

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

رساله دکتری مهندسی سازه:

شناسایی پارامترهای مودال، حاصل از داده های خروجی ناشی از

ارتعاشات سازه

نگارنده:

سعید محمدی

استاد راهنما:

دکتر علی کیهانی

اردیبهشت ۱۳۹۸

شماره: ۹۱۲۴۹۱۵
تاریخ: ۱۴۰۲/۰۲/۰۹
ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۱۲: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)
(ویژه دانشجویان ورودی های ۹۴ و ما قبل)

بدینوسیله گواهی می شود آقای سعید محمدی دانشجوی دکتری رشته مهندسی عمران - سازه به شماره دانشجویی ۹۱۲۴۹۱۵ ورودی مهر ماه سال ۱۳۹۱ در تاریخ ۱۳۹۸/۰۲/۰۹ از رساله نظری / عملی خود با عنوان: شناسایی پارامترهای مودال، حاصل از داده های خروجی ناشی از ارتعاشات سازه دفاع و با اخذ نمره ۱۹.۳۷ به درجه: عالی نائل گردید.

☐ الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	☐ ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۷
☐ ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹ - ۱۵	☐ د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد
☐ ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد	

ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
	دکتر علی کیهانی	استاد/ اساتید راهنما	دانشیار	
	-	مشاور/ مشاورین		
	دکتر محسن گرامی	استاد مدعو خارجی	دانشیار	
	دکتر وحیدرضا کلات جاری	استاد مدعو داخلی	دانشیار	
	دکتر فرنوش با سلیقه	استاد مدعو داخلی	استاد	
	دکتر ابراهیم زمانی بیدختی	سرپرست (نماینده) تحصیلات تکمیلی دانشکده	استاد	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش آموختگی آقای سعید محمدی بعمل آید.

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

دانشکده مهندسی عمران
تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:
آموزش تحصیلات تکمیلی

تقدیم به کران قدرترین سرمایه های زندگی ام:

همسر عزیزم به پاس همراهی های بی دریغش...

و

پدر دلسوز و مادر مهربانم به امید جبران قطره ای از زحمات بی کران شان...

تشکر و قدردانی:

خداوند مَنان را سپاسگزارم که با الطاف بی‌شمار او توانستم مرحله‌ای دیگر از مراحل تحصیل را پشت سر گذاشته و گام در مسیری نو از زندگی علمی خود بگذارم. این رساله با عنوان «تعیین پارامترهای دینامیکی سازه‌ها تنها با تکیه بر داده‌های خروجی ناشی از ارتعاشات سازه» و در راستای ارتقای الگوریتم‌های موجود در زمینه شناسایی سیستم، انجام گرفته است.

در انجام این رساله همواره از راهنمایی‌های استاد گران‌قدر جناب آقای دکتر علی کیهانی برخوردار بوده‌ام؛ پیش از همه از ایشان به‌خاطر راهنمایی‌های بی‌دریغشان در کلیه مراحل تحقیق، سپاسگزارم و از خداوند بزرگ برای ایشان طول عمر همراه با عزّت و سربلندی را خواستارم. همچنین از اساتید محترم داور که با وجود مشغله زیاد، زحمت مطالعه و داوری این رساله را به عهده گرفتند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

در کلیه مراحل انجام این رساله خانواده‌ام نیز با صبر و بردباری مشوّق اینجانب بوده‌اند؛ از این رو مراتب تشکر و قدردانی خود را از همراهی‌های آنان از جمله همسر عزیزم، پدر دلسوزم و مادر مهربانم اعلام می‌دارم. همچنین از تمامی دوستانم که در مدّت انجام این تحقیق با هم‌فکری‌ها و دلگرمی‌هایشان موجب پیشرفت کار شده‌اند، تشکر می‌نمایم.

در نهایت تمامی کاستی‌ها و نقایص احتمالی این رساله را بر عهده گرفته و از کلیه بزرگوارانی که آن را مطالعه می‌کنند، خواهشمندم این نقایص و کمبودها را به اینجانب گزارش نمایند تا در صورت امکان اصلاحات مربوط اعمال گردد.

با تشکر

سعید محمدی - بهار ۱۳۹۸

تعهد نامه

اینجانب سعید محمدی دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی عمران گرایش سازه دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله با موضوع «شناسایی پارامترهای مودال، حاصل از داده های خروجی ناشی از ارتعاشات سازه» تحت راهنمایی دکتر علی کیهانی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این رساله توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در رساله 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 می باشد 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 رساله تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ: ۱۳۹۸/۰۳/۰۱

امضا دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات، مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات نتایج موجود در رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

امروزه اطلاع از مشخصات دینامیکی سازه‌های مهمی که در گذشته ساخته شده‌اند، یعنی فرکانس‌های طبیعی، نسبت‌های میرایی و اشکال مودی، جهت ارزیابی عملکرد، کنترل ارتعاش یا بهسازی این سازه‌ها امری ضروری است. در دهه‌های اخیر با پیشرفت تکنیک‌های پردازش سیگنال، روش‌های متعددی به منظور شناسایی پارامترهای مودال سازه‌ها ارائه شده است که هر یک دارای مزایا و معایبی می‌باشد. در این رساله، دو الگوریتم تازه توسعه یافته در زمینه پردازش سیگنال مورد توجه قرار گرفته و با استفاده از تکنیک فیلتر کردن راهکارهایی جهت رفع برخی از محدودیت‌های آنها در زمینه شناسایی پارامترهای مودال سازه‌ها، ارائه شده است.

در روش پیشنهادی اول، برای اولین بار الگوریتم تجزیه میانگین موضعی (LMD) در زمینه شناسایی پارامترهای مودال سازه‌ها به کار گرفته شده است. در این روش برای جلوگیری از پدیده اختلاط مودها، از یک مرحله پیش‌پردازش شامل فیلتر کردن بازتاب‌ها استفاده شده است. عملکرد روش پیشنهادی توسط چند شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج آن با روش مبتنی بر تبدیل هیلبرت-هانگ (HHT) مقایسه شده است. بزرگترین مزیت روش پیشنهادی اول این است که شناسایی فرکانس‌های طبیعی و نسبت‌های میرایی کلیه مودهای فعال سازه تنها با اندازه‌گیری یک بازتاب مناسب قابل انجام است. با این وجود برآورد شکل مودهای سازه مستلزم اندازه‌گیری بازتاب‌های سازه در تمام درجات آزادی می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی عددی برای آزمون ارتعاش آزاد نشان دادند که حداکثر خطای برآورد فرکانس‌های طبیعی، در روش پیشنهادی اول و روش HHT به ترتیب ۱٪ و ۰/۵٪ می‌باشد. خطای برآورد نسبت‌های میرایی در این آزمون برای روش پیشنهادی اول و روش HHT به ترتیب به ۴/۱٪ و ۶/۲٪ محدود می‌شود. شکل مودهای شناسایی شده توسط هر دو روش دارای معیار اطمینان مودی (MAC) بزرگتر از ۹۹/۸٪ هستند که دقت بسیار خوبی محسوب می‌شود. در هر دو روش خطای برآورد برای مودهایی که کمتر تحریک شده‌اند، افزایش می‌یابد. همچنین به دلیل مرحله فیلتر کردن، وجود نویز در داده‌ها تأثیر چندانی بر نتایج شناسایی این دو روش ندارد. بررسی نمودارهای مربوط به فاز لحظه‌ای و لگاریتم طبیعی دامنه‌های لحظه‌ای حاصل از این دو روش نشان می‌دهد که نمودارهای مربوط به روش پیشنهادی اول در مقایسه با روش HHT کمتر تحت تأثیر نواحی ابتدا و انتهای سیگنال قرار گرفته و همچنین فرم خطی خود را در بازه وسیع‌تری حفظ می‌کند. نتایج شناسایی مربوط به شبیه‌سازی آزمایشگاهی با ارتعاشات مبهم محیطی نشان می‌دهند که هم روش پیشنهادی اول و هم روش HHT فرکانس‌های طبیعی را تقریباً به‌طور

دقیق برآورد کرده‌اند. در این شبیه‌سازی حداکثر خطای برآورد نسبت‌های میرایی، با وجود ۱۰ درصد نویز در داده‌ها، برای روش پیشنهادی اول ۷٪ و برای روش HHT برابر ۶٪ بدست آمده است.

دومین روش پیشنهاد شده، بر مبنای الگوریتم جداسازی ناپیدای منابع با استفاده از آمار مرتبه دوم (SOBSS) می‌باشد. یکی از مهم‌ترین چالش‌های استفاده از این الگوریتم در حوزه شناسایی سیستم، نیاز این الگوریتم به ثبت بازتاب‌های سازه در تمام درجات آزادی سازه است. در این رساله جهت رفع این محدودیت روشی پیشنهاد شده است که در آن ابتدا با بهره‌گیری از فیلترهای فرکانسی مناسب، تعداد مودهای فعال در بازتاب‌های ثبت شده را کاهش داده، به نحوی که تعداد مودهای فعال با تعداد بازتاب‌های ثبت شده برابر باشند. سپس با اعمال الگوریتم SOBSS بر روی بازتاب‌های فیلتر شده، پارامترهای مودال سازه استخراج می‌شوند. دقت روش پیشنهادی با استفاده از چند شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج شناسایی یک قاب برشی پنج طبقه به ازای درصد‌های مختلف نویز نشان دادند که وجود نویز در داده‌ها می‌تواند کاهش دقت برآورد نسبت‌های میرایی در برخی از مودها را به دنبال داشته باشد (حداکثر خطای ۲۳/۵٪). با این وجود دقت برآورد فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها در حضور یا عدم حضور نویز تغییر چندانی نمی‌کند. اگرچه روش پیشنهادی دوم، در هر دو حالت ارتعاش آزاد و ارتعاش مبهم محیطی، تنها با استفاده از دو بازتاب ثبت شده قادر به شناسایی مودهای فعال سازه می‌باشد ولی افزایش تعداد بازتاب‌های ثبت شده می‌تواند باعث افزایش دقت شناسایی برای مودهای با تحریک‌شدگی ضعیف شود. نتایج شناسایی مربوط به شبیه‌سازی آزمایشگاهی حاکی از ضعف روش پیشنهادی دوم در برآورد نسبت‌های میرایی برای مودهای با تحریک‌شدگی ضعیف می‌باشد (با حداکثر خطای ۴۱٪)؛ با این وجود خطای برآورد فرکانس‌های طبیعی در تمام مودهای شناسایی شده کمتر از ۱٪ و مقادیر MAC نیز برای همه شکل مودهای نسبی ۱۰۰٪ بدست آمد.

کلمات کلیدی: شناسایی پارامترهای مودال، الگوریتم LMD، الگوریتم SOBSS، فیلتر کردن

بازتاب‌ها

مقالات مستخرج از رساله:

نتایج این رساله در قالب دو مقاله در کنفرانس‌های معتبر ملی و بین‌المللی و همچنین دو مقاله در مجلات معتبر بین‌المللی دارای نمایه ISI، به چاپ رسیده است:

۱- محمدی، سعید و کیهانی، علی؛ "شناسایی پارامترهای مودال سازه‌ها با استفاده از تکنیک تجزیه میانگین موضعی"؛ چهارمین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری، ۷ و ۸ بهمن ماه ۱۳۹۵، مرکز همایش‌های بین‌المللی برج میلاد؛ تهران، ایران.

2- Mohammadi, Saeed and Keyhani Ali; "A new method for blind identification of structures with limited sensors", *11th Internatinal Congress on Civil Engineering (11ICCE)*; 8-10 May 2018, Tehran, Iran

3- Keyhani, Ali and Mohammadi, Saeed (2018); "Structural modal parameter using local mean decomposition"; *Measurement Science and Technology*; identification **29**: 025003

4- Mohammadi, Saeed and Keyhani, Ali (2019); "A new method for blind identification of structures with limited sensors"; *Measurement Science and Technology*; **30**: 055102

فهرست مطالب

۱- مقدمه	۱
۱-۱- پیشگفتار	۲
۱-۲- تاریخچه مختصر تحقیق و بیان مسئله	۳
۱-۳- نوآوری تحقیق	۵
۱-۴- سؤال‌های تحقیق	۶
۱-۵- فرض‌های تحقیق	۷
۱-۶- فرضیه‌های تحقیق	۷
۱-۶-۱- روش انجام تحقیق	۸
۱-۷- جمع‌بندی و پیکربندی رساله	۸
۲- مروری بر روش‌های مرسوم شناسایی سازه	۱۱
۲-۱- پیشگفتار	۱۲
۲-۲- روش حوزه زمان ابراهیم (ITD)	۱۲
۲-۳- الگوریتم تحقق ویژه سیستم (ERA)	۱۴
۲-۳-۱- حل معادله ارتعاش سیستم چند درجه آزادی در فضای حالت	۱۴
۲-۳-۲- استفاده از الگوریتم ERA	۱۵
۲-۴- روش شناسایی زیرفضای تصادفی	۱۸
۲-۵- شناسایی سازه به روش تجزیه مود تجربی (EMD)	۲۲
۲-۵-۱- معرفی الگوریتم EMD	۲۲
۲-۵-۲- کاربرد الگوریتم EMD در شناسایی پارامترهای مودال	۲۴
۲-۶- روش‌های شناسایی مبتنی بر جداسازی ناپیدای منابع (BSS)	۲۷
۲-۶-۱- معرفی الگوریتم BSS	۲۷
۲-۶-۲- کاربرد الگوریتم BSS برای شناسایی سازه‌ها	۳۱
۲-۷- تکنیک‌های تولید بازتاب ارتعاش آزاد	۴۱
۲-۷-۱- تکنیک تحریک طبیعی (NEXT)	۴۱

۴۳	۲-۷-۲- تکنیک کاهش تصادفی (RDT)
۴۴	۲-۸- معرفی الگوریتم تجزیه میانگین موضعی (LMD)
۴۶	۲-۹- جمع‌بندی
۴۹	۳- اصول شناسایی سیستم‌ها و کار با سیگنال‌ها و ماتریس‌ها
۵۰	۳-۱- پیشگفتار
۵۰	۳-۲- مبانی شناسایی سازه‌ها
۵۰	۳-۲-۱- سیستم‌ها
۵۴	۳-۲-۲- حل معادله ارتعاش سازه چند درجه آزادی در فضای مودال
۵۸	۳-۲-۳- اصول شناسایی پارامترهای مودال سازه‌ها
۶۰	۳-۳- سیگنال‌ها و برخی تکنیک‌های پردازش آنها
۶۱	۳-۳-۱- همبستگی سیگنال‌ها
۶۳	۳-۳-۲- ارتباط بین سیگنال‌های تصادفی
۶۳	۳-۳-۳- سفیدسازی سیگنال‌های تصادفی
۶۴	۳-۳-۴- ایستایی یک سیگنال تصادفی
۶۵	۳-۳-۵- نویز سفید
۶۵	۳-۳-۶- فیلتر کردن سیگنال‌ها
۶۸	۳-۴- ماتریس‌ها و برخی عملیات پایه روی آنها
۶۸	۳-۴-۱- چند تعریف پایه
۷۰	۳-۴-۲- تجزیه مقدار ویژه یک ماتریس
۷۲	۳-۴-۳- تجزیه مقدار منفرد یک ماتریس
۷۲	۳-۴-۴- قطری‌سازی همزمان چند ماتریس
۷۵	۳-۵- جمع‌بندی
۷۷	۴- شناسایی پارامترهای مودال سازه‌ها با استفاده از الگوریتم تجزیه میانگین موضعی
۷۸	۴-۱- پیشگفتار
۷۸	۴-۲- الگوریتم تجزیه میانگین موضعی
۷۹	۴-۲-۱- معرفی الگوریتم LMD
۸۱	۴-۲-۲- مشکلات استفاده از الگوریتم LMD و راه حل‌ها
۸۴	۴-۳- روش پیشنهادی برای شناسایی پارامترهای مودال با استفاده از تکنیک LMD

- ۴-۴- ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در شناسایی پارامترهای مودال سازه‌ها..... ۸۸
- ۴-۴-۱- مطالعه موردی اول: شناسایی پارامترهای مودال یک قاب برشی سه درجه آزادی..... ۸۸
- ۴-۴-۲- مطالعه موردی دوم: شناسایی پارامترهای مودال یک ساختمان بلند موجود، تحت اثر نیروی
مجهول باد ۹۹
- ۴-۵- جمع‌بندی ۱۰۵
- ۵- بهبود تکنیک جداسازی ناپیدای منابع به‌منظور شناسایی پارامترهای مودال سازه‌ها با
استفاده از تعداد محدودی از بازتاب‌ها..... ۱۰۷**
- ۵-۱- پیشگفتار ۱۰۸
- ۵-۲- الگوریتم جداسازی ناپیدای منابع ۱۰۸
- ۵-۲-۱- فرمول‌بندی ریاضی الگوریتم BSS..... ۱۰۹
- ۵-۲-۲- الگوریتم SOBSS برای شناسایی پارامترهای مودال سازه‌ها..... ۱۱۲
- ۵-۳- روش پیشنهادی برای شناسایی پارامترهای مودال، مبتنی بر الگوریتم SOBSS..... ۱۱۳
- ۵-۴- ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در شناسایی پارامترهای مودال سازه‌ها..... ۱۱۷
- ۵-۴-۱- مطالعه موردی اول: شناسایی پارامترهای مودال یک قاب برشی پنج درجه آزادی ۱۱۸
- ۵-۴-۲- مطالعه موردی دوم: شناسایی پارامترهای مودال یک سازه معیار ۱۳۰
- ۵-۵- جمع‌بندی ۱۳۶
- ۶- نتیجه‌گیری ۱۳۹**
- ۶-۱- پیشگفتار ۱۴۰
- ۶-۲- روش پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم LMD..... ۱۴۰
- ۶-۳- روش پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم SOBSS..... ۱۴۲
- ۶-۴- مقایسه دو روش پیشنهادی ۱۴۳
- ۶-۵- پیشنهاد برای مطالعات آتی ۱۴۵
- پیوست‌ها ۱۴۷**
- منابع و مراجع ۱۵۷**

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲- نمونه‌ای از فرکانس‌های شناسایی شده یک سازه (خطوط افقی)، توسط روش SSI، در محدوده ۰ تا ۱ هرتز [۱۳]..... ۲۱
- شکل ۲-۲- (الف) شکل سازه مورد بررسی. (ب) بازتاب ثبت شده در طبقه سوم به همراه نویز [۱۷]..... ۲۵
- شکل ۳-۲- بازتاب‌های مودی شناسایی شده به روش EMD؛ از چپ به راست: مود اول، مود دوم، مود سوم [۱۷]..... ۲۶
- شکل ۴-۲- تشریح مدل BSS با مثال کوکتل پارتی [۱۴]..... ۲۹
- شکل ۵-۲- الگوریتم BSS برای شناسایی پارامترهای مودال سازه [۲۹]..... ۳۱
- شکل ۶-۲- تأثیر افزایش میرایی بر دقت شناسایی مودهای یک سیستم سه درجه آزادی؛ نمودارهای سمت چپ: الگوریتم ICA؛ نمودارهای سمت راست: الگوریتم SOBSS [۲۹]..... ۳۲
- شکل ۷-۲- مقایسه خطای شناسایی مودهای یک سازه سه درجه آزادی در حالت بدون میرایی (نمودارهای سمت راست) و با میرایی (نمودارهای سمت چپ). نقطه چین: روش ITD؛ خط توپر: الگوریتم SOBSS با قطری‌سازی دو ماتریس کوواریانس؛ ستاره: الگوریتم SOBSS با قطری‌سازی همزمان چندین ماتریس کوواریانس [۳۰]..... ۳۳
- شکل ۸-۲- تأثیر انتخاب طول پنجره (تعداد پنجره‌ها) بر روی خطای گام قطری‌سازی، در روش MCC [۳۸]..... ۳۸
- شکل ۹-۲- فلوچارت روش ترکیبی EMD-MCC برای شناسایی سازه‌ها با تعداد محدودی از سنسورها [۳۴]..... ۳۹
- شکل ۱۰-۲- فلوچارت روش STFT-ICA برای شناسایی سازه‌ها [۴۱]..... ۴۱
- شکل ۱۱-۲- نحوه تولید توابع RD با در نظر گرفتن سطح راه‌اندازی ثابت غیرصفر [۴۴]..... ۴۴
- شکل ۱۲-۲- نحوه محاسبه فرکانس‌های لحظه‌ای (IF) و دامنه لحظه‌ای (IA) توسط الگوریتم‌های LMD و EMD [۴۶]..... ۴۶
- شکل ۱-۳- نمونه‌ای از یک بازتاب مودال شتاب برای یک سازه فرضی..... ۵۹
- شکل ۲-۳- شمایی از بازتاب فرکانسی یک فیلتر پایین‌گذر [۵۴]..... ۶۷
- شکل ۳-۳- تعبیر هندسی تجزیه مقدار ویژه یک ماتریس در فضای سه بعدی [۵۷]..... ۷۱
- شکل ۱-۴- تعیین محل قرارگیری موقعیت آینه برای گسترش سیگنال به روش گسترش آینه‌ای بهبود یافته [۵۳]..... ۸۳
- شکل ۲-۴- (الف) قاب برشی سه طبقه برای مطالعه موردی اول (ب) مدل ساده شده آن..... ۸۹
- شکل ۳-۴- (الف) بازتاب شتاب درجه آزادی سوم؛ (ب) نویز شبیه‌سازی شده؛ (ج) بازتاب آلوده به نویز..... ۹۰
- شکل ۴-۴- طیف فوریه بازتاب شتاب درجه آزادی سوم (الف) بدون نویز؛ (ب) با نویز..... ۹۰

- شکل ۴-۵- توابع PF استخراج شده توسط روش پیشنهادی (منحنی توپر) همراه با بازتاب های مودال دقیق (منحنی خط چین): (الف) تا (پ) حاصل از بازتاب های بدون نویز؛ (ت) تا (ج) حاصل از بازتاب های دارای نویز ۹۱
- شکل ۴-۶- نمودارهای IP_3 و $\ln(IA_3)$ برای مود سوّم (خط چین)، به همراه خطوط برازش شده بر این منحنی ها (توپر): (الف و ب) حاصل از بازتاب های بدون نویز؛ (پ و ت) حاصل از بازتاب های با نویز ۹۲
- شکل ۴-۷- مقایسه نمودارهای حاصل از روش پیشنهادی با روش HHT برای مود سوّم در یک بازه زمانی بزرگتر: (الف) فاز لحظه ای؛ (ب) دامنه لحظه ای؛ (پ) بازتاب مودال شناسایی شده ۹۵
- شکل ۴-۸- تحریک مبهم محیطی وارد بر پایه قاب برشی، شبیه سازی شده برای مطالعه موردی اوّل ۹۶
- شکل ۴-۹- (الف) بازتاب شتاب درجه آزادی سوّم از قاب برشی، تحت تحریک خارجی مبهم؛ (ب) طیف فوریه این بازتاب ۹۶
- شکل ۴-۱۰- (الف) تا (پ) سیگنال های فیلتر شده حاصل از بازتاب درجه آزادی سوّم؛ (ت) تا (ج) توابع PF شناسایی شده توسط روش پیشنهادی (آزمون ارتعاش محیطی) ۹۷
- شکل ۴-۱۱- نمودارهای فاز لحظه ای و دامنه لحظه ای شناسایی شده برای مود دوّم (آزمون ارتعاش محیطی) ۹۸
- شکل ۴-۱۲- پلان و نمای ساختمان ۷۶ طبقه بتنی واقع در شهر ملبورن استرالیا [۶۰] ۱۰۰
- شکل ۴-۱۳- (الف) بازتاب شتاب تراز بام از سازه معیار تحت تحریک باد؛ (ب) نویز شبیه سازی شده؛ (پ) بازتاب اندازه گیری شده دارای نویز؛ (ت) طیف فوریه بازتاب اندازه گیری شده ۱۰۱
- شکل ۴-۱۴- (الف) تا (پ): سیگنال های فیلتر شده حاصل از بازتاب شتاب بام؛ (ت) تا (ج): توابع PF شناسایی شده ۱۰۲
- شکل ۴-۱۵- (الف) تا (پ): توابع فاز لحظه ای مودهای شناسایی شده؛ (ت) تا (ج): توابع دامنه لحظه ای مودهای شناسایی شده ۱۰۳
- شکل ۵-۱- فلوچارت روش پیشنهادی برای شناسایی پارامترهای مودال، مبتنی بر الگوریتم SOBSS ۱۱۷
- شکل ۵-۲- قاب برشی پنج طبقه در مطالعه موردی اوّل: (الف) آزمون ارتعاش آزاد (ب) آزمون ارتعاش اجباری تصادفی ۱۱۸
- شکل ۵-۳- (الف) تا (پ) بازتاب شتاب درجه آزادی اوّل با سطوح مختلف نویز؛ (ت) تا (ج) بازتاب شتاب درجه آزادی چهارم با سطوح مختلف نویز ۱۲۰
- شکل ۵-۴- طیف فوریه بازتاب شتاب درجات آزادی شبیه سازی شده (الف) درجه آزادی اوّل؛ (ب) درجه آزادی چهارم ۱۲۱
- شکل ۵-۵- بازتاب های مودال نرمال، شناسایی شده توسط روش پیشنهادی، برای $R_{nj} = 0\%$ و $R_{nj} = 10\%$ (آزمون ارتعاش آزاد) ۱۲۲

- شکل ۶-۵- مقایسه شکل موده‌های قاب برشی ۵ طبقه، شناسایی شده توسط روش پیشنهادی و الگوریتم استاندارد SOBSS، برای سطح نويز $R_{nj} = 10\%$ ۱۲۴
- شکل ۷-۵- بازتاب نرمال شده شتاب مود سوّم ارتعاش، شناسایی شده توسط روش پیشنهادی و الگوریتم استاندارد SOBSS، برای سطح نويز $R_{nj} = 10\%$ ۱۲۵
- شکل ۸-۵- (الف) تحریک خارجی شبیه سازی شده برای درجه آزادی چهارم از قاب برشی ۵ طبقه؛ (ب) و (پ) به ترتیب بازتاب شتاب درجه آزادی چهارم قاب برشی ۵ طبقه و طیف فوریه آن؛ (ت) بزرگنمایی از این بازتاب شتاب ۱۲۶
- شکل ۹-۵- بازتاب‌های نرمال شتاب مودال شناسایی شده توسط روش پیشنهادی برای حالت‌های ۱ و ۲ از جدول ۳-۵ ۱۲۸
- شکل ۱۰-۵- (الف) تصویری از نمونه آزمایشگاهی معیار [۶۳]؛ (ب) مدل اجزاء محدود آن [۶۳]؛ (پ) نام گذاری درجات آزادی در طبقه i ام ۱۳۱
- شکل ۱۱-۵- بازتاب‌های شتاب در درجات آزادی طبقه چهارم (بام) از سازه معیار: (الف) امتداد x ؛ (ب) امتداد y ؛ (پ) پیچشی؛ (ت) نمای نزدیک از بازتاب امتداد y ۱۳۳
- شکل ۱۲-۵- طیف فوریه بازتاب‌های شتاب اندازه گیری شده در طبقه چهارم از سازه معیار: (الف) امتداد x ؛ (ب) امتداد y ؛ (پ) پیچشی ۱۳۴
- شکل ۱۳-۵- بازتاب‌های نرمال شتاب شناسایی شده برای مود سوّم از هر مجموعه از درجات آزادی (سازه معیار) ۱۳۵

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲- مقایسه نتایج حاصل از شناسایی به روش EMD با مقادیر تئوریک [۱۷]..... ۲۶
- جدول ۲-۲- مقایسه نتایج شناسایی ساختمان UCLA تحت زلزله پارکفیلد، با الگوریتم‌های مختلف [۳۴]..... ۳۶
- جدول ۳-۲- تعداد مودهای قابل شناسایی سازه بر اساس تعداد سنسورها، در روش پیشنهادی در مرجع [۳۵]..... ۳۷
- جدول ۱-۴- مقایسه پارامترهای مودال شناسایی شده با روش پیشنهادی و روش HHT، به همراه مقادیر تئوریک آنها..... ۹۳
- جدول ۲-۴- مقادیر پارامتر MAC برای مودهای شناسایی شده توسط روش پیشنهادی و روش HHT..... ۹۵
- جدول ۳-۴- مقایسه نتایج شناسایی قاب برشی سه طبقه توسط روش پیشنهادی و روش HHT (آزمون ارتعاش محیطی)..... ۹۹
- جدول ۴-۴- مقایسه نتایج شناسایی روش پیشنهادی با روش HHT برای سازه معیار، به همراه مقادیر تحلیلی..... ۱۰۴
- جدول ۱-۵- مشخصات دینامیکی قاب برشی ۵ طبقه برای مطالعه موردی اول..... ۱۱۹
- جدول ۲-۵- پارامترهای مودال قاب برشی ۵ طبقه، شناسایی شده توسط روش پیشنهادی (آزمون ارتعاش آزاد)..... ۱۲۳
- جدول ۳-۵- جزئیات موردنیاز برای مرحله فیلتر کردن در روش پیشنهادی، برای تعداد مختلف از بازتاب‌های اندازه‌گیری شده از قاب برشی ۵ طبقه (آزمون ارتعاش اجباری تصادفی)..... ۱۲۷
- جدول ۴-۵- پارامترهای مودال قاب برشی ۵ طبقه، شناسایی شده توسط روش پیشنهادی به ازای تعداد متفاوت از سنسورها (آزمون ارتعاش اجباری تصادفی)..... ۱۲۹
- جدول ۵-۵- فرکانس‌های گوشه موردنیاز به منظور تعریف فیلتر برای هر مجموعه از درجات آزادی از سازه معیار..... ۱۳۴
- جدول ۶-۵- پارامترهای مودال شناسایی شده برای سازه معیار، توسط روش پیشنهادی..... ۱۳۵

علائم و اختصارات

a_i : دامنه موضعی i ام در الگوریتم LMD	A یا $[A]$: ماتریس ترکیب در تکنیک BSS
$\tilde{a}(t)$: تابع دامنه موضعی در الگوریتم LMD	$\tilde{A}$: ماتریس حالت سیستم
c_j : میرایی سازه در درجه آزادی j ام	$\tilde{B}$: ماتریس تحریک ورودی در فضای حالت
f : فرکانس طبیعی مودهای سازه (Hz)	C یا $[C]$: ماتریس میرایی سازه
f_{pb} : محدوده فرکانس عبور در فیلترهای میان گذر	$\tilde{C}$: ماتریس خروجی سیستم در فضای حالت
$h(t)$: پاسخ سیستم به بار ضربه واحد	$E[.]$: عملگر امید ریاضی
k_j : سختی سازه در درجه آزادی j ام	$(.)^{EK}$: کورتیز یا کشیدگی اضافی
m : تعداد سنسورها یا تعداد بازتاب‌های اندازه‌گیری شده	F(t) یا $\{f(t)\}$: بردار نیروهای وارد بر سازه
m_j : جرم سازه در درجه آزادی j ام / میانگین موضعی	$G(.)$: تابع فیلتر بازتاب‌ها در روش پیشنهادی دوم
j ام در الگوریتم LMD	H(.) : ماتریس هنکل
n : تعداد درجات آزادی سازه	$\bar{H}[.]$: عملگر تبدیل هیلبرت
n_j : اکستریم موضعی j ام سیگنال	I : ماتریس یکّه
n_f : تعداد فیلتر موردنیاز در روش پیشنهادی دوم	$I_A(t)$: تابع دامنه لحظه‌ای در الگوریتم LMD
$q(t)$: بردار بازتاب‌های مودال سازه	$I_F(t)$: تابع فرکانس لحظه‌ای در الگوریتم LMD
t : زمان	$I_P(t)$: تابع فاز لحظه‌ای در الگوریتم LMD
$x(t)$: بردار تغییر مکان سازه	K یا $[K]$: ماتریس سختی سازه
$\dot{x}(t)$: بردار بازتاب شتاب سازه	M یا $[M]$: ماتریس جرم سازه
$\ddot{x}(t)$: بردار بازتاب‌های شتاب فیلترشده سازه	MAC: معیار اطمینان مودی
$\dot{\square}$: مشتق نسبت به زمان	N یا N_s : طول سیگنال یا بازتاب سازه
ω_j : فرکانس طبیعی مود j ام سازه (rad/s)	$PF(t)$: تابع حاصلضرب در الگوریتم LMD
ω_{dj} : فرکانس میراشونده مود j ام سازه (rad/s)	$R_{x,y}(\cdot)$: تابع همبستگی متقابل بردارهای x و y
ξ_j : نسبت میرایی مود j ام سازه	R_{nj} : سطح نویز در بازتاب درجه آزادی j ام سازه
$[\Phi]$: ماتریس حاوی شکل مودهای سازه	$RMS(\cdot)$: جذر میانگین مربعات
$[\hat{\Phi}]$: ماتریس شکل مودهای ناقص سازه	SD : معیار توقف در الگوریتم LMD
Φ_j : بردار شکل مود j ام سازه	W یا $[W]$: معکوس ماتریس ترکیب در تکنیک BSS

BSS: جداسازی ناپیدای منابع
 $arg(.)$: آرگومان عدد مختلط
 $ceil(.)$: تابعی که هر عدد را به نزدیک‌ترین عدد صحیح بزرگتر یا مساوی آن عدد گرد می‌کند.
 EMD: الگوریتم تجزیه مود تجربی
 ERA: الگوریتم تحقق ویژه سیستم
 HHT: تبدیل هیلبرت-هانگ
 ICA: تحلیل مؤلفه‌های مستقل
 IMF: تابع مودی ذاتی در الگوریتم EMD
 ITD: روش حوزه زمان ابراهیم
 JAD: قطری‌سازی تقریبی مشترک
 LMD: الگوریتم تجزیه میانگین موضعی
 MCC: روش همبستگی متقابل اصلاح شده
 NExT: تکنیک تحریک طبیعی
 RDT: تکنیک کاهش تصادفی
 SOBSS: جداسازی ناپیدای منابع با استفاده از آمار مرتبه دوم
 SSI: روش شناسایی زیرفضای تصادفی
 STFT: تبدیل فوریه زمان-محدود
 WT: تبدیل موجک

فصل اول: مقدمه

۱- مقدمه

۱-۱- پیشگفتار

برای قرن‌ها، مهندسين عمران مجبور بودند برای تحلیل و طراحی سازه‌ها به مدل‌های خیلی ساده و ایده‌آل از آن‌ها اکتفا کنند. ساختمان‌ها به صورت قاب‌های دوبعدی و پل‌ها به صورت تیرهای ساده یا پیوسته مدل می‌شدند. این نگاه ساده به سیستم‌های ساختمانی، به تدریج مبنای بسیاری از نرم‌افزارها و برنامه‌های محاسباتی در این حوزه قرار گرفت. با توسعه روش‌های طراحی بر مبنای عملکرد و نیاز جدی به بررسی حالت‌های حدی دوام، نگهداری و بهره‌برداری و همچنین چالش‌های پیش رو برای مرمت و بازسازی سازه‌های موجود، دیگر استفاده از آن مدل‌سازی‌های ساده‌شده مناسب نیست [۱].

اگرچه در دهه‌های اخیر روش‌های مدل‌سازی پیچیده‌تر مانند روش مدل‌سازی و تحلیل اجزاء محدود پیشرفت‌های چشمگیری داشته‌اند، اما همچنان دقت، قابلیت اطمینان و انطباق این مدل‌ها با واقعیت، به‌ویژه در تحلیل‌های دینامیکی، جای سؤال دارد. دلیل این امر را می‌توان در حاکم بودن فرض خطی بودن در تحلیل، تغییرات ناخواسته مشخصات اجزاء سازه در حین ساخت و بعد از آن، پیچیدگی سازه‌ها، عدم قطعیت‌های موجود در مشخصات مصالح و بارهای وارد بر سازه و ... جستجو کرد [۲].

چالش‌ها و نیازهای فوق‌رای به جز انجام آزمایش‌های تجربی بر روی سازه‌ها جهت تأیید مدل‌سازی و تعیین مشخصات واقعی سازه باقی نمی‌گذارد.

در این فصل ابتدا اهمیت شناسایی سیستم و دسته‌بندی‌های مختلف آن تشریح می‌شود و سپس نوآوری، سؤال‌ها، فرض‌ها و روش انجام تحقیق ارائه خواهد شد. در انتها نیز پیکربندی ادامه رساله

آورده می‌شود.

۱-۲- تاریخچه مختصر تحقیق و بیان مسئله

امروزه با ساخت سازه‌های بلند با انعطاف‌پذیری بالا، برآورد مشخصات دینامیکی، یعنی فرکانس‌های طبیعی، اشکال مودی و میرایی سازه، جهت پایش سلامتی و در صورت نیاز اعمال روش‌های کنترل ارتعاش بر روی این‌گونه سازه‌ها ضروری به نظر می‌رسد. در واقع کنترل ارتعاشات سازه بدون اطلاع از مشخصات اولیه آنها غیرممکن می‌باشد. دستیابی به این مهم نیازمند انجام آزمایش‌های تجربی بر روی سازه و جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل اطلاعات به‌دست آمده می‌باشد.

از اوایل دهه ۱۹۷۰ میلادی، تعیین مشخصات دینامیکی سیستم‌های مکانیکی و سازه‌ای با عناوینی هم‌چون: تحلیل مودال^۱، تحلیل مودال تجربی^۲، تحلیل مودال عملیاتی^۳، شناسایی مودال^۴، شناسایی سازه^۵ و غیره، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفت. روش‌های اولیه شناسایی سازه تحت عنوان روش‌های ورودی-خروجی^۶، نیازمند اندازه‌گیری بازتاب‌های سازه به همراه اندازه‌گیری تحریک خارجی بودند. از آنجا که نیروها و تحریک‌های خارجی که یک سازه در طول عمر مفید خود با آن‌ها مواجه می‌شود، قابل اندازه‌گیری نیستند، شناسایی با این روش‌ها مستلزم انجام آزمایش‌های مصنوعی جهت اعمال نیروهای کنترل شده به سازه می‌باشند. انجام این آزمایش‌ها علاوه بر هزینه‌بر و زمان‌بر بودن، نیازمند توقف بهره‌برداری از سازه هستند و علاوه بر آن، ایمنی سازه موجود را نیز با خطر مواجه می‌کند. بنابراین، روش‌های ورودی-خروجی تنها در موارد محدودی قابل استفاده هستند. در سال‌های اخیر، با پیشرفت‌هایی که در علم پردازش سیگنال به‌وجود آمده است، روش‌های شناسایی جدیدی،

¹ Modal Analysis (MA)

² Experimental Modal Analysis (EMA)

³ Operational Modal Analysis (OMA)

⁴ Modal Identification (MI)

⁵ Structural Identification (SI)

⁶ Input-Output methods (IO)

تحت عنوان روش‌های خروجی‌محور^۱، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در این روش‌ها، که اغلب مبتنی بر تکنیک‌های پردازش سیگنال هستند، شناسایی سازه تنها با توجه به بازتاب‌های ثبت شده از آن انجام می‌گیرد. این بازتاب‌ها می‌توانند ناشی از تحریک‌های واقعی وارد بر سازه (مانند زلزله، باد و ...) باشند.

از منظر دیگر، بسته به اینکه فرآیند شناسایی در حوزه زمان انجام می‌گیرد، یا فرکانس و یا زمان-فرکانس، می‌توان روش‌های شناسایی سیستم را طبقه‌بندی کرد. از مهم‌ترین روش‌های حوزه زمان می‌توان به روش حوزه زمان ابراهیم^۲ (ITD)، روش تحقق ویژه سیستم^۳ (ERA)، روش تکرار زیرفضای تصادفی^۴ (SSI) و روش‌های مبتنی بر الگوریتم جداسازی ناپیدای منابع^۵ (BSS) را نام برد. فرمول‌بندی و تشریح این روش‌ها در فصل ۲ ارائه خواهد شد. در حوزه فرکانس دو روش پیک‌پیکینگ^۶ (PP) و تجزیه حوزه فرکانس^۷ (FDD) معروف‌تر می‌باشند. با توجه به مشکلات بالقوه‌ای که در انتقال داده‌ها به حوزه فرکانس و سپس برگشت مجدد آنها به حوزه زمان وجود دارد، استفاده از روش‌های حوزه فرکانس کمتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در عوض، روش‌هایی که مبتنی بر پردازش سیگنال‌ها در فضای زمان-فرکانس هستند، عملکرد بهتری از خود نشان داده‌اند. از جمله تکنیک‌های موجود در این حوزه می‌توان به تبدیل موجک^۸ (WT)، تبدیل فوریه زمان-محدود^۹ (STFT)، الگوریتم تجزیه مود تجربی^{۱۰} (EMD) و الگوریتم تجزیه میانگین موضعی^{۱۱} (LMD) اشاره کرد. در این رساله، از میان روش‌های شناسایی حوزه زمان، الگوریتم‌های شناسایی بر مبنای BSS و از میان تکنیک‌های حوزه زمان-فرکانس الگوریتم LMD مورد توجه قرار گرفته است.

¹ Output-only methods

² Ibrahim Time Domain (ITD)

³ Eigen-system Realization Algorithm (ERA)

⁴ Stochastic Subspace Iteration (SSI)

⁵ Blind Source Separation (BSS)

⁶ Peak Picking (PP)

⁷ Frequency Domain Decomposition (FDD)

⁸ Wavelet Transform (WT)

⁹ Short-Time Fourier Transform (STFT)

¹⁰ Empirical Mode Decomposition (EMD)

¹¹ Local Mean Decomposition (LMD)

۱-۳- نوآوری تحقیق

الگوریتم LMD یک تکنیک تازه توسعه یافته جهت نمایش سیگنال‌ها در حوزه زمان-فرکانس می‌باشد. شاید بزرگترین مزیت این الگوریتم را بتوان سادگی کاربرد آن دانست، به‌طوری که بدون نیاز به فرمول‌بندی‌های پیچیده ریاضی و البته بدون ترک حوزه زمان، قادر است سیگنال داده شده را به یک سری مؤلفه‌های تک فرکانسی تجزیه کند. با این وجود، این الگوریتم در مواردی که مؤلفه‌های مذکور در یک باند فرکانسی محدود قرار بگیرند (مانند سازه‌های عمرانی)، با پدیده اختلاط مودها مواجه خواهد شد و قادر به جداسازی مؤلفه‌های تک فرکانسی نمی‌باشد. سایر مشکلات این الگوریتم عبارتند از: حساسیت آن به وجود نویز در داده‌ها، اثرات ابتدا و انتهای سیگنال، عدم وجود معیار توقف مناسب در مرحله جداسازی مؤلفه‌ها. اگرچه الگوریتم LMD تاکنون برای تشخیص آسیب ماشین‌های دوآر مورد استفاده قرار رفته است، ولی با توجه به مشکلات مذکور، تاکنون امکان استفاده از این الگوریتم در مبحث شناسایی پارامترهای مودال سازه‌ها مورد بررسی قرار نگرفته است. در این رساله پس از بهبود الگوریتم LMD و رفع مشکلات فوق، برای اولین بار یک روش شناسایی سازه بر مبنای این الگوریتم پیشنهاد شده است.

الگوریتم‌های مبتنی بر BSS قادرند پارامترهای مودال سازه را بدون نیاز به مدل اولیه و یا تخمین مرتبه مدل شناسایی کنند. با این وجود، نیاز به اندازه‌گیری بازتاب سازه در تمام درجات آزادی یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های این دسته از الگوریتم‌های شناسایی می‌باشد. تاکنون روش‌های متعددی جهت رفع این محدودیت پیشنهاد شده‌اند. در برخی از این روش‌ها از وجود پراکندگی^۱ در نمایش زمان-فرکانس بازتاب‌ها استفاده می‌شود. در دسته دیگری از این روش‌ها، با افزایش مصنوعی تعداد بازتاب‌ها تلاش شده است که مجموع بازتاب‌های واقعی و مصنوعی با تعداد درجات آزادی سیستم

^۱ Sparsity

برابر شود. در این رساله روشی پیشنهاد شده است که در آن به جای افزایش تعداد بازتاب‌ها، تعداد موده‌های فعال در این بازتاب‌ها کاهش داده می‌شود. بدین منظور، از تکنیک فیلترکردن داده‌ها در فضای فرکانس استفاده شده است. با این روش ضمن رفع محدودیت فوق، عملکرد الگوریتم جداسازی ناپیدای منابع با استفاده از آمار مرتبه دوم^۱ (SOBSS) در برابر نویز نیز ارتقاء پیدا کرده است.

۱-۴- سؤال‌های تحقیق

همان‌طور که در بخش ۱-۳ اشاره شد، در این رساله دو روش جدید جهت شناسایی پارامترهای مودال سازه‌ها پیشنهاد شده است. مهم‌ترین سؤالاتی که با انجام این تحقیق به آن پاسخ داده شده است، عبارتند از:

❖ چگونه می‌توان از الگوریتم LMD در مبحث شناسایی پارامترهای مودال سازه‌ها استفاده کرد؟

❖ استفاده از الگوریتم LMD به جای الگوریتم EMD در مبحث شناسایی سازه چه مزایایی دارد؟

❖ عملکرد روش پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم LMD در صورت وجود نویز در داده‌ها به چه صورت خواهد بود؟

❖ چه راهکاری برای استفاده از الگوریتم SOBSS برای شناسایی پارامترهای مودال سازه‌ها در حالتی که تعداد سنسورها از تعداد درجات آزادی کمتر است، وجود دارد؟

❖ عملکرد روش پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم SOBSS با خود الگوریتم استاندارد SOBSS چه تفاوتی دارد؟

^۱ Second-Order Blind Source Separation

❖ عملکرد روش پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم SOBSS در صورت وجود نویز در داده‌ها به

چه صورت خواهد بود؟

❖ عملکرد روش پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم SOBSS در صورت افزایش تعداد سنسورها

به چه صورت خواهد بود؟

۱-۵- فرض‌های تحقیق

در روش‌های شناسایی پیشنهاد شده در این تحقیق فرض‌های زیر در نظر گرفته شده‌اند:

- سازه دارای رفتار خطی است و پارامترهای مودال آن با زمان تغییر نمی‌کنند.
- نویز موجود در داده‌ها، با تحریک خارجی ناهمبسته است و از نوع گوسی سفید می‌باشد.
- بازتاب‌های سازه دارای ماهیت ایستا هستند. بدین منظور فرض می‌شود که بازتاب‌های سازه ناشی از ارتعاش آزاد یا بار ضربه و یا ناشی از تحریک تصادفی محیطی در دسترس باشد.
- نسبت میرایی مدهای سازه‌ها در محدوده متعارف (حدود ۰.۵٪) باقی می‌ماند.
- مدهای سازه نرمال و حقیقی هستند و به خوبی از یکدیگر تفکیک شده‌اند.

۱-۶- فرضیه‌های تحقیق

انتظار می‌رود الگوریتم LMD قابلیت کاربرد در زمینه شناسایی پارامترهای مودال سازه‌ها را داشته

باشد.

انتظار می‌رود الگوریتم LMD تنها با استفاده از یک بازتاب قادر به شناسایی کلیه مدهای فعال

سازه باشد.

انتظار می‌رود با استفاده از عملیات فیلتر کردن، بتوان بر مشکل اختلاط مودها در الگوریتم LMD غلبه کرد.

انتظار می‌رود با اصلاح الگوریتم SOBSS، بتوان از آن در حالتی که تعداد سنسورها از تعداد درجات آزادی کمتر است، برای شناسایی پارامترهای مودال سازه‌ها استفاده کرد.

انتظار می‌رود با اصلاح الگوریتم SOBSS بتوان تنها با استفاده از دو بازتاب از سازه، عملیات شناسایی پارامترهای مودال را انجام داد.

انتظار می‌رود الگوریتم SOBSS اصلاح شده را بتوان بر روی هر دو نوع بازتاب حاصل از ارتعاش آزاد سازه و هم‌چنین حاصل از ارتعاش محیطی اعمال کرد.

۱-۷- روش انجام تحقیق

در این پژوهش، پس از مرور روش‌های مرسوم در زمینه شناسایی سیستم، دو الگوریتم LMD و SOBSS مورد توجه قرار گرفته است. ابتدا چالش‌های موجود برای استفاده از الگوریتم‌های LMD و SOBSS در زمینه شناسایی سازه بررسی شده و سپس راه‌حل‌های مناسب جهت رفع این چالش‌ها پیشنهاد شده است. الگوریتم روش‌های پیشنهادی در نرم‌افزار متلب برنامه‌نویسی شده است. عملکرد هر یک از روش‌های پیشنهادی با چند شبیه‌سازی عددی مورد ارزیابی قرار گرفته و نهایتاً از مدل‌های آزمایشگاهی موجود، برای صحت‌سنجی نتایج استفاده شده است.

۱-۸- جمع‌بندی و پیکربندی رساله

این رساله در شش بخش تنظیم شده است. در فصل اول مقدمه‌ای از پژوهش آورده شد و نوآوری،

سؤال‌ها و فرض‌های تحقیق بیان شد. در فصل دوم، مروری بر مهم‌ترین روش‌های شناسایی در حوزه زمان انجام خواهد شد و فرمول‌بندی، مزایا و محدودیت‌های هر روش به تفکیک ارائه خواهد شد. فصل سوم به اصول و مبانی شناسایی سیستم‌های سازه‌ای به‌همراه تکنیک‌های پردازش سیگنال و عملیات ماتریسی مورد نیاز برای روش‌های پیشنهادی اختصاص دارد. در فصل چهارم، روش پیشنهادی اول مبتنی بر الگوریتم LMD تشریح خواهد شد و عملکرد آن توسط چند شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در فصل پنجم، روش پیشنهادی دوم مبتنی بر الگوریتم BSS مطرح خواهد شد و با انجام مطالعات پارامتریک مزیت‌های آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نهایتاً در فصل ششم، جمع‌بندی مطالب و مقایسه دو روش پیشنهادی انجام خواهد شد و پس از ارائه مهم‌ترین نتایج این رساله، پیشنهاداتی برای مطالعات آتی ارائه می‌شود.

فصل دوّم: مروری بر روش‌های مرسوم شناسایی سازه

۲- مروری بر روش‌های مرسوم شناسایی سازه

۲-۱- پیشگفتار

تاکنون روش‌های مختلفی در حوزه شناسایی سیستم توسط پژوهشگران مختلف پیشنهاد شده است که هر یک از آنها دارای نقاط ضعف و قوت متفاوتی هستند. برخی از روش‌های شناسایی سیستم در حوزه زمان، برخی در حوزه فرکانس و برخی نیز در حوزه زمان-فرکانس تعریف شده‌اند. با توجه به مشکلاتی که با روش‌های حوزه فرکانس همراه است (از قبیل هدررفتگی^۱، بدنمایی^۲ و ...)، و از طرف دیگر پیشرفت‌هایی که امروزه در زمینه پردازش سیگنال صورت گرفته است، محققین بیشتر به سمت روش‌های حوزه زمان و یا حوزه زمان-فرکانس سوق پیدا کرده‌اند. در ادامه این فصل تعدادی از روش‌های شناسایی سیستم به همراه آخرین پیشرفت‌های آنها به تفکیک تشریح می‌شوند.

۲-۲- روش حوزه زمان ابراهیم (ITD)

روش حوزه زمان ابراهیم^۳ [۳] معمولاً به عنوان اولین روش فرمول‌بندی شده در شناسایی سیستم‌های تک‌ورودی-تک‌خروجی شناخته می‌شود. در این روش بازتاب‌های ارتعاش آزاد سازه در مودهای مختلف از روی بازتاب کلی سازه به بار ضربه ساخته شده و سپس مقادیر فرکانس‌های طبیعی

¹ Leakage

² Aliasing

³ Ibrahim Time Domain (ITD)

و میرایی هر مود از روی منحنی ارتعاش آزاد آن مود محاسبه می‌شود.

معادله حاکم بر ارتعاش آزاد یک سیستم چند درجه آزادی خطی تحت بردار تحریک ورودی $F(t)$ به صورت زیر می‌باشد [۴]:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = F(t) \quad (1-2)$$

که در آن M ، C و K به ترتیب معرف ماتریس‌های جرم، میرایی ویسکوز و سختی سازه و $x(t)$ بردار تغییر مکان‌های سازه می‌باشند. همچنین بالانویس «نقطه» روی بردارها معرف مشتق آنها نسبت به زمان است. جواب معادله دیفرانسیل فوق را می‌توان در حالت ارتعاش آزاد ($F(t) = 0$) به صورت زیر نوشت.

$$x = \Psi e^{\lambda t} \quad (2-2)$$

که در آن Ψ و λ به ترتیب معرف ماتریس بردارهای ویژه و مقادیر ویژه معادله مشخصه متناظر با رابطه (۱-۲) می‌باشند. با نوشتن بازتاب سیستم برای دو بازه زمانی مناسب به صورت $[t \quad l]$ و $[t + \Delta t \quad l + \Delta t]$ به فرم رابطه (۲-۲) و مقایسه این روابط با یکدیگر، می‌توان نشان داد که رابطه (۳-۲) بین این بازتاب‌ها برقرار است.

$$\tilde{S}x = \hat{x} \quad (3-2)$$

که در آن، x و $\hat{x}$ به ترتیب بازتاب ارتعاش آزاد سیستم در بازه‌های زمانی $[t \quad l]$ و $[t + \Delta t \quad l + \Delta t]$ می‌باشند و ماتریس $\tilde{S}$ ، ماتریس سیستم است. بنابراین، با حل معادله (۳-۲) ماتریس سیستم و از تجزیه مقدار ویژه این ماتریس، پارامترهای مودال سیستم قابل محاسبه می‌باشند [۳]. در روش ITD برای شناسایی یک مدل از مرتبه m حداقل باید بازتاب سیستم در $2m$ درجه آزادی اندازه‌گیری شود. برای رفع این محدودیت، روش دیگری مشابه روش ITD توسط زاقلول^۱ [۵] پیشنهاد شده است که در آن عملیات شناسایی تنها با استفاده از یک بازتاب واحد، که در بازه‌های

^۱ S. A. Zaghlool

زمانی مختلف نمونه‌برداری شده است، قابل انجام است. روش اولیه ITD صرفاً برای بازتاب‌های ناشی از ارتعاش آزاد سازه کاربرد داشت. با این وجود، در پژوهش دیگری که اخیراً پیشنهاد شده، روش ITD برای حالتی که سازه تحریک هارمونیک قرار می‌گیرد، نیز توسعه داده شده است [۶]. ملک جعفریان و همکاران [۷] نیز تکنیکی را جهت بهبود عملکرد روش ITD برای شناسایی مودهای نزدیک به هم پیشنهاد داده‌اند.

۲-۳- الگوریتم تحقق ویژه سیستم (ERA)

الگوریتم تحقق ویژه سیستم یک تکنیک حوزه زمان است که برای تعیین پارامترهای مودال و کاهش مدل سیستم‌های دینامیکی از روی داده‌های ورودی-خروجی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این الگوریتم اطلاعات یک سیستم دینامیکی را از روی مدل ریاضی آن در فرم فضای حالت^۱ گسسته برآورد می‌کند [۸].

۲-۳-۱- حل معادله ارتعاش سیستم چند درجه آزادی در فضای حالت

با تعریف بردار $\tilde{\mathbf{z}}$ به صورت $\tilde{\mathbf{z}}(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), \dot{x}_1(t), \dot{x}_2(t), \dots, \dot{x}_n(t)\}^T$ و با توجه به رابطه (۲-۱)، فرم معادلات ارتعاش سیستم در فضای حالت به صورت رابطه (۲-۴) بدست خواهند آمد.

$$\begin{aligned}\tilde{\dot{\mathbf{z}}}(t) &= \tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{z}}(t) + \tilde{\mathbf{B}}\mathbf{F}(t) \\ \tilde{\mathbf{y}}(t) &= \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{z}}(t)\end{aligned}\tag{۲-۴}$$

در این معادلات $\tilde{\mathbf{y}}(t)$ بردار بازتاب موردنظر است که توسط ماتریس $\tilde{\mathbf{C}}$ از بردار حالت $\tilde{\mathbf{z}}(t)$ استخراج می‌شود. $\tilde{\mathbf{A}}$ ماتریس سیستم و $\tilde{\mathbf{B}}$ ماتریس تحریک ورودی هستند و به صورت زیر تعریف می‌شوند:

¹ State space

$$\tilde{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} [\mathbf{0}]_{n \times n} & [\mathbf{I}]_{n \times n} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} [\mathbf{0}]_{n \times n} \\ \mathbf{M}^{-1} \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{z}}(t) = \begin{Bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \dot{\mathbf{x}}(t) \end{Bmatrix} \quad (5-2)$$

برای حالت گسسته که از داده‌ها در بازه‌های زمانی برابر Δt ، k بار نمونه‌برداری شده است،

معادلات فضای حالت به صورت بازگشتی مطابق رابطه (۶-۲) نشان داده می‌شوند:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{z}}(k+1) &= \bar{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{z}}(k) + \bar{\mathbf{B}}\mathbf{F}(k) \\ \tilde{\mathbf{y}}(k) &= \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{z}}(k) \end{aligned} \quad (6-2)$$

که در آن ماتریس‌های $\bar{\mathbf{A}}$ و $\bar{\mathbf{B}}$ برابرند با:

$$\bar{\mathbf{A}} = e^{\tilde{\mathbf{A}}(k\Delta t)}, \quad \bar{\mathbf{B}} = \int_0^{\Delta t} e^{\tilde{\mathbf{A}}\tau} \tilde{\mathbf{B}} d\tau \quad (7-2)$$

در مسائل تحقق سیستم، هدف ساخت ماتریس‌های $\bar{\mathbf{A}}$ ، $\bar{\mathbf{B}}$ و $\tilde{\mathbf{C}}$ با استفاده از اندازه‌گیری‌های موجود، $\tilde{\mathbf{y}}(t)$ می‌باشد به طوری که سیستم تحقق یافته با ماتریس‌های فوق بتواند بازتاب‌های موجود را بازتولید کند. باید توجه داشت که برای هر سیستم تعداد نامحدودی تحقق وجود دارد که همگی بازتاب یکسانی را برای سیستم، تحت تحریک مشخص، پیش‌بینی می‌کنند.

می‌توان نشان داد که بازتاب یک سیستم تحت بار ضربه و با توجه به روابط (۶-۲)، توسط رابطه (۸-۲) تعیین می‌شود.

$$\tilde{\mathbf{y}}(k) = \mathbf{h}(k) = \tilde{\mathbf{C}}\bar{\mathbf{A}}^{k-1}\bar{\mathbf{B}} \quad (8-2)$$

تابع فوق پارامتر مارکوف^۱ سیستم نامیده می‌شود. در واقع بازتاب سیستم در فضای حالت گسسته به یک بار ضربه واحد، پارامترهای مارکوف را تعریف می‌کنند.

۲-۳-۲ استفاده از الگوریتم ERA

برای استفاده از الگوریتم ERA ابتدا باید توابع بازتاب ضربه^۲ یا همان پارامترهای مارکوف سیستم را با توجه به داده‌های ورودی و خروجی سیستم محاسبه کرد. این کار هم در فضای زمان قابل انجام

^۱ Markov parameter

^۲ Impulse Response Functions (IRFs)

است و هم با انتقال سیستم به یک مبنای دیگر، مانند استفاده از تبدیل فوریه یا تبدیل موجک^۱ [۲].
در الگوریتم ERA با استفاده از بازتاب سیستم در فضای زمان گسسته به بار ضربه واحد، h ، ماتریس
هنکل^۲ به فرم زیر تشکیل می‌شود:

$$\mathbf{H}(k-1) = \begin{bmatrix} h(k) & h(k+1) & \dots & h(k+c) \\ h(k+1) & h(k+2) & \dots & h(k+c+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h(k+r) & h(k+r+1) & \dots & h(k+c+r) \end{bmatrix} \quad (9-2)$$

که در آن، r و c مقادیر ثابتی هستند که اندازه ماتریس هنکل را تعیین می‌کنند. با جایگذاری $k = I$ در این رابطه و با استفاده از تعریف پارامترهای مارکوف (رابطه (۸-۲)) داریم:

$$\mathbf{H}(0) = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}\bar{\mathbf{B}} & \tilde{\mathbf{C}}\bar{\mathbf{A}}\bar{\mathbf{B}} & \dots & \tilde{\mathbf{C}}\bar{\mathbf{A}}^{c-1}\bar{\mathbf{B}} \\ \tilde{\mathbf{C}}\bar{\mathbf{A}}\bar{\mathbf{B}} & \tilde{\mathbf{C}}\bar{\mathbf{A}}^2\bar{\mathbf{B}} & \dots & \tilde{\mathbf{C}}\bar{\mathbf{A}}^c\bar{\mathbf{B}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{\mathbf{C}}\bar{\mathbf{A}}^{r-1}\bar{\mathbf{B}} & \tilde{\mathbf{C}}\bar{\mathbf{A}}^r\bar{\mathbf{B}} & \dots & \tilde{\mathbf{C}}\bar{\mathbf{A}}^{r+c-2}\bar{\mathbf{B}} \end{bmatrix} \quad (10-2)$$

از طرفی با استفاده از تکنیک تجزیه مقدار منفرد (SVD) برای ماتریس $\mathbf{H}(0)$ داریم:

$$\mathbf{H}(0) = \bar{\mathbf{R}}\bar{\mathbf{\Psi}}\bar{\mathbf{S}}^T \quad (11-2)$$

که در آن $\bar{\mathbf{\Psi}}$ یک ماتریس قطری است که مقادیر منفرد ماتریس $\mathbf{H}(0)$ روی آن قرار گرفته‌اند و ماتریس‌های $\bar{\mathbf{R}}$ و $\bar{\mathbf{S}}$ مربعی و متعامدند. با حذف ردیف‌ها و ستون‌های متناظر با مقادیر ویژه صفر و یا خیلی کوچک که توسط مودهای محاسباتی تولید شده‌اند، ماتریس‌های $\bar{\mathbf{\Psi}}_N$ ، $\bar{\mathbf{R}}_N$ و $\bar{\mathbf{S}}_N$ به دست می‌آیند که در آن N همان مرتبه سیستم است. اکنون با توجه به قطری بودن ماتریس $\bar{\mathbf{\Psi}}_N$ می‌توان نوشت:

$$\mathbf{H}(0) = (\bar{\mathbf{R}}_N \bar{\mathbf{\Psi}}_N^{\frac{1}{2}})(\bar{\mathbf{\Psi}}_N^{\frac{1}{2}} \bar{\mathbf{S}}_N^T) \quad (12-2)$$

می‌توان نشان داد که یک تحقق سیستم با مرتبه حداقل به‌ازای مقادیر زیر برای ماتریس‌های $\bar{\mathbf{A}}$ ،

¹ Wavelet Transform (WT)

² Hankel matrix

$\tilde{\mathbf{C}}$ و $\bar{\mathbf{B}}$ بدست خواهد آمد.

$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{A}} &= \Psi_N^{-\frac{1}{2}} \bar{\mathbf{R}}_N^T \mathbf{H}(1) \bar{\mathbf{S}}_N \Psi_N^{-\frac{1}{2}} \\ \bar{\mathbf{B}} &= \Psi_N^{-\frac{1}{2}} \bar{\mathbf{S}}_N^T [\mathbf{I} \quad 0]_m \\ \tilde{\mathbf{C}} &= [\mathbf{I} \quad 0]_p^T \bar{\mathbf{R}}_N \Psi_N^{-\frac{1}{2}}\end{aligned}\tag{۱۳-۲}$$

که در آن $\mathbf{I}$ معرف ماتریس همانی و $\mathbf{0}$ یک ماتریس صفر با ابعاد مناسب هستند. اکنون با تجزیه مقدار ویژه ماتریس حالت تحقق یافته سیستم، می توان پارامترهای مودال سیستم را برآورد کرد. به طور خلاصه مراحل اصلی الگوریتم ERA به قرار زیر می باشند [۸]:

(۱) ساخت ماتریس هنکل $\mathbf{H}(0)$ با استفاده از بازتابهای موجود، مطابق رابطه (۹-۲)

(۲) تجزیه مقدار منفرد ماتریس هنکل $\mathbf{H}(0)$ (رابطه (۱۱-۲))

(۳) تعیین مرتبه مدل با بررسی مقادیر منفرد بدست آمده از مرحله قبل (رابطه (۱۲-۲))

(۴) ساخت تحقق سیستم با کمترین مرتبه با استفاده از روابط (۱۳-۲)

(۵) تجزیه مقدار ویژه سیستم و تعیین پارامترهای مودال

استفاده از الگوریتم ERA زمانی که مرتبه مدل از قبل معلوم نباشد منجر به تولید مودهای محاسباتی شود. علاوه بر این، نتایج شناسایی با این الگوریتم در حالتی که زمان نمونه برداری مناسب نباشد و یا در حالتی که شرایط اولیه غیر صفر باشند، قابل اعتماد نیستند. اخیراً تحقیقاتی جهت رفع اشکالات فوق و اصلاح الگوریتم ERA صورت گرفته است [۹، ۱۰].

۲-۴- روش شناسایی زیرفضای تصادفی

آورشی و مور^۱ [۱۱] جزء اولین کسانی بودند که یک الگوریتم شناسایی زیرفضای تصادفی^۲ (SSI) را برای استخراج پارامترهای مودال سازه‌ها، بر اساس مدل فضای حالت آن‌ها، پیشنهاد کردند. اساس کار روش SSI به این صورت است که ابتدا یک مدل ریاضی برای سازه مورد نظر تعریف می‌شود و سپس در طی چندین مرحله تکرار طوری کالیبره می‌شود که بازتاب‌های پیش‌بینی شده توسط مدل ریاضی با بازتاب‌های واقعی سازه، تا حد امکان، مطابقت پیدا کند. بنابراین، در این روش یک دانش اولیه در رابطه با مرتبه مدل مورد نیاز است. بازتاب‌های ثبت شده‌ای که جهت کالیبراسیون مدل ریاضی استفاده می‌شوند، می‌توانند حاصل از ارتعاش اجباری تصادفی یا ارتعاش آزاد باشد [۱۲]. در حالتی که داده‌ها از ارتعاش اجباری تصادفی به دست آمده‌اند، برای راحتی فرض می‌شود که نیروهای خارجی مجهول، سیگنال‌های تصادفی ناهمبسته‌اند. خروجی‌ها به صورت یک سری بردارهای زمان گسسته n بعدی هستند (n تعداد بازتاب اندازه‌گیری شده یا تعداد سنسورها) که با $\tilde{\mathbf{y}}_k = \tilde{\mathbf{y}}(t_k)$ نمایش داده می‌شوند. مدل فضای حالت تصادفی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{z}}_{k+1} &= \tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{z}}_k + \tilde{\mathbf{w}}_k \\ \tilde{\mathbf{y}}_k &= \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{z}}_k + \tilde{\mathbf{v}}_k\end{aligned}\quad (۱۴-۲)$$

که در آن $\tilde{\mathbf{z}}_k$ بردار حالت سیستم در لحظه t_k ؛ $\tilde{\mathbf{w}}_k$ و $\tilde{\mathbf{v}}_k$ به ترتیب معرف نویز سیستم و نویز اندازه‌گیری در لحظه زمانی t_k هستند. ماتریس‌های $\tilde{\mathbf{A}}$ و $\tilde{\mathbf{C}}$ به ترتیب ماتریس‌های حالت و خروجی سیستم نامیده می‌شوند و رفتار دینامیکی سیستم را به طور کامل توصیف می‌کنند.

روابط (۱۴-۲) تنها برای سیستم‌های خطی تغییرناپذیر با زمان قابل استفاده هستند. علاوه بر این، تنها راه موجود برای اطمینان از اینکه الگوریتم SSI یک مدل بهینه از فضای حالت سیستم را نتیجه

^۱ P. V. Overschee & B. D. Moor

^۲ Stochastic Subspace Identification (SSI)

دهد، این است که بازتاب‌های اندازه‌گیری شده سیستم $(\tilde{\mathbf{y}}_k)$ ، یک تحقق از یک فرآیند تصادفی گوسی با میانگین صفر باشد. به این ترتیب، $\tilde{\mathbf{z}}_k$ ، $\tilde{\mathbf{w}}_k$ و $\tilde{\mathbf{v}}_k$ همگی فرآیندهای تصادفی با توزیع گوسی خواهند بود و علاوه بر این $\tilde{\mathbf{w}}_k$ و $\tilde{\mathbf{v}}_k$ ، نویز گوسی سفید^۱ با میانگین صفر هستند.

الگوریتم SSI هم با استفاده مستقیم از بازتاب‌های سیستم^۲ (SSI-DATA) و هم با استفاده از کوواریانس این بازتاب‌ها^۳ (SSI-COV) قابل انجام است. در ادامه فرمول‌بندی روش SSI-COV تشریح خواهد شد [۱۳]. پس از تعیین یک مدل ریاضی مناسب برای سیستم و فرض اولیه برای مرتبه آن، باید ماتریس تاپلیتس قطعه‌ای^۴ را با استفاده از حاصلضرب اندازه‌گیری‌های آینده (پیش‌بینی شده) در ترانزاده اندازه‌گیری‌های گذشته (موجود) محاسبه کرد. یعنی:

$$\mathbf{T}_{1/i} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_i & \mathbf{R}_{i-1} & \dots & \mathbf{R}_1 \\ \mathbf{R}_{i+1} & \mathbf{R}_i & \dots & \mathbf{R}_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{R}_{2i-1} & \mathbf{R}_{2i-2} & \dots & \mathbf{R}_i \end{bmatrix} = \mathbf{Y}_f (\mathbf{Y}_p)^T \quad (۱۵-۲)$$

که در آن، $\mathbf{Y}_f$ و $\mathbf{Y}_p$ به ترتیب معرف اندازه‌گیری‌های آینده (پیش‌بینی) و گذشته (موجود) هستند. $\mathbf{R}_i$ کوواریانس بازتاب‌های خروجی با تأخیر زمانی i است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{R}_i = E[\tilde{\mathbf{y}}_k \tilde{\mathbf{y}}_{k-i}^T] = \tilde{\mathbf{C}} \tilde{\mathbf{A}}^{i-1} \tilde{\mathbf{G}} \quad (۱۶-۲)$$

که در آن، $\tilde{\mathbf{G}} = E[\tilde{\mathbf{z}}_{k+1} \tilde{\mathbf{y}}_k^T]$ ماتریس کواریانس بردار حالت سیستم مرحله بعد و بازتاب‌های موجود می‌باشد. می‌توان نشان داد، ماتریس تاپلیتس رابطه (۱۵-۲) به صورت حاصلضرب ماتریس مشاهده‌پذیری^۵ $\mathbf{O}_i$ در برعکس شده ماتریس کنترل‌پذیری^۶ Γ_i قابل نمایش است.

¹ White Gaussian noise

² Data-driven SSI

³ Covariance-driven SSI

⁴ Block Toeplitz matrix

⁵ Observability matrix

⁶ Controllability matrix

$$T_{1/i} = \mathbf{O}_i \Gamma_i = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}} \\ \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{A}} \\ \vdots \\ \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{A}}^{i-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{A}}^{i-1}\tilde{\mathbf{G}} & \dots & \tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{G}} & \tilde{\mathbf{G}} \end{bmatrix} \quad (17-2)$$

از طرفی با تجزیه مقدار منفرد (SVD) ماتریس تاپلیتس داریم:

$$\mathbf{T}_{1/i} = \mathbf{U}\hat{\mathbf{S}}\mathbf{V}^T = (\mathbf{U}_1 \quad \mathbf{U}_2) \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{S}}_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{V}_1^T \\ \mathbf{V}_2^T \end{pmatrix} = \mathbf{U}_1 \hat{\mathbf{S}}_1 \mathbf{V}_1^T \quad (18-2)$$

که در آن $\mathbf{U}$ و $\mathbf{V}$ ماتریس‌های یک‌ه متعامد هستند و $\hat{\mathbf{S}}$ ماتریس قطری شامل مقادیر منفرد مثبت، از بزرگ به کوچک، می‌باشد. با مقایسه روابط (۱۶-۲) و (۱۷-۲) می‌توان نتیجه گرفت:

$$\mathbf{O}_i = \mathbf{U}_1 \hat{\mathbf{S}}_1^{1/2} ; \quad \Gamma_i = \hat{\mathbf{S}}_1^{1/2} \mathbf{V}_1^T \quad (19-2)$$

اکنون با استفاده از ماتریس مشاهده‌پذیری $\mathbf{O}_i$ ، ماتریس‌های سیستم ($\tilde{\mathbf{A}}$ و $\tilde{\mathbf{C}}$) قابل محاسبه هستند. فرآیند فوق آن‌قدر تکرار می‌شود که اختلاف بین بازتاب اندازه‌گیری شده سیستم و بازتاب پیش‌بینی شده توسط مدل حداقل شود (پیش‌بینی بهینه).

پس از به‌دست آمدن مقدار نهایی ماتریس $\tilde{\mathbf{A}}$ ، با تجزیه مقدار ویژه این ماتریس، دو ماتریس Λ و Φ حاصل می‌شوند که [۱۴]:

- ماتریس قطری Λ شامل مقادیر ویژه گسسته $\lambda_r = e^{\mu_r \Delta t}$ می‌باشد و از آن می‌توان قطب‌های سیستم را استخراج کرد.

- ماتریس Φ شامل بردارهای ویژه سیستم ϕ_r هستند.

بنابراین پارامترهای مودال به‌طور مستقیم به این دو ماتریس مرتبط می‌شوند. فرکانس‌های طبیعی

ω_r و نسبت‌های میرایی ζ_r (برای هر مود) می‌تواند به‌طور مستقیم از قطب‌های سیستم^۱ (μ_r) محاسبه شوند.

^۱ System poles

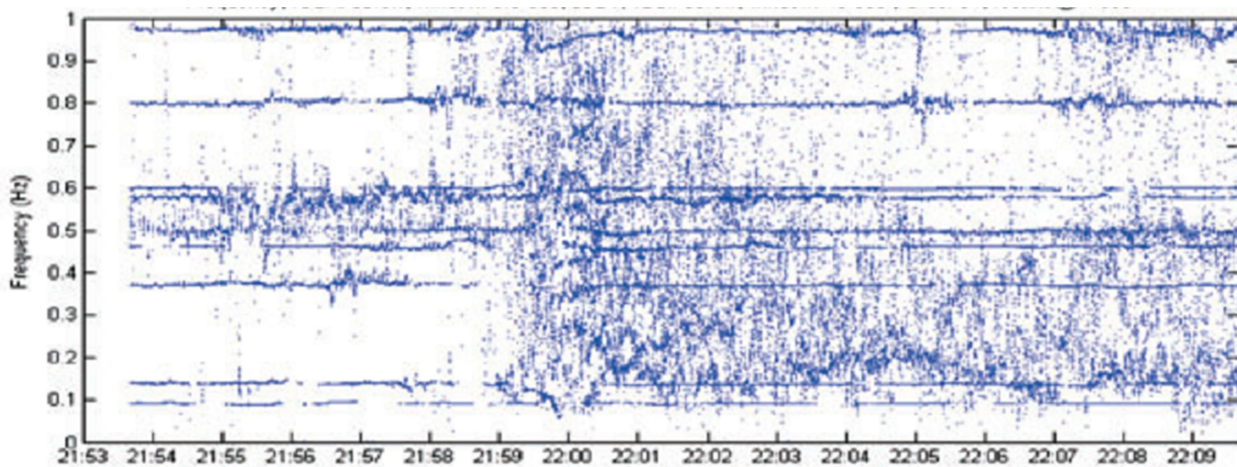
$$\mu_r = \frac{1}{\Delta t} \ln(\lambda_r) = \sigma_r + i \omega_r$$

$$\xi_r = \frac{-\sigma_r}{\sqrt{\omega_r^2 + \sigma_r^2}} \quad (20-2)$$

که در آن σ_r فاکتور میرایی^۱ نامیده می‌شود. بردار شکل r امین مود سازه (n_r) به صورت زیر بدست می‌آید:

$$n_r = \tilde{C} \phi_r \quad (21-2)$$

نمونه‌ای از نتایج شناسایی این الگوریتم برای فرکانس‌های طبیعی در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در سال‌های اخیر استفاده از الگوریتم SSI پیشرفت‌های زیادی داشته است که از آن جمله می‌توان به تشخیص دقیق‌تر مودهای واقعی از مودهای محاسباتی و توسعه این الگوریتم برای شناسایی سیستم‌های متغیر با زمان اشاره کرد [۱۵].



شکل ۱-۲- نمونه‌ای از فرکانس‌های شناسایی شده یک سازه (خطوط افقی)، توسط روش SSI، در محدوده ۰ تا ۱ هرتز [۱۳]

^۱ Damping factor

۲-۵- شناسایی سازه به روش تجزیه مود تجربی^۱ (EMD)

۲-۵-۱- معرفی الگوریتم EMD

این روش در واقع یک الگوریتم تازه توسعه یافته در زمینه پردازش سیگنال است. روش EMD که گاهی تحت عنوان تبدیل هیلبرت-هانگ^۲ نیز از آن یاد می شود [۱۶]، یک سیگنال را به یک سری توابع مودی ذاتی^۳ تجزیه می کند و سپس امکان استفاده از تبدیل هیلبرت^۴ را فراهم می کند. مزیت اصلی روش EMD این است که بدون ترک حوزه زمان توانایی تجزیه هر نوع سیگنال را به صورت سازگار و کارآمد داراست. یک IMF تابعی است که الزامات زیر را برآورده می کند:

الف) در کل مجموعه داده ها، تعداد اکستریم ها و تعداد نقاطی که نمودار محور زمان را قطع می کند (صفرها) باید با یکدیگر برابر باشند یا حداکثر یک واحد اختلاف داشته باشند.

ب) در هر نقطه، مقدار میانگین پوش تعریف شده توسط ماکزیمم های محلی و پوش تعریف شده برای مینیمم های محلی، برابر صفر باشد.

فرآیند استخراج توابع مودی ذاتی از سیگنال اصلی، غربالگری^۵ نامیده می شود. فرض کنید $x(t)$ سیگنالی است که قرار است تجزیه شود، فرآیند غربالگری شامل مراحل ساده زیر می باشد:

- ۱- تمام اکستریم های محلی داده های مورد آزمایش مشخص می شوند.
- ۲- نقاط ماکزیمم موضعی توسط خطوط منحنی وار درجه سه به یکدیگر متصل می شوند تا پوش فوقانی ساخته شود.

۳- گام قبل برای نقاط مینیمم محلی نیز انجام می شود تا پوش تحتانی نیز ساخته شود.

حال اگر میانگین دو پوش را m_I بنامیم، اختلاف بین سیگنال اصلی و m_I ، اولین مولفه (h_I) خواهد

¹ Empirical Mode Decomposition (EMD)

² Hilbert-Hung Transform (HHT)

³ Inherent Modal Functions (IMFs)

⁴ Hilbert Transform (HT)

⁵ Sifting

بود. به‌طور ایده‌آل h_I باید شرایط لازم برای IMF بودن را ارضا کند؛ زیرا با توجه به روند فوق ساختار h_I به‌گونه‌ای است که متقارن است و تمام ماکزیمم‌های آن مثبت و تمام مینیمم‌هایش منفی است. با این وجود، وقتی اولین بار عمل غربال‌گری انجام می‌شود، ممکن است یک سری نقاط دیگر نیز تبدیل به ماکزیمم محلی شوند. اکسترمم‌های جدیدی که در اثر این فرآیند تولید می‌شوند، حاکی از این است که موده‌های واقعی در سعی اول از بین رفته‌اند. در مراحل بعدی فرآیند غربال‌گری، از h_I به‌عنوان داده اصلی استفاده می‌شود و به همین ترتیب فرآیند ادامه می‌یابد تا اولین IMF به‌دست آید. پس از آن، IMF استخراج شده، از سیگنال اصلی $x(t)$ کسر می‌شود و مجدداً عملیات تجزیه داده‌ها ادامه می‌یابد. اگرچه با فرآیند غربال‌گری، فرکانس‌های طبیعی و میرایی‌های متناظر می‌توانند به‌طور مستقیم برآورد شوند ولی در عین حال استخراج تمام موده‌ها نیازمند داشتن اندازه‌گیری‌ها در تمام درجات آزادی می‌باشد.

در عمل برای تعیین تعداد گام‌هایی که فرآیند غربال‌گری برای یافتن یک IMF باید تکرار شود، از معیاری تحت عنوان «معیار توقف»^۱ استفاده می‌شود. براساس ملاکی که توسط هانگ و همکاران^۲ ارائه شده است، مجموع تفاضل‌ها به‌عنوان معیار توقف در نظر گرفته می‌شود [۱۶]:

$$SD_k = \sum_{t=0}^T \frac{|h_{k-1}(t) - h_k(t)|}{h_{k-1}^2(t)} \quad (22-2)$$

عملیات غربال‌گری برای یافتن یک IMF تا زمانی ادامه می‌یابد که SD_k از یک مقدار داده شده کوچکتر شود.

با توجه به مطالب فوق، تجزیه یک سیگنال $x(t)$ با روش EMD را می‌توان به فم ریاضی زیر نشان داد:

¹ Stoppage Criterion

² Huang et al.

$$x(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r_n(t) \quad (23-2)$$

که در آن c_j ها معرف توابع مودی ذاتی (IMF) و r_n سیگنال باقیمانده در انتهای عملیات تجزیه می‌باشند. در مواردی ممکن است فرآیند غربال‌گری منجر به تولید IMF هایی شود که دارای بیش از یک مؤلفه فرکانسی باشد. در چنین مواردی با استفاده از یک فیلتر میان‌گذر^۱ مناسب، می‌توان از اختلاط مودها جلوگیری کرد.

۲-۵-۲- کاربرد الگوریتم EMD در شناسایی پارامترهای مودال

روش EMD وقتی با تبدیل هیلبرت همراه شود، تحت عنوان تبدیل هیلبرت-هانگ نیز شناخته می‌شود. این تبدیل می‌تواند برای شناسایی سیستم‌های چند درجه آزادی تحت ارتعاش آزاد و یا تحریک اجباری به‌صورت نویز سفید، مورد استفاده قرار بگیرد. در حالت ارتعاش آزاد، با اعمال تبدیل هیلبرت بر روی IMF ها، می‌توان تاریخچه زمانی دامنه و زاویه فاز لحظه‌ای را به‌دست آورد و از آنجا با استفاده از روش حداقل مربعات، فرکانس‌های طبیعی و نسبت میرایی را برای هر بازتاب مودی محاسبه کرد.

به زبان ریاضی، پس از بدست آوردن IMF ها با عملیات غربال‌گری، بر روی هر IMF (که آن را با $c(t)$ نشان دادیم) ابتدا تبدیل هیلبرت با تعریف زیر اعمال می‌شود [۱۷]:

$$\tilde{c}(t) = \bar{H}[c(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{c(u)}{\pi(t-u)} du \quad (24-2)$$

سپس سیگنال تحلیلی $\hat{z}(t)$ به صورت زیر ساخته می‌شود:

$$\hat{z}(t) = c(t) + i\tilde{c}(t) = IA(t)e^{i \times IP(t)} \quad (25-2)$$

که در آن:

^۱ Band pass filter

$$IA(t) = |\hat{z}(t)| = \sqrt{c^2(t) + \tilde{c}^2(t)}$$

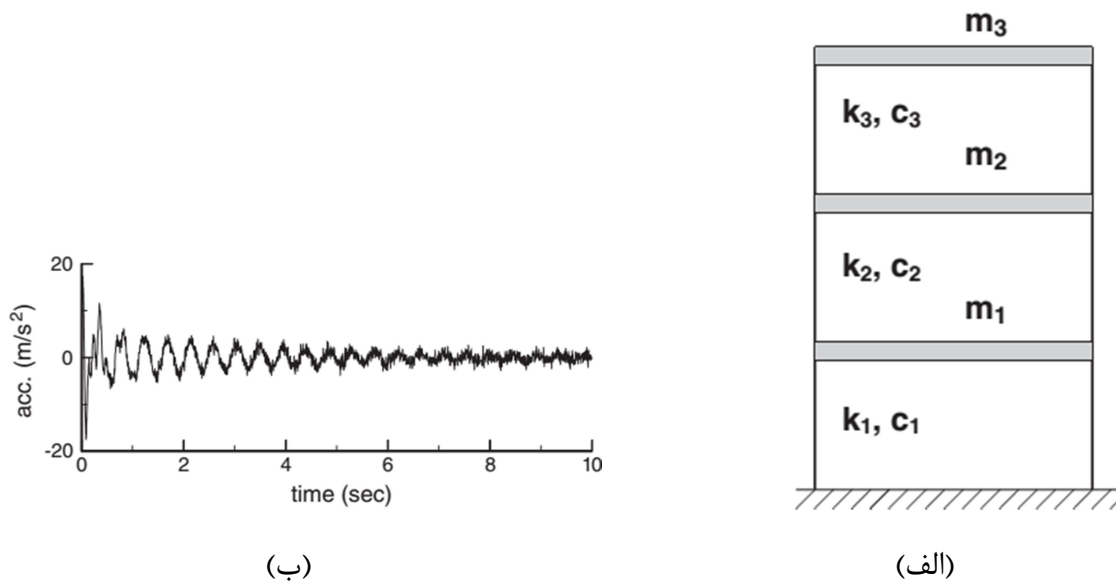
$$IP(t) = \arg(\hat{z}(t)) = \tan^{-1} \left(\frac{\tilde{c}(t)}{c(t)} \right) \quad (26-2)$$

$IA(t)$ و $IP(t)$ به ترتیب پوش دامنه و زاویه فاز لحظه‌ای سیگنال $c(t)$ هستند. فرکانس طبیعی میراشونده ω_d برای IMF موردنظر از رابطه ساده زیر به دست خواهد آمد:

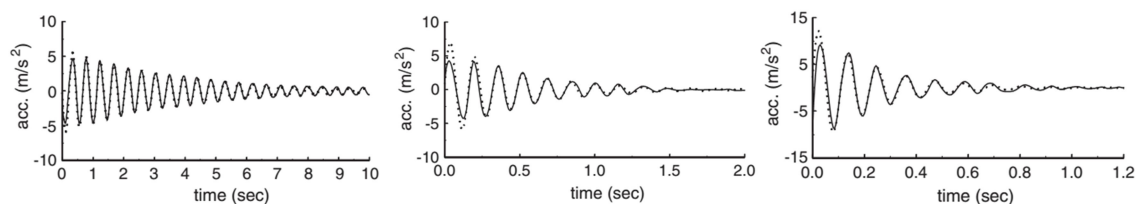
$$\omega_d(t) = \frac{d(IP)}{dt} \quad (27-2)$$

میرایی نیز می‌تواند از روی شیب منحنی $Ln(IA(t))$ در برابر زمان تعیین شود.

نمونه‌ای از نتیجه شناسایی پارامترهای مودال برای یک قاب برشی سه طبقه به روش EMD، به نقل از مرجع [۱۷] در شکل‌های شکل ۲-۲ و شکل ۳-۲ و خلاصه آن در جدول ۱-۲ آمده است.



شکل ۲-۲- (الف) شکل سازه مورد بررسی. (ب) بازتاب ثبت شده در طبقه سوم به همراه نویز [۱۷]



شکل ۲-۳- بازتاب های مودی شناسایی شده به روش EMD؛ از چپ به راست: مود اول، مود دوم، مود سوم [۱۷]

جدول ۲-۱- مقایسه نتایج حاصل از شناسایی به روش EMD با مقادیر تئوریک [۱۷]

مقادیر تئوریک	مقادیر شناسایی شده ($R_{pi} = 0\%$)		مقادیر شناسایی شده ($R_{pi} = 5\%$)	
	نسبت میرایی (%)	فرکانس طبیعی (Hz)	نسبت میرایی (%)	فرکانس طبیعی (Hz)
شماره مود				
1	2.0	2.22	1.9	2.21
2	5.6	6.22	5.5	6.19
3	8.1	8.94	7.6	8.94

اگرچه جدول فوق حاکی از دقت قابل قبول روش EMD برای شناسایی سیستم است ولی همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، این روش برای شناسایی کامل سیستم و محاسبه اشکال مودی، نیازمند بازتاب‌های اندازه‌گیری شده در تمام درجات آزادی می‌باشد. توسعه این الگوریتم برای حالتی که سازه دارای مودهای مختلط باشد در مرجع [۱۸] ارائه شده است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شده، یکی از مشکلات اساسی در مسیر استفاده از روش HHT برای شناسایی سازه‌ها، پدیده اختلاط موده‌هاست. در ادامه برخی از پیشرفت‌های اخیر این الگوریتم در زمینه حذف پدیده اختلاط موده‌ها، به‌طور خلاصه آمده است.

چن و فنگ^۱ با استفاده از مفهوم پدیده ضربان^۲ امواج، روشی را جهت بهبود عملکرد الگوریتم EMD و کاهش اثرات انتهایی سیگنال پیشنهاد کردند [۱۹]. پژوهشگران مختلفی استفاده از تکنیک افزودن

^۱ Y. Cheng and M. Q. Feng

^۲ Beating phenomenon

نویز مصنوعی به داده‌ها را جهت حذف پدیده اختلاط مودها در الگوریتم EMD مورد بررسی قرار داده‌اند [۲۰-۲۲]. تانگ و همکاران^۱ استفاده از نسخه اصلاح شده الگوریتم جداسازی ناپیدای منابع^۲ (BSS) را برای حذف پدیده اختلاط مودها در الگوریتم EMD پیشنهاد کردند [۲۳]. همچنین ترکیب الگوریتم HHT با سایر تکنیک‌ها مانند SSI، تکنیک تحریک طبیعی^۳ (NExT) و تکنیک کاهش تصادفی^۴ (RDT) و مقایسه نتایج در زمینه شناسایی پارامترهای مودال و شناسایی آسیب، توسط هرکدام از این روش‌های ترکیبی، در مرجع [۲۴] آمده است.

۲-۶- روش‌های شناسایی مبتنی بر جداسازی ناپیدای منابع (BSS)

۲-۶-۱- معرفی الگوریتم BSS

جداسازی ناپیدای سیگنال‌ها (BSS) عبارت است از بازیابی سیگنال‌های مشاهده نشده یا همان «منابع» از روی ترکیباتی از آنها که مشاهده شده‌اند. معمولاً مشاهدات از طریق خروجی مجموعه‌ای از سنسورها، که هر یک ترکیبات مختلفی از سیگنال‌های منبع را دریافت کرده‌اند، بدست می‌آیند. صفت «ناپیدا» بر این حقیقت تأکید دارد که: (۱) سیگنال‌های منبع مشاهده نمی‌شوند و (۲) هیچ‌گونه اطلاعاتی درباره نحوه ترکیب سیگنال‌ها وجود ندارد. در واقع در مواردی که هیچ‌گونه اطلاعات اولیه‌ای درباره نحوه انتقال سیگنال‌ها از منبع به سنسورها موجود نیست، استفاده از این روش اجتناب‌ناپذیر است. نبود اطلاعات قبلی درباره نحوه ترکیب با فرض استقلال آماری^۵ سیگنال‌های منبع جبران می‌شود. اگرچه این فرضیه به لحاظ آماری یک فرض قوی محسوب می‌شود ولی اغلب به لحاظ فیزیکی قابل پذیرش است. بنابراین از آنچه تحت عنوان صفت «ناپیدا» در این روش یاد می‌شود نباید برداشت

¹ Tang et.al.

² Blind Source Separation (BSS)

³ Natural Excitation Technique (NExT)

⁴ Random Decrement Technique (RDT)

⁵ Statistical independence

منفی کرد؛ چرا که ضعف اطلاعات قبلی دقیقاً همان نقطه قوت مدل BSS است [۲۵].

تکنیک‌های جداسازی ناپیدای سیگنال‌ها، اولین بار در اوایل دهه ۸۰ میلادی برای پردازش سیگنال در زمینه مدل‌سازی شبکه عصبی^۱ مطرح شد. در دو دهه اخیر مطالعات گسترده‌ای روی این مقوله شکل گرفته و زمینه کاربرد آن را در زیرشاخه‌های مختلف علم فراهم کرده است. این پیشرفت‌ها مطمئناً مرهون دو ویژگی ذاتی تکنیک BSS می‌باشد [۱۴]:

- اولاً هدف هر تکنیک BSS آشکارسازی ساختار نهفته در یک مجموعه از پدیده‌های مشاهده شده (متغیرهای تصادفی، اندازه‌گیری‌ها یا سیگنال‌ها)، می‌باشد. بازیابی سیگنال‌های اولیه (مشاهده نشده) از روی داده‌های اندازه‌گیری شده یک مسئله عمومی در بسیاری از حوزه‌هاست.
- ثانیاً در این تکنیک تعداد فرضیات اولیه اندکی در مورد سیگنال‌های اولیه مورد نیاز می‌باشد؛ در واقع واژه «ناپیدا» نیز حاکی از همین مطلب است.

در ساده‌ترین مدل BSS فرض می‌شود تعداد n_s منبع $\{s_1(t), \dots, s_{n_s}(t)\}$ و به همان تعداد سیگنال‌های ترکیبی مشاهده شده $\{x_1(t), \dots, x_{n_s}(t)\}$ وجود دارد. مدل خطی BSS به زبان ریاضی به صورت زیر می‌باشد.

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) \quad \text{یا} \quad x_i(t) = \sum_{j=1}^{n_s} a_{ij} s_j(t) \quad (2-28)$$

ماتریس $\mathbf{A}$ با مؤلفه‌های مجهول a_{ij} ، تحت عنوان ماتریس ترکیب^۲ شناخته می‌شود. البته در موارد کاربردی غالباً عکس مسئله فوق مطرح می‌شود، یعنی باید با استفاده از سیگنال‌های مشاهده شده، سیگنال‌های منبع و ماتریس ترکیب را برآورد کرد.

^۱ Neural Network

^۲ Mixing matrix

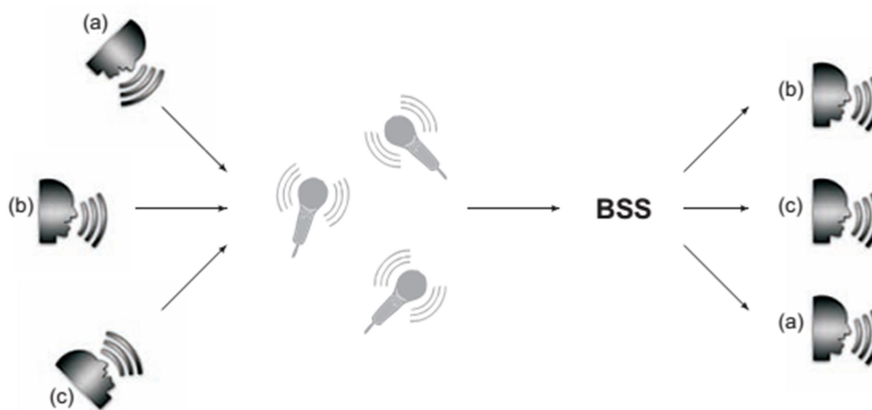
$$\mathbf{s}(t) = \mathbf{W}\mathbf{x}(t) \quad \text{یا} \quad s_i(t) = \sum_{j=1}^{n_s} w_{ij} x_j(t) \quad (29-2)$$

که در آن ماتریس $\mathbf{W}$ با مولفه‌های مجهول w_{ij} ، ماتریس تجزیه نامیده می‌شود و به لحاظ ریاضی معکوس ماتریس $\mathbf{A}$ محسوب می‌شود. از آنجا که هم ضرایب w_{ij} و هم $s_i(t)$ ها مجهول هستند، مسئله به‌طور قابل ملاحظه‌ای مشکل‌تر خواهد بود. علاوه بر این در اغلب موارد داده‌ها با نویز^۱ همراهند. در این صورت مدل عمومی BSS به فرم زیر خواهد بود:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{y}(t) + \mathbf{n}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (30-2)$$

که در آن $\mathbf{n}$ معرف نویز موجود در داده‌هاست. لازم به ذکر است با توجه به عمومیت تکنیک‌های BSS، این تکنیک‌ها محدود به متغیرهای تابع زمان نیستند؛ اگرچه در بحث شناسایی سازه، غالباً این گونه است.

هدف تکنیک BSS را می‌توان به زبان ساده با مثال معروف کوکتل پارتی^۲ تشریح کرد [۲۶]. فرض کنید در اتاقی چندین نفر به‌طور همزمان در حال صحبت هستند و در نقاط مختلف این اتاق، به تعداد افراد در حال صحبت، میکروفن‌هایی تعبیه شده است که سیگنال‌های صوتی موجود را ضبط می‌کنند (شکل ۴-۲).



شکل ۴-۲- تشریح مدل BSS با مثال کوکتل پارتی [۱۴]

¹ Noise

² Cocktail party

قاعدتاً سیگنال‌های ضبط شده توسط هر میکروفن، ترکیبی از سیگنال‌های صوتی ایجاد شده توسط افراد در حال صحبت، است. هنر BSS جدا کردن سیگنال‌های صوتی اولیه ایجاد شده توسط هر یک از افراد، از روی سیگنال‌های ترکیبی ضبط شده، است.

همان‌طور که پیشتر اشاره شد، فرض اساسی در روش‌های BSS این است که سیگنال‌های منابع به لحاظ آماری مستقل از یکدیگرند. این فرض اگرچه یک فرضیه قوی محسوب می‌شود ولی به لحاظ فیزیکی، به ویژه در مواردی که سیگنال‌ها از منابع مختلف نشأت می‌گیرند، یک فرض واقع‌گرایانه است.

در مسئله کوکتل پارتی، چنانچه الگوریتمی وجود داشته باشد که بتواند از سیگنال‌های ترکیبی، سیگنال‌هایی را استخراج کند که دو به دو استقلال آماری داشته باشند، آن‌گاه این سیگنال‌های مستقل باید توسط افراد مختلف ارسال شده باشند.

روش‌های متعددی برای جداسازی ناپیدای سیگنال‌ها در ادبیات فنی موجود است؛ تفاوت عمده این روش‌ها از یک طرف در توابع هدف نشان‌دهنده استقلال منابع و از طرف دیگر در الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده برای بهینه‌کردن تابع هدف موردنظر، می‌باشد. دو الگوریتم اساسی برای جداسازی ناپیدای منابع عبارتند از: ۱- تحلیل مؤلفه‌های مستقل^۱ (ICA)؛ ۲- جداسازی ناپیدای منابع با استفاده از آمار مرتبه دوم^۲ (SOBSS). در ICA بر اصل غیرگوسی بودن سیگنال‌های منبع، که مؤلفه‌های مستقل نامیده می‌شوند، تأکید می‌شود و از مفاهیم آماری چون کوتوز^۳، نکانتروپی^۴ به عنوان تابع هدف استفاده می‌شود. در مورد SOBSS، ساختار زمانی داده‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد و تنها با استفاده از آمار مرتبه دوم عملیات جداسازی سیگنال‌ها انجام می‌گیرد. لازم به ذکر است که فرمول‌بندی الگوریتم SOBSS برای شناسایی پارامترهای مودال سازه‌ها در فصل ۵ خواهد آمد،

¹ Independent Component Analysis (ICA)

² Second-Order Blind Identification (SOBI)

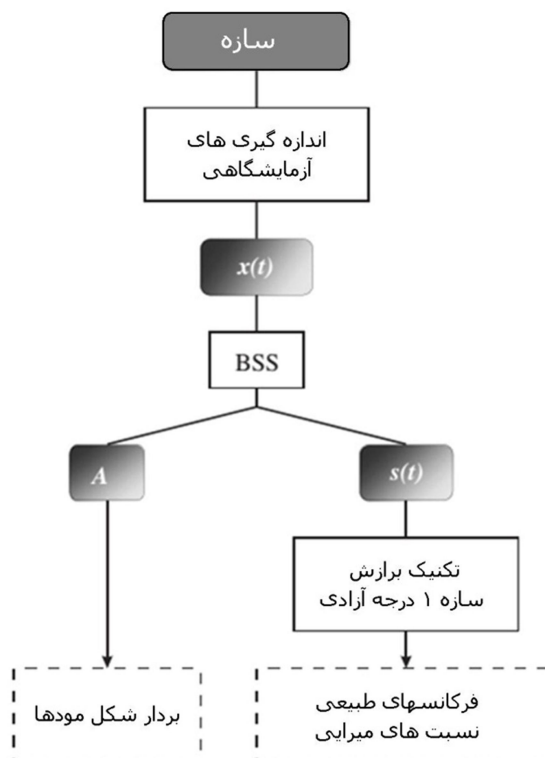
³ Kurtosis

⁴ Negentropy

بنابراین در اینجا از آوردن روابط این الگوریتم خودداری شده است.

۲-۶-۲- کاربرد الگوریتم BSS برای شناسایی سازه‌ها

بلوچرانی و همکاران^۱ استفاده از ساختار زمانی داده‌ها، به‌طور مشخص آمار مرتبه دوم، را به‌عنوان یک ابزار جهت جداسازی منابع مستقل پیشنهاد کردند [۲۷]. آنها هم‌چنین یک تکنیک قطری‌سازی همزمان را برای افزایش دقت الگوریتم معرفی کردند. کرشن و همکاران^۲ [۲۸] ایده استفاده از الگوریتم BSS را برای شناسایی پارامترهای مودال سازه‌ها مطرح کردند. آنها با در نظر گرفتن پاسخ سازه در فضای مودال، بازتاب‌های مودال سازه را به‌عنوان منابع مستقل مجازی و ماتریس شکل مودها را به‌عنوان ماتریس ترکیب در نظر گرفتند. فلوچارت استفاده از الگوریتم BSS برای شناسایی پارامترهای مودال سازه‌ها در شکل ۲-۵ به نمایش درآمده است.

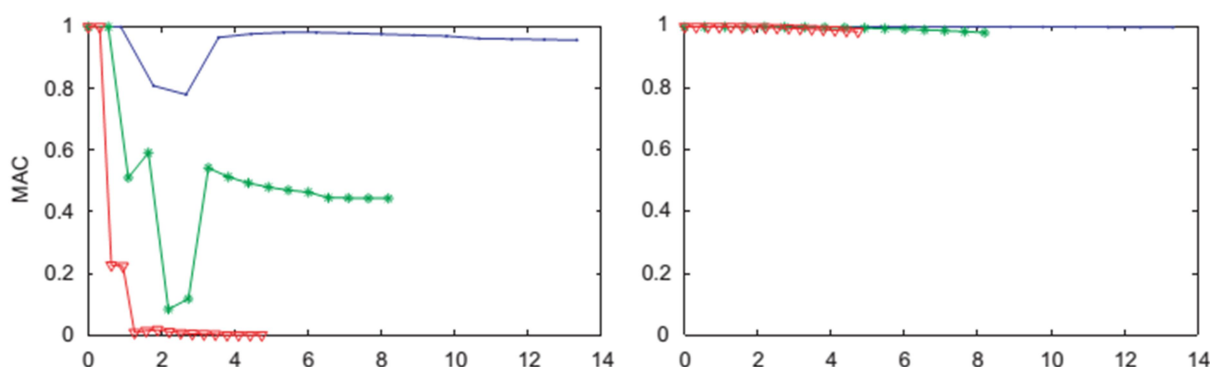


شکل ۲-۵- الگوریتم BSS برای شناسایی پارامترهای مودال سازه [۲۹]

^۱ Belouchrani et.al

^۲ Kerschen et.al

پانکلیت^۱ در رساله دکتری خود نشان داد [۱۴] که الگوریتم ICA حساسیت بالایی به وجود میرایی در بازتابها دارد، به طوری که با عبور میرایی از مرز حدود ۱٪ نتایج شناسایی با این الگوریتم چندان رضایت بخش نیست. از طرف دیگر، الگوریتم SOBSS حساسیت کمتری نسبت به میرایی از خود نشان داد و با توجه به ساده تر بودن الگوریتم آن، نسبت به الگوریتم ICA، از آن به بعد غالباً الگوریتم SOBSS برای شناسایی سازه‌ها مورد توجه پژوهشگران قرار گرفت. به عنوان نمونه، در شکل ۶-۲ تأثیر میزان میرایی بر دقت هریک از الگوریتم‌های ICA و SOBSS در شناسایی موده‌های یک سازه سه درجه آزادی نشان داده شده است.



شکل ۶-۲- تأثیر افزایش میرایی بر دقت شناسایی موده‌های یک سیستم سه درجه آزادی؛ نمودارهای سمت چپ: الگوریتم ICA؛ نمودارهای سمت راست: الگوریتم SOBSS [۲۹]

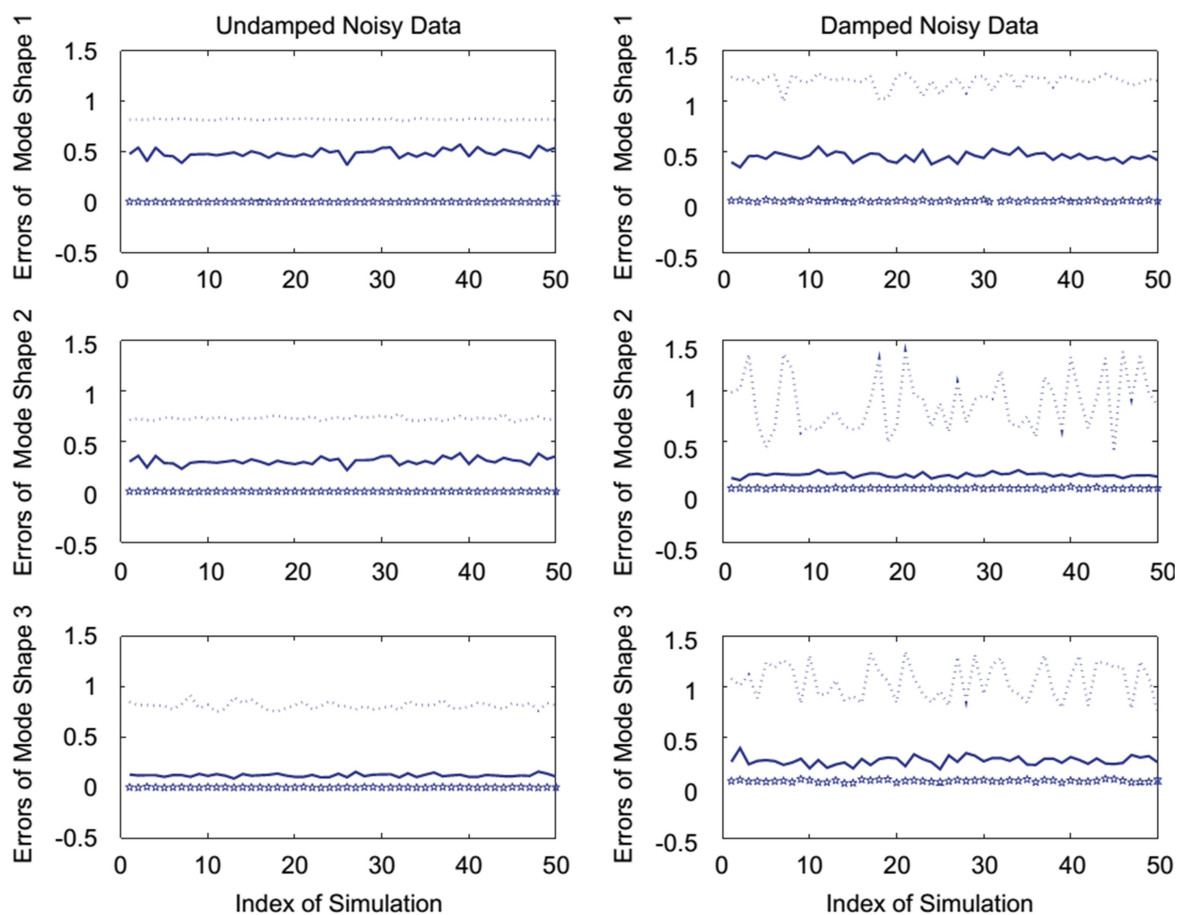
در این شکل، پارامتر معیار اطمینان مودی^۲ (MAC) که بر روی محور عمودی نمودارها نشان داده شده است، معیاری برای سنجش دقت شناسایی می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود عملکرد روش SOBSS در حضور میرایی به مراتب از روش ICA بهتر است.

در الگوریتم SOBSS برای جداسازی منابع از قطری‌سازی ماتریس کوواریانس سیگنال‌های خروجی استفاده می‌شود. به لحاظ تئوری قطری‌سازی ماتریس‌های کوواریانس برای دو تأخیر زمانی

^۱ F. Pancelete

^۲ Modal Assurance Criterion (MAC)

متفاوت، جهت تعیین ماتریس ترکیب کفایت می‌کند. با این وجود برای افزایش دقت برآورد ماتریس ترکیب و جداسازی بهتر منابع، قطری‌سازی هم‌زمان چندین ماتریس کوواریانس به ازای تأخیرهای زمانی مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقایسه بین خطای مودهای شناسایی شده یک سیستم سه درجه آزادی در حضور نویز، با استفاده از دو حالت مذکور و همچنین روش ITD، در شکل ۷-۲ نشان داده شده است.



شکل ۷-۲- مقایسه خطای شناسایی مودهای یک سازه سه درجه آزادی در حالت بدون میرایی (نمودارهای سمت راست) و با میرایی (نمودارهای سمت چپ). نقطه چین: روش ITD؛ خط توپر: الگوریتم SOBSS با قطری‌سازی دو ماتریس کوواریانس؛ ستاره: الگوریتم SOBSS با قطری‌سازی هم‌زمان چندین ماتریس کوواریانس [۳۰]

همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، قطری‌سازی هم‌زمان سبب پایداری نتایج الگوریتم

SOBSS در حضور نویز می‌شود. علاوه بر این، می‌توان ملاحظه کرد که نتایج شناسایی روش ITD در حضور میرایی پایدار نیست.

با این وجود همچنان استفاده از الگوریتم BSS در حوزه شناسایی سیستم با چالش‌هایی روبروست. مهم‌ترین این چالش‌ها عبارتند از:

- وجود میرایی متوسط به بالا (به‌ویژه میرایی غیرکلاسیک) در سازه‌ها سبب شکست اغلب روش‌های مبتنی بر BSS در شناسایی سیستم می‌شود.
- در مواردی که سازه دارای موده‌های نزدیک به هم باشد، بیشتر تکنیک‌های BSS قادر به جلوگیری از اختلاط موده‌ها نیستند.
- در اغلب روش‌های شناسایی مبتنی بر BSS، فرض می‌شود تعداد سنسورهای اندازه‌گیری بازتاب سازه، با تعداد کل درجات آزادی آن برابر است؛ این در حالی است که غالباً در مسائل عملی تعداد سنسورها از تعداد درجات آزادی کمتر است.
- در اغلب روش‌های شناسایی مبتنی بر BSS، فرض می‌شود که بازتاب‌های مودال سازه فرآیندهای تصادفی ایستا هستند. اگرچه در بسیاری از موارد این فرضیه صحیح است ولی در برخی موارد، مثلاً مواردی که بازتاب‌های سازه ناشی از زلزله‌های شدید باشند، برقرار نیست.
- در این روش‌ها معمولاً فرض می‌شود، نویز موجود در داده‌ها یک نویز سفید با توزیع گوسی، میانگین صفر و واریانس واحد است که با سیگنال‌های منبع نیز ناهمبسته است. مسلماً این شرایط در همه موارد برقرار نیستند.

یانگ و ناگاراچایا^۱ [۳۱] استفاده از تکنیک «تعقیب پیچیدگی»^۲ (CP) را برای مواردی که میرایی سازه بالاست، پیشنهاد کرده اند. در این روش بازتاب‌های ثبت شده می‌توانند ناشی از ارتعاش آزاد یا

^۱ Y. Yang and S. Nagarajaiah

^۲ Complexity Pursuit (CP)

یک تحریک تصادفی باشد؛ تنها محدودیت در این زمینه این است که تحریک نباید هارمونیک (با باند فرکانسی کوتاه) باشد. با استفاده از تکنیک CP امکان شناسایی سازه های با میرایی غیر کلاسیک و مواردی که مودها خیلی به هم نزدیک هستند به وجود می آید. شاید بتوان گفت مشکل اساسی این روش این است که همواره تعداد حداکثر مودهای شناسایی شده با تعداد بازتاب های اندازه گیری شده برابر است.

هازرا و ناراسیمان^۱ با افزودن یک مرحله پیش پردازش شامل ساخت توابع همبستگی متقابل^۲ بازتاب ها و تبدیل موجک ایستا^۳، عملکرد الگوریتم SOBSS استاندارد را برای جداسازی منابع بهبود بخشیدند [۳۲]. علاوه بر این، به دلیل استفاده از تبدیل موجک ایستا، روش پیشنهادی در برابر بازتاب های غیرایستا، مانند بازتاب های ثبت شده در حین زلزله، نیز عملکرد خوبی از خود نشان داد. با انتقال بازتاب ها به فضای زمان-فرکانس و نمایش پراکنده^۴ آن ها، می توان این روش را برای حالتی که تعداد بازتاب های موجود از تعداد درجات آزادی کمتر هستند، نیز به کار برد. توسعه این روش برای حالتی که تحریک خارجی یک سیگنال با باند فرکانسی محدود باشد (مثلاً نیروی خارجی هارمونیک)، در مرجع [۳۳] ارائه شده است. هم چنین با وزن دار کردن ماتریس های کوواریانس با توابع وزن مناسب، نتایج شناسایی با استفاده از بازتاب های ناشی از زلزله بهبود چشمگیری پیدا کرد [۳۴]. مقایسه بین نتایج شناسایی ساختمان فاکتور UCLA^۵ توسط الگوریتم های مختلف، تحت زلزله پارکفیلد^۶، در جدول ۲-۲ نشان داده شده است. همان طور که در این جدول ملاحظه می شود، الگوریتم مذکور نسبت به الگوریتم های SSI و SOBI، قادر به شناسایی تعداد مودهای بیشتری است.

¹ B. Hazra and S. Narasimhan

² Cross-correlation functions

³ Stationary Wavelet Transform (SWT)

⁴ Sparsity

⁵ UCLA Factor Building

⁶ Parkfield earthquake

جدول ۲-۲- مقایسه نتایج شناسایی ساختمان UCLA تحت زلزله پارکفیلد، با الگوریتم‌های مختلف [۳۴]

شماره	شکل مودها	ω (Hz)			ξ (%)		
		SSI	SOBI	روش پیشنهادی [۳۴]	SSI	SOBI	روش پیشنهادی [۳۴]
1	EW	0.467	0.501	0.461	4.8	4.3	4.5
2	NS	0.506	0.532	0.502	4.7	4.1	4.2
3	Torsion	0.681	0.695	0.692	5.8	4.5	4.4
4	EW	1.488	1.552	1.5	5.4	4.3	5.3
5	NS	1.665	1.521	1.612	4.9	4.0	4.4
6	Torsion	2.362	2.473	2.385	7.4	5.4	5.9
7	EW	2.677	2.735	2.671	4.4	3.4	3.8
8	NS	2.862	3.002	2.862	4.9	3.9	4.3
9	Torsion	3.826	3.990	3.812	4.6	3.7	4.1
10	EW	—	4.74	4.885	—	3.0	3.3
11	NS	—	4.79	4.982	—	3.5	3.9
12	Torsion	—	5.27	5.185	—	3.7	3.5
13	EW	—	5.65	5.350	—	2.7	3.1
14	NS	—	6.39	5.952	—	2.6	3.2
15	Torsion	—	6.56	7.752	—	3.0	3.5
16	EW	—	—	9.842	—	—	2.8
17	NS	—	—	10.251	—	—	2.7
18	Torsion	—	—	11.168	—	—	2.9
19	EW	—	—	11.785	—	—	2.3
20	NS	—	—	12.31	—	—	2.2
21	Torsion	—	—	13.251	—	—	2.4

امروزه تکنیک‌های متنوعی برای حل مسائل BSS در حالتی که تعداد سنسورها از تعداد درجات آزادی کمتر است، ارائه شده است. ابادرسا و همکاران استفاده از تکنیک عامل موازی را برای استخراج ماتریس بردارهای شکل مودها از تانسور کوواریانس‌های تأخیری مورد بررسی قرار دادند [۳۵]. آنها برای ایجاد پراکندگی در نمایش زمان-فرکانس بازتاب‌ها از یک تابع پنجره استفاده کردند. در این روش با تعداد محدودی از سنسورها می‌توان عملیات شناسایی سازه را انجام داد. جدول ۲-۳ تعداد سنسورهای مورد نیاز برای شناسایی سازه توسط این روش را نشان می‌دهد. در این پژوهش برای بسط بردار مودهای نسبی شناسایی شده به درجات آزادی اندازه‌گیری نشده از «روش بیز برای به‌روز رسانی مدل»^۱ استفاده شده است.

^۱ Bayesian model updating approach

جدول ۲-۳- تعداد مودهای قابل شناسایی سازه بر اساس تعداد سنسورها، در روش پیشنهادی در مرجع [۳۵]

تعداد سنسورها	(n)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
تعداد مودهای قابل شناسایی	(m)	2	4	6	10	15	20	26	33	41	49	59

توسعه این روش برای حالت میرایی غیرکلاسیک در مرجع [۳۶] ارائه شده است. از آنجا که در این حالت مودهای سازه به صورت مختلط ظاهر می‌شوند، برای استخراج منابع (در اینجا توابع خودهمبستگی بازتاب‌های مودال) از پیش ضرب سیگنال‌های بازتاب در معکوس ماتریس شکل مودهای مختلط با عملگر ضرب ختری-رائو^۱ استفاده شده است. قهاری و همکاران نیز یک روش مبتنی بر کلاستر کردن^۲ را برای شناسایی سازه‌ها از روی تعداد محدودی از بازتاب‌های سازه در حین زلزله پیشنهاد کرده‌اند [۳۷].

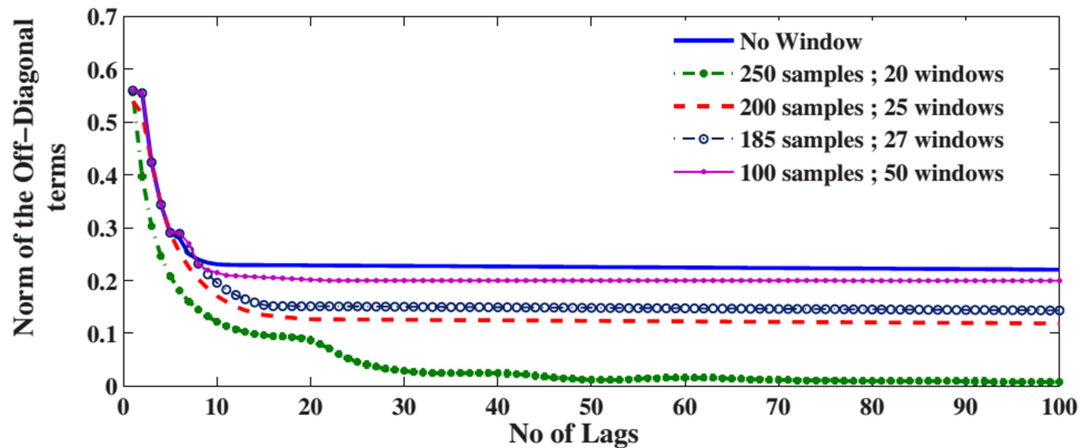
هزرا و همکاران روشی تحت عنوان «روش همبستگی متقابل اصلاح شده^۳ (MCC)» را پیشنهاد کردند که در آن به جای استفاده مستقیم از بازتاب‌های ثبت شده، الگوریتم SOBSS بر روی توابع همبستگی متقابل این بازتاب‌ها اعمال می‌شود [۳۸]. در این روش، بعد از ساخت توابع همبستگی متقابل، این سیگنال‌ها توسط پنجره‌هایی با طول مناسب قطعه‌قطعه می‌شوند و ماتریس‌های کوواریانس تأخیری در طول هر یک از این پنجره‌ها محاسبه می‌شود. این الگوریتم علاوه بر بهبود الگوریتم استاندارد SOBSS در مواجهه با میرایی‌های بالا، قابلیت استفاده بر روی بازتاب‌های غیرایستا (مانند بازتاب‌های ناشی از زلزله) را نیز دارا می‌باشد. نکته حائز اهمیت در این روش، انتخاب مناسب طول پنجره‌ها و تعداد تأخیرهای زمانی مورد استفاده برای تشکیل ماتریس‌های کوواریانس، می‌باشد. به عنوان مثال، برای یک سازه مشخص، خطای گام قطری‌سازی برای انتخاب‌های مختلف طول پنجره در شکل ۲-۸ نشان داده شده است. اگرچه در این سازه خاص، تعداد ۲۰ پنجره (معادل ۲۵۰ نمونه) و

¹ Khatri-Rao product

² Cluster-based

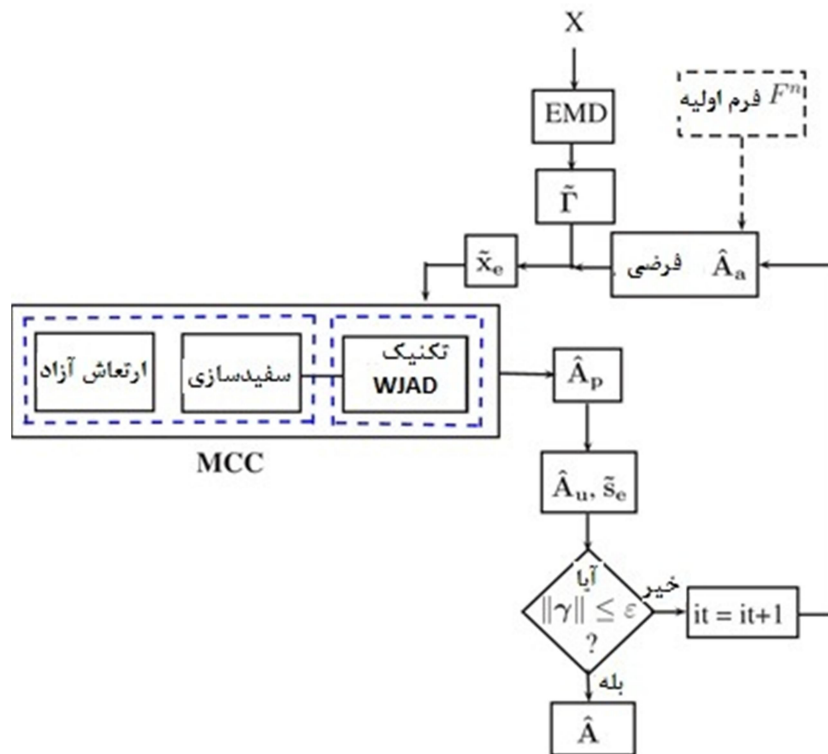
³ Modified Cross-Correlation method (MCC)

تعداد تأخیر ۵۰، انتخاب بهینه می‌باشند، ولی انتخاب این زوج پارامتر برای هر سازه نیاز به سعی و خطا دارد.



شکل ۲-۸- تأثیر انتخاب طول پنجره (تعداد پنجره‌ها) بر روی خطای گام قطری سازی، در روش MCC [۳۸]

در تحقیق دیگری برای رفع محدودیت برابر بودن تعداد سنسورها با تعداد درجات آزادی در روش MCC، استفاده از تکنیک EMD به عنوان مرحله پیش پردازش داده‌ها پیشنهاد شده است [۳۴]. در این روش سیگنال‌های بازتاب ثبت شده با تکنیک EMD به موده‌های ذاتی خود (IMF) تجزیه می‌شوند. از آنجا که توابع مودی ذاتی نیز با موده‌های سیستم در ارتباطند، بنابراین با ترکیب مناسب این توابع می‌توان تعدادی بازتاب مصنوعی ایجاد کرد و بنابراین سیگنال‌های بازتاب را به تعداد درجات آزادی مورد نظر رساند. متعاقباً با استفاده از الگوریتم MCC می‌توان مسئله را حل کرد. فلوچارت این روش ترکیبی در شکل ۲-۹ نشان داده شده است. در این شکل، F^n ، $\tilde{\Gamma}$ و $\tilde{x}_e$ به ترتیب معرف شکل موده‌های فرضی اولیه، IMF های حاصل از الگوریتم EMD و بازتاب‌های مصنوعی ساخته شده می‌باشند. $\hat{A}_a$ ، $\hat{A}_p$ ، $\hat{A}_u$ و $\hat{A}$ به ترتیب عبارتند از: ماتریس ترکیب فرضی اولیه، ماتریس ترکیب حاصل از الگوریتم MCC، ماتریس ترکیب مرتب شده و ماتریس ترکیب نهایی. $\tilde{e}$ نیز بردار سیگنال های منابع را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۹- فلوچارت روش ترکیبی EMD-MCC برای شناسایی سازه‌ها با تعداد محدودی از سنسورها [۳۴]

همان‌طور که در فلوچارت روش EMD-MCC دیده می‌شود، این الگوریتم برای شروع نیاز به حدس اولیه از بردارهای شکل موده‌های سازه دارد، که یکی از اشکالات این روش محسوب می‌شود. از دیگر مشکلات این روش می‌توان به حساسیت تکنیک EMD به داده‌های پرت، اثر ابتدا و انتهای سیگنال و پدیده اختلاط موده‌ها، حساسیت IMF ها به نویز، عدم وجود شرط لازم و کافی برای همگرایی الگوریتم اشاره کرد [۳۵].

آنتونی و چاوهان^۱ فرمول‌بندی الگوریتم SOBSS را در فضای حالت مورد بررسی قرار دادند [۳۹]. آنها برای اینکه امکان برآورد موده‌های مختلط وجود داشته باشد، از یک تکنیک قطری‌سازی غیرهرمیتی استفاده کردند که در آن ماتریس‌های پیش‌ضرب و پس‌ضرب برای قطری کردن ماتریس‌های

¹ J. Antoni & S. Chauhan

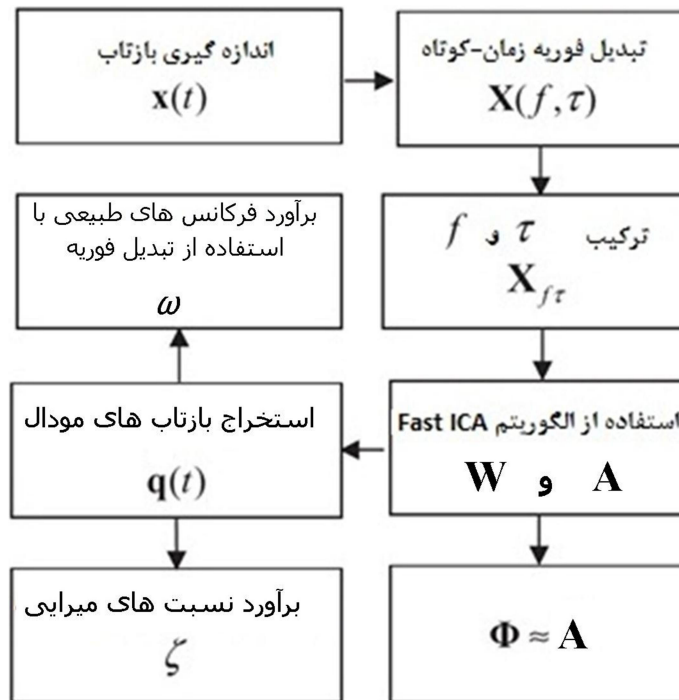
کوواریانس بازتاب‌ها، برخلاف الگوریتم استاندارد SOBSS، هرمیتی نیستند. آنها همچنین برای توسعه این روش به حالتی که تعداد سنسورها از تعداد موده‌های سازه کمتر است، استفاده از ماتریس هنکل حاوی بلوک-ماتریس‌های کواریانس پیشنهاد دادند. در این صورت، ابعاد ماتریس هنکل مذکور باید آن‌قدر بزرگ انتخاب شود که مسئله BSS از حالت نامعین^۱ خارج شود. بهبود این روش در زمینه‌های افزایش سرعت حل، کاهش ابعاد ماتریس هنکل موردنیاز و برآورد مستقیم ماتریس شکل موده‌ها در مرجع [۴۰] ارائه شده است.

اگرچه استفاده از الگوریتم SOBSS در زمینه شناسایی سازه‌ها پیشرفت‌های چشمگیری داشته است، ولی دیگر الگوریتم اصلی BSS، یعنی الگوریتم ICA، به دلیل حساسیت به وجود میرایی، در این زمینه چندان مورد توجه قرار نگرفته است. یانگ و ناگاراچایا^۲ برای کاهش حساسیت الگوریتم ICA به وجود میرایی، یک مرحله پیش‌پردازش برای داده‌ها پیشنهاد کرده‌اند که در آن ابتدا بازتاب‌های ثبت شده با استفاده از تبدیل فوریه زمان-محدود^۳ (STFT) به صورت نمایش زمان-فرکانس درآمده‌اند [۴۱]. بررسی‌های این پژوهشگران نشان داده است که روش پیشنهادی آنها، در برابر میرایی‌های بالا نیز عملکرد خوبی از خود نشان می‌دهد. علاوه بر این، به لطف الگوریتم ICA، این روش ترکیبی دیگر نیازی به فرض ایستا بودن باتاب‌های اندازه‌گیری شده ندارد؛ البته در حالت بازتاب‌های غیرایستا تنها فرکانس‌های طبیعی سازه قابل شناسایی هستند. به ادعای نویسندگان این مقاله، الگوریتم مذکور غیرپارامتری است و نیاز به دستکاری و یا قضاوت مهندسی ندارد. شاید محدودیت اصلی این روش را بتوان برابر بودن تعداد موده‌های شناسایی شده با تعداد سنسورها دانست. فلوچارت این روش در شکل ۱۰-۲ نشان داده شده است.

^۱ Underdetermined BSS

^۲ Y. Yang and S. Nagarajaiah

^۳ Short-Time Fourier Transform (STFT)



شکل ۲-۱۰- فلوچارت روش STFT-ICA برای شناسایی سازه‌ها [۴۱]

۲-۷- تکنیک‌های تولید بازتاب ارتعاش آزاد

بسیاری از روش‌های شناسایی سیستم، مانند ITD، ERA و HHT، نیازمند بازتاب‌های ارتعاش آزاد سیستم به‌عنوان ورودی الگوریتم هستند. از آنجا که در اغلب موارد بازتاب‌های ارتعاش آزاد و یا بازتاب‌های ضربه سیستم در دسترس نیستند، بنابراین لازم است که به‌نحوی بازتاب‌های معادل بازتاب ارتعاش آزاد سیستم ایجاد شوند. بدین منظور دو تکنیک در ادبیات فنی موجود است که در ادامه به تشریح آنها پرداخته می‌شود.

۲-۷-۱- تکنیک تحریک طبیعی^۱ (NExT)

براساس این تکنیک، چنانچه داده‌های حاصل از ارتعاش اجباری سیستم تحت آزمایش‌هایی با انواع

^۱ Natural Excitation Technique (NExT)

خاصی تحریک، موجود باشد، آن گاه توابع همبستگی متقابل^۱ بین بازتاب اندازه گیری شده و یک معیار مرجع واحد، معادله دیفرانسیل حاکم بر ارتعاش سیستم را به صورت همگن ارضا می کنند و بنابراین می توانند به عنوان بازتاب ارتعاش آزاد سیستم مورد استفاده قرار بگیرند [۴۲].

با پس ضرب تغییر مکان هر یک از درجات آزادی اندازه گیری شده $x_i(s)$ (به عنوان سیگنال مرجع)، در معادله ارتعاش سیستم تحت تحریک اجباری (رابطه (۱-۲)) و سپس اعمال عملگر امید ریاضی^۲ به طرفین رابطه خواهیم داشت:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}_{x_i}(t,s) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}_{x_i}(t,s) + \mathbf{K}\mathbf{x}_{x_i}(t,s) = \mathbf{R}_{F,x_i}(t,s) \quad (۳۱-۲)$$

که در آن $R(.)$ بردار توابع همبستگی متقابل و s یک لحظه زمانی متفاوت است. برای فرآیندهای با ایستایی ضعیف^۳ می توان نشان داد [۴۳]:

$$\dot{R}_{x,x_i}(\tau) = R_{\dot{x},x_i}(\tau) = -R_{x,\dot{x}_i}(\tau) \quad (۳۲-۲)$$

که در آن: $\tau = t - s$. با فرض اینکه فرآیندهای تغییر مکان، سرعت و شتاب دارای ایستایی ضعیف باشند و با تحریک ورودی، که متعاقباً اعمال می شود، به لحاظ آماری ناهمبسته باشند ($R_{F,x_i}(t,s) = 0$)، آنگاه با اعمال مشتق چهارم به رابطه (۳۱-۲) و استفاده از تساوی فوق داریم:

$$\mathbf{M}\ddot{\ddot{\mathbf{x}}}_{x_i}(\tau) + \mathbf{C}\dot{\ddot{\mathbf{x}}}_{x_i}(\tau) + \mathbf{K}\ddot{\mathbf{x}}_{x_i}(\tau) = 0 \quad (۳۳-۲)$$

معادله فوق نشان می دهد که تابع همبستگی متقابل بازتاب سازه با یک سیگنال مرجع، معادله دیفرانسیل حاکم بر ارتعاش سیستم را به صورت همگن ارضا می کند و بنابراین می تواند به عنوان بازتاب ارتعاش آزاد در نظر گرفته شود.

¹ Cross-correlation functions

² Expectation

³ Weakly stationary process

۲-۷-۲- تکنیک کاهش تصادفی (RDT)^۱

اساس این تکنیک بر این حقیقت استوار است که بازتاب تصادفی یک سازه تحت یک نیروی خارجی تصادفی از دو بخش تشکیل می‌شود: (۱) بخش تعینی (پاسخ به بارضربه و یا پاسخ به بار پله)، (۲) بخش تصادفی (که معمولاً میانگین آن برابر صفر فرض می‌شود) [۴۴]. بنابراین اگر به تعداد کافی از این بازتاب تصادفی نمونه‌برداری شود، با میانگین‌گیری از این نمونه‌ها، بخش تصادفی حذف می‌شود و تنها بخش تعینی بازتاب باقی می‌ماند. برای اطمینان از اینکه بخش تعینی در فرآیند میانگین‌گیری حذف نمی‌شود، سه راهکار برای نمونه‌برداری وجود دارد: الف) سطح راه‌اندازی^۲ ثابت غیر صفر (در این صورت نتیجه بازتاب ارتعاش آزاد به بار پله خواهد بود؛ ب) سطح راه‌اندازی صفر با شیب مثبت (در این صورت بازتاب ارتعاش آزاد میرا به بار ضربه مثبت به‌دست خواهد آمد؛ ج) سطح راه‌اندازی صفر با شیب منفی (در این صورت بازتاب ارتعاش آزاد میرا به بار ضربه منفی به‌دست خواهد آمد). لازم به ذکر است که شبه بازتاب‌های حاصل از این تکنیک را توابع RD^۳ می‌گویند.

اگر بازتاب موجود را با $y(t)$ نشان دهیم، برای تولید تابع RD متناظر می‌توان از رابطه (۲-۳۴) استفاده کرد.

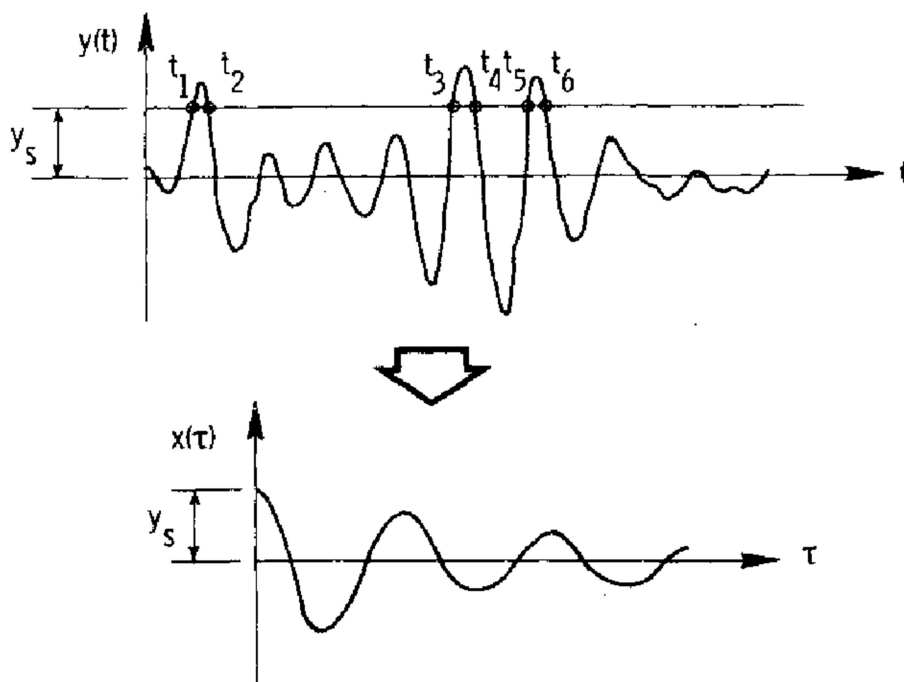
$$x(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y(t_n + \tau) \quad (۲-۳۴)$$

که در آن، $x(\tau)$ تابع RD متناظر با بازتاب $y(t)$ و N تعداد کل نمونه‌هاست. t_n معرف نقطه شروع هر یک از نمونه‌هاست. در شکل ۲-۱۱ نحوه به‌دست آمدن t_n ها برای حالت الف) فوق، نشان داده شده است. در حالت ب) t_n ها نقاطی هستند که نمودار بازتاب محور زمان را قطع می‌کند و با شیب مثبت ادامه می‌یابد؛ به‌طور مشابه در حالت ج) t_n ها نقاطی هستند که نمودار بازتاب محور زمان را قطع می‌کند و با شیب منفی ادامه می‌یابد.

^۱ Random Decrement Technique (RDT)

^۲ Triggering level

^۳ RD signatures



شکل ۲-۱۱- نحوه تولید توابع RD با در نظر گرفتن سطح راه اندازی ثابت غیر صفر [۴۴]

لازم به ذکر است که این تکنیک باعث به هم خوردن اختلاف فاز بین مودها می شود؛ بنابراین در صورت استفاده از این تکنیک، دیگر بردار شکل مودهای سازه قابل شناسایی نمی باشند. خوانندگان محترم جهت مشاهده برنامه کامپیوتری نگارش شده برای تکنیک RDT در نرم افزار متلب، به پیوست این رساله (بخش پ-۲) مراجعه فرمایند.

۲-۸- معرفی الگوریتم تجزیه میانگین موضعی^۱ (LMD)

الگوریتم تجزیه میانگین موضعی (LMD) یک روش تحلیل زمان-فرکانس خود سازگار^۲ است که ابتدا

^۱ Local Mean Decomposition (LMD)

^۲ Self-adaptive

در سال ۲۰۰۵ برای پردازش سیگنال‌های نوار مغزی^۱ پیشنهاد شد [۴۵]. در این روش یک سیگنال به یک سری سیگنال‌های تک مؤلفه‌ای AM-FM^۲، تحت عنوان توابع حاصلضرب^۳ (PF)، تجزیه می‌شود. از آنجا که فرمول‌بندی این الگوریتم در فصل ۴ به‌طور کامل تشریح می‌شود، در اینجا از ذکر جزئیات روش خودداری شده است.

اگرچه الگوریتم LMD همانند الگوریتم EMD یک روش تجربی به حساب می‌آید ولی تفاوت‌های اساسی بین دو الگوریتم مشهود است. مهمترین مزیت‌های روش LMD نسبت به EMD به قرار زیر است [۴۶]:

- در تکنیک LMD برخلاف روش EMD نیازی به استفاده از تبدیل هیلبرت برای محاسبه دامنه و فاز لحظه‌ای نمی‌باشد.
- روش LMD نسبت به روش EMD کمتر تحت تأثیر پرش‌های ناگهانی^۴ سیگنال قرار می‌گیرد.
- تعداد مؤلفه‌های تجزیه شده حاصل از روش LMD نسبت به روش EMD کمتر است؛ که این خود می‌تواند مانع از تفکیک اطلاعات مشخصه سیگنال به دو یا چند جزء مجزا شود.
- اثرات ابتدا و انتهای سیگنال^۵ بر روی روش LMD به مراتب کمتر از روش EMD است.

برای مقایسه بهتر این دو الگوریتم، فلوچارت ساده آنها در شکل ۲-۱۲ نشان داده شده است [۴۶]. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، برخلاف الگوریتم EMD، در الگوریتم LMD برای تعیین فرکانس‌ها و دامنه‌های لحظه‌ای نیازی به استفاده از تبدیل هیلبرت نیست. لازم به ذکر است که اخیراً الگوریتم LMD به‌طور موفقیت آمیز برای تشخیص آسیب‌های موجود در ماشین‌های دوار^۶ مورد استفاده قرار

¹ Electroencephalogram (EEG)

² AM: Amplitude Modulated; FM: Frequency Modulated

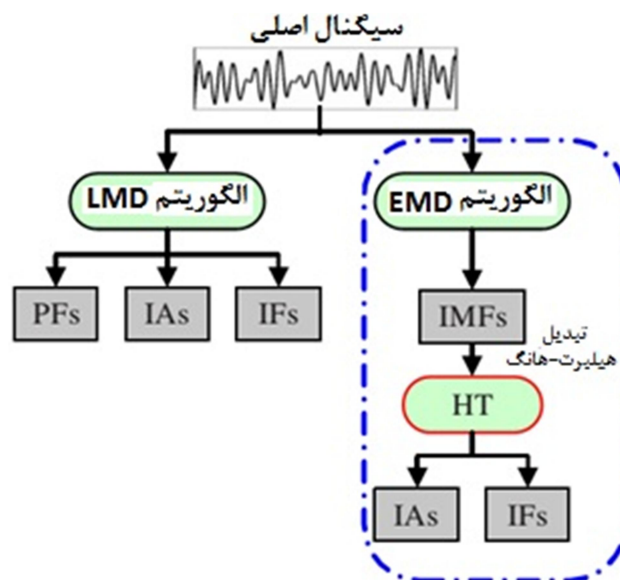
³ Product Functions (PFs)

⁴ Overshoot & undershoot

⁵ End effects

⁶ Rotating machinery

گرفته است [۴۷-۴۹]. برخی از پیشرفت‌های اخیر این الگوریتم در زمینه تشخیص آسیب در ماشین‌های دوار را می‌توان در مراجع [۵۰-۵۳] پیدا کرد.



شکل ۲-۱۲- نحوه محاسبه فرکانس‌های لحظه‌ای (IF) و دامنه لحظه‌ای (IA) توسط الگوریتم‌های LMD و EMD [۴۶]

از آنجا که تاکنون الگوریتم LMD به‌طور مشخص برای شناسایی سازه مورد استفاده قرار نگرفته است، در فصل ۴ این رساله امکان استفاده از این الگوریتم در بحث شناسایی پارامترهای مودال سازه‌ها مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲-۹- جمع‌بندی

در این فصل روش‌های مرسوم شناسایی سیستم در حوزه زمان، به‌همراه فرمول‌بندی آنها، مرور شد. کلیه روش‌های مطرح شده در این فصل در زمره روش‌های خروجی-محور قرار می‌گیرند. از آنجا که اغلب این روش‌ها تنها با بازتاب‌های ارتعاش آزاد و یا ناشی از بار ضربه کار می‌کنند، در انتهای این

فصل دو تکنیک متداول برای تولید شبه‌بازتاب‌های معادل ارتعاش آزاد تشریح شد. در میان روش‌های مطرح شده در این بخش، ارتقاء الگوریتم‌های SOBSS و LMD در زمینه شناسایی پارامترهای مودال سازه‌ها در این رساله مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به اینکه هر یک از این دو الگوریتم در فصل‌های جداگانه تشریح خواهند شد، در این فصل از آوردن جزئیات آنها خودداری شده است.

فصل سوّم: اصول شناسایی سیستم‌ها و کار با سیگنال‌ها و ماتریس‌ها

۳- اصول شناسایی سیستم‌ها و کار با سیگنال‌ها و ماتریس‌ها

۳-۱- پیشگفتار

شناسایی یک سیستم نیازمند آگاهی از ویژگی‌های کلی آن سیستم و همچنین داشتن مهارت لازم جهت کار با سیگنال‌ها به‌عنوان ورودی‌ها و خروجی‌های آنها می‌باشد. علاوه بر این از آنجا که معمولاً سیستم‌ها مجموعه‌ای به هم پیوسته از یک سری اجزاء هستند، رفتار آنها نیز در غالب ماتریس‌ها و بردارها فرمول‌بندی می‌شود. با توجه به مطالب گفته شده، در این فصل ابتدا تعاریف مربوط به سیستم‌ها و مبانی شناسایی سیستم‌های سازه‌ای تشریح می‌شود. در ادامه برخی از تعاریف و عملیات پایه بر روی سیگنال‌ها و ماتریس‌ها، که در فصول آینده مورد استفاده قرار خواهند گرفت، تشریح می‌شود.

۳-۲- مبانی شناسایی سازه‌ها

۳-۲-۱- سیستم‌ها

سیستم در حالت کلی به فرآیند یا مجموعه‌ای اطلاق می‌شود که سبب تبدیل سیگنال‌ها به یکدیگر می‌شود. بدین معنی که روی مجموعه‌ای از سیگنال‌ها به‌عنوان ورودی عمل کرده و یک سری سیگنال‌های خروجی را به دست می‌دهد. سیستم‌ها را نیز می‌توان همانند سیگنال‌ها تقسیم‌بندی کرد [۵۴]. به‌طور مثال، چنانچه هم ورودی‌ها و هم خروجی‌های یک سیستم، سیگنال‌های زمان-گسسته

باشند، سیستم را نیز سیستم زمان-گسسته می‌گویند. در عمل بسیاری از سیگنال‌ها و سیستم‌های گسسته از گسسته‌سازی سیگنال‌ها و سیستم‌های پیوسته، از طریق نمونه‌برداری به‌دست می‌آیند. از نگاهی دیگر، چنانچه سیستم تنها یک ورودی و یک خروجی داشته باشد، آن را تک‌ورودی-تک‌خروجی^۱ می‌نامند و چنانچه تعداد ورودی‌ها و خروجی‌ها بیش از یک باشد، سیستم را چندورودی-چندورودی^۲ می‌گویند.

۳-۲-۱-۱- برخی از ویژگی‌های سیستم‌ها

برای شناخت بهتر سیستم، لازم است ابتدا از ویژگی‌های آن اطلاعاتی به‌دست آورد. برخی از مهم‌ترین ویژگی‌های سیستم‌ها به‌طور مختصر در ادامه مرور خواهند شد [۵۴].

- علیت^۳: سیستمی را که خروجی آن در هر لحظه تنها به مقدار ورودی در همان لحظه یا لحظات قبل آن وابسته باشد، سیستم علی و در غیر این صورت غیرعلی می‌نامند.
- حافظه دار بودن: چنانچه خروجی یک سیستم در هر لحظه تنها به ورودی آن در همان لحظه بستگی داشته باشد، سیستم را بدون حافظه (استاتیکی) می‌گویند و در غیر این صورت سیستم حافظه‌دار (دینامیکی) خواهد بود.
- پایداری: برای پایداری یک سیستم تعاریف متعددی وجود دارد. به‌عنوان یک تعریف ساده، سیستمی را پایدار گویند که به ازای تمام ورودی‌های محدود، خروجی‌های محدود را نتیجه دهد.
- فشردگی: سیستمی را که رفتار آن با معادلات دیفرانسیل معمولی مدل شود، سیستم فشرده و سیستمی که رفتار آن با معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی مدل شود، را سیستم گسترده می‌نامند.

¹ Single Input-Single Output (SISO)

² Multi Input-Multi Output (MIMO)

³ Causality

- تغییرناپذیری با زمان^۱: اگر یک سیستم به ازای یک ورودی خاص $x(t)$ خروجی اش سیگنال $y(t)$ باشد. حال سیستم را تغییرناپذیر با زمان گویند اگر با اعمال انتقال زمانی دلخواه τ در سیگنال $x(t)$ خروجی سیستم همان سیگنال $y(t)$ با همان انتقال زمانی τ باشد. این مطلب را می توان به زبان ریاضی مطابق رابطه (۱-۳) نشان داد.

$$x(t) \rightarrow y(t) \Rightarrow x(t-\tau) \rightarrow y(t-\tau) \quad (1-3)$$

به تعبیر سازه ای، چنانچه مشخصات سازه (سختی، جرم و میرایی) با تغییر زمان ثابت باقی بمانند، سیستم تغییرناپذیر با زمان خواهد بود. بدیهی است که سیستمی که فاقد این ویژگی باشد، سیستم تغییرپذیر با زمان نامیده می شود.

- خطی بودن: فرض کنید یک سیستم به ازای سیگنال ورودی $x_1(t)$ دارای سیگنال خروجی $y_1(t)$ و به ازای سیگنال ورودی $x_2(t)$ دارای سیگنال خروجی $y_2(t)$ باشد. حال این سیستم را خطی گویند اگر رابطه (۲-۳) برای آن برقرار باشد.

$$\begin{cases} x_1(t) \rightarrow y_1(t) \\ x_2(t) \rightarrow y_2(t) \end{cases} \Rightarrow ax_1(t) + bx_2(t) \rightarrow ay_1(t) + by_2(t) \quad (2-3)$$

که در آن a و b ضرایب اسکالر ثابت هستند. به عبارت دیگر اگر دو خاصیت جمع پذیری و مقیاس پذیری برای یک سیستم برقرار باشد، سیستم را خطی و در غیر این صورت غیرخطی می گویند. به طور مشابه از نقطه نظر سازه ای، سازه خطی سازه ای است که اصل برهم نهی^۲ برای آن برقرار باشد.

۳-۲-۱-۲- سیستم های خطی تغییرناپذیر با زمان (LTI)

ترکیب دو ویژگی خطی بودن و تغییرناپذیری با زمان، دسته مهمی از سیستم ها را تحت عنوان سیستم های خطی تغییرناپذیر با زمان را نتیجه می دهد که تئوری های شناسایی و کنترل تا حد بسیار خوبی برای آن ها گسترش پیدا کرده اند.

¹ Time Invariant

² Superposition principle

رفتار سیستم‌های LTI به‌طور کامل با استفاده از بازتاب ضربه آن (پاسخ سیستم به بار ضربه) مشخص می‌شود. به عبارت دیگر اگر بازتاب ضربه یک سیستم LTI مشخص باشد، بازتاب آن سیستم تحت هر تحریک خارجی دیگر را می‌توان از طریق رابطه (۳-۳) به دست آورد [۵۴].

$$y(t) = x(t) * h(t) \quad (۳-۳)$$

که در آن $h(t)$ معرف بازتاب ضربه سیستم و $y(t)$ بازتاب سیستم به تحریک خارجی $x(t)$ می‌باشد. همچنین علامت * نشان‌دهنده عملگر کانولوشن می‌باشد. لازم به ذکر است رابطه اخیر در حالت زمان گسسته به جمع کانولوشن مشهور است که مطابق رابطه (۴-۳) قابل محاسبه می‌باشد.

$$y(n) = x(n) * h(n) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x(k)h(n-k) \quad (۴-۳)$$

علاوه بر این می‌توان ثابت کرد، سیستم‌های LTI پایدارند اگر و فقط اگر بازتاب ضربه آنها به‌طور مطلق جمع‌پذیر باشد. همچنین برای اینکه یک سیستم LTI علی باشد، کافی است بازتاب ضربه آن تنها به ازای مقادیر مثبت n دارای مقادیر غیر صفر باشد. بیان ریاضی این دو مطلب به ترتیب در رابطه‌های (۵-۳) و (۶-۳) نشان داده شده است [۵۴].

$$\sum_{k=-\infty}^{+\infty} |h(n)| < \infty \quad (۵-۳)$$

$$h(n) = 0, \quad \forall n < 0 \quad (۶-۳)$$

از یک نگاه دیگر، سیستم‌های LTI را می‌توان با توجه به طول بازتاب ضربه آنها تقسیم‌بندی نمود. منظور از طول بازتاب ضربه، بیشترین مقدار مثبت n است که به ازای تمامی مقادیر بزرگتر از آن، $h(n)$ همواره برابر صفر باشد. بر این اساس اگر سیستمی دارای بازتاب ضربه با طول محدود باشد، سیستم با بازتاب ضربه طول محدود^۱ نامیده می‌شود. به‌طور مشابه، سیستمی را که طول بازتاب ضربه آن

^۱ Finite Impulse Response (FIR)

نامحدود (بی نهایت) باشد، سیستم با بازتاب ضربه طول نامحدود^۱ می نامند [۵۴]. لازم به ذکر است، در این رساله همواره فرض بر این است که سازه های مورد بررسی، LTI می باشند و علاوه بر آن علی و پایدارند.

۳-۲-۲- حل معادله ارتعاش سازه چند درجه آزادی در فضای مودال

معادله حاکم بر ارتعاش یک سیستم n درجه آزادی خطی تحت بردار تحریک ورودی $F(t)$ ، به صورت زیر می باشد [۴].

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = F(t) \quad (۷-۳)$$

که در آن M ، C و K به ترتیب معرف ماتریس های جرم، میرایی ویسکوز و سختی سازه و $x(t)$ بردار تغییر مکان های سازه می باشند. همچنین بالانویس «نقطه» روی بردارها معرف مشتق آنها نسبت به زمان است. حل معادله دیفرانسیل فوق بستگی به ماهیت میرایی سازه دارد. چنانچه ماتریس میرایی را بتوان به صورت یک ترکیب خطی از ماتریس های جرم و سختی نمایش داد، به آن میرایی رایلی^۲ و در غیر این صورت میرایی غیر رایلی گویند. در ادامه حل معادله ارتعاش سیستم برای هر دو نوع میرایی، به طور جداگانه، تشریح می شود.

۳-۲-۲-۱- حل معادله ارتعاش با فرض میرایی رایلی

در صورتی که میرایی سازه از نوع رایلی فرض شود، حل معادله ارتعاش سازه n درجه آزادی در فضای مودال منجر به ایجاد مودهای حقیقی نرمال می شود. در این صورت بازتاب های تغییر مکان و شتاب سازه را می توان به n مود حقیقی، مطابق رابطه (۸-۳) تجزیه کرد.

$$x(t) = \Phi q(t) \quad ; \quad \ddot{x}(t) = \Phi \ddot{q}(t) \quad (۸-۳)$$

^۱ Infinite Impulse Response (IIR)

^۲ Rayleigh damping

که در آن، $\Phi = [\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n]$ ماتریس شامل بردارهای شکل مودها و $\mathbf{q}(t) = \{q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t)\}^T$ بردار شامل بازتاب‌های مودال تغییر مکان می‌باشند. با جایگذاری رابطه (۸-۳) در رابطه (۱-۲) و استفاده از خاصیت تعامد مودها، رابطه (۱-۲) به صورت ارتعاش مجزای n مود قابل بیان می‌باشد.

$$\ddot{q}_j(t) + 2\xi_j \omega_j \dot{q}_j(t) + \omega_j^2 q_j(t) = f_j(t) \quad (۹-۳)$$

که در آن $f_j(t) = \Phi_j^T \mathbf{F}(t) / m_j$ نیروی معادل در مود j ام؛ ξ_j ، ω_j و m_j به ترتیب نسبت میرایی، فرکانس طبیعی و جرم مودال مود j ام می‌باشند. اکنون پاسخ معادله دیفرانسل (۹-۳) را می‌توان با استفاده از انتگرال دوهامل^۱ محاسبه کرد.

$$q_j(t) = \frac{1}{m_j \omega_{dj}} \int_0^t f_j(\tau) e^{-\xi_j \omega_j (t-\tau)} \sin[\omega_{dj} (t-\tau)] d\tau \quad (۱۰-۳)$$

که در آن، $\omega_{dj} = \omega_j \sqrt{1-\xi_j^2}$ نشان دهنده فرکانس میرای مود j ام است. روابط (۷-۳) تا (۱۰-۳) نشان می‌دهند که یک سیستم n درجه آزادی را می‌توان در فضای مودال به n سیستم یک درجه آزادی تبدیل کرد و بازتاب سازه اصلی را از برهم‌نهی بازتاب این سیستم‌های یک درجه آزادی به دست آورد.

در حالت خاصی که تنها یک نیروی ضربه F_0 در درجه آزادی r ام سازه اعمال شود، می‌توان نشان داد که از حل انتگرال دوهامل رابطه (۱۰-۳)، برای بازتاب شتاب مودال j ام، رابطه (۱۱-۳) به دست خواهد آمد [۱۷].

^۱ Duhamel integral

$$\ddot{q}_j(t) = \frac{F_0 \phi_{rj} \omega_j}{m_j \sqrt{1 - \xi_j^2}} e^{-\xi_j \omega_j t} \cos(\omega_{dj} t + \varphi_j + \frac{\pi}{2}) \quad (11-3)$$

که در آن، ϕ_{rj} درایه r ام از بردار شکل مود j ام است و $\varphi_j = \tan^{-1}[2\xi_j \sqrt{1 - \xi_j^2} / (1 - 2\xi_j^2)]$ معرف تأخیر فاز برای مود j ام می‌باشد. با توجه به روابط (3-8) و (3-11)، بازتاب شتاب درجه آزادی p ام در این حالت، از رابطه (3-12) محاسبه خواهد شد.

$$\ddot{x}_p(t) = \sum_{j=1}^n \phi_{pj} \ddot{q}_j(t) = \sum_{j=1}^n \left\{ \frac{F_0 |\phi_{pj}| |\phi_{rj}| \omega_j}{m_j \sqrt{1 - \xi_j^2}} e^{-\xi_j \omega_j t} \cos(\omega_{dj} t + \varphi_j + \frac{\pi}{2} + \varphi_{pj,r}) \right\} \quad (12-3)$$

که در آن $\varphi_{pj,r}$ اختلاف فاز بین درایه‌های p ام و r ام از بردار شکل مود j ام است. با فرض وجود مودهای نرمال، این پارامتر یکی از دو مقدار $\pm 2\beta\pi$ (هم‌فاز) یا $\pm(2\beta+1)\pi$ (غیر هم‌فاز) خواهد شد؛ که در آن β یک عدد صحیح است.

۳-۲-۲-۲- حل معادله ارتعاش با فرض میرایی غیر رایلی

در صورتی که میرایی سازه را نتوان رایلی فرض کرد، حل معادله ارتعاش سازه n درجه آزادی در فضای مودال منجر به ایجاد مودهای مختلط می‌شود که به صورت زوج‌های مزدوج مختلط^۱ ظاهر می‌شوند. در این صورت برای حل معادله (3-7)، معمولاً از فرم فضای حالت، مطابق رابطه (3-13)، استفاده می‌شود [۱۸].

$$\mathbf{A}\dot{\mathbf{Z}} + \mathbf{B}\mathbf{Z} = \mathbf{G} \quad \text{or} \quad \dot{\mathbf{Z}} = \mathbf{D}\mathbf{Z} + \mathbf{A}^{-1}\mathbf{G} \quad (13-3)$$

که در آن $\mathbf{Z}$ و $\mathbf{D}$ ، به ترتیب، بردار حالت و ماتریس سیستم هستند. این دو پارامتر و سایر پارامترها مطابق رابطه (3-14) تعریف می‌شوند:

¹ Complex conjugate pairs

$$\mathbf{Z} = \begin{Bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \dot{\mathbf{x}}(t) \end{Bmatrix}_{(2n \times 1)}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{M} \\ \mathbf{M} & \mathbf{0} \end{bmatrix}_{(2n \times 2n)}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{M} \end{bmatrix}_{(2n \times 2n)}, \quad \mathbf{G} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}(t) \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix}_{(2n \times 1)}, \quad (14-3)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix}_{(2n \times 2n)}$$

با تجزیه مقدار ویژه ماتریس سیستم $\mathbf{D}$ ، مقادیر ویژه $\lambda_j = \lambda_{n+j}^* = -\xi_j \omega_j + i \omega_{dj}$ و بردارهای ویژه $\Psi_j = \{\Phi_j, \lambda_j \Phi_j\}^T$ به صورت زوج‌های مختلط به دست می‌آیند؛ که در آن بردار مختلط متناظر با شکل مود j ام و بالانویس «*» به معنی مزدوج کمیت مختلط است. مشابه حالت موده‌های نرمال، پاسخ معادله دیفرانسیل رابطه (۱۳-۳) را می‌توان به صورت زیر نشان داد.

$$\mathbf{Z} = \Psi \mathbf{q} = \sum_{j=1}^{2n} \Psi_j q_j(t) \quad (15-3)$$

که در آن $q_j(t)$ معرف بردار بازتاب مودال تغییرمکان در مود j ام است. با جایگذاری رابطه (۱۵-۳) در رابطه (۱۳-۳) و استفاده از خاصیت تعامد موده‌های مختلط، داریم:

$$a_j \dot{q}_j + b_j q_j = \Psi_j^T \mathbf{G} \quad (16-3)$$

که در آن:

$$a_j = \Psi_j^T \mathbf{A} \Psi_j ; \quad b_j = \Psi_j^T \mathbf{B} \Psi_j ; \quad \lambda_j = -b_j / a_j \quad (17-3)$$

هم‌چنین بردار بازتاب شتاب سازه به صورت زیر قابل نمایش می‌باشد.

$$\ddot{\mathbf{x}}(t) = \Phi \ddot{\mathbf{q}}(t) = \sum_{j=1}^{2n} \Phi_j \ddot{q}_j(t) \quad (18-3)$$

در حالت خاصی که تنها یک بار ضربه به شدت F_0 در درجه آزادی r ام اعمال شود، بازتاب مودال

شتاب j ام را می‌توان به صورت رابطه (۱۹-۳) نشان داد [۱۸].

$$\ddot{q}_j(t) = B_{rj} e^{\lambda_j t} \quad (19-3)$$

که در آن، ϕ_{rj} درایه r ام از بردار شکل مود j ام است و $B_{rj} = \frac{F_0 \lambda_j^2 \phi_{rj}}{a_j}$. نهایتاً با توجه به روابط

(۱۸-۳) و (۱۹-۳)، بازتاب شتاب سازه در درجه آزادی p ام را می‌توان با استفاده از رابطه (۲۰-۳) به‌دست آورد.

$$\dot{x}_p(t) = \sum_{j=1}^{2n} \phi_{pj} \ddot{q}_j(t) = \sum_{j=1}^{2n} \left\{ 2|\phi_{pj}| |B_{rj}| e^{-\xi_j \omega_j t} \cos(\omega_{dj} t + \theta(\phi_{pj}) + \theta(B_{rj})) \right\} \quad (20-3)$$

که در آن $\theta(\phi_{pj})$ و $\theta(B_{rj})$ ، به‌ترتیب، نشان دهنده زاویه فاز کمیت‌های مختلط ϕ_{pj} و B_{rj} هستند و $|\phi_{pj}|$ و $|B_{rj}|$ معرف دامنه این کمیت‌ها می‌باشند.

۳-۲-۳- اصول شناسایی پارمترهای مودال سازه‌ها

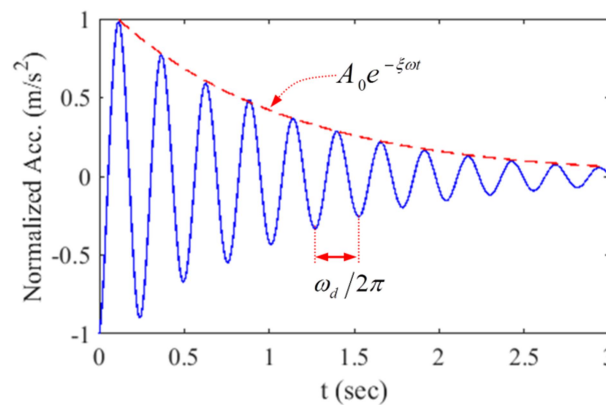
برای شناسایی یک سازه، تعدادی سنسور (معمولاً از نوع شتاب‌سنج) در تعدادی از درجات آزادی سازه کار گذاشته می‌شود. این سنسورها بازتاب سازه را در این درجات آزادی، تحت اثر نیروهای دینامیکی وارد بر آن، ثبت می‌کنند. مشابه سایر سیگنال‌ها، این بازتاب‌های ثبت شده معمولاً آلوده به نویز هستند؛ یعنی:

$$\ddot{y}_i(t) = \ddot{x}_i(t) + v_i(t) \quad (21-3)$$

که در آن، $\ddot{y}_i(t)$ بازتاب ثبت شده در درجه آزادی i ام، $\ddot{x}_i(t)$ بازتاب دقیق شتاب سازه در این درجه آزادی و $v_i(t)$ نویز اضافی ثبت شده در این درجه آزادی، می‌باشند. نویز موجود در داده‌ها اغلب به‌صورت نویز سفید (و معمولاً با توزیع آماری گوسی) فرض می‌شود. باتوجه به محتوی فرکانسی نویزها، در اکثر روش‌های شناسایی سازه جهت حذف نویز، از یک مرحله پیش‌پردازش شامل فیلترکردن استفاده می‌شود. لازم به ذکر است، در هر دو روش پیشنهادی این رساله، مرحله فیلترکردن جزء مراحل اصلی روش‌ها محسوب می‌شود که به‌طور ضمنی کاهش اثرات نویز را نیز به‌دنبال دارد.

شناسایی پارمترهای مودال به معنی تعیین بردارهای شکل مودها، فرکانس‌های طبیعی و نسبت‌های میرایی مودهای سازه با استفاده از بازتاب‌های ثبت شده است. همان‌طور که در بخش قبل تشریح شد، یک سازه چند درجه آزادی را می‌توان با استفاده از تحلیل مودال به چند سازه یک درجه

آزادی تبدیل کرد. بنابراین، شناسایی سیستم چند درجه آزادی اصلی مستلزم شناسایی هر یک از این سیستم‌های یک درجه آزادی در فضای مودال است. بدین منظور، کافی است بردارهای شکل مودها Φ و بازتاب‌های مودال $\ddot{q}(t)$ را در روابط (۸-۳) یا (۱۸-۳) برآورد کرد. عملاً با تعیین هر یک از این دو کمیت، کمیت دیگر با توجه به معلوم بودن بازتاب‌های سازه و با استفاده از روابط (۸-۳) یا (۱۸-۳) قابل محاسبه خواهد بود. برآورد فرکانس‌های طبیعی و نسبت‌های میرایی مودهای سازه نیز با استفاده از بازتاب‌های مودال $\ddot{q}(t)$ ، انجام می‌گیرد. به‌عنوان مثال فرض کنید یکی از بازتاب‌های مودال سازه، ناشی از ارتعاش آزاد سازه، مطابق شکل ۱-۳ باشد.



شکل ۱-۳- نمونه‌ای از یک بازتاب مودال شتاب برای یک سازه فرضی

همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، منحنی خط‌چین برآزش شده دارای معادله $A_0 e^{-\xi \omega t}$ می‌باشد؛ که در آن A_0 پارامتری است که با توجه به شرایط اولیه مسئله تعیین می‌شود (روابط (۱۱-۳) یا (۱۹-۳) را ملاحظه کنید). بنابراین، با رسم منحنی خط‌چین در دستگاه مختصات نیمه‌لگاریتمی، خطی به‌دست می‌آید که شیب آن $-\xi \omega$ است. همچنین فاصله هر دو پیک متوالی برابرست با $\omega_d/2\pi$. البته برای کاهش خطا، لازم است مقدار این پارامتر برای چندین لحظه زمانی مختلف محاسبه شود و میانگین آنها به‌عنوان $\omega_d/2\pi$ در نظر گرفته شود. خاطر نشان می‌شود،

فرکانس طبیعی هر مود با توجه به طیف فوریه بازتاب مودال نظیر آن نیز به راحتی قابل است. به هر حال، با داشتن دو کمیت $\xi\omega$ و ω_d و رابطه آنها با یکدیگر $(\xi\omega)^2 = \omega^2 - \omega_d^2$ ، مقادیر فرکانس طبیعی و نسبت میرایی برای این مود قابل محاسبه خواهند بود.

پس از برآورد بردارهای شکل مودها، فرکانسهای طبیعی و نسبتهای میرایی و با فرض معلوم بودن ماتریس جرم سازه، ماتریسهای سختی و میرایی سازه نیز از رابطه (۲۲-۳) به دست می آیند (در اینجا تنها روابط مربوط به حالت مودهای نرمال ارائه شده است) [۴].

$$\mathbf{K} = \Phi^T \text{diag}(k_j) \Phi^{-1} ; \quad \mathbf{C} = \Phi^T \text{diag}(c_j) \Phi^{-1} \quad (22-3)$$

که در آن، $\text{diag}(\cdot)$ نشان دهنده ماتریس قطری حاوی کمیت موردنظر است؛ k_j و c_j به ترتیب معرف سختی مودال و میرایی مودال j ام هستند که از رابطه (۲۳-۳) محاسبه می شوند.

$$k_j = m_j \omega_j^2 ; \quad c_j = 2\xi_j m_j \omega_j \quad (23-3)$$

یادآوری می شود که با فرض معلوم بودن ماتریس جرم سازه، مقدار جرم مودال برای مود j ام برابرست با: $m_j = \Phi_j^T \mathbf{M} \Phi_j$.

۳-۳- سیگنال ها و برخی تکنیک های پردازش آنها

سیگنال تابعی است که حاوی اطلاعات مشخصی از یک پدیده است. به عنوان مثال می توان به تغییرات دمای اتاق در طول روز یا تغییرات شتاب زمین در طی زمین لرزه (شتابنگاشت) اشاره کرد. به لحاظ ریاضی، سیگنال ها را می توان تابعی از یک یا چند متغیر مستقل (معمولاً زمان) دانست. این متغیرهای مستقل می توانند به صورت پیوسته یا گسسته باشند. سیگنال هایی که تابعی پیوسته از زمان باشند را سیگنال های زمان-پیوسته یا آنالوگ می گویند. به طور مشابه، سیگنال هایی که به صورت تابعی گسسته در زمان مشخص شوند، سیگنال های زمان-گسسته نامیده می شوند [۵۴]. در

ادامه برخی از مهم‌ترین ویژگی‌های سیگنال‌ها و همچنین عملیات پایه روی آنها تشریح خواهد شد.

۳-۱- همبستگی سیگنال‌ها

در آمار و احتمال، همبستگی میزان وابستگی دو متغیر تصادفی به یکدیگر را تعیین می‌کند. در مباحث پردازش سیگنال، همبستگی معیاری برای سنجش میزان تشابه سیگنال‌ها به یکدیگر است. به لحاظ هندسی، اگر هر سیگنال را یک بردار در نظر بگیریم، همبستگی دو سیگنال را می‌توان کسینوس زاویه بین دو بردار متناظر آنها تعبیر کرد. از این دیدگاه، بیشترین مقدار همبستگی دو سیگنال زمانی اتفاق می‌افتد که بردارهای متناظر آنها هم‌جهت باشند. به‌طور کلی معیار همبستگی با تعاریفی که در ادامه می‌آید، کاربردهای وسیعی از جمله در تحلیل‌های آماری، شناسایی سیستم، شناسایی الگو و ... دارد.

مطابق تعریف، کوواریانس متقابل^۱ و همبستگی متقابل^۲ دو سیگنال تصادفی $x(n)$ و $y(n)$ با طول نامحدود، بین دو لحظه زمانی k و l ، به ترتیب، از رابطه‌های (۲۴-۳) و (۲۵-۳) بدست می‌آیند [۵۴].

$$c_{xy}(k, l) = E\{[x(k) - m_x][y(l) - m_y]^*\} \quad (24-3)$$

$$r_{xy}(k, l) = E\{x(k)y^*(l)\} \quad (25-3)$$

که در آن m_x و m_y به ترتیب معرف میانگین سیگنال‌های تصادفی x و y هستند و بالانویس «*» به معنی مزدوج مختلط^۳ سیگنال می‌باشد. اگر x و y دو سیگنال حقیقی دارای طول محدود N و واجد شرایط ایستایی ضعیف^۴ باشند (این ویژگی در ادامه تشریح خواهد شد)، توابع کوواریانس متقابل و همبستگی متقابل دو سیگنال را می‌توان به ترتیب از رابطه‌های (۲۶-۳) و (۲۷-۳) محاسبه نمود.

^۱ Cross-covariance

^۲ Cross-correlation

^۳ Complex conjugate

^۴ Weakly stationary

$$c_{xy}(\tau) = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N [x(n-\tau) - m_x] [y(n) - m_y] \quad (26-3)$$

$$r_{xy}(\tau) = \frac{1}{\sqrt{\sigma_x^2 \sigma_y^2}} c_{xy}(\tau) \quad (27-3)$$

که در آن $\sigma_x^2 = c_{xx}(0)$ و $\sigma_y^2 = c_{yy}(0)$ به ترتیب واریانس سیگنال‌های x و y ؛ و τ بیانگر تأخیر زمانی بین دو سیگنال x و y می‌باشند. همان‌طور که از رابطه‌های (26-3) و (27-3) ملاحظه می‌شود، همبستگی دو سیگنال به صورت تابعی از تأخیر زمانی بیان شده است. براین اساس، همبستگی دو سیگنال بدون تأخیر زمانی ($r_{xy}(0)$) به ضریب همبستگی دو سیگنال معروف است. همچنین اگر سیگنال‌های x و y یکسان باشند ($y=x$)، توابع حاصل از رابطه‌های (26-3) و (27-3) به ترتیب توابع اتوکاریانس^۱ و خودهمبستگی^۲ سیگنال موردنظر خواهند بود.

در مباحث پردازش سیگنال برای محاسبه همبستگی معمولاً از رابطه $r_{xy}(\tau) = \sum_{n=1}^N x(n-\tau).y(n)$ استفاده می‌شود. علاوه بر این در مواردی که به جای دو سیگنال با مجموعه‌ای از سیگنال‌های تصادفی (حاصل از یک فرآیند تصادفی) به صورت $\mathbf{x} = \{x_1(n), x_2(n), \dots, x_m(n)\}^T$ سر و کار داریم، برای هر تأخیر زمانی τ می‌توان یک ماتریس همبستگی متقابل مطابق رابطه (28-3) محاسبه کرد [۵۴].

$$\mathbf{R}_x(\tau) = \begin{bmatrix} r_{x_1 x_1}(\tau) & r_{x_1 x_2}(\tau) & \dots & r_{x_1 x_m}(\tau) \\ r_{x_2 x_1}(\tau) & r_{x_2 x_2}(\tau) & \dots & r_{x_2 x_m}(\tau) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{x_m x_2}(\tau) & r_{x_m x_2}(\tau) & \dots & r_{x_m x_m}(\tau) \end{bmatrix} \quad (28-3)$$

ماتریس لازم به ذکر است، در نرم‌افزار برنامه‌نویسی مهندسی متلب^۳ [۵۵]، توابع $corr()$ ، $xcorr()$ و $xcov()$ به ترتیب برای محاسبه ضریب همبستگی، تابع همبستگی و تابع کوواریانس متقابل

¹ Auto-covariance

² Auto-correlation

³ MATLAB

سیگنال‌های تصادفی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۳-۲-۳- ارتباط بین سیگنال‌های تصادفی

تعاریف زیر برای تعیین رابطه بین دو سیگنال تصادفی مورد استفاده قرار می‌گیرد:

- دو سیگنال تصادفی x و y را ناهمبسته^۱ گویند، اگر کوواریانس آنها برابر صفر باشد (

$$c_{xy}(\tau) = 0.$$

- دو سیگنال تصادفی x و y را متعامد^۲ گویند، اگر همبستگی آنها برابر صفر باشد ($r_{xy}(\tau) = 0$).

با توجه به رابطه همبستگی و کوواریانس، می‌توان گفت چنانچه یکی و یا هر دو سیگنال ناهمبسته دارای میانگین صفر باشند، آن دو سیگنال متعامد نیز هستند. لازم به ذکر است، همبستگی تنها وجود رابطه خطی بین دو سیگنال را آشکار می‌کند. بنابراین ناهمبسته بودن یا متعامد بودن الزاماً به معنی استقلال آماری^۳ دو سیگنال تصادفی نیست؛ بلکه استقلال دو متغیر یا سیگنال تصادفی به معنی عدم وجود هرگونه ارتباط (اعم از خطی یا غیرخطی) بین آن دو می‌باشد.

۳-۳-۳- سفیدسازی^۴ سیگنال‌های تصادفی

سفید بودن یک ویژگی قوی‌تر نسبت به ناهمبستگی است. بنا به تعریف، بردار تصادفی صفر میانگین $\mathbf{x}_w = \{x_{1w}(n), x_{2w}(n), \dots, x_{mw}(n)\}^T$ را سفید گویند، اگر سیگنال‌های $x_{iw}(n)$ نسبت به یکدیگر ناهمبسته بوده و دارای واریانس واحد باشند؛ یعنی: $c_{x_{iw}x_{jw}}(0) = \delta_{ij}$. به عنوان نمونه می‌توان به نویز سفید اشاره کرد. عبارت سفید از این حقیقت نشأت می‌گیرد که طیف توان نویز سفید در همه فرکانس‌ها ثابت است، تا حدی شبیه طیف نور سفید که همه رنگ‌ها را در خود دارد.

از آنجا که سفیدسازی اساساً همان ناهمبسته‌سازی به همراه مقیاس کردن است، تکنیک تحلیل

¹ Uncorrelated

² Orthogonal

³ Statistical independence

⁴ Whitening

مؤلفه‌های اصلی^۱ در این مورد قابل استفاده خواهد بود. در واقع برای سفیدسازی بردار تصادفی داده شده $\mathbf{x}$ با n مولفه، باید یک تبدیل خطی $\mathbf{V}$ را طوری پیدا کرد که بردار تبدیل یافته $\mathbf{x}_w = \mathbf{V}\mathbf{x}$ ، سفید باشد. برای این کار می‌توان از تبدیل سفید کننده مطابق رابطه (۳-۲۹) استفاده کرد.

$$\mathbf{V} = \mathbf{D}^{-1/2} \mathbf{E}^T \quad (۳-۲۹)$$

که در آن $\mathbf{D} = \text{diag}(d_1, \dots, d_n)$ یک ماتریس قطری شامل مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس $\mathbf{C}_x(0)$ و $\mathbf{E} = [\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_n]$ ماتریسی است که ستون‌های آن بردارهای ویژه نرمال شده $\mathbf{C}_x(0)$ هستند. شایان ذکر است که ماتریس تبدیل فوق مادامی که مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس مثبت باشند، همواره موجود است (در عمل این شرایط همواره برقرار است).

باید توجه کرد که تبدیل خطی سفید کننده $\mathbf{V}$ یک ماتریس منحصر به فرد نیست؛ بلکه هر ماتریس $\mathbf{L}\mathbf{V}$ ، که در آن $\mathbf{L}$ یک ماتریس متعامد است، نیز یک تبدیل سفیدساز خواهد بود. یک مورد مهم از تبدیلات سفیدساز، ماتریس $\mathbf{V} = \mathbf{E}\mathbf{D}^{-1/2}\mathbf{E}^T$ است که به جذر معکوس ماتریس کوواریانس $\mathbf{C}_x(0)$ معروف است و با $(\mathbf{C}_x)^{-1/2}$ نشان داده می‌شود [۲۶].

۳-۳-۴- ایستایی یک سیگنال تصادفی

ایستایی یک سیگنال به معنی عدم وابستگی مشخصات آماری آن، به زمان می‌باشد. بر این اساس یک سیگنال تصادفی را دارای ایستایی مرتبه دوم یا ایستایی ضعیف گویند، اگر مشخصات آماری مرتبه دوم آن (یعنی تابع خودهمبستگی) مستقل از زمان باشد. به طور دقیق‌تر یک سیگنال تصادفی دارای ایستایی ضعیف است اگر شرایط زیر برای آن برقرار باشد.

- میانگین سیگنال ثابت باشد؛ یعنی: $m_x(n) = m_x$
- مقدار خودهمبستگی سیگنال بین لحظات زمانی مختلف (مثلاً k و l)، تنها به مقدار

$$r_{xx}(k, l) = r_{xx}(k - l) \quad \text{یعنی: داشته باشد؛ یعنی:}$$

¹ Principal Component Analysis (PCA)

• واریانس سیگنال یک مقدار محدود داشته باشد؛ یعنی: $\sigma_x^2 = c_{xx}(0) < \infty$

چنانچه کلیه مشخصات آماری یک سیگنال از هر مرتبه‌ای (میانگین، همبستگی، کورتیز و ...) مستقل از زمان باشد، آن سیگنال را دارای ایستایی قوی گویند.

۳-۳-۵- نویز سفید^۱

نویز سفید ($v(n)$) یک سیگنال تصادفی با ایستایی ضعیف است که تابع اتوکوواریانس آن از رابطه (۳-۳۰) به دست می‌آید [۵۴].

$$c_{vv}(k) = \sigma_v^2 \delta(k) \quad (3-30)$$

که در آن $\delta(k)$ نشان‌دهنده دلتای کروکر است. به عبارت دیگر، نویز سفید دنباله‌ای از متغیرهای تصادفی ناهمبسته است که همگی دارای واریانس یکسان می‌باشند. به زبان ساده، مقدار نویز سفید در هر لحظه زمانی، هیچ کمکی به برآورد خطی مقادیر آن در سایر لحظات زمانی نمی‌کند. چنانچه نویز سفید از توزیع نرمال (گوسی) پیروی کند، به آن نویز گوسی سفید می‌گویند. در متلب برای تولید نویز گوسی سفید با طول دلخواه می‌توان از دستور *randn* استفاده نمود.

۳-۳-۶- فیلتر کردن سیگنال‌ها

فیلترها دسته مهمی از سیستم‌های LTI محسوب می‌شوند. در واقع فیلترها سیستم‌هایی هستند که بر روی دامنه یا فرکانس سیگنال‌های ورودی، تأثیرات مطلوبی خواهند گذاشت. فیلترهایی که مؤلفه‌های فرکانسی معینی را عبور می‌دهند، به فیلترهای فرکانس گزین^۲ معروف هستند. برای طراحی فیلترهای فرکانس گزین (یا به اختصار فیلترها) لازم است پارامترهای لازم برای تعریف سیستمی با بازتاب ضربه مطلوب را محاسبه کنیم. بر این اساس، فیلترها را می‌توان به دو دسته

^۱ White noise

^۲ Frequency-selective

فیلترهای IIR و فیلترهای FIR تقسیم‌بندی نمود. در طراحی فیلترهای IIR باید تابع تبدیل^۱ فیلتر را تخمین زد. هسته اصلی تکنیک‌های طراحی فیلترهای IIR زمان-گسسته همان تکنیک‌های حالت زمان-پیوسته است. در مقابل، روش‌های طراحی فیلترهای FIR مبتنی بر تقریب مستقیم بازتاب فرکانسی فیلتر هستند و می‌توان گفت که این نوع فیلترها غالباً محدود به حالت زمان-گسسته می‌باشند. سه روش عمده در طراحی فیلترهای FIR عبارتند از: پنجره کردن^۲، الگوریتم تکراری، الگوریتم پارکز-مک کلیلان^۳. از این میان، الگوریتم پارکز-مک کلیلان به دلیل سادگی کاربرد و هم‌چنین طراحی بهینه، بیشتر از سایر الگوریتم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این الگوریتم بازتاب فرکانسی فیلتر مورد نظر با استفاده از یک جندجمله‌ای مناسب تخمین زده می‌شود. جزئیات بیشتری در مورد این الگوریتم و سایر تکنیک‌های طراحی فیلتر را می‌توان در مرجع [۵۴] پیدا کرد. لازم به ذکر است در این رساله، در روش‌های پیشنهاد شده برای شناسایی سیستم، از فیلترهای FIR در مرحله پیش‌پردازش داده‌ها استفاده شده است. برای طراحی این فیلترها نیز از الگوریتم پارکز-مک کلیلان استفاده شده است.

فیلترها با توجه به محدوده فرکانسی که تحت تأثیر قرار می‌دهند، به انواع مختلفی از جمله فیلتر پایین‌گذر^۴، فیلتر میان‌گذر^۵، فیلتر بالاگذر^۶، فیلتر ناچ^۷، فیلتر میان‌نگذر^۸ و ... تقسیم‌بندی می‌شوند. به‌عنوان نمونه، بازتاب فرکانسی یک فیلتر پایین‌گذر در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.

¹ Transfer function

² Windowing

³ Parks-McClellan

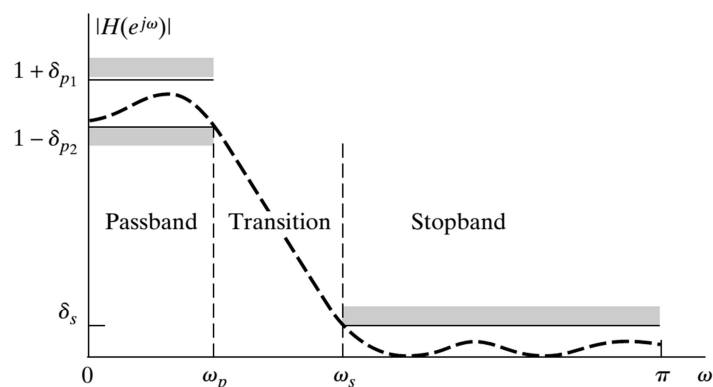
⁴ Low-pass filter

⁵ Band-pass filter

⁶ High-pass filter

⁷ Notch filter

⁸ Band-stop filter



شکل ۳-۲- شمایی از بازتاب فرکانسی یک فیلتر پایین‌گذر [۵۴]

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، سه ناحیه در نمودار شکل ۳-۲ تفکیک شده است: باند عبور، ناحیه گذار و باند توقف. این فیلتر فرکانس‌های کوچکتر از ω_p را به‌طور کامل عبور می‌دهد (باند عبور) و فرکانس‌های بزرگتر از ω_s را به‌طور کامل میرا می‌کند (باند توقف). اگرچه در حالت ایده‌آل انتظار بر این است که $\omega_s = \omega_p$ باشد ولی در عمل به دلیل ناپایداری‌های عددی در طراحی فیلترها، همواره یک محدوده فرکانسی $\omega_p < \omega < \omega_s$ تحت عنوان ناحیه گذار وجود خواهد داشت. بدیهی است که هر چه طول ناحیه گذار کوچک‌تر باشد، فیلتر به حالت ایده‌آل نزدیک‌تر است ولی از طرف دیگر، کاهش طول ناحیه گذار سبب افزایش دامنه اختلالات در باند عبور و باند توقف خواهد شد. حداکثر دامنه این اختلالات، که به آنها رِیپل^۱ گفته می‌شود، برای باندهای عبور و توقف در شکل ۳-۲ با پارامترهای δ_s , δ_{p2} , δ_{p1} نشان داده شده‌اند.

به‌طور مشابه، در فیلترهای میان‌گذر یک باند عبور، دو باند توقف و دو ناحیه گذار وجود خواهد داشت. در این نوع فیلتر، مؤلفه‌های فرکانسی بین دو فرکانس مشخص ($\omega_{p1} < \omega < \omega_{p2}$) عبور داده می‌شوند و سایر مؤلفه‌های فرکانسی میرا می‌شوند.

باید توجه داشت که فیلترها علاوه بر متأثر کردن سیگنال در محدوده فرکانسی خاص، معمولاً یک فاز

^۱ Ripple

خطی نیز به سیگنال خروجی اضافه می‌کنند. بنابراین پس از فیلتر کردن، باید این تغییر فاز به نحو مناسبی از سیگنال فیلترشده حذف شود. در جعبه ابزار پردازش سیگنال^۱ از نرم‌افزار متلب الگوریتم‌های متعددی برای طراحی و اعمال فیلترها وجود دارد. در این رساله، از دستور *design.lowpass* و *design.bandpass* به ترتیب برای طراحی فیلترهای FIR پایین‌گذر و میان‌گذر استفاده شده است. همچنین جهت اعمال فیلترها به سیگنال‌های (بازتاب‌های) مورد نظر، از دستور *filtfilt* استفاده شده است. مزیت این دستور این است که به‌طور خودکار در سیگنال خروجی تغییر فاز ایجاد نمی‌کند [۵۵].

۳-۴- ماتریس‌ها و برخی عملیات پایه روی آنها

مشخصات یک سیستم همواره توسط یک یا چند ماتریس قابل تعریف می‌باشد. سیگنال‌ها نیز عمدتاً به‌صورت بردارهایی در یک دستگاه مختصات فضایی، با ابعادی برابر با طول سیگنال در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به اینکه روش‌های شناسایی سیستم همواره مبتنی بر کار با ماتریس‌ها و بردارهاست، در این بخش چند تعریف پایه و سپس چند عملیات ویژه مربوط به ماتریس‌ها و بردارها که در فصل‌های آتی مورد استفاده قرار می‌گیرند، تشریح خواهد شد [۵۶].

۳-۴-۱- چند تعریف پایه

- بردار یگه: برداری است که اندازه یا طول آن برابر واحد باشد.
- بردارهای متعامد: دو یا چند بردار غیرصفر را متعامد گویند اگر حاصلضرب داخلی آنها در یکدیگر برابر صفر شود.
- بردارهای یگه متعامد: اگر دو یا چند بردار یگه دارای خاصیت تعامد باشند، آنها را بردارهای یگه

^۱ Signal processing toolbox

متعامد گویند.

- ماتریس متعامد^۱: ماتریسی مربعی است که ستون‌ها و ردیف‌های آن بردارهای یگه متعامد باشند. به زبان ریاضی ماتریس A را متعامد گویند، اگر رابطه (۳۷-۳) برای آن برقرار باشد.

$$A^T A = A A^T = I \quad (31-3)$$

که در آن بالانویس " T " نشان دهنده ترانهاده ماتریس و I ماتریس یگه است. از رابطه (۳۱-۳) می‌توان نتیجه گرفت که معکوس یک ماتریس متعامد با ترانهاده آن برابر است ($A^{-1} = A^T$).

- ماتریس متقارن: ماتریس مربعی A را متقارن گویند، اگر ترانهاده‌اش با خودش برابر باشد. یعنی:

$$A = A^T$$

- ماتریس پادمتقارن: ماتریس مربعی A را پادمتقارن گویند، اگر ترانهاده‌اش با قرینه‌اش برابر باشد. یعنی:

$$A = -A^T$$

- ترانهاده هرمیتی یک ماتریس^۲: ترانهاده هرمیتی برای یک ماتریس مختلط، معادل ترانهاده کردن آن ماتریس و سپس مزدوج کردن درایه‌های آن می‌باشد و با بالانویس " H " مشخص می‌شود. به این عمل، ترانهاده مزدوج^۳ نیز گفته می‌شود.

- ماتریس نرمال: ماتریس مربعی A را نرمال گویند، اگر رابطه (۳۸-۳) برای آن برقرار باشد.

$$A^H A = A A^H \quad (32-3)$$

- ماتریس هرمیتی: ماتریس مربعی مختلط B را هرمیتی گویند، اگر مقدار آن با ترانهاده هرمیتی‌اش برابر باشد. یعنی: $B^H = B$.

- ماتریس مختلط متعامد^۴: ماتریس مربعی مختلط B را متعامد گویند، اگر معکوس آن با ترانهاده

هرمیتی‌اش برابر باشد. یعنی: $B^{-1} = B^H$. برخی از مهم‌ترین ویژگی‌های ماتریس مختلط متعامد B

¹ Orthogonal matrix

² Hermitian transpose

³ Conjugate transpose

⁴ Unitary matrix

عبارتند از:

- ماتریس B «قطری شونده»^۱ است؛ برای این کار کافی است تجزیه مقدار ویژه برای آن انجام شود.
- دترمینان ماتریس B برابر واحد است.
- ماتریس B را می‌توان به صورت $B = e^{iH}$ نوشت؛ که در آن i ثابت موهومی و H یک ماتریس هرمیتی است.

۳-۴-۲- تجزیه مقدار ویژه یک ماتریس

نشان دادن یک ماتریس مربعی در فرم استاندارد^۲ آن به صورت حاصلضربی از مقادیر ویژه و بردارهای ویژه آن را تجزیه مقدار ویژه آن ماتریس می‌گویند. این عملیات منجر به نمایش ماتریس مربعی A ($n \times n$) به فرم رابطه (۳-۳۳) خواهد شد [۵۶].

$$A = V^T \Lambda V \quad (3-33)$$

که در آن V یک ماتریس نرمال است که ستون‌های آن بردارهای ویژه ماتریس A هستند و Λ یک ماتریس قطری شامل مقادیر ویژه ماتریس A می‌باشد. در مسائل شناسایی سیستم، بردارهای ویژه ماتریس حالت سیستم معرف بردار شکل موده‌های ارتعاشی می‌باشند؛ هم‌چنین فرکانس‌های طبیعی و نسبت‌های میرایی در مقادیر ویژه ماتریس حالت سیستم نهفته می‌باشند.

به لحاظ ریاضی تعیین مقادیر ویژه و بردارهای ویژه ماتریس مربعی A ($n \times n$) مستلزم حل یکی از معادلات رابطه (۳-۳۴) یا (۳-۳۵) می‌باشد.

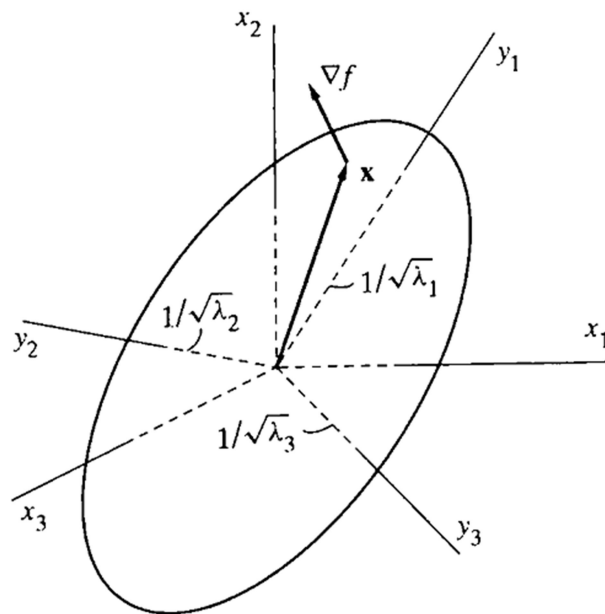
$$f = \mathbf{x}^T A \mathbf{x} = 1 \quad (3-34)$$

$$A \mathbf{x} = \lambda \mathbf{x} \quad (3-35)$$

¹ Diagonalizable

² Canonical form

که در آن $\mathbf{x}$ و λ به ترتیب معرف بردارها و مقادیر ویژه ماتریس $\mathbf{A}$ می‌باشند. اگر ماتریس $\mathbf{A}$ حقیقی و متقارن و مثبت مؤکد^۱ باشد، تابع f در رابطه (۳-۳۹) معرف یک بیضوی در یک فضای n -بعدی اقلیدسی می‌باشد (شکل ۳-۳). در این صورت تجزیه مقدار ویژه ماتریس $\mathbf{A}$ به تعبیر هندسی معادل پیدا کردن محورهای اصلی بیضوی، یعنی محورهای y_1, y_2, y_3 در شکل ۳-۳، می‌باشد. این تعبیر هندسی اساس برخی از روش‌های عددی برای تجزیه مقدار ویژه ماتریس‌ها، هم‌چون روش ژاکوبی^۲ و چرخش‌های گیونز^۳، می‌باشد که در بخش ۳-۴-۴ به آن اشاره خواهد شد. لازم به ذکر است، علاوه بر روش‌های نامبرده، روش‌های عددی دیگری برای تجزیه مقدار ویژه ماتریس‌ها وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش تکراری رایلی^۴ و روش توانی^۵ اشاره کرد [۵۷]. در نرم‌افزار برنامه‌نویسی متلب می‌توان مقادیر و بردارهای ویژه یک ماتریس را در صورت وجود با استفاده از دستور $eig()$ محاسبه کرد [۵۵].



شکل ۳-۳- تعبیر هندسی تجزیه مقدار ویژه یک ماتریس در فضای سه بعدی [۵۷]

¹ Positive definite

² Jacobi method

³ Givens rotation

⁴ Rayleigh quotient iteration

⁵ Power method

۳-۴-۳- تجزیه مقدار منفرد^۱ یک ماتریس

تجزیه مقدار منفرد در واقع تعمیم یافته تجزیه مقدار ویژه برای ماتریس های غیر مربعی می باشد. بدین ترتیب، تجزیه مقدار منفرد ماتریس $B (m \times n)$ مطابق رابطه (۳-۳۶) قابل نمایش می باشد [۵۶].

$$B = Q\Psi R^H \quad (3-36)$$

که در آن Q و R به ترتیب ماتریس های مربعی متعامد $(m \times m)$ و $(n \times n)$ و Ψ یک ماتریس مستطیلی $(m \times n)$ شامل مقادیر حقیقی غیرمنفی روی قطر اصلی، می باشند. ستون های ماتریس Q «بردارهای منفرد چپ» و ستون های ماتریس R «بردارهای منفرد راست» نامیده می شوند. هم چنین درایه های روی قطر اصلی ماتریس Ψ همان مقادیر منفرد ماتریس اولیه B می باشند. می توان ثابت کرد که بردارهای منفرد راست، همان بردارهای ویژه ماتریس حاصلضرب $B^H B$ و بردارهای منفرد چپ همان بردارهای ویژه ماتریس حاصلضرب BB^H می باشند. هم چنین مقادیر منفرد غیرصفر ماتریس غیر مربعی B برابرست با جذر مقادیر ویژه غیرصفر هر یک از ماتریس های BB^H یا $B^H B$. یکی از کاربردهای اصلی تجزیه مقدار منفرد در مسائل شناسایی سیستم، سفیدسازی سیگنال های ثبت شده می باشد.

۳-۴-۴- قطری سازی همزمان چند ماتریس

همان طور که می دانیم، ماتریس قطری ماتریسی است که تنها درایه های روی قطر اصلی آن غیر صفر باشند. بر این اساس، منظور از قطری سازی ماتریس مربعی A ، یافتن ماتریس معکوس پذیر P است به طوری که حاصلضرب ماتریسی $P^{-1}AP$ ، یک ماتریس قطری باشد. این عملیات در واقع همان تجزیه مقدار ویژه ماتریس A می باشد که در بخش ۳-۴-۲ به آن پرداخته شد. با این وجود، در برخی از روش های شناسایی سیستم، جهت افزایش دقت روش، قطری سازی همزمان چند ماتریس

¹ Singular Value Decomposition (SVD)

توسط یک ماتریس قطری ساز مشترک در دستور کار قرار می گیرد. در ادامه تکنیک ژاکوبی برای قطری سازی تقریبی مشترک^۱ چند ماتریس بسط داده می شود [۲۷].

در تکنیک ژاکوبی برای قطری کردن ماتریس $\mathbf{M}$ با ابعاد $n \times n$ ، باید ماتریس مختلط متعامد $\mathbf{V}$ را طوری پیدا کرد که مجموع درایه های غیر قطر اصلی ماتریس حاصل ضرب $\mathbf{V}^H \mathbf{M} \mathbf{V}$ حداقل باشد. بدیهی است که اگر ماتریس $\mathbf{M}$ قابلیت قطری شدن را داشته باشد، در این صورت: $\text{off}(\mathbf{V}^H \mathbf{M} \mathbf{V}) = 0$. اگر به جای یک ماتریس، قطری سازی یک مجموعه از ماتریس ها به صورت $\Gamma = \{\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2, \dots, \mathbf{M}_K\}$ مورد نظر باشد، به ناچار عملیات قطری سازی به صورت تقریبی انجام می گیرد. بدین منظور تابع هدف را می توان مطابق رابطه (۳۷-۳) تعریف کرد.

$$JD_criterion = \text{off} \left(\sum_{k=1}^K \mathbf{V}^H \mathbf{M}_k \mathbf{V} \right) \quad (37-3)$$

که در آن تابع $\text{off}()$ به معنی مجموع درایه های غیر قطر اصلی ماتریس مورد نظر می باشد. اکنون ماتریس یک متعامد $\mathbf{V}$ را یک قطری ساز تقریبی مشترک برای مجموعه ماتریسی Γ گویند، اگر بتواند تابع هدف رابطه (۳۷-۳) را حداقل کند. برای تعیین قطری ساز تقریبی مشترک، ابتدا مجموعه ماتریسی Γ به صورت K ماتریس مربعی 2×2 مطابق رابطه (۳۸-۳) در نظر گرفته می شود.

$$\mathbf{H}_k = \begin{bmatrix} a_k & b_k \\ c_k & d_k \end{bmatrix} \quad (38-3)$$

چنانچه ماتریس یگه متعامد $\mathbf{V}$ توسط چرخش های گیونز مطابق رابطه (۳۹-۳) و ماتریس حاصل ضرب $\mathbf{H}'_k$ مطابق رابطه (۴۰-۳) تعریف شوند:

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} \cos \theta & e^{i\phi} \sin \theta \\ -e^{-i\phi} \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (39-3)$$

$$\mathbf{H}'_k = \mathbf{V}^H \mathbf{H}_k \mathbf{V} = \begin{bmatrix} a'_k & b'_k \\ c'_k & d'_k \end{bmatrix}; \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (40-3)$$

¹ Joint Approximate Diagonalization (JAD)

برای تعیین قطری‌ساز مشترک کافی است مقادیر زاویه‌های θ و ϕ طوری پیدا شود که مقدار

$$\sum_{k=1}^K |a'_k|^2 + |d'_k|^2 \text{ حداکثر باشد. از آنجا که } 2(|a'_k|^2 + |d'_k|^2) = |a'_k - d'_k|^2 + |a'_k + d'_k|^2 \text{ و همچنین}$$

$a'_k + d'_k = \text{const.}$ ، بنابراین به جای حداقل کردن تابع هدف رابطه (۳۷-۳)، کافی است در هر مرحله

از چرخش‌های گیونز، تابع هدف رابطه (۴۱-۳) حداکثر شود.

$$\mathbf{Q} = \sum_{k=1}^K |a'_k - d'_k|^2 \quad (41-3)$$

از طرفی با توجه به رابطه‌های (۳۹-۳) و (۴۰-۳) به راحتی می‌توان نشان داد که:

$$a'_k - d'_k = (a_k - d_k) \cos 2\theta - (b_k + c_k) \sin 2\theta \cos \phi - i(c_k - b_k) \sin 2\theta \sin \phi \quad (42-3)$$

بنابراین تابع هدف رابطه (۴۱-۳) را می‌توان به فرم برداری مطابق رابطه (۴۳-۳) نوشت:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{u}^H \mathbf{u} = \mathbf{v}^T \mathbf{G}^H \mathbf{G} \mathbf{v} = \mathbf{v}^T \text{Re}(\mathbf{G}^H \mathbf{G}) \mathbf{v} \quad (43-3)$$

که در آن $\text{Re}()$ نشان‌دهنده بخش حقیقی ماتریس است و بردارهای $\mathbf{u}$ ، $\mathbf{v}$ و $\mathbf{G}$ براساس روابط

(۴۴-۳) تا (۴۷-۳) تعریف می‌شوند.

$$\mathbf{u}^T = [a'_1 - d'_1, \dots, a'_K - d'_K] \quad (44-3)$$

$$\mathbf{v}^T = [\cos 2\theta, -\sin 2\theta \cos \phi, -\sin 2\theta \sin \phi] \quad (45-3)$$

$$\mathbf{G}^T = [\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2, \dots, \mathbf{g}_K] \quad (46-3)$$

$$\mathbf{g}_k^T = [a_k - d_k, b_k + c_k, i(c_k - b_k)] \quad (47-3)$$

اکنون با توجه به تعریف ماتریس $\mathbf{G}$ می‌توان نتیجه گرفت که حاصلضرب $\mathbf{G}^H \mathbf{G}$ یک ماتریس

3×3 هرمیتی است که به دلیل خاصیت پادتقارنی، بخش موهومی آن در تابع هدف رابطه (۴۳-۳)

مشارکتی ندارد. از طرفی با توجه به تعریف بردار $\mathbf{v}$ می‌توان نشان داد: $\mathbf{v}^T \mathbf{v} = 1$. حداکثر شدن تابع

هدف رابطه (۴۳-۳) تحت شرایط $\mathbf{v}^T \mathbf{v} = 1$ به این معنی است که بردار $\mathbf{v}$ ، بردار ویژه (متناظر با

بزرگترین مقدار ویژه) ماتریس $\text{Re}(\mathbf{G}^H \mathbf{G})$ می‌باشد. بنابراین برای قطری کردن همزمان مجموعه

ماتریسی $\mathbf{\Gamma}$ کافی است در هر مرحله از چرخش‌های گیونز، زوایای θ و ϕ را از تجزیه مقدار ویژه

ماتریس مربعی $\text{Re}(\mathbf{G}^H \mathbf{G})$ تعیین کرد [۲۷]. همچنین ماتریس قطری ساز مشترک از حاصلضرب متوالی ماتریس چرخش‌های گیونز (رابطه (۳-۳۹)) در تمام تکرارها، به دست می‌آید.

۳-۵- جمع‌بندی

در این فصل ابتدا تعاریف مربوط به سیستم‌ها و سپس فرمول‌بندی مربوط به شناسایی آنها در فضای مودال تشریح شد. با توجه به اینکه در این رساله بر روش‌های خروجی-محور برای شناسایی سازه‌ها تأکید دارد، استفاده از این روش‌ها مستلزم داشتن مهارت کافی برای کار با بازتاب‌های سازه یا همان سیگنال‌های خروجی می‌باشد. بدین منظور برخی مفاهیم و تکنیک‌های پردازش سیگنال نیز در این فصل گنجانده شد. از طرف دیگر، مشخصات سازه‌های چند درجه آزادی و معادلات حاکم بر ارتعاش آنها همواره به صورت ماتریسی نشان داده می‌شوند. بنابراین در بخش انتهایی این فصل تعدادی از مفاهیم پایه و عملیات ماتریسی که در فصول بعد مورد استفاده قرار می‌گیرد، تشریح شد.

فصل چهارم: شناسایی پارامترهای مودال سازه‌ها با استفاده از

الگوریتم تجزیه میانگین موضعی

۴- شناسایی پارامترهای مودال سازه‌ها با استفاده از الگوریتم تجزیه

میانگین موضعی

۴-۱- پیشگفتار

در این فصل به معرفی الگوریتم تجزیه میانگین موضعی^۱ (LMD) و استفاده از آن برای شناسایی پارامترهای مودال سازه‌ها پرداخته می‌شود. بدین منظور، ابتدا الگوریتم استاندارد LMD معرفی شده و سپس برخی از مشکلاتی که برای استفاده از این روش برای شناسایی سازه وجود دارد، مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس الگوریتم پیشنهادی برای شناسایی پارامترهای مودال سازه ارائه شده و عملکرد آن توسط چند شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۴-۲- الگوریتم تجزیه میانگین موضعی

الگوریتم LMD یک روش تحلیل زمان-فرکانس خودسازگار است که اولین بار توسط اسمیت^۲ [۴۵] برای تحلیل سیگنال‌های نوار مغزی (EEG) مورد استفاده قرار گرفت. این روش تا حدودی مشابه الگوریتم EMD است که در فصل دوم به آن اشاره شد. در این روش یک سیگنال به یک سری

^۱ Local Mean Decomposition (LMD)

^۲ Smith

سیگنال‌های تک مؤلفه‌ای AM-FM^۱، تحت عنوان توابع حاصلضرب^۲ (PF)، تجزیه می‌شود.

۴-۲-۱ معرفی الگوریتم LMD

فرآیند تجزیه یک سیگنال غیرایستا $X(t)$ توسط تکنیک LMD به‌طور خلاصه به قرار زیر می‌باشد [۴۵]:

۱- ابتدا کلیه اکستریم‌های موضعی، n_i ، برای سیگنال داده شده تعیین می‌شوند.

۲- میانگین‌های موضعی، m_i ، و دامنه‌های موضعی، a_i ، سیگنال داده شده با استفاده از روابط (۴-۱) محاسبه می‌شوند.

$$\begin{cases} m_i = \frac{n_i + n_{i+1}}{2} \\ a_i = \frac{|n_i - n_{i+1}|}{2} \end{cases} \quad (۴-۱)$$

۳- توابع پیوسته میانگین موضعی $\tilde{m}_{11}(t)$ و دامنه موضعی $\tilde{a}_{11}(t)$ با استفاده از تکنیک میانگین‌گیری متحرک^۳ (MA) محاسبه می‌شوند.

۴- تابع میانگین موضعی از سیگنال اولیه کسر می‌شود و سپس سیگنال باقیمانده $h_{11}(t)$ بر تابع دامنه موضعی تقسیم می‌شود (رابطه (۴-۲)):

$$\begin{cases} h_{11}(t) = X(t) - \tilde{m}_{11}(t) \\ s_{11}(t) = \frac{h_{11}(t)}{\tilde{a}_{11}(t)} \end{cases} \quad (۴-۲)$$

اگر $s_{11}(t)$ یک سیگنال FM خالص باشد، به گام بعد می‌رویم و گرنه گام‌های اول تا چهارم با

جایگزینی $s_{11}(t)$ به جای سیگنال اولیه مجدداً تکرار می‌شود تا وقتی که $s_{1q_1}(t) = \frac{h_{1rq_1}(t)}{\tilde{a}_{1q_1}(t)}$ یک

سیگنال FM خالص باشد که بین ۱- و ۱ نوسان می‌کند. در رابطه اخیر q_l تعداد تکرارهای لازم برای

^۱ AM: Amplitude Modulated; FM: Frequency Modulated

^۲ Product Functions (PFs)

^۳ Moving Average technique (MA)

محاسبه اولین تابع حاصلضرب (PF) است. این گام به مرحله غربال‌گری^۱ در الگوریتم LMD معروف است.

۵- اولین PF با استفاده از رابطه (۳-۴) به‌دست می‌آید.

$$PF_1(t) = LA_1(t) s_{l_{q_1}}(t) \quad (۳-۴)$$

که در آن $LA_1(t)$ معرف دامنه لحظه‌ای متناظر است که از رابطه (۴-۴) به‌دست می‌آید.

$$LA_1(t) = \tilde{a}_{11}(t) \tilde{a}_{12}(t) \dots \tilde{a}_{1_{q_1}}(t) = \prod_{j=1}^{q_1} \tilde{a}_{1j}(t) \quad (۴-۴)$$

تابع فاز لحظه‌ای^۲ (IP) و فرکانس لحظه‌ای^۳ (IF) متناظر با این مرحله نیز از روابط (۵-۴) و (۶-۴) محاسبه می‌شوند.

$$IP_1(t) = \arccos(s_{l_{q_1}}(t)) \quad (۵-۴)$$

$$IF_1(t) = \frac{f_s}{2\pi} \cdot \frac{d(IP_1(t))}{dt} \quad (۶-۴)$$

که در آن f_s نرخ نمونه‌برداری می‌باشد.

۶- در گام آخر تابع PF به‌دست آمده از مرحله قبل از سیگنال اولیه $X(t)$ کسر می‌شود $u_1(t) = X(t) - PF_1(t)$ و مراحل فوق مجدداً برای $u_1(t)$ تکرار می‌شوند تا توابع حاصلضرب بعدی به‌دست آیند. این روند تا آنجا ادامه می‌یابد که $u_p(t)$ نهایتاً یک تابع مونوتونیک بدون نوسان شود. در این صورت خواهیم داشت:

$$X(t) = \sum_{i=1}^p PF_i(t) + u_p(t) \quad (۷-۴)$$

^۱ Sifting process

^۲ Instantaneous Phase angle (IP)

^۳ Instantaneous Frequency (IF)

۴-۲-۲- مشکلات استفاده از الگوریتم LMD و راه حل‌ها

۴-۲-۲-۱- مسئله انتخاب اندازه پنجره برای تکنیک میانگین‌گیری متحرک (MA)

همان‌طور که در بخش قبل ارائه شد، در گام سوم از الگوریتم LMD باید توابع پیوسته میانگین موضعی و دامنه موضعی برای هر مرحله از غربال‌گری، با استفاده از تکنیک MA ساخته شوند. با این وجود، نتایج تجزیه یک سیگنال با استفاده از الگوریتم LMD، با توجه به اندازه پنجره تکنیک MA می‌تواند متفاوت باشد. بنابراین انتخاب اندازه این پنجره باید محتاطانه، با سعی و خطا و به همراه قضاوت مهندسی انجام گیرد. در این رساله برای انتخاب اندازه پنجره از معیاری مطابق رابطه (۴-۸) استفاده شده است [۵۸].

$$\Delta = [\max(k_l - k_{l-1})] / \rho \quad l = 2, 3, \dots, n_M \quad (۴-۸)$$

که در آن Δ اندازه پنجره در تکنیک MA می‌باشد؛ k_l, n_M به ترتیب معرف اندیس‌های مربوط به اکستریم‌ها و تعداد اکستریم‌ها می‌باشند و ρ ثابتی است که با توجه به نوع سیگنال انتخاب می‌شود. برای سیگنال‌های با مؤلفه‌های گذرا، همین‌طور در این رساله، مقدار $\rho = 5$ پیشنهاد شده است [۵۸].

۴-۲-۲-۲- مسئله حساسیت الگوریتم به نواحی ابتدا و انتهای سیگنال^۱

الگوریتم LMD نیز همانند الگوریتم EMD از اثرات نواحی مرزی متأثر می‌شود. برای بهبود عملکرد الگوریتم EMD در نواحی انتهایی سیگنال، تاکنون چندین روش پیشنهاد شده است که از آن جمله می‌توان به گسترش آینه‌ای^۲ سیگنال در دو انتها و افزودن موج‌های مشخصه^۳ اشاره کرد [۱۶، ۵۹].

در تکنیک گسترش آینه‌ای، سیگنال مورد نظر در ابتدا و انتها به صورت معکوس آینه‌ای تکرار می‌شود تا یک سیگنال طولانی‌تر به دست آید. اکنون می‌توان الگوریتم EMD یا LMD را بر روی

^۱ The end effect issue

^۲ Mirror extension

^۳ Characteristic waves

قسمت میانی این سیگنال طولانی (که همان سیگنال اصلی است) اعمال کرد. در این صورت برای نواحی انتهایی سیگنال اصلی، عملیات غربال‌گری با توجه به دنباله‌های مصنوعی ایجاد شده، انجام می‌شود و بنابراین از شدت اثرات نواحی انتهایی بر روی این الگوریتم‌ها کاسته خواهد شد. در این رساله یک تکنیک گسترش آینه‌ای بهبودیافته، برای کاهش اثرات مخرب نواحی انتهایی سیگنال بر الگوریتم LMD، مورد استفاده قرار گرفته است [۵۳]. مطابق این روش محل قرارگیری آینه براساس چهار قاعده زیر تعیین می‌شود:

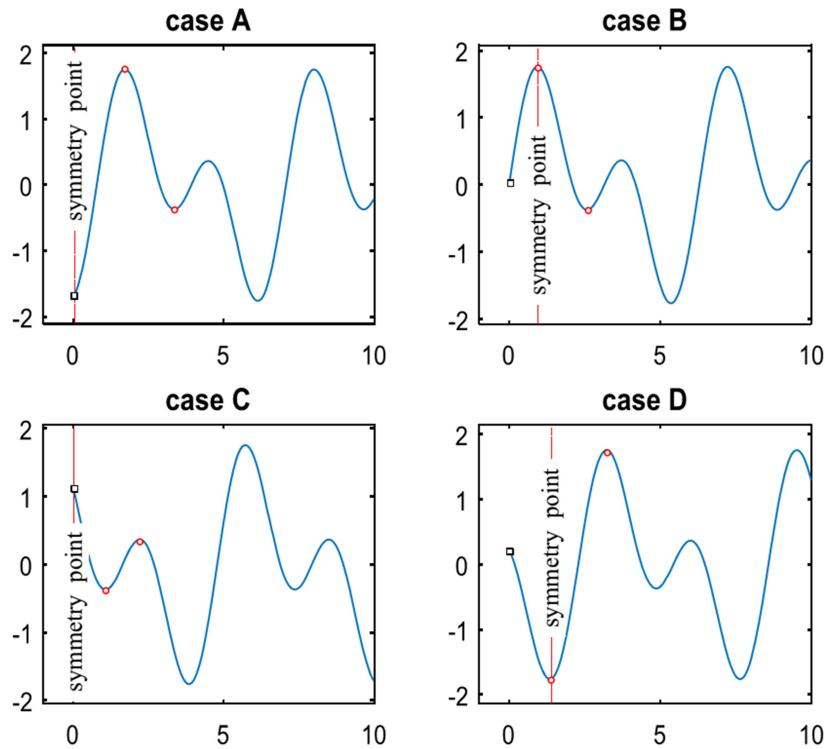
(۱) اگر اولین اکستریم موضعی یک نقطه ماکزیمم باشد و مقدار سیگنال در نقطه انتهایی از اولین مینیمم موضعی کوچکتر باشد، آنگاه محل قرارگیری آینه همان نقطه انتهایی خواهد بود.

(۲) اگر اولین اکستریم موضعی یک نقطه ماکزیمم باشد و مقدار سیگنال در نقطه انتهایی از اولین مینیمم موضعی کوچکتر نباشد، آنگاه محل قرارگیری آینه بر اولین ماکزیمم موضعی منطبق خواهد شد.

(۳) اگر اولین اکستریم موضعی یک نقطه مینیمم باشد و مقدار سیگنال در نقطه انتهایی از اولین ماکزیمم موضعی بزرگتر باشد، آنگاه محل قرارگیری آینه همان نقطه انتهایی خواهد بود.

(۴) اگر اولین اکستریم موضعی یک نقطه مینیمم باشد و مقدار سیگنال در نقطه انتهایی از اولین ماکزیمم موضعی بزرگتر نباشد، آنگاه محل قرارگیری آینه بر اولین مینیمم موضعی منطبق خواهد شد.

قواعد فوق برای تعیین محل قرارگیری آینه در انتهای سمت چپ سیگنال (ابتدا) تشریح شد. بدیهی است که از قواعد مشابه، می‌توان برای انتهای سمت راست سیگنال (انتها) نیز استفاده کرد. قواعد فوق در شکل ۴-۱ به‌عنوان نمونه نشان داده شده است.



شکل ۴-۱- تعیین محل قرارگیری موقعیت آینه برای گسترش سیگنال به روش گسترش آینه‌ای بهبود یافته [۵۳]

۴-۲-۲- مسئله معیار توقف^۱ در الگوریتم LMD

مطابق آنچه در گام چهارم الگوریتم LMD ارائه شد، روند غربال‌گری تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که $s_{lq}(t)$ یک سیگنال FM خالص شود که بین ۱- و ۱+ نوسان می‌کند. بنابراین در این مرحله باید یک معیار توقف تعریف شود که در صورت برآورده شدن آن، روند تکرار خاتمه پیدا کند. در این رساله، از یک معیار توقف مطابق رابطه (۴-۹) استفاده شده است [۵۳].

$$SD = RMS(z(n)) + EK(z(n)) \quad (4-9)$$

که در آن $z(n) = a(n) - 1$ سیگنال پوش دامنه با خط مبنای صفر^۱ می‌باشد؛ $RMS(z(n))$ و

^۱ Stoppage criterion

$EK(z(n))$ به ترتیب معرف جذر میانگین مربعات و کشیدگی اضافی^۲ سیگنال $z(n)$ می‌باشند و

مطابق روابط (۱۰-۴) و (۱۱-۴) تعریف می‌شوند.

$$RMS(z(n)) = \sqrt{\frac{1}{N_s} \sum_{n=1}^{N_s} (z(n))^2} \quad (10-4)$$

$$EK(z) = \frac{\frac{1}{N_s} \sum_{n=1}^{N_s} (z(n) - \bar{z})^4}{\left[\frac{1}{N_s} \sum_{n=1}^{N_s} (z(n) - \bar{z})^2 \right]^2} - 3 \quad (11-4)$$

در روابط اخیر، N_s و $\bar{z}$ به ترتیب نشان‌دهنده طول سیگنال و میانگین حسابی^۳ سیگنال $z(n)$ می‌باشند. در واقع با استفاده از رابطه (۹-۴) تضمین می‌کند که سیگنال باقیمانده با خط مبنای صفر، از هر دو دیدگاه کلی و موضعی دارای کمترین انرژی می‌باشد. بدین منظور، چنانچه به ازای تکرار j ام داشته باشیم: $SD_{j+1} > SD_j$ و $SD_{j+2} > SD_{j+1}$ ، آنگاه روند غربال‌گری خاتمه می‌یابد و تابع حاصلضرب (PF) با توجه به نتایج تکرار $(j-1)$ ام ساخته می‌شود. در غیر این صورت، غربال‌گری تا زمانی که j به یک مقدار حداکثر از پیش تعیین شده برسد، ادامه پیدا می‌کند.

لازم به ذکر است برنامه کامپیوتری نگارش شده برای الگوریتم LMD اصلاح شده (شامل اصلاحات مذکور) در نرم‌افزار متلب، در پیوست این رساله (بخش پ-۳) ارائه گردیده است.

۴-۳- روش پیشنهادی برای شناسایی پارامترهای مودال با استفاده از

تکنیک LMD

الگوریتم LMD تاکنون توسط پژوهشگران مختلف به‌طور موفقیت آمیز برای تشخیص آسیب‌های

¹ Zero base-line envelope signal

² Excess kurtosis

³ Ensemble average

موجود در ماشین‌های دوار^۱ مورد استفاده قرار گرفته است [۴۷-۴۹]. با این وجود تاکنون قابلیت این روش در استخراج پارامترهای مودال سازه‌ها، به‌طور مشخص مورد بررسی قرار نگرفته است. معادله ارتعاش یک سیستم n درجه آزادی مطابق رابطه (۴-۱۲) قابل بیان می‌باشد.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (۴-۱۲)$$

که در آن $\mathbf{M}$ ، $\mathbf{C}$ و $\mathbf{K}$ به‌ترتیب معرف ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه می‌باشند؛ $\mathbf{x}(t)$ و $\mathbf{F}(t)$ نیز به‌ترتیب بردار تغییر مکان‌های سازه و بردار نیروهای خارجی وارد بر سازه را نشان می‌دهند. با فرض وجود مودهای نرمال، معادله ارتعاش مود j ام این سازه را می‌توان مطابق رابطه (۴-۱۳) نشان داد.

$$\ddot{q}_j(t) + 2\xi_j\omega_j\dot{q}_j(t) + \omega_j^2q_j(t) = \Phi_j^T\mathbf{F}(t)/m_j \quad (۴-۱۳)$$

که در آن $q_j(t)$ بازتاب مودال j ام؛ ξ_j ، ω_j و m_j به‌ترتیب نسبت میرایی، فرکانس طبیعی و جرم مودال مود j ام می‌باشند. همچنین Φ_j نشان‌دهنده بردار شکل مود j ام است و بالانویس «T» برای نشان دادن ترانزپوز ماتریس یا بردار استفاده شده است. متعاقباً بازتاب شتاب سازه در درجه آزادی p ام، $\ddot{x}_p(t)$ ، مطابق رابطه (۴-۱۴) به‌دست می‌آید.

$$\ddot{x}_p(t) = \sum_{j=1}^n \phi_{pj}\ddot{q}_j(t) \quad ; (p = 1, 2, \dots, n) \quad (۴-۱۴)$$

که در آن ϕ_{pj} درایه p ام بردار شکل مود Φ_j می‌باشد. در مسائل شناسایی سازه، معمولاً بازتاب شتاب سازه در تعدادی از درجات آزادی و احتمالاً به‌صورت آلوده با نویز در دسترس می‌باشد و هدف استخراج بردار شکل مودها، نسبت‌های میرایی و فرکانس‌های طبیعی می‌باشد. در مواردی که بازتاب‌های ناشی از ارتعاش آزاد و یا ارتعاش ناشی از بار ضربه برای یک سازه در دسترس باشد، روش پیشنهادی برای شناسایی پارامترهای مودال شامل مراحل زیر می‌باشد:

¹ Rotating machinery

(۱) طیف فوریه بازتاب‌های اندازه‌گیری شده رسم شده و یک محدوده تقریبی در اطراف هر یک از فرکانس‌های غالب این بازتاب‌ها تعیین می‌شود.

(۲) بر اساس محدوده‌های تقریبی مشخص شده در مرحله قبل، یک سری فیلترهای میان‌گذر مناسب تعریف شده و به بازتاب‌های موجود اعمال می‌شوند. این مرحله سبب حذف مشکل تداخل مودها در الگوریتم LMD خواهد شد.

(۳) الگوریتم LMD بر روی هر یک از بازتاب‌های فیلترشده اعمال می‌شود تا توابع حاصلضرب متناظر (PF) به‌دست آیند. در این مرحله توابع دامنه لحظه‌ای (IA) و فاز لحظه‌ای متناظر (IP) با هر PF نیز تعیین می‌شوند.

(۴) برای z امین PF استخراج شده، شیب خطوط برازش شده بر منحنی‌های IP و $\ln(IA)$ در برابر زمان در یک محدوده مناسب، به‌ترتیب، $\omega_{dj} = \omega_j \sqrt{1 - \xi_j^2}$ و $-\xi_j \omega_j$ را تخمین می‌زنند. در این مرحله از تکنیک برازش خطی حداقل مربعات در یک بازه زمانی مناسب استفاده می‌شود. این بازه زمانی با توجه به فرکانس مود مورد نظر طوری تعیین می‌شود که حتی الامکان منحنی‌های نامبرده به فرم خطی نزدیک باشند.

(۵) برای شناسایی بردارهای شکل مود با استفاده از این روش، باید بازتاب‌های سازه در تمام درجات آزادی اندازه‌گیری شود. در این‌صورت، مقدار مطلق و علامت درایه‌های بردار شکل مود z ام نسبت به یک درایه مرجع اختیاری، به استفاده از روابط (۴-۱۵) و (۴-۱۶) تعیین می‌شوند.

$$|\phi_{pj}| / |\phi_{qj}| = \exp[IA'_{pj}(t_0) - IA'_{qj}(t_0)] \quad (۱۵-۴)$$

$$\varphi_{pj,q} = IP'_{pj}(t_0) - IP'_{qj}(t_0) \quad (۱۶-۴)$$

که در آنها، ϕ_{pj} و ϕ_{qj} به‌ترتیب نشان دهنده درایه‌های p ام و q ام بردار شکل مود z ام، Φ_j را می‌باشند. اختلاف فاز دو درایه فوق را مشخص می‌کند؛ $IA'_{xy}(t_0)$ و $IP'_{xy}(t_0)$ به‌ترتیب مقادیر متناظر با خطوط برازش شده بر منحنی‌های $\ln(IA)$ و IP در لحظه زمانی t_0 می‌باشند؛ زیرنویس‌های « pj » و « qj » نیز به‌ترتیب مقادیر متناظر با مود z ام شناسایی شده توسط بازتاب

اندازه‌گیری شده در درجات آزادی p ام و q ام را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که در حالتی که با مودهای نرمال سر و کار داریم، مقدار $\varphi_{pj,q}$ یکی از مقادیر $\pm 2m\pi$ یا $\pm(2m+1)\pi$ را خواهد گرفت [۱۷] که در آنها m یک عدد صحیح است.

روش پیشنهادی در مواردی که بازتاب‌های سازه ناشی از تحریکات مبهم محیطی^۱ در دسترس باشند نیز قابل استفاده می‌باشد. در این موارد، باید بازتاب‌های فیلتر شده از مرحله دوم روش پیشنهادی را با استفاده از تکنیک کاهش تصادفی^۲ (RDT) به توابع RD^۳ تبدیل کرد [۴۴]. این توابع مشابه بازتاب‌های ازتغاش آزاد هستند و می‌توانند به عنوان ورودی برای الگوریتم LMD در گام سوم مورد استفاده قرار گیرند.

بزرگترین مزیت روش پیشنهادی این است که تنها با استفاده از یک بازتاب سازه، قادر است کلیه نسبت‌های میرایی و فرکانس‌های طبیعی مودهایی که تحریک شده‌اند را محاسبه کند. با این وجود، شناسایی کامل سازه و تعیین بردارهای شکل مودها مستلزم داشتن بازتاب‌های سازه در تمام درجات آزادی می‌باشد. مزیت دیگر این روش نسبت به روش‌های شناسایی مبتنی بر الگوریتم EMD این است که، در روش پیشنهادی توابع دامنه لحظه‌ای و فاز لحظه‌ای مستقیماً در طی عملیات غربال‌گری به دست می‌آیند؛ این در حالی است که در روش‌های شناسایی مبتنی بر الگوریتم EMD، پس از عملیات غربال‌گری لازم است که توابع فوق با استفاده از تبدیل هیلبرت^۴ محاسبه شوند.

¹ Ambient excitations

² Random Decrement Technique (RDT)

³ RD signatures

⁴ Hilbert Transform (HT)

۴-۴- ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در شناسایی پارامترهای مودال

سازه‌ها

در این بخش عملکرد روش پیشنهادی با استفاده از چند شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بدین منظور، عملکرد روش پیشنهادی برای دو حالت ارتعاش آزاد و ارتعاش محیطی به‌طور جداگانه مورد مطالعه قرار گرفته است.

۴-۴-۱- مطالعه موردی اول: شناسایی پارامترهای مودال یک قاب برشی سه درجه

آزادی

در این بخش یک قاب برشی سه درجه آزادی مطابق شکل ۴-۲، با مشخصات دینامیک معلوم در نظر گرفته می‌شود. جرم، سختی و میرایی ویسکوز کلیه طبقات با یکدیگر برابر هستند:

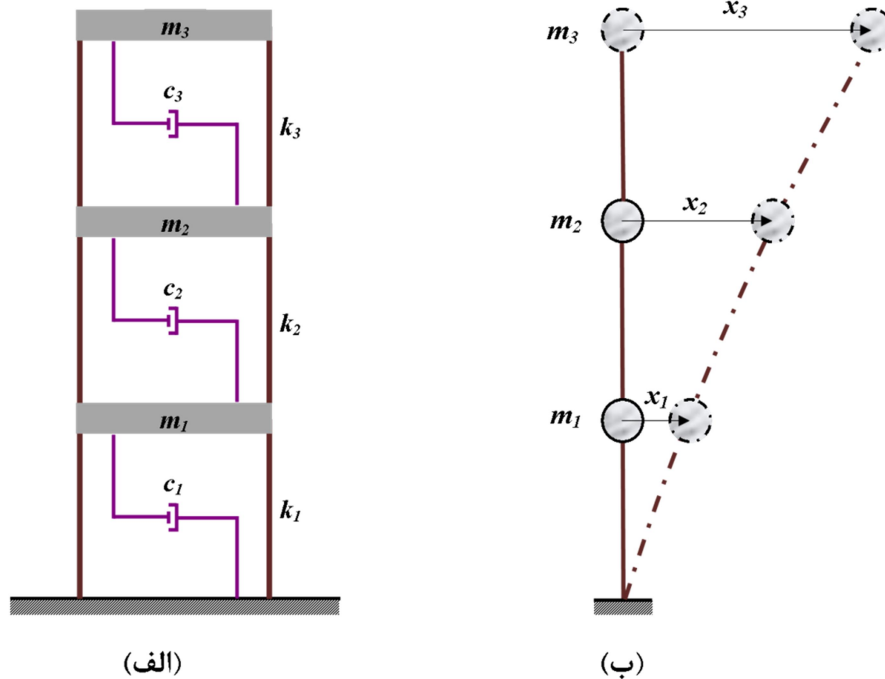
$$m_j = 1000 \text{ kg}, k_j = 980 \text{ kN / m}, c_j = 2.814 \text{ kN .sec / m}; (j = 1, 2, 3) \quad [۱۷]$$

بر اساس نوع بازتاب‌های اندازه‌گیری شده، دو سناریو برای این مطالعه عددی در نظر گرفته شده است: الف) آزمون ارتعاش آزاد؛ ب) آزمون ارتعاش محیطی. در ادامه نتایج شناسایی هر یک از این موارد به‌طور جداگانه ارائه شده است.

۴-۴-۱-۱- آزمون ارتعاش آزاد

در این آزمون، یک نیروی ضربه به بزرگی $F_0 = 1 \text{ kN}$ به درجه آزادی دوم از قاب برشی سه طبقه اعمال می‌شود و بازتاب‌های شتاب در تمام درجات آزادی اندازه‌گیری می‌شوند. برای بررسی اثر نویز بر روی عملکرد روش پیشنهادی، تعدادی نویز سفید گوسی نیز شبیه‌سازی شده و به هر یک از بازتاب‌های شتاب افزوده می‌شود. در این مطالعه، سطح نویز درجه آزادی j ام (R_{nj}) به‌صورت $R_{nj} = \sigma_j / \max |\ddot{x}_j(t)|$ تعریف می‌شود؛ که در آن σ_j انحراف معیار نویز شبیه‌سازی شده برای

درجه آزادی z ام می‌باشد. برای اینکه امکان مقایسه نتایج با روش مبتنی بر EMD فراهم باشد [۱۷]، مقدار سطح نویز برای کلیه درجات آزادی ۵٪ در نظر گرفته شده است ($R_{nj} = 5\%$; $j = 1, 2, 3$).

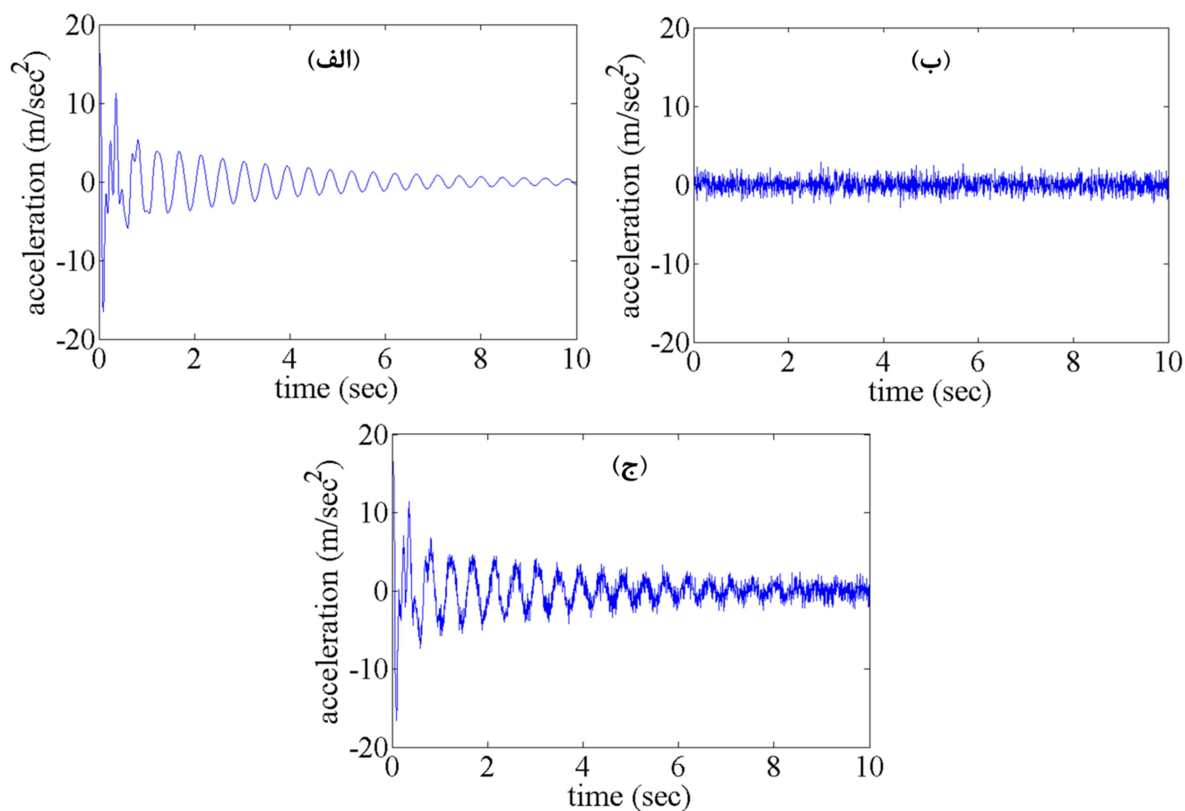


شکل ۴-۲- (الف) قاب برشی سه طبقه برای مطالعه موردی اول (ب) مدل ساده شده آن

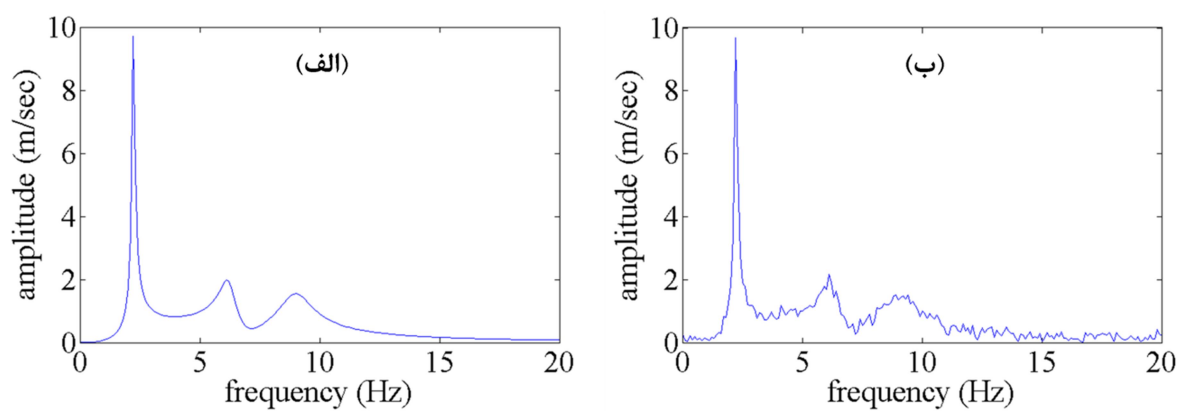
بازتاب شتاب درجه آزادی سوم، نویز شبیه‌سازی شده متناظر و بازتاب آلوده به نویز متناظر با آن در شکل ۴-۳ نشان داده شده است. علاوه بر این، طیف فوریه بازتاب شتاب درجه آزادی سوم در دو حالت بدون نویز و با نویز در شکل ۴-۴ به نمایش درآمده است. همان‌طور که در نمودارهای شکل ۴-۴ ملاحظه می‌شود، سه فرکانس غالب قابل تشخیص می‌باشد که اولین آنها در حدود 2 Hz ، دومین آنها در حدود 6 Hz و سومین آنها در حدود 8 Hz قرار دارند. بنابراین باندهای گذر مناسب برای مرحله فیلتر کردن عبارتند از: $1.8\text{ Hz} < f_{bp1} < 4.3\text{ Hz}$ ، $4.3\text{ Hz} < f_{bp2} < 7.7\text{ Hz}$ و $7.7\text{ Hz} < f_{bp3} < 16.7\text{ Hz}$.

اکنون فیلترهای میان‌گذر مناسب برای هر یک از باندهای عبور فوق تعریف می‌شوند و بر روی

بازتاب شتاب موجود (درجه آزادی سوم) اعمال می‌شوند. نهایتاً با اعمال الگوریتم LMD بر روی بازتاب‌های فیلترشده، توابع حاصلضرب (PF)، فاز لحظه‌ای (IP) و دامنه لحظه‌ای (IA) به‌دست می‌آیند.

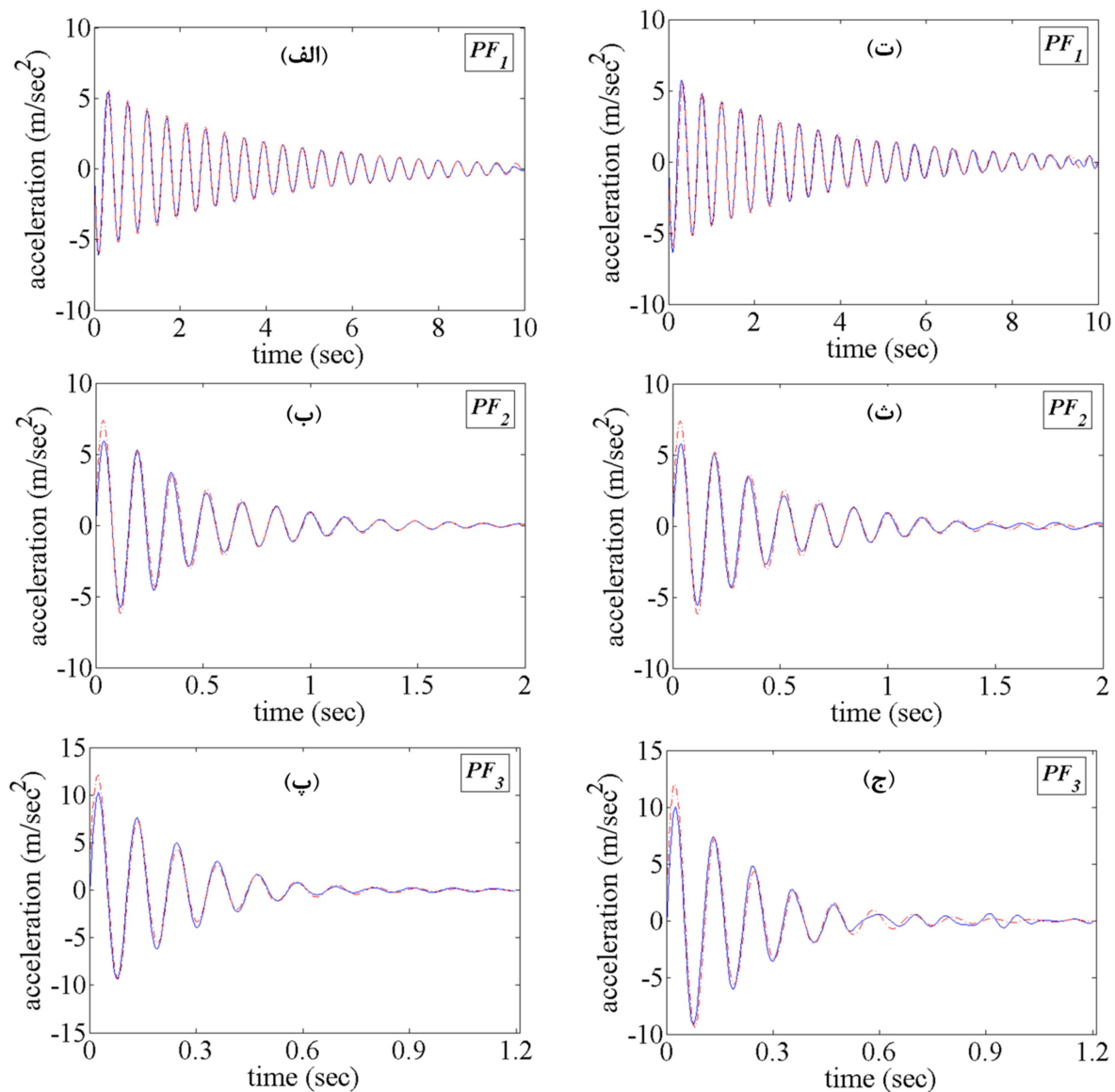


شکل ۳-۴- (الف) بازتاب شتاب درجه آزادی سوم؛ (ب) نویز شبیه سازی شده؛ (ج) بازتاب آلوده به نویز



شکل ۴-۴- طیف فوریه بازتاب شتاب درجه آزادی سوم (الف) بدون نویز؛ (ب) با نویز

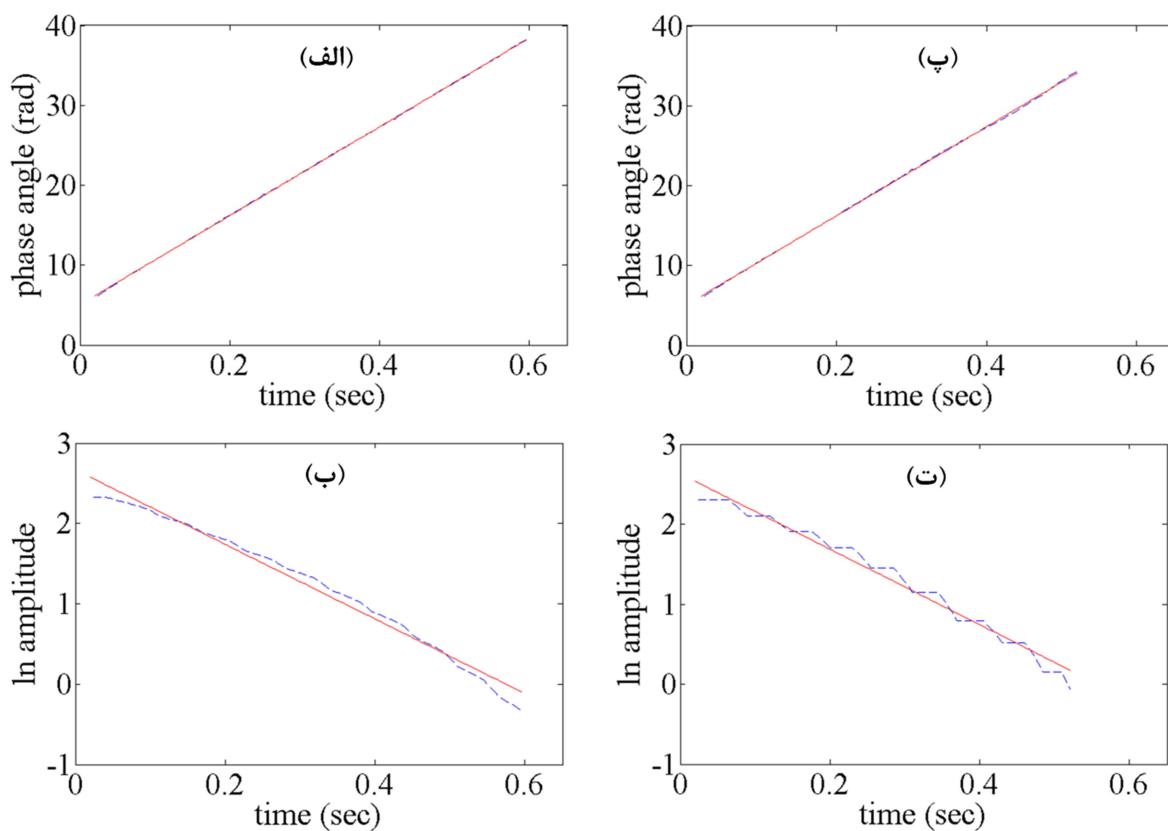
توابع PF استخراج شده در نمودارهای شکل ۴-۵ نشان داده شده است. در این نمودارها، منحنی‌های خط چین نشان‌دهنده مقادیر دقیق شتاب‌های مودال، حاصل از آنالیز مودال قاب موردنظر، می‌باشند. خاطر نشان می‌شود که توابع PF در واقع متناظر با بازتاب‌های مودال شتاب، $\ddot{q}_j(t)$ هستند.



شکل ۴-۵- توابع PF استخراج شده توسط روش پیشنهادی (منحنی توپر) همراه با بازتاب‌های مودال دقیق (منحنی خط چین): (الف) تا (پ) حاصل از بازتاب‌های بدون نویز؛ (ت) تا (ج) حاصل از بازتاب‌های دارای نویز

همان‌طور که در این نمودارها ملاحظه می‌شود، مودهای استخراج شده توسط روش پیشنهادی

به خوبی با بازتاب‌های مودال دقیق مطابقت دارند. با این وجود، دقت شناسایی برای مودهای بالاتر که کمتر تحریک شده‌اند، اندکی پایین‌تر است. نمودارهای مربوط به فاز لحظه‌ای و لگاریتم طبیعی دامنه لحظه‌ای در برابر زمان در شکل ۴-۶ نشان داده شده‌اند. همچنین، خطوط برازش شده بر این منحنی‌ها نیز در این شکل قابل مشاهده می‌باشند. برای اختصار تنها توابع مربوط به مود سوم که پایین‌ترین دقت را دارد در هر دو حالت با نویز و بدون نویز، نشان داده شده است.



شکل ۴-۶- نمودارهای IP_3 و $\ln(IA_3)$ برای مود سوم (خط چین)، به همراه خطوط برازش شده بر این منحنی‌ها (توپر): (الف و ب) حاصل از بازتاب‌های بدون نویز؛ (پ و ت) حاصل از بازتاب‌های با نویز

نتایج شناسایی حاصل از روش پیشنهادی و نتایج مربوط به روش HHT (الگوریتم EMD به علاوه تبدیل هیلبرت)، در هر دو حالت وجود یا عدم وجود نویز، به همراه مقادیر تئوریک آنها در جدول ۴-۱ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، فرکانس‌های طبیعی کلیه مودها با دقت بالایی توسط

هر دو روش پیشنهادی و روش HHT استخراج شده‌اند. به‌طوری که بیشترین خطای برآورد فرکانس طبیعی که مربوط به مود سوم است، برای روش پیشنهادی و روش HHT به‌ترتیب برابر ۱/۱٪ و ۰/۴٪ می‌باشد. در رابطه با نسبت‌های میرایی نیز، دقت هر دو روش برای دو مود اول بالاست؛ ولی این دقت برای مود سوم کاهش یافته است. به‌طوری که خطای برآورد نسبت میرایی مود سوم در حالت وجود نویز برای روش پیشنهادی برابر ۴٪ و برای روش HHT برابر ۶/۲٪ می‌باشد. علاوه بر این، نویز اضافه شده به بازتاب‌ها تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر نتایج شناسایی ندارد. دلیل این امر، پیش‌پردازش بازتاب‌ها توسط فیلترهای میان‌گذر می‌باشد که منجر به حذف قسمت عمده‌ای از نویز موجود در آنها می‌شود. با این وجود اثر نویز بر شناسایی نسبت‌های میرایی تا حدودی شدیدتر از فرکانس‌های طبیعی است.

جدول ۴-۱- مقایسه پارامترهای مودال شناسایی شده با روش پیشنهادی و روش HHT، به همراه مقادیر تئوریک آنها

شماره مود	روش پیشنهادی				روش HHT [17]				مقادیر تئوریک
	$R_{nj} = 5\%$		$R_{nj} = 0$		$R_{nj} = 5\%$		$R_{nj} = 0$		
	ξ (%)	f (Hz)	ξ (%)	f (Hz)	ξ (%)	f (Hz)	ξ (%)	f (Hz)	
۱	۲/۱۰	۲/۲۲	۱/۹۸	۲/۲۱	۲/۱۰	۲/۲۲	۱/۹	۲/۲۱	۲/۰۰
۲	۵/۶۴	۶/۲۱	۵/۴۷	۶/۲۲	۵/۷۰	۶/۲۲	۵/۵	۶/۱۹	۵/۶۰
۳	۸/۳۲	۸/۸۸	۸/۴۳	۸/۹۱	۷/۸۰	۸/۹۴	۷/۶	۸/۹۴	۸/۱۰

برای مقایسه بهتر، نمودارهای مربوط به فاز لحظه‌ای، دامنه لحظه‌ای و بازتاب مودال شناسایی شده توسط هر دو روش پیشنهادی و روش HHT، در یک بازه زمانی بزرگتر، در شکل ۴-۷ نشان داده شده است. در اینجا نیز برای اختصار، تنها نتایج مربوط به مود سوم ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مسئله اثر نواحی انتهایی بر روی روش پیشنهادی به مراتب کمتر از روش HHT می‌باشد.

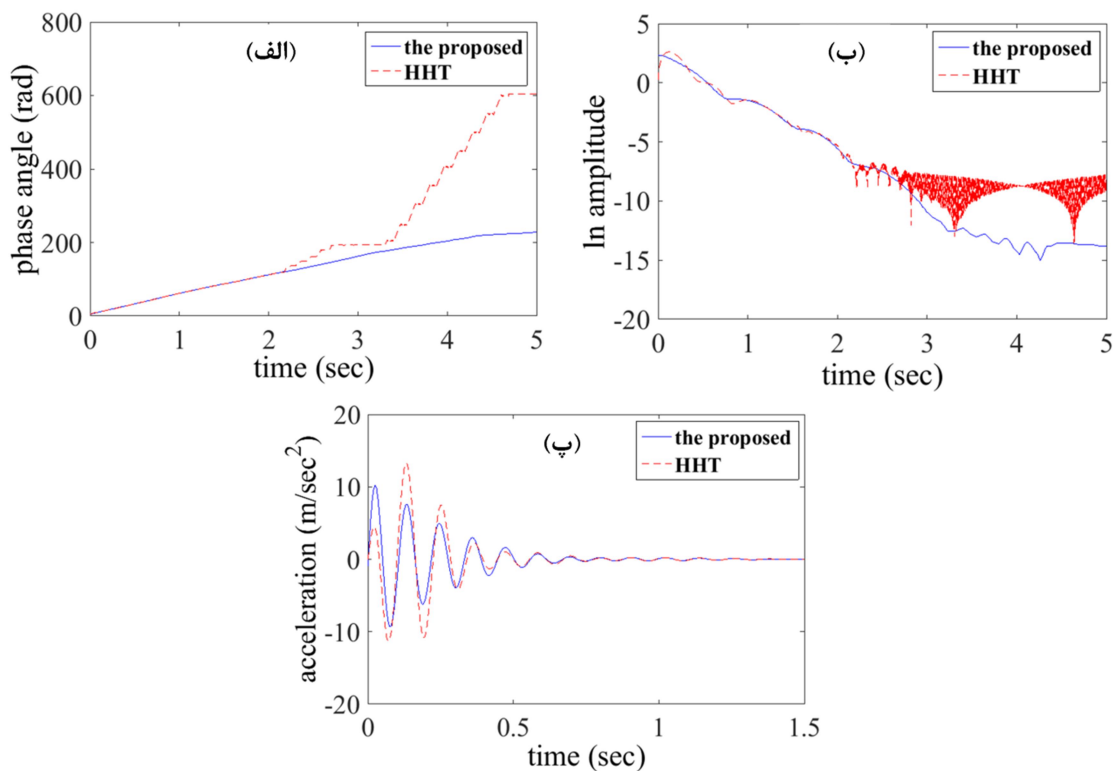
همچنین، نمودارهای فاز لحظه‌ای و دامنه لحظه‌ای به دست آمده از روش پیشنهادی، نسبت به روش HHT، به فرم خطی نزدیک‌تر هستند. جهت روشن شدن اهمیت این نکته، باید توجه کرد که فرکانس‌های طبیعی و نسبت‌های میرایی محاسبه شده در جدول ۴-۱ تنها با برازش خط بر قسمت محدودی از این نمودارها، بین دو لحظه زمانی مناسب، به دست آمده‌اند. بنابراین در صورت استفاده از روش HHT باید مراقبت بیشتری در انتخاب این بازه زمانی انجام شود تا نتایج دقت قابل قبولی داشته باشند.

برای شناسایی بردارهای شکل مودها با استفاده از روش پیشنهادی از روابط ارائه شده در بخش قبل استفاده می‌شود. غالباً معیار اطمینان مودی^۱ (MAC) که توسط رابطه (۴-۱۷) تعریف می‌شود، برای ارزیابی دقت شناسایی بردارهای شکل مودها مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۷].

$$MAC_i = \frac{(\phi_i^T \bar{\phi}_i)^2}{(\phi_i^T \phi_i)(\bar{\phi}_i^T \bar{\phi}_i)} \quad (۴-۱۷)$$

که در آن، ϕ_i و $\bar{\phi}_i$ به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر تئوریک و برآورد شده بردار شکل مود i ام هستند. مقادیر پارامتر MAC برای مودهای شناسایی شده، در دو حالت وجود یا عدم وجود نویز، در جدول ۴-۲ آمده است.

^۱ Modal Assurance Criterion (MAC)



شکل ۴-۷- مقایسه نمودارهای حاصل از روش پیشنهادی با روش HHT برای مود سوم در یک بازه زمانی بزرگتر: (الف) فاز لحظه‌ای؛ (ب) دامنه لحظه‌ای؛ (پ) بازتاب مودال شناسایی شده

جدول ۴-۲- مقادیر پارامتر MAC برای مودهای شناسایی شده توسط روش پیشنهادی و روش HHT

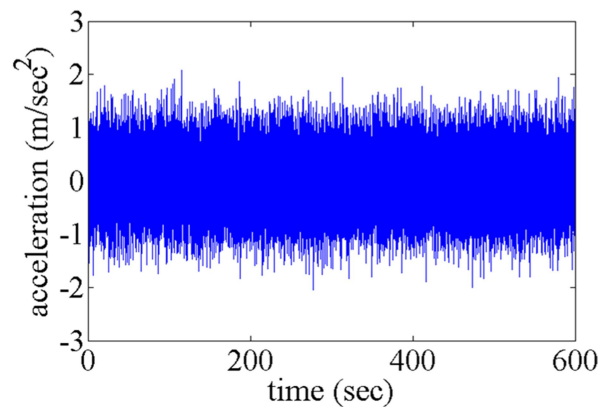
شماره مود	روش پیشنهادی				روش HHT [۱۷]
	$R_{nj} = 5\%$	$R_{nj} = 0$	$R_{nj} = 5\%$	$R_{nj} = 0$	
۱	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۱/۰۰	۱/۰۰
۲	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۹۹۸
۳	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۹۹۸	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹

همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌شود، مقادیر MAC بزرگتر از ۰/۹۹ نشان‌دهنده این است

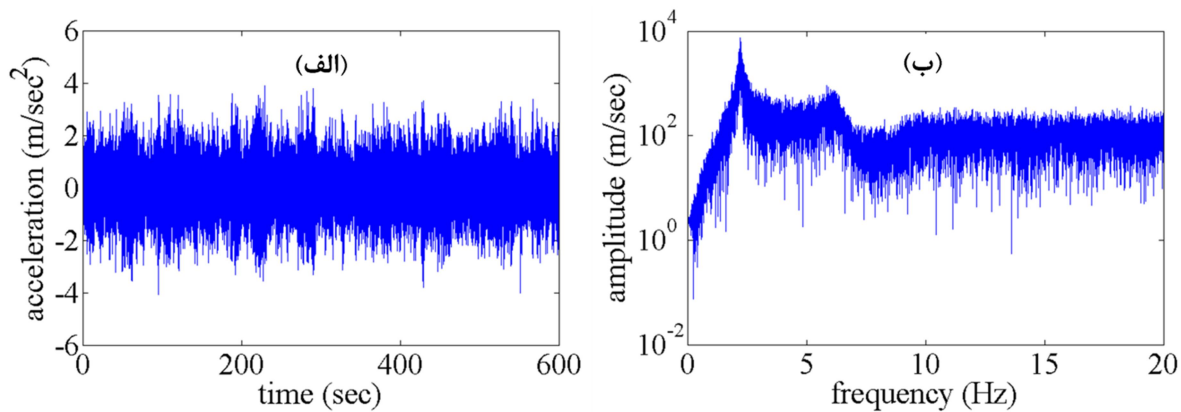
که کلیه مودها با دقت بالایی توسط هر دو روش شناسایی شده‌اند.

۴-۱-۲- آزمون ارتعاش محیطی

در این بخش، قاب برشی موردنظر تحت یک تحریک مبهم محیطی در پایه خود قرار می‌گیرد. همان‌طور که در شکل ۸-۴ نشان داده شده است، این تحریک خارجی به‌صورت یک نویز گوسی سفید شبیه‌سازی شده است. بازتاب شتاب درجه آزادی سوم به همراه طیف فوریه آن در شکل ۹-۴ به نمایش درآمده است.



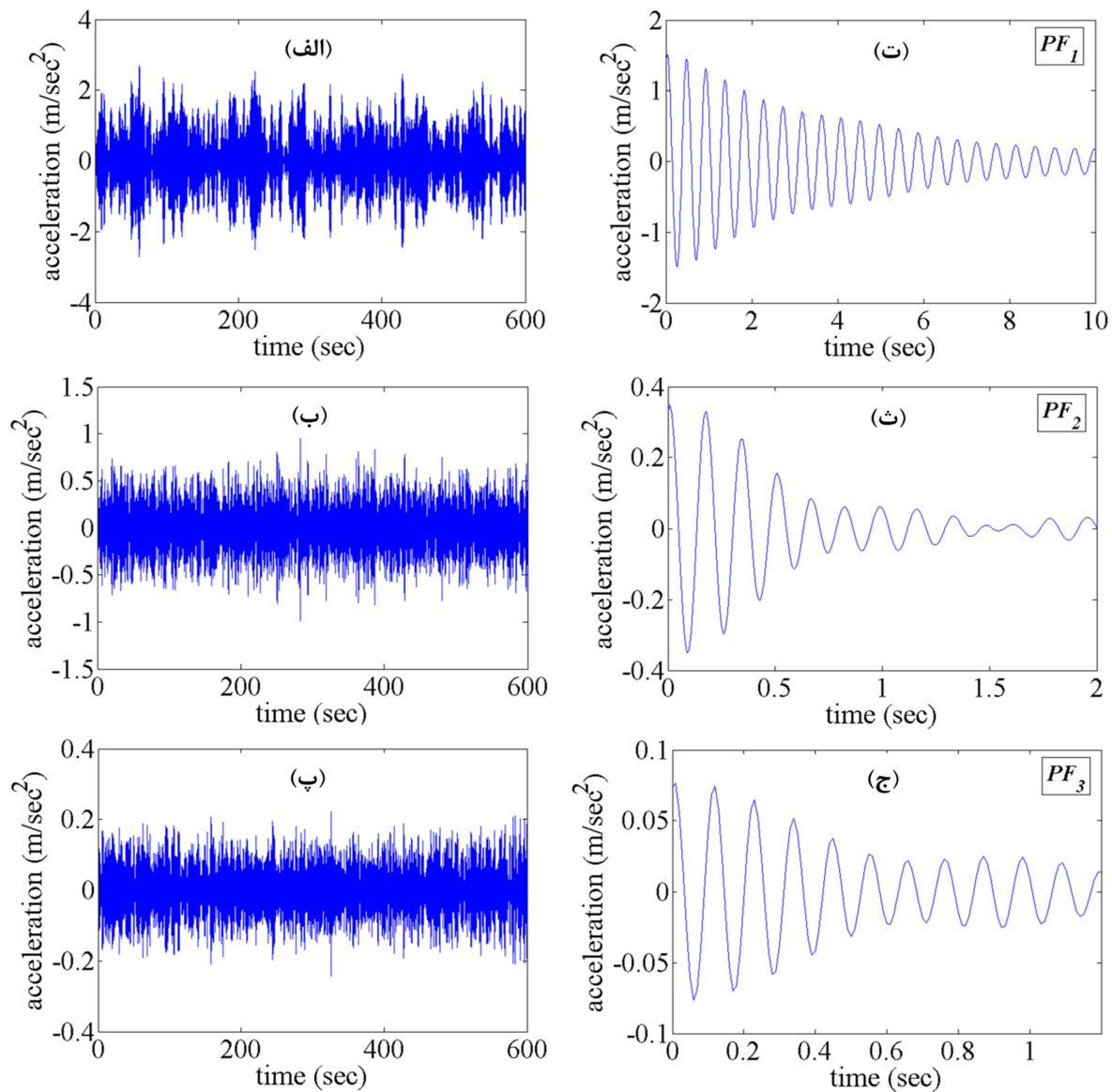
شکل ۸-۴- تحریک مبهم محیطی وارد بر پایه قاب برشی، شبیه‌سازی شده برای مطالعه موردی اول



شکل ۹-۴- (الف) بازتاب شتاب درجه آزادی سوم قاب برشی، تحت تحریک خارجی مبهم؛ (ب) طیف فوریه این بازتاب

با توجه به طیف فوریه نشان داده شده در شکل ۹-۴، مود سوم ارتعاشی تحت این نوع تحریک

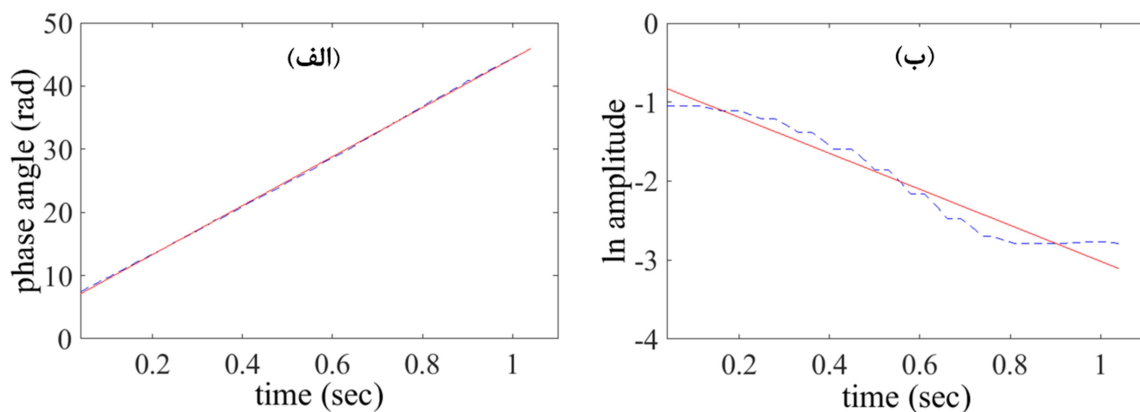
خارجی به خوبی برانگیخته نشده است. بنابراین می‌توان انتظار داشت که نتایج شناسایی این مود نسبت به دو مود دیگر دقت پایین‌تری داشته باشد.



شکل ۴-۱۰- (الف) تا (پ) سیگنال‌های فیلترشده حاصل از بازتاب درجه آزادی سوم؛ (ت) تا (ج) توابع PF شناسایی شده توسط روش پیشنهادی (آزمون ارتعاش محیطی)

در این آزمون نیز می‌توان از همان فیلترهای میان‌گذر تعریف شده در آزمون ارتعاش آزاد استفاده کرد. براساس روش پیشنهادی، قبل از اعمال الگوریتم LMD بر روی بازتاب‌های فیلتر شده، باید توابع

RD متناظر آنها با استفاده از تکنیک RDT ساخته شوند. بدین منظور، بازه $[0.5\sigma, +\infty]$ به عنوان «سطح راه اندازی»^۱ در نظر گرفته می شود؛ که در آن، σ انحراف معیار متناظر با هریک از بازتاب های فیلتر شده است. سیگنال های فیلتر شده و توابع PF شناسایی شده توسط روش پیشنهادی در نمودارهای شکل ۴-۱۰ نشان داده شده اند. همچنین به عنوان نمونه، نمودارهای فاز لحظه ای و دامنه لحظه ای، شناسایی شده توسط روش پیشنهادی، برای مود دوم در شکل ۴-۱۱ نشان داده شده اند. همان طور که در این شکل ملاحظه می شود، اگرچه نمودار فاز لحظه ای به خوبی با خط برازش شده بر آن مطابقت می کند ولی منحنی مربوط به دامنه لحظه ای نسبت به خط برازش شده بر آن اختلاف مشهودی دارد. این بدان معناست که دقت برآورد نسبت های میرایی در این آزمون نسبت به فرکانس های طبیعی پایین تر خواهد بود.



شکل ۴-۱۱- نمودارهای (الف) فاز لحظه ای و (ب) دامنه لحظه ای شناسایی شده برای مود دوم (آزمون ارتعاش محیطی)

مقایسه بین فرکانس های طبیعی و نسبت های میرایی مودهای شناسایی شده توسط روش پیشنهادی با روش HHT در جدول ۴-۳ ارائه شده است. نتایج جدول حاکی از این است که روش پیشنهادی کلیه فرکانس های طبیعی را با دقت بالایی شناسایی کرده است؛ حتی برای مود سوم که به

^۱ Triggering level

خوبی تحریک نشده است خطای برآورد فرکانس طبیعی برای روش پیشنهادی به $1/8\%$ و برای روش HHT به $2/9\%$ محدود شده است. از طرف دیگر، خطای برآورد نسبت‌های میرایی مودهای اول و دوم که توسط روش پیشنهادی شناسایی شده‌اند به ترتیب عبارتند از: 1% و 4.6% . این خطا در روش HHT برای مودهای اول و دوم، به ترتیب 25.5% و 3.9% می‌باشد. همان‌طور که انتظار می‌رفت، دقت برآورد نسبت میرایی مود سوم توسط هر دو روش بسیار پایین و غیرقابل قبول می‌باشد.

لازم به ذکر است که تکنیک RDT مورد استفاده در روش پیشنهادی (برای حالتی که بازتاب‌ها ناشی از تحریک خارجی مبهم هستند)، منجر به برهم‌خوردن اختلاف فاز بین مودها می‌شود و بنابراین عملاً امکان استخراج شکل مودها در این حالت وجود ندارد. لذا معیار اطمینان مودی (MAC) در جدول ۳-۴ ارائه نشده است.

جدول ۳-۴- مقایسه نتایج شناسایی قاب برشی سه طبقه توسط روش پیشنهادی و روش HHT (آزمون ارتعاش محیطی)

شماره مود	روش پیشنهادی		روش HHT		مقادیر تحلیلی (دقیق)	
	f (Hz)	ξ (%)	f (Hz)	ξ (%)	f (Hz)	ξ (%)
۱	۲/۲۳	۲/۰۲	۲/۲۳	۲/۵۱	۲/۲۲	۲/۰
۲	۶/۱۹	۵/۸۶	۶/۲۱	۵/۳۸	۶/۲۱	۵/۶
۳	۹/۱۴	۳/۷۹	۹/۲۴	۴/۶۱	۸/۹۸	۸/۱

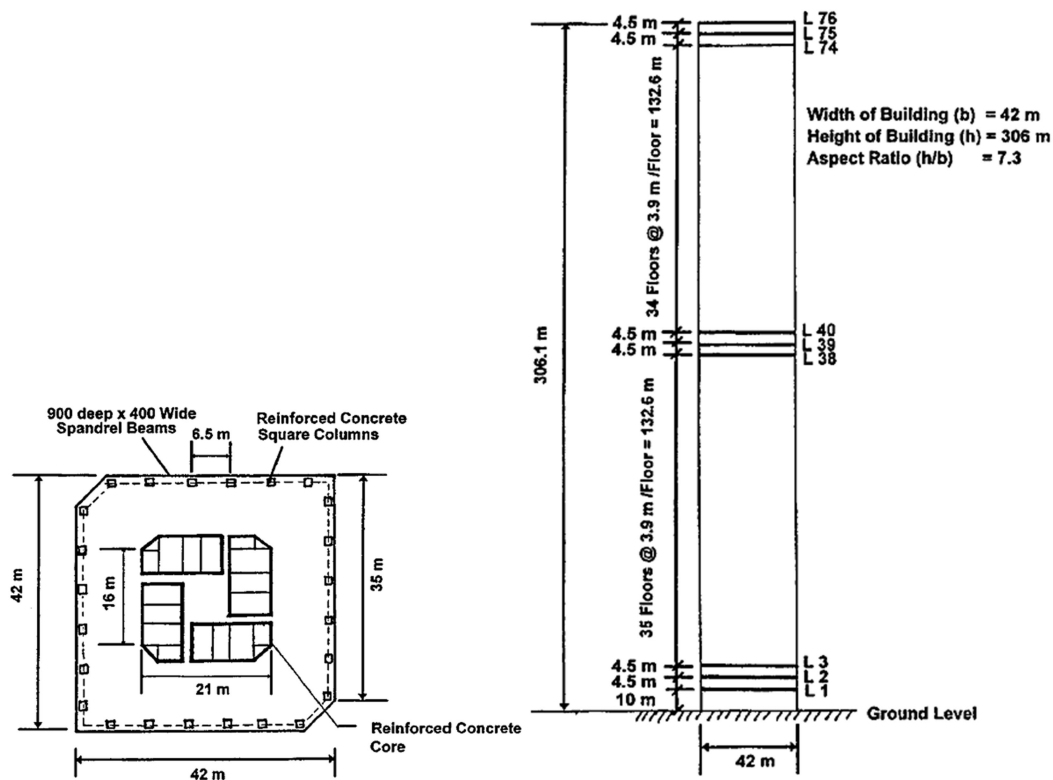
۴-۴-۲- مطالعه موردی دوم: شناسایی پارامترهای مودال یک ساختمان بلند

موجود، تحت اثر نیروی مجهول باد

در این بخش عملکرد روش پیشنهادی با شناسایی یک سازه معیار^۱ مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این سازه یک ساختمان بتنی بلند ۷۶ طبقه با ارتفاع ۳۰۶ متر است که در شهر ملبورن استرالیا واقع شده

^۱ Benchmark structure

است. این ساختمان دارای نسبت ارتفاع به عرض ۷/۳، یک سازه لاغر و حساس در مقابل نیروی باد محسوب می‌شود. مدلی از این سازه بلند در دانشگاه سیدنی استرالیا ساخته شده و تحت آزمایش تونل باد قرار گرفته است [۶۰]. تصویری از پلان و نمای این ساختمان در شکل ۴-۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۲- پلان و نمای ساختمان ۷۶ طبقه بتنی واقع در شهر ملبورن استرالیا [۶۰]

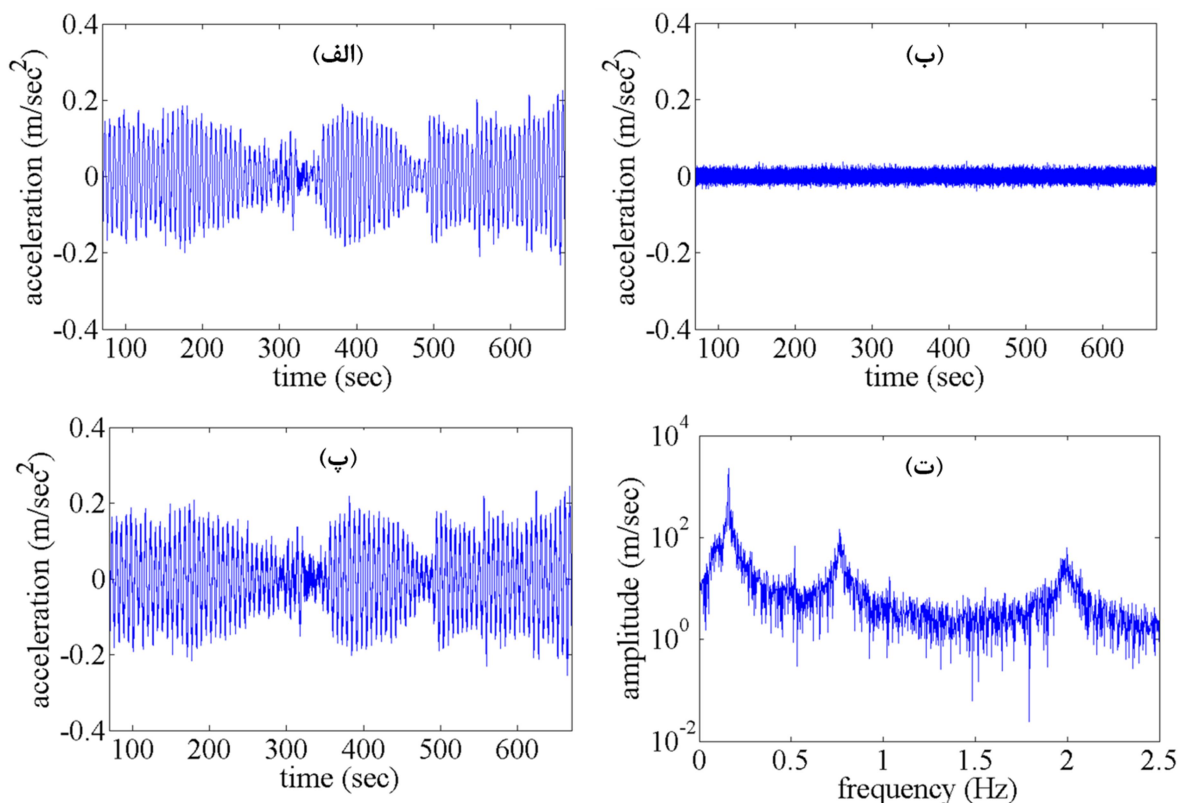
یانگ و همکاران^۱ در سال ۲۰۰۴ تحقیقی را منتشر کردند که در آن به شناسایی پارامترهای مودال این سازه معیار با استفاده از روش HHT، از روی داده‌های شبیه‌سازی شده از تونل باد، پرداخته بودند [۶۱]. مطابق پژوهش مذکور، در این بخش از رساله سطح نویز موجود در داده‌ها با استفاده از رابطه $R_n = \sigma_v / \sigma_x$ تعریف شده است که در آن σ_v ، به ترتیب انحراف معیارهای بازتاب شتاب و نویز می‌باشند. با در نظر گرفتن سطح نویز $R_n = 10\%$ ، یک نویز گوسی سفید، v ، شبیه‌سازی شده و به

^۱ Yang et al.

بازتاب شتاب تراز بام، $\ddot{x}_{76}$ ، اضافه شده است تا بازتاب شتاب حاوی نویز برای این درجه آزادی به دست

$$\text{آید: } \ddot{y}_{76} = \ddot{x}_{76} + v$$

نمودارهای موبوط به بازتاب شتاب تراز بام بدون نویز ($\ddot{x}_{76}$)، نویز شبیه‌سازی شده (v) و بازتاب شتاب تراز بام با نویز ($\ddot{y}_{76}$)، به ترتیب در شکل ۴-۱۳ (الف، ب و پ) نشان داده شده‌اند. برای اطمینان از وجود بازتاب ماندگار^۱ و حذف بازتاب‌های گذرا، تنها تاریخچه زمانی بازتاب شتاب در بازه زمانی [70 670] ثانیه برای شناسایی مورد استفاده قرار گرفته است. طیف فوریه بازتاب شتاب موجود (دارای نویز) نیز در شکل ۴-۱۳ (ت) ترسیم شده است.

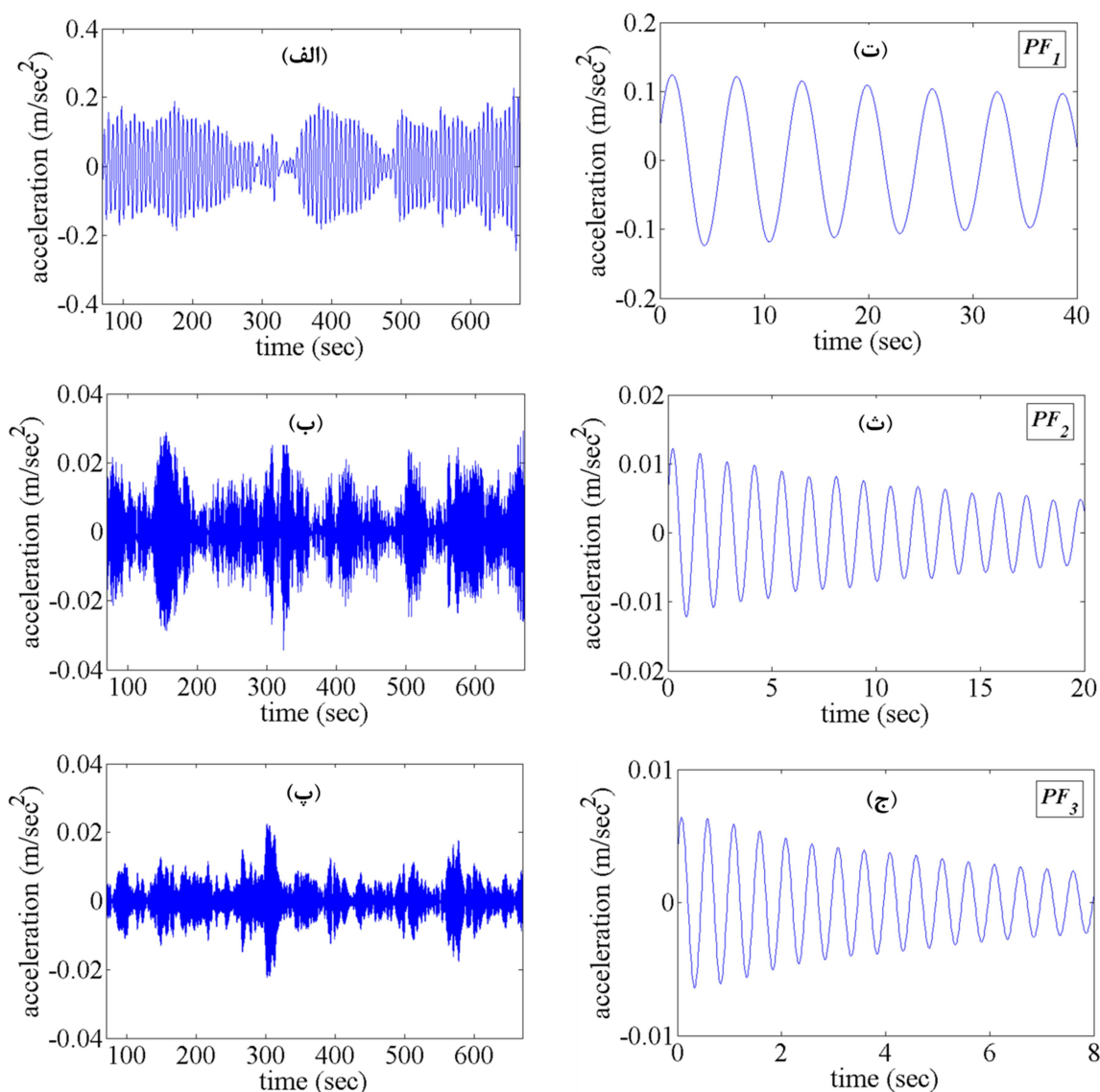


شکل ۴-۱۳- (الف) بازتاب شتاب تراز بام از سازه معیار تحت تحریک باد؛ (ب) نویز شبیه‌سازی شده؛ (پ) بازتاب اندازه‌گیری شده دارای نویز؛ (ت) طیف فوریه بازتاب اندازه‌گیری شده

پس از اعمال فیلترهای میان‌گذر در باندهای فرکانسی فوق، نوبت به تشکیل توابع RD با استفاده

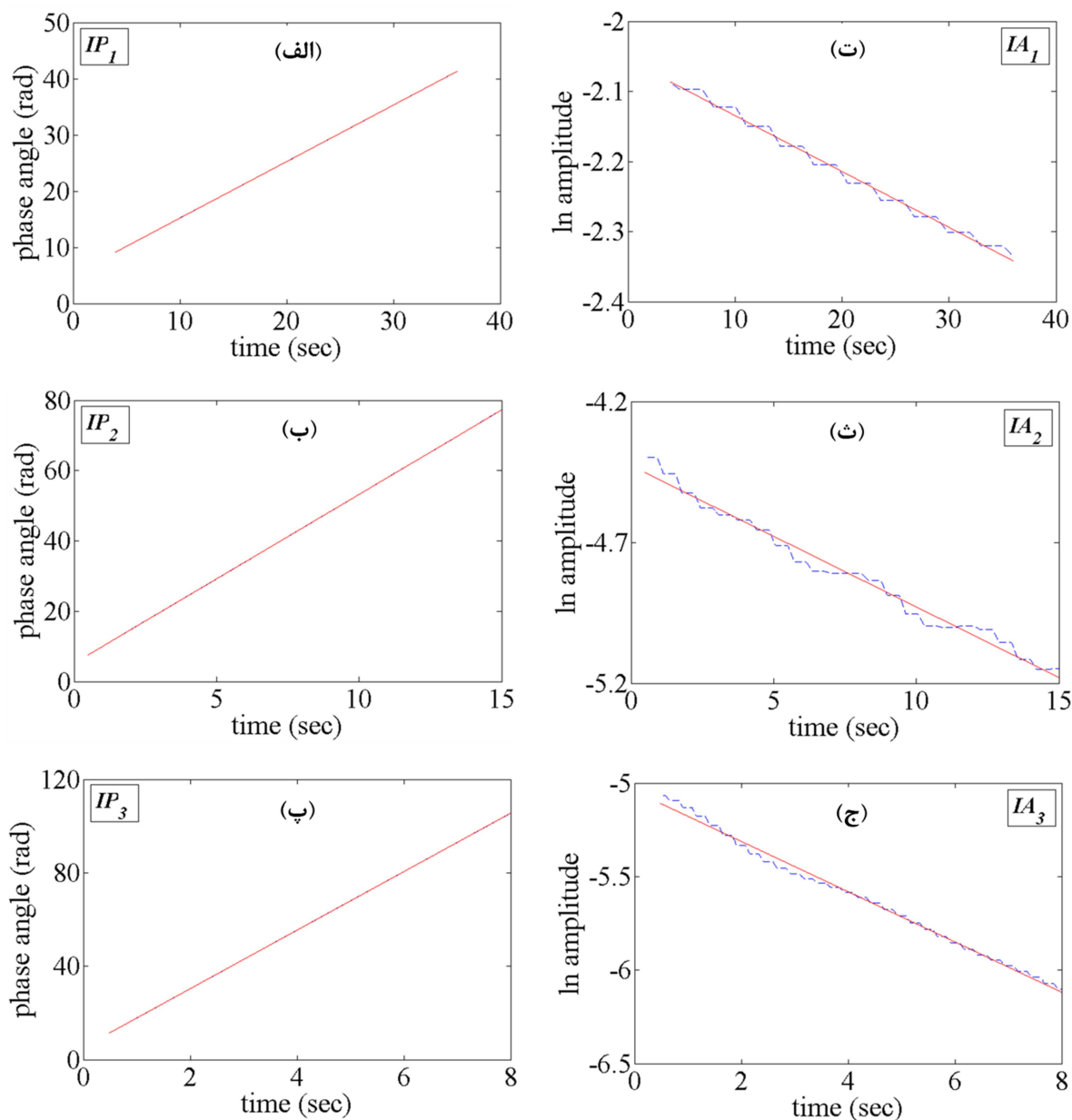
¹ Steady state response

از تکنیک RDT می‌باشد. این بازتاب‌ها به نوعی مشابه بازتاب‌های ارتعاش آزاد سیستم هستند. سطح راه‌اندازی این تکنیک برای مطالعه حاضر، به‌صورت بازه $[0.3\sigma, +\infty]$ در نظر گرفته شده است؛ که در آن σ معرف انحراف معیار هر یک از بازتاب‌های فیلترشده می‌باشد. پس از اعمال الگوریتم LMD بر روی توابع RD، توابع PF، IP و IA برای هر یک از مودها به‌دست می‌آید. سیگنال‌های فیلترشده حاصل از بازتاب شتاب تراز بام دارای نویز $(\ddot{y}_{76})$ ، به همراه توابع PF متناظر با آنها در شکل ۴-۱۴ ترسیم شده است.



شکل ۴-۱۴- (الف) تا (پ): سیگنال‌های فیلتر شده حاصل از بازتاب شتاب بام؛ (ت) تا (ج): توابع PF شناسایی شده نمودارهای مربوط به توابع فاز لحظه‌ای و دامنه لحظه‌ای برای مودهای شناسایی شده با استفاده از

روش پیشنهادی، در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است. خطوط توپر در این نمودارها نشان‌دهنده خطوط برازش شده بر منحنی‌های مذکور، به روش حداقل مربعات، می‌باشند.



شکل ۴-۱۵ - (الف) تا (پ): توابع فاز لحظه‌ای مودهای شناسایی شده؛ (ت) تا (ج): توابع دامنه لحظه‌ای مودهای شناسایی شده

با توجه به اینکه هر سه مود فعال به خوبی برانگیخته شده‌اند، توابع IP و IA این مودها، در بازه

های زمانی نسبتاً طولانی، تطابق خوبی با خطوط برازش شده بر آنها دارند. بنابراین می‌توان انتظار داشت نتایج شناسایی با استفاده از روش پیشنهادی دقت بالایی را برای هر سه مود داشته باشد. مقادیر برآورد شده برای فرکانس‌های طبیعی و نسبت های میرایی این مودها توسط روش پیشنهادی، به همراه نتایج روش HHT و مقادیر تحلیلی، در دو حالت وجود یا عدم وجود نویز، در جدول ۴-۴ ارائه شده است.

جدول ۴-۴- مقایسه نتایج شناسایی روش پیشنهادی با روش HHT برای سازه معیار، به همراه مقادیر تحلیلی

مقادیر تحلیلی	روش HHT [۶۱]					روش پیشنهادی				شماره مود
	$R_n = 10\%$		$R_n = 0$		$R_n = 10\%$		$R_n = 0$			
ξ (%) f (Hz)	ξ (%) f (Hz)	ξ (%) f (Hz)	ξ (%) f (Hz)	ξ (%) f (Hz)	ξ (%) f (Hz)	ξ (%) f (Hz)	ξ (%) f (Hz)	ξ (%) f (Hz)		
۱/۰۰ ۰/۱۶	۰/۹۱ ۰/۱۶	۱/۰۳ ۰/۱۶			۰/۹۹ ۰/۱۶		۰/۹۹ ۰/۱۶		۱	
۱/۰۰ ۰/۷۶	۱/۰۶ ۰/۷۷	۱/۰۶ ۰/۷۷			۱/۰۴ ۰/۷۶		۱/۰۵ ۰/۷۶		۲	
۱/۰۰ ۱/۹۹	۱/۰۰ ۱/۹۸	۰/۹۵ ۱/۹۸			۱/۰۷ ۱/۹۹		۱/۰۱ ۱/۹۹		۳	

نتایج جدول فوق نشان می‌دهند که هر دو روش پیشنهادی و روش HHT قادر به شناسایی دقیق فرکانس‌ها طبیعی برای هر سه مود تحریک شده، هستند. در مورد نسبت‌های میرایی نیز اگرچه دقت برآورد در مودهای بالاتر مقداری کاهش داشته است (خطای برآورد ۷٪ برای روش پیشنهادی و ۶٪ برای روش HHT) ولی باز هم در تمام موارد دقت قابل قبولی توسط هر دو روش فراهم شده است. علاوه بر این، نویز موجود در بازتاب اندازه‌گیری شده، تأثیر چندانی بر نتایج شناسایی نداشته است.

۴-۵- جمع‌بندی

در این فصل، یک روش جدید، مبتنی بر الگوریتم LMD، برای شناسایی پارامترهای مودال سازه‌ها

پیشنهاد گردید. این روش قادر است کلیه فرکانس‌های طبیعی و نسبت‌های میرایی مودهای فعال در بازتاب‌های سازه را تنها با استفاده از یک بازتاب مناسب شناسایی کند. این بازتاب می‌تواند ناشی از ارتعاش آزاد سازه و یا تحریک خارجی مبهم محیطی (مثل ارتعاشات ناشی از باد یا ترافیک) باشد. با این وجود، شناسایی کامل سازه و تعیین شکل مودها نیازمند اندازه‌گیری بازتاب سازه در تمام درجات آزادی می‌باشد. برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، دو مطالعه موردی انجام گرفت و در آنها با استفاده از بازتاب‌های شبیه‌سازی شده پارامترهای مودال سازه‌های مورد نظر برآورد شد. نتایج نشان دادند که روش پیشنهادی در تمام موارد از دقت قابل قبولی، حتی در حضور نویز، برخوردار است.

فصل پنجم: بهبود تکنیک جداسازی ناپیدای منابع به منظور
شناسایی پارامترهای مودال سازه‌ها با استفاده از تعداد محدودی از
بازتاب‌ها

۵- بهبود تکنیک جداسازی ناپیدای منابع به منظور شناسایی پارامترهای

مودال سازه‌ها با استفاده از تعداد محدودی از بازتاب‌ها

۵-۱- پیشگفتار

در این فصل به معرفی تکنیک جداسازی ناپیدای منابع^۱ (BSS) و استفاده از آن برای شناسایی پارامترهای مودال سازه‌ها پرداخته می‌شود. بدین منظور، ابتدا اصول این الگوریتم و فرمول‌بندی آن ارائه شده و سپس برخی از مشکلاتی که برای استفاده از این روش برای شناسایی سازه وجود دارد، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه یک روش پیشنهادی برای رفع مشکلات مذکور جهت شناسایی پارامترهای مودال سازه ارائه شده و عملکرد آن توسط چند شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۵-۲- الگوریتم جداسازی ناپیدای منابع

تکنیک‌های جداسازی ناپیدای سیگنال‌ها، اولین بار در اوایل دهه ۸۰ میلادی برای پردازش سیگنال در زمینه مدل‌سازی شبکه عصبی^۲ مطرح شد. در دو دهه اخیر مطالعات گسترده‌ای روی این مقوله شکل گرفته و زمینه کاربرد آن را در زیرشاخه‌های مختلف علم فراهم کرده است.

^۱ Blind Source Separation (BSS)

^۲ Neural Network

تکنیک BSS عبارت است از بازیابی سیگنال‌های مشاهده نشده یا همان «منابع» از روی ترکیباتی از آنها که مشاهده شده‌اند. معمولاً مشاهدات از طریق خروجی مجموعه‌ای از سنسورها، که هر یک ترکیبات خطی مختلفی از سیگنال‌های منابع را دریافت کرده‌اند، به دست می‌آیند. صفت «ناپیدا» بر این حقیقت تأکید دارد که: (۱) سیگنال‌های منبع مشاهده نمی‌شوند؛ (۲) هیچ‌گونه اطلاعاتی درباره نحوه ترکیب سیگنال‌ها وجود ندارد. در واقع در مواردی که هیچ‌گونه اطلاعات اولیه‌ای درباره نحوه انتقال سیگنال‌ها از منبع به سنسورها موجود نیست، استفاده از این روش اجتناب‌ناپذیر است. نبود اطلاعات قبلی درباره نحوه ترکیب با فرض استقلال آماری^۱ سیگنال‌های منبع جبران می‌شود. اگرچه این فرضیه به لحاظ آماری یک فرض قوی محسوب می‌شود ولی اغلب به لحاظ فیزیکی قابل پذیرش است [۶۲].

۵-۲-۱- فرمول‌بندی ریاضی الگوریتم BSS

به لحاظ ریاضی مدل BSS مطابق رابطه (۵-۱) فرمول‌بندی می‌شود.

$$\{x(t)\} = [A]\{s(t)\} + \{n(t)\} \quad (۵-۱)$$

که در آن $\{x(t)\}$ بردار سیگنال‌های مشاهده شده، $\{s(t)\}$ بردار سیگنال‌های منابع مجهول، $[A]$ ماتریس ترکیب مجهول و $\{n(t)\}$ بردار نویز موجود در داده‌ها می‌باشند. رابطه فوق در حالت کلی فاقد حل ریاضی می‌باشد؛ با این وجود، با در نظر گرفتن فرض استقلال آماری برای منابع، امکان حل آن با استفاده از یکی از روش‌های مبتنی بر BSS امکان‌پذیر می‌باشد. دو الگوریتم اساسی برای جداسازی ناپیدای منابع عبارتند از: تحلیل مؤلفه‌های مستقل^۲ و جداسازی ناپیدای منابع با استفاده از آمار مرتبه دوم^۳.

در تحلیل مؤلفه‌های مستقل برای جداسازی فرض می‌شود که سیگنال‌های منبع (همان مؤلفه‌های

^۱ Statistical independence

^۲ Independent Component Analysis (ICA)

^۳ Second-Order Blind Source Separation (SOBSS)

مستقل)، غیرگوسی هستند و یا حداکثر غیرگوسی بودن^۱ را دارا می‌باشند [۲۶]. حداکثر غیرگوسی بودن سیگنال‌های منبع بر اساس یک اصل آماری تحت عنوان اصل حد مرکزی^۲ است که به صورت زیر بیان می‌شود:

« تحت شرایط خاص، توزیع آماری حاصل جمع (یا ترکیب خطی) چند متغیر تصادفی مستقل، نسبت به هر یک از آنها به طور مجزا، به توزیع گوسی نزدیک‌تر است»

با توجه به اصل فوق، برای یافتن مؤلفه‌های مستقل کافی است به دنبال متغیرهایی باشیم که حداکثر غیرگوسی بودن را داراست. برای ماکزیمم کردن غیرگوسی بودن می‌توان توابع هدف متفاوتی تعریف کرد که از آن جمله می‌توان به کورتیز^۳ و نگانتروپی^۴ اشاره کرد [۲۶]. با وجود کاربرد گسترده این روش در شاخه‌های مختلف علم، به دلیل حساسیت بالای روش ICA به وجود میرایی در داده‌ها [۲۸]، این روش کاربرد چندانی در مسائل شناسایی سیستم‌های سازه‌ای پیدا نکرده است.

در الگوریتم SOBSS، ساختار زمانی داده‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد و تنها با استفاده از آمار مرتبه دوم عملیات جداسازی سیگنال‌ها انجام می‌گیرد. معمولاً فرض می‌شود که نویز موجود در داده‌ها یک فرآیند تصادفی سفید و مستقل از سیگنال‌های منبع باشد، بنابراین داریم [۲۷]:

$$E(\{n(t)\}\{n(t + \tau)\}) = \sigma^2 \delta(\tau) [I] \quad (۲-۵)$$

که در آن، $E(.)$ معرف عملگر امید ریاضی^۵ است؛ σ واریانس نویز، $\delta(\tau)$ و $[I]$ به ترتیب نشان دهنده دلتای کرونکر^۶ و ماتریس یکک^۷ می‌باشند. اکنون با توجه به روابط (۱-۵) و (۲-۵) رابطه (۳-۵) به دست خواهد آمد.

$$[R(x, \tau)] = [A][R(s, \tau)][A]^H \quad ; \tau \neq 0 \quad (۳-۵)$$

¹ Non-Gaussianity

² Central Limit Theorem

³ Kurtosis

⁴ Negentropy

⁵ Expectation operator

⁶ Kronecker delta

⁷ Identity matrix

که در آن $[R(x, \tau)] = E(\{x(t)\}\{x(t + \tau)\})$ ماتریس همبستگی سیگنال‌های خروجی برای تأخیر زمانی τ می‌باشد. به‌طور مشابه $[R(s, \tau)] = E(\{s(t)\}\{s(t + \tau)\})$ معرف ماتریس همبستگی تأخیری سیگنال‌های منبع است. هم‌چنین، بالانویس « H » برای نشان دادن ترانزفاده هرمیتی ماتریس موردنظر به کار رفته است. از آنجا که در الگوریتم BSS فرض بر این است که سیگنال‌های منابع به لحاظ آماری مستقل هستند، بنابراین $[R(s, \tau)]$ یک ماتریس قطری خواهد بود. چنانچه ماتریس $[A]$ یک ماتریس با مرتبه کامل و معکوس‌پذیر باشد، با تعریف $[W] = [A]^{-1}$ رابطه (۳-۵) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$[W][R(x, \tau)][W]^H = [D] \quad (۴-۵)$$

که در آن، $[D] = [R(s, \tau)]$ یک ماتریس قطری است. رابطه (۴-۵) در واقع یک مسئله «تجزیه مقدار ویژه» برای ماتریس همبستگی سیگنال‌های ورودی محسوب می‌شود. از این نقطه‌نظر، $[W]$ ماتریسی است که ستون‌های آن بردارهای ویژه ماتریس $[R(x, \tau)]$ را تشکیل می‌دهند و $[D]$ نیز ماتریس قطری حاوی مقادیر ویژه این ماتریس است. بنابراین برای حل معادله (۴-۵) کافی است بردارهای ویژه ماتریس همبستگی بردار مشاهدات را به ازای چند تأخیر زمانی محاسبه کنیم. سپس با ضرب ماتریس معکوس بردارهای ویژه ($[W] = [A]^{-1}$) در بردار سیگنال‌های خروجی $\{x(t)\}$ ، بردار سیگنال‌های منابع $\{s(t)\}$ به دست خواهند آمد. غالباً به منظور عملکرد بهتر الگوریتم، ابتدا عملیات سفیدسازی^۱ بر روی بردار سیگنال‌های خروجی انجام شده و سپس ماتریس‌های همبستگی بردار مشاهدات سفید شده به ازای چندین تأخیر زمانی محاسبه می‌شود. متعاقباً با استفاده از تکنیک قطری سازی تقریبی همزمان^۲، که در فصل سوم جزئیات آن تشریح شد، ماتریس ترکیب و سپس سیگنال‌های منابع استخراج می‌شوند [۲۷]. برنامه کامپیوتری مربوط به این الگوریتم در نرم‌افزار متلب، در پیوست این رساله (بخش پ- ۴) ارائه گردیده است.

^۱ Whitening

^۲ Joint Approximate Diagonalization (JAD)

۵-۲-۲- الگوریتم SOBSS برای شناسایی پارامترهای مودال سازه‌ها

معادله ارتعاش آزاد یک سیستم چند درجه آزادی به صورت رابطه (۵-۵) قابل بیان است.

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (۵-۵)$$

که در آن $[M]$ ماتریس جرم، $[C]$ ماتریس میرایی و $[K]$ ماتریس سختی سازه هستند. $\{x(t)\}$ و $\{f(t)\}$ به ترتیب معرف بردارهای تغییر مکان و نیروی تحریک خارجی می‌باشند و بالانویس «نقطه» به معنی مشتق نسبت به زمان می‌باشد. پاسخ معادله فوق در حالت ارتعاش آزاد ($\{f(t)\} = 0$) در فضای مودال مطابق رابطه (۶-۵) بدست می‌آید.

$$\{x(t)\} = [\Phi]\{q(t)\} \quad \text{or} \quad \{\ddot{x}(t)\} = [\Phi]\{\ddot{q}(t)\} \quad (۶-۵)$$

که در آن $[\Phi]$ معرف ماتریس حاوی بردارهای شکل مودها و $\{q(t)\}$ بردار بازتاب‌های مودال سازه است که از رابطه (۷-۵) قابل محاسبه می‌باشد.

$$q_j(t) = B_{0j} e^{-\xi_j \omega_j t} \cos(\omega_{dj} t + \theta_{0j}) \quad (۷-۵)$$

در رابطه اخیر B_{0j} و θ_{0j} پارامترهای ثابتی هستند که با توجه به شرایط اولیه مسئله برای مود j ام تعیین می‌شوند. ω_j و ξ_j به ترتیب فرکانس طبیعی و نسبت میرایی مود j ام و $\omega_{dj} = \omega_j \sqrt{1 - \xi_j^2}$ فرکانس میراشونده مود j ام نامیده می‌شوند. اکنون با مقایسه رابطه (۶-۵) و رابطه (۱-۵) و در نظر گرفتن بازتاب‌های مودال سازه به عنوان منابع مجازی مستقل و ماتریس $[\Phi]$ به عنوان ماتریس ترکیب، امکان توسعه الگوریتم SOBSS به مباحث دینامیک سازه فراهم می‌شود [۲۸].

همان‌طور که در بخش ۵-۲-۱- اشاره شد، برای استفاده از الگوریتم SOBSS لازم است که ماتریس ترکیب $[A]$ یک ماتریس مربعی کامل و معکوس‌پذیر باشد. لازمه این امر این است که تعداد مشاهدات (تعداد سنسورها) با تعداد منابع برابر باشند. در حوزه دینامیک سازه‌ها، این به معنی اندازه‌گیری بازتاب سازه در تمام درجات آزادی می‌باشد که در مسائل عملی امکان‌پذیر نیست. در بخش بعد، با استفاده از تکنیک فیلترکردن، یک روش پیشنهادی برای رفع این محدودیت ارائه

می‌شود.

۵-۳- روش پیشنهادی برای شناسایی پارامترهای مودال، مبتنی بر

الگوریتم SOBSS

استفاده از الگوریتم SOBSS استاندارد در مباحث شناسایی سازه با چالش‌هایی مواجه است که مهم‌ترین آنها عبارتند از:

- استفاده از این الگوریتم نیازمند دسترسی به بازتاب‌های ارتعاش آزاد سازه می‌باشد.
- استفاده از این الگوریتم مستلزم اندازه‌گیری بازتاب سازه در تمام درجات آزادی می‌باشد.
- دقت شناسایی توسط این الگوریتم با افزایش میزان میرایی کاهش می‌یابد و در میرایی‌های بالا نتایج شناسایی به هیچ‌وجه قابل اعتماد نمی‌باشند.

معمولاً برای رفع محدودیت اول از تکنیک تحریک طبیعی استفاده می‌شود. هم‌چنین تاکنون پژوهش‌های زیادی برای رفع محدودیت دوم انجام شده است که غالباً از دو استراتژی پیروی می‌کنند. (۱) افزایش تعداد بازتاب‌ها (مشاهدات) و یا ابعاد ماتریس همبستگی متناظر آن به صورت مصنوعی؛ (۲) در نظر گرفتن فرض پراکندگی برای بازتاب‌های اندازه‌گیری شده. در این بخش، با بهره‌گیری از تکنیک فیلترکردن، یک روش جدید ارائه می‌شود که در آن به جای افزایش مصنوعی تعداد بازتاب‌ها، تعداد موده‌های فعال سازه در بازتاب‌های موجود کاهش داده می‌شود. جزئیات این روش در ادامه تشریح خواهد شد.

فرض کنید در یک سیستم n درجه آزادی تحت نوع خاصی از تحریک، بازتاب‌های آن در m درجه آزادی اندازه‌گیری شده باشد، به طوری که: $m < n$. با مرتب کردن درجات آزادی اندازه‌گیری شده از ۱ تا m ، رابطه (۵-۶)، برای هر یک از بازتاب‌های اندازه‌گیری شده به صورت زیر بسط داده می‌شود.

$$\ddot{x}_i(t) = \sum_{j=1}^n \varphi_{ij} \ddot{q}_j(t) = \varphi_{i1} \ddot{q}_1(t) + \varphi_{i2} \ddot{q}_2(t) + \dots + \varphi_{in} \ddot{q}_n(t) \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (۸-۵)$$

و یا در فرم برداری:

$$\{\ddot{x}(t)\}_{m \times N} = [\hat{\Phi}]_{m \times n} \{\ddot{q}(t)\}_{n \times N} \quad (۹-۵)$$

که در آن N طول یا مدت زمان بازتاب‌های اندازه‌گیری شده است و φ_{ij} نشان‌دهنده المان واقع بر سطر i ام و ستون j ام از ماتریس شکل مودهای ناقص سازه، $[\hat{\Phi}]$ ، می‌باشد. با توجه به رابطه (۷-۵)، ملاحظه می‌شود که بازتاب‌های مودال سازه، $\ddot{q}_i(t)$ ، توابعی تک فرکانسی هستند. بنابراین با تعریف فیلترهای فرکانسی مناسب و اعمال آنها بر روی بازتاب‌های سازه، می‌توان سیگنال‌هایی با تعداد دلخواه از مودهای فعال تولید کرد. لذا باندهای عبور این فیلترها می‌توانند طوری تعریف شوند که سیگنال‌های فیلتر شده حاصل، تعداد مودهای فعال با تعداد درجات آزادی اندازه‌گیری شده، m برابر شوند. یعنی:

$$\begin{aligned} \ddot{z}_{ij}(t) &= G_j(\ddot{x}_i) = \varphi_{ir} \ddot{q}_r(t) + \varphi_{i(r+1)} \ddot{q}_{(r+1)}(t) + \dots + \varphi_{i(r+m-1)} \ddot{q}_{(r+m-1)}(t) \\ &= \sum_{p=r}^{r+m-1} \varphi_{ip} \ddot{q}_p(t) \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n_f; \end{aligned} \quad (۱۰-۵)$$

که در آن، $\ddot{z}_{ij}(t)$ نشان‌دهنده سیگنال حاصل از فیلتر کردن بازتاب شتاب درجه آزادی i ام، $\ddot{x}_i$ توسط j امین فیلتر، $G_j(.)$ ، می‌باشد؛ زیرنویس « r » شماره مود متناظر با کوچک‌ترین فرکانس طبیعی در باند عبور j ام را نشان می‌دهد؛ معرف تعداد کل فیلترهای موردنیاز و یا تعداد باندهای عبور موردنیاز است که با توجه به تعداد درجات آزادی اندازه‌گیری شده از رابطه $n_f = \text{ceil}(n/m)$ تعیین می‌شود؛ در رابطه اخیر عملگر $\text{ceil}()$ تابعی است که هر عدد گویا را به نزدیک‌ترین عدد صحیح بزرگتر یا مساوی آن، گرد می‌کند. اکنون با توجه به رابطه (۹-۵)، فرم برداری رابطه (۱۰-۵) برای j امین باند گذر (یا فیلتر) به صورت زیر قابل نمایش می‌باشد.

$$\{\ddot{z}(t)\}_{m \times N}^{(j)} = [\hat{\Phi}]_{m \times m}^{(j)} \{\ddot{q}(t)\}_{m \times N}^{(j)} \quad (۱۱-۵)$$

که در آن، $[\hat{\Phi}]^{(j)}$ معرف ماتریس شکل مودهای نسبی سازه در مرحله فیلتر کردن z ام می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در رابطه (۵-۱۱) تعداد مودهای فعال سازه (یا همان منابع) با تعداد درجات آزادی اندازه‌گیری شده (یا همان سنسورها) برابر هستند. بنابراین الگوریتم استاندارد SOBSS را می‌توان برای شناسایی پارامترهای مودال سازه، متناظر با مودهای فعال موجود، به کار برد. برای اینکه روش پیشنهادی به‌درستی عمل کند، لازم است که باندهای عبور مربوط به فیلترهای فرکانسی طوری انتخاب شوند که تعداد فرکانس‌های غالب در هر باند عبور از تعداد درجات آزادی اندازه‌گیری شده تجاوز نکند. لازم به ذکر است که چنانچه عبارت (n/m) یک عدد صحیح نباشد، آنگاه تعدادی از مودهای سازه بیش از یک بار شناسایی خواهند شد. این قضیه مشکل خاصی برای شناسایی سازه ایجاد نمی‌کند، زیرا مودهای تکراری را می‌توان به راحتی با توجه به فرکانس‌های طبیعی‌شان تشخیص داد.

چالش دیگری که در استفاده از الگوریتم SOBSS در حوزه شناسایی پارامترهای مودال سازه‌ها وجود دارد، این است که در اغلب موارد دسترسی به بازتاب‌های ارتعاش آزاد سازه وجود ندارد. در این‌گونه موارد، چنانچه بازتاب‌های سازه تحت نوع خاصی از تحریک (مثلاً تحریک‌های خارجی محیطی^۱) موجود باشد می‌توان با استفاده از روشی که در ادامه تشریح می‌شود، توابعی معادل بازتاب‌های ارتعاش آزاد سازه ایجاد کرد. این روش در ادبیات فنی به تکنیک تحریک طبیعی معروف است [۴۲]. بر اساس این روش، با پس‌ضرب دو طرف رابطه (۵-۵) در تغییرمکان یکی از درجات آزادی اندازه‌گیری شده $x_i(s)$ (به عنوان سیگنال مرجع)، و سپس اعمال عملگر امید ریاضی به طرفین رابطه خواهیم داشت:

$$[M]\{\ddot{R}_{\ddot{x},x_i}(t,l)\} + [C]\{\dot{R}_{\dot{x},x_i}(t,l)\} + [K]\{R_{x,x_i}(t,l)\} = \{R_{f,x_i}(t,l)\} \quad (۵-۱۲)$$

که در آن $\{R_{\square}(t,l)\}$ بردار توابع همبستگی متقابل و «/» یک لحظه زمانی متفاوت است. برای

^۱ Ambient external excitation

فرآیندهای با ایستایی ضعیف^۱ می‌توان نشان داد [۴۳]:

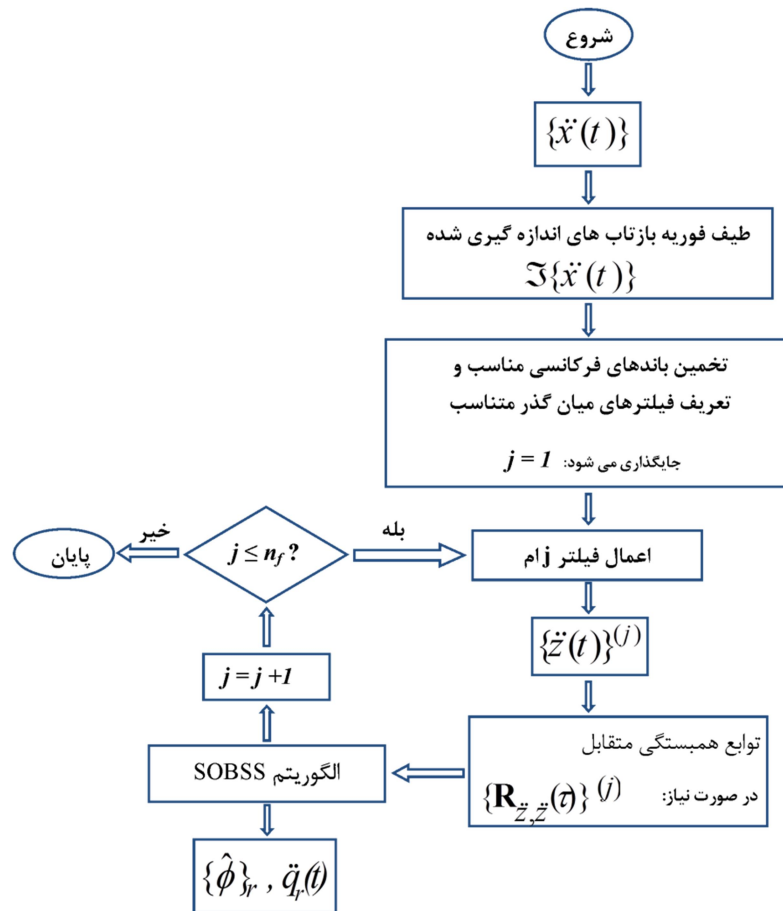
$$\dot{R}_{x,x_i}(\tau) = R_{\dot{x},x_i}(\tau) = -R_{x,\dot{x}_i}(\tau) \quad (۱۳-۵)$$

که در آن $\tau = t - l$. با فرض اینکه فرآیندهای تغییر مکان، سرعت و شتاب دارای ایستایی ضعیف باشند و با تحریک ورودی، که متعاقباً اعمال می‌شود، به لحاظ آماری ناهمبسته باشند $(R_{f,x_i}(t,s) = 0)$ ، آنگاه با چهار بار مشتق‌گیری از طرفین رابطه (۱۲-۵) و با توجه به رابطه (۱۳-۵) می‌توان نتیجه گرفت:

$$[M]\{\ddot{R}_{\dot{x},\dot{x}_i}(\tau)\} + [C]\{\dot{R}_{\dot{x},\dot{x}_i}(\tau)\} + [K]\{R_{\dot{x},\dot{x}_i}(\tau)\} = 0 \quad (۱۴-۵)$$

رابطه (۱۴-۵) نشان می‌دهد که تابع همبستگی متقابل بازتاب‌های سازه با یک سیگنال مرجع، معادله دیفرانسیل حاکم بر ارتعاش سیستم را به صورت همگن ارضا می‌کند و بنابراین می‌تواند به عنوان بازتاب ارتعاش آزاد در نظر گرفته شود. در این رساله برای رفع حساسیت این تکنیک به انتخاب سیگنال مرجع، به طور جداگانه از کلیه بازتاب‌های اندازه‌گیری شده به عنوان سیگنال مرجع استفاده شده و نتایج حاصل از تمام حالت‌ها میانگین‌گیری شده است. با توجه به مطالب گفته شده در این بخش، می‌توان مراحل شناسایی پارامترهای مودال سازه با استفاده از روش پیشنهادی را مطابق فلوچارت شکل ۵-۱ خلاصه کرد. در بخش بعد دقت روش پیشنهادی با استفاده از چند شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

^۱ Weakly stationary



شکل ۵-۱- فلوچارت روش پیشنهادی برای شناسایی پارامترهای مودال، مبتنی بر الگوریتم SOBSS

۵-۴- ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در شناسایی پارامترهای مودال

سازه‌ها

در این بخش عملکرد روش پیشنهادی با استفاده از چند شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی مورد

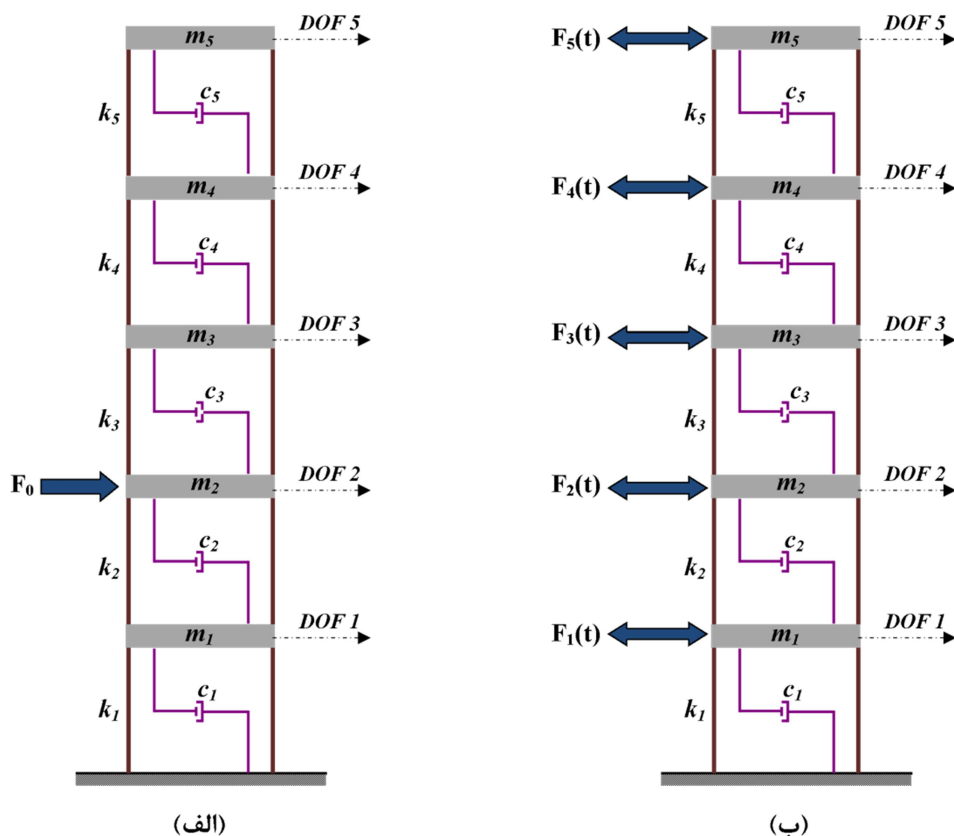
ارزیابی قرار می‌گیرد. بدین منظور، عملکرد روش پیشنهادی برای دو حالت ارتعاش آزاد و ارتعاش

محیطی به‌طور جداگانه مورد مطالعه قرار گرفته است.

۵-۴-۱- مطالعه موردی اول: شناسایی پارامترهای مودال یک قاب برشی پنج درجه

آزادی

برای ارزیابی روش پیشنهادی ابتدا دو شبیه‌سازی عددی انجام شده است. در این شبیه‌سازی‌ها عملیات شناسایی به ترتیب با استفاده از بازتاب‌های ارتعاش آزاد و ارتعاش اجباری تصادفی مربوط به یک قاب برشی پنج طبقه انجام شده است. همان‌طور که در شکل ۵-۲ نشان داده شده است، در این سازه هر طبقه تنها دارای یک درجه آزادی تغییرمکانی می‌باشد. جرم، سختی و میرایی طبقات در جدول ۵-۱ نشان داده شده است.



شکل ۵-۲- قاب برشی پنج طبقه در مطالعه موردی اول: (الف) آزمون ارتعاش آزاد؛ (ب) آزمون ارتعاش اجباری تصادفی

جدول ۵-۱- مشخصات دینامیکی قاب برشی ۵ طبقه برای مطالعه موردی اول

طبقه	جرم (kg)	سختی (N/m)	میرایی (N.s/m)
اول	۲۰۰۰	۵۰۰۰۰	۲۰۰۰
دوم	۲۰۰۰	۸۰۰۰۰	۲۶۰۰
سوم	۲۰۰۰	۱۰۰۰۰۰	۳۰۰۰
چهارم	۲۰۰۰	۸۰۰۰۰	۲۶۰۰
پنجم	۲۰۰۰	۶۰۰۰۰	۲۲۰۰

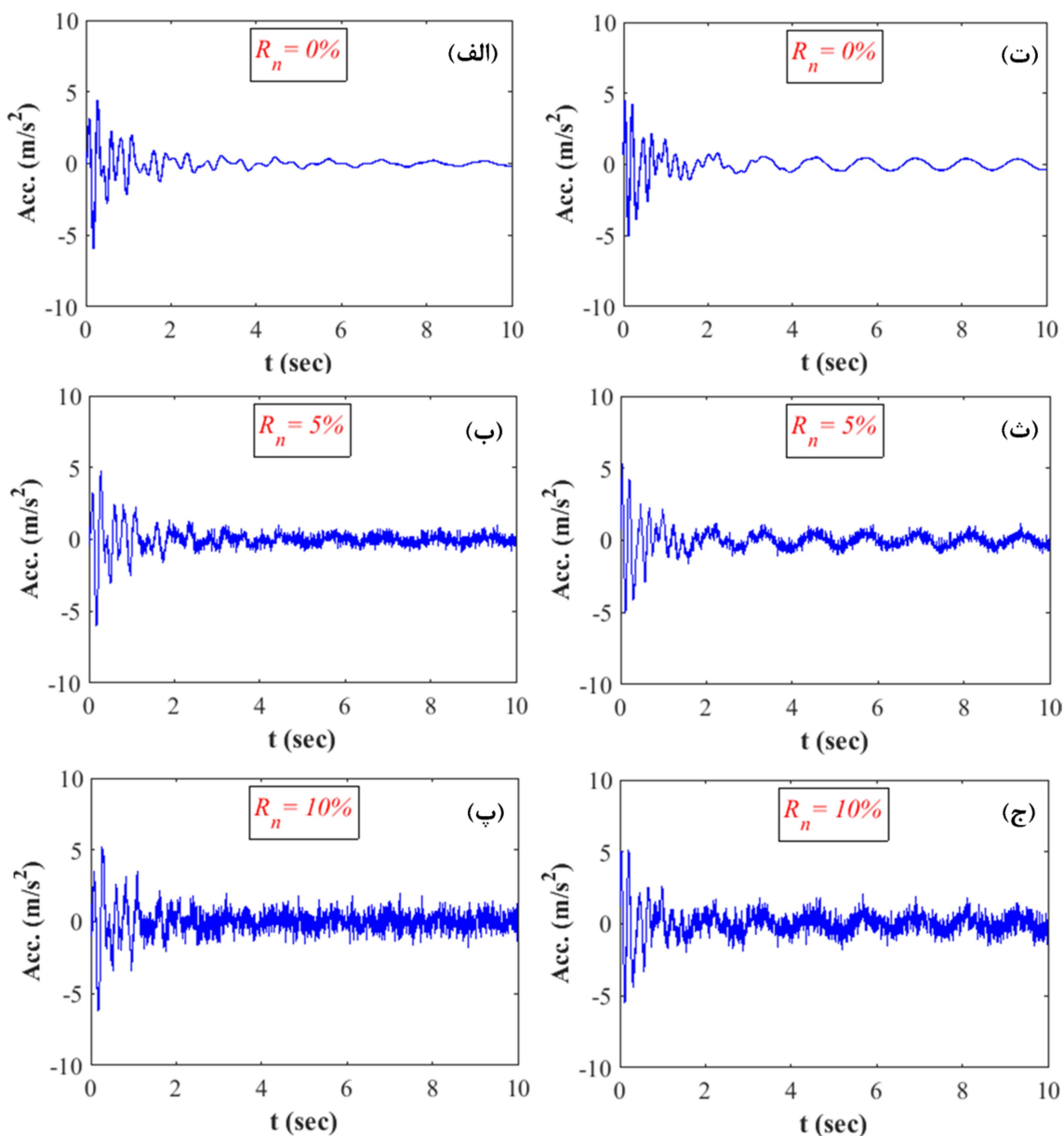
بر اساس نوع بازتاب‌های اندازه‌گیری شده، دو سناریو برای این مطالعه عددی در نظر گرفته شده است: الف) آزمون ارتعاش آزاد؛ ب) آزمون ارتعاش اجباری تصادفی. در ادامه نتایج شناسایی هر یک از این موارد به‌طور جداگانه ارائه شده است.

۵-۴-۱-۱- آزمون ارتعاش آزاد

در این آزمون، یک نیروی ضربه به بزرگی $F_0 = 1 \text{ kN}$ به درجه آزادی دوم از قاب برشی مذکور اعمال می‌شود و بازتاب‌های شتاب تنها در درجات آزادی ۱ و ۴ محاسبه می‌شوند. برای بررسی اثر نویز بر روی عملکرد روش پیشنهادی، تعدادی نویز سفید گوسی نیز شبیه‌سازی شده و به هر یک از بازتاب‌های شتاب افزوده می‌شود. در این مطالعه، سطح نویز درجه آزادی j ام (R_{nj}) به‌صورت $R_{nj} = \sigma_j / \max |\ddot{x}_j(t)|$ تعریف می‌شود؛ که در آن σ_j انحراف معیار نویز شبیه‌سازی شده برای درجه آزادی j ام می‌باشد. به‌منظور مقایسه بهتر، دو مقدار برای سطح نویز در نظر گرفته شده است: $R_{nj} = 10\%$ ، $R_{nj} = 5\%$ که در آن‌ها $j = 1, 4$.

بازتاب شتاب در درجات آزادی اول و چهارم، در حالت‌های بدون نویز، با نویز ۵٪ و با نویز ۱۰٪ در شکل ۵-۳ نشان داده شده است. لازم به ذکر است به‌منظور رعایت اختصار، در ادامه تنها نمودارهای مربوط به حالت نویز ۱۰٪ و حالت بدون نویز نشان داده شده و نتایج مربوط به حالت نویز ۵٪ تنها در جداول ارائه شده است. طیف فوریه بازتاب شتاب درجات آزادی اندازه‌گیری شده، در دو حالت بدون

نویز و با نویز ۱۰٪ در شکل ۴-۵ به نمایش درآمده است. همان‌طور که در نمودارهای شکل ۴-۵ ملاحظه می‌شود، تمام پنج مود سازه تحت بار اعمال شده به‌خوبی تحریک شده‌اند ($n = 5$). از آنجا که تنها دو اندازه‌گیری برای شناسایی مورد استفاده قرار می‌گیرد ($m = 2$)، بنابراین تعداد فیلترهای موردنیاز برای مرحله فیلتر کردن برابرست با: $n_f = \text{ceil}\left(\frac{5}{2}\right) = 3$.

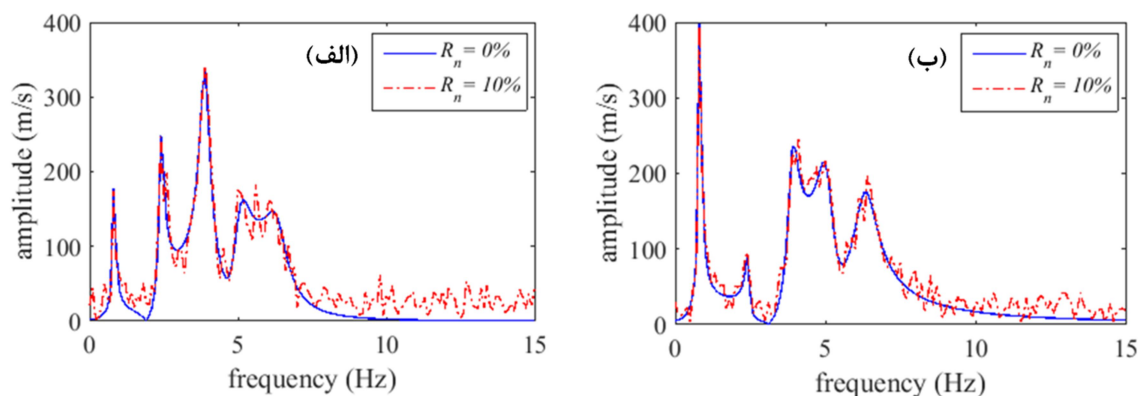


شکل ۴-۵- الف) تا پ) بازتاب شتاب درجه آزادی اول با سطوح مختلف نویز؛ ت) تا ج) بازتاب شتاب درجه آزادی چهارم با سطوح مختلف نویز

باندهای گذر مناسب برای مرحله فیلتر کردن باید به گونه‌ای تعریف شوند که تنها دو فرکانس غالب در هر باند عبور قرار بگیرد. با رعایت این ضابطه، باندهای گذر مناسب برای فیلتر کردن عبارتند از:

$$f_{pb1} < 3 \text{ Hz} , 3.5 \text{ Hz} < f_{pb2} < 5.5 \text{ Hz} \text{ و } 4.5 \text{ Hz} < f_{pb3} < 7 \text{ Hz} .$$

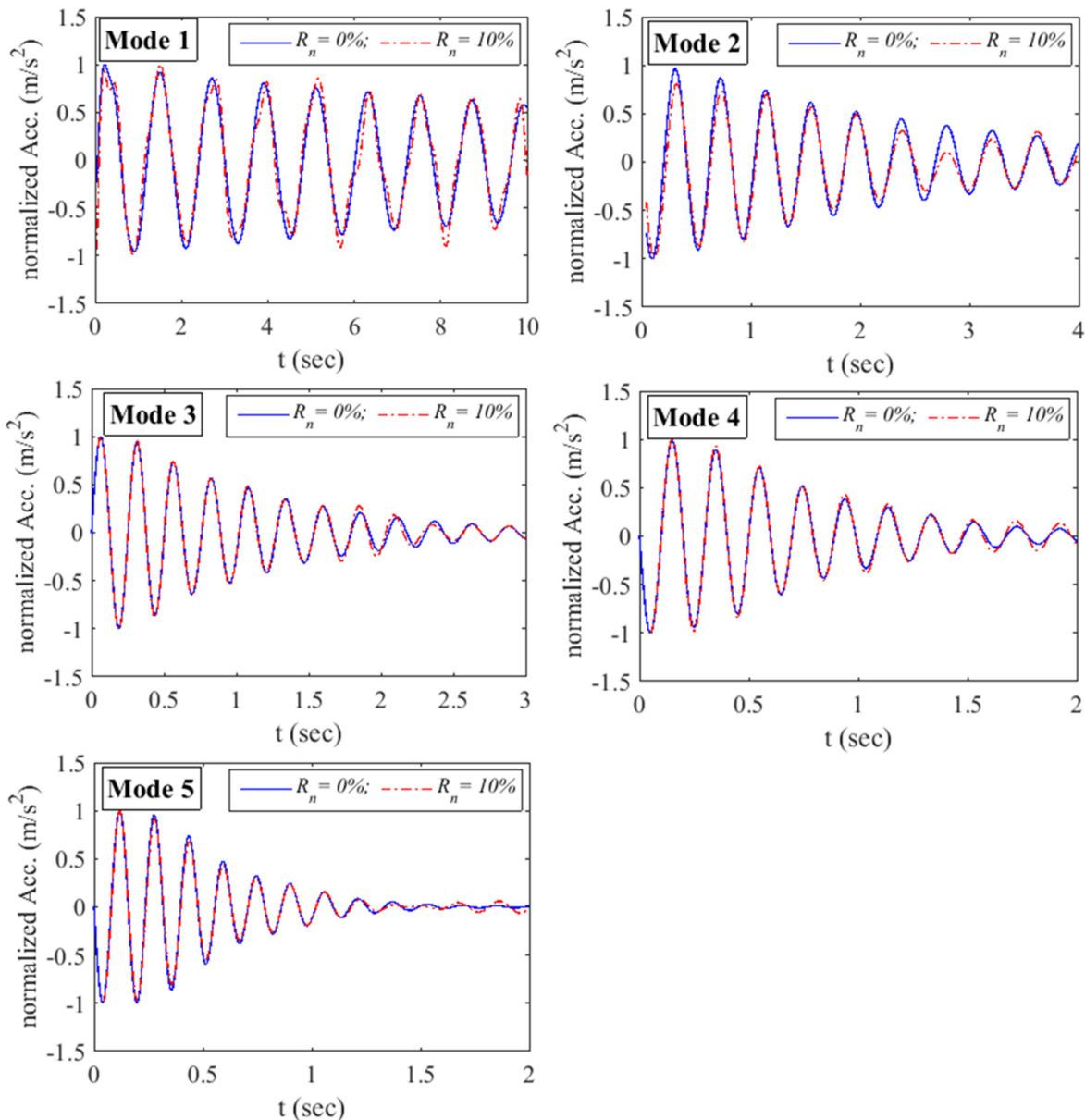
پس از تعریف فیلترهای فرکانسی مناسب و اعمال آنها بر روی بازتاب‌های موجود، می‌توان با استفاده از الگوریتم SOBSS بردار شکل موده‌های نسبی و بازتاب‌های مودال شتاب را، به‌طور جداگانه از هر یک از بازتاب‌های فیلتر شده، استخراج کرد. بازتاب‌های مودال شتاب شناسایی شده، در هر دو حالت $R_{nj} = 0\%$ و $R_{nj} = 10\%$ در شکل ۵-۵ نشان داده شده‌اند.



شکل ۵-۴- طیف فوریه بازتاب شتاب درجات آزادی شبیه‌سازی شده (الف) درجه آزادی اول؛ (ب) درجه آزادی چهارم

از آنجا که بازتاب‌های مودال شتاب تنها برای شناسایی فرکانس‌های طبیعی و نسبت‌های میرایی مورد استفاده قرار می‌گیرند، مقدار مطلق دامنه نوسانات در این بازتاب‌ها حائز اهمیت نمی‌باشد. بنابراین در اینجا کلیه نمودارهای به‌صورت نرمال شده ارائه شده‌اند. علاوه بر این هر یک از بازتاب‌های مودال، متناسب با فرکانس طبیعی آن مود، در یک بازه زمانی مناسب نمایش داده شده است؛ به‌طوری‌که تقریباً تعداد هشت سیکل (یا بیشتر) در هر نمودار گنجانده شود. این کار از یک طرف باعث ایجاد وضوح بیشتر نمودارها می‌شود؛ از طرف دیگر با توجه به میرا شدن سریع نوسانات در

مودهای با فرکانس بالا، در نظر گرفتن این بازه زمانی مناسب در مجاورت مبدأ برای آنها اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. با بررسی نمودارهای شکل ۵-۵ ملاحظه می‌شود که وجود نویز در داده‌ها تأثیر چندانی بر بازتاب‌های مودال شناسایی شده توسط روش پیشنهادی، به استثناء مود اول، ندارد. فرکانس‌های طبیعی و نسبت‌های میرایی این مودها را می‌توان با استفاده از یکی از روش‌های مرسوم شناسایی سیستم‌های یک درجه آزادی برآورد کرد.



شکل ۵-۵- بازتاب‌های مودال نرمال، شناسایی شده توسط روش پیشنهادی، برای $R_{nj} = 0\%$ و $R_{nj} = 10\%$ (آزمون ارتعاش آزاد)

پارامترهای مودال شناسایی شده توسط روش پیشنهادی و مقادیر پارامتر MAC، به همراه مقادیر تحلیلی آنها، در جدول ۵-۲ نشان داده شده است. نتایج مربوط به سطح نویز ۵٪ نیز در این جدول ارائه شده است. از جدول ۵-۲ می توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی فرکانس هاس طبیعی و بردار شکل مودهای نسبی را، در هر دو حالت وجود یا عدم وجود نویز، با دقت بالایی برآورد می کند (با بیشینه خطای برآورد ۱/۳٪ برای فرکانس طبیعی مود پنجم، در سطح نویز ۱۰٪).

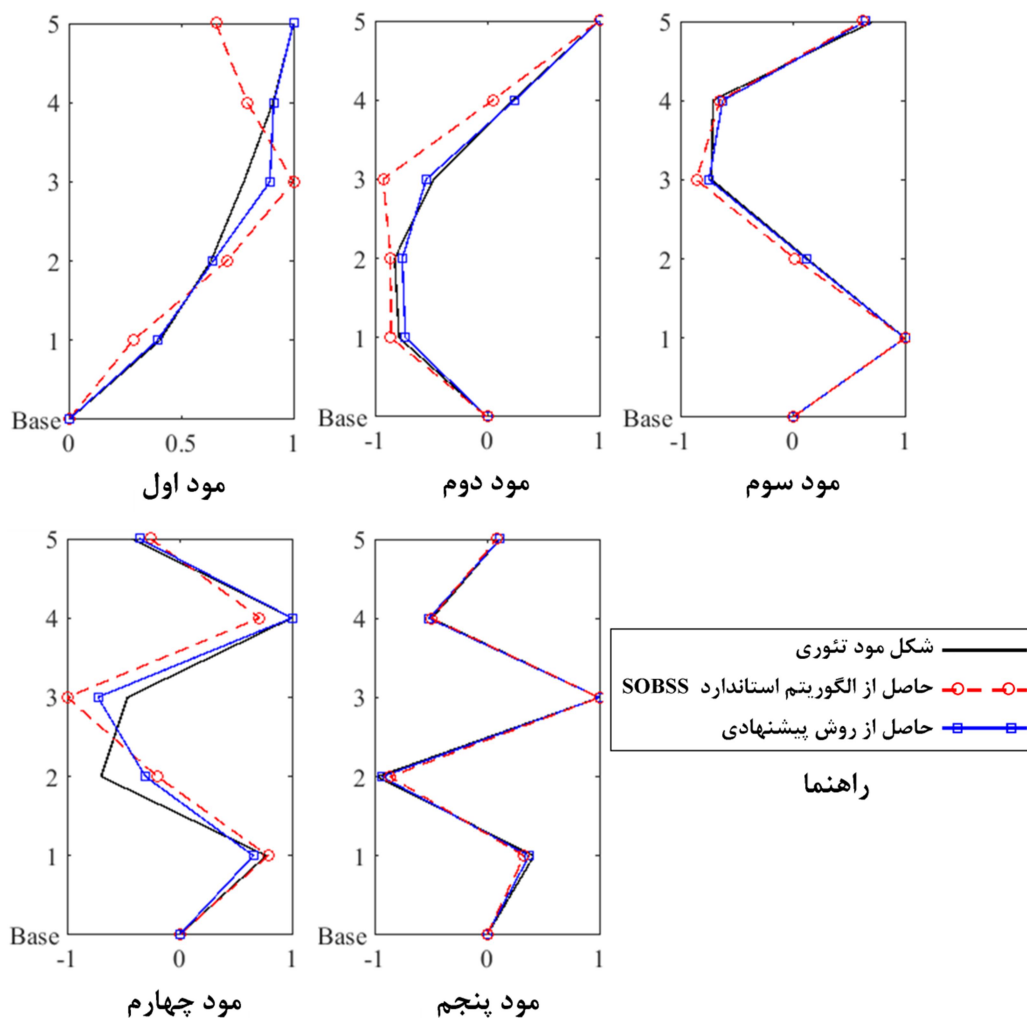
جدول ۵-۲- پارامترهای مودال قاب برشی ۵ طبقه، شناسایی شده توسط روش پیشنهادی (آزمون ارتعاش آزاد)

مود	مقادیر تحلیلی (دقیق)		مقادیر شناسایی شده $R_{nj} = 0\%$			مقادیر شناسایی شده $R_{nj} = 5\%$			مقادیر شناسایی شده $R_{nj} = 10\%$		
	ξ (%)	f_n (Hz)	MAC	ξ (%)	f_n (Hz)	MAC	ξ (%)	f_n (Hz)	MAC	ξ (%)	f_n (Hz)
اول	۰/۸۳	۰/۹۴	۰/۸۳	۰/۹۶	۱/۰۰	۰/۸۳	۰/۹۱	۱/۰۰	۰/۸۳	۰/۷۴	۰/۹۹۹
دوم	۲/۴۱	۲/۶۹	۲/۴۱	۲/۶۸	۱/۰۰	۲/۴۱	۲/۶۴	۰/۹۹۸	۲/۴۲	۲/۹۸	۱/۰۰
سوم	۳/۸۹	۴/۲۵	۳/۸۹	۴/۲۲	۰/۹۹۹	۳/۸۸	۳/۹۴	۰/۹۹۹	۳/۹۰	۳/۹۱	۱/۰۰
چهارم	۵/۰۶	۵/۴۰	۵/۰۶	۵/۴۱	۰/۹۹۹	۵/۱۱	۴/۸۶	۰/۹۹۹	۵/۰۹	۴/۱۳	۱/۰۰
پنجم	۶/۳۴	۶/۲۵	۶/۳۳	۶/۴۹	۰/۹۹۵	۶/۴۲	۶/۰۴	۰/۹۹۴	۶/۴۲	۶/۰۴	۰/۹۹۷

دقت برآورد نسبت های میرایی، به طور کلی، با افزایش سطح نویز کاهش می یابد. به نظر می رسد محتوای فرکانسی نویز شبیه سازی شده بیشترین تأثیر را روی مودهای اول و چهارم داشته است به طوری که در سطح نویز ۱۰٪ خطای برآورد نسبت های میرایی این مودها به ترتیب به ۲۱/۳٪ و ۲۳/۵٪ رسیده است. با این وجود، دقت تخمین نسبت های میرایی سایر مودها در محدوده قابل قبول باقی می ماند (خطای برآورد کمتر از ۱۰ درصد).

برای مقایسه عملکرد روش پیشنهادی با الگوریتم استاندارد SOBSS در حضور نویز، یکبار دیگر عملیات شناسایی این قاب، این بار با استفاده از بازتاب های نویزدار تمام درجات آزادی انجام می شود. یادآوری می شود که الگوریتم استاندارد SOBSS تنها در صورت در دسترس بودن بازتاب در تمام

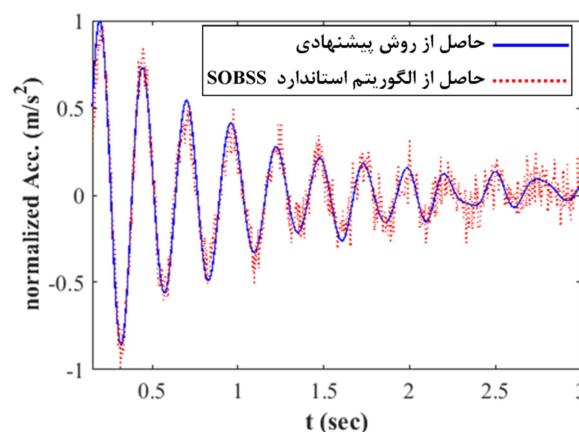
درجات آزادی قابل استفاده می‌باشد. در مورد روش پیشنهادی، چون تعداد درجات آزادی اندازه‌گیری شده و تعداد مدهای فعال سازه برابر هستند ($n = m = 5$)، لذا تنها استفاده از یک فیلتر برای شناسایی کفایت می‌کند ($n_f = 1$). در این راستا و با توجه به طیف فوریه بازتاب‌های موجود، که دو نمونه از آن قبلاً در شکل ۴-۵ نشان داده شد، باند گذر این فیلتر عبارتست از: $f_{pb} < 7 \text{ Hz}$. شکل مدهای شناسایی شده توسط روش پیشنهادی و روش SOBSS در سطح نویز ۱۰٪، به همراه مدهای تحلیلی (دقیق) در شکل ۶-۵ نشان داده شده است.



شکل ۶-۵- مقایسه شکل مدهای قاب برشی ۵ طبقه، شناسایی شده توسط روش پیشنهادی و الگوریتم استاندارد SOBSS، برای سطح نویز $R_{nj} = 10\%$

همان‌طور که در شکل ۵-۶ مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی نسبت به الگوریتم استاندارد SOBSS در شناسایی همه مودها، برتری آشکاری دارد، به‌ویژه برای مودهای ۱، ۲ و ۴. با این وجود مودهای اول و چهارم شناسایی شده توسط روش پیشنهادی خطای بالاتری را نشان می‌دهند که با نتایج شناسایی سایر پارامترهای مودال در جدول ۵-۲ (فرکانس طبیعی و نسبت میرایی)، مربوط به حالتی که شناسایی تنها با استفاده از دو سنسور انجام شد، نیز مطابقت دارد.

نکته حائز اهمیت دیگر اینکه، بازتاب‌های مودال شناسایی شده توسط الگوریتم استاندارد SOBSS در این سطح نویز ($R_{nj} = 10\%$) به‌هیچ وجه قابل اعتماد نیستند. برای تأیید این ادعا و به‌عنوان نمونه، بازتاب نرمال شده شتاب مود سوم ارتعاش، شناسایی شده توسط روش پیشنهادی و الگوریتم استاندارد SOBSS، در شکل ۵-۷ نشان داده شده است.

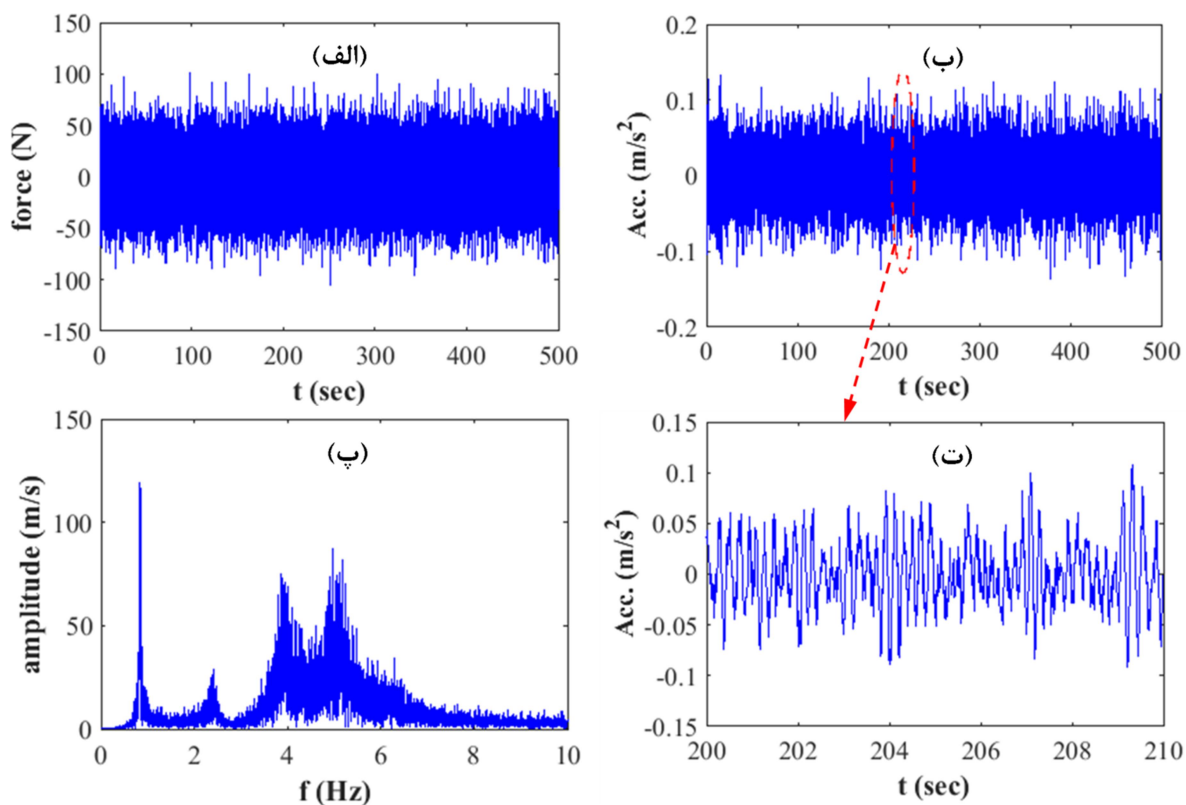


شکل ۵-۷- بازتاب نرمال شده شتاب مود سوم ارتعاش، شناسایی شده توسط روش پیشنهادی و الگوریتم استاندارد SOBSS، برای سطح نویز $R_{nj} = 10\%$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، وجود نویز در اندازه‌گیری‌ها تخریب شدید بازتاب‌های مودال شناسایی شده توسط الگوریتم SOBSS را به‌دنبال دارد. این درحالی است که روش پیشنهادی همچنان بازتاب‌های مودال را، حتی با تعداد سنسور کمتر، با دقت خوبی شناسایی می‌کند.

۵-۴-۱-۲- آزمون ارتعاش اجباری تصادفی

در این بخش عملکرد روش پیشنهادی در شناسایی پارامترهای مودال سازه‌ها از روی بازتاب‌های شتاب حاصل از تحریک‌های محیطی مجهول، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بدین منظور قاب برشی ۵ طبقه تحت یک سری تحریک‌های تصادفی مجهول در تمام طبقه‌ها، قرار می‌گیرد (شکل ۵-۲). هر یک از تحریک‌های تصادفی به صورت یک نویز گوسی سفید شبیه‌سازی شده است. برای اجتناب از طولانی شدن متن، تنها نمونه‌ای از این تحریک‌ها که در طبقه چهارم اعمال شده سات، به همراه بازتاب شتاب طبقه چهارم و طیف فوریه این بازتاب در شکل ۸-۵ نشان داده شده‌اند. همین‌طور یک بزرگنمایی از بازتاب شتاب نیز در شکل ۸-۵(ت) ارائه شده است.



شکل ۸-۵- (الف) تحریک خارجی شبیه‌سازی شده برای درجه آزادی چهارم از قاب برشی ۵ طبقه؛ (ب) و (پ) به ترتیب بازتاب شتاب درجه آزادی چهارم قاب برشی ۵ طبقه و طیف فوریه آن؛ (ت) بزرگنمایی از این بازتاب شتاب

با توجه به طیف فوریه نشان داده شده در شکل ۵-۸ (پ)، چهار مود سازه تحت این بارگذاری به خوبی برانگیخته شده‌اند و یک مود نیز با فرکانس طبیعی حدود 6Hz نیز به طور ضعیف برانگیخته شده است ($n = 5$). در این بخش به منظور ارزیابی اثر تعداد سنسورها (یا درجات آزادی اندازه‌گیری شده) بر دقت روش پیشنهادی، عملیات شناسایی قاب مذکور با تعداد مختلفی از بازتاب‌های شبیه‌سازی شده انجام می‌شود.

جزئیات کامل مربوط به درجات آزادی اندازه‌گیری شده به همراه باندهای عبور موردنیاز برای مرحله فیلتر کردن در هر حالت، در جدول ۳-۵ آورده شده است.

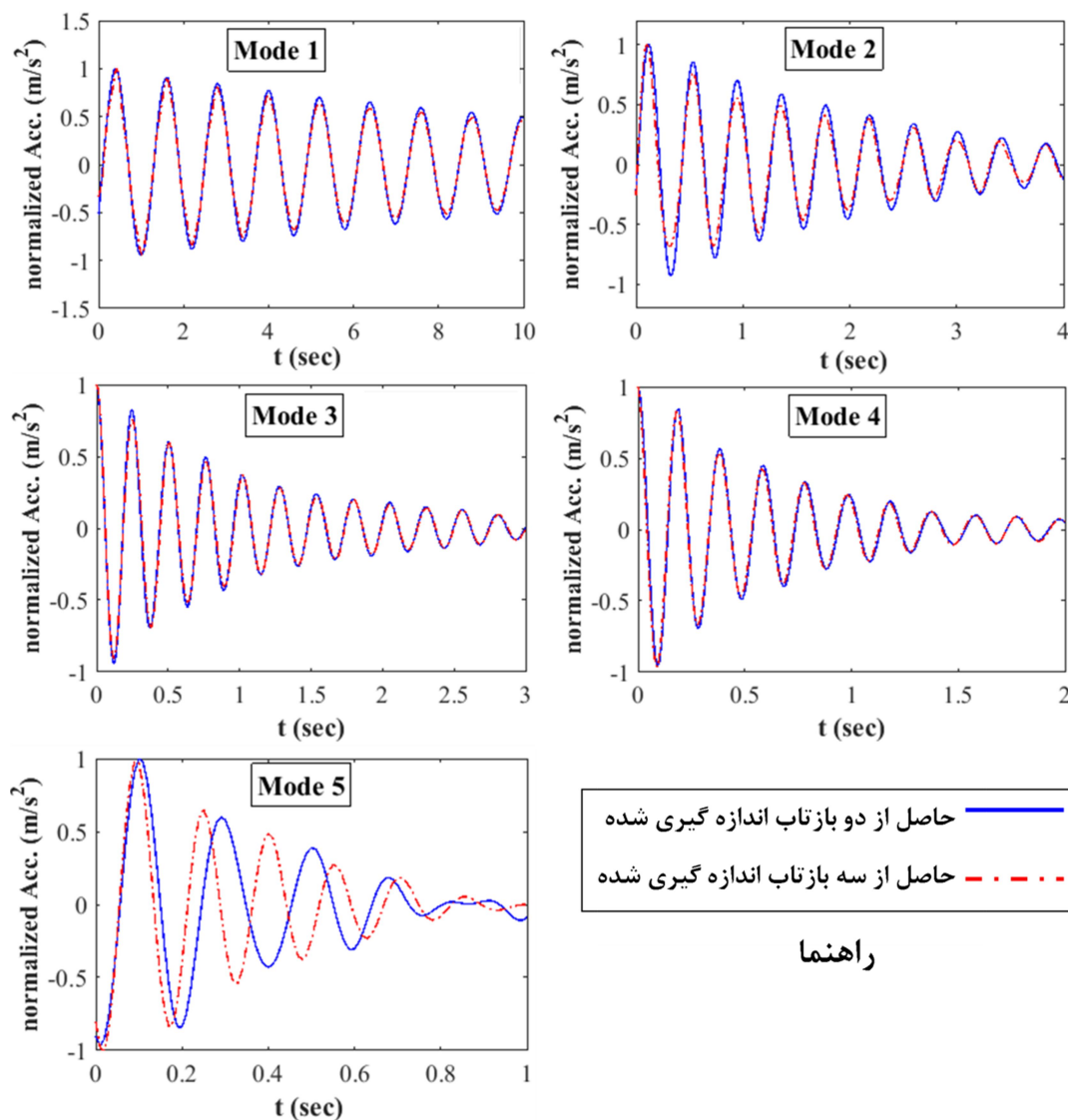
جدول ۳-۵- جزئیات موردنیاز برای مرحله فیلتر کردن در روش پیشنهادی، برای تعداد مختلف از بازتاب‌های اندازه‌گیری شده از قاب برشی ۵ طبقه (آزمون ارتعاش اجباری تصادفی)

#	DOF های اندازه‌گیری شده	تعداد سنسورها (n)	تعداد فیلتر موردنیاز (n_f)	باندهای عبور موردنیاز برای مرحله فیلتر کردن
حالت ۱	۱ و ۴	۲	۳	$f_{pb1} < 3 \text{ Hz}, 3.5 \text{ Hz} < f_{pb2} < 5.5 \text{ Hz},$ and $4.5 \text{ Hz} < f_{pb3} < 7 \text{ Hz}$
حالت ۲	۱، ۳ و ۴	۳	۲	$f_{pb1} < 4.3 \text{ Hz}, 3 \text{ Hz} < f_{pb2} < 7 \text{ Hz}$
حالت ۳	۱، ۳، ۴ و ۵	۴	۲	$f_{pb1} < 5.5 \text{ Hz}, 1.5 \text{ Hz} < f_{pb2} < 7 \text{ Hz}$
حالت ۴	۱، ۲، ۳، ۴ و ۵	۵	۱	$f_{pb} < 7 \text{ Hz}$

همان‌طور که در جدول ۳-۵ ارائه شده است، در بعضی از حالت‌ها، باندهای گذر تعریف شده با یکدیگر همپوشانی دارند؛ این بدان معنی است که برخی از مودها بیش از یکبار شناسایی می‌شوند. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، مودهای تکراری را می‌توان به راحتی با توجه به فرکانس‌های طبیعی‌شان تشخیص داد و میانگین نتایج شناسایی را برای آنها گزارش کرد.

برای رعایت اختصار، در اینجا تنها بازتاب‌های مودال شناسایی شده برای حالت‌های ۱ و ۲ جدول

فوق در شکل ۹-۵ به تصویر کشیده شده است. با مشاهده نمودارهای شکل ۹-۵ می‌توان دریافت که افزایش تعداد سنسورها بر نتایج شناسایی چهار مود اول تأثیر چندانی نداشته است. با این حال، یک تفاوت چشمگیر بین این حالت‌های شناسایی برای مود پنجم مشاهده می‌شود.



شکل ۹-۵- بازتاب‌های نرمال شتاب مودال شناسایی شده توسط روش پیشنهادی برای حالت‌های ۱ و ۲ از جدول ۳-۵

برای مقایسه بهتر بین دقت شناسایی مود پنجم با ترکیبات مختلف از درجات آزادی اندازه‌گیری

شده، پارامترهای مودال شناسایی شده برای هر یک از حالت‌های جدول ۵-۳ در جدول ۵-۴ ارائه شده است.

جدول ۵-۴- پارامترهای مودال قاب برشی ۵ طبقه، شناسایی شده توسط روش پیشنهادی به ازای تعداد متفاوت از سنسورها (آزمون ارتعاش اجباری تصادفی)

مود	مقادیر شناسایی شده (حالت ۱)			مقادیر شناسایی شده (حالت ۲)			مقادیر شناسایی شده (حالت ۳)			مقادیر شناسایی شده (حالت ۴)		
	f_n (Hz)	ξ (%)	MAC	f_n (Hz)	ξ (%)	MAC	f_n (Hz)	ξ (%)	MAC	f_n (Hz)	ξ (%)	MAC
اول	۰/۸۳	۰/۹۴	۰/۸۴	۰/۸۴	۱/۱۶	۰/۹۹۹	۰/۸۴	۱/۳۴	۱/۰۰	۰/۸۳	۱/۳۴	۱/۰۰
دوم	۲/۴۱	۲/۶۹	۲/۴۲	۲/۴۳	۲/۷۸	۰/۹۹۸	۲/۴۲	۲/۹۵	۱/۰۰	۲/۴۲	۲/۹۳	۱/۰۰
سوم	۳/۸۹	۴/۲۵	۳/۸۸	۴/۰۵	۴/۰۱	۱/۰۰	۳/۸۸	۳/۸۹	۱/۰۰	۳/۸۸	۳/۸۶	۰/۹۹۹
چهارم	۵/۰۶	۵/۴۰	۵/۰۵	۵/۰۶	۴/۹۳	۰/۹۹۹	۵/۰۵	۵/۱۷	۰/۹۹۶	۵/۰۴	۴/۷۱	۰/۹۹۷
پنجم	۶/۳۴	۶/۲۵	۵/۸۵	۶/۵۲	۶/۱۱	۰/۹۹۵	۶/۳۴	۵/۸۷	۰/۹۹۹	۶/۳۷	۵/۷۸	۰/۹۹۴

با توجه به جدول ۵-۴ می‌توان گفت، در آزمون ارتعاش اجباری تصادفی فرکانس‌های طبیعی و بردار شکل مودهای نسبی برای چهار مود اول ارتعاش سازه، در تمام حالت‌ها، با دقت بالایی برآورد شده‌اند (خطای برآورد زیر ۱٪). در مورد فرکانس طبیعی مود پنجم نیز ملاحظه می‌شود که، به استثناء حالت (۱)، بیشترین خطای برآورد مربوط به حالت (۲) و با مقدار ۴/۳٪ می‌باشد. از طرف دیگر و در نگاه کلی، نسبت‌های میرایی برآورد شده در این آزمون نسبت به آزمون ارتعاش آزاد دقت پایین‌تری دارند. به‌طوری که بیشینه خطای برآورد این پارامتر در بین حالت‌های ۲، ۳ و ۴ از جدول ۵-۴، برای مودهای اول تا پنجم به ترتیب عبارتند از: ۴۲/۵٪، ۹/۶٪، ۹/۲٪، ۱۲/۸٪ و ۷/۵٪. علاوه‌بر این، بر اساس مقادیر پارامتر MAC برای مود پنجم شناسایی شده، می‌توان گفت که نتایج شناسایی این مود برای حالت ۱، که تنها از دو سنسور جهت شناسایی استفاده شده است، قابل قبول نمی‌باشند. دلیل این امر را می‌توان در طیف فوریه رسم شده در شکل ۴-۶ یافت؛ چرا که براساس این شکل، در بازتاب

شتاب درجه آزادی چهارم، مود پنجم برخلاف سایر مودها به خوبی تحریک نشده است. با افزایش تعداد درجات آزادی اندازه گیری شده، این مود شانس بیشتری برای نشان دادن خود در بازتاب های دیگر پیدا می کند. لذا شناسایی این مود در حالت های استفاده از سه سنسور و بیشتر (حالت های ۲، ۳ و ۴) مقادیر بزرگتری را برای پارامتر MAC نتیجه داده است که به معنی قابل اعتماد بودن نتایج شناسایی این مود می باشد (جدول ۵-۲ را ببینید). بنابراین می توان نتیجه گرفت که در روش پیشنهادی، افزایش تعداد درجات آزادی اندازه گیری شده (یا تعداد سنسورها) تنها می تواند بر روی شناسایی مودهایی که به طور ضعیف تحریک شده اند، تأثیرگذار باشد. با این وجود، نتیجه گیری خاصی در مورد افزایش یا کاهش دقت برآورد نسبت های میرایی توسط روش پیشنهادی، در اثر افزایش تعداد سنسورها، نمی توان داشت.

۵-۴-۲- مطالعه موردی دوم: شناسایی پارامترهای مودال یک سازه معیار

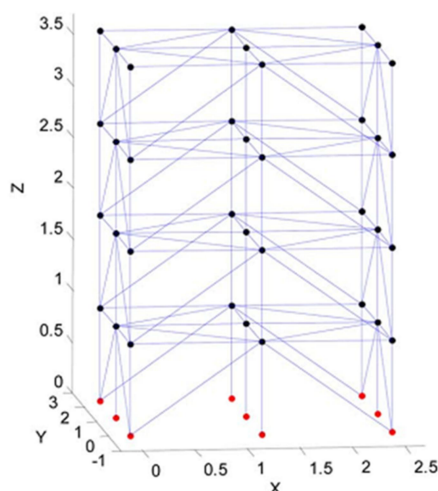
در این بخش عملکرد روش پیشنهادی با شناسایی یک سازه معیار^۱ مورد ارزیابی قرار می گیرد. این سازه یک نمونه آزمایشگاهی است که در سال ۲۰۰۳ در دانشگاه بریتیش کلمبیا^۲ به منظور بررسی روش های موجود در زمینه پایش سلامتی سازه ها ساخته شده است [۶۳]. این نمونه آزمایشگاهی یک قاب سه بعدی ۴ طبقه در مقیاس $\frac{1}{3}$ است که در هر دو امتداد دارای سیستم مهاربندی است. تصویری از این نمونه آزمایشگاهی به همراه مدل اجزاء محدود آن و نامگذاری درجات آزادی در شکل ۵-۱۰ نشان داده شده است.

¹ Benchmark structure

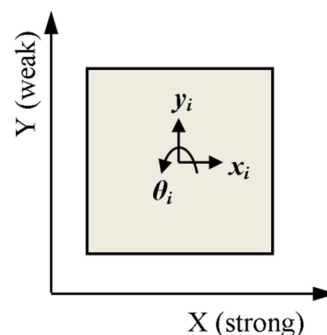
² University of British Columbia



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۵-۱۰- (الف) تصویری از نمونه آزمایشگاهی معیار [۶۳]؛ (ب) مدل اجزاء محدود آن [۶۳]؛ (پ) نام گذاری درجات آزادی در طبقه i ام

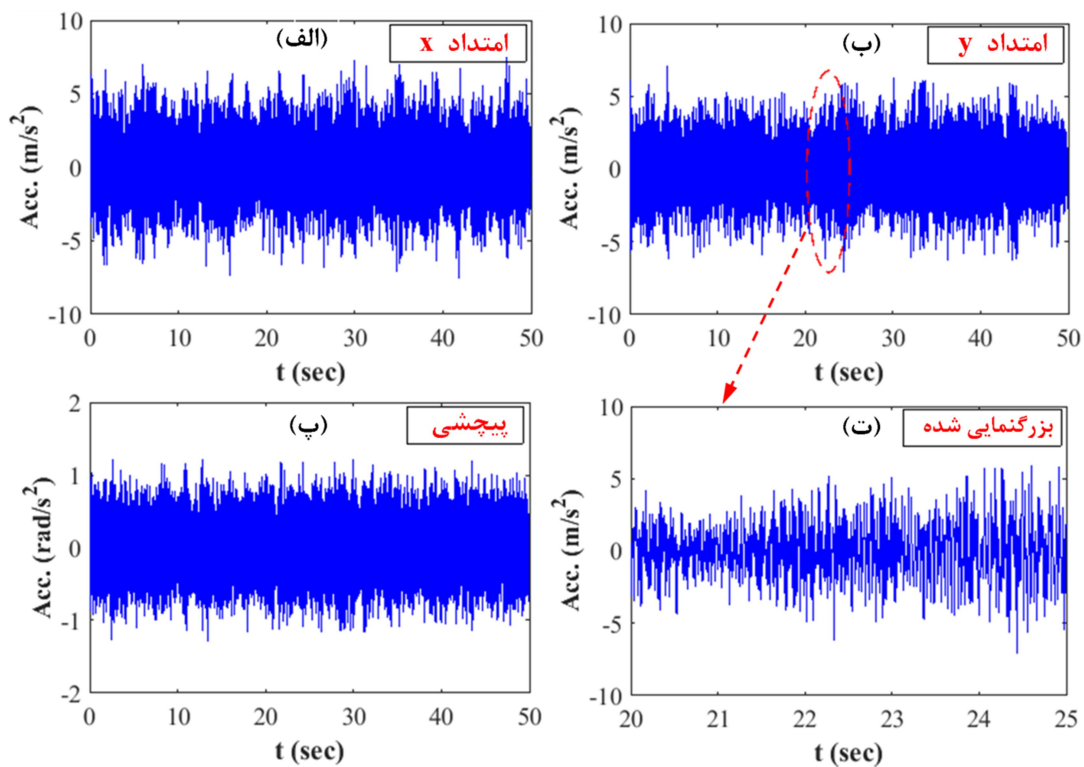
همان طور که در شکل ۵-۱۰ ملاحظه می شود، سازه مورد نظر در هر راستا دو دهانه دارد. عرض کلیه دهانه ها $1/25$ متر و ارتفاع طبقات $0/9$ متر می باشد. همچنین جرم سازه توسط یک سری دال های بتنی بر روی هر طبقه تأمین شده است. جزئیات بیشتر در مورد این نمونه آزمایشگاهی در مرجع [۶۳] موجود می باشد. بر روی این نمونه چندین آزمایش شامل سناریوهای مختلف آسیب دیدگی و تحت چند نوع بارگذاری به انجام رسیده است. همچنین از این نمونه آزمایشگاهی یک مدل تحلیلی اجزاء محدود نیز ساخته شده است که قابلیت اعمال سناریوهای مختلف بارگذاری و آسیب را دارا می باشد [۶۴]. داده های مربوط به مدل آزمایشگاهی و همچنین برنامه کامپیوتری در محیط متلب جهت انجام تحلیل اجزاء محدود روی مدل تحلیلی، در سایت اینترنتی مرجع [۶۵] قابل دسترسی می باشد.

از آنجا که تمام مودهای ارتعاشی این سازه، در آزمایش هایی که بر روی آن انجام شده برانگیخته نشده اند، در این رساله از مدل تحلیلی اجزاء محدود برای اعتبارسنجی روش پیشنهادی و ارزیابی عملکرد آن استفاده شده است. در این راستا، جمعاً ۱۲ درجه آزادی برای مدل تحلیلی در نظر گرفته

شده است که شامل دو درجه آزادی انتقالی و یک درجه آزادی دورانی در مرکز جرم هر طبقه می‌باشد (قسمت پ) از شکل ۵-۱۰ را ببینید). علاوه بر این، برنامه کامپیوتری مذکور به کاربر این اجازه را می‌دهد که گزینه جرم نامتقارن را برای طبقات انتخاب کند. انتخاب این گزینه سبب تحریک بهتر مودهای پیچشی (درجات آزادی دورانی) می‌شود.

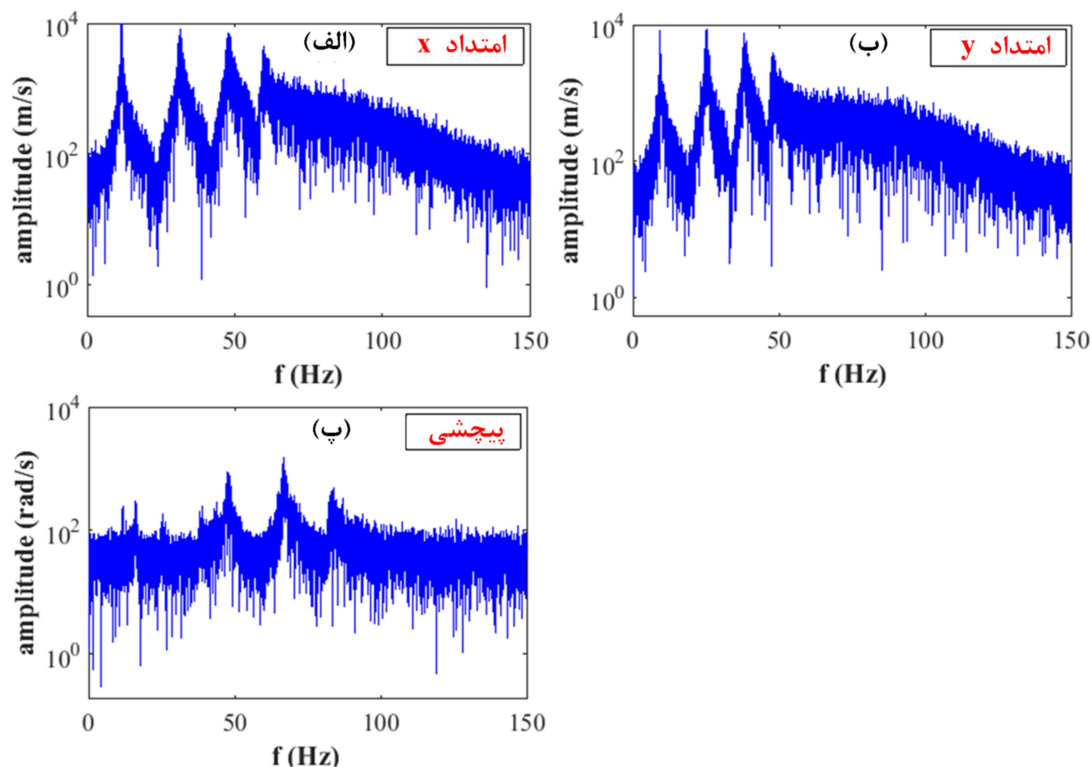
برای شبیه‌سازی بازتاب‌های موردنیاز، دو تحریک خارجی مبهم به صورت نویز گوسی سفید تعریف شده و در آخرین طبقه (بام) و در هر دو راستای x و y به سازه اعمال شده است. از آنجا که بازتاب‌های سازه در درجات آزادی انتقالی امتداد x و y از یکدیگر و از درجات آزادی دورانی مستقل هستند، پس برای استفاده از روش پیشنهادی جهت شناسایی سازه، حداقل دو بازتاب در هر مجموعه از درجات آزادی موردنیاز است. بدین منظور، بازتاب‌های شتاب در تمام درجات آزادی طبقات دوم و چهارم، یعنی $(\ddot{x}_2, \ddot{y}_2, \ddot{\theta}_2)$ و $(\ddot{x}_4, \ddot{y}_4, \ddot{\theta}_4)$ در مدت زمان ۱۰۰ ثانیه ثبت شده است. این بازتاب‌ها با نرخ 1000 Hz نمونه‌برداری شده‌اند و سطح نویز نیز ۱۰٪ در نظر گرفته شده است. به عنوان نمونه، بازتاب‌های شتاب انتقالی و پیچشی طبقه چهارم در شکل ۵-۱۱ نشان داده شده است. یک بزرگنمایی از بازتاب شتاب امتداد y نیز در این شکل گنجانده شده است. لازم به ذکر است به منظور حذف اثر بازتاب‌های گذرا، از ۵۰ ثانیه ابتدایی این اندازه‌گیری‌ها صرف نظر شده است.

برای تعریف باندهای گذر موردنیاز جهت مرحله فیلتر کردن، طیف فوریه این بازتاب‌ها نیز در شکل ۵-۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در این نمودارها ملاحظه می‌شود، برای هر یک از دو امتداد x و y تعداد چهار فرکانس غالب قابل تشخیص می‌باشد ($n = 4$). با این وجود، تنها سه مود پیچشی تحریک شده در نمودار مربوط به آن مشاهده می‌شود. به عبارت بهتر، مود اول با فرکانس طبیعی حدود 16 Hz به طور ضعیف تحریک شده است. بنابراین می‌توان انتظار داشت که نتایج شناسایی مودهای پیچشی، به ویژه مود اول پیچشی، نسبت به مودهای انتقالی دقت پایین‌تری داشته باشند.



شکل ۵-۱۱- بازتاب‌های شتاب در درجات آزادی طبقه چهارم (بام) از سازه معیار: (الف) امتداد x؛ (ب) امتداد y؛ (پ) پیچشی؛ (ت) نمای نزدیک از بازتاب امتداد y

با توجه به اینکه برای هر مجموعه از درجات آزادی، تنها دو اندازه‌گیری وجود دارد ($m = 2$)، بنابراین تعداد فیلترهای مورد نیاز برابرست با: $n_f = \text{ceil}\left(\frac{4}{2}\right) = 2$. بر این اساس و با توجه به طیف‌های فوریه رسم شده در شکل ۵-۱۲، فرکانس‌های گوشه مربوط به هریک از باندهای گذر موردنیاز، برای هر مجموعه از درجات آزادی، در جدول ۵-۵ ارائه شده است.

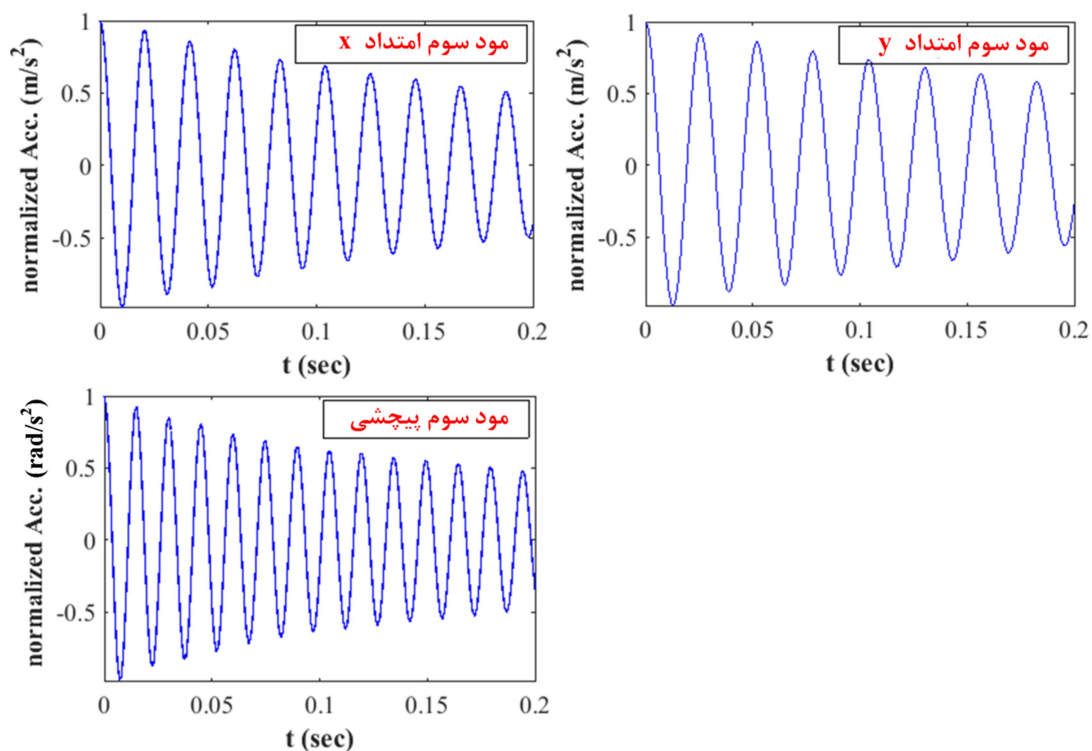


شکل ۵-۱۲- طیف فوریه بازتاب‌های شتاب اندازه‌گیری شده در طبقه چهارم از سازه معیار: (الف) امتداد x؛ (ب) امتداد y؛ (پ) پیچشی

جدول ۵-۵- فرکانس‌های گوشه موردنیاز به‌منظور تعریف فیلتر برای هر مجموعه از درجات آزادی از سازه معیار

فیلتر فرکانسی دوم		فیلتر فرکانسی اول		نوع درجه آزادی
		$f_{bp2}(Hz)$	$f_{bp1}(Hz)$	
$f_{bp4}(Hz)$	$f_{bp3}(Hz)$			انتقالی امتداد x
۷۰	۴۰	۳۸	۵	انتقالی امتداد y
۶۰	۳۰	۳۰	۵	پیچشی (θ)
۹۵	۵۵	۵۰	۱۰	

به‌عنوان نمونه، نمودارهای مربوط به بازتاب‌های مودال شناسایی شده برای مود سوم از هر مجموعه از درجات آزادی در شکل ۵-۱۳ نشان داده شده است. همچنین پارمترهای مودال استخراج شده برای کلیه مودها در جدول ۵-۶ ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌شود، به استثناء مود اول پیچشی سایر مودها با موفقیت توسط روش پیشنهادی شناسایی شده‌اند.



شکل ۵-۱۳- بازتاب‌های نرمال شتاب شناسایی شده برای مود سوم از هر مجموعه از درجات آزادی (سازه معیار)

جدول ۵-۶- پارامترهای مودال شناسایی شده برای سازه معیار، توسط روش پیشنهادی

مقادیر شناسایی شده			مقادیر تحلیلی [۶۴]		مود
MAC	$\xi(\%)$	$f_n(Hz)$	$\xi(\%)$	$f_n(Hz)$	
۱/۰۰	۱/۱۵	۹/۲۸	۱/۰۰	۹/۲۹	۱ (y)
۱/۰۰	۰/۸۴	۱۱/۶۶	۱/۰۰	۱۱/۶۴	۲ (x)
-	-	-	۱/۰۰	۱۶/۱۹	۳ (θ)
۱/۰۰	۱/۱۶	۲۵/۲۴	۱/۰۰	۲۵/۲۷	۴ (y)
۱/۰۰	۱/۱۷	۳۱/۵۹	۱/۰۰	۳۱/۶۶	۵ (x)
۱/۰۰	۱/۱۸	۳۸/۲۸	۱/۰۰	۳۸/۲۶	۶ (y)
۱/۰۰	۰/۵۹	۴۳/۹۷	۱/۰۰	۴۴/۲۰	۷ (θ)
۱/۰۰	۱/۱۹	۴۷/۶۴	۱/۰۰	۴۷/۷۵	۸ (y)
۱/۰۰	۱/۲۰	۴۷/۹۱	۱/۰۰	۴۷/۹۷	۹ (x)
۰/۹۹۹	۱/۲۶	۵۹/۸۹	۱/۰۰	۵۹/۸۱	۱۰ (x)
۱/۰۰	۰/۸۸	۶۶/۸۸	۱/۰۰	۶۶/۹۰	۱۱ (θ)
۱/۰۰	۱/۰۷	۸۳/۱۹	۱/۰۰	۸۳/۲۳	۱۲ (θ)

همان‌طور که انتظار می‌رفت، با توجه به اینکه مود اول به خوبی تحریک نشده بود، شناسایی آن توسط روش پیشنهادی با شکست مواجه شد. در مورد مودهای شناسایی شده، اگرچه فرکانس‌های طبیعی و بردار شکل مودهای نسبی با دقت بالایی برآورد شده‌اند (خطای برآورد کمتر از ۱٪)، ولی شناسایی نسبت‌های میرایی از دقت خوبی برخوردار نیست. به‌طوری که نسبت‌های میرایی مود هفتم و مود دهم به ترتیب دارای خطای ۴۱٪ و ۲۶٪ و سایر مودها در محدوده زیر ۲۰٪ قرار می‌گیرند.

۵-۵- جمع‌بندی

در این فصل یک روش ترکیبی جدید مبتنی بر الگوریتم SOBSS، برای شناسایی پارامترهای مودال سازه‌ها پیشنهاد گردید و برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی چند شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی انجام شد. در واقع روش پیشنهادی الگوریتم استاندارد SOBSS را به حالتی که بازتاب سازه در تمام درجات آزادی در دسترس نیست، گسترش می‌دهد. اساس کار روش پیشنهادی برخلاف بسیاری از روش‌هایی که در این زمینه وجود دارند، کاهش تعداد مودهای فعال سازه به تعداد بازتاب‌های ثبت شده است. بدین منظور از یک مرحله پیش‌پردازش شامل فیلتر کردن و تشکیل توابع همبستگی متقابل بازتاب‌ها (در صورت نیاز)، استفاده می‌شود. علاوه بر این، عملکرد روش پیشنهادی در مواجهه با نویز نسبت به الگوریتم استاندارد SOBSS به مراتب بهتر است. برای استفاده از این روش لازم است بازتاب سازه حداقل در دو درجه آزادی اندازه‌گیری شده باشد. این بازتاب‌ها می‌تواند ناشی از ارتعاش آزاد سازه و یا تحریک خارجی مبهم محیطی (مثل ارتعاشات ناشی از باد یا ترافیک) باشد. افزایش تعداد درجات آزادی اندازه‌گیری شده در شناسایی مودهای کم انرژی که کمتر تحریک شده‌اند، مؤثر خواهد بود. دقت روش پیشنهادی در شناسایی فرکانس‌های طبیعی و بردار شکل مودهای نسبی بسیار خوب ارزیابی شد (خطای برآورد حدود ۱٪). این درحالی است که نسبت‌های میرایی برآورد شده توسط این روش، در حالتی که بازتاب‌های ارتعاش آزاد در دسترس نباشند، خطای

بالا تری دارند (در برخی موارد تا حدود ۴۰٪). با این وجود، در اغلب موارد دقت برآورد این پارامتر نیز در محدوده قابل قبولی قرار می گیرد (خطای برآورد کمتر از ۲۰٪).

فصل ششم: نتیجه گیری

۶- نتیجه گیری

۶-۱- پیشگفتار

در این رساله پس از بررسی روش‌های موجود برای شناسایی سیستم‌های سازه‌ای، دو روش برای شناسایی پارامترهای مودال سازه، تنها با استفاده از داده‌های خروجی ناشی از ارتعاشات سازه، پیشنهاد شد. هر یک از این روش‌ها به‌طور کامل در فصل‌های ۴ و ۵ تشریح شده و عملکرد آنها توسط چند شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت. روش پیشنهادی اول مبتنی بر الگوریتم LMD و روش دوم مبتنی بر الگوریتم SOBSS می‌باشد. در این فصل مهم‌ترین نتایج مربوط به هر یک از روش‌های پیشنهادی، به‌طور جداگانه، ارائه می‌شود. سپس یک مقایسه بین مزایا و معایب این دو روش انجام خواهد شد و در انتها پیشنهاداتی جهت مطالعات آتی ارائه می‌شود.

۶-۲- روش پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم LMD

در این رساله برای اولین بار، الگوریتم LMD جهت شناسایی سازه مورد استفاده قرار گرفت. برای این کار، برخی از ایراداتی که در الگوریتم استاندارد LMD وجود داشت، از قبیل مسئله ابتدا و انتهای سیگنال، مسئله معیار توقف و مسئله انتخاب پنجره برای تکنیک MA، تا حد زیادی بهبود داده شد. علاوه بر این برای جلوگیری از پدیده اختلاط مودها، از یک مرحله پیش‌پردازش شامل فیلتر کردن استفاده شد. این مرحله علاوه بر حذف پدیده اختلاط مودها در کاهش اثرات نویز موجود در داده‌ها نیز

مؤثر است. روش پیشنهادی قابل استفاده بر روی بازتاب‌های ناشی از ارتعاش آزاد و یا ارتعاشات مبهم محیطی می‌باشد. با انجام چند شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی عملکرد روش پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گرفت و با نتایج مربوط به روش HHT مقایسه شد. مهم‌ترین نتایج حاصل از بررسی این روش به قرار زیر می‌باشند:

- این روش قادر است تنها با استفاده از یک بازتاب مناسب، کلیه فرکانس‌های طبیعی و نسبت‌های میرایی موده‌های فعال سازه را شناسایی کند.
- برای شناسایی کامل سازه و استخراج بردارهای شکل موده‌ها، اندازه‌گیری بازتاب در تمام درجات آزادی مورد نیاز است.
- در هر دو حالت ارتعاش آزاد و ارتعاش مبهم محیطی، روش پیشنهادی با دقت بالایی قادر به شناسایی فرکانس‌های طبیعی سازه می‌باشد (خطای برآورد کمتر از ۰.۳٪). با این وجود دقت برآورد نسبت‌های میرایی برای مودهایی که مشارکت پایین‌تری در بازتاب‌های سازه دارند، کاهش می‌یابد (بیشینه خطای برآورد حدود ۰.۲۶٪).
- وجود مرحله فیلترکردن سبب شده است که روش پیشنهادی عملکرد بسیار خوبی در مواجهه با داده‌های آلوده به نویز داشته باشد.
- درحالی‌که در روش HHT برای به‌دست آوردن دامنه و فاز لحظه‌ای باید از یک تبدیل هیلبرت پس از الگوریتم EMD استفاده شود، در روش پیشنهادی این دو کمیت به‌طور مستقیم در طی مرحله غربال‌گری به‌دست می‌آیند (بدون نیاز به تبدیل هیلبرت).
- اگرچه نتایج شناسایی روش پیشنهادی و روش HHT در اغلب موارد به یکدیگر نزدیک هستند، ولی بررسی‌ها نشان داد که نمودارهای مربوط به فاز لحظه‌ای و لگاریتم طبیعی دامنه لحظه‌ای در برابر زمان، در روش پیشنهادی نسبت به روش HHT در بازه زمانی بزرگتری فرم خطی خود را حفظ می‌کنند. با توجه به برآورد پارامترهای مودال از روی

شیب خطوط برآزش شده بر منحنی‌های مذکور، حفظ فرم خطی رد بازه زمانی بزرگتر، به

معنی پایداری بیشتر نتایج شناسایی روش پیشنهادی نسبت به روش HHT می‌باشد.

- روش پیشنهادی نسبت به روش HHT، از مسئله نواحی ابتدا و انتهای سیگنال تأثیرپذیری کمتری دارد که دلیل آن استفاده از تکنیک تقارن آینه‌ای بهبود یافته در روش پیشنهادی می‌باشد.
- به‌دست آمدن دامنه و فاز لحظه‌ای در حین عملیات شناسایی، امکان بررسی تغییرات در پارامترهای مودال سازه در طول زمان و متعاقباً شناسایی آسیب را فراهم می‌کند.
- استفاده از تکنیک RDT برای حالتی که شناسایی با استفاده از تعاشات محیطی انجام می‌شود، امکان شناسایی بردار شکل مودها را در این حالت از بین می‌برد.

۶-۳- روش پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم SOBSS

در این رساله یک روش شناسایی جدید مبتنی بر الگوریتم SOBSS پیشنهاد شد. در واقع روش پیشنهادی امکان استفاده از الگوریتم SOBSS را در مواردی که تعداد سنسورها از تعداد کل درجات آزادی کمتر است، را فراهم می‌کند. روش پیشنهادی، برخلاف اغلب روش‌هایی که در این زمینه پیشنهاد شده‌اند، بر مبنای کاهش تعداد مودهای فعال سازه در بازتاب‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد. بدین منظور، از یک مرحله پیش‌پردازش شامل فیلتر کردن و محاسبه توابع همبستگی متقابل (در صورت نیاز) استفاده شده است. این مرحله علاوه بر کاهش تعداد مودهای فعال سازه، در کاهش اثرات نویز موجود در داده‌ها نیز مؤثر است. روش پیشنهادی قابل استفاده بر روی بازتاب‌های ناشی از ارتعاش آزاد و یا ارتعاشات مبهم محیطی می‌باشد. با انجام چند شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی عملکرد روش پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج حاصل از بررسی این روش به قرار زیر می‌باشند:

- روش پیشنهادی قادر به شناسایی پارامترهای مودال سازه با استفاده از ارتعاشات آزاد و یا ارتعاشات محیطی می باشد.
- در روش پیشنهادی تنها دو بازتاب اندازه گیری شده برای شناسایی کلیه مدهایی از سازه که به خوبی تحریک شده اند، کفایت می کند.
- در روش پیشنهادی، افزایش تعداد سنسورها (تعداد درجات آزادی اندازه گیری شده)، افزایش دقت شناسایی مدهایی که به طور ضعیف تحریک شده اند، را به دنبال دارد.
- نتایج نشان می دهند که در هر دو حالت ارتعاش آزاد و یا ارتعاش محیطی، فرکانس های طبیعی و بردار شکل مدهای نسبی شناسایی شده توسط روش پیشنهادی از دقت بالایی برخوردارند (خطای برآورد زیر ۱٪).
- به طور کلی، نسبت های میرایی برآورد شده نسبت به سایر پارامترهای مودال دقت پایین تری دارند. به طوری که در موارد محدودی خطای برآورد این پارامتر به حدود ۴۰٪ هم می رسد. با این وجود در اغلب موارد خطای برآورد این پارامتر در محدوده قابل قبولی باقی می ماند (کمتر از ۲۰٪).
- با توجه به پیش پردازش داده ها در مرحله فیلتر کردن، اثر نویز بر روی عملکرد روش پیشنهادی، در مقایسه با الگوریتم استاندارد SOBSS به مراتب بهتر است.

۶-۴- مقایسه دو روش پیشنهادی

در هر دو روش پیشنهادی از تکنیک فیلتر کردن به عنوان مرحله پیش پردازش استفاده شده است. دلیل اصلی فیلتر کردن بازتاب ها در روش پیشنهادی اوّل (مبتنی بر الگوریتم LMD) جلوگیری از پدیده اختلاط مدهاست ولی در روش پیشنهادی دوّم (مبتنی بر الگوریتم SOBSS) این مرحله برای کاهش تعداد مدهای فعال در بازتاب های سازه مورد استفاده قرار می گیرد. تعداد فیلترهای مورد نیاز

در روش پیشنهادی اول، صرف‌نظر از تعداد بازتاب‌های موجود، برابر با تعداد مدهای فعال سازه است. در روش پیشنهادی دوم، تعداد فیلترهای موردنیاز به تعداد بازتاب‌های اندازه‌گیری شده و مدهای فعال سازه بستگی دارد؛ به این ترتیب که، با افزایش تعداد بازتاب‌ها، تعداد فیلترهای موردنیاز کاهش خواهد یافت. از طرف دیگر، با توجه به اینکه باندهای گذر تعریف شده در روش پیشنهادی اول کوچکتر از روش پیشنهادی دوم هستند، عملیات نویزگیری در روش اول با قدرت بیشتری انجام می‌شود. از این منظر، افزایش تعداد بازتاب‌ها در روش دوم، از آنجا که باعث بزرگتر شدن باندهای گذر نیز می‌شود، نقطه قوت این روش در مقابل نویز را کاهش می‌دهد.

در روش پیشنهادی اول امکان شناسایی فرکانس‌های طبیعی و نسبت‌های میرایی مدهای فعال سازه تنها با استفاده از یک بازتاب ثبت شده وجود دارد. این درحالی است که در روش پیشنهادی دوم حداقل دو بازتاب ثبت شده برای شناسایی این پارامترها مورد نیاز است.

روش پیشنهادی اول بر روی هر یک از بازتاب‌های ثبت شده به طور جداگانه کار می‌کند. بنابراین افزایش تعداد بازتاب‌ها تأثیری بر دقت نتایج شناسایی توسط این روش ندارد. در نقطه مقابل، روش پیشنهادی دوم بر روی مجموعه بازتاب‌های ثبت شده کار می‌کند، بنابراین افزایش تعداد بازتاب‌ها سبب افزایش دقت شناسایی (حداقل در مورد مدهای با تحریک‌شدگی ضعیف) خواهد شد.

هر دو روش امکان شناسایی سازه با استفاده از ارتعاشات آزاد و یا ارتعاشات محیطی را فراهم می‌کنند. با این وجود، درحالی که شناسایی سازه با استفاده از ارتعاشات محیطی صورت می‌گیرد، به دلیل استفاده از تکنیک RDT در روش پیشنهادی اول، عملاً امکان شناسایی بردار شکل مدهای سازه از بین می‌رود؛ درحالی که در روش پیشنهادی دوم در هر دو حالت ارتعاش آزاد یا ارتعاش محیطی، بردار شکل مدهای نسبی قابل شناسایی خواهند بود.

در روش پیشنهادی اول ابتدا بازتاب‌های مودال سازه شناسایی می‌شوند و سپس بردار شکل مدها با استفاده از این بازتاب‌ها برآورد می‌شوند؛ اما در روش دوم ابتدا بردار شکل مدهای سازه و بلافاصله پس از آن بازتاب‌های مودال شناسایی می‌شوند. به طور کلی، دقت شناسایی بردار شکل مدهای سازه

در روش دوم از روش اول بالاترست.

از آنجا که روش اول مبتنی بر الگوریتم LMD است، به هر حال تاحدودی تحت تأثیر ابتدا و انتهای سیگنال قرار دارد. لذا بازتاب‌های مودال شناسایی شده توسط این روش در نواحی ابتدایی و انتهایی دارای مقداری خطا می‌باشند و باید این نواحی آسیب‌دیده در هنگام برآورد فرکانس‌های طبیعی و نسبت‌های میرایی حذف شوند. این در حالی است که روش پیشنهادی دوم از این پدیده متأثر نمی‌شود.

هر دو روش فرکانس‌های طبیعی مدهای سازه را با دقت بالاتری نسبت به نسبت‌های میرایی برآورد می‌کنند. در هر دو روش دقت برآورد نسبت‌های میرایی در مدهایی که مشارکت کمتری در بازتاب‌های سازه دارند، کاهش می‌یابد.

در روش اول کمیت‌های دامنه و فاز لحظه‌ای در طی عملیات شناسایی به دست می‌آیند. بنابراین امکان شناسایی آسیب با توجه به تغییرات این کمیت‌ها در طول زمان، فراهم می‌شود. با این وجود، در روش دوم این امکان به طور مستقیم وجود ندارد.

۶-۵- پیشنهاد برای مطالعات آتی

در این بخش تعدادی از موضوعات مرتبط که در راستای توسعه این رساله می‌باشند، جهت انجام مطالعات آتی پیشنهاد می‌گردد.

- ارزیابی عملکرد هر یک از روش‌های پیشنهادی برای حالت مدهای مختلط
- ارزیابی عملکرد هر یک از روش‌های پیشنهادی برای حالت مدهای با فرکانس‌های نزدیک به هم
- توسعه روش پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم SOBSS جهت افزایش دقت شناسایی نسبت‌های

میرایی با استفاده از تکنیک پنجره کردن بازتاب‌ها

- انجام مطالعات آزمایشگاهی جهت بررسی دقیق‌تر نقاط ضعف و قوت روش‌های پیشنهادی
- توسعه روش‌های پیشنهادی برای حالتی که بازتاب‌های ثبت شده ناشی از تحریک زلزله باشند.

پیوست‌ها

پیوست‌ها

پ - ۱ - پیشگفتار

در این بخش، تعدادی از مهم‌ترین برنامه‌های کامپیوتری نگارش شده در نرم‌افزار متلب ارائه می‌شود. در اینجا تنها برنامه‌های اصلی مربوط به الگوریتم LMD اصلاح شده، الگوریتم SOBSS و تکنیک RDT ارائه خواهد شد. لازم به ذکر است برای اجرای این برنامه‌ها، بعضاً توابع (function) دیگری نیز موردنیاز است که جهت اختصار از آوردن آن‌ها خودداری شده است.

پ - ۲ - برنامه کامپیوتری مربوط به تکنیک RDT

در بخش ۲-۷-۲ رساله، مبانی تکنیک RDT ارائه گردید. این تکنیک در فصل چهارم رساله، به‌عنوان یک مرحله پیش‌پردازش، برای تبدیل بازتاب‌های حاصل از ارتعاش محیطی به بازتاب‌های متناظر ارتعاش آزاد، مورد استفاده قرار گرفت. در این بخش برنامه کامپیوتری مربوط به این تکنیک ارائه می‌شود.

```

function x_RD=RDT(x,trig_level,RD_num)

[m,n]=size(x); % x is a row vector matix (m<<n)

for mm=1:m
    sigma=std(x(mm,:))
    trig=sigma*trig_level(mm);
    start_point=[];
    cont=[];
    jj=1;
    kk=1;

    for ii=1:n
        if x(mm,ii)>=trig
            cont(jj)=ii;
            if jj>1 && (cont(jj)-cont(jj-1))>1
                start_point(kk)=ii;
                kk=kk+1;
            end
            jj=jj+1;
        end
    end
    start_point=[cont(1),start_point];
    %%
    for ii=1:RD_num
        y=0;
        jj=1;
        while jj<=length(start_point)
            if (ii+start_point(jj))>n
                jj=jj-1;
                if jj==0
                    jj=1;
                end
            end
            break
        end
        y=y+x(mm,ii+start_point(jj));
        jj=jj+1;
    end
    x_RD(mm,ii)=(1/jj)*y;
end

num_point=length(start_point)
end
x_RD=(normal_mat(x_RD',0))';
end

```

پ - ۳ - برنامه کامپیوتری الگوریتم LMD اصلاح شده

در بخش ۴-۲ رساله، مبانی و جزئیات الگوریتم LMD اصلاح شده مطرح گردید. در این بخش برنامه

کامپیوتری مربوط به این الگوریتم ارائه می‌شود.

```
% LMD

% x    - input signal (must be a column vector)
% n    - number of Product Functions
% lag  - moving average step size

% sampling rate set to 200; differnt value can be replaced at
Line:"IF(jj,:)=..."

function [IA,IP,PF] = lmd_2(x,n,lag)

if nargin<3
    lag=ones(1,n);
end

c = x(:)'; % copy of the input signal (as a row vector)
N = length(x);

%-----
-----
PF=zeros(n,N);
eps=N*0.0001;
R=3; % this parameter affect the moving average step size. to
extract transient components (higher modes) R=5, and for slow-
varying siganl R=3 have been proposed;

for jj=1:n % the stop criterion is tested at the end of the loop
    h=c;
    aa=ones(1,N);
    rr=0;
    while 1
        rr=rr+1;
    %%
        % find local max/min points

        d = diff(h); % approximate derivative
        maxmin = []; % to store the optima (min and max without
distinction so far)
        h_m=[];
        maxmin_m=[];
        peaks=[];
        m1=[];
        a1=[];
        for i=1:N-2
            if d(i)==0 % we are on a zero
                maxmin = [maxmin, i];
```

```

elseif (d(i)*d(i+1))<0 % we are straddling a
zero so
    maxmin = [maxmin, i+1]; % define zero as at
i+1 (not i)
end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if size(maxmin,2) < 2 % then it is the residue
break
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[h_m,maxmin_m]=boundary_process(h,maxmin); % mirror
extension to improve end effect issue

%maxmin_m=[1,maxmin,N];
%h_m=h;

peaks=h_m(maxmin_m);
nn=length(maxmin_m);

%%
% finding local mean and local amplitude
for ii=1:nn-1
    m1(maxmin_m(ii):maxmin_m(ii+1)-
1)=(peaks(ii)+peaks(ii+1))/2;
    a1(maxmin_m(ii):maxmin_m(ii+1)-1)=0.5*abs((peaks(ii)-
peaks(ii+1)));
    delta_maxmin_m(ii)=maxmin_m(ii+1)-maxmin_m(ii);
end

if nargin<3
lag(jj)=floor((max(delta_maxmin_m))/R);
if lag(jj)<5
    lag(jj)=5;
end
end

%-----
% boundary process for controlling end effect issue
% m1_start=(peaks(1)+2*peaks(2)+peaks(3))/4;
% a1_start=(abs(peaks(1)-peaks(2))+abs(peaks(2)-
peaks(3)))/4;
% m1_end=(peaks(end-2)+2*peaks(end-1)+peaks(end))/4;
% a1_end=(abs(peaks(end)-peaks(end-1))+abs(peaks(end-1)-
peaks(end-2)))/4;
% m1=[m1_start,m1(2:end-1),m1_end];
% a1=[a1_start,a1(2:end-1),a1_end];
% maxmin=[1,maxmin];
%%
%linear interpolation
% m2=interp1((maxmin_m(1:nn-
1))',m1',(1:length(h_m))','linear','extrap');
% a2=interp1((maxmin_m(1:nn-
1))',a1',(1:length(h_m))','linear','extrap');

```

```

%      m2=m2';
%      a2=a2';

% moving aveage process for making "m(t)" and "a(t)"
kk=ones(1,lag(jj))/lag(jj);
m2=conv(m1,kk,'same');
a2=conv(a1,kk,'same');
%%
% converting to original signal length
t0=floor((length(h_m)-N)/2);
m3=m2(t0+1:t0+N);
a3=a2(t0+1:t0+N);

% stopping criteria
z=a3-ones(1,N);
z_bar=(sum(z)/N)*ones(1,N);
rms_z=sqrt(sum(z.^2)/N);
ek_z=abs(-3+(sum((z-z_bar).^4)/N)/(sum((z-
z_bar).^2)/N)^2);

s(rr,:)=(h-m3)./(a3+1e-8*ones(1,N));
a(rr,:)=aa.*a3;
aa=a(rr,:);
if rr>1
    s0=s(rr-1,:);
    a0=a(rr-1,:);
else
    s0=s(rr,:);
    a0=a(rr,:);
end

ER(rr)=rms_z+ek_z;
if ER(rr)<=eps
    break
end

if rr>4 && ER(rr)>ER(rr-1) && ER(rr-1)>ER(rr-2)
    s0=s(rr-3,:); a0=a(rr-3,:);
    break
end

if rr>100
    disp('Warning:LMD algorithm cant to find the
solutions')
    disp('Please change the "lag" parameter for moving
average process or increase the "eps" parameter as telorance')
    break
end

h=s(rr,:);

end

```

```

IA(jj,:)=a0;
S(jj,:)=s0;
PF(jj,:)=IA(jj,:).*S(jj,:);
IP(jj,:)=real(acos(S(jj,:)));

c = c-PF(jj,:);
end

end

```

پ - ۴ - برنامه کامپیوتری مربوط به الگوریتم SOBSS

در فصل پنجم رساله، مبانی ریاضی الگوریتم SOBSS ارائه گردید. این الگوریتم به عنوان هسته مرکزی روش پیشنهادی دوم مورد استفاده قرار می گیرد. در این بخش برنامه کامپیوتری مربوط به این الگوریتم ارائه می شود.

```

function [H,S,D]=sobi(X,n,p),

[m,N,ntrials]=size(X);
if nargin<1 | nargin > 3
    help sobi
elseif nargin==1,
    n=m; % Source detection (hum...)
    p=min(100,ceil(N/3)); % Number of time delayed correlation
matrices to be diagonalized
    % Authors note: For noisy data, use at least p=100 the time-
delayed covariance matrices.
elseif nargin==2,
    p=min(100,ceil(N/3)); % Default number of correlation matrices
to be diagonalized
                                % Use < 100 delays if necessary for short
data epochs
end;

%
% Make the data zero mean
%
X(:, :)=X(:, :)-kron(mean(X(:, :))', ones(1,N*ntrials));

%
% Pre-whiten the data based directly on SVD
%
[UU,SS,VV]=svd(X(:, :)',0);

```

```

Q= pinv(SS)*VV';
X(:, :)=Q*X(:, :);

% Estimate the correlation matrices
%
k=1;
pm=p*m; % for convenience
for u=1:m:pm,
    k=k+1;
    for t = 1:ntrials
        if t == 1
            Rxp=X(:, k:N, t) *X(:, 1:N-k+1, t)' / (N-k+1) /ntrials;
        else
            Rxp=Rxp+X(:, k:N, t) *X(:, 1:N-k+1, t)' / (N-k+1) /ntrials;
        end;
    end;
    M(:, u:u+m-1)=norm(Rxp, 'fro')*Rxp; % Frobenius norm =
end; %
sqrt(sum(diag(Rxp'*Rxp)))

%
% Perform joint diagonalization
%
epsil=1/sqrt(N)/100;
encore=1;
V=eye(m);
while encore,
    encore=0;
    for p=1:m-1,
        for q=p+1:m,
            % Perform Givens rotation
            g=[ M(p, p:m:pm)-M(q, q:m:pm) ;
                M(p, q:m:pm)+M(q, p:m:pm) ;
                i*(M(q, p:m:pm)-M(p, q:m:pm)) ];
            [vcp, D] = eig(real(g*g'));
            [la, K]=sort(diag(D));
            angles=vcp(:, K(3));
            angles=sign(angles(1))*angles;
            c=sqrt(0.5+angles(1)/2);
            sr=0.5*(angles(2)-j*angles(3))/c;
            sc=conj(sr);
            oui = abs(sr)>epsil ;
            encore=encore | oui ;
            if oui , % Update the M and V matrices
                colp=M(:, p:m:pm);
                colq=M(:, q:m:pm);
                M(:, p:m:pm)=c*colp+sr*colq;
                M(:, q:m:pm)=c*colq-sc*colp;
                rowp=M(p, :);
                rowq=M(q, :);
                M(p, :)=c*rowp+sc*rowq;
                M(q, :)=c*rowq-sr*rowp;
                temp=V(:, p);

```



```

        V(:,p)=c*V(:,p)+sr*V(:,q);
        V(:,q)=c*V(:,q)-sc*temp;
    end%% if
end%% q loop
end%% p loop
end%% while

%
% Estimate the mixing matrix
%
H = pinv(Q)*V;

%
% Estimate the source activities
%
if nargout>1
    for ii=1:ntrials
        S(:, :, ii)=V'*X(:, :, ii); % estimated source activities
    end
end
end

```

پ - ۵ - جمع بندی

در این پیوست، تعدادی از برنامه‌های کامپیوتری نگارش شده در نرم‌افزار متلب جهت استحضار خوانندگان محترم ارائه گردید. علاقمندان می‌توانند جهت اطلاع از جزئیات این برنامه‌ها و همچنین سایر برنامه‌های نگارش شده در طی انجام این رساله، با نگارنده مکاتبه نمایند.

منابع و مراجع

- [١] Structural Identification of Constructed Systems: American Society of Civil Engineers (ASCE); 2013.
- [٢] Alvin KF, Robertson AN, Reich GW, Park KC. Structural system identification: from reality to models. *Computers & Structures* 2003;81:1149-76.
- [٣] Ibrahim SR, Mikulcik EC. A time domain modal vibration test technique. *Shock and Vibration Bulletin* 1973;43:16.
- [٤] Chopra AK. *Dynamics of Structures*. 3rd ed: Pearson Education; 2007.
- [٥] Zaghlool SA. Single-station time-domain (SSTD) vibration testing technique: Theory and application. *Journal of Sound and Vibration* 1980;72:205-34.
- [٦] Mohanty P, Rixen DJ. A modified Ibrahim time domain algorithm for operational modal analysis including harmonic excitation. *Journal of Sound and Vibration* 2004;275:375-90.
- [٧] Malekjafarian A, Brincker R, Ashory MR, Khatibi MM. Modified Ibrahim Time Domain Method for Identification of Closely Spaced Modes: Experimental Results. In: Caicedo JM, Catbas FN, Cunha A, Racic V, Reynolds P, Salyards K, editors. *Topics on the Dynamics of Civil Structures, Volume 1*. New York, NY: Springer New York; 2012. p. 443-9.
- [٨] Juang JN, Pappa RS. An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 1985;8:620-7.
- [٩] Zhang G, Ma J, Chen Z, Wang R. Automated eigensystem realisation algorithm for operational modal analysis. *Journal of Sound and Vibration* 2014;333:3550-63.
- [١٠] Moaveni B, Masoumi Z. Modifying the ERA and fast ERA to improve operational performance for structural system identification. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2019;120:664-92.
- [١١] Van Overschee P, De Moor B. Subspace algorithms for the stochastic identification problem. *Automatica* 1993;29:649-60.
- [١٢] Abdelghani M, Verhaegen M, Van Overschee P, De Moor B. COMPARISON STUDY OF SUBSPACE IDENTIFICATION METHODS APPLIED TO FLEXIBLE

STRUCTURES. Mechanical Systems and Signal Processing 1998;12:679-92.

[13]Liu Y-C, Loh C-H, Ni Y-Q. Stochastic subspace identification for output-only modal analysis: application to super high-rise tower under abnormal loading condition. Earthquake Engineering & Structural Dynamics 2013;42:477-98.

[14]Poncelate F. Experimental modal analysis using blind source separation techniques. Aerospace and Mechanical Engineering Department, University of Liege, Belgium 2010.

[15]Li W, Vu V-H, Liu Z, Thomas M, Hazel B. Extraction of modal parameters for identification of time-varying systems using data-driven stochastic subspace identification. Journal of Vibration and Control 2018;24:4781-96.

[16]Huang NE, Shen Z, Long SR, Wu MC, Shih HH, Zheng Q, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 1998;454:903-95.

[17]Yang JN, Lei Y, Pan S, Huang N. System identification of linear structures based on Hilbert–Huang spectral analysis. Part 1: normal modes. Earthquake Engineering & Structural Dynamics 2003;32:1533-54.

[18]Yang JN, Lei Y, Pan S, Huang N. System identification of linear structures based on Hilbert–Huang spectral analysis. Part 2: Complex modes. Earthquake Engineering & Structural Dynamics 2003;32:1533-54.

[19]Chen Y, Feng MQ. A technique to improve the empirical mode decomposition in the Hilbert-Huang transform. Earthquake Engineering and Engineering Vibration 2003;2:75-85.

[20]Wu Z, Huang NE. Ensemble Empirical Mode Decomposition: A Noise-Assisted Data Analysis Method. Advances in Adaptive Data Analysis 2009;1:1-41.

[21]Yeh J-R, Shieh J-S. Complementary Ensemble Empirical Mode Decomposition: A Novel Noise Enhanced Data Analysis Method. Advances in Adaptive Data Analysis 2010;2:135-56.

[22]Zheng J, Cheng J, Yang Y. Partly ensemble empirical mode decomposition: An improved noise-assisted method for eliminating mode mixing. Signal Processing

2014;96:362-74.

[٢٣]Tang B, Dong S, Song T. Method for eliminating mode mixing of empirical mode decomposition based on the revised blind source separation. *Signal Processing* 2012;92:248-58.

[٢٤]Han J, Zheng P, Wang H. Structural modal parameter identification and damage diagnosis based on Hilbert-Huang transform. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration* 2014;13:101-11.

[٢٥]Cardoso JF. Blind signal separation: statistical principles. *Proceedings of the IEEE* 1998;86:2009-25.

[٢٦]Hyvarinen A, Karhunen J, Oja E. Independent Component Analysis. *Independent Component Analysis: John Wiley & Sons*; 2001.

[٢٧]Belouchrani A, Abed-Meraim K, Cardoso JF, Moulines E. A blind source separation technique using second-order statistics. *IEEE Transactions on Signal Processing* 1997;45:434-44.

[٢٨]Kerschen G, Poncelet F, Golinval JC. Physical interpretation of independent component analysis in structural dynamics. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2007;21:1561-75.

[٢٩]Poncelet F, Kerschen G, Golinval JC, Verhelst D. Output-only modal analysis using blind source separation techniques. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2007;21:2335-58.

[٣٠]Zhou W, Chelidze D. Blind source separation based vibration mode identification. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2007;21:3072-87.

[٣١]Yang Y, Nagarajaiah S. Blind modal identification of output-only structures in time-domain based on complexity pursuit. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 2013;42:1885-905.

[٣٢]Hazra B, Narasimhan S. Wavelet-based blind identification of the UCLA Factor building using ambient and earthquake responses. *Smart Materials and Structures* 2009;19:025005.

[٣٣]Sadhu A, Narasimhan S. A decentralized blind source separation algorithm for

ambient modal identification in the presence of narrowband disturbances. *Structural Control and Health Monitoring* 2014;21:282-302.

[۳۴] Hazra B, Sadhu A, Roffel AJ, Paquet PE, Narasimhan S. Underdetermined Blind Identification of Structures by Using the Modified Cross-Correlation Method. *Journal of Engineering Mechanics* 2012;138:327-37.

[۳۵] Abazarsa F, Ghahari SF, Nateghi F, Taciroglu E. Response-only modal identification of structures using limited sensors. *Structural Control and Health Monitoring* 2013;20:987-1006.

[۳۶] Abazarsa F, Nateghi F, Ghahari SF, Taciroglu E. Blind Modal Identification of Non-Classically Damped Systems from Free or Ambient Vibration Records. *Earthquake Spectra* 2013;29:1137-57.

[۳۷] Ghahari SF, Abazarsa F, Ghannad MA, Çelebi M, Taciroglu E. Blind modal identification of structures from spatially sparse seismic response signals. *Structural Control and Health Monitoring* 2014;21:649-74.

[۳۸] Hazra B, Roffel AJ, Narasimhan S, Pandey MD. Modified Cross-Correlation Method for the Blind Identification of Structures. *Journal of Engineering Mechanics* 2010;136:889-97.

[۳۹] Antoni J, Chauhan S. A study and extension of second-order blind source separation to operational modal analysis. *Journal of Sound and Vibration* 2013;332:1079-106.

[۴۰] McNeill S. A Modal Identification Algorithm Combining Blind Source Separation and State Space Realization. *Journal of Signal and Information Processing* 2013;Vol.04No.02:13.

[۴۱] Yang Y, Nagarajaiah S. Time-Frequency Blind Source Separation Using Independent Component Analysis for Output-Only Modal Identification of Highly Damped Structures. *Journal of Structural Engineering* 2013;139:1780-93.

[۴۲] James G, Carne T, Laufer J. The natural excitation technique (NExT) for modal parameter extraction from operating structures 1995.

[۴۳] Bendat JS, Piersol AG. *Random Data Analysis and Measurement Procedures*.

Measurement Science and Technology 2000;11:1825.

[٤٤]Ibrahim SR. Random Decrement Technique for Modal Identification of Structures. Journal of Spacecraft and Rockets 1977;14:696-700.

[٤٥]Smith JS. The local mean decomposition and its application to EEG perception data. Journal of the Royal Society, Interface 2005;2:443-54.

[٤٦]Wang Y ,He Z, Zi Y. A Comparative Study on the Local Mean Decomposition and Empirical Mode Decomposition and Their Applications to Rotating Machinery Health Diagnosis. Journal of Vibration and Acoustics 2010;132:021010--10.

[٤٧]Cheng J, Yang Y, Yang Y. A rotating machinery fault diagnosis method based on local mean decomposition. Digital Signal Processing 2012;22:356-66.

[٤٨]Deng L, Zhao R. Fault feature extraction of a rotor system based on local mean decomposition and Teager energy kurtosis. Journal of Mechanical Science and Technology 2014;28:1161-9.

[٤٩]Liu H, Han M. A fault diagnosis method based on local mean decomposition and multi-scale entropy for roller bearings. Mechanism and Machine Theory 2014;75:67-78.

[٥٠]Yang Y, Cheng J, Zhang K. An ensemble local means decomposition method and its application to local rub-impact fault diagnosis of the rotor systems. Measurement 2012;45:561-70.

[٥١]Li Y, Xu M, Haiyang Z, Wei Y, Huang W. A new rotating machinery fault diagnosis method based on improved local mean decomposition. Digital Signal Processing 2015;46:201-14.

[٥٢]Zhang C, Li Z, Hu C, Chen S, Wang J, Zhang X. An optimized ensemble local mean decomposition method for fault detection of mechanical components. Measurement Science and Technology 2017;2٨:٠٣٥١٠٢

[٥٣]Liu Z, Jin Y, Zuo MJ, Feng Z. Time-frequency representation based on robust local mean decomposition for multicomponent AM-FM signal analysis. Mechanical Systems and Signal Processing 2017;95:468-87.

[٥٤]Oppenheim AV, Schafer RW. Discrete-Time Signal Processing. 3rd ed: Pearson Education Limited; 2014.

- [٥٥]MATLAB 2015b. Massachusetts, United States: The MathWorks, Inc.; 2015.
- [٥٦]Banerjee S, Roy A. Linear Algebra and Matrix Analysis for Statistics. New York: Chapman and Hall/CRC; 2014.
- [٥٧]Meirovitch L. Principles and Techniques of Vibrations Pearson Education; 1997.
- [٥٨]Wang Y, He Z, Zi Y. A demodulation method based on improved local mean decomposition and its application in rub-impact fault diagnosis. Measurement Science and Technology 2009;20:025704.
- [٥٩]Quek ST, Tua PS, Wang Q. Detecting anomalies in beams and plate based on the Hilbert–Huang transform of real signals. Smart Materials and Structures 2003;12:447-60.
- [٦٠]Yang JN, Agrawal AK, Samali B, Wu J-C. Benchmark Problem for Response Control of Wind-Excited Tall Buildings. Journal of Engineering Mechanics 2004;130:437-46.
- [٦١]Yang JN, Lei Y, Lin S, Huang N. Identification of Natural Frequencies and Dampings of In Situ Tall Buildings Using Ambient Wind Vibration Data. Journal of Engineering Mechanics 2004;130:570-7.
- [٦٢]Cardoso J. Blind signal separation: statistical principles. Proceedings of the IEEE 1998;86:2009-25.
- [٦٣]Giraldo DF, Song W, Dyke SJ, Caicedo JM. Modal Identification through Ambient Vibration: Comparative Study. Journal of Engineering Mechanics 2009;135:759-70.
- [٦٤]Johnson EA, Lam HF, Katafygiotis LS, Beck JL. Phase I IASC-ASCE Structural Health Monitoring Benchmark Problem Using Simulated Data. Journal of Engineering Mechanics 2004;130:3-15.
- [٦٥]Dyke S .Report on the Building Structural Health Monitoring Problem Phase 1 Analytical. 2011.

Abstract

Nowadays, there are many important existing structures which a comprehensive knowledge about their dynamical properties, i.e. natural frequencies, damping ratios, and mode shapes, is necessary for any structural evaluation, control or rehabilitation purpose. In recent decades, as a result of developments in the signal processing techniques, several methods have been proposed in this concept and each method has some benefits and shortcomings. In this thesis, we have investigated two recently developed algorithms in signal processing context and try to fix their restriction when using in modal parameters identification purpose.

In the first proposed method, Local Mean Decomposition (LMD) algorithm has been utilized in modal parameters identification context for the first time. To prevent the mode mixing phenomenon, a preprocessing step including filtering of the responses has been used. The ability of the proposed method has been investigated due to some numerical and experimental simulations and the results compared with those obtained from Hilbert-Huang Transform (HHT). As a major advantage, the proposed method can extract natural frequencies and damping ratios of all active modes from only one suitable measurement. However, the responses at all DOFs are required for estimation of the structural mode shapes. The identification results from numerical simulations in the free vibration test showed that the maximum estimation error of the natural frequencies for the first proposed method and the HHT method were 1% and 0.5%, respectively. Also, the maximum estimation error of the damping ratios for the first proposed method and the HHT method were 4.1% and 6.2%, respectively. The mode shape vectors identified by both methods had MAC values greater than 99.8%, which means a high level of accuracy. It should be mentioned that the estimation errors in both methods increase for poorly-excited modes. In addition, owing to the filtering step, the existence of noise in the measurements has no considerable effect on the identification results of both methods. Investigating the plots of instantaneous phase angles and the natural logarithm of instantaneous amplitudes showed that the first proposed method in comparison with the HHT method is less affected by the end effect issue. Also, the proposed method showed fewer deviations from the linear form in a longer time interval. The identification results of the experimental simulation with ambient vibrations showed that the natural frequencies are accurately identified by either the first

proposed method or the HHT ones. Moreover, the maximum estimation error of the damping ratios in the case of 10% noise is restricted to 7% and 6%, respectively, for the first proposed method and the HHT ones.

The second proposed method is based on Second-Order Blind Source Separation (SOBSS) algorithm. A major restriction of the standard SOBSS algorithm in the identification context is that the responses in all DOFs should be recorded. In the current research, this problem has been resolved by reducing the number of active modes in the measurements using the filtering technique so that the number of active modes is equal to the number of measurements. Then the standard SOBSS algorithm can be applied on the filtered responses to extract the modal parameters of the structure. The identification results of a simulated 5-story shear frame for different noise levels showed that the noises in the measurements cause to increase the estimation errors of the damping ratios in the second proposed method (the maximum error of 23.5%). However, the natural frequencies and the mode shape vectors identified by this method have not been considerably affected by the noise level. Although in both cases of free or ambient vibrations, the proposed method can identify the active modes using only two measurements, but more accuracy can be achieved for poorly excited modes, by increasing the number of measured DOFs. The identification results of the experimental simulation indicate the disability of the second proposed method in estimation of the damping ratios of the poorly-excited modes (with maximum errors of 41%). Nevertheless, the estimation errors of the natural frequencies for all of the identified modes are less than 1% and the corresponding MAC values are approximately 100%.

Keywords:

Modal parameters identification, LMD algorithm, SOBSS algorithm, filtering the measurements



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

Ph.D. Thesis in Structural Engineering

Modal parameters identification using the output data due to the structural vibrations

By:

Saeed Mohammadi

Supervisor:

Dr. Ali Keyhani

April 2019