

جدول ۵-۲: شماره و مقدار خرابی المان‌ها در سازه

سناریو	شماره المان	شماره گره ابتدا و انتهای المان	مقدار خرابی
۱	۱۷۵	۸۶-۷۶	%۱۰
	۲۴۸	۱۶۶-۱۶۵	%۲۰
	۵۴۲	۱۵۶-۵۲	%۳۰
	۷۰۱	۱۹۶-۹۵	%۴۰
۲	۱۷	۱۹-۱۸	%۱۵
	۱۸۷	۹۸-۸۸	%۲۰
	۲۰۱	۱۱۳-۱۱۲	%۳۰
	۳۵۴	۱۹۴-۱۸۵	%۴۰
	۴۷۲	۱۲۷-۲۸	%۲۰
	۵۵۵	۱۵۹-۶۴	%۳۵
	۶۷۲	۱۸۸-۹۷	%۱۵



الف

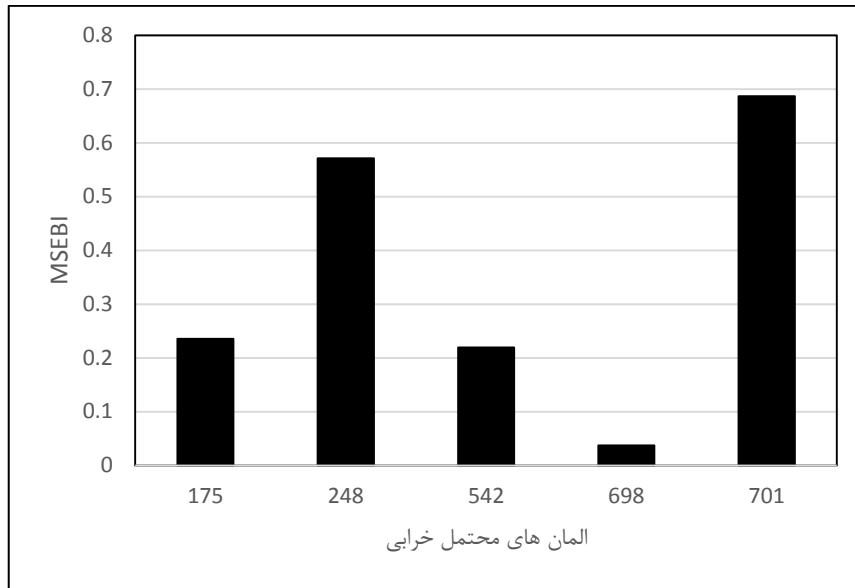
ب

شکل ۵-۲: نمایش سناریوی خرابی بر روی سازه: (الف): سناریوی اول، (ب): سناریوی دوم

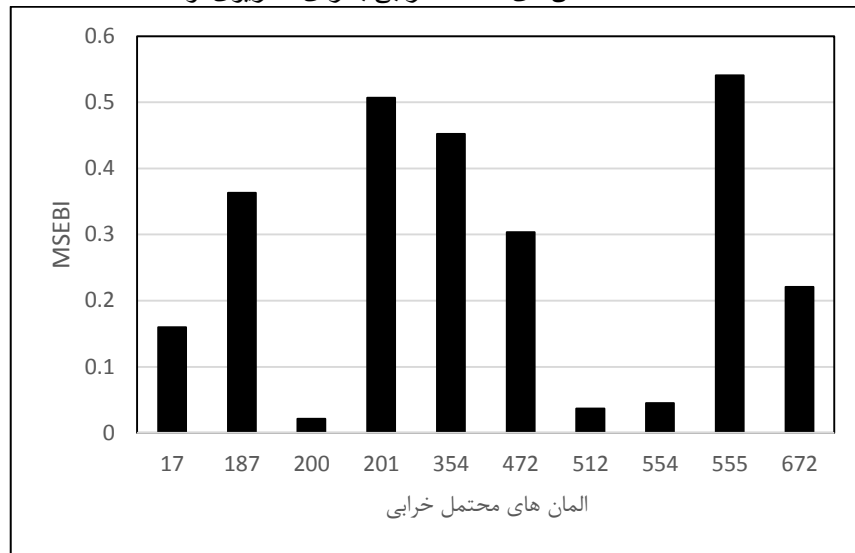
به منظور عیب‌یابی این سازه با استفاده از روش پیشنهادی در این پژوهش ابتدا سازه به‌ازای حالت سالم مورد تحلیل دینامیکی قرار می‌گیرد و فرکانس‌ها و مدشکل‌های سازه در این حالت محاسبه می‌شود. سپس به‌علت دسترسی نداشتن به مدل آزمایشگاهی فرکانس‌ها و مدشکل‌های سازه خراب به‌ازای حالات خرابی مطرح شده در جدول نیز به روش مشابه محاسبه می‌شود.

پس از آن مرحله اول عیب‌یابی شروع می‌شود. در این مرحله با استفاده از شاخص انرژی کرنشی مودال مکان‌المان‌های محتمل خرابی مشخص می‌شود.

نتایج استفاده از این شاخص به‌ازای دو سناریوی مطرح شده در شکل‌های ۵-۳ و ۵-۴ نشان داده شده است.



شکل ۳-۵: المان های محتمل خرابی به ازای سناریوی اول



شکل ۴-۵: المان های محتمل خرابی به ازای سناریوی دوم

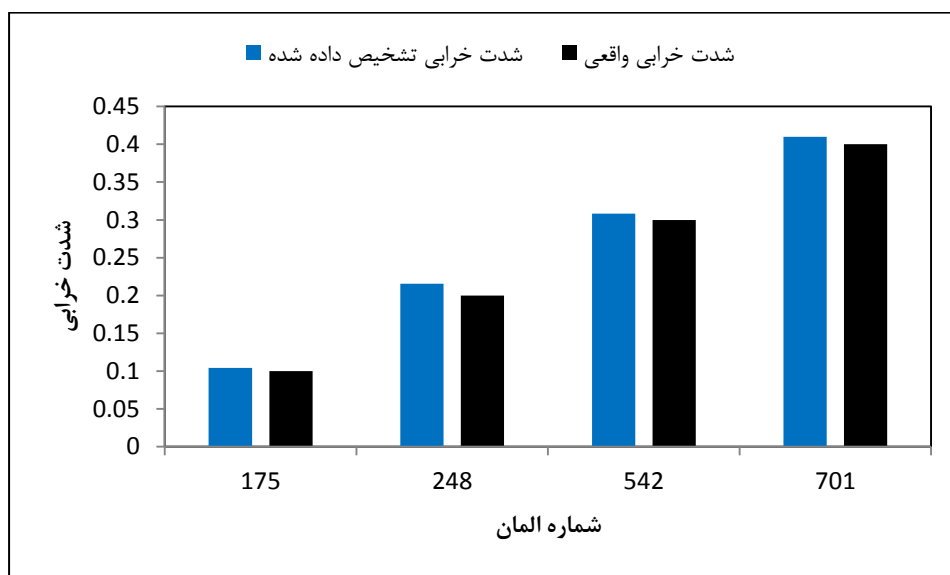
همان طور که از نمودارها مشخص است در هر سناریو، شاخص انرژی کرنشی مودال به دقت خیلی خوبی مکان المان های خراب را مشخص کرده است. این شاخص با استفاده از مودشکل های هر المان و ماتریس سختی مربوط به آن انرژی کرنشی هر المان را مشخص کرده که ناصفر بودن آن نشانه ای از خراب بودن آن المان است.

با این وجود با توجه به ابعاد بالای سازه و همچنین تعداد زیاد المان ها، تعدادی المان به اشتباه خراب تشخیص داده شده است. به طور مثال المان ۲۰۰ در سناریوی مطرح شده سالم می باشد اما بعد از استفاده از شاخص MSEBI مقدار انرژی کرنشی آن ۰.۰۳ شده است. با این وجود مقدار انرژی کرنشی المان های سالم به اشتباه خراب تشخیص داده شده بسیار کمتر از انرژی کرنشی المان های واقعاً خراب می باشد. از این رو با تعریف آستانه ۰.۱، فقط المان هایی که مقدار انرژی کرنشی آنها بالاتر از این مقدار است وارد مرحله دوم عیب یابی می شوند. با توجه به نمودار مشخص است با به کار بردن

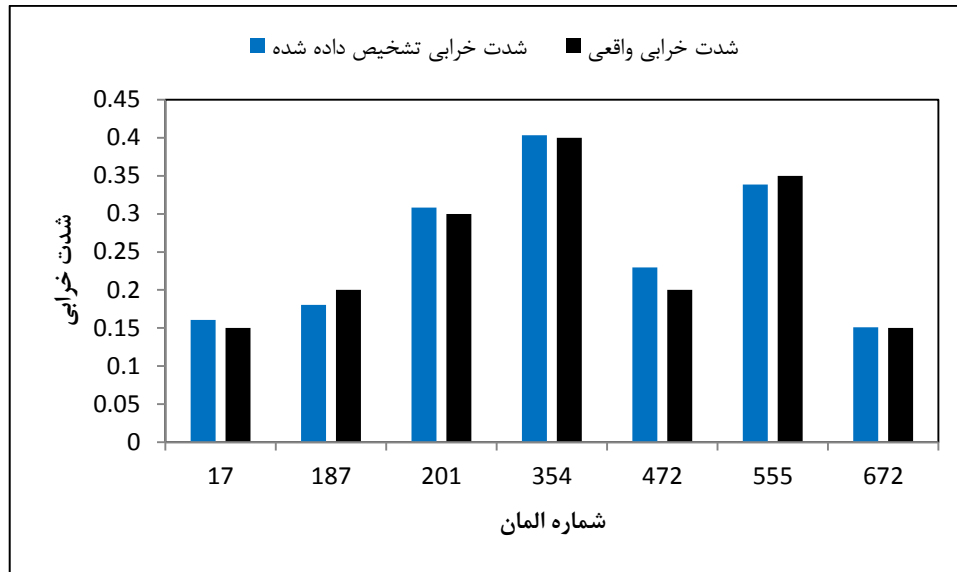
این آستانه فقط المان‌های واقعاً خراب وارد مرحله دوم می‌شوند و المان‌های سالم به اشتباه خراب تشخیص داده شده، وارد مرحله دوم نمی‌شوند.

در مرحله دوم عیب‌یابی به‌منظور یافتن شدت خرابی در المان‌های معیوب از الگوریتم بهینه‌سازی خفاش استفاده شده است. بدین منظور تابع هدف مبتنی بر تفاوت فرکانسی سازه خراب واقعی و سازه به‌روز شونده (MDLAC) با توجه به توضیحات فصل ۳ کمینه می‌شود. با کمینه شدن این تابع هدف شدت خرابی در المان‌های سازه مشخص می‌شود.

نتایج استفاده از این الگوریتم به‌ازای دو سناریوی مطرح شده در جدول ۵-۲ در شکل‌های ۵-۵ و ۵-۶ نشان داده شده است.



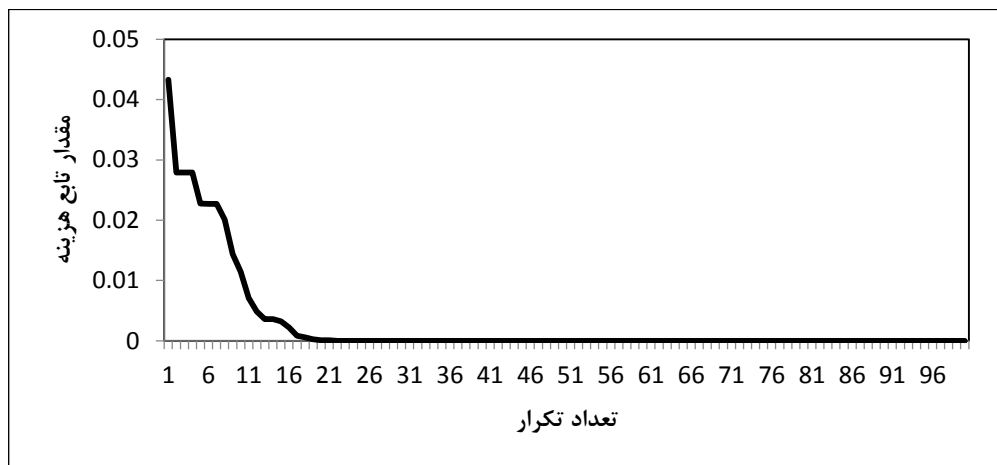
شکل ۵-۵: شدت خرابی در المان‌های سازه به‌ازای سناریوی اول



شکل ۶-۵: شدت خرابی در المان‌های سازه به‌ازای سناریوی دوم

با توجه به نمودارهای بالا مشخص می‌شود که روند پیشنهادی با دقت بسیار خوبی شدت خرابی را در المان‌های معیوب مشخص می‌کند. الگوریتم بهینه‌سازی خفاش با استفاده هوشمند از پارامترهای تنظیمی و به‌کارگیری روندی هدفمند، دارای سرعت و قدرت بسیار خوبی در بهینه کردن توابع مختلف دارد. در مورد تابع هدف مطرح شده در این پژوهش هم این الگوریتم به سرعت همگرا شده و شدت خرابی را در المان‌های سازه را با دقت بسیار خوبی مشخص می‌کند.

نمودار تاریخچه همگرایی این الگوریتم به‌ازای سازه فضاکار چلیک ۷۲۱ عضوی در شکل ۷-۵ نشان داده شده است.

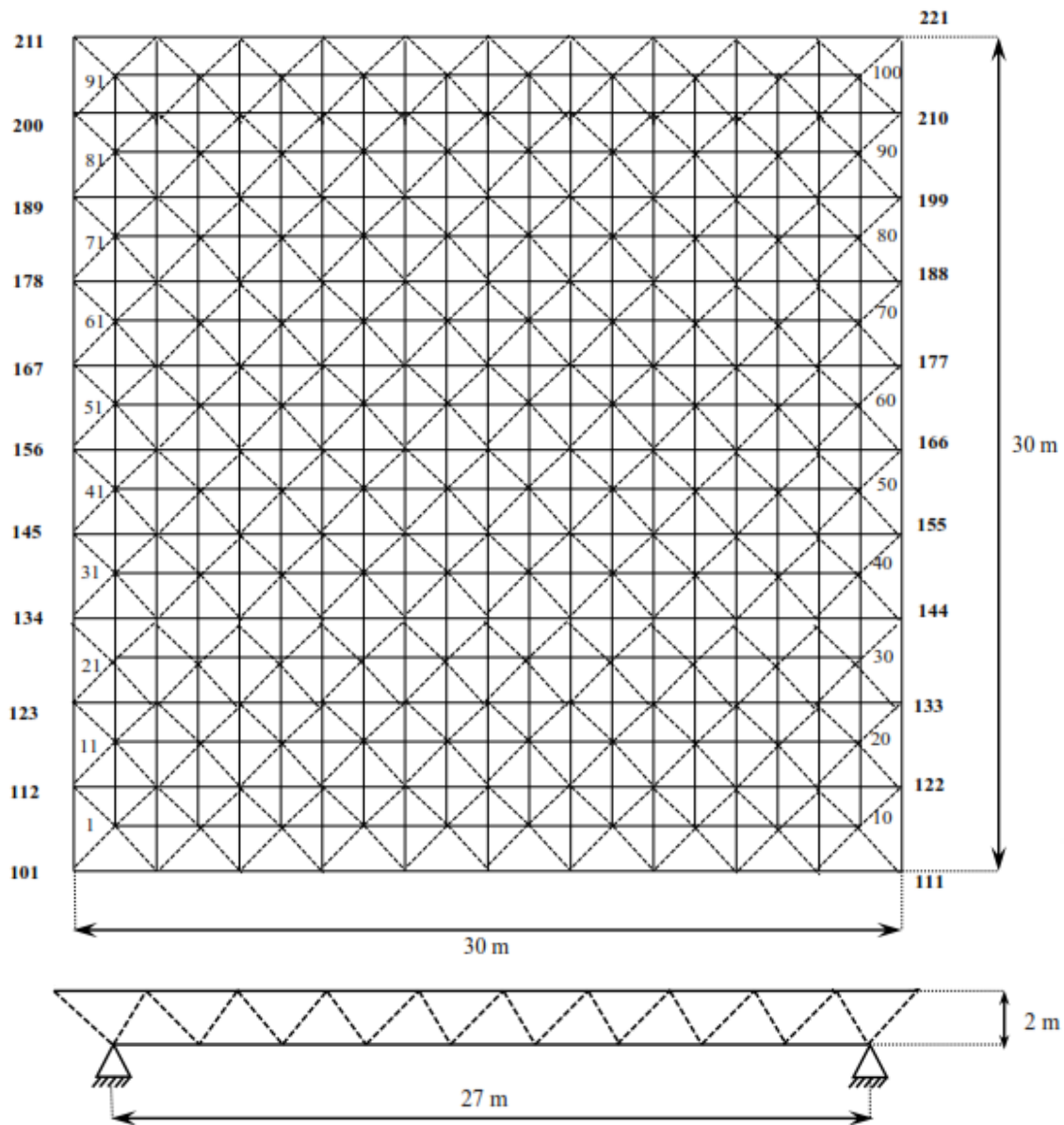


شکل ۷-۵: نمودار تاریخچه همگرایی الگوریتم BA

همان‌طور که از نمودار مشخص است با استفاده از روند ارائه شده در این پژوهش و به‌علت کاهش فضای جستجو الگوریتم تنها بعد از ۱۷ تکرار به جواب بهینه می‌رسد و از این‌رو دارای سرعت همگرایی بالایی می‌باشد.

۵-۳- سازه فضاکار شبکه تخت دولایه ۸۰۰ عضوی

سازه دوم مورد بررسی قرار گرفته شده یک شبکه دولایه ۸۰۰ عضوی با ۲۲۱ گره می‌باشد. سطح مقطع تمام اعضا ۵۰ سانتی‌متر مربع می‌باشد. هندسه کامل سازه در شکل ۸-۵ نشان داده شده است.

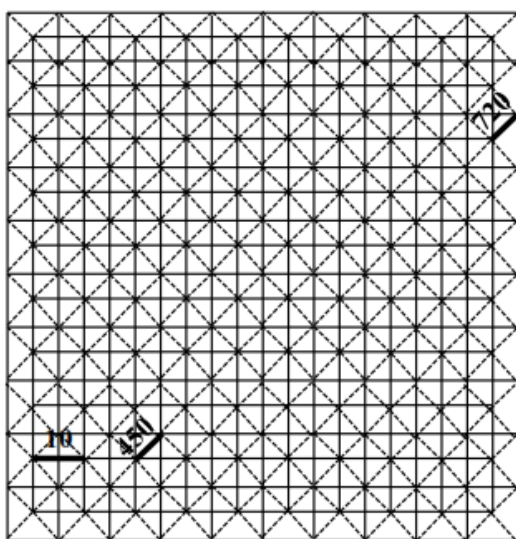


شکل ۸-۵ هندسه سازه فضاکار شبکه تخت دولایه ۸۰۰ عضوی

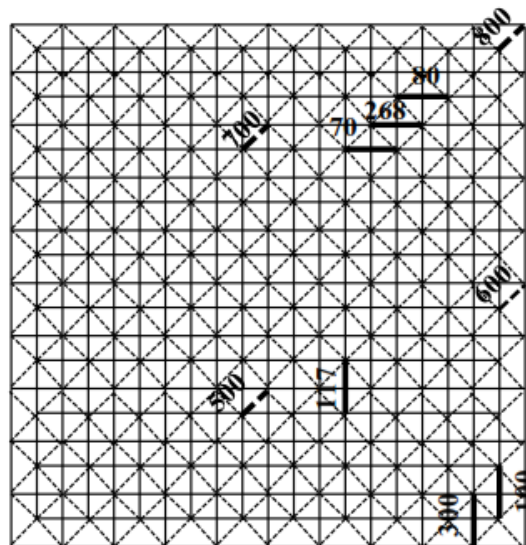
در این سازه برای بررسی روند پیشنهادی از سناریوهای خرابی جدول ۳-۵ استفاده شده است. المان‌های خراب در هر یک از این حالات در شکل‌های ۹-۵ الف و ب نشان داده شده است.

جدول ۵-۳: شماره و مقدار خرابی المان‌ها در سازه

سناریو	شماره المان	شماره گره ابتدا و انتهای المان	مقدار خرابی
۱	۱۰	۱۱-۱۲	۱۰٪
	۴۵۰	۱۳-۱۱۵	۳۰٪
	۷۲۰	۸۰-۱۹۹	۴۰٪
۲	۷۰	۷۷-۷۸	۱۵٪
	۸۰	۸۸-۸۹	۳۰٪
	۱۰۰	۱۰-۲۰	۲۰٪
	۳۰۰	۱۱۰-۱۲۱	۲۵٪
	۵۰۰	۲۵-۱۳۹	۳۰٪
	۶۰۰	۵۰-۱۶۶	۳۵٪
	۷۰۰	۷۵-۱۹۴	۱۵٪
	۸۰۰	۱۰۰-۲۲	۴۰٪



الف

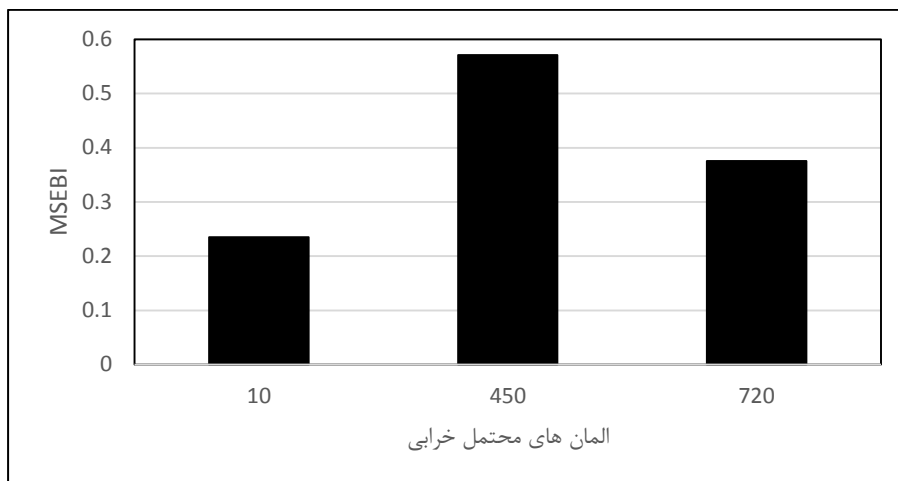


ب

شکل ۹-۵: نمایش سناریوی خرابی بر روی سازه: (الف): سناریوی اول، (ب): سناریوی دوم

در این مثال ابعاد سازه بزرگ‌تر شده و متناسب با آن تعداد المان‌های سازه نیز افزایش یافته است. هدف از بررسی این مثال بررسی کارایی روش پیشنهادی در این پژوهش بر روی سازه فضاکار با تعداد المان زیاد می‌باشد.

در مرحله اول با استفاده از شاخص انرژی کرنشی مودال مکان المان‌های خراب به‌ازای سناریوهای مطرح شده در جدول ۵-۳ مشخص می‌شود. نتایج استفاده از این روند در شکل‌های ۵-۱۰ و ۵-۱۱ نشان داده شده است.



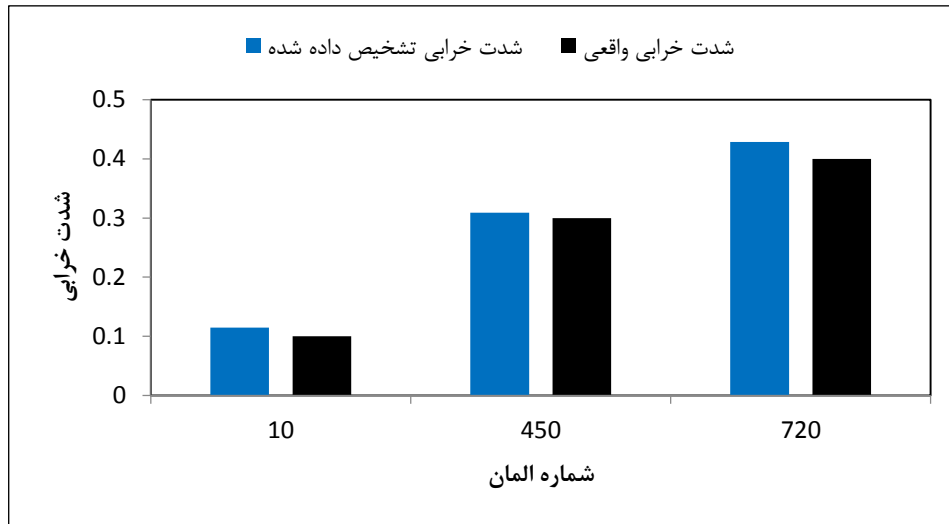
شکل ۵-۱۰: المان های محتمل خرابی به ازای سناریوی اول



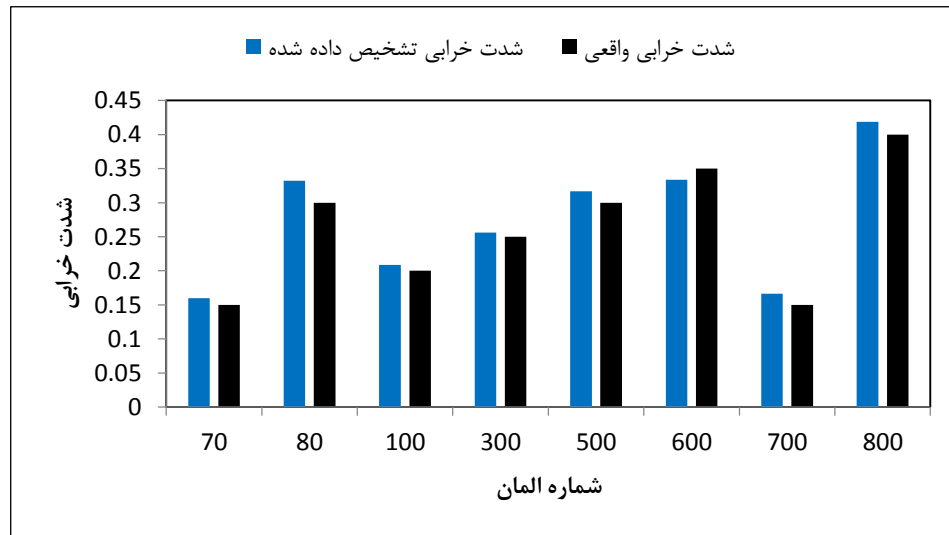
شکل ۵-۱۱: المان های محتمل خرابی به ازای سناریوی دوم

همان طور که از نمودارهای بالا مشخص است استفاده از شاخص MSEBI باعث کاهش تعداد المان های محتمل خرابی از ۸۰۰ به ۳ و ۱۰ المان می شود. این کاهش قابل توجه فضای جستجو موجب بالا رفتن دقت روند پیشنهادی به منظور تشخیص مکان و شدت خرابی در سازه های فضاکار می شود.

در مرحله دوم مشابه با مثال قبل تابع هدف مبتنی بر تفاوت فرکانسی کمینه شده و به ازای آن شدت خرابی در المان های معیوب مشخص می شود. نتایج استفاده از این روند در شکل های ۵-۱۲ و ۵-۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۲: شدت خرابی در المان‌های سازه به‌ازای سناریوی اول

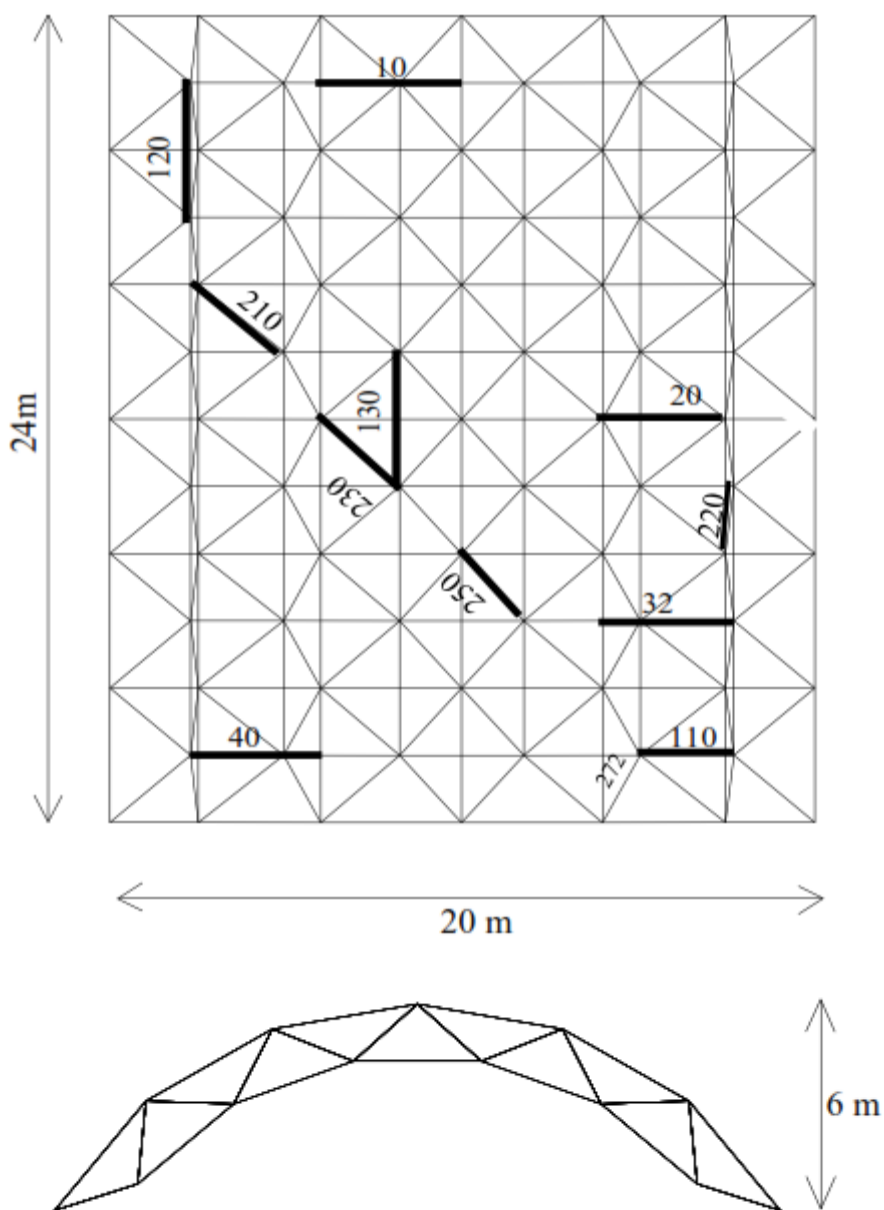


شکل ۵-۱۳: شدت خرابی در المان‌های سازه به‌ازای سناریوی دوم

با توجه به نمودارها مشخص می‌شود که روند پیشنهادی قادر است حتی با زیاد شدن تعداد المان‌ها و بزرگ‌تر شدن ابعاد سازه، با دقت خیلی خوبی شدت و مکان خرابی در المان‌های سازه‌های فضاکار را محاسبه کند.

۴-۵- سازه فضاکار دولایه چلیک با نقش دوراهه روی دوراهه ۲۸۸ عضوی

در این قسمت به‌منظور مقایسه الگوریتم بهینه‌سازی خفاش با الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات از یک چلیک با نقش دو راهه استفاده شده است. سازه مورد نظر یک شبکه چلیک با هندسه مطابق شکل ۵-۱۴، که شامل ۲۸۸ عضو است، می‌باشد. سطح مقطع تمام اعضا ۵۰ سانتی‌متر مربع می‌باشد. در این مثال یک حالت آسیب مطابق جدول ۴-۵، در نظر گرفته شده است.

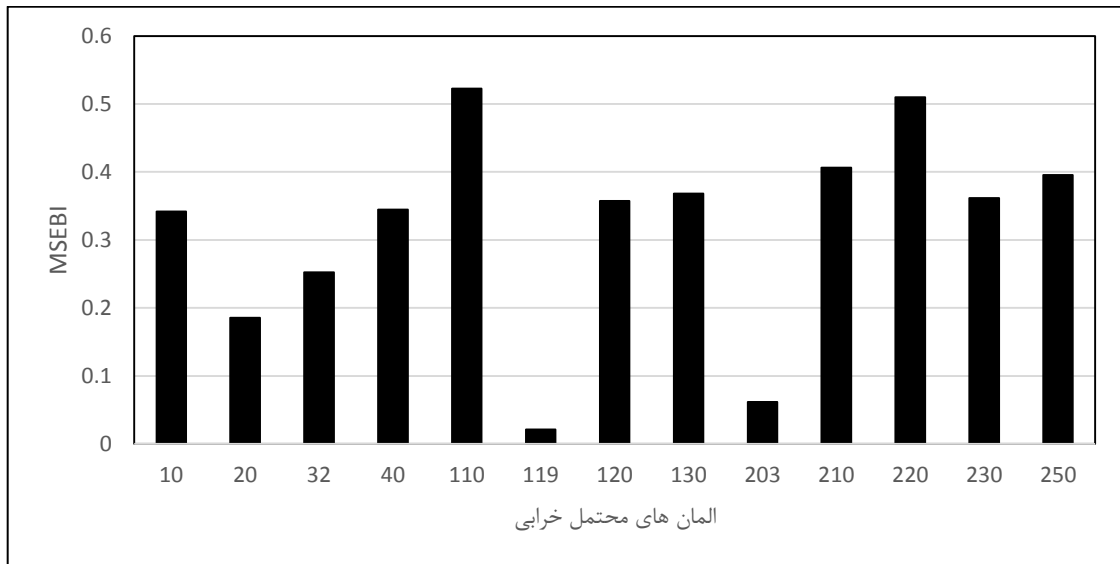


شکل ۵-۱۴: هندسه سازه فضاکار چلیک دولایه با نقش دوراهه روی دوراهه ۲۸۸ عضوی

جدول ۴-۵: شماره و مقدار خرابی المان‌های سازه

شماره المان	مقدار خرابی	شماره المان	مقدار خرابی
۱۳۰	۲۰٪	۱۰	۱۵٪
۲۱۰	۳۰٪	۲۰	۱۰٪
۲۲۰	۲۵٪	۳۲	۲۰٪
۲۳۰	۳۵٪	۴۰	۳۰٪
۲۵۰	۳۰٪	۱۱۰	۴۰٪
		۱۲۰	۳۵٪

مانند مثال‌های قبل با استفاده از شاخص MSEBI مکان المان‌های محتملاً خراب پیدا می‌شود و المان‌های با آستانه بالاتر از ۰.۱ وارد مرحله دوم می‌شوند. نموداری مربوطه به این مرحله در شکل ۵-۱۵ نشان داده شده است.



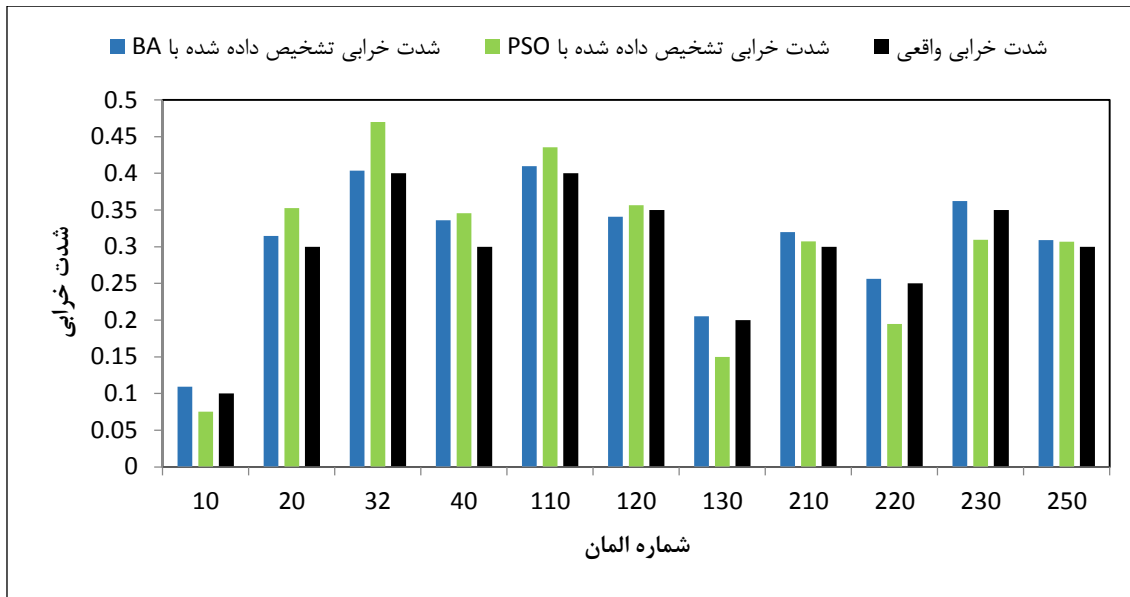
شکل ۵-۱۵: المان‌های محتمل خرابی

در مرحله دوم به منظور مقایسه کارایی الگوریتم BA، دقت شناسایی شدت خرابی و سرعت همگرایی آن با الگوریتم PSO مقایسه می‌شود. پارامترهای تنظیمی PSO مطابق جدول زیر در نظر گرفته شده است.

جدول ۵-۵: پارامترهای تنظیمی الگوریتم PSO

پارامتر	توصیف	مقدار
n_p	تعداد پرندگان جستجوگر	۲۰
n_i	ماکزیم تعداد تکرار	۱۰۰
C_1	پارامتر شناختی	۲
C_2	پارامتر اجتماعی	۲
ρ^{min}	کمترین مقدار وزن	۰.۴
ρ^{max}	بیشترین مقدار وزن	۰.۹

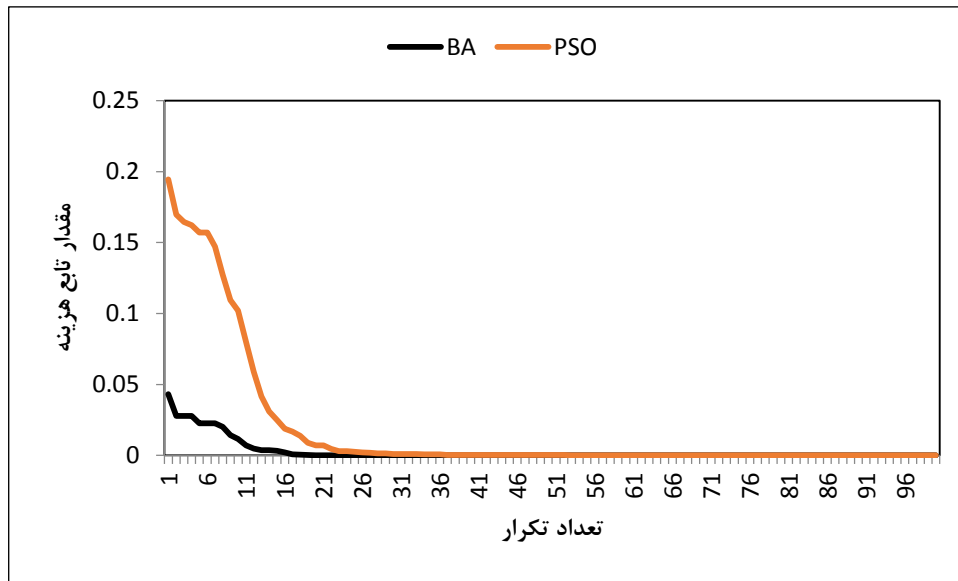
بعد از اجرای هر دو الگوریتم نتایج حاصل در شکل ۵-۱۶ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۶: شدت خرابی تشخیص داده شده در المان‌های سازه با استفاده از BA و PSO

با توجه به نمودار مشخص می‌شود که تقریباً در تمامی موارد دقت الگوریتم BA در شناسایی شدت خرابی در المان‌های معیوب بهتر از الگوریتم PSO می‌باشد. از این رو استفاده از الگوریتم BA در عیب‌یابی سازه‌های سازه فضاکار باعث افزایش دقت روند عیب‌یابی می‌شود.

در نمودار زیر تاریخچه همگرایی دو الگوریتم با یکدیگر مقایسه می‌شود (شکل ۵-۱۷).

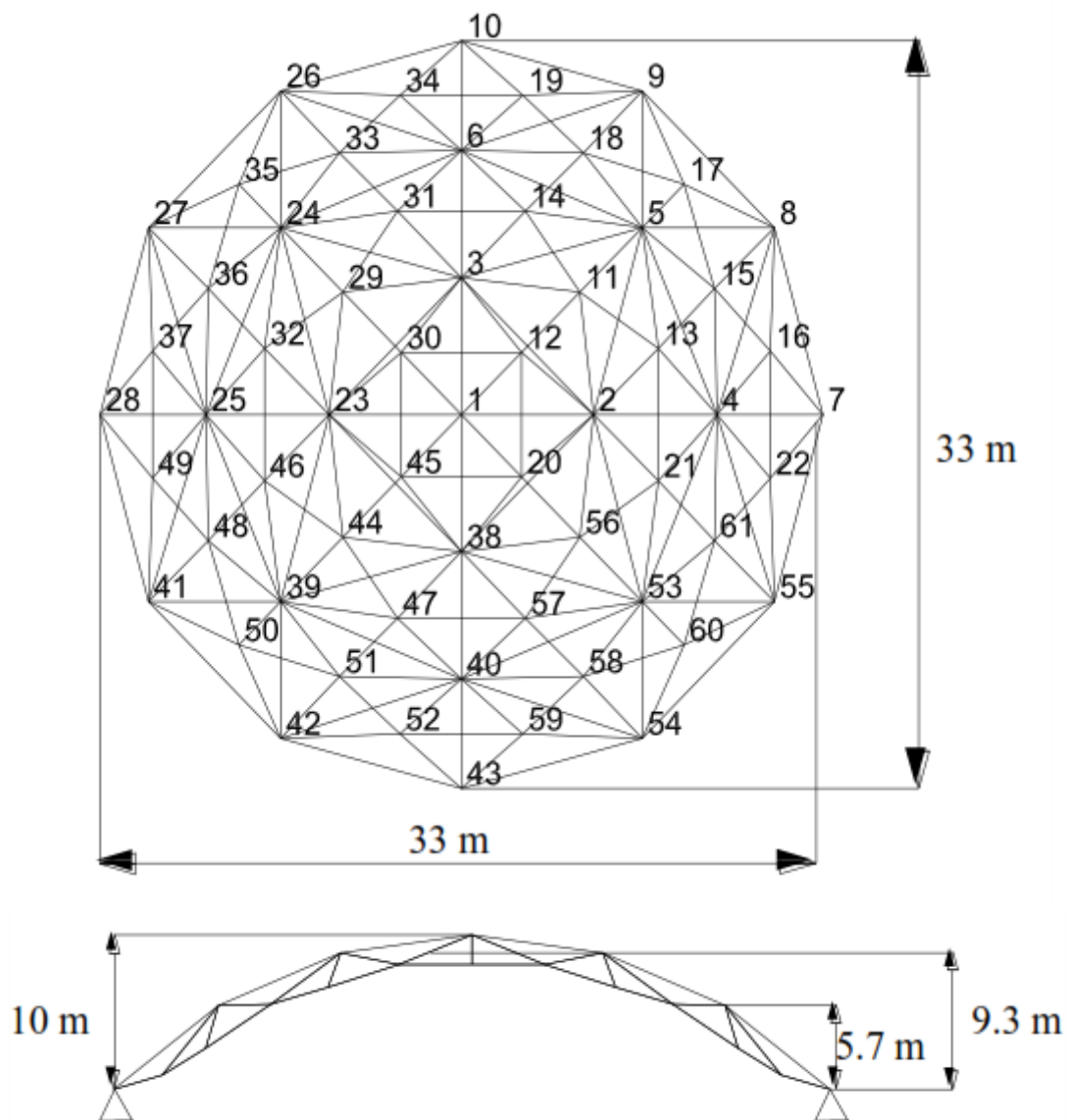


شکل ۵-۱۷: مقایسه تاریخچه همگرایی دو الگوریتم BA و PSO

با بررسی نمودار بالا می‌توان پی برد که سرعت همگرایی الگوریتم BA بیشتر از PSO است و در نتیجه به محاسبات کمتری برای رسیدن به نتیجه مطلوب نیاز دارد. به‌علاوه الگوریتم BA از مقدار تابع هزینه کمتری شروع کرده و از این‌رو در تعداد تکرار کمتری تابع هزینه را کمینه می‌کند. از این‌رو الگوریتم BA دارای سرعت و دقت بیشتری در فرآیند عیب‌یابی سازه‌ها است.

۵-۵- سازه فضاکار گنبد دیاماتیک ۲۱۶ عضوی

در مثال آخر به‌منظور مقایسه تاثیر شاخص‌های مختلف بر روند عیب‌یابی پیشنهادی در این پژوهش، دو نوع شاخص شناسایی مکان خرابی برای مرحله اول با یکدیگر مقایسه شده‌اند. سازه مورد بررسی یک گنبد دیاماتیک است. سازه با هندسه مطابق شکل ۵-۱۸، دارای ۲۱۶ عضو می‌باشد. سطح مقطع تمام اعضای سازه برابر ۵۰ سانتی‌متر مربع است. سازه مذکور درگره‌های ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۲۶، ۲۷، ۴۱، ۴۲، ۴۳، ۵۴ و ۵۵ در سه جهت x، y و z به‌صورت مفصلی ثابت شده است.



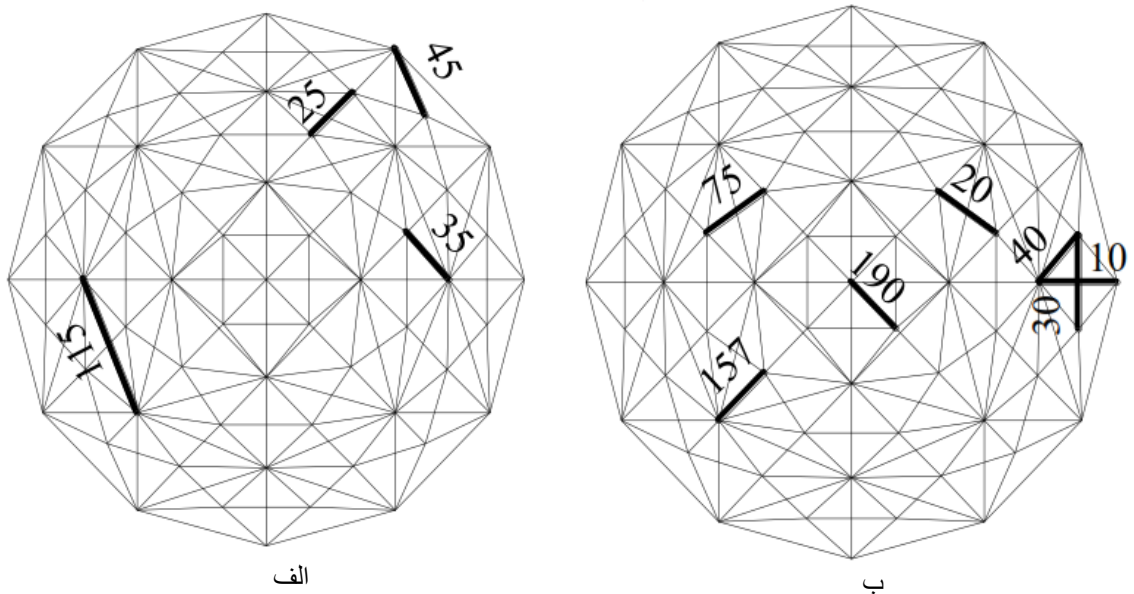
شکل ۵-۱۸: هندسه سازه گنبد دیاماتیک دولایه ۲۱۶ عضوی

به منظور مقایسه شاخص‌ها از دو سناریوی مطرح شده در جدول ۵-۶ استفاده شده است. همچنین مکان المان‌های معیوب بر روی سازه واقعی در شکل‌های ۵-۱۹ الف و ب نشان داده شده است.

جدول ۵-۶ شماره و مقدار خرابی المانها در سازه

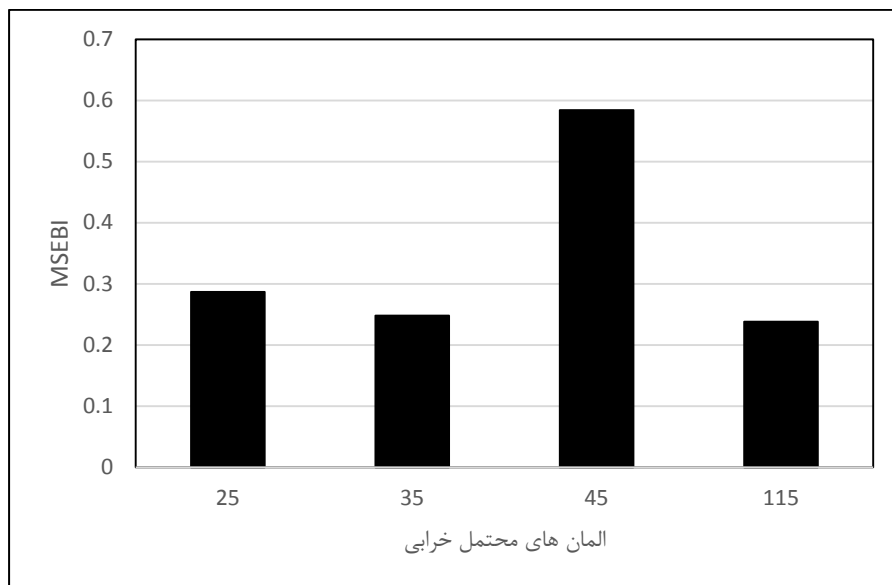
سناریو	شماره المان	شماره گره ابتدا و انتهای المان	مقدار خرابی
۱	۲۵	۱۴-۱۸	۲۰٪
	۳۵	۴-۱۳	۳۰٪
	۴۵	۹-۱۷	۴۰٪
	۱۱۵	۲۵-۳۹	۱۰٪
۲	۱۰	۴-۷	۱۰٪
	۲۰	۱۱-۱۳	۲۰٪
	۳۰	۱۶-۲۲	۳۰٪
	۴۰	۴-۱۶	۳۰٪
	۷۵	۲۹-۳۲	۴۰٪
	۱۵۷	۳۹-۴۴	۲۰٪
	۱۹۰	۱-۲۰	۱۰٪

برای مقایسه شاخص انرژی کرنشی مودال و باقی مانده نیروی مودال بعد از تحلیل دینامیکی سازه در دو حالت خراب و سالم، با توجه به توضیحات فصل ۴ این دو شاخص محاسبه می‌شوند.

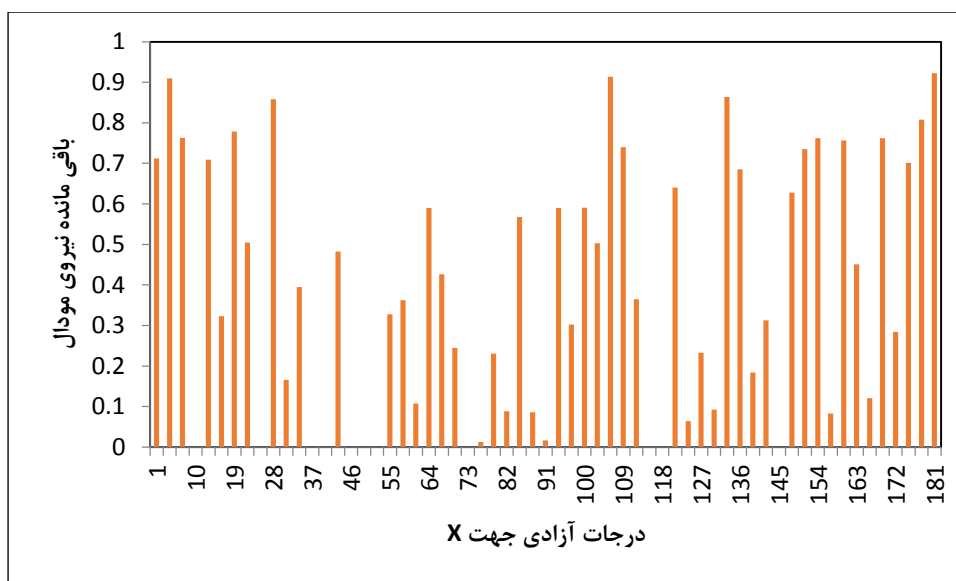


شکل ۵-۱۹: نمایش سناریوی خرابی بر روی سازه: (الف): سناریوی اول، (ب): سناریوی دوم

نتایج حاصل از استفاده از شاخص MSEBI برای شناسایی مکان خرابی برای سناریوی اول مطرح شده در جدول ۵-۶ در شکل‌های ۵-۲۰ و نتایج استفاده از شاخص باقی‌مانده نیروی مودال در شکل-های ۵-۲۱، ۵-۲۲، ۵-۲۳ و ۵-۲۴ آمده است.



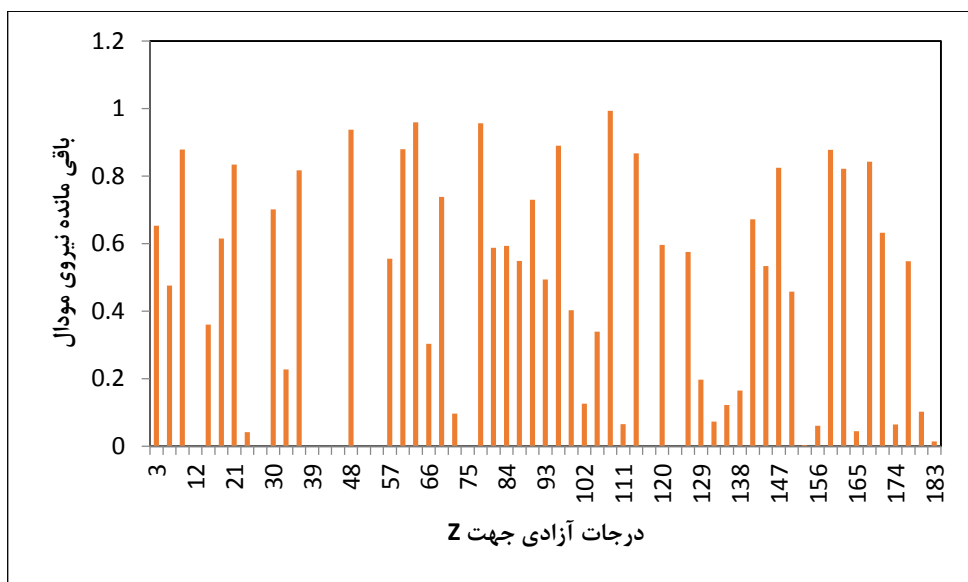
شکل ۵-۲۰: مکان المان های محتمل خرابی در سناریوی اول با استفاده از شاخص MSEBI



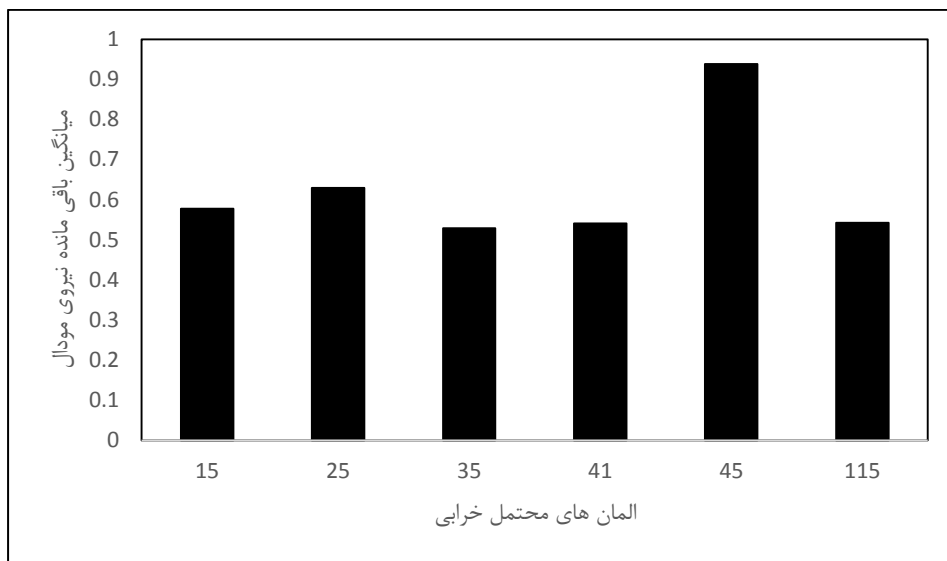
شکل ۵-۲۱: مقدار باقی مانده نیروی مودی در درجات آزادی جهت X در سناریوی اول



شکل ۵-۲۲: مقدار باقی مانده نیروی مودی در درجات آزادی جهت Y در سناریوی اول



شکل ۵-۲۳: مقدار باقی مانده نیروی مودی در درجات آزادی جهت Z در سناریوی اول

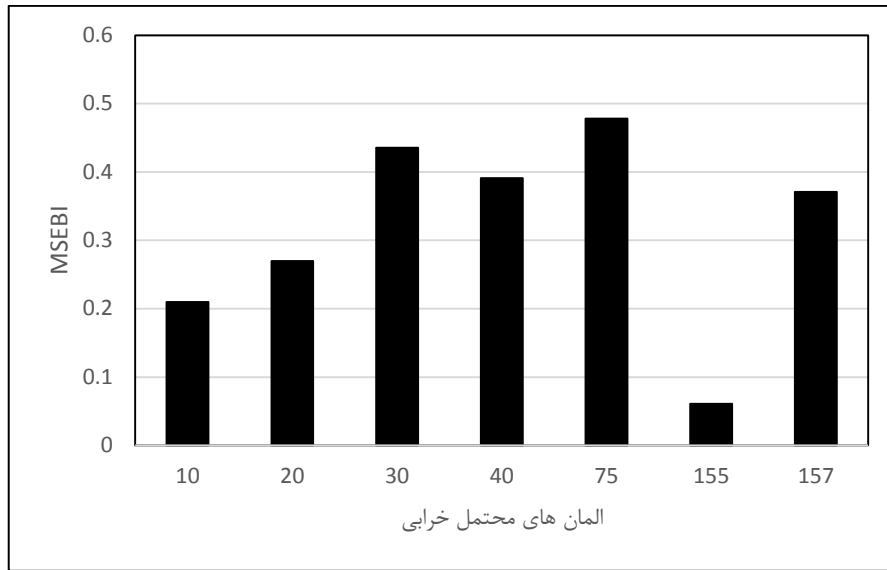


شکل ۵-۲۴: مکان المان های محتمل خرابی در سناریوی اول با استفاده از شاخص باقی مانده نیروی مودال قابل توجه است که شاخص باقی مانده نیروی مودال براساس درجات آزادی سازه عمل می کند، از این رو اگر مقدار باقی مانده نیروی مودی برای هر سه درجه آزادی هر گره صفر باشد، المان مربوط به آن گره معیوب می باشد. بنابراین بعد از مشخص شدن درجات آزادی با مقدار باقی مانده نیروی مودال صفر، با استفاده از برنامه نویسی های انجام شده، المان های مربوط به این درجه آزادی شناسایی و در نهایت المان معیوب مشخص می شود.

شکل های ۵-۲۱ و ۵-۲۲ و ۵-۲۳ مقدار باقی مانده نیروی مودال را در درجات آزادی جهت x ، y و z نشان می دهد و شکل ۵-۲۴ المان های معیوب مربوط به این درجات آزادی.

با مقایسه نتایج حاصل از استفاده از شاخص MSEBI و استفاده از شاخص باقی مانده نیروی مودال، مشخص می گردد شاخص MESBI دارای دقت بیشتری در شناسایی مکان المان های محتمل خرابی می باشد. در هنگام استفاده از این شاخص فقط یک عضو به اشتباه خراب تشخیص داده شده است در حالی که در هنگام استفاده از شاخص باقی مانده نیروی مودال ۲ المان سالم به اشتباه خراب تشخیص داده شده اند. به علاوه در این شاخص نمی توان با تعریف آستانه ای المان های سالم اشتباه خراب تشخیص داده شده را از بقیه المان ها جدا کرد، چون در تمام المان ها مقدار باقی مانده نیروی مودال بالاتر از ۰.۱ است و تفاوتی بین المان های واقعاً خراب و المان های سالم وجود ندارد.

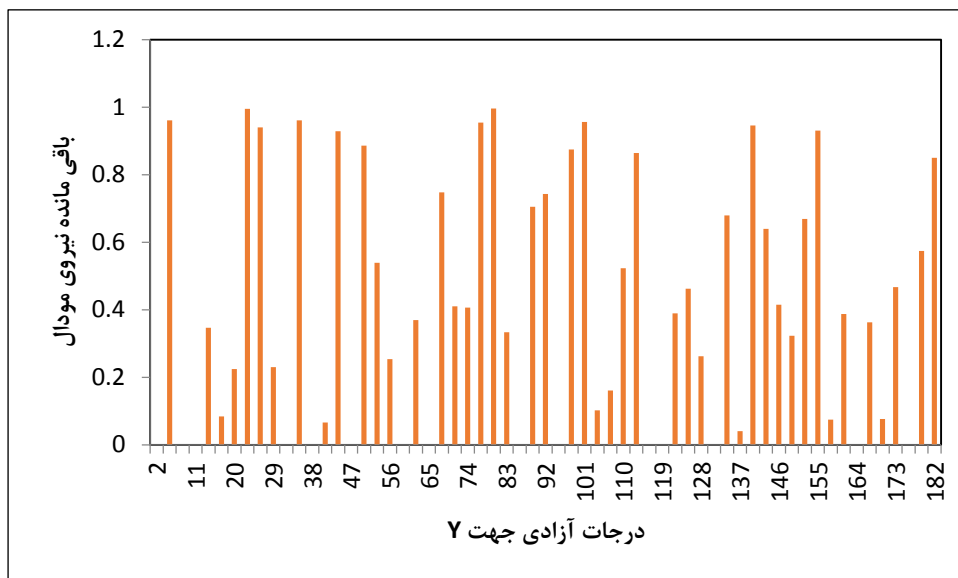
به منظور صحت سنجی مقایسه انجام شده، این دو روند را به ازای سناریوی دوم جدول ۵-۶ نیز با یکدیگر مقایسه می کنیم. نتایج حاصل از این سناریو خرابی در شکل های ۵-۲۵، ۵-۲۶، ۵-۲۷، ۵-۲۸ و ۵-۲۹ آمده است.



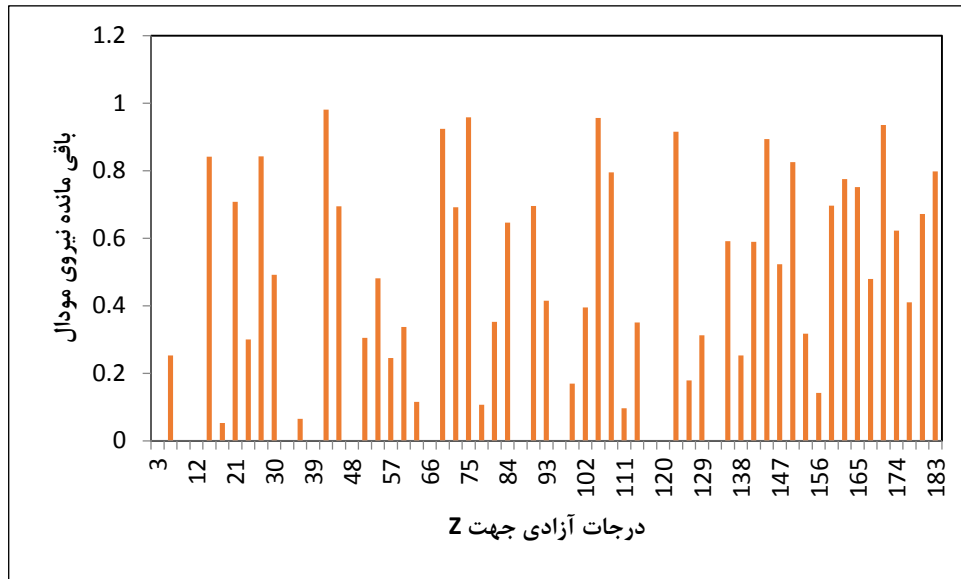
شکل ۵-۲۵: مکان المان های محتمل خرابی در سناریوی دوم با استفاده از شاخص MSEBI



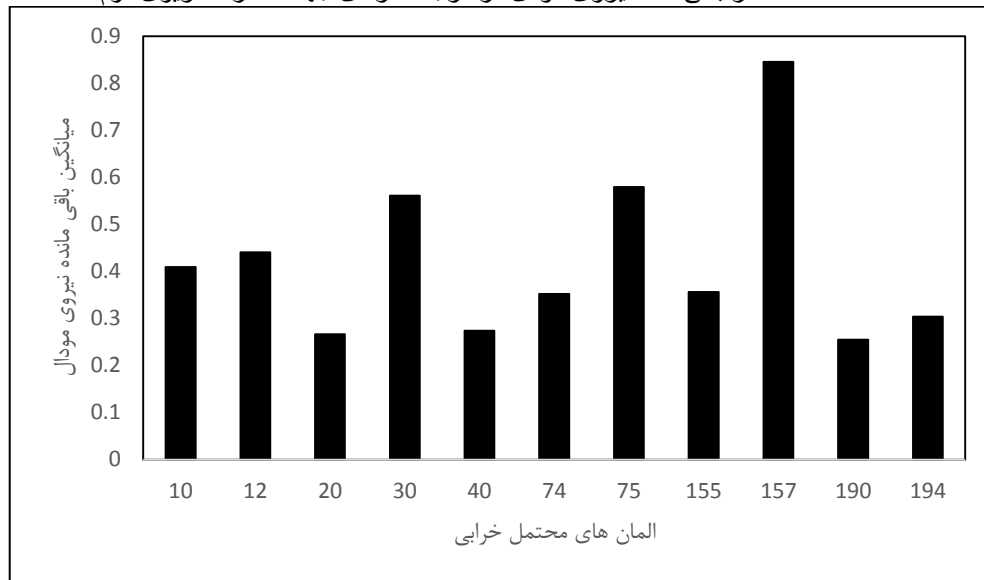
شکل ۵-۲۶: مقدار باقی مانده نیروی مودی در درجات آزادی جهت X در سناریوی دوم



شکل ۵-۲۷: مقدار باقی مانده نیروی مودی در درجات آزادی جهت ۷ در سناریوی دوم

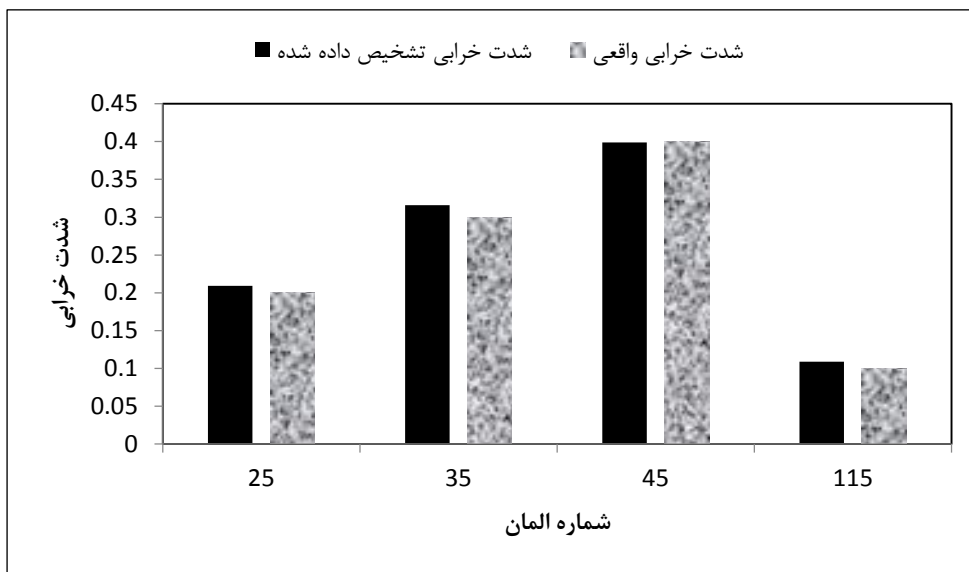


شکل ۵-۲۸: مقدار باقی مانده نیروی مودی در درجات آزادی جهت Z در سناریوی دوم



شکل ۵-۲۹: مکان المان های محتمل خرابی در سناریوی دوم با استفاده از شاخص باقی مانده نیروی مودال نتایج حاصل از سناریوی دوم نیز بیان گر دقت بالاتر شاخص MSEBI نسبت به شاخص انرژی کرنشی مودال در تشخیص مکان المان های خراب در سازه های فضاکار می باشد.

در نهایت شدت خرابی در المان ها مانند مثال های قبل با استفاده از الگوریتم بهینه سازی خفاش مشخص می شود که نتایج در شکل های ۵-۳۰ و ۵-۳۱ نشان داده شده است.



شکل ۳۰-۵: شدت خرابی در المان‌های سازه به‌ازای سناریوی اول



شکل ۳۱-۵: شدت خرابی در المان‌های سازه به‌ازای سناریوی دوم

۶- فصل ششم:

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه‌گیری

سازه‌های فضاکار به دلیل خصوصیات و شکل هندسی‌شان دارای اعضای بسیاری در مقایسه با سازه‌های دیگر می‌باشند. بنابراین در این سازه‌ها تعداد متغیرها که همان تعداد درایه‌های بردار خرابی می‌باشند، مقدار قابل توجهی است. برای رفع این مشکل در این پژوهش یک روش دو مرحله‌ای پیشنهاد شده است، به این ترتیب که در مرحله اول به منظور کاهش فضای جستجو و تعیین المان‌های محتملاً خراب از شاخص انرژی کرنشی مودال استفاده شده است و در مرحله دوم شدت خرابی المان‌های مشکوک با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی خفاش مشخص می‌شود. نتایج مثال‌های بررسی شده نشان دهنده موارد زیر است:

۱- روش پیشنهادی تمام المان‌های واقعاً خراب را در مرحله اول تشخیص می‌دهد و همچنین با این عمل زمان و هزینه محاسباتی برنامه بهینه‌ساز کاهش می‌یابد. در مرحله دوم، الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری خفاش با استفاده از اندیس خرابی، تفاوت فرکانسی شدت خرابی را در المان‌های مشخص شده در مرحله اول تعیین می‌کند. نتایج عددی روش پیشنهادی بر روی سازه‌های فضاکار تخت دولایه و چلیک‌ها با ابعاد مختلف مورد بررسی قرار گرفت. مشاهدات نشان می‌دهد که روش پیشنهادی دقیق و قابل اعتماد است.

۲- الگوریتم فراابتکاری خفاش که برای اولین بار در این پژوهش به منظور عیب‌یابی سازه‌ها از آن استفاده شد با هزینه محاسباتی بسیار کمتری نسبت به الگوریتم‌های مشابه تابع مورد نظر و در حالت خاص تابع تفاوت فرکانسی سازه سالم و معیوب را کمینه می‌کند. به علاوه مقایسه‌ای بین الگوریتم بهینه‌سازی خفاش و اجتماع ذرات صورت پذیرفت که نتایج نشان دهنده سرعت همگرایی بیشتر الگوریتم (BA) نسبت به (PSO) در زمینه عیب‌یابی سازه‌ها می‌باشد.

۳- همچنین مقایسه‌ای بین استفاده از شاخص انرژی کرنشی مودال و شاخص باقی‌مانده نیروی مودی به منظور مشخص کردن مکان المان‌های محتمل خرابی انجام شد و نتایج بیان‌گر دقت بالاتر شاخص انرژی کرنشی مودال (MSEBI) در شناسایی المان‌های محتمل خرابی در سازه‌های فضاکار می‌باشد.

۴- با استفاده از نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان به عیب‌یابی سازه‌های فضاکار در کاربردهای عملی نیز پرداخت. بدین منظور باید بعد از سنسورگذاری سازه و ثبت پاسخ آن در اثر ارتعاشات طبیعی و یا مصنوعی، اطلاعات حاصله (شتاب، جابه‌جایی، ...) پس از جمع‌آوری، با تبدیل‌های حوزه زمان به حوزه فرکانس به پاسخ‌های دینامیکی مرسوم همچون مد شکل و فرکانس رسید و سپس از این پاسخ‌ها به عنوان ورودی سیستم عیب‌یابی پیشنهاد شده در این پژوهش استفاده کرد.

۶-۲- ارائه پیشنهادات

۱- نحوه ثبت داده‌ها توسط سنسورهایی می‌باشد که در درجات آزادی مختلفی از سازه قرار می‌گیرند. در بحث ثبت داده‌ها، نیازی به سنسورگذاری تمام گره‌ها سازه نمی‌باشد و تعداد و محل قرارگیری سنسورها را می‌توان بدون کاهش کارایی روش، با آنالیز داه‌ها و بهینه‌سازی محل قرارگیری سنسورها تعیین کرد. کاهش تعداد سنسورها در سازه باعث کمتر شدن نویز ناشی از سنسورها می‌شود و کمتر کردن خطای ناشی از سنسورها به روند بالا بردن دقت روش می‌تواند موثر باشد.

۲- در این تحقیق خرابی توسط کاهش مدول الاستیسیته اعمال شده است. می‌توان سطح مقطع المان را برای خرابی کاهش داد. باید به این نکته توجه کرد که در صورت کاهش سطح مقطع جرم اعضا کاهش پیدا می‌کند و باید در محاسبات کاهش جرم وارد شود.

۳- در سازه‌های فضاکار، خرابی صرفاً برای اعضا نمی‌باشد، گره‌های سازه امکان خراب شدن دارند. در شناسایی خرابی می‌توان خرابی گره و خرابی المان را شناسایی کرد.

۴- در بررسی خرابی در سازه‌های فضاکار یکسری ساده سازی‌ها صورت پذیرفت. در واقع در این پژوهش خرابی، خطی فرض شده است درحالی‌که در واقع، مسأله خرابی یک پدیده غیرخطی می‌باشد. به این نکته باید توجه کرد در صورت خطی فرض کردن مسأله برای سازه‌ها با تعداد المان‌های خراب بالا به مشکل برمی‌خوریم. بنابراین می‌توان مسأله را با در نظر گرفتن خصوصیات غیرخطی حل نمود.

منابع

[۱] شریفی، ا.، روش‌های مبتنی بر انرژی: روشی برای تشخیص خرابی در سازه، پایان‌نامه ارشد عمران، دانشگاه شیراز، ۱۳۸۵.

[2] Yu, L., Xu, P., Structural Health Monitoring Based on Continuous ACO Method, *Microelectronics Reliability*, Vol. 51, pp. 270-278, 2011.

[3] Nasealavi, S.S., Salajegheh, J., Salajegheh, E., Fadaee, M.J., An Improved Genetic Algorithm using Sensitivity Analysis and Micro-search for Damage Detection, *Asian Journal Civil Engineering*, Vol. 11, No. 6, pp. 717-740, 2010.

[۴] گودرزی، ی.، ترکزاده، پ.، تشخیص خرابی در سازه‌ها با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات، کنفرانس زلزله سازه و روش‌های محاسباتی، جهاد دانشگاهی کرمان، ۱۳۹۰.

[۵] گریست، ص.، سلاجقه، ج.، ترکزاده، پ.، سلاجقه، ع.، عیب‌یابی سازه با استفاده از انرژی کرنشی مودال و الگوریتم ژنتیک، کنفرانس زلزله، سازه و روش‌های محاسباتی، جهاد دانشگاهی کرمان، ۱۳۹۰.

[۶] سروی، ف.، عیب‌یابی سازه‌ها براساس پاسخ‌های دینامیکی با استفاده از به‌روز رسانی مدل اجزا محدود، پایان‌نامه ارشد عمران، دانشگاه تحصیلات تکمیلی کرمان، ۱۳۹۰.

[7] M. Nobahari, S.M. Seyedpoor, Structural damage detection using an efficient correlation based index and a modified genetic algorithm, *Mathematical and Computer modelling* 53. 2011, 1798–1809.

[8] He, R., Hwang, S., Damage Detection by a Hybrid Real-parameter Genetic Algorithm under the Assistance of Grey Relation Analysis, *Engineering Application of Artificial Intelligence*, Vol. 20, pp. 980-992, 2007.

[9] Guo, H.Y., Li, Z.L., A Two-stage Method to Identify Structural Damage Sites and Extents by using Evidence Theory and Micro-search Genetic Algorithm, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 23, pp. 769-782, 2009.

[10] Seyedpoor SM. A two stage method for structural damage detection using a modal strain energy based index and particle swarm optimization. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2012; 47(1): pp. 1–8.

[11] Torkzadeh P, Goodarzi Y, Salajegheh E. A Two-Stage Damage Detection Method for Large-Scale Structures by Kinetic and Modal Strain Energies Using Heuristic Particle Swarm. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*. 2013; 3(3): pp. 465–482.

[۱۲] پیروزی، ح؛ ترکزاده پ. و شجاعی باغینی س.، عیب‌یابی سازه‌ها با استفاده از روش دومرحله‌ای مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی فاخته، کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و توسعه پایدار شهری، تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، ۱۳۹۲.

[13] Naseralavi, S. S., Fadaee, M. J., & Salajegheh, J. Subset solving algorithm : A novel sensitivity-based method for damage detection of structures. *Applied Mathematical Modelling*, 35(5). 2011, 2232–2252.

[۱۴] ضیایی، م.، ناصرعلوی، ص. و سلاجقه، ع.، شناسایی خرابی توسط الگوریتم اصلاح شده جامعه مورچگان با استفاده از پاسخ استاتیکی، کنفرانس زلزله، سازه و روش‌های محاسباتی، کرمان، جهاد دانشگاهی استان کرمان، ۱۳۹۰.

[15] Hjelmstad, K.D., Shin, S., Damage Detection and Assessment of Structures from Static Response, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 123, No. 6, pp. 568-576, 1997.

[16] Bakhtiari-Nejad, B., Rahai, A., Esfandiari, A., A structural damage detection method using static noisy data, *Engineering Structures*, Vol. 27, pp. 1784- 1793, 2005.

[17] Weber, B., Paultre, P., Proulx, J., Consistent regularization of nonlinear model updating for damage identification, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 23, pp. 1965- 1985, 2009.

[18] Cao, M., Ye, L., Zhou, L., Su, Z., Bai, R., Sensitivity of Fundamental Mode Shape and Static Deflection for Damage Identification in Cantilever Beams, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 25, pp. 630-643, 2011.

[19] Buda, G., Caddemi, S., Identification of Concentrated Damages in Euler-Bernoulli Beams under Static Loads, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 133, No. 8, pp. 942-956, 2007.

[20] Chou J-H, Ghaboussi J. Genetic algorithm in structural damage detection. *Computers & Structures*. 2001; **79**(14): pp. 1335–1353.

[21] Wang X, Hu N, Fukunaga H, Yao ZH. Structural damage identification using static test data and changes in frequencies. *Engineering Structures*. 2001; **23**(6): pp. 610–621.

[22] Oh BH, Jung BS. Structural damage assessment with combined data of static and modal tests. *Journal of Structural Engineering*. 1998; **124**(8): pp. 956–965.

[23] Loutridis S, Douka E, Hadjileontiadis LJ, Trochidis A. A two-dimensional wavelet transform for detection of cracks in plates. *Engineering Structures*. 2005; **27**(9): pp. 1327–1338.

[۲۴] خردمند، س.، تعیین خرابی در صفحات خمشی با روش موجک و شدت آن ، پایان نامه ارشد عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۹۰.

[۲۵] فرخی، م. و ترکزاده، پ. ، عیب‌یابی ورق‌ها با استفاده از تبدیل موجک بسته‌ای دو بعدی، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، زاهدان، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ۱۳۹۲.

[۲۶] عطایی، ا.، تعیین خرابی و ترک در صفحات خمشی با استفاده از تبدیل Curvlet و شبکه عصبی، پایان نامه ارشد عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۹۲.

[27] Mahmoud M a, Abu Kiefa M a. Neural network solution of the inverse vibration problem. *NDT & E International*. 1999; **32**(2): pp. 91–99.

[28] Mehrjoo M, Khaji N, Moharrami H, Bahreininejad a. Damage detection of truss bridge joints using Artificial Neural Networks. *Expert Systems with Applications*. 2008; **35**(3): pp. 1122–1131.

[۲۹] رسولی، ا، علوی، ن.، سلاجقه، ج.، سلاجقه، ع.، نظام آبادی پور، ح.، مقایسه پاسخ‌های مختلف در عیب‌یابی گنبدها مبتنی بر شبکه عصبی، مجموعه مقالات سومین کنفرانس ملی زلزله و سازه، جلد اول، جهاد دانشگاهی استان کرمان، کرمان، ایران، ۲۶-۲۷، ۱۶۹-۱۷۹. مهرماه ۱۳۹۱.

[30] Saeed R a., Galybin a. N, Popov V. Crack identification in curvilinear beams by using ANN and ANFIS based on natural frequencies and frequency response functions. *Neural Computing and Applications*. 2011; **21**(7): pp. 1629–1645.

[31] Noori M., Cao Y, Hou Z, Sharma S. Application of Support Vector Machine for Reliability Assessment and Sturctural Health Monitoring. *International Journal of Engineering Under Uncertainty: Hazards, Assessment and Mitigation*. 2010; **2**: pp. 89–98.

[32] Bakhary, N., Hao, H., & Deeks, A. J. (2010). Structure Damage Detection Using Neural Network with Multi-Stage Substructuring. *Advances in Structural Engineering*, **13**(1), 1–16.

[۳۳] قیاسی، ر؛ ترکزاده، پ. و فرخی، م.، عیب‌یابی سازه‌های فولادی با استفاده از انرژی کرنشی مودال و ماشین بردار پشتیبان حداقل مربعات، سومین کنفرانس ملی سازه و فولاد و اولین کنفرانس ملی سازه‌های سبک فولادی (LSF) ، تهران، انجمن سازه های فولادی ایران، ۱۳۹۱.

[۳۴] قیاسی، ر. و ترکزاده، پ.، مقایسه روش ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی تابع بنیادی شعاعی در عیب‌یابی سازه‌ها، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، زاهدان، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ۱۳۹۲.

[35] Liu Y-Y, Ju Y-F, Duan C-D, Zhao X-F. Structure damage diagnosis using neural network and feature fusion. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2011; **24**(1): pp. 87–92.

[36] H. Fathnejat, P. Torkzadeh, E. Salajegheh, and R. Ghiasi, Structural Damage Detection by Model Updating Method Based on Cascade Feed-Forward Neural Network as an Efficient Approximation Mechanism, *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, vol. 4, no. 4, pp. 451–472, 2014.

[37] Panedy, A.K., Biswas, M., Damage detection in structures using changes in flexibility, *Journal of Sound Vibration*. Vol. 169. No. 1, pp. 3-17. 1994.

[38] Sanayei, M., Imbaro, G.R., McClaim, J.A.S., Brown, L.C., Structural model updating using experimental static measurements, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 6, pp. 792-798. 1997.

[39] Shi, Z.Y., Law, S.S., Zhang, L.M., Optimizing sensor placement for structural damage detection, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 126, No. 11, pp.1173-1179. 2000.

[40] Bakht, B., Jeager, L.G., Bridge testing a surprise every time, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 116, No.5, pp. 605-511, 1990.

[41] Nguyen N, Lee H. An Application of Support Vector Machines for Induction Motor Fault Diagnosis with Using Genetic. *International Journal of Electronics*. 2010; **97**(9): pp. 1071–1081

[42] Dougherty, E.R., *Probability and Statistics for the Engineering, Computing and Physical Sciences*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1990.

[43] X.-S. Yang and A. H. Gandomi, “Bat algorithm: a novel approach for global engineering optimization,” *Eng. Comput.*, vol. 29, no. 5, pp. 464–483, 2012.

[44] X.-S. Yang and X. He, “Bat algorithm: literature review and applications,” *Int. J. Bio-Inspired Comput.*, vol. 5, no. 3, pp. 141–149, 2013.

[45] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and X.-S. Yang, “Binary bat algorithm,” *Neural Comput. Appl.*, pp. 1–19, 2013.

[46] Eberhart R, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory. In: *Micro Machine and Human Science, 1995. MHS'95., Proceedings of the Sixth International Symposium on*. IEEE; 1995: pp. 39–43.

[47] Kennedy J. Particle swarm optimization. In: *Encyclopedia of Machine Learning*. Springer; 2010: pp. 760–766.

- [48] He S, Wu QH, Wen JY, Saunders JR, Paton RC. A particle swarm optimizer with passive congregation. *Biosystems*. 2004; **78**(1): pp. 135–147.
- [49] Noshin, H., Space Structure, 3rd International Conference Porocceeding Hardcover, Spone Press, 1990.
- [50] Los Alamos National Laboratory Report, Review of structural health monitoring literature, 1996-2001, 2003.
- [51] Wang X, Hu N, Fukunaga H, Yao ZH. Structural damage identification using static test data and changes in frequencies, *Engineering Structures*, 23:610-21, 2001.
- [52] Shi, Z. Y., Law, S. S. and Zhang, L. M., Structural damage detection from modal strain energy change, *Journal of Engineering Mechanics*, 126:1216-1223, 2000.

ABSTRACT:

Damage detection is an important trend in the Structural Health Monitoring (SHM) field that has been the subject of considerable research during the past two decades. Research on diagnostic methods based on dynamical analysis of structures is extended in recent years. These methods can be used as permanent evaluating methods and thus, can prevent further damage to the structure. In this study a novel two stage methods for damage detection of structure is proposed. Static responses and dynamic characteristics of structure will change due to damages dependent on both the damage location and the damage severity.

In this study, an approach for damage detection of large-scale structures is developed by modal strain energies (MSE) and Bat Algorithm (BA). Bat algorithm is new meta heuristic optimization algorithm that using of this algorithm in field of damage detection is proposed for first time in this dissertation. Modal strain energy is damage index that use from changing of modal parameter to determine the location of structural damages. After determining the suspected damage locations in first stage, the severity of damages is obtained based on variations of frequency between the analytical models and the responses measured in damaged models in second stage. The detection of structural damages is formulated as an unconstrained optimization problem that is solved by BA.

To demonstrate the ability of this method for detection of multiple structural damages, different types of damage scenarios in space structure are considered. The results show that the proposed method can detect the exact locations and the severity of damages with a high accuracy in large-scale structures. Furthermore, comparison between particle swarm optimization (PSO) algorithm and BA shows that BA have higher convergence rate and accuracy in damage detection field. Finally, based on numerical example, it can conclude that MSE damage index has better ability in detecting suspected damage elements in comparison by residual modal energy index.

KEY WORDS: damage detection, modal strain energy, space structure, bat algorithm, severity and location of damage, particle swarm optimization



University of Shahrood
Structural Engineering

**Damage detection in structures based on dynamic responses using
model update**

Shahrokh Esfarayeni

Supervisor(s): Dr. Ali Keyhani

February 2015