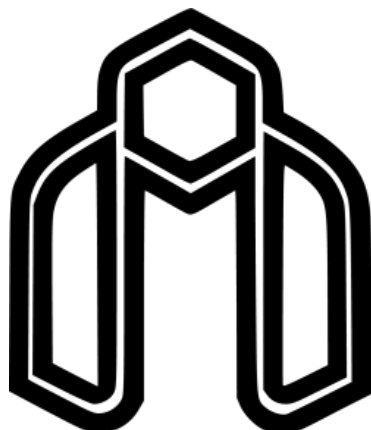


به نام خدایوند بخشایشنده هر بان
به نام خدایوند بخشایشنده هر بان



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه

تشخیص مشخصات سازه‌ای با استفاده از روش کاهش تصادفی

نگارنده

آرزو احدی

استاد راهنما

دکتر علی کیهانی

دی ۱۳۹۹

شماره: = ع/۴۳، ۹۹

تاریخ: ۱۵، ۱۱، ۱۳۹۹

باسمه تعالی



دانشگاه صنعتی شاهرود
مدیریت تحصیلات تکمیلی

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

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم آرزو احدی با شماره دانشجویی ۹۵۰۰۷۹۴ رشته عمران گرایش سازه تحت عنوان تشخیص مشخصات سازه ای با استفاده از روش کاهش تصادفی (اصلاحیه) که در تاریخ ۱۳۹۹/۱۰/۲۱ با حضور هیأت داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

☐ الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	☐ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸-۱۸/۹۹
☒ ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۷/۹۹	☐ د) درجه متوسط: نمره ۱۴-۱۵/۹۹
☐ ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد	
☒ نوع تحقیق: نظری	☐ عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر علی کیهانی	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	-	-	
۳- استاد مشاور	-	-	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر میثم جلالی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر فرنوش باسلیقه	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر ابراهیم زمانی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر رضا نادری

تاریخ و امضاء مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مرادفوت شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع

مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

شکر و قدردانی

ضمن شکر و شیره از استاد محترم «جناب آقای دکتر کیهانی» که راهنمایی ها و حمایت های بی دریغ ایشان در راستای انجام هر چه بهتر این پایان نامه بسیار راهگشا بود.

و با تشکر از جناب آقای مهندس رضا کوردزی که همراهی ایشان این مسیر را برای بنده هموار نمودند.

و

تقدیم به ماد و پدر عزیزم که تمام آنچه هستم را مدیون تلاش و بردباری آن هایم. به امید آن که لجنه رضایتی بر لبان شان نقش بندد.

تهدنامه

اینجانب آرزو احدی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته عمران گرایش سازه دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تشخیص مشخصات سازه‌ای با استفاده از روش کاهش تصادفی تحت راهنمایی دکتر علی کیهانی 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 مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی 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) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

ملکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .

استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

تاریخ

امضای دانشجو

(مهر)

1402/05/01

چکیده

پایش سلامت^۱ سازه‌ها یکی از زمینه‌های کارآمد در مهندسی عمران برای ارزیابی و نگهداری درازمدت سازه‌های مهم می‌باشد. توجه به خرابی‌های کوچک و پیشگیری به موقع از پیشرفت خرابی، چه از نظر اقتصادی و چه از نظر ایمنی، خالی از لطف نخواهد بود.

یکی از روش‌های مهم پایش سلامت سازه‌ها روش دینامیکی یا همان روش ارتعاشی است. از آنجایی که خواص ارتعاشی سازه از جمله فرکانس و شکل‌های مودی تابع خواص فیزیکی آن است، بنابراین تغییر در خواص فیزیکی سازه می‌تواند تغییراتی را در خواص ارتعاشی آن به وجود آورد، از این رو، این تغییرات می‌تواند به منزله نشانه‌ای از وقوع خسارت سازه‌ای تلقی شوند.

به همین منظور در این پایان‌نامه سعی شده است با استفاده از الگوریتمی توسعه‌یافته توسط روش کاهش تصادفی^۲، به خصوصیات سازه و اشکال مودی^۳ دست پیدا کرد تا بتوان با استفاده از تشخیص تغییرات در این خواص ارتعاشی، خرابی سازه را تشخیص داد.

روش کاهش تصادفی علاوه بر حذف نویز، به دلیل میانگین‌گیری، باعث کاهش دیتای لازم برای پردازش شده که این امر منجر به کاهش زمان مورد نیاز برای پردازش و استفاده بهینه از اطلاعات ورودی با ارزش می‌شود.

در این پایان‌نامه با دو آزمون متفاوت، یک ساختمان ۳ طبقه و یک تیر دو سر مفصل، به صحت‌سنجی الگوریتم پیشنهادی پرداخته شده است، سپس دقت بالای الگوریتم با استفاده از داده‌های واقعی یک ساختمان ۴ طبقه بررسی شده و با استفاده از دیتای واقعی یک سازه ۴ طبقه دیگر در حالت‌های سالم و دارای خرابی، مشخصات سازه بدست آورده شده است و با نتایج مقاله که مقایسه شده است. در آخر مشاهده می‌شود که مشخصات سازه‌ی از الگوریتم در زمان کوتاهی بدست آمده و با دقت خوبی با خروجی روش‌های دیگر برابری می‌کند.

واژه‌های کلیدی:

پایش سلامت، روش کاهش تصادفی، تشخیص خرابی، اشکال مودی

^۱ Health monitoring

^۲ Random decrement technique

^۳ Mode shape

فهرست مطالب

ج	تشکر و قدردانی.....
د	تعهد نامه.....
ه	چکیده.....
ه	پایش سلامت، روش کاهش تصادفی، تشخیص خرابی، اشکال مودی.....
و	فهرست مطالب.....
ح	فهرست اشکال.....
ل	فهرست جداول.....
۱	۱ فصل اول : مقدمه.....
۲	۱.۱ اهمیت و لزوم پیش سلامت سازه.....
۴	۲.۱ اهداف تحقیق.....
۵	۳.۱ ساختار پایان نامه.....
۷	۲ فصل دوم : مروری بر تحقیقات گذشته.....
۸	۱.۲ پیش گفتار.....
۹	۲.۲ بررسی روشهای تشخیص خرابی با بهره‌گیری از داده‌های مودال.....
۱۴	۱.۲.۲ شاخص خرابی بدست آمده از داده‌های مودال.....
۱۷	۲.۲.۲ تاریخچه روش انحنای شکل مودی.....
۱۹	۳.۲.۲ تاریخچه روشهای دیگر مودال.....
۲۲	۴.۲.۲ تاریخچه روش کاهش تصادفی.....
۲۴	۵.۲.۲ کاربرد روش کاهش تصادفی در الگوریتمهای شناسایی در حوزه‌ی زمان.....
۲۵	۶.۲.۲ کاربرد روش کاهش تصادفی در الگوریتم‌های شناسایی در حوزه‌ی فرکانس.....
۲۵	۷.۲.۲ کاربرد عملی روش کاهش تصادفی برای بدست آوردن اشکال مودی با استفاده از روش SSI-COV.....
۲۷	۳ فصل سوم : روش پیشنهادی.....
۲۸	۱.۳ پیش گفتار.....
۲۹	۲.۳ استراتژی پیش سلامت.....
۲۹	۱.۲.۳ روشهای تحلیل داده.....
۳۲	۳.۳ تئوری کاهش تصادفی (Random decrement technique).....

۱.۳.۳	بدست آوردن سیگنال ورودی	۳۶
۱.۱.۳.۳	معادلات سیستم چند درجه آزادی	۳۶
۲.۱.۳.۳	محاسبه ی پاسخ ضربه	۳۹

۴ فصل چهارم : صحت سنجی

۱.۴	پیش گفتار	۴۲
۲.۴	آزمون اول:	۴۳
۴.۲.۱	بدست آوردن شکل مودی به صورت عددی:	۴۳
۲.۲.۴	اعمال روش کاهش تصادفی	۴۷
۳.۲.۴	تخمین میرایی	۴۸
۴.۲.۴	شکل مودی حاصل از الگوریتم توسعه یافته با روش کاهش تصادفی	۵۰
۴.۳	آزمون دوم: [۴۸]	۵۲
۱.۳.۴	بدست آوردن مشخصات تیر	۵۲
۱.۱.۳.۴	بدست آوردن شکل مودی حاصل از روابط تئوری:	۵۲
۲.۳.۴	بدست آوردن سیگنال جابه جایی ورودی	۵۴
۴.۳.۳	اعمال روش کاهش تصادفی	۵۵
۴.۳.۴	تخمین میرایی	۵۶
۵.۳.۴	شکل مودی حاصل از الگوریتم توسعه یافته با روش کاهش تصادفی	۵۸

۵ فصل پنجم : شبیه سازی

۱.۵	پیش گفتار	۶۲
۲.۵	آزمون اول:	۶۲
۱.۲.۵	استخراج سیگنال ورودی	۶۳
۲.۲.۵	اعمال روش کاهش تصادفی	۶۴
۵.۲.۳	تخمین میرایی	۶۹
۴.۲.۵	شکل مودی حاصل از الگوریتم توسعه یافته با روش کاهش تصادفی	۶۹
۳.۵	آزمون دوم:	۷۱
۵.۳.۱	استخراج سیگنال ورودی	۷۲
۲.۳.۵	اعمال روش کاهش تصادفی	۷۲
۵.۳.۳	تخمین میرایی	۷۷
۴.۳.۵	شکل مودی حاصل از الگوریتم توسعه یافته با روش کاهش تصادفی	۷۹
۵.۳.۵	تشخیص خرابی	۸۰

۸۵ فصل ششم : نتیجه گیری و پیشنهادات

۸۹ فصل هفتم : منابع و مآخذ

۹۵ فصل هشتم : پیوست

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: ارتباط پایش سلامت با پایش سلامت انسان..... ۲
- شکل ۱-۲: سقوط پرواز شماره ۱۰۱ شرکت هواپیمایی آلوها ۱۸ آوریل ۲۳۸۸..... ۹
- شکل ۲-۲: جابه‌جایی شکل مودی (سمت چپ) و انحنای شکل مودی (سمت راست)..... ۱۸
- شکل ۳-۲: تفاوت بین انحنای شکل مودی در دو حالت سالم و آسیب‌دیده..... ۱۸
- شکل ۴-۲: رویکرد استفاده از توابع RD..... ۲۴
- شکل ۵-۲: پل کرونا، واقع در جنوب کشور پرتغال / جانمایی سنسورهای پایش سلامت..... ۲۵
- شکل ۶-۲: تابع کاهش سلامت Cross و Auto در سنسور شماره ۲۳ و ۱۵..... ۲۶
- شکل ۷-۲: اشکال مودی با استفاده از روش‌های شناسایی مودال SSI-COV و RD-FDD..... ۲۶
- شکل ۱-۳: عملکرد تابع کاهش تصادفی..... ۳۲
- شکل ۲-۳: انتخاب triggering value..... ۳۳
- شکل ۳-۳: ارتعاش واقعی سازه..... ۳۶
- شکل ۴-۳: ارتعاش سازه تحت مود اول..... ۳۶
- شکل ۵-۳: ارتعاش سازه تحت مود دوم..... ۳۷
- شکل ۶-۳: سیستم جرم و فنر معادل دی کوپله شده با میرایی..... ۳۹
- شکل ۷-۳: تابع ضربه..... ۳۹
- شکل ۱-۴: سیگنال شتاب طبقات اول تا سوم..... ۴۴
- شکل ۲-۴: طیف فرکانسی شتاب طبقه اول..... ۴۴
- شکل ۳-۴: طیف فرکانسی شتاب طبقه دوم..... ۴۵
- شکل ۴-۴: طیف فرکانسی شتاب طبقه سوم..... ۴۵

- شکل ۴-۵ : شتاب طبقه اول فیلتر شده به مولفه های فرکانسی..... ۴۶
- شکل ۴-۶ : شتاب طبقه سوم فیلتر شده به مولفه های فرکانسی..... ۴۶
- شکل ۴-۷ : شتاب طبقه سوم فیلتر شده به مولفه های فرکانسی..... ۴۷
- شکل ۴-۸ : RDT طبقه اول..... ۴۷
- شکل ۴-۹ : RDT طبقه دوم..... ۴۸
- شکل ۴-۱۰ : RDT طبقه سوم..... ۴۸
- شکل ۴-۱۱ : بدست آوردن میرایی از روی نمودار ارتعاش آزاد..... ۴۹
- شکل ۴-۱۲ : اشکال مودی..... ۵۱
- شکل ۴-۱۳ : شکل مودی اول_تئوری..... ۵۳
- شکل ۴-۱۴ : شکل مودی دوم_تئوری..... ۵۳
- شکل ۴-۱۵ : شکل مودی سوم_تئوری..... ۵۳
- شکل ۴-۱۶ : جابجایی سه نقطه اول بر حسب زمان..... ۵۴
- شکل ۴-۱۷ : طیف فرکانسی جابه جایی نقطه اول..... ۵۵
- شکل ۴-۱۸ : RDT نقطه اول به تفکیک سه فرکانس اول..... ۵۵
- شکل ۴-۱۹ : RDT نقطه چهارم به تفکیک سه فرکانس اول..... ۵۶
- شکل ۴-۲۰ : تخمین میرایی..... ۵۶
- شکل ۴-۲۱ : شکل مودی اول_RDT..... ۵۹
- شکل ۴-۲۲ : شکل مودی دوم_RDT..... ۵۹
- شکل ۵-۱ : سازه مدل..... ۶۲
- شکل ۵-۲ : سیگنال طبقات..... ۶۴
- شکل ۵-۳ : طیف فرکانسی طبقه اول..... ۶۴

- شکل ۴-۵: طیف فرکانسی طبقه دوم..... ۶۵
- شکل ۵-۵: طیف فرکانسی طبقه سوم..... ۶۵
- شکل ۶-۵: طیف فرکانسی طبقه چهارم..... ۶۶
- شکل ۷-۵: RDT طبقه اول به تفکیک سه فرکانس اول..... ۶۷
- شکل ۸-۵: RDT طبقه دوم به تفکیک سه فرکانس اول..... ۶۷
- شکل ۹-۵: RDT طبقه سوم به تفکیک سه فرکانس اول..... ۶۸
- شکل ۱۰-۵: RDT طبقه چهارم به تفکیک سه فرکانس اول..... ۶۸
- شکل ۱۱-۵: تخمین میرایی..... ۶۹
- شکل ۱۲-۵: مود اول و دوم و سوم در راستای شرقی و غربی..... ۶۹
- شکل ۱۳-۵: مود اول و دوم و سوم در راستای شمالی و جنوبی..... ۷۰
- شکل ۱۴-۵: مود اول و دوم پچش..... ۷۰
- شکل ۱۶-۵: سازه مورد بررسی ۷۱
- شکل ۱۵-۵: سازه مورد بررسی مقاله..... ۷۱
- شکل ۱۷-۵: سازه مورد بررسی مقاله..... ۷۱
- شکل ۱۸-۵: سیگنال طبقات اول تا چهارم..... ۷۲
- شکل ۱۹-۵: طیف فرکانسی طبقه همکف..... ۷۳
- شکل ۲۰-۵: طیف فرکانسی طبقه اول..... ۷۳
- شکل ۲۱-۵: طیف فرکانسی طبقه دوم..... ۷۴
- شکل ۲۲-۵: طیف فرکانسی طبقه سوم..... ۷۴
- شکل ۲۳-۵: RDT طبقه اول به تفکیک فرکانس های ۲ تا ۴..... ۷۵
- شکل ۲۴-۵: RDT طبقه دوم به تفکیک فرکانس های ۲ تا ۴..... ۷۵

- شکل ۵-۲۵: RDT طبقه سوم به تفکیک فرکانس های ۲ تا ۴..... ۷۶
- شکل ۵-۲۶: RDT طبقه چهارم به تفکیک فرکانس های ۲ تا ۴..... ۷۶
- شکل ۵-۲۷: تخمین میرایی..... ۷۷
- شکل ۵-۲۸: شکل مودی مودهای دوم تا چهارم بدست آمده از الگوریتم..... ۷۹
- شکل ۵-۲۹: شکل مودی مودهای دوم تا چهارم بدست آمده از مقاله..... ۷۹
- شکل ۵-۳۰: شکل مودی مودهای دوم تا چهارم بدست آمده از الگوریتم در حالت state ۲۲..... ۸۱
- شکل ۵-۳۱: شکل مودی مودهای دوم تا چهارم بدست آمده از الگوریتم در حالت state ۱۸..... ۸۲
- شکل ۵-۳۲: شکل مودی مود دوم در حالت های state ۱۳ و state ۱۸ و state ۲۲..... ۸۲
- شکل ۵-۳۳: شکل مودی مود سوم در حالت های state ۱۳ و state ۱۸ و state ۲۲..... ۸۳
- شکل ۵-۳۴: شکل مودی مود چهارم در حالت های state ۱۳ و state ۱۸ و state ۲۲..... ۸۳

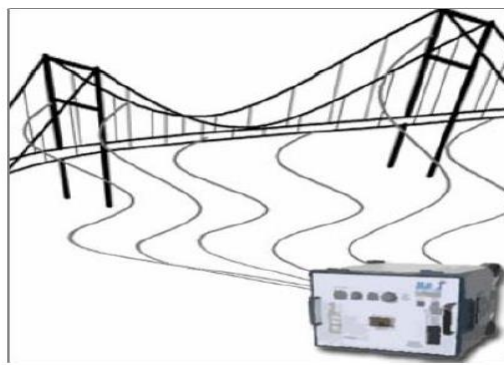
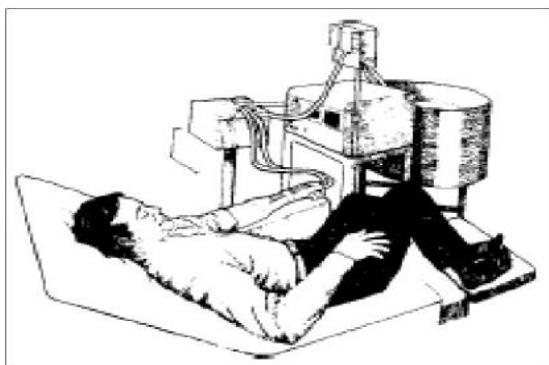
فهرست جداول

جدول ۱-۲ : روش های شناسایی.....	۱۱
جدول ۲-۲:فرکانس های ۵ مود اول در تیر طره ای سالم و آسیب دیده.....	۱۷
جدول ۱-۴ : مشخصات ورودی سازه.....	۴۳
جدول ۲-۴ : پارامتر های مودال.....	۴۳
جدول ۳-۴ :مقادیر ضریب میرایی مولف های فرکانسی RDT.....	۴۹
جدول ۵-۴ :مشخصات تیر.....	۵۲
جدول ۶-۴ : مقادیر ضریب میرایی مود اول در ۵۰ نقطه (تقریبا برابر با ۰,۰۱).....	۵۷
جدول ۷-۴ : مقادیر ضریب میرایی مود دوم در ۵۰ نقطه (تقریبا برابر با ۰,۰۱۵).....	۵۷
جدول ۸-۴ :مقادیر ضریب میرایی مود سوم در ۵۰ نقطه (تقریبا برابر با ۰,۰۲).....	۵۸
جدول ۱-۵ : دیتای ورودی.....	۶۳
جدول ۲-۵ :میرایی بدست آمده از روش کاهش تصادفی برای فرکانس دوم.....	۷۷
جدول ۳-۵ :میرایی بدست آمده از روش کاهش تصادفی برای فرکانس سوم.....	۷۸
جدول ۴-۵ : میرایی بدست آمده از روش کاهش تصادفی برای فرکانس چهارم.....	۷۸
جدول ۵-۵ : میرایی بدست آمده در مقاله.....	۷۸
جدول ۶-۵ : جدول حالت های آزمایش.....	۸۰

فصل اول: مقدمه

۱.۱ اهمیت و لزوم پایش سلامت سازه

پایش سلامت سازه‌ها به معنای پیاده‌سازی تمام راهبردهایی است که با آن می‌توان نقایص و مشکلات سازه را تشخیص و بررسی کرد. مطابق با شکل ۱-۱ این سیستم را می‌توان همانند سیستم مغز و اعصاب بدن در نظر گرفت؛ بدین صورت که اعصاب شرایط محیط و بدن را در هر لحظه حس کرده و به مغز ارسال می‌شود. داده‌های پردازش شده توسط مغز ارسال می‌گردد. حال می‌توان این گونه عنوان کرد که سازه‌ی بدون پایش سلامت همانند بدن بدون سیستم عصبی است. در بدن بدون سیستم عصبی ممکن است عضو یا اعضای دچار فرسودگی و آسیب شده باشند؛ در حالی که صاحب آن بدن این را نمی‌داند و قاعدتا هیچ اقدامی در جهت بهبود آن انجام نخواهد داد؛ این در نهایت منجر به مرگ خاموش آن عضو یا اعضا خواهد گردید [۱].



Human Health Monitoring (HHM) Structural Health Monitoring (SHM)

شکل ۱-۱: ارتباط پایش سلامت با پایش سلامت انسان

وقوع خرابی در طول عمر سازه‌ها امری اجتناب‌ناپذیر است. تاکنون در اثر وقوع آسیب‌ها در سیستم‌های سازه‌ای، خسارات مالی و جانی فراوانی پدید آمده است. بسیاری از این آسیب‌ها را می‌توان با بررسی‌های اولیه از وضعیت سازه ترمیم نمود و از گسترش خرابی در سازه‌ها و فروریختن آن‌ها جلوگیری کرد. هدف از پایش سلامت سازه پیدا کردن خرابی در سیستم‌های سازه‌ای به منظور ترمیم و نگهداری سازه است. در این فصل به بیان کلیات و شرح مختصری از انواع روش‌ها و چالش‌ها در طی پایش سلامت سازه پرداخته شده است.

فرآیند شناسایی خرابی و پایش وضعیت سازه‌ای ساختمانی در دهه‌های اخیر توسط محققان به صورت فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته است.

خرابی‌های ساختمان‌ها و پل‌ها بدون هیچ هشدار قبلی قابل مشاهده در بسیاری از نقاط دنیا در حال افزایش است. با توجه به افزایش شمار این خسارات، توسعه‌ی روش‌هایی برای تشخیص خرابی‌هایی که منجر به این‌گونه خسارات شوند بسیار ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین ساختمان‌ها و ابرسازه‌های مهم، درست شبیه یک بیمار در بیمارستان، باید برای بروز نشانه‌های آسیب و یا خرابی احتمالی تحت پایش قرار گیرند.

بسیاری از تکنیک‌های تشخیص خرابی قدیمی که هنوز نیز مورد استفاده قرار گرفته می‌شوند از روش‌های تجربی مانند امواج تنش^۴، امواج فراصوتی^۵، اشعه ایکس، صوتی^۶ و یا گرمایی استفاده می‌کنند که روش‌های تشخیص خرابی غیر مخرب^۷ نامیده می‌شوند. هرچند استفاده از این روش‌ها نیاز به اطلاع از محل احتمالی خرابی در سازه دارد و همچنین تنها برای قسمت‌هایی از سازه که قابل دسترسی است کاربرد خواهد داشت. نتایج آزمایشات غیرمخرب این‌چنینی در اغلب موارد غیر قابل اتکا است و همچنین از آن‌جا که نیازمند اندازه‌گیری تنش‌ها و کرنش‌ها و شتاب‌های محلی با استفاده از حسگرهای نصب شده بر روی برخی اعضای مهم در زمان‌های مختلف است کار چندان ساده‌ای نیست. هر چند تغییرات در وضعیت تنش‌ها و کرنش‌ها می‌تواند هشدار برای خرابی‌های احتمالی باشد اما همه این روش‌ها بسیار زمان‌بر و پرهزینه هستند و آزمایش تمامی اعضای مهم یک سازه بزرگ غیرعملی به نظر می‌رسد.

به دلیل این نواقص محققان روش‌هایی را دنبال کرده‌اند که می‌تواند بر روی سازه‌های بزرگ به صورت کلی و در یک بازه زمانی کوتاه‌تر اعمال شود. تکنیک‌های شناسایی خرابی بر اساس ارتعاش که روش‌هایی کلی به شمار می‌آیند می‌توانند وضعیت سازه را بصورت یکجا شناسایی کنند. تشخیص خرابی با استفاده از داده‌های ارتعاشی از آنجا ممکن است که وقوع خرابی باعث تغییر در ویژگی‌های فیزیکی سازه از قبیل

Tension waves^۴

Ultrasonic waves^۵

acoustic^۶

Non-destructive^۷

جرم، سختی و میرایی در نتیجه تغییر در ویژگی‌های دینامیکی سازه از قبیل فرکانس‌های طبیعی، شکل مودها و... می‌شود.

بنابراین با بررسی ویژگی‌های دینامیکی ناشی از ارتعاش یک سازه می‌توان ویژگی‌های خرابی سازه اعم از موقعیت و مقدار خرابی را شناسایی کرد. اما در تکنیک‌های شناسایی خرابی بر اساس ارتعاش با مشکلاتی از قبیل خطاهای اندازه‌گیری، شکل مودهای ناقص، جواب‌های غیر یکتا در محاسبات و مسائل محیطی روبرو هستند. این مشکلات برای سازه‌های عمرانی شدیدتر است [۲].

۲.۱ اهداف تحقیق

با توجه به موارد مذکور، شناسایی خصوصیات دینامیکی سازه امری حیاتی به شمار می‌رود. اگرچه خصوصیات دینامیکی سازه‌ها در مراتب مختلفی قابل تعریف است، در این پایان‌نامه منظور از خصوصیات دینامیکی، خصوصیات مودی شامل اشکال مودی، فرکانس‌های طبیعی و نسبت‌های میرایی است. چالش بزرگی که انگیزه اصلی جهت انجام این پروژه به شمار می‌رود، ضعف روش‌های متداول شناسایی خصوصیات مودی از سیگنال‌های ثبت شده بر روی سازه‌هاست.

اهداف دنبال شده در این پایان‌نامه به طور مشخص عبارتند از:

- معرفی روشی جهت محاسبه‌ی مشخصات سازه‌ای با استفاده از انواع ارتعاش سازه در زمان کوتاه‌تر.
- بررسی قابلیت روش پیشنهادی جهت تشخیص خرابی در سازه‌ها.
- بررسی دقت روش پیشنهادی جهت تعیین مشخصات سازه‌ای.

۳.۱ ساختار پایان نامه

فصل اول- مقدمه - در این فصل کلیتی راجع به لزوم پایش سلامت سازه‌ای، پیشینه، گستره و اهداف تحقیق به صورت خلاصه آورده شده است.

فصل دوم- مروری بر تحقیقات گذشته - در این فصل با اشاره به روش‌های مختلف پیشنهاد شده برای شناسایی خسارت، مروری بر تحقیقات انجام شده در این زمینه صورت گرفته است. نهایتاً روش‌های مختلف پیشنهاد شده همراه با مزایا و معایب هر یک از آن‌ها مورد اشاره واقع شده است.

فصل سوم- روش پیشنهادی - در این فصل جایگاه روش پیشنهادی در روند استراتژی پایش سلامت و تئوری آن توضیح داده شده است.

فصل چهارم- صحت سنجی - در این فصل با دو آزمون متفاوت، یک ساختمان ۳ طبقه و یک تیر دو سر مفصل، به صحت سنجی الگوریتم پیشنهادی پرداخته شده است.

فصل پنجم- شبیه سازی - در این فصل با استفاده از الگوریتم پیشنهادی بر روی داده‌های واقعی یک ساختمان ۴ طبقه فرکانس‌های طبیعی سازه با دقت بالایی محاسبه شده و با استفاده از دیتای واقعی که دارای پاسخ یک سازه ۴ طبقه در حالت های سالم و دارای خرابی می‌باشد، توانایی تشخیص خرابی الگوریتم مورد بررسی قرار گرفته شده است.

فصل ششم- نتیجه‌گیری و پیشنهادات - در نهایت جمع‌بندی کلی از آنچه در این پایان‌نامه آمده است در این فصل صورت گرفته است.

فصل دوم: مروری بر تحقیقات گذشته

۱.۲ پیش گفتار

بنا بر تعریف، فن پایش سلامت سازه‌ها تشخیصی از وضعیت مواد به کاررفته در سازه و بخش‌های متفاوت آن را در طول عمر سازه به دست می‌دهد. اساساً لازم است وضعیت سلامت هر سازه در محدوده‌ی تعریف شده‌ی طراحی باشد، اگرچه می‌تواند در اثر واکنش طبیعی با محیط و اتفاقات ناگهانی تغییر کند. با استفاده از بعد زمانی پایش سازه، که امکان لحاظ کردن تاریخچه‌ی اطلاعات کامل از سازه را فراهم می‌کند، پیش‌بینی خسارت وارد بر سازه میسر خواهد بود. در این صورت می‌توان پایش سلامت سازه را به عنوان روشی جدید به منظور پیش‌بینی غیرمخرب معرفی کرد. اساس این روش بر استفاده از انواع حسگرها، ارسال داده‌ها، کاربرد مواد هوشمند، محاسبات متنوع و توانایی پردازش سازه‌ها استوار است. نخستین بخش این سامانه، به عملکرد پایش یکپارچه‌ی سازه مربوط می‌شود و توسط حسگر به منظور ایجاد یک سیگنال به یک زیرسامانه (جهت جمع آوری و ذخیره داده‌ها) فرستاده می‌شود. چندین حسگر مشابه برای تشکیل یک شبکه می‌توانند به یکدیگر متصل شوند و داده‌های آن‌ها با انواع دیگر حسگرها ادغام شود. سیگنال دریافت شده توسط زیرسامانه به موازات داده‌های ثبت شده‌ی قبلی توسط کنترلر، جهت اعلام وضعیت سلامت سازه استفاده می‌شود. معمولاً ابزارهای بسیاری به منظور پایش وضعیت سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند که از جمله مهمترین آنها می‌توان به حسگرهای پیزوالکتریک، حسگرهای فیبرنوری و استفاده از مواد هوشمند اشاره کرد. به طور کلی پایش سلامت سازه‌ها براساس دو رویکرد مبتنی بر تشخیص و پیش‌بینی استوار است. بخش مهم و قابل پیشرفت در این حوزه همان پیش‌بینی است؛ زیرا رویکرد تشخیص، عمدتاً به همان روش‌های ارزیابی غیرمخرب می‌پردازد [۳].

از دانش ارتعاشات چنین برمی‌آید که وجود ترک در هر سازه به کاهش فرکانس طبیعی سامانه منجر می‌شود. با کاهش فرکانس طبیعی، حد تحمل سازه نیز کاهش می‌یابد، لذا بارگذاری‌ها زودتر می‌توانند خود را به حد فرکانس طبیعی برسانند. با برابرشدن فرکانس بارگذاری با یکی از ۳ فرکانس‌های طبیعی سازه پدیده‌ی تشدید رخ می‌دهد و در نهایت باعث فروپاشی کلی سازه می‌شود. حال اگر سامانه‌ی پایش وضعیت سازه روی سازه جانمایی شود، به محض ایجاد ترک یا هر عیب دیگر، سامانه‌ی مذکور اطلاعاتی را به مرکز کنترل ارسال می‌نماید و به دنبال آن در جهت رفع آن عیب اقدام می‌شود. تمامی مطالب بیان شده بر اهمیت پایش سلامت سازه‌ها دلالت دارد. در شکل ۱-۲ نمایشی از سانحه، مورخ ۲۴ سقوط پرواز شماره ۱۰۱ شرکت هواپیمایی آلوها ۱۸ آوریل ۲۳۸۸، نمایش داده شده است. علت سقوط این هواپیما

عدم کنترل خوردگی گزارش شده است. پس از بروز چنین رخدادهایی بود که جامعه بشری درصدد یافتن راه‌حلی برای رفع این مشکلات و جلوگیری از چنین سوانحی برآمد. از دیگر دلایل پایش سلامت سازه‌ها، صرفه‌جویی تعمیر و نگهداری از سامانه‌های متنوع صنعتی است. مثلاً چنانچه یک سازه‌ی نیروگاهی یا یکی از قطعات وابسته به صنایع هوافضا دچار مشکل شود یا از کار بیافتد، راه‌اندازی مجدد آن هزینه‌ی گزافی خواهد داشت.



شکل ۱-۲: سقوط پرواز شماره ۱۰۱ شرکت هواپیمایی آلوها ۱۸ آوریل ۲۳۸۸

۲.۲ بررسی روش‌های تشخیص خرابی با بهره‌گیری از داده‌های

مودال

با توجه به لزوم شناسایی خرابی در مراحل اولیه آن و جلوگیری از پیشرفت خرابی و روند کلی کاهش سختی، فرض خرابی خطی و در نظرگیری خرابی بصورت کاهش سختی فرض قابل قبولی می‌تواند باشد که این مسئله نیز با بررسی مطالعات انجام شده، که اکثریت خرابی را خطی فرض کرده‌اند، مشهود است. علاوه بر این با توجه به پیچیدگی‌های مطرح در مسئله پایش سلامت سازه، فرض خرابی خطی منجر به سادگی بخشی از این مسئله و امکان رسیدگی به مسائل مهمتری همچون مکان دقیق خرابی و شدت آن را فراهم می‌سازد.

تعدادی از محققان بدون استفاده از روش‌های رایج شناسایی خرابی بر اساس مشخصات مودال سازه، به طور مستقیم از معادلات بدست آمده از خصوصیات فیزیکی سازه براساس قانون اول ترمودینامیک

استفاده کردند [۳]. جین و همکاران در سال ۲۰۰۰، به بررسی امکان استفاده از روش معیار انرژی در تحلیل اجزا محدود غیر خطی برای شناسایی خرابی در پل‌ها پرداختند [۴]. در این مطالعه رفتار غیرخطی پل‌ها در اثر تغییر شکل های غیرالاستیک مواد و خرابی ناشی از ترک‌ها تحت بار دینامیکی بررسی شد. در سال ۲۰۰۲، اون و همکاران یک مدل مناسب برای رفتار غیرخطی ناشی از ترک‌ها ارائه دادند [۵]. در این مدل تغییر سختی در حالت تبدیل ترک باز به بسته از فرم تانژانت هذلولوی پیروی می‌کرد. مدل حاصله در بدست آوردن پاسخ تیر بتن‌آرمه در سطوح مختلف خرابی استفاده شد و آن‌ها متوجه شدند که ترک‌ها در سیکل‌های ارتعاشی به طور کامل بسته نمی‌شوند.

شاخص‌های خرابی ۱ با استفاده از داده‌های مودال بدست آمده از آزمایش دینامیکی سازه سالم و آسیب دیده مانند فرکانس‌های طبیعی، شکل‌مودها و غیره تعریف می‌شوند. همبستگی تغییرات به وجود آمده در این مشخصات مودال به علت خرابی با دیگر اطلاعات مربوط به سازه و پاسخ‌های پیش‌بینی شده که از مدل ریاضی بدست آمده‌اند، بررسی می‌شود تا محل خرابی را شناسایی کنند. این روش‌ها نسبتاً ساده هستند و نمی‌توانند شدت خرابی را تعیین کنند. البته قابل ذکر است که در بسیاری از کاربردهای عملی پایش سلامت سازه، مشخص شدن محل خرابی کافی است و شدت آن توسط بازبینی‌های چشمی و یا دیگر روش‌های غیرمخرب برآورد می‌شود.

مطالعات گذشتگان در زمینه‌های متعددی به شرح زیر ارائه شده است [۶]:

- شاخص خرابی بدست آمده از تغییر فرکانس‌ها
- شاخص خرابی بدست آمده از تغییر شکل مودها
- شاخص خرابی بدست آمده از انحنا شکل مود و یا کرنش شکل مودها
- شاخص خرابی بدست آمده از تغییرات انرژی کرنشی
- شاخص خرابی بدست آمده از تغییرات نرمی مودال
- شاخص خرابی بدست آمده از تابع پاسخ فرکانس
- شناسایی خرابی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی

بررسی جداگانه‌ی هریک از این موارد در این مقال نمی‌گنجد، لذا تنها به بررسی خلاصه‌وار آن‌ها در قالب جدول ۱-۲ می‌پردازیم.

جدول ۱-۲: روش های شناسایی

معایب	مزایا	پژوهشگر
تخمین خسارت با استفاده از فرکانس طبیعی		
ناتوان در تایین محل خسارت	قادر به تخمین خسارت	Ndambi و همکاران (۲۰۰۲)
نیازمند انتخاب مقیاس رنگی مناسب برای خروجی گرافیک جهت مشاهده درست آسیب	قادر به تایین محل خسارت	Garesci و همکاران (۲۰۰۶)
دقت پایین در تعیین مقدار آسیب برای آسیب در یک چهارم دهانه	قادر به شناسایی محل آسیب با خطای نسبتا کوچک قادر به تعیین مقدار آسیب در وسط دهانه	Kim و Stubbs (۲۰۰۲)
ناتوان در شناسایی خسارت در درجه حرارت های دیگر	قادر به شناسایی خسارت در همان درجه حرارت	Kim و همکاران (۲۰۰۷)
تخمین خسارت با استفاده از شکل مود		
وابسته به مدل عددی که به صورت تجربی کالیبره شده اثر نوفه سیگنال هیچ تعریفی برای حداقل شکل مدهای مورد نیاز برای تایین خسارت وجود ندارد	قادر به شناسایی، محل و کمیت خسارت استفاده از مدل آماری (بر مبنای فرضیات) برای تمایز بین مناطق آسیب دیده و سالم توصیف خسارت با استفاده از شکل های مود فردی کاربرد میدانی و تایید روش بر روی سازه های پل بتن مسلح روش برای دست آوردن خواص معین پایه برای سازه های موجود روش برای ارزیابی قابلیت اطمینان سامانه توسعه یافته ترین و پر	Stubbs و همکاران (۲۰۰۰) Stubbs و Kim (۱۹۹۶)

	کاربردترین روش تخمین خسارت	
Kim و Stubbs (۲۰۰۲)	قادر به شناسایی، محل و کمیت آسیب قادر به استفاده از شکل موده‌های خاص جهت شناسایی محل خسارت بدون نیاز به حل دستگاه معادلات	بدون مطالعات اعتبارسنجی میدانی به حضور نوفه سیگنال پرداخته نشده است هیچ تعریفی برای حد اقل شکل موده‌های مورد نیاز برای تایین خسارت وجود ندارد
Afzal و Hu (۲۰۰۶)	قادر به شناسایی، محل و کمیت آسیب بدون اطلاع قبلی از تیر دست نخورده	قادر به شناسایی دو مورد خسارت تنها با فاصله مساوی و در سطح مشابهی از خسارت
Kim و همکاران (۲۰۰۵)	قادر به حل مشکل تکینگی در نزدیکی نقاط عطف قادر به تشخیص خسارت بدون دانش در مورد چگالی، نیروی محوری اعمال شده و یا سفتی فونداسیون قادر به شناسایی، محل و کمیت خسارت به طور مستقیم توسط بازرسی از شاخص خسارت	نیاز به اندازه‌گیری شبکه متراکم برای دقت خوب پیش نیازی شکل مودها برای تشخیص خسارت دقیق
تخمین خسارت با استفاده از تابع پاسخ فرکانسی		
Tang (۲۰۰۵)	قادر به تشخیص خسارت با داده آلوده شده به نوفه	روش برای تعیین مقدار خسارت و برآورد شدت آزمایش نشده است
Link (۲۰۰۸)	قادر به شناسایی موارد خسارت‌های متعدد با داده آلوده شده به نوفه	اعتبارسنجی تجربی از روش انجام نشد

نوذریان و اسفندیاری (۲۰۰۹)	قادر به شناسایی خسارت، محل و تعیین مقدار آن	بهترین پیش بینیها با فرکانس تحریک بالاتر روش تنها با مثالهای عددی راستی آزمایی شد
Liu و همکاران (۲۰۰۹)	دارای پتانسیل بسیار زیادی در تعیین محل خسارت سازه با فرض میرایی متناسب	روش با میرایی غیر متناسب مورد آزمایش قرار نگرفته مشکل در تشخیص خسارات با میزان کم
Zou و همکاران (۲۰۱۱)	قادر به تشخیص خسارت با داده آلوده شده	جانمایی خسارت انجام نشده
تخمین خسارت با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی		
Imregun و Zang (۲۰۰۱)	قادر به شناسایی و مکان یابی خسارت شناسایی محل خسارت در حضور ۵٪ نوفه سیگنال کاهش داده FRF برای کاهش نوفه محاسباتی	ناتوان از برآورد شدت خسارت افزایش تعداد رایانه‌های شخصی در تجزیه و تحلیل نتایج به دلیل افزایش حساسیت نوفه سیگنال نتایج را بهبود نمی بخشد
Pandey و Barai (۱۹۹۵)	قادر به شناسایی خسارت قادر به شناسایی، با اطلاعات ناقص با روش TDNN کاربرد به صورت عددی در شبیه سازی پل فلزی	ناتوان از تشخیص محل خسارت و یا برآورد شدت آن
Ko و همکاران (۲۰۰۲)	قادر به تشخیص خسارت با استفاده از ترکیبی از شاخص انعطاف پذیری معین و شاخص انحنای معین	ناتوان از برآورد شدت خسارت در خسارات با شدت کم قادر به انجام شناسایی دقیق خسارت در نزدیکی تکیه‌گاه
Ni و همکاران (۲۰۰۲)	قادر به شناسایی محل آسیب صحیح حتی در موارد وجود چندین آسیب	بستگی ارزیابی رضایت بخش از محل آسیب به تعداد سنسورها توزیع شده در امتداد سازه
Yuen و همکاران (۲۰۰۶)	قادر به شناسایی خسارت‌های	ناتوان از تعیین محل خسارت با

میزان خسارت کوچک	متعدد	
دقت شناسایی آسیب در حدود ۷۰٪	قادر به شناسایی خسارت در حضور نوفه	Smith و Yeung (۲۰۰۵)
روش پیشنهادی تنها با داده‌های عددی اعتبارسنجی شد	مناسب رای تخمین خسارت در سیستم‌های سازه‌ای بزرگ	مهرجو و همکاران (۲۰۰۸)
روش برای عدم قطعیت‌های موجود در مدل و شرایط محیطی آزمایش نشد	توانایی شناسایی محل و مقدار خسارت	Park و همکاران (۲۰۰۹)
متوسط خطا در تشخیص سختی سازه بسیار بالاست	مناسب برای داده‌های نارقیق و ناکامل	Ye و Niu (۲۰۰۹)
ناتوانی در تشخیص خسارت‌های کم	قابل استفاده حتی در صورت وجود خطاهای بالا در داده‌های اندازه‌گیری شده	Bagchi و همکاران (۲۰۱۰)
عدم توانایی شناسی آسیب در بیش از دو عضو عدم شناسایی آسیب در حضور نوفه بالای ۱۰٪ عدم شناسایی دقیق میزان خرابی	قابلیت شناسایی محل و میزان خرابی در حضور نوفه توانایی شناسی دو آسیب همزمان	Bandara و همکاران (۲۰۱۲)

۱.۲.۲ شاخص خرابی بدست آمده از داده‌های مودال

در اکثر سازه‌های عمرانی مثل ساختمان‌های بلند مرتبه، برج‌ها، سدها و سازه‌های دریایی خرابی بتدریج در طول عمر سرویس‌دهی آنها تجمع می‌یابد و یا ممکن است از خرابی‌های ناگهانی ناشی از بلایای طبیعی رنج ببرند. بنابراین از نقطه نظر سرویس‌دهی و ایمنی، تشخیص خرابی سازه‌ها یک موضوع مهم می‌باشد [۷]. اگر این خرابی‌ها تشخیص داده نشوند، ممکن است ایمنی سازه کاهش یابد. در نتیجه ممکن است احتمال خرابی کل سازه بالا برود که منجر به خطرهای جانی و مالی برای افراد می‌شود. از این رو اهمیت تشخیص خرابی بیش از پیش خود را نشان می‌دهد. فرآیند عیب‌یابی در سازه‌ها را می‌توان با توجه به سطح اطلاعاتی که از آسیب ارائه می‌دهند، در پنج مرحله تعریف کرد که عبارتند از [۸]:

۱. تشخیص وجود یا عدم وجود خرابی سازه‌ای ۲. تعیین موقعیت خرابی ۳. تعیین نوع خرابی ۴. تعیین شدت خرابی ۵. تخمین عمر باقی‌مانده ی سرویس‌دهی خرابی.

روش‌های تشخیص خرابی در سازه‌ها را می‌توان در یک تقسیم‌بندی کلی به دو دسته روش‌های مخرب و غیرمخرب تقسیم‌بندی کرد. در روش‌های مخرب، با تخریب بخشی از سازه به وجود یا عدم وجود خرابی پی می‌برند. این روش‌ها فقط در مواردی خاص مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله این روش‌ها می‌توان به تست خستگی اشاره کرد. روش‌های غیرمخرب نیز خود به دو دسته روش‌های محلی (موضعی) و روش‌های کلی (جامع) تقسیم‌بندی می‌شوند. در روش‌های موضعی تشخیص خرابی، معمولاً بخش کوچکی از سازه بررسی می‌گردد. برای اجرای این روش‌ها، فقط از اطلاعات سازه آسیب‌دیده استفاده می‌شود و نیازی به اطلاعات سازه سالم نمی‌باشد. آزمایش جریان گرداب‌های از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های بازرسی چشمی، آزمایش اولتراسونیک یا فراصوتی، روش ذرات، آزمایش رادیوگرافی مغناطیسی و... اشاره کرد. اما این روش‌ها پرهزینه و وقت‌گیر بوده و برای پیش‌بینی موقعیت سازه نیاز به در معرض دید بودن اعضای سازه دارند [۹]. اما روش‌های کلی جایگزین مناسبی برای روش‌های موضعی می‌باشند تا به محدودیت‌های آنان غلبه کنند. ایده اصلی این روش‌ها آن است که هرگونه تغییری در مشخصات سازه مانند سختی و میرایی، منجر به تغییر در پارامترهای مودال سازه می‌شود. از این‌رو در طی سال‌های اخیر از تغییر پارامترهای مودال و ترکیب آنها، روش‌های متنوعی برای تشخیص خرابی پیشنهاد گردیده است. ویرا و همکاران با آزمایش بر روی یک سکوی دریایی مدل شده و ایجاد خرابی در آن، فرکانس‌های طبیعی مدل را با استفاده از تحریک اتفاقی بدست آوردند و متوجه شدند که در اثر خرابی، کاهش ۰ تا ۳۵ درصدی در سه فرکانس طبیعی اول سازه ایجاد می‌شود. آن‌ها در مطالعه خود ارزیابی عملکرد برخی روش‌های تشخیص خرابی را با استفاده از بردارهای ویژه بر روی مدل هیدروالاستیک کوچک مقیاس از سکوی دریایی ثابت که با تئوری مشابه طراحی و ساخته شده بود را انجام دادند [۱۰]. سوق نژاد و همکاران در سال ۲۰۱۵ تشخیص ترک‌های سطحی در قاب را با توجه به تغییر در فرکانس طبیعی انجام دادند. آن‌ها از روش اجزای محدود برای محاسبه فرکانس طبیعی سازه ترک‌دار استفاده کردند، سپس با توجه به اختلاف فرکانس‌های طبیعی در سازه سالم و آسیب‌دیده و با انجام عمل حل-معکوس، محل و عمق خرابی را تعیین کردند [۱۱].

فیاد و عبدالرزاق یک تست ارتعاشی برای تشخیص خرابی تکیه‌گاه‌های باربر الاستیک در شاه‌تیرهای پل بتن مسلح با تکیه‌گاه‌های ساده انجام دادند. آن‌ها دریافتند که فرکانس‌های طبیعی برای تشخیص خرابی در تکیه‌گاه‌های باربر الاستیک بسیار حساس‌اند [۱۲]. یام و همکاران یک شاخص خرابی با استفاده از اختلاف بین انحنای شکل مودی دو بعدی برای سازه سالم و آسیب‌دیده تعریف کردند و صلاحیت این شاخص را برای مولفه خرابی با استفاده از صفحه آلومینیومی ترک خورده نشان دادند [۱۳]. لی و همکاران دو شاخص خرابی با استفاده از انحنای شکل مودی دو بعدی بنام‌های شاخص ممان خمشی و شاخص شکل مودی کرنشی پسماند را ارائه کردند و از آن‌ها برای تعیین خرابی در یک صفحه با انتهای آزاد استفاده کردند. نتایج نشان داد که شاخص خرابی می‌تواند موقعیت خرابی را بدرستی تشخیص دهد [۱۴]. استابز و همکاران روشی بر مبنای کاهش انرژی کرنشی مودال با استفاده از اشکال مودی در یک پل آسیب‌دیده بیان کردند. آن‌ها با محاسبه اشکال مودی سازه قبل و بعد از خرابی، موقعیت خرابی را تعیین کردند [۱۵]. نوبهاری و سیدپور یک روش برای تشخیص خرابی چندگانه در سیستم‌های سازه‌ای با استفاده از مفهوم انرژی کرنشی در سازه ارائه نمودند. آن‌ها برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، دو سازه معیار دارای چندین سناریوی خرابی را در نظر گرفتند. آن‌ها از یک قاب و نیز یک خرپای ۳۱ عضوی به عنوان سازه‌های معیار استفاده کردند [۱۶]. ریسلز و کاسمتکا از روش بردار نیروی باقی‌مانده برای تخمین نواحی ممکن خرابی استفاده کردند و سپس مقدار خرابی را با استفاده از آنالیز حساسیت وزن‌دار مبتنی بر توسعه مرتبه اول سری تیلور از یک سیستم سازه‌ای غیرمیرا ارزیابی کردند [۱۷]. برخی دیگر از محققان روش‌های دیگری را برای تشخیص خرابی‌های سازه‌ای استفاده کردند که از جمله آن‌ها می‌توان به روش‌های همبستگی بین داده‌های مودال [۱۸]، روش تخمین پارامتر [۱۹]، ماتریس انتقال هندسی [۲۰] و توابع پاسخ فرکانسی [۲۱] اشاره کرد. روش‌های ذکرشده تشخیص خرابی معمولاً یک تابع هدف را که بصورت اختلاف بین داده‌های مودال اندازه‌گیری شده از تست‌های مودال و محاسباتی از مدل‌های عددی تعریف می‌شود را بهینه می‌کنند و به کمک آن مقادیر خرابی را تخمین می‌زنند. برای مثال ساهو و مایتی برای ارزیابی خرابی براساس این حقیقت از یک الگوریتم ژنتیک عصبی که خرابی تأثیرقابل توجهی بر روی رفتار استاتیکی سازه دارد استفاده کردند [۲۲]. همچنین دینگ و همکاران از الگوریتم رقابت استعماری و روش بردار نیروی باقی‌مانده برای تخمین شدت خرابی در سازه استفاده کردند [۲۳]. تقریباً در تمامی روش‌های ذکرشده، به منظور تشخیص خرابی از داده‌های مودال سیستم

به عنوان متغیرهای تابع هدف استفاده می‌شد که با استفاده از یک سری روش‌های ریاضیاتی و بهینه یابی، مکان و شدت خرابی بدست می‌آمد.

۲.۲.۲ تاریخچه روش انحنای شکل مودی:

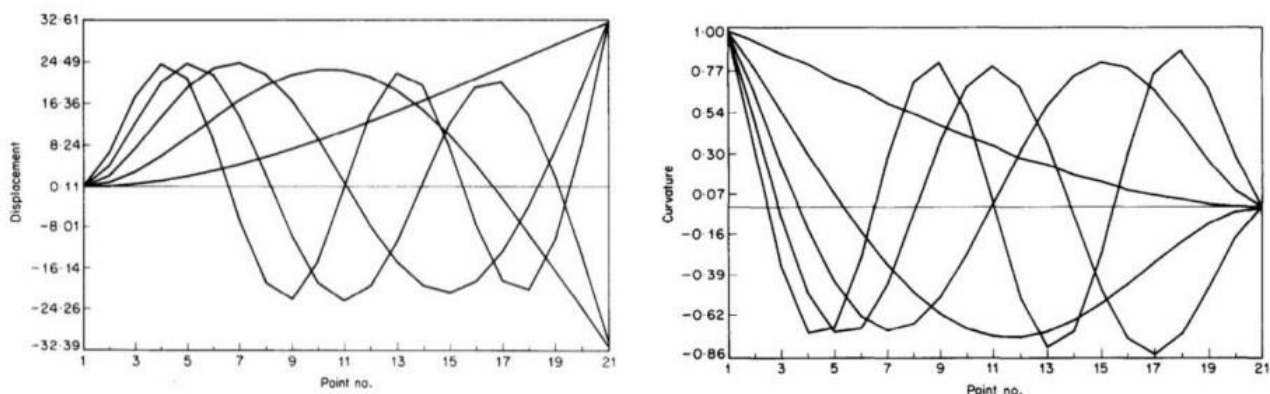
Pandey و همکارانش در سال ۱۶۶۱ به بررسی پارامترهای انحنای شکل مودی به عنوان یک روش شناسایی و محل یابی آسیب در سازه پرداختند [۲۴]. با استفاده از مدل تحلیلی یک تیر طره ای و ساده نشان دادند که تغییرات کلی در انحنای اشکال مودی در نواحی آسیب متمرکز شده اند. تغییرات در انحنای شکل مودی با افزایش اندازه آسیب افزایش می یابد. از این اطلاعات می توان برای بدست آوردن میزان آسیب در سازه استفاده نمود. [۲۴]

اگر در سازه‌ای ترک یا آسیب ایجاد شود، این آسیب مقدار EI مقطع را در ناحیه آسیب‌دیده کاهش می‌دهد که باعث افزایش مقدار انحنای در مقطع سازه خواهد شد. تغییرات انحنای با کاهش مقدار EI افزایش می یابد از این رو، مقدار آسیب را می‌توان از بزرگای تغییرات در انحنای بدست آورد.

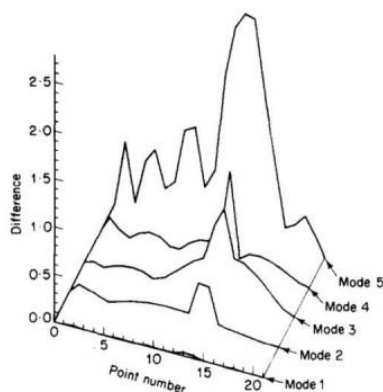
فرکانس‌های طبیعی پنج مود اول تیر طره‌ای در حالت سالم و آسیب‌دیده که در المان شماره ۱۳ دارای آسیب می‌باشند (۵۰٪ کاهش در مقدار مدول الاستیسیته) در **Error! Reference source not found.** مشاهده می‌شود. همچنین جابجایی شکل مودی و انحنای شکل مودی را در پنج مود اول برای تیر طره‌ای در شکل ۲-۲ و تفاوت بین انحنای شکل مودی در دو حالت سالم و آسیب‌دیده در تیر طره‌ای در شکل ۲-۳ [۲۵] قابل مشاهده است.

جدول ۲-۲: فرکانس‌های ۵ مود اول در تیر طره ای سالم و آسیب دیده

Mode no.	Natural frequency (Hz)		Percentage change in frequency
	Intact	Damaged	
1	39.631	39.463	0.42
2	247.110	237.181	4.02
3	687.663	665.472	3.23
4	1336.898	1331.641	0.39
5	2188.828	2108.587	3.67



شکل ۲-۲: جابه‌جایی شکل مودی (سمت چپ) و انحنای شکل مودی (سمت راست)



شکل ۲-۳: تفاوت بین انحنای شکل مودی در دو حالت سالم و آسیب‌دیده

همان‌طور که از نتایج تحقیقات آن‌ها مشخص است تفاوت در انحنای شکل مودی در محدوده آسیب رخ داده است که بین گره ۱۳ و ۱۶ می‌باشد [۲۵]. با تغییر در فرکانس‌های طبیعی یک سازه می‌توان به حضور آسیب در یک سازه پی برد ولی این تغییرات مکان آسیب را به طور دقیق مشخص نمی‌سازند، برای پیدا کردن محل آسیب می‌توان از پارامتر انحنای شکل مودی استفاده نمود که شاخص بسیار مناسبی برای مکان‌یابی آسیب می‌باشد. Wahab و Roeck در سال ۱۶۶۶ به بررسی و کاربرد روش تغییر انحنای مودال در شناسایی آسیب پل بتن‌آرمه پرداختند [۲۶]. برای بررسی این روش تیرهایی با تکیه‌گاه یک‌سر و ساده که دارای قسمت‌های آسیب‌دیده در مکان‌های متفاوت بودند را مورد آزمایش های شبیه‌سازی قرار دادند. Toyosaki و همکارانش در سال ۲۰۱۲ به بررسی تکنیک شناسایی آسیب

با استفاده از داده‌های مودال برای تیرها پرداختند [۲۷]. آن‌ها این کار را با مقایسه شکل مودی و فرکانس طبیعی سازه قبل و بعد از آسیب انجام دادند. آن‌ها در این مطالعه از روش ارائه شده توسط π و همکارانش که در سال ۲۰۰۲ ارائه شد استفاده نمودند. این روش برای بررسی سازه‌های تیر شکل به منظور تخمین محلی که کاهش سختی در آن رخ داد پیشنهاد شده است که در این روش به داده‌های سازه آسیب‌دیده احتیاج است. Cao و همکارانش در سال ۲۰۱۶ مطالعه‌ای بر روی شناسایی آسیب‌های سازه‌ای با استفاده از مفهوم انحنای مودال بر روی تیرها انجام دادند [۲۸]. از خصوصیات جالب انحنای مودال، حساسیت زیاد به آسیب و تعیین لحظه‌ای مکان آسیب است. Cao و همکارانش در سال ۲۰۱۶ به شناسایی آسیب چندگانه در تیرها با استفاده از انحنای اشکال مودی پرداختند و حساسیت انحنای شکل مودی را در مقابل آسیب چندگانه مورد بررسی قرار دادند [۲۹]. ولی نقص قابل توجه انحنای شکل مودی، حساسیت آن به اندازه‌گیری ارتعاشات ناخواسته^۸ است که به راحتی برتری آن را در حساسیت به آسیب چندگانه خدشه دار می‌کند. برای غلبه بر این مشکل، تعاملی بین تبدیل موجک^۹ و اپراتور انرژی^{۱۰} با هدف بهبود انحنای شکل مودی بوجود آورند. انحنای شکل مودی بهبود یافته، انحنای شکل مودی WT-TEO نامیده می‌شود که دارای قابلیت‌های ذاتی ایمنی نسبت به ارتعاشات ناخواسته است و در مقابل آسیب چندگانه حساس می‌باشد. اثر انحنای شکل مودی TW-TEO را بصورت تحلیلی با استفاده از شناسایی ترک‌های چندگانه در تیرهای طره‌ای با تاکید ویژه بر توانایی محلیابی آسیب چندگانه در شرایط ارتعاشات ناخواسته صحت‌سنجی کردند.

۳.۲.۲ تاریخچه روش‌های دیگر مودال:

Pedro و همکارانش در سال ۲۰۰۸ روشی را برای تخمین محل و شدت آسیب در تیرهای با تکیه‌گاه ساده براساس اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مدل‌های ارتعاشی ارائه دادند [۳۰]. در این مطالعه آن‌ها آسیب را به عنوان تغییر در سختی مقطع در نظر گرفتند. برای بکارگیری روش پیشنهادی آن‌ها، باید دو فرکانس سیستم و شکل مودی متناظر آن و ماتریس جرم سیستم نیز مشخص باشد. نتایج بدست آمده

^۸ noise

^۹ WT

^{۱۰} Teager (TEO)

از روش پیشنهادی آن‌ها، پاسخ رضایت‌بخشی را در مقایسه مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد. Cao و همکارانش در سال ۲۰۱۱ در مقاله‌ای به بررسی حساسیت شکل مودی و خیز استاتیکی برای شناسایی آسیب در تیرهای طره‌ای پرداختند [۳۱]. شکل مودی و خیز استاتیکی خصوصیات غالب مورد استفاده برای شناسایی آسیب در تیرها هستند. براساس این خصوصیات یک پرسش اساسی باقی می‌ماند که کدام یک از این دو دارای حساسیت بیشتری در شناسایی آسیب هستند. که در این مطالعه ارتباط بین شکل مودی و خیز استاتیکی بر روی یک تیر طره‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. صحت این روش با استفاده از شبیه سازی المان محدود الاستیک سه بعدی مورد تایید می‌باشد. D'Amore و Trovato در سال ۲۰۱۲ با استفاده از روش‌هایی مبتنی بر تحلیل مودال به شناسایی آسیب در پل‌ها پرداختند که پارامترهای مودال مدل آزمایشی برای ارزیابی حساسیت پارامترهای دینامیکی با استفاده از سطوح مختلف داده‌ها، تخمین زده شد [۳۲]. Matsuo و همکارانش در سال ۲۰۱۲ به شناسایی آسیب در تیر با استفاده از روش تحریک فرکانس‌های بالا براساس روش المان طیفی پرداختند [۳۳]. برطبق تحلیلی که انجام پذیرفت، در تحریک فرکانس‌های بالا، آسیب‌هایی شناسایی شد که در تحریک فرکانس‌های پایین قابل شناسایی نبودند. جعفرخوانی در سال ۲۰۱۳ در پایان‌نامه دکترای خود، به بررسی و شناسایی سیستم، تشخیص آسیب و پایش سلامت سازه‌های عمرانی پرداخت که این کار را با استفاده از روش‌های متفاوت مبتنی بر ارتعاش انجام داد [۳۴]. در نهایت به این نتیجه رسید که با توجه به عملکرد امیدوار کننده شناسایی سیستم‌های مختلف و روش‌های تشخیص آسیب و روش‌های مورد بحث، نتایج کلی در فراهم نمودن دستورالعمل‌هایی برای کاربرد روش‌های مبتنی بر ارتعاش برای مسائل واقعی بخصوص اجرای به منظور سلامت سازه پایش‌ای برای سیستم‌های غیرخطی پیچیده نیز مفید هستند. Devore در سال ۲۰۱۳ در پایان‌نامه دکترای خود با عنوان تشخیص آسیب با استفاده از شناسایی زیرسازه، به ارائه یک چارچوب کلی برای فرمول‌بندی کردن زیرسازه پرداخت [۳۴]. شناسایی زیرسازه با بکارگیری مدلی کاهش‌یافته برای بخشی از سازه شروع می‌شود همانند یک مدل المان محدود در مقیاس بزرگ و سپس تخمینی از رفتار کاهش‌یافته با استفاده از اندازه‌گیری‌های پاسخ از سازه کلی را تشکیل می‌دهد. چندین شبیه متفاوت‌سازی را بکارگرفت و در پایان نشان داد که شناسایی زیرسازه برای سازه‌های زنجیرهای مناسب است. Heckman در سال ۲۰۱۳ در پایان‌نامه دکترای خود به بررسی

کاربرد لرزه‌نگاشت‌های فرکانس بالا برای تشخیص آسیب در سازه‌های عمرانی پرداخت [۳۵]. او این کار را با استفاده از دو روش جدید برای پایش سلامت سازه‌ای^{۱۱} و آزمایشاتی در مقیاس کوچک انجام داد و به این نتیجه رسید که، در حالی که رکوردهای شتاب و سرعت ایجاد شده بوسیله آسیب به بهترین نحو با رکورد شتاب و سرعت که توسط آزمایش چکش ایجاد می‌شود سازگاری دارد، ممکن است این روش در برابر ارتعاشات ناخواسته مناسب نباشد. انتظامی و همکارانش در سال ۲۰۱۶ به بررسی شناسایی شدت و مکان آسیب سازه بر طبق مدل بروز شده خصوصیات فیزیکی به وسیله مساله معکوس-Penrose Moore پرداختند. آنها این کار را بر اساس بسط شرایط تعامد دینامیکی در یک سازه آسیب‌دیده برای دستیابی به تفاوت بین خصوصیات فیزیکی سازه آسیب‌دیده و سالم انجام دادند. از این‌رو یک فرایند تشخیص آسیب دو مرحله‌ای شامل تعیین محل آسیب و مقدار آن بوسیله توابع خطی مورد نظر بکار گرفتند که در بسط شرایط تعامد اعمال می‌شوند. نتیجتاً، گسترش آسیب بوسیله بکارگیری تابع خطی مورد نظر در مساله ویژه بسط داده‌شده سازه آسیب‌دیده را اندازه‌گیری کردند. در نهایت به این نتیجه رسیدند که روش محل‌یابی آسیب پیشنهادشده می‌تواند دقیقاً محل آسیب را در طول فرایند بروزرسانی شناسایی کند. آن‌ها این کار را با ارائه شاخص آسیبی به نام β که ضریبی مرتبط با ماتریس سختی سازه آسیب‌دیده می‌باشد انجام دادند. در ادامه به منظور بررسی عددی روش پیشنهادی خود و شناسایی محل و شدت آسیب، یک تیر طره‌ای را مورد مطالعه قرار دادند.

سپس با استفاده از روش پیشنهادی مکان و شدت آسیب در تیر طره‌ای را در شرایط معمولی و شرایط دارای ارتعاشات ناخواسته در حالت متفاوت آسیب مورد بررسی قرار دادند. در یکی از آن حالت آسیب، المان ۲ و ۵ در تیر مورد نظر به ترتیب دارای ۱۵٪ و ۲۵٪ کاهش سختی بودند [۳۴].

Cao در سال ۲۰۱۶ در پایان نامه کارشناسی ارشد خود با عنوان تشخیص آسیب سازه‌ای با استفاده از اشکال مودی آزمایشگاهی، به ارائه یک روش محل‌یابی آسیب سازه‌ای به منظور ارزیابی سلامت سازه‌ای پرداخت و فرض نمود که آسیب به سبب تغییر در سختی به وجود می‌آید [۳۶]. در نهایت دقت روش را با استفاده از مطالعات عددی بررسی نمود. Lee و Eun در سال ۲۰۱۶ به شناسایی آسیب سازه‌های قابی براساس تغییر پاسخ وابسته به جرم اضافی پرداختند [۳۷]. آن‌ها برای ارزیابی سلامت سازه‌ای، مقایسه‌ای

بین پاسخ حالت‌های آسیب‌دیده و سالم را انجام دادند. توابع پاسخ فرکانسی^{۱۲} اندازه‌گیری شده در مجاورت اولین فرکانس تشدید، به مود متعامد مشخصه^{۱۳} متناظر با اولین مقدار متعامد مشخصه^{۱۴} تبدیل شده‌اند. داده‌های مود متعامد مشخصه که در اولین اندازه‌گیری، بر روی سازه آسیب‌دیده مورد نظر تعیین شده بودند، را به عنوان داده مرجع در نظر گرفتند و آن را با یکی دیگر از مجموعه بدست آمده از سازه که با جرم کمتری بر روی یک المان تشکیل شده بود مورد مقایسه قرار دادند. اختلاف بین مود متعامد مشخصه دو حالت را به عنوان شاخص آسیب مورد استفاده قرار دادند. در نهایت تغییر در FRF، قبل و بعد از اضافه کردن جرم کوچک را به منظور هدف شناسایی آسیب مورد بررسی قرار دادند. Wang و همکارانش در سال ۲۰۱۵ به شناسایی آسیب در سازه‌هایی از نوع برشی با استفاده از روش تجزیه متعامد مشخصه (POD) پرداختند [۳۴]. مودهای متعامد مشخصه (POMs) از طریق تجزیه متعامد مشخصه (POD) بدست می‌آیند. آن‌ها در این مطالعه، یک مود متعامد مشخصه (POM) جدید بر اساس نظریه شناسایی آسیب برای ساختمان‌های از نوع برشی را توسعه دادند. در ابتدا آن‌ها، مودهای متعامد مشخصه (POMs) پاسخ دینامیکی شتاب یک ساختمان برشی را تحت حرکت زمین بدست آوردند، سپس از مود متعامد مشخصه (POM) غالب پاسخ شتاب برای شناسایی محل و شدت آسیب از طریق الگوریتم بهینه‌سازی تراکم ذرات^{۱۵} استفاده نمودند. آن‌ها این روش را در دو ساختمان برشی سه طبقه در شبیه‌سازی عددی و آزمایشی بکار بردند و در پایان به این نتیجه رسیدند که روش پیشنهادی، محل و شدت آسیب سازه‌ای را بطور موثری شناسایی می‌کند.

۴.۲.۲ تاریخچه روش کاهش تصادفی:

یک روش حوزه زمان می‌باشد که در آن پاسخ سازه به نیروی وارده، تبدیل به توابع اتلاف تصادفی که متناسب با توابع همبستگی پاسخ سیستم بوده می‌گردد و می‌توان آن را بعنوان پاسخ ارتعاش آزاد سازه در نظر گرفت.

FRF^{۱۲}

POM^{۱۳}

POV^{۱۴}

PSO^{۱۵}

به طور کلی آزمایش‌های شناسایی موده‌های سازه، از طریق اندازه‌گیری نیروهای ارتعاشی ورودی (یا نیروهای ورودی) به صورت آزمایشگاهی و بدست‌آوردن پاسخ سازه نسبت به این ورودی‌ها انجام می‌گیرد. یکی از روش‌های ساده جهت شناسایی سازه، استفاده از پاسخ ارتعاش آزاد سیستم می‌باشد. در این حالت، پاسخ ارتعاش آزاد سیستم درست بعد از حذف‌شدن نیروی ارتعاش اولیه محاسبه می‌گیرد.

در همه‌ی موارد نمی‌توان از ارتعاش‌های کنترل‌شده یا نیروهای ورودی قابل اندازه‌گیری استفاده کرد. برای مثال، اگر ساختمانی که مورد بررسی می‌باشد در حال بهره‌برداری باشد، وارد کردن هر نیرویی ممکن است باعث خسارات جبران ناپذیر شود. مثال دیگر، اندازه‌گیری پاسخ‌هایی که در آن نیروی ورودی قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد، است. در این موارد، روش کاهش تصادفی برای بدست آوردن پاسخ ارتعاش آزاد، روشی مطمئن می‌باشد.

روش کاهش تصادفی (Random Decrement Technique) در اواخر دهه شصت و اوایل هفتاد [۳۸] توسط کول به واسطه‌ی یکی از پروژه‌هایش به منظور تجزیه و تحلیل پاسخ دینامیکی سازه‌های فضایی تحت اثر بارهای محیطی در ناسا، پیشنهاد شد. هدف اصلی آن پروژه، بدست آوردن مشخصات سازه فضایی و شناسایی خرابی موجود به وسیله اندازه‌گیری پاسخ بود. کول به دنبال روشی ساده‌تر و مستقیم برای تبدیل تاریخچه‌ی زمانی پاسخ به شکلی که برای مشاهده‌گر معنادارتر باشد بود [۳۹].

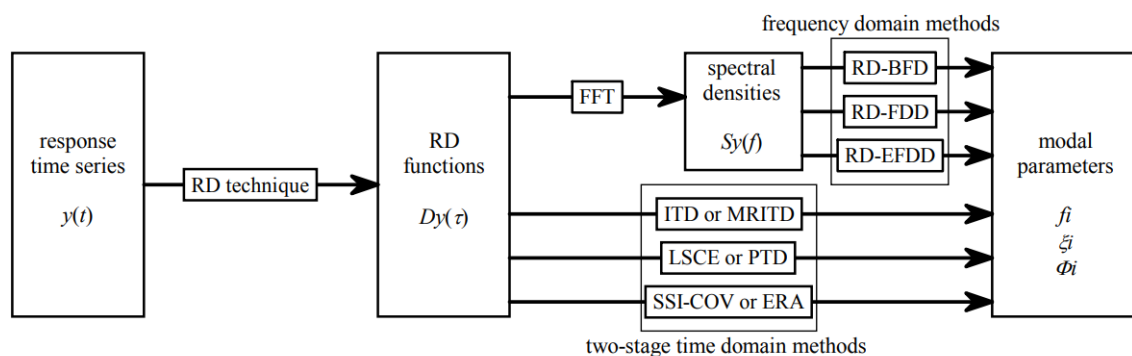
توسعه روش کاهش تصادفی به دلیل مشکلاتی که در بدست آوردن میرایی سازه از نیمی از پهنای باند طیف چگالی برآورده‌شده توسط الگوریتم FFT^{16} وجود داشت و فقدان یک رویکرد در شناسایی غیر خطی طیف چگالی ناشی از پاسخ به بارهای محیطی، ایجاد شد. از زمان تحولات اولیه [۳۸، ۳۹]، روش RD به طور گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. این شامل یک فرآیند نسبتاً ساده از میانگین‌گیری بخش‌های زمانی اندازه‌گیری شده در پاسخ‌های سازه ناشی از بارهای تصادفی یا بارهای ناشی از تحریک کننده‌ها می‌باشد. با استفاده از این روش، پاسخ‌ها به توابع RD تبدیل می‌شوند.

بسیاری از کاربردهای تکنیک RD، با ادغام دو روش شناسایی مودها در حوزه‌ی زمان مانند حوزه‌ی زمان ابراهیم [۴۰] و الگوریتم تحقق سیستم ویژه [۴۱] و بسیار مرجعی حوزه‌ی زمان [۴۲] توسعه یافته است. احتمالاً نتیجه طبیعی آن واقعیت این است که روش RD یک روش حوزه‌ی زمانی است.

^{۱۶} Fast Fourier Transform

این روش همچنین جهت برآورد طیفی و بدست آوردن تابع فرکانسی یک سازه نیز مورد استفاده قرار میگیرد [۴۳]، پس می توان آن را با روش های شناسایی مودال در حوزه ی فرکانس نیز ادغام نمود [۴۴]. برای این منظور، طیف چگال پاسخ یک سیستم از FFT توابع RD محاسبه می گردد و جهت میان گیری از FFT، با استفاده از طیف تاریخچه زمانی آن، که به عنوان میانگین گروهی یا روش ولج شناخته می شود استفاده می شود.

در شکل ۴-۲، رویکرد استفاده از توابع RD در شکل زیر توضیح داده شده است.



شکل ۴-۲: رویکرد استفاده از توابع RD

۵.۲.۲ کاربرد روش کاهش تصادفی در الگوریتم های شناسایی در حوزه ی زمان

روش کاهش تصادفی در روش های شناسایی مشخصات مودال در حوزه ی زمان مانند حوزه ی زمان ابراهیم [۴۰] [Ibrahim time domain(ITD)] و یا در الگوریتم تحقق سیستم ویژه [Eigen system] [۴۶] [realization algorithm(ERA)] استفاده شده است، همان طور که در شکل بالا مشاهده می شود در باقی روش ها هم می تواند استفاده شوند مانند روش حوزه زمان ابراهیم چندین مرجعی [Multiple reference Ibrahim time domain(MITD)]، حداقل مربعات نمایی مختلط [Least-squares complex exponential(LSCE)] و روش بسیار مرجعی حوزه زمان [Poly reference frequency domain(PTD)]. همه ی این روش ها را می توان یک روش یکپارچه، بعنوان روش دو مرحله ای شناسایی مشخصات مودال سیستم در حوزه زمانی در نظر گرفت [۴۲]. این روش ها را می توان روشی معادل، برای بدست آوردن تابع همبستگی و تابع پاسخ در نظر گرفت.

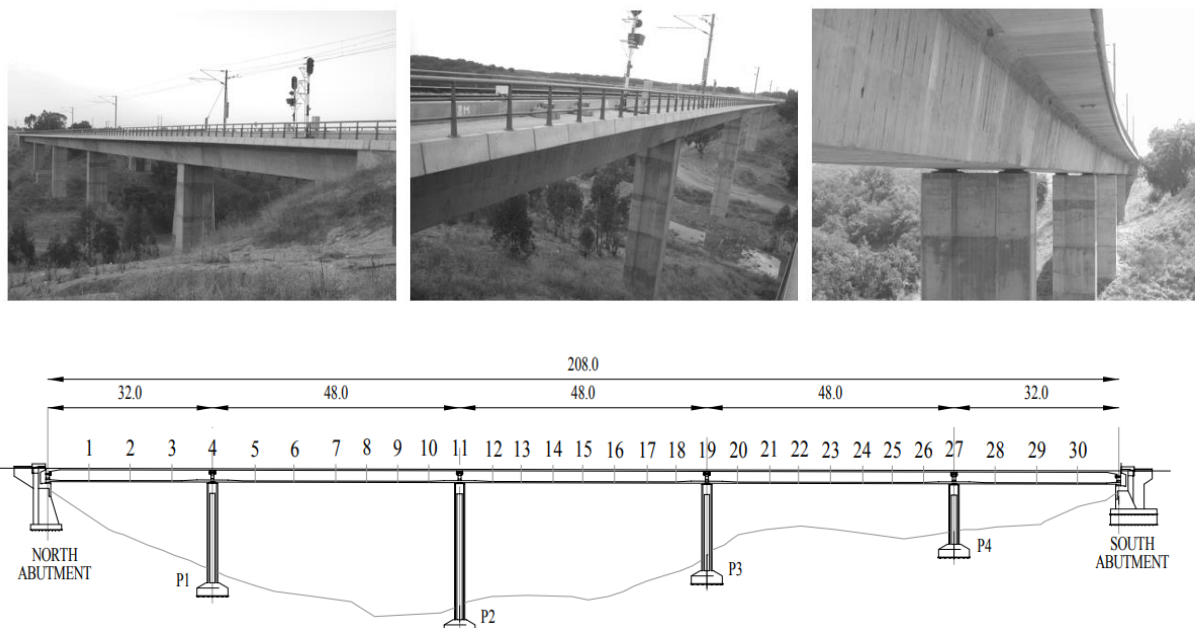
۶.۲.۲ کاربرد روش کاهش تصادفی در الگوریتم های شناسایی در حوزه ی فرکانس

سه روش شناسایی مودال در حوزه ی فرکانس وجود دارد. روش دامنه فرکانس (BFD) یا روش جستار قله (PP)؛ روش تجزیه دامنه فرکانس (FDD)؛ و روش تجزیه دامنه فرکانس پیشرفته (EFDD).

۷.۲.۲ کاربرد عملی روش کاهش تصادفی برای بدست آوردن اشکال مودی با

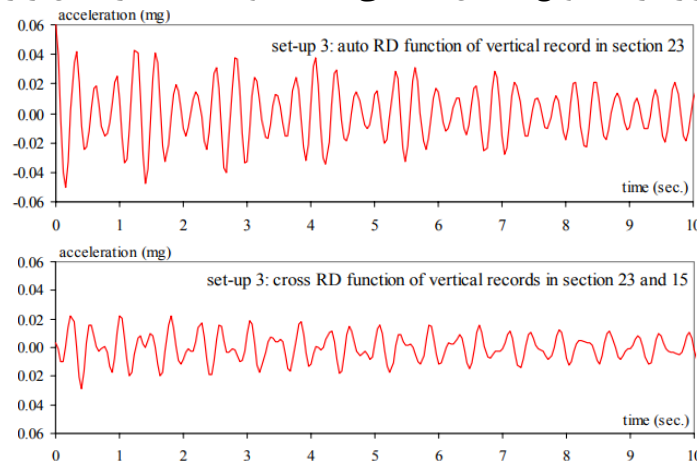
استفاده از روش $\text{SSI} - \text{COV}$

در این قسمت، روش کاهش تصادفی و دو روش شناسایی مودال جهت آنالیز دیتای خروجی از سنسورهای ارتعاشی نصب شده بر روی پل راه آهن، پل کرونا، واقع در جنوب کشور پرتغال، به مشارکت هم در می آیند. مطابق با شکل ۵-۲، این پل دارای طولی به اندازه ۲۰۸ متر بوده و دارای دو دهانه خارجی به طول ۳۲ متر و ۳ دهانه میانی به طول ۴۸ متر می باشد [۴۵].



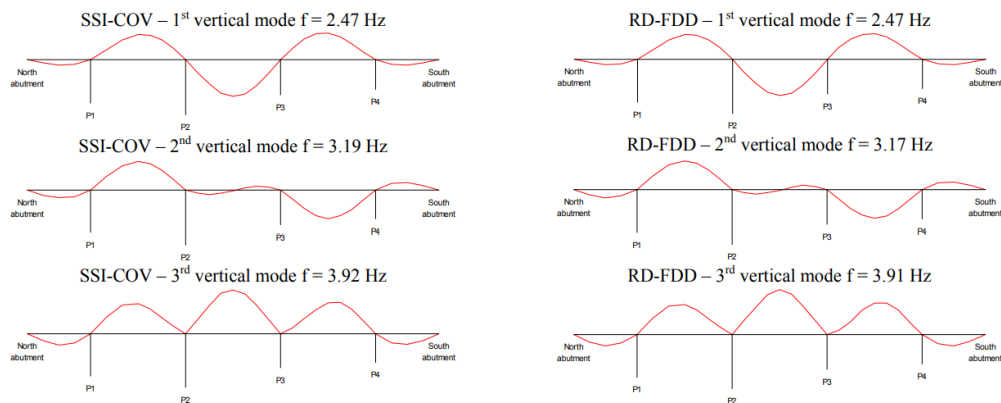
شکل ۵-۲: پل کرونا، واقع در جنوب کشور پرتغال / جانمایی سنسورهای پایش سلامت

در این پل ۳۰ سنسور جای گذاری شده که محل دقیق جانمایی آن‌ها در شکل ۲-۶ مشخص می‌باشد. با استفاده از روش کاهش تصادفی و در نظر گرفتن یک حد رها سازی^{۱۷} مناسب و بهینه (که روش بدست آوردن آن را در فصل الگوریتم های مورد استفاده توضیح داده شده است) خروجی های شتاب سنج‌ها در ۳ نقطه مورد بررسی قرار گرفت. توابع کاهش تصادفی Auto و Cross در شکل زیر آورده شده است [۴۶]



شکل ۲-۶: تابع کاهش سلامت Cross و Auto در سنسور شماره ۲۳ و ۱۵

توابع کاهش تصادفی تخمین زده شده، توسط روش ها SSI-COV و RD-FDD مورد استفاده قرار گرفته و در نهایت اشکال مودی دقیقی مطابق با شکل ۲-۷ حاصل شده است [۴۵].



شکل ۲-۷: اشکال مودی با استفاده از روش های شناسایی مودال SSI-COV و RD-FDD

حال در این پایان نامه بر آن هستیم تا با روشی متفاوت از خروجی توابع کاهش تصادفی در حوزه ی زمان استفاده کنیم و به اشکال مودی و مشخصات سازه در حوزه فرکانس دست یابیم.

^{۱۷} حد آستانه

فصل سوم: روش پیشنهادی

۱.۳ پیش گفتار:

منظور از مساله‌ی شناسایی سیستم، بدست آوردن مدل ریاضی یک پدیده (مثلا سیستم دینامیکی) به کمک اطلاعات آزمایشگاهی می‌باشد. این تعریف بیانگر این مهم است که این فن در حوزه‌های مختلف مهندسی همچون شناسایی سیستم‌های بیولوژیکی، فرآیندهای صنعتی، سیستم‌های اقتصادی، صنایع هواپیماسازی، خودروسازی و غیره کاربرد دارد. هدف از مدلسازی، تحلیل مهندسی، شبیه‌سازی، وضعیت‌سنجی، پیش‌بینی یا کنترل می‌باشد.

انجام عملیات شناسایی می‌تواند در فضای فرکانسی یا در فضای زمانی انجام شود. معمولا از شناسایی در فضای فرکانسی تعبیر به شناسایی مودال می‌کنند. منظور از شناسایی مودال، تعیین پارامترهای مودی به کمک اطلاعات آزمایشگاهی است. منظور از پارامترهای مودی، فرکانس‌های طبیعی، میرایی و شکل‌های مودی می‌باشد. در آزمایش مودال کلاسیک، پارامترهای مودال با تعیین تابع پاسخ فرکانسی سیستم [۱] تعیین می‌شود. این تابع بارگذاری ورودی را به پاسخ سیستم ارتباط می‌دهد. این روش نیاز به اندازه‌گیری ورودی و خروجی به سیستم را دارد. برای شناسایی مودال سازه‌های بزرگ عمرانی، سازه‌هایی که مرتعش کردن آنها بطور مصنوعی براحتی امکان‌پذیر نیست، و یا سازه‌هایی که اندازه‌گیری پارامترهای مودی آنها تحت بهره‌برداری نیاز است، از تکنیک‌های آزمایش مودال از روی خروجی [۲] استفاده می‌شود. این نوع تکنیک‌ها در حوزه‌ی مهندسی عمران تحت عنوان آزمایش ارتعاشات محیطی [۳] خوانده می‌شود. آزمایش مودی از روی خروجی ارزانتر است و سریعتر انجام می‌پذیرد. زیرا به تجهیزات مرتعش‌کننده نیازی نیست. این آزمایش بهره‌برداری از سازه را مختل نمی‌کند و پاسخ اندازه‌گیری شده بیانگر شرایط واقعی بهره‌برداری از سازه می‌باشد. البته عدم اندازه‌گیری ورودی، عدم قطعیت در تخمین پارامترهای مودال را افزایش می‌دهد، لکن می‌توان با ترکیب اطلاعات سنسوری و استفاده از تکنیک‌های تحلیل و مدیریت اطلاعات، عدم قطعیت را تا سرحد امکان کاهش داد.

۲.۳ استراتژی پایش سلامت

استراتژی پایش سلامت سازه را می‌توان به ۴ سطح زیر تقسیم کرد:

سطح ۱: شناسایی وجود آسیب در سازه:

در این حالت ابتدا باید فرکانس نمونه‌ای که می‌خواهیم از سازه برداشت کنیم مشخص شود. به همین جهت یک سری شتاب‌سنج و ... را در قسمت‌های مختلف سازه قرار می‌دهیم؛ سپس به سازه نیرو وارد می‌کنیم. این نیروها می‌تواند ضربه ای، پریودیک و یا حتی تحت بهره‌برداری باشد. سپس نتایج سنسورها را برداشت می‌شود.

سطح ۲: شناسایی محل آسیب در سازه :

در این سطح با استفاده از نتایج سطح ۱، مشخصات دینامیکی سازه مانند جرم، میرایی و سختی آن را بدست می‌آوریم بر اساس این اطلاعات قبل از اینکه آسیبی به سازه وارد شود، مکان‌هایی که احتمال آسیب در آن‌ها بیشتر می‌باشد را پیدا می‌کنیم.

سطح ۳: طبقه‌بندی آسیب در سازه :

این طبقه‌بندی در دو رده‌ی خسارت کلی و خسارت جزئی می‌تواند ارزیابی شود.

سطح ۴: پیش‌بینی عمر باقی‌مانده سازه:

جهت پیش‌بینی درست از عمر باقی‌مانده سازه نیاز به بررسی اطلاعات مداوم حداقل ۳ سال آن سازه می‌باشد. در این مرحله باید حسگرهایی که در سطح ۱ استفاده کرده بودیم باید حتماً کالیبره باشند. براساس اطلاعات ارزیابی آسیب کرنش‌های پسماند و خستگی در سازه را تعیین و عمر باقی‌مانده سازه را تخمین می‌زنیم.

۱.۲.۳ روش‌های تحلیل داده :

یک سیستم پایش سلامت سازه مقدار زیادی داده تولید می‌کند، چگونگی پردازش این داده‌ها و تفسیر نتایج آن‌ها در سیستم پایش سلامت مسأله‌ای مهم و چالش برانگیز محسوب می‌شود.

به منظور پردازش داده از الگوریتم‌های شناسایی استفاده می‌شود. این الگوریتم‌های شناسایی، ویژگی‌های سازه را براساس نظریه‌های ارتعاش استخراج می‌کنند.

تکنیک‌های نظارت بر سلامت و ارزیابی سازه‌های مهندسی براساس اطلاعات به‌دست آمده از ارتعاش، یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای شناسایی آسیب‌های سازه‌ای است که به مدت سه دهه مورد بررسی قرار گرفته است. ایده اساسی پذیرفته‌شده طی این مطالعات برای تشخیص آسیب بر اساس حرکت سازه، این است که تغییرات ناشی از خسارت در خواص فیزیکی (جرم، میرایی و سختی) موجب تغییرات قابل تشخیص در خواص مودال (فرکانسهای طبیعی، میرایی مودال و اشکال مودی) خواهند شد. بدین ترتیب، تغییرات در پارامترهای مودال سازه نشان‌دهنده‌ی تغییر در وضعیت سلامت سازه، یعنی آسیب است.

تکنیک مرکزی برای توصیف دینامیک سازه آنالیز مودال است، که طی آن پارامترهای مودال (فرکانسهای طبیعی، نسبت‌های میرایی و اشکال مودی) که رفتار دینامیکی سازه را کنترل می‌کنند، شناسایی می‌شوند. در آنالیز مودال، جهت تخمین پارامترهای مودی از الگوریتم‌هایی که در حوزه‌ی زمان یا فرکانس در قالب الگوریتم ماتریس چندجمله‌ای^{۱۸} هستند، استفاده می‌شود؛ از جمله:

۱. الگوریتم نمایی مختلط^{۱۹}

۲. حداقل مربعات نمایی مختلط^{۲۰}

۳. بسیارمرجعی حوزه زمان^{۲۱}

۴. حوزه زمان ابراهیم^{۲۲}

۵. حوزه زمان ابراهیم چندین مرجعی^{۲۳}

^{۱۸} Unified matrix polynomial algorithms

^{۱۹} Complex exponential algorithm(CEA)

^{۲۰} Least-squares complex exponential(LSCE)

^{۲۱} Poly reference frequency domain(PTD)

^{۲۲} Ibrahim time domain(ITD)

^{۲۳} Multiple reference Ibrahim time domain(MITD)

۶. الگوریتم تحقق سیستم ویژه^{۲۴}

۷. زیرفضای تصادفی^{۲۵}

۸. چندین مرجعی حوزه فرکانس^{۲۶}

۹. حوزه فرکانس همزمان^{۲۷}

۱۰. چند مرجعی حوزه فرکانس^{۲۸}

۱۱. چندجمله ای کسر متعارفی^{۲۹}

۱۲. چندجمله ای متعامد^{۳۰}

۱۳. تابع بیانگر مود مختلط^{۳۱}

۱۴. روش جستار قله^{۳۲}

در این پایان نامه به معرفی روش جدیدی در آنالیز مودال جهت تخمین پارامترهای مودال می پردازیم. بنیاد اصلی روش پیشنهادی استفاده از روش کاهش تصادفی می باشد. زیرا این الگوریتم همزمان با حذف نویز، در مدت زمانی کوتاه تر نسبت به روش های پیشین به شناسایی سازه و تشخیص خرابی آن می پردازد.

Eigen system realization algorithm(ERA)^{۲۴}

Stochastic subspace identification(SSI)^{۲۵}

Poly reference frequency domain(PFD)^{۲۶}

Simultaneous frequency domain(SFD)^{۲۷}

Multi-reference frequency domain(MRFD)^{۲۸}

Rational fraction polynomial(RFP)^{۲۹}

Orthogonal polynomial(OP)^{۳۰}

Complex mode indication function (CMIF)^{۳۱}

Peak Packing(PP)^{۳۲}

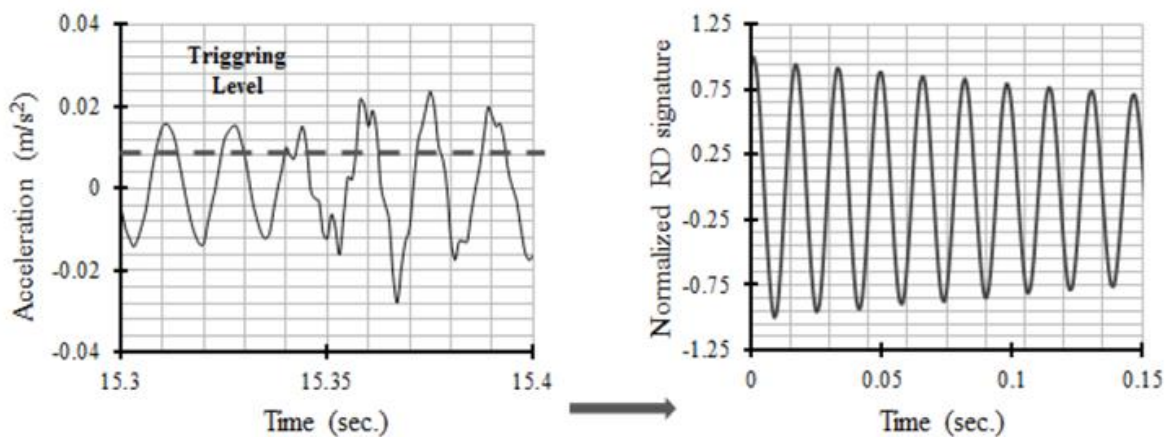
۳.۳ تئوری کاهش تصادفی (Random decrement technique)

روش کاهش تصادفی (RD) استخراج شده از معادلات حرکت، معرف پاسخ ارتعاش آزاد سیستم می‌باشد. در این تکنیک، پاسخ تصادفی سیستم به پاسخ ارتعاش آزاد سیستم تبدیل می‌گردد.

این روش، میانگین‌گیری پاسخ ارتعاش تصادف در قسمت‌های زمانی معین می‌باشد (شکل ۱-۳). از شرط آستانه^{۳۳}، برای تعیین محل شروع میانگین‌گیری در هر زیربازه زمانی استفاده می‌شود. پاسخ ارتعاش تصادفی، متشکل از نویز و پاسخ ارتعاش آزاد سیستم می‌باشد که با میانگین‌گیری در هر زیربازه زمانی، نویز حذف می‌گردد [۴۶].

$$RD(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(t_i + \tau) | \{X(t_i) = a\} \quad 1-3$$

در این معادله، $RD(\tau)$ تابعی از متغیر زمان، $\tau = t - t_i$ ، پاسخ ارتعاش تصادفی سیستم، X زمان t_i زمان آستانه، N تعداد نقاط آستانه می‌باشد.

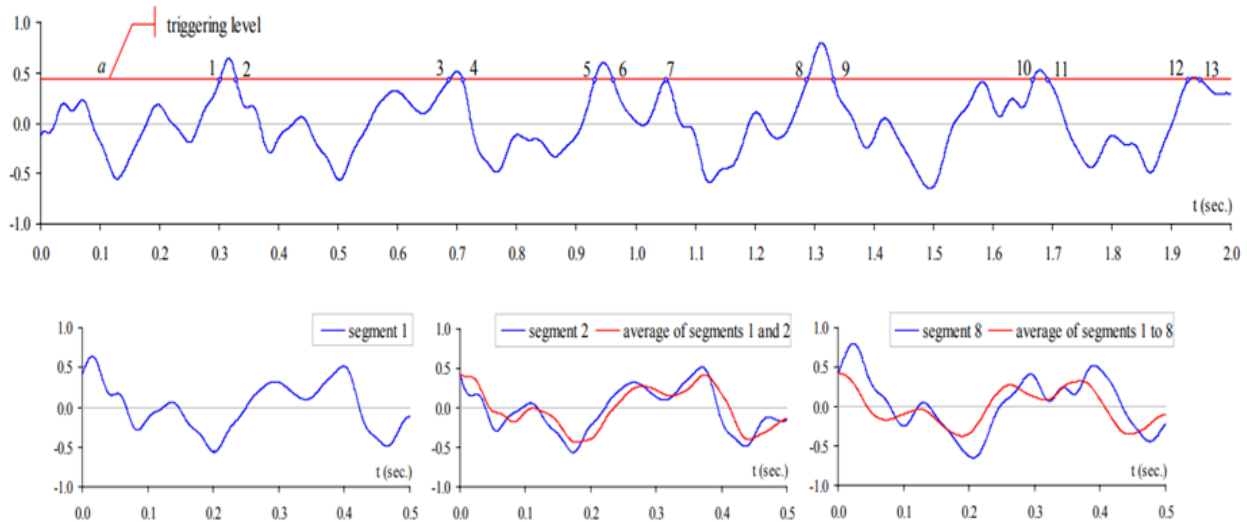


شکل ۱-۳: عملکرد تابع کاهش تصادفی

با میانگین‌گیری از مجموعه متنابهی از قطعات پاسخ سیستم با شرایط اولیه برابر، قسمت تصادفی پاسخ تقریباً حذف شده و آنچه که بجا می‌ماند پاسخ سیستم به شرایط اولیه خواهد بود. این پاسخ همان

^{۳۳} Triggering value

ارتعاش آزاد سیستم می‌باشد. یکی از مزیت‌های این روش حذف نوفه در پاسخ بدست آمده می‌باشد که بدلیل میانگین‌گیری قطعات متنابهی از پاسخ سیستم می‌باشد.



شکل ۲-۳: انتخاب triggering value

ایده‌ی اولیه روش کاهش تصادفی تنها توابع کاهش تصادفی خودکار را در بر می‌گرفت. که حد آستانه و زمان‌بندی آن به صورت متوسط در یک سیگنال پاسخ تعریف می‌شوند. اما بعدها، توابع کاهش تصادفی توسعه پیدا کرد به طوری که شرط حد آستانه در یک سیگنال پاسخ تعریف شده و بخش‌های زمانی در یک سیگنال پاسخ دیگر به طور همزمان ارائه شده است (شکل ۲-۳) [۴۰]. برای بدست آوردن حد آستانه می‌توان هم از تمام درایه‌های ماتریس توابع کاهش تصادفی استفاده کرد و هم می‌توان صرفاً با استفاده از تعداد محدودی از درایه‌های آن استفاده کرد که آن‌ها همان درایه‌های قطر ماتریس توابع کاهش تصادفی خودکار می‌باشند.

دو تابع پاسخ تاریخچه زمانی را در نظر بگیرید $x(t)$ و $y(t)$ ، که هم‌زمان اندازه‌گیری شده‌اند. مقادیر Cross RDT و auto RDT را می‌توان از فرمول‌های زیر بدست آورد:

$$D_{xx}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(t_i + \tau) \quad ۲-۳$$

$$D_{xy}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y(t_i + \tau) \quad ۳-۳$$

در این معادله N ، تعداد نقاطی بر روی پاسخ سیستم در هر بخش زمانی می‌باشد که مقدار آن‌ها از شرط حد آستانه بیشتر است..

برای محاسبه توابع کاهش تصادفی می‌توان مقادیر متفاوتی برای حد آستانه در نظر گرفت. [۴۷]

این مقادیر متناسب با شرایط متفاوت، تعیین می‌گردند. در زیر، تعدادی از مقادیر حد آستانه که معمولاً استفاده می‌گردند آورده شده است.

a) level crossing (the one illustrated in Figure 2);

$$Tx(t_i) = \{x(t_i) = a\}$$

b) positive points;

$$Tx(t_i) = \{a \leq x(t_i) < b\}$$

c) zero crossing with positive slope;

$$Tx(t_i) = \{x(t_i) = 0, \dot{x}(t_i) > 0\}$$

d) local extremum.

$$Tx(t_i) = \{a \leq x(t_i) < b, \dot{x}(t_i) = 0\}$$

در شکل بالا حد آستانه اعداد مثبتی هستند زیرا در قسمت مثبت طیف پاسخ قرار دارد. اما ممکن است این شرط در قسمت منفی پاسخ سیگنال در نظر گرفته شود که در این صورت نیز، جهت برداشت طیف RDT از میانگین مقادیر برخورد منفی حد آستانه با تابع در هر بخش‌بندی زمانی استفاده می‌کنیم. همین‌طور برای زمانی که حد آستانه در قسمت مثبت سیگنال پاسخ قرار دارد، نیز می‌توان همان مقدار حد آستانه را در قسمت منفی سیگنال پاسخ قرار داد و نقاط برخورد سیگنال با حد آستانه در قسمت منفی را با علامتی مثبت به نقاط برخورد سیگنال با حد آستانه در قسمت مثبت سیگنال جمع نمود و مجموعاً در بازه‌های زمانی تقسیم‌شده میانگین گرفت. این روش به دلیل افزایش نقاط برای میانگین‌گیری باعث بالا رفتن دقت سیگنال RDT می‌شود.

یکی از جنبه‌های مهم برای عملکرد مناسب و صحیح RDT، انتخاب تراز مناسب شرط حد آستانه می‌باشد. (a و b در فرمولهای بالا). این موضوع مهم است که به خاطر سپرده شود که عموماً بالا بودن بیش از حد تراز حد آستانه باعث می‌شود که تعداد نقاط کمتری با حد آستانه برخورد کند در نتیجه هم میانگین ناقص-تری داریم هم چون این احتمال وجود دارد که در یک بخش زمانی هیچ نقطه‌ای برخورد نکند پس در آن بخش زمانی ما در RDT نقطه‌ای نداریم، پس سیگنال RDT ما بسیار کوچک می‌شود و یک سری از بخش‌های زمانی را از دست می‌دهیم. به همین منظور برای ارتقا در روش‌های شناسایی حوزه زمان مناسب

نیست. همین‌طور اگر این تراز را خیلی پایین بگیریم نویز وارد سیگنال RDT می‌شود که این برای روش‌های شناسایی در حوزه فرکانس اختلال ایجاد می‌کند. زیرا تشخیص فرکانس‌های اصلی از نویز کاری دشوار می‌شود. به همین منظور مقداری که از روی آزمون و خطا بدست آمده و تقریباً تمام خواسته‌های روش‌های در حوزه‌ی زمان و فرکانس را پوشش می‌دهد برابر با $\sqrt{2}\sigma$ می‌باشد [۴۷]. که در آن σ انحراف معیار می‌باشد. برای حذف بهتر نویز، می‌بایست تعداد نقاط آستانه افزایش یابد، همچنین ضروری است که میزان سطح آستانه به اندازه کافی بزرگ باشد. میزان بهینه سطح آستانه، برابر است با $\sqrt{2}\sigma_x$. واریانس پاسخ کاهش تصادفی نیز با افزایش تعداد نقاط آستانه نیز کاهش می‌یابد.

یکی دیگر از نقاط مهم سیگنال کاهش تصادفی، طول بخش‌بندی زمان که بر روی تابع پاسخ اعمال می‌شود، است. برای استفاده در روش‌های شناسایی در حوزه‌ی زمان لازم است که این بخش‌بندی طوری انتخاب شود تا تعداد نقاط کافی توسط تابع کاهش تصادفی برداشت شود و سیگنال به وجود آمده بتواند پوشش کافی و درستی بدهد. همچنین برای روش‌های شناسایی در حوزه فرکانس نیز این موضوع برقرار است.

اگر فرض شود توابع پاسخ دارای خواص zero mean stationary Gaussian stochastic باشد، می‌توان نتیجه گرفت که تابع کاهش تصادفی ایجاد شده با توابع همبستگی پاسخ نظیر خود، متناسب است؛ همچنین مقدار حد آستانه با مشتق اول نسبت به زمان آن بستگی دارد [۴۲، ۴۳، ۴۴]. پس این تابع کاهش تصادفی روشی برای تخمین تابع همبستگی محسوب می‌شود. مقایسات بین روش‌های محاسبه‌ی تابع همبستگی، بین روش‌های مستقیم مثل استفاده از تابع FFT و روش کاهش تصادفی نشان داده است که این روش از روش‌های مستقیم گاهی سریع‌تر می‌باشد. (البته لازم به ذکر است که روش‌های FFT برای توابع همبستگی یا طولانی سریع‌تر است [۴۸])

۱.۳.۳ بدست آوردن سیگنال ورودی

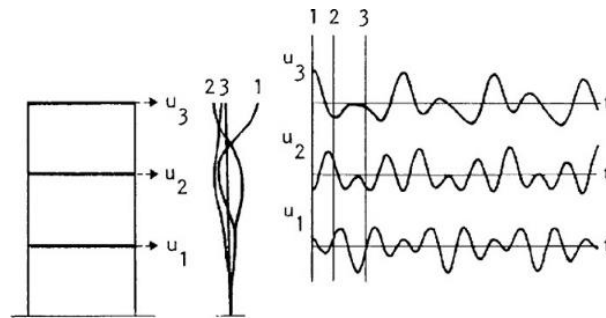
در این روش برای صحت‌سنجی از روش تئوری استفاده شده است. در روش تئوری نیازمند سیگنال ورودی هر طبقه می‌باشیم. برای بدست آوردن سیگنال ورودی مربوط به هر طبقه از معادلات مودال برای سیستم‌های میرای چند درجه آزادی استفاده شده است.

۱.۱.۳.۳ معادلات سیستم چند درجه آزادی

معادلات حرکت یک سیستم میرای چند درجه آزادی خطی به صورت زیر خواهد بود:

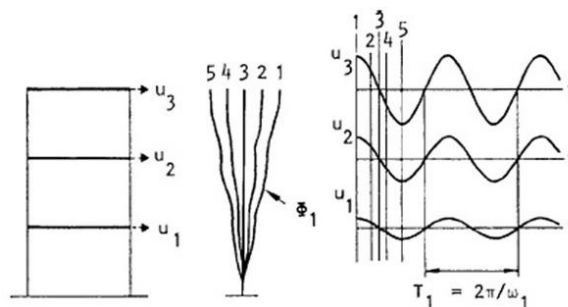
$$M\ddot{u} + c\dot{u} + f_s(u) = p(t) \quad ۱-۳$$

که در آن m و k به ترتیب ماتریس جرم و ماتریس سختی می‌باشند.

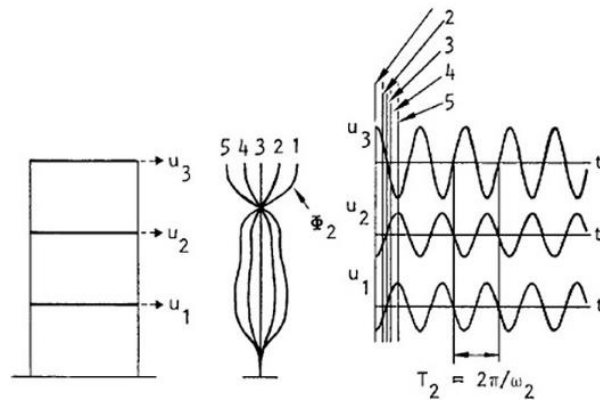


شکل ۳-۳: ارتعاش واقعی سازه

شکل ۳-۳ ارتعاش یک سازه دو طبقه را در حالت واقعی را نشان می‌دهد. اگر نمودار ارتعاش طبقات به صورت نمودارهای بالا باشد، مشاهده می‌شود که نسبت جابه‌جایی طبقات در لحظات مختلف یکسان نیست پس نمی‌توان حرکت سازه را به صورت هارمونیک در نظر گرفت. برای این منظور با استفاده از یک سری الگوی رفتاری، این حالت ارتعاش‌های پیچیده را به جمع پاسخ‌های چند سیستم یک درجه آزاد در نظر گرفت. به این صورت حرکت سازه به صورت همگن درآمد و می‌توان فرکانس را از روی آن‌ها بدست آورد.



شکل ۳-۴: ارتعاش سازه تحت مود اول



شکل ۳-۵: ارتعاش سازه تحت مود دوم

شکل ۳-۵ و شکل ۳-۴ به ترتیب مودهای اول و دوم را نشان داده شده است که به عنوان الگوی ارتعاشی استفاده می‌شوند.

برای یک سیستم با N درجه آزادی می‌توان، N حالت ارتعاشی در نظر گرفته شود که از الگوهای رفتاری (مودها) برای توصیف رفتار آنها استفاده می‌شود.

$$u(t) = \sum_{r=1}^N \phi_r q_r(t) = \Phi q(t) \quad ۲-۳$$

در فرمول بالا Φ بردار مودی تغییر یافته سازه (بردار شکل مودی در مود n ام) و q_r تابع هارمونیک می‌باشد.

با استفاده از این معادله، معادله کوپل شده ۱ در ۱، می‌تواند به چند معادله غیر مزدوج شده^{۳۴} با اجزای مودال آن تبدیل کرد. با توجه به معادلات بالا، خواهیم داشت:

$$\sum_{r=1}^N m \phi_r q_{rr}''(t) + \sum_{r=1}^N c \phi_r q_{rr}'(t) + \sum_{r=1}^N k \phi_r q_r(t) = p(t) \quad ۳-۳$$

با ضرب کردن معادله بالا در ϕ_n^T خواهیم داشت:

$$\sum_{r=1}^N \phi_n^T m \phi_r q_{rr}''(t) + \sum_{r=1}^N \phi_n^T c \phi_r q_{rr}'(t) + \sum_{r=1}^N \phi_n^T k \phi_r q_r(t) = \phi_n^T p(t) \quad ۴-۳$$

$$M_n \ddot{q}_n(t) + C_n \dot{q}_n(t) + K_n q_n(t) = P_n(t) \quad ۵-۳$$

و در نهایت فرم ماتریسی معادله حرکت به صورت زیر خواهد بود:

$$M \ddot{q} + C \dot{q} + K q = P(t) \quad ۶-۳$$

در نتیجه معادله کوپل شده ۱-۳ به N معادله غیرکوپل شده ۶-۳ تبدیل می‌گردد. در فرم ماتریسی معادله مطابق با معادله ۵-۳، M_{nn} ماتریس قطری جرم مودال و K_{nn} ماتریس قطری سختی مودال و P_n بردار ستونی نیروی مودال و C ماتریس غیرقطری میرایی مودال می‌باشد. این معادله تنها در صورتی غیر-کوپل شده می‌باشد که میرای کلاسیک ($C_{nr} = 0 \rightarrow n \neq r$) باشد. لذا معادله ۶-۳ به صورت زیر تبدیل می‌گردد:

$$M_n \ddot{q}_n(t) + C_n \dot{q}_n(t) + K_n q_n(t) = P_n(t) \quad ۷-۳$$

که در آن، C_n به صورت زیر خواهد بود:

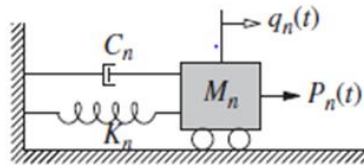
$$C_{nr} = \phi_n^T c \phi_r \quad ۸-۳$$

$$\xi_n = \frac{C_n}{2 M_n \omega_n} \quad ۹-۳$$

معادله ۷-۳، پاسخ سیستم تک درجه آزادی نشان‌داده در شکل را بدست می‌آورد. با تقسیم این معادله بر M_n خواهیم داشت:

$$\ddot{q} + 2\xi_n \omega_n \dot{q}_n + \omega_n^2 q_n = \frac{P_n(t)}{M_n} \quad ۱۰-۳$$

که در ζ_n برابر است با ضریب میرایی برای مود nم سیستم.



شکل ۳-۶: سیستم جرم و فنر معادل دی کوپله شده با میرایی

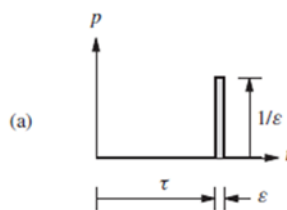
۲.۱.۳.۳ محاسبه ی پاسخ ضربه

در این حالت از طریق پاسخ ضربه ی نیروی f_n برای هر طبقه پاسخ آن طبقه را بدست می آید.

برای این منظور معادله ی زیر در نظر گرفته می شود.

$$mu''(t) + cu'(t) + ku(t) = p(t) \quad ۱۱-۳$$

که در آن $P(t)$ یک بارگذاری کاملاً دلخواه است. در روشی که در ادامه برای تعیین پاسخ $u(t)$ بر اثر بارگذاری دلخواه $P(t)$ توسعه داده می شود، فرض می شود که بار به صورت مجموعه ای از ضربه های متوالی به سیستم اعمال شود. در نتیجه پاسخ کلی سیستم از برهم نهی پاسخ سازه به علت تک ضربه اعمال شده در هر لحظه محاسبه می شود. واضح است که چون روش مبتنی بر برهم نهی است، رفتار سازه باید در محدوده ارتجاعی باشد.



شکل ۳-۷: تابع ضربه

در شکل ۷-۳ نیرویی نشان داده شده است که در مدت زمان بسیار کوتاه و با شدت بسیار بزرگ (اما محدود) به سازه اعمال شده است. این بار را " نیروی ضربه " می نامیم. پاسخ سازه تحت اثر نیروی ضربه به صورت زیر می باشد.

سیستم میرا

$$h(t - \tau) = u(t) = \frac{1}{m\omega_D} e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin[\omega_D(t - \tau)] \quad t > \tau \quad ۱۲-۳$$

سیستم نامیرا

$$h(t - \tau) = u(t) = \frac{1}{m\omega} \sin[\omega(t - \tau)] \quad t > \tau \quad ۱۳-۳$$

بار $p(t)$ دلخواه متغیر با زمان را می توان به صورتی که در شکل زیر نشان داده شده است، با مجموعه ای از ضربه های کوتاه متوالی نشان داد. می توان پاسخ سیستم دینامیکی خطی (ارتجاعی) به چنین ضربه-هایی که مقدار آن ها در هر لحظه ی τ برابر $P(\tau)d\tau$ است، را با حاصل ضرب مقدار ضربه در پاسخ ضربه ی واحد به دست آورد:

$$du(t) = [P(\tau)d\tau]h(t - \tau) \quad t > \tau \quad ۱۴-۳$$

پاسخ جابه جایی سیستم در هر لحظه ی زمانی t مجموع پاسخ ها به کلیه ضربه ها تا آن لحظه است. بنابراین :

$$u(t) = \int_0^t P(\tau)h(t - \tau)d\tau \quad ۱۵-۳$$

با جایگذاری معادلات بدست آمده برای $h(t - \tau)$ در انتگرال فوق، پاسخ $u(t)$ به صورت زیر برای سازه های نامیرا و میرا به دست می آید :

$$u(t) = \frac{1}{m\omega} \int_0^t P(\tau) \sin[\omega(t - \tau)] d\tau \quad ۱۶-۳$$

$$u(t) = 1/m\omega_D \int_0^t P(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin[\omega_D(t - \tau)] d\tau \quad ۱۷-۳$$

هر یک از انتگرال های فوق را " انتگرال دوهامل " می نامند.

فصل چہارم: صحت سنجی

۱.۴ پیش گفتار

در این فصل بررسی عملکرد الگوریتم توسعه یافته پرداخته شده است. به همین منظور در ادامه دو آزمون جهت صحت سنجی الگوریتم پیشنهادی طراحی و انجام شده است. در آزمون اول با مشخصات مشخصی از سازه ابتدا از طریق محاسبات عددی با استفاده از روابط علم دینامیک، به شکل مودی رسیده سپس با استفاده از الگوریتم پیشنهادی و رسیدن به شکل مودی مشابه به شکل مودی رسیده شده در قبل، صحت الگوریتم را ثابت می شود.

در ادامه به بررسی عملکرد الگوریتم توسعه یافته در تیر دو سر مفصل پرداخته شده است. در این مورد هم با استفاده از روابط علم دینامیک، به شکل مودی رسیده سپس با استفاده از الگوریتم پیشنهادی و رسیدن به شکل مودی مشابه به شکل مودی رسیده شده در قبل، صحت الگوریتم را ثابت می شود.

۲.۴ آزمون اول:

هدف از این آزمون صحت سنجی الگوریتم پیشنهادی می باشد. به همین منظور ابتدا یک سازه ۳ طبقه با مشخصات زیر در نظر گرفته می شود.

۱.۲.۴ بدست آوردن شکل مودی به صورت عددی:

جدول ۱-۴ : مشخصات ورودی سازه

سیگنال ورودی	ماتریس سختی	ماتریس میرایی	ماتریس جرم
$f = 5 \cdot \text{randn}(3, N)$	$K = 40000 \cdot [3, -1, 0; -1, 3, -1; 0, -1, 1]$	$C = 10 \cdot [0, 0, 0; 0, 2, -1; 0, -1, 2]$	$M = [50, 0, 0; 0, 30, 0; 0, 0, 30]$

مشخصات سیستم در جدول ۱-۴ مشخص شده است به طوری که K ، M و C ماتریس های سیستم می باشند و f ورودی سیستم می باشد.

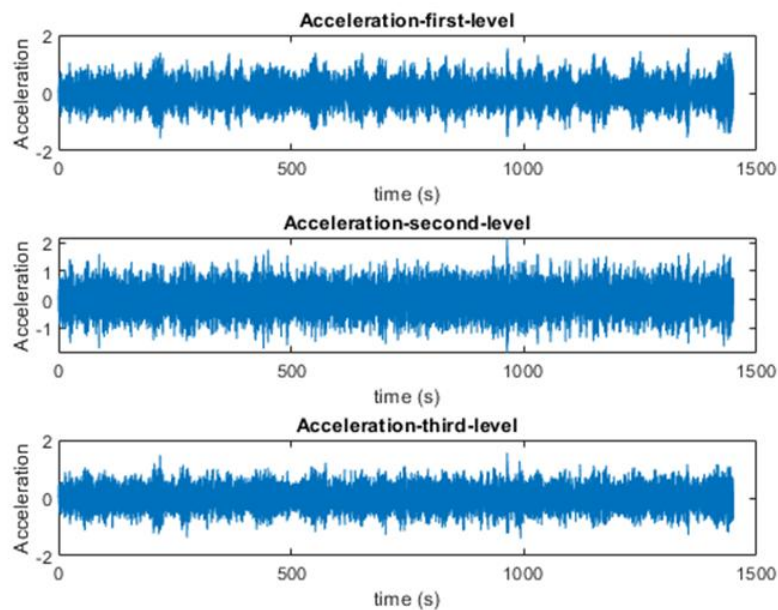
در ادامه با استفاده از مشخصات سیستم جابجایی هر طبقه، فرکانس، ضریب میرایی و شکل مودی بدست می آید: (جدول ۲-۴)

جدول ۲-۴ : پارامتر های مودال

طبقه	اول	دوم	سوم
فرکانس	۴,۱۳۸	۷,۳۵۹	۱۱,۱۶۲
میرایی	۰,۰۱۰۲	۰,۰۰۲۸	۰,۰۰۷۷
مود اول	۱	۲,۱۵۴۸	۴,۳۷۱۸
مود دوم	۱	۰,۳۲۷	-۰,۵۴۲
مود سوم	۱	-۳,۱۴۹	۱,۱۷

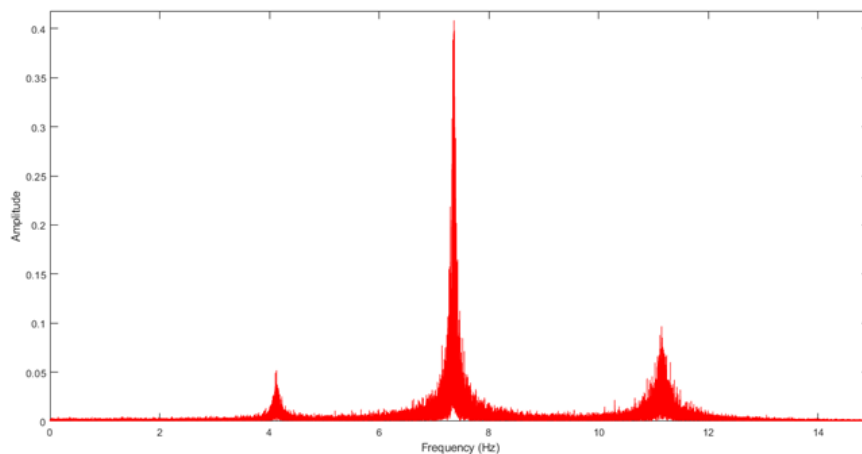
با توجه به توضیحات فصل قبل برای بدست آوردن سیگنال‌های شتاب هر طبقه کفایت پاسخ ضربه‌ی سیستم را با نیروی وارده بر آن طبقه که با استفاده از فرمول ۳-۷ بدست آمده است، کانالو کرده و محاسبه شود.

در شکل ۴-۱ سیگنال‌های شتاب هر طبقه مشاهده می‌شود که در واقعیت خروجی سنسورهای طبقات می‌باشد اما در این جا به دلیل عدم کارگذاری سنسور، از طریق روش تئوری آن‌ها بدست آورده شده‌اند.

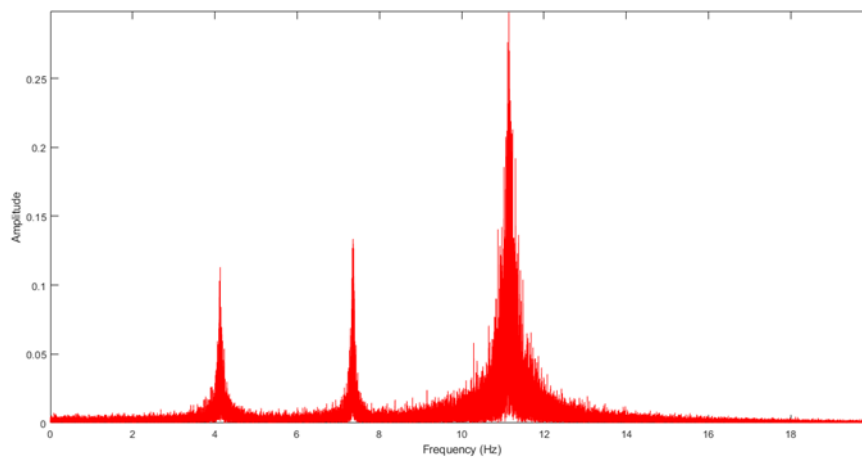


شکل ۴-۱: سیگنال شتاب طبقات اول تا سوم

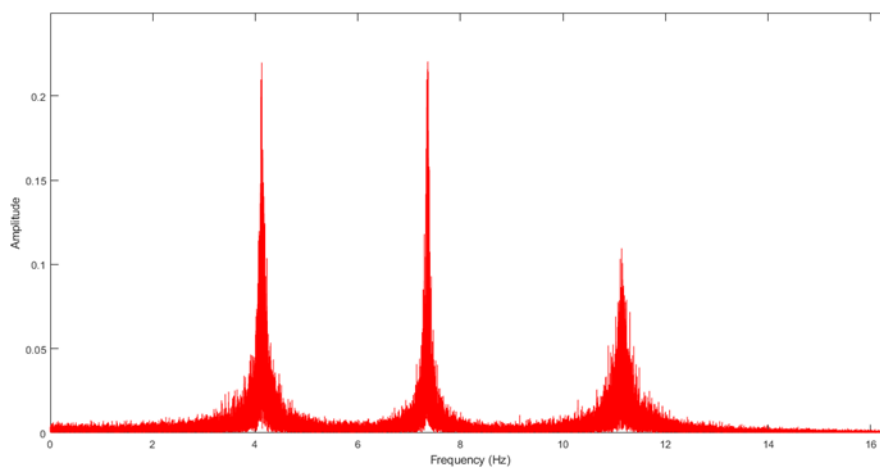
در شکل ۴-۲، شکل FFT حال طیف فرکانسی برای هر کدام از سیگنال‌های طبقات که از طریق ۴-۳ و شکل ۴-۴ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲: طیف فرکانسی شتاب طبقه اول



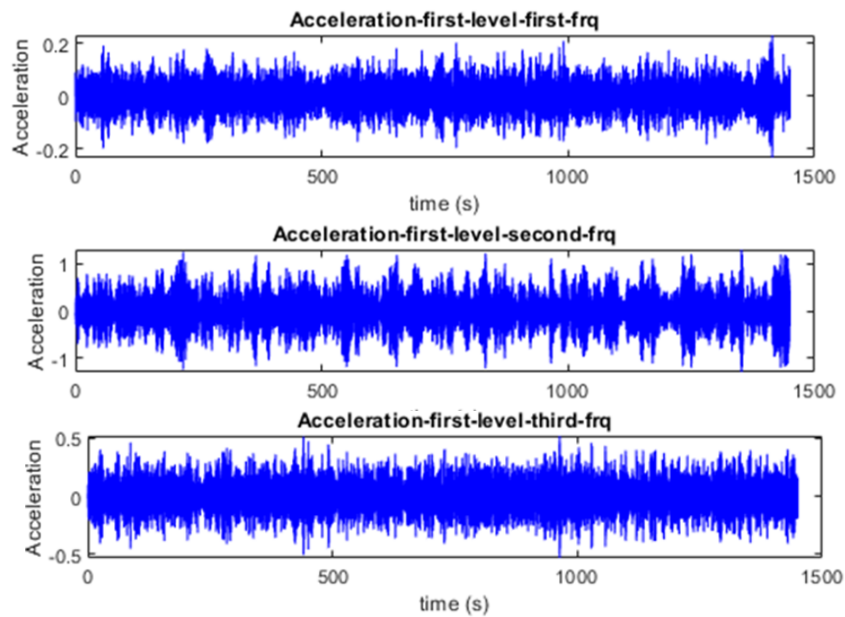
شکل ۴-۳: طیف فرکانسی شتاب طبقه دوم



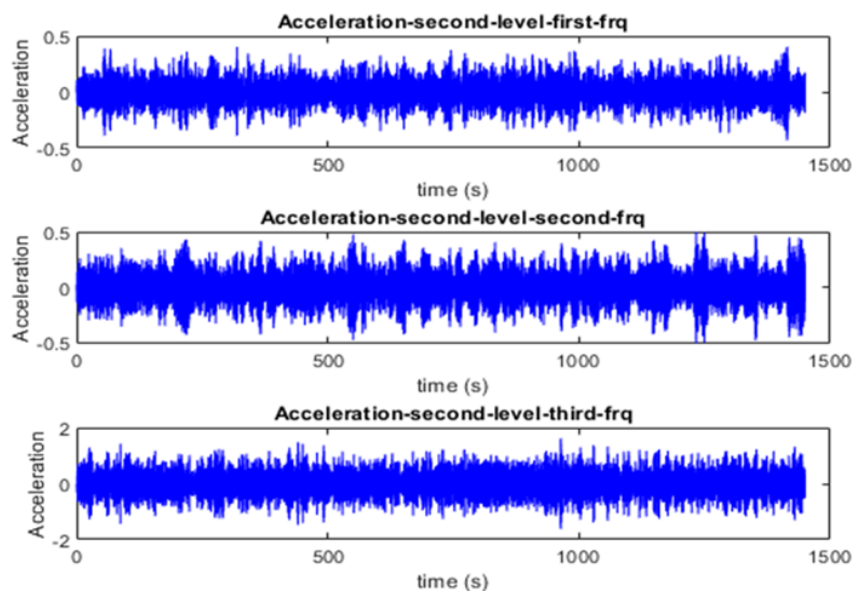
شکل ۴-۴: طیف فرکانسی شتاب طبقه سوم

همانطور که مشاهده می‌شود فرکانس‌های قالب طبقات باهم برابر می‌باشد.

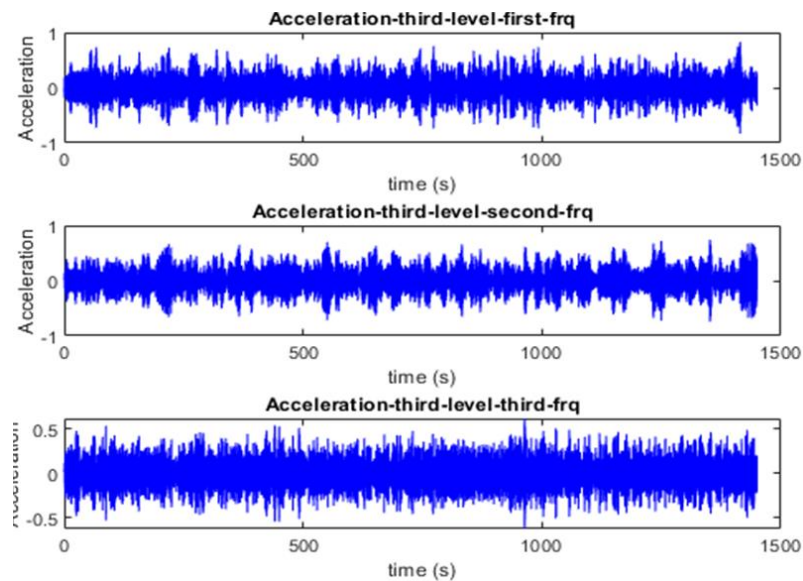
حال سعی بر آن است تا با استفاده از فیلتر میان‌گذر، سیگنال ورودی هر طبقه به فرکانس‌های غالب سازه تجزیه شود. در شکل ۴-۵، شکل ۴-۶ و شکل ۴-۷ نتایج نشان داده شده است.



شکل ۴-۵: شتاب طبقه اول فیلتر شده به مولفه های فرکانسی



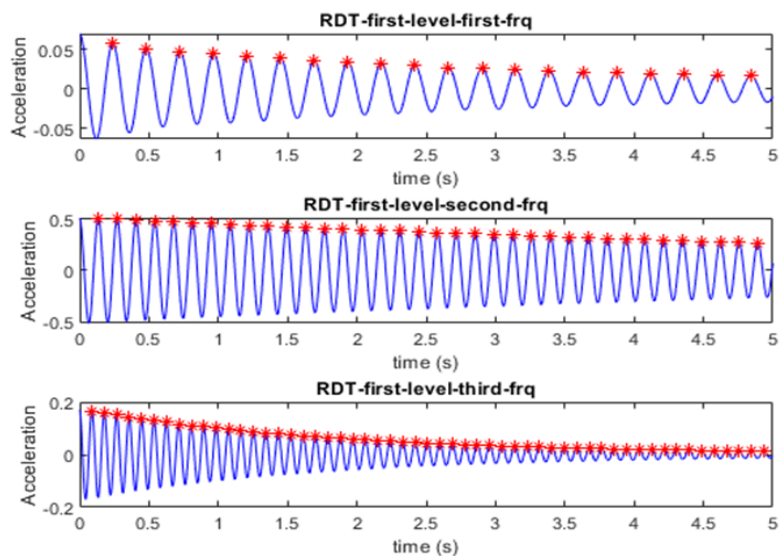
شکل ۴-۶: شتاب طبقه سوم فیلتر شده به مولفه های فرکانسی



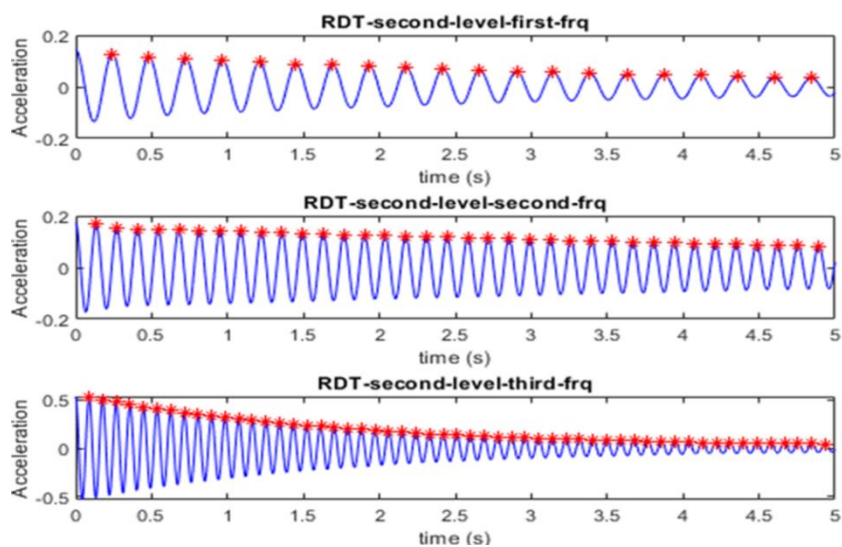
شکل ۴-۷: شتاب طبقه سوم فیلتر شده به مولفه های فرکانسی

۲.۲.۴ اعمال روش کاهش تصادفی

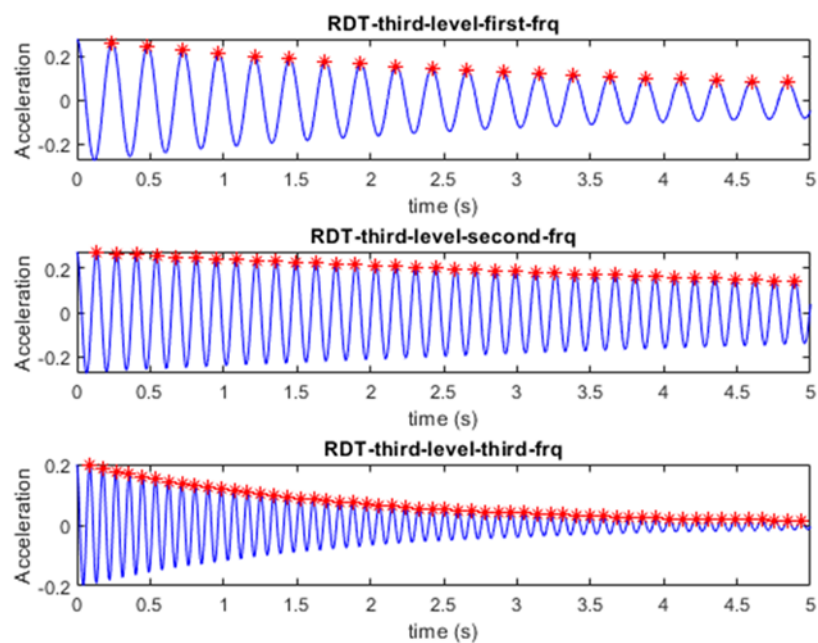
حال هر کدام از سیگنال های فوق را تحت الگوریتم RDT تبدیل به ارتعاش آزاد می شود (شکل ۴-۸، شکل ۴-۹ و شکل ۴-۱۰). همان طور که در فصل های پیش ذکر شده است، RDT با عملیات میان گیری و کاهش تصادفی باعث سرعت در عملیات پردازش داده و بالا رفتن سرعت پردازش می شود.



شکل ۴-۸: RDT طبقه اول



شکل ۴-۹: RDT طبقه دوم



شکل ۴-۱۰: RDT طبقه سوم

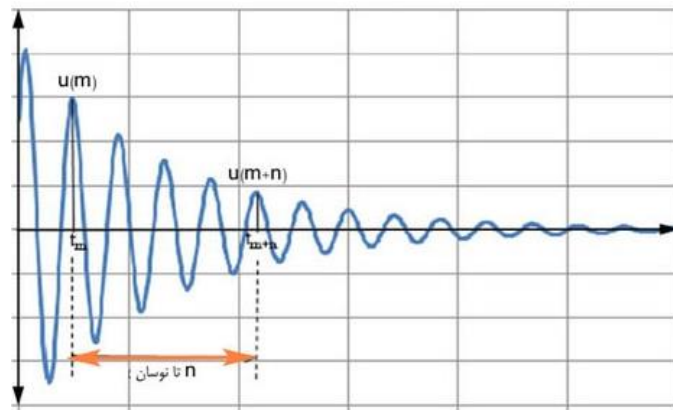
۳.۲.۴ تخمین میرایی

مطابق شکل ۴-۱۱ ارتباط میان نسبت دو پیک متوالی میرا ارتعاش آزاد و میزان نسبت میرایی تشریح می گردد. نسبت جابجایی در زمان t نسبت به یک پریود زمانی قبل از آن به صورت زیر می باشد:

$$\frac{u(t)}{u(t+T_D)} = \exp(\xi \omega_n T_D) = \exp\left(\frac{\gamma \pi \xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right) \quad ۱۸-۴$$

$$\frac{u_i}{u_{i+1}} = \exp\left(\frac{\gamma \pi \xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right) \quad ۱۹-۴$$

$$\delta = \ln \frac{u_i}{u_{i+1}} = \frac{\gamma \pi \xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad ۲۰-۴$$



شکل ۱۱-۴: بدست آوردن میرایی از روی نمودار ارتعاش آزاد

ضریب میرایی با استفاده از رابطه‌ی بالا برای پاسخ RDT طبقه اول در فرکانس اول (۴،۱۳ هرتز) محاسبه شده است. بدین طریق میزان میرایی هر مولفه فرکانسی RDT در سه طبقه مطابق جدول ۳-۴ بدست آمده است.

جدول ۳-۴: مقادیر ضریب میرایی مولف‌های فرکانسی RDT

	طبقه اول	طبقه دوم	طبقه سوم
مقادیر میرایی RDR	۰.۰۱۰۱	۰.۰۰۲۸	۰.۰۰۷۸
	۰.۰۱۰۴	۰.۰۰۳۳	۰.۰۰۷۹
	۰.۰۰۹۷	۰.۰۰۲۸	۰.۰۰۷۹
مقادیر حقیقی میرایی	۰.۰۱۰۲۲	۰.۰۰۲۸۵۶	۰.۰۰۷۷۷

همانگونه که مشخص است، ضرایب میرایی محاسبه شده از پاسخ RDT با مقادیر حقیقی ضرایب میرایی با تقریب مناسبی یکسان می‌باشد.

۴.۲.۴ شکل مودی حاصل از الگوریتم توسعه یافته با روش کاهش تصادفی

در ادامه برای بدست آوردن اشکال مودی از پاسخ RDT، می‌بایست مقدار دامنه هر مولفه فرکانسی در هر طبقه بدست آورده شود.

سیگنال هر طبقه به سه مولفه فرکانسی تفکیک می‌گردد.

$$Y_{11} = am_{11} \times \exp(-a_{11} \times F_1 \times 2 \times \pi \times t) \times \cos(2 \times \pi \times F_1 \times t + q_{11}) \quad 21-4$$

$$Y_{12} = am_{12} \times \exp(-a_{12} \times F_2 \times 2 \times \pi \times t) \times \cos(2 \times \pi \times F_2 \times t + q_{12}) \quad 22-4$$

$$Y_{13} = am_{13} \times \exp(-a_{13} \times F_3 \times 2 \times \pi \times t) \times \cos(2 \times \pi \times F_3 \times t + q_{13}) \quad 23-4$$

در این قسمت فرکانس و میرایی قبلا محاسبه گردیده و فاز اولیه و دامنه با حل مقداردهی عددی زیر بدست می‌آید.

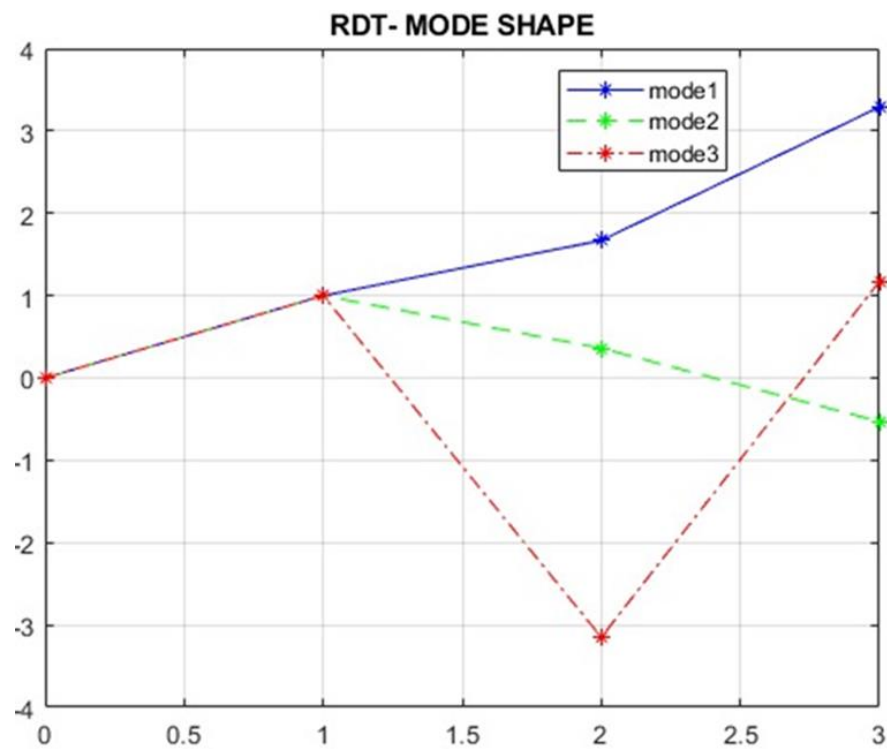
باتوجه به پاسخ RDT در فرکانس اول برای طبقه اول، برای آن که میزان دامنه محاسبه گردد، در معادله Y_{11} میزان فرکانس و میرایی قبلا محاسبه شده و مجهول دامنه می‌باشد. با مقداردهی عددی و حل معادله، مقدار دامنه am_{11} محاسبه می‌گردد.

مقادیر شکل مودی حاصل از RDT به طریق زیر محاسبه شده است و در شکل ۱۲-۴ نشان داده شده است.

$$mod_{11} = [am_{1111}/am_{1111}, am_{2111}/am_{1111}, am_{3111}/am_{1111}]; \quad 24-4$$

$$mod_{22} = [am_{1211}/am_{1211}, am_{2211}/am_{1211}, am_{3211}/am_{1211}]; \quad 25-4$$

$$mod_{33} = [am_{1311}/am_{1311}, am_{2311}/am_{1311}, am_{3311}/am_{1311}]; \quad 26-4$$



شکل ۴-۱۲: اشکال مودی

همانگونه که مشخص است، شکل مودی حاصل از RDT با شکل مودی محاسبه شده از ماتریس‌های سیستم، تقریباً یکسان می‌باشد.

جدول ۴-۴: مقایسه نتایج

		مود اول	مود دوم	مود سوم
مقادیر شکل مودی بدست آمده از RDT	طبقه اول	۱	۱	۱
	طبقه دوم	۱.۶۷	۰.۳۶	-۳.۱۵
	طبقه سوم	۳.۲۹	-۰.۵۳	۱.۱۷
مقادیر شکل مودی بدست آمده از تئوری	طبقه اول	۱	۱	۱
	طبقه دوم	۲.۱۵	۰.۳۲	-۳.۱۴۹
	طبقه سوم	۴.۳۷	-۰.۵۴	۱.۱۷۰۹
مقادیر میرایی بدست آمده از تئوری	طبقه اول	۰.۰۱۰۲۲۳	۰.۰۰۲۸۶۱	۰.۰۰۷۷۶۹۵
	طبقه دوم			
	طبقه سوم			
مقادیر میرایی بدست آمده از RDT	طبقه اول	۰.۰۱۰۱	۰.۰۰۲۸	۰.۰۰۷۸
	طبقه دوم	۰.۰۱۰۴	۰.۰۰۳۳	۰.۰۰۷۹
	طبقه سوم	۰.۰۰۹۷	۰.۰۰۲۸	۰.۰۰۷۹
مقادیر فرکانس بدست آمده از تئوری	طبقه اول	۴.۱۳۸۴	۷.۲۵۹۱	۱۱.۱۶۲۶
	طبقه دوم			
	طبقه سوم			
مقادیر فرکانس بدست آمده از RDT	طبقه اول	۴.۱۱۵۶	۷.۲۸۶۷	۱۱.۱۵۹۷
	طبقه دوم			
	طبقه سوم			

۳.۴ آزمون دوم: [۴۸]

در این بخش سعی بر آن است عملکرد الگوریتم تعمیم یافته را بر روی المان تیر دو سر مفصل بررسی شود.

۱.۳.۴ بدست آوردن مشخصات تیر

ابتدا یک تیر دو سر مفصل با مشخصات درج شده در جدول ۴-۵ را در نظر گرفته و به صورت تئوری مشخصات سازه‌ای آن را بدست آورده می شود:

جدول ۴-۵: مشخصات تیر

b	h	m	I	E	L	n	l	sd
۰,۱	۰,۰۰۵	$۷۸۰۰ \cdot b \cdot h$	$(b \cdot h^3) / ۱۲$	$۲ \cdot (۱۰^{۱۱})$	۱,۲	۵۰	L/n	۱۷

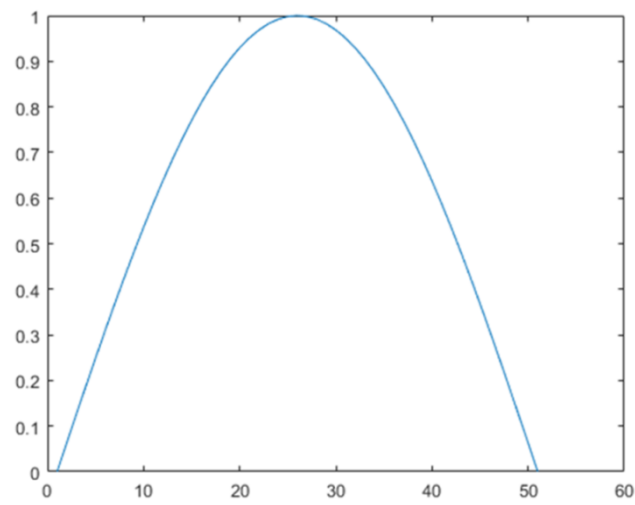
میرایی همچنین برای فرکانس اول $۰,۰۱$ فرض شده است. برای فرکانس های بعدی طوری در نظر

گرفته شده است که $۰,۰۵$ به میرایی قبلی اضافه شود.

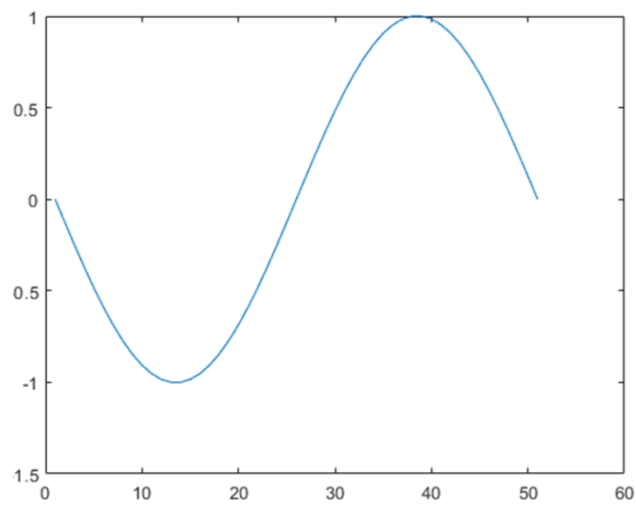
در ابتدا با استفاده از مشخصات تیر به مشخصات سازه یعنی ماتریس سختی و جرم می‌رسیم. در اینجا به دلیل پیوستگی تیر دو سر مفصل از روش اجزا محدود برای بدست آوردن ماتریس سختی استفاده شده است.

۱.۱.۳.۴ بدست آوردن شکل مودی حاصل از روابط تئوری:

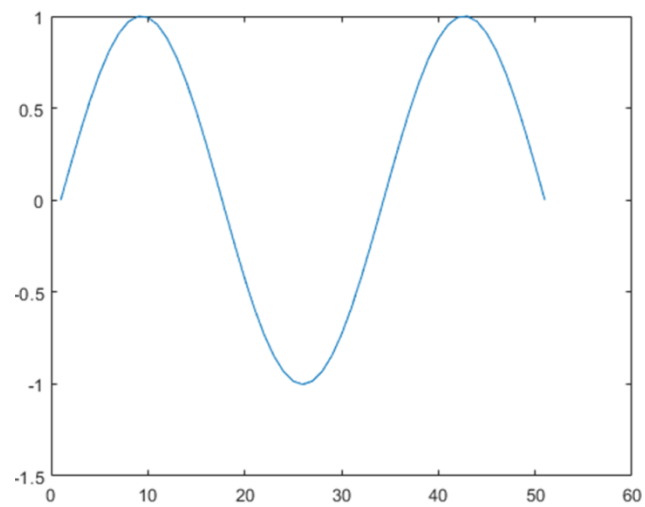
با استفاده از مشخصات سازه و روابط دینامیک شکل مودی تیر دو سر مفصل به صورت زیر بدست آمده است.



شکل ۴-۱۳: شکل مودی اول_تئوری



شکل ۴-۱۴: شکل مودی دوم_تئوری

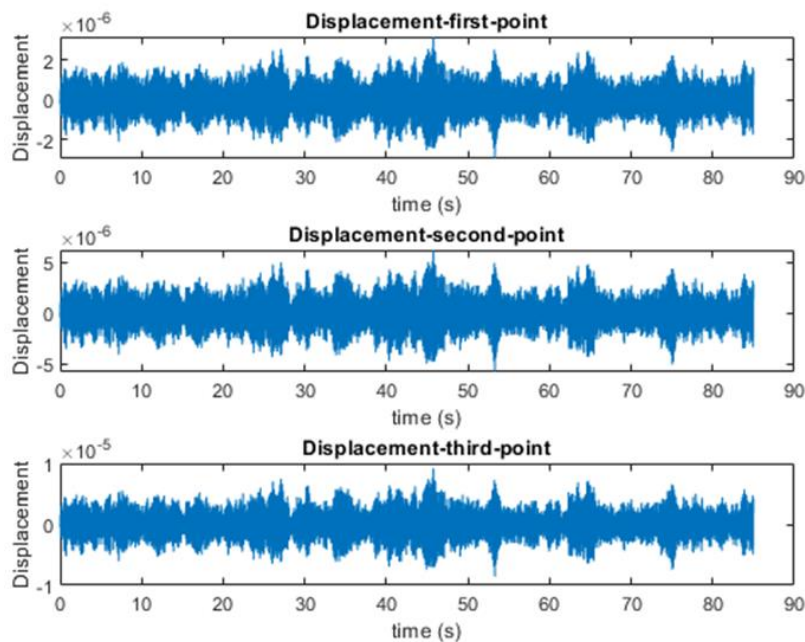


شکل ۴-۱۵: شکل مودی سوم_تئوری

سپس در ادامه با استفاده از روش پیشنهادی به دست آوردن شکل مودی پرداخته می‌شود. سپس با مقایسه شکل مودی حاصل از تئوری و شکل مودی حاصل از روش پیشنهادی، صحت عملکرد روش مذکور بررسی می‌شود.

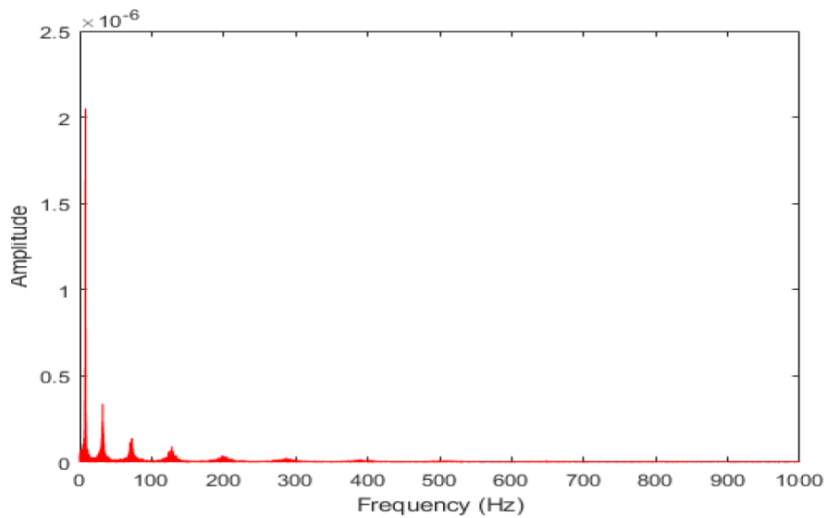
۲.۳.۴ بدست آوردن سیگنال جابه جایی ورودی

در این قسمت نیز همانطور که در آزمون اول توضیح داده شد با استفاده از آنکوپل کردن ماتریس‌های سختی و جرم و میرایی، پاسخ جابه‌جایی هر نقطه بدست آورده شده است. سپس پاسخ ضربه را با نیروی ورودی متناسب با هر نقطه کانوال کرده و جابه‌جایی در آن نقطه بدست آمده است. حال مجموع پاسخ‌های هر نقطه برای تمامی مودها، سیگنال جابه‌جایی هر نقطه را می‌دهد که در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۶: جابجایی سه نقطه اول بر حسب زمان

حال در شکل ۴-۱۷ از سیگنال‌های جابه‌جایی فوق fft زده تا فرکانس‌های قالب را بدست بیاوریم.

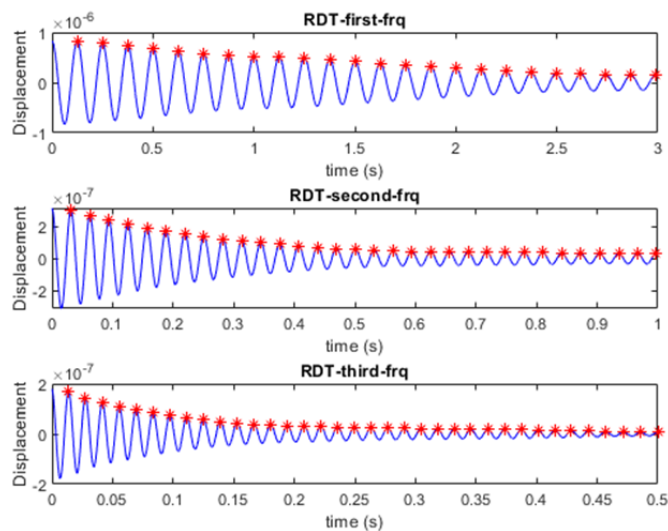


شکل ۴-۱۷: طیف فرکانسی جابه جایی نقطه اول

برای ۴۹ نقطه‌ی بعدی نیز، طیف‌های فرکانسی به دست می‌آید. اما به دلیل حجم بالای دیتا، از گذاشتن آن‌ها پرهیز شده است. اما مشاهده خواهد شد که باقی طیف‌ها نیز دارای فرکانس‌های مشابه می‌باشند.

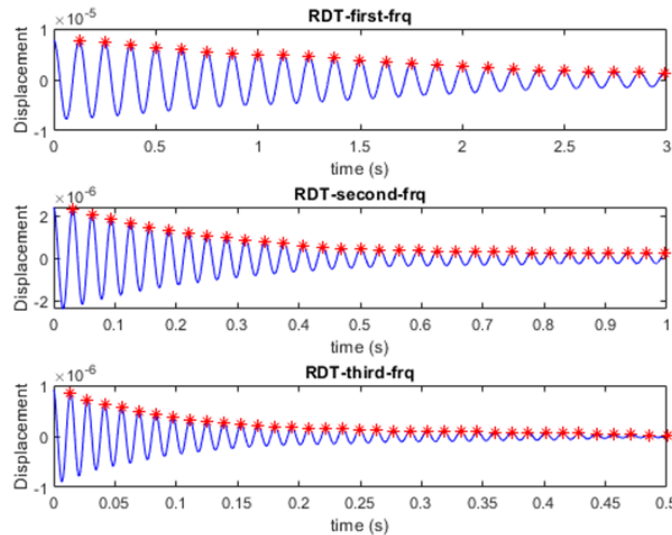
۳.۳.۴ اعمال روش کاهش تصادفی

به دلیل اهمیت بالای ۳ مود اول، در ادامه طیف جابجایی در هر ۵۰ نقطه را تنها به ازای ۳ فرکانس اول آن‌ها فیلتر کرده و سپس بر روی هر کدام RDT اعمال می‌شود. مطابق شکل ۴-۱۸ سیگنال RDT برای مود اول تا سوم در نقطه اول خواهیم داشت.



شکل ۴-۱۸: RDT نقطه اول به تفکیک سه فرکانس اول

همین‌طور برای باقی نقطه‌ها این عملیات را ادامه داده می‌شود. اما در این جا نیز به دلیل بالا بودن حجم دیتا خروجی از گذاشتن نتایج RDT باقی نقاط پرهیز شده است. برای نمونه‌ای دیگر از نتایج RDT جابه‌جایی نقطه چهارم تحت فرکانس‌های اول تا سوم‌اش را در شکل ۴-۱۹ مشاهده می‌کنید.

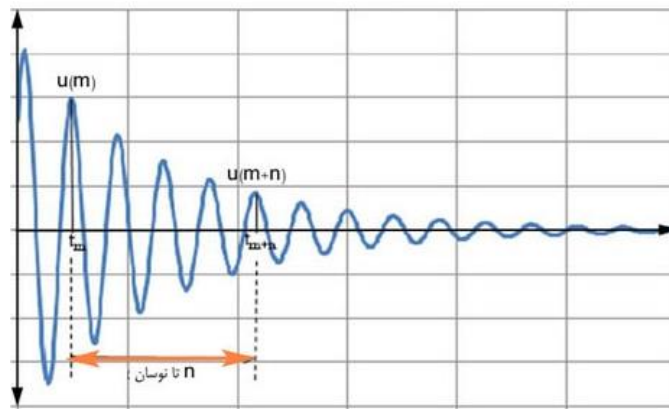


شکل ۴-۱۹: RDT نقطه چهارم به تفکیک سه فرکانس اول

۴.۳.۴ تخمین میرایی

مطابق با شکل ۴-۲۰، استفاده از فرمول زیر میرایی را از روی نمودارهای RDT بدست می‌آید.

$$\xi = \frac{1}{2\pi n} \ln \frac{u_m}{u_{m+n}}$$



شکل ۴-۲۰: تخمین میرایی

بدین طریق میزان میرایی هر مولفه فرکانسی RDT در ۵۰ نقطه برای سه فرکانس اول محاسبه می-گردد. این مقادیر در جدول ۴-۶، جدول ۴-۷ و جدول ۴-۸ به ترتیب برای مود اول و دوم و سوم نشان داده شده است.

جدول ۴-۶: مقادیر ضریب میرایی مود اول در ۵۰ نقطه (تقریباً برابر با ۰,۰۱)

میرایی	بونت	میرایی	بونت	میرایی	بونت	میرایی	بونت
۰,۰۱۰۸۴۵۴۷۹	۳۸	۰,۰۱۰۶۸۸۲۷۳	۲۶	۰,۰۱۰۷۱۸۶۲۴	۱۳	۰,۰۱۰۴۴۷۷۸۲	۱
۰,۰۱۰۸۴۲۵۹۲	۳۹	۰,۰۱۰۶۸۹۹۶۶	۲۷	۰,۰۱۰۶۱۲۰۳۵	۱۴	۰,۰۱۰۵۹۳۵۴۸	۲
۰,۰۱۰۸۲۷۴۸۳	۴۰	۰,۰۱۰۶۹۴۹۱۵	۲۸	۰,۰۱۰۶۱۲۰۸۵	۱۵	۰,۰۱۰۵۹۳۳۳۳	۳
۰,۰۱۰۸۲۳۵۰۶	۴۱	۰,۰۱۰۶۹۵۶۹۱	۲۹	۰,۰۱۰۶۱۸۵۷۶	۱۶	۰,۰۱۰۵۸۷۵۰۶	۴
۰,۰۱۰۸۱۷۲۱۱	۴۲	۰,۰۱۰۶۸۹۹۴۵	۳۰	۰,۰۱۰۶۱۶۴۶۸	۱۷	۰,۰۱۰۷۴۶۱۴۹	۵
۰,۰۱۰۸۱۳۳۷۱	۴۳	۰,۰۱۰۶۹۶۰۲۷	۳۱	۰,۰۱۰۷۹۱۱۳	۱۸	۰,۰۱۰۷۴۳۸۵۶	۶
۰,۰۱۰۸۱۴۷۵۴	۴۴	۰,۰۱۰۶۹۰۴۷۳	۳۲	۰,۰۱۰۷۷۹۱۳	۱۹	۰,۰۱۰۷۵۰۶۶۸	۷
۰,۰۱۰۸۰۰۰۸۱۵	۴۵	۰,۰۱۰۶۸۱۱۰۱	۳۳	۰,۰۱۰۶۵۲۳۳۳	۲۰	۰,۰۱۰۷۵۴۲۳۹	۸
۰,۰۱۰۷۹۶۰۵۷	۴۶	۰,۰۱۰۶۷۳۵۶۲	۳۴	۰,۰۱۰۶۶۴۰۶۹	۲۱	۰,۰۱۰۸۲۳۸۹۵	۹
۰,۰۱۰۷۹۲۳۴۴	۴۷	۰,۰۱۰۶۷۴۱۲۸	۳۵	۰,۰۱۰۶۶۶۱۴۳	۲۲	۰,۰۱۰۸۳۱۰۸	۱۰
۰,۰۱۰۷۳۸۴۴۱	۴۸	۰,۰۱۰۸۴۶۴۸۸	۳۶	۰,۰۱۰۶۶۱۸۳۱	۲۳	۰,۰۱۰۵۱۲۱۵۶	۱۱
۰,۰۱۰۷۳۷۸۲۱	۴۹	۰,۰۱۰۸۴۷۱۲	۳۷	۰,۰۱۰۶۷۳۷۴۴	۲۴	۰,۰۱۰۵۰۸۲۰۶	۱۲
۰,۰۱۰۶۳۶۴۴۴	۵۰			۰,۰۱۰۶۶۹۰۰۲	۲۵		

جدول ۴-۷: مقادیر ضریب میرایی مود دوم در ۵۰ نقطه (تقریباً برابر با ۰,۰۱۵)

میرایی	بونت	میرایی	بونت	میرایی	بونت	میرایی	بونت
۰,۰۱۴۴۸۴۶۱۶	۳۸	۰,۰۱۳۷۴۱۰۳۷	۲۶	۰,۰۱۴۳۶۷۲۶۷	۱۳	۰,۰۱۴۴۶۶۰۱۴	۱
۰,۰۱۴۵۳۴۹۱۱	۳۹	۰,۰۱۴۰۴۲۷۳۵	۲۷	۰,۰۱۴۲۳۴۵۰۱	۱۴	۰,۰۱۴۵۳۷۳۸۱	۲
۰,۰۱۴۳۶۰۶۲۵	۴۰	۰,۰۱۴۵۳۰۲۱	۲۸	۰,۰۱۴۳۷۸۲۲۷	۱۵	۰,۰۱۴۵۹۹۷۶	۳
۰,۰۱۴۴۰۲۹۱۳	۴۱	۰,۰۱۴۲۲۲۳۶	۲۹	۰,۰۱۴۴۳۳۰۲۶	۱۶	۰,۰۱۴۵۷۵۷۱۱	۴
۰,۰۱۴۵۰۳۱۵۷	۴۲	۰,۰۱۴۱۹۱۴۶۴	۳۰	۰,۰۱۴۴۶۲۴۳	۱۷	۰,۰۱۴۴۶۵۵۸۴	۵
۰,۰۱۴۴۵۱۶۹۷	۴۳	۰,۰۱۴۵۲۸۴	۳۱	۰,۰۱۴۸۱۹۶۹۷	۱۸	۰,۰۱۴۳۳۰۸۷۵	۶
۰,۰۱۴۴۹۸۵۷۸	۴۴	۰,۰۱۴۶۱۸۶۹۵	۳۲	۰,۰۱۴۹۸۲۹۱۶	۱۹	۰,۰۱۴۳۵۸۰۴۶	۷
۰,۰۱۴۴۶۶۹۱۳	۴۵	۰,۰۱۴۴۲۷۳۱۷	۳۳	۰,۰۱۵۳۸۵۱۱۶	۲۰	۰,۰۱۴۳۵۰۶۳	۸
۰,۰۱۴۳۶۷۷۰۸	۴۶	۰,۰۱۴۳۱۰۱۵۹	۳۴	۰,۰۱۶۰۱۱۹۱۱	۲۱	۰,۰۱۴۳۰۸۰۵۴	۹
۰,۰۱۴۳۶۷	۴۷	۰,۰۱۴۴۰۷۴۶۶	۳۵	۰,۰۱۵۹۱۲۰۲۲	۲۲	۰,۰۱۴۲۴۵۳۷۵	۱۰
۰,۰۱۴۴۲۸۸۰۸	۴۸	۰,۰۱۴۴۸۰۵۶۳	۳۶	۰,۰۱۶۱۶۹۵۶۲	۲۳	۰,۰۱۴۳۱۴۴۱۷	۱۱
۰,۰۱۴۶۴۷۶۰۱	۴۹	۰,۰۱۴۴۲۶۹۳۶	۳۷	۰,۰۱۸۱۵۶۱۴۴	۲۴	۰,۰۱۴۲۱۶۵۵۳	۱۲
۰,۰۱۵۱۱۸۶۴۳	۵۰			۰,۰۲۵۰۷۷۰۱۵	۲۵		

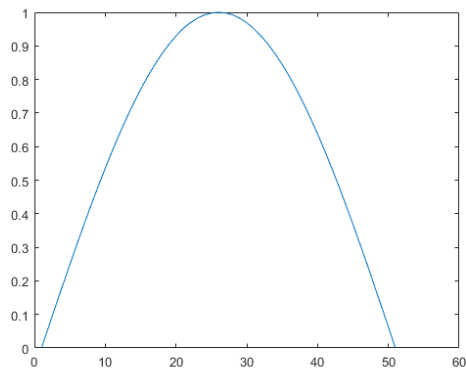
جدول ۴-۸: مقادیر ضریب میرایی مود سوم در ۵۰ نقطه (تقریباً برابر با ۰,۰۲)

پوینت	میرایی	پوینت	میرایی	پوینت	میرایی	پوینت	میرایی
۱	۰,۰۲۱۸۳۹۷۱۶	۱۳	۰,۰۲۱۷۴۴۳۳۳	۲۶	۰,۰۲۱۴۰۸۶۷۶	۳۸	۰,۰۲۱۳۰۴۱۹۲
۲	۰,۰۲۱۹۰۴۷۰۲	۱۴	۰,۰۲۱۵۸۴۷۳۳	۲۷	۰,۰۲۱۲۵۶۱۲	۳۹	۰,۰۲۱۴۳۷۷
۳	۰,۰۲۱۹۰۸۷۱۷	۱۵	۰,۰۲۲۳۷۵۰۲۲	۲۸	۰,۰۲۱۳۷۹۴۳۳	۴۰	۰,۰۲۱۳۴۴۵۵۳
۴	۰,۰۲۱۶۵۱۳۸۸	۱۶	۰,۰۲۹۸۷۲۱۲۸	۲۹	۰,۰۲۱۶۴۵۳۰۲	۴۱	۰,۰۲۱۴۰۴۴۱۴
۵	۰,۰۲۱۷۴۲۱۹	۱۷	۰,۰۴۳۴۲۵۱۹۹	۳۰	۰,۰۲۲۱۸۵۴۸۷	۴۲	۰,۰۲۱۴۹۶۶۰۴
۶	۰,۰۲۱۸۷۶۹۳۱	۱۸	۰,۰۲۳۷۲۰۶۰۱	۳۱	۰,۰۲۲۱۵۰۱۷۹	۴۳	۰,۰۲۱۲۱۴۱۳۸
۷	۰,۰۲۱۵۹۶۷۹۳	۱۹	۰,۰۲۲۱۶۶۷۴۵	۳۲	۰,۰۲۴۲۱۲۳۴۷	۴۴	۰,۰۲۱۰۲۰۱۰۲
۸	۰,۰۲۱۴۰۴۰۴۲	۲۰	۰,۰۲۱۶۳۰۹۶۴	۳۳	۰,۰۴۵۱۶۸۷۷۷	۴۵	۰,۰۲۱۲۱۰۷۹۲
۹	۰,۰۲۱۳۵۴۵۶۲	۲۱	۰,۰۲۱۵۰۹۷۰۳	۳۴	۰,۰۲۹۴۶۳۲۵۹	۴۶	۰,۰۲۱۴۰۰۳۷
۱۰	۰,۰۲۱۲۵۴۳۶	۲۲	۰,۰۲۱۶۴۲۰۱۶	۳۵	۰,۰۲۲۵۷۴۹۴	۴۷	۰,۰۲۱۴۳۵۴۷۱
۱۱	۰,۰۲۱۴۳۸۸۲۳	۲۳	۰,۰۲۱۷۱۸۸۷۶	۳۶	۰,۰۲۱۷۱۲۰۵۵	۴۸	۰,۰۲۱۳۹۴۱۹۷
۱۲	۰,۰۲۱۵۷۲۲۲۶	۲۴	۰,۰۲۱۵۹۳۱۸۸	۳۷	۰,۰۲۱۴۵۱۵۹۸	۴۹	۰,۰۲۱۳۷۱۳۵۷
		۲۵	۰,۰۲۱۶۶۵۷۹۶			۵۰	۰,۰۲۱۸۸۳۰۲

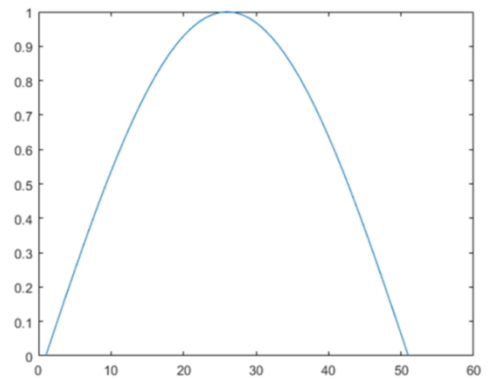
همانگونه که مشخص است، ضرایب میرایی محاسبه شده از پاسخ RDT با مقادیر حقیقی ضرایب میرایی با تقریب مناسبی یکسان می‌باشد.

۵.۳.۴ شکل مودی حاصل از الگوریتم توسعه یافته با روش کاهش تصادفی

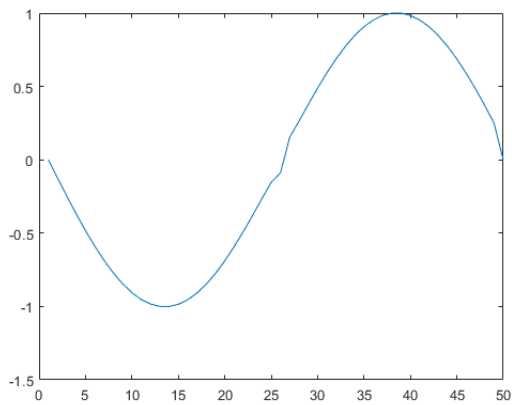
با برداشت مقدار دامنه‌ی جابه‌جایی هر کدام از نقطه‌ها از روی سیگنال RDT آن‌ها برای هر سه فرکانس اول و اتصال آن‌ها به یکدیگر اشکال مودی اول تا سوم مطابق با شکل ۴-۱۳ و شکل ۴-۱۴ و شکل ۴-۱۵ بدست می‌آید.



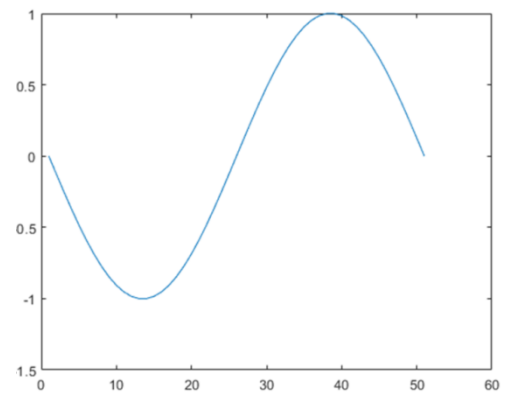
شکل ۴-۲۱: شکل مودی اول_RDT



شکل ۴-۱۳: شکل مودی اول-تئوری



شکل ۴-۲۲: شکل مودی دوم_RDT



شکل ۴-۱۴: شکل مودی دوم-تئوری

فصل پنجم: شبیه سازی

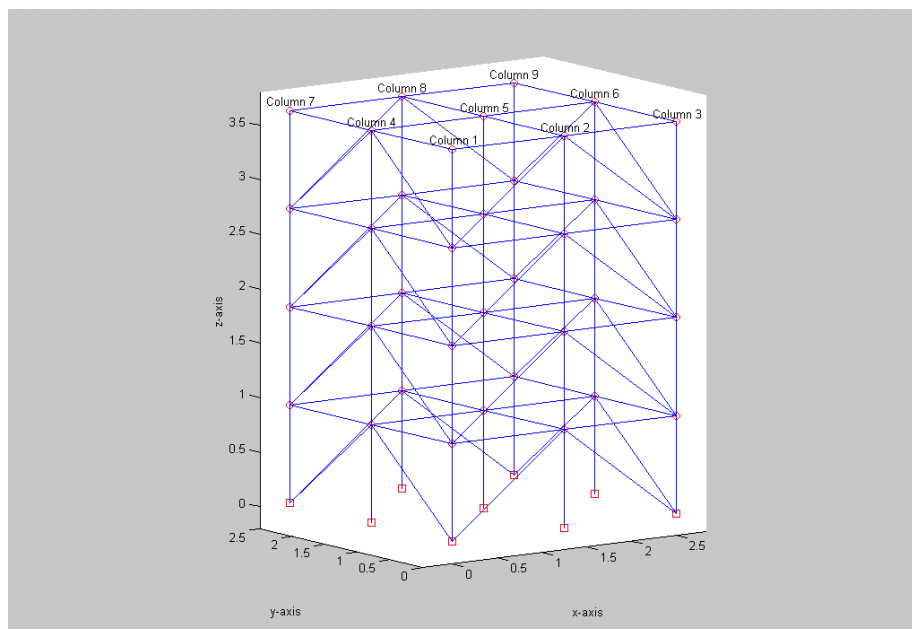
۱.۵ پیش گفتار

در این بخش از دو مقاله معتبر جهت بررسی عملکرد روش پیشنهادی استفاده شده است. برای بررسی دقت روش معرفی شده در بدست آوردن فرکانس های سازه ای از آزمون اول و برای بررسی دقت در بدست آوردن اشکال مودی و همچنین تشخیص خرابی از آزمون دوم بهره گرفته شده است.

۲.۵ آزمون اول:

در این آزمون قصد داریم با استفاده از دیتاهای واقعی استخراج شده از مقاله، اشکال مودی سازه بدست آید [۴۹, ۵۰].

سازه ۴ طبقه زیر را در شکل ۵-۱ در نظر بگیرید:



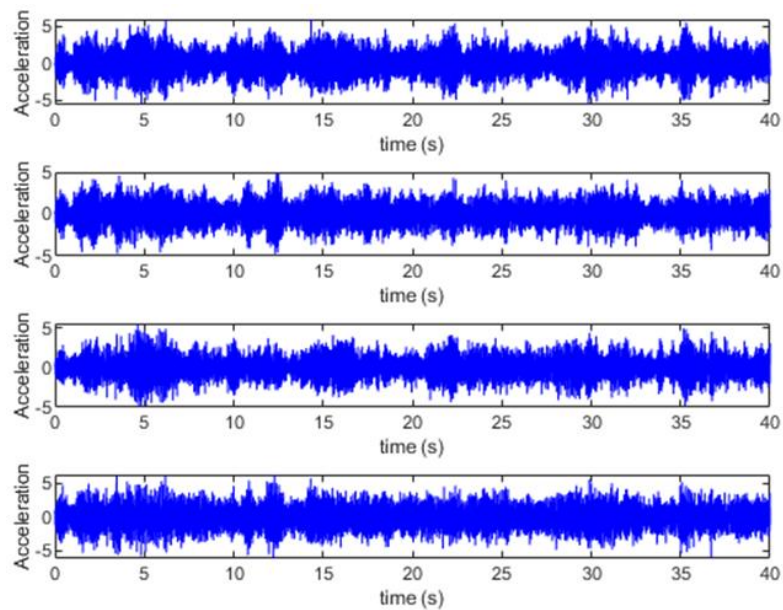
شکل ۵-۱: سازه مدل

جدول ۵-۱: دیتای ورودی

acc(:,1)	floor 1 of column 2 in x-direction
acc(:,2)	floor 1 of column 6 in y-direction
acc(:,3)	floor 1 of column 8 in x-direction
acc(:,4)	floor 1 of column 4 in y-direction
acc(:,5)	floor 2 of column 2 in x-direction
acc(:,6)	floor 2 of column 6 in y-direction
acc(:,7)	floor 2 of column 8 in x-direction
acc(:,8)	floor 2 of column 4 in y-direction
acc(:,9)	floor 3 of column 2 in x-direction
acc(:,10)	floor 3 of column 6 in y-direction
acc(:,11)	floor 3 of column 8 in x-direction
acc(:,12)	floor 3 of column 4 in y-direction
acc(:,13)	floor 4 of column 2 in x-direction
acc(:,14)	floor 4 of column 6 in y-direction
acc(:,15)	floor 4 of column 8 in x-direction
acc(:,16)	floor 4 of column 4 in y-direction

۱.۲.۵ استخراج سیگنال ورودی

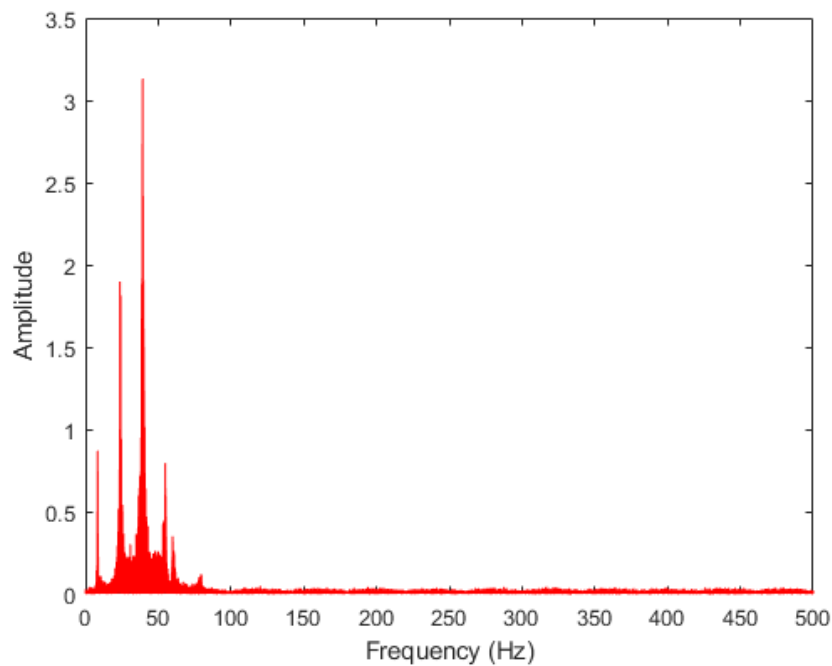
شتاب طبقات اول برداشت شده از جدول داده‌های مندرج در مقاله مطابق شکل ۵-۲ رسم شده است. برای این منظور به صورت نمونه از هر طبقه در یک راستا و ستون مشخص سیگنال‌ها، برداشت شده است.



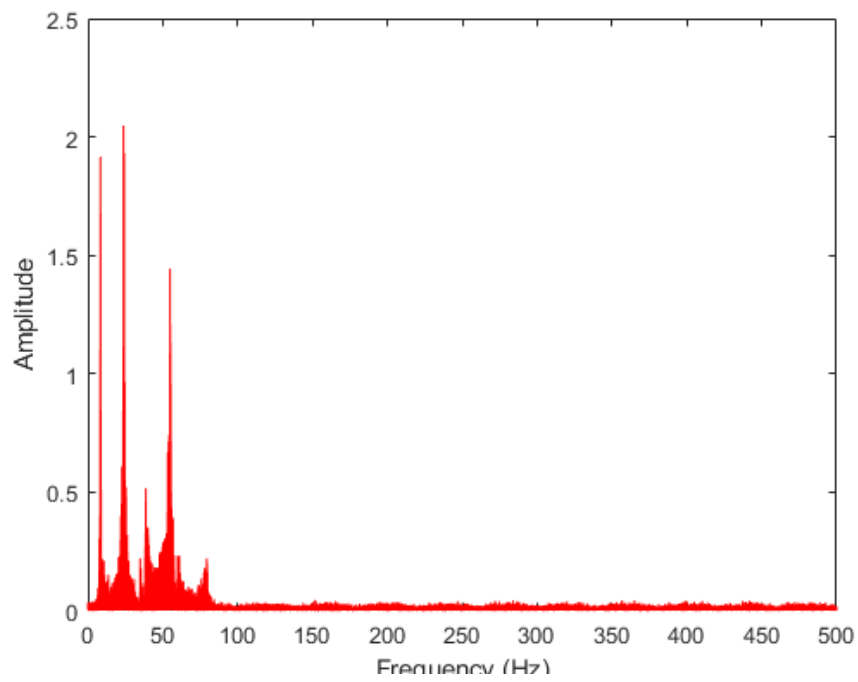
شکل ۵-۲: سیگنال طبقات

۲.۲.۵ اعمال روش کاهش تصادفی

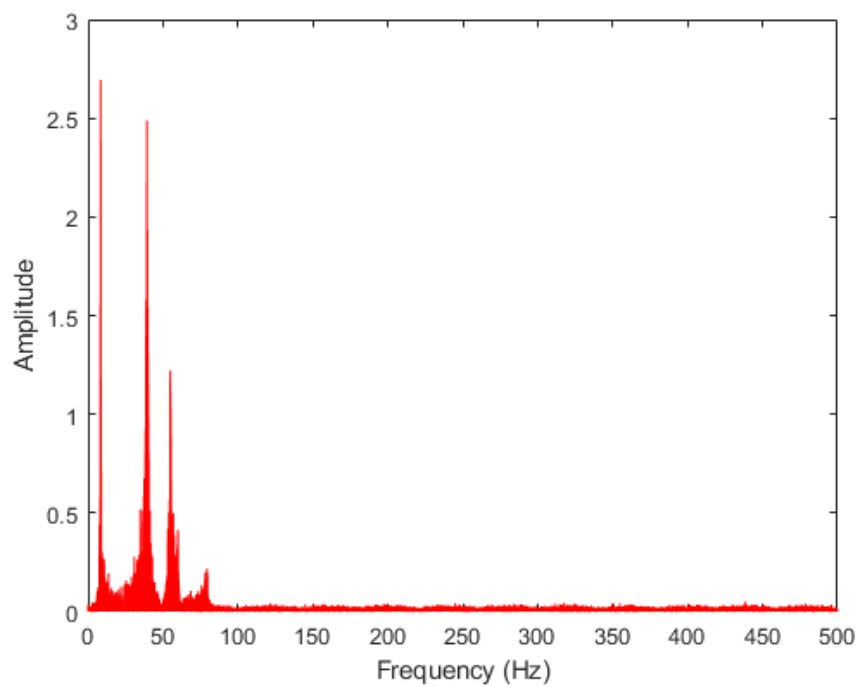
حال از طریق سری فوریه، مقادیر فرکانس طبقات از سیگنال‌های دریافتی استخراج شده و در شکل ۵-۳، شکل ۵-۴، شکل ۵-۵ و شکل ۵-۶ مشاهده می‌شود که مقادیر فرکانس طبقات در هر چهار سیگنال ثابت است.



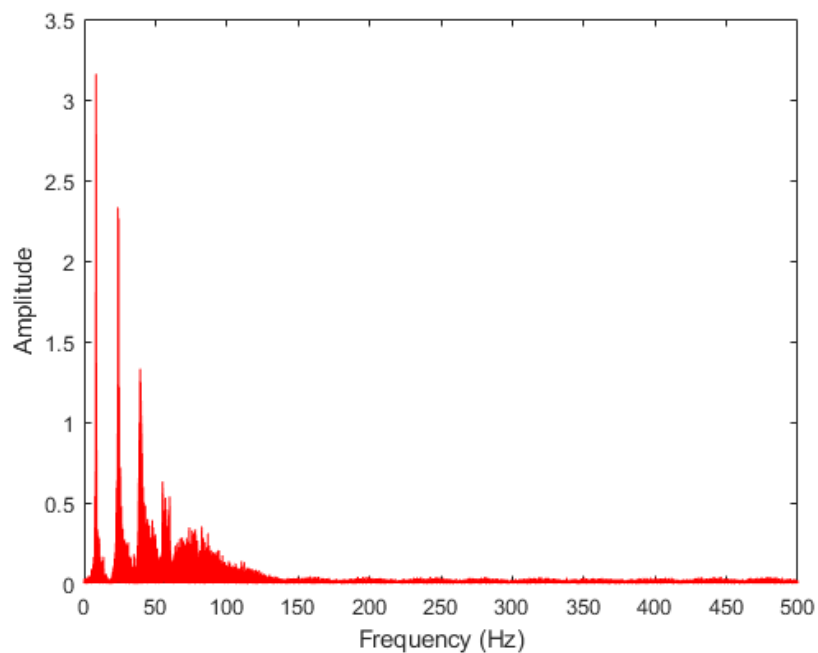
شکل ۵-۳: طیف فرکانسی طبقه اول



شکل ۴-۵: طیف فرکانسی طبقه دوم



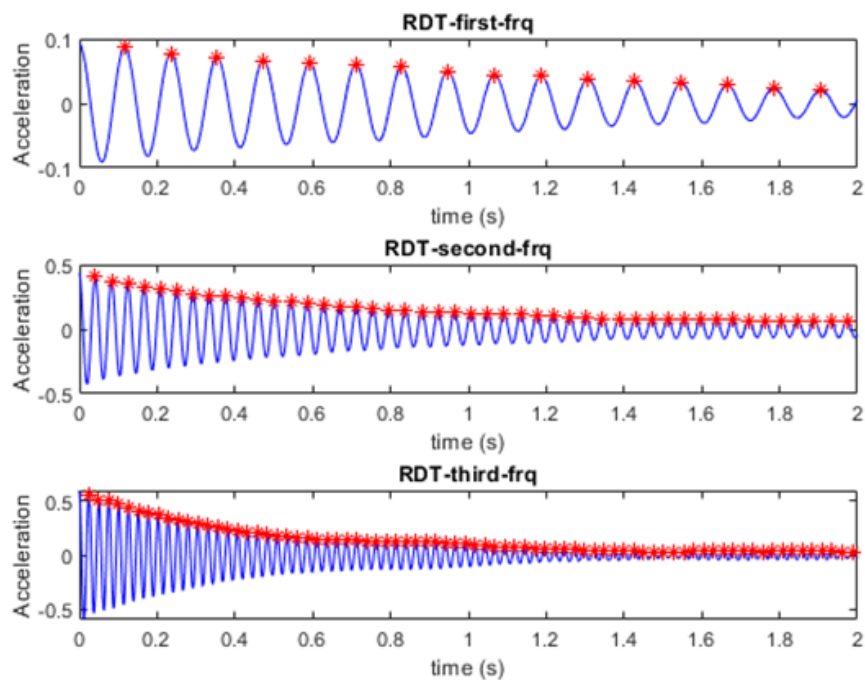
شکل ۵-۵: طیف فرکانسی طبقه سوم



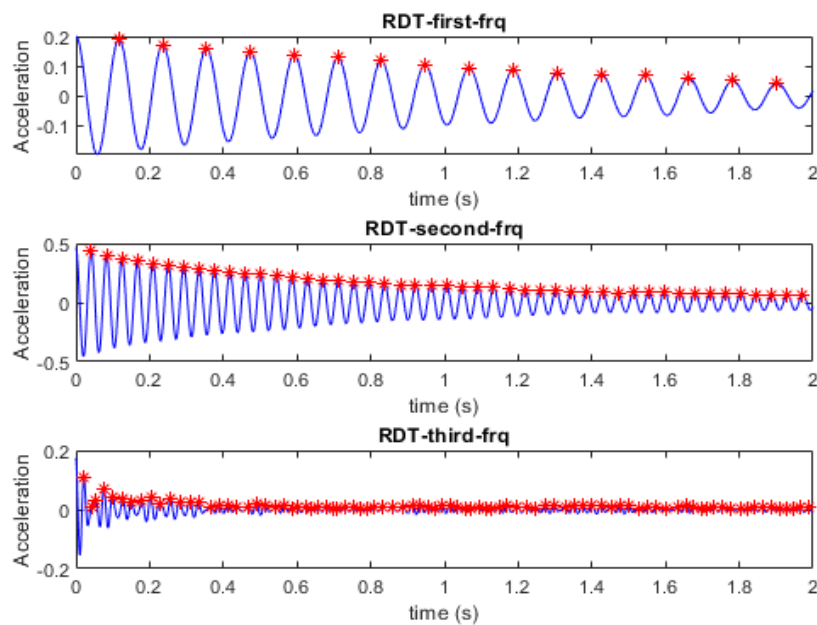
شکل ۵-۶: طیف فرکانسی طبقه چهارم

در ادامه مولفه‌های فرکانسی شتاب در هر طبقه را به فرکانس‌های بدست آمده از سری فوریه فیلتر شده و سپس بر روی هر کدام RDT اعمال خواهیم شد.

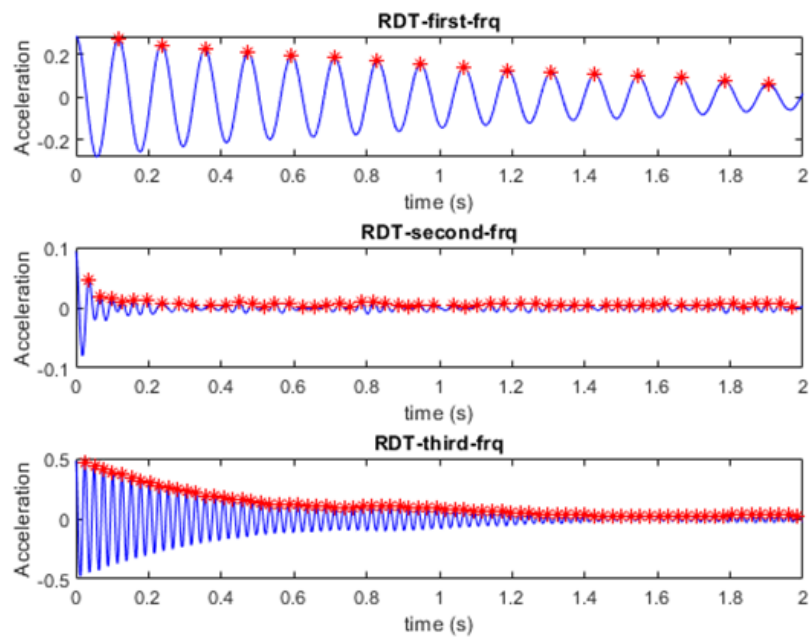
در RDT، میزان حد‌آستانه برابر با $\sqrt{2}\sigma$ و مقدار زیربازه زمانی برابر با ۲ ثانیه در نظر گرفته شده است. در شکل ۵-۷، شکل ۵-۸، شکل ۵-۹ و شکل ۵-۱۰ به ترتیب سیگنال RDT طبقات اول تا چهارم نشان داده شده است.



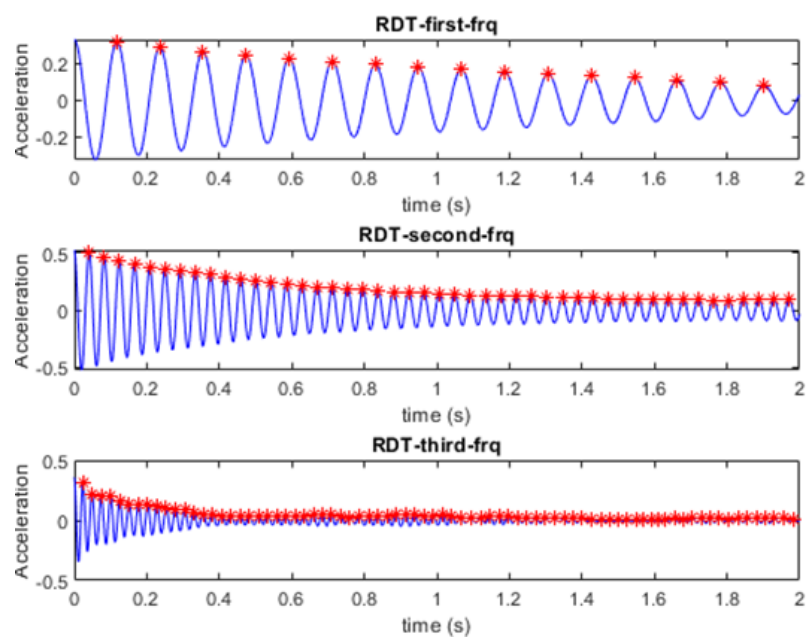
شکل ۵-۸: RDT طبقه دوم به تفکیک سه فرکانس اول



شکل ۵-۷: RDT طبقه اول به تفکیک سه فرکانس اول



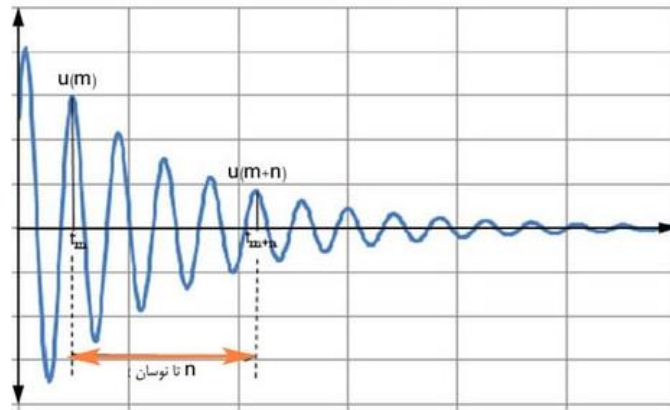
شکل ۵-۹: RDT طبقه سوم به تفکیک سه فرکانس اول



شکل ۵-۱۰: RDT طبقه چهارم به تفکیک سه فرکانس اول

۳.۲.۵ تخمین میرایی

در شکل ۱۱-۵ با استفاده از فرمول زیر میرایی را از روی نمودارهای RDT بدست آمده است.



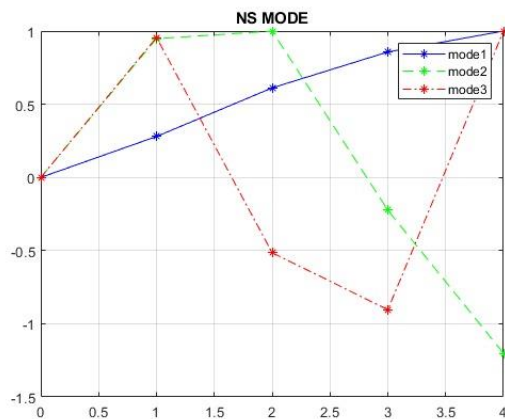
شکل ۱۱-۵: تخمین میرایی

$$\xi = \frac{1}{2\pi n} \ln \frac{u_m}{u_{m+n}}$$

همانطور که از نتایج مشاهده می گردد ، میرایی بدست آمده، تقریباً برابر با ۰,۰۱ داده شده، می باشد.

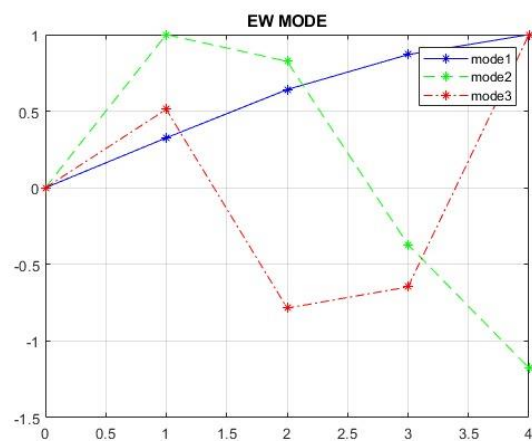
۴.۲.۵ شکل مودی حاصل از الگوریتم توسعه یافته با روش کاهش تصادفی

حال از طریق مقداردهی عددی، شکل مودی مطابق شکل ۱۲-۵ و شکل ۱۳-۵ و شکل ۱۴-۵ بدست آمده است.

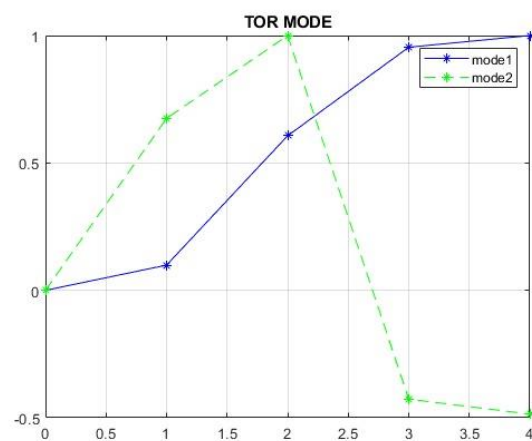


شکل ۱۲-۵: مود اول و دوم و سوم در

راستای شرقی و غربی



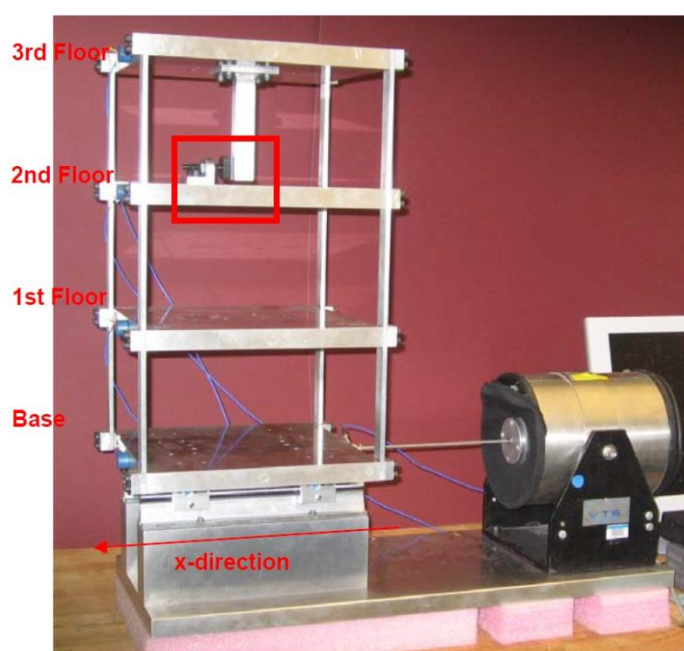
شکل ۵-۱۳: مود اول و دوم و سوم در راستای شمالی و جنوبی



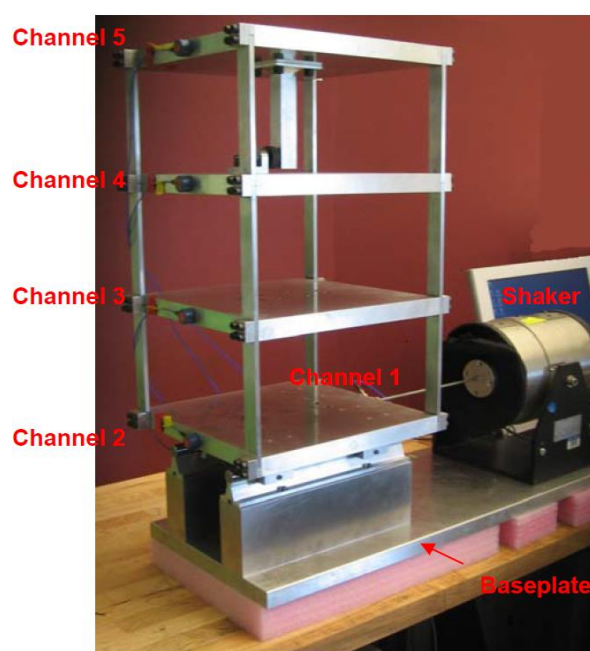
شکل ۵-۱۴: مود اول و دوم پچش

۳.۵ آزمون دوم

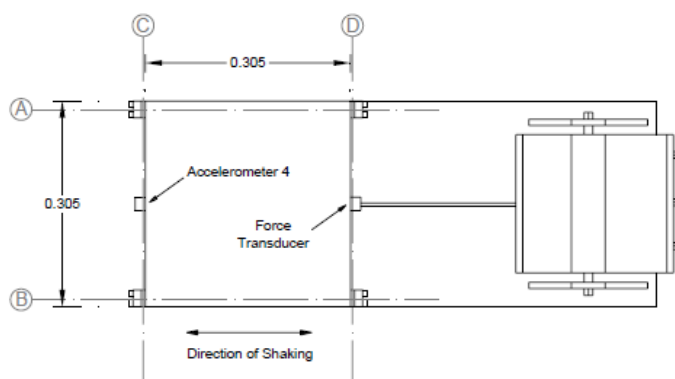
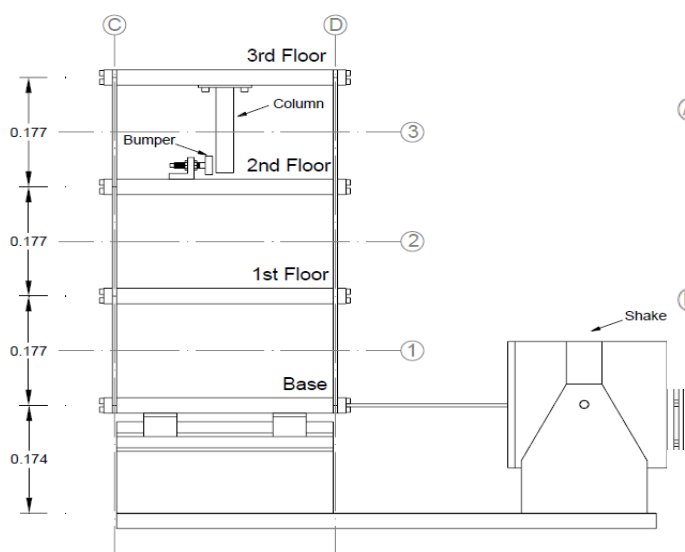
در این آزمون [۵۱] قصد داریم با استفاده از دیتاهای واقعی استخراج شده از مقاله، اشکال مودی سازه را بدست بیاوریم. این دیتاها شامل دیتای سازه‌ی سالم و سازه‌ی دچار خرابی مطابق شکل ۵-۱۵، شکل ۵-۱۶ و شکل ۵-۱۷ می‌باشد. در این حالت مشاهده می‌شود که مودهای سازه‌ی سالم با وجود خرابی در طبقه‌ای که خرابی قرار دارد، شیب آن تغییر می‌کند.



شکل ۵-۱۵: سازه مورد بررسی مقاله



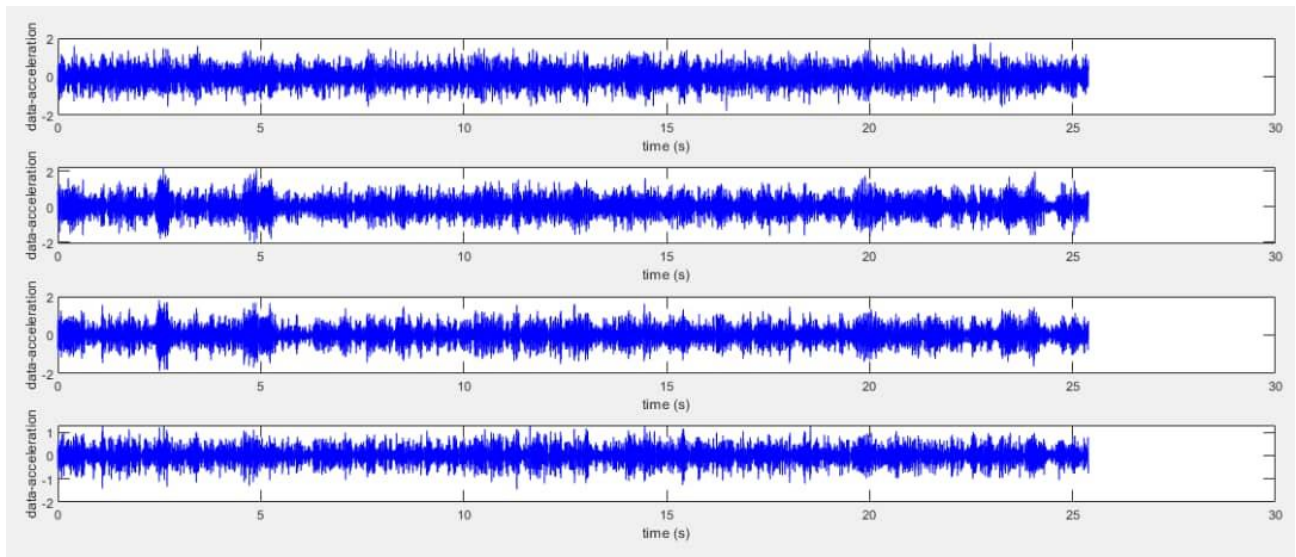
شکل ۵-۱۶: سازه مورد بررسی



شکل ۵-۱۷: سازه مورد بررسی مقاله

۱.۳.۵ استخراج سیگنال ورودی

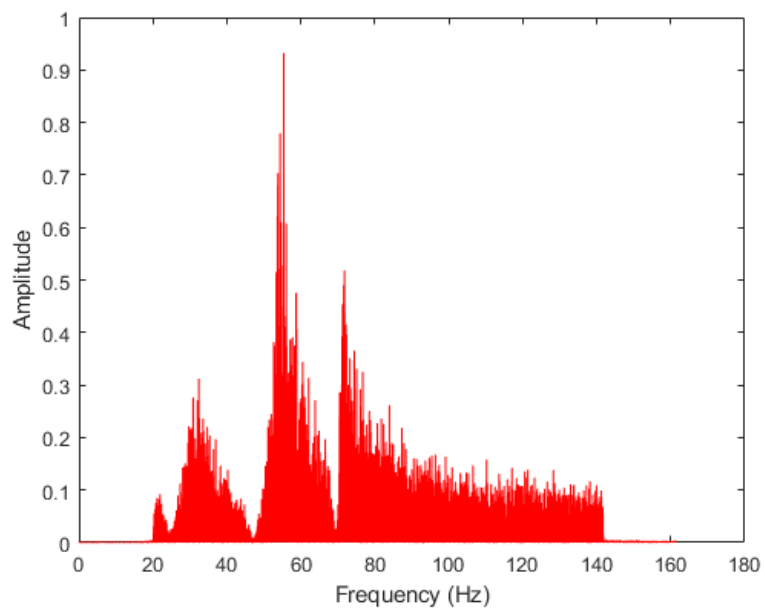
سیگنال ورودی استخراج شده از مقاله به صورت زیر در شکل ۵-۱۸ آورده شده است .



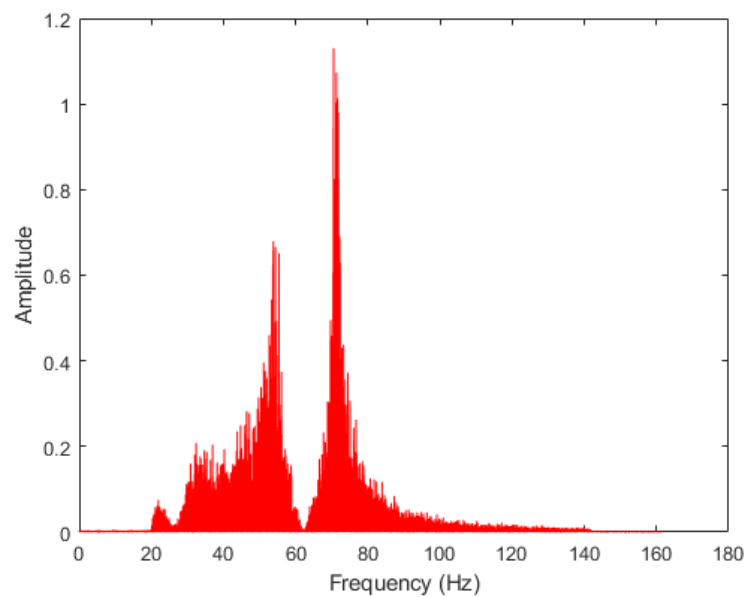
شکل ۵-۱۸: سیگنال طبقات اول تا چهارم

۲.۳.۵ اعمال روش کاهش تصادفی

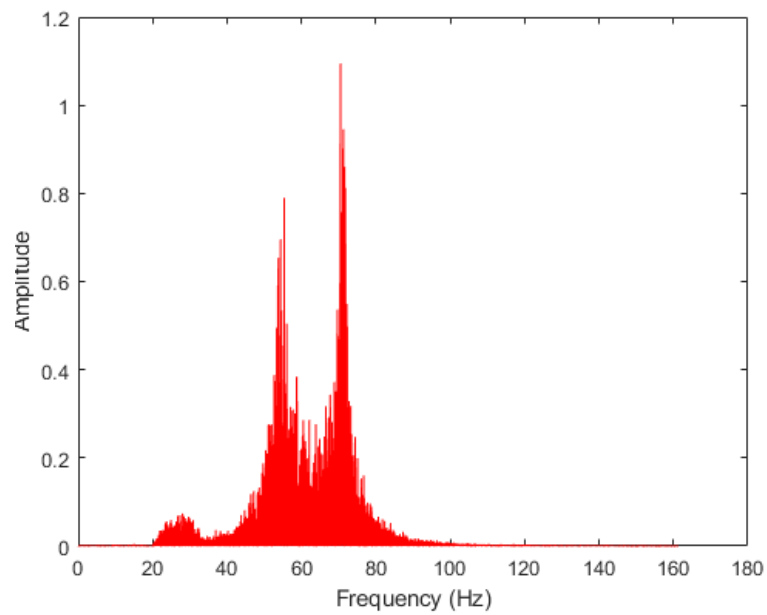
مطابق با شکل ۵-۱۹، شکل ۵-۲۰، شکل ۵-۲۱ و شکل ۵-۲۲، از طریق سری فوریه، مقادیر فرکانس طبقات را از سیگنال‌های دریافتی استخراج شده است. برای این منظور به صورت نمونه تنها سازه‌ی سالم مورد بررسی قرار گرفته شده است.



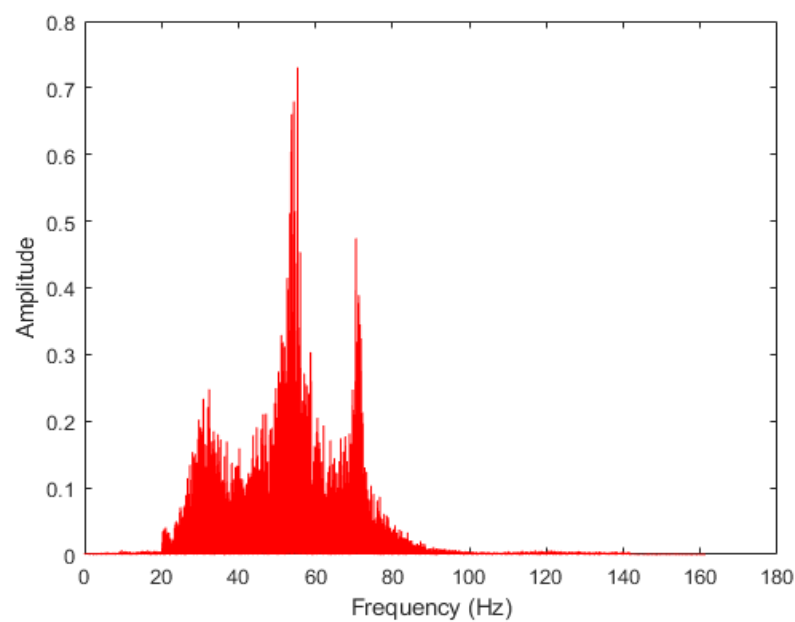
شکل ۵-۱۹: طیف فرکانسی طبقه همکف



شکل ۵-۲۰: طیف فرکانسی طبقه اول



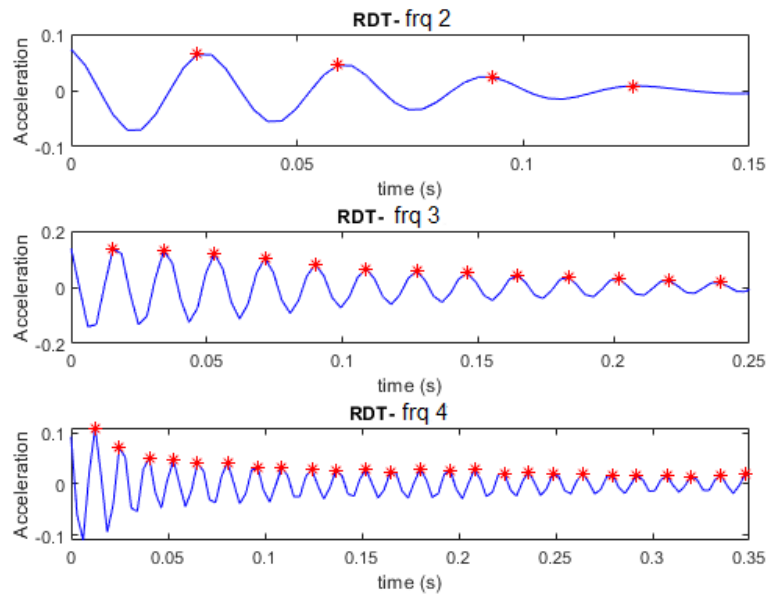
شکل ۵-۲۱: طیف فرکانسی طبقه دوم



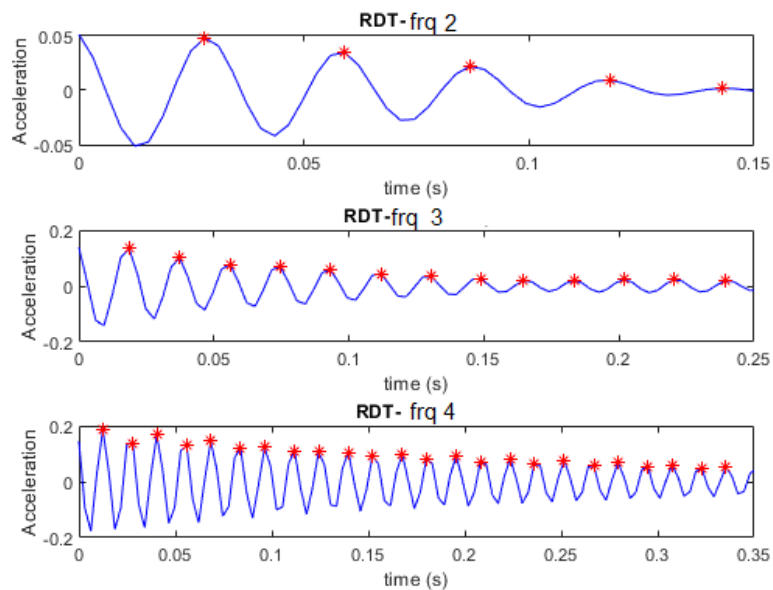
شکل ۵-۲۲: طیف فرکانسی طبقه سوم

در ادامه مولفه‌های فرکانسی شتاب در هر طبقه را به فرکانس‌های سازه فیلتر کرده و سپس بر روی هر کدام RDT اعمال می‌شود.

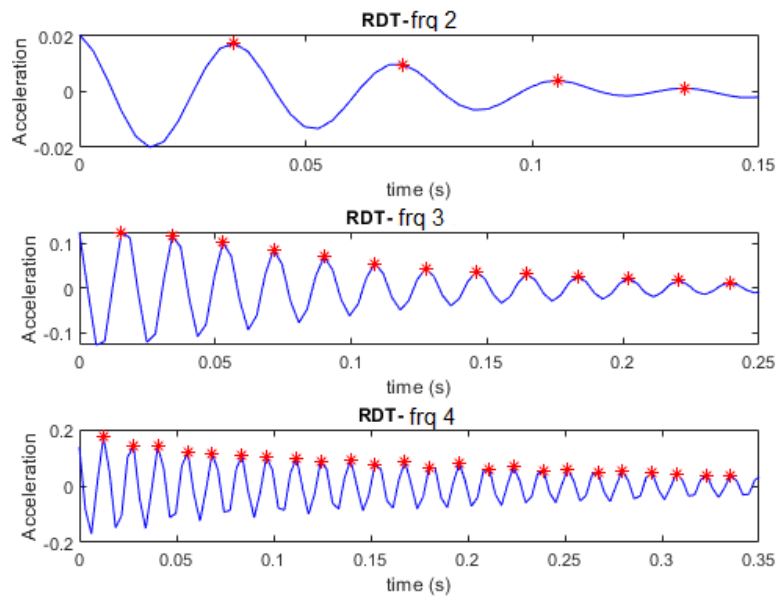
در RDT، میزان trigerring value برابر با $\sqrt{2}\sigma$ و مقدار subsegment duration برابر با ۱۹ در نظر گرفته شده است. شکل ۲۳-۵، شکل ۲۴-۵، شکل ۲۵-۵ و شکل ۲۶-۵ که به ترتیب نشان‌دهنده سیگنال RDT طبقات اول تا چهارم مطابق با تفکیک فرکانس‌های ۲ تا ۴ می‌باشند، در زیر آورده شده است.



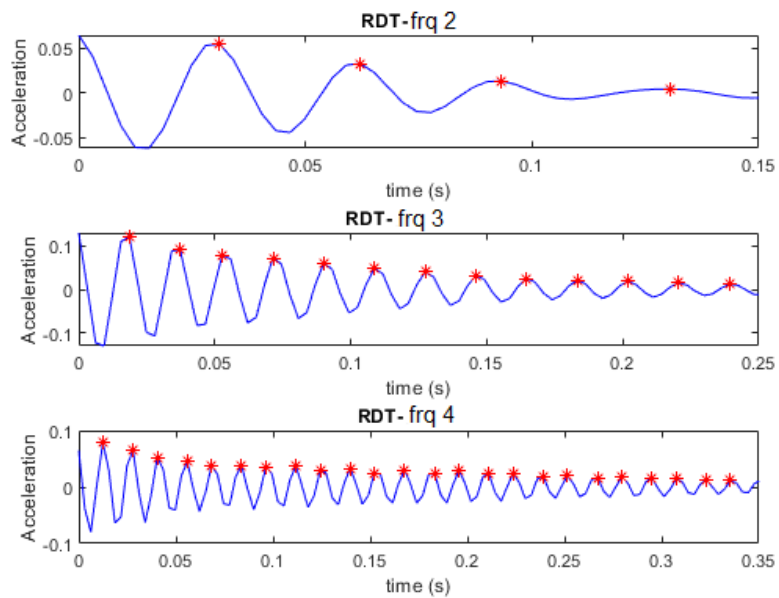
شکل ۲۳-۵: RDT طبقه اول به تفکیک فرکانس‌های ۲ تا ۴



شکل ۲۴-۵: RDT طبقه دوم به تفکیک فرکانس‌های ۲ تا ۴



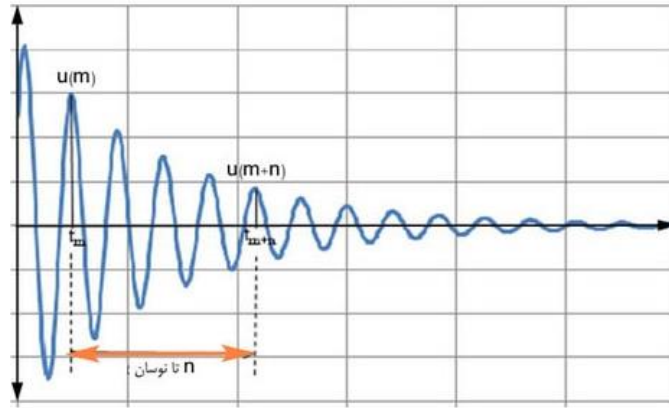
شکل ۵-۲۵: RDT طبقه سوم به تفکیک فرکانس های ۲ تا ۴



شکل ۵-۲۶: RDT طبقه چهارم به تفکیک فرکانس های ۲ تا ۴

۳.۳.۵ تخمین میرایی

مطابق با شکل ۵-۲۷، با استفاده از فرمول زیر میرایی از روی نمودارهای RDT بدست می آید.



شکل ۵-۲۷: تخمین میرایی

$$\xi = \frac{1}{2\pi n} \ln \frac{u_m}{u_{m+n}}$$

میرایی بدست آمده از RDT برای مود دوم مطابق مقادیر جدول ۵-۲ محاسبه شده است.

جدول ۵-۲: میرایی بدست آمده از روش کاهش تصادفی برای فرکانس دوم

تعداد دفعات تست فرکانس دوم									
تست نهم	تست هشتم	تست هفتم	تست ششم	تست پنجم	تست چهارم	تست سوم	تست دوم	تست اول	
۰.۰۶۱۵	۰.۰۵۷۲	۰.۰۸۵۳	۰.۰۳۹۸	۰.۰۴۴۵	۰.۰۶۷	۰.۰۴۱۵	۰.۰۵۷۴	۰.۰۶۹۶	طبقه همکف
۰.۰۸۱۹	۰.۰۸۵۳	۰.۰۶۷۱	۰.۰۵۲۶	۰.۰۴۹۷	۰.۰۵۷۴	۰.۰۵۱۴	۰.۰۵۱	۰.۰۶۹۸	طبقه اول
۰.۰۵۷۷	۰.۰۷۱۵	۰.۰۴۷۴	۰.۰۸۳۹	۰.۰۵۵۸	۰.۰۵۹۷	۰.۰۹۲۳	۰.۰۶۶۶	۰.۰۵۴۳	طبقه دوم
۰.۰۶۰۲	۰.۰۶۷۴	۰.۰۸۰۸	۰.۰۴۳۲	۰.۰۴۵	۰.۰۷۲۳	۰.۰۴۴۴	۰.۰۵۶۶	۰.۰۶۷۹	طبقه سوم
								۰.۰۶۱۵۸	میانگین کل

میرایی بدست آمده از RDT برای مود سوم مطابق مقادیر جدول ۵-۳ محاسبه شده است.

جدول ۳-۵: میرایی بدست آمده از روش کاهش تصادفی برای فرکانس سوم

تعداد دفعات تست فرکانس سوم									
تست نهم	تست هشتم	تست هفتم	تست ششم	تست پنجم	تست چهارم	تست سوم	تست دوم	تست اول	
۰.۰۲۴۲	۰.۰۱۷۹	۰.۰۲۰۹	۰.۰۱۸۶	۰.۰۲۴۴	۰.۰۱۶۴	۰.۰۱۸۹	۰.۰۲۲۱	۰.۰۱۸۵	طبقه همکف
۰.۰۲۷	۰.۰۱۷۱	۰.۰۱۶۸	۰.۰۲۰۸	۰.۰۲۰۹	۰.۰۲۲۹	۰.۰۲۰۱	۰.۰۱۸۸	۰.۰۱۳۵	طبقه اول
۰.۰۲۲۶	۰.۰۱۶۳	۰.۰۲۶۵	۰.۰۲۲۳	۰.۰۲۲۷	۰.۰۲۰۴	۰.۰۲۰۶	۰.۰۱۶۹	۰.۰۱۵۵	طبقه دوم
۰.۰۲۵	۰.۰۱۵۹	۰.۰۱۸۵	۰.۰۱۸۹	۰.۰۲۰۹	۰.۰۲۳۲	۰.۰۲۶۱	۰.۰۲۰۵	۰.۰۱۴۳	طبقه سوم
								۰.۰۲۰۱۹	میانگین کل

میرایی بدست آمده از RDT برای مود چهارم مطابق مقادیر جدول ۴-۵ محاسبه شده است.

جدول ۴-۵: میرایی بدست آمده از روش کاهش تصادفی برای فرکانس چهارم

تعداد دفعات تست فرکانس چهارم									
تست نهم	تست هشتم	تست هفتم	تست ششم	تست پنجم	تست چهارم	تست سوم	تست دوم	تست اول	
۰.۰۱۴۱	۰.۰۱۰۲	۰.۰۱۲۱	۰.۰۱۲۶	۰.۰۱۷۲	۰.۰۱۹۳	۰.۰۰۸۵	۰.۰۱۰۷	۰.۰۱۱۵	طبقه همکف
۰.۰۰۸۸	۰.۰۰۵۶	۰.۰۱۱۴	۰.۰۰۷۹	۰.۰۱۱۸	۰.۰۰۷	۰.۰۰۷۶	۰.۰۰۷۸	۰.۰۰۸۸	طبقه اول
۰.۰۰۹۵	۰.۰۰۶۱	۰.۰۱۰۷	۰.۰۰۷۷	۰.۰۱۱۷	۰.۰۰۷۴	۰.۰۰۹	۰.۰۰۷۹	۰.۰۰۹۲	طبقه دوم
۰.۰۰۹۱	۰.۰۰۶۸	۰.۰۱۱۹	۰.۰۰۸۸	۰.۰۱۱۳	۰.۰۰۸۳	۰.۰۱۰۴	۰.۰۰۹۹	۰.۰۱۰۳	طبقه سوم
								۰.۰۰۹۹۷	میانگین کل

همچنین میرایی بدست آمده در مقاله به صورت زیر آورده شده است.

جدول ۵-۵: میرایی بدست آمده در مقاله

Table 3: Experimental and Numerical Modal Parameters

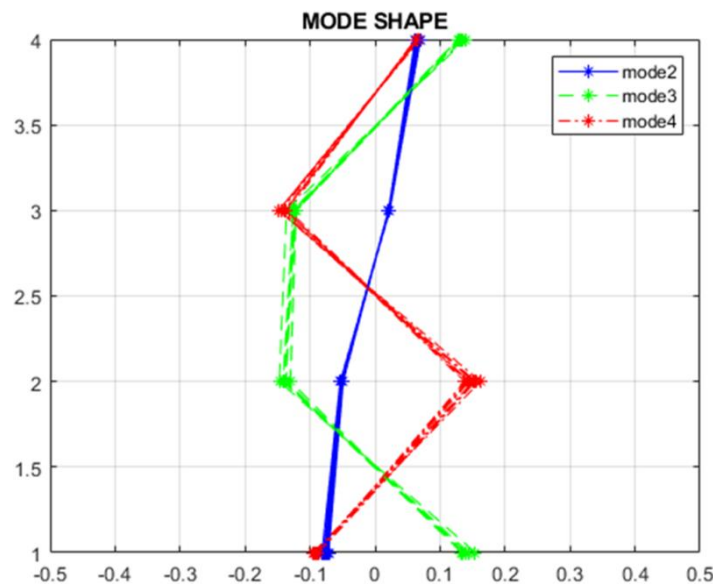
Mode number	Frequency (Hz)		Damping ratio (%)
	Experimental	Numerical	
2	30.7	29.8 (-2.9 %)	6.3
3	54.2	54.0 (-0.4 %)	2.0
4	70.7	71.6 (+1.3 %)	0.97

با مقایسه مقادیر جدول ۵-۵ با مقادیر میرایی بدست آمده مشاهده می شود که میرایی توسط الگوریتم پیشنهادی ما با دقت بالایی محاسبه شده است.

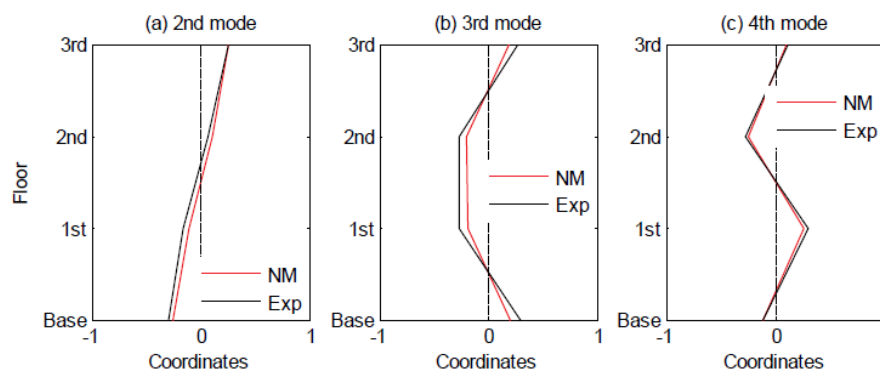
۴.۳.۵ شکل مودی حاصل از الگوریتم توسعه یافته با روش کاهش تصادفی

در این بخش، ابتدا برای نمونه شکل مودی حالت سالم سازه را بدست آورده با شکل مودی حالت سالم مقاله جهت تایید شدن الگوریتم پیشنهادی مقایسه می شود.

شکل مودی بدست آمده از الگوریتم پیشنهادی توسعه یافته با روش کاهش تصادفی در شکل ۲۸-۵ آورده شده است.



شکل ۲۸-۵: شکل مودی مودهای دوم تا چهارم بدست آمده از الگوریتم



Numerical (NM) and experimental (Exp) mode shapes of the baseline condition.

شکل ۲۹-۵: شکل مودی مودهای دوم تا چهارم بدست آمده از مقاله

همانطور که مشاهده می‌گردد شکل مودی حاصله از الگوریتم پیشنهادی توسعه یافته با روش کاهش تصادفی با شکل مودی مندرج در مقاله با دقت بالایی مشابه می‌باشد.

۵.۳.۵ تشخیص خرابی

جهت تشخیص خرابی کافیت شکل مودی یک سازه خراب را با شکل مودی سالم همان سازه مورد بررسی قرارگیرد. در این صورت با تغییر شکل مودی سازه خراب در طبقه‌ای که دچار خرابی شده است می‌توان محدوده‌ی خرابی را تشخیص داد.

در این پایان‌نامه، دو حالت خرابی مندرج در مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. به جهت تکراری و طولانی بودن روش بدست‌آمدن شکل مودی از الگوریتم پیشنهادی، در این بخش تنها به ارائه شکل مودی نهایی سازه خراب در حالت‌های مختلف می‌پردازیم.

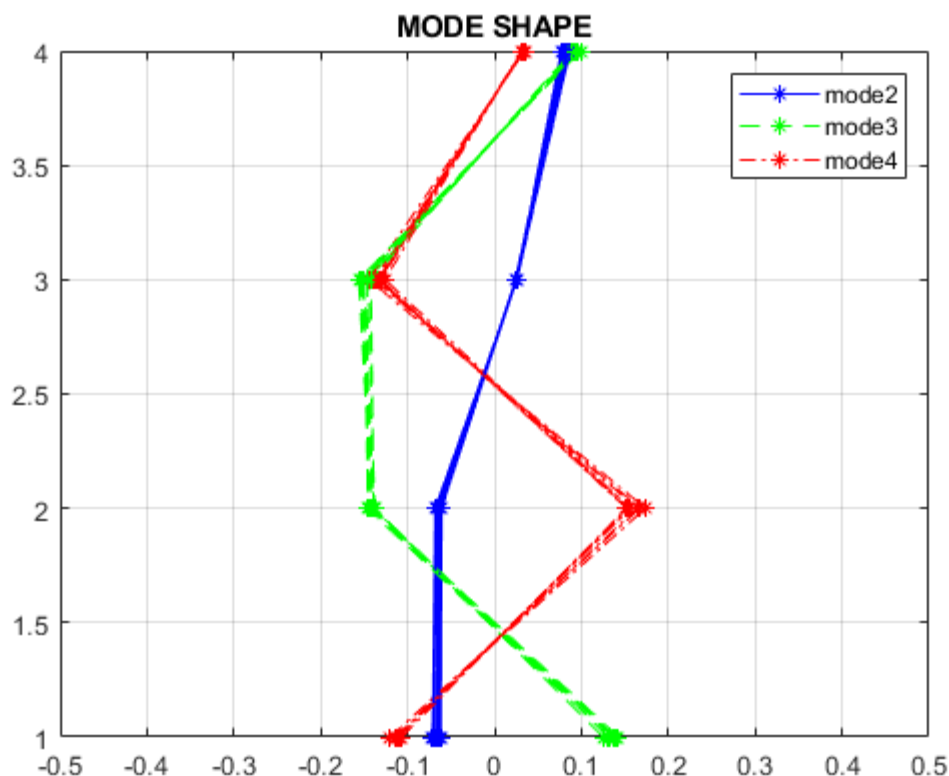
جدول ۵-۶: جدول حالت های آزمایش

Table 2: Data labels for structural state conditions.

Label	State condition	Data samples (dataxxx)
State#01	Mass on the 1st floor	11 to 20
State#02	Mass at the base	21 to 30
State#08	Gap=0.13mm	160 to 169
State#09	Gap=0.10mm	170 to 179
State#10	Gap=0.05mm	180 to 189
State#11	Gap=0.15mm	190 to 199
State#12	Gap=0.20mm	200 to 209
State#13	Baseline condition	210 to 219
State#14	Gap=0.20mm + mass on the 1st floor	220 to 229
State#15	Gap=0.10mm + mass on the 1st floor	230 to 239
State#16	Gap=0.20mm + mass at the base	240 to 249
State#17	Column: 1BD – 50% stiffness reduction	251 to 260
State#18	Column: 1AD + 1BD – 50% stiffness reduction	261 to 270
State#21	Column: 3BD – 50% stiffness reduction	291 to 300
State#22	Column: 3AD + 3BD – 50% stiffness reduction	302 to 311
State#23	Column: 2AD + 2BD – 50% stiffness reduction	312 to 321
State#24	Column: 2BD – 50% stiffness reduction	322 to 331

لازم به ذکر است جهت بررسی توانایی الگوریتم پیشنهادی در تشخیص خرابی، برای نمونه از حالت‌های خرابی ۱۸ state, ۲۲ state مندرج در جدول ۵-۶ استفاده کردیم.

همانطور که از جدول ۵-۶ مشاهده می‌شود ۲۲ state، دیتای سازه با ۵۰ درصد کاهش سختی ستون-های AD و BD در طبقه سوم که موقعیت آنها در شکل ۵-۱۷ مشخص است، می‌باشد.

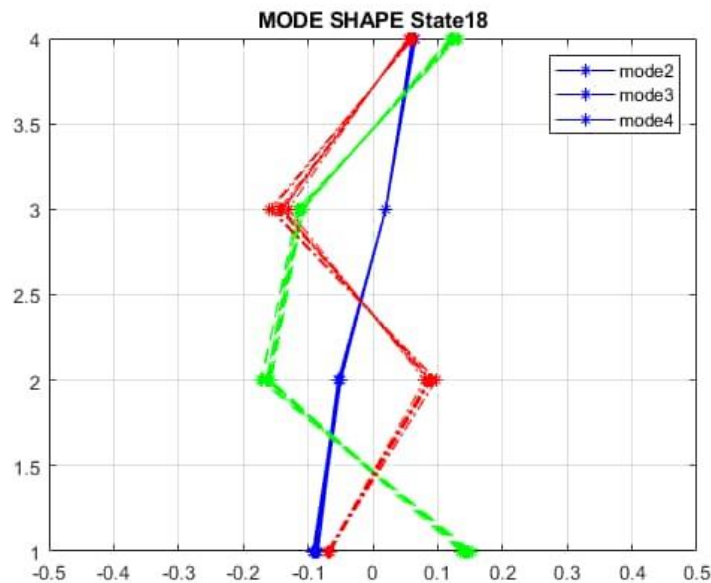


شکل ۵-۳۰: شکل مودی مودهای دوم تا چهارم بدست آمده از الگوریتم در حالت ۲۲state

با مقایسه‌ی این شکل مودی با شکل مودی شکل ۵-۲۸ مشاهده می‌شود که مود شماره ۳ در طبقه سوم دچار تغییر زیادی شده است که این نشان دهنده‌ی تغییر سختی در این طبقه می‌باشد.

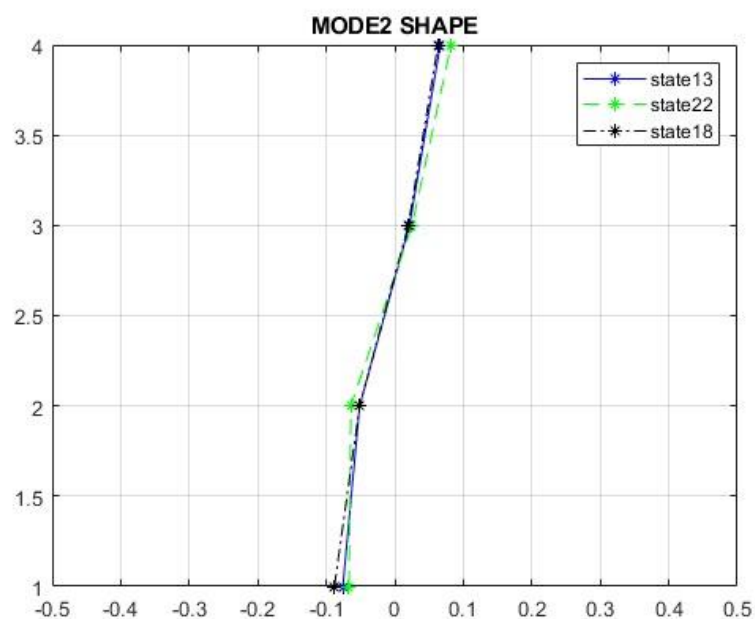
برای حالت ۱۸ state، دیتای سازه با ۵۰ درصد کاهش سختی ستون‌های AD و BD در طبقه اول می‌باشد و شکل مودی آن در شکل ۵-۳۱ ترسیم شده است.

با مقایسه این شکل مودی با شکل مودی شکل ۵-۲۸ مشاهده می‌شود که مود شماره ۳ در طبقه اول دچار تغییر زیادی شده است که این نشان دهنده‌ی تغییر سختی در این طبقه می‌باشد.

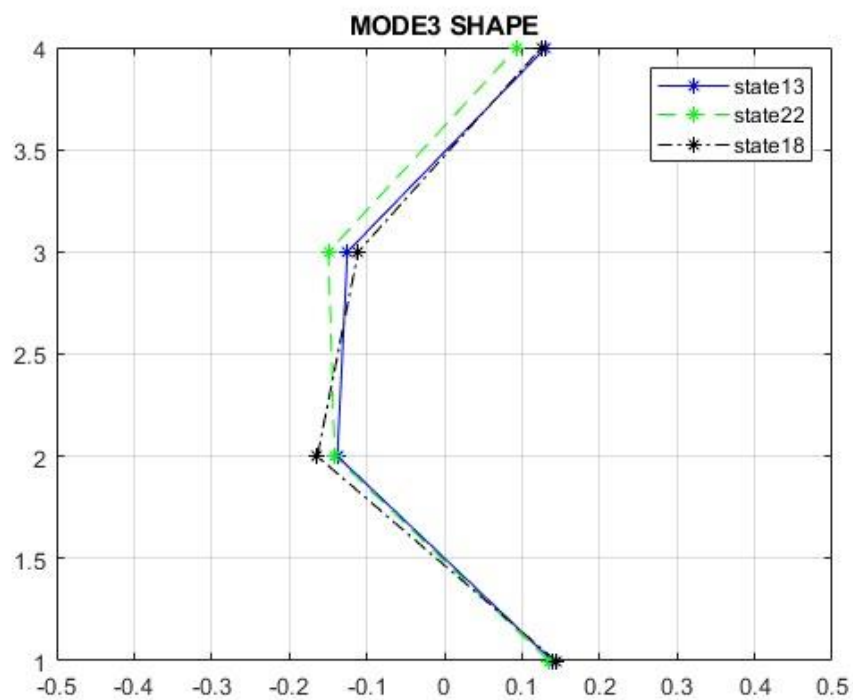


شکل ۵-۳۱: شکل مودی مودهای دوم تا چهارم بدست آمده از الگوریتم در حالت ۱۸state

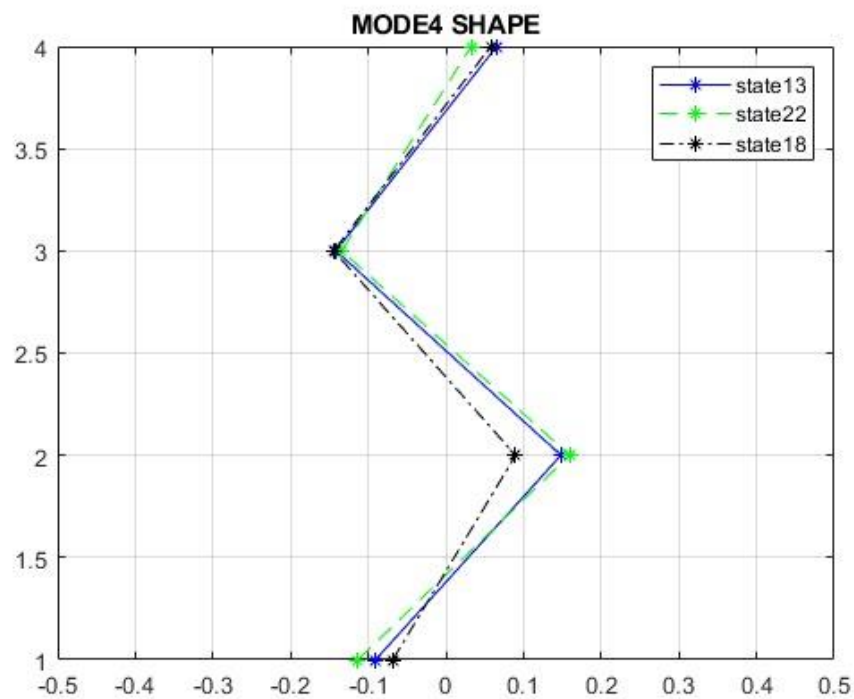
برای درک بهتر تغییرات مودهای ناشی از کاهش سختی، هر کدام از مودها را متناسب با حالت سالم برای هر دو حالت خرابی در نمودارهای زیر به صورت همزمان ترسیم شده و در شکل ۵-۳۲، شکل ۵-۳۳ و شکل ۵-۳۴ مقایسه شده است.



شکل ۵-۳۲: شکل مودی مود دوم در حالت های ۱۳state و ۱۸state و ۲۲state



شکل ۵-۳۳: شکل مودی مود سوم در حالت های state13 و state18 و state22



شکل ۵-۳۴: شکل مودی مود چهارم در حالت های state13 و state18 و state22

فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات

بررسی سلامت سازه‌ای از جمله مباحثی است که مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. دلیل این امر، افزایش ابعاد و تعداد سازه‌های مهندسی و همچنین نرخ رو به رشد خرابی در این سازه‌ها است. تشخیص خرابی در این سازه‌ها تنها با روش‌های قدیمی نظیر چکش اشمیت و اولتراسونیک میسر نمی‌باشد و به همین دلیل نیاز به روش‌های بررسی سلامت سازه‌ای می‌باشد. امروزه روش‌های بررسی سلامت سازه‌ای متعددی وجود دارد که می‌تواند این امر را میسر سازد تا سازه را به صورت پیوسته مورد پایش قرار دهد. از آنجا که داده‌ها و روش‌های استاتیکی نظیر مدلسازی المان محدود نسبت به تغییرات و خرابی‌ها حساس نیستند داده‌های دینامیکی (لرزه ای) بیشتر مورد توجه محققین بوده است.

روش‌های بر پایه‌ی ارتعاشات به قرار زیر است:

- روش‌های فرکانسی
 - روش‌های بر پایه‌ی شکل مود
 - روش‌های بر پایه‌ی تابع پاسخ فرکانسی
 - روش‌های بر پایه‌ی ویولت (تحلیل سری‌های زمانی)
- می‌دانیم روش‌های ابتدایی قدیمی‌تر بوده و نسبتاً پرهزینه می‌باشند و همچنین در حالت کلی شکل مود-های اول سازه به درد عیب‌یابی نمی‌خورند زیرا نسبت به خرابی حساس نیستند و در واقع می‌بایست به دنبال مودهایی باشیم که فرکانس آن‌ها به فرکانس بارگذاری نزدیک‌تر است.
- برای حل این مساله روشی را معرفی کردیم که علاوه بر کاهش هزینه به دلیل کاهش زمان پردازش و دقت بالا و قابل قبول خود، می‌تواند محل خرابی را تا حد خوبی شناسایی کند .

این الگوریتم به دلیل حذف داده‌های زمانی سیگنال اولیه، زمان سیگنال مورد پردازش را با درصد چشمگیری کاهش داده و پردازش را بر روی سیگنال جدید انجام می‌دهد. که این امر باعث کاهش زمان پردازش می‌شود.

برای مثال در آزمون دوم فصل شبیه سازی، شکل ۵-۱۸ سیگنال ورودی شتاب طبقات مستخرج شده از مقاله مورد نظر می باشد. همان طور که مشاهده می شود سیگنال ورودی دارای ۴۰ ثانیه طول زمان می باشد که با اعمال روش کاهش تصادفی و تبدیل آن به سیگنال خروجی RDT، سیگنال نهایی دارای ۰,۱۵ الی ۰,۲۵ طول زمان می باشد که متناسب با فرکانس این زمان برای سیگنال های مختلف متغیر است. در نتیجه ی این امر، کاهش زمان پردازش را شاهد خواهیم بود.

در ادامه از مقایسه نتایج و مشاهده شباهت شکل مودی بدست آمده با شکل مودی مندرج در مقاله، می توان به دقت بالای این روش در رسیدن به شکل مودی اشاره کرد.

همچنین در آخر با مقایسه اشکال مودی سازه ی مورد مطالعه بدست آمده توسط روش معرفی شده ی در مقاله، تحت خرابی مشخص اشکال مودی مربوط به سازه ی سالم و مشاهده ی تغییر در شکل مودی در همان موقعیت خرابی مندرج در مقاله می باشد، می توان نتیجه گرفت استفاده از این روش جهت تشخیص خرابی نیز کارآمد می باشد.

روش پیشنهادی به وضوح برای شناسایی خرابی از سرعت بالاتری نسبت به روش های مودال موجود برخوردار است و در پی آن تعریف یک محدوده، برای دسته بندی سازه تحت عنوان سالم یا آسیب دیده، بسیار آسان خواهد بود.

در این روش از دو پارامتر حد آستانه و زیربازه ی زمانی استفاده شده است که تا حدود زیادی دقت این الگوریتم به انتخاب درست این دو می باشد. در اینجا مقدار حد آستانه با استفاده از نتایج پیشینیان برابر با مقدار $\sigma \sqrt{2}$ می باشد که در آن σ واریانس داده های ورودی سیگنال اولیه است و زیربازه زمانی برابر با تقریباً ۴ برابر دوره تناوب کمترین فرکانس مشخصه گرفته شده است تا بتوان میرایی را با دقت خوبی تخمین زد. اما این مقادیر در این پایان نامه به صورت دستی وارد شده اند.

به عنوان پیشنهاد جهت استفاده از این روش در تحقیقات آینده می توان به تشخیص یک الگوریتم جهت انتخاب بهینه دو پارامتر حد آستانه و زیربازه‌ی زمانی اشاره کرد.

با توجه ضعف عملکرد الگوریتم RDT در تمییز دادن سیگنال‌های حاوی دیتاهای باارزش با فرکانس‌های بسیار پایین نزدیک به نویز و حذف آنها، به عنوان پیشنهاد می توان الگوریتم معرفی شده را بسط و توسعه داد به طوری که این ضعف جبران شود.

فصل هفتم: منابع و مآخذ

- [۱] Khoshnoudian, F., and A. Esfandiari. "Structural damage diagnosis using modal data." *Scientia Iranica* ۱۸,۴ (۲۰۱۱): ۸۵۳-۸۶۰.
- [۲] Doebling, Scott W., et al. Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review. No. LA-۱۳۰۷۰-MS. Los Alamos National Lab., NM (United States), ۱۹۹۶.
- [۳] Balageas, Daniel L. "Non-Destructive Evaluation of Cooperative Structures (NDECS): A Third Way?." (۲۰۰۶).
- [۴] Giurgiutiu, Victor, et al. "Active sensors for health monitoring of aging aerospace structures." *Smart Structures and Materials ۲۰۰۰: Smart Structures and Integrated Systems*. Vol. ۳۹۸۵. International Society for Optics and Photonics, ۲۰۰۰.
- [۶]
- طلایی، سعید، پایان نامه‌ی ارشد گرایش سازه، "کاربرد روش اندیس خسارت برای تعیین پایش سلامت سازه"، دانشگاه صنعتی امیر کبیر ۱۳۹۳.
- [۷] Ghee Koh, Chan, Lin Ming See, and Thambirajah Balendra. "Damage detection of buildings: numerical and experimental studies." *Journal of structural engineering* ۱۲۱,۸ (۱۹۹۵): ۱۱۵۵-۱۱۶۰.
- [۸] Rytter, Anders. Vibrational based inspection of civil engineering structures. Diss. Dept. of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, ۱۹۹۳.
- [۹] Lam, H. F. "Detection of damage location based on sensitivity and experimental modal analysis." MPH dissertation, Hong Kong Polytech. Univ., Hong Kong (۱۹۹۴).
- [۱۰] Viero, Paula F., and Ney Roitman. "Application of some damage identification methods in offshore platforms." *Marine Structures* ۱۲,۲ (۱۹۹۹): ۱۰۷-۱۲۶.
- [۱۱] Mousavi Nejad Souq, Seyyed Sajad, and Gholam Hossein Baradaran. "Crack detection in frame Structures with regard to changes in natural frequencies by using finite element method and ACOR." *Modares Mechanical Engineering* ۱۵,۸ (۲۰۱۵): ۵۱-۵۸.
- [۱۲] Fayyadh, Moatasem M., and H. Abdul Razak. "Condition assessment of elastic bearing supports using vibration data." *Construction and Building Materials* ۳۰ (۲۰۱۲): ۶۱۶-۶۲۸.
- [۱۳] Yam, L. H., Y. Y. Li, and W. O. Wong. "Sensitivity studies of parameters for damage detection of plate-like structures using static and dynamic approaches." *Engineering structures* ۲۴,۱۱ (۲۰۰۲): ۱۴۶۵-۱۴۷۵.
- [۱۴] Li, Y. Y., et al. "Identification of damage locations for plate-like structures using damage sensitive indices: strain modal approach." *Computers & structures* ۸۰,۲۵ (۲۰۰۲): ۱۸۸۱-۱۸۹۴.

- [۱۵] Stubbs, Norris, and Jeong-Tae Kim. "Damage localization in structures without baseline modal parameters." *AIAA journal* ۳۴,۸ (۱۹۹۶): ۱۶۴۴-۱۶۴۹.
- [۱۶] Nobahari, Mehdi, and Seyed Mohammad Seyedpoor. "An efficient method for structural damage localization based on the concepts of flexibility matrix and strain energy of a structure." *Structural Engineering and Mechanics* ۴۶,۲ (۲۰۱۳): ۲۳۱-۲۴۴.
- [۱۷] Ricles, J. M., and J. B. Kosmatka. "Damage detection in elastic structures using vibratory residual forces and weighted sensitivity." *AIAA journal* ۳۰,۹ (۱۹۹۲): ۲۳۱۰-۲۳۱۶.
- [۱۸] Allemang, Randall J., and David L. Brown. "A correlation coefficient for modal vector analysis." *Proceedings of the ۱st international modal analysis conference*. Vol. ۱. SEM Orlando, ۱۹۸۲.
- [۱۹] Pothisiri, T., and K. D. Hjelmstad. "Structural damage detection and assessment from modal response." *Journal of engineering mechanics* ۱۲۹,۲ (۲۰۰۳): ۱۳۵-۱۴۵.
- [۲۰] Escobar, J. Alberto, J. Jesús Sosa, and Roberto Gómez. "Structural damage detection using the transformation matrix." *Computers & structures* ۸۳,۴-۵ (۲۰۰۵): ۳۵۷-۳۶۸.
- [۲۱] Huynh, D., J. He, and Danh Tran. "Damage location vector: A non-destructive structural damage detection technique." *Computers & Structures* ۸۳,۲۸-۳۰ (۲۰۰۵): ۲۳۵۳-۲۳۶۷.
- [۲۲] Sahoo, Bishweswar, and Damodar Maity. "Damage assessment of structures using hybrid neuro-genetic algorithm." *Applied Soft Computing* ۷,۱ (۲۰۰۷): ۸۹-۱۰۴.
- [۲۳] Ding, Z. H., et al. "Structural damage detection based on residual force vector and imperialist competitive algorithm." *Structural Engineering and Mechanics* ۶۲,۶ (۲۰۱۷): ۷۰۹-۷۱۷.
- [۲۴] Pandey, A. K., M. Biswas, and M. M. Samman. "Damage detection from changes in curvature mode shapes." *Journal of sound and vibration* ۱۴۵,۲ (۱۹۹۱): ۳۲۱-۳۳۲.
- [۲۵] Kim, Jeong-Tae, et al. "Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method." *Engineering structures* ۲۵,۱ (۲۰۰۳): ۵۷-۶۷.
- [۲۶] Wahab, MM Abdel, and Guido De Roeck. "Damage detection in bridges using modal curvatures: application to a real damage scenario." *Journal of Sound and vibration* ۲۲۶,۲ (۱۹۹۹): ۲۱۷-۲۳۵.
- [۲۷] Toyosaki, Y., et al. "Identification of damage to beam structures using modal data." *Proceedings of the ۱۵th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal, September. ۲۰۱۲.
- [۲۸] Jafarkhani, Reza. *Studies Into Vibration-Signature-Based Methods for System Identification, Damage Detection and Health Monitoring of Civil Infrastructures*. University of Southern California, ۲۰۱۳.
- [۲۹] Cao, Maosen, et al. "Identification of multiple damage in beams based on robust curvature mode shapes." *Mechanical Systems and Signal Processing* ۴۶,۲ (۲۰۱۴): ۴۶۸-۴۸۰.

- [۳۰] Grande, E., and M. Imbimbo. "A multi-stage approach for damage detection in structural systems based on flexibility." *Mechanical Systems and Signal Processing* ۷۶ (۲۰۱۶): ۴۵۵-۴۷۵.
- [۳۱] Cao, Maosen, et al. "Sensitivity of fundamental mode shape and static deflection for damage identification in cantilever beams." *Mechanical Systems and Signal Processing* ۲۵,۲ (۲۰۱۱): ۶۳۰-۶۴۳.
- [۳۲] E. D'Amore, S. Trovat.; "Experimental Analysis for Identification of Bridge Structure Damage using Operational Modal Analysis Based Methods"; ۱۵ th world conference in Earthquake Engineering ۲۰۱۲.
- [۳۳] Furukawa, Aiko, Takuya Matsuo, and Koji Nishikawa. "A Study on Damage Detection of the Steel Truss Bridge Based on the Spectral Element Method using High Frequency Excitation." *JSCSE* ۶۸,۴ (۲۰۱۲): I_۵۲۳-I_۵۳۲.
- [۳۴] DeVore, Charles Edward. *Damage detection using substructure identification*. University of Southern California, ۲۰۱۳.
- [۳۵] Heckman, Vanessa Mary. *Damage detection in civil structures using high-frequency seismograms*. Diss. California Institute of Technology, ۲۰۱۴.
- [۳۶] Gerbo, Evan Jamison. "Structural Damage Detection Utilizing Experimental Mode Shapes." (۲۰۱۴).
- [۳۷] Lee, Eun-Taik, and Hee-Chang Eun. "Damage identification of a frame structure model based on the response variation depending on additional mass." *Engineering with Computers* ۳۱,۴ (۲۰۱۵): ۷۳۷-۷۴۷.
- [۳۸] Cole, H. A.: "On-the-line Analysis of Random Vibrations", AIAA Paper No.۶۸- ۲۸۸, ۱۹۶۸.
- [۳۹] Cole, H. A.: "On-line Failure Detection and Damping Measurements of Aerospace Structures by Random Decrement Signature", NASA CR-۲۲۰۵, ۱۹۷۳.
- [۴۰] Ibrahim, S. R. and Mikulcik, E. C.: "A Method for the Direct Identification of Vibration Parameters from the Free Response", *The Shock and Vibration Bulletin*, Vol. ۴۷, N. ۴, p. ۱۸۳-۱۹۸, ۱۹۷۷.
- [۴۱] Juang, J.-N. and Pappa, R. S.: "An Eigensystem Realization Algorithm for Modal Parameter Identification and Model Reduction", *AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. ۸, N. ۴, p. ۶۲۰-۶۲۷, ۱۹۸۵.
- [۴۲] Peeters, B.: "System Identification and Damage Detection in Civil Engineering", PhD Thesis, K. U. Leuven, Belgium, ۲۰۰۰.
- [۴۳] Brincker, R., Jensen, J. L. and Krenk, S.: "Spectral Estimation by the Random Decrement Technique", ۹th International Conference on Experimental Mechanics, Copenhagen, Denmark, ۱۹۹۰.
- [۴۴] Asmussen, J. C. and Brincker, R.: "Estimation of Frequency Response Functions by Random Decrement", IMAC XIV, Dearborn, USA, ۱۹۹۶.

- [۴۵] Zhang, L.: "On the Two-Stage Time Domain Modal Identification", IMAC XXI, Kissimmee, USA, ۲۰۰۳.
- [۴۶] Elshafey, Ahmed A., Mahmoud R. Haddara, and H. Marzouk. "Dynamic response of offshore jacket structures under random loads." *Marine Structures* ۲۲,۳ (۲۰۰۹): ۵۰۴-۵۲۱.
- [۴۷] Asmussen, J. C.: "Modal Analysis Based on the Random Decrement Technique – Application to Civil Engineering Structures", PhD Thesis, University of Aalborg, Denmark, ۱۹۹۷.
- [۴۸] Brincker, Rune, and J. Rodrigues. "Application of the random decrement technique in operational modal analysis." *Proceedings of the ۱st International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC)*, Aalborg Universitet, Aalborg, Denmark. ۲۰۰۵.
- [۴۹] Johnson, Erik A., et al. "Phase I IASC-ASCE structural health monitoring benchmark problem using simulated data." *Journal of engineering mechanics* ۱۳۰,۱ (۲۰۰۴): ۱۵-۳.
- [۵۰] Sun, Hao, and Oral Büyüköztürk. "The MIT Green Building benchmark problem for structural health monitoring of tall buildings." *Structural Control and Health Monitoring* ۲۵,۳ (۲۰۱۸): e۲۱۱۵
- [۵۱] Figueiredo, Eloi, et al. *Structural health monitoring algorithm comparisons using standard data sets*. No. LA-۱۴۳۹۳. Los Alamos National Lab.(LANL), Los Alamos, NM (United States), ۲۰۰۹

فصل هشتم: پیوست

قسمتی از کد متلب در خصوص توابع مرتبط با استخراج شکل مودی با استفاده از مشخصات سازه آورده شده است.

تابع جهت محاسبه ی شکل مودی به صورت تئوری:

```
function Result=MDOF_simulation(M,C,K,f,fs)
if size(f,1)>size(f,2)
    f=f';
end
n=size(f,1);
dt=1/fs; %sampling rate
[Vectors Values]=eig(K,M);
Freq=sqrt(diag(Values))/(2*pi); % undamped natural frequency
steps=size(f,2);
Mn=diag(Vectors'*M*Vectors); % uncoupled mass
Cn=diag(Vectors'*C*Vectors); % uncoupled damping
Kn=diag(Vectors'*K*Vectors); % uncoupled stiffness
wn=sqrt(diag(Values));
zeta=Cn./(sqrt(2.*Mn.*Kn)); % damping ratio
wd=wn.*sqrt(1-zeta.^2);
fn=Vectors'*f; % generalized input force matrix
t=[0:dt:dt*steps-dt];
%forced vibration
for i=1:n
    h(i,:)=(1/(Mn(i)*wd(i))).*exp(-zeta(i)*wn(i)*t).*sin(wd(i)*t); %transfer function of displacement
    hd(i,:)=(1/(Mn(i)*wd(i))).*(-zeta(i).*wn(i).*exp(-zeta(i)*wn(i)*t).*sin(wd(i)*t)+wd(i).*exp(-zeta(i)*wn(i)*t).*cos(wd(i)*t)); %transfer function of velocity
    hdd(i,:)=(1/(Mn(i)*wd(i))).*((zeta(i).*wn(i))^2.*exp(-zeta(i)*wn(i)*t).*sin(wd(i)*t)-zeta(i).*wn(i).*wd(i).*exp(-zeta(i)*wn(i)*t).*cos(wd(i)*t)-wd(i).*(zeta(i).*wn(i)).*exp(-zeta(i)*wn(i)*t).*cos(wd(i)*t))-wd(i)^2.*exp(-zeta(i)*wn(i)*t).*sin(wd(i)*t)); %transfer function of acceleration
    qq=conv(fn(i,:),h(i,:))*dt;
    qqd=conv(fn(i,:),hd(i,:))*dt;
    qqdd=conv(fn(i,:),hdd(i,:))*dt;
    q(i,:)=qq(1:steps); % modal displacement
    qd(i,:)=qqd(1:steps); % modal velocity
    qdd(i,:)=qqdd(1:steps); % modal acceleration
end
x=Vectors*q; %displacement
v=Vectors*qd; %velocity
a=Vectors*qdd; %acceleration
```

```

% Free vibration
xi=zeros(n,1); % displacement initial condition
vi=zeros(n,1); % velocity initial condition
xno=Vectors'*M*xi./Mn;
vno=Vectors'*M*vi./Mn;
for i=1:n
AA=(vno(i)+xno(i).*zeta(i).*wn(i))./wd(i);
BB=xno(i);
qf(i,:)=exp(-zeta(i)*wn(i)*t).*(AA.*sin(wd(i)*t)+BB.*cos(wd(i)*t));
qdf(i,:)=wd(i)*exp(-zeta(i)*wn(i)*t).*(AA.*cos(wd(i)*t)-BB.*sin(wd(i)*t))-
zeta(i).*wn(i).*exp(-zeta(i)*wn(i)*t).*(AA.*sin(wd(i)*t)+BB.*cos(wd(i)*t));
qddf(i,:)=wd(i)^2*exp(-zeta(i)*wn(i)*t).*(-AA.*sin(wd(i)*t)-BB.*cos(wd(i)*t))-
2*zeta(i).*wn(i).*wd(i).*exp(-zeta(i)*wn(i)*t).*(AA.*cos(wd(i)*t)-
BB.*sin(wd(i)*t))+zeta(i)^2.*wn(i)^2*exp(-zeta(i)*wn(i)*t).*(-AA.*sin(wd(i)*t)-
BB.*cos(wd(i)*t));
end
x=x+Vectors*qf;
v=v+Vectors*qdf;
a=a+Vectors*qddf;
Result.Displacement=x;
Result.Velocity=v;
Result.Acceleration=a;
Result.Parameters.Freq=Freq;
Result.Parameters.DampRatio=zeta;
Result.Parameters.ModeShape=Vectors;
End

```

تابع RDT :

```

function [IRF1,IRF2,IRF3,t1,t2,t3] = RDT(y,ys,T,dt)

% [IRF] = RDT(y,ys,T,dt) returns the impulse response function (IRF) by
% using the random decrement technique (RDT) to the time serie y, with a
% triggering value ys, and for a duration T
% INPUT:
% y: time series of ambient vibrations: vector of size [n×N]
% dt : Time step
% ys: triggering values (ys < max(abs(y)) and here ys=1.41*std(y))
% T: Duration of subsegments (T<dt*(numel(y)-1))
% OUTPUT:
% IRF: impusle response function
% t: time vector asociated to IRF

```

```

if T>=dt*(numel(y(1,:))-1),
    error('Error: subsegment length is too large');
else
    % number of time step per block
    nT = round(T/dt); % sec
end
if ys==.,
    error('Error: ys must be different from zero')
elseif or(ys >=max(y(1,:)),ys <=min(y(1,:))|or(ys >=max(y(2,:)),ys
<=min(y(2,:))|or(ys >=max(y(3,:)),ys <=min(y(3,:))),
    error('Error: ys must verify : min(y) < ys < max(y)')
else
    % find triggering value
    ind11(1,:)=find(diff(y(1,1:end-nT)>ys(1,1))~=.)+1;
    ind22(1,:)=find(diff(y(2,1:end-nT)>ys(2,1))~=.)+1;
    ind33(1,:)=find(diff(y(3,1:end-nT)>ys(3,1))~=.)+1;
end
% construction of decay vibration D11
IRF11 = zeros(numel(ind11),nT);
for ii=1:numel(ind11),
    IRF11(ii,:)=y(1,ind11(ii):ind11(ii)+nT-1);
end
% construction of decay vibration D22
IRF22 = zeros(numel(ind22),nT);
for ii=1:numel(ind22),
    IRF22(ii,:)=y(2,ind22(ii):ind22(ii)+nT-1);
end
% construction of decay vibration D33
IRF33 = zeros(numel(ind33),nT);
for ii=1:numel(ind33),
    IRF33(ii,:)=y(3,ind33(ii):ind33(ii)+nT-1);
end
% averaging to remove the random part
IRF11 = mean(IRF11);
IRF22 = mean(IRF22);
IRF33 = mean(IRF33);
% normalize the IRF

```

```

%IRF11 = IRF11./IRF11(1);
%IRF22 = IRF22./IRF22(1);
% time vector corresponding to the IRF
t11 = linspace(0,T,numel(IRF11));
t22 = linspace(0,T,numel(IRF22));
t33 = linspace(0,T,numel(IRF33));
end

```

آزمون اول در فصل صحت‌سنجی، نحوه‌ی تعریف یک سازه سه طبقه و محاسبه پاسخ تصادفی و اشکال مودی از روی ماتریس‌ها به صورت تئوری:

```

clear all;
close all;
clc;
%Inputs
M=[5000;0.300;0.030];
C=10*[0.00;0.2,-1;0,-1.2];
K=4000*[3,-1.0;-1.3,-1;0,-1.1];
sd=29;% subsegment duration
N = sd*50*300; % number of time step
t = linspace(0,sd*50,N); % time
dt = median(diff(t)); % time step
fs = 1/dt;
% A white noise is used as an input
f= 5.*randn(3,N);
[x]=MDOF_simulation(M,C,K,f,fs);
figure
subplot(311)
plot(t,x.Acceleration(1,:));
xlabel('time (s)')
ylabel('Acceleration')
title('Acceleration-first-level')
subplot(312)
plot(t,x.Acceleration(2,:));
xlabel('time (s)')
ylabel('Acceleration')
title('Acceleration-second-level')
subplot(313)

```

```

plot(t,x.Acceleration(۳,:));
xlabel('time (s)')
ylabel('Acceleration')
title('Acceleration-third-level')

Frequency=x.Parameters.Freq;
Dampingratio=x.Parameters.DampRatio;
modeshape=x.Parameters.ModeShape;

fprintf('***** \n')
fprintf(['Frequencies are
',num2str(Frequency(۱)),',',num2str(Frequency(۲)),',',num2str(Frequency(۳)), ' Hz', '
\n']);
fprintf('***** \n')
fprintf(['Damping ratios are
',num2str(Dampingratio(۱)),',',num2str(Dampingratio(۲)),',',num2str(Dampingratio(۳)), '
\n']);
fprintf('***** \n')
fprintf(['modeshapes are
',num2str(modeshape(۱,۱)/modeshape(۱,۱)),',',num2str(modeshape(۲,۱)/modeshape(۱,۱)),',',num2str(
modeshape(۳,۱)/modeshape(۱,۱)), ' \n']);

fprintf(['
',num2str(modeshape(۱,۲)/modeshape(۱,۲)),',',num2str(modeshape(۲,۲)/modeshape(۱,۲)),',',num2str(
modeshape(۳,۲)/modeshape(۱,۲)), ' \n']);

fprintf(['
',num2str(modeshape(۱,۳)/modeshape(۱,۳)),',',num2str(modeshape(۲,۳)/modeshape(۱,۳)),',',num2str(
modeshape(۳,۳)/modeshape(۱,۳)), ' \n']);

fprintf('***** \n')
%%
figure
ft_spect(x.Acceleration(۱,:),dt,'ap','red','.', 'deg')
figure
ft_spect(x.Acceleration(۲,:),dt,'ap','red','.', 'deg')
figure
ft_spect(x.Acceleration(۳,:),dt,'ap','red','.', 'deg')

```

آزمون اول در فصل صحت‌سنجی، فیلتر و اعمال RDT و محاسبه میرایی و دامنه هر فرکانس از روی RDT و محاسبه مقادیر شکل مودی حاصل از آن:

```

Acceleration_filter۱=bandpass(x.Acceleration(۱,:),[۱
۵],fs,'stopbandAttenuation',۸۰,'Steepness',۰.۷);

Acceleration_filter۲=bandpass(x.Acceleration(۱,:),[۶
۸],fs,'stopbandAttenuation',۸۰,'Steepness',۰.۷);

Acceleration_filter۳=bandpass(x.Acceleration(۱,:),[۱۱
۲۰],fs,'stopbandAttenuation',۷۰,'Steepness',۰.۷);

figure
subplot(۳۱۱)
hold on; box on;

```

```

plot(t,Acceleration_filter\1,'b');
xlabel('time (s)')
ylabel('Acceleration')
title('Acceleration-first-level-first-frq')
subplot(3\2)

plot(t,Acceleration_filter\2,'b');
xlabel('time (s)')
ylabel('Acceleration')
title('Acceleration-first-level-second-frq')
subplot(3\3)

plot(t,Acceleration_filter\3,'b');
xlabel('time (s)')
ylabel('Acceleration')
title('Acceleration-first-level-third-frq')
figure
ft_spect(Acceleration_filter\1,dt,'a','red',.,'deg');
figure
ft_spect(Acceleration_filter\2,dt,'a','red',.,'deg');
figure
ft_spect(Acceleration_filter\3,dt,'a','red',.,'deg');
% subsegment duration
Ts = round(t(end)/sd);
nT = round(Ts/dt);
% triggering value
xs(1,1) = 1.4*std(Acceleration_filter\1);
xs(2,1) = 1.4*std(Acceleration_filter\2);
xs(3,1) = 1.4*std(Acceleration_filter\3);
Acceleration_filter=[Acceleration_filter\1;Acceleration_filter\2;Acceleration_filter\3];
% RDT function
[IRF\1,IRF\2,IRF\3,newT\1,newT\2,newT\3] = RDT(Acceleration_filter,xs,Ts,dt);
%
TF\1=islocalmax(IRF\1);
TF\2=islocalmax(IRF\2);
TF\3=islocalmax(IRF\3);
figure
subplot(3\1)
hold on; box on;
plot(newT\1,IRF\1,'b',newT\1(TF\1),IRF\1(TF\1),'r*');
xlabel('time (s)')
ylabel('Acceleration')
title('RDT-first-level-first-frq')

```

```

xlim([0 Δ]);
subplot(312)
plot(newT12, IRF12, 'b', newT12(TF12), IRF12(TF12), 'r*');
xlabel('time (s)')
ylabel('Acceleration')
title('RDT-first-level-second-frq')
xlim([0 Δ]);
subplot(313)
plot(newT13, IRF13, 'b', newT13(TF13), IRF13(TF13), 'r*');
xlabel('time (s)')
ylabel('Acceleration')
title('RDT-first-level-third-frq')
xlim([0 Δ]);
%figure
%ft_spect(IRF11,dt,'ap','red',., 'deg')
%figure
%ft_spect(IRF12,dt,'ap','red',., 'deg')
%figure
%ft_spect(IRF13,dt,'ap','red',., 'deg')

%%
%%
aa11=IRF11(TF11);
a11=log(aa11(1)/aa11(20))*(1/(2*pi*29));
F1=4.1384;
F2=7.3591;
F3=11.626;

syms am11 q11
eqns=[am11*exp(-a11*F1*2*pi*dt).*cos(2*pi*F1*dt+q11)==IRF11(1),...
      am11*exp(-
a11*F1*2*pi*find(IRF11==aa11(20))*dt).*cos(2*pi*F1*find(IRF11==aa11(20))*dt+q11)==aa11(20)];
S11 = solve(eqns,[am11 q11]);
am111=vpa(S11.am11);
q111=vpa(S11.q11);
am1111=am111(1)*cos(q111(1));
%q1111=q111(2);
%am11111=
%%
aa12=IRF12(TF12);

```

```

a12=log(aa12(1)/aa12(2.0))*(1/(2*pi*19));

F1=4,1384;

F2=7,3591;

F3=11,1626;

syms am12 q12

eqns=[am12*exp(-a12*F2*2*pi*dt).*cos(2*pi*F2*dt+q12)==IRF12(1),...

      am12*exp(-
a12*F2*2*pi*find(IRF12==aa12(2.0))*dt).*cos(2*pi*F2*find(IRF12==aa12(2.0))*dt+q12)==aa12(2.0)];

S12 = solve(eqns,[am12 q12]);

am121=vpa(S12.am12);

q121=vpa(S12.q12);

am1211=am121(1)*cos(q121(1));

%q1211=q121(1);

%%

aa13=IRF13(TF13);

a13=log(aa13(1)/aa13(2.0))*(1/(2*pi*19));

F1=4,1384;

F2=7,3591;

F3=11,1626;

syms am13 q13

eqns=[am13*exp(-a13*F3*2*pi*dt).*cos(2*pi*F3*dt+q13)==IRF13(1),...

      am13*exp(-
a13*F3*2*pi*find(IRF13==aa13(2.0))*dt).*cos(2*pi*F3*find(IRF13==aa13(2.0))*dt+q13)==aa13(2.0)];

S13 = solve(eqns,[am13 q13]);

am131=vpa(S13.am13);

q131=vpa(S13.q13);

am1311=am131(1)*cos(q131(1));

%q1311=q131(1);

mod1=[modeshape(1.1)/modeshape(1,1),modeshape(2.1)/modeshape(1.1),modeshape(3.1)/modeshape(1.1)];

mod2=[modeshape(1.2)/modeshape(1.2),modeshape(2.2)/modeshape(1.2),modeshape(3.2)/modeshape(1.2)];

mod3=[modeshape(1.3)/modeshape(1.3),modeshape(2.3)/modeshape(1.3),modeshape(3.3)/modeshape(1,3)];

mod11=[am1111/am1111,am2111/am1111,am3111/am1111];

mod22=[am1211/am1211,am2211/am1211,am3211/am1211];

mod33=[am1311/am1311,am2311/am1311,am3311/am1311];

```

.....

آزمون دوم در فصل صحت‌سنجی، تعریف یک تیر دو سر مفصل و محاسبه مشخصات سیستم از قبیل جابجایی، سرعت و شتاب هر طبقه، فرکانس، ضریب میرایی و شکل مودی:

```

b=0.1;

h=0.005;

m=7800*b*h;      %ro*b*h   (kg/m)

I=(b*h^3)/12;      % (b*h^3)/12   (m^4)

E=2*(10^11);      %N/m^2

L=1.2;            %m

n=50;

l=L/n;

eksay=0.05;

sd=17;

%% System matrices
%assembly mass matrix(Kb)
%-----

for i=1:n

    if(i==1)

        Mb(:,i)=0;

    end

    mb=(m*l/420)*[156 22*l 54 -13*l; 22*l 4*(1^2) 13*l -3*(1^2); 54 13*l 156 -22*l; -13*l -3*(1^2)
-22*l 4*(1^2)];

    Mb=Mb+horzcat(zeros((2*n+2),(2*i-2)), vertcat(zeros((2*i-2),4), mb, zeros((2*n-
2*i),4)), zeros((2*n+2),(2*n-2*i)));

end

Mb(1,:)=[];

Mb(:,1)=[];

Mb(end-1,:)=[];

Mb(:,end-1)=[];

Mb=Mb;

%assembly stiffness matrix(Kb)
%-----

for i=1:n

    if(i==1)

        Kb(:,i)=0;

    end

    kb=((2*E*I)/(1^3))*[6 3*l -6 3*l; 3*l 2*(1^2) -3*l 1^2; -6 -3*l 6 -3*l; 3*l 1^2 -3*l
2*(1^2)];

    Kb=Kb+horzcat(zeros((2*n+2),(2*i-2)), vertcat(zeros((2*i-2),4), kb, zeros((2*n-
2*i),4)), zeros((2*n+2),(2*n-2*i)));

```

```

end
Kb\(\, :) = [];
Kb\(:, \) = [];
Kb\ (end-\, :) = [];
Kb\(:, end-\) = [];
Kb=Kb\;

%assembly damping matrix(Cb)
%-----
omegai=(pi^2)*sqrt((E*I)/(m*(L^4)));
omegaj=f*(pi^2)*sqrt((E*I)/(m*(L^4)));
a=(f*eksay*omegai*omegaj)/(omegaj+omegai);
b=(f*eksay)/(omegaj+omegai);
Cb=(a*Mb)+(b*Kb);

%%
fs=f...;
dt=1/fs;
t=0:(1/fs):1.5;
f= 5.*randn(f*n,length(t));
%%
%n=size(f,\);
dt=1/fs; %sampling rate
[Vectors Values]=eig(Kb,Mb);
Freq=sqrt(diag(Values))/(f*pi); % undamped natural frequency
steps=size(f,f);
Mn=diag(Vectors'*Mb*Vectors); % uncoupled mass
Cn=diag(Vectors'*Cb*Vectors); % uncoupled damping
Kn=diag(Vectors'*Kb*Vectors); % uncoupled stiffness
wn=sqrt(diag(Values));
%zeta=Cn./(sqrt(f.*Mn.*Kn)); % damping ratio
zeta= 0.05:0.05:(0.1+(f*n-1)*0.05); % damping ratio
%zeta=[0.05,0.1,0.15,0.2,0.25,0.3,0.35,0.4,0.45,0.5,0.55,0.6,0.65,0.7,0.75,0.8];
wd=wn.*sqrt(1-zeta.^2);
fn=Vectors'*f; % generalized input force matrix
%forced vibration
h=zeros(f*n,steps);
hd=zeros(f*n,steps);
hdd=zeros(f*n,steps);
for i=1:f*n
    h(i,:)=(1/(Mn(i)*wd(i)))*exp(-zeta(i)*wn(i)*t).*sin(wd(i)*t); %transfer function of
displacement

```

```

    hdd(i,:)=(1/(Mn(i)*wd(i)))*(-zeta(i).*wn(i).*exp(-
zeta(i).*wn(i)*t).*sin(wd(i)*t)+wd(i).*exp(-zeta(i).*wn(i)*t).*cos(wd(i)*t)); %transfer
function of velocity

    hdd(i,:)=(1/(Mn(i)*wd(i)))*((zeta(i).*wn(i))^2.*exp(-zeta(i).*wn(i)*t).*sin(wd(i)*t)-
zeta(i).*wn(i).*wd(i).*exp(-zeta(i).*wn(i)*t).*cos(wd(i)*t)-wd(i).*(zeta(i).*wn(i)).*exp(-
zeta(i).*wn(i)*t).*cos(wd(i)*t))-wd(i)^2.*exp(-zeta(i).*wn(i)*t).*sin(wd(i)*t)); %transfer
function of acceleration

    qq=conv(fn(i,:),h(i,:))*dt;
    qqd=conv(fn(i,:),hdd(i,:))*dt;
    qqdd=conv(fn(i,:),hdd(i,:))*dt;
    q(i,:)=qq(1:steps); % modal displacement
    qd(i,:)=qqd(1:steps); % modal velocity
    qdd(i,:)=qqdd(1:steps); % modal acceleration

end

x=Vectors*q; %displacement
v=Vectors*qd; %velocity
a=Vectors*qdd; %acceleration

% Free vibration
xi=zeros(2*n,1); % displacement initial condition
vi=zeros(2*n,1); % velocity initial condition
xno=Vectors'*Mb*xi./Mn;
vno=Vectors'*Mb*vi./Mn;
for i=1:2*n
    AA=(vno(i)+xno(i).*zeta(i).*wn(i))./wd(i);
    BB=xno(i);
    qf(i,:)=exp(-zeta(i).*wn(i)*t).*(AA.*sin(wd(i)*t)+BB.*cos(wd(i)*t));
    qdf(i,:)=wd(i).*exp(-zeta(i).*wn(i)*t).*(AA.*cos(wd(i)*t)-BB.*sin(wd(i)*t))-
zeta(i).*wn(i).*exp(-zeta(i).*wn(i)*t).*(AA.*sin(wd(i)*t)+BB.*cos(wd(i)*t));
    qddf(i,:)=wd(i)^2.*exp(-zeta(i).*wn(i)*t).*(-AA.*sin(wd(i)*t)-BB.*cos(wd(i)*t))-
2*zeta(i).*wn(i).*wd(i).*exp(-zeta(i).*wn(i)*t).*(AA.*cos(wd(i)*t)-
BB.*sin(wd(i)*t))+zeta(i)^2.*wn(i)^2.*exp(-zeta(i).*wn(i)*t).*(-AA.*sin(wd(i)*t)-
BB.*cos(wd(i)*t));
end

x=x+Vectors*qf;
v=v+Vectors*qdf;
a=a+Vectors*qddf;

%%
figure
plot([.;Vectors(2:2:end-1,1);.])
figure
plot([.;Vectors(2:2:end-1,2);.])
figure
plot([.;Vectors(2:2:end-1,3);.])
figure

```

```

plot([.:Vectors(۲:۲:end-۱,۴);.])
%%
figure
subplot(۳۱۱)
plot(t,x(۲,:));
xlabel('time (s)')
ylabel('Displacement')
title('Displacement-first-point')
subplot(۳۱۲)
plot(t,x(۴,:));
xlabel('time (s)')
ylabel('Displacement')
title('Displacement-second-point')
subplot(۳۱۳)
plot(t,x(۶,:));
xlabel('time (s)')
ylabel('Displacement')
title('Displacement-third-point')
%%
figure
ft_spect(x(۲,:),dt,'a','red',.,'deg')
figure
ft_spect(x(۴,:),dt,'a','red',.,'deg')
figure
ft_spect(x(۶,:),dt,'a','red',.,'deg')

```

آزمون دوم در فصل صحت‌سنجی، اعمال RDT بر روی تیر دو سر مفصل و محاسبه میرایی و دامنه هرمود فرکانسی از روی RDT:

```

F1=۷,۹۷۲۸;
F2=۳۱,۸۹۹۰;
F3=۷۱,۸۴۶۴;
n=۵۰;
sd=۱۷;
for i=۱:n
Displacement_filter۱=bandpass(x(۲*i,:),[۷ ۹],fs,'stopbandAttenuation',۸۰,'Steepness',.۷);
Displacement_filter۲=bandpass(x(۲*i,:),[۲۵ ۳۵],fs,'stopbandAttenuation',۸۰,'Steepness',.۷);
Displacement_filter۳=bandpass(x(۲*i,:),[۶۰ ۸۰],fs,'stopbandAttenuation',۷۰,'Steepness',.۷);
%figure
%ft_spect(Displacement_filter۱,dt,'ap','red',.,'deg');
%figure

```

```

%ft_spect(Displacement_filterᳵ,dt,'ap','red',.,'deg');

%figure
%ft_spect(Displacement_filterᳵ,dt,'ap','red',.,'deg');

%%
%RDT
% subsegment duration
Ts = round(t(end)/sd);
nT = round(Ts/dt);
% triggering value
xs(1,i) = 1,ᳵ1*std(Displacement_filter1);
xs(ᳵ,i) = 1,ᳵ1*std(Displacement_filterᳵ);
xs(ᳵ,i) = 1,ᳵ1*std(Displacement_filterᳵ);
Displacement_filter=[Displacement_filter1;Displacement_filterᳵ;Displacement_filterᳵ];
% RDT function
[IRF1,IRFᳵ,IRFᳵ,newT1,newTᳵ,newTᳵ] = RDT(Displacement_filter,xs(:,i),Ts,dt);

%
TF1=islocalmax(IRF1);
TFᳵ=islocalmax(IRFᳵ);
TFᳵ=islocalmax(IRFᳵ);
figure
subplot(ᳵ11)
hold on; box on;
plot(newT1,IRF1,'b',newT1(TF1),IRF1(TF1),'r*');
xlabel('time (s)')
ylabel('Displacement')
title('RDT-first-frq')
xlim([. ᳵ]);
subplot(ᳵ1ᳵ)
plot(newTᳵ,IRFᳵ,'b',newTᳵ(TFᳵ),IRFᳵ(TFᳵ),'r*');
xlabel('time (s)')
ylabel('Displacement')
title('RDT-second-frq')
xlim([. 1]);
subplot(ᳵ1ᳶ)
plot(newTᳶ,IRFᳶ,'b',newTᳶ(TFᳶ),IRFᳶ(TFᳶ),'r*');
xlabel('time (s)')
ylabel('Displacement')
title('RDT-third-frq')
xlim([. .ᳵ]);
%figure

```

```

%ft_spect(IRF\1,dt,'ap','red',.,'deg')

%figure

%ft_spect(IRF\2,dt,'ap','red',.,'deg')

%figure

%ft_spect(IRF\3,dt,'ap','red',.,'deg')

%%

aa1=IRF\1(TF1);

a1(i,1)=log(aa1(1)/aa1(20))*(1/(2*pi*29));

syms am1 q1

eqns=[am1*exp(-a1(i,1)*F1*2*pi*dt).*cos(2*pi*F1*dt+q1)==IRF\1(1),...

      am1*exp(-
a1(i,1)*F1*2*pi*find(IRF\==aa1(20))*dt).*cos(2*pi*F1*find(IRF\==aa1(20))*dt+q1)==aa1(20)];

S1 = solve(eqns,[am1 q1]);

am11=vpa(S1.am1);

q11=vpa(S1.q1);

am111(i,1)=am11(1)*cos(q11(1));

%q111=q11(2);

%ami111=

%%

aa2=IRF2(TF2);

a2(i,1)=log(aa2(1)/aa2(20))*(1/(2*pi*29));

syms am2 q2

eqns=[am2*exp(-a2(i,1)*F2*2*pi*dt).*cos(2*pi*F2*dt+q2)==IRF2(1),...

      am2*exp(-
a2(i,1)*F2*2*pi*find(IRF2==aa2(20))*dt).*cos(2*pi*F2*find(IRF2==aa2(20))*dt+q2)==aa2(20)];

S2 = solve(eqns,[am2 q2]);

am21=vpa(S2.am2);

q21=vpa(S2.q2);

am211(i,1)=am21(1)*cos(q21(1));

%q211=q21(1);

%%

aa3=IRF3(TF3);

a3(i,1)=log(aa3(1)/aa3(20))*(1/(2*pi*19));

syms am3 q3

eqns=[am3*exp(-a3(i,1)*F3*2*pi*dt).*cos(2*pi*F3*dt+q3)==IRF3(1),...

      am3*exp(-
a3(i,1)*F3*2*pi*find(IRF3==aa3(20))*dt).*cos(2*pi*F3*find(IRF3==aa3(20))*dt+q3)==aa3(20)];

S3 = solve(eqns,[am3 q3]);

am31=vpa(S3.am3);

```

```

q31=vpa(Sr.q3);
am311(i,1)=am31(1)*cos(q31(1));
%q1311=q131(1);

end

```

و محاسبه ی اشکال مودی حاصل از RDT :

```

%clear am311 am211 am111
close all;
clc;
figure
plot([. ; Vectors(2:2:end-1,1)/max(Vectors(2:2:end-1,1));.]);
figure
plot([. ; Vectors(2:2:end-1,2)/max(Vectors(2:2:end-1,2));.]);
figure
plot([. ; Vectors(2:2:end-1,3)/max(Vectors(2:2:end-1,3));.]);
%%
if(size(am111,2)==1)
am111=am111';
end
am111=double(am111);
%%
if(size(am211,2)==1)
am211=am211';
end
am211=double(am211);
am2min=islocalmin(am211);
am2mina=am211(am2min);
if(min(am311)>. )
am211(1,1:find(am211==am2mina(1)))=-am211(1,1:find(am211==am2mina(1)));
end
%%
if(size(am311,2)==1)
am311=am311';
end
am311=double(am311);
am3min=islocalmin(am311);
am3mina=am311(am3min);
if(min(am311)>. )

```

```

am311(1,find(am311==am3mina(1)):find(am311==am3mina(2)))=-
am311(1,find(am311==am3mina(1)):find(am311==am3mina(2)));

end

%%

figure

plot([0,am111(1:1:end-1)/max(am111(1,1:end-1)),0]);

figure

plot([0,am211(1:1:end-1)/max(am211(1:1:end-1)),0]);

figure

plot([0,am311(1:1:end-1)/max(am311(1:1:end-1)),0]);

```

آزمون اول در فصل شبیه سازی، مقادیر شتاب و طیف فرکانسی سیستم چهار طبقه ارایه شده در دیتای Datafile برای ستون دوم در هر طبقه:

```

figure

ft_spect(acc(:,1),dt,'a','red',.,'deg')

figure

ft_spect(acc(:,5),dt,'a','red',.,'deg')

figure

ft_spect(acc(:,9),dt,'a','red',.,'deg')

figure

ft_spect(acc(:,13),dt,'a','red',.,'deg')

%%

fs=1/dt;

t=0:(1/fs):Duration;

figure

subplot(411)

hold on; box on;

plot(t,acc(:,1),'b');

xlabel('time (s)')

ylabel('Acceleration')

subplot(412)

plot(t,acc(:,5),'b');

xlabel('time (s)')

ylabel('Acceleration')

subplot(413)

plot(t,acc(:,9),'b');

xlabel('time (s)')

ylabel('Acceleration')

subplot(414)

plot(t,acc(:,13),'b');

```

```
xlabel('time (s)')
ylabel('Acceleration')
```

آزمون اول در فصل شبیه سازی، فیلتر مولفه های فرکانسی شتاب و اعمال RDT بر روی هر یک و محاسبه میرایی از روی RDT:

```
sd=۱۹;
fs=۱/dt;
t=0:(۱/fs):۴۰;

for i=۱:۱:۱۶

Acceleration_filter۱=bandpass(acc(:,i),[۷ ۱۰],fs,'stopbandAttenuation',۸۰,'Steepness',۰.۷);
Acceleration_filter۲=bandpass(acc(:,i),[۱۸ ۳۰],fs,'stopbandAttenuation',۸۰,'Steepness',۰.۷);
Acceleration_filter۳=bandpass(acc(:,i),[۳۳ ۴۸],fs,'stopbandAttenuation',۷۰,'Steepness',۰.۷);

% subsegment duration
Ts = round(t(end)/sd);
nT = round(Ts/dt);

% triggering value
xs(۱,i) = .۵*std(Acceleration_filter۱);
xs(۲,i) = .۵*std(Acceleration_filter۲);
xs(۳,i) = .۵*std(Acceleration_filter۳);

xsm(۱,i) = ۱,۴*std(Acceleration_filter۱)/max(Acceleration_filter۱);
xsm(۲,i) = ۱,۴*std(Acceleration_filter۲)/max(Acceleration_filter۲);
xsm(۳,i) = ۱,۴*std(Acceleration_filter۳)/max(Acceleration_filter۳);

Acceleration_filter=[Acceleration_filter۱';Acceleration_filter۲';Acceleration_filter۳'];

% RDT function
[IRF۱,IRF۲,IRF۳,newT۱,newT۲,newT۳] = RDT(Acceleration_filter,xs(:,i),Ts,dt);

IRF۱۱(i,:)=IRF۱;%first freq
IRF۲۲(i,:)=IRF۲;%second freq
IRF۳۳(i,:)=IRF۳;%third freq

TF۱=islocalmax(IRF۱);
TF۲=islocalmax(IRF۲);
TF۳=islocalmax(IRF۳);

figure
subplot(۳۱۱)
hold on; box on;
plot(newT۱,IRF۱,'b',newT۱(TF۱),IRF۱(TF۱),'r*');
xlabel('time (s)')
```

```

ylabel('Acceleration')
title('RDT-first-frq')
%xlim([0 3]);

subplot(312)

plot(newT2,IRF2,'b',newT2(TF2),IRF2(TF2),'r*');
xlabel('time (s)')
ylabel('Acceleration')
title('RDT-second-frq')
%xlim([0 1]);

subplot(313)

plot(newT3,IRF3,'b',newT3(TF3),IRF3(TF3),'r*');
xlabel('time (s)')
ylabel('Acceleration')
title('RDT-third-frq')
%xlim([0 0.5]);

aa1=IRF1(TF1);
a1(i,1)=log(aa1(1)/aa1(8))*(1/(2*pi*7));
aa2=IRF2(TF2);
a2(i,1)=log(aa2(1)/aa2(8))*(1/(2*pi*7));
aa3=IRF3(TF3);
a3(i,1)=log(aa3(1)/aa3(16))*(1/(2*pi*15));
end

```

و محاسبه شکل مودی و پیچش:

```

for i=1:1:f
    syms a b c
    eqns=[-IRF11(4*i-2,1)==a-c*1.25,
    IRF11(4*i-2,1)==b+c*1,
    IRF11(4*i-1,1)==b-c*1];
    S11 = solve(eqns,[b a c]);
    a=vpa(S11.a);
    b=vpa(S11.b);
    c=vpa(S11.c);
    IRF11u.(i,1)=double(a);
    IRF11v.(i,1)=double(b);
    teta.11(i,1)=double(c);
end
for i=1:1:f
    syms a b c
    eqns=[-IRF22(4*i-2,1)==a-c*1.25,

```

```

IRF22(f*i-r,i)==b+c*i,
IRF22(f*i-l,i)==b-c*i];
S11 = solve(eqns,[b a c]);
a=vpa(S11.a);
b=vpa(S11.b);
c=vpa(S11.c);
IRF22u(i,l)=double(a);
IRF22v(i,l)=double(b);
teta22(i,l)=double(c);
end
for i=1:l:f
    syms a b c
    eqns=[-IRF23(f*i-r,i)==a-c*i,25,
    IRF23(f*i-r,i)==b+c*i,
    IRF23(f*i-l,i)==b-c*i];
    S11 = solve(eqns,[b a c]);
    a=vpa(S11.a);
    b=vpa(S11.b);
    c=vpa(S11.c);
    IRF23u(i,l)=double(a);
    IRF23v(i,l)=double(b);
    %%.....
    x=[.:f]';
    figure
    plot(x,[.: -IRF11u./max(-IRF11u)], '-b*',x,[.: -IRF22u./max(-IRF22u)], '--g*',x,[.: -
    IRF23u./max(-IRF23u)], '-.r*');
    grid on
    legend('mode1','mode2','mode3');
    title('EW MODE');
    figure
    plot(x,[.: IRF11v./max(IRF11v)], '-b*',x,[.: IRF22v./max(IRF22v)], '--
    g*',x,[.: IRF23v./max(IRF23v)], '-.r*');
    grid on
    legend('mode1','mode2','mode3');
    title('NS MODE');
    figure
    plot(x,[.: teta11./max(teta11)], '-b*',x,[.: teta22./max(teta22)], '--g*');
    grid on
    legend('mode1','mode2','mode3');
    title('TOR MODE');

```

آزمون دوم در فصل شبیه سازی، بدست آوردن طیف فرکانسی دیتای گرفته شده و ترسیم آن:

```
close all
dt=0.001;
fs=1/dt;
t=0:dt:25.3921;
data=load('data\10.txt');
%data=double(table2array(data303));

figure
ft_spect(data(:,1),dt,'a','red',0,'deg')
figure
ft_spect(data(:,2),dt,'a','red',0,'deg')
figure
ft_spect(data(:,3),dt,'a','red',0,'deg')
figure
ft_spect(data(:,4),dt,'a','red',0,'deg')
figure
ft_spect(data(:,5),dt,'a','red',0,'deg')
figure
subplot(511)
hold on; box on;
plot(t,data(:,1),'b');
xlabel('time (s)')
ylabel('force')
subplot(512)
plot(t,data(:,2),'b');
xlabel('time (s)')
ylabel('data-acceleration')
subplot(513)
plot(t,data(:,3),'b');
xlabel('time (s)')
ylabel('data-acceleration')
subplot(514)
plot(t,data(:,4),'b');
xlabel('time (s)')
ylabel('data-acceleration')
subplot(515)
plot(t,data(:,5),'b');
xlabel('time (s)')
```

```
ylabel('data-acceleration')
```

آزمون دوم در فصل شبیه سازی، اعمال RDT و محاسبه میرایی و شکل مودی:

```
close all
sd=۱۹;
dt=۰.۰۳۱;
fs=۱/dt;
t=0:dt:۲۵.۳۹۲۱;
for j=۱:۹
    %j=۱:۹
    acc=k((j-۱)*۸۱۹۲)+۱:(j*۸۱۹۲), ۱.۵);
for i=۲:۱.۵
    Acceleration_filter۱=bandpass(acc(:,i), [۲۷ ۳۴], fs, 'stopbandAttenuation', ۷۰, 'Steepness', ۰.۷);
    Acceleration_filter۲=bandpass(acc(:,i), [۴۴ ۵۵], fs, 'stopbandAttenuation', ۷۰, 'Steepness', ۰.۷);
    Acceleration_filter۳=bandpass(acc(:,i), [۶۷ ۷۵], fs, 'stopbandAttenuation', ۸۰, 'Steepness', ۰.۸);

    %RDT
    % subsegment duration
    Ts = round(t(end)/sd);
    nT = round(Ts/dt);
    % triggering value
    xs(۱,i) = ۰.۵*std(Acceleration_filter۱);
    xs(۲,i) = ۰.۵*std(Acceleration_filter۲);
    xs(۳,i) = ۰.۵*std(Acceleration_filter۳);

    xsm(۱,i) = ۱.۴*std(Acceleration_filter۱)/max(Acceleration_filter۱);
    xsm(۲,i) = ۱.۴*std(Acceleration_filter۲)/max(Acceleration_filter۲);
    xsm(۳,i) = ۱.۴*std(Acceleration_filter۳)/max(Acceleration_filter۳);
    Acceleration_filter=[Acceleration_filter۱';Acceleration_filter۲';Acceleration_filter۳'];

    % RDT function
    [IRF۱,IRF۲,IRF۳,newT۱,newT۲,newT۳] = RDT(Acceleration_filter,xs(:,i),Ts,dt);

    IRF۱۱(i,:)=IRF۱;%first freq
    IRF۲۲(i,:)=IRF۲;%second freq
    IRF۳۳(i,:)=IRF۳;%third freq

    %
    TF۱=islocalmax(IRF۱);
    TF۲=islocalmax(IRF۲);
    TF۳=islocalmax(IRF۳);

    figure
```

```

subplot(311)
hold on; box on;
plot(newT1,IRF1,'b',newT1(TF1),IRF1(TF1),'r*');
xlabel('time (s)')
ylabel('Acceleration')
title('RDT-first-frq')
xlim([0 0.5]);

subplot(312)
plot(newT2,IRF2,'b',newT2(TF2),IRF2(TF2),'r*');
xlabel('time (s)')
ylabel('Acceleration')
title('RDT-second-frq')
xlim([0 0.5]);

subplot(313)
plot(newT3,IRF3,'b',newT3(TF3),IRF3(TF3),'r*');
xlabel('time (s)')
ylabel('Acceleration')
title('RDT-third-frq')
xlim([0 0.5]);

%%
aa1=IRF1(TF1);
a1(i-1,j)=log(aa1(1)/aa1(7))*(1/(2*pi*2));

%%
aa2=IRF2(TF2);
a2(i-1,j)=log(aa2(1)/aa2(20))*(1/(2*pi*21));

%%
aa3=IRF3(TF3);
a3(i-1,j)=log(aa3(1)/aa3(30))*(1/(2*pi*31));

end

%%
x=[1:4]';
plot([IRF1(2:5)],x,'-b*',[IRF2(2:5)],x,'--g*',[IRF3(2:5)],x,'-.r*');
grid on
legend('mode2','mode3','mode4');
title('MODE SHAPE');
xlim([-0.5 0.5]);
hold on
%%
m2s13(:,j)=IRF1(2:5);

```

```

mrs13(:,j)=IRF22(r:delta);
mfs13(:,j)=IRF33(r:delta);

end

```

Abstract

Structural health monitoring is one of the important fields in civil engineering for evaluation and long-term maintenance of structures. It is important to pay attention to small damages and timely prevention of damages, both economically and safely.

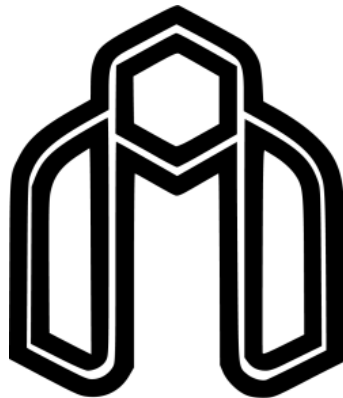
One of the important methods of the health monitoring of structures is the dynamic method. Since the vibrational properties of a structure, including the frequency and modal shapes, are a function of its physical properties, so a change in the physical properties of a structure causes changes in its vibrational properties, so these changes can be considered as a sign Be considered as structural damage.

Therefore, in this thesis, using the developed algorithm of Random decrement method, the properties of the structure and Modal shapes are obtained in order to be able to detect the failure of the structure by detecting changes in these vibrational properties.

Random decrement method, in addition to eliminating noise, due to averaging, reduces the data needed for processing, which leads to a reduction in processing time.

In this thesis, with three different tests, a three-storey building, a hinged beam and a four-storey building with real data, the proposed algorithm is validated and then with using the actual response data of a four-storey structure in Healthy and damage mode, the characteristics of the structure have been obtained and compared with the results of the article. Finally, it can be seen that the characteristics of the structure obtained from the algorithm in a short time and accurately equalizes the output of other methods.

Keywords: Health monitoring, Random decrement technique, Mode shape



**Shahrood University of
Technology**

Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Structural Engineering

Identification of Structural Properties using Random Decrement Technique

By: Arezoo Ahadi

Supervisor

Dr. Ali Keyhani

January ۲۰۲۱