

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده‌ی مهندسی عمران

گروه سازه

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد

شناسایی آسیب در مسائل سه‌بعدی به کمک بهینه‌سازی توپولوژی

فرشاد عبداللهی

استاد راهنما:

دکتر سید مهدی توکلی

تیر ۱۳۹۸

شماره: ۹۸/۲۴
تاریخ: ۹۸/۶/۱۴

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 آقای فرشاد عبداللهی با شماره دانشجویی ۹۵۱۶۶۲۴ رشته مهندسی عمران گرایش سازه تحت عنوان شناسایی آسیب در مسائل سه بعدی به کمک بهینه‌سازی توپولوژی که در تاریخ ۱۳۹۸/۰۴/۲۳ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه:): مردود
نوع تحقیق: نظری عملی

اعضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استادیار	دکتر سید مهدی توکلی	۱- استاد راهنمای اول
			۲- استاد راهنمای دوم
			۳- استاد مشاور
	استادیار	دکتر مهدی گلی	۴- نماینده تحصیلات تکمیلی
	دانشیار	دکتر وحیدرضا کلات‌جاری	۵- استاد ممتحن اول
	دانشیار	دکتر رضا نادری	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر رضا نادری

تاریخ و امضاء:

تبدیل در صورتی که کسی برگرد شود حداکثر یکبار امکان دارد (مجاز تحصیل) می‌تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم به

خانواده‌ی عزیزم که در این مسیر طولانی همواره حمایت
کردند و به من ایمان داشتند.

تشکر و قدردانی

صمیمانه از تمامی کسانی که در نگارش این پایان‌نامه مرا یاری کردند تشکر می‌کنم.

از جناب آقای دکتر سید مهدی توکلی که نه‌تنها در زمینه‌ی درسی، بلکه در سایر زمینه‌ها نیز برای ما وقت گذاشتند و دلسوزانه در فراز و نشیب این تحقیق ما را یاری کردند نهایت سپاس را دارم.

از دوستان گران‌قدرم، خانم مریم اسلامی و آقای جمشید شهمیری که تجربیات خود را در اختیار من قرار دادند هم تشکر فراوان می‌کنم.

هم‌چنین از تمامی اساتید گرامی و دوستانی که مرا در به ثمر رساندن این پایان‌نامه همراهی کرده‌اند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

تعهد نامه

اینجانب فرشاد عبداللهی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته‌ی سازه دانشکده‌ی عمران دانشگاه شاهرود نویسنده پایان‌نامه " شناسایی آسیب در مسائل سه‌بعدی به کمک بهینه‌سازی توپولوژی " تحت راهنمایی دکتر سید مهدی توکلی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورداستفاده 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 بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آن‌ها) استفاده‌شده 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 استفاده‌شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، 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

هدف اصلی در این پژوهش، معرفی روش بهینه‌سازی توپولوژی به‌عنوان یک ابزار قدرتمند در شناسایی آسیب در سازه‌های سه‌بعدی پیوسته و ترکیب آن با تکنیک‌های گسترش مودی است. یک فرآیند پایش سلامت سازه متشکل از دو بخش شناسایی آسیب و شناسایی سیستم در این پژوهش ارائه شده است که هر دو بخش به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته‌اند. تابع هدف مورد استفاده در این پژوهش بر مبنای بردار مودی بوده و هدف آن به حداقل رساندن اختلاف بین داده‌های مودال سازه‌ی آسیب‌دیده و مدل عددی است.

برای بخش شناسایی سیستم، از تکنیک‌های گسترش مودی استفاده شده تا با استفاده از تعداد کمی از مؤلفه‌های بردار مودی، سایر مؤلفه‌ها تخمین زده شود. به این منظور از دو روش گسترش دینامیکی و کاهش مودال T_{SEREP} استفاده شده است. در روش گسترش دینامیکی از ماتریس سختی و جرم سازه استفاده می‌شود. روش کاهش مودال با فرض سالم بودن سازه، مودها را به دست آورده و سپس با یک تبدیل خطی از روی داده‌های معلوم، داده‌های مجهول را تخمین می‌زند. در ادامه با استفاده از روش‌های شناسایی آسیب ارائه شده محل و شدت آسیب‌ها در سازه محاسبه می‌شود.

آسیب در این پژوهش به صورت کاهش در جرم و سختی المان‌ها در نظر گرفته شده است. به منظور مدل‌سازی مناسب آسیب‌ها، از روش مصالح مصنوعی همسانگرد با ضریب جریمه (SIMP)¹ برای تعریف مصالح استفاده شده و با کمک بهینه‌سازی توپولوژی و استفاده از روش تندترین شیب نزولی تابع هدف بهینه می‌شود. برای به دست آوردن مشتقات تابع هدف نسبت به متغیرهای طراحی از آنالیز حساسیت تحلیلی استفاده شده که به این منظور تابع هدف نسبت به متغیر طراحی مشتق‌گیری تحلیلی شده و روابط به دست آمده در بخش مربوطه آورده شده است.

¹ Solid Isotropic Material with Penalization

نوآوری این پژوهش به کارگیری تکنیک‌های گسترش مودی در شناسایی آسیب در سازه‌های پیوسته و بهره‌گیری از روش‌های بهینه‌سازی توپولوژی جهت مدل‌سازی دامنه‌ی طراحی و تعیین محل و شدت آسیب می‌باشد.

به منظور دستیابی به اهداف گفته شده، یک کد متلب متشکل از بخش‌های مختلف نوشته شده که بر پایه‌ی تحلیل اجزا محدود سه‌بعدی می‌باشد. در نهایت ۶ مثال جهت بررسی عملکرد روش ارائه‌شده آورده شده است. با توجه به نتایج مثال‌ها، محل و شدت آسیب‌ها با دقت مناسبی تشخیص داده شدند.

واژگان کلیدی: پایش سلامت سازه‌ها، بهینه‌سازی توپولوژی، شناسایی آسیب، گسترش مودی،

SIMP.

فهرست مطالب

فصل اول : مقدمه و کلیات	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ ساختار پایان نامه	۴
فصل دوم : مروری بر پایش سلامت سازه	۷
۱-۲ مقدمه	۸
۲-۲ مبانی شناسایی آسیب و روش های مختلف آن	۹
۱-۲-۲ آزمایش های مخرب	۹
۲-۲-۲ آزمایش های غیر مخرب	۱۰
۳-۲-۲ آزمایش های غیرمستقیم و معکوس	۱۱
۳-۲ پایش سلامت سازه	۱۶
۱-۳-۲ مقدمه	۱۶
۲-۳-۲ مراحل پایش سلامت سازه	۱۶
۳-۳-۲ پایش دینامیکی سلامت سازه	۱۹
۴-۲ شناسایی آسیب	۱۹
۱-۴-۲ مقدمه	۱۹
۲-۴-۲ شناسایی موضعی و عمومی خرابی در سازه ها	۲۱
۵-۲ شناسایی سیستم	۲۲
۱-۵-۲ مقدمه	۲۲
۲-۵-۲ روش SEREP	۲۳
۳-۵-۲ روش گسترش دینامیکی	۲۵
۶-۲ مسائل تنش مسطح سازه های گسسته	۲۶
۱-۶-۲ جابجایی ها، کرنش ها و تنش ها	۲۶
۲-۶-۲ گسسته سازی المان محدود	۲۷

۲۷	..... درونیایی جابجایی ها	۳-۶-۲
۲۸	..... المان هشت گره‌ای	۴-۶-۲
۳۳	..... فصل سوم : شناسایی آسیب با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی	
۳۴	..... مقدمه	۱-۳
۳۵	..... فرم ریاضی عمومی برای یک مسئله بهینه‌سازی سازه‌ای	۲-۳
۳۷	..... انواع مسائل بهینه‌سازی سازه‌ای	۳-۳
۳۸	..... مسئله عمومی بهینه‌سازی توپولوژی	۴-۳
۳۹	..... مسئله بهینه‌سازی توپولوژی برای شناسایی آسیب	۵-۳
۴۱	..... انواع تابع هدف	۶-۳
۴۸	..... توابع هدف مورد استفاده در بهینه‌سازی	۷-۳
۴۸	..... تغییرات فرکانس (مقادیر ویژه)	۱-۷-۳
۴۹	..... تغییرات شکل مودی (بردارهای ویژه)	۲-۷-۳
۵۰	..... روش مصالح مصنوعی همسانگرد با اعمال جریمه	۸-۳
۵۴	..... مسئله دینامیک	۹-۳
۵۶	..... تحلیل حساسیت	۱۰-۳
۵۶	..... روش تفاضل محدود	۱-۱۰-۳
۵۷	..... مشتق‌گیری تحلیلی	۲-۱۰-۳
۶۰	..... روش بهینه‌سازی تندترین شیب نزولی	۱۱-۳
۶۳	..... روش جستجوی طلایی برای پیدا کردن گام حرکت	۱۲-۳
۶۶	..... روش پیوسته‌سازی	۱۳-۳
۶۷	..... ساختار برنامه کامپیوتری تهیه شده	۱۴-۳
۶۹	..... فصل چهارم : مثال‌های عددی	
۷۰	..... مقدمه	۱-۴
۷۰	..... مثال اول	۲-۴
۷۵	..... مثال دوم	۳-۴

۷۷.....	۴-۴ مثال سوم.....
۸۰.....	۵-۴ مثال چهارم.....
۸۵.....	۶-۴ مثال پنجم.....
۸۹.....	۷-۴ مثال ششم.....
۹۵.....	فصل پنجم : نتایج و پیشنهادات.....
۹۶.....	۱-۵ مقدمه.....
۹۶.....	۲-۵ نتایج.....
۹۸.....	۳-۵ پیشنهادات.....
۹۹.....	مراجع.....

فهرست شکل ها و جدول ها

۵۰.....	شکل ۱-۳ ریز سلول ها با حفره های مستطیلی.....
۵۱.....	شکل ۲-۳ سلول واحد مربعی با حفره مستطیلی در مرکز آن در مقیاس میکروسکوپی.....
۶۵.....	شکل ۳-۳ مقطعی از روش جستجوی طلایی.....
۶۵.....	شکل ۴-۳ تعیین اولین نقطه متوسط.....
۶۶.....	شکل ۵-۳ تعیین دومین نقطه متوسط.....
۷۱.....	شکل ۱-۴. نمای تیر به همراه شرایط تکیه گاهی.....
۷۱.....	شکل ۲-۴. (الف) محل داده ها در حالت اول (ب) محل داده ها در حالت دوم.....
۷۲.....	شکل ۳-۴ (الف) بردار مودی تقریبی در جهت X (ب) بردار مودی دقیق در جهت X (ج) اختلاف بردارهای مودی.....
۷۳.....	شکل ۴-۴ (الف) بردار مودی تقریبی در جهت X (ب) بردار مودی دقیق در جهت X (ج) اختلاف بردارهای مودی.....
۷۴.....	شکل ۵-۴ (الف) بردار مودی تقریبی در جهت X (ب) بردار مودی دقیق در جهت X (ج) اختلاف بردارهای مودی.....

- شکل ۴-۶ (الف) بردار مودی تقریبی در جهت X (ب) بردار مودی دقیق در جهت X (ج) اختلاف بردارهای مودی. ۷۴
- شکل ۴-۷ (الف) نمای سه‌بعدی تیر (ب) محل داده‌ها و خرابی‌های المان‌ها. ۷۶
- شکل ۴-۸ (الف) حالت اول با فرض معلوم بودن تمام نقاط (ب) مدل سه‌بعدی برای حالت اول (پ) حالت دوم و با استفاده از روش T_{SEREP} (ت) حالت سوم و با استفاده از روش گسترش دینامیکی. ۷۶
- شکل ۴-۹ تاریخچه‌ی شدت آسیب المان‌ها در طول فرآیند شناسایی آسیب. ۷۷
- شکل ۴-۱۰ مدل سه‌بعدی تیر به همراه شرایط تکیه‌گاهی و الگوی آسیب. ۷۸
- شکل ۴-۱۱ (الف) نتیجه‌ی شناسایی آسیب برای حالت اول (ب) نتیجه‌ی شناسایی آسی برای حالت دوم. ۷۸
- شکل ۴-۱۲ مدل سه‌بعدی و نمودار تاریخچه‌ی تابع هدف برای حالت اول. ۷۹
- شکل ۴-۱۳ نتیجه‌ی شناسایی آسیب برای (الف) ۳ مود و (ب) ۱۰ مود. ۸۰
- جدول ۴-۱ مقایسه‌ی شدت آسیب شناسایی شده برای ۳، ۵ و ۱۰ مود. ۸۰
- شکل ۴-۱۴ مدل سه‌بعدی تیر به همراه شرایط تکیه‌گاهی و الگوی آسیب. ۸۱
- شکل ۴-۱۵ (الف) محل داده‌ها در حالت دوم (ب) محل داده‌ها در حالت سوم. ۸۱
- شکل ۴-۱۶ مدل سه‌بعدی شناسایی آسیب به همراه برش طولی و عرضی تیر برای حالت اول. ۸۲
- شکل ۴-۱۷ مدل سه‌بعدی شناسایی آسیب به همراه برش طولی و عرضی تیر برای حالت دوم. ۸۲
- شکل ۴-۱۸ مدل سه‌بعدی شناسایی آسیب به همراه برش طولی و عرضی تیر برای حالت سوم. ۸۳
- شکل ۴-۱۹ نتایج شناسایی شدت آسیب و نمودار تاریخچه‌ی تابع هدف برای حالت اول. ۸۳
- شکل ۴-۲۰ نتایج شناسایی شدت آسیب و نمودار تاریخچه‌ی تابع هدف برای حالت دوم. ۸۴
- شکل ۴-۲۱ نتایج شناسایی شدت آسیب و نمودار تاریخچه‌ی تابع هدف برای حالت سوم. ۸۴
- جدول ۴-۲ نتایج شدت آسیب شناسایی شده. ۸۵
- شکل ۴-۲۲ مدل سه‌بعدی تیر به همراه شرایط تکیه‌گاهی، محل و الگوی خرابی و مقطع تیر. ۸۶
- شکل ۴-۲۳ (الف) محل داده‌ها در حالت دوم (ب) محل داده‌ها در حالت سوم. ۸۶
- شکل ۴-۲۴ مدل سه‌بعدی شناسایی آسیب برای حالت اول. ۸۷
- شکل ۴-۲۵ مدل سه‌بعدی شناسایی آسیب برای حالت دوم. ۸۷

- شکل ۴-۲۶ مدل سه بعدی شناسایی آسیب برای حالت سوم..... ۸۷
- شکل ۴-۲۷ نتایج شناسایی شدت آسیب و نمودار تاریخچه‌ی تابع هدف برای حالت اول..... ۸۸
- شکل ۴-۲۸ نتایج شناسایی شدت آسیب و نمودار تاریخچه‌ی تابع هدف برای حالت دوم..... ۸۸
- شکل ۴-۲۹ نتایج شناسایی شدت آسیب و نمودار تاریخچه‌ی تابع هدف برای حالت سوم..... ۸۸
- جدول ۴-۳ نتایج شدت آسیب شناسایی شده ۸۹
- شکل ۴-۳۰ مدل سه بعدی تیر به همراهی شرایط تکیه‌گاهی، محل و الگوی خرابی و مقطع تیر..... ۹۰
- شکل ۴-۳۱ محل داده‌ها برای حالت دوم..... ۹۰
- شکل ۴-۳۲ نتیجه‌ی الگوریتم در حالت اول برای (الف) آسیب شماره ۱ بالای تیر و (ب) آسیب شماره ۲ پایین تیر..... ۹۱
- شکل ۴-۳۳ نتیجه‌ی الگوریتم در حالت دوم برای (الف) آسیب شماره ۱ بالای تیر و (ب) آسیب شماره ۲ پایین تیر..... ۹۱
- شکل ۴-۳۴ شدت آسیب در المان‌های حالت اول..... ۹۲
- شکل ۴-۳۵ شدت آسیب در المان‌های حالت دوم..... ۹۲
- شکل ۴-۳۶ نمودار تاریخچه‌ی تابع هدف (الف) حالت اول (ب) حالت دوم..... ۹۳

فصل اول : مقدمه و کلیات

۱-۱ مقدمه

طی سال‌های گذشته تحقیقات زیادی در زمینه‌ی پایش سلامت صورت گرفته که بخشی از آن‌ها به شناسایی سیستم و برخی دیگر به شناسایی آسیب پرداخته‌اند. فرآیند پایش سلامت عبارت است از استخراج مشخصات کیفی سازه و سپس استفاده از آن‌ها در راستای شناسایی آسیب [۱]. تغییر در مشخصات سازه می‌تواند به‌منزله‌ی آسیب باشد که برای تعیین آسیب، پارامترهای دینامیکی سازه می‌توانند بسیار مفید واقع شوند، چراکه با ایجاد آسیب در سازه، مشخصات دینامیکی سازه نیز دست‌خوش تغییر قرار گرفته و با حالت بدون آسیب متفاوت می‌شود. لذا برای شناسایی آسیب از مشخصات دینامیکی سازه نظیر: فرکانس‌های طبیعی، شکل مود و نسبت‌های میرایی استفاده می‌شود که می‌توانند در ارزیابی کلی سازه به ما کمک کنند.

فرض اساسی در استفاده از مشخصات دینامیکی، الاستیک خطی بودن رفتار سازه در طول فرآیند می‌باشد. به‌طور معمول فرض می‌شود که رفتار سازه‌های عمرانی در طول دوره‌ی کاربری در محدوده‌ی الاستیک خطی باشد. به‌منظور خطی بودن رفتار سازه، از ارتعاشات کم دامنه برای شناسایی کیفی استفاده می‌شود تا فرضیات اساسی برقرار باشند.

سازه‌های آسیب‌دیده به این دلیل مورد بررسی قرار می‌گیرند که امکان افت کارایی و یا خرابی کامل در آن‌ها به نسبت سایر سازه‌های سالم بیشتر بوده و می‌توان با پایش سلامت سازه، عمر کاربری آن‌ها را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش داد. آسیب‌ها می‌توانند ناشی از عوامل طبیعی مانند زلزله و یا عوامل انسانی مانند انفجار باشند که در هر دو صورت کاربری سازه را با مشکل مواجه می‌کنند. صرف‌نظر از سازه‌هایی که دچار آسیب شده‌اند، در بعضی از سازه‌ها که اهمیت استراتژیک دارند مانند: پل‌ها، سدها، بیمارستان‌ها، تونل‌ها و غیره، انتظار می‌رود که به‌طور بی‌وقفه سرویس‌دهی داشته باشند و در تمام طول عمر قابل بهره‌برداری باشند، لذا پایش سلامت به این سازه‌ها این امکان را می‌دهد که قبل از ایجاد خرابی‌های شدید بتوان محل و شدت خرابی‌های موضعی را تعیین کرده و به ترمیم آن‌ها پرداخته شود.

[۲].

با توجه به تحقیقات صورت گرفته در زمینه‌ی شناسایی آسیب، فرآیند کلی به چهار گام عمده تقسیم می‌شود که باید به ترتیب انجام گیرند [۳]:

- در ابتدا باید تشخیص داده شود که سازه دارای آسیب است یا خیر،
- بعد از تشخیص آسیب در سازه باید محل و موقعیت هندسی آسیب تعیین شود،
- با تعیین موقعیت آسیب، باید شدت آسیب محاسبه شود،
- با داشتن محل و شدت آسیب می‌بایست عمر باقی‌مانده‌ی سازه تخمین زده شود.

با کمک روش‌های بهینه‌سازی می‌توان از محل و مقدار دقیق آسیب در سازه مطلع شده و می‌توان متناسب با محل و شدت آسیب، به ترمیم سازه پرداخت. این فرآیند به افزایش طول عمر مفید سازه منجر می‌شود و از طرفی دیگر از رسیدن آسیب به مرحله‌ی بحرانی جلوگیری کرده و می‌تواند پیش از وقوع فاجعه از آن جلوگیری کند که هم از لحاظ اقتصادی و هم از لحاظ اجتماعی می‌تواند مفید واقع شود. از دیگر فواید این فرآیند می‌توان به غیرمخرب بودن آن اشاره کرد. شناسایی آسیب به دو دسته‌ی مخرب و غیر مخرب تقسیم می‌شوند. در روش‌های مخرب، المان‌هایی از سازه به‌منظور نمونه‌برداری جهت تشخیص خرابی، دچار آسیب می‌شدند که خود همین امر موجب آسیب اضافه در سازه می‌شود. از طرفی دیگر در روش‌های مخرب تنها المان‌های معینی قابل دسترسی جهت نمونه‌برداری هستند و نمی‌توان به تمامی اعضای سازه دسترسی داشت. در روش‌های غیر مخرب که مبتنی بر ارزیابی مشخصات دینامیکی سازه هستند، می‌توان تمامی المان‌های سازه را بدون کوچک‌ترین آسیب به سازه، مورد بررسی قرار داد.

در زمینه‌ی تعیین محل و شدت آسیب، تحقیقات بسیاری صورت گرفته و با این حال جنبه‌های ناشناخته‌ی وجود دارد که کمتر به آن‌ها پرداخته شده است. روش‌های متعددی برای این امر مورد استفاده قرار گرفته که هر کدام نقاط قوت و نقاط ضعف مربوط به خودشان را دارند. در این پژوهش سعی شده است تا محل و شدت آسیب با استفاده از روش بهینه‌سازی توپولوژی تعیین گردد [۴].

در تمامی شاخه‌های مهندسی، هدف این است که طرحی بهینه ارائه شود تا هزینه‌ها تا حد ممکن کاهش یابند. می‌توان گفت بهینه‌سازی عنصر کلیدی و مشترک در تمامی شاخه‌های مهندسی است و در طیف وسیعی از مسائل کاربرد دارد. در مهندسی عمران بهینه‌سازی می‌تواند در طراحی سازه به منظور کاهش مصالح و مقرون به صرفه تر شدن هزینه‌ها مورد استفاده قرار گیرد. به طور کلی می‌توان گفت بهینه‌سازی فرآیندی است که می‌تواند بهترین نتیجه را تحت شرایط تعریف شده حاصل کند. برای بهینه‌سازی کامپیوتری می‌توان از دو روش عمده استفاده کرد. دسته‌ی اول استفاده از فرآیندهای فرا ابتکاری^۱ است که مبتنی بر داده‌های آماری و هوش مصنوعی می‌باشد. دسته‌ی دوم به اصطلاح روش مبتنی بر شیب^۲ و یا روش ریاضی نام دارد که در آن از فرمول‌های ریاضی برای یافتن بهینه‌ترین گزینه استفاده می‌شود [۵]. در روش‌های مبتنی بر شیب علاوه بر خود تابع، مشتق تابع نیز مورد نیاز است که در برخی از موارد به دست آوردن مشتق تابع هدف یک چالش سخت به حساب می‌آید. در این پژوهش از روش تندترین شیب نزولی^۳ استفاده شده که در حل مسائل بهینه‌سازی نامقید بسیار کارآمد بوده و از دقت بالایی برخوردار است [۶].

هدف این پژوهش ارائه‌ی روشی برای شناسایی آسیب در سازه‌های سه‌بعدی با کمک بهینه‌سازی توپولوژی در سازه‌های با داده‌های مودال ناقص است. سازه‌هایی که به هر دلیلی تمامی داده‌های مودال آن‌ها در دست نباشد، با روش پیشنهادی در این پژوهش، تنها با تعداد محدودی از داده‌ها قابل آسیب‌شناسی هستند.

۱-۲ ساختار پایان‌نامه

هدف اصلی در این پژوهش ارائه‌ی یک فرآیند کامل برای پایش سلامت سازه‌های سه‌بعدی پیوسته می‌باشد. این فرآیند به دو بخش شناسایی سیستم و شناسایی آسیب تقسیم می‌شود. در بخش شناسایی

¹ Meta heuristic

² Gradient Based Methods

³ Steepest Descent Method

سیستم از روش‌های گسترش مودی استفاده شده تا با کمک آن‌ها بتوان مشخصات دینامیکی سازه را در تمامی درجات آزادی به دست آورد درحالی‌که تنها تعداد کمی از درجات آزادی در دسترس هستند. در بخش شناسایی آسیب نیز با کمک بهینه‌سازی توپولوژی و استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده از مرحله‌ی شناسایی سیستم، محل و شدت آسیب تعیین می‌شوند. در طول این پژوهش قدرت و دقت روش پیشنهادی برای شناسایی سیستم و سپس شناسایی محل و شدت خرابی مشخص می‌گردد.

در فصل دوم مروری بر پیشینه‌ی تحقیقات صورت گرفته در زمینه‌ی پایش سلامت آورده شده و توضیحاتی در مورد روش‌های شناسایی سیستم و شناسایی آسیب آورده شده که به بیان نحوه‌ی عملکرد هر یک از روش‌ها می‌پردازد. فرمول‌بندی و روابط مربوط به بخش‌های ذکر شده نیز در این بخش آورده شده و در انتها به مبانی پایه‌ای الاستیسیته در سازه‌های پیوسته پرداخته می‌شود.

در فصل سوم به شناسایی آسیب با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی پرداخته شده است. در بخش اول به بررسی روش‌های مختلف بهینه‌سازی پرداخته شده و بهینه‌سازی توپولوژی به‌طور اختصاصی بررسی می‌شود. در قسمت بعد به نحوه‌ی استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی در فرآیند شناسایی آسیب پرداخته شده است. در ادامه به تعریف تابع هدف مورد استفاده در این تحقیق پرداخته شده و پارامترهای مورد استفاده در بهینه‌سازی توپولوژی به‌طور کامل تعریف می‌شوند. در بخش بعد روش در نظر گرفتن مصالح مصنوعی همسانگرد با اعمال ضریب جریمه جهت استفاده در بهینه‌سازی توپولوژی توضیح داده شده است. فرمول‌بندی دینامیکی مسئله‌ی دینامیکی در ادامه مطرح شده و سپس به تحلیل حساسیت جهت دستیابی به مشتقات تابع هدف پرداخته می‌شود. در ادامه توضیحاتی در مورد روش تندترین شیب نزولی آورده شده و روش جست‌وجوی طلایی برای دستیابی به مناسب‌ترین گام حرکت معرفی شده است. در بخش بعد به روش پیوسته‌سازی جهت تسریع در فرآیند شناسایی آسیب پرداخته شده و در انتها الگوریتم برنامه‌ی کامپیوتری آورده شده است.

فصل چهارم مربوط به مثال‌های عددی می‌باشد که مثال‌های آورده شده از ساده به پیچیده، از لحاظ تعداد المان‌ها، تعداد درجات آزادی معلوم و هندسه‌ی مسئله، به ترتیب آورده شده‌اند تا قدرت و دقت روش پیشنهادی را به نمایش بگذارند. در نهایت در فصل پنجم به بررسی نتایج به دست آمده و تحلیل آن‌ها پرداخته می‌شود.

فرضیات در نظر گرفته شده در این پژوهش به شرح زیر است:

۱. آسیب به عنوان کاهش سختی و جرم در سازه در نظر گرفته شده و سایر آسیب‌ها مانند آسیب‌های ناشی از پیچش، تسلیم و آسیب‌هایی که روی جرم و سختی اثر نمی‌کنند لحاظ نشده‌اند.
۲. رفتار مصالح و سازه در این پژوهش در محدوده‌ی خطی در نظر گرفته شده است.
۳. از اثرات میرایی در این پژوهش صرف نظر شده است.
۴. مودهای در نظر گرفته شده در این پژوهش به ترتیب از فرکانس‌های کوچک به بزرگ مرتب شده‌اند به این گونه که کوچکترین فرکانس برای مود اول بوده و به ترتیب مودهای بعدی دارای فرکانس‌های بزرگتری هستند.

فصل دوم : مروری بر پایش سلامت سازه

۲-۱ مقدمه

هدف اصلی از احداث سازه‌های عمرانی، سرویس‌دهی در طول عمر تعیین‌شده‌ی سازه است که گاهی به علت بروز حوادث طبیعی مانند زلزله، عملکرد سازه دچار اختلال شده و آن‌گونه که از قبل تعیین‌شده قابل بهره‌برداری نمی‌باشد. از طرفی ارزیابی رفتار سازه‌ها بعد از ایجاد اختلال و خرابی در آن‌ها کار بسیار دشواری می‌باشد که عموماً در صورت کم‌اهمیت بودن سازه، از آن صرف‌نظر می‌شود. از سوی دیگر سازه‌های استراتژیک مانند پل‌ها، بیمارستان‌ها، خطوط لوله و غیره، با توجه به طول عمر تعیین‌شده‌ی طولانی آن‌ها بیشتر دستخوش چنین اختلال‌هایی می‌شوند، چراکه مصالح ساختمانی به‌مرورزمان مقاومت و خصوصیاتشان را از دست می‌دهند. ایجاد خرابی‌های عمده در چنین سازه‌هایی با اهمیت بالا می‌تواند فاجعه‌بار باشد و در صورت بروز چنین حوادثی، خسارت‌های شدید مالی در بر خواهند داشت. لذا ارزیابی چنین سازه‌هایی می‌تواند بسیار مفید بوده و در صرفه‌جویی هزینه و زمان برای بازسازی، می‌تواند کمک‌کننده باشد. طی یک گزارش در سال ۲۰۰۴ مشخص شد که بین ۳۰ تا ۵۰ درصد ساختمان‌های استراتژیک و ملی آمریکا دچار نقص سازه‌ای می‌باشند که نیازمند به تعمیر هستند [۷]. بنابراین یک برنامه‌ی جامع برای ارزیابی راحت سازه‌ها می‌تواند نقشی حیاتی در تأمین سلامت سازه‌های موجود ایفا کند.

پایش سلامت^۱ علمی است که می‌تواند درزمینه‌ی حفاظت از سیستم‌های سازه‌ای و ارزیابی آن‌ها مفید باشد. با تشخیص آسیب‌های موجود در سازه می‌توان از خرابی‌های پیش‌رونده جلوگیری کرده و عمر مفید سازه را به طرز چشم‌گیری افزایش داد. از طرفی بعد از ایجاد آسیب‌های غیر قابل پیش‌گیری از جمله زلزله، می‌توان محل و شدت خرابی در اعضای سازه را مشخص کرده و به ترمیم اصولی سازه‌های آسیب‌دیده پرداخت. فرآیند شناسایی آسیب^۲ بخشی اصلی در پایش سلامت سازه است که به کمک آن

¹ Structural Health Monitoring

² Structural Damage Detection

می‌توان آسیب‌های پیچیده با شدت‌های متفاوت و در محل‌های متفاوت را تشخیص داد و سپس به کمک اطلاعات به‌دست‌آمده می‌توان به ترمیم آسیب‌ها پرداخت.

آسیب در المان‌های سازه می‌تواند مشخصات فیزیکی و دینامیکی سازه را دستخوش تغییر قرار دهد و به‌تبع آن می‌توان با استفاده از تغییرات به وجود آمده در مشخصات دینامیکی و مقایسه‌ی آن با حالت آسیب‌نندیده‌ی سازه، تمامی آسیب‌ها به همراه محل آن‌ها را مشخص کرد. به این منظور کافی است شاخصی به‌عنوان شاخص آسیب در نظر گرفت و با مقایسه‌ی شاخص‌ها به آسیب دسترسی پیدا کرد.

۲-۲ مبانی شناسایی آسیب و روش‌های مختلف آن

به‌طور کل می‌توان روش‌های شناسایی آسیب را به سه دسته‌ی کلی تقسیم کرد [۸, ۹]:

۱. آزمایش‌های مخرب

۲. آزمایش‌های غیر مخرب

۳. آزمایش‌های غیرمستقیم و معکوس

۲-۲-۱ آزمایش‌های مخرب

روش‌های مخرب به آزمایش‌هایی گفته می‌شوند که پس از انجام آن‌ها نمونه آزمایش‌شده غیر قابل‌استفاده گردد. آزمایش‌های مخرب اغلب به‌منظور بررسی و تعیین خواص مکانیکی و یا کنترل کیفیت مواد با استفاده از نمونه‌برداری از قطعه موردنظر به کار می‌روند. از معایب این روش می‌توان به‌سرعت پایین، پرهزینه بودن و ارائه اطلاعات فقط مربوط به نمونه‌های آزمایش‌شده اشاره کرد. آزمایش‌های مخرب عبارت‌اند از [۱۰]:

• آزمایش کشش

• آزمایش سختی

- آزمایش ضربه
- آزمایش سلامت
- آزمایش خستگی
- آزمایش‌های مخرب جهت خواص شیمیایی
- آزمایش‌های متالوگرافی

۲-۲-۲ آزمایش‌های غیر مخرب

در مقابل روش‌های مخرب، روش‌های غیر مخرب قرار دارند. آزمون‌های غیر مخرب روش‌هایی در تشخیص سلامت اجزای یک ماده یا سازه، یا اندازه‌گیری برخی کمیت‌های فیزیکی از عضو است. به عبارت دیگر روش‌های غیر مخرب به روش‌هایی اطلاق می‌شوند که در آن‌ها کارایی یک عضو، بدون ایجاد خرابی در آن و نیز بدون آسیب پوشش سطحی آن مورد بررسی قرار می‌گیرد [۱۱]:

- بازرسی چشمی (VT)
- بازرسی به روش مایع نافذ (LPT)
- بازرسی با ذرات مغناطیسی (MPT)
- بازرسیอัลتراسونیک (UT)
- بازرسی رادیوگرافی با امواج (RT)

با توجه به اهداف این تست، محدودیت‌ها و مزایای هر کدام از روش‌های فوق، یک یا چند مورد از این روش‌ها برای آزمون انتخاب می‌گردند. از معایب این روش‌ها می‌توان به محدودیت‌های موجود در انجام آن‌ها و پرهزینه بودن آن‌ها اشاره کرد.

۲-۳-۳ آزمایش‌های غیرمستقیم و معکوس

روش‌های ذکرشده در قسمت‌های قبل هر یک دارای معایبی هستند که باعث می‌شود فقط در بخش‌های خاصی کاربرد داشته باشند و نتوان از آن‌ها در تمامی موارد استفاده کرد و از طرفی هزینه‌های زیادی را شامل خواهند شد. از سوی دیگر تمامی روش‌های مذکور فقط به صورت موضعی و فقط قسمت‌هایی از سازه را مورد ارزیابی قرار می‌دهند و قادر نیستند کل سیستم سازه‌ای را در نظر بگیرند و اگر قرار باشد کل سازه را به این روش‌ها ارزیابی کنیم هزینه بسیار زیادی خواهد داشت. بنابراین می‌توان روش‌های فوق را برای ارزیابی موضعی در نظر گرفت.

برای ارزیابی کل سیستم سازه نیازمند روشی راحت‌تر و کم‌هزینه‌تر می‌باشیم، به طوری که علاوه بر کنترل کل سازه، قادر باشد محدودیت‌های اجرایی که روش‌های قبل داشتند را از بین برده و در مدت زمان کمتر بالاترین دقت را داشته باشد. به این منظور می‌توان از بررسی پاسخ‌های دینامیکی و یا استاتیکی سازه استفاده کرد به گونه‌ای که ابتدا نتایج برای حالت سالم سازه ثبت شده و در صورت بروز آسیب بتوان با مقایسه‌ی مقادیر بعد از آسیب، به محل و شدت آسیب‌ها دسترسی پیدا کرد. روش‌های مبتنی بر پاسخ سازه از جمله روش‌های غیرمستقیمی است که این امکان را فراهم می‌کند که تنها با استفاده از پاسخ سازه، قبل و بعد از ایجاد آسیب، بتوان آسیب را تشخیص داد و در سازه‌های پیچیده می‌تواند بسیار مؤثر باشد. در این روش‌ها می‌توان با مقایسه رفتار سازه قبل و بعد از خرابی، آسیب‌های موجود در سازه را مورد بررسی قرار داد و حتی محل و شدت خرابی را با دقت بالایی به دست آورد. روش‌های غیرمستقیم که امروزه استفاده می‌شوند را می‌توان به صورت زیر تقسیم کرد:

• روش‌های تغییرات فرکانس^۱

یکی از روش‌های پرکاربرد در تعیین آسیب در سازه‌ها استفاده از تغییرات فرکانس طبیعی سازه است که به‌طور وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از این روش به این علت بسیار رایج است که فرکانس طبیعی پایه‌ای‌ترین مشخصه‌ی دینامیکی سازه بوده و نحوه‌ی استخراج آن بسیار آسان است. اعتبار نتایج به‌دست‌آمده زمانی بیشتر می‌شود که تغییرات فرکانس در محیط کنترل‌شده و با دقت بالا اندازه‌گیری شود تا بتواند جهت تعیین آسیب کاربردهای علمی بیشتری داشته باشد. با توجه به تحقیقات صورت گرفته در زمینه‌ی تغییرات فرکانس طبیعی سازه می‌توان گفت که یکی از شاخص‌های مناسب جهت تعیین آسیب در سازه است، اما در سازه‌های با پیچیدگی بالا و سازه‌های غیرخطی از توانایی کافی برخوردار نیست و از طرفی حساسیت پایین این شاخص در برابر خرابی‌های کوچک، از نقاط ضعف این روش به حساب می‌آیند [۸].

• روش‌های تغییرات تابع پاسخ فرکانس^۲

توابع پاسخ فرکانس در واقع توابعی هستند که پاسخ سازه را در طیف معینی از فرکانس‌ها در نظر می‌گیرد و مانند روش قبل تنها در نقاط تشدید، پاسخ‌های سازه را در نظر نمی‌گیرد که همین موضوع باعث می‌شود تا حساسیت این روش نسبت به آسیب‌های کوچک افزایش یافته و بتواند به خوبی آسیب‌ها را تشخیص دهد [۱۲] بنابراین رفتار سیستمی که توسط پارامترهای مودال نمایش داده نشده را نیز نشان می‌دهد. از فواید روش‌های تغییرات تابع فرکانس می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- توانایی اندازه‌گیری داده‌ها در مودهایی که خارج از پهنای باند فرکانس هستند
- دسترسی به اطلاعات سازه‌ای فراوان با اندازه‌گیری این داده‌ها
- اجتناب از خطای تشخیص مود

¹ Frequency Changing Methods

² Frequency Response Function Change Methods

- کاربرد در سازه‌هایی با میرایی بالا و موده‌های نزدیک به هم

از مشکلات این روش می‌توان به این مورد اشاره کرد که برای به دست آوردن توابع پاسخ فرکانس، اطلاعات ورودی سازه نیاز است و در سازه‌های پیچیده این امر مشکل خواهد بود. از طرفی هنوز روش مناسبی جهت انتخاب باند فرکانس مناسب وجود ندارد [۱۳].

• روش‌های تغییر شکل مود^۱

روش تغییر شکل مود یا روش مودال یکی دیگر از روش‌هایی است که اخیراً به‌طور گسترده مورد استقبال قرار گرفته و با توجه به دقت بالایی که دارد، برای شناسایی آسیب مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش‌ها سعی شده تا نقص‌های روش‌های تغییر فرکانس پوشش داده شود و در نتیجه حساسیت شناسایی آسیب نسبت به آسیب‌های کوچک افزایش یافته است. در این روش‌ها نه تنها شاخص‌های مودال مورد بررسی قرار می‌گیرند بلکه فرکانس‌های ویژه‌ی سازه را هم جهت بررسی سازه و تشخیص آسیب در سازه مورد بررسی قرار می‌دهند. پایه‌ی اصلی این روش‌ها بر مبنای تغییرات شکل مود بنانهاده شده‌اند که در واقعیت به دست آوردن شکل‌های مودی بالاتر که حساسیت بالاتری به آسیب دارند مشکل است [۱۴].

• روش‌های انحنای شکل مود^۲

با توجه به اینکه تغییرات شکل مود سازه‌ی آسیب‌دیده نسبت به شکل مود سازه‌ی سالم اتفاق می‌افتد اما مشتقات شکل مودها یا به عبارتی انحنای شکل مودها می‌توانند تغییرات بهتری نسبت به آسیب از خود نشان دهند، چراکه حساسیت انحنای مودی نسبت به خود بردار مودی بسیار بیشتر است. در این روش‌ها با توجه به اینکه دارای حساسیت بالاتری نسبت به روش‌های مودی دارند از لحاظ عددی گاهی

¹ Mode Shape Changes Method

² Curvature Mode Shape Changes Method

دچار مشکل می‌شوند، چراکه خطاهای کوچک عددی می‌توانند تحت حساسیت بالای انحنای مودی، خطاهای بزرگی را نتیجه دهند. یک نویز کوچک در داده‌ها می‌تواند به کلی نتایج را دستخوش تغییر قرار دهد. علاوه بر این به دست آوردن انحنای شکل مودی در آزمایشگاه می‌تواند کار بسیار دشوار و همچنین پر خطایی باشد که با توجه به حساسیت بالایی که این روش‌ها دارند می‌تواند نتایج نامطلوبی حاصل کند [۱۵].

• روش‌های تغییر نرمی

یکی دیگر از روش‌های پرکاربرد درزمینه‌ی شناسایی آسیب استفاده از ماتریس نرمی است. معکوس ماتریس سختی را ماتریس نرمی می‌نامند. هر ستون نرمی، فرم جابجایی سازه متناظر با نیروی واحد به‌کاررفته در درجه آزادی متناظر آن را نشان می‌دهد. ماتریس نرمی می‌تواند از شکل مودهای اندازه‌گیری شده و فرکانس‌های مودال، تخمین زده شود یا به‌طور مستقیم با استفاده از آزمایش تغییر شکل تحت بار استاتیکی اندازه‌گیری شود. آزمایش استاتیکی در مقایسه با آزمایش دینامیکی معایبی همچون نیاز به ابزار دقیق و مشکلات شرایط مرزی است. از طرفی روش‌های استاندارد و تجهیزات موردنیاز برای استخراج داده‌های مودال بسیار آسان‌تر قابل دسترسی هستند. یکی از روش‌های استخراج ماتریس نرمی استفاده از داده‌های مودال است که می‌توان به‌آسانی به دست آورد. بنابراین استفاده از داده‌های مودال برای استخراج ماتریس نرمی می‌تواند یک روش مناسب باشد که البته در بسیاری از تحقیقات از همین روش استفاده‌شده است [۱۶].

• روش‌های مبتنی بر موجک^۱

بیشتر روش‌های ارزیابی خرابی بر اساس ارتعاش، به مشخصات مودال از سیگنال موقت که به‌وسیله تبدیل فوریه به دست می‌آیند، نیازمند می‌باشند. اخیراً در برخی تحقیقات از آنالیز موجک نیز به این

¹ Wavelet Transform Methods

منظور استفاده می‌شود. آنالیز موجک یکی از دستاوردهای نسبتاً جدید ریاضیات محض می‌باشد، که مبتنی بر چندین دهه پژوهش در آنالیز همساز^۱ است. این روش امروزه کاربردهای مهمی در بسیاری از رشته‌های علوم و مهندسی یافته و امکانات جدیدی برای درک جنبه‌های ریاضی و افزایش کاربردهای آن فراهم شده است. در آنالیز موجک هم مانند آنالیز فوریه با بسط توابع سروکار داریم ولی این بسط برحسب موجک‌ها انجام می‌شود [۱۷].

• روش‌های شبکه‌های عصبی

شبکه‌های عصبی به‌عنوان ابزاری برای انجام دادن نگاشت بین الگوهای ورودی و خروجی متناظر با شرایط خرابی سازه به کار می‌رود. این روش می‌تواند یک یا چند المان خراب را در تعداد محدودی تشخیص دهد. شبکه‌های عصبی به علت چهار ویژگی مهم، برای عیب‌یابی استفاده می‌شوند: (۱) توانایی نگاشت کلی (۲) مقاومت در برابر اطلاعات نویزی (۳) توانایی یادگیری با آموزش نظارت‌شده (۴) قابلیت کار کردن با اطلاعات ناقص [۱۸، ۱۹].

• روش‌های بهینه‌سازی^۲

بهینه‌سازی در سال‌های اخیر به‌عنوان یکی از روش‌های قدرتمند در جهت شناسایی آسیب در سازه‌های پیچیده مورد توجه قرار گرفته است. در بهینه‌سازی با توجه به محدود بودن داده‌های دینامیکی سازه، ابتدا با روش‌های گسترش مودال داده‌های ناموجود تخمین زده شده و سپس با داده‌های تحلیلی فرآیند شناسایی آسیب صورت می‌گیرد. با توجه به اینکه آسیب به‌صورت کاهش در سختی و جرم المان مدل می‌شود، در نتیجه ماتریس کلی سختی و جرم دستخوش تغییر قرار می‌گیرند که همین موضوع موجب تغییر مقادیر ویژه (فرکانس‌های سازه) و بردارهای ویژه (بردارهای مودی) می‌شود. حالت‌های مختلف

¹ Consistent Analysis

² Optimization Methods

خرابی بر اساس محل و میزان خرابی، مدل شده و مقادیر ویژه سازه در هر حالت محاسبه می‌شود. بر اساس اختلاف فرکانس سازه خراب واقعی و مدل شده می‌توان خرابی سازه را مشخص کرد که هر چه این دو مقادیر به هم نزدیک‌تر باشند، خرابی مدل شده به خرابی واقعی نزدیک‌تر و پاسخ دقیق‌تر خواهد بود. این روش‌ها عموماً با استفاده از یک یا چند الگوریتم بهینه‌سازی قادر به تشخیص دقیق محل و شدت خرابی در سازه می‌باشند.

۲-۳ پایش سلامت سازه

۲-۳-۱ مقدمه

پایش سلامت سازه وضعیت عملکردی سازه را به صورت مداوم و یا دوره‌ای بررسی می‌کند. تحقیقات بسیاری نیز در این زمینه صورت گرفته که هر یک با توجه به اهداف محققان، بخش‌های معینی را بهبود بخشیده‌اند که در نهایت منجر به ارزیابی دقیق و آسان‌تر سازه‌ها شده است [۴]. سیستم پایش سلامت سازه شامل مجموعه‌ای از سنسورها، انتقال داده‌ها، مدل محاسباتی و توانایی پردازش داخل سازه می‌باشد. فرآیند ذکر شده، امکان تغییر در طراحی سازه با هدف مدیریت طول عمر آن، فراهم می‌آورد. بنابراین سیستم پایش سلامت سازه یک فناوری چند رشته‌ای است که نیاز به درک عمیق از مصالح، سنسورها، همراه با توانایی انجام مدل‌سازی پیچیده و پردازش سیگنال‌های عددی و تحلیلی دارد.

۲-۳-۲ مراحل پایش سلامت سازه

به‌طور کلی سیستم پایش سلامت سازه وظیفه تشخیص و پیش‌بینی امنیت سازه در طول عمر مفید آن را بر عهده دارد. این سیستم علاوه بر شناسایی آسیب در بیشترین مراحل ممکن برای جلوگیری از پیشرفت آسیب و بروز خسارت جدی، این قابلیت را خواهد داشت که پس از وقوع اتفاقات خطرناک مانند زلزله به صورت فوری ضمن ارزیابی وضعیت سازه، اطلاع‌رسانی لازم را در جهت تخلیه سازه به تصمیم‌گیرندگان در سطوح مختلف که از پیش تعریف شده‌اند، به انجام برساند. نتایج سیستم پایش سلامت سازه مهندسان را قادر خواهد ساخت تا در صورت بروز مشکل در مرحله تصمیم‌گیری، بهترین

تصمیمات لازم را جهت جلوگیری از بروز خسارت‌های بیشتر اتخاذ نمایند. همچنین با استفاده از این نتایج می‌توان احتمال خرابی سازه را در یک پاسخ و مدت‌زمان مشخص، تعیین نمود. همان‌طور که در بالا اشاره شد سیستم نظارتی پیشنهادی از شش مؤلفه اصلی زیر تشکیل شده است:

• سیستم حسگرها^۱

سیستم دستگاه‌های اندازه‌گیری شامل دو زیرسیستم اندازه‌گیری شرایط محیطی و زیرسیستم اندازه‌گیری پاسخ‌های سازه می‌باشد. زیرسیستم اندازه‌گیری شرایط محیطی با هدف اصلی نظارت بر شرایط خارجی و اندازه‌گیری بارهای خارجی دینامیکی می‌باشد. زیرسیستم اندازه‌گیری پاسخ سازه به منظور اندازه‌گیری ویژگی‌هایی همچون شتاب، جابجایی، میزان کج شدگی و غیره می‌باشد. بدین منظور نوع، تعداد و محل حسگرهای لازم بایستی با مطالعه دقیق بر روی مدل سازه مشخص شوند. محل نصب شتاب سنج‌ها بایستی به گونه‌ای تعیین شوند که بتوان خصوصیات دینامیکی سازه واقعی نظیر فرکانس، شکل مودهای ارتعاشی و میرایی سازه را تعیین نمود.

• سیستم جمع‌آوری و انتقال داده‌ها^۲

این سیستم را می‌توان به دو زیرسیستم تجهیزات واحد جمع‌آوری داده‌ها و شبکه انتقال داده‌ها به صورت سیمی و یا بی‌سیم تقسیم‌بندی نمود. پردازش سیگنال‌ها، ذخیره‌سازی موقت اطلاعات و انتقال سیگنال‌ها از جمله وظایف این سیستم به شمار می‌روند.

• پردازش داده‌ها و سیستم کنترل^۳

این سیستم به یک کامپیوتر با قدرت پردازش بالا جهت برقراری سیستم کنترل، نمایش عملکرد سیستم پایش سلامت، نمایش عملکرد سازه و پردازش و تحلیل داده‌ها اطلاق می‌شود.

¹ Sensory System

² Data Acquisition and Transmission System

³ Data Processing and Control System

- سیستم مدیریت اطلاعات^۱

این سیستم نیز به کمک یک کامپیوتر با قدرت پردازش و کارایی بالا به عنوان یک سیستم مخزن، وظیفه مدیریت داده‌ها به منظور ذخیره‌سازی و بازیابی داده‌های پایش و نتایج تحلیل‌ها را بر عهده دارد.

- سیستم ارزیابی سلامت سازه^۲

این سیستم هسته مرکزی مجموعه نظارت بر سلامتی سازه محسوب می‌شود. به طور کلی می‌توان این بخش را به دو قسمت تشخیص و پیش‌بینی تقسیم کرد. در قسمت تشخیص سه هدف دنبال می‌شود که عبارت‌اند از: بررسی امکان وجود آسیب در سازه، تعیین محل آسیب در صورت وجود و در نهایت تخمین میزان و شدت خرابی در سازه. در قسمت پیش‌بینی نیز به این سؤال پاسخ داده می‌شود که مدت زمان عمر سازه با وضع موجود چقدر است. به عبارت دیگر احتمال خرابی در مدت زمان و پاسخ معین در این قسمت تعیین خواهد شد. در سیستم ارزیابی سلامت سازه از روش‌های اجزای محدود جهت مدل‌سازی عددی سازه، روش‌های به‌روزرسانی مدل و تحلیل‌های حساسیت پاسخ برای مشخص نمودن پارامترهای دینامیکی سازه نظیر فرکانس‌های طبیعی، شکل مودهای ارتعاشی و میرایی سازه استفاده می‌شود. از این پارامترها در قسمت‌های تشخیص و پیش‌بینی، برای بررسی امکان خرابی، محل و شدت آن استفاده می‌گردد.

- بازرسی و سیستم پایش^۳

با توجه به اهمیت و حساسیت پایش سلامت در سازه، این سیستم می‌بایست به صورت دائم و با استفاده از رویه‌های مشخص بازرسی و نگهداری شود. این رویه‌ها شامل بازرسی، نگهداری و کالیبراسیون تجهیزات واحد جمع‌آوری (حسگرها) و انتقال داده‌ها و همچنین نگهداری از سخت‌افزارهای سیستم مدیریت و تحلیل داده‌ها خواهد بود.

¹ Data Management System

² Structural Health Evaluation System

³ Inspection and Maintenance System

۲-۳-۳ پایش دینامیکی سلامت سازه

تکنیک‌های پایش سلامت مبتنی بر دینامیک سازه، وضعیت سلامت اجزای سازه را بر اساس تشخیص و تحلیل پاسخ دینامیکی آن، ارزیابی می‌کنند. این تکنیک‌ها را می‌توان بر اساس نوع پاسخ برای تحقیق موردنظر، در محدوده فرکانسی مسئله و در ماهیت مؤثر در تغییرات اجزا در نظر گرفت. این تکنیک‌ها به صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند:

غیرفعال: اگر جزء نیاز به منبع تحریک خارجی مختص سیستم پایش سلامت نداشته باشد.

فعال: تکنیک‌هایی که به وسیله آن سازه به گونه‌ای که با هدف تولید پاسخی که می‌تواند عموماً نشان-دهنده وجود آسیب باشد، تحریک می‌شود.

۲-۴ شناسایی آسیب

۲-۴-۱ مقدمه

وجود آسیب در سازه با توجه به شدت و موقعیت آسیب می‌تواند مشخصات استاتیکی و دینامیکی سازه را دستخوش تغییر قرار دهد. این تغییر در رفتار سازه می‌تواند برای تشخیص آسیب در مرحله‌ی اول، و سپس تعیین محل و شدت خرابی تأثیرگذار باشد. تشخیص زودهنگام آسیب از این رو می‌تواند مفید باشد که در سازه‌ها ابتدا آسیب جزئی با توجه به شرایط بارگذاری ایجاد شده و به صورت پیش‌رونده گسترش می‌یابد.

شناسایی آسیب در همان ابتدا می‌تواند هم هزینه‌ی تعمیر را کاهش دهد و هم زحمت تعمیر را کاهش دهد. برای تعریف آسیب از دیدگاه سازه‌ای می‌توان گفت که آسیب در واقع کاهش جرم و سختی قسمتی از سازه است که منجر به تغییر در سختی و جرم کل سازه می‌شود. با توجه به شدت و وسعت آسیب، می‌توان گفت که چه میزان از سختی و جرم کل سازه دستخوش تغییر قرار گرفته است. با توجه به تعاریف فوق می‌توان به اهمیت شناسایی آسیب به عنوان نخستین گام در پایش سلامت سازه‌ها پی برد.

تکنیک‌های متعددی در شناسایی آسیب سازه‌ها کاربرد دارد که هر یک مزایا و معایب مختص به خود را دارند. شناسایی آسیب به‌عنوان یک فرآیند بسیار کارآمد در علوم مهندسی، به‌ویژه عمران و مکانیک به شمار می‌رود که در مسائل مهمی همچون پایش سلامت برج‌ها، پل‌ها، توربین‌های بادی و غیره در حال حاضر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مبنای بسیاری از روش‌های شناسایی آسیب در سازه‌ها، تغییر در پاسخ‌های سازه‌ای است که به علت کاهش سختی و جرم‌المان‌ها جرم و سختی کل سازه تغییر کرده و در نهایت پاسخ‌های سازه‌ای تغییر می‌کند که با مقایسه با پاسخ‌های اولیه‌ی سازه می‌تواند به معنی وجود آسیب در سازه باشد. با مشخص شدن وجود آسیب در سازه، در ادامه شدت و محل آن تعیین می‌شود. مشخصات سازه‌ای به دو گروه استاتیکی و دینامیکی تقسیم می‌شوند که از مشخصه‌های استاتیکی می‌توان به تغییر مکان‌گره‌ای، شیب و انحنای جابجایی اشاره کرد و مشخصه‌های دینامیکی شامل فرکانس‌های طبیعی، اشکال مودی، انحنای اشکال مودی و غیره می‌باشند.

در روش‌های دینامیکی با تحلیل مودال می‌توان به مشخصات سازه‌ای دسترسی پیدا کرد. شایان‌ذکر است که دقت روش‌های مبتنی بر پاسخ‌های دینامیکی از دقت بالاتری برخوردار بوده اما هزینه‌ی بیشتری هم دارند. به علت کم‌هزینه‌تر بودن روش‌های استاتیکی نسبت به روش‌های دینامیکی، در برخی از مسائل از روش‌های استاتیکی استفاده می‌شود. در کل هر دو روش می‌توانند متناسب با شرایط حاکم، برای شناسایی آسیب مورد استفاده قرار گیرند که هزینه‌های کلی تعمیر و نگهداری سازه را به حداقل می‌رسانند.

در صورتی که خرابی‌های سازه‌ای از همان ابتدا قابل‌شناسایی باشند، می‌توان با تعمیر اعضای آسیب‌دیده از به وجود آمدن خسارات کلی در سازه و ضررهای مالی و جانی ناشی از آن جلوگیری کرد. بنابراین آسیب‌های موضعی در صورت عدم شناسایی و بازسازی به‌موقع می‌توانند باعث کاهش عمر بهره‌برداری سازه و یا حتی خرابی کلی آن گردد. لذا نظارت بر سلامت سازه‌ها و شناسایی خرابی‌های رخ داده در مراحل اولیه، از موضوعات مورد توجه مهندسين می‌باشند. در این راستا روش‌های غیر مخرب به دلیل

اقتصادی بودن، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و ضرورت تحقیقات گسترده روی آن‌ها را بیش از پیش آشکار می‌نمایند. علاوه بر این، می‌توان با پیش‌بینی مکان‌های ضعف سازه، عملیات بهینه‌ای جهت ترمیم و بهسازی آن در برابر حوادث احتمالی انجام داد. ضرورت انجام این پژوهش زمانی آشکارتر می‌شود که بدانیم با گسترش عیب‌یابی غیر مخرب در سازه‌ها از تخریب کامل آن‌ها جلوگیری می‌کنیم. همچنین با بررسی دقیق‌تر سازه می‌توانیم در مدت‌زمانی کوتاه‌تر هزینه‌ای کمتر جهت عیب‌یابی سازه صرف نماییم.

۲-۴-۲ شناسایی موضعی و عمومی خرابی در سازه‌ها

روش‌های شناسایی آسیب به دو گروه موضعی و عمومی تقسیم می‌شوند. در روش‌های موضعی همان‌طور که قبل‌تر اشاره شد، فقط بخش‌هایی از سازه که احتمال می‌رود دچار آسیب شده باشند توسط آزمایش‌های مخرب و یا غیر مخرب مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. از معایب این روش‌ها می‌توان به زمان‌بر بودن و پرهزینه بودن آن‌ها اشاره کرد که درعین‌حال این امکان را فراهم نمی‌کند که کل سازه به‌طور کامل مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. ارزیابی کلی سازه به‌این‌علت ارزشمند است که گاهی ممکن است به علت ناآگاهی بخش‌های آسیب‌دیده‌ای از سازه مورد ارزیابی قرار نگیرند و درنهایت منجر به خسارت‌های جبران‌ناپذیری شوند. از این‌رو روش‌های عمومی شناسایی آسیب مورد توجه قرار گرفتند تا نقص‌های روش‌های موضعی را پوشش دهند. در این روش‌ها از داده‌های استاتیکی و دینامیکی سازه نظیر تغییر مکان‌های گره‌ای، شیب تغییر مکان‌ها، اشکال مودی، فرکانس‌های طبیعی و غیره استفاده می‌شود تا با کمک آن‌ها محل و شدت آسیب در تمام اعضای سازه با دقت بالا تعیین شوند [۲۰]. در ادامه به بررسی متغیرهای استاتیکی و دینامیکی سازه در تعیین پاسخ‌های سازه‌ای می‌پردازیم.

• متغیرهای استاتیکی در شناسایی آسیب

نحوه‌ی به دست آوردن این متغیرها به این‌گونه است که سازه تحت بار استاتیکی در نقاط معین قرارگرفته و سپس تغییر مکان‌ها یا سایر مشخصات مدنظر در سایر اعضای سازه اندازه‌گیری می‌شوند. از فواید این روش‌ها می‌توان به راحتی در اجرای آزمایش‌های مربوطه و عدم پیچیدگی دستگاه‌ها اشاره کرد. از طرف دیگر وجود بخش‌های صلب در سازه می‌تواند در ثبت نتایج ایجاد مشکل کند. به‌منظور رفع این مشکل، می‌توان به پیشنهاد محققان از کرنش‌های اندازه‌گیری شده برای شناسایی آسیب استفاده کرد.

• متغیرهای دینامیکی در شناسایی آسیب

در روش‌های دینامیکی برای شناسایی آسیب در سازه، از داده‌های حاصل از آزمایش‌های دینامیکی استفاده می‌شود. کارایی و دقت بیشتر روش‌های دینامیکی به نسبت روش‌های استاتیکی از مزایای این روش‌ها بوده اما از طرف دیگر دسترسی به پاسخ‌های دینامیکی سازه اغلب دشوارتر و پرهزینه‌تر می‌باشد. استخراج داده‌های دینامیکی از جمله فرکانس‌های طبیعی، اشکال مودی و غیره می‌توانند در تشخیص آسیب به‌صورت دقیق مفید واقع شوند و همچنین می‌توانند اطلاعات سازه‌ای ارزشمندی در مورد سازه در اختیار ما قرار دهند. رویکردهای اخیر حاکی از این است که گرایش‌های عمومی به سمت روش‌های دینامیکی طی چند سال اخیر به‌طور دائم در حال افزایش است.

۲-۵ شناسایی سیستم^۱

۲-۵-۱ مقدمه

فرآیند پایش سلامت سازه از دو بخش عمده‌ی شناسایی سیستم و شناسایی آسیب تشکیل شده است. با توجه به گستردگی هریک از موضوعات ذکرشده، در این پژوهش تمرکز اصلی بر روی شناسایی آسیب

¹ System identification

بوده و به صورت جزئی به شناسایی سیستم پرداخته شده است. شناسایی سیستم عبارت است از به دست آوردن پاسخ‌های سازه‌ی مورد بررسی، به منظور استفاده در فرآیند شناسایی آسیب. به منظور دسترسی به پاسخ‌های سازه‌ی مورد بررسی ابتدا باید با نصب شبکه‌ی سنسور روی سازه، اقدام به ثبت پارامترهای مورد نیاز کنیم. انتخاب نوع، تعداد و محل سنسورها به گونه‌ای که با کمترین تعداد سنسور بتوان به دقیق‌ترین پاسخ سازه‌ای دست یافت، خود موضوع گسترده‌ای در زمینه‌ی شناسایی سیستم است که در این پژوهش به آن پرداخته نمی‌شود. بخش بعدی پردازش داده‌های به دست آمده به منظور قابل استفاده شدن در فرآیند شناسایی آسیب است که روش‌های پیچیده‌ی ریاضیاتی را شامل می‌شود که هدف این پژوهش نیست. در این پژوهش دو تکنیک گسترش مودال برای تکمیل داده‌های مودال مورد استفاده قرار گرفته که هر یک به طور کامل توضیح داده خواهند شد. در هر یک از این روش‌ها ابتدا تعدادی از مؤلفه‌های بردار مودی به صورت ورودی در نظر گرفته می‌شوند و سپس با استفاده از تکنیک‌هایی که توضیح داده خواهند شد، مؤلفه‌هایی که در دست نیستند محاسبه می‌شوند. به این ترتیب می‌توان تمامی مؤلفه‌های بردار مودی را تنها با استفاده از تعداد کمی از آن‌ها به دست آورد که این امر می‌تواند در شناسایی آسیب با داده‌های ناقص بسیار مفید واقع شود.

۲-۵-۲ روش SEREP^۱

روش کاهش یا گسترش سیستم معادل یا به اختصار SEREP، از داده‌های موجود، برای تشکیل ماتریس تبدیل استفاده می‌کند. این ماتریس تبدیل (T_{SEREP}) که یک تبدیل خطی است، برای به دست آوردن داده‌های اندازه‌گیری نشده، از روی داده‌های تحلیلی است. نحوه‌ی عملکرد این روش به این گونه است که ابتدا سازه با فرض سالم بودن تحلیل شده و بردارهای مودی استخراج می‌شوند. داده‌های حاصل از این تحلیل با پیشوند a در روابط مشخص شده‌اند. داده‌هایی که از پیش اندازه‌گیری شده‌اند نیز با پیشوند

¹ System Equivalent Reduction Expansion Process

m مشخص شده‌اند. برای محاسبه‌ی ماتریس $\mathbf{T}_{\text{SEREP}}$ ابتدا لازم است مؤلفه‌های بردار مودی تحلیلی متناظر با مؤلفه‌های بردار مودی اندازه‌گیری شده طی فرآیند وارون پسودو^۱ معکوس شده و در بردارهای مودی موجود ضرب شود [۱۳]:

$$\mathbf{T}_{\text{SEREP}} = \boldsymbol{\varphi}_{am}^+ \boldsymbol{\varphi}_m \quad , \quad \boldsymbol{\varphi}_{am}^+ = (\boldsymbol{\varphi}_a^T \boldsymbol{\varphi}_a)^{-1} \boldsymbol{\varphi}_a^T \quad (1-2)$$

در رابطه‌ی فوق $\boldsymbol{\varphi}_{am}^+$ بیانگر مؤلفه‌های بردار مودی تحلیلی متناظر مؤلفه‌های بردار مودی اندازه‌گیری شده است. $\boldsymbol{\varphi}_m$ مؤلفه‌های بردار مودی اندازه‌گیری شده است. در ادامه با داشتن ماتریس تبدیل و مؤلفه‌های بردار مودی تحلیلی متناظر با مؤلفه‌های بردار مودی اندازه‌گیری نشده، می‌توانیم مقدار مؤلفه‌های اندازه‌گیری نشده را تقریب بزنیم:

$$\boldsymbol{\varphi}_s = \boldsymbol{\varphi}_{as} \mathbf{T}_{\text{SEREP}} \quad (2-2)$$

در رابطه‌ی فوق $\boldsymbol{\varphi}_{as}$ بیانگر مؤلفه‌های بردار مودی تحلیلی متناظر مؤلفه‌های بردار مودی اندازه‌گیری نشده است که با ضرب شدن در ماتریس تبدیل $\mathbf{T}_{\text{SEREP}}$ ، مؤلفه‌های اندازه‌گیری نشده‌ی بردار مودی سازه را حاصل می‌کند که با $\boldsymbol{\varphi}_s$ نمایش داده شده است. درنهایت با ترکیب دو بردار مودی اندازه‌گیری شده و اندازه‌گیری نشده، به بردارهای مودی کل سازه دست می‌یابیم.

$$\boldsymbol{\varphi} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varphi}_m \\ \boldsymbol{\varphi}_s \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

درنهایت با استفاده از بردار مودی کامل می‌توانیم فرآیند شناسایی آسیب را با دقت مناسب تکمیل کنیم. از معایب این روش به خطی بودن آن می‌توان اشاره کرد، چراکه رفتار بردارهای مودی لزوماً خطی نمی‌باشد و از طرف دیگر، مشخصات دینامیکی سازه که در تعیین بردارهای مودی به‌طور مستقیم کاربرد

¹ Pseudo inverse

دارند در این معادلات گنجانده نشده‌اند. اما ساده بودن این روش و عدم نیاز به داده‌های تحلیلی سازه مانند ماتریس سختی کل و ماتریس جرم کل، از نقاط قوت این روش به حساب می‌آیند.

۲-۵-۳ روش گسترش دینامیکی^۱

در روش گسترش دینامیکی برای محاسبه‌ی مؤلفه‌های بردار مودی اندازه‌گیری نشده مستقیماً از داده‌های اندازه‌گیری استفاده‌شده و نیازی به بردار مودی تحلیلی سازه‌ی سالم نیست. در این روش از ماتریس سختی و ماتریس جرم سازه در حالت سالم استفاده می‌شود که با توجه به استفاده از این اطلاعات می‌توان پی برد که در این روش تبدیل خطی صورت نمی‌گیرد و متناسب با مشخصات سازه‌ای هر مسئله نتایج منحصربه‌فردتر بوده و از دقت بالاتری برخوردار است. در این روش ابتدا درجات آزادی سازه بو دو معلوم و مجهول تقسیم می‌شوند که به ترتیب با پیشوندهای m و s نمایش داده می‌شوند. ماتریس‌های سختی و جرم کل سازه بر اساس معلوم و مجهول دسته‌بندی‌شده و معادله‌ی دینامیکی حاکم بر سازه نوشته به شکل زیر می‌شود:

$$\left(-\omega_{mj}^2 \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{mm} & \mathbf{M}_{ms} \\ \mathbf{M}_{sm} & \mathbf{M}_{ss} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{mm} & \mathbf{K}_{ms} \\ \mathbf{K}_{sm} & \mathbf{K}_{ss} \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\varphi}_{mj} \\ \boldsymbol{\varphi}_{sj} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (۴-۲)$$

در رابطه‌ی فوق $\boldsymbol{\varphi}_{mj}$ و $\boldsymbol{\varphi}_{sj}$ به ترتیب مؤلفه‌های بردار مودی معلوم و مجهول در مود j هستند و ω_{mj} فرکانس طبیعی در مود j است. تنها مجهول در رابطه‌ی فوق $\boldsymbol{\varphi}_{sj}$ است که با بازنویسی بخش پایین رابطه‌ی فوق به شکل زیر، به راحتی قابل محاسبه است:

$$\boldsymbol{\varphi}_{sj} = - \left(-\omega_{mj}^2 \mathbf{M}_{ss} + \mathbf{K}_{ss} \right)^{-1} \left(-\omega_{mj}^2 \mathbf{M}_{sm} + \mathbf{K}_{sm} \right) \boldsymbol{\varphi}_{mj} \quad (۵-۲)$$

با حل معادله‌ی فوق به راحتی مقادیر مجهول بردار مودی به دست آمده و با ترکیب بردارهای معلوم و مجهول مانند رابطه‌ی (۲-۳) می‌توانیم به بردار مودی کامل سازه دسترسی پیدا کنیم. با توجه به اینکه

^۱ Dynamic Expansion

در این روش مستقیماً از ماتریس سختی و ماتریس جرم سازه استفاده شده است، می توان ادعا کرد که دقت بالاتری به نسبت روش قبل خواهد داشت. اما عدم دسترسی به ماتریس سختی و جرم در برخی از سازه‌ها می‌تواند عیب این روش به حساب آید.

۲-۶ مسائل تنش مسطح سازه‌های گسسته

در این بخش به تحلیل جامدات سه‌بعدی پرداخته شده است. در این جامدات، در هر سه جهت محورهای مختصات جابجایی و تنش داریم و بارها و شرایط مرزی در تمامی قسمت‌های سازه قابل اعمال هستند. مواد در نظر گرفته شده همگی ایزوتروپیک بوده و همگن. المان‌های در نظر گرفته شده هم مکعب ۸ گره‌ای با ۲۴ درجه آزادی است. در ادامه به بررسی روابط جامدات سه‌بعدی می‌پردازیم.

۲-۶-۱ جابجایی‌ها، کرنش‌ها و تنش‌ها

مسئله تنش سه‌بعدی، به صورت زیر، سه جابه‌جایی کلی u ، v و w را که به ترتیب در جهت‌های کلی x و y و z تعریف شده‌اند، را در نظر می‌گیرد [۲۱].

$$d(x, y, z) = [u \quad v \quad w]^T \quad (۶-۲)$$

با مشتق‌گیری از تغییر مکان‌ها، کرنش‌ها به دست می‌آیند.

$$\varepsilon(x, y, z) = \left[\frac{\partial u}{\partial x} \quad \frac{\partial v}{\partial y} \quad \frac{\partial w}{\partial z} \quad \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \quad \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right]^T \quad (۷-۲)$$

و با فرض اینکه مصالح الاستیک خطی باشند، تنش‌ها به شکل زیر می‌شوند:

$$\sigma = [\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \tau_{xy} \quad \tau_{yz} \quad \tau_{zx}]^T = \mathbf{C} \varepsilon \quad (۸-۲)$$

$$\mathbf{C} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (9-2)$$

در روابط بالا E مدول الاستیسیته و ν ضریب پواسون است.

۲-۶-۲ گسسته‌سازی المان محدود

با در نظر گرفتن دامنه یک المان به صورت Ω^e و مرز المان به صورت Γ^e ، بردار جابه‌جایی n گره‌ای المان محدود توسط $3n$ درجه آزادی تعریف می‌شود.

$$\mathbf{d}^e = [u_1 \ v_1 \ w_1 \ u_2 \ v_2 \ w_2 \ \dots \ u_n \ v_n \ w_n]^T \quad (10-2)$$

۳-۶-۲ درون‌یابی جابه‌جایی‌ها

بردار جابه‌جایی در هر المان توسط جابه‌جایی‌های گره‌ای به صورت زیر درون‌یابی می‌شود:

$$\mathbf{u} = \sum_{i=1}^n N_i^e u_i \quad (11-2)$$

$$\mathbf{v} = \sum_{i=1}^n N_i^e v_i \quad (12-2)$$

$$\mathbf{w} = \sum_{i=1}^n N_i^e w_i \quad (13-2)$$

که در آن N_i^e ها، توابع شکل المانی را مشخص می‌کنند. این کار همچنین می‌تواند به فرم ماتریسی زیر انجام شود:

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} N_1^e & 0 & 0 & N_2^e & 0 & \dots & 0 & N_n^e & 0 & 0 \\ 0 & N_1^e & 0 & 0 & N_2^e & 0 & \dots & 0 & N_n^e & 0 \\ 0 & 0 & N_1^e & 0 & 0 & N_2^e & 0 & \dots & 0 & N_n^e \end{bmatrix} \mathbf{d}^e = \mathbf{N}\mathbf{u}^e \quad (14-2)$$

بردار کرنش نیز می‌تواند توسط مشتقات مقادیر جابه‌جایی به این صورت به دست آید:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}^T \mathbf{u} = \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (15-2)$$

که در آن \mathbf{B} ماتریس کرنش-جابه‌جایی است. این ماتریس برای محاسبه ماتریس سختی و بردار تنش در هر المان موردنیاز است.

۲-۶-۴ المان هشت گره‌ای

المان در نظر گرفته‌شده در این پژوهش مکعب ۸ گره‌ای است که در مختصات محلی (ξ, η, ψ) تعریف شده است. درون‌یابی مختصات اصلی نیز به صورت زیر صورت می‌گیرد:

$$x = \sum_{i=1}^8 N_i x_i, \quad y = \sum_{i=1}^8 N_i y_i, \quad z = \sum_{i=1}^8 N_i z_i \quad (16-2)$$

که در آن N_i توابع شکل بوده و به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$N_1(\xi, \eta, \psi) = \frac{1}{8}(1 - \xi)(1 - \eta)(1 - \psi) \quad (17-2)$$

$$N_2(\xi, \eta, \psi) = \frac{1}{8}(1 + \xi)(1 - \eta)(1 - \psi) \quad (18-2)$$

$$N_3(\xi, \eta, \psi) = \frac{1}{8}(1 + \xi)(1 + \eta)(1 - \psi) \quad (19-2)$$

$$N_4(\xi, \eta, \psi) = \frac{1}{8}(1 - \xi)(1 + \eta)(1 - \psi) \quad (20-2)$$

$$N_5(\xi, \eta, \psi) = \frac{1}{8}(1 - \xi)(1 - \eta)(1 + \psi) \quad (21-2)$$

$$N_6(\xi, \eta, \psi) = \frac{1}{8}(1 + \xi)(1 - \eta)(1 + \psi) \quad (22-2)$$

$$N_7(\xi, \eta, \psi) = \frac{1}{8}(1 + \xi)(1 + \eta)(1 + \psi) \quad (23-2)$$

$$N_8(\xi, \eta, \psi) = \frac{1}{8}(1 - \xi)(1 + \eta)(1 + \psi) \quad (24-2)$$

جابه‌جایی‌ها نیز به صورت زیر درونیابی می‌شوند:

$$u = \sum_{i=1}^8 N_i u_i, \quad v = \sum_{i=1}^8 N_i v_i, \quad w = \sum_{i=1}^8 N_i w_i \quad (25-2)$$

که در آن مقادیر u ، v و w مقادیر جابه‌جایی در هر نقطه از المان و u_i ، v_i و w_i برای $i = 1, 2, \dots, n$

جابه‌جایی‌های گره‌ای هستند. مشتقات به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi} \\ \frac{\partial}{\partial \eta} \\ \frac{\partial}{\partial \psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \psi} & \frac{\partial y}{\partial \psi} & \frac{\partial z}{\partial \psi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (26-2)$$

به فرم ماتریسی رابطه قبل را می‌توان به این صورت نوشت:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi} \\ \frac{\partial}{\partial \eta} \\ \frac{\partial}{\partial \psi} \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (27-2)$$

که در آن \mathbf{J} ماتریس ژاکوبی، ارتباط‌دهنده مختصات طبیعی و کلی است. مشتقات نسبت به مختصات کلی می‌توانند به صورت زیر به دست آیند:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix} = \mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi} \\ \frac{\partial}{\partial \eta} \\ \frac{\partial}{\partial \psi} \end{bmatrix} \quad (28-2)$$

برای محاسبه‌ی ماتریس سختی و ماتریس جرم نیازمند به ماتریس ژاکوبی هستیم. ماتریس سختی و ماتریس جرم از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\mathbf{K} = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{B} d\Omega \quad (29-2)$$

$$\mathbf{M} = \int_{\Omega} \mathbf{N}^T p \mathbf{N} d\Omega \quad (30-2)$$

در روابط بالا p چگالی ماده بوده و \mathbf{B} ماتریس کرنش-جابجایی است که برحسب مختصات محلی می‌باشد. بنابراین حجم المان به صورت زیر خواهد شد:

$$d\Omega = \det \mathbf{J} \times d\xi d\eta d\psi \quad (31-2)$$

در رابطه‌ی بالا $\det \mathbf{J}$ دترمینان ماتریس ژاکوبی است. برای حل این انتگرال از روش گوس با ۸ نقطه‌ی گوسی استفاده می‌کنیم. با بازنویسی تمام پارامترهای انتگرال بر اساس مختصات محلی، فرم کلی انتگرال به صورت زیر می‌شود:

(۳۲-۲)

$$\mathbf{K}^e = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{B} d\Omega^e = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{B} \det \mathbf{J} d\xi d\eta d\psi = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{B} \det \mathbf{J}$$

$$\mathbf{M}^e = \int_{\Omega} \mathbf{N}^T p \mathbf{N} d\Omega^e = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \mathbf{N}^T p \mathbf{N} \det \mathbf{J} d\xi d\eta d\psi = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \mathbf{N}^T p \mathbf{N} \det \mathbf{J} \quad (۳۳-۲)$$

با محاسبه‌ی ماتریس جرم و سختی المان‌ها، بسته به شکل و تعداد المان‌های مسائل مختلف، می‌توانیم ماتریس جرم و سختی کل را تشکیل داده و به کمک روابط دینامیکی، فرکانس‌ها و بردارهای مودی سازه‌های سه‌بعدی پیوسته را جهت استفاده در فرآیند شناسایی آسیب به دست آوریم.

فصل سوم : شناسایی آسیب با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی

۳-۱ مقدمه

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 قابل ملاحظه‌ای 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 طرح 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.

هر مسئله‌ی بهینه‌سازی را می‌توان به سه قسمت عمده تقسیم کرد:

۱- متغیرهای طراحی^۱

در مسائل مهندسی دو دسته متغیر داریم. دسته‌ی اول متغیرهای بهینه‌سازی هستند که در طول فرآیند بهینه‌سازی تغییر می‌کنند. دسته‌ی دوم متغیرهای از پیش تعیین شده می‌باشند که در طول فرآیند بهینه‌سازی ثابت هستند. در حالت کلی در مهندسی عمران، متغیرهای طراحی بهینه‌سازی ممکن است مربوط به اندازه، هندسه و توپولوژی سازه باشد. ابعاد کلی سازه‌ها، مشخصات مقاطع سازه‌ها و غیره می‌توانند به‌عنوان متغیرهای طراحی مربوط به اندازه 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 فرآیند 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^۲

تابعی متشکل از متغیرهای طراحی است که هدف اصلی مسئله‌ی بهینه‌سازی را تعریف می‌کند. مهم‌ترین ویژگی مدنظر جهت بهینه شدن در این قسمت تعریف می‌شود. اهمیت تابع هدف به‌گونه‌ای است که در صورت انتخاب تابع نامناسب، کل فرآیند بهینه‌سازی مختل می‌شود و از طرف دیگر در صورت انتخاب تابع هدف مناسب، طی گام‌های بسیار کمتری شاهد بهینه شدن مسئله خواهیم بود.

۳- قیدهای طراحی^۳

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

¹ Design Variables

² Objective Function

³ Design Constrains

تغییر مکان‌ها باید از مقادیر مجاز خود کوچک‌تر باشند. قیدها در حالت کلی ممکن است به صورت مساوی یا نامساوی باشند.

۳-۲ 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 کمانش باشد. به منظور رسیدن به هر کدام از این اهداف، ممکن است قیدهایی نیز وجود داشته باشند. در مسائل بهینه‌سازی سازه‌ای، معمولاً کمیت‌هایی همچون حجم مصالح به کار گرفته شده، تنش-ها، تغییر مکان‌ها و حتی هندسه سازه به عنوان قید در نظر گرفته می‌شوند [۲۲]. مسئله‌ی بهینه‌سازی را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$\begin{aligned}
 \text{minimize} & : f(x) \\
 \text{subjected to} & : h_j(x) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, n_h \\
 & g_k(x) \leq 0 \quad k = 1, 2, \dots, n_g \\
 & x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \quad i = 1, 2, \dots, n
 \end{aligned} \tag{۱-۳}$$

که در آن $f(x)$ تابع هدف، $x = (x_1, \dots, x_n)$ برداری از متغیرهای طراحی، $h_j(x)$ قیدهای مساوی^۱ و $g_k(x)$ قیدهای نامساوی^۲ هستند. همچنین n_h, n_g 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 اقماع کنند، یک فضای شدنی^۳ را تشکیل می‌دهند. از طرفی، فضای نشدنی^۴ مجموعه‌ای از همه نقاط طراحی است که حداقل یکی از قیدها را نقض کرده باشند. اگر تابع هدف و قیدهای مساوی و نامساوی توابعی خطی از متغیرهای طراحی باشند، آنگاه مسئله یک مسئله بهینه‌سازی خطی^۵ خواهد بود. در یک مسئله بهینه‌سازی

¹ Equality constraints

² Inequality constraints

³ Feasible domain

⁴ Infeasible domain

⁵ Linear optimization problem

غیرخطی^۱، تابع هدف یا حداقل یکی از قیدها یک تابع غیرخطی از متغیرهای طراحی است. به طور معمول مسائل بهینه‌سازی سازه‌ای جزء مسائل بهینه‌سازی غیرخطی می‌باشند [۲۳].

۳-۳ انواع مسائل بهینه‌سازی سازه‌ای

برای یک طرح بهینه، سه مرحله کلی تعریف می‌شود. مرحله‌ی اول فرم و سیستم سازه با توجه به فضای طراحی تعیین می‌شود. در مرحله‌ی دوم با در نظر گرفتن فرم و سیستم سازه، شکل و مشخصات ابعادی و مرزهای سازه تعیین می‌شود. در نهایت جزئیات سازه به صورت بهینه انتخاب می‌شوند. به دنبال این تقسیم‌بندی، سه روش بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. هر یک از این روش‌ها متناسب با کاربردشان در زمینه‌های مختلف مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرند که در ادامه هر یک توضیح داده خواهند شد: **بهینه‌سازی ابعادی**^۲: تحقیقات اولیه که در زمینه‌ی بهینه‌سازی صورت گرفته بیشتر به بهینه‌سازی ابعادی پرداخته است. از کاربردهای این شاخه از بهینه‌سازی می‌توان به مواردی قبیل پیدا کردن سطح مقطع بهینه‌ی اعضای خرپا یا قاب و یا بهینه کردن ضخامت یک سازه‌ی صفحه‌ای اشاره کرد. نکته‌ی مشترک در مسائل بهینه‌سازی ابعادی ثابت بودن دامنه‌ی طراحی است که در طول فرآیند بهینه‌سازی ثابت بوده و دستخوش تغییر قرار نمی‌گیرد.

بهینه‌سازی شکل^۳: بعد از بهینه‌سازی ابعادی تحقیقاتی به منظور پیدا کردن مرزهای بهینه‌ی سازه صورت گرفت که نتیجه‌ی آن پیدا شدن شاخه‌ای جدید در علم بهینه‌سازی تحت عنوان بهینه‌سازی شکل شد. از کاربردهای این شاخه می‌توان به پیدا کردن تابعی برای مرزهای یک سازه و همچنین پیدا کردن محل اتصالات سازه‌های اسکلتی اشاره کرد. در این نوع بهینه‌سازی، دامنه‌ی طراحی متغیر بوده اما نحوه‌ی توزیع مصالح در طول دامنه ثابت می‌باشد و مرزهای جدید نیز شکل نمی‌گیرند.

¹ Nonlinear optimization problem

² Size optimization

³ Shape optimization

بهینه‌سازی توپولوژی^۱: با گسترش تحقیقات در زمینه بهینه‌سازی، شاخه‌ی دیگری از بهینه‌سازی تحت عنوان بهینه‌سازی توپولوژی مطرح شد که به نحوه‌ی توزیع مصالح در دامنه‌ی تعریف شده می‌پردازد. در این شاخه از بهینه‌سازی، المان‌ها به‌عنوان متغیر طراحی در نظر گرفته می‌شوند. برای مثال در خرپاها سطح مقطع خرپا به‌عنوان متغیر طراحی در نظر گرفته می‌شود که مقدار آن‌ها می‌تواند صفر باشد که به معنی عدم نیاز به عضو در آن محل است. در بهینه‌سازی توپولوژی دامنه طراحی متغیر بوده و توزیع مصالح تحت شرایط مرزی ثابت صورت می‌گیرد.

۳-۴ مسئله عمومی بهینه‌سازی توپولوژی

استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی به‌عنوان یک ابزار قدرتمند در زمینه‌های طراحی و به‌خصوص مهندسی، توانسته است بسیاری از نیازهای محققان را برطرف کند. عملکرد این شاخه از بهینه‌سازی این‌گونه است که با در نظر گرفتن قیدهای تعریف شده، نحوه‌ی توزیع بهینه‌ی مصالح را به ازای تابع هدف معین، مشخص می‌کند. به‌عبارت‌دیگر می‌توان گفت که در تعیین نحوه‌ی ارتباط اعضای سازه و همچنین محل و تعداد حفره‌های سازه، به‌طور مؤثری قابل استفاده است. در این روش هدف اصلی جانمایی مصالح در دامنه‌ی تعریف شده است و در تعیین میزان مصالح در نقاط مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. در صورتی که به نقاطی مصالح اختصاص نیابد، محدوده‌ی مورد نظر بیانگر حفره است.

در روش‌های مبتنی بر المان محدود، دامنه‌ی طرح به المان‌های کوچک تقسیم می‌شود که می‌توان از هر المان برای تعیین وجود یا عدم وجود مصالح در همان المان استفاده کرد. به‌عبارت‌دیگر، در دامنه‌ی کل طرح به دنبال زیر دامنه‌هایی هستیم که دارای مصالح باشند تا به کمک آن‌ها بتوان توپولوژی طرح را تعیین کرد. به المان‌های مورد بررسی در صورت وجود مصالح عدد ۱ تعلق می‌گیرد و در صورت عدم وجود مصالح، عدد ۰ تعلق می‌گیرد. اما فقط مقادیر ۰ و ۱ در سازه اتفاق نمی‌افتد و مقادیر بین ۰ و ۱

¹ Topology optimization

نیز می‌تواند به‌عنوان مقادیر المان‌ها اختصاص یابد. به این منظور از توابع چگالی مصنوعی استفاده می‌شود. در این صورت به‌منظور جلوگیری از شکل‌گیری نواحی متخلخل (نواحی با چگالی بین صفر و یک) از یک توان جریمه نیز مطابق با رویکرد مصالح مصنوعی همسانگرد با اعمال جریمه استفاده می‌شود [۲۴].

هالمبرگ^۱ و همکاران در سال ۱۹۶۴ از بهینه‌سازی توپولوژی با قید تنش برای تعیین المان‌های خرپا استفاده کردند [۲۵]. سونبرگ^۲ برای اولین بار در سال ۱۹۸۷ از مجانب‌های پویا برای بهینه‌سازی توپولوژی استفاده کرد [۲۶]. در سال ۱۹۸۸ بندسو^۳ و کیکوچی^۴ برای اولین بار بهینه‌سازی توپولوژی را معرفی کردند و در سال ۱۹۸۹ بندسو روش اعمال جریمه مواد همسانگرد را پیشنهاد داد [۲۴]. در سال ۱۹۹۱ رزوانی^۵ و همکاران برای دستیابی به یک مدل سیاه و سفید با استفاده از اعمال جریمه بر متغیرهای طراحی متوسط تلاش کردند [۲۷]. کاربرد عددی ایده‌ی توزیع ماده بر اساس مواد همگن‌شده برای اولین بار توسط بندسو و کیکوچی در سال ۱۹۸۸ انجام شد. در این روش، با بهینه کردن ابعاد مصالح، توپولوژی بهینه به دست می‌آید [۲۴].

۳-۵ مسئله بهینه‌سازی توپولوژی برای شناسایی آسیب

با توجه به اینکه در چند دهه‌ی گذشته تحقیقات بسیاری در زمینه‌ی طراحی بهینه صورت گرفته با این حال آثار کمی در زمینه‌ی بهینه‌سازی دینامیکی وجود دارد [۲۸, ۲۹]. دو رویکرد کلی برای بهینه‌سازی توپولوژی دینامیکی می‌توان در نظر گرفت. در رویکرد اول هدف پیدا کردن سازه‌ای با بیشترین سختی تحت قید حجم است. به این منظور، انرژی کرنشی تحت اثر شرایط مرزی و بارگذاری باید حداقل

¹ Holmberg et al.

² Svanberg

³ Bendsoe

⁴ Kikuchi

⁵ Rozvany et al.

شود. با توجه به این که در این حالت هیچ قیدی برای تنش‌ها و تغییر مکان‌ها تعریف نمی‌شود، رویکرد دیگری از مسائل بهینه‌سازی که برای به حداقل رساندن وزن سازه تحت قیدهای تنش در نظر گرفته می‌شود [۲۹, ۳۰]. رویکرد دوم طی سال‌های اخیر مورد استقبال محققان قرار گرفته است.

نحوه‌ی عملکرد رویکرد اول این‌گونه است که با کمک روش اجزا محدود، چگالی المان‌ها به‌عنوان متغیر طراحی در نظر گرفته‌شده و طی فرآیند بهینه‌سازی، توپولوژی بهینه حاصل می‌شود. از معایب این رویکرد می‌توان به حجم بالای داده‌ها و محاسبات اشاره کرد، اما به علت کاربردی‌تر بودن این رویکرد در مسائل مهندسی، می‌توان از معایب آن چشم‌پوشی کرد. [۳۱]. متغیرهای طراحی در این رویکرد در واقع چگالی المان‌های اجزا محدود می‌باشند.

آسیب در سازه منجر به تغییر مشخصات فیزیکی و دینامیکی آن می‌شود. با در نظر گرفتن سازه به‌عنوان یک سیستم دینامیکی متشکل از سختی، جرم و میرایی، می‌توان شاهد تغییرات ناشی از آسیب در پاسخ‌های دینامیکی بوده و به کمک تغییرات ایجادشده در توابع پاسخ فرکانسی و یا پارامترهای مودال، می‌توان محل و شدت خرابی‌ها را تشخیص داد. با تعریف مسئله‌ی بهینه‌سازی برای سازه‌ی موردنظر و به‌روزرسانی مدل محاسباتی می‌توان از تغییرات مشخصات دینامیکی در تعیین آسیب کمک گرفت. در این به‌روزرسانی، اختلاف بین داده‌های تحلیلی و واقعی به‌مرور کاهش یافته و به مقدار صفر نزدیک می‌شوند [۵].

بهینه‌سازی توپولوژی یک محدوده بسیار فعال تحقیقاتی را شامل می‌شود که به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است. کلیات روش‌های بهینه‌سازی را می‌توان در کتاب بندسو بررسی کرد [۲۲, ۳۲]. هم‌چنین با مطالعه‌ی مبانی اولیه‌ی بهینه‌سازی توپولوژی، می‌توان به تعریف مناسبی از این شاخه از بهینه‌سازی دست‌یافت. با توجه به کتاب بندسو، بهینه‌سازی توپولوژی یک روش ریاضی برای توزیع مصالح در دامنه‌ی تعریف شده و با اعمال قیدهای در نظر گرفته‌شده می‌باشد که در راستای عملکرد هرچه بهتر سیستم اعمال شده‌اند [۲۲, ۲۳].

۳-۶ انواع تابع هدف در شناسایی آسیب

بخش حیاتی هر مسئله‌ی بهینه‌سازی تابع هدف است که مسیر فرآیند بهینه‌سازی را هدایت می‌کند. انتخاب تابع هدف مناسب بسته به اهداف بهینه‌سازی متفاوت است. همان‌طور که پیش‌تر توضیح داده شد، انتخاب تابع هدف نامناسب می‌تواند موجب پایین آمدن دقت و طولانی‌تر شدن فرآیند بهینه‌سازی شود. از طرف دیگر با انتخاب تابع هدف مناسب می‌توان طی مدت زمان کمتر، به نتایج دقیق‌تری دست‌یافت. انتخاب تابع هدف نامناسب حتی می‌تواند به پاسخ اشتباه منجر شود. به این منظور برای انتخاب تابع هدف باید نکات بسیاری در نظر گرفته شود تا بتوان از کارآمد بودن بهینه‌سازی موردنظر اطمینان حاصل کرد. در ادامه به چند تابع هدف که در تحقیقات گذشته در نظر گرفته شده‌اند می‌پردازیم. در بیشتر روش‌های شناسایی آسیب، مقدار تابع هدف از تفاضل داده‌های ارتعاشی ناشی از آزمایش مودال سازه‌ی موجود و مدل تحلیلی استخراج می‌شود که با کمینه کردن این مقادیر می‌توان به محل و شدت آسیب ایجاد شده در سازه دسترسی پیدا کرد [۳۳-۳۵]. با توجه به اینکه فرکانس‌های طبیعی پایین سازه به راحتی قابل محاسبه هستند، از این پارامتر در مسائل معکوس برای شناسایی آسیب استفاده می‌شود که می‌تواند نتایج مناسبی در اختیار قرار دهد. کالی^۱ و آدامز^۲ در سال ۱۹۷۹ از نخستین افرادی بودند که در این زمینه به پژوهش پرداختند [۳۶]. در تحقیقات آن‌ها محل و مقدار خرابی در تیرهای یک‌بعدی با استفاده از داده‌های فرکانس‌های طبیعی، شناسایی می‌شوند.

اوینس^۳ در سال ۱۹۸۵ برای اولین بار شاخص MAC را معرفی کرد. این شاخص از مقایسه‌ی دو مود استخراج شده و مقدار آن بین ۰ و ۱ است. این شاخص از خصوصیات تعامد شکل مودها برای مقایسه‌ی دو مود استفاده می‌کند. مقدار این شاخص اگر ۱ باشد به این معنی است که شکل مود در گره‌ی موردنظر

¹ Cowley

² Adams

³ Ewins

یکسان است. در صورت ^۰ بودن این مقدار هم می توان گفت که شکل مود در دو گره ی موردنظر یکسان نیست [۳۷].

استابس^۱ و اوسگودا^۲ در سال ۱۹۸۷ بر اساس حساسیت فرکانس های طبیعی به آسیب توانستند روشی برای شناسایی آسیب پیدا کنند. آن ها برای محاسبه ی تابع حساسیت از مدل اجزا محدود استفاده کردند که در زمان محاسبات بسیار تأثیر منفی داشت [۳۸]. ابه^۳ در سال ۱۹۹۶ از تبدیل سریع فوریه (FFT) برای شناسایی تغییرات فرکانس طبیعی استفاده کرد و توانست محل و شدت آسیب در یک سازه را شناسایی کند [۳۹]. در سال ۱۹۹۹ هاوت^۴ و الاموس^۵ روش های شناسایی آسیب بر مبنای انرژی کرنشی مودال را ارائه دادند [۴۰].

وانگ و همکارانش^۶ در سال ۲۰۰۱ الگوریتم شناسایی خرابی سازه های را با استفاده از اطلاعات آزمایش استاتیکی و تغییرات در فرکانس های طبیعی معرفی کردند [۴۱]. آن ها از روشی دومارحله ای، متشکل از تغییرشکل های استاتیکی سازه ای و چند فرکانس طبیعی اول سازه برای شناسایی خرابی استفاده کردند و از این طریق خرابی های سازه را شناسایی نمودند. در سال ۲۰۰۹ شیه^۷ [۴۲] از عملکرد پاسخ فرکانس به عنوان ابزار شناسایی آسیب در یک سازه استفاده کردند. در همان سال شناسایی محل آسیب با استفاده از روش های انرژی کرنشی مودال توسط لی و همکارانش^۸ صورت گرفت [۴۳]؛ آن ها از مقایسه ی داده های سازه در دو حالت سالم و آسیب دیده استفاده کرده و با روش بهینه سازی معکوس به حل مسئله پرداختند. در سال ۲۰۰۲ هائو^۹ و شیا^{۱۰} و انجمنی از MSCE با استفاده از تحلیل حساسیت

¹ Stubbs

² Osegueda

³ Abe

⁴ Haute

⁵ Alamos

⁶ Wang et al

⁷ Shih et al

⁸ Li et al

⁹ Hao

¹⁰ Xia

و الگوریتم ژنتیک اختلاف بین داده‌های ارتعاشی سنجیده شده و داده‌های تحلیلی را به حداقل رساندند. سه معیار متفاوت برای تابع هدف در نظر گرفته شده‌اند که عبارت‌اند از: تغییرات فرکانس، تغییرات شکل مود و ترکیبی از این دو تابع هدف [۴۴].

در سال ۲۰۰۵ بختیاری نژاد و همکاران، با استفاده از روشی بر پایه‌ی انرژی کرنشی ذخیره‌شده در المان‌ها به منظور تعیین نقاط بارگذاری بهینه استفاده کردند و سپس به‌طور تجربی در آزمایشگاه این روش را مورد آزمایش قرار دادند و موفق شدند محل و شدت خرابی را تعیین کنند [۴۵]. چوی و همکاران^۱ در سال ۲۰۰۵، شاخص جدیدی مبتنی بر ماتریس نرمی سازه معرفی کردند که با آزمایش‌های متعدد به این نتیجه رسیدند که این شاخص به مودهای ارتعاشی پایین‌تر حساسیت بالاتری دارد. از آنجایی که در این روش فقط از ماتریس نرمی یا انحنای المان‌ها استفاده می‌کند، نمی‌تواند شدت خرابی را تشخیص دهد [۴۶].

در سال ۲۰۰۷ توسط پیمانی و همکارانش، با کمک‌گیری از الگوریتم ژنتیک توانستند روشی برای تشخیص ترک در سازه‌های تیر شکل ارائه دهند و طی مراحل آزمایشگاهی توانستند عمق و شدت ترک را با دقت مناسبی تشخیص دهند. [۴۷]. روش‌های بسیاری مبتنی بر فرکانس‌های طبیعی ارائه شده‌اند که در برخی از آن‌ها محل و شدت خرابی‌ها به خوبی قابل تشخیص هستند [۴۸-۵۰].

سو^۲ و اکسو^۳ در سال ۲۰۱۰ به کمک روش حداقل مربعات غیرخطی مقید توانستند اختلاف بین داده‌های تحلیلی و آزمایشگاهی را به حداقل برسانند و به این منظور از معیار MAC کمک گرفتند [۵۱]. در سال ۲۰۱۰ ناصر علوی، سلاجقه و فدایی از الگوریتم ژنتیک پیوسته برای شناسایی آسیب در سازه‌ها استفاده کردند. روش ارائه‌شده دو مزیت مهم داشت: (۱) حذف متغیرهای طراحی حین حل

¹ Choi et al.

² Su

³ Xu

مسئله بهینه‌سازی برای کاهش فضای جستجو (۲) بهبود حل مسئله خطی شده با استفاده از حل معکوس مور پنروز^۱ [۵۲].

سیدپور در سال ۲۰۱۱ به شناسایی محل آسیب‌های چندگانه‌ی سازه‌ای بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی پرندگان^۲ پرداخت. او تغییرات فرکانس طبیعی سازه را نشانه‌ای از آسیب در سازه تعبیر کرده و با کمک گرفتن از آن توانست محل آسیب‌ها را شناسایی کند. از مزایای استفاده از روش‌های مبتنی بر فرکانس-های طبیعی می‌توان به حجم پایین محاسبات و داده‌ها اشاره کرد [۵۳]. در سال ۲۰۱۱ ضیایی، ناصر علوی و سلاجقه روشی دومرحله‌ای برای شناسایی آسیب در سازه‌های فضا کار تحت بار استاتیکی معرفی کردند. در گام اول به کمک روش الگوریتم مورچه‌ها فضای جست‌وجو کاهش یافته و سپس در گام دوم شدت آسیب در المان‌هایی که در گام قبل به‌عنوان المان‌های آسیب‌دیده انتخاب می‌شدند، تعیین می‌شود. [۵۴]. در سال ۲۰۱۱ زارع، ناصر علوی و سلاجقه به بررسی پاسخ‌های متعددی برای شناسایی آسیب مبتنی بر تحلیل حساسیت پرداختند که در نهایت پاسخ‌های استاتیکی به‌عنوان مؤثرترین روش در نظر گرفته شد [۵۵].

در سال ۲۰۱۱ گریست، ناصر علوی و سلاجقه با استفاده از الگوریتم ژنتیک پیشرفته و تغییرات پاسخ‌های مودال سازه، به تعیین جزییات دقیق خرابی پرداختند و برای حل این مشکل که شدت خرابی می‌تواند در طول المان خراب، غیریکنواخت باشد و محدوده دقیق خرابی می‌تواند بر مش بندی اجزای محدود منطبق نباشد، از توابع شکل مناسب و در نظر گرفتن جای گره‌ها به‌عنوان متغیرهای طراحی استفاده کردند [۵۶]. در سال ۲۰۱۱ توسط نوبهاری و سیدپور، عیب‌یابی سازه‌ها بر اساس الگوریتم ژنتیک اصلاح‌شده بررسی گردید [۵۷]. در سال ۲۰۱۱ توسط مرادی و همکارانش، کاربرد الگوریتم زنبورعسل برای مسائل شناسایی ترک در تیرها معرفی شده است. نتایج نشان داد که به کمک این روش، اندازه و

¹ Moore-penrose inverse

² Multi Staged Particle Swarm Optimization(MSPSO)

محل ترک به خوبی مشخص می‌شود [۵۸]. در سال ۲۰۱۱ توسط مران و همکارانش^۱، عیب‌یابی سازه‌ها بر اساس الگوریتم ژنتیک ترکیبی با متغیرهای حقیقی را معرفی کردند. این تحقیق نشان داد که دقت این روش در مقایسه با سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی در حد بسیار مطلوبی بالاتر می‌باشد [۵۹]. در سال ۲۰۱۲ توسط سیدپور، یک روش دومرحله‌ای برای تعیین محل و اندازه خرابی سازه‌ای با استفاده از انرژی کرنشی مودال مبتنی بر شاخص MSEBI و الگوریتم بهینه‌سازی PSO پیشنهاد شده است. نتایج عددی نشان دادند که ترکیب MSEBI^۲ و PSO^۳ می‌تواند یک ابزار قابل اطمینان برای شناسایی دقیق خرابی سازه‌ای چندگانه باشد [۶۰].

فو و همکاران^۴ در سال ۲۰۱۲ طی تحقیق به منظور یافتن مکان و تعداد بهینه سنسورها، تابع هدفی بر اساس فاصله شبکه سنسورها از یکدیگر تعریف نمودند که هدف آن مینیمم ساختن میزان خطای شکل مودی و انرژی مصرف شده بر اساس تغییر ماتریس هنکل بوده است [۶۴]. فاروق و همکاران در سال ۲۰۱۲ با استفاده از اطلاعات حاصل از کرنش‌سنج‌های نصب شده بر روی یک ورق کامپوزیتی، به مقایسه ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی در عیب‌یابی ورق‌ها پرداختند و نتیجه گرفتند که پاسخ‌های SVM^۵ در این زمینه بهتر است [۶۲]. در سال‌های ۲۰۰۷، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۶ تحقیقاتی بر مبنای تغییرات انحنای شکل مودی، در سه پژوهش مختلف، باهدف یافتن آسیب، صورت پذیرفت [۶۵-۶۳]. لو و همکارانش^۶، در سال ۲۰۱۳ یک روش دومرحله‌ای مبتنی بر انحنای شکل مودی و تحلیل حساسیت پاسخ برای شناسایی خرابی در تیرها بیان نمودند. شبیه‌سازی‌های عددی روی انواع مختلف تیر نشان داد که روش پیشنهادی برای شناسایی ترک، روشی دقیق و کارآمد می‌باشد [۶۶].

¹ Meruane et al.

² Modal Strain Energy Based Index

³ Particle Swarm Optimization

⁴ Fu et al

⁵ Support Vector Machine

⁶ Lu et al

فاطمه سروی در سال ۲۰۱۳ بر اساس پاسخ‌های دینامیکی با استفاده از به‌روزرسانی مدل اجزاء محدود به عیب‌یابی سازه‌ها پرداخت. در این تحقیق خرابی به‌صورت کاهش یکی از خصوصیات فیزیکی اعضای سازه مدل‌سازی شده است و محل و شدت خرابی با روندی معکوس با استفاده از به‌روزرسانی مدل سازه مشخص گردیده است. جهت تشخیص خرابی از دو روش استفاده‌شده که اولی با استفاده از الگوریتم‌های جستجوگر فرااکتشافی^۱ (رقابت استعماری و اجتماع ذرات) و دومی با استفاده از الگوریتم گرادیانی (لونبرگ-مارکوارت) مسئله خرابی را حل می‌کند. همچنین برای عملکرد مطلوب لونبرگ-مارکوارت در حل مسئله عیب‌یابی سازه‌های پر عضو گسسته استفاده‌شده‌اند و همین‌طور از روش‌های فرااکتشافی رقابت استعماری و اجتماع ذرات جهت عیب‌یابی سازه‌ها با کاربرد تابع هدف مؤثر بهره گرفته‌شده است و در نهایت مقایسه بین الگوریتم‌ها صورت گرفته است [۶۷].

رامین قیاسی در سال ۲۰۱۳ به عیب‌یابی سازه‌ها با استفاده از روش‌های پیشرفته هوش مصنوعی پرداخت که در آن مسئله عیب‌یابی به‌صورت آموزش الگوریتم هوش مصنوعی بیان می‌شود و در آن پاسخ‌های سازه، ورودی الگوریتم و عیوب سازه، خروجی آن است. الگوریتم‌های مورد استفاده شامل ماشین بردار پشتیبان حداقل مربعات، شبکه عصبی تابع بنیادی شعاعی، سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی و نزدیک‌ترین همسایگی با بزرگ‌ترین مرز بود. بر اساس نتایج ماشین بردار پشتیبان حداقل مربعات دارای سرعت و دقت بیشتری نسبت به سایر الگوریتم‌های هوش مصنوعی درون‌یابی می‌باشد [۶۸].

حسن پیروزی در سال ۲۰۱۴ به عیب‌یابی سازه‌ها با استفاده از دو روش الگوریتم بهینه‌سازی فاخته و روش اختلال هوموتروپی پرداخت. روش اول با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته طی یک فرآیند دومرحله‌ای با بهره‌گیری از پاسخ‌های مودال مدل سازه و در روش دوم با استفاده از روش اختلال هوموتروپی که برای حل دستگاه‌های غیرخطی است، سازه عیب‌یابی شده است. روش دوم که یک روش تک‌مرحله‌ای است، مبتنی بر آنالیز حساسیت بوده که طی فرآیندی تکراری، تابع هدف ارائه‌شده را

¹ Metaheuristic algorithms

حداقل می‌کند. اثر وجود نویز هم در پاسخ دینامیکی بررسی شده است. در این روش با استفاده از پاسخ‌های شتاب تحت تحریک دینامیکی عیب‌یابی سازه انجام می‌شود و همین‌طور با استفاده هم‌زمان دو پاسخ فرکانس و مود شکل در بردار پاسخ‌ها مدل سازه به‌روزرسانی می‌شود [۶۹].

در سال ۲۰۱۴ توسط ناندا و همکارانش^۱ یک روش ارزیابی خسارت در اتصالات اعضای سازه‌ای با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) که به نام الگوریتم پرندگان نیز مشهور است، پیشنهاد شده است که می‌تواند برای تعیین مقدار خرابی اتصال در هر سازه قابی استفاده شود. در این روش خرابی اتصال به‌صورت یک کاهش در فاکتور سختی اتصال اندازه‌گیری می‌شود. به‌منظور صحت-سنجی نتایج تئوری در این تحقیق چند نمونه مطالعات آزمایشگاهی نیز انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم حاضر قادر به تخمین مقدار خرابی در اتصال با دقت قابل قبول می‌باشد [۷۰].

در سال ۲۰۱۵ سان^۲ و بویوک‌تورک^۳ از ایده جایگذاری بهینه سنسورها بر اساس الگوریتم کلونی مورچه‌ها استفاده کردند. ایده پایه OSP^۴ در پایش سلامت سازه، یافتن چیدمان تعدادی سنسور است، به‌گونه‌ای که بتوان حداکثر اطلاعات را از سیستم دینامیکی به دست آورد. برای تحقق این هدف، OSP را می‌توان به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی فرمول‌بندی نمود که در آن تابع هدف تعریف شده توسط کاربر، که به مشخصه‌های دینامیکی یک سیستم سازه‌ای مرتبط است، کمینه (یا بیشینه) می‌شود. مکان سنسورها را می‌توان به‌عنوان متغیرهای بهینه‌سازی گسسته تعریف کرد و قید مسئله عموماً تعداد سنسور می‌باشد؛ که تابع هدف آن بر اساس ماتریس MAC بر طبق شکل‌های مودی موجود نوشته شده است [۷۱].

در سال ۲۰۱۵ چاو^۵ انرژی کرنشی معادل را به‌عنوان یکی از شاخص‌های نظارت بر سلامت سازه‌ها موردبررسی قرار داد. در این مطالعه، یک روش جدید جهت تشخیص آسیب‌ها با استفاده از الگوریتم

¹ Nanda et al.

² sun

³ Büyüköztürk

⁴ Optimal Sensor Placement

⁵ Chao

بهینه‌سازی ترکیبی چندهدفه بر پایه روش MSE ارائه شده است که با استفاده از آن می‌توان خسارت‌های زیادی را به صورت سه‌بعدی در سازه تشخیص داد. الگوریتم ژنتیک ترکیبی چندهدفه پیشنهادی، محل و ابعاد آسیب‌های سازه را تشخیص می‌دهد [۷۲]. در سال‌های اخیر برخی تحقیقات بر اساس بردار نیروی باقی‌مانده در سازه انجام گرفته است [۷۶، ۷۷]. همچنین از تبدیل موجک نیز برخی برای شناسایی آسیب استفاده نموده‌اند [۷۸، ۷۹]. در سال ۲۰۱۷ ژانگ، دو و سان^۱ [۷۷] روش خطوط هم‌تراز برای شناسایی آسیب در سازه‌های پیوسته بر اساس پاسخ دینامیکی را پیشنهاد نمودند. اسلامی و همکاران در سال ۲۰۱۹ با به‌کارگیری روش بهینه‌سازی توپولوژی در سازه‌های پیوسته توانستند به شناسایی آسیب در سازه‌های صفحه‌ای^۲ بپردازند. آن‌ها از تابع هدف مبتنی بر اختلاف بردارهای مودی کمک گرفتند و توانستند محل و شدت آسیب را با دقت بالایی به دست آورند [۷۸].

۳-۷ توابع هدف مورد استفاده در بهینه‌سازی

۳-۷-۱ تغییرات فرکانس

با توجه به توضیحات بخش‌های قبل می‌توان تغییرات فرکانس را رایج‌ترین مشخصه در شناسایی آسیب در نظر گرفت [۷۹، ۸۰]. با تحقیقات گسترده روی اثرات آسیب بر فرکانس طبیعی سازه و شبیه‌سازی-های عددی متعدد، ثابت شد که می‌توان از توابع هدف مبتنی بر فرکانس طبیعی سازه برای شناسایی آسیب استفاده کرد [۸۱]. در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ یک رویکرد جدید با به‌کارگیری این ایده، با استفاده از متغیرهای طراحی بهینه‌سازی توپولوژی برای شناسایی آسیب، توسط گروه تحقیقاتی Morlier توسعه یافته است [۸۲، ۸۳]. اگر در فرآیند بهینه‌سازی تنها از فرکانس‌های طبیعی جهت شناسایی آسیب استفاده شود، تابع هدف به شکل زیر می‌تواند در شناسایی آسیب مؤثر باشد:

¹ Zhang, Du and Sun

² Plane Structures

$$f(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^{nm} w_i^\lambda \left(\frac{\lambda_i(\mathbf{p}) - \lambda_i^*}{\lambda_i^*} \right)^2 \quad (2-3)$$

که در آن \mathbf{p} بردار چگالی المان‌ها (متغیرهای طراحی) است و مقادیر آن بین صفر و یک متغیر می‌باشد. λ_i ، i امین مقدار ویژه (فرکانس طبیعی) در مدل عددی و λ_i^* ، i امین مقدار ویژه در سازه‌ی اصلی آسیب‌دیده است که در طول روند بهینه‌سازی مقادیری ثابت دارد. w_i^λ ، i امین عضو از بردار وزن مربوط به تابع فرکانس است که در این پژوهش تمامی مقادیر آن ۱ فرض شده است و nm تعداد مودهای لحاظ شده برای تحلیل مودال است. از آنجاکه فرکانس‌های طبیعی را می‌توان به راحتی و با دقت بالایی حتی در یک نقطه اندازه‌گیری نمود، در نظر گرفتن این پارامتر به عنوان معیار سنجش در پایش سلامت سازه، زمانی که اندازه‌گیری‌ها به صورت دوره‌ای انجام می‌شود، عملی است. ایرادات اولیه در استفاده از تغییرات فرکانس به تنهایی به عنوان تابع هدف، عدم توانایی در تشخیص آسیب در سازه‌های متقارن و حساس نبودن فرکانس‌ها به آسیب‌های جزئی محلی، می‌باشد. در چنین مواردی، شکل‌های مودی باید ترکیب شوند.

۳-۷-۲ تغییرات شکل مودی

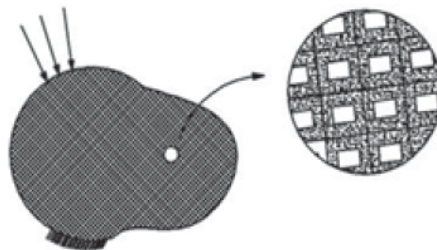
همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، فرکانس‌های طبیعی به تنهایی قادر به تعیین محل و شدت آسیب در تمامی حالات نمی‌باشند و در سازه‌های متقارن و تشخیص آسیب‌های موضعی دارای ضعف هستند. علت اصلی می‌تواند این باشد که در نظر گرفتن فقط یک کمیت برای کل سازه؛ می‌تواند تمامی ویژگی‌های سازه را در نظر گیرد. استفاده از بردارهای ویژه با توجه به اینکه از تمامی نقاط سازه اطلاعات فراهم می‌کنند، می‌تواند در فرآیند شناسایی آسیب مؤثر واقع شوند. بردارهای مودی یا همان بردارهای ویژه به ازای تمامی درجات آزادی سازه دارای مقدار بوده و می‌تواند به عنوان شاخص مناسبی برای شناسایی آسیب مورد استفاده قرار گیرد. به این منظور از تابع هدف به فرم زیر استفاده می‌شود:

$$f(\rho) = \sum_{i=1}^{nm} w_i^{\phi} \sum_{j=1}^{np} \left(|\varphi_{ij}(\rho)| - |\varphi_{ij}^*| \right)^2 \quad (3-3)$$

که در آن φ_{ij} ، زامین عضو از i امین بردار ویژه نرمال شده در مدل بهینه‌سازی است، φ_{ij}^* ، زامین عضو از i امین بردار ویژه نرمال شده در سازه اصلی آسیب‌دیده است که در طول روند بهینه‌سازی مقداری ثابت دارد. w_i^{ϕ} ، i امین عضو از بردار وزن مربوط به تابع شکل مودی است که در این پژوهش مقادیر آن ۱ در نظر گرفته شده است. برای اعمال معادله (۳-۳)، شکل‌های مودی بایستی بر اساس ماتریس جرم نرمال شده باشند. شکل مود نسبت به آسیب در سازه حساس است، و شکل مودهای اندازه‌گیری شده به‌طور معمول خطاهای کوچک‌تری نسبت به اندازه‌گیری فرکانس‌ها دارند [۸۴].

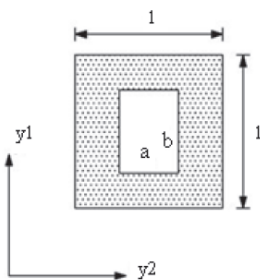
۳-۸ روش مصالح مصنوعی همسانگرد با اعمال جریمه

در بهینه‌سازی توپولوژی به پخش مصالح در دامنه‌ی طراحی پرداخته می‌شود. به این منظور، سازه را از حفره‌های کوچک تشکیل داده و سپس به نحوه‌ی قرارگیری و اندازه‌ی حفره‌ها در فرآیند بهینه‌سازی پرداخته می‌شود. در این روش از بهینه‌سازی، ابعاد حفره‌ها متغیرهای طراحی را تشکیل می‌دهند. اگر ابعاد حفره‌ها در محدوده‌ای از دامنه‌ی طراحی بزرگ باشد به معنی عدم حضور مصالح در آن بخش است و برعکس اگر در بخش‌هایی حفره نباشد به این معنی است که در این بخش‌ها مصالح توزیع شده است. شکل ۳-۱ نشانگر بخش کوچکی از سازه است که به‌صورت حفره‌های کوچک در نظر گرفته شده است [۸۵]:



شکل ۳-۱ ریز سلول‌ها با حفره‌های مستطیلی [۸۵]

به‌طور کلی به دو روش می‌توان ریز سلول‌ها را برای مسائل بهینه‌سازی در نظر گرفت. دسته اول ریز سازه‌های مرکب لایه‌ای^۱ و دسته دوم میکرو سلول‌ها با حفره‌های داخلی می‌باشند. تئوری همگن‌سازی^۲ برای محاسبه خواص مکانیکی ماکروسکوپی این مواد به کار می‌رود که این خواص در روش بهینه‌سازی مورد استفاده به‌عنوان تابع هدف، نیاز است. یک روش ساده‌تر می‌تواند استفاده از مصالح مصنوعی همسانگرد (SIMP^۳) باشد. استفاده از این نوع ریز سازه‌ها می‌تواند در ساده‌سازی مسئله مفید باشد. به موادی که با این روش در نظر گرفته شوند، مصالح مصنوعی گفته می‌شود. در انتخاب ریز سازه‌ها باید به‌گونه‌ای عمل کنیم که هر ریز سازه بتواند تمامی مقادیر بین ۰ و ۱ را به خود اختصاص دهد و از طرفی با کمترین تعداد متغیرها قابل محاسبه باشد تا در تعداد متغیرهای طراحی به حداقل رسیده و فرآیند بهینه‌سازی زمان کمتری ببرد. برای سازه‌های سه‌بعدی، مکعب ساده‌ترین حالت برای در نظر گرفتن حفره است و تنها با داشتن سه ضلع آن می‌توان حجم آن را حساب کرد. در شکل زیر سلول‌های مربعی برای تعیین مساحت حفره نشان داده شده است اما در مسئله‌ی سه‌بعدی دیگر سطح مورد نظر نبوده و حجم حفره اهمیت پیدا می‌کند. با در نظر گرفتن بعد سوم در شکل زیر می‌توانیم حجم حفره را حساب کنیم:



شکل ۲-۳ سلول واحد مربعی با حفره مستطیلی در مرکز آن در مقیاس میکروسکوپی [۸۵]

¹ Ranked layered material

² Homogenization Theory

³ Solid Isotropic Material with Penalization

در شکل ۳-۲ یک سلول در دو بعد نشان داده شده است. در مسائل سه بعدی می توان با در نظر گرفتن بعد سوم با طول c در جهت بردار مختصات y_3 که متعامد با دو بردار y_1 و y_2 است، حجم حفره را مشخص کرد. توجه داریم که حجم کل سلول برابر با ۱ بوده و در صورت ایجاد حفره تغییر می کند که در این صورت حجم مصالح از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$V_s = \int_v (1 - abc) dv \quad (5-3)$$

که در این رابطه $0 \leq a \leq 1$ ، $0 \leq b \leq 1$ ، $0 \leq c \leq 1$ و v فضای طراحی و V_s قسمت جامد فضای طراحی را نشان می دهد. با توجه به اینکه حداکثر مقدار فضای جامد می تواند ۱ باشد، می توان عدد ۱ را به منزله ی عدم وجود آسیب و اعداد کوچک تر از ۱ را به منزله ی وجود آسیب در المان مورد نظر تعبیر کرد که قابلیت استفاده از این روش در شناسایی آسیب را فراهم می کند. برای هر المان رابطه ی زیر را در نظر بگیریم:

$$\rho^e = (1 - a^e b^e c^e) \rho_0^e \quad (6-3)$$

$$\rho(x) = \begin{cases} 1 & x \in \Omega_s \quad \text{no damage} \\ 0 < \rho_{\min} \leq \rho(x) < 1 & x \in \Omega \setminus \Omega_s \quad \text{damage} \end{cases} \quad (7-3)$$

که در این فرمول ρ_0 چگالی المان سالم (برابر با ۱) است. با فرضیات بالا، ρ به عنوان متغیر طراحی در نظر گرفته می شود. با وجود اینکه این فرض به ساده سازی مسئله کمک شایانی می کند، اما از طرفی باعث به وجود آمدن تعداد بسیاری حفره در تمامی سازه می شود. در واقعیت سازه ای به عنوان سازه ی بهینه قابل قبول است که دارای نقاطی با مصالح ($\rho = 1$) و نقاط دیگر بدون مصالح (حفره) باشد. وجود نقاطی با چگالی بین ۰ و ۱ نمی تواند در مسائل واقعی قابل توجیه باشد اما برای اهداف شناسایی آسیب می تواند مفید باشد چراکه با کاهش چگالی المان سختی و جرم المان کاهش می یابد. با توجه به توضیحات بخش های قبل، این کاهش سختی و جرم را می توان به عنوان آسیب در نظر گرفت. در نتیجه در سازه های آسیب دیده، المان هایی که مقدار چگالی آن ها کمتر از ۱ باشد المان آسیب دیده در نظر

گرفته می‌شوند. یکی از نقاط ضعف این روش در نظر گرفتن حفره برای تمامی المان‌ها از جمله المان‌های سالم است که این حفره‌ها در المان‌های سالم بسیار کوچک هستند. در نتیجه این روش سازه‌ای با مصالح حفره‌دار به وجود می‌آورد که در عمل چنین سازه‌ای غیرمنطقی است. برای برطرف کردن این مشکل از توان جریمه که به چگالی المان‌ها اعمال می‌شود استفاده می‌کنیم تا از حضور حفره‌های ناخواسته در المان‌هایی که می‌بایست دارای مصالح باشند جلوگیری شود [۸۶]. به این منظور پارامتری تحت عنوان ضریب جریمه (μ) تعریف می‌شود در رابطه‌ی زیر آورده شده است:

$$\mathbf{C}(x) = \rho^\mu(x) \mathbf{C}^0 \quad \mu \geq 1 \quad (۸-۳)$$

در رابطه‌ی بالا ρ چگالی المان است که به‌عنوان متغیر طراحی در نظر گرفته شده و μ ضریب جریمه است. \mathbf{C} ماتریس الاستیسیته است که با در نظر گرفتن چگالی المان‌ها می‌شود. در المان‌های آسیب‌دیده که چگالی کمتری دارند، ماتریس الاستیسیته کاهش می‌یابد که به دنبال آن ماتریس سختی و جرم المان نیز کاهش می‌یابند. با ایجاد تغییر در ماتریس سختی و جرم المان‌ها، ماتریس جرم و سختی کل سازه نیز دستخوش تغییر قرار می‌گیرند. با جایگذاری موارد فوق در روابط گفته شده در بخش ۲-۶، ماتریس‌های سختی و جرم المان در مدل‌سازی SIMP به فرم زیر درمی‌آیند:

$$\mathbf{K}^e(\rho^e) = \int_{\Omega^e} \mathbf{B}^T \mathbf{C}(\rho^e) \mathbf{B} d\Omega \quad (۹-۳)$$

$$\mathbf{M}^e(\rho^e) = \rho^e \int_{\Omega^e} \mathbf{N}^T p \mathbf{N} d\Omega \quad (۱۰-۳)$$

بنابراین ماتریس‌های سختی و جرم کل سازه به‌صورت زیر محاسبه می‌گردند:

$$\mathbf{K} = \sum_{e=1}^{ne} \rho^e \mathbf{K}_e^* \quad , \quad \mathbf{M} = \sum_{e=1}^{ne} \rho^e \mathbf{M}_e^* \quad (۱۱-۳)$$

در رابطه‌ی بالا ne تعداد المان‌ها بوده و \mathbf{K}_e^* و \mathbf{M}_e^* ماتریس‌های سختی و جرم المان‌های سالم هستند. طبق تحقیقات صورت گرفته در این زمینه توسط دو^۱ و اولهف^۲ احتمال بروز خطا و ایجاد مودهای مصنوعی در برخی نواحی با چگالی‌های بسیار کم وجود دارد [۸۷]. از این رو یکی از معادلات اصلاح شده زیر برای مدل SIMP بایستی استفاده گردد:

$$\mathbf{M}^e(\rho^e) = \begin{cases} \rho^e \mathbf{M}^e & \rho^e > 0.1 \\ \left(6 \times 10^5 (\rho^e)^6 - 5 \times 10^6 (\rho^e)^7\right) \mathbf{M}^e & \rho^e \leq 0.1 \end{cases} \quad (12-3)$$

با در نظر گرفتن رابطه‌ی بالا دیگر مودهای مصنوعی تأثیری بر روند بهینه‌سازی نگذاشته و خطایی در این زمینه نتایج را تحت تأثیر قرار نخواهد داد.

۳-۹ تعادل دینامیکی

فرم کلی تعادل دینامیکی به صورت رابطه‌ی ۳-۱۳ است. حال می‌توان این معادله را برای سازه‌های متشکل از چند جزء به صورت ماتریسی و به شکل زیر در نظر گرفت:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = 0 \quad (13-3)$$

در رابطه‌ی بالا \mathbf{M} و \mathbf{C} و \mathbf{K} به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی نام دارند. ماتریس میرایی یکی از مشخصه‌های دینامیکی سازه است که در رفتار سازه تأثیر دارد. ماتریس میرایی یک ماتریس مربعی بوده و می‌تواند ماتریسی قطری و یا غیر قطری باشد. در صورتی که این ماتریس قطری باشد می‌توان از روش‌های کلاسیک بر اساس حل معادله استفاده کرد. در صورت قطری نبودن این ماتریس دیگر روش‌های کلاسیک برای حل معادله حرکت مورد استفاده قرار نمی‌گیرند [۸۸]. در این پژوهش از

¹ Du

² Olhoff

ماتریس میرایی و اثرات آن صرف نظر شده است. با صرف نظر از میرایی، معادله‌ی کلی به شکل زیر تغییر می‌کند:

$$\mathbf{M} \ddot{\boldsymbol{\varphi}}_n + \mathbf{K} \mathbf{y} \boldsymbol{\varphi}_n = 0 \Rightarrow (\mathbf{M} \ddot{\mathbf{y}} + \mathbf{K} \mathbf{y}) \boldsymbol{\varphi}_n = 0 \quad (14-3)$$

با جایگذاری $y = e^{i\omega t}$ معادله بالا به فرم زیر تغییر می‌یابد:

$$[-\omega_n^2 \mathbf{M} e^{i\omega t} + \mathbf{K} e^{i\omega t}] \boldsymbol{\varphi}_n = 0 \xrightarrow{y=e^{i\omega t}} [-\omega_n^2 \mathbf{M} \mathbf{y} + \mathbf{K} \mathbf{y}] \boldsymbol{\varphi}_n = 0 \quad (15-3)$$

عبارت بالا در حالتی صفر می‌شود که معادله‌ی پایین برقرار باشد:

$$\mathbf{K} \boldsymbol{\varphi}_n = \omega_n^2 \mathbf{M} \boldsymbol{\varphi}_n \rightarrow \mathbf{K} \boldsymbol{\varphi}_n = \lambda \mathbf{M} \boldsymbol{\varphi}_n \quad (16-3)$$

برای حل معادله‌ی بالا که یک مسئله‌ی مقادیر ویژه در حالت کلی است باید از روش‌های ریاضی کمک گرفته و سپس به $\omega_n^2 = \lambda$ مقدار ویژه و $\boldsymbol{\varphi}_n$ بردار ویژه متناظر با آن بر اساس تعداد مودها دست یافت. با استفاده از ماتریس‌های سختی و جرم در این معادله، فرکانس‌های طبیعی سازه (ω_i) به دست آمده و سپس با حل معادله تعادل دینامیکی در ارتعاش آزاد یک مود، (φ_i) به صورت زیر، محاسبه می‌شود:

$$(\mathbf{K} - \lambda_i \mathbf{M}) \boldsymbol{\varphi}_i = 0 \quad (17-3)$$

در رابطه‌ی بالا به ازای تعداد مودهای معین می‌توان فرکانس‌های طبیعی و بردارهای طبیعی را به دست آورد تا در فرآیند بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گیرند. معادله‌ی ۱۷-۳ با کمک توابع کتابخانه‌ای متلب، به ازای تعداد مودهای مشخص حل شده است. مودها بر اساس فرکانس‌های طبیعی از کوچک به بزرگ مرتب شده‌اند. برای مثال‌های بخش پنجم نیز از پنج مود اول سازه (از فرکانس کوچکتر به بزرگتر) استفاده شده است.

۳-۱۰ تحلیل حساسیت

یکی از بخش‌های مهم در مسائل بهینه‌سازی را می‌توان تحلیل حساسیت دانست، چراکه به روند بهینه‌سازی کمک فراوانی می‌کند. تحلیل حساسیت در واقع به بررسی تغییرات تابع هدف نسبت به متغیرهای طراحی می‌پردازد. به عبارت دیگر، تحلیل حساسیت به دنبال تغییرات ایجادشده خروجی ناشی از تغییرات ایجادشده در متغیرهای ورودی است که مشابه تعریف مشتق می‌باشد.

روش‌های بهینه‌سازی به دو بخش عمده‌ی فرا ابتکاری^۱ و روش‌های ریاضی تقسیم می‌شوند که به روش‌های ریاضی، روش‌های کلاسیک نیز گفته می‌شود. در روش‌های فرا ابتکاری از الگوریتم‌های طبیعی مانند الگوریتم ژنتیک و کلونی مورچه‌ای و غیره استفاده می‌شود. در این روش‌ها تابع هدف مورد نظر توسط الگوریتم‌های فرا ابتکاری بهینه می‌شود. در روش‌های ریاضیاتی مشتق تابع هدف نسبت به متغیر طراحی از دو روش عددی و تحلیلی به دست می‌آید که در نهایت برای بهینه کردن تابع هدف مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش تحلیلی از دقت بالاتری نسبت به روش عددی برخوردار است اما در تمام مسائل مشتق تابع هدف نسبت به متغیر طراحی مستقیماً قابل دسترسی نبوده که در این حالت مشتق عددی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳-۱۰-۱ روش تفاضل محدود^۲

تفاضل محدود یک روش ریاضی برای به دست آوردن مقدار تقریبی حساسیت است. در این روش از تعریف مشتق استفاده شده و با تفاضل مقادیر تابع هدف به ازای تغییر کوچکی در ورودی تابع استفاده می‌شود. اساس این روش برای حل معادلات، استفاده از تعریف مشتق است. برای مشتق تابع f در نقطه‌ی x از رابطه‌ی زیر استفاده می‌کنیم:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{f(x + dx) - f(x)}{dx} \quad (۳-۱۸)$$

^۱ Meta Heuristic

^۲ Finite Difference

به کمک رابطه‌ی بالا می‌توان مشتق هر تابعی را به‌طور تقریبی محاسبه کرد. از معایب این روش می‌توان به‌سرعت پایین آن اشاره کرد. از مزیت‌های این روش هم می‌توان به کاربردی بودن آن در بیشتر مسائل اشاره کرد. این امر در مسائلی که به مشتق تحلیلی تابع هدف دسترسی نداریم می‌تواند مفید واقع شود.

۳-۱۰-۲ مشتق‌گیری تحلیلی

برخلاف روش قبل که به‌صورت تقریبی مقدار مشتق را فراهم می‌کرد، مشتق‌گیری تحلیلی با استفاده از روابط ریاضیاتی، مقدار دقیق مشتق را بدون نیاز به محاسبه‌ی کامل تابع هدف در اختیار قرار می‌دهد که همین امر موجب صرفه‌جویی در زمان می‌شود. با توجه به اینکه در تابع هدف موردنظر که در بخش ۳-۷ معرفی شد هم مشتق فرکانس طبیعی و هم مشتق بردار مودی نیاز است، هر یک را جداگانه موردبررسی قرار می‌دهیم.

• مشتق تحلیلی فرکانس طبیعی

برای محاسبه‌ی مشتق تحلیلی فرکانس طبیعی نسبت به متغیر طراحی (چگالی المان‌ها) از رابطه‌ی ۳-۱۷ استفاده می‌کنیم و آن را به شکل زیر بازنویسی می‌کنیم [۸۹]:

$$\mathbf{K} \boldsymbol{\varphi}_i = \lambda_i \mathbf{M} \boldsymbol{\varphi}_i \quad (۱۹-۳)$$

بردار ویژه $\boldsymbol{\varphi}_i$ ، λ_i امین شکل مودی و λ_i مجذور i امین فرکانس طبیعی است. بردار ویژه $\boldsymbol{\varphi}_i$ ابتدا باید بر اساس جرم نرمالیزه شود که در رابطه‌ی پایین به آن اشاره شده است:

$$\boldsymbol{\varphi}_i^T \mathbf{M} \boldsymbol{\varphi}_i = 1 \quad (۲۰-۳)$$

با مشتق‌گیری از طرفین رابطه‌ی ۳-۱۷ نسبت به متغیر طراحی، شکل معادله به‌صورت زیر می‌شود:

$$\left(\frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \rho^e} - \lambda_i \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \rho^e} \right) \boldsymbol{\varphi}_i - \frac{\partial \lambda_i}{\partial \rho^e} \mathbf{M} \boldsymbol{\varphi}_i + (\mathbf{K} - \lambda_i \mathbf{M}) \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}_i}{\partial \rho^e} = 0 \quad (۲۱-۳)$$

در معادله‌ی بالا با توجه به معادله‌ی ۳-۱۷ بخش سوم که حاوی مشتق بردار مودی است صفر می‌شود. سپس با ضرب طرفین رابطه در $\boldsymbol{\Phi}_i^T$ ، معادله‌ی بالا به شکل زیر در می‌آید:

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial \rho^e} = \boldsymbol{\Phi}_i^T \left(\frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \rho^e} - \lambda_i \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \rho^e} \right) \boldsymbol{\Phi}_i \quad (۳-۲۲)$$

بنابراین با داشتن مشتق فرکانس‌های طبیعی می‌توان مشتق تابع هدف اول که در بخش ۳-۷ معرفی گردید را به شکل زیر به دست آورد:

$$\frac{\partial f(\boldsymbol{\rho})}{\partial \rho^e} = \sum_{i=1}^{mm} 2w_i^\lambda \left(\frac{\partial \lambda_i}{\partial \rho^e} \right) \left(\frac{\lambda_i(\boldsymbol{\rho}) - \lambda_i^*}{(\lambda_i^*)^2} \right) \quad (۳-۲۳)$$

با توجه به اینکه فرکانس‌های طبیعی برای شناسایی آسیب از دقت و حساسیت مناسبی برخوردار نیستند، لذا از این تابع هدف در این پژوهش استفاده نشده. با توجه به اینکه مشتقات فرکانس در محاسبه‌ی مشتقات بردار مودی استفاده می‌شود لذا مشتق تابع هدف مبتنی بر فرکانس نیز محاسبه شده است.

• مشتق تحلیلی اشکال مودی

برخلاف فرکانس‌های طبیعی، مشتق بردار مودی به‌سادگی قابل محاسبه نیست، چراکه در این حالت مستلزم حل دستگاه تکیه هستیم که خود امری پیچیده است. در تحقیقات انجام‌شده دو رویکرد به‌منظور مقابله با این مشکل معرفی شده [۸۹] که در این تحقیق به یکی از آن‌ها می‌پردازیم. به این منظور ابتدا برای ساده‌تر شدن روابط \mathbf{F}_i را به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{K} - \lambda_i \mathbf{M} \quad (۳-۲۴)$$

در گام بعدی با مشتق‌گیری از روابط ۳-۱۷ و ۳-۲۰ به روابط زیر می‌رسیم:

$$\mathbf{F}_i \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}_i}{\partial \rho^e} = -\frac{\partial \mathbf{F}_i}{\partial \rho^e} \boldsymbol{\varphi}_i, \quad 2\boldsymbol{\varphi}_i^T \mathbf{M} \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}_i}{\partial \rho^e} = -\boldsymbol{\varphi}_i^T \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \rho^e} \boldsymbol{\varphi}_i \quad (25-3)$$

با ترکیب روابط بالا به رابطه‌ی پایین می‌رسیم:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}_i \\ 2\boldsymbol{\varphi}_i^T \mathbf{M} \end{bmatrix} \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}_i}{\partial \rho^e} = -\begin{bmatrix} \partial \mathbf{F}_i / \partial \rho^e \\ \boldsymbol{\varphi}_i^T (\partial \mathbf{M} / \partial \rho^e) \end{bmatrix} \boldsymbol{\varphi}_i \quad (26-3)$$

با ضرب طرفین معادله در $[\mathbf{F}_i / \boldsymbol{\varphi}_i^T \mathbf{M}]$ ، معادله‌ی نهایی به شکل زیر درمی‌آید:

$$\frac{\partial \boldsymbol{\varphi}_i(\boldsymbol{\rho})}{\partial \rho^e} = -[\mathbf{F}_i \mathbf{F}_i + 2\mathbf{M} \boldsymbol{\varphi}_i \boldsymbol{\varphi}_i^T \mathbf{M}]^{-1} \left[\mathbf{F}_i \frac{\partial \mathbf{F}_i}{\partial \rho^e} + \mathbf{M} \boldsymbol{\varphi}_i \boldsymbol{\varphi}_i^T \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \rho^e} \right] \boldsymbol{\varphi}_i \quad (27-3)$$

در رابطه‌ی بالا:

$$\frac{\partial \mathbf{F}_i}{\partial \rho^e} = \left[\frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \rho^e} - \lambda_i \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \rho^e} - \frac{\partial \lambda_i}{\partial \rho^e} \mathbf{M} \right] \quad (28-3)$$

درنهایت با داشتن مشتق بردار مودی می‌توانیم مشتق تابع هدف نسبت به متغیر طراحی را به صورت

زیر در نظر بگیریم:

$$\frac{\partial f(\boldsymbol{\rho})}{\partial \rho^e} = \sum_{i=1}^{nm} w_i^\varphi \sum_{j=1}^{np} 2 \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}_{ij}(\boldsymbol{\rho})}{\partial \rho^e} \frac{\boldsymbol{\varphi}_{ij}(\boldsymbol{\rho})}{|\boldsymbol{\varphi}_{ij}(\boldsymbol{\rho})|} \left(|\boldsymbol{\varphi}_{ij}(\boldsymbol{\rho})| - |\boldsymbol{\varphi}_{ij}^*| \right) \quad (29-3)$$

با داشتن مشتق تحلیلی تابع هدف می‌توانیم بهینه‌سازی را با دقت بالاتر و سرعت بهتر انجام دهیم.

شایان‌ذکر است که برای به دست آوردن معادله‌ی ۲۷-۳ نیاز به حل مسئله‌ی معکوس می‌باشد که

استفاده از روش‌های عددی می‌تواند در تسریع حل معادله مؤثر باشد. بنابراین معادله‌ی ۲۷-۳ به کمک

روش حداقل باقیمانده^۱ حل شده است.

¹ Minimum Residual Method

۳-۱۱ روش بهینه‌سازی تندترین شیب نزولی^۱

در هر مسئله‌ی بهینه‌سازی استفاده از روش بهینه‌سازی مناسب می‌تواند بسیار تأثیرگذار باشد. هدف اصلی از بهینه‌سازی، حداقل یا حداکثر کردن تابع هدف است. مسئله‌ی بهینه‌سازی مورد بحث در این پژوهش به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\min_{\rho} : \left\{ f(\rho) = \sum_{i=1}^{nm} \sum_{j=1}^{np} (|\varphi_{ij}| - |\varphi_{ij}^*|)^2 \right\} \quad (30-3)$$

Subjected to : $0 \leq \rho_k \leq 1$, $k=1, \dots, ne$

در رابطه‌ی فوق nm تعداد مودها، np تعداد درجات آزادی، ne تعداد المان‌ها، ρ متغیر طراحی یا همان چگالی المان‌ها، φ^* بردار مودی سازه‌ی آسیب‌دیده و φ بردار مودی مدل عددی است. در این پژوهش از بهینه‌سازی به روش تندترین شیب نزولی برای به حداقل رساندن اختلاف بین مقادیر تابع هدف سازه‌ی آسیب‌دیده و سازه‌ی تحلیلی است. به این منظور مصالح مصنوعی برای المان‌ها در نظر گرفته شده که به کمک آن برای هر المان چگالی تعریف شده که متغیر طراحی مسئله است. در روش تندترین شیب نزولی که یک روش مرحله‌ای است، در هر مرحله مقادیر چگالی تغییر کرده و با گذشت چندین مرحله در نهایت اختلاف بین مقادیر تابع هدف سازه‌ی آسیب‌دیده و سازه‌ی تحلیلی به حداقل می‌رسد که به معنی موفقیت الگوریتم در شناسایی محل و شدت آسیب است.

نحوه‌ی عملکرد روش تندترین شیب نزولی به این‌گونه است که ابتدا یک جهت برای حرکت در نظر می‌گیرد و سپس متناسب با جهت حرکت، به اندازه‌ی گام حرکت پیش می‌رود. انتخاب جهت به‌گونه‌ای است که تندترین شیب را در نظر بگیرد تا هرچه سریع‌تر به پاسخ بهینه برسد و به همین علت است که تندترین شیب نزولی نامیده می‌شود. برای جهت حرکت از مشتقات تابع هدف که در مرحله‌ی قبل محاسبه شد استفاده می‌شود و سپس با توجه با مقادیر تابع هدف، به کمک روش جست‌وجوی طلایی^۲

¹ Steepest Descent Method

² Golden Search Method

گام حرکت تعیین شده و الگوریتم به یک گام به جلو حرکت می‌کند. در گام بعد دوباره شیب نقاط حساب شده و متناسب با شیبی که بیشترین تغییر را ایجاد کند به اندازه‌ی گام حرکت جدید پیشروی می‌کند. پیدا کردن گام حرکت زمانی ممکن است که تابع هدف پیچیده نبوده و فرم ضمنی نداشته باشد. به همین جهت روش‌های عددی در تعیین گام حرکت استفاده می‌شوند تا از مشکلات ناشی از پیچیدگی تابع هدف اجتناب شود [۹۰].

روش‌های مختلفی برای تعیین یک راستای مناسب برای روش‌های بهینه‌سازی نامقید وجود دارند. روش تندترین شیب نزولی ساده‌ترین و احتمالاً شناخته‌شده‌ترین روش عددی برای بهینه‌سازی نامقید می‌باشد. اساس این روش که توسط کوشی در سال ۱۸۴۷ معرفی شده است [۹۱] بر یافتن یک جهت \mathbf{d} در اثر تکرار است به گونه‌ای که تابع هدف $f(\xi)$ بیشترین کاهش را داشته باشد. به این دلیل این روش، تندترین شیب نزولی نامیده می‌شود. همچنین، خواص گرادیان تابع هدف در فرآیند تکراری مورد استفاده قرار می‌گیرند که دلیلی بر نام دیگر این رویکرد روش گرادیان است. رویه تندترین شیب نزولی یک روش مرتبه اول است، چراکه تنها گرادیان تابع هدف، به منظور ارزیابی راستای جستجو، محاسبه می‌شود. گرادیان یک تابع اسکالر را می‌توان به صورت بردار ستونی زیر تعریف کرد:

$$\mathbf{c} = \nabla f = \left[\frac{\partial f}{\partial \rho_1} \quad \frac{\partial f}{\partial \rho_2} \quad \dots \quad \frac{\partial f}{\partial \rho_n} \right] \quad (31-3)$$

برای ساده‌سازی این نشانه‌گذاری، از بردار \mathbf{c} به منظور نشان دادن گرادیان تابع هدف $f(\rho)$ استفاده می‌شود که عبارت است از: $c_i = \partial f / \partial \rho_i$. به منظور مشخص کردن نقطه‌ای از بردار که در آن گرادیان محاسبه می‌شود، از اندیس i استفاده شده است:

$$\mathbf{c}^k = \mathbf{c}(\rho^k) = \left[\frac{\partial f(\rho^k)}{\partial \rho_i} \right]^T \quad (32-3)$$

در رابطه‌ی بالا k شماره‌ی گام فرآیند بهینه‌سازی است. استفاده از بردار گرادیان در روش تندترین شیب نزولی به دلیل ویژگی‌هایی که دارد مورد توجه قرار گرفته است. مهم‌ترین ویژگی این بردار جهت آن به سمتی است که تابع هدف بیشترین شیب را در آن نقطه دارد. این روش با استفاده از مشتق اول، بیشترین تغییرات را در تابع پیدا کرده و عکس آن جهت حرکت می‌کند تا به نقطه‌ی مینیمم برسد. با کوچک‌ترین حرکت در راستای به‌دست‌آمده، شاهد بیشترین تغییر در تابع هدف خواهیم بود. بنابراین فرم اصلی برای جهت حرکت به صورت زیر است:

$$\mathbf{d}^k = -\mathbf{c}^k = -\nabla f(\rho^k) \quad (33-3)$$

با داشتن جهت حرکت می‌توان الگوریتم بهینه‌سازی را به صورت زیر بنویسیم:

$$\rho^{k+1} = \rho^k + \alpha^k \mathbf{d}^k \quad (34-3)$$

در رابطه‌ی بالا α^k گام حرکت است که در بخش بعد به نحوه‌ی محاسبه‌ی آن پرداخته خواهد شد. همان‌طور که مشخص است، مقادیر چگالی در هر گام از چگالی در مرحله‌ی قبل استفاده شده که در خلاف جهت بیشترین شیب و به طول گام معین تغییر یافته است که این تغییر با چندین گام تکرار، در نهایت منجر به بهینه شدن تابع هدف می‌شود. در ادامه روند اجرای این روش به صورت گام‌به‌گام برای درک بهتر توضیح داده شده است:

گام ۱. در این گام مقدار اولیه برای متغیرهای طراحی در نظر گرفته می‌شود که در مسئله‌ی شناسایی آسیب در این پژوهش برای تمامی المان‌ها مقدار ۱ به عنوان فرض اولیه تعیین می‌شود.

گام ۲. محاسبه‌ی مقادیر ویژه، بردارهای ویژه و مشتقات آن‌ها به منظور تعیین بیشترین شیب و جهت-یابی الگوریتم بهینه‌سازی.

گام ۳. محاسبه‌ی بهینه‌ترین گام حرکت با روش جست‌وجوی طلایی.

گام ۴. به‌روزرسانی متغیرهای طراحی با استفاده از رابطه‌ی ۳-۳۴ و به دست آوردن مقادیر جدید برای متغیرهای طراحی.

گام ۵. تکرار گام‌های اول تا چهارم تا جایی که مقادیر تابع هدف کمینه شود.

روش تندترین شیب نزولی باوجود ساده بودن، بسیار کارآمد و مؤثر است و برای کمینه کردن تابع هدف مسئله‌ی موردبررسی در این پژوهش موفقیت‌آمیز عمل کرده است. با توجه به این که این روش یک روش بهینه‌سازی نامقید است، برای پایان چرخه‌ی بهینه‌سازی هیچ قیدی در نظر گرفته نشده است. برای آگاهی از بهینه شدن تابع هدف با این روش کافی است نمودار تاریخچه‌ی تابع هدف به ازای تعداد گام‌ها، در انتهای نمودار به صفر و یا مقادیر خیلی کوچک میل کند [۹۰].

۳-۱۲ روش جستجوی طلایی^۱ برای پیدا کردن گام حرکت

گام حرکت می‌تواند در روند بهینه‌سازی بسیار تعیین‌کننده باشد. به‌گونه‌ای که اگر گام حرکت کوچک در نظر گرفته شود، تعداد گام‌ها افزایش می‌یابد و به تبع آن زمان رسیدن به پاسخ بهینه افزایش چشمگیری پیدا می‌کند. از طرف دیگر با بزرگ در نظر گرفتن گام ممکن است الگوریتم حالت بهینه را رد کرده و دچار ایرادات محاسباتی و درنهایت واگرایی شود. گام حرکت باید به‌گونه‌ای در نظر گرفته شود که در ابتدا بزرگ بوده و سپس با نزدیک‌تر شدن به نقطه‌ی بهینه، به‌مرور کوچک‌تر شود. درواقع پیدا کردن خود گام حرکت هم یک مسئله‌ی بهینه‌سازی با ابعاد کوچک‌تر است که به کمک روش‌های ساده‌ی بهینه‌سازی قابل‌تشخیص است. سه روش عمده برای تعیین گام حرکت در نظر گرفته می‌شود. روش‌های جست‌وجو بر اساس حذف بازه‌ها مانند فیبوناچی^۲ و جستجوی طلایی^۳، روش جست‌وجو بر اساس محاصره و جست‌وجو بر اساس برازش منحنی^۳.

در این تحقیق از روش جست‌وجوی طلایی استفاده شده است. این روش در ابتدا با توجه به مقدار اولیه‌ی تابع، یک گام اولیه در نظر گرفته و رفته‌رفته با توجه به تغییرات تابع هدف، گام را کاهش می‌دهد. این

¹ Golden Search Method

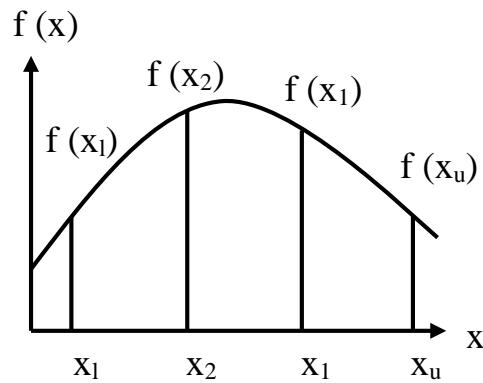
² Fibonacci

³ Curve Fitting

روش را می‌توان به‌عنوان یکی از بهترین روش‌های کاهش بازه در نظر گرفت. این روش هم مانند سایر روش‌های کاهش فاصله‌ای رفتار می‌کند. مراحل این روش عبارت‌اند از: ۱- ارزیابی مقدار تابع در نقاط از پیش تعیین‌شده و مقایسه‌ی آن‌ها ۲- مقایسه برای محصور کردن مقدار حداقل در گام قبل ۳- همگرایی به نقطه‌ی مینیمم در مرحله‌ی دوم با استفاده از روند کاهشی بازه عدم قطعیت. مزیت این روش نسبت به سایر روش‌های کاهش بازه‌ای تعداد پایین ارزیابی‌های تابع در طی دو مرحله است که در صرفه‌جویی زمان بسیار مفید است.

این روش در واقع یک تکنیک برای پیدا کردن اکستریم تابع پیوسته با محصور کردن بازه‌ی اکستریم است. علت نام‌گذاری این روش استفاده از فواصل سه‌نقطه‌ای است که فواصل طلایی نام دارند. این تکنیک در پیدا کردن اکستریم توابع تک متغیره استفاده شود که دارای یک اکستریم در بازه‌ی معین داشته باشند. استفاده از فواصل مساوی به این دلیل نامناسب است که ممکن است فواصل کوچک در نظر گرفته شوند و برای رسیدن به نقطه‌ی بهینه زمان زیادی طول بکشد. از طرف دیگر با بزرگ در نظر گرفتن فواصل ممکن است الگوریتم از نقطه‌ی بهینه عبور کرده و واگرا شود. روش جست‌وجوی طلایی با کاهش فاصله در هر گام، از فواصل بزرگ شروع شده و در گام‌های انتهایی فواصل کوچک می‌شوند تا نقطه‌ی بهینه به‌درستی تشخیص داده شود.

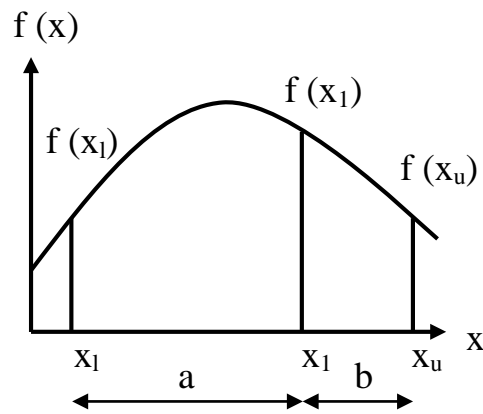
همان‌طور که در شکل ۳-۳ مشاهده می‌شود سه نقطه X_1, X_1, X_u در محور X ($X_1 < X_1 < X_u$) متناظر با مقادیر $f(X_1), f(X_1), f(X_u)$ از تابع هدف می‌باشند. از آنجایی که $f(X_1) < f(X_1)$ و $f(X_1) < f(X_u)$ ، مقدار ماکزیمم بایستی بین X_1, X_u باشد. نقطه چهارم X_2 ، برابر با بزرگ‌ترین مقدار از بین دو فاصله $[X_1, X_1]$ و $[X_1, X_u]$ در نظر گرفته می‌شود. با فرض اینکه فاصله $[X_1, X_1]$ بزرگ‌تر از $[X_1, X_u]$ باشد، بازه $[X_1, X_1]$ برای انتخاب X_2 انتخاب می‌شود. اگر $f(X_2) > f(X_1)$ باشد، سه نقطه به ترتیب $X_1 < X_2 < X_1$ ، و در غیر این صورت اگر $f(X_2) < f(X_1)$ باشد سه نقطه به ترتیب $X_2 < X_1 < X_u$ خواهند بود. این روند تا زمانی که فاصله بین نقاط به اندازه کافی کوچک شود، ادامه پیدا می‌کند [۹۰].



شکل ۳-۳ مقطعی از روش جستجوی طلایی [۹۰]

اولین نقطه متوسط x_1 به گونه‌ای انتخاب می‌شود که نسبت طول‌ها در معادله ۳-۳۴ برابر گردد. a و b همان‌طور که در شکل ۳-۴ نشان داده شده، معرف فاصله‌اند. انتخاب این فواصل به گونه‌ای است که مقدار $a+b$ برابر با حدفاصل بین نقاط x_u و x_1 باشد.

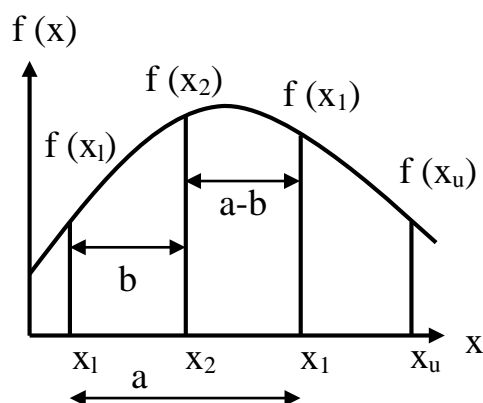
$$\frac{a}{a+b} = \frac{b}{a} \quad (3-35)$$



شکل ۳-۴ تعیین اولین نقطه متوسط [۹۰]

نقطه متوسط دوم x_2 به‌طور مشابه به گونه‌ای انتخاب شده است که نسبت در معادله زیر را تضمین کند. فواصل a و b در شکل ۳-۵ نشان داده شده‌اند.

$$\frac{b}{a} = \frac{a-b}{b} \quad (3-36)$$



شکل ۳-۵ تعیین دومین نقطه متوسط [۹۰]

در گام بعدی یک فاصله جدید و کوچک‌تر تعیین می‌شود که بیشترین مقدار تابع در آن بازه وجود دارد. قابل توجه است که بازه جدید $[x_1, x_2, x_1]$ یا $[x_2, x_1, x_u]$ است. برای تعیین اینکه کدامیک از این دو بازه در تکرار بعدی در نظر گرفته می‌شود، تابع در نقاط متوسط x_1 و x_2 مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل ۳-۵ اگر $f(x_2) > f(x_1)$ باشد ناحیه جدید مورد بررسی $[x_1, x_2, x_1]$ است و در غیر این صورت اگر $f(x_2) < f(x_1)$ باشد ناحیه کوچک‌تر جدید مورد بررسی $[x_2, x_1, x_u]$ است. در حالت اول مرزهای بازه توسط x_1 و x_1 تعیین می‌شوند و نقطه x_2 در مرحله قبل به‌گونه‌ای که نسبت به مرزهای بازه در وسط آن مشخص گردیده است. این روند تعیین بازه کوچک‌تر و یک نقطه متوسط جدید تا زمانی که فاصله بین نقاط مرزی به اندازه کافی کوچک شود، ادامه خواهد داشت [۹۰].

۳-۱۳ روش پیوسته‌سازی^۱

همان‌طور که پیش‌تر در مورد استفاده از مصالح مصنوعی همسانگرد با اعمال جریمه گفته شد، مقادیر چگالی المان‌های سازه در بخش‌هایی که مصالح وجود دارد نباید کمتر از یک باشد چراکه به معنی وجود حفره در مصالح بوده و این امر در واقعیت این‌چنین نیست. به این منظور از ضریب جریمه μ برای از بین بردن حفره‌های ایجادشده استفاده می‌شود. اما با توجه به اینکه با در نظر گرفتن ضریب جریمه در حقیقت یک ریز سازه‌ی مصنوعی برای بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود، در نهایت سازه‌ی واقعی است که باید بهینه شود. به این منظور از روش پیوسته‌سازی در مصالح استفاده می‌شود. به این‌گونه که ابتدا

^۱ Continuation Method

مقدار ۳ برای ضریب جریمه در نظر گرفته شده و به مرور متناسب با تعداد گام‌های در نظر گرفته شده این مقدار به ۱ می‌رسد و در نهایت روند بهینه‌سازی با سازه‌ی واقعی ادامه پیدا می‌کند [۲۳]. برای این پژوهش، با توجه به ورودی‌های برنامه، از رابطه‌ی زیر برای محاسبه‌ی ضریب جریمه در هر مرحله استفاده شده است:

$$\mu^{k+1} = \mu^k - \left(\frac{\mu_{initial} - 1}{n_{contin}} \right), \quad \mu \geq 1 \quad (37-3)$$

در رابطه‌ی بالا $\mu_{initial}$ مقدار اولیه ضریب جریمه است که در این تحقیق برابر ۳ در نظر گرفته شده است و n_{contin} تعداد گام‌هایی است که برای فرایند پیوسته‌سازی در نظر گرفته شده است.

۳-۱۴ ساختار برنامه کامپیوتری تهیه شده

به منظور شناسایی آسیب در سازه‌های سه‌بعدی با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی، برنامه‌ی با کمک نرم‌افزار MATLAB توسعه داده شده است که نحوه‌ی عملکرد این برنامه به صورت زیر است:

گام اول: در این گام داده‌های ورودی مانند مشخصات مصالح و مختصات نقاط و ماتریس هم‌بندی به برنامه داده می‌شوند.

گام دوم: داده‌های ورودی پردازش شده و مش بندی صورت می‌گیرد و مقادیر اولیه‌ی چگالی ($\rho = 1$) برای المان‌ها در نظر گرفته می‌شود.

گام سوم: تشکیل ماتریس جرم و سختی المان‌ها و سپس تشکیل ماتریس جرم و سختی برای کل سازه در دو حالت سازه‌ی آسیب‌دیده (که در بعضی از المان‌ها آسیب با کاهش چگالی در نظر گرفته شده) و سازه‌ی تحلیلی (که چگالی تمامی المان‌ها برابر ۱ در نظر گرفته شده).

گام چهارم: محاسبه‌ی فرکانس طبیعی و بردار مودی برای سازه‌ی آسیب‌دیده و سازه‌ی تحلیلی و نرمال کردن آن‌ها بر اساس جرم، برای مراحل بعد.

گام پنجم: در نظر گرفتن مؤلفه‌های دارای سنسور بردار مودی سازه‌ی سالم و اجرای الگوریتم گسترش مودی جهت دستیابی به تمامی داده‌های مودال سازه‌ی سالم جهت فرآیند شناسایی آسیب.

گام ششم: محاسبه‌ی مقدار اولیه‌ی تابع هدف به منظور تعیین گام هدف به کمک روش جست‌وجوی طلایی و به دست آوردن مقادیر اولیه‌ی مشتق متغیرهای طراحی به منظور استفاده در حلقه‌ی بهینه‌سازی.

گام هفتم: ورود به حلقه‌ی بهینه‌سازی با تعداد تکرار معین و محاسبه‌ی ضریب جریمه و طول گام حرکت برای اولین تکرار.

گام هشتم: آنالیز حساسیت تابع هدف برای به دست آوردن مشتقات تابع هدف و محاسبه‌ی مقدار تابع هدف.

گام نهم: به‌روزرسانی اولیه‌ی متغیرهای طراحی بر اساس روش تندترین شیب نزولی و محاسبه‌ی مقادیر جدید برای متغیرهای طراحی.

گام دهم: تکرار گام‌های هفتم تا نهم به تعداد تکرارهای در نظر گرفته‌شده.

فصل چهارم : مثال های عددی

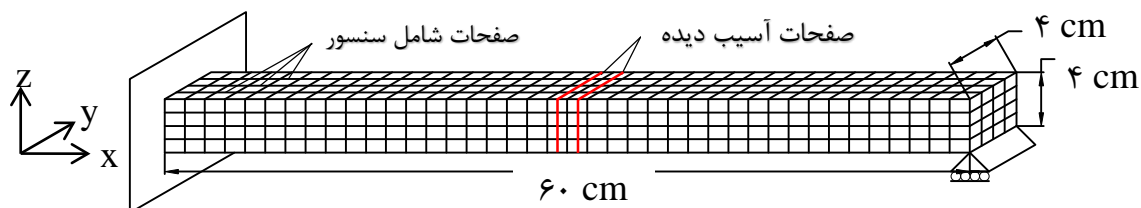
۴-۱ مقدمه

به منظور به نمایش گذاشتن دقت روش پیشنهاد شده در این پژوهش، مثال‌های عددی آورده شده‌اند. تابع هدف در این بخش اختلاف بردارهای مودی است که در بخش ۳-۷ به آن پرداخته شد. در مجموع ۶ مثال در این بخش مدل‌سازی شده که از مسائل ساده شروع شده و به مرور به پیچیدگی مسائل افزوده می‌شود. در مثال اول مقایسه‌ی دو روش گسترش دینامیکی و T_{SERET} صورت گرفته و در مثال‌های بعدی به شناسایی آسیب با کمک روش بهینه‌سازی توپولوژی و بهره‌گیری از تکنیک‌های گسترش مودی جهت دستیابی به اطلاعات کامل مودی پرداخته شده است. در تمامی مثال‌ها ضریب الاستیسیته ۲ پاسکال ضریب پواسون $0/3$ در نظر گرفته شده است. چگالی مواد مورد استفاده $0/00785$ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب (چگالی فولاد) در نظر گرفته شده است. ضریب جرمه در مثال‌ها دارای مقدار اولیه ۳ بوده و متناسب با تعداد گام‌های پیوسته‌سازی، طی روند بهینه‌سازی به مقدار ۱ کاهش می‌یابد. در تمامی مسائل ۵ مود اول سازه در نظر گرفته شده و در مثال ۳ تأثیر تعداد مود بر روند شناسایی آسیب بررسی شده و برای تعداد ۳، ۵ و ۱۰ مود اجرا شده است. مثال‌های مورد بررسی برای سه حالت در نظر گرفته می‌شوند. حالت اول فرض می‌شود تمامی داده‌های سازه‌ی آسیب‌دیده در دست می‌باشد و فرآیند شناسایی آسیب با داشتن تمامی داده‌های مودال صورت می‌گیرد. حالت دوم تعدادی از درجات آزادی مجهز به سنسور فرض شده‌اند و فرض می‌شود تنها در همان درجات آزادی داده‌های سازه‌ی آسیب‌دیده در دست است و به کمک تکنیک‌های گسترش مودی سایر داده‌ها تقریب زده می‌شوند. حالت سوم مشابه با حالت دوم است، با این تفاوت که تعداد درجاتی که در آن‌ها سنسور فرض شده کمتر بوده که موجب افزایش پیچیدگی بیشتر مسئله می‌شود.

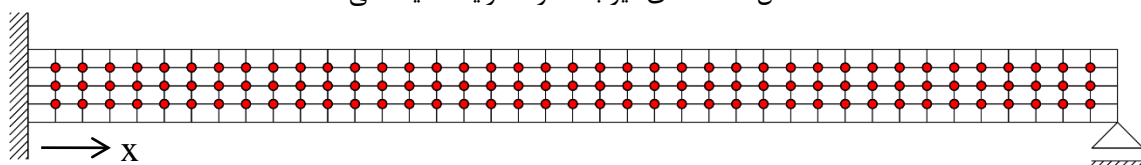
۴-۲ مثال اول

در این مثال تمرکز اصلی بر روی مقایسه‌ی عملکرد روش گسترش دینامیکی و T_{SEREP} است. به همین منظور یک تیر با مقطع مستطیل و ابعاد $4 \times 4 \times 60$ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. این تیر برای

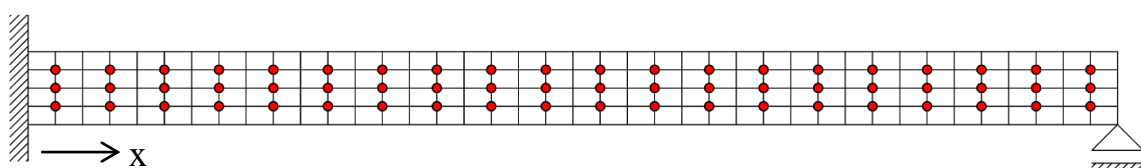
تحلیل اجزای محدود به ۶۴۰ المان با ابعاد $1 \times 1 \times 1,5$ سانتی متر تقسیم شده است. به منظور مقایسه‌ی دو روش گسترش مودی، دو حالت برای محل داده‌ها در نظر گرفته شده است. شکل ۴-۱ نمای سه بعدی تیر به همراه شرایط تکیه‌گاهی آن را نشان می‌دهد و در شکل ۴-۲ نحوه‌ی محل داده‌ها در دو حالت آورده شده است.



شکل ۴-۱. نمای تیر به همراه شرایط تکیه‌گاهی



(الف)

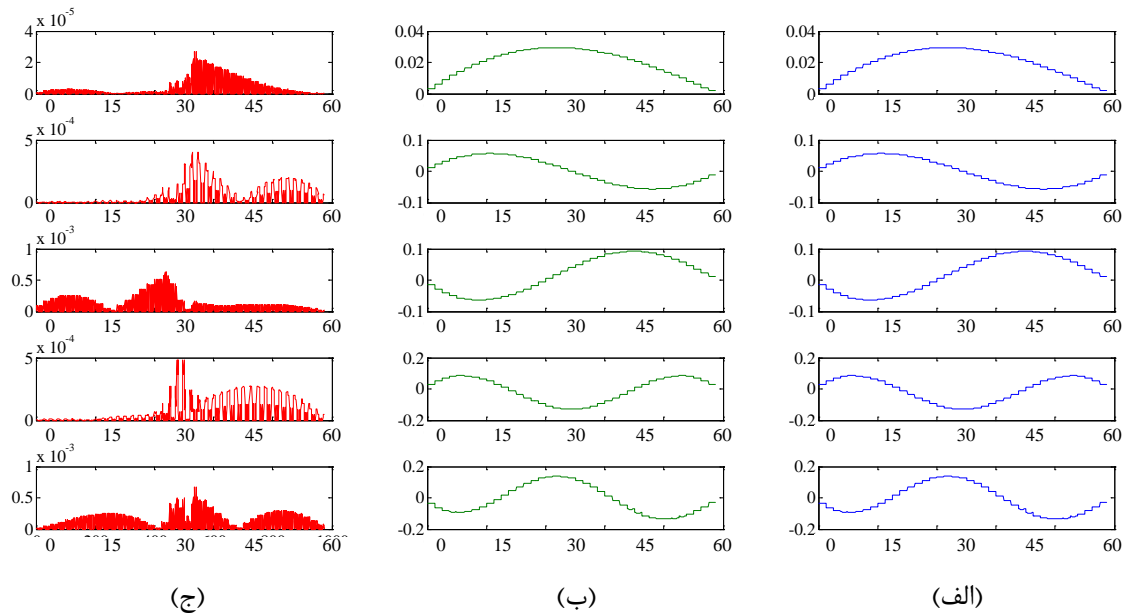


(ب)

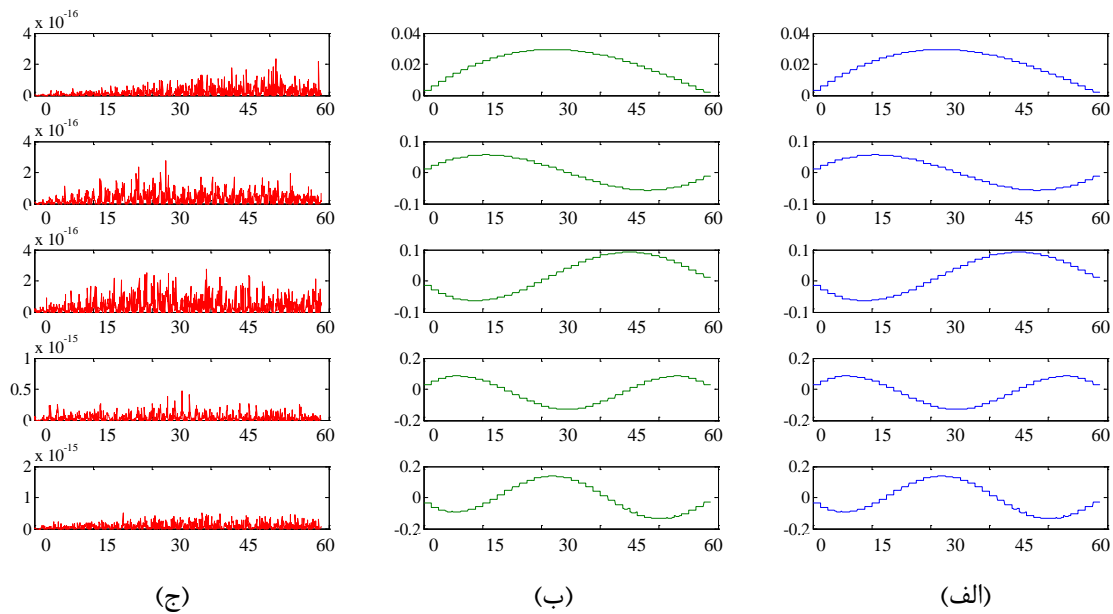
شکل ۴-۲. (الف) محل داده‌ها در حالت اول (ب) محل داده‌ها در حالت دوم در صفحات مشخص شده‌ی تیر مورد نظر، چهار المان میانی دارای آسیب با شدت ۵۰ درصد می‌باشند. به منظور مقایسه‌ی تکنیک‌های گسترش مودی، ابتدا تمام بردارهای مودی به طور دقیق محاسبه می‌شوند. سپس با توجه به حالت اول و دوم، درجات آزادی دارای سنسور به عنوان نقاط معلوم انتخاب شده و با داشتن داده‌های نقاط مذکور، به محاسبه‌ی سایر نقاط پرداخته می‌شود. سپس با محاسبه‌ی اختلاف داده‌های تقریب زده شده و داده‌های دقیق، به بررسی عملکرد روش‌های تکنیک مودی می‌پردازیم. در ابتدا برای حالت اول محل داده‌ها که در شکل ۴-۲ (الف) آورده شده است، بردارهای مودی

را با استفاده از دو روش گسترش مودی و T_{SEREP} محاسبه کرده و با مقادیر دقیق مقایسه می‌کنیم. در

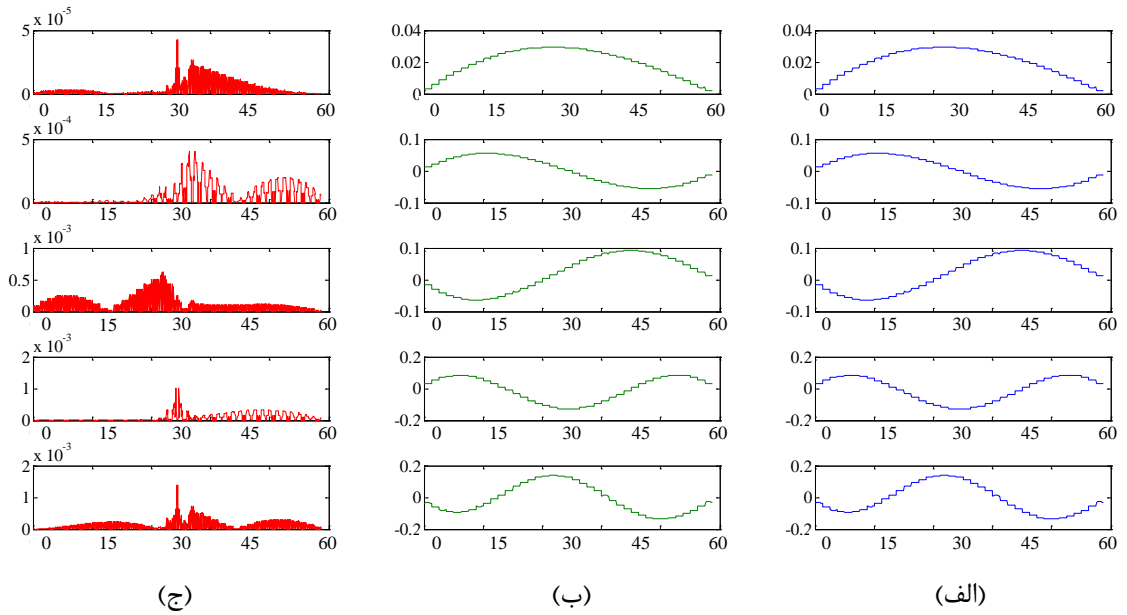
شکل ۳-۴ بردارهای مودی با روش T_{SEREP} ، برای جهت X محاسبه شده.



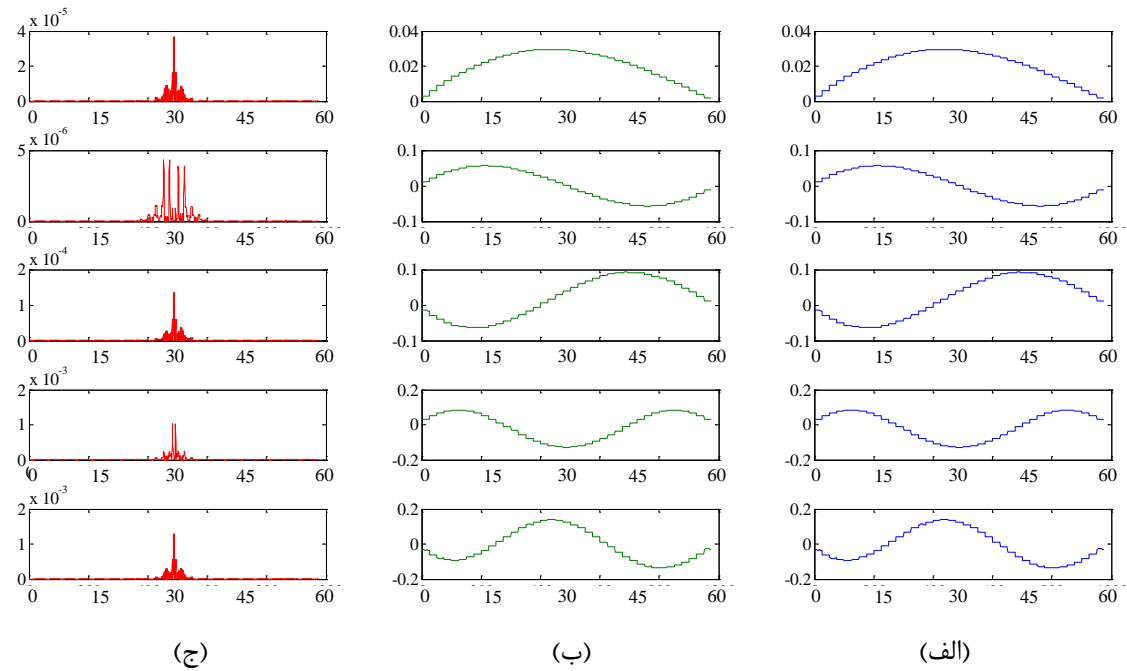
شکل ۳-۴ (الف) بردار مودی تقریبی در جهت X (ب) بردار مودی دقیق در جهت X (ج) اختلاف بردارهای مودی. نتایج بالا بیانگر ۵ مود اول تیر موردنظر می‌باشند که ردیف اول نمودارها مربوط به مود اول بوده و به ترتیب تا ردیف پنجم که مربوط به مود پنجم است ادامه یافته است. با توجه به نتایج فوق، می‌توان دید که بردار مودی در برخی از مودها دارای خطا بوده و حداکثر اختلاف بین داده‌ها از مرتبه‌ی 10^{-3} است. در ادامه نتایج روش گسترش مودی در شکل ۴-۴ برای جهت X آورده شده است.



شکل ۴-۴ (الف) بردار مودی تقریبی در جهت X (ب) بردار مودی دقیق در جهت X (ج) اختلاف بردارهای مودی. با توجه به نتایج بالا می‌توان گفت که بردارهای مودی تقریبی و دقیق با هم برابر هستند، چراکه شکل نمودارها در حالت تقریبی و حالت دقیق یکسان بوده و بیشترین اختلاف بین بردارهای مودی از مرتبه‌ی 10^{-15} است که در عمل قابل صرف‌نظر است و شناسایی آسیب به چنین تفاوت‌های ناچیزی حساسیت ندارد. بنابراین انتظار می‌رود که نتایج شناسایی آسیب با استفاده از تکنیک گسترش دینامیکی دقت بالاتری نسبت به روش T_{SEREP} داشته باشد. در مثال بعد به شناسایی آسیب با استفاده از دو روش گفته‌شده پرداخته می‌شود و تأثیر اختلاف بین دو روش نمایش داده می‌شود. در ادامه به حالت دوم مسئله پرداخته می‌شود که محل داده‌ها طبق شکل ۴-۲ (ب) بوده و نتایج برای روش T_{SEREP} در شکل ۴-۵ برای محور X آورده شده است.



شکل ۴-۵ (الف) بردار مودی تقریبی در جهت X (ب) بردار مودی دقیق در جهت X (ج) اختلاف بردارهای مودی. نتایج به دست آمده در این حالت تقریباً مشابه با حالت قبل است، تنها تفاوت در این حالت بیشتر شدن مقادیر اختلاف دو بردار می باشد که زیاد نیست. همانند حالت قبل، شکل بردارهای مودی در روش تقریبی با روش دقیق متفاوت بوده و حداکثر تغییرات از مرتبه 10^{-3} است. در ادامه نتایج روش گسترش دینامیکی برای حالت دوم، در شکل ۴-۶ برای جهت X آورده شده اند.

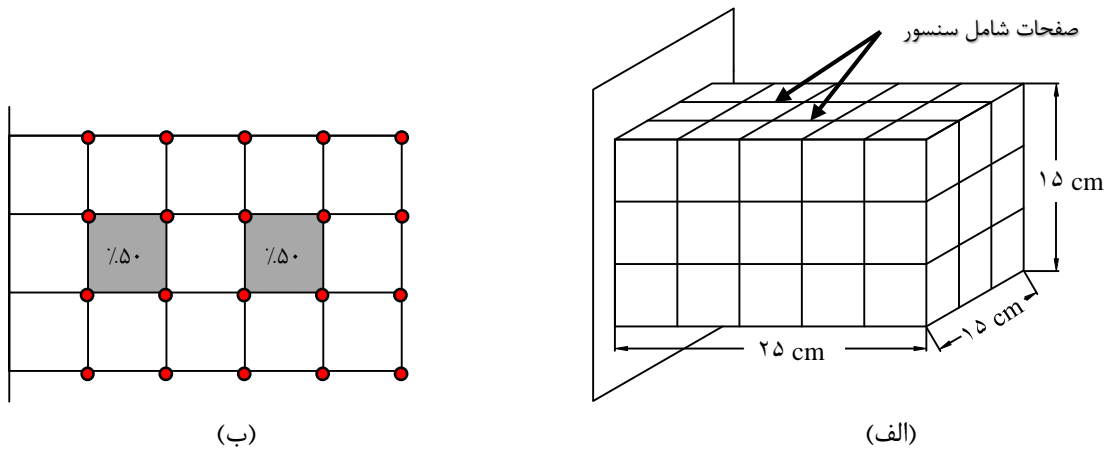


شکل ۴-۶ (الف) بردار مودی تقریبی در جهت X (ب) بردار مودی دقیق در جهت X (ج) اختلاف بردارهای مودی.

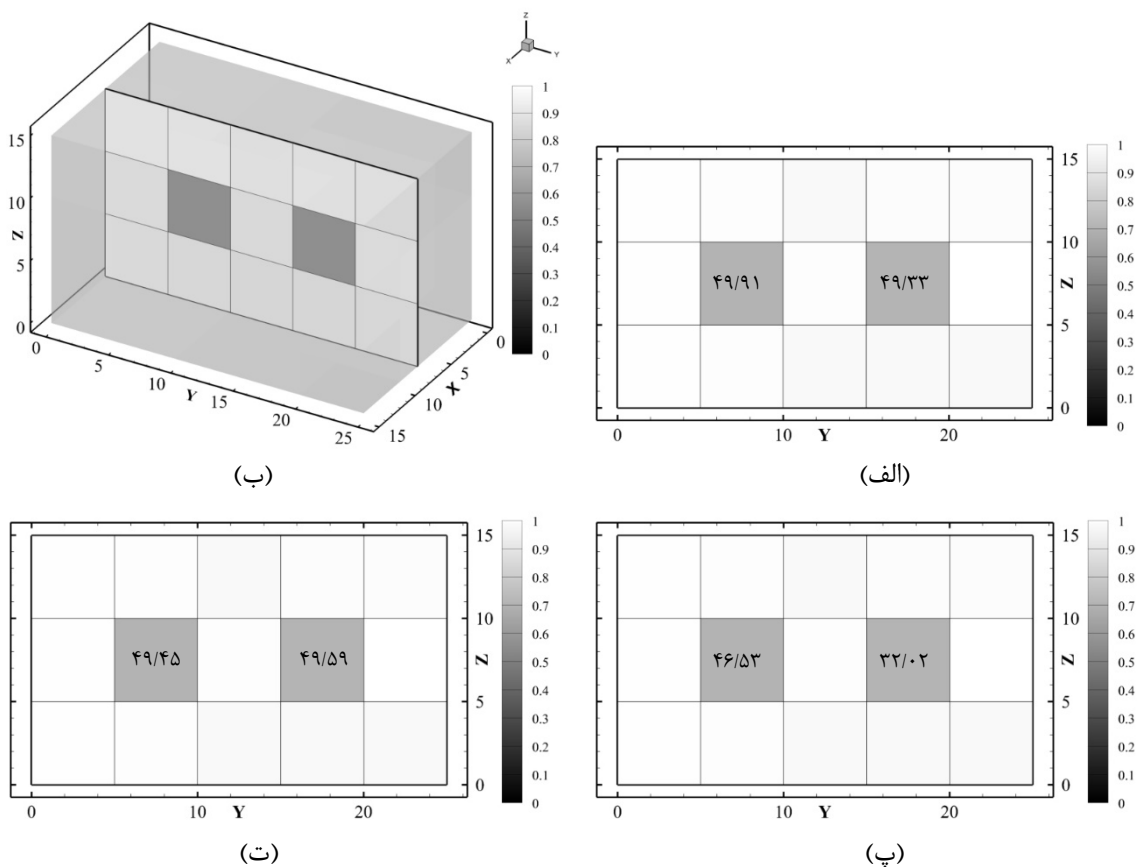
همانند حالت قبل، شکل بردارهای مودی تقریبی و دقیق با روش گسترش دینامیکی یکسان هستند اما در این حالت حداکثر اختلاف دو بردار مودی از مرتبه‌ی 10^{-3} است که در حالت قبل 10^{-15} بود. پایین بودن تعداد نقاط معلوم می‌تواند دلیل این امر باشد. در این حالت هر دو روش دارای اختلاف از مرتبه‌ی یکسانی هستند اما با توجه به نمودارها می‌توان مشاهده کرد که در حالت گسترش دینامیکی تقریباً در تمام نقاط مقادیر اختلاف دو نمودار صفر بوده و فقط در تعداد کمی از نقاط که در مجاورت المان‌های آسیب‌دیده قرار دارند شاهد اختلاف هستیم که همین موضوع باعث می‌شود که روش گسترش دینامیکی به‌عنوان گزینه‌ی بهتر برای تکنیک گسترش مودی انتخاب شود. در مثال چهارم فرآیند شناسایی آسیب برای تیر معرفی‌شده در این مثال، برای حالت اول و دوم و با کمک روش گسترش دینامیکی اجرا شده و نتایج در همان بخش بررسی خواهند شد.

۴-۳ مثال دوم

یک تیر طره به ابعاد $15 \times 15 \times 25$ سانتی‌متر در نظر گرفته‌شده است. تیر به 45 المان با ابعاد $5 \times 5 \times 5$ تقسیم‌بندی شده و درجات آزادی تکیه‌گاه در هر سه جهت X ، Y و Z مقید شده است. نمای سه‌بعدی تیر در شکل ۴-۷ (ب) آورده شده و دو المان با شدت خرابی 50% در وسط تیر مطابق شکل ۴-۷ (الف) در نظر گرفته‌شده است. تیر موردنظر برای سه حالت آسیب‌شناسی شده. حالت اول با فرض معلوم بودن تمامی مؤلفه‌های بردار مودی، حالت دوم با فرض معلوم بودن مؤلفه‌های بردار مودی در درجات آزادی صفحات مشخص شده و استفاده از تکنیک T_{SEREP} و حالت سوم با فرض معلوم بودن مؤلفه‌های بردار مودی در درجات آزادی صفحات مشخص شده و استفاده از تکنیک گسترش دینامیکی مسئله حل می‌شود. محل داده‌ها در شکل ۴-۷ (الف) مشخص شده است.

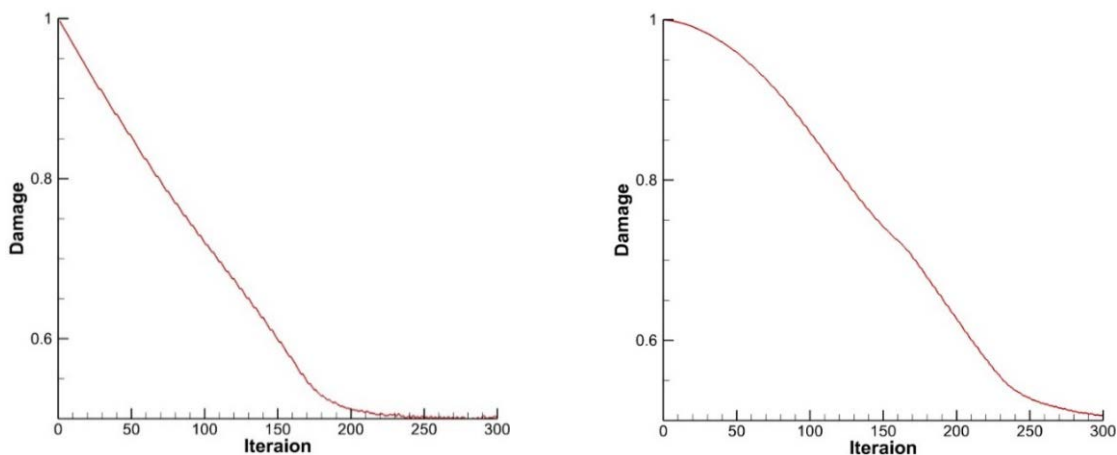


شکل ۴-۷ (الف) نمای سه‌بعدی تیر (ب) محل داده‌ها و خرابی المان‌ها.
 این مثال برای هر سه حالت در نظر گرفته شده به ازای ۳۰۰ گام اجرا شده و ضریب جریمه در ۱۶۰ گام اول از مقدار ۳ به مقدار ۱ کاهش یافته است. نتایج شناسایی آسیب برای هر سه حالت در شکل ۴-۸ آورده شده است.



شکل ۴-۸ (الف) حالت اول با فرض معلوم بودن تمام نقاط (ب) مدل سه‌بعدی برای حالت اول (پ) حالت دوم و با استفاده از روش TSEREP (ت) حالت سوم و با استفاده از روش گسترش دینامیکی.

با توجه به نتایج فوق می‌توان گفت که روش گسترش دینامیکی در مقایسه با روش TSEREP از دقت بالاتری برخوردار بوده و این امکان را فراهم می‌کند که با داشتن تعدادی از داده‌های مودال، فرآیند شناسایی آسیب به‌درستی محل و شدت آسیب را تعیین کند. بنابراین در مثال‌های بعدی از روش گسترش دینامیکی برای تقریب داده‌های مجهول جهت شناسایی آسیب استفاده می‌شود. در ادامه در شکل ۴-۹ نمودار تاریخچه‌ی شدت آسیب طی گام‌ها برای حالت اول آورده شده است.



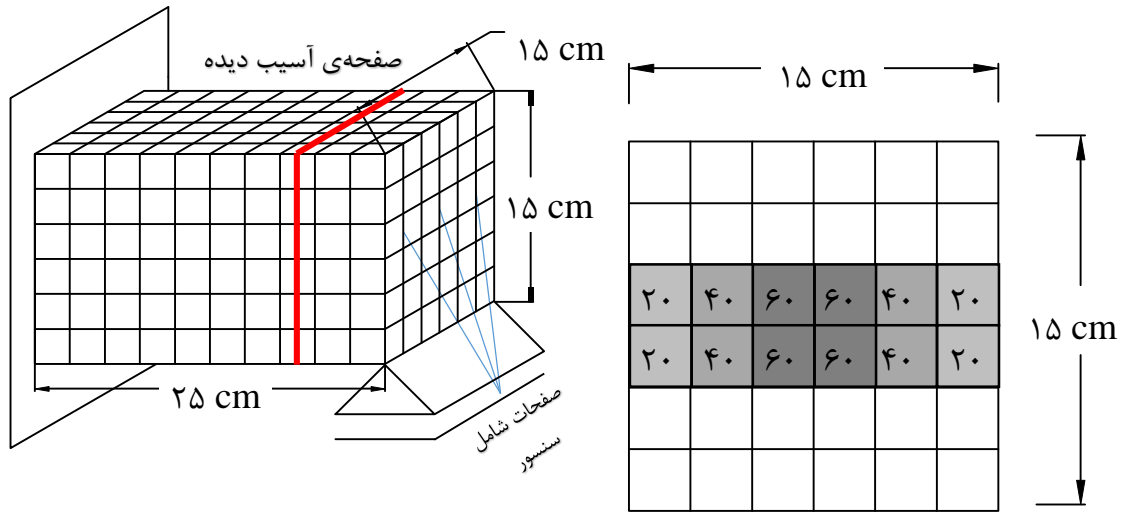
شکل ۴-۹ تاریخچه‌ی شدت آسیب المان‌ها در طول فرآیند شناسایی آسیب.

روند کاهش شدت آسیب از ۱ به ۰,۵ بیانگر درستی عملکرد الگوریتم پیشنهادی در شناسایی آسیب است. قسمت انتهایی نمودار که به سمت مقدار ۰,۵ میل می‌کند بیانگر همگرا شدن الگوریتم در انتهای فرآیند بهینه‌سازی است.

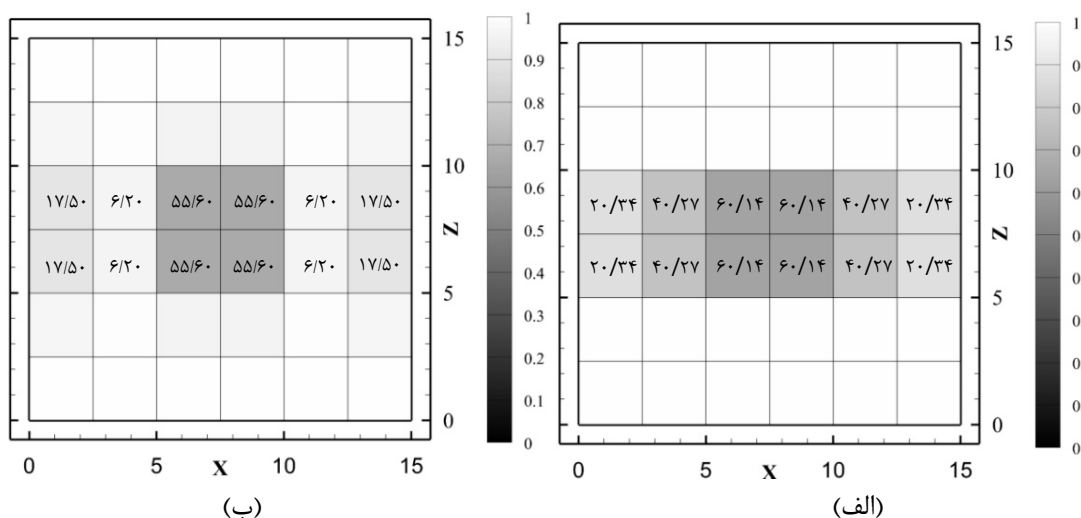
۴-۴ مثال سوم

تیر طره به ابعاد مشابه با مثال قبل با تعداد المان‌های بیشتر در نظر گرفته شده است. تعداد المان‌ها ۶ در ۶ در ۱۰ می‌باشد. در مجموع ۳۶۰ المان در نظر گرفته شده که ابعاد هر المان $2/5 \times 2/5 \times 2/5$ است. مدل سه‌بعدی تیر به همراه شرایط تکیه‌گاهی و الگوی آسیب در شکل ۴-۱۰ آورده شده. این مثال برای دو حالت در نظر گرفته شده. حالت اول با فرض معلوم بودن مقادیر بردار مودی در تمامی نقاط و حالت دوم با فرض معلوم بودن مؤلفه‌های بردار مودی در نقاط داخل صفحات مشخص شده. این مثال دو بار و

هر بار برای ۳۰۰ گام اجرا شده که ۱۶۰ گام اول با استفاده از روش پیوسته‌سازی، مقدار ضریب جریمه از ۳ به ۱ کاهش یافته است. در انتها برای بررسی تأثیر تعداد مودها در نتایج بهینه‌سازی، تیر موردنظر برای ۳ و ۱۰ مود آسیب‌شناسی شده و نتایج آن آورده شده است.

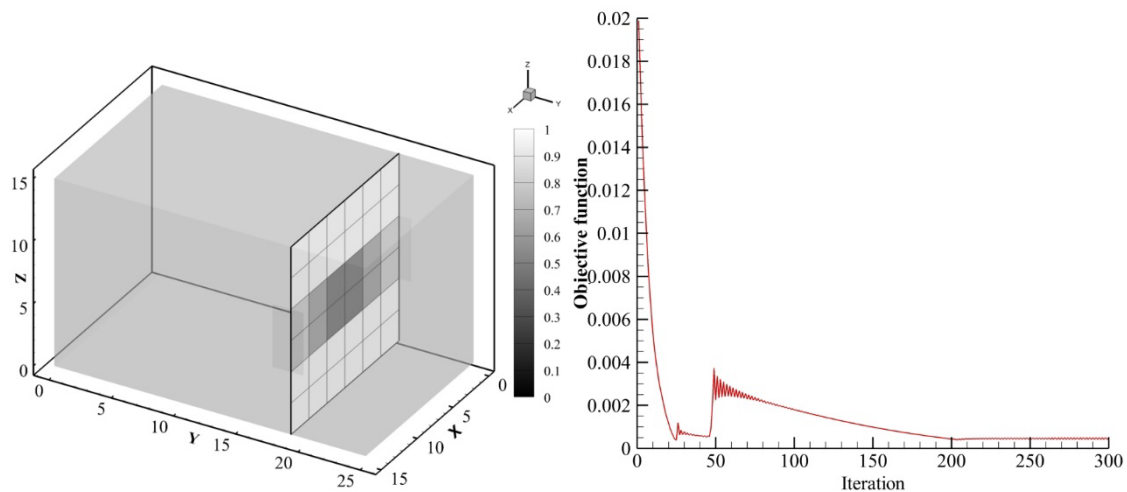


شکل ۴-۱۰ مدل سه‌بعدی تیر به همراه شرایط تکیه‌گاهی و الگوی آسیب. با حل مسئله برای هر دو حالت نتایج به صورت شکل ۴-۱۱ به دست آمده. با توجه به الگوی آسیب که هم شدت آسیب‌ها متغیر بوده و هم در صفحات غیر یکسان پخش شده می‌توان گفت که پیچیدگی این مثال نسبت به مثال قبل بیشتر بوده ولی همچنان انتظار می‌رود الگوریتم موردنظر قادر به شناسایی آسیب باشد. در حالت دوم با توجه به این که تنها ۳ صفحه از سازه شامل داده است، انتظار می‌رود روش گسترش دینامیکی بتواند محل و شدت آسیب‌ها را به درستی تشخیص دهد.



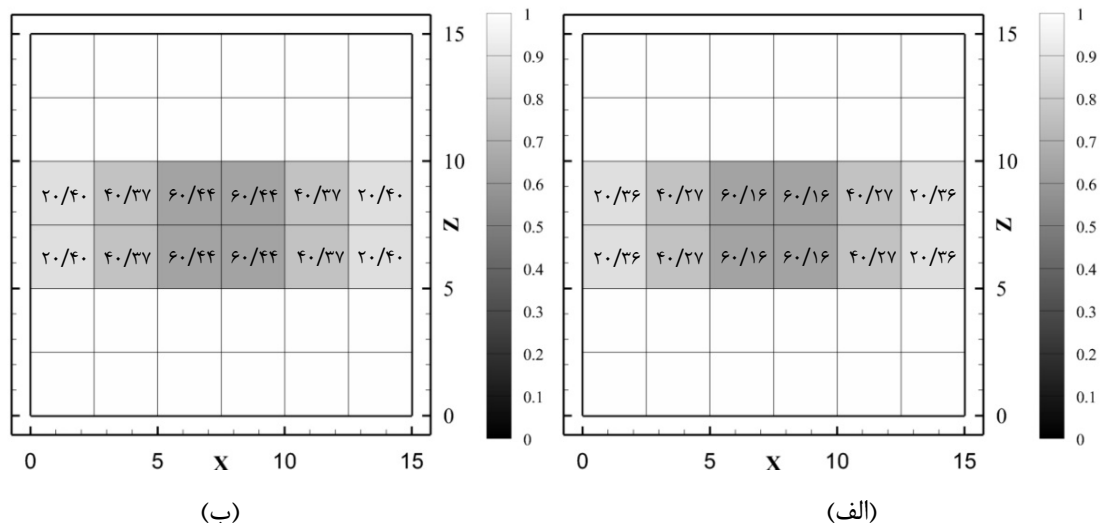
شکل ۴-۱۱ (الف) نتیجه‌ی شناسایی آسیب برای حالت اول (ب) نتیجه‌ی شناسایی آسیب برای حالت دوم.

واضح است که در حالت اول محل و شدت آسیب‌ها به‌درستی محاسبه شده است اما در حالت دوم با توجه به کم بودن تعداد داده‌های در نظر گرفته‌شده، تکنیک گسترش دینامیکی در محاسبه‌ی بردار مودی تقریبی دچار اندکی خطا شده که نتیجه‌ی آن خطا در شناسایی آسیب است. نحوه‌ی محل داده‌ها می‌تواند نقش اساسی در بهبود عملکرد تکنیک گسترش دینامیکی داشته باشد. در حالت دوم محل آسیب‌ها به‌درستی تشخیص داده شده و آسیب اضافی در سایر المان‌ها مشاهده نمی‌شود ولی در برخی از المان‌های آسیب‌دیده شدت آسیب با خطا محاسبه شده است. در ادامه در شکل ۴-۱۲ نمودار تاریخچه‌ی تابع هدف و مدل سه‌بعدی شناسایی آسیب برای حالت اول آورده شده است.



شکل ۴-۱۲ مدل سه‌بعدی و نمودار تاریخچه‌ی تابع هدف برای حالت اول.

قسمت افقی نمودار تاریخچه‌ی زمانی بیانگر همگرایی الگوریتم پیشنهادی است که وجود این قسمت افقی نمودار در تمامی مسائل بهینه‌سازی به معنی بهینه شدن تابع هدف می‌باشد. در ادامه نتایج الگوریتم بهینه‌سازی برای ۳ و ۱۰ مود آورده شده است.



شکل ۴-۱۳ نتیجه‌ی شناسایی آسیب برای (الف) ۳ مود و (ب) ۱۰ مود.

با توجه به نتایج بالا می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش تعداد مودها لزوماً نتایج بهتر نمی‌شود. علت این امر را می‌توان مودهای بالا که درصد مشارکت مودی پایینی دارند دانست. از طرفی در نظر گرفتن ۳ مود هم نتایجی با دقت پایین‌تر نسبت به حالت ۵ مود نتیجه می‌دهد. در این حالت می‌توان گفت که تمامی داده‌های موردنیاز برای شناسایی دقیق آسیب فراهم نمی‌شود که دقت نتایج پایین‌تر می‌شود. نتایج حاصل از شناسایی آسیب برای ۳، ۵ و ۱۰ مود در جدول ۴-۱ آورده شده است.

جدول ۴-۱ مقایسه‌ی شدت آسیب شناسایی شده برای ۳، ۵ و ۱۰ مود

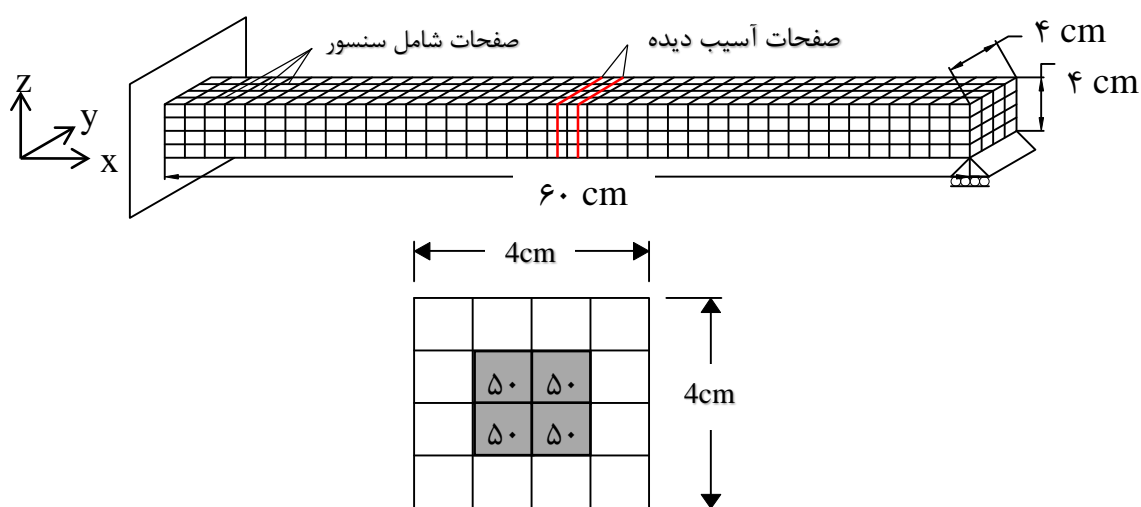
تعداد مود	آسیب موجود	آسیب شناسایی شده	خطا
۳	۲۰٪	۲۰/۳۶٪	۱/۸۰٪
۵	۲۰٪	۲۰/۳۴٪	۱/۷۰٪
۱۰	۲۰٪	۲۰/۴۰٪	۲/۰۰٪

با توجه به نتایج به دست آمده، تعداد ۵ مود برای سایر مثال‌ها در نظر گرفته می‌شود.

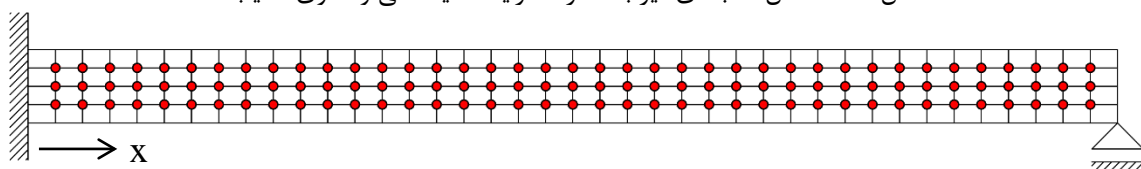
۴-۵ مثال چهارم

در این مثال، تیر بررسی شده در مثال اول مورد ارزیابی قرار گرفته و برای سه حالت شناسایی آسیب شده است. حالت اول با فرض معلوم بودن تمامی مؤلفه‌های بردار مودی و حالت دوم و سوم با در نظر

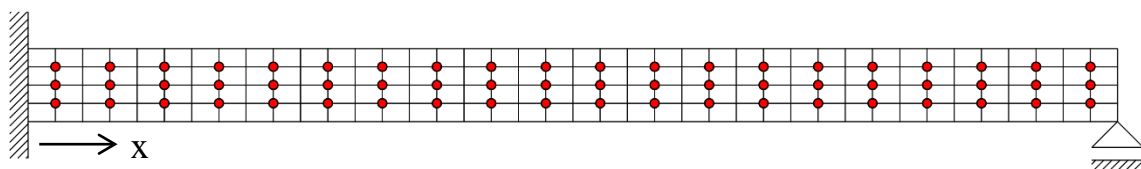
گرفتن مؤلفه‌های بردار مودی در نقاط مشخص شده در شکل ۴-۱۵ است. مدل سه‌بعدی تیر به همراه الگوی آسیب و شرایط تکیه‌گاهی در شکل ۴-۱۴ آورده شده است. برای حالت اول فرض شده تمامی درجه‌ی آزادی سازه مجهز به سنسور است. حالت دوم تعداد ۳۵۱ گره مجهز به سنسور فرض شده و حالت سوم ۱۸۰ گره در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است که این مثال برای ۳۰۰ گام اجرا شده که در ۲۰۰ گام اول از روش پیوسته‌سازی استفاده شده و ضریب جریمه از مقدار ۳ به مقدار ۱ کاهش یافته است.



شکل ۴-۱۴ مدل سه‌بعدی تیر به همراه شرایط تکیه‌گاهی و الگوی آسیب.



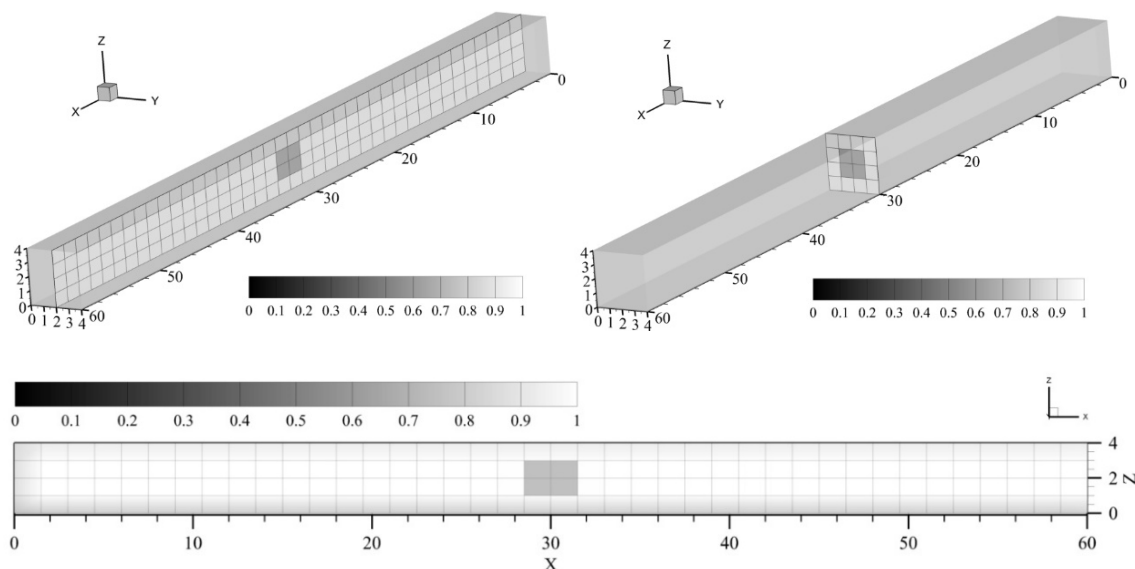
(الف)



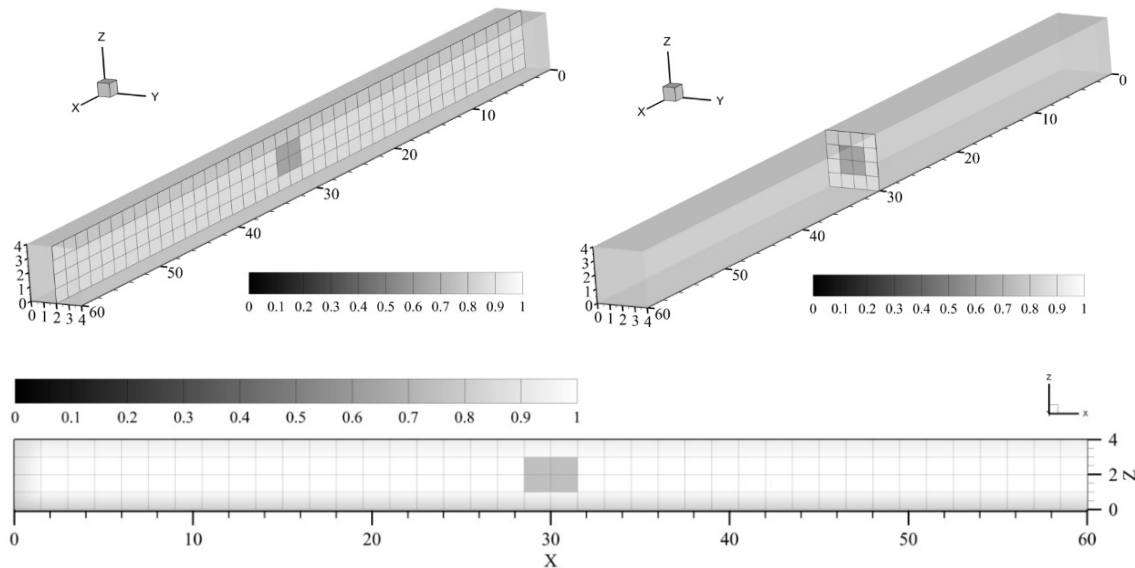
(ب)

شکل ۴-۱۵. (الف) محل داده‌ها در حالت دوم (ب) محل داده‌ها در حالت سوم. با اجرای هر سه حالت، نتایج شناسایی آسیب مطابق شکل‌های ۴-۱۶، ۴-۱۷ و ۴-۱۸ به دست می‌آیند. با توجه به نتایج روش گسترش دینامیکی در مثال ۱ می‌توان انتظار داشت که نتایج حالت اول و دوم

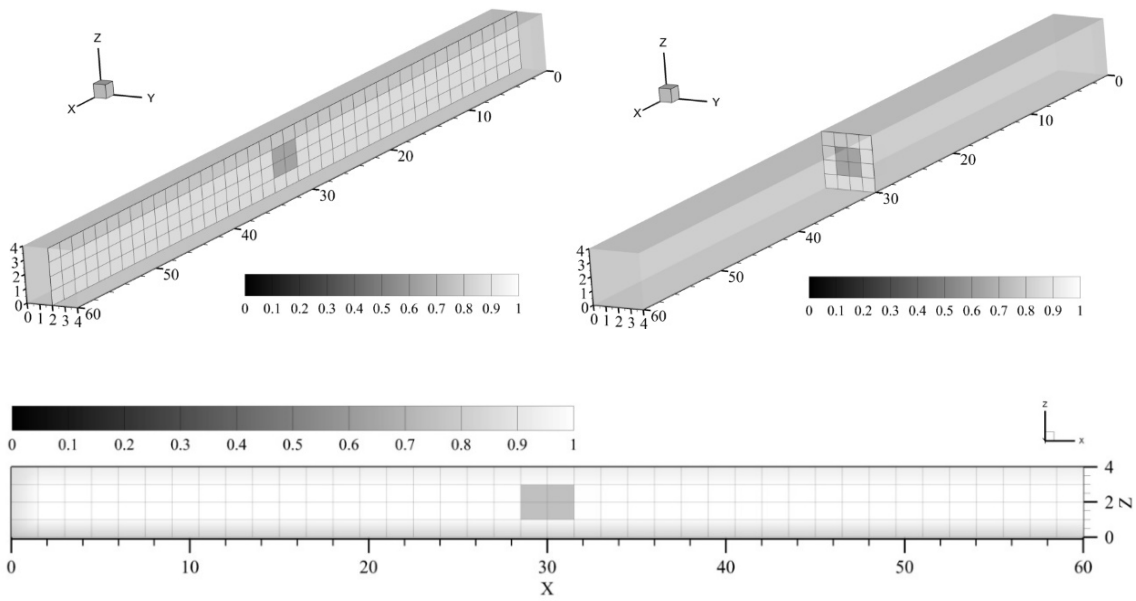
مشابه بوده و حالت سوم با مقداری خطا محاسبه شود. از طرفی حدس زده می‌شود که در تعیین محل آسیب، تمامی حالت‌ها مشابه هم باشند و تنها در تعیین شدت آسیب‌ها حالت سوم کمی متفاوت تر باشد.



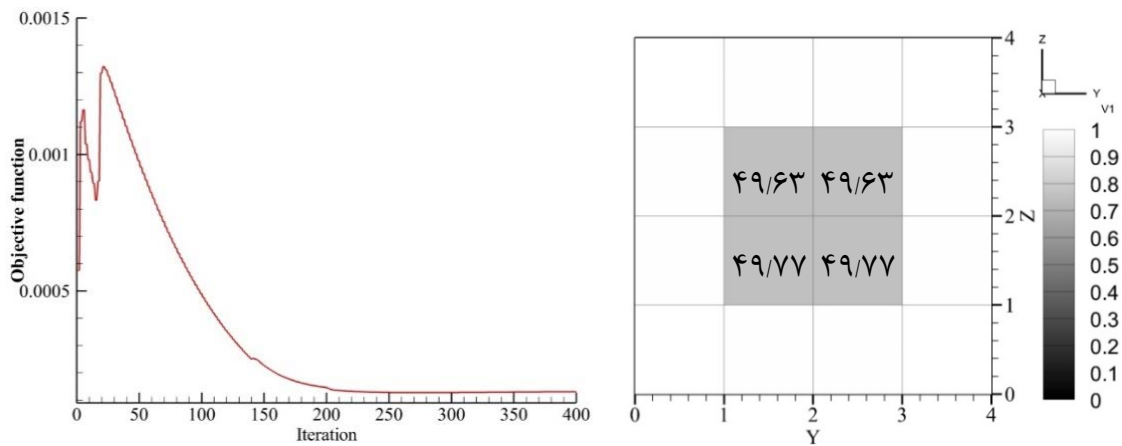
شکل ۴-۱۶ مدل سه‌بعدی شناسایی آسیب به همراه برش طولی و عرضی تیر برای حالت اول.



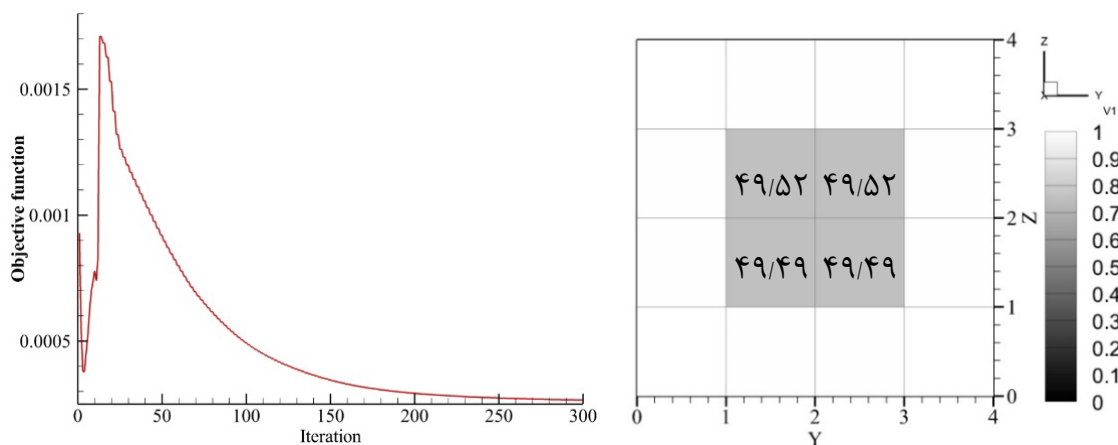
شکل ۴-۱۷ مدل سه‌بعدی شناسایی آسیب به همراه برش طولی و عرضی تیر برای حالت دوم.



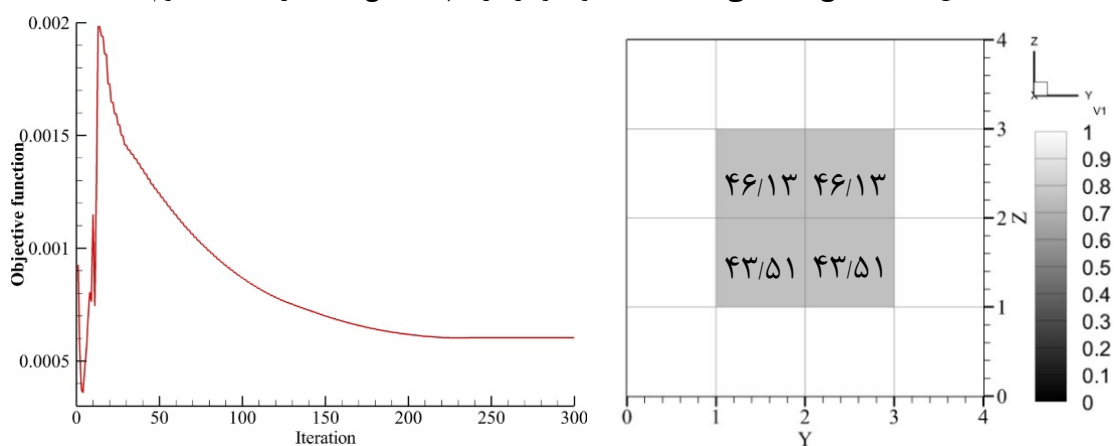
شکل ۴-۱۸ مدل سه‌بعدی شناسایی آسیب به همراه برش طولی و عرضی تیر برای حالت سوم. با توجه به شکل‌های ۴-۱۶، ۴-۱۷ و ۴-۱۸ می‌توان ادعا کرد که الگوریتم شناسایی آسیب توانسته به درستی محل آسیب را مشخص کند و هیچ آسیب اضافی در سایر المان‌ها مشاهده نمی‌شود. در ادامه به بررسی شدت آسیب‌های محاسبه شده در المان‌ها پرداخته می‌شود. شکل‌های ۴-۱۹، ۴-۲۰ و ۴-۲۱ برای نمایش شدت آسیب در المان‌ها و نمودار تاریخچه‌ی تابع هدف آورده شده‌اند.



شکل ۴-۱۹ نتایج شناسایی شدت آسیب و نمودار تاریخچه‌ی تابع هدف برای حالت اول.



شکل ۲۰-۴ نتایج شناسایی شدت آسیب و نمودار تاریخچه‌ی تابع هدف برای حالت دوم.



شکل ۲۱-۴ نتایج شناسایی شدت آسیب و نمودار تاریخچه‌ی تابع هدف برای حالت سوم.

همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، نتایج حالت اول و دوم مانند یکدیگر شده و در حالت سوم با اندکی خطا شدت آسیب محاسبه شده است. در هر سه حالت، نمودار تاریخچه‌ی تابع هدف دارای بخش افقی در انتها است که به معنی همگرا شدن الگوریتم بهینه‌سازی است. در ۳۰ گام ابتدایی الگوریتم مقدار تابع هدف دچار نوسان شده که بعد از ۳۰ گام به پایداری رسیده است. مقدار نهایی نمودار در حالت سوم بیشتر از دو حالت اول است که به‌منزله‌ی بیشتر بودن اختلاف بین بردارهای مودی سازه‌ی آسیب‌دیده با مدل تحلیلی می‌باشد که در نهایت منجر به محاسبه‌ی آسیب با مقداری خطا شده است. در ادامه هر سه حالت به همراه درصد آسیب‌های متناظر در جدول ۲-۴ آورده شده است که به درک بهتر نتایج کمک می‌کند.

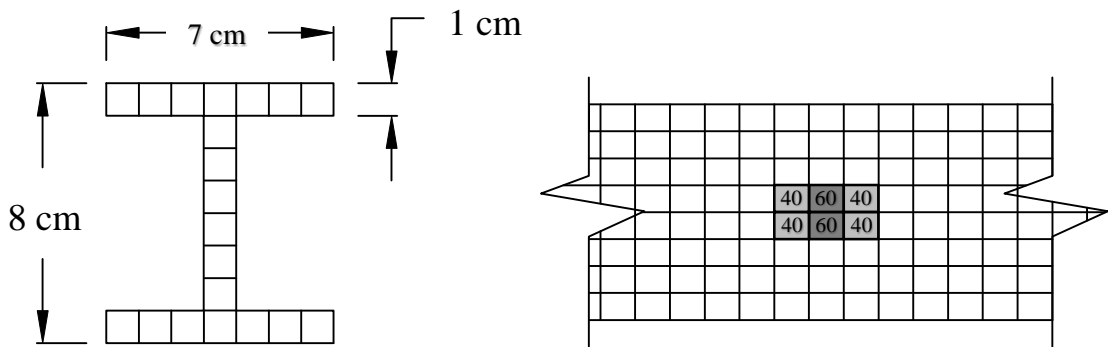
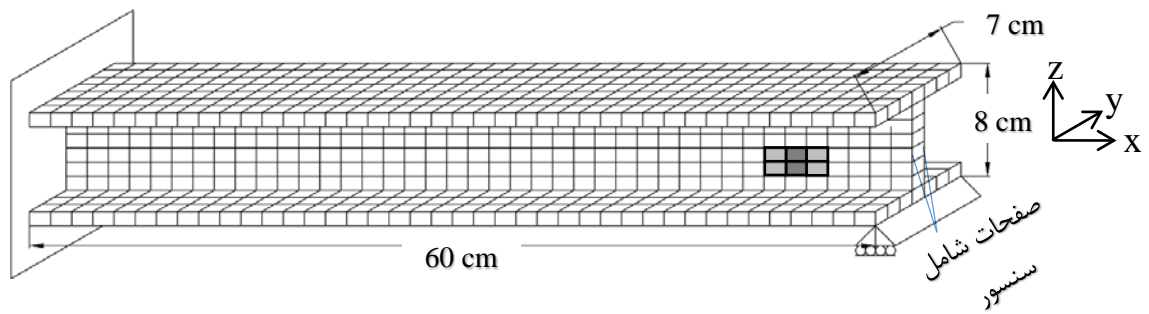
جدول ۴-۲ نتایج شدت آسیب شناسایی شده

حالت	آسیب موجود	آسیب شناسایی شده	خطا
۱	۵۰٪	۴۹/۷۰٪	۰/۶۰٪
۲	۵۰٪	۴۹/۵۰٪	۱/۰۰٪
۳	۵۰٪	۴۴/۸۲٪	۲۱/۰۳٪

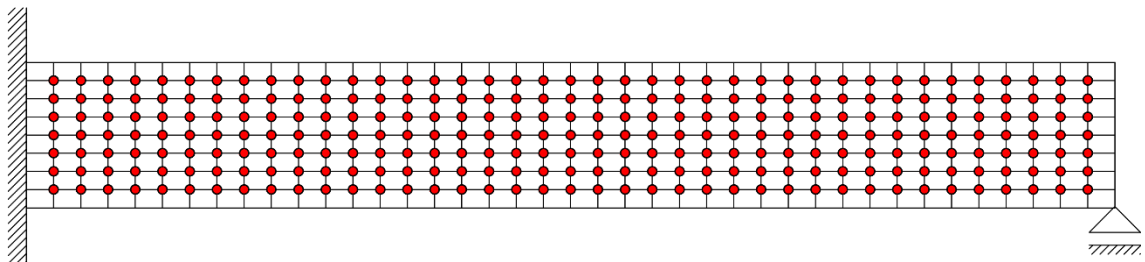
با توجه به جدول فوق می‌توان گفت که روش پیشنهادی در شناسایی محل آسیب در هر سه حالت موفق بوده و در شناسایی شدت آسیب در حالت اول و دوم بسیار دقیق بوده و در حالت سوم از دقت کمتری برخوردار است.

۴-۶ مثال پنجم

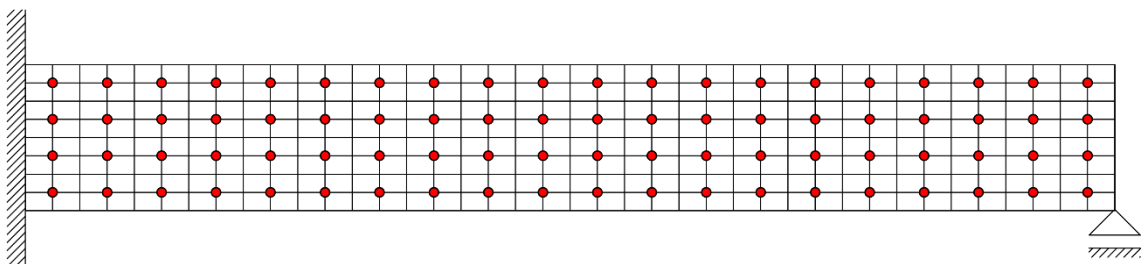
در این مثال یک تیر بال‌پهن به طول ۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. مقطع تیر به همراه شرایط تکیه‌گاهی و محل و الگوی خرابی در شکل ۴-۲۲ آورده شده است. تیر موردنظر به ۸۰۰ المان با ابعاد ۱،۵ در ۱ در ۱ جهت آنالیز به روش اجزا محدود تقسیم شده است. محل خرابی در جان تیر فرض شده و به همین جهت، داده‌ها فقط در جان تیر فرض می‌شوند. مشابه مثال قبل، در این مثال نیز برای ۳ حالت ارزیابی می‌شود. حالت اول با فرض معلوم بودن بردار مودی در تمام ۱۷۲۲ درجه‌ی آزادی و حالت دوم با ۵۴۶ درجه‌ی آزادی معلوم و حالت سوم با فرض معلوم بودن ۱۵۶ درجه‌ی آزادی که در شکل ۴-۲۲ مشخص شده‌اند حل می‌شوند. این مثال برای ۳۰۰ گام حل شده که ۲۰۰ گام ابتدایی با روش پیوسته‌سازی محاسبه شده و ضریب جریمه از ۳ به یک کاهش می‌یابد.



شکل ۴-۲۲ مدل سه بعدی تیر به همراه شرایط تکیه گاهی، محل و الگوی خرابی و مقطع تیر.

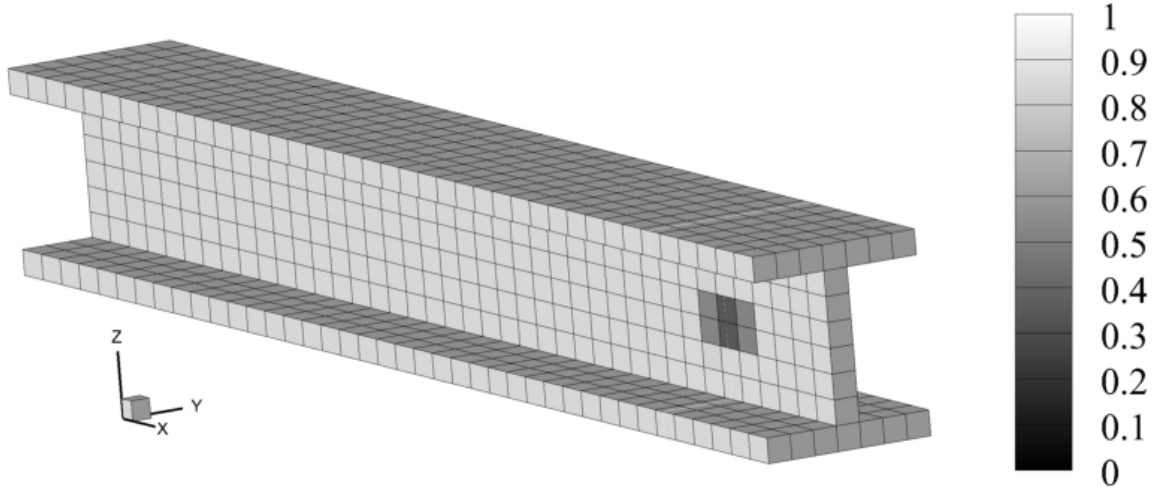


(الف)

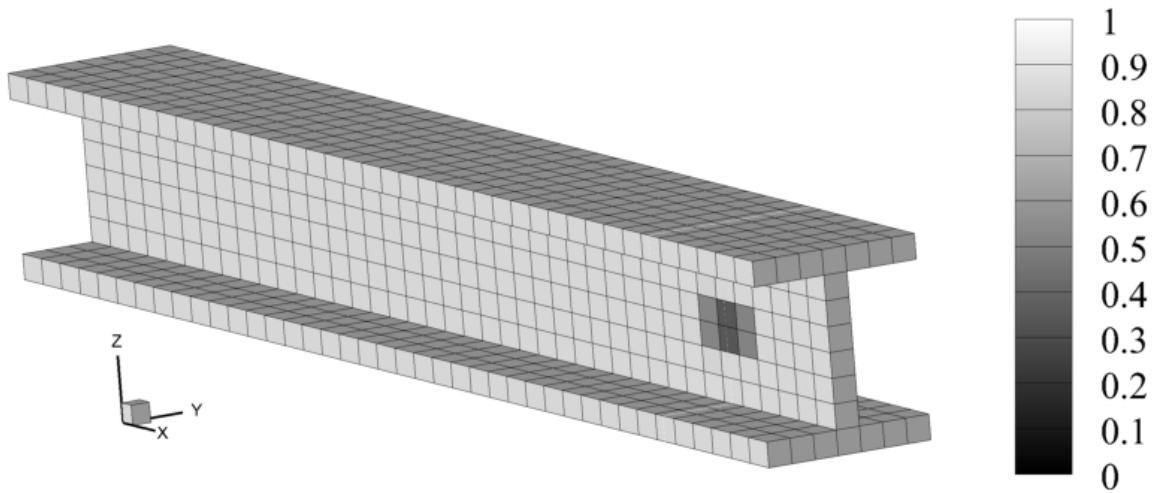


(ب)

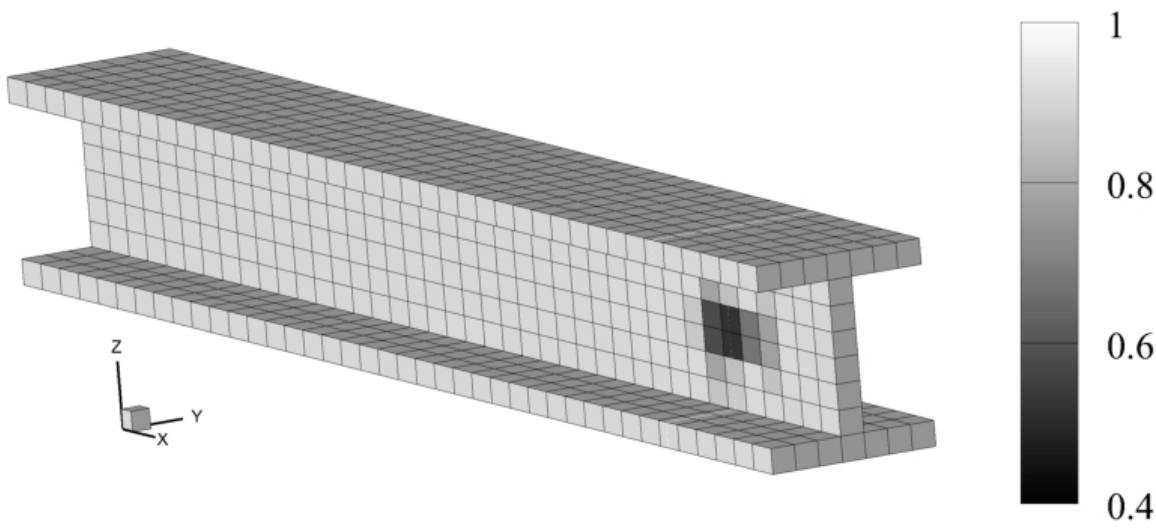
شکل ۴-۲۳ (الف) محل داده‌ها در حالت دوم (ب) محل داده‌ها در حالت سوم. با حل مثال برای هر سه حالت، نتایج به صورت مشخص شده در شکل‌های ۴-۲۴، ۴-۲۵ و ۴-۲۶ می‌باشد. در این مثال نیز همانند مثال قبل انتظار می‌رود محل آسیب در هر سه حالت به درستی تعیین شده و شدت آسیب در حالت اول و دوم یکسان شده و در حالت سوم با کمی خطا به دست آید.



شکل ۴-۲۴ مدل سه بعدی شناسایی آسیب برای حالت اول.

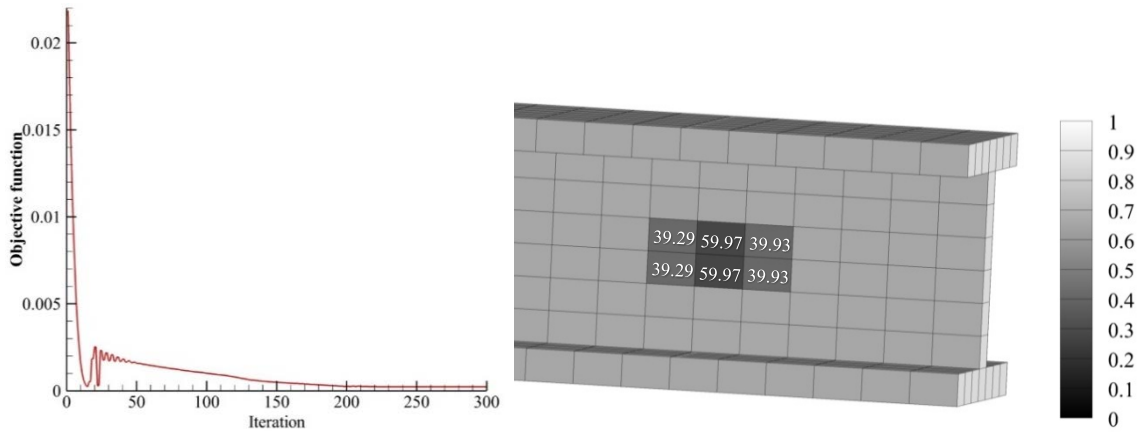


شکل ۴-۲۵ مدل سه بعدی شناسایی آسیب برای حالت دوم.

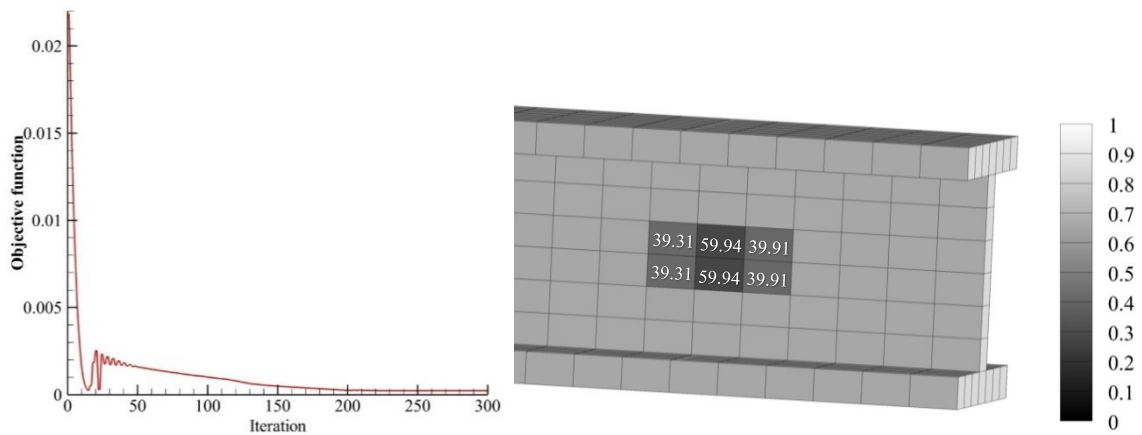


شکل ۴-۲۶ مدل سه بعدی شناسایی آسیب برای حالت سوم.

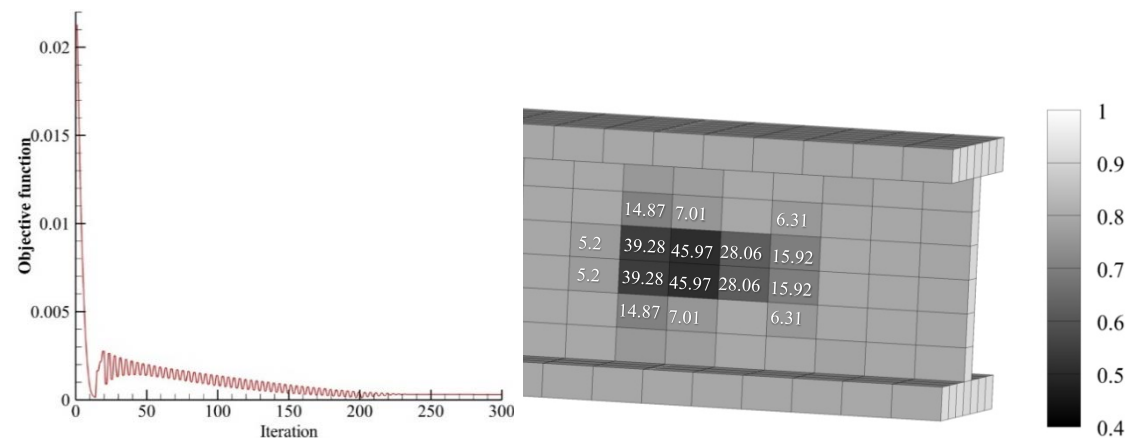
با توجه به نتایج، حالت اول و دوم یکسان بوده اما در حالت سوم علاوه بر المان‌های آسیب‌دیده، تعدادی از المان‌های اطراف نیز دارای آسیب به‌دست‌آمده‌اند. شدت آسیب و نمودار تاریخچه‌ی تابع هدف در حالت‌های اول تا سوم به ترتیب در شکل‌های ۴-۲۷، ۴-۲۸ و ۴-۲۹ آورده شده‌اند.



شکل ۴-۲۷ نتایج شناسایی شدت آسیب و نمودار تاریخچه‌ی تابع هدف برای حالت اول.



شکل ۴-۲۸ نتایج شناسایی شدت آسیب و نمودار تاریخچه‌ی تابع هدف برای حالت دوم.



شکل ۴-۲۹ نتایج شناسایی شدت آسیب و نمودار تاریخچه‌ی تابع هدف برای حالت سوم.

همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، حالت اول و دوم کاملاً مشابه یکدیگر بوده و فقط حالت سوم متفاوت است. شدت خرابی در المان‌های آسیب‌دیده در حالت سوم با مقداری خطا محاسبه شده و نمودار تاریخچه‌ی تابع هدف نیز در این حالت دارای نوسان در بخش انتهایی است اما در نهایت خط صاف شده که به معنی همگرا شدن الگوریتم بهینه‌سازی است. در ادامه حالت‌های مختلف به همراه شدت‌های آسیب در جدول ۳-۴ آورده شده‌اند تا درک بهتری از مسئله ایجاد کنند.

جدول ۳-۴ نتایج شدت آسیب شناسایی شده

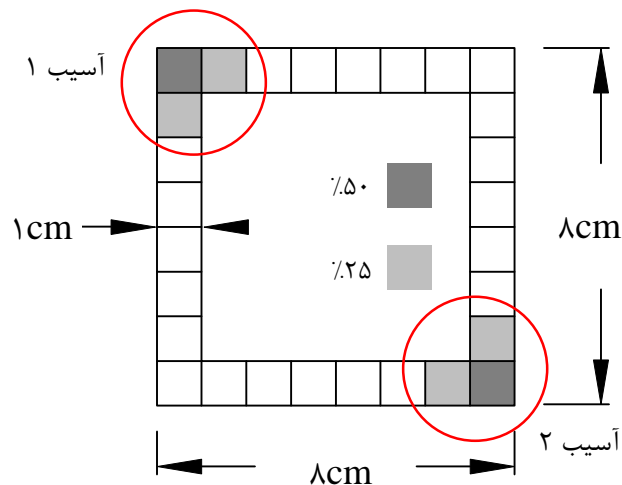
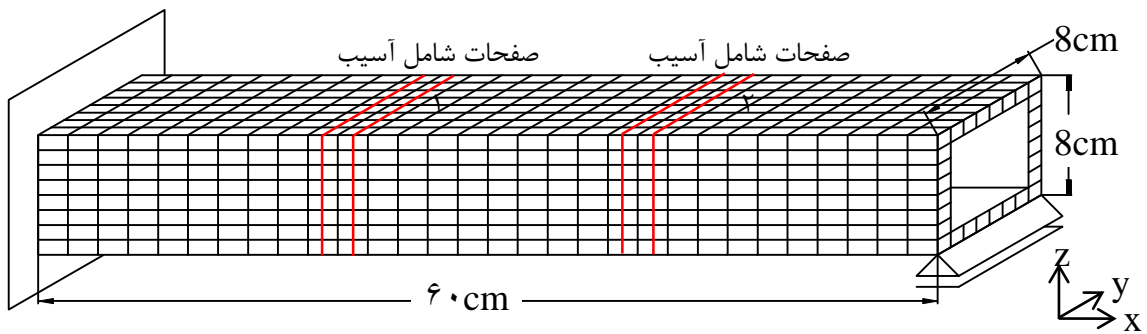
حالت	آسیب موجود	آسیب شناسایی شده	خطا
۱	۴۰٪	۳۹/۶۱٪	۰/۹٪
	۶۰٪	۵۹/۹۷٪	۰/۰۵٪
۲	۴۰٪	۳۹/۶۱٪	۰/۹٪
	۶۰٪	۵۹/۹۴٪	۰/۱٪
۳	۴۰٪	۳۳/۶۵٪	۱۵/۸۶٪
	۶۰٪	۴۵/۹۷٪	۲۳/۳۸٪

الگوریتم پیشنهادی در این مثال توانست در حالت اول و دوم با دقت بسیار بالا محل و شدت آسیب را تشخیص دهد. در حالت سوم با علت کم بودن تعداد درجات آزادی مجهز به سنسور و چینش نامناسب سنسورها، نتایج با کمی خطا محاسبه شده و همچنین تعدادی از المان‌های سالم نیز دارای آسیب شناسایی شدند. انتظار می‌رود با چیدمان صحیح سنسورها، دقت الگوریتم پیشنهادی در شناسایی آسیب سازه‌های با تعداد سنسور کم بسیار بالاتر رفته و مشابه حالت اول و دوم گردد.

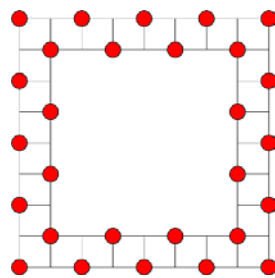
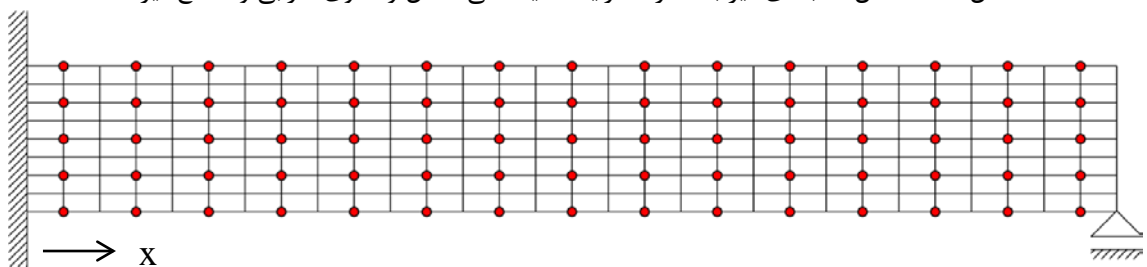
۴-۷ مثال ششم

یک تیر با مقطع جعبه‌ای به طول ۶۰ سانتی‌متر و ابعاد ۸×۸ سانتی‌متر برای این مثال در نظر گرفته شده است. ضخامت مقطع ۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین شرایط تکیه‌گاهی و مدل سه‌بعدی این تیر در شکل ۴-۳۰ آورده شده است. تیر موردنظر به ۸۴۰ المان با ابعاد $۱ \times ۱ \times ۲$ سانتی‌متر

تقسیم شده و برای دو حالت ارزیابی می شود. حالت اول با فرض معلوم بودن مؤلفه های بردار مودی تمام ۱۶۸۰ گره و حالت دوم با فرض موجود بودن مؤلفه های بردار مودی نقاط مشخص شده در شکل ۴-۳۱ به تعداد ۴۲۰ عدد، بررسی می شود. مانند دو مثال قبل ۳۰۰ گام برای این مثال در نظر گرفته شده که ۲۰۰ گام اول با روش پیوسته سازی انجام می شود و مقدار ضریب جریمه از ۳ به ۱ کاهش می یابد.

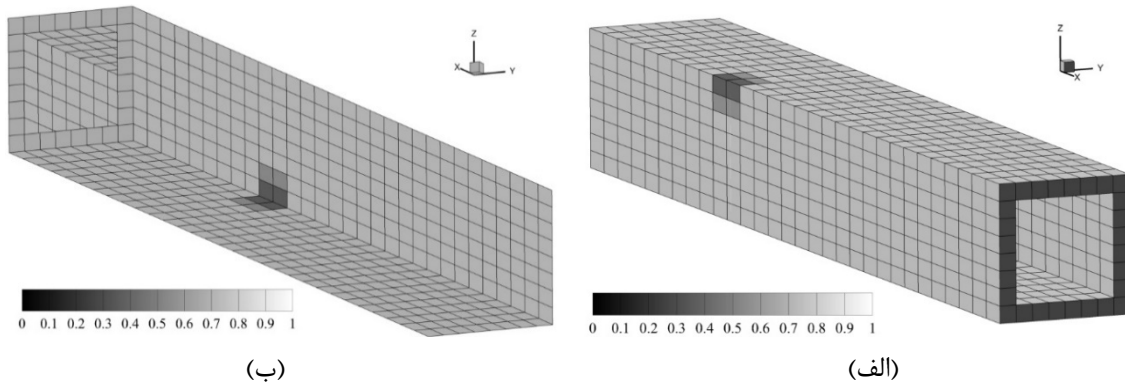


شکل ۴-۳۰ مدل سه بعدی تیر به همراه شرایط تکیه گاهی، محل و الگوی خرابی و مقطع تیر.

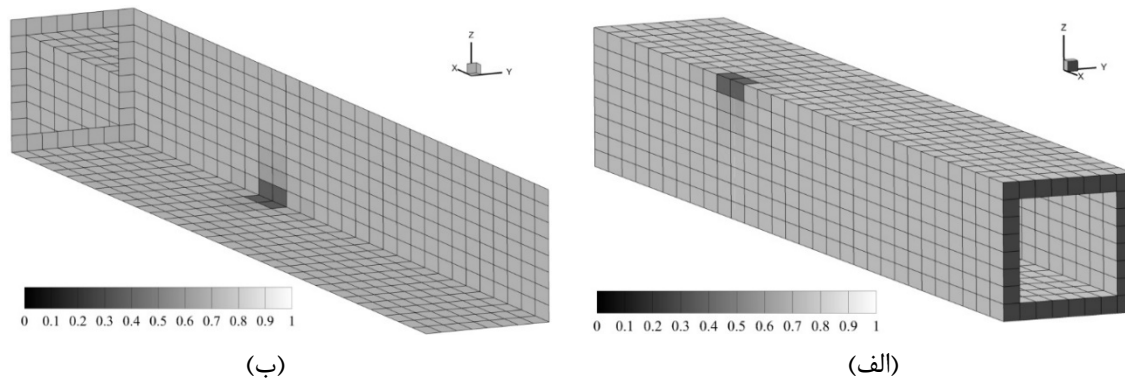


شکل ۴-۳۱ محل داده ها برای حالت دوم.

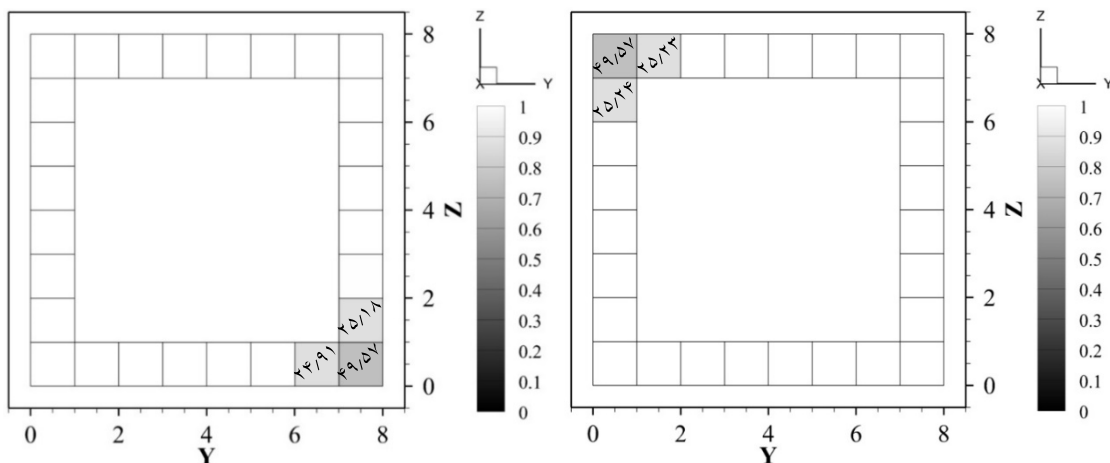
با حل این مثال ، نتایج به صورت شکل های ۳۲-۴ و ۳۳-۴ ارائه شده اند. با توجه به اینکه تعداد داده ها در حالت دوم کم است، انتظار می رود دقت کمتری نسبت به حالت اول داشته باشد.



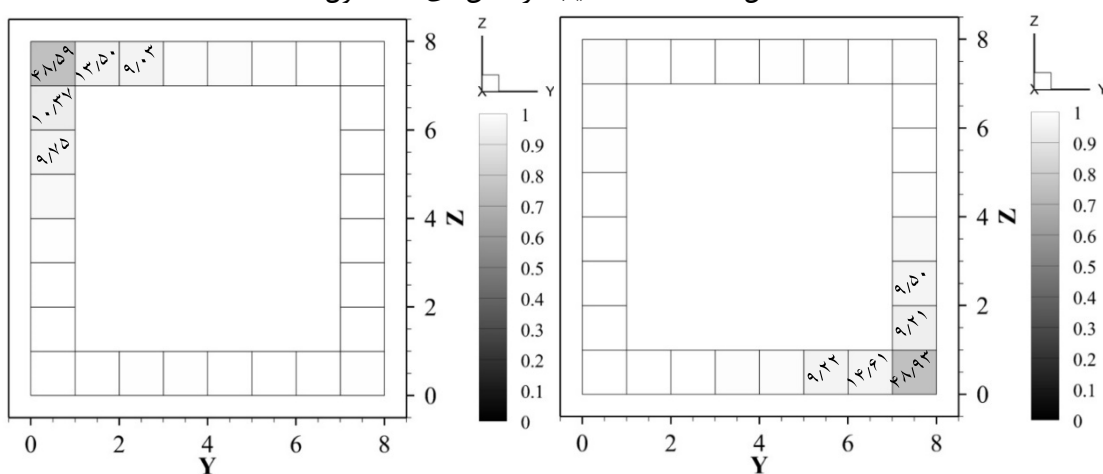
شکل ۳۲-۴ نتیجه ی الگوریتم در حالت اول برای (الف) آسیب شماره ۱ بالای تیر و (ب) آسیب شماره ۲ پایین تیر.



شکل ۳۳-۴ نتیجه ی الگوریتم در حالت دوم برای (الف) آسیب شماره ۱ بالای تیر و (ب) آسیب شماره ۲ پایین تیر. با توجه به نتایج می توان گفت که حالت اول به درستی عمل کرده و محل و شدت آسیب در المان های آسیب دیده را با دقت بالایی محاسبه کرده اما در حالت دوم المان های لبه ای به درستی آسیب شناسی شده اند اما ردیف کناری آن ها به درستی آسیب شناسی نشده اند و در ردیف کناری آن ها آسیب های اضافه محاسبه شده است. شدت آسیب های محاسبه شده در حالت اول و دوم در شکل های ۳۴-۴ و ۳۵-۴ آورده شده است.

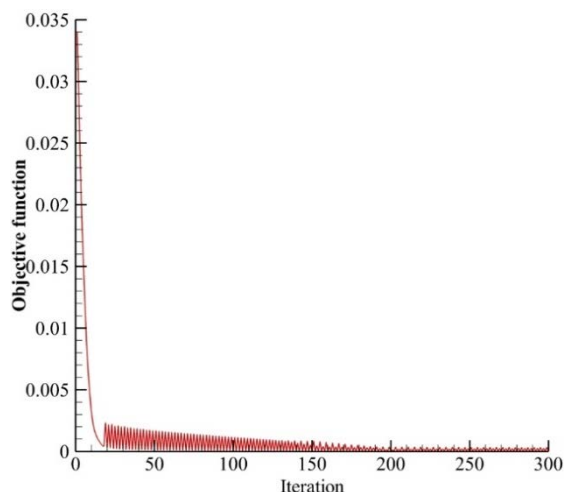


شکل ۴-۳۴ شدت آسیب در المان‌های حالت اول.

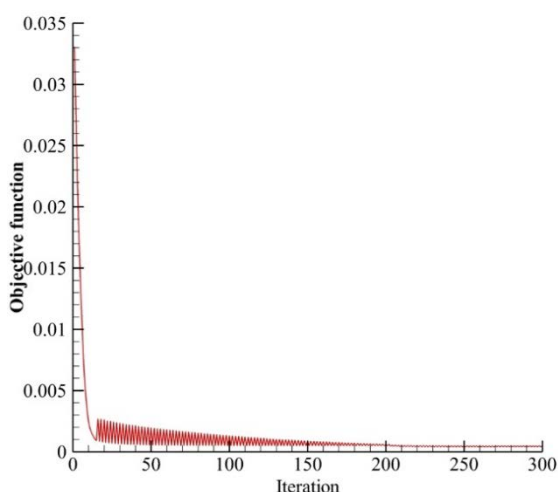


شکل ۴-۳۵ شدت آسیب در المان‌های حالت دوم.

شدت آسیب‌ها در حالت اول با دقت مناسب محاسبه شده و همان‌طور که گفته شد، شدت آسیب در المان‌های گوشه در حالت دوم با دقت مناسبی به دست آمده اما در المان‌های کناری شدت با خطا محاسبه شده و در ردیف کناری نیز آسیب شناسایی شده در حالی که المان‌های مذکور سالم هستند. در ادامه نمودار تاریخچه‌ی تابع هدف در شکل ۴-۳۶ آورده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۴-۳۶ نمودار تاریخچه‌ی تابع هدف (الف) حالت اول (ب) حالت دوم.

در هر دو حالت نمودار تقریباً یکسان هستند با این تفاوت که در حالت اول مقدار اولیه‌ی تابع هدف کمتر از مقدار اولیه‌ی تابع هدف در حالت دوم است. این موضوع به این معنی است که در حالت دوم تفاوت بین سازه‌ی آسیب‌دیده که با روش گسترش دینامیکی تقریب زده شده و مدل تحلیلی بیشتر است که منطقی است چراکه به علت تقریبی بودن بردارهای مودی در این حالت، بردارهای مودی از حالت سالم فاصله‌ی بیشتری دارند. تفاوت دیگر این دو نمودار در بخش انتهایی است. هر دو در بخش افقی دارای نوسان هستند اما در حالت اول از گام ۲۰۰ به بعد نمودار صاف شده اما در حالت دوم نوسان تا انتها ادامه دارد. در ادامه برای درک بهتر از حالت‌های در نظر گرفته‌شده، هر دو حالت به همراه آسیب‌های شناسایی‌شده در جدول ۴-۴ آورده شده‌اند.

جدول ۴-۴ نتایج شدت آسیب شناسایی‌شده

حالت	آسیب موجود	آسیب شناسایی‌شده	خطا
۱	۵۰٪	۴۹/۵۷٪	۰/۵٪
	۲۵٪	۲۵/۱۴٪	۰/۵۶٪
۲	۵۰٪	۴۸/۷۶٪	۲/۴۸٪
	۲۵٪	۱۱/۹۲٪	۵۲/۳۲٪

نتایج به دست آمده در حالت اول دقت مناسبی داشته و در حالت دوم المان‌های گوشه به درستی شناسایی آسیب شده‌اند اما المان‌های کناری با خطای بالایی محاسبه شده‌اند. علت این خطا می‌تواند کم بودن تعداد سنسورها و یا چیدمان نامناسب سنسورها باشد.

فصل پنجم : نتایج و پیشنهادات

۵-۱ مقدمه

در این پژوهش ابتدا مبانی تحلیل اجزا محدود سه بعدی در محیط پیوسته تشریح شده است. سپس با در نظر گیری آسیب به صورت کاهش جرم و سختی، مصالح با روش SIMP تعریف شده و برای هر المان چگالی در نظر گرفته شده که با کاهش چگالی المان‌ها مستقیماً سختی و جرم سازه دستخوش تغییر قرار می‌گیرد. با تکنیک‌های مودی تنها با داشتن تعداد کمی از داده‌های مودال، سایر داده‌ها تقریب زده شده و در ادامه با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی اختلاف بین سازه‌ی آسیب‌دیده و مدل تحلیلی کمینه شده که به شناسایی محل و شدت آسیب می‌انجامد. مثال‌های عددی به منظور بررسی عملکرد این روش در بخش ۴ آورده شدند. با توجه به نتایج مثال ۱، معین شد که روش گسترش دینامیکی از دقت بالاتری به نسبت روش TSEREP دارد. بنابراین در مثال‌های بعدی فقط از همین تکنیک استفاده شد. در ادامه‌ی مثال‌ها با افزایش پیچیدگی الگوی آسیب و تعداد المان‌ها، الگوریتم شناسایی آسیب به راحتی قادر به تشخیص محل و شدت آسیب بوده و فقط در حالت‌هایی که تعداد داده‌های ورودی کم بوده و یا چیدمان مناسبی نداشتند، نتایج اندکی دستخوش تغییر قرار می‌گرفت. نتایج کلی به دست آمده از مثال‌های بخش قبل به صورت خلاصه بیان خواهند شد.

۵-۲ نتایج

از نتایج کلی که در این پژوهش حاصل شد می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- استفاده از تکنیک‌های گسترش مودی می‌تواند در حل مسائل با داده‌های مودال ناقص بسیار مؤثر باشد. با کمک این روش‌ها با داشتن تعداد محدودتری از داده‌های مودال نسبت به کل درجات آزادی، تمامی داده‌ها تقریب زده می‌شوند. تکنیک گسترش دینامیکی به مراتب کارآمدتر از روش TSEREP است چراکه مستقیماً از مشخصات سازه‌ای مانند ماتریس جرم و سختی استفاده می‌کند.

- استفاده از تابع هدف اختلاف بردارهای مودی گزینه‌ی مناسبی برای شناسایی آسیب در مسائل سه‌بعدی در محیط پیوسته است که می‌تواند علی‌رغم پیچیدگی سازه، محل و شدت دقیق آسیب را تعیین کند.
- با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، استفاده از روش بهینه‌سازی توپولوژی در کمینه کردن تابع هدف گزینه‌ای مناسب بوده که در روند شناسایی آسیب بسیار تأثیرگذار است. از مزایای استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی می‌توان به پیوستگی مسئله‌ی بهینه‌سازی اشاره کرد. به عبارت دیگر، چگالی به صورت تدریجی در حین بهینه‌سازی می‌تواند کم یا زیاد شود که علاوه بر محل آسیب، شدت آسیب را هم تعیین می‌کند.
- مدل‌سازی مصالح با روش SIMP در کاهش متغیرهای طراحی بسیار مفید واقع شد و با در نظر گرفتن یک متغیر تحت عنوان چگالی بجای ابعاد حفره، در کاهش پیچیدگی مسئله‌ی بهینه‌سازی کمک کرده و باعث کاهش زمان محاسبات شده است.
- استفاده از روش حداقل باقیمانده برای حل مسئله‌ی معکوس در محاسبه‌ی مشتقات تابع هدف باعث افزایش بسیار زیاد در سرعت الگوریتم شده و همچنین دقت فرآیند شناسایی آسیب به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته است.
- در نظر گرفتن ۵ مود اول سازه هم از لحاظ سرعت و هم از لحاظ نتایج به‌دست‌آمده بسیار مناسب بوده و در نظر گرفتن تعداد بیشتر مود توصیه نمی‌شود چراکه درصد مشارکت مودهای بالاتر بسیار پایین بوده و روند شناسایی آسیب را می‌تواند مختل می‌کند. از طرف دیگر در نظر گرفتن تعداد مودهای کمتر نیز در نتایج تأثیر منفی داشته و توصیه نمی‌شود.
- فرض اولیه در مسئله‌ی بهینه‌سازی توپولوژی با استفاده از روش تندترین شیب نزولی می‌تواند در حجم محاسبات موردنیاز جهت دستیابی به پاسخ نهایی تأثیر بسزایی داشته باشد. با فرض اینکه در گام اول در مدل عددی تمامی المان‌ها سالم هستند، مقدار ۱ به‌عنوان چگالی اولیه در

نظر گرفته شد که در ساده‌سازی مسئله‌ی بهینه‌سازی بسیار مؤثر است. این فرض در المان‌های سالم نیز تأثیر گذاشته و از ایجاد حفره در المان‌های سالم جلوگیری می‌کند.

- روش پیوسته‌سازی در این پژوهش نقش بسیار مهمی در روند بهینه‌سازی ایفا می‌کند. با تغییر ضریب جریمه طی گام‌های بهینه‌سازی که در این پژوهش همواره از مقدار ۳ به ۱ کاهش می‌یافت، ابتدا در تعیین محل‌های سالم یا به اصطلاح سفید کمک‌کننده بوده و با کاهش ضریب به مقدار ۱ در شناسایی آسیب کمک می‌کند. برای افزایش دقت در تعیین شدت آسیب، تعداد معینی از گام‌های بهینه‌سازی با ضریب جریمه‌ی ۱ اجرا می‌شود که این امر می‌تواند به طرز قابل‌ملاحظه‌ای شدت آسیب را دقیق‌تر تعیین کند.

۳-۵ پیشنهادها

پیشنهادات مطرح شده در این بخش می‌تواند به بهبود عملکرد الگوریتم پیشنهادی کمک کند:

- استفاده از روش‌های دیگر بهینه‌سازی مانند روش مجانب‌های پویا و یا استفاده از روش‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری مانند روش الگوریتم ژنتیک و تراکم ذرات.
- استفاده از روش‌های مبتنی بر توابع پاسخ فرکانسی به منظور تسهیل در جمع‌آوری و استفاده از داده‌های ورودی.
- توسعه‌ی مدل موردبررسی برای سازه‌های پوسته‌ای.

مراجع

- [1] Doebling SW, Farrar CR, Prime MB, and Shevitz DW. Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics : a literature review. *Los Alamos Natl. Lab., NM (United States)* (1996) 133.
- [2] Doebling SW, Farrar CR, and Prime MB. A summary review of vibration-based damage identification methods. *Shock Vib. Dig.* (1998) 30: 91–105.
- [3] Ritter A. Aalborg Universitet Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures Rytter , Anders. (1993).
- [4] Gopalakrishnan S, Ruzzene M, and Hanagud S. Computational Techniques for Structural Health Monitoring. (2011). Available from: URL: <http://link.springer.com/10.1007/978-0-85729-284-1>
- [5] Law S-S and Zhu X-Q. Damage Models and Algorithms for Assessment of Structures under Operating Conditions. 1st ed. CRC Press Balkema, Leiden, Netherlands (2009).
- [6] Arora JS. Introduction to Optimum Design. 2nd ed. Elsevier Inc, San Diego, California (2004).
- [7] Muñoz A, Blondet M, Quintana U, and Leon H. The 13th World Conference on Earthquake Engineering, Earthquake - Resistant Performance of Peruvian School Buildings. (2004) 10.
- [8] Hong-ping Z, Bo H, and Xiao-qiang C. Detection of structural damage through changes in frequency. *Wuhan Univ. J. Nat. Sci.* (2008) 10: 1069–1073.
- [9] Aviation F. FAA Inspection Research Activities for Composite Materials. *Aviation* (2006).
- [10] I. A. Collell, J. Zatloukal, J. Ramon and CR. Destructive testing methods of welded joints. (2014).
- [11] Nguyen VH. Empirical Methods for Evaluating CARBON FIBER COMPOSITES. *Anal. Learn. Iterative Consecutive Exec.* (2014).
- [12] Limongelli MP. Frequency response function interpolation for damage detection under changing environment Frequency response function interpolation for damage detection under changing

- environment. *Mech. Syst. Signal Process.* (2016) 24: 2898–2913.
- [۱۳] Friswell MI and Mottershead JE. Finite Element Model Updating in Structural Dynamics. 1st ed. Vol. 38. Springer, Swansea, U.K (1995).
- [۱۴] Maia NMM, Silva JMM, and Almas EAM. DAMAGE DETECTION IN STRUCTURES : FROM MODE SHAPE TO FREQUENCY RESPONSE FUNCTION METHODS. *Mech. Syst. Signal Process.* (2003) 17: 489–498.
- [۱۵] Pandey AK, Biswas M, and Samman MM. DAMAGE DETECTION FROM MODE CHANGES IN CURVATURE. *J. Sound Vib.* (1991) 145: 321–332.
- [۱۶] Falzone G, Puerta G, Wei Z, Zhao M, Kumar A, Bauchy M, et al. The influences of soft and stiff inclusions on the mechanical properties of cementitious composites. *Cem. Concr. Compos.* (2016) 71: 153–165.
- [۱۷] Jin G, Lee S, Carletta J, and Nagayama T. Decentralized damage identification using wavelet signal analysis embedded on wireless smart sensors. *Eng. Struct.* (2011) 33: 2162–2172.
- [۱۸] Rhim J and Lee SW. A neural network approach for damage detection and identification of structures. *Comput. Mech.* (1995) 16: 437–443.
- [۱۹] Shyam D, Chowdary GBL, and Mahapatra DR. Structural Damage Identification Using Artificial Neural Network and Synthetic data.
- [۲۰] Law S-S and Zhu X-Q. Damage Models and Algorithms for Assessment of Structures under Operating Conditions. (2009).
- [۲۱] Logan DL. A FIRST COURSE IN THE FINITE ELEMENT METHOD. 5th ed. University of Wisconsin–Platteville (2012).
- [۲۲] Bendsøe MP and Sigmund O. Topology optimization: theory, methods, and applications. Vol. 2nd Editio, Engineering. (2003).
- [۲۳] Hassani B and Hinton E. Homogenization and Structural Topology Optimization. 1st ed. Springer, New York, USA (1999).
- [۲۴] Bendsøe MP and Kikuchi N. Generating optimal topologies in

- structural design using a homogenization method. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* (1988) 71: 197–224.
- [۲۵] Holmberg E, Torstenfelt B, Klarbring A, Holmberg E, Torstenfelt B, Klarbring A, et al. Stress constrained topology optimization Stress constrained topology optimization. (2013) 33–47.
- [۲۶] Svanberg K. THE METHOD OF MOVING ASYMPTOTES-A NEW METHOD FOR STRUCTURAL OPTIMIZATION. (1987) 24: 359–373.
- [۲۷] Zhou M and Rozvany GIN. The COC algorithm, Part II: Topological, geometrical and generalized shape optimization. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* (1991) 89: 309–336.
- [۲۸] V.B.Venkayya. Structural Optimization : A review and some recommendations. *Int. J. Numer. Methods Eng.* (1978) 13: 203–228.
- [۲۹] Olhoff N and Taylor J. On structural optimization. *J. Appl. Mech.* (1983) 50: 1139–1151.
- [۳۰] Duysinx P and Sigmund O. CONSTRAINTS IN OPTIMAL MATERIAL DISTRIBUTIONS. (1998).
- [۳۱] Colominas I, Casteleiro M, Navarrina F, and Muin I. Topology optimization of structures : A minimum weight approach with stress constraints. (2005) 36: 599–606.
- [۳۲] Bendsoe MP. Structural Optimization. (1989) 202: 193–202.
- [۳۳] Hajela P and Soeiro FJ. Structural damage detection based on static and modal analysis. *AIAA J.* (1990) 28: 1110–1115.
- [۳۴] Hassiotis S and Jeong GD. Identification of Stiffness Reductions Using Natural Frequencies. *J. Eng. Mech.* (1995) 121: 1106–1113.
- [۳۵] A. Morassi N. LOCALIZING A NOTCH IN A STEEL FRAME FROM FREQUENCY MEASUREMENTS By A. Morassi 1 and N. Rovere. (1997) 123: 422–432.
- [۳۶] Cawley P and Adams RD. A Vibration Technique for Non-Destructive Testing of Fibre Composite Structures. *J. Compos. Mater.* (1979) 13: 161–175.
- [۳۷] Ewins DJ. Modal Testing : Theory and Practice.

- [۳۸] Stubbs N and Osegueda R. Global nondestructive damage evaluation of offshore platforms using modal analysis. *Proceeding 6th Annu. offshore Technol. Conf.* (1987) pp.517-524.
- [۳۹] Abe M. Structural damage detection by natural frequencies. *37th Struct. Struct. Dyn. Mater. Conf.* (1996) 1064–1069.
- [۴۰] Haute T and Alamos L. Application of the Strain Energy Damage Detection Method To Plate- Like Structures. *J. Sound Vib.* (1999) 224: 359–374.
- [۴۱] Xiao-zhen C, Hong-ping ZHU, and Chuan-yao C. Structural damage identification using test static data based on grey system theory *. (2005) 790–796.
- [۴۲] Shih HW, Thambiratnam DP, and Chan THTÃ. ARTICLE IN PRESS Vibration based structural damage detection in flexural members using multi-criteria approach. (2009).
- [۴۳] Li YY, Cheng L, Yam LH, and Wong WO. Identification of damage locations for plate-like structures using damage sensitive indices: Strain modal approach. *Comput. Struct.* (2002) 80: 1881–1894.
- [۴۴] Hao H and Xia Y. Vibration-based Damage Detection of Structures by Genetic Algorithm. *J. Comput. Civ. Eng.* (2002) 16: 222–229.
- [۴۵] Bakhtiari-nejad F, Rahai A, and Esfandiari A. A structural damage detection method using static noisy data. (2005).
- [۴۶] Choi S, Park S, Yoon S, and Stubbs N. Nondestructive damage identification in plate structures using changes in modal compliance. (2005) 38: 529–540.
- [۴۷] Vakil-baghmisheh M and Peimani M. Crack detection in beam-like structures using genetic algorithms. (2008) 8: 1150–1160.
- [۴۸] Paolozzi A and Peroni I. Detection of Debonding Damage in a Composite Plate through Natural Frequency Variations. *J. Reinf. Plast. Compos.* (1990) 9: 369–389.
- [۴۹] Dems K and Mróz Z. Identification of damage in beam and plate structures using parameter-dependent frequency changes. *Eng.*

- Comput.* (2001) 18: 96–120.
- [۵۰] Yang Z, Chen X, Yu J, Liu R, Liu Z, and He Z. A damage identification approach for plate structures based on frequency measurements. *Nondestruct. Test. Eval.* (2013) 28: 321–341.
- [۵۱] Yu L and Xu P. An ACO-based algorithm for structural health monitoring. *2010 Progn. Syst. Heal. Manag. Conf. PHM '10* (2010).
- [۵۲] Naseralavi SS, Fadaee MJ, and Salajegheh J. Subset solving algorithm : A novel sensitivity-based method for damage detection of structures. (2010) 35: 2232–2252.
- [۵۳] Seyedpoor SM. Structural Damage Detection Using a Multi-Stage Particle Swarm Optimization. (2014).
- [۵۴] ع. س. شناسایی خرابی توسط الگوریتم اصلاح شده جامعه مورچگان با استفاده and م. ض. ص. ن (۱۳۹۰). از پاسخ استاتیکی. کنفرانس زلزله، سازه و روش های محاسباتی
- [۵۵] پ. ت. ارزیابی انواع پاسخ ها در عیب یابی سازه ها در روش های مبتنی بر and ر. ز. ص. ن. ع. س (۱۳۹۰). تحلیل حساسیت. کنفرانس زلزله، سازه و روش های محاسباتی
- [۵۶] ج. س. تشخیص خرابی در سازه ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک and گ. ص. ن. ع. س (۱۳۹۰). پیشرفته و آنالیز حساسیت. کنفرانس زلزله، سازه و روش های محاسباتی
- [۵۷] Nobahari M, Branch N, and Seyedpoor SM. Structural damage detection using an efficient correlation-based index and a modified genetic algorithm. (2011).
- [۵۸] Moradi S, Razi P, and Fatahi L. On the application of bees algorithm to the problem of crack detection of beam-type structures. 89: 2169–2175.
- [۵۹] Meruane V and Heylen W. Author ' s Accepted Manuscript An Hybrid Real Genetic Algorithm to Detect. *Mech. Syst. Signal Process.* (2010).
- [۶۰] Seyedpoor SM. A two stage method for structural damage detection using a modal strain energy based index and particle swarm optimization. *Int. J. Non. Linear. Mech.* (2012) 47: 1–8.
- [۶۱] Fu T and Ghosh a. Energy efficient deployment strategies in structural health monitoring using wireless sensor networks. *Struct. Control Heal. Heal. Monit.* (2012) 20: 971–986.

- [۶۲] Farooq M, Zheng H, Nagabhushana A, Roy S, Burkett S, Barkey M, et al. Damage Detection and Identification in Smart Structures using SVM and ANN. *Int. Soc. Opt. Photonics* (2012) 830–834.
- [۶۳] Qiao P, Lu K, Lestari W, and Wang J. Curvature mode shape-based damage detection in composite laminated plates. *Compos. Struct.* (2007) 80: 409–428.
- [۶۴] Moreno-García P, Araújo dos Santos J V., and Lopes H. A new technique to optimize the use of mode shape derivatives to localize damage in laminated composite plates. *Compos. Struct.* (2014) 108: 548–554.
- [۶۵] Navabian N, Bozorgnasab M, Taghipour R, and Yazdanpanah O. Damage identification in plate-like structure using mode shape derivatives. *Arch. Appl. Mech.* (2016) 86: 819–830.
- [۶۶] Lu XB, Liu JK, and Lu ZR. A two-step approach for crack identification in beam. (2012) 332: 282–293.
- [۶۷] ف. س. عیب‌یابی سازه‌ها بر اساس پاسخ‌های دینامیکی با استفاده از به‌روزرسانی مدل اجزاء محدود. (۱۳۹۰) پایان‌نامه ارشد عمران
- [۶۸] پ. ت. ز. مقایسه روش ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی تابع بنیادی شعاعی در عیب‌یابی and ر. ق. (۱۳۹۲) سازه‌ها. هفتمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران
- [۶۹] س. ش. عیب‌یابی سازه‌ها با استفاده از روش دو مرحله‌ای مبتنی بر الگوریتم and ح. پ. پ. ت. (۱۳۹۲) بهینه‌سازی فاخته. کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و توسعه پایدار شهری
- [۷۰] Nanda B, Maity D, and Maiti DK. Modal parameter based inverse approach for structural joint damage assessment using unified particle swarm optimization. (2014) 242: 407–422.
- [۷۱] Sun H and Büyüköztürk O. Optimal sensor placement in structural health monitoring using discrete optimization. *Smart Mater. Struct.* (2015) 24.
- [۷۲] Cha Y-J and Buyukozturk O. Structural Damage Detection Using Modal Strain Energy and Hybrid Multiobjective Optimization. *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.* (2015) 30: 347–358.
- [۷۳] Beskhyroun S, Wegner LD, and Sparling BF. New methodology for

the application of vibration-based damage detection techniques. *Struct. Control Heal. Monit.* (2011) 19: 88–106.

- [٧٤] Eraky A, Saad A, Anwar AM, and Abdo A. Damage detection of plate-like structures based on residual force vector. *HBRC J.* (2016) 12: 255–262.
- [٧٥] Katunin A. Vibration-based damage identification in composite circular plates using polar discrete wavelet transform. *J. Vibroengineering* (2013) 15: 355–363.
- [٧٦] Cao MS, Xu H, Bai RB, Ostachowicz W, Radzieński M, and Chen L. Damage characterization in plates using singularity of scale mode shapes. *Appl. Phys. Lett.* (2015) 106.
- [٧٧] Zhang W, Du Z, Sun G, and Guo X. A level set approach for damage identification of continuum structures based on dynamic responses. *J. Sound Vib.* (2017) 386: 100–115.
- [٧٨] Eslami SM, Abdollahi F, Shahmiri J, and Tavakkoli SM. STRUCTURAL DAMAGE DETECTION BY USING TOPOLOGY OPTIMIZATION FOR PLANE STRESS PROBLEMS. *Int. J. Optim. Civ. Eng.* (2019) 9: 159–176.
- [٧٩] Shahdin A, Morlier J, Niemann H, and Gourinat Y. Correlating low energy impact damage with changes in modal parameters: Diagnosis tools and FE validation. Vol. 10, Structural Health Monitoring. (2011).
- [٨٠] Richardson MH and Mannan MA. Correlating minute structural faults with changes in modal parameters. *Proc. SPIE - Int. Soc. Opt. Eng.* (1993) 1923: 893–898.
- [٨١] Doebling SWS, Farrar CRC, Prime MBM, and Shevitz DWD. Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review. *Los Alamos Natl. Lab.* (1996) 133p.
- [٨٢] Niemann H, Morlier J, Shahdin A, and Gourinat Y. Damage localization using experimental modal parameters and topology optimization. *Mech. Syst. Signal Process.* (2010) 24: 636–652.
- [٨٣] Shahdin A, Morlier J, and Gourinat Y. Correlating low-energy impact damage with changes in modal parameters: A preliminary study on composite beams. *Struct. Heal. Monit.* (2009) 8: 523–536.

- [٨٤] Sharma S. Application of Support Vector Machines for Damage Detection in Structures. (2008).
- [٨٥] Hassani B, Structures EH-C&, and 1998 undefined. A review of homogenization and topology optimization I—homogenization theory for media with periodic structure. *Elsevier* [cited 2019 Mar 12]. Available from: URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004579499800131X>
- [٨٦] Yaghoobi N and Hassani B. Topological Optimization of Vibrating Continuum Structures for Optimal Natural Eigenfrequency. *Int. J. Optim. Civ. Eng.* [serial online] 2017 7: 1–12. Available from: URL: <http://link.springer.com/10.1007/s00158-014-1107-x>
- [٨٧] Du J and Olhoff N. Topological design of freely vibrating continuum structures for maximum values of simple and multiple eigenfrequencies and frequency gaps. *Struct. Multidiscip. Optim.* (2007) 34: 91–110.
- [٨٨] Ray W. Clough JP. Dynamics of Structures. *Dyn. Struct.* (2013).
- [٨٩] Fox RL and Kapoor MP. Rates of change of eigenvalues and eigenvectors. *AIAA J.* (1968) 6: 2426–2429.
- [٩٠] Jasbir S. Arora. Introduction to Optimum Design. (2011).
- [٩١] S CRH. ' Methode generale pour la resolution des systemes d equations simultan '. (2010) 2–4.

Abstract

This research mainly aims to introduce topology optimization as a powerful means for damage detection in three dimensional continuum problems. A procedure for Structural Health Monitoring (SHM) is proposed in this paper consisting of both system identification and damage detection parts. Mode shape based objective function is considered to minimize the difference between responses of real and numerical models.

For system identification, modal expansion techniques are used to obtain unmeasured data from measured data. For that aim, dynamic expansion method and T_{SEREP} method are used in this research. In dynamic expansion method global mass and stiffness matrices are directly used to obtain unmeasured data. In T_{SEREP} method a transformation matrix is computed by linear transformation between intact mode shapes and damaged mode shapes at measured degrees of freedom. Then transformation matrix is used to obtain unmeasured data. Afterwards, damage detection process is used to localize and quantify damages in structure.

Damage is assumed as reduction in mass and stiffness of elements. In order to model damages, SIMP method is used. For topology optimization, steepest descent method is utilized to optimize objective function. In sensitivity analysis, derivatives of design variables are calculated by analytical sensitivity formulation. In the end 6 numerical examples are presented in the end to show accuracy of proposed method. According to results, it can be claimed that proposed method can obtain unmeasured data by the aid of modal expansion techniques. Also, damage detection process can localize and quantify damages accurately.

Innovation of this research is to utilize modal expansion techniques in damage detection of continuum structures to overcome incomplete data issue and using topology optimization method for parameterization of design domain in order to model damage and attain damage location and intensity.

For mentioned purposes, a MATLAB code was developed based on 3D finite element method and results are discussed over 6 different examples provided in section five. According to the results, location and intensity of damages are obtained properly.

Keywords: structural health monitoring, topology optimization, damage identification, modal expansion, SIMP.



Shahrood University of Technology

Department of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Structural Engineering

Damage Detection in Three Dimensional Problems Using
Topology Optimization

By: Farshad Abdollahi

Supervisor:

Dr. Seyed Mehdi Tavakkoli

Date: July 2019