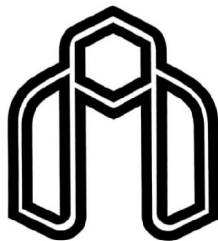


سُبْحَانَكَ اللَّهُمَّ رَبَّ السَّمَاوَاتِ
وَالْأَرْضِ رَبَّنَا لَا إِلَهَ إِلَّا أَنْتَ
قَدْ بَدَأَ الْإِنْسَانَ مِنْ عَلَقٍ
فَاعْبُدْهُ وَكَفَى الْجَبْنَ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده‌ی مهندسی عمران

گروه سازه

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد

تشخیص آسیب صفحات خمشی با استفاده از بهینه‌سازی

توپولوژی

جمشید شهمیری

استاد راهنما:

دکتر سید مهدی توکلی

تیرماه ۱۳۹۸

شماره: ۲۷۰
تاریخ: ۱۶/۶/۹۸

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای جمشید شهمیری با شماره دانشجویی ۹۵۰۸۸۶۴ رشته مهندسی عمران گرایش سازه تحت عنوان تشخیص آسیب صفحات خمشی با استفاده از بهینه سازی توپولوژی که در تاریخ ۱۳۹۸/۰۴/۲۳ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه:) ☒ مردود ☐ نوع تحقیق: نظری ☒ عملی ☐			
عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر سید مهدی توکلی	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم			
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر مهدی گلی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر وحیدرضا کلات جاری	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر رضا نادری	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر رضا نادری

تاریخ امضاء: ۱۳۹۸/۰۴/۲۳

آموزشگاه تخصصی تحصیلات تکمیلی

تصريح در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر در این مقطع تحصیلی می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم بہ

خانوادہ عزیزم کہ ہمیشہ حامی و ہمراہ من بوده اند.

شکر و قدردانی

بر خود لازم می‌دانم از کلیه کسانی که من را در تدوین و نگارش این پایان نامه یاری نمودند، صمیمانه شکر و قدردانی نمایم.

از جناب آقای دکتر سید مهدی توکلی که حقیقتاً خیلی فراتر از یک استاد راهنما، کلیه‌ی مراحل انجام این پژوهش با خوش رویی، یاری و راهنمایی نمودند و وقت خود را بی‌منت در اختیار من گذاشتند نهایت سپاس را دارم.

از دوستان عزیزم، خانم مریم اسلامی و آقای فرشاد عبداللہی که در انجام این پایان نامه هم فکری و بهکاری نموده‌اند و تجربیات خود را در اختیار من قرار دادند شکر می‌نمایم.

هم‌چنین از تمامی اساتید گرامی و دوستانی که مراد به شعر رساندن این پایان نامه همراهی کرده‌اند، کمال شکر و قدردانی را دارم.

تعهد نامه

این جانب جمشید شهمیری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته‌ی سازه دانشکده‌ی عمران دانشگاه شاهرود نویسنده پایان‌نامه "تشخیص آسیب صفحات خمشی با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی تحت راهنمایی دکتر سید مهدی توکلی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط این جانب 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 پایان‌نامه 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 شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه شاهرود» و یا «Shahrood University» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی 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، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

امروزه سازه‌ها نقش بسزایی را در تأمین امنیت و رفاه جامعه بشری ایفا می‌کنند. اگر سازه‌ها به‌درستی طراحی، اجرا و نگهداری نشوند ممکن است موجب بروز مشکلاتی شوند. طراحی و اجرای مناسب یک سازه از اهمیت زیادی در کارایی آن سازه برخوردار است. در این میان سازه‌هایی وجود دارند که علاوه بر طراحی و اجرای مناسب باید کنترل سلامت آن‌ها به‌طور پیوسته بررسی شود تا از بروز خرابی در سازه و پیامدهای ناگوار پس‌از آن جلوگیری به عمل آید. از سازه‌های مهمی که باید کنترل سلامت آن‌ها به‌طور پیوسته انجام گیرد می‌توان به سدها، پل‌ها و سازه‌های تاریخی اشاره کرد. این سازه‌ها به دلیل حساسیت‌هایی که از لحاظ اقتصادی، سیاسی و اجتماعی دارند اگر دچار خرابی بشوند موجب به وجود آمدن پیامدهای جبران‌ناپذیری خواهند شد. سازه‌ها در طول عمر مفید خود بر اثر عوامل مختلفی از قبیل بارهای اعمالی، خستگی، خوردگی و غیره دچار خرابی می‌شوند. تشخیص خرابی سازه‌ها یکی از زمینه‌های مهم در جوامع مهندسی می‌باشد که در سال‌های اخیر مهندسين هوافضا، مکانیک و عمران به این موضوع توجه و علاقه‌ی بسیاری نشان داده‌اند و تحقیقاتی متفاوتی در این زمینه انجام گرفته است.

در این پایان‌نامه با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی به شناسایی آسیب در صفحات خمشی پرداخته می‌شود. تابع هدف موردنظر برای حل این مسئله بهینه‌سازی، اختلاف تابع پاسخ فرکانسی و همچنین اختلاف شکل مودها سازه‌ی آسیب‌دیده و مدل تحلیلی می‌باشد. همچنین در این پایان‌نامه نشان داده شده است که برای تشخیص نیازی به داده‌های سازه سالم و مدل‌سازی عددی آن نمی‌باشد. به‌طوری‌که با استفاده از داده‌های مودال به‌دست‌آمده از سازه واقعی در دو زمان متفاوت می‌توان محل و شدت خرابی پیش‌رونده را تشخیص داد. در این پژوهش برای تحلیل سازه از روش اجزای محدود استفاده شده است. آسیب در این مسئله به‌صورت کاهش سختی سازه است و از تأثیر آسیب بر روی جرم سازه صرف‌نظر شده است. مدل‌سازی توزیع مصالح در سازه با استفاده از روش چگالی مصنوعی

جریمه شده انجام می شود. برای این منظور چگالی مصنوعی هر المان به عنوان متغیر طراحی مسئله‌ی بهینه سازی در نظر گرفته می شود. مقدار چگالی مصنوعی برای هر المان بین ۰ تا ۱ قرار می گیرد اگر مقدار چگالی مصنوعی در یک نقطه از سازه عددی بین ۱ تا ۰ باشد به معنای وجود خرابی در آن نقطه از سازه می باشد و اگر برابر ۱ باشد به معنای عدم وجود خرابی در آن نقطه است. در روش مصالح مصنوعی جریمه شده از یک ضریب به عنوان جریمه مقادیر متوسط استفاده می شود. به کار بردن این ضریب باعث جریمه چگالی های متوسط می شود طوری که آن ها را به چگالی تقریباً پر یا خالی تبدیل می کند. از طرفی این ضریب باعث افزایش حساسیت نسبت به خرابی می شود به همین خاطر در این پایان نامه روش پیوسته سازی مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش مقدار ضریب جریمه بین دو عدد (در اینجا بین ۳ و ۱) در نظر گرفته می شود که این ضریب در طول مراحل بهینه سازی به صورت خطی کاهش می یابد به این صورت که در ابتدای مراحل بهینه سازی مقدار آن عدد بزرگ تر انتخاب می شود تا مقادیر متوسط با سرعت بیشتری به مقدار واقعی خود نزدیک شوند. پس از رسیدن به مراحل آخر بهینه سازی به دلیل اختلاف کم بین مقادیر چگالی مصنوعی المان ها و مقدار واقعی آن ها مقدار ضریب جریمه با عدد کوچک تر برابر می شود و این مقدار تا انتهای مراحل بهینه سازی ثابت است. در این پایان نامه جهت کد نویسی الگوریتم تشخیص آسیب نظر از برنامه متلب استفاده شده است. از روش های ریاضی به منظور حل مسئله ی بهینه سازی استفاده شده است. کارایی و دقت روش پیشنهادی با استفاده از چند مثال عددی نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از مثال های ارائه شده در این پایان نامه، الگوریتم ارائه شده در شناسایی محل و شدت خرابی از دقت قابل توجهی برخوردار است.

واژگان کلیدی: بهینه سازی توپولوژی، تشخیص خرابی، تابع پاسخ فرکانسی، تحلیل حساسیت

فهرست مطالب

فصل اول.....	۱
مقدمه و کلیات	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۱-۲- کار پژوهشی حاضر.....	۴
۱-۳- فرضیات پژوهش.....	۴
۱-۴- ساختار پایان نامه.....	۵
فصل دوم.....	۷
روش‌های شناسایی آسیب در سازه‌ها.....	۷
۲-۱- مقدمه	۸
۲-۲- اشکال مختلف آسیب در سازه‌ها.....	۱۱
۲-۳- روش‌های شناسایی آسیب	۱۲
۲-۳-۱- تشخیص آسیب با استفاده از فرکانس طبیعی.....	۱۳
۲-۳-۲- تشخیص آسیب با استفاده از شکل مود.....	۱۴
۲-۳-۳- تشخیص آسیب با استفاده از میرایی	۱۶
۲-۳-۴- تشخیص آسیب با استفاده از خمیدگی‌ها یا کرنش‌های شکل مود.....	۱۷
۲-۳-۵- تشخیص آسیب با استفاده از تغییر انرژی کرنشی	۱۹
۲-۳-۶- تشخیص آسیب با استفاده از ماتریس نرمی.....	۲۰
۲-۳-۷- تشخیص آسیب با استفاده از روش‌های خطی با الگوی عددی (روش به‌روزرسانی عامل - های سازه‌ای).....	۲۳
۲-۳-۸- تشخیص آسیب با استفاده از روش‌های غیرخطی.....	۲۴
۲-۳-۹- تشخیص آسیب بر اساس تابع پاسخ فرکانسی.....	۲۵
۲-۳-۱۰- تشخیص آسیب با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی.....	۲۶

فصل سوم ۲۷

تئوری شناسایی آسیب ۲۷

۱-۳- مقدمه ۲۸

۲-۳- تعیین فرکانس طبیعی و شکل مودهای سازه ۲۹

۳-۳- تعیین تابع پاسخ فرکانسی با استفاده از روش‌های نظری ۳۰

۴-۳- تعیین ماتریس سختی سازه توسط اجزا محدود ۳۴

۵-۳- مسئله بهینه‌سازی ۳۸

۱-۵-۳- فرم ریاضی عمومی برای یک مسئله بهینه‌سازی سازه‌ای ۴۰

۲-۵-۳- انواع مسائل بهینه‌سازی سازه‌ای ۴۱

۳-۵-۳- بهینه‌سازی توپولوژی صفحات خمشی ۴۲

فصل چهارم ۴۵

شناسایی آسیب با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی ۴۵

۱-۴- مقدمه ۴۶

۲-۴- تابع هدف شکل مودی ۴۷

۳-۴- تابع هدف پاسخ فرکانسی ۴۸

۴-۴- آنالیز حساسیت ۴۹

۱-۴-۴- آنالیز حساسیت تابع هدف اختلاف مودها ۵۰

۲-۴-۴- آنالیز حساسیت تابع هدف پاسخ فرکانسی ۵۲

۶-۴- روش بهینه‌سازی تندترین شیب نزولی ۵۲

۶-۴- ساختار الگوریتم تهیه‌شده در این پژوهش جهت تشخیص خرابی ۵۴

فصل پنجم ۵۷

مثال‌های عددی ۵۷

۱-۵- مقدمه ۵۸

۵۸ ۵-۲- تابع هدف شکل مودی

۵۸ ۵-۲-۱- مثال (۱)

۶۳ ۵-۲-۲- مثال (۲)

۶۷ ۵-۳- تابع هدف پاسخ فرکانسی

۶۷ ۵-۳-۱- مثال (۳)

۷۱ ۵-۳-۲- مثال (۴)

۷۴ ۵-۳-۳- مثال (۵)

۷۷ ۵-۳-۴- مثال (۶)

۸۱ **فصل ششم**

۸۱ نتیجه گیری و پیشنهادها

۸۲ ۶-۱- مقدمه

۸۲ ۶-۲- نتایج

۸۴ ۶-۳- پیشنهادها

۸۵ مراجع

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۲) دسته‌بندی روش‌های ارزیابی خسارت سازه‌ها ۱۰
- شکل (۱-۳) شماتیک یک سازه واقعی و مدل اجزای محدود آن جهت تعیین تابع پاسخ فرکانسی .. ۳۳
- شکل (۲-۳) تأثیر خرابی بر رو تابع پاسخ فرکانسی ۳۳
- شکل (۱-۴) فلوچارت الگوریتم تهیه‌شده در این پایان‌نامه ۵۶
- شکل (۱-۵) شرایط تکیه‌گاهی و محل‌المان‌های آسیب‌دیده، مثال ۱ ۵۹
- شکل (۲-۵) مقایسه شکل مودهای سازه در حالت سازه آسیب‌دیده و سالم در 5 مود اول سازه، مثال ۱ ۶۰
- شکل (۳-۵) نمودار تغییرات تابع هدف، مثال ۱ ۶۱
- شکل (۴-۵) نتایج الگوریتم بهینه‌سازی برای مراحل مختلف، مثال ۱ ۶۱
- شکل (۵-۵) تشخیص محل و شدت آسیب توسط الگوریتم بهینه‌سازی، مثال ۱ ۶۳
- شکل (۶-۵) شرایط تکیه‌گاهی و محل‌المان‌های آسیب‌دیده، مثال ۲ ۶۴
- شکل (۷-۵) نمودار تغییرات تابع هدف، مثال ۲ ۶۵
- شکل (۸-۵) نتایج الگوریتم بهینه‌سازی برای مراحل مختلف، مثال ۲ ۶۵
- شکل (۹-۵) تشخیص محل و شدت آسیب توسط الگوریتم بهینه‌سازی، مثال ۲ ۶۶
- شکل (۱۰-۵) شرایط تکیه‌گاهی و محل‌المان‌های آسیب‌دیده، مثال ۳ ۶۸
- شکل (۱۱-۵) نمودار تغییرات تابع هدف، مثال ۳ ۶۹
- شکل (۱۲-۵) تأثیر خرابی بر روی نمودار تابع پاسخ فرکانسی، مثال ۳ ۶۹

- شکل (۵-۱۳) نتایج الگوریتم بهینه‌سازی برای مراحل مختلف، مثال ۳ ۷۰
- شکل (۵-۱۴) تشخیص محل و شدت آسیب توسط الگوریتم بهینه‌سازی، مثال ۳ ۷۱
- شکل (۵-۱۵) شرایط تکیه‌گاهی و محل المان‌های آسیب‌دیده، مثال ۴ ۷۲
- شکل (۵-۱۶) تأثیر خرابی بر روی نمودار تابع پاسخ فرکانسی، مثال ۴ ۷۳
- شکل (۵-۱۷) تشخیص محل و شدت آسیب توسط الگوریتم بهینه‌سازی، مثال ۴ ۷۳
- شکل (۵-۱۸) نمودار تغییرات تابع هدف، مثال ۴ ۷۴
- شکل (۵-۱۹) شرایط تکیه‌گاهی و محل المان‌های آسیب‌دیده، مثال ۵ ۷۵
- شکل (۵-۲۰) تشخیص محل و شدت آسیب توسط الگوریتم بهینه‌سازی، مثال ۵ ۷۶
- شکل (۵-۲۱) نمودار تغییرات تابع هدف، مثال ۵ ۷۷
- شکل (۵-۲۲) شرایط تکیه‌گاهی و محل المان‌های آسیب‌دیده، مثال ۶ ۷۸
- شکل (۵-۲۳) تشخیص محل و شدت آسیب توسط الگوریتم بهینه‌سازی، مثال ۶ ۷۸
- شکل (۵-۲۴) نمودار تغییرات تابع هدف، مثال ۶ ۷۹

فهرست جدول‌ها

جدول (۱-۵) مقادیر شدت خرابی برای المان‌های آسیب‌دیده، مثال ۱ ۶۳

جدول (۲-۵) مقادیر شدت خرابی برای المان‌های آسیب‌دیده، مثال ۲ ۶۶

جدول (۳-۵) مقادیر شدت خرابی برای المان‌های آسیب‌دیده، مثال ۵ ۷۶

جدول (۴-۵) مقادیر شدت خرابی برای المان‌های آسیب‌دیده، مثال ۶ ۷۹

فصل اول

مقدمه و کلیات

مشخص نمودن وضعیت سلامت یک سازه مانند سدها، پل‌ها، بناهای تاریخی و غیره یکی از ملزومات در مهندسی عمران می‌باشد. از این بین سازه‌های صفحه‌ای به‌عنوان یکی از سازه‌های پرکاربرد در زیرساخت‌های عمرانی، هوافضا و صنایع خودروسازی می‌باشند. این سازه‌ها در طول عمر مفید خود بر اثر عوامل مختلفی از قبیل بارهای اعمالی، خستگی، خوردگی و ... دچار خرابی می‌شوند. عدم تشخیص به‌موقع این خرابی‌ها منجر به کاهش ایمنی و عمر مفید سازه می‌شود که در نهایت خسارات جبران‌ناپذیری را به وجود می‌آورد. بنابراین اطمینان از سلامت و یکپارچگی سازه بسیار حائز اهمیت می‌باشد [۱]. با مشخص نمودن وضعیت یک سازه می‌توان به دو هدف مهم دست یافت. اولین هدف این است که از ایجاد خسارات جبران‌ناپذیر در این سازه‌ها مطلع شد و دومین هدف تصمیم‌گیری در مورد تعمیر، اصلاح و یا حتی تخریب این سازه‌ها می‌باشد. برای دست یافتن به اولین هدف پژوهش‌های بسیاری انجام شده، روش‌های متفاوتی نیز پیشنهاد شده است. روش‌های تشخیص آسیب در سازه را می‌توان به اشکال مختلفی تقسیم‌بندی نمود. تقسیم‌بندی این روش‌ها به روش‌های موضعی و کلی یا روش‌های مخرب و غیر مخرب از جمله این تقسیم‌بندی‌ها می‌باشد. بازرسی سازه به‌صورت چشمی، استفاده از امواج آلتراسونیک، بازرسی رادیوگرافی با امواج، آزمایش ضربه و آزمایش‌های متالوگرافی چند نمونه از راهکارهای تشخیص آسیب در سازه می‌باشند. بازرسی سازه به‌صورت چشمی یکی از قدیمی‌ترین و ساده‌ترین روش‌های تشخیص آسیب می‌باشد این روش برای بازرسی اولیه سازه مناسب می‌باشد. استفاده از روش بازرسی چشمی معایب زیادی دارد که می‌توان به وقت‌گیر بودن، دقیق نبودن و همچنین مختل نمودن کاربری سازه اشاره نمود.

اکثر این روش‌ها روش‌های موضعی می‌باشند یعنی با استفاده از آن‌ها آسیب در یک منطقه از سازه را می‌توان تشخیص داد. استفاده از این روش‌ها بسیار زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد. از این جهت روش‌های

تشخیص آسیب بر پایه‌ی مشخصات دینامیکی سازه ارائه شد. این روش‌ها بر اساس مشخصات مودال سازه ازجمله فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها می‌باشند. مشخصات مودال تابعی از مشخصات فیزیکی سازه ازجمله سختی، جرم و میرایی هستند به‌طوری‌که تغییر در مشخصات فیزیکی موجب تغییر در مشخصات مودال می‌شود.

تاکنون روش‌های بسیاری برای تشخیص آسیب بر اساس پارامترهای مودال در سازه‌های مختلف از قبیل صفحات خمشی، تیرها، قاب‌ها، سازه‌های فضایی، پل‌ها و غیره معرفی شده است [۲]. در روند پایش سلامت در یک سازه ما باید به چهار سؤال اساسی پاسخ دهیم: آیا آسیبی در سازه وجود دارد؟ این آسیب در کجای سازه ایجاد شده است؟ شدت این آسیب به چه مقدار است؟ و چگونه این آسیب بر روی عمر مفید سازه تأثیر می‌گذارد؟ با استفاده از روش‌های تشخیص آسیب می‌توان به سه سؤال اول پاسخ داد [۳].

باوجود پیشرفت‌های بسیاری که در زمینه تشخیص آسیب در سازه‌ها به وجود آمده است اما هنوز جنبه‌های ناشناخته‌ای وجود دارد که می‌بایست در جهت کشف این ناشناخته‌ها تفکر و پژوهش‌های بسیاری انجام شود. هدف اصلی این پژوهش تشخیص آسیب در سازه‌های صفحه‌ای با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی می‌باشد.

بهینه‌سازی، دانشی است که رفتار سازه و اقتصاد پروژه را به‌صورت هم‌زمان در نظر می‌گیرد ازاین‌رو علاوه بر تأمین ایمنی سازه منجر به کاهش مصالح تا حد ممکن می‌شود. هدف از استفاده بهینه‌سازی در این پژوهش کمینه کردن اختلاف توابع پاسخ فرکانسی جهت تشخیص محل و شدت خرابی در سازه می‌باشد. علم بهینه‌سازی را می‌توان به سه قسمت مختلف تقسیم نمود: بهینه‌سازی توپولوژی، بهینه‌سازی شکل و بهینه‌سازی ابعادی. هدف از بهینه‌سازی توپولوژی در یک سازه تعیین تعداد و مکان مناسب حفره‌ها می‌باشد [۴].

۱-۲- کار پژوهشی حاضر

در این پایان نامه با استفاده از بهینه سازی توپولوژی به تشخیص آسیب در سازه پرداخته شده است. در شاخه بهینه سازی همیشه نیاز به تعریف یک تابع هدف مناسب می باشد تا با کمینه یا بیشینه کردن این تابع هدف بتوان مسئله موردنظر را پاسخ داد. در این پایان نامه هدف تشخیص خرابی با استفاده از داده های مودال می باشد از این رو تابع هدف انتخاب شده جهت شناسایی آسیب در سازه اختلاف بین شکل های مودی و همچنین اختلاف بین تابع پاسخ فرکانسی در سازه سالم و سازه آسیب دیده می باشد. اشکال مودی یک سازه اطلاعات مفیدی را در مورد یک سازه در اختیار ما قرار می دهند و می توان برای تشخیص آسیب از آن ها استفاده نمود. تابع پاسخ فرکانسی نیز همه ویژگی های مکانیکی سازه را شامل می شود و عامل های مودال اصلی به کمک روش های برازش منحنی روی تابع های پاسخ فرکانسی به دست می آید. بنابراین می توان تغییرات این تابع ها را به عنوان شاخص خسارت به کار برد [۵]. الگوریتم بهینه سازی مورد استفاده در این پژوهش روش تندترین شیب نزولی می باشد. در این روش نیاز به انجام آنالیز حساسیت تابع هدف می باشد از این رو این روش با وجود سادگی روشی بسیار حساس و دقیق می باشد. برنامه کامپیوتری مورد استفاده جهت ایجاد الگوریتم تشخیص آسیب برنامه متلب^۱ می باشد، با استفاده از این برنامه الگوریتم موردنظر کد نویسی شده و کارایی این روش با بررسی چند مثال عددی نشان داده شده است.

۱-۳- فرضیات پژوهش

فرضیات اساسی در این پژوهش عبارتند از:

۱- در این پژوهش منظور از آسیب کاهش سختی سازه می باشد.

^۱ MATLAB

۲- ماتریس جرم در سازه بدون آسیب و آسیب‌دیده هیچ تغییری نمی‌کند.

۳- میرایی سازه در نظر گرفته نشده است.

۴- رفتار سازه تحت بارهای وارده به صورت خطی فرض می‌شود.

۱-۴- ساختار پایان‌نامه

در فصل دوم از این پایان‌نامه به معرفی و تاریخچه روش‌های مختلف شناسایی آسیب در سازه پرداخته شده است. در فصل سوم نحوه‌ی به دست آوردن مشخصات مودال، نحوه آنالیز با استفاده از اجزای محدود و الگوریتم بهینه‌سازی جهت اجرای الگوریتم تشخیص آسیب توضیح داده شده است. فصل چهارم به موضوع اصلی پایان‌نامه اختصاص داده شده است به‌طوری‌که تابع هدف‌های در نظر گرفته شده و همچنین نحوه محاسبه‌ی آنالیز حساسیت مربوط به هر کدام ارائه شده است. در فصل پنجم چند مثال عددی ارائه شده است تا با استفاده از این مثال‌ها بتوان کارایی و صحت روش استفاده شده در این پایان‌نامه را مورد بحث و بررسی قرار داد. فصل آخر از این پایان‌نامه به توضیح در مورد نتایج، تفسیر آن‌ها و همچنین ارائه پیشنهادها برای کارهای پژوهشی آینده برای افرادی که به موضوع بااهمیت شناسایی آسیب در سازه‌ها علاقه دارند اختصاص داده شده است.

فصل دوم

روش‌های شناسایی آسیب در سازه‌ها

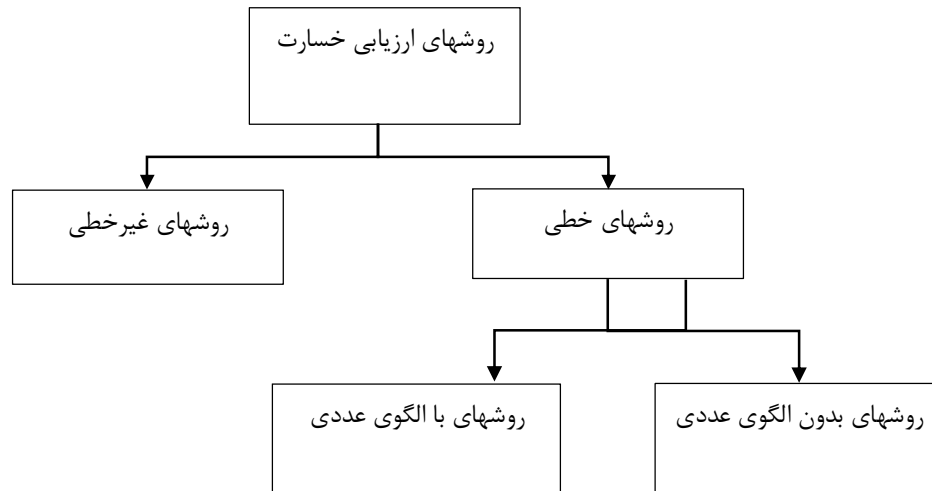
شناسایی آسیب در مراحل اولیه ایجاد آن از اهداف پایش سلامت سازه‌ها می‌باشد. ایجاد آسیب‌های جزئی در سازه نیز به‌مرورزمان منجر به پیامدهای ناگواری می‌شود، ازاین‌جهت شناسایی آسیب یک موضوع بسیار مهم می‌باشد. در میان روش‌های شناسایی آسیب در سازه‌ها آن روش‌هایی که به شناسایی آسیب به هنگام سازه می‌پردازند موردتوجه بیشتری قرارگرفته‌اند. این روش‌ها می‌توانند به‌صورت لحظه‌ای محل و شدت آسیب در سازه را گزارش کنند بنابراین می‌توان از پیشروی آسیب در سازه جلوگیری نمود. یکی از پارامترهای مهم در شناسایی آسیب سازه‌ها تعیین برنامه زمان‌بندی بررسی و ارزیابی می‌باشد که در سازه‌های مختلف به دو صورت اجباری و پیوسته انجام می‌شود. به‌عنوان مثال بررسی وضعیت سلامت سازه بعد از وقوع یک حادثه غیرمعمول از قبیل زلزله، انفجار، برخورد کشتی‌ها با پایه‌های پل یا غیره امری ضروری می‌باشد و باید مشخص گردد که میزان آسیب وارده به سازه‌ی مربوطه بعد از وقوع آن حادثه چه مقدار می‌باشد و این آسیب در کجای سازه اتفاق افتاده تا برنامه‌ای جهت ترمیم و مقاوم‌سازی سازه ارائه شود. اما در سیستم‌های پیوسته بدون در نظر گرفتن وقوع یک حادثه وضعیت سازه به‌صورت دوره‌ای و در زمان‌های مشخص ارزیابی و گزارش می‌شود تا از وضعیت سازه در زمان‌های مختلف آگاه بوده و برای جلوگیری از پیشروی خرابی یا حتی فروریزش اجزا سازه اقدام نمود. اخیراً این سیستم‌ها موردتوجه بسیاری از محققین بوده‌اند و هدف آن‌ها اعلان هشدارهای به‌موقع و جلوگیری از حوادث غیرمنتظره در سازه‌ها می‌باشد.

تعیین یک شاخص خسارت که بتواند وضعیت سازه را برآورد کند، اهمیت دارد. باوجود پیشرفت‌های فراوان روش‌های پایش سلامت سازه‌ها، هنوز هم برای تعیین شاخص خسارت مناسب تردیدهای بسیاری به‌جامانده است. برخی از شاخص‌ها مکان خسارت را به‌درستی نشان نمی‌دهند. این مشکل هنگامی که داده‌های مودال در اثر شرایط محیطی یا نویز تغییر می‌کند بیشتر می‌شود. در بیشتر

آزمایش‌ها عامل‌هایی مانند شرایط محیطی و نویز، آشکارسازی خسارت‌ها را دشوار می‌سازند و گاهی اثر شرایط محیطی روی داده‌های مودال از اثر خسارت‌ها بیشتر است و به قضاوت نادرستی می‌انجامد. در داده‌های آزمایشی نیز همیشه نویز وجود دارد. وجود نویز از دقت نتیجه‌ها به میزان زیادی می‌کاهد. برای کاهش نویز تاکنون روش‌های بسیاری را پیشنهاد داده‌اند. یک روش ارزیابی خسارت باید اثر شرایط محیطی و نویز را از داده‌های مودال جدا سازد و تغییر ویژگی‌های مکانیکی در اثر خسارت را مشخص کند.

روش‌های تعیین خسارت را به گونه‌های متفاوتی می‌توان دسته‌بندی نمود که تقسیم‌بندی خطی و غیرخطی یکی از این دسته‌بندی‌ها می‌باشد [۶]. نمونه‌ای از خسارت غیرخطی تشکیل ترک‌های خستگی است که در شرایط بهره‌برداری پی‌درپی باز و بسته می‌شوند. از میان رفتن اتصال نیز خسارت غیرخطی را در سازه به وجود می‌آورد. بنا به پژوهش‌های انجام‌شده، پاسخ دینامیکی غیرخطی حساسیت کمتری به خسارت‌ها دارد و روش‌های ارتعاش خطی به محل و اندازه خسارت‌ها حساس‌تر می‌باشند [۷]. در بیشتر روش‌ها فرض می‌کنند که رفتار خطی است و ویژگی‌های مودال به دامنه ارتعاش بستگی ندارد.

روش‌های خطی را در دودسته بررسی می‌کنند. در دسته نخست، مکان خسارت بدون الگوی عددی پیدا می‌شود. روش‌های بدون الگوی عددی روش‌های سنتی هستند و با تغییرهای فرکانس‌های ویژه، شکل مودها یا تغییرات مشتق آن‌ها به سنجیدن رفتار سازه می‌پردازند. در دسته دیگر، ارزیابی سازه بر اساس الگوی ریاضی است و با تحلیل اجزای محدود انجام می‌شود.



شکل (۱-۲) دسته‌بندی روش‌های ارزیابی خسارت سازه‌ها

در انتخاب روش ارزیابی خسارت باید به نوع سازه، چگونگی خسارت و میزان حساسیت روش توجه کرد. همه روش‌های پیشنهادی برای ارزیابی خسارت را نمی‌توان برای هر سازه‌ای به کار برد. برخی از این روش‌ها خسارت‌های متقارن را نمی‌توانند آشکار سازند [۶]. از سوی دیگر همه پارامترهای مودال نسبت به خسارت حساسیت یکسانی ندارند. ارزیابی خسارت بدون در نظر گرفتن این موارد نتیجه مطلوبی نخواهد داشت. به همین دلیل پژوهش‌های بسیاری برای مقایسه و ارزیابی روش‌های تعیین خسارت انجام شده است. در اینجا روش‌های تعیین خسارت مرور می‌شوند و برتری‌ها و کاستی‌های آن‌ها مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند.

شناسایی آسیب در سازه‌ها را می‌توان به دو روش استفاده از پارامترهای استاتیکی و دینامیکی نیز تقسیم‌بندی نمود. در روش‌های استاتیکی مشخصه‌های استاتیکی سازه از قبیل کرنش، جابجایی و غیره در حالت سازه سالم و سازه آسیب‌دیده مورد بررسی قرار می‌گیرند. روش‌های دینامیکی نسبت به روش‌های استاتیکی از دقت بیشتری برخوردار هستند که این مزیت باعث شده است تا محققان توجه بیشتری به این روش‌ها بکنند؛ از این رو اکثر پژوهش بر اساس پارامترهای دینامیکی سازه انجام گرفته

است. در روش‌های دینامیکی به بررسی مشخصه‌های دینامیکی سازه نظیر فرکانس طبیعی، شکل مود و ... در دو حالت سازه آسیب‌دیده و بدون آسیب پرداخته می‌شود.

تغییر داده‌های مودال بنیادی (فرکانس‌ها، شکل مودها و میرایی) نشان‌دهنده تغییر ویژگی‌های مکانیکی سازه است. داده‌های مودال بنیادی به آسانی از پاسخ سازه در دامنه زمان یا فرکانس به دست می‌آیند. در دامنه زمان با کاربرد روش‌های شناسایی آماری روی سیگنال‌های پاسخ زمانی این عامل‌ها پیدا می‌شوند. در دامنه فرکانسی، با روش‌های برازش نمودار روی تابع‌های پاسخ فرکانسی^۲ فرکانس‌ها، میرایی و شکل مودها تعیین خواهد شد [۸].

برازش نمودارهای تابع پاسخ فرکانسی را می‌توان به راحتی با برنامه‌هایی مانند متلب انجام داد. این نمودارها همه ویژگی‌های پارامترهای مودال بنیادی را دارند. به همین دلیل برخی از پژوهشگران تغییر تابع‌های پاسخ فرکانسی را برای پیدا کردن خسارت‌ها به کار می‌برند. روش‌های پیشنهادی بر اساس پارامترهای مودال بنیادی به الگوریتم پیچیده نیاز ندارد. به همین دلیل باوجود کاستی‌های فراوان هنوز هم در ارزیابی سازه‌ها به کار می‌روند.

۲-۲- اشکال مختلف آسیب در سازه‌ها

معمولاً آسیب در یک سازه را می‌توان به اشکال مختلفی از قبیل شل شدن پیچ و پرچ‌ها در اتصالات سازه، گسیختگی در اتصالات جوشی، خوردگی در اجزای سازه، ایجاد ترک و ... مشاهده نمود. عدم تشخیص به موقع خرابی در سازه می‌تواند خسارات بسیاری به وجود بیاورد. به‌طور مثال اگر وضعیت سلامت سدها به‌طور دوره‌ای و مستمر بررسی نشود با ایجاد یک ترک کوچک در بدنه آن زمینه فروریزش کلی سد فراهم خواهد شد که در صورت از بین رفتن بدنه سد آبی که در پشت آن جمع‌آوری شده است می‌تواند روستاها یا حتی شهرهای پایین‌دست پل را ویران نماید. بنابراین با

² Frequency Response Function

بررسی مستمر مشخصات دینامیکی سازه می‌توان از وقوع خرابی مطلع گشت. تغییر در مشخصات دینامیکی یک سازه نشانگر تغییر در مشخصات فیزیکی آن از قبیل سختی و جرم می‌باشد که بیانگر ایجاد خرابی در سازه است. در نتیجه می‌توان با بررسی این تغییرات از جمله تغییر در فرکانس طبیعی، شکل مود و... محل و شدت آسیب در سازه را تشخیص داد و از پیشروی آن جلوگیری نمود.

۲-۳- روش‌های شناسایی آسیب

به‌طور کلی روش‌های شناسایی آسیب در سازه را می‌توان به روش‌های کلی و موضعی تقسیم‌بندی نمود. روش‌های موضعی روش‌هایی هستند که آسیب در یک منطقه از سازه را تشخیص می‌دهند و توانایی تشخیص آسیب در کل سازه را ندارند اما روش‌های کلی به جهت استفاده از مشخصه‌های یک سازه که معرف وضعیت کل سازه می‌باشند؛ توانایی تشخیص آسیب در کل سازه را دارند. از جمله از روش‌هایی که به‌صورت موضعی خرابی در سازه را مشخص می‌کنند می‌توان به بازرسی چشمی، رادیوگرافی، روش‌های آلتراسونیک، میدان مغناطیسی، روش‌های آکوستیک و میدان حرارت اشاره کرد. از دیگر معایب روش‌های موضعی مختل نمودن کاربری سازه و همچنین وقت‌گیر بودن آن می‌باشد.

در زمینه‌ی تشخیص خسارت سالوو^۳ [۹]، دابلینگ^۴ و فرار^۵ [۱۰] و نیز دابلینگ^۳ و همکاران [۲] پژوهش‌های بسیاری را انجام داده‌اند که در ادامه به بررسی این موضوع پرداخته می‌شود.

³ Salawu
⁴ Doebling
⁵ Farrar

۲-۳-۱- تشخیص آسیب با استفاده از فرکانس طبیعی

فرکانس‌های طبیعی در اثر خسارت‌های زیاد تغییر چشمگیر می‌کنند و یک ویژگی کلی از سازه‌اند. از این رو با استفاده از فرکانس‌های طبیعی به تنهایی نمی‌توان خسارت‌ها را مکان‌یابی کرد و شدت آن‌ها را تعیین کرد. فرکانس‌های طبیعی با کاهش سختی در اثر بارگذاری کاهش می‌یابد. این کاهش در همه مودهای ارتعاشی یکسان نیست. اندازه‌گیری فرکانس‌های طبیعی از دیگر عامل‌های مودال آسان-تر می‌باشد و می‌توان تغییرات ویژگی‌های کلی سازه‌ها را با آن‌ها بررسی کرد [۱۱].

فرکانس‌ها در اثر شرایط محیطی مانند تغییر درجه حرارت و رطوبت محیط تغییر می‌کنند [۱۲]. این پدیده تحلیل نتیجه‌های آزمایش را دشوار می‌سازد. آزمایش مودال معمولاً زمان زیادی می‌برد از این رو شرایط محیطی در مدت آزمایش تغییر می‌کند و روی نتایج اثر می‌گذارند. اثر تغییر شرایط محیطی روی ویژگی‌های ارتعاشی سبب عدم اطمینان در نتیجه‌های آزمایش می‌شود و در برخی حالات این اثرات بیشتر و قابل‌مقایسه با اثر خسارت است [۱۳]. بسیاری از پژوهشگران گزارش کرده‌اند که تغییر فرکانس‌های طبیعی در یک روز به دلیل تغییر درجه حرارت زیاد است. پژوهشگران آزمایشگاه لوس آلاموس^۶ پس از انجام آزمایش‌های طولانی‌مدت پل آلاموس کانپون^۷ دریافتند که سه فرکانس طبیعی نخست این پل در حدود ۴/۷٪، ۶/۶٪ و ۵٪ در ۲۴ ساعت شبانه‌روز تغییر می‌کند [۱۴]. در این آزمایش‌ها دمای عرشه پل در شبانه‌روز ۲۲ درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کرد. پیترز^۸ و همکاران نیز پل Z24 را در سوئیس به صورت پیوسته و در مدت یک سال بررسی کردند و گزارش دادند که فرکانس‌ها با افزایش درجه حرارت کاهش پیدا می‌کنند [۱۵]. ژیا^۹ و همکاران نیز مسئله کاهش فرکانس‌های طبیعی را با افزایش درجه حرارت بررسی کردند و نتیجه گرفتند که از بین مشخصه‌های مودال بنیادی شکل مودها به افزایش درجه حرارت و رطوبت حساس نیست [۱۳].

^۶ Los Alamos

^۷ Alamos Canyon

^۸ Peeters

^۹ Xia

تغییرات فرکانس‌های طبیعی به‌تنهایی مکان ترک‌ها را نشان نمی‌دهند و به کاهش سختی کل سازه وابستگی دارند. پژوهشگران در ابتدا با محاسبه تغییرات ضریب الاستیک دینامیکی ناشی از تغییر فرکانس‌ها به بررسی سازه خسارت‌دیده می‌پرداختند. از آن‌پس کارهای پژوهشی بسیاری در زمینه تعیین اندازه و مکان خسارت به کمک تغییر فرکانس‌ها انجام شد. برای یافتن مکان خسارت‌ها روش پیشرو یا وارون به کار می‌رود [۱۲]. در روش پیشرو مکان خسارت در الگوی عددی حدس زده می‌شود و با کمک سعی و خطا و مقایسه نتیجه‌های تجربی و عددی محل خسارت مشخص می‌شود. در روش وارون با داشتن فرکانس‌های تجربی اندازه و مکان ترک‌ها به دست می‌آیند.

سالانو روش دیگری را بر اساس فرکانس‌ها [۹] ارائه داد. روش‌های ارائه‌شده، در اثر شرایط محیطی مانند تغییر درجه حرارت و شرایط مرزی نتیجه خوبی نمی‌دهد. در بسیاری از حالات به کمک فرکانس‌های ویژه الگوی خسارت واقعی تعیین نمی‌شود و نمی‌توان خسارت را در سازه‌های متقارن مشخص ساخت.

۲-۳-۲- تشخیص آسیب با استفاده از شکل مود

با استفاده از شکل مود می‌توان مکان و شدت خسارت‌ها را بدون نیاز به یک مدل عددی جهت بروز رسانی اطلاعات سازه پیدا کرد. از این‌رو شاخص‌های خسارت بسیاری بر اساس تغییرات شکل مودها پیشنهاد شده‌اند. برای بررسی شکل مودها ابتدا باید نویز را از داده‌های تجربی برداشت و بنا به روش‌های ارزیابی موردنظر اشکال مودها را نسبت به ماتریس جرم یا بیشترین دامنه هم‌پایه کرد. پس از آن با به کار بردن داده‌ها در رابطه‌های شاخص خسارت، مکان و شدت خسارت‌ها تعیین خواهد شد. روش‌های موردبحث در این بخش شکل مودها را مستقیم و بدون نیاز به محاسبات پیچیده ارزیابی می‌کنند.

تغییرات شکل مودها در خسارت‌های کم بسیار ناچیز است. پژوهشگران به دنبال روش‌هایی هستند که این تغییرات ناچیز را آشکار سازند. آلمانگ^{۱۰} و همکاران [۱۶] رابطه‌ای برای تعیین میزان همبستگی دو بردار شکل مود پیشنهاد کردند. رابطه پیشنهادی آن‌ها که معیار اطمینان مودال^{۱۱} نام دارد، در بیشتر پژوهش‌ها به کار می‌رود. معیار اطمینان مودال برای دو بردار شکل مود φ_i^A و φ_j^B که نشانگر حالت خسارت‌دیده و خسارت ندیده سازه هستند [۱۶].

مقدار معیار اطمینان مودال بین ۰ تا ۱ است که به ترتیب بیانگر نا همبستگی و همبستگی دو جفت بردار شکل مودی است. این روش بر پایه این است که تغییر در بردارهای شکل مودی در مقاطع عرضی نزدیک به آسیب نسبتاً بزرگ‌تر از مکان‌های دور از آسیب است. آلمانگ [۱۷]، مروری را برای کاربردهای این معیار و شکل‌های دیگر آن ارائه داد. بنا به آن، معیار اطمینان مودال در طی بیست سالی که از نخستین کاربرد آن می‌گذرد، دگرگونی‌های زیادی پیدا کرده و برای بهبود این معیار راه-کارهایی پیشنهاد داده‌اند. با توجه به اینکه در معیار پیشنهادی آلمانگ تنها از یک جفت مود برای شناسایی آسیب استفاده می‌شد، مسئله انتخاب مودهای مناسب برای محاسبه آن معیار روشی مشابه بنام معیار اطمینان مودال هم‌پایه^{۱۲} را برای مکان‌یابی آسیب مطرح می‌کند. با این روش می‌توان چگونگی کاهش سختی در تک‌تک درجات آزادی را بررسی کرد. مقدار این معیار نیز مانند مقدار معیار اطمینان مودال بین صفر و یک تغییر می‌کند. اگر تغییر مکان مودال از درجه آزادی i از دو مجموعه اندازه‌گیری یکسان باشد، مقدار معیار اطمینان مودال هم‌پایه یک خواهد شد. تغییرات شکل مودها به دلیل خسارت سبب کاهش این معیار و نزدیکی آن به صفر می‌شود.

معیار اطمینان مودال هم‌پایه معنای فیزیکی ندارد و تنها مکان خسارت‌ها را نشان می‌دهد. توصیه می‌شود که این روش را برای آزمایش در حالت شرایط مرزی آزاد به کار نبرند. زیرا تکیه‌گاه‌ها روی سایر درجه‌های آزادی جدا از تکیه‌گاه اثر می‌گذارند و خطاهای آزمایش افزایش می‌یابد.

¹⁰ Allemang

¹¹ Modal Assurance Criterion (MAC)

¹² Co-ordinate Modal Assurance Criterion (COMAC)

برای یافتن مکان دقیق‌تر خسارت‌ها شکل دیگری از معیار اطمینان مودال پیشنهاد شده که معیار اطمینان مودال جزئی نام دارد و سازه را به چند بخش تقسیم می‌کند و در هر بخش بردارهای مودال با یکدیگر مقایسه می‌شوند [۱۷].

هنگامی که خسارت در نقطه‌ای از سازه بیشتر می‌شود، خمیدگی شکل مودها تغییر می‌کند و به‌سوی ناحیه خسارت‌دیده می‌گراید. در خسارت‌های زیاد می‌توان این تغییر را با چشم مشاهده کرد. به همین جهت برخی پژوهشگران با مشتق اول و دوم شکل مودها به آشکارسازی خسارت‌ها در سازه می‌پردازند. شاخص نرمی قدر مطلق تغییر توان دوم شکل مودها است. آن‌ها دو شاخص نرمی و سختی را با شاخص‌هایی که به تغییر مشتق شکل مودها وابسته‌اند مقایسه کردند. این مقایسه‌ها نشان دادند که برای ارزیابی خسارت‌ها بهتر است مشتق شکل مودها را بکار ببرند.

۲-۳-۳- تشخیص آسیب با استفاده از میرایی

کاربرد ضریب میرایی برای ارزیابی خسارت هنوز در مرحله تجربی باقی‌مانده است. بنا به پژوهش‌های انجام‌شده در خصوص میرایی به‌منظور ارزیابی خسارت در حقیقت نمی‌توان معیار درستی را بر اساس نسبت‌های میرایی به دست آورد. اندامبی^{۱۳} [۸] سازوکارهای میرایی و نسبت میرایی را به‌صورت نشانی از پایش سلامت سازه برای تیرهای بتن مسلح ترک‌خورده بکار برد. وی بازپخش انرژی کرنشی به دلیل تنش انتقالی بین فولاد و بتن هنگام ترک خوردن و انرژی هدر شده ناشی از اصطکاک را با افزایش خسارت و افزایش ضریب میرایی در نظر گرفت. تاکنون تلاش‌های فراوانی برای به‌کارگیری نسبت‌های میرایی به‌عنوان نشانه‌ای از خسارت انجام‌شده ولی هیچ‌کدام موفقیت‌آمیز نبوده‌اند.

کاساس^{۱۴} و همکاران [۱۸] با آزمایش روی تیرهای بتنی ترک‌خورده نشان دادند که هیچ رابطه روشنی میان رشد ترک و افزایش میرایی وجود ندارد. سالوو و همکاران [۱۹] نیز روی یک پل بتن مسلح آزمایش کردند و معیار روشنی را برای میرایی به دست نیاوردند. به همین سبب در بیشتر

¹³ Ndambi

¹⁴ Casas

پژوهش‌ها نسبت‌های میرایی برای ارزیابی سازه‌های خسارت‌دیده بکار نمی‌روند.

۲-۳-۴- تشخیص آسیب با استفاده از خمیدگی‌ها یا کرنش‌های شکل مود

خمیدگی‌های شکل مود، برخلاف تغییر مکان‌های مودی، نسبت به خسارت‌ها حساسیت بیشتری دارند. اگر در یک تیر ترک خمشی ایجاد شود، از سختی خمشی آن کاسته خواهد شد و این پدیده سبب کاهش محلی خمیدگی‌ها می‌شود [۲۰]. می‌توان خمیدگی‌های شکل مود را کرنش‌های خمشی وابسته به هر یک از مودهای ارتعاشی خمشی دانست. با افزایش خسارت‌ها کرنش‌های مودال افزایش می‌یابند. بنابراین تغییر خمیدگی‌ها یا کرنش‌های مودال پیشروی خسارت‌ها را نشان می‌دهند. مفهوم خمیدگی شکل مودها را پاندی^{۱۵} و همکاران [۲۱] معرفی کردند. آن‌ها خمیدگی‌ها را از شکل تغییر مکان مودها با تقریب تفاوت مرکزی به دست آوردند و این شیوه را با روش اجزای محدود برای یک تیر با تکیه‌گاه‌های ساده به کار بردند و دریافتند که خمیدگی مودال نسبت به معیار اطمینان مودال بسیار حساس‌تر است. خاطرنشان می‌شود که برای به دست آوردن مقدار دقیق خمیدگی‌ها به یک شبکه اندازه‌گیری فشرده نیاز است و این کار در مودهای ارتعاشی با فرکانس بالاتر مشکل‌تر می‌شود [۲۱].

در روش‌های ارزیابی خسارت در سازه‌ها، کرنش‌های مودال یکی از عامل‌های مهم به شمار می‌روند. خمیدگی‌های محاسبه‌شده به روش تفاوت مرکزی هموار نیستند و به‌تندی بالا و پایین می‌روند. در صورت وجود نویز در داده‌ها این بالا و پایین رفتن‌ها بیشتر می‌شود. برای رسیدن به یک خمیدگی هموار باید نخست نویز را از داده‌های مودال جدا کرد. پس‌ازاین کار با روش‌های برازش منحنی یا بهینه‌سازی، کرنش‌های مودال با دقت مناسبی به دست می‌آیند. اما بازهم خطاهای موجود در نقاط مرزی مانند تکیه‌گاه‌ها باقی می‌مانند [۶]. برای پیشگیری از این خطاها که به مکان‌یابی نادرست خسارت‌ها می‌انجامد، باید روش‌های بهینه‌سازی مقید^{۱۶} به کار برود. در این روش‌ها شرایط مرزی

¹⁵ Pandey

¹⁶ Constructed Optimization

به صورت مقید تعریف می شوند و خمیدگی های همواری به دست می آیند. در مرجع [۶] روش بهینه سازی مقیدی به نام روش مرکب^{۱۷} ارائه شده که نويز را از داده ها جدا می سازد و با دقت بسیار زیادی کرنش های مودال را با قرار دادن شرایط مرزی محاسبه می کند.

وهاب و دیراک [۲۲] و به کمک ضریب خمیدگی خسارت به آشکارسازی خسارت ها در یک پل بتن پیش تنیده پرداختند. آن ها نشان دادند هنگامی که بیش از یک ناحیه خسارت دیده وجود داشته باشد، مکان یابی خسارت ها با اندازه گیری یک شکل مود امکان پذیر نیست و بایستی تعداد بیشتری از مودهای ارتعاشی اندازه گیری شوند. همچنین برای محاسبه دقیق خمیدگی شکل مودها باید شبکه فشرده ای از حسگرها را کار گذاشت. برخی از پژوهشگران خمیدگی های مودال را پیش و پس از خسارت با رابطه همبستگی معیار مودال مقایسه می کنند [۶].

ارزیابی خسارت در سازه های دوبعدی به کمک خمیدگی شکل مودها نیز بررسی شده است. در سازه های دوبعدی محاسبه خمیدگی ها مشکل تر است و بهتر است خمیدگی ها با روش های هموارسازی به دست آیند. ژانگ^{۱۸} و یانگ^{۱۹} [۲۳] روش هموارسازی شکاف را برای سازه های صفحه ای ارائه داده اند. این روش را پیش تر رتکلیف^{۲۰} [۲۴] و رتکلیف و باگاریا^{۲۱} [۲۵] برای سازه های یک بعدی به کار برده بودند. باتیپد و همکاران از شاخص خسارت بر اساس خمیدگی استفاده نمودند. اگر میان خمیدگی اندازه گیری شده و خمیدگی هموار شده شکافی باشد، این شکاف خسارت را نشان می دهد. با این روش می توان بدون آگاهی از شرایط اولیه سازه به ارزیابی خسارت ها پرداخت. در بیشتر موارد داده های مودال در شرایط اولیه در دسترس نیستند و به همین دلیل روش مورد بحث نسبت به سایر روش های موجود برتری دارد.

17 Mixed approach

18 Zhong

19 Yong

20 Ratcliffe

21 Bagaria

۲-۳-۵- تشخیص آسیب با استفاده از تغییر انرژی کرنشی

زمانی که شکل مودهای ارتعاشی به صورت تغییر مکان گره‌ای سازه در نظر گرفته می‌شود، انرژی کرنشی در سازه ذخیره می‌شود. در نتیجه انرژی ذخیره شده توسط شکل مودهای ارتعاشی، انرژی کرنشی مودال نامیده می‌شود [۲۶]. بنا به بخش قبلی، خمیدگی‌های هر یک از شکل مودها را می‌توان کرنش‌های مودال وابسته به هر مود ارتعاشی پنداشت. با داشتن کرنش‌های مودال و بهره گرفتن از رابطه‌های مقاومت مصالح، انرژی کرنشی مودال^{۲۲} به دست می‌آید. امروزه از انرژی کرنشی مودال برای بررسی خسارت به‌ویژه مکان‌یابی آسیب در سازه بهره برده می‌شود. تغییرات انرژی کرنشی مودال در گام‌های بارگذاری خسارت را نشان می‌دهد. تغییر انرژی کرنشی مودال، تاکنون برای آشکارسازی خسارت در بسیاری از سازه‌ها به کار رفته است. در این زمینه، یانگ^{۲۳} و همکاران با ارائه روشی نوین و با استفاده از تغییرات انرژی کرنشی مودال، خسارت را در سازه‌های دریایی بر اساس بارهای محیطی مورد بررسی قرار دادند [۲۷]. در روش پیشنهادی آن‌ها، ضریب تغییر انرژی کرنشی مودال و نیز ضریب خمشی انرژی کرنشی مودال استفاده شدند. همچنین فان^{۲۴} و کیائو^{۲۵} با پیشنهاد روشی بر اساس انرژی کرنشی توانستند ضریب مکان خسارت و نیز ضریب اصلاح شدت خسارت را بر اساس مفهوم انرژی کرنشی مودال تعیین کنند [۲۸]. در روش‌های پیشنهادی آن‌ها، فرکانس طبیعی و شکل مود در حالت‌های پیش از خسارت و نیز پس از وقوع آسیب، برای شناسایی خسارت در سازه‌های صفحه‌ای استفاده شدند. افزون بر این وانگ^{۲۶} و همکاران با ارائه یک روش کاربردی برای استفاده از انرژی کرنشی مودال، توانستند به بررسی خسارت در پل‌های خرپا شکل بپردازند [۲۹]. روش پیشنهادی آن‌ها بر اساس گسترش روش شاخص اطمینان مکان خسارت چندگانه، از مفهوم همبستگی بهره بردند. استفاده از حساسیت انرژی

²² Modal Strain Energy(MSE)

²³ Yang

²⁴ Fan

²⁵ Qiao

²⁶ Wang

کرنشی مودال را می‌توان در پژوهش یان^{۲۷} و همکاران مورد ارزیابی قرار داد. آن‌ها با استفاده از داده‌های مودال به دست‌آمده از بارهای محیطی توانستند به رابطه سازی حساسیت انرژی کرنشی مودال برای شناسایی خسارت دست یابند. روش پیشنهادی آن‌ها بر مبنای تجزیه و تحلیل آماری استوار بود. برای اثبات روش پیشنهاد شده، از یک تیر ساده و همچنین الگوسازی عددی بهره بردند. استابز و همکاران [۳۰]، بر اساس کاهش انرژی کرنشی مودال بین دو درجه آزادی، شاخصی را برای تعیین خسارت پیشنهاد دادند و آن را برای آسیب یابی سازه بکار بردند. در مرجع [۳۱] این رابطه‌ها را برای تیر اولر-برنولی گسترش داده‌اند.

در پی پژوهش‌های [۳۰] و [۳۱]، بسیاری از پژوهشگران برای بررسی کارایی و بهبود روش انرژی کرنشی تلاش کردند [۳۲]. در مرجع [۳۳] کارایی این روش را با مجموعه محدودی از عامل‌های مودال بررسی کردند. روش دیگری را شی^{۲۸} و همکاران [۳۴] برای تعیین خسارت با تغییر انرژی کرنشی ارائه دادند. روش پیشنهادی آن‌ها نه تنها محل، بلکه بزرگی خسارت را نیز تعیین می‌کرد ولی تنها برای حالت‌های با نویز بسیار کم رضایت‌بخش بود.

۲-۳-۶- تشخیص آسیب با استفاده از ماتریس نرمی

یکی از روش‌های ارزیابی خسارت محاسبه ماتریس نرمی است. به کمک ماتریس نرمی که از داده‌های تجربی محاسبه می‌شود، می‌توان مکان خسارت‌ها را پیدا کرد. در این روش نیازی به محاسبه کرنش-های مودال نیست. ماتریس نرمی نیروی ایستای وارده را به تغییر مکان سازه وابسته می‌کنند. این ماتریس با مودهای هم‌پایه شده نسبت به ماتریس جرم و فرکانس‌های طبیعی محاسبه می‌شود. برای محاسبه دقیق ماتریس نرمی باید همه شکل مودها و فرکانس‌های ویژه اندازه‌گیری شوند. این کار در آزمایشگاه امکان‌پذیر نیست. بنابراین ماتریس نرمی محاسبه‌شده با داده‌های آزمایشگاهی خطا دارد. ماتریس نرمی به تغییرات مودها در فرکانس‌های پایین‌تر حساس‌تر است. از این رو با شمار محدودی از

²⁷ Yan

²⁸ Shi

مودهای ارتعاشی نخست سازه، ماتریس نرمی با دقت مناسبی محاسبه می‌شود.

روند محاسبه ماتریس نرمی از دیدگاه نظری را می‌توان به آسانی دنبال کرد. محاسبه ماتریس نرمی به الگوی جزء محدود سازه نیازی ندارد و از رابطه‌های ساده معادله حرکت در دینامیک سازه‌ها به دست می‌آید.

ماتریس نرمی با وارون توان دوم فرکانس‌ها وابسته است و فرکانس‌های بالاتر روی ماتریس نرمی کمتر اثر می‌گذارند. در عمل تنها می‌توان تعداد محدودی از فرکانس‌ها را اندازه گرفت. از این رو ماتریس نرمی محاسباتی خطا دارد. اگر تعداد مودهای اندازه‌گیری شده از تعداد درجات آزادی کمتر باشد، خطای محاسباتی ماتریس نرمی را می‌توان با میانگین‌گیری فوربنیوس^{۲۹} محاسبه کرد. محاسبه میانگین فوربنیوس برای نمونه‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که می‌توان از این خطا چشم‌پوشید [۳۵]. خطای محاسبه ماتریس سختی که از وارون ماتریس نرمی به دست می‌آید بیشتر است. به همین دلیل، در بیشتر پژوهش‌ها روش نرمی را به کار می‌برند.

روش ماتریس نرمی را تاکنون پژوهشگران بسیاری برای آشکارسازی خسارت به‌کاربرده‌اند. پاندی و بیسواس^{۳۰} در [۳۶] و [۳۷] با بررسی تغییر ماتریس نرمی، خسارت‌ها را شناسایی و مکان‌یابی کردند. ژانگ^{۳۱} و آکنام^{۳۲} [۳۸] از مفهوم خمیدگی برای مقایسه ماتریس‌های نرمی در گام‌های خسارت بهره گرفتند. آن‌ها تغییر خمیدگی ستون‌های ماتریس نرمی را به‌عنوان نشان خسارت در سازه تعریف کردند. بررسی و مقایسه روش‌ها نشان می‌دهند که بسیاری از روش‌های پیشنهادی ابتکاری هستند و برای گونه ویژه‌ای از سازه‌ها پاسخ رضایت بخشی دارند. روش‌های ابتکاری پایه نظری ندارند و تنها با ابتکار و مشاهده و آزمایش روی داده‌های گوناگون پیشنهاد شده‌اند. یکی از این روش‌های ابتکاری روش مرجع [۳۶] می‌باشد که در آن ماتریس‌های نرمی پیش و پس از خسارت با یکدیگر مقایسه می‌شوند و بیشترین تغییر هر ستون از ماتریس نرمی را به‌عنوان شاخص خسارت در نظر می‌گیرند. تغییر ماتریس

²⁹ Forbenius

³⁰ Biswas

³¹ Zhang

³² Aktam

نرمی پیش و پس از ساخت با ماتریس $[\Delta]$ تعریف می‌شود [۳۹] و [۴۰]. برای بررسی تغییرات ماتریس نرمی، ژانگ و آکتام [۳۸] با کمک دو راه‌کار نرمی و خمیدگی، روش تغییر در خمیدگی سطح بار واحد را پیشنهاد کردند. شکل تغییر یافته سازه در اثر بار واحد، سطح بار واحد نام دارد. این سطح از ستون‌های ماتریس نرمی به دست می‌آید و خمیدگی آن با روش تفاضل مرکزی محاسبه می‌شود. به بیان دیگر آن‌ها به جای محاسبه خمیدگی شکل مودها، خمیدگی ستون‌های ماتریس نرمی را محاسبه و به عنوان شاخص خسارت ارائه دادند. آن‌ها هریک از ستون‌های ماتریس نرمی را یک بردار فرض کردند و خمیدگی یا انحنای هر بردار را با روش‌های ریاضی، مانند تفاضل محدود به دست آوردند. برای مقایسه ماتریس‌های نرمی در گام‌های خسارت و محاسبه شاخص خسارت، روش‌های دیگری مانند روش واریسی واحد، روش‌های خطای ماتریس سختی و نرمی باقیمانده نیز پیشنهاد شده‌اند. برنال^{۳۳} [۴۱] روش نوینی را برای بررسی تغییر ویژگی‌های ماتریس نرمی ارائه داد. روش پیشنهادی وی پایه نظری داشت و ابتکاری نبود. او با تجزیه مقدار منفرد ماتریس نرمی و پیدا کردن فضای صفر این ماتریس، بردارهایی را برای نشان دادن مکان خسارت‌ها تعریف کرد. او این بردارها را بردارهای مکان‌یابی خسارت^{۳۴} نامید. کارایی روش او برای مکان‌یابی خسارت‌ها با کمک آزمایش‌هایی نشان داده شد [۴۲]. زونت^{۳۵} و همکاران [۴۳] ماتریس نرمی را در فضای کرنش‌ها تصویر کردند و با این راهکار، پیشروی خسارت‌ها را نشان دادند. برخی از پژوهشگران، با کمک بردارهای ریتز^{۳۶} خسارت‌ها را در سازه نشان می‌دهند [۴۴]. بردارهای ریتز از حاصل ضرب ماتریس نرمی و بردار وابسته به نیروهای دینامیکی محاسبه می‌شوند. نورمید^{۳۷} و کلاف^{۳۸} [۴۵] و لگر^{۳۹} و همکاران [۴۶] نشان دادند که با شمار محدودی از بردارهای ریتز می‌توان کمیت‌های ناشناخته موردنظر را از سازه پیدا کرد.

³³ Bernal

³⁴ Damage Locating Vectors(DLV)

³⁵ Zonta

³⁶ Ritz

³⁷ Nour-Omid

³⁸ Clough

³⁹ Leger

۲-۳-۷- تشخیص آسیب با استفاده از روش‌های خطی با الگوی عددی (روش

به‌روزرسانی عامل‌های سازه‌ای)

در سازه‌ها به‌غیر از مکان و اندازه خسارت‌ها، عامل‌های ناشناخته بسیاری وجود دارد. این عامل‌های ناشناخته شامل جرم، سختی تکیه‌گاه‌ها، سختی و مقاومت سازه هستند. برای یافتن این عامل‌ها روش‌های به‌روزرسانی پیشنهاد شده‌اند که به حل یک مسئله بهینه‌سازی مقید می‌انجامد. در این شیوه‌ها یک الگوی عددی مانند الگوی اجزای محدود از سازه موردنظر را می‌سازند. در فرایند به‌روزرسانی عامل‌های ناشناخته الگوی عددی تا هنگامی تغییر می‌کنند که تفاوت میان داده‌های مودال عددی و تجربی به کمترین مقدار خود برسد [۱۲]. در این هنگام الگویی از سازه با رفتاری بسیار نزدیک به واقعیت به دست می‌آید. با این الگوی دقیق عامل‌های موردنظر به‌راحتی پیدا خواهد شد. در روش به‌روزرسانی روش انتخاب تابع هدف اهمیت دارد. این تابع بیشتر به‌صورت تفاوت میان فرکانس‌ها و شکل مودهای تجربی و عددی تعریف می‌شود. سایر ویژگی‌های سازه مانند شرایط مرزی را به‌عنوان قیدهای مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود [۶] و [۴۷].

کاولی^{۴۰} و آدامز^{۴۱} [۴۸] برای آشکارسازی و تعیین مکان و شدت خسارت در صفحات کامپوزیت فیبر کربن و آلومینیوم، یک روش به‌روزرسانی را بر اساس تغییر نسبت فرکانس‌های دو مود ارتعاشی ارائه کردند. آن‌ها نسبت اختلاف فرکانس طبیعی مدل عددی و سازه خسارت‌دیده در دو مود مختلف را به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفتند. مکان خسارت با کمینه کردن تابع هدف پیدا شده است. روش آن‌ها برای ارزیابی خسارت‌های چندتایی نیز مناسب بوده است.

پنی^{۴۲} و همکاران [۴۹] با روش‌های آماری و الگوی عددی، مکانی در سازه را که احتمال شکست در آن بیشتر بود پیدا کردند. آن‌ها نظریه کمترین مربعات تعمیم‌یافته را برای تعیین میزان نزدیکی داده‌های عددی و تجربی به‌کار برده‌اند.

⁴⁰ Cawley

⁴¹ Adams

⁴² Penny

کاساس و آپاریسیو^{۴۳} [۱۸] روش به روزرسانی را برای شناسایی بخش‌های ترک‌خورده از یک تیر بتنی بکار بردند. آن‌ها این شیوه را با کمینه کردن خطا میان فرکانس‌ها و دامنه‌های مودال اندازه‌گیری شده با مقدارهای عددی اجزای محدود ارائه دادند. بسیاری از پژوهشگران راهکارهای تحلیل حساسیت را برای حل مسئله بهینه‌سازی با گسترش دنباله تیلور از تابع خطا پیشنهاد کرده‌اند. روش الگوریتم ژنتیک نیز می‌تواند برای بهینه کردن این تابع به کار رود. الگوی عددی به روزرسانی شده باید تا حد امکان با سازه واقعی هماهنگ باشد.

در روش به روزرسانی، انتخاب عامل‌های مناسب اهمیت دارد. نمونه‌هایی از عامل‌های به روزرسانی، سختی تکیه‌گاه‌ها، سختی پیچشی و خمشی اجزاء و تابع‌های خسارت هستند. هاسیوتیس^{۴۴} و جنونگ^{۴۵} [۵۰] یک دسته معادلات هم‌زمان را برای سازه به دست آوردند که کاهش سختی محلی را به کاهش فرکانس‌های ویژه وابسته می‌ساخت. در بهینه‌سازی این مسئله، تغییرات ماتریس سختی با باقی‌مانده‌های مسئله، مقدار ویژه را کمینه کردند. آن‌ها این راهکار را برای یک سازه قابی فولادی دو دهانه و ۱۰ طبقه به کار بردند. راهکارهای به روزرسانی که برای کم کردن باقی‌مانده‌ها میان یک الگوی عددی و تجربی پیشنهاد شده‌اند برای مطالعات آزمایشگاهی ارزیابی خسارت مناسب‌اند.

۲-۳-۸- تشخیص آسیب با استفاده از روش‌های غیرخطی

در برابر شمار بسیار زیاد روش‌های خطی تعیین خسارت، روش‌های غیرخطی مورد توجه کمتری قرار گرفته‌اند. در زمینه ارتعاش غیرخطی تیرهای بتنی، نیلد^{۴۶} و همکاران [۵۱] با آزمایش تحریک ضربه‌ای روی تیرهای بتنی، نخستین پژوهش‌ها را آغاز کردند. آن‌ها نشان دادند هنگامی که دامنه ارتعاش کوچک است، فرکانس با یک تقریب خطی با زمان افزایش می‌یابد و پس از مدتی پایدار می‌شود. فرکانس تیرهای مزبور از فرکانس پل‌ها بسیار بزرگ‌تر بود. این آزمایش‌ها را چن^{۴۷} [۵۲]،

⁴³ Aparicio

⁴⁴ Hassiotis

⁴⁵ Jeong

⁴⁶ Neild

⁴⁷ chen

روی تیرها با مقیاس کوچک ادامه داد. او دریافت که در تیر خسارت ندیده میان دامنه و فرکانس وابستگی وجود دارد و این وابستگی‌ها تا هنگام گسیختگی تیر افزایش می‌یابند.

۲-۳-۹- تشخیص آسیب بر اساس تابع پاسخ فرکانسی

تابع پاسخ فرکانسی همه ویژگی‌های مکانیکی سازه را شامل می‌شود و مشخصه‌های مودال به کمک روش‌های برازش منحنی روی تابع‌های پاسخ فرکانسی به دست می‌آید. بنابراین می‌توان تغییرات این تابع‌ها را به‌عنوان شاخص خسارت به کار برد. تابع پاسخ فرکانسی از نسبت میان تحریک و پاسخ سازه به دست می‌آید. پاسخ سازه به‌صورت تغییر مکان، سرعت یا شتاب است. بنابراین در هریک از حالت‌ها تابع پاسخ فرکانسی متفاوت خواهد بود.

وانگ^{۴۸} و همکاران با استفاده از تابع پاسخ فرکانسی به شناسایی محل تقریبی آسیب پرداختند [۵۳]. کیرمیدجیان^{۴۹} و استرستر^{۵۰} با استفاده از بهینه‌سازی و تابع پاسخ فرکانسی روشی برای تشخیص آسیب در سازه‌ها ارائه نمودند. در این پژوهش از یک مدل اجزا محدود سازه‌ی سالم برای تطبیق پاسخ فرکانسی سازه آسیب‌دیده استفاده شد تا آسیب در سازه مشخص شود. کارایی این روش با اطلاعات به‌دست‌آمده از مدل یک پل موردبررسی قرار گرفت و آسیب در این پژوهش تشخیص داده شد [۵۴]. بگامبر^{۵۱} و لیر^{۵۲} به شناسایی آسیب بر روی یک خرپای دوبعدی و یک تیر دو سر آزاد با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی ترکیبی ذرات پرداختند [۵۵]. تابع هدف مورد استفاده در مسئله بهینه‌سازی تابع پاسخ فرکانسی بود. نتایج نشان داد که بهینه‌سازی ترکیبی ازدحام ذرات عملکرد بهتری را در تشخیص آسیب نسبت به بهینه‌سازی ازدحام ذرات دارا می‌باشد. موهان^{۵۳} و همکارانش پژوهشی بر اساس تابع پاسخ فرکانسی برای تشخیص آسیب ارائه نمودند [۵۶]. آن‌ها در این پژوهش برای حل مسئله تشخیص آسیب از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده نمودند همچنین این پژوهش بر روی

⁴⁸ whang

⁴⁹ Kiremidjian

⁵⁰ Straster

⁵¹ Begambre

⁵² Laier

⁵³ Mohan

تیرها و خریاها انجام شد. در این پژوهش عملکرد دو روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات جهت تشخیص آسیب مقایسه شد و با توجه به نتایج، الگوریتم ازدحام ذرات عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک دارا می‌باشد. لی^{۵۴} و شین^{۵۵} نیز پژوهشی بر روی تشخیص آسیب در سازه‌های صفحه‌ای بر اساس تابع پاسخ فرکانسی انجام دادند [۵۷].

۲-۳-۱۰- تشخیص آسیب با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی

بهینه‌سازی یکی از ابزارهای قدرتمند جهت استفاده در زمینه تشخیص آسیب در سازه‌ها می‌باشد. علم بهینه‌سازی را می‌توان به ۳ زیرشاخه: بهینه‌سازی توپولوژی، بهینه‌سازی شکل و بهینه‌سازی ابعادی تقسیم نمود که از این بین بیشترین تحقیقات در زمینه تشخیص آسیب با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی انجام شده است. نیشیزو^{۵۶} و همکاران با استفاده از روش بهینه‌سازی مجانب‌های پویا به تشخیص آسیب پرداختند [۵۸]. تابع هدف استفاده‌شده در این مقاله اختلاف بین فرکانس‌های طبیعی سازه بود. ژانگ و همکاران استفاده از روش مجموع سطوح تراز را برای تشخیص آسیب در سازه‌ها پیشنهاد دادند [۵۹]. این روش فقط توانایی شناسایی محل آسیب در سازه‌ها را دارد ولی در شناسایی شدت آسیب مشکل دارد. اسلامی و همکاران با استفاده از روش تندترین شیب نزولی و مدل مصالح مصنوعی محل و شدت آسیب در سازه‌ها را مشخص نمودند [۶۰]. آن‌ها در این پژوهش از دو تابع هدف اختلاف فرکانس طبیعی و اختلاف شکل مودها استفاده نمودند و به مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از این دو تابع پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده نشانگر عملکرد ضعیف تابع هدف اختلاف فرکانس طبیعی نسبت به اختلاف شکل مودها بود. عبداللہی و توکلی روش چگالی متغیر جریمه‌شده را جهت مشخص نمودن محل و شدت آسیب در سازه‌های سه‌بعدی استفاده نمودند. تابع هدف مورد استفاده در پژوهش آن‌ها اختلاف شکل مودها بود. آن‌ها با استفاده از روش گسترش مودها با تعداد کمی از داده‌های مودی سازه، آسیب در سازه را مشخص نمودند [۶۱].

⁵⁴ Lee

⁵⁵ Shin

⁵⁶ Nishizu

فصل سوم

تئوری شناسایی آسیب

به روش‌هایی که برای مشخص نمودن پاسخ سازه‌ها بر اساس آزمایش مودال انجام می‌گیرد، روش‌های شناسایی مودال گویند. برای تعیین مشخصات دینامیکی سازه معمولاً از دو روش آزمایش استفاده می‌شود. در روش اول نیروهای ورودی به سازه اعمال می‌شود و با داده‌های خروجی در قالب شتاب، سرعت یا جابجایی از آن استخراج می‌گردد. نسبت پاسخ خروجی به نیروی ورودی در حوزه فرکانس را تابع پاسخ فرکانسی و همین نسبت در حوزه زمان تابع پاسخ ضربه^{۵۷} گویند [۶۲]. به روش شناسایی مشخصات مودال با استفاده از این تابع‌ها روش غیرمستقیم گویند. در نوع دیگر آزمایش‌ها آزمایش داده‌های ورودی وجود ندارند و مشخصات مودال تنها با استفاده از داده‌های خروجی به دست می‌آیند. در این روش سازه توسط نیروهای محیطی از قبیل باد، عبور ماشین‌آلات و غیره مرتعش می‌شود سپس با استفاده از داده‌های خروجی به شناسایی داده‌های مودال پرداخته می‌شود. این روش را شناسایی محیطی داده‌های مودال یا شناسایی مودال با داده‌های خروجی-تنها نامند [۶۳]. معمولاً برای سازه‌های واقعی و با مقیاس بزرگ استفاده از روش اول میسر نمی‌باشد و مجبور به استفاده از روش دوم هستیم. به روش شناسایی مشخصات مودال بدون استفاده از تابع‌های پاسخ ضربه و فرکانس روش مستقیم گویند. پارامترهای به‌دست‌آمده از این روش فرکانس‌های طبیعی، شکل مود و میرایی سازه خواهند بود. این پارامترها نشانگر رفتار سازه می‌باشند و تغییر در آن‌ها بیان‌کننده تغییر در مشخصات دینامیکی سازه نظیر سختی، جرم خواهد بود. گاهی اوقات استفاده از آزمایش‌های تجربی یا عملی مودال غیرممکن یا بسیار پرهزینه می‌باشند. همچنین می‌توان با استفاده از روش‌های نظری و ریاضی داده‌هایی در حد واقعی و قابل قبول به دست آورد که زمان و هزینه روش‌های آزمایشگاهی را کاهش داد. از این رو می‌توان با انجام روش‌های نظری داده‌های مودال مربوط به سازه را به دست آورد.

⁵⁷ Impulse Response Function

با پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه روش‌های نظری و همچنین نرم‌افزارهای کامپیوتری می‌توان با دقت بسیار خوبی داده‌های مودال را به دست آورد. برای استفاده از روش‌های نظری داشتن اطلاعات سازه اولیه جهت مدل‌سازی آن یکی از ملزومات مورد توجه می‌باشد. از این رو با دسترسی به اطلاعات سازه اولیه و با استفاده از روش‌های اجزا محدود می‌توان مدل‌سازی سازه را انجام داد. در روش‌های نظری جهت تعیین داده‌های مودال باید از مشخصات فیزیکی سازه استفاده نمود درواقع با استفاده از ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی می‌توان به داده‌های مودال دست یافت. از این رو با استفاده از تحلیل اجزای محدود مشخصات فیزیکی سازه استخراج می‌گردد. امروزه یکی از کاربردی‌ترین مسائل جهت استخراج داده‌های مودال در روش‌های نظری استفاده از مسئله مقادیر ویژه و بردارهای ویژه می‌باشد.

۳-۲- تعیین فرکانس طبیعی و شکل مدهای سازه

یکی از فرضیات در این پژوهش عدم وجود میرایی در سازه می‌باشد. از این رو به بررسی معادله دینامیکی حاکم بر سازه نامیرا در شرایط ارتعاش آزاد می‌پردازیم.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = 0 \quad (۱-۳)$$

با حل معادله دینامیکی بالا می‌توان پاسخ‌های سازه را به دست آورد.

$$\mathbf{u} = \boldsymbol{\varphi}_i e^{j\omega t} \quad (۲-۳)$$

$$\ddot{\mathbf{u}} = -\omega^2 \boldsymbol{\varphi}_i e^{j\omega t} \quad (۳-۳)$$

در این دو رابطه‌ها $\boldsymbol{\varphi}_i$ و ω_i به ترتیب شکل مود و فرکانس طبیعی مود i ام سازه می‌باشند. با قرار دادن دو رابطه بالا در رابطه (۱-۳) داریم.

$$\mathbf{M}(-\omega_i^2 \boldsymbol{\varphi}_i e^{j\omega t}) + \mathbf{K}(\boldsymbol{\varphi}_i e^{j\omega t}) = 0 \quad (۴-۳)$$

به‌طور خلاصه رابطه (۳-۴) به‌صورت زیرنویسی می‌شود.

$$(-\omega^2 \mathbf{M} \varphi_i + \mathbf{K} \varphi_i) e^{j\omega t} = 0 \quad (۳-۵)$$

رابطه $e^{j\omega t}$ مقداری غیر صفر می‌باشد. بنابراین رابطه نهایی جهت شناسایی مشخصات مودال سازه با استفاده از روش‌های نظری به شرح زیر می‌باشد.

$$\mathbf{K} \varphi_i = \omega_i^2 \mathbf{M} \varphi_i \quad (۳-۶)$$

بجای رابطه بالا می‌توان از معادله مشخصه جهت استخراج داده‌های مودال استفاده نمود.

$$(\mathbf{K} - \omega_i^2 \mathbf{M}) \varphi_i = 0 \quad (۳-۷)$$

برای به دست آوردن فرکانس طبیعی و شکل مودها از رابطه (۳-۷) ابتدا دترمینان $(\mathbf{K} - \omega_i^2 \mathbf{M})$ را برابر صفر قرار می‌دهیم تا مقادیر فرکانس طبیعی به دست آید، سپس با جایگذاری مقادیر فرکانس‌های طبیعی شکل مودها به دست خواهد آمد.

۳-۳- تعیین تابع پاسخ فرکانسی با استفاده از روش‌های نظری

در این مطالعه، برای شناسایی خرابی در سازه‌ها، تابع پاسخ فرکانس سازه به‌عنوان یک پاسخ سودمند در نظر گرفته شده است. از این تابع که از مشخصه‌های دینامیکی سازه می‌باشد، می‌توان در شناسایی مکان و شدت خرابی در سازه‌ها استفاده کرد. لذا در این قسمت، نحوه محاسبه‌ی تابع پاسخ فرکانسی بیان می‌شود. همان‌طور که توضیح داده شد تابع پاسخ فرکانسی از نسبت پاسخ سازه به نیروی ورودی در حوزه فرکانس به‌وسیله آزمایش‌های تجربی مودال به دست می‌آید. در اینجا برای محاسبه تابع پاسخ فرکانسی از روش‌های نظری استفاده می‌کنیم از این‌رو نیاز به محاسبه فرکانس طبیعی و شکل مود سازه داریم که در بخش ۳-۲ توضیح داده شد.

تابع پاسخ فرکانسی نسبت پاسخ سازه به نیروی ورودی در فضای فرکانسی می‌باشد. پاسخ سازه می‌تواند شتاب، سرعت یا جابجایی باشد. رابطه بین نیرو ورودی و پاسخ سازه به صورت زیر می‌باشد [۶۴].

$$\mathbf{X}(\omega) = \mathbf{H}(\omega) \cdot \mathbf{F}(\omega) \quad (۸-۳)$$

$$\mathbf{H}(\omega) = \frac{\mathbf{X}(\omega)}{\mathbf{F}(\omega)} \quad (۹-۳)$$

در رابطه بالا $\mathbf{H}(\omega)$ برابر ماتریس تابع پاسخ فرکانسی، $\mathbf{X}(\omega)$ برابر با پاسخ سازه در حوزه فرکانس و $\mathbf{F}(\omega)$ نیز نیروی ورودی در فضای فرکانسی می‌باشد. معادله حرکت یک سیستم چند درجه آزادی به صورت رابطه (۱۰-۳) می‌باشد.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{P}(t) \quad (۱۰-۳)$$

بطوریکه $\mathbf{M}$ ، $\mathbf{C}$ و $\mathbf{K}$ برابر با ماتریس جرم، ماتریس میرایی و ماتریس سختی سازه به ترتیب می‌باشد. $\mathbf{P}(t)$ برابر با بردار نیروی خارجی وارد بر سازه، $\mathbf{x}$ ، $\dot{\mathbf{x}}$ و $\ddot{\mathbf{x}}$ به ترتیب برابر با بردار جابجایی، سرعت و شتاب سازه می‌باشند. با انتقال این معادله به حوزه فرکانسی معادله زیر حاصل می‌شود.

$$(-\Omega^2 \mathbf{M} + j\Omega \mathbf{C} + \mathbf{K})\mathbf{X}(\Omega) = \mathbf{F}(\Omega) \quad (۱۱-۳)$$

در معادله (۱۱-۳)، Ω برابر با فرکانس بار اعمالی به سازه، j مساوی $\sqrt{-1}$ ، $\mathbf{X}(\Omega)$ و $\mathbf{F}(\Omega)$ به ترتیب برابر با جابجایی و نیروی اعمالی به سازه در فضای فرکانسی می‌باشد. در رابطه بالا عبارت $(-\Omega^2 \mathbf{M} + j\Omega \mathbf{C} + \mathbf{K})$ را با $\mathbf{Z}(\Omega)$ نیز نشان می‌دهند که به آن سختی دینامیکی گویند. ضرب ماتریس سختی دینامیکی در ماتریس نرمی دینامیکی (مبین ماتریس تابع پاسخ فرکانسی $\mathbf{H}(\omega)$) برابر با ماتریس همانی می‌باشد [۶۴].

$$(-\Omega^2 \mathbf{M} + j\Omega \mathbf{C} + \mathbf{K})\mathbf{H}(\Omega) = \mathbf{I} \quad (۱۲-۳)$$

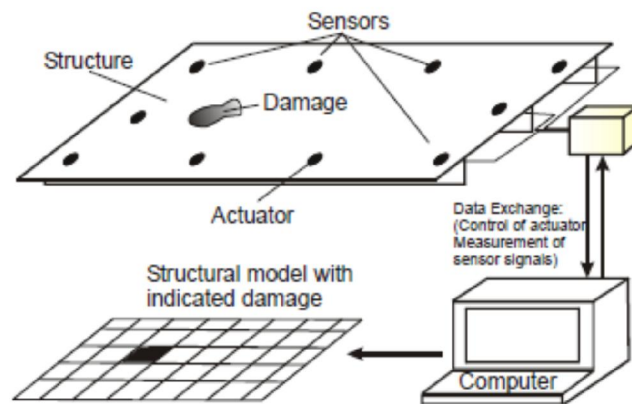
برای سازه‌های واقعی به دلیل وجود درجات آزادی بسیار موجود در سازه محاسبه ماتریس تابع پاسخ فرکانسی توسط رابطه بالا توصیه نمی‌شود. از این رو جهت محاسبه تابع پاسخ فرکانسی از رابطه (۳-۳)

(۱۳) استفاده می‌کنیم. تابع پاسخ فرکانسی برای یک سیستم چند درجه آزادی بدون در نظر گرفتن میرایی با استفاده از داده‌های مودال به صورت زیر به دست می‌آید.

$$H_{ij}(\omega) = \sum_{n=1}^{nm} \frac{\varphi_{in} \cdot \varphi_{jn}}{(\omega_n^2 - \omega^2)} \quad (۱۳-۳)$$

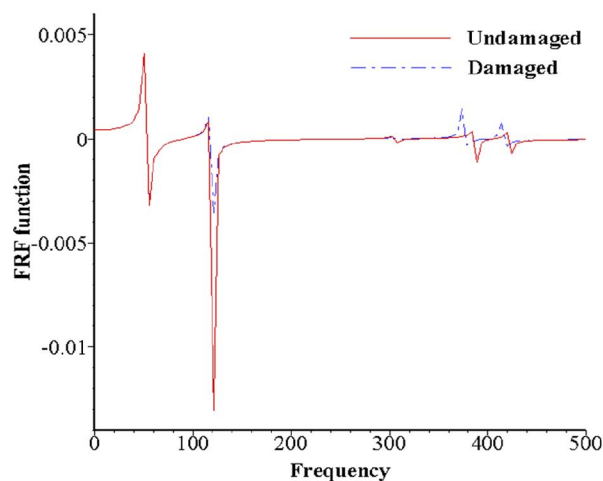
در این رابطه $H_{ij}(\omega)$ برابر با پاسخ در درجه آزادی i ام سازه در قالب جابجایی به ازای یک بار وارد شده در درجه آزادی j ام با بزرگای واحد و فرکانس ω می‌باشد. φ_{in} برابر با شکل مود درجه آزادی i ام به ازای مود n در سازه است. ω_n برابر با فرکانس طبیعی سازه در n ام، nm تعداد موده‌های محاسبه شده و ω برابر فرکانس بار اعمالی به سازه می‌باشد. برای محاسبه تابع پاسخ فرکانسی در یک درجه آزادی دلخواه از سازه همان طور که توضیح داده شد نیاز به یک بار با بزرگای واحد و با فرکانس متغیر می‌باشد. از این رو ما یک نیروی ورودی با فرکانس متغیر در بازه فرکانس طبیعی سازه را در روند الگوریتم نظری در نظر می‌گیریم. جهت محاسبه تابع پاسخ فرکانسی برای تشخیص آسیب از ۳ راه کار می‌توان استفاده کرد؛ اولین راه کار ثابت بودن محل حس گر درازای متغیر بودن محل بار ورودی (البته حس گر در کارهای آزمایشگاهی استفاده می‌شود و ما در اینجا از روش‌های نظری استفاده می‌کنیم و منظور محلی است که پاسخ سازه برای آنجا به دست آمده است)، دومین راه کار ثابت بودن محل بار ورودی و متغیر بودن محل حس گرها می‌باشد و سومین راه کار جابجایی حس گر و محل نیروی ورودی که توصیه نمی‌شود. در این پژوهش از دومین راه کار استفاده شده است. از این رو ماتریس تابع پاسخ فرکانسی به یک بردار تبدیل می‌شود و حجم محاسبات کمتر می‌شود.

پاسخ‌های در محدوده فرکانس سازه‌ها حاوی اطلاعات بسیار جامع و مفیدی از سازه می‌باشند که به کارگیری آن‌ها برای شناسایی خرابی در سازه‌ها در مقایسه با دیگر مشخصه‌های دینامیکی سازه‌ها موجب دقت بسیار بالاتری خواهد شد. در این تحقیق تابع پاسخ فرکانسی سازه سالم و آسیب دیده را محاسبه کرده تا در ادامه با کمک بهینه سازی به شناسایی خرابی بپردازیم. شماتیک کلی یک سازه و مدل اجزای محدود آن جهت تعیین تابع پاسخ فرکانسی در شکل (۱-۳) قابل مشاهده می‌باشد.



شکل (۱-۳) شماتیک یک سازه واقعی و مدل اجزای محدود آن جهت تعیین تابع پاسخ فرکانسی [۶۴]

در شکل شماره ۳-۲ اختلاف تابع پاسخ فرکانسی در حالت سازه سالم و آسیب دیده برای صفحه خمشی مثال ۱ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود مقادیر تابع پاسخ فرکانسی در دو حالت سازه سالم و همچنین سازه آسیب دیده متفاوت می باشد و این تفاوت در جایی که فرکانس بار ورودی با فرکانس طبیعی سازه برابر است بیشتر مشهود می باشد. از این رو می بایست دامنه تغییر فرکانس بار ورودی با دامنه فرکانس طبیعی سازه برابر باشد تا نتایج بهتری در روند تشخیص آسیب به دست آید.



شکل (۲-۳) تأثیر خرابی بر رو تابع پاسخ فرکانسی

۳-۴- تعیین ماتریس سختی سازه توسط اجزا محدود

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد در روش‌های نظری یکی از راه‌های مدل‌سازی سازه استفاده از اجزا محدود می‌باشد. با تحلیل اجزا محدود می‌توان به راحتی از روش‌های به‌روزرسانی مدل جهت تشخیص آسیب در سازه‌ها استفاده نمود. کاربرد اصلی روش اجزا محدود در این پایان‌نامه تعیین ماتریس سختی و ماتریس جرم سازه جهت محاسبه داده‌های مودال می‌باشد. همچنین با استفاده از روش به‌روزرسانی مدل به تشخیص آسیب در سازه پرداخته می‌شود.

در این پژوهش از صفحه میندلین-رایزنر جهت انجام روش اجزا محدود استفاده شده است. در تئوری میندلین-رایزنر برخلاف تئوری صفحات کیرشهف تغییر شکل‌های برشی نیز در نظر گرفته می‌شود [۶۵]. فرضیات این تئوری به صورت زیر می‌باشد.

۱- جابجایی‌ها نسبت به ضخامت صفحه ناچیز می‌باشند.

۲- تنش عمود بر صفحه اصلی صفر در نظر گرفته می‌شود ($\sigma_z = 0$).

۳- مقاطع عمود بر سطح میانی صفحه بعد از خمش لزوماً عمود باقی نمی‌مانند.

انرژی کرنشی صفحه میندلین-رایزنر به صورت رابطه (۳-۱۴) می‌باشد.

$$U = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \sigma_f^T \epsilon_f d\Omega + \frac{\alpha}{2} \int_V \sigma_c^T \epsilon_c d\Omega \quad (۳-۱۴)$$

که در این رابطه

$$\sigma_f^T = [\sigma_x \ \sigma_y \ \tau_{xy}] \quad (۳-۱۵)$$

$$\epsilon_f^T = [\epsilon_x \ \epsilon_y \ \gamma_{xy}] \quad (۳-۱۶)$$

تنش خمشی و کرنش خمشی می‌باشند و

$$\sigma_c^T = [\tau_{xz} \tau_{yz}] \quad (۱۷-۳)$$

$$\varepsilon_c^T = [\gamma_{xz} \gamma_{yz}] \quad (۱۸-۳)$$

تنش و کرنش برشی می‌باشند. پارامتر α در اینجا به‌عنوان ضریب اصلاح برشی می‌باشد و مقدار آن معمولاً بین $\frac{2}{3}$ تا $\frac{5}{6}$ در نظر گرفته می‌شود [۶۶].

جابجایی‌ها در این تئوری به‌صورت سه جابجایی اصلی در نظر گرفته می‌شود که به علت ناچیز بودن جابجایی در دو راستای محورهای صفحه اصلی آن‌ها را به‌صورت چرخش در نظر می‌گیریم.

$$u = z\theta_x; \quad v = z\theta_y; \quad w = w_0 \quad (۱۹-۳)$$

کرنش‌های خمشی توسط روابط زیر به دست می‌آیند.

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = z \frac{\partial \theta_x}{\partial x} \quad (۲۰-۳)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = z \frac{\partial \theta_y}{\partial y} \quad (۲۱-۳)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = z \left(\frac{\partial \theta_y}{\partial x} + \frac{\partial \theta_x}{\partial y} \right) \quad (۲۲-۳)$$

همچنین کرنش‌های برشی توسط روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial w}{\partial x} + \theta_x \quad (۲۳-۳)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial w}{\partial y} + \theta_y \quad (۲۴-۳)$$

رابطه خطی الاستیک بین تنش و کرنش خمشی برای مصالح همگن و همسانگرد به‌صورت زیر می‌باشد.

$$\sigma_f = D_f \varepsilon_f \quad (۲۵-۳)$$

که D_f بیانگر ماتریس الاستیسیته خمشی می باشد.

$$D_f = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (۲۶-۳)$$

رابطه خطی الاستیک بین تنش و کرنش برشی نیز به صورت رابطه (۲۷-۳) بیان می شود.

$$\sigma_c = D_c \varepsilon_c \quad (۲۷-۳)$$

که D_c بیانگر ماتریس الاستیسیته برشی می باشد.

$$D_c = \begin{bmatrix} G & 0 \\ 0 & G \end{bmatrix} \quad (۲۸-۳)$$

در رابطه بالا G برابر با مدول برشی می باشد. با جایگذاری این مقادیر در رابطه انرژی کرنشی، رابطه (۱۴-۳) تبدیل به رابطه زیر می شود.

$$U = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \varepsilon_f^T D_f \varepsilon_f d\Omega + \frac{\alpha}{2} \int_V \varepsilon_c^T D_c \varepsilon_c d\Omega \quad (۲۹-۳)$$

مقادیر جابجایی توسط یک تابع شکل درونیابی شده اند.

$$w = \sum_{i=1}^n N_i(\xi, \eta) w_i, \quad \theta_x = \sum_{i=1}^n N_i(\xi, \eta) \theta_{xi}, \quad \theta_y = \sum_{i=1}^n N_i(\xi, \eta) \theta_{yi} \quad (۳۰-۳)$$

بطوریکه $N_i(\xi, \eta)$ برابر با تابع شکل المان ۴ گرهی Q4 می باشد.

$$N_1(\xi, \eta) = l_1(\xi) l_1(\eta) = \frac{1}{4} (1-\xi)(1-\eta) \quad (۳۱-۳)$$

$$N_2(\xi, \eta) = l_2(\xi) l_1(\eta) = \frac{1}{4} (1+\xi)(1-\eta) \quad (۳۲-۳)$$

$$N_3(\xi, \eta) = l_2(\xi)l_2(\eta) = \frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta) \quad (33-3)$$

$$N_4(\xi, \eta) = l_1(\xi)l_2(\eta) = \frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta) \quad (34-3)$$

کرنش صفحات خمشی به صورت زیر تعریف می شود.

$$\varepsilon_f = z\mathbf{B}_f\mathbf{d}^e; \quad \varepsilon_c = \mathbf{B}_c\mathbf{d}^e \quad (35-3)$$

ماتریس کرنش-جابجایی برای حالت خمشی و برشی در روابط زیر نشان داده شده اند.

$$\mathbf{B}_f = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & \dots & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial x} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & \dots & 0 & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \dots & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial y} & \frac{\partial N_4}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (36-3)$$

$$\mathbf{B}_c = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & N_1 & 0 & \dots & \frac{\partial N_4}{\partial x} & N_4 & 0 \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & 0 & N_1 & \dots & \frac{\partial N_4}{\partial y} & 0 & N_4 \end{bmatrix} \quad (37-3)$$

با توجه به روابط بیان شده می توان رابطه انرژی کرنشی را مجدداً به صورت زیر بازنویسی نمود.

$$U = \frac{1}{2}\mathbf{d}^{eT} \iint_{\Omega^e z} \mathbf{B}_f^T \mathbf{D}_f \mathbf{B}_f dz d\Omega^e \mathbf{d}^e + \frac{\alpha}{2}\mathbf{d}^{eT} \iint_{\Omega^e z} \mathbf{B}_c^T \mathbf{D}_c \mathbf{B}_c dz d\Omega^e \mathbf{d}^e \quad (38-3)$$

ماتریس سختی صفحه میندیلین به صورت زیر به دست می آید.

$$\mathbf{K}^e = \frac{h^3}{12} \int_{\Omega^e} \mathbf{B}_f^T \mathbf{D}_f \mathbf{B}_f d\Omega^e + \frac{\alpha}{2}h \int_{\Omega^e} \mathbf{B}_c^T \mathbf{D}_c \mathbf{B}_c d\Omega^e \quad (39-3)$$

یا به صورت

$$\mathbf{K}^e = \frac{h^3}{12} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \mathbf{B}_f^T \mathbf{D}_f \mathbf{B}_f |\mathbf{J}| d\xi d\eta + \frac{\alpha}{2}h \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \mathbf{B}_c^T \mathbf{D}_c \mathbf{B}_c |\mathbf{J}| d\xi d\eta \quad (40-3)$$

می‌باشد. در اینجا $|\mathbf{J}|$ برابر با دترمینان ماتریس ژاکوبین است. برای حل انتگرال رابطه (۳-۴۰) می‌توان از روش‌های عددی استفاده کرد. به این منظور معمولاً برای به دست آوردن ماتریس سختی المان Q4 از روش 2×2 نقطه‌ای گوس استفاده می‌شود.

$$\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \mathbf{F}(\xi, \eta) d\xi d\eta = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 w_i w_j \mathbf{F}(\xi, \eta) \quad (3-41)$$

که در آن p, q به ترتیب تعداد نقاط انتگرال‌گیری در جهت‌های ξ, η هستند و $w_i w_j$ وزن‌های مرتبط مشابه شکل برای بعضی درجات انتگرال‌گیری می‌باشند. در این پایان‌نامه هم از روش ۲ نقطه‌ای گوس استفاده شده است.

$$\mathbf{K}^e = \frac{h^3}{12} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \mathbf{B}_f^T \mathbf{D}_f \mathbf{B}_f |\mathbf{J}| w_i w_j + \frac{\alpha}{2} h \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \mathbf{B}_c^T \mathbf{D}_c \mathbf{B}_c |\mathbf{J}| w_i w_j \quad (3-42)$$

۳-۵- مسئله بهینه‌سازی

درواقع بهینه‌سازی، به دست آوردن بهترین راه‌حل برای یافتن مجموعه‌ای از متغیرهای طراحی است که منجر به یک مقدار بهینه برای یک یا چند تابع هدف گردد. هدف از بهینه‌سازی یافتن حداقل یا حداکثر تابعی است که شامل متغیرهای طراحی باشد. در بهینه‌سازی سازه‌ها به‌طور عمومی پارامترهای اقتصادی به‌عنوان پارامترهای اصلی طراحی در نظر گرفته می‌شوند؛ که در حالت کلی شامل وزن و مصالح مصرفی می‌باشند. در این قبیل مسائل عمومی بهینه‌سازی از یک سری قید برای محدود کردن بهینه‌سازی استفاده می‌شود. بهینه‌سازی در سازه‌ها به‌طور معمول احتیاج به روش‌های تکراری دارد.

تعداد تکرار در روش‌های بهینه‌سازی برای رسیدن به سمت شرایط بهتر، بستگی به تعداد درجات آزادی یا تعداد متغیرها دارد. با افزایش تعداد متغیرهای طراحی، زمان محاسبه به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای

افزایش می‌یابد. هر مرحله به دو گام تقسیم می‌شود: در گام اول سازه تحلیل می‌شود تا پاسخ آن نسبت به متغیرهای طراحی به دست آید. در گام دوم متغیرهای طراحی بر اساس ضوابط بهینه‌سازی اصلاح می‌گردند. از مشکلات دیگر روش‌های کلاسیک حجم زیاد اطلاعات ایجاد شده است که بررسی و ذخیره نمودن آن دشوار می‌باشد. در مسئله مورد بررسی، هدف شناسایی آسیب در سازه است. لذا برای دستیابی به این منظور از روش مصالح مصنوعی همسانگرد استفاده می‌شود. در این روش با تعریف شاخصی برای هر المان به‌عنوان متغیر طراحی، توپولوژی سازه شامل شدت شاخص‌های المان‌ها را با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی، می‌توان یافت.

به‌طور کلی هر مسئله بهینه‌سازی از سه متغیر اصلی زیر تشکیل می‌شود:

۱- **متغیرهای طراحی:** هر سیستم مهندسی را با مجموعه‌ای از کمیت‌ها می‌توان توصیف نمود.

بعضی از این کمیت‌ها در طول عملیات بهینه‌سازی تغییر می‌کنند که متغیرهای بهینه‌سازی نامیده می‌شوند. از طرف دیگر مقادیری از سیستم که در طول فرایند بهینه‌سازی ثابت هستند را پارامترهای از پیش تعیین‌شده می‌نامند. در حالت کلی در مهندسی عمران، متغیرهای طراحی بهینه‌سازی ممکن است مربوط به‌اندازه، هندسه و توپولوژی سازه باشد. ابعاد کلی سازه‌ها، مشخصات مقاطع سازه‌ها و ... می‌توانند به‌عنوان متغیرهای طراحی مربوط به‌اندازه سازه انتخاب شوند. متغیرهای طراحی هندسه متغیرهایی هستند که با تغییر آن‌ها، شکل و پیکربندی اولیه سازه تغییر می‌کند، مانند مختصات گره‌ها در یک خرپا یا قاب ساختمانی. اگر در طول فرایند بهینه‌سازی، هدف حذف المان‌های غیرضروری و یا حذف قسمتی از مصالح در سازه باشد، در این حالت متغیرهای بهینه‌سازی بیانگر توپولوژی سازه می‌باشد.

۲- **تابع هدف:** تابعی است برحسب متغیرهای طراحی که باید انعکاس‌دهنده هدف اصلی از

مسئله طراحی باشد. به‌طور کلی، تابع هدف باید مهم‌ترین ویژگی یک طرح را بیان نماید. انتخاب

تابع هدف مناسب یکی از تصمیمات مهم در بهینه‌سازی است.

۳- **قیدهای طراحی:** به مجموعه‌ای از معیارها، ضوابط و دستورالعمل‌هایی که در مسئله طراحی

بهینه باید لحاظ شوند، قیود یا محدودیت‌های طراحی گفته می‌شود. به‌عنوان مثال، برای طراحی

ایمن یک سازه، تنش‌ها و تغییر مکان‌ها باید از مقادیر مجاز خود کوچک‌تر باشند. قیدها در حالت

کلی ممکن است به‌صورت مساوی یا نامساوی باشند.

۳-۵-۱- فرم ریاضی عمومی برای یک مسئله بهینه‌سازی سازه‌ای

منظور از سازه بهینه می‌تواند سازه‌ای با کم‌ترین وزن، بیش‌ترین سختی و یا حتی پایدارترین رفتار در

مقابل کماتش باشد. به‌منظور رسیدن به هرکدام از این اهداف، ممکن است قیدهایی نیز وجود داشته

باشند. در مسائل بهینه‌سازی سازه‌ای، معمولاً کمیت‌هایی همچون حجم مصالح به کار گرفته‌شده،

تنش‌ها، تغییر مکان‌ها و حتی هندسه سازه به‌عنوان قید در نظر گرفته می‌شوند [۴].

به‌طور کلی می‌توان مسئله بهینه‌سازی عمومی را به فرم زیر بیان نمود:

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && f(\mathbf{x}) \\ & \text{subjected to} && h_j(\mathbf{x}) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, n_h \\ & && g_k(\mathbf{x}) \leq 0 \quad k = 1, 2, \dots, n_g \\ & && x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (3-43)$$

که در آن $f(x)$ تابع هدف، $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ برداری از متغیرهای طراحی، $h_j(x)$ قیدهای مساوی

و $g_k(x)$ قیدهای نامساوی هستند. همچنین n_g, n_h و n به ترتیب تعداد قیدهای مساوی، نامساوی و

متغیرهای طراحی هستند. مقادیر x_i^l و x_i^u نیز کران‌های پایین و بالای متغیرهای طراحی x_i محسوب

می‌شوند. مجموعه‌ای از متغیرهای طراحی که همه قیدها را اکتان کنند، یک فضای شدنی را تشکیل

می‌دهند. از طرفی، فضای نشدنی مجموعه‌ای از همه نقاط طراحی است که حداقل یکی از قیدها را نقص کرده باشند.

اگر تابع هدف و قیدهای مساوی و نامساوی توابعی خطی از متغیرهای طراحی باشند، آنگاه مسئله یک مسئله بهینه‌سازی خطی خواهد بود. در یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی، تابع هدف یا حداقل یکی از قیدها یک تابع غیرخطی از متغیرهای طراحی است. به‌طورمعمول مسائل بهینه‌سازی سازه‌ای جزء مسائل بهینه‌سازی غیرخطی می‌باشند [۶۶].

۳-۵-۲- انواع مسائل بهینه‌سازی سازه‌ای

طراحی مهندسی سازه را می‌توان به سه مرحله تقسیم کرد. در مرحله اول با توجه به فضای طراحی، فرم و سیستم سازه مشخص می‌شود. مرحله دوم به تعیین شکل سازه و مشخصات هندسی مرزهای آن اختصاص دارد. مرحله سوم، مرحله طراحی جزئیات سازه می‌باشد. این تقسیم‌بندی سبب پیدایش سه روش بهینه‌سازی سازه شده است. از منظر خصوصیات هندسی، می‌توان مسائل بهینه‌سازی سازه-ای را در سه دسته زیر تقسیم‌بندی نمود:

بهینه‌سازی ابعادی: پژوهش‌های اولیه در بهینه‌سازی سازه‌ای، تمرکز بر روی بهینه‌سازی ابعادی داشته‌اند. به‌عنوان مثال، پیدا کردن سطح مقطع اعضای یک خرپا یا قاب یا بهینه کردن ضخامت یک صفحه از جمله این مسائل هستند. در این قبیل مسائل، دامنه طراحی ثابت است و در طول پروسه بهینه‌سازی تغییر نمی‌کند.

بهینه‌سازی شکل: به‌منظور توسعه‌های بعدی در بهینه‌سازی، زمینه پیدا کردن مرزهای بهینه یک سازه مطرح شده است. پیدا کردن تابع مناسب برای تعریف مرزهای یک سازه تنش مسطح و همین‌طور پیدا کردن محل اتصالات یک سازه اسکلتی جزء این دسته از مسائل بهینه‌سازی سازه‌ای هستند. در این‌گونه مسائل، دامنه طراحی ثابت نیست اما نحوه توزیع مصالح ثابت باقی می‌ماند و از طرفی مرزهای جدید نیز شکل نمی‌گیرند.

بهینه‌سازی توپولوژی: در بهینه‌سازی توپولوژی مسائل گسترده مانند خراباها، سطح مقطع اعضا به‌عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته می‌شود که مقدار آن‌ها می‌تواند صفر گردد، به این معنی که این اعضا قادر هستند از خرپا حذف شوند.

۳-۵-۳- بهینه‌سازی توپولوژی صفحات خمشی

در بهینه‌سازی توپولوژی حفره‌هایی در سازه فرض می‌شود و با توجه به مسئله بهینه‌سازی و تابع هدف تعریف‌شده مکان، اندازه و تعداد این حفره‌ها محاسبه می‌شود. در این پژوهش مسئله بهینه‌سازی توپولوژی طوری تعریف‌شده است که اندازه و شکل حفره‌ها به‌عنوان متغیر طراحی در نظر گرفته شوند. آسیب در اینجا به‌عنوان کاهش سختی در نظر گرفته شده و چون آسیب تأثیر اندکی بر روی جرم سازه دارد لذا از آن صرف‌نظر شده است. برای تشخیص آسیب توسط بهینه‌سازی توپولوژی از مدل SIMP به‌طوری که در ادامه توضیح داده می‌شود، استفاده شده است.

میزان آسیب در هر نقطه $\mathbf{x}$ از سازه را با تابع $\rho(\mathbf{x})$ نشان می‌دهیم:

$$\rho(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1 & \mathbf{x} \in \Omega_{mat} \\ 0 < \rho_{min} \leq \rho(\mathbf{x}) < 1 & \mathbf{x} \notin \Omega_{mat} \end{cases} \quad (3-44)$$

در رابطه بالا $\rho(\mathbf{x})$ بین ۰ و ۱ متغیر است بطوریکه مقدار صفر نشان‌دهنده عدم حضور ماده در آن نقطه و مقدار ۱ نشان‌دهنده وجود ماده در آن نقطه است. Ω_{mat} معرف دامنه‌ای است که در آن ماده وجود دارد. بنابراین ماتریس الاستیسیته برای هر نقطه از سازه به‌صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\mathbf{D}(\mathbf{x}) = \rho^p(\mathbf{x}) \mathbf{D}^0 \quad ; \quad p \geq 1 \quad (3-45)$$

در رابطه بالا $\mathbf{D}^0$ برابر با ماتریس الاستیسیته قسمت سالم سازه و p برابر ضریب جریمه است. به کار بردن p باعث جریمه چگالی‌های متوسط می‌شود طوری که آن‌ها را به چگالی تقریباً پر یا خالی تبدیل می‌کند. از طرفی این ضریب باعث افزایش حساسیت نسبت به خرابی می‌شود به همین خاطر در این پژوهش روش پیوسته سازی [۶۶] مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش مقدار p بین دو عدد (در اینجا بین ۳ و ۱) در نظر گرفته می‌شود و در طول مراحل بهینه‌سازی به‌صورت خطی کاهش می‌یابد

به این صورت که در ابتدای مراحل بهینه‌سازی مقدار آن عدد بزرگ‌تر انتخاب می‌شود تا آسیب با سرعت بیشتری تعیین شود و پس از رسیدن به مراحل آخر بهینه‌سازی مقدار آن با عدد کوچک‌تر برابر می‌شود و این مقدار تا انتهای مراحل بهینه‌سازی ثابت است.

در این پژوهش برای کاربردی نمودن مدل SIMP، فرض شده که آسیب در هر نقطه برای هر المان ثابت باشد و با ρ_e نشان داده می‌شود. بنابراین ماتریس سختی هر المان را می‌توان به صورت زیر به دست آورد.

$$\mathbf{K}_e(\rho_e) = \int_{\Omega_e} \mathbf{B}^T \mathbf{D}(\rho_e) \mathbf{B} d\Omega \quad (46-3)$$

به طوری که $\mathbf{B}$ ماتریس کرنش-جابجایی و Ω_e حجم المان مربوطه است. در رابطه (46-3) آسیب در ماتریس الاستیسته تأثیر می‌گذارد که منجر به کاهش مقدار ماتریس سختی المان‌های آسیب‌دیده می‌شود. همچنین ماتریس جرم هر المان نیز از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$\mathbf{M}_e = \int_{\Omega_e} d \mathbf{N}^T \mathbf{N} d\Omega \quad (47-3)$$

d برابر با چگالی هر المان و $\mathbf{N}$ ماتریس توابع شکل می‌باشند. در رابطه (48) آسیب تأثیری بر روی ماتریس جرم ندارد و همان‌طور که گفته شد به دلیل ناچیز بودن از تأثیرش صرف‌نظر می‌شود.

همان‌طور که در این فصل توضیح داده شد با استفاده از تحلیل اجزای محدود ماتریس سختی و جرم را برای صفحه میندلین-رایزنر محاسبه می‌شود سپس با استفاده از روش‌های مودال شکل‌های مودی و فرکانس طبیعی به دست می‌آید. با استفاده از اطلاعات مودال سازه نیز می‌توان تابع پاسخ فرکانسی را به دست آورد. با داشتن این اطلاعات و با تابع هدف‌های در نظر گرفته شده در فصل ۴ می‌توان محل و شدت آسیب در سازه را مشخص نمود.

فصل چهارم

شناسایی آسیب با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی

امروزه بهینه‌سازی توپولوژی به‌عنوان یک ابزار قدرتمند در بسیاری از زمینه‌های طراحی و به‌خصوص مسائل مهندسی و سازه‌ای در نظر گرفته می‌شوند. علم بهینه‌سازی توپولوژی همواره با این سؤال روبرو است که بهترین وضعیت برای مصالح در دامنه‌ای معین، به‌منظور بهینه کردن یک تابع هدف معلوم تحت قیدهای خاص چیست؟ به عبارت دیگر، هدف بهینه‌سازی توپولوژی تعیین تعداد، مکان و شکل حفره‌های سازه و نحوه ارتباط بین اعضاست. بنابراین طراحی توپولوژی یک سازه، پیدا کردن توزیع بهینه ماده در یک دامنه مشخص می‌باشد؛ به این معنی که باید تعیین شود کدام نقاط از دامنه دارای مصالح و کدام نقاط خالی از مصالح باشند (به‌صورت حفره باقی بمانند).

آسیب در سازه‌ها، به‌ویژه آسیب محلی، به‌طور معمول به تغییرات پارامترهای فیزیکی سازه مرتبط است. سازه می‌تواند به‌عنوان یک سیستم دینامیکی با سختی، جرم و میرایی در نظر گرفته شود. هنگامی که برخی از آسیب‌ها در سازه ایجاد می‌شوند، پارامترهای سازه‌ای، توابع پاسخ فرکانس و پارامترهای مودال سیستم نیز تغییر خواهند کرد. رویکردی که در بهینه‌سازی به‌منظور شناسایی آسیب یا به‌روزرسانی مدل انجام می‌پذیرد، به‌روزرسانی مدل تحلیلی است تا تفاوت بین داده‌های تحلیلی پس از به‌روزرسانی مدل و داده‌های اندازه‌گیری‌شده به حداقل برسد.

تابع هدف را می‌توان یکی از مهم‌ترین بخش‌های یک مسئله بهینه‌سازی قلمداد نمود. تابع هدف معیاری است که به‌وسیله آن مقدار همگرایی الگوریتم محاسبه می‌شود و زمان توقف اجرای الگوریتم را مشخص می‌کند. انتخاب تابع هدف مناسب با توجه به شرایط خاص مسئله شناسایی خرابی بر عهده کاربر است. روش‌های تشخیص آسیب معمول، یک تابع هدف را به حداقل می‌رسانند، که این تابع هدف عموماً به‌صورت اختلاف بین داده‌های ارتعاشی به‌دست‌آمده توسط آزمایش‌های مودال و

داده‌های محاسبه‌شده توسط مدل تحلیلی، تعریف می‌شود در ادامه به بررسی تابع هدف‌های انتخاب‌شده در این نگارش پرداخته می‌شود.

۴-۲- تابع هدف شکل مودی

شکل مودها یکی از پارامترهای مودال سازه می‌باشند که اطلاعات جامعی از سازه را می‌توان از آن‌ها استخراج نمود. یکی از کاربردهای شکل مود استفاده از آن‌ها جهت تشخیص خرابی در سازه‌ها می‌باشد که پژوهش‌های بسیاری در این زمینه انجام گرفته است. فرکانس طبیعی سازه به‌تنهایی توانایی تشخیص محل و شدت آسیب را ندارد و دلیل آن وجود یک فرکانس برای هر مود از سازه می‌باشد، اما شکل مودها گستردگی بیشتری دارند به‌طوری‌که به ازای هر مود در هر یک از درجات آزادی یک مقدار شکل مودی قابل‌محاسبه است. از این‌رو با استفاده از شکل مودها می‌توان محل و شدت آسیب در سازه را مشخص نمود. در این پژوهش از اختلاف شکل مودها در سازه سالم و آسیب‌دیده به‌عنوان تابع هدف مسئله بهینه‌سازی استفاده شده است تا با استفاده از آن بتوان محل و شدت آسیب را تشخیص داد.

تابع هدف استفاده‌شده در این بخش توان دوم اختلاف قدر مطلق شکل مود سازه آسیب‌دیده و مدل تحلیلی می‌باشد.

$$f(\rho) = \sum_{i=1}^{NM} (|\varphi_i^u| - |\varphi_i^d|)^2 \quad (1-4)$$

که در این رابطه $f(\rho)$ و ρ به ترتیب بیانگر تابع هدف و بردار متغیرهای طراحی می‌باشند. φ_i بیانگر بردار شکل مود i ام می‌باشد. پارامتر NM به‌عنوان مودهای محاسبه‌شده تعریف شده است. φ_i^d و φ_i^u به ترتیب برابر با بردار شکل مود مدل تحلیلی و سازه آسیب‌دیده می‌باشد. برای تشخیص آسیب با استفاده از اختلاف شکل مودها از تابع هدف‌های دیگری نیز استفاده شد که هرکدام از آن‌ها در

تشخیص محل و شدت آسیب به طور دقیق، ضعیف بودند از این رو بهترین تابع هدف جهت استفاده در این پژوهش رابطه (۴-۱) می باشد.

۴-۳- تابع هدف پاسخ فرکانسی

تابع پاسخ فرکانسی همه ویژگی های مکانیکی سازه را شامل می شود و مشخصه های مودال به کمک روش های برازش منحنی روی تابع های پاسخ فرکانسی به دست می آید. بنابراین می توان تغییرات این تابع ها را به عنوان شاخص خسارت به کار برد. تابع هدف مورد استفاده در این بخش مشابه تابع هدف استفاده شده در بخش (۴-۲) می باشد با این تفاوت که بجای شکل مود از تابع پاسخ فرکانسی استفاده می شود.

$$f(\mathbf{p}) = \sum_{r=1}^R \sum_{s=1}^M (|H_{rk}(\omega_s, \mathbf{p})| - |H_{rk}^d(\omega_s)|)^2 \quad (۴-۲)$$

که در این رابطه $f(\mathbf{p})$ و $\mathbf{p}$ به ترتیب بیانگر تابع هدف و بردار متغیرهای طراحی می باشند. k برابر k امین درجه آزادی سازه است که نیروی ورودی به آنجا اعمال می شود، همچنین s برابر با s امین فرکانس بار ورودی می باشد. پارامتر R به عنوان تعداد کل پاسخ های تابع فرکانسی محاسبه شده تعریف شده است. M تعداد کل فرکانس های بار اعمالی به سازه می باشد. H_{rk} و H_{rk}^d به ترتیب برابر با تابع پاسخ فرکانسی مدل تحلیلی و سازه آسیب دیده می باشد. همان طور که پیش تر گفته شد در این پژوهش جهت تشخیص آسیب از اختلاف پارامترهای مودال (شکل مود و تابع پاسخ فرکانسی) بین سازه سالم و آسیب دیده به تشخیص خرابی پرداخته می شود. برای تشخیص آسیب لزوماً نیازی به داشتن داده های مودی سازه سالم نمی باشد و با بررسی اختلاف بین پارامترهای مودال سازه آسیب دیده در دو زمان متفاوت نیز می توان محل آسیب پیش رونده در سازه را مشخص نمود. در این حالت سازه آسیب دیده با شدت خرابی کمتر به عنوان سازه مبنا در نظر گرفته می شود. در این

پایان‌نامه برای تابع هدف از پارامترهای مودال مدل تحلیلی بجای سازه سالم استفاده شده است. اضافه می‌نماید که در مسائل بهینه‌سازی، الگوریتم تا رسیدن به هدف مطلوب بارها تکرار می‌شود. در اینجا نیز اولین مرحله از الگوریتم اختلاف بین سازه سالم و آسیب‌دیده یا سازه آسیب‌دیده در دو زمان متفاوت می‌باشد اما در مراحل بعدی به دلیل استفاده از روش به‌روزرسانی مدل، سازه مبنا به یک مدل عددی تبدیل می‌گردد تا مقدار تابع هدف کمینه شود و این روند تا جایی ادامه دارد که به هدف موردنظر نزدیک شویم.

با توجه به مطالب بیان‌شده در فصل گذشته مربوط به بهینه‌سازی سازه‌ها می‌توان مسئله بهینه‌سازی را به صورت زیر بیان کرد.

$$\begin{array}{ll} \text{minimize} & f(\rho) \\ \text{subjected to} & 0 < \rho_{\min} < \rho_i < 1 \quad i = 1, 2, \dots, N \end{array} \quad (3-4)$$

در این رابطه N برابر با تعداد المان‌های مدل سازه می‌باشد.

۴-۴- آنالیز حساسیت

روش‌های بهینه‌سازی را می‌توان به سه دسته تقسیم نمود، روش‌های برگرفته از طبیعت، روش‌های معیار بهینگی و روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی. در روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی جهت کمینه یا بیشینه کردن تابع هدف ابتدا مشتق آن گرفته می‌شود تا نقاط اکسترمم آن به دست آید سپس با جایگذاری این نقاط، مقدار بیشینه یا کمینه تابع را محاسبه می‌کنند. در این پژوهش نیز از روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی استفاده شده است. در اینجا باید گرادیان تابع هدف مشخص شود یعنی تغییرات تابع هدف نسبت به هر یک از متغیرهای طراحی محاسبه شود. جهت محاسبه گرادیان تابع هدف دو روش وجود دارد. اولین روش استفاده از تفاضل محدود است که به علت تقریبی بودن روش، در این مسئله جواب قابل‌قبولی ارائه نمی‌دهد و از طرفی استفاده از روش تفاضل محدود سرعت اجرای برنامه را بسیار کند

می‌کند از این روش استفاده از تفاضل محدود در مسائل بهینه‌سازی بر پایه برنامه‌ریزی ریاضی توصیه نمی‌شود مگر اینکه مشتق‌گیری تحلیلی از تابع هدف میسر نباشد. دومین روش استفاده از مشتق تحلیلی می‌باشد که در اینجا جهت افزایش در دقت و سرعت کار از مشتق تحلیلی استفاده شده است. جهت انجام مشتق تحلیلی باید گرادیان تابع هدف به صورت تحلیلی محاسبه شود. همان‌طور که گفته شد گرادیان تابع هدف برابر با تغییرات تابع هدف نسبت به هر کدام از متغیرهای طراحی می‌باشد.

$$\nabla f(\mathbf{p}) = \left\{ \frac{\partial f}{\partial \rho_1}, \frac{\partial f}{\partial \rho_2}, \dots, \frac{\partial f}{\partial \rho_n} \right\}^T \quad (4-4)$$

۴-۴-۱- آنالیز حساسیت تابع هدف اختلاف مودها

برای محاسبه گرادیان تابع هدف اختلاف مودها ابتدا از رابطه (۴-۱) نسبت به پارامتر طراحی مشتق جزئی گرفته می‌شود.

$$\frac{\partial f}{\partial \rho_e} = 2 \times \sum_{i=1}^{NM} \frac{\partial \varphi_i^u}{\partial \rho_e} \times \frac{\varphi_i^u}{|\varphi_i^u|} (|\varphi_i^u| - |\varphi_i^d|) \quad (5-4)$$

در این رابطه پارامتر $\frac{\partial \varphi_i^u}{\partial \rho_e}$ برابر با مشتق جزئی بردار شکل مود نسبت به پارامتر طراحی می‌باشد. با بازنویسی رابطه (۳-۷) داریم.

$$(\mathbf{K} - \lambda_i \mathbf{M}) \varphi_i = 0 \quad (6-4)$$

در این رابطه $\varphi_i^2 = \lambda_i$ قرار می‌دهیم. رابطه بالا را در عبارت φ_i^T ضرب می‌کنیم.

$$\varphi_i^T (\mathbf{K} - \lambda_i \mathbf{M}) \varphi_i = 0 \quad (7-4)$$

اگر از رابطه بالا نسبت به پارامتر طراحی مشتق جزئی بگیریم رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$\frac{\partial \varphi_i^T}{\partial \rho_e} (\mathbf{K} - \lambda_i \mathbf{M}) \varphi_i + \varphi_i^T \left(\frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \rho_e} - \lambda_i \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \rho_e} \right) \varphi_i - \varphi_i^T \frac{\partial \lambda_i}{\partial \rho_e} \mathbf{M} \varphi_i + \varphi_i^T (\mathbf{K} - \lambda_i \mathbf{M}) \frac{\partial \varphi_i}{\partial \rho_e} = 0 \quad (8-4)$$

بردار شکل مود نسبت به جرم نرمال شده است و به صورت زیر می باشد.

$$\boldsymbol{\varphi}_i^T \mathbf{M} \boldsymbol{\varphi}_i = 1 \quad (9-4)$$

در رابطه (۸-۴) مشتق بردار شکل مود و مشتق فرکانس طبیعی نسبت به پارامتر طراحی موجود می باشد. عبارت اول و چهارم در این رابطه با توجه به رابطه (۶-۴) برابر صفر می باشد همچنین عبارت سوم نیز با توجه به رابطه (۹-۴) برابر $\frac{\partial \lambda_i}{\partial \rho_e}$ می باشد. با توجه به این که در این پایان نامه ماتریس جرم را مستقل از خرابی و پارامتر طراحی در نظر گرفته ایم مشتق ماتریس جرم نسبت به پارامتر طراحی نیز صفر می باشد. از این رو مشتق فرکانس طبیعی نسبت به پارامتر طراحی به دست می آید.

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial \rho_j} = \boldsymbol{\varphi}_i^T \left(\frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \rho_j} \right) \boldsymbol{\varphi}_i \quad (10-4)$$

جهت محاسبه مشتق جزئی بردار شکل مود نسبت به پارامتر طراحی ابتدا مشتق معادله (۶-۴) محاسبه می شود.

$$(\mathbf{K} - \lambda_i \mathbf{M}) \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}_i}{\partial \rho_e} + \left(\frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \rho_e} - \lambda_i \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \rho_e} \right) \boldsymbol{\varphi}_i - \frac{\partial \lambda_i}{\partial \rho_e} \mathbf{M} \boldsymbol{\varphi}_i = 0 \quad (11-4)$$

پس از محاسبه مشتق مقدار ویژه به نظر می رسد می توان با جایگذاری در رابطه (۱۱-۴) و حل دستگاه معادلات خطی مشتق بردار ویژه را نیز به دست آورد. اما با توجه به اینکه مقدار دترمینان ماتریس $(\mathbf{K} - \lambda_i \mathbf{M})$ برابر صفر می باشد محاسبه مشتق بردار ویژه به راحتی امکان پذیر نمی باشد. در این پژوهش با استفاده از روش حداقل مربعات این رابطه حل شده و جواب قابل قبولی را ارائه شده است. برای حل یک دستگاه معادلات خطی $\mathbf{Ax} = \mathbf{B}$ با استفاده از روش حداقل مربعات ابتدا یک مقدار اولیه برای بردار $\mathbf{x}$ در نظر گرفته می شود سپس با کمینه کردن معادله $\mathbf{Ax} - \mathbf{B}$ مقدار $\mathbf{x}$ به دست می آید [۶۷]. برای به دست آوردن مشتق شکل مودها نسبت به پارامتر طراحی پژوهش های بسیاری انجام شده و هر کدام روش های ریاضی متفاوتی ارائه داده اند [۶۸] که برای همه حالت ها جوابگو نمی باشد.

۴-۴-۲- آنالیز حساسیت تابع هدف پاسخ فرکانسی

هرکدام از مؤلفه‌های گرادیان تابع هدف پاسخ فرکانسی با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\frac{\partial f}{\partial \rho_e} = 2 \times \sum_{r=1}^R \sum_{s=1}^M \frac{\partial H_{rk}(\omega_s, \mathbf{p})}{\partial \rho_e} \times \frac{H_{rk}(\omega_s, \mathbf{p})}{|H_{rk}(\omega_s, \mathbf{p})|} (|H_{rk}(\omega_s, \mathbf{p})| - |H_{rk}^d(\omega_s)|) \quad (12-4)$$

این معادله برابر با مشتق جزئی تابع هدف رابطه (۴-۲) نسبت به متغیرهای طراحی ($\mathbf{p}$) می‌باشد. در

این رابطه عبارت $\frac{\partial H_{rk}(\omega_s, \mathbf{p})}{\partial \rho_e}$ برابر مشتق جزئی تابع پاسخ فرکانسی نسبت به متغیرهای طراحی می‌-

باشد. از این رو مشتق این تابع (۳-۱۳) باید محاسبه شود.

$$\frac{\partial H_{ij}}{\partial \rho_e} = \sum_{n=1}^{NoM} \frac{(\frac{\partial \varphi_{in}}{\partial \rho_j} \cdot \varphi_{jn} + \varphi_{in} \cdot \frac{\partial \varphi_{jn}}{\partial \rho_j}) \times (\omega_n^2 - \omega^2) - (\frac{\partial \lambda_n}{\partial \rho_j}) \times (\varphi_{in} \cdot \varphi_{jn})}{(\omega_n^2 - \omega^2)^2} \quad (13-4)$$

در این رابطه جهت محاسبه مشتق شکل مودها و مشتق فرکانس طبیعی نسبت به متغیر طراحی از روابط (۴-۱۰) و (۴-۱۱) و توضیحات داده شده در بخش قبل استفاده می‌شود. با محاسبه مشتق شکل مود و فرکانس طبیعی می‌توان مشتق تابع پاسخ فرکانسی نسبت به متغیر طراحی را به دست آورد.

در مسائل بهینه‌سازی که نیاز به آنالیز حساسیت دارند اگر این موضوع به‌درستی انجام نشود مسئله به جواب درست نخواهد رسید. از این رو آنالیز حساسیت یک موضوع بسیار مهم می‌باشد.

۴-۶- روش بهینه‌سازی تندترین شیب نزولی

از آنجاکه هدف اصلی به حداقل رساندن تابع هدف است، ایده تندترین شیب نزولی باعث تغییر در متغیرهای طراحی در هر مرحله از الگوریتم می‌شود که در نتیجه آن مقدار تابع هدف نیز کاهش می‌یابد. برای حل این مسئله بهینه‌سازی با چندین متغیر که بدون قید تعریف شده است، در گام اول

ابتدا بایستی جهت‌یابی شود. سپس در حین جهت‌یابی بایستی اندازه گام برای یافتن حداقل مقدار تابع هدف، تعیین گردد [۶۹].

در این روش ابتدا به متغیرهای طراحی یک مقدار اولیه داده می‌شود و سپس با تعیین طول گام حرکت (α) و جهت حرکت، الگوریتم یک گام به سمت جلو حرکت کرده و مقدار تابع هدف کمینه می‌شود. این روند تا رسیدن به نتیجه مطلوب تکرار می‌یابد. الگوریتم تندترین شیب نزولی به صورت زیر بیان می‌شود:

۱- در اولین مرحله ($k=1$) یک بردار به عنوان پارامترهای طراحی اولیه (ρ^k) برای الگوریتم در نظر گرفته می‌شود.

۲- یک عدد ثابت تحت عنوان پارامتر همگرایی در نظر گرفته می‌شود ($\epsilon > 0$).

۳- تابع هدف ($f(\rho)$) با استفاده از پارامترهای طراحی محاسبه می‌شود، اگر مقدار آن از پارامتر همگرایی کمتر بود ($f(\rho) < \epsilon$) الگوریتم متوقف می‌شود در غیر این صورت گام بعدی اجرا می‌شود.

۴- جهت حرکت (d^k) در این روش با مقدار منفی گرادیان تابع هدف برابر می‌باشد ($d^k = -\nabla f(\rho)$)، مقدار گرادیان تابع هدف با مقدار مشتق تحلیلی تابع هدف برابر می‌باشد.

۵- گام حرکت (α) با استفاده از روش‌های عددی محاسبه می‌شود [۶۹].

۶- مقدار پارامترهای طراحی با استفاده از فرمول $\rho^{k+1} = \rho^k + \alpha^k d^k$ به‌روزرسانی می‌شود و الگوریتم از مرحله ۳ تا ۶ دوباره تکرار می‌شود.

روش تندترین نزول بسیار ساده است. از یک تخمین اولیه برای طراحی کمینه شروع می‌شود. راستای تندترین شیب نزولی و گام حرکت در آن نقطه محاسبه می‌شود. تابع هدف به سمت راستای محاسبه شده حرکت می‌کند. در نقطه جدید پارامترهای طراحی، مجدداً راستای تندترین شیب نزولی محاسبه شده و کل این فرایند مجدداً تکرار می‌گردد [۶۹]

۴-۶- ساختار الگوریتم تهیه شده در این پژوهش جهت تشخیص خرابی

برنامه تهیه شده به منظور حل مسئله بهینه سازی در این پژوهش با استفاده از برنامه MATLAB نوشته شده است. این برنامه را می توان در گام های زیر خلاصه نمود:

۱- پارامترهای مربوط برای تحلیل اجزای محدود سازه از قبیل مشخصات مصالح، شرایط مرزی، تعداد المان ها، شکل سازه و غیره معرفی می شود.

۲- مقادیر پارامترهای طراحی برای هر المان سازه آسیب دیده مشخص می شوند. در اینجا برای سازه آسیب دیده مقادیر المان های آسیب دیده به نسبت خرابی مقداردهی می شوند و مابقی مقادیر ۱ در نظر گرفته می شود.

۳- ماتریس های جرم و سختی سازه آسیب دیده با استفاده از روابط اجزای محدود محاسبه می شود.

۴- مقادیر و بردارهای ویژه با استفاده از ماتریس سختی و جرم کل سازه و همچنین با استفاده از روابط بخش ۲ از فصل سوم این پایان نامه برای سازه آسیب دیده و سالم به دست می آید و همچنین بردارهای ویژه با استفاده از ماتریس جرم نرمال می شوند.

۵- مراحل ۲، ۳ و ۴ برای مدل عددی نیز انجام می شود. در مدل عددی تمامی مقادیر پارامترهای طراحی برابر ۱ می باشد.

۶- با استفاده از مقادیر ویژه و بردارهای ویژه نرمال شده سازه آسیب دیده و مدل عددی، مقدار تابع هدف محاسبه می شود.

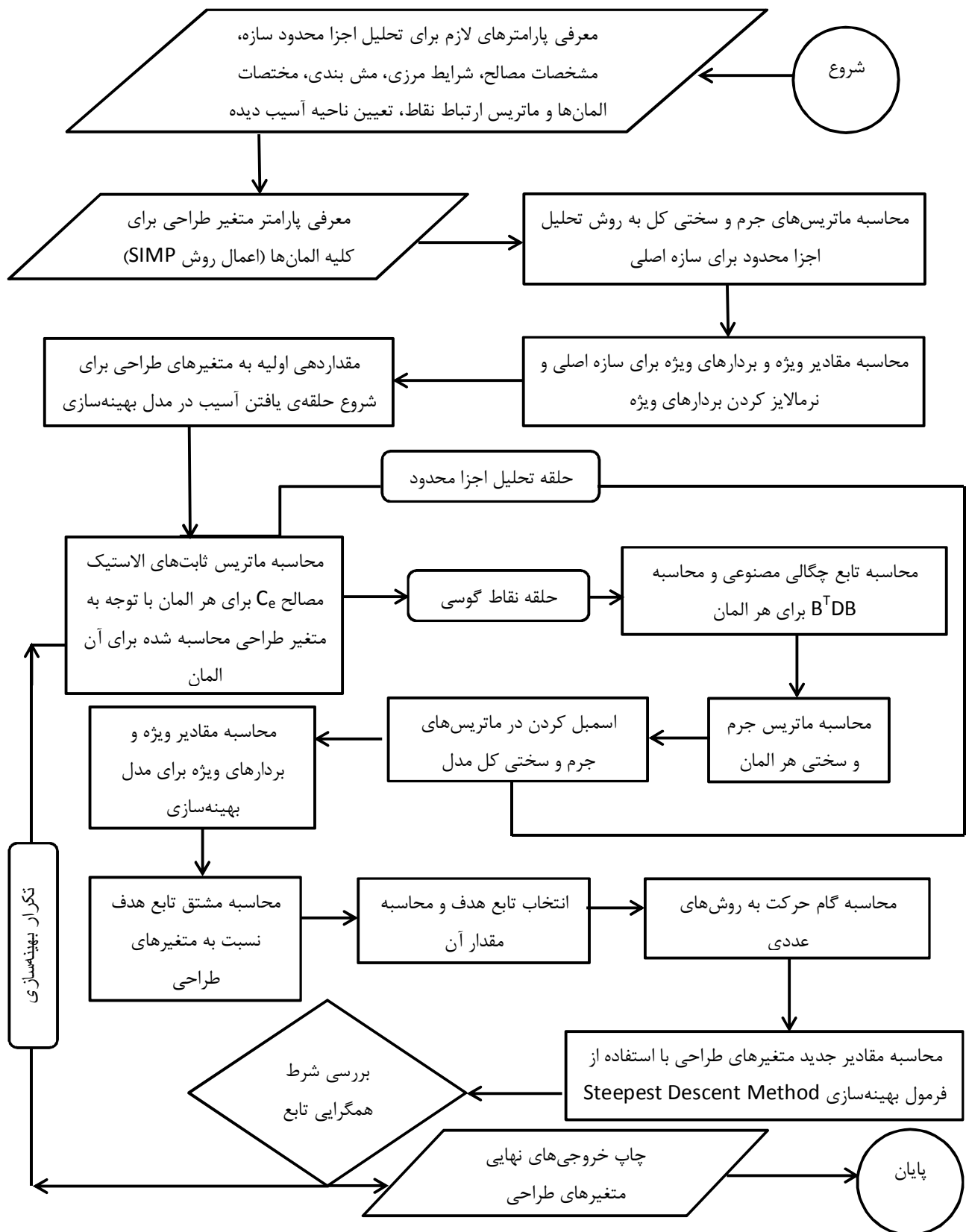
۷- تحلیل حساسیت تابع هدف نسبت به متغیرهای طراحی با توجه نوع تابع هدف که در این فصل توضیح داده شده است انجام می شود.

۸- گام حرکت را برای روش بهینه‌سازی تندترین شیب نزولی محاسبه می‌شود.

۹- با استفاده از معادله $\rho^{k+1} = \rho^k + \alpha^k d^k$ متغیرهای طراحی به‌روزرسانی می‌شوند و سپس محدودیت‌های طراحی $0 \leq \rho \leq 1$ اعمال می‌گردند. این روند تکرار از مرحله ۵ ادامه می‌یابد تا در مرحله ۹ متوقف شود یا پس از تعداد مشخصی تکرار متوقف شود.

۱۰- مراحل بالا تا کمینه شده تابع هدف ادامه می‌یابد و پس کمینه شدن مقدار تابع هدف، مقادیر به‌روزرسانی شده پارامترهای به‌عنوان جواب مسئله می‌باشند.

الگوریتم تهیه‌شده در این پژوهش به‌صورت فلوچارت در شکل (۴-۱) نشان داده شده است.



شکل (۴-۱) فلوچارت الگوریتم تهیه شده در این پایان نامه

فصل پنجم

مثال‌های عددی

۵-۱- مقدمه

به منظور نشان دادن کارایی و دقت روش پیشنهادی در این نگارش چند مثال در این فصل ارائه شده است. مثال‌های این فصل به دو بخش تقسیم می‌شوند که در بخش اول با استفاده از تابع هدف اختلاف مودها به تشخیص آسیب پرداخته می‌شود و در بخش دوم از اختلاف تابع پاسخ فرکانسی جهت تعیین نمودن محل و شدت آسیب استفاده شده است. در مثال‌های این فصل صفحه خمشی میدلین-رایزنر مورد بررسی قرار گرفته است. برای تحلیل اجزای محدود صفحه خمشی از المان مربعی با ۴ گره استفاده شده است. ابعاد صفحه، شرایط تکیه‌گاهی، تعداد المان‌ها، محل و شدت المان‌های آسیب‌دیده برای هر مثال متفاوت است و در هر مثال بیان شده است. مقادیر مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و جرم واحد حجم برای تمامی مثال‌ها به ترتیب برابر $E = 2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ ، $\nu = 0.3$ و $D = 0.00785 \text{ kg/cm}^3$ می‌باشند. تعداد مودهای محاسبه شده در تمامی مثال‌های ۵ مود در نظر گرفته شده است.

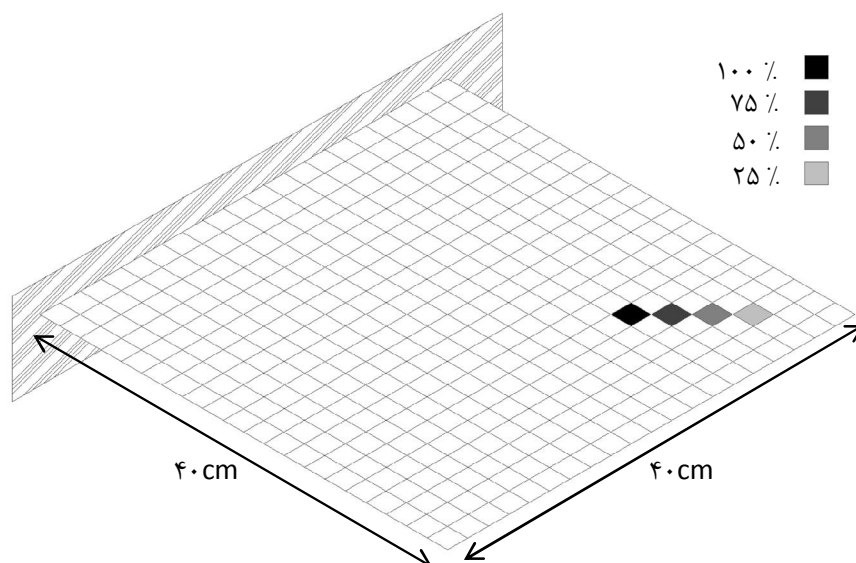
۵-۲- تابع هدف شکل مودی

در این بخش ۲ مثال با شرایط تکیه‌گاهی و خرابی‌های متفاوت در نظر گرفته شده است که تابع هدف مورد استفاده در این ۲ مثال اختلاف شکل مودها می‌باشد.

۵-۲-۱- مثال (۱)

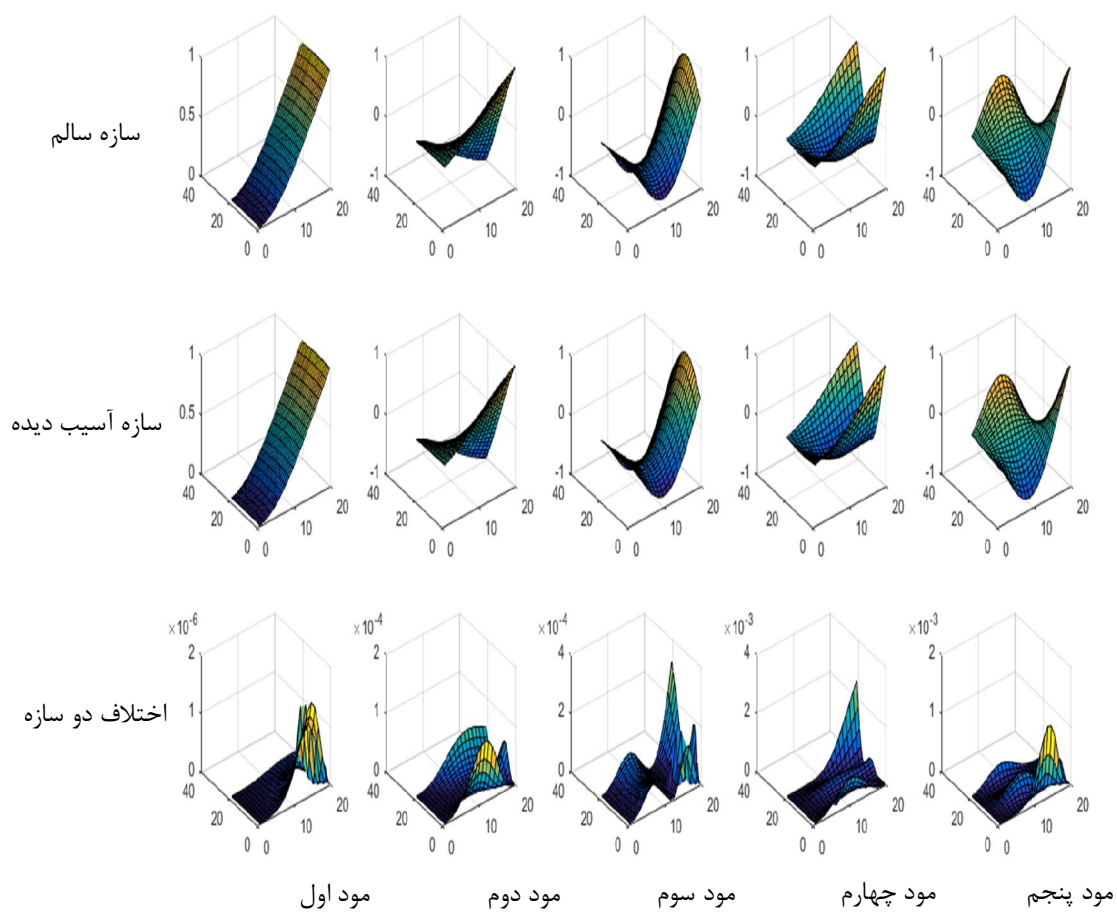
یک صفحه خمشی به ابعاد $40 \times 40 \text{ cm}$ و ضخامت 5 cm در نظر گرفته شده است. در این مثال برای تحلیل اجزای محدود، صفحه به ۴۰۰ المان با ابعاد مساوی تقسیم گردیده است. صفحه مورد نظر به صورت گیردار در نظر گرفته شده است. تابع هدف مورد استفاده در این مثال اختلاف شکل مودها

می‌باشد. فرض بر این است که آسیب در گوشه صفحه خمشی به‌صورت مورب قرار گرفته است، به این منظور ۴ المان با شدت خرابی متفاوت به‌عنوان آسیب در نظر گرفته شده است. شرایط تکیه‌گاهی و محل المان‌های آسیب‌دیده در شکل (۱-۵) نشان داده شده است.



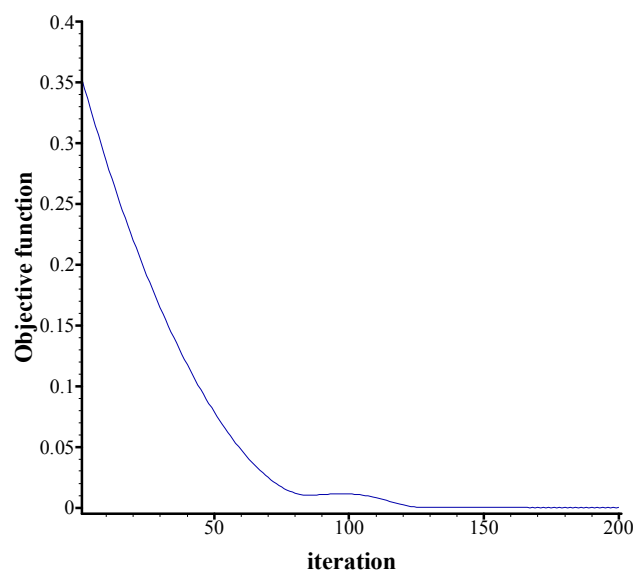
شکل (۱-۵) شرایط تکیه‌گاهی و محل المان‌های آسیب‌دیده، مثال ۱

در این مثال برای مقایسه شکل مودها در سازه سالم و آسیب‌دیده، شکل مودهای سازه برای ۵ مود اولیه در سازه سالم و آسیب‌دیده و همچنین برای حالت اختلاف بین دو سازه سالم و آسیب‌دیده نیز در شکل (۲-۵) نشان داده شده است.

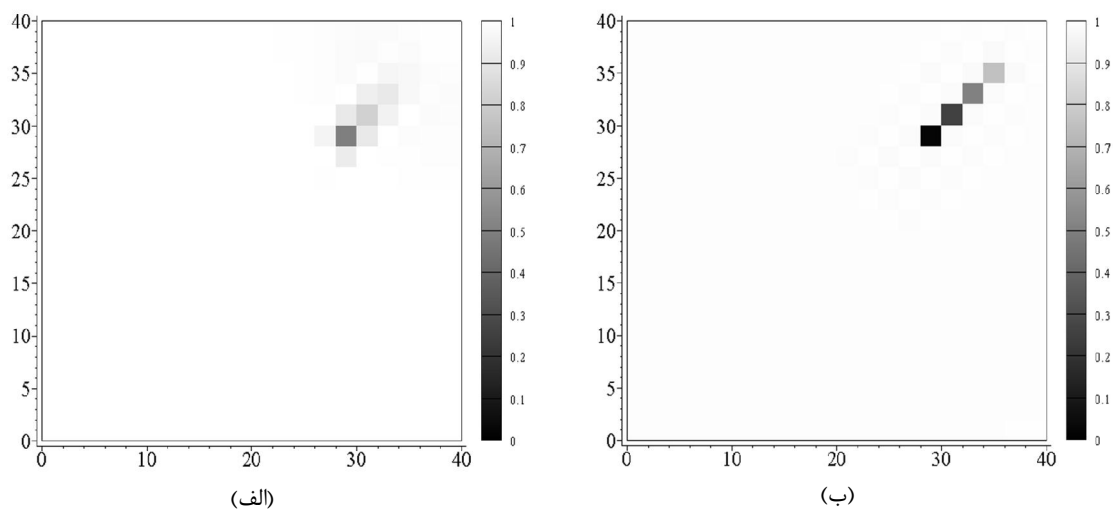


شکل (۵-۲) مقایسه شکل مودهای سازه در حالت سازه سالم ، آسیب دیده و اختلاف آن‌ها در ۵ مود اول سازه، مثال ۱

چگونگی تغییرات تابع هدف در شکل (۵-۳) مشاهده می‌شود. مطابق این شکل مقدار تابع هدف به نزدیک صفر رسیده است. به منظور درک بهتر مراحل تشخیص آسیب با استفاده از الگوریتم بهینه-سازی دو مرحله از روند تشخیص آسیب در شکل (۵-۴) نشان داده شده است.



شکل (۵-۳) نمودار تغییرات تابع هدف، مثال ۱

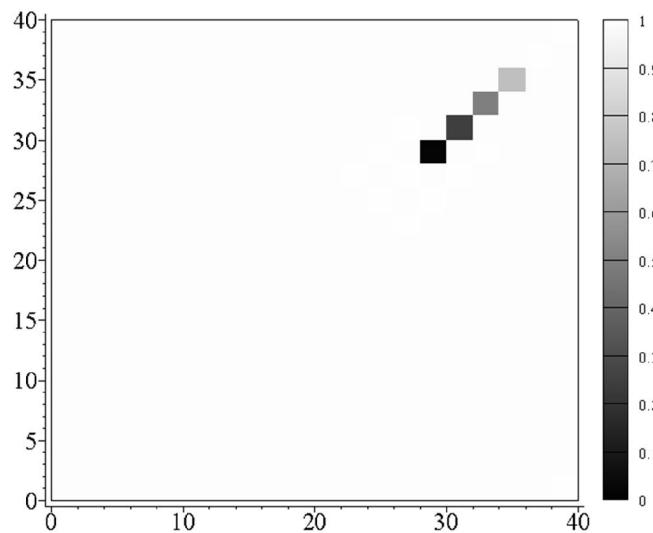


شکل (۵-۴) نتایج الگوریتم بهینه‌سازی برای مراحل مختلف، مثال ۱

(الف) مرحله ۵۰ (ب) مرحله ۱۵۰

همان‌طور که در شکل (۴-۵) مشاهده می‌شود روند الگوریتم بهینه‌سازی به‌خوبی مشخص شده است. در این الگوریتم بهینه‌سازی ابتدا تمامی مقادیر پارامترهای طراحی برای مدل تحلیلی برابر ۱ قرار داده می‌شود سپس با پیشرفت این الگوریتم مقادیر پارامتر طراحی در المان‌های آسیب‌دیده به نسبت شدت خرابی کاهش یافته تا جایی که مقدار و محل دقیق آسیب تشخیص داده شود در این مرحله مقدار تابع هدف به صفر رسیده است. مطابق شکل (۳-۵) مقدار تابع هدف در مرحله ۲۰۰ به صفر رسیده است از این‌رو در مرحله ۲۰۰ محل و شدت دقیق خرابی مشخص شده است. شکل (۵-۵) نشان‌دهنده‌ی محل و شدت خرابی تشخیص داده شده توسط الگوریتم بهینه‌سازی در مرحله ۲۰۰ می‌باشد.

مطابق شکل (۵-۵) و با توجه به محل آسیب نشان داده شده در شکل (۱-۵) مشاهده می‌شود که در این مثال محل المان‌های آسیب‌دیده به‌درستی توسط الگوریتم بهینه‌سازی تشخیص داده شده است. دقت الگوریتم در تشخیص محل آسیب بسیار بالا بوده و توانسته محل دقیق آسیب را به‌خوبی تشخیص دهد. از طرفی این الگوریتم شدت آسیب را نیز به‌خوبی مشخص نموده است. مقادیر به‌دست‌آمده برای شدت آسیب المان‌های آسیب‌دیده در این مثال در جدول (۱-۵) مشخص شده است. مطابق این جدول الگوریتمی که در این نگارش معرفی شده توانایی بسیار خوبی در تشخیص مقادیر شدت خرابی نیز دارد و همان‌طور که مشاهده می‌شود با خطای پایینی این مقادیر به‌دست‌آمده است.



شکل (۵-۵) تشخیص محل و شدت آسیب توسط الگوریتم بهینه‌سازی، مثال ۱

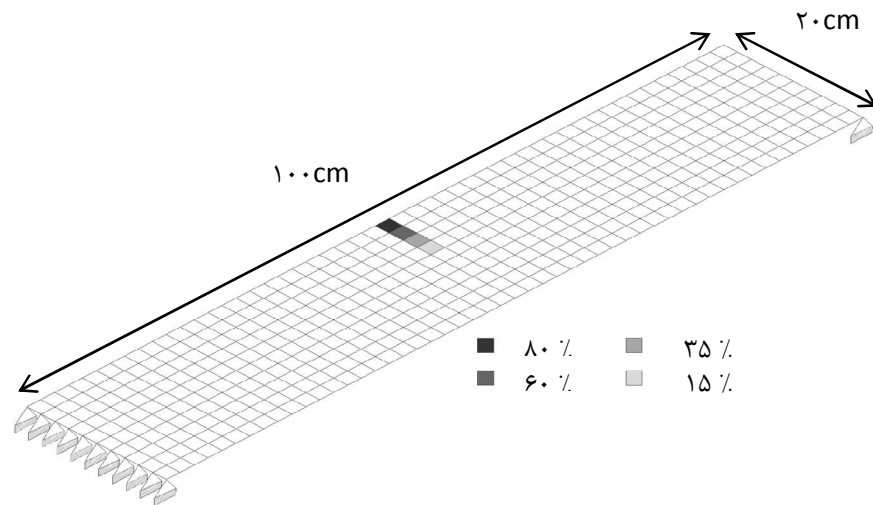
جدول (۱-۵) مقادیر شدت خرابی برای المان‌های آسیب‌دیده، مثال ۱

شماره المان	شدت آسیب	شدت آسیب به‌دست آمده	خطا
۱	% ۲۵	% ۲۵.۴۲	+ % ۰.۴۲
۲	% ۵۰	% ۵۰.۲۳	+ % ۰.۲۳
۳	% ۷۵	% ۷۵.۱۶	+ % ۰.۱۶
۴	% ۱۰۰	% ۹۹.۰۰	- % ۱.۰۰

۵-۲-۲-مثال (۲)

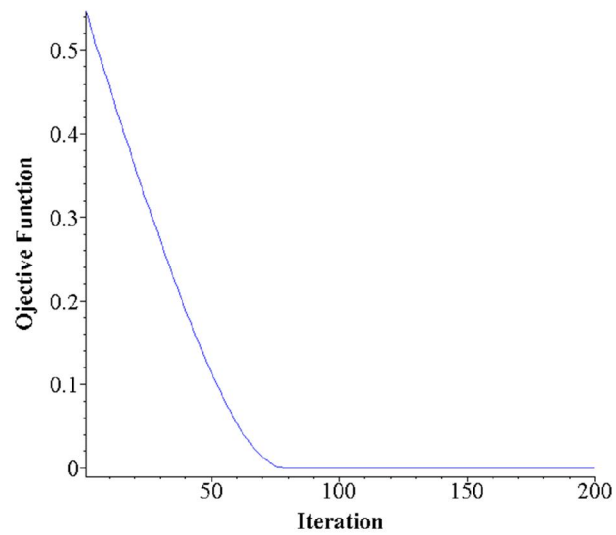
یک صفحه خمشی به ابعاد 100×20 cm و ضخامت 3 cm در نظر گرفته شده است. در این مثال نیز ۴ المان آسیب‌دیده با شدت‌های متفاوت در سازه ایجاد شده است. تابع هدف مورد استفاده در این مثال اختلاف شکل مودها می‌باشد. آسیب به صورت یک ترک در لبه صفحه در فرض شده است که به

سمت مرکز صفحه در حال گسترش می‌باشد. ابعاد و شرایط تکیه‌گاهی با مثال قبل متفاوت است. تکیه‌گاه‌ها به صورت ساده در دو طرف صفحه قرار دارند. تعداد کل المان‌ها ۵۰۰ می‌باشد. شرایط تکیه-گاهی و همین‌طور محل و شدت المان‌های آسیب‌دیده در شکل (۵-۶) قابل مشاهده می‌باشد.



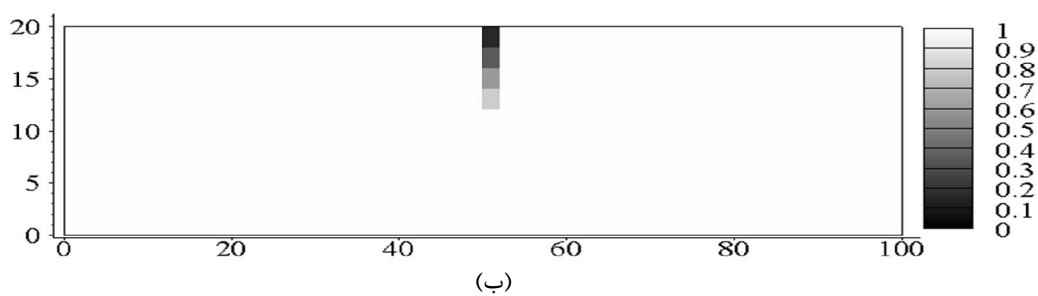
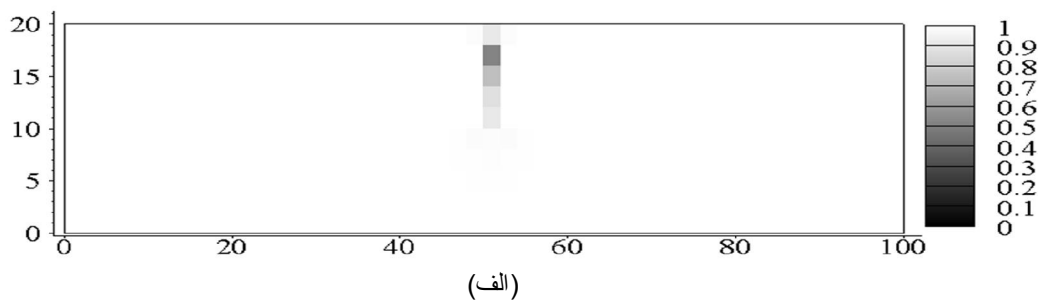
شکل (۵-۶) شرایط تکیه‌گاهی و محل المان‌های آسیب‌دیده، مثال ۲

نمودار تغییرات تابع هدف در این مثال در شکل (۵-۷) نشان داده شده است. مطابق این نمودار پس از گذشت تقریباً ۸۰ مرحله از بهینه‌سازی مقدار تابع پس از گذشت ۲۰۰ مرحله از مقدار ۰.۵۴۶ به مقدار 9.61×10^{-5} رسیده سپس با یک شیب بسیار کم به صفر میل می‌کند.



شکل (۷-۵) نمودار تغییرات تابع هدف، مثال ۲

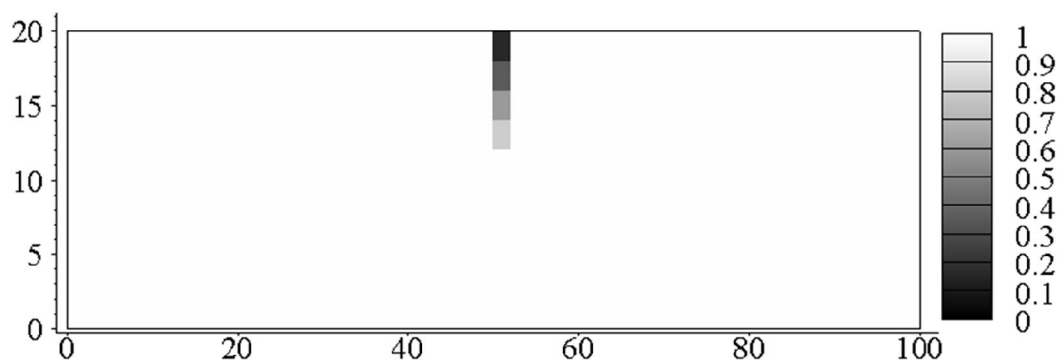
مانند مثال قبل جهت نشان دادن پروسه تشخیص آسیب توسط الگوریتم بهینه‌سازی چند مرحله از این الگوریتم در شکل (۸-۵) نشان داده شده است.



شکل (۸-۵) نتایج الگوریتم بهینه‌سازی برای مراحل مختلف، مثال ۲

(الف) مرحله ۵۰ (ب) مرحله ۱۵۰

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در مرحله ۱۵۰ از الگوریتم بهینه‌سازی محل و شدت خرابی تقریباً به‌درستی تشخیص داده شده است و مطابق شکل (۵-۷) تقریباً در مرحله ۱۰۰ الگوریتم محل و شدت آسیب را تشخیص داده است زیرا در مرحله ۱۰۰ مقدار تابع هدف تقریباً برابر صفر می‌باشد و این بیانگر عدم اختلاف بین شکل مود در سازه آسیب‌دیده و مدل تحلیلی می‌باشد و نیازی به ادامه الگوریتم بعد از این مرحله نمی‌باشد. در شکل (۵-۹) محل و شدت آسیب تشخیص داده شده در مرحله ۲۰۰ نشان داده شده است.



شکل (۵-۹) تشخیص محل و شدت آسیب توسط الگوریتم بهینه‌سازی، مثال ۲

مقادیر به‌دست‌آمده توسط الگوریتم بهینه‌سازی برای المان‌های آسیب‌دیده در جدول (۵-۲) نشان داده شده و با مقادیر واقعی مقایسه شده است. مقادیر به‌دست‌آمده بسیار نزدیک به مقادیر واقعی بوده و این نشان‌دهنده کارایی این الگوریتم در تشخیص شدت آسیب نیز می‌باشد.

جدول (۵-۲) مقادیر شدت خرابی برای المان‌های آسیب‌دیده، مثال ۲

شماره المان	شدت آسیب	شدت آسیب به‌دست‌آمده	خطا
۱	٪ ۱۵	٪ ۱۵.۴۳	+٪ ۰.۴۳
۲	٪ ۳۵	٪ ۳۵.۴۲	+٪ ۰.۴۲
۳	٪ ۶۰	٪ ۶۰.۱۰	+٪ ۰.۱۰
۴	٪ ۸۰	٪ ۸۰.۱۶	+٪ ۰.۱۶

در این دو مثال مشاهده شد که الگوریتم بهینه‌سازی با استفاده از تابع هدف اختلاف شکل مودها با دقت بسیار بالایی می‌تواند محل و شدت آسیب را در صفحه خمشی میدلین-رایزنر تشخیص دهد. در این دو مثال سعی شد تا خرابی در جایی از سازه که بیشترین تغییر شکل را دارد قرار گیرد تا کارایی این الگوریتم مشخص شود. در ادامه چند مثال دیگر با استفاده از اختلاف تابع پاسخ فرکانسی در این فصل قرار گرفته تا کارایی این روش با استفاده از این تابع هدف نیز مشخص شود.

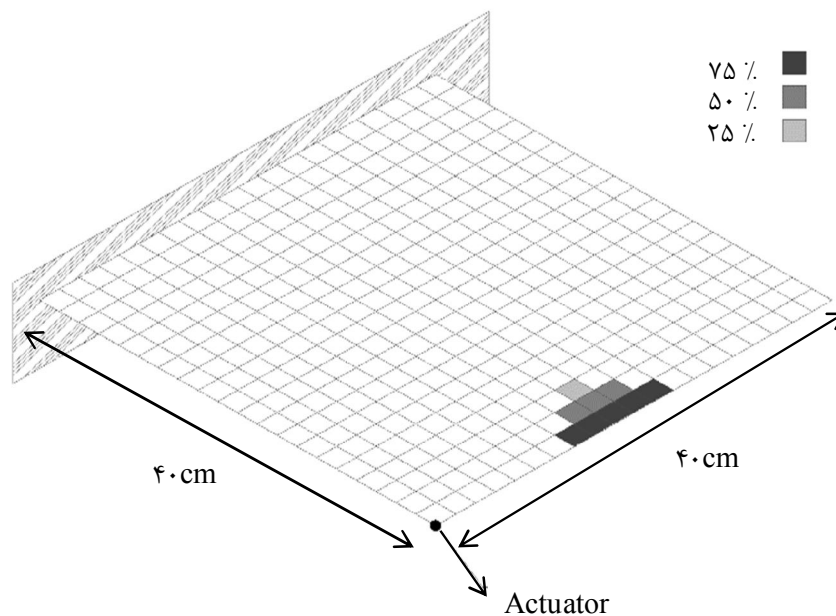
۵-۳- تابع هدف پاسخ فرکانسی

همان‌طور که قبلاً گفته شد برای تابع پاسخ فرکانسی نیاز به مشخص نمودن محل بار ورودی می‌باشد بطوریکه با جابجایی محل بار ورودی نتایج تغییر می‌کند. محل بار ورودی باید در جایی انتخاب شود که بهترین نتایج را به دست آورد. در توابع پاسخ فرکانسی دو رویکرد برای انتخاب محل بار ورودی وجود دارد، در اولین رویکرد معمولاً محل بار ورودی ثابت می‌باشد ولی محل حس‌گرها متغیر است و با جابجایی حس‌گرها می‌توان نتایج خوبی به دست آورد. در رویکرد دوم محل حس‌گرها ثابت است ولی محل بار ورودی متغیر می‌باشد و با تغییر محل آن و تحلیل پاسخ‌های به‌دست‌آمده از سازه به تشخیص آسیب در سازه می‌پردازند. در این نگارش فرض بر این می‌باشد که محل بار ورودی در یک درجه آزادی ثابت است و با داشتن پاسخ سازه در تمامی درجات آزادی محل و شدت آسیب مشخص می‌شود.

۵-۳-۱- مثال (۳)

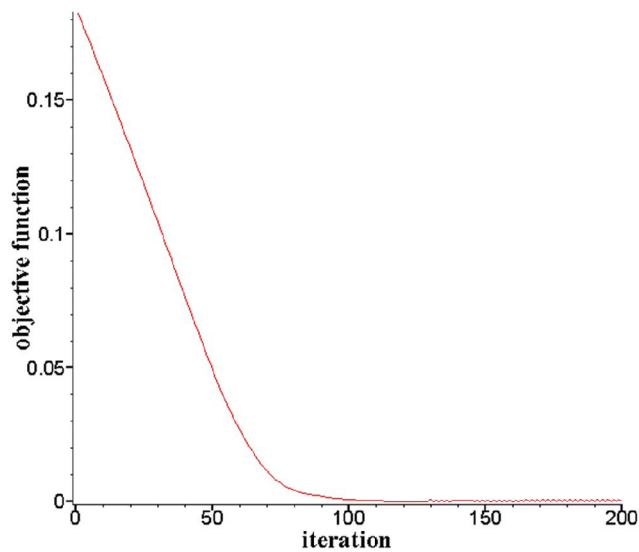
یک صفحه خمشی به ابعاد 40×40 cm و ضخامت 5 cm در نظر گرفته شده است. در این مثال برای تحلیل اجزای محدود، صفحه به ۴۰۰ المان با ابعاد مساوی تقسیم گردیده است. صفحه موردنظر به‌صورت گیردار در نظر گرفته شده است. تابع هدف مورد استفاده در این مثال اختلاف تابع پاسخ

فرکانسی می‌باشد. دامنه تغییر فرکانس بار ورودی در این مثال ۰ تا ۵۰۰ می‌باشد. فرض بر این است که آسیب در لبه صفحه خمشی قرار دارد، به این منظور ۹ المان با شدت خرابی متفاوت به‌عنوان آسیب در نظر گرفته شده است. محل المان‌های آسیب‌دیده و همچنین محل بار ورودی به سازه در شکل (۵-۱۰) مشخص شده است.

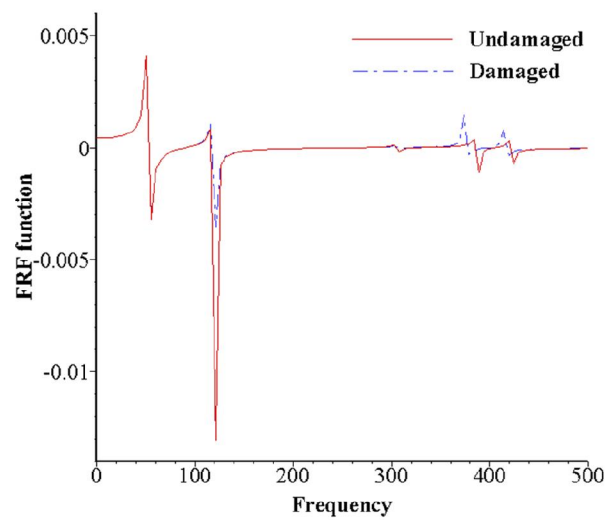


شکل (۵-۱۰) شرایط تکیه‌گاهی و محل المان‌های آسیب‌دیده، مثال ۳

تعداد مراحل بهینه‌سازی در این مثال نیز ۲۰۰ مرحله در نظر گرفته شده است. با توجه به نمودار تغییرات تابع هدف در شکل (۵-۱۱) پس از ۱۲۰ مرحله مقدار تابع هدف به صفر رسیده است سپس شیب آن ثابت شده است. در این مثال با رسم تابع پاسخ فرکانسی برای سازه سالم و آسیب‌دیده در شکل (۵-۱۲) تأثیر خرابی بر روی تابع پاسخ فرکانسی نشان داده شده است.



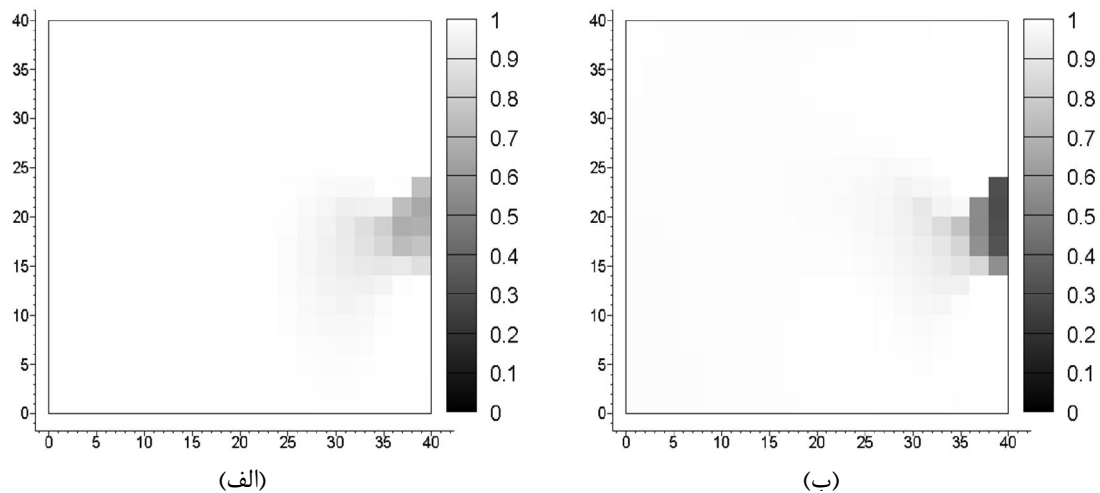
شکل (۵-۱۱) نمودار تغییرات تابع هدف، مثال ۳



شکل (۵-۱۲) تأثیر خرابی بر روی نمودار تابع پاسخ فرکانسی در محل بار ورودی، مثال ۳

با توجه به نمودار تابع پاسخ فرکانسی در شکل (۵-۱۲) مقدار این تابع در جایی که فرکانس بار ورودی با فرکانس طبیعی سازه برابر است یک تغییر بسیار بزرگ دارد، این یکی از ویژگی‌های تابع

پاسخ فرکانسی است که می‌توان از آن برای به دست آوردن فرکانس طبیعی سازه نیز استفاده نمود. در شکل (۵-۱۲) تأثیر خرابی بر روی نمودار پاسخ فرکانسی بسیار مشهود است و همان‌طور که مشاهده می‌شود این اختلاف در جایی که فرکانس بار ورودی با فرکانس طبیعی سازه برابر است زیاد می‌باشد. در شکل (۵-۱۳) دو مرحله از مراحل تشخیص آسیب توسط الگوریتم بهینه‌سازی قرار داده شده است. با توجه به نمودار تغییرات تابع هدف در شکل (۵-۱۱) این دو مرحله قبل از رسیدن مقدار تابع هدف به صفر می‌باشند. از این‌رو همان‌طور که مشاهده می‌شود شدت خرابی در این دو مرحله به‌خوبی مشخص نشده و تعدادی خرابی اضافه نیز وجود دارد.

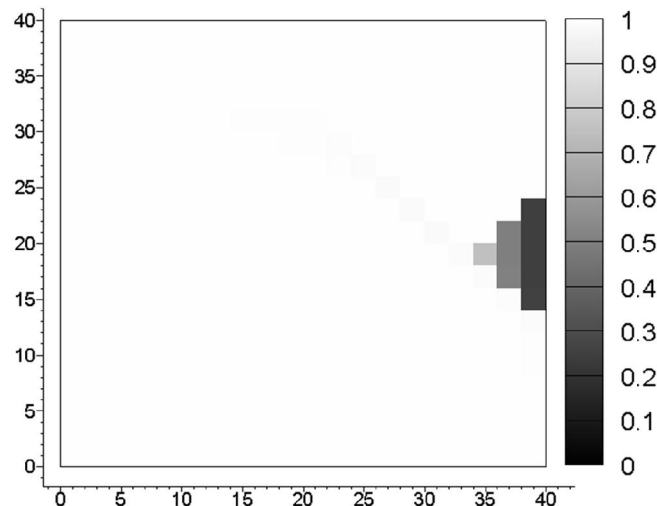


شکل (۵-۱۳) نتایج الگوریتم بهینه‌سازی برای مراحل مختلف، مثال ۳

(الف) مرحله ۵۰ (ب) مرحله ۱۰۰

با پیشرفت روند الگوریتم بهینه‌سازی مقدار تابع هدف به صفر نزدیک شده و اختلاف بین تابع پاسخ فرکانسی در سازه سالم و مدل عددی به صفر نزدیک می‌شود که باعث دقیق‌تر شدن شدت خرابی در المان‌های آسیب‌دیده و همچنین حذف خرابی‌های اضافه می‌شود. این موضوع در شکل (۵-۱۴) مشخص شده است. محل و شدت آسیب تشخیص داده شده توسط الگوریتم بعد از ۲۰۰ مرحله در

این شکل نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با دقت بسیار خوبی آسیب تشخیص داده شده است.



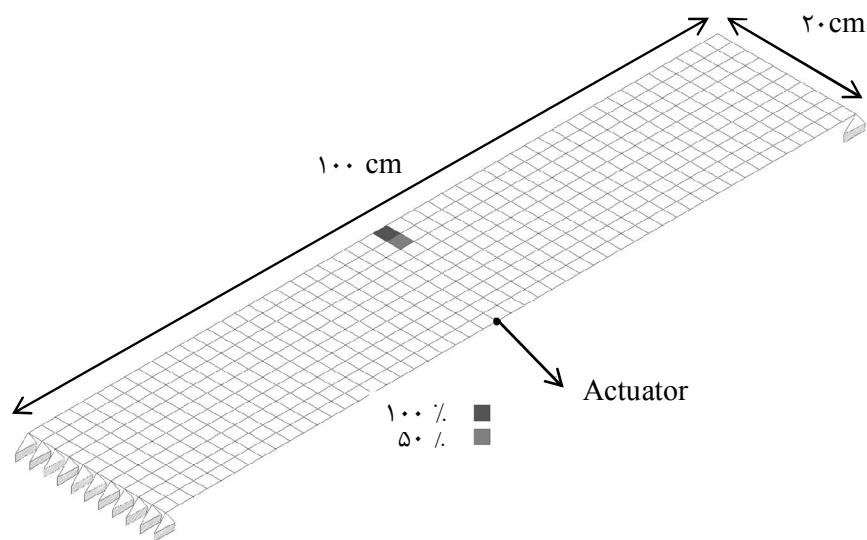
شکل (۵-۱۴) تشخیص محل و شدت آسیب توسط الگوریتم بهینه‌سازی، مثال ۳

شدت خرابی‌های به‌دست‌آمده توسط الگوریتم بهینه‌سازی برای المان‌های آسیب‌دیده به ترتیب برابر با ۲۵.۱۸٪، ۵۰.۱۶٪ و ۷۵.۰۵٪ می‌باشد. اختلاف این مقادیر با مقادیر خرابی در سازه آسیب‌دیده بسیار کم می‌باشد. کارایی این الگوریتم با استفاده از تابع هدف پاسخ فرکانسی در این مثال قابل‌مشاهده می‌باشد.

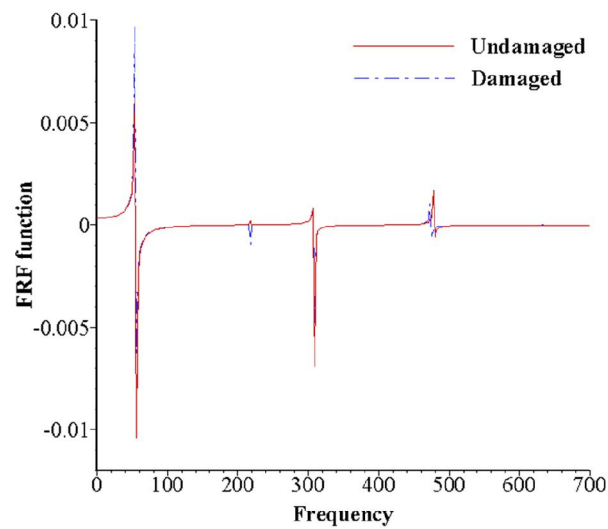
۵-۳-۲- مثال (۴)

یک صفحه خمشی به ابعاد 100×20 cm و ضخامت 3 cm در نظر گرفته شده است. این مثال مشابه مثال (۲) بخش قبل در نظر گرفته شده است. با این تفاوت که تعداد المان‌های آسیب‌دیده در این مثال کمتر می‌باشد. هدف از این مثال مقایسه‌ی دو تابع هدف با یکدیگر می‌باشد البته سعی شده

تا تعداد خرابی‌ها نیز کمتر باشد تا کارایی این روش برای تعداد خرابی‌های کمتر نیز بررسی شود. تعداد المان‌های آسیب‌دیده در این مثال ۲ عدد می‌باشد و به‌صورت یک ترک فرض شده که به سمت مرکز صفحه در حال گسترش می‌باشد. دامنه تغییر فرکانس بار در این مثال بین ۰ تا ۷۰۰ می‌باشد. محل خرابی‌ها، محل بار ورودی به سازه و همچنین شرایط تکیه‌گاهی در شکل (۵-۱۵) مشخص شده است. تأثیر آسیب بر روی تابع پاسخ فرکانسی در شکل (۵-۱۶) نشان داده شده است. مانند مثال قبل با توجه به شکل (۵-۱۶) اختلاف تابع پاسخ فرکانسی بین سازه سالم و آسیب‌دیده در محل فرکانس طبیعی سازه مشهودتر می‌باشد.

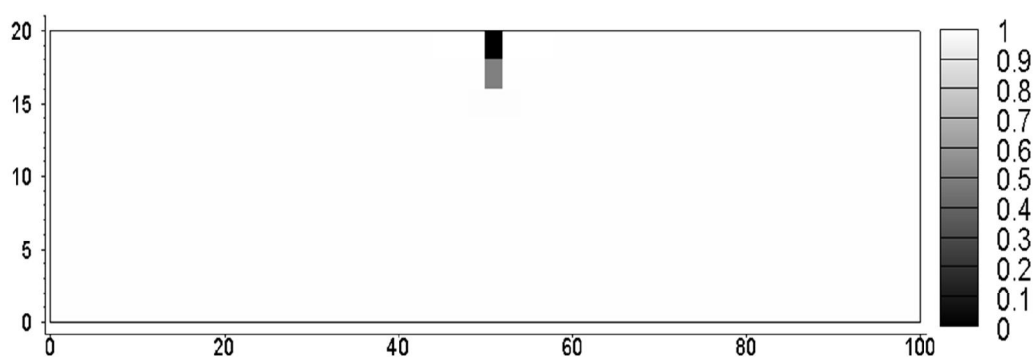


شکل (۵-۱۵) شرایط تکیه‌گاهی و محل المان‌های آسیب‌دیده، مثال ۴

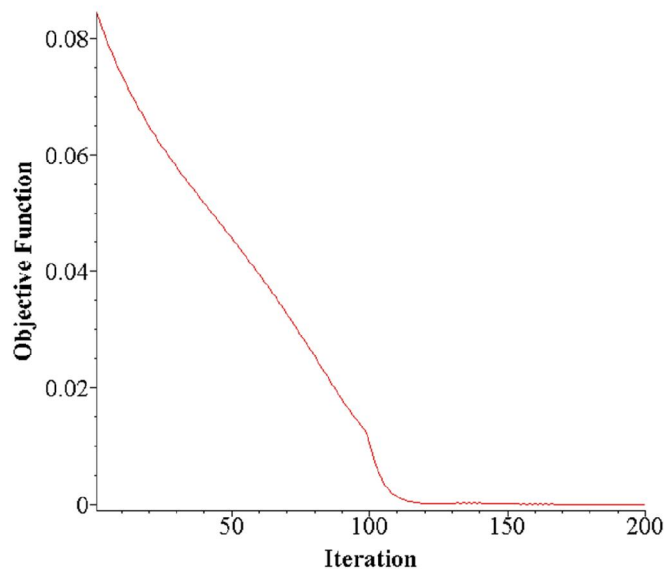


شکل (۵-۱۶) تأثیر خرابی بر روی نمودار تابع پاسخ فرکانسی در محل بار ورودی، مثال ۴

محل و شدت المان‌های آسیب‌دیده در این مثال به‌خوبی تشخیص داده شده و این موضوع در شکل (۵-۱۷) قابل‌مشاهده است. تغییرات تابع هدف نیز در شکل (۵-۱۸) نشان داده شده است.



شکل (۵-۱۷) تشخیص محل و شدت آسیب توسط الگوریتم بهینه‌سازی، مثال ۴

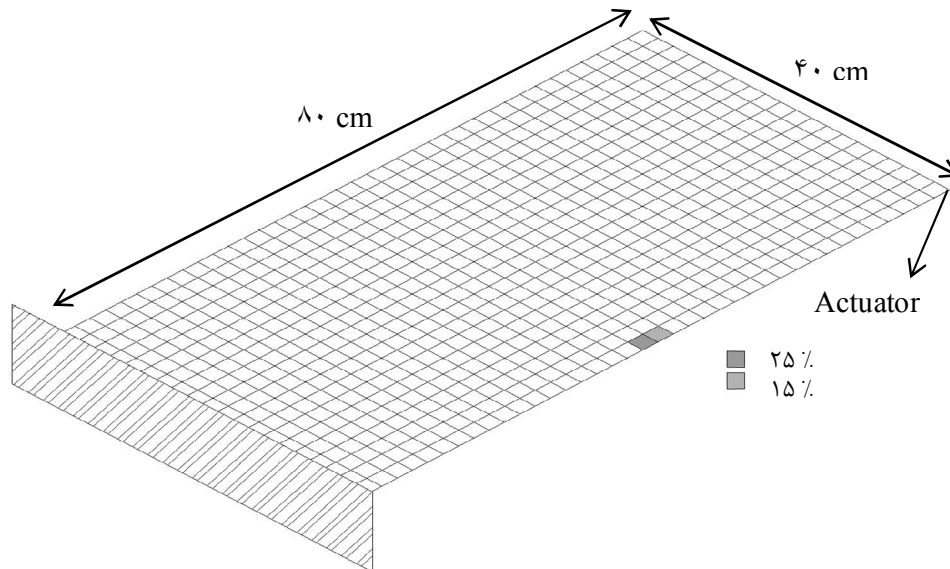


شکل (۵-۱۸) نمودار تغییرات تابع هدف، مثال ۴

۵-۳-۳-۵- مثال (۵)

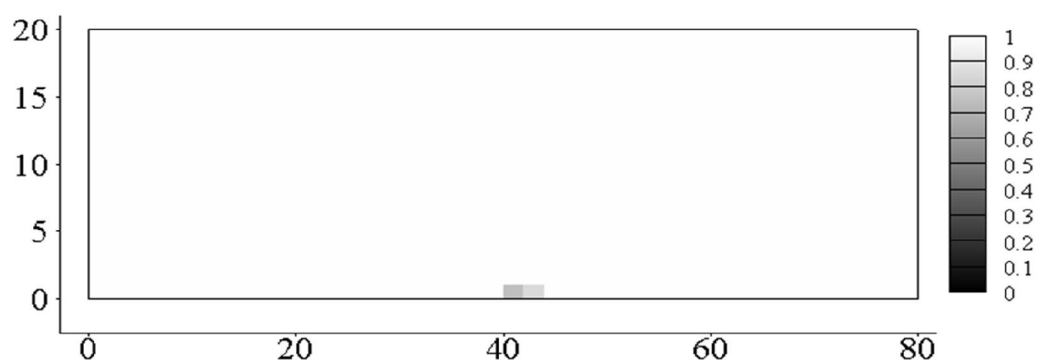
در بعضی از سازه‌ها به دست آوردن مشخصات سازه و مصالح بکار رفته در سازه امری دشوار می‌باشد. از این جهت مدل‌سازی سازه‌ی اولیه جهت تشخیص خرابی ناممکن می‌شود. در این شرایط می‌توان مشخصات مودال سازه را در یک زمان مشخص به دست آورد و آن را به عنوان مبنا در نظر گرفت و سپس با گذشت زمان و تشدید خرابی در سازه مجدداً مشخصات مودال سازه محاسبه می‌شود از اختلاف مشخصات مودال در سازه آسیب‌دیده و سازه مبنا می‌توان آسیب را تشخیص داد. در این مثال ابتدا تابع پاسخ فرکانسی برای سازه با مقادیر خرابی کمتر نسبت به سازه آسیب‌دیده را به دست آورده و آن را سازه مبنا در نظر می‌گیریم سپس تابع پاسخ فرکانسی برای سازه آسیب‌دیده را به دست می‌آوریم از اختلاف آن‌ها شدت و محل آسیب در سازه مشخص می‌شود. سازه مبنا در این مثال مشابه سازه آسیب‌دیده (شکل (۵-۱۹)) می‌باشد با این تفاوت که مقادیر خرابی در سازه مبنا ۱۰٪ و ۲۰٪ می‌باشند. ابعاد صفحه خمشی 80×40 cm می‌باشد، ضخامت صفحه 5 cm است و برای تحلیل

اجزای محدود آن از تعداد ۸۰۰ المان ۴ گرهی استفاده شده است. همان‌طور که در شکل شماره (۵-۱۹) مشاهده می‌کنید محل و شدت خرابی و همچنین شرایط تکیه‌گاهی نشان داده شده است.



شکل (۵-۱۹) شرایط تکیه‌گاهی و محل المان‌های آسیب‌دیده، مثال ۵

با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی تعریف‌شده محل و شدت خرابی‌ها تشخیص داده شده است. همان‌طور که در شکل (۵-۲۰) نشان داده شده است محل خرابی‌ها به‌درستی تشخیص داده شده است شدت خرابی نیز با تقریب نسبتاً خوبی به‌دست آمده است. مقادیر خرابی تشخیص داده شده توسط الگوریتم را می‌توان در جدول (۵-۳) مشاهده نمود. تغییرات تابع هدف در شکل (۵-۲۱) نشان داده شده است.

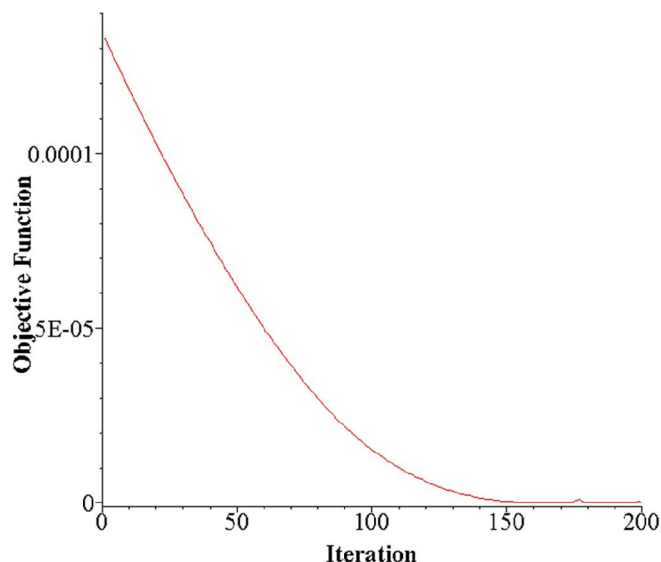


شکل (۵-۲۰) تشخیص محل و شدت آسیب توسط الگوریتم بهینه‌سازی، مثال ۵

جدول (۵-۳) مقادیر شدت خرابی برای المان‌های آسیب‌دیده، مثال ۵

خطا	شدت آسیب به‌دست آمده	شدت آسیب ثانویه	شدت آسیب اولیه	شماره المان
+۳.۳۴٪	۱۸.۳۴٪	۱۵٪	۱۰٪	۱
-۱.۳۶٪	۲۳.۶۴٪	۲۵٪	۲۰٪	۲

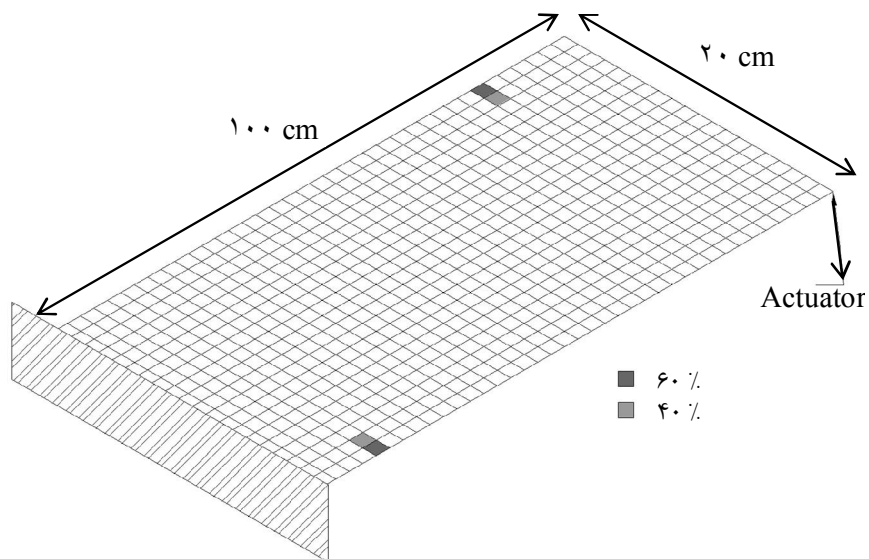
هدف این مثال به دست آوردن مقادیر خرابی ثانویه می‌باشد. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود مقادیر خرابی به‌دست‌آمده توسط الگوریتم با مقادیر خرابی ثانویه اختلاف بسیار کمی دارند.



شکل (۵-۲۱) نمودار تغییرات تابع هدف، مثال ۵

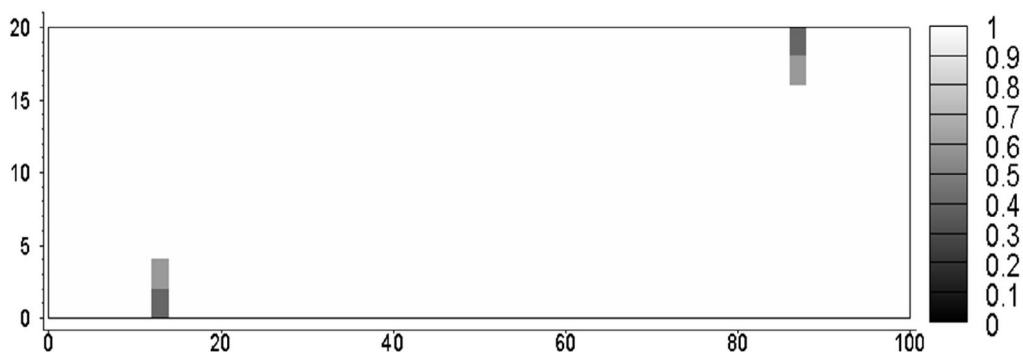
۵-۳-۴-مثال (۶)

یک صفحه خمشی به ابعاد 100×20 cm و ضخامت 3 cm در نظر گرفته شده است. تعداد المان-های آسیب‌دیده در این مثال ۴ عدد می‌باشد و به‌صورت دو خرابی در جای متفاوت از سازه در نظر گرفته شده است. دامنه تغییر فرکانس بار ورودی به سازه در این مثال بین ۰ تا ۱۰۰۰ می‌باشد. محل خرابی‌ها، محل بار ورودی به سازه و همچنین شرایط تکیه‌گاهی در شکل (۵-۲۲) مشخص شده است. خرابی تشخیص داده شده توسط الگوریتم و همچنین نمودار تغییرات تابع هدف را می‌توان در شکل‌های (۵-۲۳) و (۵-۲۴) مشاهده نمود.

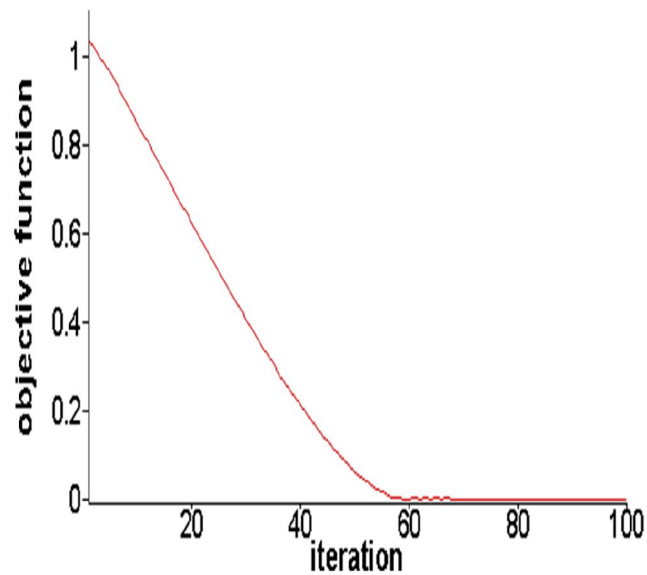


شکل (۵-۲۲) شرایط تکیه‌گاهی و محل‌المان‌های آسیب‌دیده، مثال ۶

در این مثال خرابی در دو جای متفاوت از سازه در نظر گرفته شده است. تا توانایی الگوریتم در تشخیص این‌گونه خرابی‌ها نیز بررسی شود. همانطور در شکل (۵-۲۳) مشاهده محل و شدت خرابی‌ها بدرستی تشخیص داده شده، تابع هدف نیز با توجه به شکل (۵-۲۴) پس از گذشت ۱۰۰ مرحله تکرار کمینه شده و به مقدار 1.5×10^{-5} رسیده است.



شکل (۵-۲۳) تشخیص محل و شدت آسیب توسط الگوریتم بهینه‌سازی، مثال ۶



شکل (۵-۲۴) نمودار تغییرات تابع هدف، مثال ۶

مقادیر بدست آمده توسط الگوریتم، مقادیر خرابی در نظر گرفته شده برای سازه و همچنین اختلاف آن‌ها را می‌توان در جدول (۵-۴) مشاهده نمود. در این مثال مقدار خرابی با دقت بسیار بالایی تشخیص داده شده است.

جدول (۵-۴) مقادیر شدت خرابی برای المان‌های آسیب‌دیده، مثال ۶

شماره المان	شدت آسیب	شدت آسیب به‌دست‌آمده	خطا
۱	٪ ۶۰	٪ ۵۹.۱۰	-٪ ۰.۹
۲	٪ ۴۰	٪ ۴۰.۲۳	+٪ ۰.۲۳
۳	٪ ۶۰	٪ ۶۰.۳۸	+٪ ۰.۳۸
۴	٪ ۴۰	٪ ۴۰.۲۳	-٪ ۰.۲۳

فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۶-۱- مقدمه

هدف از این پایان‌نامه ارائه یک روش تشخیص آسیب در سازه‌های صفحه‌ای پیوسته با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی سازه‌ها می‌باشد. بر این اساس در فصل اول مقدمه‌ای از مفاهیم اولیه شناسایی آسیب بیان شد. در فصل دوم پیشینه‌ای از پژوهش‌هایی که در مورد شناسایی آسیب و روش‌های استفاده‌شده در این زمینه گفته شد. فصل سوم به‌طور کامل به روش‌های نظری شناسایی داده‌های مودال و تابع پاسخ فرکانسی برای استفاده از آن‌ها در تحلیل حساسیت تابع هدف پرداخته شد. در فصل چهارم دو تابع هدف برای استفاده در مسئله بهینه‌سازی جهت تشخیص آسیب در صفحه خمشی میدلین-رایزنر ارائه شد. مثال‌های عددی برای کارایی روش معرفی‌شده در این پایان‌نامه در فصل پنجم بیان شد. در این مثال‌ها مشاهده شد که این الگوریتم از دقت بسیار خوبی برای تشخیص محل و شدت آسیب در سازه برخوردار است.

۶-۲- نتایج

- با توجه به مثال‌های ارائه‌شده دقت الگوریتم بسیار بالا می‌باشد. در فصل قبل سعی شد در هر مثال خرابی در قسمت‌های مختلف سازه با شکل متفاوت نسبت به مثال‌های دیگر قرار گیرد از این‌رو الگوریتم ارائه‌شده توانایی تشخیص انواع خرابی‌ها را دارا می‌باشد.
- در همه مثال‌ها مقدار تابع هدف باگذشت ۱۰۰ مرحله به صفر می‌رسد. از این‌رو می‌توان گفت که سرعت همگرایی الگوریتم در تشخیص آسیب برای تمامی مثال‌ها به یک اندازه می‌باشد.
- استفاده از روش‌های بهینه‌سازی توپولوژی در شناسایی آسیب سازه‌ها کمک بسیاری در افزایش دقت و سرعت شناسایی آسیب می‌کند.

- برای به دست آوردن مشتق شکل مودها نسبت به پارامتر طراحی روش‌های بسیار و پیچیده-ای توسط پژوهش‌های گوناگونی ارائه شده است. در این نگارش با استفاده از روش حداقل مربعات نتایج بسیار خوبی به دست آمد و استفاده از این روش به جای استفاده از روش‌های پیچیده دیگر بسیار کارآمد می‌باشد.
- همان‌طور که گفته شد این الگوریتم مقدار اولیه پارامترهای طراحی در مدل عددی را به مقدار واقعی آن‌ها نزدیک می‌کند. برای افزایش سرعت الگوریتم بهتر است مقدار اولیه پارامترهای طراحی در مدل عددی را برابر ۱ قرار دهیم. چون با قرار دادن مقدار ۱ برای تمامی پارامترهای طراحی الگوریتم تنها سعی در کم کردن مقدار پارامتر طراحی در المان-های آسیب‌دیده می‌کند از این‌رو سرعت کمینه شدن تابع هدف بیشتر شده و زودتر به جواب مطلوب می‌رسد. از طرف دیگر اگر مقدار اولیه پارامترهای طراحی در مدل عددی را برابر یک عدد ثابت بین ۰ تا ۱ قرار دهیم (مثلاً عدد ۰.۵) شکل مودی که برای سازه به دست می‌آید با شکل مودی در حالتی که پارامتر طراحی برابر ۱ می‌باشد یکی است. از این‌رو برای تابع هدف اختلاف مودها الگوریتم مقادیر اولیه به عنوان المان سالم در نظر گرفته و تغییری در آن‌ها ایجاد نمی‌کند به همین خاطر نواحی خاکستری در شکل به دست آمده از نتایج خروجی به وجود می‌آید.
- استفاده از روش خرابی پیش‌رونده در تشخیص آسیب سازه بسیار روش جالب و کارآمدی می‌باشد. از مزیت‌های این روش می‌توان به عدم نیاز به پارامترهای مودال سازه آسیب‌دیده و کاهش اثرات نویز در داده‌های محاسباتی اشاره نمود.

۶-۳- پیشنهادها

- استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بجای استفاده از داده‌های نظری در روند تشخیص آسیب و مدل‌سازی نویز در مدل عددی و یا استفاده از مدل آسیب‌دیده بجای استفاده از مدل عددی
- در نظر گرفتن ماتریس میرایی در سازه و عدم چشم‌پوشی از مقدار آن در سازه
- به دست آوردن فرکانس طبیعی سازه در حالت اعمال عمدی بار نقطه‌ای در نقاط مختلف سازه جهت استفاده به‌عنوان تابع هدف برای تشخیص آسیب و محاسبه آنالیز حساسیت آن
- استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف و مقایسه نتایج آن باهم

مراجع

- [1] R. Brincker and C. Ventura, *Introduction to operational modal analysis*. John Wiley & Sons, 2015.
- [2] S. W. Doebling, C. R. Farrar, and M. B. Prime, “A summary review of vibration-based damage identification methods,” *Shock Vib. Dig.*, vol. 30, no. 2, pp. 91–105, 1998.
- [3] S.-S. Law, X.-Q. Zhu, and X.-Q. Zhu, *Damage Models and Algorithms for Assessment of Structures under Operating Conditions*. CRC Press, 2009.
- [4] M. P. Bendsøe and O. Sigmund, “Topology optimization—theory, methods, and applications.” Springer, Berlin Heidelberg New York, pp. 1–370, 2003.
- [5] Z. Yang, X. Chen, J. Yu, R. Liu, Z. Liu, and Z. He, “A damage identification approach for plate structures based on frequency measurements,” *Nondestruct. Test. Eval.*, vol. 28, no. 4, pp. 321–341, Dec. 2013.
- [6] J. Maeck, “Damage Assessment of Civil Engineering Structures by Vibration Monitoring Damage,” 2003.
- [7] S. A. Neild, “Using non-linear vibration techniques to detect damage in concrete bridges,” Oxford, 2001.
- [8] J. M. Ndambi *et al.*, “Comparison of techniques for modal analysis of concrete structures,” *Eng. Struct.*, vol. 22, no. 9, pp. 1159–1166, Sep. 2000.
- [9] O. S. Salawu, “Detection of structural damage through changes in frequency: a review,” *Eng. Struct.*, vol. 19, no. 9, pp. 718–723, Sep. 1997.
- [10] S. Farrar, Charles R., Doebling, “An Overview Of Modal Based Damage Identification Methods”, Engineering Analysis Group,” *United States N. p.*, Sep. 1997.
- [11] X. Zhu, S. Law, and H. Hao, “Damage assessment of reinforced concrete beams including the load environment,” *Struct. Eng. Mech.*, vol. 33, no. 6, pp. 765–779, 2009.
- [12] D. Montalvão, N. M. M. Maia, and A. M. R. Ribeiro, “A review of vibration-based structural health monitoring with special emphasis on composite materials,” *Shock and Vibration Digest*, vol. 38, no. 4. pp. 295–324, 01-Jul-2006.

- [13] Y. Xia, H. Hao, G. Zanardo, and A. Deeks, "Long term vibration monitoring of an RC slab: Temperature and humidity effect," *Eng. Struct.*, vol. 28, no. 3, pp. 441–452, Feb. 2006.
- [14] C. R. Farrar, S. W. Doebling, P. J. Cornwell, and E. G. Straser, "Variability of modal parameters measured on the Alamosa Canyon Bridge." United States: N. p., 31-Dec-1996.
- [15] B. Peeters and G. De Roeck, "One Year Monitoring Of The Z24-Bridge : Environmental Influences Versus Damage Events Status of the paper B . P EETERS AND G . D E R OECK . One year monitoring of the z24-bridge : environmental," in *The International Society for Optical Engineering*, 2000, no. May.
- [16] R. J. Allemang and D. L. Brown, "A correlation coefficient for modal vector analysis," in *Proceedings of the first international Modal Analysis Conference*, 1982, pp. 110–116.
- [17] R. J. Allemang, "The modal assurance criterion - Twenty years of use and abuse," *Sound Vib.*, vol. 37, no. 8, pp. 14–21, 2003.
- [18] J. R. Casas and A. C. Aparicio, "Structural damage identification from dynamic-test data," *J. Struct. Eng.*, vol. 120, no. 8, pp. 2437–2450, 1994.
- [19] O. S. Salawu and C. Williams, "Bridge assessment using forced-vibration testing," *J. Struct. Eng.*, vol. 121, no. 2, pp. 161–173, 1995.
- [20] C. P. Ratcliffe, "Damage detection using a modified Laplacian operator on mode shape data," *J. Sound Vib.*, vol. 204, no. 3, pp. 505–517, 1997.
- [21] A. K. Pandey, M. Biswas, and M. M. Samman, "Damage detection from changes in curvature mode shapes," *J. Sound Vib.*, vol. 145, no. 2, pp. 321–332, Mar. 1991.
- [22] M. M. ABDEL WAHAB and G. DE ROECK, "DAMAGE DETECTION IN BRIDGES USING MODAL CURVATURES: APPLICATION TO A REAL DAMAGE SCENARIO," *J. Sound Vib.*, vol. 226, no. 2, pp. 217–235, Sep. 1999.
- [23] H. Zhong and M. Yang, "Damage detection for plate-like structures using

- generalized curvature mode shape method,” *J. Civ. Struct. Heal. Monit.*, vol. 6, no. 1, pp. 141–152, 2015.
- [24] C. P. Ratcliffe, “A frequency and curvature based experimental method for locating damage in structures,” *J. Vib. Acoust.*, vol. 122, no. 3, pp. 324–329, 2000.
 - [25] C. P. Ratcliffe and W. J. Bagaria, “Vibration technique for locating delamination in a composite beam,” *AIAA J.*, vol. 36, no. 6, pp. 1074–1077, 1998.
 - [26] S. M. Seyedpoor, “A two stage method for structural damage detection using a modal strain energy based index and particle swarm optimization,” *Int. J. Non. Linear. Mech.*, vol. 47, no. 1, pp. 1–8, Jan. 2012.
 - [27] W.-J. Yan, W.-X. Ren, and T.-L. Huang, “Statistic structural damage detection based on the closed-form of element modal strain energy sensitivity,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 28, pp. 183–194, Apr. 2012.
 - [28] W. Fan and P. Qiao, “A strain energy-based damage severity correction factor method for damage identification in plate-type structures,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 28, pp. 660–678, Apr. 2012.
 - [29] L. Wang, T. H. T. Chan, D. P. Thambiratnam, and A. C. C. Tan, “Damage detection for truss bridge structures using correlation-based structural modal strain energy,” *Proc. 8th Int. Conf. Short Mediu. Span Bridg.*, no. August, pp. 861–870, 2010.
 - [30] N. Stubbs, J. T. Kim, and K. Topole, “An efficient and robust algorithm for damage localization in offshore platforms,” in *Proceedings of the ASCE 10th Structures Congress*, 1992, vol. 1, pp. 543–546.
 - [31] N. Stubbs, J. Kim, and C. R. Farrar, “Field Verification of a Nondestructive Damage Localization and Severity Estimation Algorithm,” in *Proceeding of 13th International Modal Analysis Conference*, 1995, pp. 210–218.
 - [32] P. Cornwell, S. W. Doebling, and C. R. Farrar, “Application of the strain energy damage detection method to plate-like structures,” *J. Sound Vib.*, vol. 224, no. 2, pp. 359–374, 1999.

- [33] K. G. Topole and N. Stubbs, "Non-destructive damage evaluation of a structure from limited modal parameters," *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 24, no. 11, pp. 1427–1436, 1995.
- [34] Z. Shi, S. S. Law, and L. Zhang, "Structural damage detection from modal strain energy change," *J. Eng. Mech.*, vol. 126, no. 12, pp. 1216–1223, 2000.
- [35] Y. Gao, B. F. Spencer Jr, and D. Bernal, "Experimental verification of the flexibility-based damage locating vector method," *J. Eng. Mech.*, vol. 133, no. 10, pp. 1043–1049, 2007.
- [36] A. K. Pandey and M. Biswas, "Damage detection in structures using changes in flexibility," *J. Sound Vib.*, vol. 169, no. 1, pp. 3–17, 1994.
- [37] A. K. Pandey and M. Biswas, "Experimental verification of flexibility difference method for locating damage in structures," *J. Sound Vib.*, vol. 184, no. 2, pp. 311–328, 1995.
- [38] Z. Zhang and A. E. Aktam, "The damage indices for constructed facilities," in *Proceedings of the IMAC*, 1995, pp. 1520–1529.
- [39] A. Alvandi and C. Cremona, "Assessment of vibration-based damage identification techniques," *J. Sound Vib.*, vol. 292, no. 1–2, pp. 179–202, 2006.
- [40] F. C. Choi, J. Li, B. Samali, and K. Crews, "Application of the modified damage index method to timber beams," *Eng. Struct.*, vol. 30, no. 4, pp. 1124–1145, 2008.
- [41] D. Bernal, "Load vectors for damage localization," *J. Eng. Mech.*, vol. 128, no. 1, pp. 7–14, 2002.
- [42] D. Bernal and B. Gunes, "Flexibility based approach for damage characterization: benchmark application," *J. Eng. Mech.*, vol. 130, no. 1, pp. 61–70, 2004.
- [43] D. Zonta, A. Lanaro, and P. Zanon, "A strain-flexibility-based approach to damage location," in *Key Engineering Materials*, 2003, vol. 245, pp. 87–96.
- [44] H. Sohn and K. H. Law, "Damage diagnosis using experimental Ritz vectors," *J.*

Eng. Mech., vol. 127, no. 11, pp. 1184–1193, 2001.

- [45] B. Nour-Omid and R. W. Clough, “Dynamic analysis of structures using Lanczos co-ordinates,” *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 12, no. 4, pp. 565–577, 1984.
- [46] P. Leger, E. L. Wilson, and R. W. Clough, “The use of load-dependent Ritz vectors for dynamic and earthquake analyses,” 1986.
- [47] A. Teughels and G. De Roeck, “Structural damage identification of the highway bridge Z24 by FE model updating,” *J. Sound Vib.*, vol. 278, no. 3, pp. 589–610, 2004.
- [48] P. Cawley and R. D. Adams, “The location of defects in structures from measurements of natural frequencies,” *J. Strain Anal. Eng. Des.*, vol. 14, no. 2, pp. 49–57, Apr. 1979.
- [49] J. E. T. Penny, D. A. L. Wilson, and M. I. Friswell, “Damage location in structures using vibration data,” in *Proceedings-SPIE The International Society for Optical Engineering*, 1993, p. 861.
- [50] S. Hassiotis and G. D. Jeong, “Identification of stiffness reductions using natural frequencies,” *J. Eng. Mech.*, vol. 121, no. 10, pp. 1106–1113, 1995.
- [51] S. A. Neild, M. S. Williams, and P. D. McFadden, “Nonlinear Vibration Characteristics of Damaged Concrete Beams,” *J. Struct. Eng.*, vol. 129, no. 2, pp. 260–268, 2003.
- [52] A. Goldsmith, “Damage detection in concrete beams using vibration measurements,” 1999.
- [53] Z. Wang, R. M. Lin, and M. K. Lim, “Structural damage detection using measured FRF data,” *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 147, no. 1–2, pp. 187–197, 1997.
- [54] A. S. Kiremidjian and E. G. Etraster, “Modular, wireless damage monitoring system for structures,” Sep. 1998.
- [55] O. Begambre and J. E. Laier, “A hybrid Particle Swarm Optimization – Simplex

- algorithm (PSOS) for structural damage identification,” *Adv. Eng. Softw.*, vol. 40, no. 9, pp. 883–891, Sep. 2009.
- [56] S. C. Mohan, D. K. Maiti, and D. Maity, “Structural damage assessment using FRF employing particle swarm optimization,” *Appl. Math. Comput.*, vol. 219, no. 20, pp. 10387–10400, 2013.
- [57] U. Lee and J. Shin, “A frequency response function-based structural damage identification method,” *Comput. Struct.*, vol. 80, no. 2, pp. 117–132, 2002.
- [58] T. Nishizu, A. Takezawa, and M. Kitamura, “Eigenfrequency-based damage identification method for non-destructive testing based on topology optimization,” *Eng. Optim.*, vol. 49, no. 3, pp. 417–433, 2017.
- [59] W. Zhang, Z. Du, G. Sun, and X. Guo, “A level set approach for damage identification of continuum structures based on dynamic responses,” *J. Sound Vib.*, vol. 386, pp. 100–115, 2017.
- [60] S. M. Eslami, F. Abdollahi, J. Shahmiri, and S. M. Tavakkoli, “STRUCTURAL DAMAGE DETECTION BY USING TOPOLOGY OPTIMIZATION FOR PLANE STRESS PROBLEMS,” *Int. J. Optim. Civ. Eng.*, vol. 9, no. 1, pp. 159–176, 2019.
- [61] F. Abdollahi and S. M. Tavakkoli, “DAMAGE IDENTIFICATION BY USING MODAL EXPANSION AND TOPOLOGY OPTIMIZATION IN THREE DIMENSIONAL ELASTICITY PROBLEMS,” *Int. J. Optim. Civ. Eng.*, vol. 9, no. 4, pp. 543–560, 2019.
- [62] D. J. Ewins, *Modal Testing: Theory and Practice*, vol. 108, no. 1. John Wiley & Sons, Ltd, 2000.
- [63] Á. Cunha, E. Caetano, F. Magalhães, and C. Moutinho, “From input-output to output-only modal identification of civil engineering structures,” in *Proceedings of the 1st International Operational Modal Analysis Conference: IOMAC, April 26-27, Copenhagen, Denmark, 2005*, no. May 2014, pp. 1–22.
- [64] Alfredo Güemes, B. Lin, and V. Giurgiutiu, *Structural Health Monitoring*, vol. 11, no. 1. 2012.

- [65] K. Bhaskar and T. . Vardan, *Plates Theories and Application*, vol. 28, no. 1. Wiley Online Library, 2013.
- [66] E. H. Behrooz Hassani, *Homogenization and Structural Topology Optimization: Theory, Practice and Software*. 1998.
- [67] John Wolberg, *Data Analysis Using the Method of Least Squares*. Springer London, 2006.
- [68] R. L. Fox and M. P. Kapoor, “Rates of Change Eigenvalues and Eigenvectors,” *Am. Inst. Aeronaut. Astronaut.*, vol. 6, no. 12, pp. 2426–2429, 1963.
- [69] J. S. Arora, *Introduction to optimum design*. Elsevier/Academic Press, 2004.

Abstract

Nowadays structures play a significant role in ensuring the security and welfare of the human community. If the structures are not properly designed, implemented and maintained, they may cause problems. Proper design and execution of a structure is of great importance in the performance of the structure. In the meantime, there are some structures that, in addition to proper design and implementation, should be monitored continuously for their health control, in order to avoid collapse in the structure and adverse consequences. Important structures that need to be monitored continuously include dams, bridges and historic structures. These structures will cause irreparable consequences due to their economic, political and social sensitivities if they fail. Structures in the course of their lifetime due to various factors such as applied loads, fatigue, corrosion, etc. are damaged. Structural damage detection is one of the most important areas in engineering societies. In recent years, aerospace engineers, mechanics and civil engineering have shown this interest and many researches have been carried out.

In this thesis, structural damage detection for bending plates is investigated by the aid of topology optimization. The objective function for solving this optimization problem is the difference in the frequency response function (FRF) as well as the difference in the mode shapes of the damaged structure and the numerical model. It is also shown in this thesis that there is no need for intact structure data for damage detection purposes. So by using modal data obtained from damaged structures in two different times, location and intensity of the progressive damage can be detected. In this research, Finite element method is utilized for structural analysis. Damage in this problem is assumed as a reduction in the structural stiffness and impact of damage on structural mass has been neglected. Material distribution in this problem is modeled by solid isotropic material with penalization (SIMP) method. For this purpose, the density of each element is considered as the design variable of the optimization problem. The amount of density for each element is between 0 and 1. If the density of an element is between 1 and 0, it means corresponding element is damaged, and if density of an element is 1, it means that corresponding element is intact. In SIMP method a penalization coefficient is assigned. Applying this coefficient on densities results in converting them to nearly full or empty elements. On the other hand, this coefficient increases the sensitivity to damage. Therefore, in this thesis, continuation method has been used. In this method,

the coefficient changes between two values (3 and 1 in this research). This coefficient decreases linearly during the optimization stages, so that at the beginning of the optimization steps, the large value (3) is chosen, so that the variables approach their true values faster. After reaching final iterations of optimization, due to the low difference between the values of the density of the numerical model and their actual values, the coefficient is equal to the smaller value (1) and coefficient remains constant until the end of the optimization process. MATLAB software is used for programming purposes in damage detection procedure. Mathematical methods have been used to solve the optimization problem. The efficiency and accuracy of the proposed method is illustrated using few numerical examples. According to the results obtained from the examples presented in this thesis, the accuracy of the proposed algorithm in identifying the location and intensity of damage is significant.

Keywords: topology optimization, damage detection, frequency response function, sensitivity analysis.



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Structural Engineering

Damage detection for bending plates by using topology
optimization

By: Jamshid Shahmiri

Supervisor:

Dr. Seyed Mehdi Tavakkoli

Date: July 2019