

بنام خداوند جان و



دانشکده : عمران
گروه : سازه

بروزرسانی مدل اجزای محدود دینامیکی سازه‌ها با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی ذاتی

دانشجو : محمد آهی

استاد راهنما :
دکتر علی کیهانی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

ماه و سال انتشار :
بهمن ۱۳۹۳

تشکر و قدردانی

بر خود لازم می‌دانم تا سپاسگزار خانواده‌ی دلسوز و مهربانم و همچنین دوست و همراه عزیزم مهندس کاوه افتخاری باشم. آنها همواره حامی و پشتیبان من بوده‌اند.

از استاد ارجمندم، آقای دکتر کیهانی که همواره با سخنان راه‌گشای خود مرا در انجام این تحقیق یاری نمودند، کمال تشکر را دارم و امیدوارم همواره سلامت و پایدار باشند.

همچنین تشکر و قدردانی می‌نمایم از جناب آقای دکتر کلات‌جاری و جناب آقای دکتر حسینی که برای داوری این پایان‌نامه قبول زحمت نمودند و زمان خود را در اختیار اینجانب قرار دادند.

تعهد نامه

اینجانب محمد آهی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته سازه دانشکده عمران دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه
بروزرسانی مدل اجزای محدود دینامیکی سازه‌ها با استفاده از روش‌های بهینه‌ذاتی 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 بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای 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 .

امضای دانشجو

تاریخ ۹۳/۱۲/۷

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها 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.

زیرساخت‌های عمرانی مانند پل‌ها، سدها و ... در طی عمر بهره‌برداری ممکن است دچار آسیب شوند. شناسایی این آسیب و خرابی در سازه‌ها، از این جهت که غفلت از آن می‌تواند منجر به تغییر و اختلال در عملکرد سازه شود، از اهمیت بالایی برخوردار است. پیامد نهایی آسیب سازه‌ای می‌تواند حتی تخریب کلی سازه نیز باشد. از این‌رو ضروری است تا روش‌شناسی کارآمدی برای تشخیص خرابی در سازه‌های موجود اتخاذ گردد. روش‌های گوناگونی بر اساس خصوصیات مختلف سازه، برای شناسایی خرابی سازه‌ای مطرح است؛ در این میان، روش‌های متکی بر داده‌های دینامیکی یا همان خواص مودال سازه به میزان مناسبی به خرابی‌های درونی و سطحی سازه حساس هستند. مقایسه‌ی اختلاف میان داده‌های دینامیکی اندازه‌گیری‌شده از مدل اجزای محدود سازه‌ی موجود و سازه‌ی سالم، و حداقل‌سازی آن با فرایندی به نام روزرسانی مدل اجزای محدود دینامیکی توصیف می‌گردد؛ در واقع روزرسانی مدل، یک مسئله‌ی بهینه‌سازی است که در آن خصوصیات مکانیکی سازه به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی تعریف می‌شود و به کمک آن می‌توان کیفیت آسیب و خرابی در سازه را آشکار نمود.

در این پایان‌نامه، روزرسانی مدل اجزای محدود، بصورت کاهش در سختی المان، مدل و به جای نتایج آزمایش ارتعاش دینامیکی، از داده‌های شبیه‌سازی عددی استفاده شده و کمینه‌سازی اختلاف مدل سازه‌ی موجود و سازه‌ی سالم، به کمک الگوریتم‌های ذاتی (فراببتکاری) صورت گرفته است. از اشکال مودی سازه، برای تشکیل تابع هدف بهینه‌سازی و از دو الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) و کرم شبتاب (FA) برای حل مسئله‌ی بهینه‌سازی، استفاده شده است. چند مثال عددی در سازه‌های با شرایط گوناگون، با طرح‌های خرابی متفاوت بررسی گردید. نتایج نشان‌دهنده‌ی کارایی مطلوب روش مطرح شده می‌باشد و هر دو الگوریتم بهینه‌سازی در اغلب موارد نتایج مشابهی داشته‌اند، با این وجود در برخی موارد الگوریتم ازدحام ذرات عملکرد مناسب‌تری از خود نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: تشخیص خرابی، روزرسانی مدل، الگوریتم‌های فراببتکاری، خواص مودال.

فهرست مطالب

فصل ۱ مقدمه

۱-۱ مقدمه.....	۳
۲-۱ تشخیص خرابی.....	۴
۳-۱ بروزرسانی مدل اجزای محدود.....	۵
۴-۱ اهمیت موضوع.....	۶
۵-۱ روش تحقیق.....	۸
۶-۱ شرحی بر فصول.....	۹

فصل ۲ مروری بر پیشینه تحقیق

۱-۲ مقدمه.....	۱۳
۲-۲ روش های بروزرسانی مدل اجزای محدود.....	۱۳
۳-۲ حوزه های کاربرد بروزرسانی مدل اجزای محدود.....	۱۷
۱-۳-۲ حوزه ی مودال.....	۱۷
۱-۱-۳-۲ فرکانس طبیعی.....	۱۷
۲-۱-۳-۲ شکل مودی.....	۱۸
۲-۳-۲ حوزه ی فرکانس.....	۱۹
۴-۲ مروری بر تحقیقات انجام گرفته.....	۲۱
۵-۲ جمع بندی فصل.....	۲۸

فصل ۳ مبانی نظری تحقیق

۱-۳ مقدمه.....	۳۱
۲-۳ مقدمه ای بر بهینه سازی.....	۳۱
۱-۲-۳ الگوریتم های فراابتکاری.....	۳۶
۱-۱-۲-۳ الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات.....	۳۶
۲-۱-۲-۳ الگوریتم کرم شب تاب.....	۳۹

۳۹.....	۳-۲-۱-۲ رفتار کرم شب تاب
۴۰.....	۳-۲-۱-۲ اصول الگوریتم کرم شب تاب
۴۱.....	۳-۲-۱-۲ شدت نور و جذابیت
۴۵.....	۳-۳ مدل اجزای محدود دینامیکی
۴۷.....	۴-۳ مدل سازی اجزای محدود

فصل ۴ روش پیشنهادی و ارزیابی آن

۵۳.....	۴-۱ مقدمه
۵۳.....	۴-۲ بروزرسانی با استفاده از اشکال مودی سازه
۵۵.....	۴-۳ مدل سازی و ارائه نتایج
۵۶.....	۴-۳-۱ تیر یک سر گیردار
۵۸.....	۴-۳-۲ تیر سراسری با دو دهانه
۶۰.....	۴-۳-۳ تیر سراسری با چهار دهانه
۶۲.....	۴-۳-۴ خرابای دوبعدی ۱۱ عضوی
۶۴.....	۴-۳-۵ خرابای دوبعدی ۲۵ عضوی
۶۶.....	۴-۳-۶ قاب سه طبقه و سه دهانه

فصل ۵ نتیجه گیری و پیشنهادات

۷۱.....	۵-۱ مقدمه
۷۱.....	۵-۲ خلاصه نتایج
۷۳.....	۵-۳ پیشنهاد برای تحقیقات آینده

فصل ۶ مراجع

شکل (۱-۱) اجزای اساسی سلامت سنجی سازه و نسبت آن با ارزیابی غیرمخرب.....	۴
شکل (۲-۱) نمایش شماتیک به روزرسانی مدل اجزای محدود	۷
شکل (۱-۴) تیر طره المان بندی شده	۵۷
نمودار (۱-۴) نتایج تشخیص خرابی در تیر یک سر گیردار (طرح خرابی نخست)	۵۷
نمودار (۲-۴) نتایج تشخیص خرابی در تیر یک سر گیردار (طرح خرابی دوم)	۵۸
شکل (۲-۴) تیر سراسری دو دهانه	۵۹
نمودار (۳-۴) نتایج تشخیص خرابی در تیر سراسری دو دهانه (طرح خرابی نخست)	۵۹
نمودار (۴-۴) نتایج تشخیص خرابی در تیر سراسری دو دهانه (طرح خرابی دوم)	۶۰
شکل (۳-۴) تیر سراسری چهار دهانه	۶۱
نمودار (۵-۴) نتایج تشخیص خرابی در تیر سراسری چهار دهانه (طرح خرابی نخست)	۶۱
نمودار (۶-۴) نتایج تشخیص خرابی در تیر سراسری چهار دهانه (طرح خرابی دوم)	۶۲
شکل (۴-۴) خرپای دوبعدی ۱۱ عضوی	۶۳
نمودار (۷-۴) نتایج تشخیص خرابی در خرپای دوبعدی ۱۱ عضوی (طرح خرابی نخست)	۶۳
نمودار (۸-۴) نتایج تشخیص خرابی در خرپای دوبعدی ۱۱ عضوی (طرح خرابی دوم)	۶۴
شکل (۵-۴) خرپای دوبعدی ۲۵ عضوی	۶۵
نمودار (۹-۴) نتایج تشخیص خرابی در خرپای دوبعدی ۲۵ عضوی (طرح خرابی نخست)	۶۵
نمودار (۱۰-۴) نتایج تشخیص خرابی در خرپای دوبعدی ۲۵ عضوی (طرح خرابی دوم)	۶۶
شکل (۶-۴) قاب سه طبقه و سه دهانه	۶۷
نمودار (۱۱-۴) نتایج تشخیص خرابی در قاب سه طبقه و سه دهانه (طرح خرابی نخست)	۶۷
نمودار (۱۲-۴) نتایج تشخیص خرابی در قاب سه طبقه و سه دهانه (طرح خرابی دوم)	۶۸

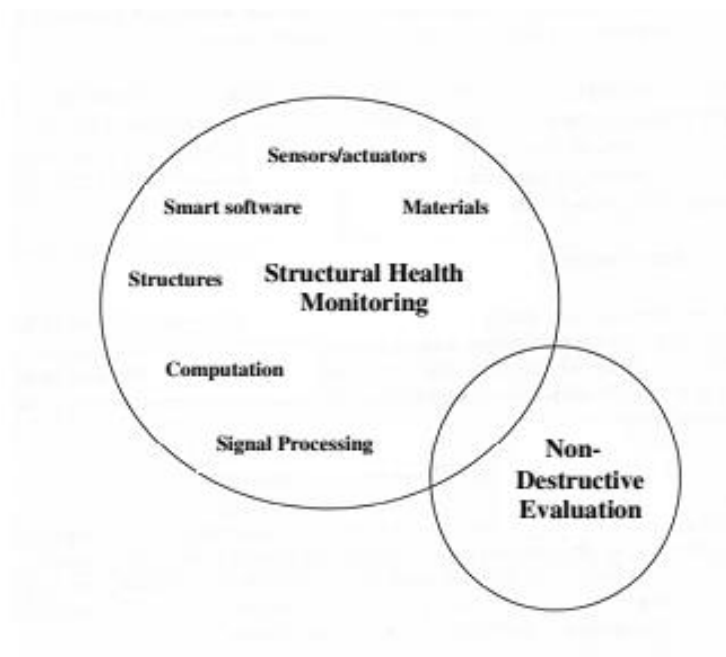
١

مقدمه

از اواخر دهه‌ی هشتاد میلادی مفهوم مواد و سازه‌های هوشمند، بیش‌ازپیش ذهن مهندسان را به خود مشغول ساخت. ایده‌های نو در این زمینه، به‌طور مشخص در صنایع هوافضا و مهندسی عمران موردتوجه قرار گرفت. سیستم‌های هوشمندی که کنترل‌کننده «سلامت» خود می‌باشند، سازوکاری با عنوان «سلامت سنجی» (پایش سلامت) سازه^۱ را طی می‌کنند. این سازوکار بناست تا در همه‌ی لحظات عمر یک سازه، تشخیصی درست از «وضعیت» هریک از اجزای تشکیل‌دهنده‌ی سازه (سیستم) و همچنین تمامیت آن ارائه دهد. شرایط کلی سازه پس از فرایند سلامت سنجی باید همچنان در چارچوب مشخص طراحی شده باقی بماند [1]. سلامت‌سنجی سازه به بیان مختصر «به‌کارگیری راهبردی آسیب شناسانه برای کنترل سلامت زیرساخت‌ها و سازه‌هایی بااهمیت زیاد مانند پل‌ها در مهندسی عمران و جت‌ها در صنایع هوافضا» تعریف می‌شود و امروزه اهمیت آن بیشتر از لحاظ دوام طول عمر این زیرساخت‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. با توجه به جایگاه بسیار مهم سنجش قابلیت اعتماد و برآورد عمر باقی‌مانده‌ی سازه در کاهش هزینه‌های نگهداری و افزایش سطح ایمنی سازه‌ها، میل به سلامت سنجی سازه در میان صاحبان فناوری و سرمایه، به‌سرعت رو به فزونی است. به‌طور مشخص، کاربرد آزمون غیرمخرب به‌منظور ارزیابی سطح عملکرد سازه‌ای، روش بسیار مجهزی برای سلامت سنجی به شمار می‌رود، به‌طوری‌که داده‌های قابل‌اعتماد را بهبود داده و بر محدودیت‌های روش‌های بازرسی چشمی مرسوم، چیرگی بارزی دارد [2]. سلامت سنجی سازه، مبنای مشترکی با ارزیابی غیرمخرب^۲ سازه‌ها دارد (شکل ۱-۱). در حقیقت چندین روش ارزیابی غیر مخرب، با تفکیک عملگرها و حسگرهای درون سازه‌ی موردسنجش، می‌تواند به روش‌های سلامت سنجی سازه‌ای بدل گردد.

^۱ Structural Health Monitoring (SHM)

^۲ Non Destructive Evaluation



(شکل ۱-۱) اجزای اساسی سلامت سنجی سازه و نسبت آن با ارزیابی غیرمخرب [1]

۲-۱ تشخیص خرابی

ارزیابی سطح سلامت سازه‌ها، به‌منظور مقایسه‌ی عملکرد سازه‌ای موجود و مطلوب (سالم) آن‌ها صورت می‌پذیرد. طبقاً پاسخ سازه از طریق آزمایش‌های غیر مخرب مانند آزمایش ارتعاش دینامیکی، می‌تواند وجود آسیب را روشن سازد. آسیب (خرابی)، به تغییر در خصوصیات هندسی یا مصالحی سیستم سازه اطلاق می‌شود، که می‌تواند شامل تغییرات در شرایط مرزی و پیوستگی سیستم نیز باشد [5]. هر خرابی می‌تواند عملکرد حال حاضر یا آینده‌ی سیستم را تحت تأثیر قرار دهد. تشخیص خرابی یا شناسایی آسیب^۱، فرایندی است که به‌طور کلی در ۴ سطح زیر انجام می‌شود [2]:

- کشف خرابی، تشخیص وجود خرابی در سازه.
- موقعیت‌یابی خرابی، تعیین محل وقوع خرابی در سازه.

^۱- Damage Identification

- طبقه‌بندی خرابی، تعیین نوع خرابی وارده بر سازه.

- وسعت خرابی، برآورد شدت خرابی سازه.

کیفیت هریک از این سطوح خرابی، به‌وسیله‌ی انجام آزمایش‌های استاندارد بر روی سیستم و پردازش پاسخ‌های سازه‌ای تشخیص داده می‌شود. این پاسخ‌ها در پیوند با روش‌های گوناگون عددی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این روش‌ها به دودسته‌ی عمده‌ی مدل مبنا^۱ و پارامتر مبنا^۲ تقسیم می‌شوند که اولی به یک مدل سازه‌ای مرجع (به‌عنوان مثال مدل اجزای محدود) استناد می‌کند، درحالی‌که خصوصیت اصلی دومی، توصیف ریاضی پارامترها یا ویژگی‌های مشخصه‌ی سیستم (به‌عنوان مثال، تحلیل جزئیات سری-زمانی) می‌باشد. باید یادآور شد که از دیدگاه عددی، امروزه روش اجزای محدود یک روش شبیه‌سازی بسیار قدرتمند به کمک رایانه است که به کاربر این امکان را داده تا بدون محدودیت در اندازه و پیچیدگی به مطالعه‌ی هر نوع مسئله‌ای به‌طور مجازی پردازد. باین‌حال هر مدل اجزای محدودی، تقریبی عددی از سازه‌ی واقعی با فرضیات متعدد است که همین مسئله می‌تواند منجر به اختلافات قابل‌ملاحظه‌ای میان مدل و سازه‌ی واقعی شود. با مقایسه‌ی داده‌های آزمایشگاهی به‌دست‌آمده از آزمایش دینامیکی و داده‌های عددی، معمولاً این تفاوت‌ها محرز می‌شود [4].

۱-۳ بروز رسانی مدل اجزای محدود

به‌روزرسانی مدل اجزای محدود^۳، یک روش عددیِ مدل-مبنا است که به‌منظور حداقل سازی اختلاف میان سازه‌ی واقعی و مدل اجزای محدود بکار برده می‌شود. ایده‌ی اصلی آن، استفاده از پاسخ سازه‌ای ثبت‌شده، برای به‌روزرسانی شماری از پارامترهای سازه‌ایِ مدل عددی (همچون سختی، جرم و نیروهای داخلی) و نیز شرایط مرزی (همچون فنرهای دورانی یا انتقالی) است؛ تا زمانی که مطابقت

^۱ - Model-Based

^۲ - Parameter -Based

^۳ - Finite Element Model Updating(FEMU)

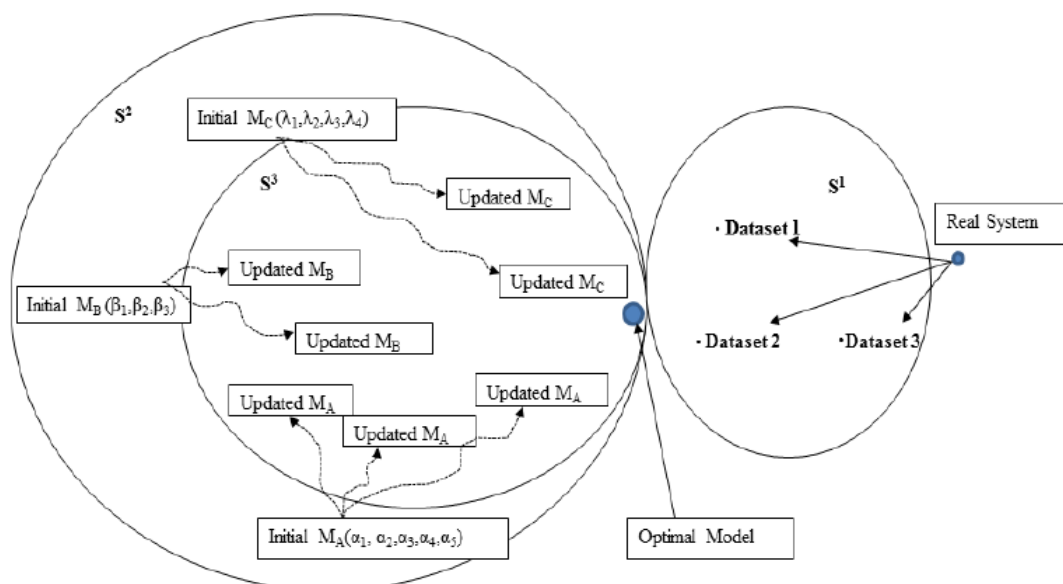
مناسبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی به دست آید. سازه‌ی حاصل از فرایند به‌روزرسانی، از نظر دینامیکی مطابقت بیشتری با واقعیت فیزیکی خواهد داشت.

۴-۱ اهمیت موضوع

همان‌طور که گفته شد، خرابی در سازه، تغییر در خصوصیات مصالحی و هندسی آن تلقی می‌شود و در عملکرد سیستم تأثیرات سوئی می‌گذارد. بنابراین چگونگی توزیع‌های جدید پارامتر به‌عنوان نتیجه، اطلاعات مفیدی را در رابطه با خرابی سازه‌ای محتمل فراهم می‌آورد. از این‌رو، به‌روزرسانی مدل اجزای محدود را می‌توان برای کشف خرابی به کار گرفت. درواقع با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی حاصل از سازه‌ی دچار خرابی و اعمال فرایند به‌روزرسانی، نحوه‌ی توزیع پارامتر سازه‌ای موردنظر (مثل مدول الاستیسیته)، نقصان را در خصوصیات سازه‌ای مشخص می‌کند که این نشانگر وقوع خرابی است. در این سیاق بروز رسانی مدل اجزای محدود به‌طور ماهرانه‌ای در زمینه‌ی سلامت سنجی سازه به‌کاربرده می‌شود [2].

مدل‌های اجزای محدود را می‌توان منحصر به این تعریف دانست؛ تقریبی از سیستم واقعی که قاعدتاً هرگز پاسخ‌های دینامیکی یکسان با داده‌ی اندازه‌گیری به ما نمی‌دهد. اکنون پرسش این است؛ چگونه مدل اولیه‌ی اجزای محدود را به مدلی که بازتاب بهتری از پاسخ دینامیکی سیستم واقعی باشد، نزدیک کنیم؟ پاسخ به این سؤال، یعنی بهبود (یا بروز رسانی) مدل را باید در روش‌شناسی هوشمند و خودکار جستجو کرد. اساساً باید مسئله‌ی به‌روزرسانی اجزای محدود را به شکل زیر از منظری کلی نگریست. این شکل، سه را که هریک به‌صورت بیضی کشیده شده را ترسیم می‌دارد. فضای S^1 ، فضای همه‌ی اندازه‌گیری‌های محتمل سیستم واقعی را در برمی‌گیرد. فضای S^2 ، فضای همه‌ی مدل‌های اولیه‌ی محتمل و فضای S^3 ، فضای همه‌ی مدل‌های بروز شده می‌باشد. سیستم واقعی مطلوب در خارج از فضای S^1 قرار دارد؛ که بیش از دیگر عوامل، این امر ناشی از «ناکامل بودن مدل» می‌باشد. منظور از ناکاملی، عدم امکان حقیقی ثبت رفتار همه‌ی درجات آزادی دینامیکی سیستم می‌باشد.

شکل (۲-۱)، سه مدل فرضی از یک سیستم اندازه‌گیری خاص $M_A(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5)$ و $M_C(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4)$ و $M_B(\beta_1, \beta_2, \beta_3)$ را نشان می‌دهد. موقعیت اولیه‌ی مدل‌ها، پیش از به‌روزرسانی و موقعیت بالقوه‌ی آن‌ها پس از این فرایند نیز مشخص شده است. از سوی دیگر موقعیت مدل بهینه‌ی ایده‌آل در S^3 نیز نشان داده شده است. این مدل بهینه‌ی خاص، شبیه‌تر از هر مدل دیگری به سیستم واقعی است. عملاً ما سروکاری با سیستم واقعی نداریم، بلکه با داده‌های اندازه‌گیری که به شکلی مناسب آن را نمایندگی می‌کنند، کار می‌کنیم.



شکل (۲-۱) نمایش شماتیک به‌روزرسانی مدل اجزای محدود [5]

فرض شود که مدل اولیه، M_C و مجموعه‌ی ۲ نیز مجموعه‌ی داده‌های اندازه‌گیری باشد. چنانچه در شکل ملاحظه می‌شود، M_C ابتدائاً در فاصله‌ای دور از داده‌های ۲ قرار گرفته است. هدف آن است تا با نزدیکی این دو، دقت در تقریب داده‌ها حتی‌الامکان افزایش یابد. مدل بروز شده (یا اصلاح‌شده) مدلی است که کمترین فاصله‌ی موردنظر را به دست دهد. در عمل اغلب مهندسان تعدادی مدل را برای یک

سیستم طرح می‌کنند؛ برای نمونه مدل‌های M_A ، M_B و M_C ، مدل‌های پیشنهادی برای شکل هستند [5].

۱-۵ روش تحقیق

بروز رسانی مدل اجزای محدود از روی اصلاح مفهوم فیزیکی مدل، همواره مستلزم به‌کارگیری درک فیزیکی درستی برای انتخاب درست پارامترهای به‌روزرسانی، چینش نیروهای ورودی سیستم و پاسخ‌های اندازه‌گیری‌شده در آزمایش ارتعاش می‌باشد.

برای شناسایی سازه‌ای و کشف خرابی، عموماً استفاده از پاسخ دینامیکی بر پاسخ استاتیکی ترجیح داده می‌شود؛ چراکه سیگنال‌های دینامیکی اطلاعات بیشتری را در اختیار ما قرار داده و همچنین از مشکل احتمالی عدم یکتایی پاسخ، اجتناب می‌کند. در روش‌های استاتیکی برای غلبه بر عدم یکتایی، غالباً یا باید نیرو در موقعیت‌های متعدد اعمال گردد یا اینکه اطلاعات اضافی، مانند فرکانس مودال به‌کاربرده شود. از آن گذشته، اندازه‌گیری دینامیکی با شتاب سنج، ساده‌تر از اندازه‌گیری استاتیکی است و اندازه‌گیری استاتیکی، نیازمند مبنایی ثابت برای حسگرهای جابجایی است. به دلایل گفته‌شده، بیشتر کارهای تحقیقاتی در حوزه شناسایی سازه‌ای و کشف خرابی بر اساس اندازه‌گیری‌های دینامیکی انجام می‌شود [3].

پیش‌بینی‌های عددی (فرکانس و شکل مودی) باید در برابر تغییرات کوچک در پارامترهای به‌روزرسانی، حساسیت نشان دهند. نتایج آزمایشگاهی مؤید این مطلب است که عموماً فرکانس‌های طبیعی، به میزان قابل توجهی، به ازای اختلافات اندک در ساخت قطعات آزمایشگاهی مشابه، دچار تغییر می‌شود. باین حال یافتن پارامترهای به‌هم‌پیوسته که نتایج آزمایش به آن حساسیت تام نشان دهند، می‌تواند بسیار مشکل باشد. از سوی دیگر چنانچه داده‌های عددی به پارامتر انتخابی حساسیت ناچیز نشان دهد، به‌روزرسانی و اصلاح پارامتر، اعتباری متزلزل خواهد داشت؛ چراکه اختلاف میان پیش‌بینی‌ها و نتایج با دگرگونی در پارامترهای غیر مرتبط با خرابی تنظیم خواهد شد. از سوی دیگر میزان موفقیت

فرایند به‌روزرسانی، بستگی بالایی به غنای اطلاعات به‌دست‌آمده از آزمایش دارد. این داده‌ها که در قالب اندازه‌گیری‌های دینامیکی دریافت می‌شود، معمولاً غیردقیق^۱ و ناقص^۲ هستند. غیردقیق از این نظر که اختلالات تصادفی و سیستماتیک در چارچوب آزمایش همواره وجود دارد. و ناقص از آن نظر که دامنه‌ی فرکانس اندازه‌گیری، کوتاه‌تر از آن است که همه‌ی درجات آزادی مدل را پوشش دهد. از طرفی تعداد ایستگاه‌های اندازه‌گیری در مدل آزمایشگاهی عموماً بسیار کمتر از تعداد درجات آزادی مدل اجزای محدود است. حل این مشکل مستلزم کاهش مدل^۳ یا بسط بردارهای ویژه اندازه‌گیری^۴ شده است. در این پایان‌نامه به‌جای استفاده از نتایج حاصل از آزمایش ارتعاش دینامیکی، از شبیه‌سازی مدل دینامیکی استفاده شده است؛ به این صورت که با اعمال تغییرات مشخص در خصوصیات فیزیکی از طریق تغییر در ماتریس سختی مدل و آنالیز مودال آن مبنای ارزیابی مدل تحلیلی و مقایسه فراهم آمده است. از این‌رو مشکلات اشاره‌شده در بالا در مدل حاضر وجود نخواهد داشت [1].

از سوی دیگر همان‌طور که پیش‌ازاین بیان شد، بروز رسانی مدل اجزای محدود دینامیکی، اساساً یک مسئله‌ی بهینه‌سازی است که هدف آن کمینه‌کردن فاصله‌ی داده‌ی اندازه گرفته‌شده (یا شبیه‌سازی‌شده)، با داده‌ی پیش‌بینی مدل اجزای محدود می‌باشد. از این‌رو ما با یک مسئله‌ی بهینه‌سازی سروکار داریم که در آن متغیرهای بهینه‌سازی، خصوصیات مکانیکی سازه می‌باشد؛ این خصوصیات بناست تا رفتار واقعی سازه‌ی دچار آسیب را منعکس نماید. در این پایان‌نامه از اشکال مودی برای تشکیل تابع هدف بهینه‌سازی استفاده شده است. در این سیاق الگوریتم‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری، که در زمره‌ی روش‌های محاسباتی هوشمند به شمار می‌روند، به‌کاربرده شده‌اند.

۱-۶ شرحی بر فصول

^۱- Imprecision

^۲- Incompleteness

^۳- Model Reduction

^۴- Modal Expansion

در فصل اول این پایان نامه ماهیت به روزرسانی مدل اجزای محدود بیان گردید. در فصل دوم با تعریفی دقیق تر از این مفهوم به معرفی پژوهش های انجام شده در این زمینه، پرداخته خواهد شد. در فصل سوم به بیان مبانی نظری مورد نیاز برای فرایند به روزرسانی و تشخیص خرابی اشاره می شود. در فصل چهارم روش به روزرسانی و الگوریتم بهینه سازی مورد نظر معرفی می گردد و در فصل بعدی این روش با مثال های عددی و طرح خرابی گوناگون مورد آزمایش قرار می گیرند و نتایج به دست آمده به صورت نمودارهای تشخیص خرابی، نشان داده خواهد شد. در فصل پایانی به بیان جمع بندی پرداخته و نهایتاً منابع مورد استفاده در این پایان نامه لیست می گردد.

مروری بر پیشینه‌ی تحقیق

در این فصل، نخست روش‌های به‌روزرسانی اجزای محدود معرفی شده و مزایا و معایب هریک بیان می‌گردد. سپس حوزه‌های دینامیکی کاربرد به‌روزرسانی مدل اجزای محدود مورد اشاره قرار گرفته است و در ادامه انواع روش‌های به‌روزرسانی به تفکیک بیان می‌شود. در پایان فصل نیز جمع‌بندی از ادبیات پیشین به‌روزرسانی اجزای محدود ارائه می‌گردد.

۲-۲ روش‌های به‌روزرسانی مدل اجزای محدود

دو شیوه برای به‌روزرسانی مدل اجزای محدود وجود دارد: روش مستقیم و روش تکرارشونده. روش‌های مستقیم که در آن‌ها از خصوصیات مودال استفاده می‌شود، از نظر محاسباتی برای بازتولید دقیق داده‌ی مودال اندازه‌گیری شده، کارآمد است. این روش‌ها، پارامترهای فیزیکی بروز شده را به حساب نمی‌آورد. در نتیجه با این وجود است که مدل اجزای محدود می‌تواند مقادیر اندازه‌گیری شده را پیش‌بینی نماید، اما به طرق زیر مدل بروز شده دچار محدودیت است [4]:

- پیوستگی گره‌ها به‌عنوان اثر فیزیکی مدل‌سازی اجزای محدود که ناشی از قطعیت پیوستگی فیزیکی تمامیت سازه است، ممکن است ناکارآمد باشد.
- ماتریس‌های بروز شده به‌جای تمرکز، دچار تفرق هستند. اینکه المان‌های سازه‌ای به‌سادگی به المان‌های مجاورشان متصل‌اند، مسلم می‌سازد که ماتریس‌های جرم و سختی به‌صورت قطری با جفتی‌هایی بین المان‌های دور از هم محصور شده‌اند.
- امکان از بین رفتن تقارن ماتریس‌ها وجود دارد.

اما روش‌های تکرارشونده از تغییر در پارامترهای فیزیکی برای به‌روزرسانی مدل‌های اجزای محدود بهره می‌برند؛ از این‌رو مدل‌هایی حاصل می‌شود که از نظر فیزیکی واقعیت‌پذیر هستند.

اسفندیاری و همکاران^۱ از توابع پاسخ-فرکانس و فرکانس‌های طبیعی برای به‌روزرسانی مدل در سازه‌ها استفاده کردند. یک روش حداقل مربعات با نرمال‌سازی مناسب برای حل سیستم متعین^۲ با داده‌ی نویزدار مورد استفاده قرار گرفت. شیوه حساسیت و انتخاب مناسب داده‌ی فرکانس اندازه‌گیری، دقت و همگرایی بهتر فرایند به‌روزرسانی اجزای محدود را به دست داد.

وانگ و همکارانش^۳ از ZMD^۴ برای شناسایی شکلهای مودی و به‌روزرسانی مدل اجزای محدود استفاده کردند. با اعمال این رویکرد در مسئله‌ی یافتن شکل مودی در یک سازه‌ی ورق ساده، مشاهده شده است که ZMD مزایای قابل توجهی در مقایسه با معیار اطمینان مودال (MAC) مرسوم دارد، به ویژه در سازه‌های نامتقارن.

یوان و دای^۵، روش موثر عددی را برای به‌روزرسانی مدل اجزای محدود سیستمهای ژيروسکوپی^۶ میرا ایجاد کردند. این روش، داده‌ی مودال اندازه گرفته‌شده را با مدل اجزای محدود ادغام کرده تا مدل اجزای محدودی بسازد که دستاورد آن ماتریس‌های ژيروسکوپیک و میرایی باشد که به‌وضوح داده‌ی مودال آزمایشگاهی را بازتولید کند.

کوزاک و همکارانش^۷ از یک شاخص ناهمبستگی (MCI)^۸ برای به‌روزرسانی مدل استفاده کردند. شاخص شناخته‌شده‌ای مانند آن ایجاد گردید تا به دقت به خطاهای انتقالی درجات آزادی در مدل اجزای محدود پی ببرد. شاخص ناهمبستگی از توابع پاسخ-فرکانس و ماتریس سختی دینامیکی برای هر مختصات به‌عنوان یک تابع فرکانس محاسبه گردید. روش حساسیت شاخص ناهمبستگی نتایج خوبی، حتی برای زمانی که درجات آزادی کمی، اندازه‌گیری‌شده، داده است.

¹ -Esfandiari et al, 2009

² -Over-Determined

³ - Wang et al, 2009

⁴ - Zernike Moment Descriptor

⁵ - Yuan & Dai, 2009

⁶ - Gyroscopic

⁷ -Kozak et al, 2009

⁸ - MisCorrelation Index

آرورا و همکارانش^۱ یک به‌روزرسانی مدل اجزای محدود را که از ماتریس‌های میرایی استفاده‌شده، انجام دادند. روش به‌روزرسانی مبتنی بر میرایی، پیشنهاد شد و با این هدف که مدل بروزشده‌ی اجزای محدود میرا، دارای مکانیزم دقیق پیش‌بینی توابع پاسخ-فرکانس اندازه‌گیری‌شده باشد، بررسی گردید. نتایج حاصل نشان داد که روش پیشنهادی، به دقت قادر به پیش‌بینی توابع پاسخ-فرکانس پیچیده می‌باشد. کلونه و همکارانش^۲، به‌روزرسانی اجزای محدود را برای بهبود ارزیابی پل به اجرا در آورد. بنا بود روش آن‌ها خطای مدل‌سازی بسیار ساده‌شده را با پیشرفت‌های مدل فیزیکی قبل از تقریب پارامترها با بهینه‌سازی غیرخطی برطرف کند. افزون بر این، توابع هدف چندهدفه، چندگانه سازی انواع گوناگون اندازه‌گیری‌ها را پیش برده و اجازه داد تا روند استواری برای تخمین پارامتر به دست آید. یانگ و همکارانش^۳، چندین تابع هدف را برای بروز رسانی اجزای محدود در سازه‌ها بررسی نمودند. بایراکتار و همکارانش^۴ خصوصیات مودال را برای تغییر عدم قطعیت شرایط مرزی و خصوصیات مواد، اجرا و مدل‌های اجزای محدود یک پل را بروز کردند.

علاوه بر این، لی و دو^۵، حساس‌ترین متغیر طراحی بروز رسانی اجزای محدود کابل‌های مهاری را به‌کاربرده و مدل اجزای محدودی را که بتواند فرکانس طبیعی نزدیک‌تر به نمونه‌های آزمایشگاهی را پیش‌بینی کند، با موفقیت شناسایی کردند. استینیکرز و همکاران^۶ داده‌های انتقال‌پذیری (نسبت میان دو پاسخ) را با موفقیت برای به‌روزرسانی اجزای محدود اعمال کردند [6].

در فصل گذشته عنوان شد که یکی از موضوعات مهم در به‌روزرسانی اجزای محدود، مسئله‌ی انتخاب پارامتر است. داده‌های اندازه‌گرفته‌شده، شامل اطلاعات محدودی است و برای اجتناب از مشکلات پی آیند، ناچاریم تعداد پارامترهای به‌روزرسانی را کوچک در نظر بگیریم. این قبیل پارامترها باید با

¹ -Arora et al, 2009

² -Schlune et al, 2009

³ - Yang et al, 2009

⁴ -Bayraktar et al, 2009

⁵ -Li & Du, 2009

⁶ -Steenackers et al, 2007

هدف اصلاح عدم قطعیت شناسایی شده در مدل، انتخاب گردد و داده‌ها باید نسبت به آن‌ها حساسیت داشته باشد. اما بدون اعمال ملاحظات درک فیزیکی، به ندرت دستیابی به پارامتر موردنظر مقدور خواهد بود. روش‌های مستقیم برای کاربر اصولاً امکان انتخاب پارامتر برای به‌روزرسانی را فراهم نمی‌کنند. در این روش‌ها، کل ماتریس‌های سختی و جرم در یک گام حل (غیر تکراری) اصلاح می‌شوند. بنابراین عبارات ماتریس منفرد همگی بدون هیچ ارتباطی با توابع شکل المان تغییر می‌یابند. حاصل اینکه هرگونه معنای فیزیکی که مدل اجزای محدود اولیه می‌توانست دارا باشد، در فرایند بروز رسانی از دست می‌رود. این چنین روش‌هایی قادر به تولید یک مدل بروز شده هستند که عیناً داده‌های اندازه گرفته شده را باز می‌گرداند. به این مدل، مدل بازنمودی^۱ گفته شده است.

در صورت استفاده از روش‌هایی که اجازه‌ی انتخاب پارامتر به‌روزرسانی را فراهم می‌کنند، بهبود و اصلاح مدل، نیازمند بینش فیزیکی شایانی می‌باشد؛ این بینش نه تنها در توانایی تشبیه اندازه‌گیری‌ها بلکه در درک فیزیکی ضرایب نیز ضروری است. چنین مدل‌هایی را مدل‌های بینش-مبنا^۲ نام گذاشته‌اند [5].

کیم و پارک^۳، روش انتخاب پارامتر خودکاری را برای به‌روزرسانی اجزای محدود ارائه کردند. این روش خودکار، مبتنی بر مشاهدات مستقیم است. کارایی روش پیشنهادی بر روی مسئله‌ای شبیه‌سازی شده و نیز در یک سازه‌ی حقیقی، به‌طور قطعی ارزیابی شده است.

زاراته و کیسیدو^۴، موضوع وجود چندین مدل اجزای محدود بروز شده را مورد مطالعه قرار داده و دریافتند که حل بهینه‌ی کلی، بر حسب اختلاف بین داده‌ی اندازه‌گیری شده و داده‌ی اجزای محدود، ضرورتاً مدل اجزای محدود مطلوب را نتیجه نمی‌دهد. موضوع مهم دیگر آن است که همیشه یک عدم انطباق

¹- Representational

²- Knowledge- Based Models

³-Kim & Park, 2008

⁴-Zarate & Caicedo, 2008

بین شکلهای مودی اندازه‌گیری و پیش‌بینی در عبارات درجات آزادی اندازه‌گیری وجود دارد. یکی از دلایل آن، می‌تواند دشواری در اندازه‌گیری درجات آزادی دورانی باشد [6].

۳-۲ حوزه‌های کاربرد به‌روزرسانی مدل اجزای محدود (FEMU)

۳-۲-۱ حوزه‌ی مودال^۱

داده‌های حوزه‌ی مودال با فرکانس طبیعی، شکل مودی و نسبت میرایی بیان می‌گردد. در اغلب مقالات این حوزه در مهندسی عمران، از اثر میرایی صرف‌نظر می‌گردد، زیرا میزان میرایی در سازه‌ها به اندازه‌ی کافی کوچک است که بتوان از آن صرف‌نظر کرد. پرکاربردترین روش برای استخراج خصوصیات مودال، فرایند آنالیز مودال نام دارد.

۳-۲-۱-۱ فرکانس طبیعی

فرکانس‌های طبیعی، یکی از خصوصیات اساسی یک سیستم به شمار می‌رود و با استفاده از آزمایش ارتعاش معلوم می‌شود. تغییرات در فرکانس طبیعی برای تشخیص آسیب سازه‌ای به کار رفته است. کاولی و آدامز^۲، از تغییر در فرکانس طبیعی برای تشخیص آسیب در مواد مرکب بهره برده‌اند. فرار و همکارانش^۳، از جابجایی فرکانس طبیعی برای تشخیص آسیب در یک پل I-40 استفاده و ملاحظه کردند که فرکانس طبیعی ابزار مناسبی برای تشخیص خرابی عیب‌های کوچک نیست. دریافته شده که برای بهبود دقت روش فرکانس طبیعی، عملی‌تر آن است که آزمایش در شرایط زیست‌محیطی کنترل‌شده و جایی که عدم قطعیت‌های اندازه‌گیری، نسبتاً پائین باشد، انجام گیرد. دیگر استفاده‌های موفق از فرکانس طبیعی شامل مسینا و همکارانش^۴ است که به منظور موقعیت‌یابی آسیب‌های منفرد و مضاعف در یک خرپای ۳۱ عضوی شبیه‌سازی‌شده و سکوی ساحلی فلزی تخته‌ای، استفاده گردید.

^۱- Modal -Domain

^۲-Cawley & Adams(1979)

^۳-Farrar et al.(1994)

^۴-(Messina et al.,1996 ; Messina et al.,1998)

خرابی با کاهش سختی میله‌های منفرد تا سقف ۳۰٪ به هر دو سازه وارد شده است. این روش از نظر آزمایشگاهی بر روی یک سازه‌ی میله-آزمون آلومینیومی، که در آن با کاهش سطح مقطع یکی از اعضا از ۷/۹ میلی‌متر به ۵/۰ میلی‌متر خرابی وارد آمده، اعتبار یافته است. کاربردهای بیشتر فرکانس طبیعی شامل جوش موضعی وانگ و همکارانش^۱ و سازه‌های تیر مانند ژانگ و ایادیجی^۲ و ژانگ و همکارانش^۳ می‌شود. استفاده از فرکانس طبیعی در تشخیص خرابی، مستلزم توسعه‌ی مدل‌هایی است که بتوانند به دقت فرکانس‌های طبیعی را پیش‌بینی کنند.

۲-۳-۱-۲ شکل مودی

شکل مودی، منحنی تخمینی یک ارتعاش صفحه‌ای را در مود متناظر با یک فرکانس طبیعی ترسیم می‌کند. شکل مودی به ماهیت سطح و شرایط مرزی آن بستگی دارد. وست^۴، از معیار اطمینان مودال^۵ (MAC) استفاده کرد؛ معیاری که برای اندازه‌گیری درجه‌ی همبستگی میان دو شکل مودی به‌منظور موقعیت‌یابی خرابی در بدنه‌ی باله‌ی فضاپیماي شاتل به کار رفت. در اعمال MAC، شکل‌های مودی قبل و بعد از خرابی باهم مقایسه می‌شدند. خرابی با بارگذاری صوتی آغاز شد. شکل‌های مودی تفکیک‌شده و تغییرات در شکل مودی در میان محدوده‌ی تفکیکی، پشت سر هم مقایسه شده‌اند. کیم و همکارانش^۶ معیار اطمینان مودال جزئی^۷، (PMAC) را به کار بردند و معیار اطمینان مودال هم‌پایه^۸ (COMAC) نیز توسط لیون و اوینز^۹ برای جداسازی نواحی خرابی سازه، پیشنهاد شد. ساوالو^{۱۰} بر مبنای نسبت وزن‌دار فرکانس‌های طبیعی سازه‌ی آسیب‌دیده به سازه‌ی سالم، شاخص صحت آسیب کلی را بنا نهاد. وزن‌ها

^۱- (Messina et al., 1996 ; Messina et al., 1998)

^۲- (Zhong & Oyadiji, 2008)

^۳- Zhong et al., 2008

^۴- (West, 1982)

^۵- Modal Assurance Criterion

^۶- (Kim et al. 1992)

^۷- Partial Modal Assurance Criterion

^۸- Coordinate Modal Assurance Criterion

^۹- (Lieven & Ewins. 1988)

^{۱۰}- (Sawalu., 1995)

برای تعیین حساسیت در هر بار خرابی به کار می‌رفت. استینیکر و گوییلوم^۱ به‌روزرسانی مدل اجزای محدودی را که عدم قطعیت در پارامترهای مودال را به حساب می‌آورد، انجام دادند.

اشکالات عمده‌ی ویژگی‌های مودال، به‌طور خلاصه توسط اوینز^۲ به‌صورت زیر برشمرده شده است:

- با توجه به ضرورت سروکار داشتن با فرایند بهینه‌سازی از نظر محاسباتی، گران‌قیمت است.
- به سبب آنالیز مودال، در برابر اختلالات افزایشی آسیب‌پذیر است.
- ناتوانی در عاملیت موده‌های فراتر از پهنای باند فرکانسی.
- صرفاً برای سازه‌های خطی و با میرایی اندک مناسب است.

با این وجود به‌طور خلاصه داده‌های مودال مزایای زیر را نیز دارا هستند:

- استفاده از آن در تشخیص خرابی ساده است.
- مناسب‌ترین روش برای تشخیص عیوب درشت است.
- به‌طور مستقیم با توپولوژی سازه درگیر است.
- جنبه‌های بسیار مهم دینامیکی سازه در آن مورد تأکید قرار گرفته است.

۲-۳-۲ حوزه‌ی فرکانس^۳

^۱ - (Steenacker & Guillaume, 2006)

^۲ - (Ewins, 1995)

^۳ - Frequency-Domain

تحریک و پاسخ اندازه‌گیری‌شده‌ی سازه به‌وسیله‌ی تبدیل فوریه، قابل تبدیل به حوزه‌ی زمان است.^۱ نسبت پاسخ یا تحریک در حوزه‌ی فرکانس در هر فرکانس، تابع پاسخ-فرکانس^۲ (FRF) نامیده می‌شود. استفاده‌ی مستقیم از توابع پاسخ-فرکانس، بدون استخراج داده‌های مودال برای تشخیص عیوب، موضوع پژوهش سستیری و دی آبروگیو^۳ و فاورجان و سینو^۴ بوده است. دی آمبروگیو و زوبل^۵، مستقیماً توابع پاسخ-فرکانس را به‌منظور تشخیص وجود عیوب در سازه‌ی خرابی اعمال کردند. ایمرگان و همکارانش^۶ دریافتند که کاربرد مستقیم توابع پاسخ-فرکانس در طبقه‌بندی عیب‌ها در سازه‌های شبیه‌سازی‌شده، مزایای قاطعی بر استفاده از خصوصیات مودال دارد. لیون^۷ و شولتز و همکارانش^۸ از کاربرد توابع پاسخ-فرکانس اندازه‌گیری‌شده در عیب شناسی سازه‌ای دفاع کردند. دیگر کاربردهای مستقیم توابع پاسخ-فرکانس عبارت‌اند از شون و همکارانش^۹، نی و همکارانش^{۱۰}، لیو و همکارانش^{۱۱}، وایت و همکارانش^{۱۲} و نیز تودوروفسکا و تیروفوناک^{۱۳}. به دلایل زیر کار با توابع پاسخ-فرکانس مشکل است [9]:

- اطلاعاتی به‌مراتب بیشتر از آنچه برای تشخیص خرابی به آن نیاز است، را در بر دارد.
- هیچ روشی برای انتخاب پهنای باند فرکانس دلخواه وجود ندارد.
- عموماً در مناطق ضد-تشدید، پراختلال هستند.

در عین حال روش‌های تابع پاسخ-فرکانس، از مزایایی نیز برخوردارند [9]:

^۱-(Clough & Penzien. , 1976 ; Ewins. , 1995)

^۲- Frequency- Response Function

^۳-(Sestieri & D'Ambrogio. , 1989)

^۴-(Faverjon & Sinou. , 2009)

^۵-(D'Ambrogio & Zobel. , 1994)

^۶-(Imregun et al. 1995)

^۷-(Lyon. 1995)

^۸-(Schultz et al. , 1996)

^۹-(Shone et al. , 2009)

^{۱۰}-(Shone et al. , 2009)

^{۱۱}-(Liu et al. 2009)

^{۱۲}-(White et al. 2009)

^{۱۳}-(Todorovska & Trifunac. , 2008)

- داده‌های اندازه‌گیری شده شامل اثرات موده‌های فراتر از پهنای باند فرکانسی می‌شود.
- یک اندازه‌گیری داده‌های بسیاری فراهم می‌نماید.
- نیازی به آنالیز مودال نمی‌باشد و از خطاهای تشخیص مودال جلوگیری می‌شود.
- توابع پاسخ-فرکانس در سازه‌های با میرایی زیاد و چگالی مودال قابل اجراست.

هنوز باید پژوهش‌های گسترده صورت گیرد، تا دریابیم چطور توابع پاسخ فرکانس به بهترین شکل برای تشخیص عیب و نقص به کار رود. افزون بر داده‌ی مودال، داده‌های دیگری مانند اطلاعات کرنشی یا^۱ و^۲ یا ترکیبی از داده‌ی مودال و جابجایی استاتیکی ژونگ و ژیا^۲ را می‌توان مورد استفاده قرار داد.

۴-۲ مروری بر تحقیقات انجام گرفته

در ادامه به مرور تحقیقات انجام گرفته، بر مبنای روش‌های مستقیم و غیرمستقیم که از توابع پاسخ-فرکانس یا خصوصیات مودال برای به‌روزرسانی اجزای محدود استفاده می‌کنند، پرداخته شده است:

▪ روش‌های ماتریس-اصلاحی^۳

شیوه‌های ماتریس-اصلاحی، برای تشخیص خرابی در سازه، بر پایه‌ی اصلاح ماتریس‌های مدل سازه‌ای، برای نمونه ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی استوارند. اسلوب کار آن‌ها کمینه‌سازی فاصله‌ی بین ماتریس‌های اندازه‌گیری و تحلیلی به صورت زیر است [5] :

$$\{E\}_i = (-\omega_i^2[M] + j\omega_i[C] + [K])\{\phi\}_i$$

^۱- (Yao & Li, 2008)

^۲- (Zong & Xia, 2008)

^۳- Matrix – update Methods

در اینجا، M زیر نوشتی برای مقدار اندازه‌گیری؛ $[M]$ ماتریس جرم؛ $[C]$ ماتریس میرایی و $[K]$ ماتریس سختی سازه می‌باشد. $\{E\}_i$ بردار خطاست که نیروی مانده¹ نیز نامیده می‌شود. ω_i و $\{\Phi\}_i$ به ترتیب i امین فرکانس طبیعی و شکل مودی هستند؛ و $j = \sqrt{-1}$. در این معادله نیروی مانده، همان نیروی هارمونیک است که سازه‌ی سالم در فرکانس ω_i ، در معرض آن قرار گرفته است به‌طوری‌که سازه با شکل مودی $\{\Phi\}_i$ به آن پاسخ خواهد داد. معیار اقلیدسی $\{E\}_i$ ، با به‌روزرسانی پارامترهای فیزیکی در مدل کمینه شده است.

اختلاف بین ماتریس‌های بروز رسانده و اصلی، خرابی را تعیین می‌کند. یکی از رویکردها برای اعمال این روند، فرمول‌بندی تابع هدف به‌گونه‌ای که حداقل شود، قرار دادن قیودی برای مسئله همچون نگه‌داشتن نسبت‌های تعامد ماتریس‌ها و انتخاب یک روال بهینه‌سازی است. این شیوه‌ها از آنجا که با تغییرات مکرر در پارامترهای مرتبط تا کمینه‌سازی خطا ادامه می‌یابد، به‌عنوان روش‌های تکراری رده‌بندی می‌شوند.

اوجالوو و پیلو² با استفاده از خصوصیات مودال، معیار اقلیدسی نیروی مانده را برای i امین مود سازه کمینه کردند. یوان و دای³ با برقراری نسبت‌های تعامدی ضروری و استفاده از داده‌های ناکامل مودال، به‌روزرسانی اجزای محدود را انجام داده است. دی آمبروجیو و زوبل⁴ نیروی مانده را در معادله‌ی حرکت حوزه‌ی فرکانس به‌صورت زیر کمینه کرده‌اند:

$$[E] = (-\omega^2[M] + j\omega[C] + [K])[X^m] - [F^m]$$

در این معادله $[X^m]$ و $[F^m]$ به ترتیب ماتریس‌های جابجایی و نیروی تبدیل فوریه هستند. هر ستون از ماتریس با یک نقطه فرکانس اندازه‌گیری، متناظر می‌شود. قاعده‌ی اقلیدسی ماتریس خطای $[E]$

¹ -Residual Force

² - (Ojalvo & Pilon , 1988)

³ - (Yuan & Dai, 2006)

⁴ - (D'Ambrogio & Zobel, 1994)

به وسیله‌ی پارامترهای فیزیکی به‌روزرسانی در مدل کمینه می‌شود. روش‌های مورد اشاره در این بخش از نظر محاسباتی گران قیمت می‌باشد. افزون بر این یافتن کمینه‌ی کلی با تکنیک بهینه‌سازی ناشی از نقاط ثابت متعدد، مشکل است.^۱ روش‌هایی چون الگوریتم ژنتیک و متغیرهای طراحی آغازی متعدد، به‌منظور افزایش احتمال یافتن کمینه‌ی کلی اعمال شده‌اند.^۲

▪ روش‌های ماتریس بهینه

این روش‌ها در رده‌ی روش‌های مستقیم جای گرفته، و حل تحلیلی را به جای حل عددی برای یافتن ماتریس‌های سازه‌ی آسیب‌دیده به کار می‌گیرد. آن‌ها طبیعتاً با عبارات ضرایب لاگرانژ و ماتریس‌های انحرافی فرمول‌بندی می‌شوند.

▪ روش‌های مبتنی بر حساسیت

در این روش‌ها فرض می‌کنند که داده‌ی آزمایشگاهی، انحرافات داده‌ی طراحی راجع به مدل اجزای محدود اصلی است. با اتخاذ چنین فرضی، باید داده‌ی آزمایشگاهی به داده‌ی اجزای محدود نزدیک باشد تا این روش‌ها موثر باشد. این فرمول‌بندی، تنها زمانی که اصلاحات سازه‌ای یا درواقع وسعت خرابی کوچک باشد، کار خواهد کرد. ماترشید و همکارانش^۳ این روش را در ابعاد بزرگ مسائل صنعتی به کار بستند. آن‌ها بدنه‌ی یک بالگرد را مورد بررسی قرار دادند. احتمالاً مناسب‌ترین پژوهش کاربردی در تشریح موضوع، همین مقاله باشد.

این روش‌ها مبتنی بر محاسبه‌ی مشتقات خصوصیات مودال و یا توابع پاسخ-فرکانس می‌باشد. روش‌های زیادی که مشتقات خصوصیات مودال و توابع پاسخ-فرکانس را محاسبه می‌کنند، توسعه یافته است. یکی از چنین روش‌هایی توسط فاکس و کاپور^۴ پیشنهاد شد؛ آن‌ها مشتقات خصوصیات مودال

^۱- (Janter & Sas, 1990)

^۲- (Mares & Surace, 1996; Levin & Lieven, 1998; Larson & Zimmerman, 1993; Friswell et al., 1994; Dunn, 1998)

^۳- (Mottershead et al, 2010)

^۴- (Fox & Kapoor, 1968)

سیستم نامیرا را محاسبه نمودند. موریس و مروویچ^۱، هاگ و چووی^۲ و گاربا^۳ روش‌های دیگر محاسبه‌ی مشتقاتِ خصوصیات مودال را برای تعیین تغییرات پارامتر مطرح کردند. آن‌ها روابط تعامد را به نسبت ماتریس‌های جرم و سختی به کار بردند تا مشتقات فرکانس‌های طبیعی و شکل‌های مودی را به نسبت تغییرات پارامتر محاسبه کنند.

بن‌هایم و پرلس^۴ حساسیت توابع پاسخ-فرکانس گزینشی را برای گشودن مسئله‌ی به‌روزرسانی اجزای محدود پیشنهاد کردند، در حالی که لین و همکارانش^۵ تکنیک حساسیت مودال را با تضمین اینکه این روش‌ها برای عیوب با وسعت بزرگ نیز کاراست، بهبود دادند.

همزیک^۶ روش که حساسیت در یک سطح المان را برآورد کند، پیشنهاد کرد. مزیت این روش، قابلیت تشخیص خطاهای محلی است. افزون بر این از نظر محاسباتی نیز کارایی دارد. آلوین^۷ این روش را برای بهبود نرخ همگرایی، با استفاده از یک نشانگر خطای واقع‌گرایانه‌تر و ترکیب اندازه‌گیری‌های اطمینان آماری برای پارامترهای مدل اولیه و داده‌ی اندازه‌گیری‌شده، اصلاح کرد.

■ روش‌های تخصیص-سازه ویژه^۸

روش‌های مذکور بر مبنای نظریه‌ی سیستم-کنترل استوار است. سازه‌ی مورد بررسی وادار به پاسخ به وضعیتی از پیش تعیین‌شده می‌گردد. در حین تشخیص خرابی، سازه‌ی ویژه‌ی مطلوب، آن است که در آزمایش اندازه گرفته‌شده است. زیمرمان و کائوک^۹ این روش‌ها را برای تعیین مدول الاستیسیته‌ی

^۱- (Norris & Meirovitch, 1989)

^۲- (Haug & Choi, 1984)

^۳- (Chen & Garba, 1980)

^۴- (Ben-Haim & Prells, 1993)

^۵- (Lin et al, 1995)

^۶- (Hemez, 1993)

^۷- (Alvin, 1996)

^۸- *Eigenstructure-assignment Methods*

^۹- (Zimmerman & Kaouk, 1992)

تیر طره با کمک داده‌ی مودال اندازه گرفته به کار بردند. شولتز و همکارانش^۱ این رویکرد را از طریق استفاده از توابع پاسخ-فرکانس اندازه‌گیری بهبود داد.

یکی از محدودیت‌های این روش‌ها این است که تعداد موقعیت‌های حسگرها از تعداد درجات آزادی در مدل اجزای محدود کمتر است. این موضوع مشکل‌ساز است، چراکه یکپارچگی داده‌ی آزمایشگاهی را با مدل اجزای محدود دشوار می‌سازد، از این‌رو از بنیادی‌ترین اشکالات به‌روزرسانی اجزای محدود روش‌های تشخیص محسوب می‌شود. برای تلافی این محدودیت، شکل مودی و توابع پاسخ-فرکانس، هردو به ابعاد مدل اجزای محدود بسط داده یا ماتریس‌های سختی و جرم مدل اجزای محدود به اندازه‌ی داده‌ی اندازه‌گیری کاهش داده می‌شود.

▪ روش‌های بهینه‌سازی تکراری

هوآنگ و ژو^۲ روش‌های بهینه‌سازی را برای به‌روزرسانی مدل اجزای محدود سازه‌های پل به کار بستند. روش بهینه‌سازی، به‌وسیله‌ی تحلیل حساسیت تقویت گردید. شوارز و همکارانش^۳ مدلی اجزای محدودی که اختلاف بین مودهای یک مدل اجزای محدود و داده‌های آزمایشگاهی را کمینه کند، اصلاح کردند. بکیر و همکارانش^۴ روش‌های حساسیت را برای به‌روزرسانی مدل به کار بردند. آن‌ها از یک روش بهینه‌سازی مقید برای کمینه کردن اختلاف بین فرکانس‌ها و شکل مودی بهره بردند.

جاشی و رن^۵ از یک روش بهینه‌سازی چندهدفه برای به‌روزرسانی مدل اجزای محدود بهره گرفتند. تابع هزینه^۶ چندهدفه‌ی آن‌ها بر پایه‌ی اختلاف بین مقادیر ویژه و انرژی کرنشی استوار بوده است. لیو و همکارانش^۷ مدل اجزای محدود یک تیر ۱۴ دهانه با اتصالات نیم مفصل و کرانه‌ای، با استفاده از روش

^۱ - (Schultz et al, 1996)

^۲ - (Huang & Zhu, 2008)

^۳ - (Schwarz et al, 2007)

^۴ - (Bakir et al, 2007)

^۵ - (Jaishi & Ren, 2007)

^۶ - Cost Function

^۷ - (Liu et al, 2006)

بهینه‌سازی چند گانه را به‌روزرسانی و اصلاح کردند. ژانگ و هوآنگ^۱ یک روش گرادیان-نزولی بهینه‌سازی را برای به‌روزرسانی سازه پل به کار بستند. تابع هدف به‌عنوان مجموع تفاضل فرکانس و شکل مودال بیان شد. جابجایی پارامتر با قضاوت مهندسی میسر گردید.

▪ روش‌های بیزین/مونت کارلو^۲

روش بیزین فرایندی مبتنی بر نظریه‌ی بیز و توابعی است که برای استنتاج آماری از طریق مستندات (مشاهدات) برای اصلاح احتمال درست بودن یک فرضیه می‌باشد^۳. ونگ و همکارانش^۴ روش‌های بیزین را به‌منظور به‌روزرسانی مدل یک پل، براساس داده‌ی حسگر به کار گرفتند، درحالی‌که ماروالا و سیبسی^۵ به‌روزرسانی اجزای محدود در سازه‌های تیری را انجام دادند. مارس و همکارانش^۶ روش مونت کارلو را با موفقیت برای به‌روزرسانی مدل تصادفی استفاده کردند. ونگ و همکارانش^۷ رویکرد بیزین را برای به‌روزرسانی مدل پل هوایی فولادی با دهانه‌ی بلند انتخاب کردند. همز و دابلینگ^۸ نیز روش بیزین را در به‌روزرسانی اجزای محدود با موفقیت به کار بردند و آنرا برای دینامیک خطی استفاده نمودند، درحالی‌که لیندهولم و وست^۹ تقریبی برای پارامتر بیزین را در به‌روزرسانی به کار بستند و آنرا برای داده‌ی پاسخ دینامیکی آزمایشگاهی استفاده کردند. بولکایبت و همکارانش^{۱۰} سه روش نمونه‌گیری برای بیزین را معرفی و بررسی نمودند.

^۱- (Zhang & Huang, 2008)

^۲- Bayesian/Monte Carlo Approaches

^۳-(Marwala, 2009)

^۴-(Wong et al, 2006)

^۵-(Marwala & Sibisi, 2005)

^۶-(Mares et al, 2006)

^۷-(Zheng et al, 2009)

^۸-(Hemez & Doebling, 1999)

^۹-(Lindholm & West, 1995)

^{۱۰}-Boulkaibet et al, 2012

▪ روش‌های محاسباتی هوشمند(ذاتی)^۱

لیو و همکارانش^۲ از نظریه‌ی فازی برای به‌روزرسانی مدل اجزای محدود استفاده کردند. در پژوهش آن‌ها، پارامترهای مدل و متغیرهای طراحی به‌عنوان متغیرهای فازی مدل شده بودند و این تکنیک بطور موفق بر روی یک پل بتنی واقعی انجام گرفت. یونگ و کیم^۳ از الگوریتم ژنتیک چندگانه برای به‌روزرسانی کمک گرفتند و آن را روی مدل عددی یک پل آزمایش نمودند. یک الگوریتم ژنتیک چندگانه با ترکیب الگوریتم ژنتیک با روش نلدر-مید سیمپلکس^۴ تشکیل شده بود. دریافتند که تکنیک پیشنهادی روی سازه‌های پلی کارایی دارد.

تان و همکارانش^۵ ماشین‌های حامل پشتیبان و داده‌ی موجک را برای به‌روزرسانی در سازه‌ها اعمال کردند. نتیجه به‌دست‌آمده از داده‌ی شبیه‌سازی، تایید کرد که این روش می‌تواند مدل را با موفقیت به‌روزرسانی و اصلاح نماید. زاپیکو^۶ شبکه‌های عصبی را برای به‌روزرسانی به کار بردند. نتایج حاصل نشان داد که مدل اجزای محدود اصلاح شده با دقت می‌تواند مودهای پائینی را که از اندازه‌گیری به‌دست‌آمده، پیش‌بینی کند. کاربردهای موفق دیگر روش‌های محاسباتی هوشمند در به‌روزرسانی اجزای محدود عبارت‌اند از: تو و لو^۷، یان و همکارانش^۸ همچنین فی و همکارانش^۹ که الگوریتم ژنتیک را اعمال کردند، فنگ و همکارانش^{۱۰} که یک دوگانه‌ی الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید را اعمال کردند و هه و همکارانش^{۱۱} که دوگانه‌ی الگوریتم ژنتیک و شبکه‌ی عصبی را به کار بردند. تان و کوو^{۱۲} تغییر شکل قوطی موجک و تشخیص الگوی فازی را برای به‌روزرسانی به کار بردند [6].

^۱ -Computational Intelligence Methods

^۲ - (Liu et al, 2009)

^۳ - (Jung & Kim, 2009)

^۴ - Nelder-Mead Simplex Method

^۵ - (Tan et al, 2009)

^۶ - (Zapico et al, 2008)

^۷ - (Tu & Lu, 2008)

^۸ - (Yan et al, 2007)

^۹ - (Fei et al, 2006)

^{۱۰} - (Feng et al, 2006)

^{۱۱} - (He et al, 2008)

^{۱۲} - (Tan & Qu, 2011)

روش‌های به‌روزرسانی اجزای محدود محدودیت‌های متعددی دارند. مهم‌تر از آن، آن‌ها متکی بر مدل اجزای محدود دقیق هستند که ممکن است در دسترس نباشد. حتی اگر مدل موجود باشد نیز مسئله‌ی عدم یکتایی مدل بروز شده، سبب خواهد شد که مسئله‌ی تشخیص خرابی تبدیل به نایکتایی به‌روزرسانی اجزای محدود شود. نایکتایی، پدیده‌ای است که وضعیتی را توصیف می‌کند که بیش از یک مدل اجزای محدود اصلاح شده به کار رفته باشد [14].

۲-۵ جمع‌بندی فصل

در این فصل، روش‌های بروز رسانی اجزای محدود به تفصیل شرح داده و با ذکر پژوهش‌های انجام شده، مزایا و معایب هریک از روش‌ها تشریح گردید. در تمامی روش‌ها سعی گردیده تا با استفاده از کمترین نیاز به مقادیر اندازه‌گیری‌شده، به جواب‌های مطلوب دست یابند. به‌طور کلی در ادبیات بروز رسانی و تشخیص خرابی سازه‌ها، هیچ توافق کلی بر روی یک روش بهینه و مناسب وجود ندارد. هنوز هیچ الگوریتمی که بتواند خرابی در سازه را در انواع سازه‌های مختلف به کمک بروز رسانی تشخیص دهد، پیشنهاد نشده است [2]. از این رو، کماکان ارائه‌ی یک روش جامع به‌منظور به‌روزرسانی و تشخیص خرابی در سازه، زمینه‌ی تحقیقات بسیاری از پژوهشگران است.

مبانی نظری تحقیق

چنانکه در فصل پیشین ملاحظه گردید، روش‌های مبتنی بر داده‌های دینامیکی برای بروز رسانی مدل اجزای محدود جایگاه ویژه‌ای در میان پژوهشگران این عرصه یافته است. ایده‌ی اصلی این روش‌ها آن است که خرابی باعث تغییر در مشخصات فیزیکی سازه (جرم، سختی و احیاناً میرایی) شده و این امر به ایجاد یک تغییر قابل شناسایی در خواص مودال (فرکانس طبیعی، میرایی مودال و اشکال مودی) می‌انجامد. از این رو با بررسی پارامترهای دینامیکی سازه، تشخیص خرابی ممکن می‌گردد. کمینه‌سازی اختلاف بین دو وضعیت سالم (قبل از رخداد آسیب) و موجود سازه به کمک به‌روزرسانی به تشخیص خرابی منجر خواهد شد.

در این فصل به تشریح مبانی نظری و ابزارهای مورد استفاده در روش پیشنهادی فصل بعد پرداخته خواهد شد. در این پایان‌نامه از الگوریتم‌های فرا ابتکاری (هوشمند) برای یافتن مکان و میزان خرابی در سازه استفاده شده است. نخست پس از بیان مقدمه‌ای درباره‌ی بهینه‌سازی فرا ابتکاری، شرحی بر روش‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری مطرح در این پایان‌نامه خواهد رفت؛ در ادامه مبانی نظری دینامیک سازه و نحوه‌ی مدل‌سازی سازه شرح داده می‌شود.

۳-۲ مقدمه‌ای بر بهینه‌سازی

به‌طور کلی اغلب مسائل بهینه‌سازی را از نظر ریاضی می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

$$\underset{x \in \mathbb{R}^n}{\text{minimize}} \quad f_i(x), \quad (i = 1, 2, \dots, M)$$

$$\text{Subject to } \phi_j(x) = 0, \quad (j = 1, 2, \dots, J)$$

$$\psi_k(x) \leq 0, \quad (k = 1, 2, \dots, K)$$

که در آن $f_i(x)$ ، $\phi_j(x)$ و $\psi_k(x)$ توابع بردار طراحی زیر هستند:

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$$

به این صورت که مولفه‌های x_i متغیرهای تصمیم یا طراحی نامیده می‌شوند. این متغیرها می‌توانند پیوسته‌ی حقیقی، گسسته و یا ترکیبی از هر دو باشند. $(i = 1, 2, 3, \dots, M)$ ، توابع هدف تعریف‌شده و بطوریکه برای $M = 1$ تنها یک تابع هدف وجود دارد. اندازه‌ی فضای اختصاص‌یافته به متغیرهای طراحی، فضای طراحی (یا فضای جستجو) $(\mathbb{R}^n)$ ، و فضای شکل‌گرفته توسط مقادیر توابع هدف، فضای پاسخ (یا فضای حل) نامیده می‌شود. تساوی‌ها با $\phi_j(\mathbf{x})$ و نامساوی‌ها با $\psi_k(\mathbf{x})$ بیانگر قیدهای مسئله است. همه‌ی مسائل بهینه‌یابی یا بهینه‌سازی را می‌توان به شکل صریح یا غیرصریح به صورت ریاضی گفته‌شده بیان کرد. به عنوان نمونه مسئله‌ی طراحی موتور اتومبیل با بالاترین کارایی ممکن سوخت و کمترین انتشار کربن را به راحتی نمی‌توان به صراحت ریاضیاتی بیان کرد؛ یا تصور کنید می‌خواهید بیشترین لذت را از یک تعطیلات پایان هفته با گذراندن حداقل زمان ببرید. البته مسائلی مانند آنچه در این پایان‌نامه با آن سر و کار داریم، الگوریتم‌هایی است که توابع هدف به کاررفته برای حل آن‌ها صریح می‌باشد.

هدف: یک هدفه و چندهدفه	انواع بهینه‌سازی بر اساس ملاک ارزیابی
قیود: مقید و نامقید	
زاویه دید: یک نمایی (محدب) و چندنمایی	
رفتار تابع: خطی و غیر خطی	
متغیر/پاسخ: گسسته و پیوسته و مختلط	
قطعی ^۱ : غیر تصادفی (قطعی) و تصادفی	

^۱ Determinacy

از میان طبقه‌بندی‌های فوق، ارزیابی مسئله براساس قطعیت از بیشترین اهمیت برخوردار است. در حقیقت همه‌ی انواع طبقه‌بندی‌های دیگر، نوعی بهینه‌سازی قطعی محسوب می‌شوند. اما در عموم مسائل مهندسی با حالتی روبرو هستیم که مقادیر متغیرهای طراحی و تابع هدف غیر دقیق هستند؛ در حقیقت عدم قطعیت(هایی) در صحت این مقادیر وجود دارد. بواسطه‌ی این اختلال یا عدم قطعیت، مسئله‌ی ما تبدیل به مسئله‌ی بهینه‌سازی غیر قطعی(تصادفی) می‌شود.

به زبان تمثیل، جستجو برای یافتن حل بهینه مانند جستجوی گنج است. تصور کنید در تکاپوی یافتن گنجی مدفون در چشم‌انداز تپه‌ای آن هم در مدتی محدود باشیم. در حالتی بعید فرض کنید چشم بسته و بدون هیچ راهنمایی باشیم؛ به ناچار روند جستجو ماهیتی کاملاً تصادفی خواهد داشت که همان‌طور که انتظار می‌رود معمولاً بی نتیجه می‌ماند. در حالت بعید دیگری اگر گفته شود که گنج در بالاترین نقطه از مکانی مشخص واقع شده، ما مستقیماً از طریق تندترین صخره صعود برای رسیدن به آن نقطه را پی خواهیم گرفت. این سناریو به روش‌های تپه‌نوردی کلاسیک مربوط خواهد بود. در بیشتر موارد، جستجوی ما چیزی میان دو حالت بالاست؛ ما نه چشم‌بسته‌ایم و نه می‌دانیم که دقیقاً کجا را باید جستجو کنیم. جستجوی هر یک مترمربع از تپه‌های بلند نیز ایده‌ای ناب‌خردانه است. در این‌گونه موارد، اغلب، مدتی به دنبال نشانه با هر چیز جزئی دیگر بطور نامنظمی چرخ می‌زنیم؛ به‌طور تصادفی بعضی جاها را مورد جستجو قرار می‌دهیم؛ سپس جایی دیگر که محتمل به نظر می‌رسد و به همین ترتیب. این گردش تصادفی، یکی از مشخصه‌های اصلی الگوریتم‌های جستجوی مدرن است. بدیهی است که می‌توانیم جستجوی گنج را به‌تنهایی انجام دهیم که شبیه‌سازی تبرید^۱ از آن‌گونه می‌باشد. از سوی دیگر می‌توانیم از گروهی از افراد بخواهیم تا به جستجو بپردازند و اطلاعاتشان(گنج) را به اشتراک بگذارند. این سناریو از به اصطلاح هوش ازدحامی^۲ بهره می‌گیرد و به بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۳ منجر می‌شود. به‌وضوح درمی‌یابیم که می‌توان استراتژی جستجو را کمی بیش از این پالایش

^۱ Simulated Annealing(SA)

^۲ Swarm Intelligence

^۳ Particle Swarm Optimization(PSO)

نمود؛ بعضی از جویندگان گنج بهتر از دیگران اند، ما می‌توانیم آنان و نیز نیروهای تازه‌نفس را به کار گیریم. این ساز و کار چیزی شبیه به الگوریتم ژنتیک یا الگوریتم‌های تکاملی¹ می‌باشد که در آن عوامل جستجو دائم در حال بهبود کارائی هستند. در حقیقت تقریباً در همه‌ی الگوریتم‌های فرااکتشافی مدرن، ما به دنبال بهترین جواب‌ها(عوامل) و تصادفی(جابجا) کردن عوامل نه چندان خوب، در حین ارزیابی صلاحیت هر فرد(قابلیت)، در ترکیب با تاریخچه سیستم هستیم.

همان‌طور که اشاره شد، الگوریتم‌های بهینه‌سازی را می‌توان به دو گروه کلی تقسیم کرد: الگوریتم‌های قطعی و الگوریتم‌های غیر قطعی(تصادفی). الگوریتم‌های قطعی فرایندی سخت را دنبال می‌کنند که مسیر و مقادیر متغیرهای طراحی و توابع هدف آن تکرارپذیر است. به‌عنوان نمونه صعود از راه تپه، یک الگوریتم قطعی محسوب می‌شود و برای نقطه‌ی آغازی یکسان، مسیری یکسان را دنبال می‌کند؛ حال فرقی نمی‌کند که شما امروز مسیر را بپیمایید یا فردا. از طرف دیگر، الگوریتم‌های غیر قطعی همواره میزانی از تصادفی بودن را دارا هستند. ژنتیک الگوریتم، مثال خوبی از این دسته است. رشته‌ها(یا حل‌ها) در میان جمعیت، در هر دفعه اجرای برنامه، متفاوت خواهد بود؛ چرا که این الگوریتم‌ها هر بار از شماره‌های تصادفی کاذبی استفاده می‌نمایند. با وجود این، نتایج نهایی تفاوت چندانی را نشان نخواهد داد، اما مسیرهای هر فرد دقیقاً تکرار پذیر نیستند.

اغلب الگوریتم‌های متعارف یا کلاسیک، قطعی هستند. برخی از این الگوریتم‌های بهینه‌سازی از معلومات گرادیانی بهره می‌گیرند که به آن‌ها در اصطلاح، الگوریتم‌های مبتنی بر گرادیان گفته می‌شود. برای نمونه الگوریتم نیوتون-رافسون از این سری شمرده می‌شود، چرا که از مقادیر تابع و نیز مشتقات آن استفاده می‌کند. این الگوریتم‌ها برای توابع هدف ناپیوسته قابل استفاده نمی‌باشد. دسته‌ای دیگر از الگوریتم‌ها که اصطلاحاً الگوریتم‌های غیر مبتنی بر گرادیان(یا مستقل از گرادیان) خوانده می‌شود، تنها مقدار تابع هدف را دخالت می‌دهد نه مشتقات را؛ روش شیب‌دار نلدِر-مید از آن‌گونه است. الگوریتم‌های

¹ Evolutionary Algorithms

تصادفی نیز با وجود تفاوت اندک به دو گونه طبقه بندی می‌شوند: اکتشافی و فرا اکتشافی^۱. از نظر واژگانی، هیورستیک^۲ «پی بردن» یا «کشف کردن با سعی و خطا» معنی می‌شود. ممکن است راه حل های کیفی برای یک مسئله بهینه سازی معطوف به میزان قابل قبولی از زمان باشد. در حقیقت دستیابی به جواب های زیر بهینه در مدت زمان قابل پذیرش به جای جواب بهینه در مدت زمان نامحدود به عنوان کیفیتی قابل قبول برای حل مسائل پیچیده و بزرگ بهینه سازی محسوب می‌شود. با این حال مسائل این چینی با الگوریتم های اکتشافی همیشه نیز به راه حل های بهینه منتهی نمی‌شود. به عبارت دقیق تر ضمانتی وجود ندارد که جواب بهینه به دست آید؛ اما تجربه نشان می‌دهد که این الگوریتم ها در بیشتر موارد خوب عمل می‌کنند. پیشبرد و بسط الگوریتم های اکتشافی به اصطلاحاً- الگوریتم های متا هیورستیک (فرا اکتشافی) ختم می‌شود. «متا» در اینجا به معنای فراتر و در سطحی بالاتر تعبیر می‌شود و متاهیورستیک ها عموماً بهتر از هیورستیک های معمولی عمل می‌کنند.

بیشتر الگوریتم های فرا اکتشافی الهام گرفته از طبیعت اند، چرا که بر اساس شماری از خصوصیات ذاتی طبیعت توسعه یافته اند. طبیعت عمری میلیون ها ساله را پشت سر گذارده و از این نظر راه حل هایی تمام عیار و بی عیب برای غلبه بر مسائل پیش رویش یافته است. بنابراین ما می‌توانیم هنر حل مسئله را از طبیعت آموخته و الگوریتم های اکتشافی و فرا اکتشافی ملهم از طبیعت را ایجاد کنیم.

دو جزء مهم هر الگوریتم فرا اکتشافی عبارت اند از: انتخاب بهترین جواب و تصادفی سازی. انتخاب بهترین، ضامن همگرایی جواب ها به سمت بهینگی است، در حالی که تصادفی سازی از افتادن جواب ها در بهینه های محلی جلوگیری می‌کند. و همزمان تنوع جواب ها را بالا می‌برد. ترکیب خوبی از دو جزء اخیر، معمولاً دستیابی به بهینگی کلی را حتمی می‌سازد [7]. از میان الگوریتم های فرا اکتشافی مدرن می‌توان به الگوریتم ژنتیک (GA)، بهینه سازی اجتماع مورچگان (ACO)، الگوریتم زنبور (BA)، شبیه سازی

¹- Meta Heuristic

²- Heuristic

تبرید (SA)، جستجوی هارمونی (HS) بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، و در نهایت الگوریتم کرم شب‌تاب (FA)، به‌عنوان شناخته‌شده‌ترین آن‌ها اشاره کرد.

۳-۲-۱ الگوریتم‌های فرا ابتکاری

۳-۲-۱-۱ الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات (Particle Swarm Optimization)

جیمز کندی، روانشناس اجتماعی و راسل سی ابرهات، مهندس برق صاحبان اصلی ایده‌ی الگوریتم PSO می‌باشند. آن‌ها در ابتدا قصد داشتند با بهره‌گیری از مدل‌های اجتماعی و روابط موجود اجتماعی، نوعی از هوش محاسباتی را بوجود آورند که به توانایی فردی ویژه‌ای نیاز نداشته باشد. کار کندی و ابرهات، منجر به ایجاد الگوریتمی قوی برای بهینه‌سازی به نام الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات شد. در این الگوریتم تعدادی از موجودات وجود دارند که به آن‌ها ذره گفته می‌شود و در فضای جستجوی تابعی که قصد بهینه کردن مقدار آن را داریم، پخش شده‌اند. هر ذره، مقدار تابع هدف را در موقعیتی از فضا که در آن قرار گرفته‌است، محاسبه می‌کند. سپس با استفاده از ترکیب اطلاعات محل فعلی‌اش و بهترین محلی که در گذشته در آن بوده‌است و همچنین اطلاعات یک یا چند ذره از بهترین ذرات موجود در جمع، جهتی را برای حرکت انتخاب می‌کند. همه‌ی ذرات جهتی برای حرکت انتخاب می‌کنند و پس از انجام حرکت، یک مرحله از الگوریتم به پایان می‌رسد. این مراحل چندین بار تکرار می‌شوند تا آنکه پاسخ موردنظر به دست آید. درواقع انبوه ذرات که مقدار کمینه‌ی یک تابع را جستجو می‌کنند، همانند دسته‌ای از پرندگان عمل می‌کنند که به دنبال غذا می‌گردند.

هر ذره در الگوریتم PSO از سه بردار d بُعدی تشکیل شده است که d ، بُعد فضای جستجو می‌باشد. برای ذره‌ی i ام این سه بردار عبارت‌اند از: x^i موقعیت فعلی ذره، v^i سرعت حرکت ذره و $x^{i, best}$ بهترین موقعیتی که ذره تا بحال تجربه کرده‌است. x^i مجموعه‌ای از مختصات است که موقعیت فعلی ذره را نشان می‌دهد. در هر مرحله‌ای که الگوریتم تکرار می‌شود، x^i به‌عنوان یک پاسخ برای

مسئله محاسبه می‌شود. اگر این موقعیت بهتر از پاسخ‌های پیشین باشد در $x^{i, best}$ ذخیره می‌شود. f^i مقدار تابع هدف در x^i و $f^{i, best}$ مقدار تابع هدف در $x^{i, best}$ است که هر دو از عناصر تشکیل دهنده‌ی هر ذره به حساب می‌آیند. ذخیره کردن مقدار $f^{i, best}$ برای انجام مقایسه‌های بعدی، ضروری است. اما ذخیره کردن مقدار f^i ضروری نمی‌باشد. در هر تکرار x^i و v^i جدیدی به دست می‌آیند و منظور از اجرای الگوریتم، بهتر کردن $x^{i, best}$ است.

الگوریتم PSO چیزی فراتر از یک مجموعه‌ی ذرات است. هیچ‌کدام از ذرات، قدرت حل هیچ مسئله‌ای را ندارند، بلکه هنگامی می‌توان به حل مسئله امیدوار شد که آن‌ها با یکدیگر ارتباط و تعامل داشته باشند. درواقع برای انبوه ذرات، حل مسئله یک مفهوم اجتماعی است که از رفتار تک تک ذرات و تعامل میان آن‌ها به وجود می‌آید. بهترین موقعیتی که به وسیله‌ی همه‌ی ذرات پیدا شده است، به صورت x^{gbest} نشان داده می‌شود که با مقایسه‌ی مقادیر $f^{i, best}$ به ازای همه‌ی ذرات و از میان $x^{i, best}$ ها انتخاب می‌شود. مقدار تابع هدف در x^{gbest} به صورت f^{gbest} نشان داده می‌شود. اگر تعداد ذرات موجود در جمعیت، n باشد، آن‌گاه می‌توان روابط زیر را نوشت [7]:

$$x^{i, best}[t] = \arg \min f(x^i[\tau]) = \arg \min \{f(x^i[t]), f(x^{i, best}[t-1])\} \quad (1-3)$$

$$f^{i, best}[t] = f(x^{i, best}[t]) = \min f^i[\tau] = \min \{f^i[t], f^{i, best}[t-1]\} \quad (2-3)$$

$$x^{gbest}[t] = \arg \min f(x^{i, best}[t]) \quad (3-3)$$

$$f^{gbest}[t] = f(x^{gbest}[t]) = \min f^{i, best}[t] \quad (4-3)$$

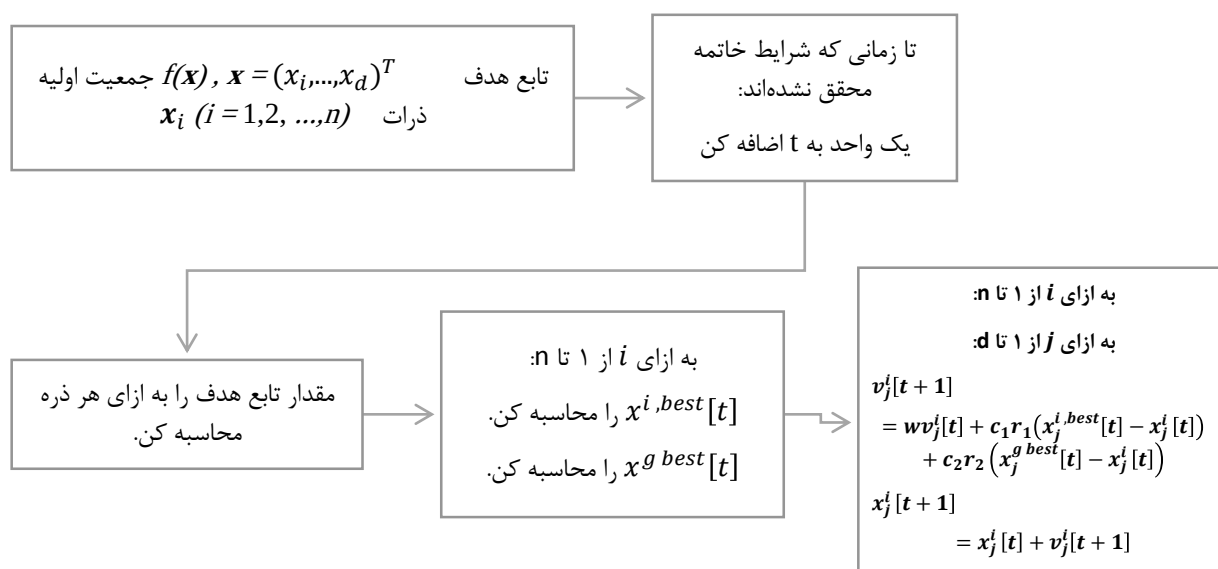
در مرحله‌ی ابتدایی الگوریتم، ذرات با موقعیت‌ها و سرعت‌های تصادفی ایجاد می‌شوند. در طی اجرای الگوریتم، موقعیت و سرعت ذره در مرحله‌ی $t + 1$ ام از الگوریتم، از روی اطلاعات مرحله‌ی قبلی ساخته می‌شوند. اگر Z_j مولفه‌ی j ام از بردار Z باشد، آن‌گاه روابطی که سرعت و موقعیت ذرات را تغییر می‌دهند، عبارتند از

$$v_j^i[t+1] = wv_j^i[t] + c_1r_1(x_j^{i,best}[t] - x_j^i[t]) + c_2r_2(x_j^{g,best}[t] - x_j^i[t]) \quad (5-3)$$

$$x_j^i[t+1] = x_j^i[t] + v_j^i[t+1] \quad (6-3)$$

در این روابط، w ضریب اینرسی، r_1 و r_2 اعدادی تصادفی در بازه‌ی $[0,1]$ با توزیع یکنواخت و هم چنین c_1 و c_2 ضرایب یادگیری هستند. r_1 و r_2 باعث می‌شوند که نوعی گوناگونی در پاسخ‌ها به وجود آید و به این ترتیب جستجوی کاملی روی فضا صورت پذیرد. c_1 ضریب یادگیری مربوط به تجارب شخصی هر ذره است و در مقابل c_2 ضریب یادگیری مربوط به تجارب کل جمع می‌باشد. از معادلات اخیر می‌توان دریافت که هر ذره به هنگام حرکت، (الف) جهت حرکت قبلی خود، (ب) بهترین موقعیتی را که در آن قرار داشته‌است و (پ) بهترین موقعیتی را که به‌وسیله‌ی کل جمع تجربه شده است، را در نظر می‌گیرد.

فلوچارت بهینه‌سازی انبوه ذرات



۳-۲-۱-۲ الگوریتم کرم شب تاب (FireFly Algorithm)

یکی از الگوریتم‌های فرااکتشافی نسبتاً جدید که توسط آقای ژین شه یانگ^۱ در سال ۲۰۰۷، معرفی شده است، الگوریتم کرم شب تاب می‌باشد؛ این الگوریتم بر اساس خاصیت جذب^۲ کرم‌های شب تاب، بخاطر انرژی نوری که منتشر می‌کنند، عمل می‌کند.

۳-۲-۱-۲ رفتار کرم شب تاب

روشنایی تلالو مانند کرم‌های شب تاب در شب‌های تابستان در مناطق استوایی جلوه‌ای تماشایی دارد. در حدود ۲۰۰۰ گونه‌ی کرم شب تاب وجود دارد که بیشتر آن‌ها تلالویی کوتاه و موزون تولید می‌کنند. الگوی این تلالوها برای هر گونه‌ی مشخص، منحصر به فرد می‌باشد. این نورهای تلالو آمیز طی فرایندی زیست تابی^۳ تولید می‌شود و ساز و کار حقیقی این سیستم‌های سیگنالی هنوز در پرده‌ی ابهام قرار دارد. باین حال دو کارکرد اساسی آن‌ها، یکی ایجاد جاذبه در جنس مخالف خود برای جفت گیری و دیگری به کارگیری آن به عنوان سیستمی دفاعی در برابر مهاجمان و شکارچیان است. موزونی اشعه‌ها، میزان تشعشع و مدت زمان آن بخشی از سیستم سیگنالی است که منجر به جذب دو جنس مخالف کرم می‌شود. کرم‌های ماده‌ی یک گونه، تنها به الگوی نوردهی منحصر به همان گونه واکنش نشان می‌دهند.

می‌دانیم که شدت نور I ، در نقطه‌ای به فاصله‌ی مشخص r از منبع نور نقطه‌ای، تابعی از مجذور معکوس آن فاصله است. افزون بر این هوا با جذب نور، سبب کاهش شدت آن با افزایش فاصله می‌شود. این دو عامل، ما را قادر به دیدن کرم‌ها تنها در فاصله‌ای نزدیک از آن‌ها می‌نماید. معمولاً در شب کرم‌ها در فاصله‌ی چند صد متری قادر به برقراری ارتباط با یکدیگرند. می‌توان اشعه‌های نور کرم‌های شب تاب

^۱- Xin She Yang

^۲- Attractiveness

^۳- bioluminescence

را به طریقی مرتبط با تابع هدف کمینه فرمول‌بندی کرد؛ بدین ترتیب فرمول‌بندی الگوریتم‌های بهینه‌سازی جدیدی ممکن خواهد شد.

۲-۲-۱-۲-۳ اصول الگوریتم کرم شب تاب

نخست باید برخی از خصوصیات شب‌تاب را ایده‌آل‌سازی کنیم. سه قاعده ایده‌آلی زیر را مبنا قرار می‌دهیم:

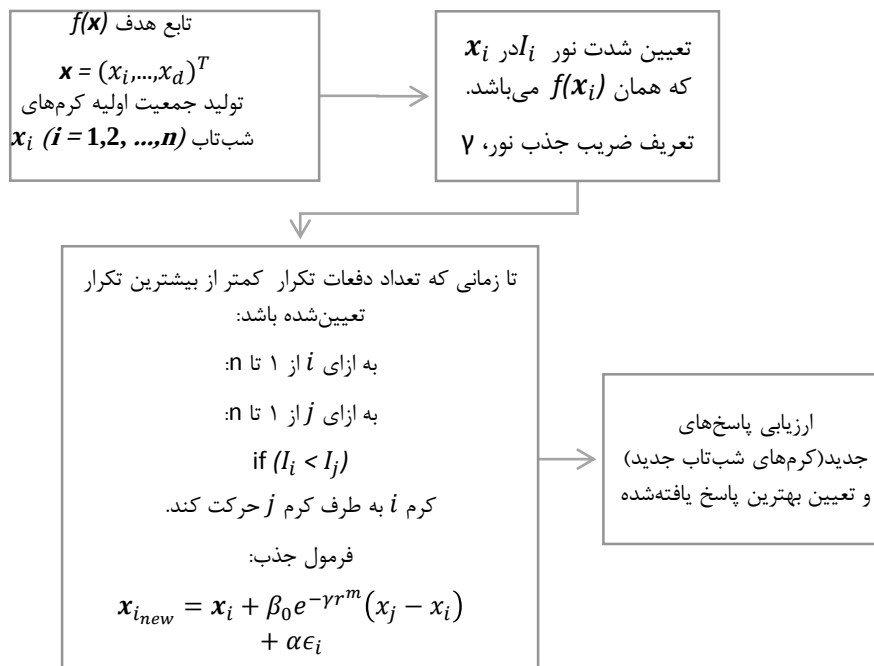
- همه‌ی شب‌تاب‌ها تک جنسی هستند؛ یعنی همه‌ی آن‌ها، بدون توجه به جنسیت به یکدیگر جذب می‌شوند.
- جذابیت شب‌تاب‌ها با درخشندگی آن‌ها متناسب است؛ پس برای هر دو شب‌تاب، کرم درخشنده‌تر، دیگری را به سمت خود جذب می‌کند. جذابیت و درخشندگی با هم رابطه‌ی مستقیم و هر دو با فاصله نسبت عکس دارند. اگر یک شب‌تاب در موقعیتی باشد که هیچ شب‌تابی درخشنده‌تر از آن نباشد، به‌طور تصادفی حرکت خواهد کرد.
- درخشندگی هر شب‌تاب از دیدگاه تابع هدف، تعیین‌شده یا تغییر داده می‌شود. برای نمونه، برای یک مسئله بهینه‌سازی^۱ به راحتی درخشندگی را متناسب با مقدار تابع هدف منظور می‌کنیم. شکل‌های دیگری از درخشندگی را می‌توان به طریق مشابه تابع تناسب^۲ در بحث الگوریتم ژنتیک تبیین کرد.

براساس این قواعد گام‌های اساسی الگوریتم کرم شب‌تاب را می‌توان چنین خلاصه کرد:

فلوچارت کرم شب تاب

^۱- Maximization

^۲- fitness function



۳-۲-۱-۲-۳ شدت نور و جذابیت

در الگوریتم کرم شب‌تاب دو موضوع مهم وجود دارد: یکی تغییرپذیری شدت نور و دیگری فرمول‌بندی جذابیت. برای سادگی ما فرض می‌کنیم جذابیت هر کرم شب‌تاب به وسیله‌ی درخشندگی^۱ آن تعیین می‌شود.

در ساده‌ترین حالت، برای مسائل بهینه‌سازی بیشینه، درخشندگی کرم شب‌تاب، I ، در هر موقعیت مشخص x را می‌توان با $I(x)$ که متناسب است با $f(x)$ ، نشان داد. با وجود این، جذابیت، β ، پارامتری نسبی است؛ بطوریکه باید از منظر ناظر (یا بنابر قضاوت دیگر کرم‌ها) نگریسته شود. بنابراین جذابیت به نسبت فاصله r_{ij} ، بین کرم‌های i و j تغییر می‌کند. افزون بر این، شدت نور با فاصله گرفتن از منبع کاهش می‌یابد و بخشی از نور نیز در واسطه‌های میان منبع و نقطه‌ی موردنظر جذب می‌شود؛ ازین رو بایستی بگذاریم جذابیت با درجه‌ای از جذب^۲ نیز تغییر کند.

^۱- Brightness

^۲- Absorption

در ساده‌ترین شکل، شدت نور $I(r)$ طبق نسبت معکوس مجذور فاصله تغییر می‌کند:

$$I(s) = \frac{I_s}{r^2} \quad (۷-۳)$$

که در آن $I(s)$ شدت نور در منبع نور است. برای یک منبع نور نقطه‌ای با ضریب جذب ثابت γ ، شدت نور I با فاصله‌ی r به‌صورت زیر تغییر می‌کند:

$$I = I_0 e^{-\gamma r} \quad (۸-۳)$$

که در آن I_0 شدت نور اولیه است. برای اجتناب از تکین شدن^۱ در نقطه‌ی $r=0$ در عبارت $\frac{I_s}{r^2}$ ، اثر ترکیبی قاعده‌ی مجذور معکوس و جذب به فرم گوسی زیر تقریب زده می‌شود:

$$I(r) = I_0 e^{-\gamma r^2} \quad (۹-۳)$$

از آنجایی که جذابیت هر کرم شب‌تاب متناسب است با شدت نور مشاهداتی توسط کرم مجاور، اکنون می‌توانیم جذابیت β را برای هر کرم شب‌تاب تعریف کنیم:

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (۱۰-۳)$$

که در آن β_0 ، جذابیت در $r=0$ می‌باشد. غالباً با تبدیل عبارتِ نمایی به عبارت $\frac{1}{1+r^2}$ محاسبه سریع‌تر می‌گردد. پس تابع بالا، بنا به نیاز می‌تواند به‌صورت تقریبی زیر نوشته شود:

$$\beta = \frac{\beta_0}{1+\gamma r^2} \quad (۱۱-۳)$$

معمولاً برای دو رابطه‌ی اخیر، مشخصه‌ای از جنس فاصله به‌صورت $\Gamma = \frac{1}{\sqrt{\gamma}}$ تعریف می‌کنند که بینش روشن‌تری در مقابل γ ، در مورد ماهیت جذب به ما می‌دهد؛ چرا که Γ بر حسب فاصله یا طول است

^۱- Singularity

و حد نهایی آن یعنی بیشترین فاصله، کمترین میزان جذب نور را به دست می‌دهد. بر این اساس مقادیر

فوق برای عبارات بالا به ترتیب $e^{-\gamma r^2} = e^{-1}$ و $\frac{1}{1+\gamma r^2} = \frac{1}{2}$ به دست می‌آید.

در وضعیت تعمیم یافته‌ی تابع جذابیت، $\beta(r)$ می‌تواند هر تابع کاهشی یکنواختی مانند رابطه‌ی زیر

باشد:

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r^m}, \quad (m \geq 1) \quad (12-3)$$

هرچه مقدار m بزرگتر باشد، جذابیت با سرعت بیشتری افت می‌کند یا به عبارتی در مسئله بهینه‌سازی پاسخ محلی‌تر می‌شود.

برای مقدار ثابت γ ، طول مشخصه برابر می‌شود با

$$\Gamma = \gamma^{-\frac{1}{m}} \quad (13-3)$$

به‌طور وارونه برای مقیاس طول داده شده‌ی Γ ، در یک مسئله‌ی بهینه‌سازی، پارامتر γ را می‌توان به‌عنوان مقدار اولیه‌ی نمونه اختیار کرد:

$$\gamma = \frac{1}{\Gamma^m} \quad (14-3)$$

فاصله‌ی بین هر دو کرم شبتاب i و j در x_i و x_j برای حالت ۲ بعدی از رابطه‌ی آشنای

$$r_{ij} = \|x_i - x_j\| = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (15-3)$$

به دست می‌آید.

جابجایی کرم i که به کرم j با جاذبه‌ی بیشتر، متمایل می‌شود از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$x_{i_{new}} = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r^m} (x_j - x_i) + \alpha \epsilon_i \quad (16-3)$$

که در آن عبارت دوم ناشی از جاذبه^۱ می‌باشد. عبارت سوم، عامل تصادفی‌سازی^۲، α پارامتر تصادفی آن و ϵ_i برداری از اعداد با توزیع تصادفی یکنواخت و یا گوسی است. تصادفی کردن پاسخ، در راستای ایجاد جهش و تنوع‌پذیر کردن پاسخ‌ها دخالت داده می‌شود.

برای بیشتر کاربردهای ما، $\beta_0 = 1$ و $\alpha \in [0, 1]$ در نظر گرفته می‌شود. پارامتر دیگر، γ است که نوسانات جذابیت را توصیف می‌کند و مقدار آن در تعیین سرعت همگرایی و درک رفتار الگوریتم کرم شب‌تاب شدیدا اهمیت دارد. در تئوری مسئله این ضریب در فاصله‌ی $\gamma \in [0, \infty)$ انتخاب می‌شود؛ اما در عمل براساس بهینه‌یابی، طول مشخصه‌ی سیستم (Γ) ، یعنی $\gamma = O(l)$ تعیین می‌شود. بنابراین در بیشتر کاربردها، مقدار آن نوعا بین ۰٫۱ تا ۱۰ تغییر می‌کند.

شایان ذکر است که فاصله‌ی r تعریف شده در رابطه بالا، محدود به فاصله‌ی اقلیدوسی نمی‌باشد. می‌توان بسته به نوع مسئله‌ی بهینه‌سازی موردنظر، فواصل r دیگری در فضاها n بعدی تعریف کرد. در حقیقت هر اندازه‌ای که بتواند به‌طور موثری چند و چون بهره را در مسائل بهینه‌سازی توصیف نماید، قابل استفاده به‌عنوان «فاصله‌ی r » خواهد بود. مقیاس نوعی Γ ، باید با مقیاس مربوط به مسئله بهینه‌سازی مرتبط باشد. اگر Γ ، مقیاس نوعی برای مسئله‌ی بهینه‌سازی مفروضی باشد، برای تعداد بسیار زیاد کرم شب‌تاب n که $n \gg m$ و m ، تعداد بهینه‌های محلی باشد، آنگاه موقعیت اولیه‌ی آن کرم‌ها باید با نسبتی یکنواخت در کل فضای جستجو توزیع گردد. به‌عنوان فرایند تکرارها، کرم‌ها بایستی به همه‌ی بهینه‌های محلی همگرا شوند. با مقایسه‌ی بهترین پاسخ‌ها، در میان همه‌ی بهینه‌ها، بهینه‌ی کلی به راحتی به دست خواهد آمد [7].

¹- Attraction

²-Randomization

۳-۳ مدل اجزای محدود دینامیکی

در به روزرسانی مدل اجزای محدود دینامیکی، معمولاً خواص مودال یعنی فرکانس طبیعی و شکل مودی به کار گرفته می شود. از این رو این پارامترها باید تشریح شوند. خصوصیات مودال با ویژگی های فیزیکی سازه مرتبط است. همه ی سازه های الاستیک توسط عباراتی از ماتریس های جرم، میرایی و سختی توزیع یافته، در حوزه ی زمان به شرح زیر توصیف می شوند:

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{F\} \quad (۱۷-۳)$$

که در آن $[M]$ ماتریس جرم، $[C]$ ماتریس میرایی، $[K]$ ماتریس سختی سازه و $\{X\}$ ، $\{\dot{X}\}$ و $\{\ddot{X}\}$ به ترتیب بردارهای جابجایی، سرعت و شتاب، و نهایتاً $\{F\}$ بردار نیروی اعمالی به سیستم است.

اگر معادله ی فوق در حوزه ی مودال تبدیل شود، می توان برای مود i ام یک معادله ی مقدار ویژه تشکیل داد، سپس:

$$(-\bar{\omega}_i^2[M] + j\bar{\omega}_i[C] + [K])\{\bar{\Phi}\}_i = \{0\} \quad (۱۸-۳)$$

که در آن $j = \sqrt{-1}$ و $\bar{\omega}_i$ مقدار ویژه ی مختلط i ام است. در این معادله قسمت حقیقی $\{\bar{\Phi}\}_i$ به شکل مودی نرمالایز شده $\{\Phi\}_i$ باز می گردد، درحالی که قسمت موهومی $\bar{\omega}_i$ ، فرکانس طبیعی ω_i را مربوط می کند. از این معادله می توان دریافت که تغییر در ماتریس های جرم و سختی سبب تغییرات در خصوصیات مودال سازه می شود.

با در نظر گرفتن فرم ارتعاش آزاد سازه و صرف نظر کردن از میرایی، معادله ی فوق را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$[M]\{\ddot{X}\} + [K]\{X\} = 0 \quad (۱۹-۳)$$

با حل معادله ی دیفرانسیل فوق، پاسخ سیستم به صورت زیر در می آید:

$$\{X(t)\} = \{a\} \sin(\omega t + \theta) \quad (۲۰-۳)$$

که در آن، $\{a\}$ بردار دامنه‌ی ارتعاش بوده و ω و θ به ترتیب مقادیر فرکانس طبیعی و زاویه‌ی اختلاف فاز سیستم می‌باشد. با مشتق‌گیری از جواب حاصله و جایگذاری آن در معادله داریم:

$$-[M]\omega^2\{a\} \sin(\omega t + \theta) + [K]\{a\} \sin(\omega t + \theta) = 0 \quad (۲۱-۳)$$

که از آن:

$$[-[M]\omega^2 + [K]]\{a\} = 0 \quad (۲۲-۳)$$

در صورتی معادله‌ی بالا دارای جواب منحصر به فرد است که دترمینان ماتریس ضرایب برابر با صفر باشد، یعنی:

$$|-[M]\omega^2 + [K]| = 0 \quad (۲۳-۳)$$

از حل معادله‌ی بالا، مقادیر فرکانس‌های طبیعی برای مودهای ارتعاشی آن محاسبه می‌شود. سپس با جایگذاری مقادیر فرکانس طبیعی در معادله‌ی (۲۲-۳) می‌توان بردار اشکال مودی متناظر را محاسبه نمود. به بیانی دیگر با محاسبه‌ی مقادیر ویژه و بردارهای ویژه‌ی ماتریس سختی و جرم می‌توان مقادیر فرکانس‌های طبیعی و ماتریس مودال را به دست آورد:

$$[\Phi] = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \dots & \phi_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{n1} & \dots & \phi_{nn} \end{bmatrix} = [\{\phi_1\} \quad \{\phi_2\} \quad \dots \quad \{\phi_n\}] \quad (۲۴-۳)$$

که n معرف تعداد درجات آزادی سازه است [8].

۳-۴ مدل سازی اجزای محدود

با گسترش رایانه های مدرن با قابلیت پردازش ماتریس های بزرگ، ساخت مدل های عددی بغرنج و خیلی بزرگ ممکن شده است. یکی از شناخته شده ترین این مدل ها، مدل اجزای محدود می باشد. از سوی دیگر به دلیل محدودیت ذهن انسان در درک محیط پیچیده ی خود به صورت یکجا، همواره سعی شده است تا سیستم ها به اجزای کوچکتری که قابل درک هستند، تجزیه شود. شناخت این المان های ساده تر و باز چینی آن ها به صورتی که سیستم اصلی را تولید نماید، روشی است برای شناخت و بررسی رفتار سیستم های پیچیده که روش اجزای محدود نام گرفته است [6].

با این مفهوم در بحث مهندسی برای بررسی یک سازه آن را به المان هایی که بررسی رفتار آن ها ساده و قابل فهم می باشد، تبدیل کرده و با در نظر گرفتن شرایط پیوستگی بین المان ها می توان به شناسایی رفتار سازه دست یافت.

در به روز رسانی اجزای محدود بایستی مدلی از سازه ی واقعی را به صورت عددی ساخت. در این پایان نامه مدل های عددی شامل تیر، قاب و خرپا می باشد؛ در ادامه چگونگی مدل سازی المان های این سازه ها آورده شده است.

تیرها با فرضیات تیر اولر-برنولی در نظر گرفته شده است؛ از این رو از تغییر شکل های برشی و محوری در المان تیری صرف نظر شده است. مقادیر سختی خمشی و جرم واحد طول در کل سازه ثابت در نظر گرفته می شود؛ یعنی سازه منشوری می باشد. بنابراین ماتریس های سختی و جرم المان تیر به صورت زیر می باشند:

$$[K^e] = \frac{EI}{l_e^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l_e & -12 & 6l_e \\ 6l_e & 4l_e^2 & -6l_e & 2l_e^2 \\ -12 & -6l_e & 12 & -6l_e \\ 6l_e & 2l_e^2 & -6l_e & 4l_e^2 \end{bmatrix} \quad (۳-۲۵)$$

$$[M^e] = \frac{\rho A_e l_e}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22l_e & 54 & -13l_e \\ 22l_e & 4l_e^2 & 13l_e & -3l_e^2 \\ 54 & 13l_e & -3l_e^2 & -22l_e \\ -13l_e & -3l_e^2 & -22l_e & 4l_e^2 \end{bmatrix} \quad (26-3)$$

ماتریس سختی و جرم المان‌های خرپایی در مختصات کلی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$[K^e] = \frac{EI}{l_e} \begin{bmatrix} p^2 & pm & -p^2 & -pm \\ pm & m^2 & -pm & -m^2 \\ -p^2 & -pm & p^2 & pm \\ -pm & -m^2 & pm & m^2 \end{bmatrix} \quad (27-3)$$

$$p = \frac{x_2 - x_1}{l_e}, \quad m = \frac{y_2 - y_1}{l_e} \quad (28-3)$$

$$[M^e] = \frac{\rho A_e l_e}{6} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (29-3)$$

برای المان قاب، ماتریس سختی و جرم به صورت زیر محاسبه می‌شود. این ماتریس‌ها می‌بایست با

ماتریس تبدیل مختصات، $[L]$ ، به مختصات کلی انتقال یابند:

$$[K^e] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l_e} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l_e} & 0 & 0 \\ 0 & 12\frac{EA}{l_e^3} & 6\frac{EA}{l_e^2} & 0 & -12\frac{EA}{l_e^3} & 6\frac{EA}{l_e^2} \\ 0 & 6\frac{EA}{l_e^2} & 4\frac{EA}{l_e} & 0 & -6\frac{EA}{l_e^2} & 2\frac{EA}{l_e} \\ -\frac{EA}{l_e} & 0 & 0 & \frac{EA}{l_e} & 0 & 0 \\ 0 & -12\frac{EA}{l_e^3} & -6\frac{EA}{l_e^2} & 0 & 12\frac{EA}{l_e^3} & -6\frac{EA}{l_e^2} \\ 0 & 6\frac{EA}{l_e^2} & 2\frac{EA}{l_e} & 0 & -6\frac{EA}{l_e^2} & 4\frac{EA}{l_e} \end{bmatrix} \quad (30-3)$$

$$[M^e] = \begin{bmatrix} 2a & 0 & 0 & a & 0 & 0 \\ 0 & 156b & 22l_e b & 0 & 54b & -13l_e b \\ 0 & 22l_e b & 4l_e^2 b & 0 & 13l_e b & -3l_e^2 b \\ a & 0 & 0 & 2a & 0 & 0 \\ 0 & 54b & 13l_e b & 0 & 156b & -22l_e b \\ 0 & -13l_e b & -3l_e^2 b & 0 & -22l_e b & 4l_e^2 b \end{bmatrix}$$

(۳۱-۳)

$$a = \frac{\rho A_e l_e}{6}, \quad b = \frac{\rho A_e l_e}{420} \quad (۳۲-۳)$$

$$[M^e] = [L]^T [M^e] [L] \quad (۳۳-۳)$$

$$[K^e] = [L]^T [K^e] [L] \quad (۳۴-۳)$$

در بیان دینامیکی مسئله از میرایی سازه صرف نظر شده است. دلیل این امر در درجه نخست، دشواری مدل سازی آن است [3]. از طرف دیگر هنوز رابطه‌ی بین خرابی سازه و میرایی به روشنی بیان نشده است [12]. افزون بر این دور از واقعیت نیست که مقدار میرایی را ناچیز بدانیم؛ تنها در سازه‌های بسیار حساس مانند جت‌ها، میرایی در دینامیک مسئله دخالت داده می‌شود. از این رو عمده‌ی روش‌های به‌روزرسانی اجزای محدود در مهندسی عمران از آن صرف نظر می‌کنند.

از آنجایی که به سختی می‌توان اطلاعات و اندازه‌گیری‌هایی را از یک سازه ثبت کرد که بتوان به درستی و دقت آن اطمینان یافت، در مقایسه‌ی پاسخ‌های تحلیلی و آزمایشگاهی به ناچار یا باید درک صحیحی در مورد کیفیت اندازه‌گیری‌ها و خطاها به دست آورد و یا اینکه اساساً فرض کنیم اندازه‌گیری‌ها عاری از هرگونه خطایی باشد. در صورت انتخاب راه دوم، مدل اجزای محدود بی واسطه باید به گونه‌ای

اصلاح شود که اندازه‌گیری‌ها را اقناع کند. از این‌رو در این پایان‌نامه به‌جای اندازه‌گیری خصوصیات دینامیکی از طریق آزمایش، مدل اولیه‌ی اجزای محدود با کمک شبیه‌سازی عددی، با ایجاد تغییراتی جهت‌دار در نظر گرفته‌شده و آنالیز مودال این داده‌ها به‌عنوان مبنای مقایسه با مدل تحلیلی منظور می‌شود.

همان‌طور که گفته شد، مسئله‌ی به‌روزرسانی مدل اجزای محدود در چهارچوب یک مسئله‌ی بهینه‌سازی بیان می‌گردد. یکی از مهم‌ترین گام‌ها در بهینه‌سازی، تعریف تابع هدف است که در اینجا ضرورتاً فاصله‌ی بین داده‌ی اندازه‌گیری و داده‌ی اجزای محدود پیش‌بینی، تعریف می‌شود؛ در این پایان‌نامه تنها از شکل مودی برای به‌روزرسانی مدل اجزای محدود استفاده می‌شود. لازم به یادآوری است که به جز خصوصیات مودال (شکل مودی و فرکانس طبیعی)، داده‌های دیگری مانند اطلاعات موجک، انرژی کرنشی مودال و انرژی‌های مودال ساختگی را نیز می‌توان به کار برد. با این حال هنوز روشن نشده‌است که کدام نوع داده‌ها برای پروسه به‌روزرسانی ایده آل است.

روش پیشنهادی و ارزیابی آن

در این فصل، روش پیشنهادی برای بروزرسانی مدل اجزای محدود با جزئیات شرح داده خواهد شد. در این پایان نامه از دو الگوریتم فراابتکاری برای بروزرسانی مدل و تشخیص خرابی بهره برده شده است. در حقیقت، طی دو فرایند بروزرسانی مجزا، یکی با الهام از الگوریتم ازدحام ذرات و دیگری بوسیله الگوریتم کرم شب تاب، نخست با مدل سازی اجزای محدود سازه و تعریف مسئله تشخیص خرابی به کمک «معیار اطمینان مودال»^۱ (MAC) و سپس، تعریف تابع هدف بهینه سازی، به جستجوی جواب مطلوب پرداخته می شود. تابع هدف معرفی شده در مثال های عددی مختلف به کار برده شده و در فصل بعدی قابلیت آن نشان داده شده است.

۴-۲ بروزرسانی با استفاده از اشکال مودی سازه

همان طور که پیش از این اشاره شد، با بوجود آمدن آسیب در سازه، پارامترهای فیزیکی و خواص سازه دچار تغییر می گردد که این خود سبب تغییر در پارامترهای ارتعاشی سیستم می شود. فرکانس طبیعی و اشکال مودی از جمله خواص ارتعاشی سازه هستند که مورد توجه محققان قرار گرفته اند. بسیاری از پژوهشگران به فرکانس طبیعی به عنوان شاخصی برای تشخیص خرابی سازه ها توجه کرده اند؛ با این حال استفاده از تغییرات فرکانس طبیعی لااقل به دو دلیل برای شناسایی خرابی با مشکل همراه است؛ نخست اینکه یک خرابی قابل ملاحظه ممکن است سبب تغییر کوچکی در فرکانس طبیعی شود - خصوصاً در مورد سازه های عظیم در مقیاس کلان - و این تغییرات ممکن است به خاطر اختلالات اندازه گیری، پنهان شود. دوم اینکه تغییر در جرم سازه یا دمای اندازه گیری می تواند سبب بوجود آمدن عدم قطعیت هایی در تغییرات فرکانس های اندازه گیری شود. برای غلبه بر این مشکلات، توجهات به سوی استفاده از تغییرات اشکال مودی معطوف شد. ویژگی مورد توجه این بود که تغییرات در اشکال مودی در مقایسه با فرکانس های طبیعی، نسبت به خرابی های محلی حساس تر هستند [14]. از این رو

¹ Modal Assurance Criterion

در این پایان‌نامه برای تشکیل تابع هدف مربوط به بهینه‌سازی، اشکال مودی مبنا قرار گرفته‌است. چنان‌که در فصل تاریخچه‌ی تحقیق عنوان شد، یکی از ابزارهای مهم و شناخته‌شده‌ی کاربرد اشکال مودی در برورسانی اجزای محدود، معیار اطمینان مودال (MAC) است. در این پایان‌نامه برای مقایسه‌ی اشکال مودی سازه‌ی سالم و موجود (آسیب دیده) از این معیار استفاده شده‌است.

با تشکیل مدل اجزای محدود سازه و در نظر گرفتن خرابی به صورت کاهش در سختی (کاهش مدول الاستیسیته) مدل‌سازی انجام می‌شود. در این صورت برای سختی هر المان، یک ضریب تعیین می‌شود که می‌تواند مقادیر بین صفر و یک را به خود اختصاص دهد. عدد یک معرف خرابی کامل المان و عدد صفر نشان‌دهنده‌ی سالم بودن آن می‌باشد.

با تولید جواب‌های تصادفی که با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری، جهت‌دار شده‌است و با تشکیل تابع هدف معیار، مسئله‌ی شناسایی خرابی را به صورت یک مسئله‌ی بهینه‌یابی تعریف کرد.

معیار اطمینان مودال، رایج‌ترین روش برآورد درجه‌ی همبستگی بردارهای شکل مودی است. این معیار که توسط براون و آلمانگ^۱ معرفی شده است، در واقع زوج بردارهایی را که از اندازه‌گیری و مدل تحلیلی بدست آمده را با یکدیگر جفت می‌کند. به ازای بردار شکل مودی آزمایشگاهی Φ_{mj} و بردار شکل مودی تحلیل Φ_{ak} ، مقدار MAC از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$MAC_{jk} = \frac{|\Phi_{mj}^T \cdot \Phi_{ak}|^2}{(\Phi_{ak}^T \cdot \Phi_{ak}) \cdot (\Phi_{mj}^T \cdot \Phi_{mj})} \quad (۱-۴)$$

مقدار MAC بین ۰ و ۱ می‌باشد. مقدار یک بیانگر این است که یک بردار ضربی از بردار دیگر است.

بردارهای شکل مودی آزمایشگاهی و تحلیلی باید از تعداد اجزای یکسان تشکیل شده باشد، با این حال ضرورتی ندارد که مقیاس آنها برابر باشد. معمولاً همه‌ی مودهای تحلیلی و اندازه‌گیری باهم ارتباط

^۱ Allemang & Brown

دارند و حاصل آنها در یک ماتریس گنجانده می‌شود که همان MAC است. اگر مودها در مرتبه‌ی عددی درست جفت شوند، ماتریس MAC روی قطر اصلی مقادیر حدود ۱ و روی بقیه‌ی درایه‌های ماتریس، مقداری نزدیک صفر خواهد یافت [11]. با این توضیحات تابع هدف به شکل زیر بیان می‌گردد:

$$COST(X) = 1 - MAC \quad (2-4)$$

که در آن MAC ، معیار اطمینان مودال و X بردار ضرایب ماتریس‌های سختی المان سازه می‌باشد.

مراحل بروزرسانی مدل به صورت زیر خلاصه می‌شود:

- تعریف مدل سازه‌ی سالم و سازه‌ی موجود (براساس طرح خرابی اعمال شده) و تشکیل ماتریس‌های خواص مکانیکی (جرم و سختی).

- تعیین مشخصات دینامیکی (اشکال مودی) مدل‌های سازه و تعریف تابع هدف بهینه‌سازی از طریق بیان ریاضی مسئله‌ی بروزرسانی (MAC).

- تعریف پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی و ثبت بهترین پاسخ‌های بدست آمده.

- تعیین خرابی سازه‌ای با ارزیابی میزان کاهش در مدول الاستیسیته‌ی المان‌ها.

کلیدیه‌ی مراحل مدل‌سازی در محیط برنامه‌نویسی $MATLAB$ انجام گرفته است. پارامترهای اصلی الگوریتم‌های بهینه‌سازی به صورت زیر تعیین شده است:

شرط خاتمه: حداکثر تعداد تکرار = ۲۰۰ و تعداد اعضای جمعیت = ۲۰

۳-۴ مدل‌سازی و ارائه نتایج

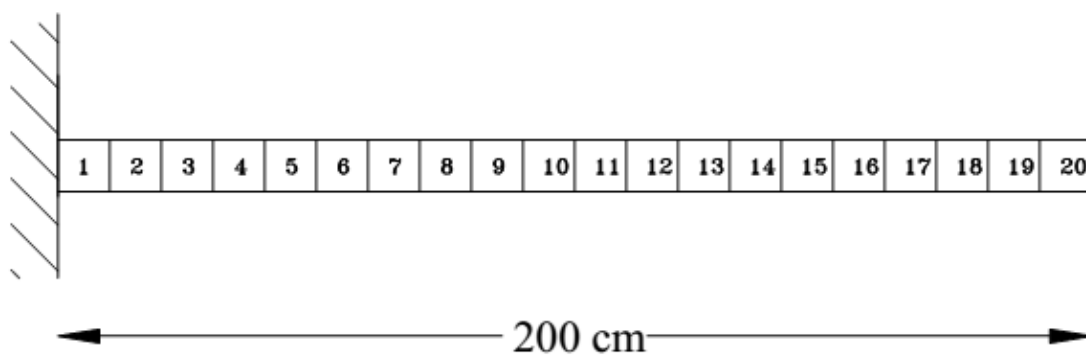
اکنون به منظور بررسی عملکرد و کارایی روش ارائه شده، مسائل عددی برای سازه‌های مختلف، با درصدهای خرابی متفاوت (سناریوهای خرابی مختلف) در نظر گرفته شده است. روش کار به این صورت بوده است که نخست یک سناریو (طرح) خرابی مشخص به سازه اعمال می‌گردد و سپس مشخصات

دینامیکی سازه که در اینجا اشکال مودی سازه مدنظر قرار گرفته، از طریق محاسبه‌ی مقادیر و بردارهای ویژه بدست خواهد آمد. به دلیل عدم دسترسی به همه‌ی مودهای سازه، تنها بخشی از اطلاعات مربوط به مودهای پائین که معمولاً قابل اندازه‌گیری هستند، برای تشخیص خرابی مورد استفاده قرار گرفته اند. در ادامه با ایجاد پاسخ‌های تصادفی جهتدار شده به کمک الگوریتم‌های فرا ابتکاری، بنا داریم تابع هدف معرفی‌شده را کمینه کنیم. با این کار انتظار می‌رود که موقعیت و میزان خرابی در سازه تعیین گردد. همه‌ی مثال‌ها با هر دو الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) و کرم شب‌تاب (FA) محاسبه شده است.

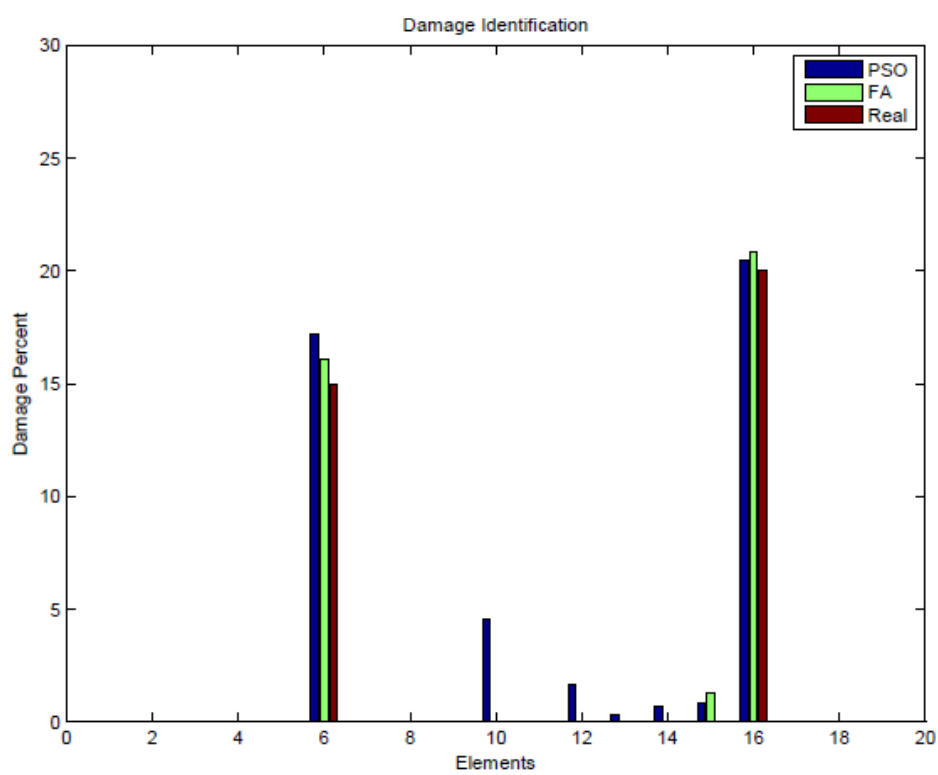
برای نشان‌دادن کارایی روش و نیز توانایی الگوریتم‌های فرا ابتکاری در یافتن محل و میزان خرابی در سازه، مثال‌های عددی متعدد در نظر گرفته شده‌است. برای هر مثال عددی، دو طرح خرابی متفاوت اعمال شده‌است. به دلیل ماهیت تصادفی الگوریتم‌های فرا ابتکاری، هرکدام از مثال‌ها ده مرتبه اجرا شده‌است و سناریو مربوط به کمترین تابع هدف به عنوان سناریو شناسایی شده معرفی گردیده است. در تمامی مثال‌ها فرض شده‌است که جرم بعد از بروز خرابی تغییر نداشته‌است.

۴-۳-۱ تیر یک سر گیردار

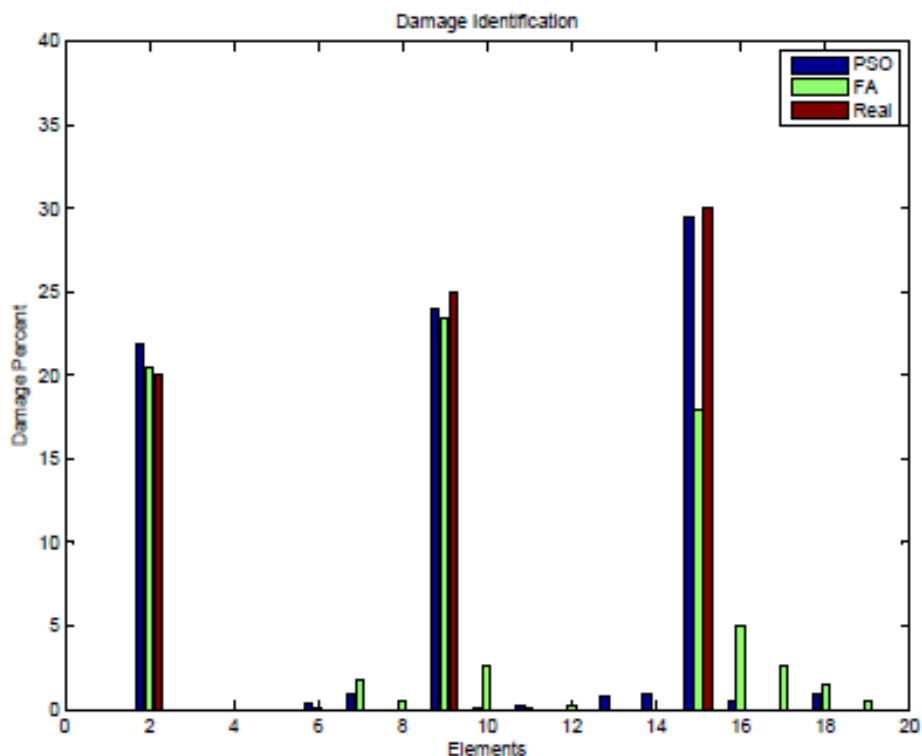
یک تیر طره با خصوصیات مکانیکی و هندسی مطابق شکل (۴-۱) را به ۲۰ قسمت مساوی تقسیم کرده‌ایم. مدول الاستیسیته و چگالی همه‌ی المان‌ها، به ترتیب برابر 200 GPa و 7780 kg/m^3 در نظر گرفته شده‌است. مقطع انتخاب‌شده پروفیل استاندارد $W12 \times 120$ می‌باشد که مساحت و ممان اینرسی آن به ترتیب 228 cm^2 و 44540 cm^4 می‌باشد. شش شکل مودی اول سازه‌ی آسیب‌دیده برای تشکیل تابع بهینه یابی مورد استفاده واقع شده است. در طرح خرابی نخست، فرض شده‌است که المان‌های شماره‌ی ۶ و ۱۶ به ترتیب ۱۵٪ و ۲۰٪ کاهش در مدول الاستیسیته داشته‌اند؛ در طرح خرابی دوم نیز المان‌های شماره‌ی ۹، ۱۵ و ۲۰ به ترتیب با ۲۰٪، ۲۵٪ و ۳۰٪ کاهش در مدول الاستیسیته فرض داشته‌شده‌اند. نتایج بدست‌آمده از هر دو الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) و کرم شب‌تاب (FA) همراه با طرح واقعی خرابی (Real) اعمال‌شده به سازه در نمودارهای (۴-۱) و (۴-۲) نشان داده‌شده‌است.



شکل (۱-۴) تیر طره المان بندی شده



نمودار (۱-۴) نتایج تشخیص خرابی در تیر یک سر گیردار (طرح خرابی اول)



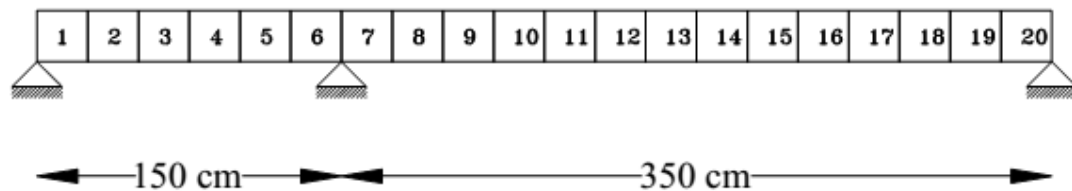
نمودار (۲-۴) نتایج تشخیص خرابی در تیر یک سر گیردار (طرح خرابی دوم)

چنان که ملاحظه می شود در طرح خرابی اول، خرابی ها به درستی و با دقت خوبی شناسایی شده اند. در طرح خرابی دوم، الگوریتم کرم شب تاب، شدت یکی از خرابی ها را کمتر از مقدار واقعی برآورد کرده است. ملاحظه می شود که الگوریتم PSO در هر دو طرح خرابی، با دقت مناسبی شدت و موقعیت خرابی ها را تشخیص داده است.

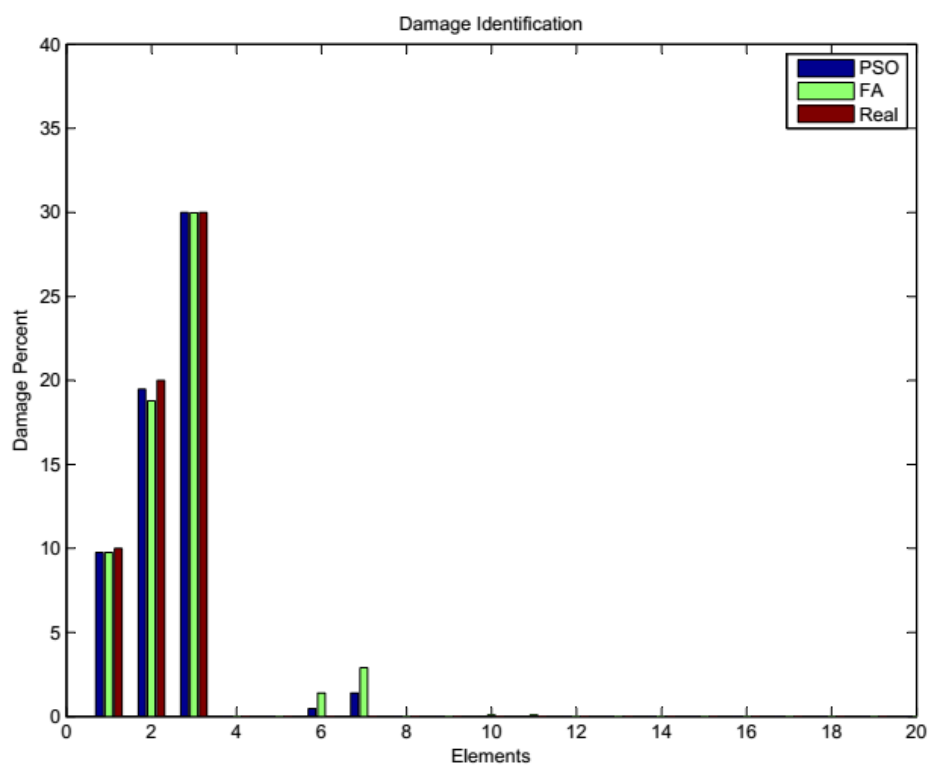
۲-۳-۴ تیر سراسری با دو دهانه

تیر سراسری با دو دهانه که در شکل (۲-۴) نشان داده شده است، به عنوان مثال دوم در نظر گرفته شده است. مشخصات مصالح همانند مثال پیشین است. شش شکل مودی اول سازه ی آسیب دیده برای تشکیل تابع هدف بهینه یابی استفاده شده است. در طرح خرابی نخست، فرض شده است که المان های شماره ی ۱ و ۲ و ۳ به ترتیب ۱۰٪ و ۲۰٪ و ۳۰٪ کاهش در مدول الاستیسیته داشته اند؛ در طرح خرابی دوم نیز المان های شماره ی ۱۱، ۱۵ و ۲۰ به ترتیب با ۲۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ کاهش در مدول الاستیسیته مفروض داشته شده اند. نتایج بدست آمده از هر دو الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) و کرم

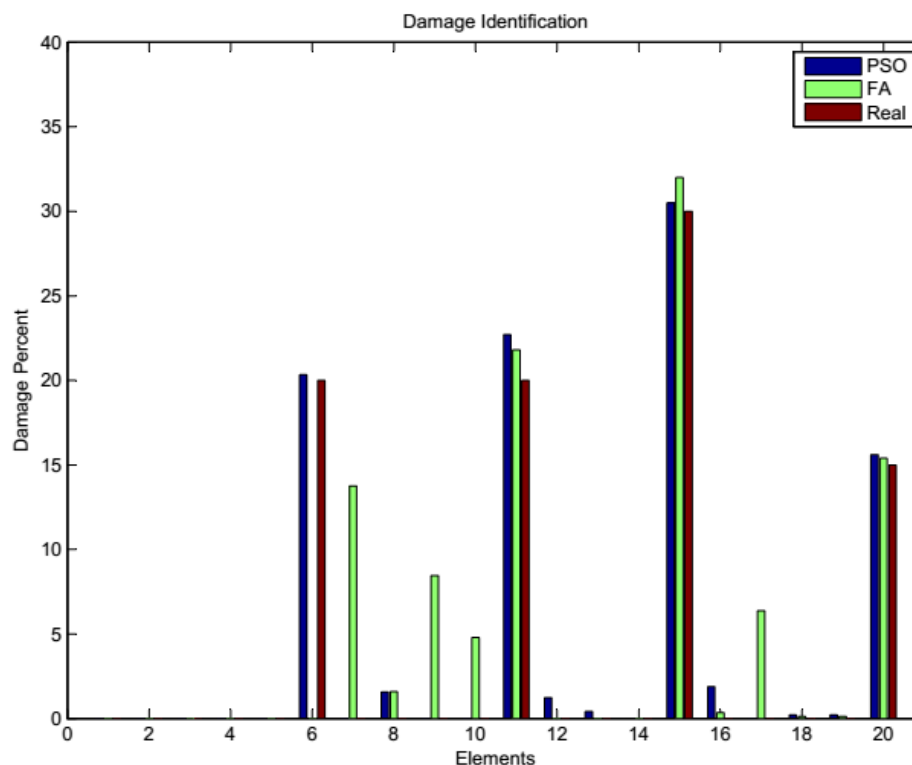
شبه‌تاب (FA)، همراه با طرح واقعی خرابی (Real) سازه در نمودارهای (۳-۴) و (۴-۴) نشان داده شده است.



شکل (۲-۴) تیر سراسری دو دهانه



نمودار (۳-۴) نتایج تشخیص خرابی در تیر سراسری دو دهانه (طرح خرابی اول)



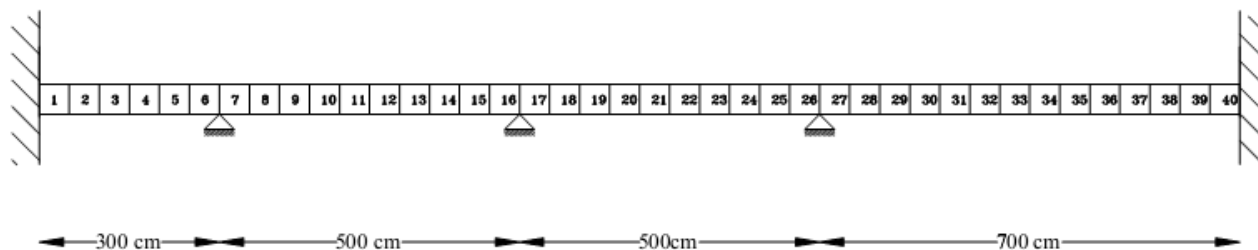
نمودار (۴-۴) نتایج تشخیص خرابی در تیر سراسری دو دهانه (طرح خرابی دوم)

چنان‌که ملاحظه می‌شود در طرح خرابی نخست، همه‌ی خرابی‌ها به درستی و با دقت بسیار خوبی شناسایی شده‌اند. اما در طرح خرابی دوم، الگوریتم کرم شبتاب در شناسایی موقعیت خرابی، دچار اشتباه شده و المان‌های شماره‌ی ۷، ۹ و ۱۰ را به‌جای المان شماره‌ی ۶ تعیین نموده‌است؛ علت این امر گیر افتادن الگوریتم کرم شبتاب در یک بهینه‌ی محلی می‌باشد. ملاحظه می‌شود که الگوریتم PSO در هر دو طرح خرابی، با دقت مناسبی، شدت و موقعیت خرابی‌ها را تشخیص داده‌است.

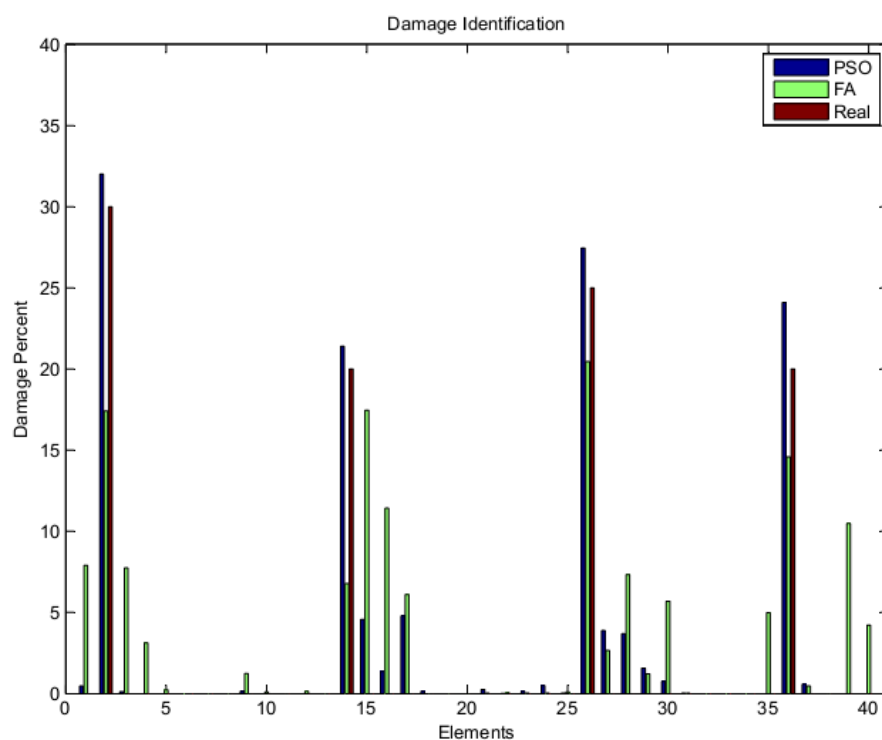
۳-۳-۴ تیر سراسری با چهاردهانه

به عنوان سومین مثال، مطابق شکل (۳-۴) تیر سراسری با چهار دهانه انتخاب شده است. مانند مثال قبل، همه‌ی مشخصات مکانیکی مصالح، منطبق بر اطلاعات داده شده در مورد مثال نخست است. ده شکل مودی نخست سازه‌ی آسیب‌دیده، برای تشکیل تابع بهینه‌سازی استفاده شده است. در طرح خرابی نخست، فرض شده‌است که المان‌های شماره‌ی ۲ و ۱۴ و ۲۶ و ۳۶ به ترتیب ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۴ درصد کاهش در مدول الاستیسیته داشته‌اند؛ در طرح خرابی دوم نیز المان‌های شماره‌ی ۵، ۱۲ و ۳۴

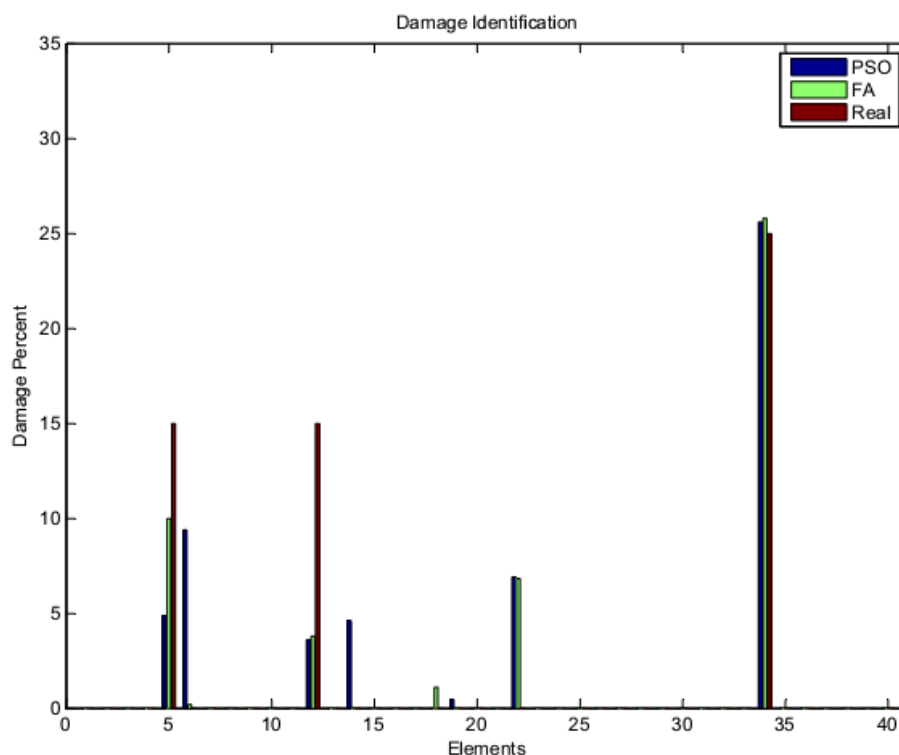
به ترتیب با ۱۵،۱۵ و ۲۵ درصد کاهش در مدول الاستیسیته مفروض داشته شده‌اند. نتایج بدست آمده از هر دو الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) و کرم شب تاب (FA)، همراه با طرح واقعی خرابی (Real) سازه در نمودارهای (۴-۵) و (۴-۶) نشان داده شده است.



شکل (۴-۳) تیر سراسری چهار دهانه



نمودار (۴-۵) نتایج تشخیص خرابی در تیر سراسری چهار دهانه (طرح خرابی اول)



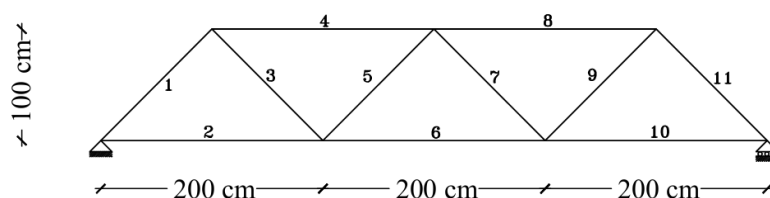
نمودار (۴-۶) نتایج تشخیص خرابی در تیر سراسری چهار دهانه (طرح خرابی دوم)

همانطور که از نمودارها برمی آید، در طرح خرابی نخست موقعیت خرابی‌ها توسط هردو الگوریتم، به درستی تعیین شده است؛ اما در تعیین شدت خرابی الگوریتم FA با درصد خطای بالایی شناسایی را انجام داده است. در مجموع به دلیل تعداد بالای متغیرها، شناسایی با دقت کمتری نسبت به دو مثال قبلی صورت گرفته است.

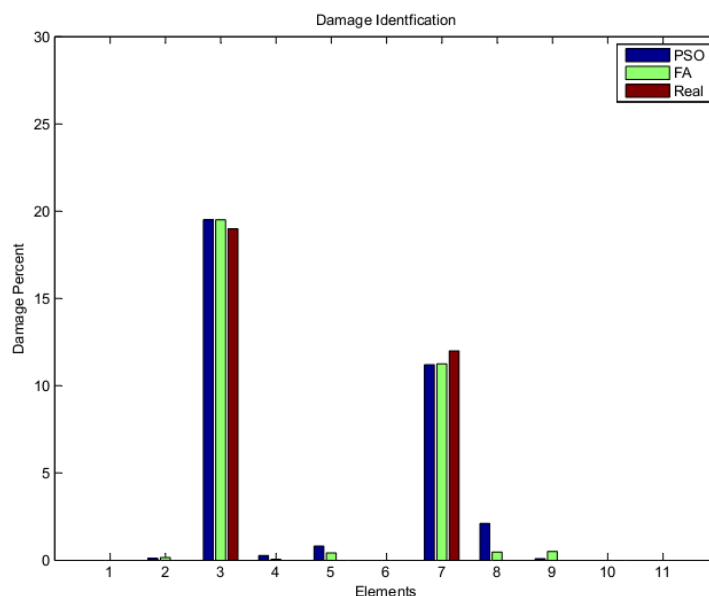
در طرح خرابی دوم، هر دو الگوریتم در تشخیص خرابی با سطح کمتر دچار مشکل شده اند و نتوانسته اند خرابی را شناسایی کنند. این مسئله به دلیل آن است که تنها ۱۰ مود اول سازه در نظر گرفته شده اند و خرابی در مکان‌هایی ایجاد شده است که تاثیر کمتری روی ۱۰ مود نخست می گذارند. در این شرایط می بایست تعداد بیشتری از مودها را اندازه گیری نمود و یا دقت اندازه گیری را افزایش داد.

۴-۳-۴ خرپای دو بعدی ۱۱ عضوی

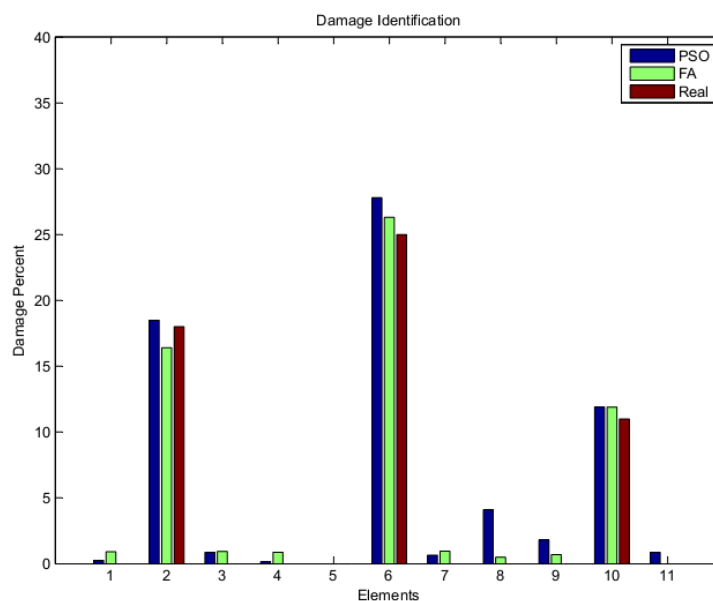
خرپای معین دوبعدی با یازده المان مطابق شکل (۴-۴)، به عنوان نمونه‌ی چهارم در نظر گرفته شده است. جنس مصالح بکاررفته مانند مثال‌های قبلی است. مساحت سطح مقطع تمامی اعضا برابر 10 m^2 در نظر گرفته شده است. پنج شکل مودی اول سازه‌ی آسیب دیده، برای تشکیل تابع هدف بهینه‌یابی استفاده شده است. در طرح خرابی نخست، فرض شده است که المان‌های شماره‌ی ۳ و ۷ به ترتیب ۱۹ و ۱۲ درصد کاهش در مدول الاستیسیته داشته‌اند؛ در طرح خرابی دوم نیز المان‌های شماره‌ی ۲، ۶ و ۱۰ به ترتیب با ۱۸، ۲۵ و ۱۱ درصد کاهش در مدول الاستیسیته مفروض داشته شده‌اند. نتایج بدست آمده از هر دو الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) و کرم شب تاب (FA)، همراه با طرح واقعی خرابی (Real) سازه در نمودارهای (۴-۷) و (۴-۸) نشان داده شده است.



شکل (۴-۴) خرابی دو بعدی ۱۱ عضوی



نمودار (۴-۷) نتایج تشخیص خرابی در خرابی دو بعدی ۱۱ عضوی (طرح خرابی اول)

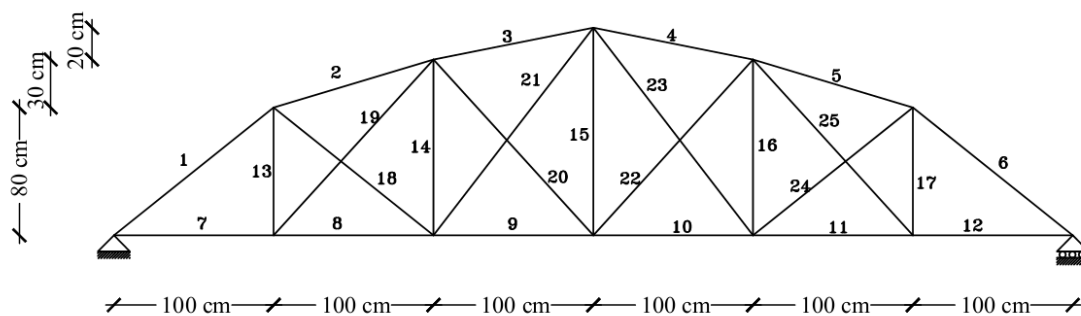


نمودار (۴-۸) نتایج تشخیص خرابی در خرپای دو بعدی ۱۱ عضوی (طرح خرابی دوم)

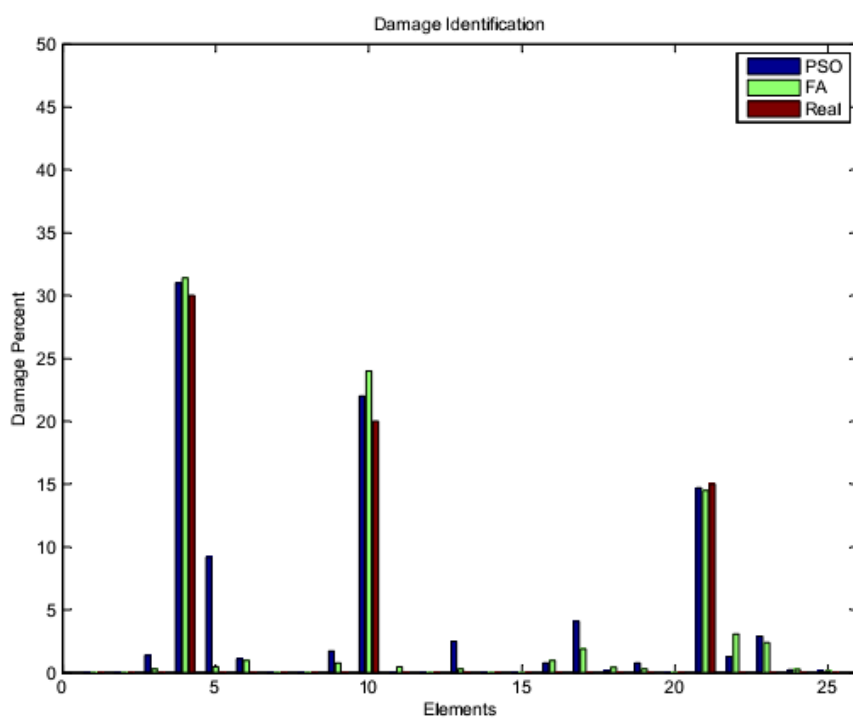
از نمودارها چنین برمی آید که هر دو الگوریتم با دقت بسیار بالایی شدت و موقعیت خرابی ها را شناسایی نموده اند.

۴-۳-۵ خرپای دو بعدی ۲۵ عضوی

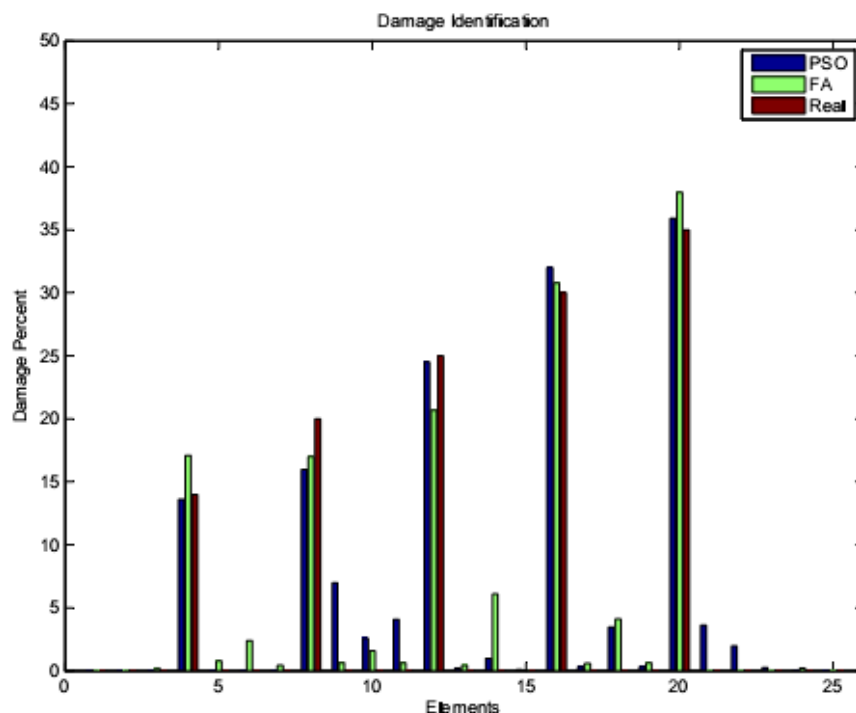
خرپای دو بعدی با ۲۵ عضو به عنوان نمونه ی پنجم در نظر گرفته شده است (شکل (۴-۵)). جنس مصالح بکار رفته، مانند مثال های قبلی است. مساحت سطح مقطع تمامی اعضا برابر $10m^2$ در نظر گرفته شده است. هفت شکل مودی اول سازه ی آسیب دیده، برای تشکیل تابع هدف بهینه سازی استفاده شده است. در طرح خرابی نخست، فرض شده است که المان های شماره ی ۴ و ۱۰ و ۲۱ به ترتیب ۳۰ و ۲۰ و ۱۵ درصد کاهش در مدول الاستیسیته داشته اند؛ در طرح خرابی دوم نیز المان های شماره ی ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ به ترتیب با ۱۴، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درصد کاهش در مدول الاستیسیته مفروض داشته شده اند. نتایج بدست آمده از هر دو الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) و کرم شبتاب (FA)، همراه با طرح واقعی خرابی (Real) سازه در نمودارهای (۴-۹) و (۴-۱۰) نشان داده شده است.



شکل (۴-۵) خرابای دو بعدی ۲۵ عضوی



نمودار (۴-۹) نتایج تشخیص خرابی در خرابای دو بعدی ۲۵ عضوی (طرح خرابی اول)



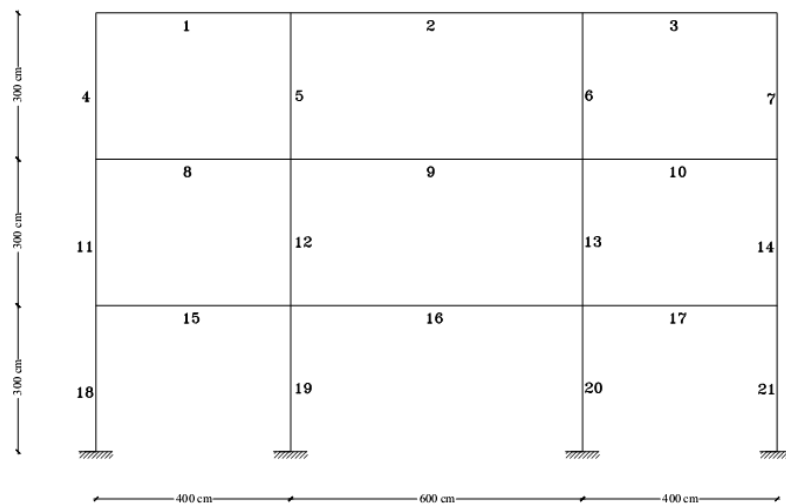
نمودار (۴-۱۰) نتایج تشخیص خرابی در خرابای دو بعدی ۲۵ عضوی (طرح خرابی دوم)

ملاحظه می‌شود که هردو الگوریتم در شناسایی موقعیت و میزان خرابی‌ها به خوبی عمل کرده‌اند؛ در عین حال عملکرد الگوریتم ازدحام ذرات در شناسایی میزان خرابی دقیق‌تر بوده‌است.

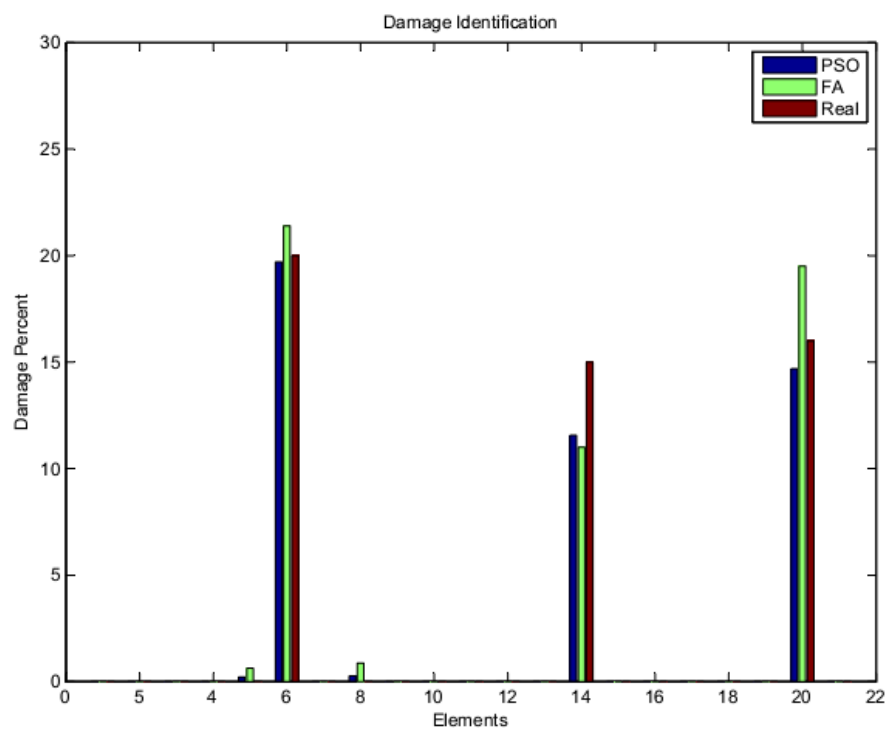
۴-۳-۶ قاب سه طبقه و سه دهانه

قاب مطابق مشخصات شکل (۴-۶) به عنوان مثال ششم انتخاب شده‌است. جنس مصالح مشابه مثال قبلی است. مقطع در نظر گرفته شده برای اعضای افقی (تیرها)، پروفیل استاندارد IPE240 و برای اعضای عمودی (ستون‌ها)، پروفیل استاندارد IPB300 در نظر گرفته شده‌است. هر المان شامل دو گره بوده و برای هر گره ۳ درجه‌ی آزادی (دو درجه آزادی انتقالی و یک درجه آزادی دورانی) در نظر گرفته شده‌است. ده شکل مودی اول سازه‌ی آسیب‌دیده برای تشکیل تابع هدف بهینه‌سازی استفاده شده‌است. در طرح خرابی نخست، فرض شده‌است که المان‌های شماره‌ی ۶، ۱۴ و ۲۰ به ترتیب ۲۰ و ۱۵ و ۱۶ درصد کاهش در مدول الاستیسیته داشته‌اند؛ در طرح خرابی دوم نیز المان‌های شماره‌ی ۲، ۸، ۱۳ و ۱۷ به ترتیب با ۱۸، ۲۰، ۱۴ و ۱۹ درصد کاهش در مدول الاستیسیته مفروض

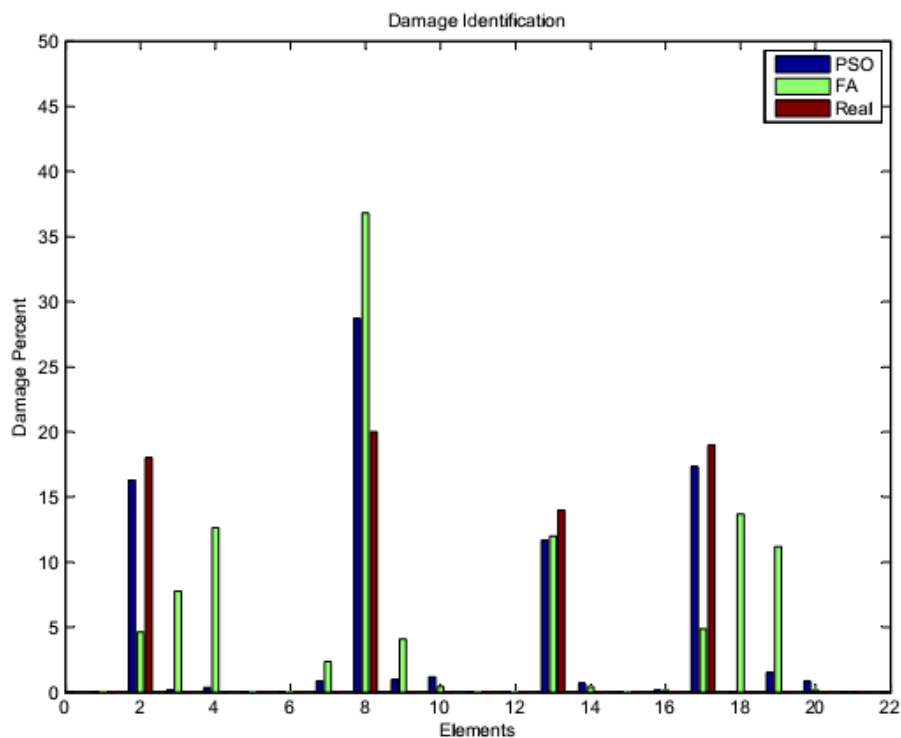
داشته شده‌اند. نتایج بدست آمده از هر دو الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) و کرم شب تاب (FA)، همراه با طرح واقعی خرابی (Real) سازه در نمودارهای (۴-۱۱) و (۴-۱۲) نشان داده شده است.



شکل (۴-۶) قاب ۳ دهانه و ۳ طبقه



نمودار (۴-۱۱) نتایج تشخیص خرابی در قاب ۳ طبقه و ۳ دهانه (طرح خرابی اول)



نمودار (۴-۱۲) نتایج تشخیص خرابی در قاب ۳ طبقه و ۳ دهانه (طرح خرابی دوم)

در طرح خرابی نخست، شناسایی میزان خرابی‌های چندگانه، با کیفیات گوناگون انجام شده و در مجموع الگوریتم‌ها رفتار قابل قبولی داشته‌اند؛ اما بازهم شاهد عملکرد موفق‌تر الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) در شناسایی خرابی هستیم. اما در طرح خرابی دوم، الگوریتم کرم شب‌تاب در شناسایی خرابی‌ها ضعیف عمل کرده‌است که این امر با استفاده از تعداد موده‌های بیشتر و افزایش تعداد تکرارهای الگوریتم، بهبود خواهد یافت.

نتیجه گیری و پیشنهادات

چنانکه پیش از این اشاره شد سلامت‌سنجی سازه‌ها و تشخیص به موقع خرابی و آسیب در آن‌ها از اهمیت شایانی برخوردار است. از این رو محققان بسیاری در مقوله‌ی تشخیص خرابی سازه‌ها تلاشهای فزاینده‌ای مبذول داشته‌اند. در پایان‌نامه‌ی پیشرو اشکال مودی سازه‌ها (پاسخ‌های دینامیکی به‌دست‌آمده از آنالیز مودال) مورد بررسی قرار گرفته و به کمک الگوریتم‌های بهینه‌سازی ذاتی (فراابتکاری) پیشنهادی از طریق تعریف تابع بهینه‌سازی مناسب خرابی‌های اعمال شده به سازه مورد ارزیابی قرار گرفت. عملکرد مطلوب الگوریتم‌های مذکور در شناسایی خرابی، به طور روشن‌تر تشخیص شدت و موقعیت خرابی در سازه‌های گوناگون ملاحظه گردید. روش‌های موجود شناسایی خرابی، هریک به نوعی سعی دارند تا با کمترین داده‌ی اندازه‌گیری و کمترین اشتباه، خرابی را تشخیص دهند. لازم به ذکر است وجود چند مکان از سازه که به اشتباه آسیب دیده گزارش می‌شود، امری اجتناب‌ناپذیر بوده و البته در جهت اطمینان می‌باشد. با این وجود روش‌های مختلف سعی دارند تا این اشتباهات را به حداقل ممکن برسانند. نکته مهم آن است که عدم شناسایی یک خرابی می‌تواند پیامدهای ناگواری را در پی داشته‌باشد. از این رو یک روش کارآمد باید بتواند موقعیت همه‌ی خرابی‌ها را به درستی تشخیص دهد.

۵-۲ خلاصه نتایج

۱. در این پایان‌نامه با بهره‌گیری از اشکال مودی سازه، فرایند بروزرسانی مدل اجزای محدود دینامیکی سازه با تشکیل تابع بهینه‌سازی و بهره‌گیری از الگوریتم‌های هوشمند ازدحام ذرات (PSO) و کرم شب‌تاب (FA) در فرایند بهینه‌سازی، انجام گردید و خرابی‌های اعمال شده به سازه با موفقیت شناسایی گردید. در مجموع عملکرد الگوریتم ازدحام ذرات (PSO)، دقیق‌تر و برای سازه‌های مورد بررسی کاراتر بود. هرچند در بعضی موارد خرابی به اشتباه

به محل‌های آسیب ندیده نسبت داده شد، با این حال این موضوع در جهت اطمینان بوده و با اندازه‌گیری‌های مجدد و دقیق‌تر می‌توان به عدم وجود خرابی در آن محل‌ها پی برد.

۲. به طور کلی روش تشخیص خرابی با استفاده از اشکال مودی به کمک معیار MAC در سازه‌های متداول کارایی مناسبی داشته و شدت و موقعیت اکثر خرابی‌ها را بدرستی تعیین می‌نماید

۳. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) در این پایان‌نامه کارایی مناسبی داشته و در مثال‌های عددی انجام‌شده با دقت خوبی بهینه‌ی کلی را یافته است. این الگوریتم به سبب حجم کم محاسبات با سرعت بالایی می‌تواند فرایند تشخیص خرابی را انجام دهد. زمانی که تعداد المان‌های سازه (پارامترهای بهینه‌سازی) افزایش می‌یابد، فرایند بهینه‌یابی دشوارتر می‌شود.

۴. الگوریتم کرم شب‌تاب (FA) در این پایان‌نامه به طور کلی در مقایسه با الگوریتم ازدحام ذرات (PSO)، ضعیف و غیر قابل پیش‌بینی عمل کرده است. در این الگوریتم در هر گام همه‌ی اعضای جمعیت با یکدیگر مقایسه می‌شوند. بنابراین انتخاب جمعیت در این الگوریتم بایستی با ملاحظات متناسب با مسئله‌ی بهینه‌سازی صورت گیرد؛ چرا که برای جمعیت‌های بزرگ، این الگوریتم به سبب فزونی بیش از حد محاسبات ممکن است دچار اختلال گردد. در مسائل با تعداد متغیرهای زیاد (مانند مثال تیر سراسری چهار دهانه) در برخی موارد ممکن است این الگوریتم با مشکل مواجه گردد و نیازمند پردازش بیشتری برای یافتن بهینه‌ی کلی می‌باشد.

۵-۳ پیشنهاد برای تحقیقات آینده

۱. در این پایان‌نامه فرایند بروزرسانی مدل اجزای محدود با صرف‌نظر از مفهوم میرایی در سازه صورت گرفت. در اغلب مقالات مهندسی عمران در این حوزه، از اثرات میرایی صرف‌نظر می‌گردد؛ چراکه میزان میرایی در سازه‌ها معمولاً به اندازه‌ی کافی کوچک است که بتوان چنین فرضی را منطقی دانست. با این حال در پژوهش‌های آینده برای سازه‌های حساس و با اهمیت بالا مانند تاسیسات خاص، می‌توان الگوهای پیچیده‌ی میرایی را در چنین سازه‌هایی در روند بروزرسانی اجزای محدود دخالت داد.
۲. مقوله‌ی غیرخطی بودن نیز می‌تواند در بروزرسانی اجزای محدود مورد بررسی قرار گیرد. فرض رفتار خطی هنگامی که با مصالح و مسائلی سر و کار داریم که رفتار و ماهیت غیرخطی دارند، دیدگاه ساده‌انگارانه‌ای خواهد بود. از این‌رو در مطالعات آینده روش‌هایی برای مدل‌سازی اجزای محدود ارائه شود که مسئله را غیر خطی در نظر گیرد.
۳. یکی از معایب روش‌های مبتنی بر بروزرسانی مدل اجزای محدود، افزایش شدید حجم محاسبات با افزایش اندازه‌ی سازه است. استفاده از تکنیک زیرسازه‌ها^۱، و شناسایی خرابی برای سازه‌های بزرگ می‌تواند موضوع تحقیقات آینده قرار گیرد.
۴. بررسی کارایی روش پیشنهادشده بر روی سازه‌های واقعی و یا سازه‌های آزمایشگاهی جزو مباحثی است که می‌تواند برای توسعه‌ی این روش و استفاده‌ی عملی از آن مورد مطالعه قرار گیرد.

¹ Substructures

٦

مراجع

- [1] I. Balageas, D. I.-P. (2006). *Structural health monitoring*. Great Britain: ISTE Ltd.
- [2] Perry, C. G. (2010). *Structural Identification and Damage Detection using Genetic Algorithms*. Taylor and Francis Group, LLC.
- [3] Mottershead, J. and M. Friswell, *Model updating in structural dynamics: a survey*. Journal of sound and vibration, 1993.**167**(2): p. 347-375.
- [4] Wenzel, H. (2009). *Health monitoring of bridges*. Vienna: John Wiley & Sons, Ltd.
- [5] Mottershead, J. and M. Friswell, *Finite element Model updating in structural dynamics*. Vol.38.1995: Springer.
- [6] Marwala, T., *Finite Element Model Updating Using Computational Intelligence Techniques*. 2010: Springer.
- [7] Xin, S.Y, *Engineering Optimization; An introduction with meta heuristic applications*.2010: John Wiley & Sons.
- [8] Siu-Seong Law & Xin-Qun Zhu, *Damage Models and Algorithms for Assessment of Structures under Operation Conditions*. 2009:CRC Press
- [9] Fryba, L. and M. Pirner, *Load tests and modal analysis of bridges*. Engineering Structures, 2001. **23**(1):p.102-109.
- [10] Ren, W.-X and G. De Roeck, *Structural damage identification using modal data.I: Simulation verification*. Journal of Structural Engineering, 2002. **128**(1): p.87-95.
- [11] Allemang, R.J., *The modal assurance criterion-twenty years of use and abuse*. Sound and Vibration, 2003.**37**(8): p.14-23.
- [12] Kaveh, A and Maniat M, *Damage detection in skeletal structures based on charged system search optimization using incomplete modal data*. International journal of civil engineering, 2014. p:291-298.

[13] Kim,J.T, et al., *Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method*. Engineering structures,2003.**25**(1): p.57-67.

[14] Xia Y., et al., *Damage identification of structures with uncertain frequency and mode shape data* .Earthquake engineering & Structural dynamics,2002.**128**(1): p.87-95.

Abstract

It's fairly possible for Bridges, dams and other civil infrastructures to become damaged during their operating life. Since neglecting these minor defects in such structure can easily lead to their malfunction, Damage Identifying of these structures is clearly very important. The ultimate consequence of structural damage can even be the whole structure's demolition. Hence, It is essential to develop an effective methodology for damage detection of existing structures. While there is Several methods to detect the mentioned damages based on different characteristics of structures, Those utilizing dynamic data structures (or in other words, the modal properties of the structure) are sensitive enough to structure's internal and surface defects. Evaluation of mechanical and physical properties of existing structure, which is done through minimization of the difference between dynamic data measured by the finite element model of damaged structure and the intact one, is described by a process called updating of the dynamic finite-element-model, which helps to reveal the extent of structural damage and failure.

In this thesis, the finite-element-model's updating has been modeled through reducing the stiffness of the elements. Here, instead of using the dynamic vibration test's results, the simulated numerical data is used and the act of minimizing the difference between the existing and the intact model is implemented by the aid of meta-heuristic algorithms. In this work, the structural mode shapes has been used to form an objective function and the particle-swarm and the firefly algorithms have been developed to solve the optimization problem. Several numerical examples of beams and frames with a variety of different damage patterns are studied in this paper, and the results indicate a good performance of the proposed method .Though in most cases, both the optimization algorithms led to similar results, in some cases, the particle swarm algorithm, has shown better performance than the other one.

Keyword: Damage detection, Model updating, Meta-heuristic algorithms, Modal properties.



Faculty of Civil Engineering

Dynamic Finite Element Model Updating By Using Intelligence Optimization Methods

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree
of Master of Science in Civil Engineering

By:

Mohammad Aahi

Supervisor:

Dr.Ali Keyhani

Feb 2015