

به نام خدایوند بخشیدارنده  
مهربان

به نام خدایوند بخشیدارنده  
مهربان

به نام خدایوند بخشیدارنده  
مهربان



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه

# شناسایی مودال سازه‌ها با استفاده از پردازش ویدیوهای ثبت شده و الگوریتم‌های خروجی-محور

نگارنده: افسانه بکر پوشیده

استاد راهنما

دکتر علی کیهانی

استاد مشاور

دکتر علیرضا احمدی فرد

بهمن ۱۳۹۸

شماره: ۴۹/۱۲/۱۳۹۴  
تاریخ: ۲۹/۰۹/۱۳۹۴

باسم تعالی



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

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم **افسانه بکریوشیده** با شماره دانشجویی **۹۵۰۲۷۵۴** رشته **مهندسی عمران گرایش سازه** تحت عنوان **شناسایی مودال سازه‌ها با استفاده از پردازش ویدیوهای ثبت شده و الگوریتم‌های خروجی** محور که در تاریخ **۱۳۹۸/۱۱/۰۸** با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

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

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	انضام
۱- استاداراهنمای اول	دکتر علی کیهانی	دانشیار	<i>[Handwritten Signature]</i>
۲- استاداراهنمای دوم	-	-	-
۳- استاد مشاور	دکتر علیرضا احمدی‌فره	دانشیار	<i>[Handwritten Signature]</i>
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر مهدی گللی	استادیار	<i>[Handwritten Signature]</i>
۵- استاد امتحن اول	دکتر سید مهدی توکلی	استادیار	<i>[Handwritten Signature]</i>
۶- استاد امتحن دوم	دکتر فروش پاساچه	استادیار	<i>[Handwritten Signature]</i>

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: *[Handwritten Signature]* دکتر / استادیار

تاریخ و امضاء: *[Handwritten Signature]*  
 دانشکده مهندسی عمران و معماری و شهر دانشکده  
 تبصره: در صورتی که کسی از دوره خود جداگانه بگذرد از مدت مجاز تحصیل می‌گذرد از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۹ ماه برگزار شود).

تقدیم بہ

پدر و مادر عزیز

و خواہران نازنینم

## شکر و قدردانی

حال که در سایه‌ی الطاف ایزدمنان نگارش و تدوین پایان نامه به اتمام رسیده، شایسته است که سخن خویش را با سپاس گزاری و یاد

نیک از یک استادان و بزرگوارانی که در این مرحله از گذر علم و دانش اندوزی رو شکر را هم بودند، آغاز نمایم.

بر خود لازم می‌دانم مراتب قدرشناسی خود را تقدیم اساتید ارجمندم آقایان دکتر علی کیهانی و دکتر علیرضا احمدی فرد نمایم که در به

ثمر رساندن این تحقیق بار اهنمایی‌ها و مشاوره‌ی خود مرا مورد لطف قرار دادند.

همچنین از کلیه کسانی که در مراحل مختلف انجام این تحقیق به نحوی مریاری نمودند، خالصانه شکر و قدردانی نموده و از خداوند منان

توفیق این عزیزان را خواستارم.

## اقرارنامه

اینجانب **افسانه بکرپوشیده** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **عمران\_سازه** دانشکده **عمران** دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **شناسایی مودال سازه‌ها با استفاده از پردازش ویدیوهای ثبت شده و الگوریتم‌های خروجی\_محور** تحت راهنمایی **جناب آقای دکتر علی کیهانی** متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

## تاریخ

### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .  
استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## چکیده

تکنیک‌های نظارت بر سلامت و ارزیابی سازه‌های مهندسی بر اساس اطلاعات به‌دست‌آمده از ارتعاش، یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای شناسایی آسیب‌های سازه‌ای است. ایده اساسی پذیرفته شده برای تشخیص آسیب بر اساس حرکت سازه، این است که تغییرات ناشی از خسارت در خواص فیزیکی موجب تغییرات قابل تشخیص در خواص مودال (فرکانس‌های طبیعی، میرایی مودال و اشکال مودی) خواهند شد. بدین ترتیب، تغییرات در پارامترهای مودال نشان‌دهنده‌ی تغییر در وضعیت سلامت سازه، یعنی آسیب است. بنابراین اندازه‌گیری تجربی و تعیین رفتار دینامیکی سازه از اهمیت بالایی برخوردار است. تکنیک محوری برای توصیف دینامیک سازه آنالیز مودال است که طی آن پارامترهای مودال که رفتار دینامیکی سازه را کنترل می‌کنند، شناسایی می‌شوند. یکی از سیستم‌های اندازه‌گیری که در این راستا مورد استقبال قرار گرفته، دوربین‌های ویدیویی دیجیتال است. تحلیل‌های مودال انجام‌شده بر اساس اندازه‌گیری‌های ویدیویی علی‌رغم مزایای زیاد به دلیل وابستگی به نشانگرهای کنتراست بالا، چالش‌هایی را در مورد سازه‌های بزرگ و غیرقابل دسترسی ایجاد می‌کنند. از طرفی پذیرش گسترده‌ی این تکنیک‌ها ضرورت توسعه روش‌هایی را بیان می‌کند که تنها از پاسخ‌های میدان-کامل اندازه‌گیری‌شده، بدون آماده‌سازی اضافی سطح سازه‌ای استفاده می‌کنند.

از این‌رو، هدف از این پایان‌نامه ارائه یک الگوریتم آنالیز مودال عملیاتی (خروجی-محور) است که قادر به شناسایی و استخراج پارامترهای مودال با وضوح مکانی بالا، بدون نیاز به آماده‌سازی سطح سازه‌ای و تنها بر اساس پاسخ‌های میدان-کامل اندازه‌گیری شده با استفاده از دوربین‌های ویدیویی سرعت-بالا است. در راستای تحقق این هدف، ابتدا بر روی هر فریم از ویدیوی سازه‌ی مرتعش یک تکنیک تجزیه‌ی چندمقیاسی اعمال می‌شود تا فاز پیکسل‌ها در مقیاس‌های مختلف مکانی استخراج شوند زیرا فاز محلی معرف حرکت ارتعاش محلی سازه است. بر اساس فاز استخراج‌شده برای هر پیکسل از هر فریم، می‌توان

ماتریس حرکت مکانی-زمانی میدان-کامل را در مقیاس‌های مکانی مختلف تشکیل داد. با توجه به اینکه پاسخ محاسبه شده دارای بعد مکانی بسیار بالاتری نسبت به بعد مودال سازه است، لازم است که از روش‌های کاهش بعد داده استفاده شود. خروجی تکنیک کاهش بعد، ترکیبات خطی از پاسخ‌های مودال است که تعداد این ترکیبات با تعداد مودهای فعال سازه برابر است. بنابراین می‌توان بر اساس ترکیبات مشاهده شده، با استفاده از الگوریتم‌های خروجی-محور، پاسخ‌های مودال را جداسازی نمود. در نهایت بر اساس پاسخ‌های به دست آمده در این مرحله، فرکانس و نسبت میرایی هر یک از مودهای سازه محاسبه می‌شوند. همچنین با اعمال تکنیک بزرگنمایی حرکت بر روی هر یک از این پاسخ‌ها و انجام روند معکوس پردازش ویدیو، شکل مودهای سازه با وضوح مکانی بالا قابل بازسازی هستند.

به منظور صحت‌سنجی، ویدیوی ارتعاش آزاد و تصادفی دو تیر یکسر گیردار و دو سر مفصل با پارامترهای مودال مشخص، در محیط نرم‌افزار متلب بازسازی شد. سپس با اعمال الگوریتم پیشنهادی بر ویدیوهای تهیه شده و مقایسه‌ی خروجی آن با مقادیر تئوری، عملکرد روش مورد تایید قرار گرفت. همچنین به جهت ارزیابی عملکرد الگوریتم در شرایط آزمایشگاهی، ویدیوی ارتعاش آزاد و تصادفی تیر یکسر گیردار آلومینیومی که در محیط آزمایشگاه و با استفاده از دوربین سرعت-بالا تهیه شده بود، مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت با استفاده از الگوریتم توسعه‌یافته پارامترهای مودال سازه آلومینیومی با موفقیت شناسایی شدند.

**کلمات کلیدی:** آنالیز مودال عملیاتی، اندازه‌گیری غیرتماسی، پردازش ویدیو، هرم مختلط جهت‌دار،

جداسازی کور منابع، بزرگنمایی حرکت



## فهرست مطالب

۱- فصل ۱: کلیات تحقیق .....	۱
۱-۱- مقدمه .....	۲
۲-۱- هدف .....	۵
۳-۱- بیان مسئله .....	۵
۴-۱- ساختار پایان نامه .....	۶
۲- فصل دوم: پیشینه تحقیق .....	۹
۱-۲- مقدمه .....	۱۰
۲-۲- مطالعات انجام شده .....	۱۰
۳- فصل سوم: مواد و روش ها .....	۱۷
۱-۳- مقدمه .....	۱۸
۲-۳- جداسازی کور منبع .....	۱۸
۱-۲-۳- سیستم ترکیب کننده .....	۲۰
۲-۲-۳- فرض های اساسی .....	۲۲
۳-۲-۳- روند جداسازی سیگنال های منبع .....	۲۳
۳-۳- الگوریتم های مبتنی بر استقلال منابع .....	۲۴
۱-۳-۳- استقلال بر مبنای میزان غیرگوسی بودن .....	۲۴
۴-۳- الگوریتم های مبتنی بر ناهمبستگی منابع .....	۲۷
۱-۴-۳- آنالیز مولفه های اصلی .....	۲۷
۲-۴-۳- شناسایی کور مرتبه دوم (SOBI) .....	۲۹
۵-۳- پیش پردازش های لازم برای حل مسئله BSS .....	۳۴
۱-۵-۳- متمرکز کردن داده ها حول صفر .....	۳۴

۳۵	..... سفیدسازی ۲-۵-۳
۳۵	..... بزرگنمایی حرکت ۶-۳
۳۸	..... هرم مختلط جهت‌دار ۷-۳
۴۰	..... نحوه‌ی به‌کارگیری الگوریتم‌های معرفی‌شده جهت حل مسئله ۸-۳
۴۳	..... فصل چهارم: روش تحقیق ۴-۴
۴۴	..... ۱-۴ مقدمه ۱-۴
۴۴	..... ۲-۴ نمایش محلی حرکت ارتعاشی مبتنی بر فاز ۲-۴
۴۵	..... ۳-۴ برهم‌نهی مودال حرکت ارتعاشی مبتنی بر فاز ۳-۴
۴۶	..... ۱-۳-۴ کاهش بعد با استفاده از آنالیز مولفه‌های اصلی ۱-۳-۴
۴۸	..... ۲-۳-۴ جداسازی کور مودهای ارتعاشی ۲-۳-۴
۴۹	..... ۴-۴ بزرگنمایی حرکت مودهای ارتعاشی ۴-۴
۵۰	..... ۱-۴-۴ بزرگنمایی مودهای ارتعاشی منفرد ۱-۴-۴
۵۲	..... ۲-۴-۴ تحلیل نسبت سیگنال به نویز ۲-۴-۴
۵۳	..... ۵-۴ خلاصه روش پیشنهادی ۵-۴
۵۷	..... فصل پنجم: بحث و نتایج ۵-۵
۵۸	..... ۱-۵ مقدمه ۱-۵
۵۸	..... ۲-۵ آزمون اول: مدل عددی ۲-۵
۵۹	..... ۱-۲-۵ تحلیل دینامیکی تیرها ۱-۲-۵
۶۱	..... ۲-۲-۵ تیر یکسر گیردار ۲-۲-۵
۷۲	..... ۳-۲-۵ تیر دو سر مفصل ۳-۲-۵
۷۸	..... ۳-۵ آزمون دوم: مدل آزمایشگاهی ۳-۵
۷۹	..... ۱-۳-۵ ارتعاش آزاد مدل آزمایشگاهی تیر یکسر گیردار ۱-۳-۵
۸۱	..... ۲-۳-۵ ارتعاش تصادفی مدل آزمایشگاهی تیر یکسر گیردار ۲-۳-۵
۸۷	..... فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۶-۶

۸۸ ..... ۱-۶- نتیجه گیری

۹۰ ..... ۲-۶- پیشنهادها

۹۱ ..... ۷- مراجع

## فهرست شکل؛

- شکل ۳-۱. نمایشی از مسئله‌ی کوکتل پارتی در ساده‌ترین حالت برابری تعداد منابع و مشاهدات.... ۱۹
- شکل ۳-۲. نمایشی از روند پردازش فریم‌های ویدیویی با استفاده از تکنیک بزرگنمایی حرکت [۲۱] ..... ۳۷
- شکل ۳-۳. هرم تشکیل‌شده در سه سطح به همراه آخرین مولفه پایین‌گذر تصویر [۲۲] ..... ۴۰
- شکل ۴-۱. نمودار جریان روش پیشنهادشده برای آنالیز مودال عملیاتی مبتنی بر اندازه‌گیری و پردازش ویدیویی ..... ۵۴
- شکل ۵-۱. نمایش تیر: الف. اتصال یکسرگیردار، ب. اتصال دو سر مفصل ..... ۵۹
- شکل ۵-۲. فریم تجزیه‌شده به ۳ مقیاس مکانی مختلط به همراه مولفه‌های بالاگذر و پایین‌گذر ..... ۶۲
- شکل ۵-۳. نمودار تاریخچه زمانی و چگالی طیفی توان متناظر با آن برای فازهای محلی استخراج‌شده از سه پیکسل دلخواه در مقیاس اول ( ویدیوی بازسازی‌شده ارتعاش آزاد تیر یکسر گیردار فولادی در محیط نرم‌افزار متلب) ..... ۶۳
- شکل ۵-۴. توزیع مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس فاز (ارتعاش آزاد تیر یکسر گیردار فولادی) ..... ۶۴
- شکل ۵-۵. مولفه‌های اصلی ماتریس فاز مکانی\_زمانی در مقیاس اول و چگالی طیفی توان متناظر با هر یک (ارتعاش آزاد تیر یکسر گیردار فولادی) ..... ۶۵
- شکل ۵-۶. پاسخ‌های مودال تخمین زده‌شده با استفاده از الگوریتم BSS و چگالی طیفی توان متناظر با هر یک (ارتعاش آزاد تیر یکسر گیردار فولادی) ..... ۶۶
- شکل ۵-۷. اشکال مودی استخراج‌شده: الف. شکل مود اول ( $\alpha = 40$ )، ب. شکل مود دوم ( $\alpha = 170$ )، ج. شکل مود سوم ( $\alpha = 200$ ) - (ارتعاش آزاد تیر یکسر گیردار فولادی) ..... ۶۸
- شکل ۵-۸. توزیع مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس فاز (ارتعاش تصادفی تیر یکسر گیردار فولادی) ..... ۶۹
- شکل ۵-۹. مولفه‌های اصلی ماتریس فاز مکانی\_زمانی در مقیاس اول و چگالی طیفی توان متناظر با هر یک (ارتعاش تصادفی تیر یکسر گیردار فولادی) ..... ۷۰

- شکل ۵-۱۰. پاسخ‌های مودال تخمین زده‌شده با استفاده از الگوریتم BSS و چگالی طیفی توان  
متناظر با هر یک (ارتعاش تصادفی تیر یکسر گیردار فولادی)..... ۷۱
- شکل ۵-۱۱. اشکال مودی استخراج شده: الف. شکل مود اول ( $\alpha = 200$ )، ب. شکل مود دوم ( $\alpha = 300$ )، ج. شکل مود سوم ( $\alpha = 600$ )، د. شکل مود چهارم ( $\alpha = 700$ )\_ (ارتعاش تصادفی تیر یکسر گیردار فولادی)..... ۷۲
- شکل ۵-۱۲. توزیع مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس فاز (ارتعاش آزاد تیر دو سر مفصل فولادی)..... ۷۳
- شکل ۵-۱۳. پاسخ‌های مودال تخمین زده‌شده با استفاده از الگوریتم BSS و چگالی طیفی توان  
متناظر با هر یک (ارتعاش آزاد تیر دو سر مفصل فولادی)..... ۷۴
- شکل ۵-۱۴. اشکال مودی استخراج شده: الف. شکل مود اول ( $\alpha = 200$ )، ب. شکل مود دوم ( $\alpha = 250$ )، ج. شکل مود سوم ( $\alpha = 300$ )، د. شکل مود چهارم ( $\alpha = 300$ )\_ (ارتعاش آزاد تیر دو سر مفصل فولادی)..... ۷۵
- شکل ۵-۱۵. توزیع مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس فاز (ارتعاش تصادفی تیر دو سر مفصل فولادی)..... ۷۶
- شکل ۵-۱۶. پاسخ‌های مودال تخمین زده‌شده با استفاده از الگوریتم BSS و چگالی طیفی توان  
متناظر با هر یک (ارتعاش تصادفی تیر دو سر مفصل فولادی)..... ۷۷
- شکل ۵-۱۷. اشکال مودی استخراج شده: الف. شکل مود اول ( $\alpha = 150$ )، ب. شکل مود دوم ( $\alpha = 400$ )، ج. شکل مود سوم ( $\alpha = 700$ )، د. شکل مود چهارم ( $\alpha = 1000$ )\_ (ارتعاش تصادفی تیر دو سر مفصل فولادی)..... ۷۸
- شکل ۵-۱۸. مدل آزمایشگاهی اندازه‌گیری ویدیویی در آزمایش ارتعاش آزاد تیر یکسر گیردار آلومینیومی..... ۷۹
- شکل ۵-۱۹. توزیع مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس فاز (ارتعاش آزاد مدل آزمایشگاهی)..... ۸۰
- شکل ۵-۲۰. مولفه‌ی اصلی ماتریس فاز مکانی\_ زمانی در مقیاس اول و چگالی طیفی توان متناظر با آن (ارتعاش آزاد مدل آزمایشگاهی)..... ۸۱
- شکل ۵-۲۱. مدل آزمایشگاهی اندازه‌گیری ویدیویی در آزمایش ارتعاش تصادفی تیر یکسر گیردار با استفاده از بلندگو [۲۴]..... ۸۲

شکل ۵-۲۲. مولفه‌های اصلی ماتریس فاز مکانی\_زمانی در مقیاس اول و چگالی طیفی توان متناظر با هر یک (ارتعاش تصادفی مدل آزمایشگاهی [۲۴]) ..... ۸۳

شکل ۵-۲۳. پاسخ‌های مودال تخمین زده‌شده با استفاده از الگوریتم BSS و چگالی طیفی توان متناظر با هر یک (ارتعاش تصادفی مدل آزمایشگاهی [۲۴]) ..... ۸۴

## فهرست جدول‌ها

- جدول ۵-۱. مشخصات تیر فولادی ..... ۵۹
- جدول ۵-۲. پارامترهای مودال تئوری در مقایسه با مقادیر تخمینی برای ویدیوی بازسازی شده ارتعاش آزاد تیر یکسر گیردار فولادی ..... ۶۶
- جدول ۵-۳. پارامترهای مودال تئوری در مقایسه با مقادیر تخمینی برای ویدیوی بازسازی شده ارتعاش تصادفی تیر یکسر گیردار فولادی ..... ۷۱
- جدول ۵-۴. پارامترهای مودال تئوری در مقایسه با مقادیر تخمینی برای ویدیوی بازسازی شده ارتعاش آزاد تیر دو سر مفصل فولادی ..... ۷۴
- جدول ۵-۵. پارامترهای مودال تئوری در مقایسه با مقادیر تخمینی برای ویدیوی بازسازی شده ارتعاش تصادفی تیر دو سر مفصل فولادی ..... ۷۷
- جدول ۵-۶. پارامترهای مودال تخمینی برای تیر یکسر گیردار آلومینیومی به طول ۲۲ اینچ در مقایسه با نتایج مرجع [۲۴] ..... ۸۴





# فصل ۱: کلیات تحقیق

## ۱-۱- مقدمه

سازه‌هایی از قبیل ساختمان‌ها، پل‌ها، سدها و ... سیستم‌های پیچیده‌ی مهندسی هستند که از رونق اقتصادی و کیفیت زندگی جامعه پشتیبانی می‌کنند. این سازه‌ها به‌طور ناگزیر در طول حیات خود در معرض بارهای خارجی مختلف مانند ترافیک، انفجار، ضربه و حوادث طبیعی چون زلزله و طوفان قرار می‌گیرند. این بارهای خارجی ممکن است آسیب‌های سازه‌ای را تحریک کرده، منجر به تهدید حیات و شکست مصالح شوند. بنابراین بازرسی، نظارت و نگهداری مناسب آن‌ها حائز اهمیت است.

تکنیک‌های نظارت بر سلامت و ارزیابی سازه‌های مهندسی بر اساس اطلاعات به‌دست‌آمده از ارتعاش، یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای شناسایی آسیب‌های سازه‌ای است که به مدت سه دهه مورد بررسی قرار گرفته است [۱]. ایده اساسی پذیرفته‌شده طی این مطالعات برای تشخیص آسیب بر اساس حرکت سازه، این است که تغییرات ناشی از خسارت در خواص فیزیکی (جرم، میرایی و سختی) موجب تغییرات قابل تشخیص در خواص مودال (فرکانس‌های طبیعی، میرایی مودال و اشکال مودی) خواهند شد. بدین ترتیب، تغییرات در پارامترهای مودال سازه نشان‌دهنده‌ی تغییر در وضعیت سلامت سازه، یعنی آسیب است.

بنابراین اندازه‌گیری تجربی و تعیین رفتار دینامیکی سازه از اهمیت بالایی برخوردار است. برخی دیگر از دلایل توصیف تجربی عبارت‌اند از: تعیین چگونگی پاسخ سازه به ورودی‌های دینامیکی مختلف، اعتبارسنجی مدل تحلیلی با اطلاعات به‌دست‌آمده از سازه‌ی فیزیکی، شناسایی مدل تجربی برای شبیه‌سازی و کنترل، مدل‌سازی و تحلیل دینامیکی، به‌روزرسانی مدل ریاضی برای پیش‌بینی پاسخ و نظارت بر سلامت سازه‌های عمرانی، مکانیکی و هوافضا بر پایه حرکات اندازه‌گیری شده [۴-۱].

تکنیک مرکزی برای توصیف دینامیک سازه آنالیز مودال است، که طی آن پارامترهای مودال (فرکانس‌های طبیعی، نسبت‌های میرایی و اشکال مودی) که رفتار دینامیکی سازه را کنترل می‌کنند، شناسایی می‌شوند [۴].

با توجه به اطلاعات اولیه‌ی موردنیاز در آزمایش مودال، می‌توان آن را در دو شاخه‌ی کلی طبقه‌بندی کرد. دسته‌ی اول با عنوان آنالیز مودال تجربی (روش‌های ورودی-خروجی<sup>۱</sup>) به روش‌هایی اشاره دارد که در آن‌ها باید بازتاب‌های اندازه‌گیری شده (پاسخ) و همچنین تحریک‌های اعمال‌شده (ورودی‌ها) به سازه مشخص باشند. درحالی‌که دسته‌ی دوم نیازی به اطلاع دقیق از تحریک‌های ورودی نداشته، تنها بر اساس پاسخ‌های اندازه‌گیری شده شناسایی را انجام می‌دهد، این تکنیک‌ها به روش‌های محیطی-عملکردی یا خروجی-محور<sup>۲</sup> معروف هستند. تحلیل خروجی-محور در بسیاری از کاربردهای دنیای واقعی، جایی که اعمال تحریک قابل کنترل به سازه دشوار بوده و یا اندازه‌گیری آن چالش‌برانگیز است، به‌عنوان یک جایگزین مناسب برای تحلیل تجربی در نظر گرفته می‌شود [۴،۵].

به‌طور مرسوم آنالیز مودال آزمایشگاهی و محیطی-عملکردی برای اندازه‌گیری ارتعاش به حسگرهایی که با استفاده از سیم<sup>۳</sup> به سازه متصل می‌شوند، نیاز دارند. به‌کارگیری چنین سیستم‌هایی علی‌رغم ارائه‌ی اندازه‌گیری‌های قابل‌اعتماد می‌تواند منجر به بارگذاری جرمی روی سازه‌های سبک‌وزن شود و در سازه‌هایی که مشکلات مرتبط با دسترسی دارند پرهزینه و زمان‌بر بوده، نیاز به تعمیر و نگهداری قابل‌توجهی دارد. از طرفی از نوفه‌های ناشی از کابل انتقال داده‌ها نیز نباید غافل شد. به‌جهت ارتقا و رفع مشکلات ناشی از کابل‌کشی‌های این حسگرها، برخی محققین بر روی شبکه‌های حسگر بی‌سیم<sup>۴</sup> متمرکز شدند که باز هم مسائلی در ارتباط با امنیت و تامین انرژی شبکه مطرح است. به‌علاوه، به دلیل اینکه این حسگرها به‌طور معمول در تعداد محدودی از مکان‌های گسسته قرار می‌گیرند، دارای وضوح سنجش مکانی پایینی هستند. بنابراین در بحث شناسایی آسیب نیز دارای محدودیت خواهند بود زیرا

---

<sup>۱</sup>Input-output methods

<sup>۲</sup>Output only methods

<sup>۳</sup>Wired sensors

<sup>۴</sup>Wireless sensors

آسیب یک پدیده‌ی محلی است و نیازمند اندازه‌گیری ارتعاش و به دنبال آن استخراج پارامترهای مودال با وضوح مکانی بالا است [۶،۷].

از اینرو، اخیراً تحقیقات بر روی امکان نظارت بدون تماس و تکنیک‌های سنجش از راه دور متمرکز شده‌اند که می‌تواند بسیاری از مشکلات مرتبط با شبکه‌های حسگر با توزیع پراکنده را از بین ببرد.

تکنیک‌های اندازه‌گیری غیرتماسی ارتعاش، مانند اندازه‌گیری جابجایی با استفاده از اسکن نوسان‌سنج لیزری<sup>۱</sup>، ظرفیت سنجش با دقت مکانی بالا را بدون نیاز به حسگر نصب‌شده بر روی سازه‌ها و بدون القای اثر بارگذاری جرم فراهم می‌کند. با این حال این دستگاه اندازه‌گیری نسبتاً پرهزینه بوده و از طرفی اجرای اندازه‌گیری‌های متوالی در سنجش نواحی بزرگ، می‌تواند زمان بر و خسته‌کننده باشد [۸-۱۰].

به‌عنوان یک روش غیرتماسی جایگزین، استفاده از دوربین‌های ویدیویی دیجیتال نسبتاً کم‌هزینه، سریع و آسان بوده، اندازه‌گیری‌های هم‌زمان با وضوح مکانی بسیار بالا را بدون اعمال جرم اضافه بر روی سازه ارائه می‌دهند. اندازه‌گیری‌های مبتنی بر دوربین فیلم‌برداری در ترکیب با الگوریتم‌های پردازش تصویر (به‌عنوان مثال همبستگی تصویر<sup>۲</sup> [۱۱] و جریان نوری<sup>۳</sup> [۱۲]) به‌طور موفقیت‌آمیزی برای اندازه‌گیری ارتعاش و آنالیز مودال مورد استفاده قرار گرفته است [۱۹-۱۳]. با این حال این روش‌ها علی‌رغم مزایای زیاد به دلیل وابستگی به الگوی ظاهری و نشانگرهای کنتراست بالا، چالش‌هایی را در مورد سازه‌های بزرگ و غیرقابل دسترسی ایجاد می‌کنند.

از طرفی پذیرش گسترده‌ی تکنیک‌های آنالیز مودال مبتنی بر اندازه‌گیری‌های دوربین فیلم‌برداری، ضرورت توسعه روش‌هایی را بیان می‌کند که تنها از اندازه‌گیری‌های ویدیویی بدون آماده‌سازی اضافی سطح سازه‌ای استفاده می‌کنند. به همین دلیل در ادامه به پیاده‌سازی الگوریتمی خروجی-محور

---

<sup>۱</sup>Laser vibrometer

<sup>۲</sup>Image correlation

<sup>۳</sup>Optical flow

می‌پردازیم که قادر به شناسایی و استخراج پارامترهای مودال با وضوح مکانی بالا، بدون نیاز به آماده‌سازی سطح سازه‌ای، تنها بر اساس پاسخ‌های میدان-کامل<sup>۱</sup> اندازه‌گیری شده با استفاده از دوربین‌های ویدیویی باشد.

## ۲-۱- هدف

هدف از پژوهش حاضر، ارائه‌ی الگوریتم آنالیز مودال خروجی-محوری است که بر اساس اندازه‌گیری‌های ویدیویی میدان-کامل از سازه‌ی مرتعش، به شناسایی و استخراج فرکانس‌های تشدید، نسبت‌های میرایی و شکل‌های مودی با وضوح بالا بپردازد.

## ۳-۱- بیان مسئله

با توجه به هدف بیان‌شده، پایان‌نامه حاضر به توسعه‌ی یک الگوریتم آنالیز مودال خروجی-محور می‌پردازد که مبتنی بر فاز بوده و با بهره‌گیری از روش جداسازی کور منابع<sup>۲</sup> [۲۰] و تکنیک بزرگنمایی حرکت<sup>۳</sup> [۲۱]، در یک روش کارآمد و نسبتاً مستقل اجرا می‌شود. روش پیشنهادی همچنین از یک تکنیک نمایش و تجزیه هرم چندمقیاسی<sup>۴</sup> [۲۲] برای استخراج، مدل‌سازی و دست‌کاری<sup>۵</sup> فاز پیکسل‌های مکانی-زمانی<sup>۶</sup> و میدان-کامل استفاده می‌کند که ارتعاش محلی<sup>۷</sup> سازه را تنها در اندازه‌گیری‌های ویدیویی کدگذاری می‌کنند [۲۳]. بنابراین قادر به استخراج کور فرکانس‌های تشدید،

---

<sup>۱</sup>Full-field

<sup>۲</sup>Blind source separation (BBS)

<sup>۳</sup>Motion magnification technique

<sup>۴</sup>Multi\_scale

<sup>۵</sup>Manipulation

<sup>۶</sup>Spatiotemporal

<sup>۷</sup>Local

نسبت‌های میرایی و اشکال مودی با وضوح بالا، با استفاده از اندازه‌گیری‌های ویدیویی به‌دست‌آمده از سازه خواهد بود. همچنین انگیزه استفاده از تکنیک بزرگنمایی حرکت برای شناسایی و تقویت مودهای ضعیف که در شناسایی مودال عملیاتی به‌ویژه در حضور نویز، بسیار شایع و چالش‌برانگیز است، ارائه شده است. ذکر این نکته نیز ضروری است که تنها ویدیوهای ثبت‌شده با استفاده از دوربین‌های سرعت-بالا<sup>۲</sup> به‌عنوان ورودی الگوریتم مورد تأیید هستند.

به‌منظور صحت‌سنجی الگوریتم پیشنهادی نیز، ویدیوی ارتعاش آزاد و تصادفی دو تیر یکسر گیردار و دو سر مفصل با پارامترهای مودال مشخص، در محیط نرم‌افزار متلب بازسازی شد. سپس با استفاده از الگوریتم پیشنهادی و ویدیوهای تهیه‌شده، پارامترهای مودال محاسبه و با مقادیر تئوری مورد مقایسه قرار گرفت.

همچنین طی یک آزمون دیگر، ویدیوی ارتعاش آزاد یک تیر یکسر گیردار آلومینیومی در مقیاس آزمایشگاهی، با استفاده از یک دوربین سرعت-بالا در محیط آزمایشگاه ثبت و پارامترهای مودال برای مودهای فعال در آن شناسایی شده‌اند. در پایان با اعمال الگوریتم بر اندازه‌گیری‌های ویدیویی انجام‌شده در پژوهش [۲۴]، عملکرد الگوریتم پیشنهادی در شناسایی مودال تیر یکسر گیردار در محیط آزمایشگاه، تحت ارتعاش تصادفی نیز مورد بررسی قرار گرفت.

## ۱-۴- ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه در شش فصل به شرح ذیل تدوین شده است:

در فصل اول به بیان مقدمه‌ای از موضوع، هدف از انجام پژوهش و تعریف مسئله پرداخته شده است.

فصل دوم مطالعات انجام‌شده در حیطه‌ی موضوع بیان‌شده را در بر می‌گیرد.

---

<sup>۱</sup>Weakly-excited mode

<sup>۲</sup>High-speed camera

تعاریف و مبانی نظری الگوریتم‌های مورد استفاده در راستای تحقق هدف موردنظر نیز در فصل سوم تشریح شده‌اند.

در فصل چهارم تئوری و روش مورد استفاده در پژوهش حاضر به تفصیل بیان شده است. فصل پنجم نیز به مدل‌سازی عددی، صحت‌سنجی و ارزیابی عملکرد روش توسعه‌یافته اختصاص یافته است.

در پایان، در فصل ششم نتایج حاصل از هدف محقق‌شده در این پایان‌نامه به همراه پیشنهادها، گنجانده شده است.





## فصل دوم: پیشینه تحقیق

## ۲-۱- مقدمه

تکنیک‌های شناسایی مودال به استخراج، ارزیابی و بررسی پارامترهای مودال (فرکانس‌های طبیعی، نسبت‌های میرایی و اشکال مودی) با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده می‌پردازند. عواملی مانند محدودیت در نصب حسگر (به‌عنوان رویکرد مرسوم در شناسایی مودال)، تحریک تصادفی اندازه‌گیری نشده و اندازه و پیچیدگی سازه‌ای باعث ارتقای الگوریتم‌های شناسایی مودال شده و آزمایش‌های مودال آزمایشگاهی را به سمت تست‌های محیطی سوق داده‌اند. در ادامه این بخش، مروری بر پیشرفت الگوریتم‌های شناسایی مودال خواهیم داشت.

## ۲-۲- مطالعات انجام شده

همان‌طور که در فصل اول عنوان شد استفاده از شتاب‌سنج‌ها به‌عنوان رویکردی مرسوم در آنالیز مودال، علی‌رغم ارائه‌ی اندازه‌گیری‌های دقیق با محدودیت‌هایی نیز همراه است. ارائه‌ی اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای و گسسته به‌عنوان نمونه‌ای از این محدودیت‌ها باعث کاهش وضوح مکانی سنجش می‌شود که معمولاً برای تشخیص آسیب مبتنی بر پارامترهای مودال، همبستگی مدل و به‌روزرسانی سازه‌های بزرگ‌مقیاس ناکافی است. در تأیید این امر وی فن و پیژانگ چاو [۷] طی مطالعه‌ای مقایسه‌ای نشان داده‌اند که وضوح مکانی اندازه‌گیری حسگر، اثربخشی روش‌های تشخیص و محلی‌سازی آسیب مبتنی بر شکل مود یا انحنا شکل مود را به‌طور قابل توجهی محدود می‌کند.

از این‌رو محققان به سمت استفاده از تکنیک‌هایی مانند اندازه‌گیری جابجایی با استفاده از اسکن لرزه‌سنج لیزری حرکت کردند که بدون نیاز به نصب حسگر بر روی سازه، امکان اندازه‌گیری‌های با وضوح مکانی بالا را فراهم می‌سازند. هم‌راستا با این جریان استانبریج و ایونز در پژوهش خود [۸] به تشریح تکنیک‌هایی پرداخته‌اند که نشان‌دهنده‌ی گسترش استفاده از اسکن لرزه‌سنج لیزری در آزمون مودال است. توماسینی و همکاران نیز [۹] ضمن بررسی برخی کاربردهای لرزه‌سنج لیزری، به محدودیت‌های

آن در خارج از محیط آزمایشگاه پرداخته و راه‌حل‌هایی برای غلبه بر این محدودیت‌ها و بهبود عملکرد آن (به‌عنوان مثال بهبود نسبت سیگنال به نویز<sup>۱</sup>) ارائه داده‌اند. در پژوهشی دیگر مائو و ایونز [۱۰] از قابلیت اسکن پیوسته‌ی لرزه‌سنج لیزری به‌عنوان روشی برای انجام آزمون مودال استفاده کرده، خودکارسازی اندازه‌گیری و افزایش وضوح مکانی مودهای اندازه‌گیری شده را از جمله مزیت‌های لرزه‌سنج لیزری نسبت به شتاب‌سنج‌های تماسی اعلام کردند. همچنین اظهار داشتند که این سیستم اندازه‌گیری می‌تواند به‌عنوان جایگزینی مناسب برای سنسورهای تماسی مورد استفاده قرار گیرد.

اما به دلیل هزینه‌ی بالای این دستگاه اندازه‌گیری و زمان‌بر بودن استفاده از آن در سنجش نواحی بزرگ (به‌دلیل اندازه‌گیری‌های متوالی)، دوربین‌های ویدیویی دیجیتال به‌عنوان یک روش غیرتماسی جایگزین مورد استقبال قرار گرفتند. دوربین‌های ویدیویی دیجیتال نسبتاً کم‌هزینه بوده، اندازه‌گیری‌های هم‌زمان با وضوح مکانی بسیار بالا را فراهم می‌کنند. اندازه‌گیری‌های مبتنی بر دوربین فیلم‌برداری در ترکیب با الگوریتم‌های پردازش تصویر (مانند همبستگی تصویر [۱۱] و جریان نوری [۱۲]) به‌طور موفقیت‌آمیزی در اندازه‌گیری ارتعاش انواع مختلف سازه‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در ادامه به معرفی چند مورد از تحقیقات انجام شده با استفاده از این رویکرد می‌پردازیم.

در پژوهش انجام‌شده توسط اولازک [۱۳] با استفاده از یک دوربین ویدیویی و سیستم پردازش تصویر، روشی برای نظارت و اندازه‌گیری جابجایی نقاط انتخاب‌شده بر روی سازه‌ی پل در جهت بررسی ویژگی‌های دینامیکی آن ارائه شده است. پاتسیاس و استازوسکی [۱۴] نیز با استخراج لبه‌ها در توالی تصویر که توصیفی از حرکت سازه هستند، یک روش تشخیص آسیب را ارائه داده‌اند. خطوط لبه در تصاویر متوالی با استفاده از رویکرد مبتنی بر تبدیل موجک<sup>۳</sup> استخراج شده‌اند. همچنین مازن وهبه و

---

<sup>۱</sup>Signal to noise ratio

<sup>۲</sup>Edge detection

<sup>۳</sup>Wavelet transform

همکاران [۱۵] با انتشار یک مطالعه‌ی تحلیلی و تجربی امکان‌سنجی یک رویکرد جدید مبتنی بر دید<sup>۱</sup> را بررسی کرده‌اند. آن‌ها رویکرد خود را با هدف به‌دست آوردن اندازه‌گیری‌های مستقیم تاریخچه‌ی زمانی جابجایی مطلق در مکان‌های انتخاب‌شده بر روی پل‌های با دهانه بلند که تحت نوسانات محیطی قرار دارند، پیشنهاد داده‌اند. اندازه‌گیری‌ها نیز با استفاده از یک دوربین بسیار دقیق در ترکیب با سیستم نوری به‌دست‌آمده است. اشمیت و همکاران [۱۶] نیز با استفاده از فتوگرامتری همبستگی تصویر دیجیتال سه بعدی موفق به اندازه‌گیری کرنش و جابجایی دینامیکی میدان-کامل شده‌اند. در پژوهشی دیگر جونگ جی لی و شینوزوکا [۱۷] یک سیستم اندازه‌گیری جابجایی دینامیکی مبتنی بر دید را با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر دیجیتال توسعه داده‌اند. همچنین کاربرد و اثربخشی روش با یک آزمون آزمایشگاهی با استفاده از آزمایش میز لرزه و یک آزمون میدانی بر روی پل تأییدشده است. در آزمون آزمایشگاهی، جابجایی اندازه‌گیری شده با داده‌های یک حسگر از نوع تماسی مقایسه شده و تطابق نتایج با خطای کمتر از ۳ درصد گزارش شده است. همچنین نتایج آزمون میدانی نیز با داده‌های لرزه‌سنج لیزری مقایسه و سازگاری خوبی گزارش شده است. به‌طور کلی، برای تکنیک توسعه‌یافته، وضوح دینامیکی کافی در دامنه و محتوای فرکانسی تأییدشده است. در مطالعه‌ی انجام‌شده توسط چانگ و جی [۱۸] نیز یک تکنیک ویدیویی برای اندازه‌گیری پاسخ ارتعاش سازه‌ای در سه بعد با استفاده از دو دوربین ارائه شده است. این تکنیک بر پایه اصول فتوگرامتری و بینایی رایانه‌ای بوده، شامل سه مرحله است: کالیبراسیون دوربین در دو مرحله، ردیابی نقطه‌ی هدف و درنهایت بازسازی سه‌بعدی آن. برای اعتبارسنجی روشی پیشنهادی، سه آزمون آزمایشگاهی شامل تحریک سینوسی وارد بر یک نقطه، تست تونل باد برای مقطع عرضی مدل پل و یک مدل ساختمانی سه‌طبقه تحت تحریک زلزله انجام شده است. نتایج با روش‌های مرسوم مقایسه شده و سازگاری خوبی را نشان داده‌اند. همچنین در پژوهش انجام

---

<sup>۱</sup>Vision-based approach

شده توسط جوزف مورلیر و میشون [۱۹]، از الگوریتم ردیابی حرکت KLT<sup>۱</sup> برای اندازه‌گیری ارتعاش استفاده شده است. ردیابی نقاط در طول تصاویر متوالی، عملیات اساسی در بسیاری از کاربردهای بینایی رایانه‌ای است. در این کار نیز، قابلیت بینایی رایانه‌ای برای تخمین ویژگی‌های دینامیکی دو سیستم مکانیکی با استفاده از یک آنالیز تک‌ورودی-چندخروجی غیرتماسی، با نشانگر کمتر و به‌صورت هم‌زمان نشان داده شده است. کیتانو و همکاران [۲۵] نیز یک سیستم دید برای نظارت بر ارتعاش سازه‌های مهندسی عمران توسعه داده‌اند که به‌عنوان مکملی بر سیستم‌های مرسوم اندازه‌گیری ارتعاش در نظر گرفته شده است. همچنین با به‌کارگیری این تکنیک در کنار انتخاب نقاطی خاص بر روی پلی با دهانه‌ی میانی به طول ۳۵۶ متر موفق به ارزیابی ارتعاش کابل‌های آن شده‌اند. در پژوهش دیگری، فنگ و همکاران [۲۶] یک سیستم حسگر مبتنی بر دید را با اجرای الگوریتم پردازش تصویر پیشرفته OCM<sup>۲</sup> توسعه داده‌اند که نیازی به نصب نشانگر هدف بر روی سازه نداشته و تنها بر اساس ردیابی ویژگی‌های موجود در سطح آن، جابجایی دینامیکی را اندازه‌گیری می‌کند. این مطالعه نشان‌دهنده‌ی اولین تلاش در زمینه آزمایش حسگرهای مبتنی بر دید در طول شب است. دقت جابجایی اندازه‌گیری شده نیز ابتدا با استفاده از آزمون میز لرزه و سپس با آزمایش‌های میدانی بر روی دو پل راه‌آهن تحت بار قطارهای متحرک با سرعت‌های مختلف در طول شب و روز مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج بیانگر دقت بالا و سازگاری روش پیشنهادی با رویکردهای مرسوم است.

علاوه بر موارد بیان شده در بالا، اخیراً کاربرد تکنیک‌های همبستگی تصویر دیجیتال<sup>۴</sup> و ردیابی نقطه‌ی سه بعدی در تحلیل مودال تجربی گزارش شده است. مزیت قابل توجه این روش‌ها، ارائه‌ی اشکال مودی با وضوح بالاتر است. به همین دلیل تورستن سیبرت و همکاران [۲۷] در پژوهش خود به بررسی تحولات

---

<sup>۱</sup>Kanade-Lucas-Tomasi

<sup>۲</sup>Single input multiple output (SIMO)

<sup>۳</sup>Orientation-code matching

<sup>۴</sup>Digital image correlation (DIC)

و کاربردهای همبستگی تصویر دیجیتال پرداخته‌اند. نویسندگان در این پژوهش اظهار داشتند که این تکنیک بر اساس یک روش میدان-کامل، تعیین دامنه‌ی جابجایی و فاز ارتعاش را با وضوح بالای مکانی-زمانی و در محدوده‌ی دینامیکی گسترده میسر می‌سازد. در تحقیق دیگری هلفریک و همکاران [۲۸] یکی از اولین تلاش‌ها برای اندازه‌گیری میدان-کامل ارتعاش یک سازه را با استفاده از همبستگی تصویر دیجیتال سه‌بعدی نشان داده‌اند. در این کار برخی نتایج اندازه‌گیری شده با استفاده از رویکرد DIC، به همراه داده‌های شتاب‌سنج و لرزه‌سنج لیزری برای مقایسه با یک مدل المان محدود ارائه شده است. نتایج نشان‌دهنده‌ی تطابق هر سه رویکرد با مدل المان محدود<sup>۱</sup> بوده که تأییدی برای رویکرد پیشنهادی مبتنی بر DIC برای اندازه‌گیری ارتعاش میدان-کامل است.

مقایسه‌ی پاسخ‌های سازه‌ای میان مقادیر پیش‌بینی‌ها و اندازه‌گیری‌ها، به‌عنوان مثال برای فرکانس طبیعی و اشکال مودی، یک گام مهم در به‌روزرسانی مدل المان محدود است. به همین جهت در مطالعات انجام‌شده توسط وی زو وانگ و همکاران [۲۹] با مقایسه‌ی شکل مود اندازه‌گیری شده توسط یک سیستم DIC و پیش‌بینی‌شده با مدل المان محدودی، مدل المان محدود یک پانل کامپوزیتی اصلاح و به‌روزرسانی شده است. همچنین کریستوفر وارن و همکاران [۳۰] طی پژوهشی، برای روش‌های مختلف تماسی و غیرتماسی از جمله اندازه‌گیری‌های شتاب‌سنج، اسکن لرزه‌سنج لیزری و اندازه‌گیری‌های نوری مانند همبستگی تصویر دیجیتال و ردیابی نقطه سه‌بعدی یک بررسی مقایسه‌ای انجام داده‌اند. نویسندگان نتیجه‌ی پژوهش خود را به این صورت بیان کردند که هر روش اندازه‌گیری مورد بررسی در این مقایسه دارای مزایا و معایبی است و در نهایت می‌توان سازگاری خوبی بین نتایج مشاهده کرد. همچنین بزرگترین تفاوت بین تکنیک‌های مرسوم و اندازه‌گیری‌های نوری را، رویکرد مورد استفاده برای اندازه‌گیری مودهای مختلف عنوان کردند. به این صورت که شتاب‌سنج‌ها و لرزه‌سنج‌های لیزری اندازه‌گیری مودهای مختلف را در محدوده‌ی فرکانس وسیع به‌صورت نقطه‌به‌نقطه انجام می‌دهند.

---

<sup>۱</sup>Finite element model

در مقابل دو روش اپتیکی همه‌ی نقاط را به‌طور هم‌زمان اندازه می‌گیرند. وی زو وانگ و همکاران [۳۱] نیز توانستند ارتعاش میدان-کامل را با استفاده از همبستگی تصویر دیجیتال اندازه‌گیری کنند. پارامترهای مودال نمونه‌ی آزمایشی نیز با استفاده از توابع پاسخ فرکانسی<sup>۱</sup> از اندازه‌گیری‌های DIC با موفقیت شناسایی شدند. همچنین در پژوهش جواد باقرزاد و همکاران [۳۲] کرنش دینامیکی میدان کامل یک توربین بادی تحت سه بارگذاری دلخواه با استفاده از دو دوربین سرعت-بالا و تکنیک ردیابی نقطه سه‌بعدی اندازه‌گیری شده است. نتایج حاصل نشان‌دهنده‌ی همبستگی بالای بین نتایج پیش‌بینی شده با استفاده از رویکرد پیشنهادی و کرنش اندازه‌گیری شده با کرنش‌سنج برای هر یک از سه حالت بارگذاری بوده است.

الگوریتم‌های ارائه‌شده در تحقیقات فوق، علی‌رغم مزایای زیاد، به دلیل وابستگی به الگوهای ظاهری و نشانگرهای کنتراست بالا، در مناطق اندازه‌گیری بزرگ و غیرقابل دسترسی محدودیت‌هایی را ایجاد می‌کنند. از طرفی به دلیل محبوبیت و استقبال گسترده‌ی استفاده از دوربین‌های فیلم‌برداری در آنالیز مودال، توسعه روش‌هایی که تنها از اندازه‌گیری‌های ویدیویی بدون آماده‌سازی اضافی سطح سازه‌ای استفاده می‌کنند، مطلوب است. از این‌رو اخیراً یک روش پردازش ویدیویی با استفاده از محاسبات جریان نوری مبتنی بر فاز [۳۳، ۳۴] و روش بزرگنمایی حرکت ویدئویی با مزیت ارائه‌ی اشکال مودی با وضوح بالا بدون استفاده از رنگ‌ها یا نشانگر بر روی سطح سازه برای تحلیل مودال عملیاتی پیشنهاد شده است [۳۵]. اما به دلیل وابستگی به چندین پارامتر ورودی و نیاز به نظارت کاربر، برای اجرای خودکار در آنالیز مودال عملیاتی مناسب نیست. از این‌رو پایان‌نامه‌ی حاضر تلاش می‌کند الگوریتم آنالیز مودال خروجی-محور جدیدی بر اساس اندازه‌گیری‌های ویدیویی ارائه دهد که نیازی به آماده‌سازی سطح سازه‌ای نداشته باشد و بتواند در یک روش نسبتاً خودکار اجرا شود.

---

<sup>۱</sup>Frequency response function





## فصل سوم: مواد و روش ها

### ۳-۱- مقدمه

در این فصل به معرفی الگوریتم‌هایی می‌پردازیم که نتایج این پایان‌نامه بر اساس آن‌ها شکل گرفته است. ابتدا در بخش‌های ۳-۲ تا ۳-۵ مفهوم جداسازی کور منابع معرفی می‌شود. تکنیک‌های جداسازی منابع بر پایه‌ی مفاهیم آماری استوار هستند و هدف آن‌ها استخراج مولفه‌های مستقل پنهان بر اساس مجموعه‌ی ترکیبات مشاهده‌شده از آن‌ها است. مبانی تئوری این الگوریتم نیز ارائه‌شده است [۳۶، ۲۰]. [۴۴]. همچنین در بخش ۳-۶ چهارچوب کلی تکنیک بزرگنمایی حرکت به‌عنوان الگوریتمی برای تقویت حرکت‌های کوچک در ویدیوها بیان شده است. بخش ۳-۷ نیز به معرفی فیلتر محلی و چندمقیاسی هرم مختلط جهت‌دار<sup>۱</sup> اختصاص یافته است. درنهایت در بخش ۳-۸ به کاربرد هر یک از الگوریتم‌های مذکور در جهت شکل‌گیری نتایج پژوهش حاضر اشاره‌شده است.

### ۳-۲- جداسازی کور منبع

جداسازی کور منابع عبارت است از بازیابی مجموعه‌ای از منابع مستقل بر اساس ترکیباتی از آن‌ها که مشاهده‌شده است. به‌کارگیری واژه‌ی کور بر پایه‌ی این واقعیت است که در این روش، جداسازی تنها با تکیه بر مشاهده‌ی سیگنال‌های ترکیبی، بدون اطلاع از ماهیت سیگنال‌های منبع و همچنین نحوه‌ی ترکیب آن‌ها صورت می‌گیرد. فقدان اطلاعات مذکور علی‌رغم دشوار ساختن روند حل مسئله، به‌عنوان دلیل اصلی بر افزایش گستره‌ی کاربرد این تکنیک شناخته‌شده است.

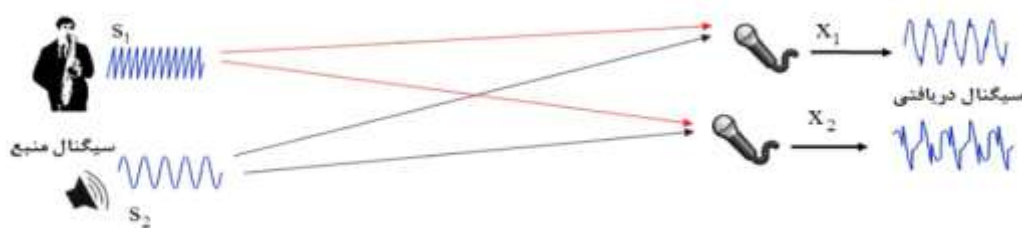
به‌طورکلی هدف تکنیک BSS را می‌توان با مثال معروف مهمانی شلوغ<sup>۲</sup> [۳۸] تشریح کرد. به این صورت که فرض کنید در اتاقی چندین نفر به‌طور هم‌زمان در حال صحبت هستند و در نقاط مختلف این اتاق میکروفن‌هایی تعبیه‌شده است که سیگنال‌های صوتی موجود را ضبط می‌کنند. قاعدتاً سیگنال‌های ضبط

---

<sup>۱</sup>Complex steerable pyramid

<sup>۲</sup>Cocktail party

شده با هر یک از میکروفن‌ها، ترکیبی از سیگنال‌های صوتی ایجاد شده توسط افراد در حال صحبت است. حال هنر BSS جدا کردن سیگنال‌های صوتی اولیه ایجادشده توسط هر یک از افراد، از روی سیگنال‌های ترکیبی ضبط شده است. شکل ۱-۳ نمونه‌ای از چگونگی ضبط سیگنال‌های صوتی با استفاده از میکروفن‌های گیرنده را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳. نمایشی از مسئله‌ی کوکتل پارتی در ساده‌ترین حالت برابری تعداد منابع و مشاهدات

با توجه به مقدمه‌ی بیان‌شده، در حالت کلی مسئله BSS را می‌توان به این صورت در نظر گرفت که تعدادی سیگنال تولیدشده توسط  $N$  منبع مختلف به صورت نامشخص با یکدیگر ترکیب شده و سیگنال‌های حاصل از آن‌ها با  $M$  سنسور تعبیه‌شده در محیط ضبط می‌شوند.

حال مسئله این است که چگونه می‌توان فقط با در اختیار داشتن سیگنال‌های ترکیبی به سیگنال‌های اصلی و ماتریس ضرایب دست یافت.

در دستیابی به ماتریس ضرایب و سیگنال‌های منابع عوامل مختلفی دخیل هستند که در ادامه به معرفی چند مورد کلیدی از آن‌ها می‌پردازیم:

### ۳-۲-۱- سیستم ترکیب کننده

تابع تبدیل از منابع تا گیرنده‌ها یعنی سیستم ترکیب کننده<sup>۱</sup> (ماتریس ضرایب) را می‌توان به فرم‌های گوناگونی به صورت زیر در نظر گرفت [۳۹]:

- خطی یا غیرخطی
- تغییرپذیر یا تغییرناپذیر با زمان
- حافظه‌دار یا بدون حافظه (لحظه‌ای)

با در نظر گرفتن حالت‌های مختلف از موارد فوق مدل‌های ترکیب کننده‌ی متفاوتی برای مسئله BSS به دست می‌آید که دو مدل عددی و پیچشی<sup>۲</sup> [۲۰، ۴۰] از جمله موارد پرکاربرد می‌باشند.

### ۳-۲-۱-۱- مدل عددی

در مدل عددی، ترکیب کننده‌ی خطی، تغییرناپذیر با زمان<sup>۴</sup> و بدون حافظه در نظر گرفته می‌شود [۳۹]:

$$X(t) = A.S(t) \quad (1-3)$$
$$x_j = \sum_{i=1}^n a_{ij}.s_i(t) \quad j=1, \dots, m$$

که  $X$  ماتریس سیگنال‌های ترکیبی،  $A = [a_{ij}]$  ماتریس ضرایب (یک ماتریس ثابت) و  $S$  ماتریس منابع است. همچنین  $m$  تعداد حسگرها و  $n$  تعداد منابع را نشان می‌دهد.

---

<sup>۱</sup>Combination (mixing) system

<sup>۲</sup>Memoryless (instantaneous)

<sup>۳</sup>Convolutional

<sup>۴</sup>Linear time invariant (LTI)

### ۳-۲-۱-۲-مدل پیچشی

مدل پیچیده‌تر و واقعی‌تر مدل پیچشی است که در آن سیگنال مشاهده شده در هر گیرنده را می‌توان به فرم زیر نمایش داد [۳۹]:

$$x_j(t) = \sum_i a_{ij} * s_i(t) \quad (2-3)$$

استفاده از هرکدام از این مدل‌ها و حالت‌های ذکرشده به شرایط مسئله و محیطی که در آن ترکیب سیگنال‌های اولیه صورت می‌گیرد، بستگی دارد.

علاوه بر این، بر اساس تعداد سیگنال‌های منبع و حسگرهای گیرنده نیز سه مدل را می‌توان برای BSS مورد بررسی قرار داد [۴۱]:

- مدل معین بحرانی<sup>۱</sup> که در آن تعداد حسگرها برابر با تعداد منابع است ( $M = N$ ).
- مدل فرامعین<sup>۲</sup> (نامعین) که در آن تعداد حسگرها کمتر از تعداد منابع است ( $M < N$ ).
- مدل فرامعین<sup>۳</sup> که در آن تعداد حسگرها بیشتر از تعداد منابع است ( $M > N$ ).

یکی از نکات اساسی که در مسئله‌ی جداسازی کور نقش مهمی را ایفا می‌کند، مقدار حداقل نسبت تعداد حسگرها به تعداد منابع است. در اکثر مسائل جداسازی، فرض بر این است که تعداد حسگرها بیشتر و یا حداقل برابر تعداد منابع باشد. اما مسئله برای حالتی هم که تعداد حسگرها بیشتر از تعداد منابع اولیه است به‌راحتی با استفاده از شیوه‌های کاهش بعد مانند تحلیل مولفه‌های اصلی<sup>۴</sup> به حالت برابری تعداد سنسورها و منابع تبدیل خواهد شد.

---

<sup>۱</sup>Critically-determined

<sup>۲</sup>Under-determined

<sup>۳</sup>Over-determined

<sup>۴</sup>Principal component analysis (PCA)

### ۳-۲-۲- فرض‌های اساسی

کمبود اطلاعات در مسئله BSS توسط یکسری فرض‌های اساسی و اعمال شرایط پایه‌ای گوناگون در الگوریتم‌های مختلف جبران می‌شود. بنابراین روش‌های حل مسئله BSS را می‌توان به سه دسته‌ی زیر تقسیم‌بندی کرد:

- الگوریتم‌هایی مبتنی بر فرض‌های خاص آماری برای منابع
- الگوریتم‌هایی بر اساس ساختارهای خاص برای سیگنال‌های منابع
- الگوریتم‌هایی بر پایه ساختارهای خاص برای سیستم ترکیب‌کننده

با توجه به گستردگی کاربرد الگوریتم‌های مبتنی بر مورد اول، تنها به فرضیه‌های مورد استفاده برای این مورد اشاره می‌کنیم.

### ۳-۲-۲-۱- استقلال

عمومی‌ترین فرض آماری که توسط الگوریتم‌های BSS در نظر گرفته شده است، فرض قوی استقلال<sup>۱</sup> بین منابع است، یعنی هر یک از سیگنال‌های اولیه باید از منابع فیزیکی مجزایی تولید شوند. در نتیجه راه‌حل در این نوع از مسائل، اعمال یک پردازش جداسازی است به نحوی که خروجی‌های حاصل از آن تا حد امکان مستقل از هم باشند.

---

<sup>۱</sup>Independence

### ۳-۲-۲- ناهمبستگی

دسته‌ای دیگر از الگوریتم‌ها فرض ضعیف‌تر ناهمبستگی<sup>۱</sup> منابع را در نظر گرفته‌اند و با بهره‌گیری از وابستگی زمانی سیگنال‌های هر منبع به جداسازی آن‌ها می‌پردازند. به لحاظ ریاضی دو متغیر تصادفی  $x_1$  و  $x_2$  ناهمبسته خواهند بود اگر مقدار کوواریانس آن‌ها برابر با صفر باشد.

همچنین باید استقلال را از ناهمبسته بودن متمایز کرد، چراکه دو متغیر تصادفی مستقل لزوماً ناهمبسته هستند اما نمی‌توان از ناهمبستگی دو متغیر، استقلال آن‌ها را نتیجه گرفت.

### ۳-۲-۳- روند جداسازی سیگنال‌های منبع

به‌طور کلی جداسازی سیگنال‌های منابع به دو صورت هم‌زمان و متوالی امکان‌پذیر است. در مسائل BSS معمولاً سیگنال‌ها به‌طور هم‌زمان جداسازی و تخمین زده می‌شوند ولی در تکنیکی دیگر به نام استخراج کور سیگنال<sup>۲</sup> در هر مرحله یکی از سیگنال‌های اصلی استخراج و با حذف اثر آن در داده‌ها سیگنال‌های منابع دیگر به تفکیک در مراحل بعدی تخمین زده می‌شوند.

با توجه به موارد بیان‌شده در بالا، الگوریتم‌هایی که به بررسی مدل عددی با در نظر گرفتن فرض‌های آماری برای منابع به جداسازی هم‌زمان سیگنال‌های اولیه و تخمین ماتریس ترکیب‌کننده می‌پردازند، از کاربردی‌ترین الگوریتم‌ها در مسئله‌ی جداسازی کور منابع به شمار می‌روند. این الگوریتم‌ها با توجه به فرضی که بر روی منابع دارند به دو دسته‌ی کلی تقسیم می‌شوند:

---

<sup>۱</sup>Uncorrelatedness

<sup>۲</sup>Time dependence

<sup>۳</sup>Blind signal extraction (BSE)

### ۳-۳- الگوریتم‌های مبتنی بر استقلال منابع

استقلال منابع یکی از اولین و عمومی‌ترین فرض‌ها برای حل مسئله BSS بوده است که در قالب تکنیک آنالیز مولفه‌های مستقل<sup>۱</sup> [۴۲] به‌طور گسترده بررسی شده است. در اکثر روش‌های موجود بر اساس ICA ابتدا معیاری برای اندازه‌گیری استقلال مولفه‌های خروجی در نظر گرفته و بر اساس آن معیار، تابع هدف مناسب تعریف می‌شود. سپس با هدف استقلال خروجی‌ها سعی در بیشینه یا کمینه کردن تابع هدف می‌شود و در نهایت ماتریس جداساز مناسب به‌دست می‌آید.

### ۳-۳-۱- استقلال بر مبنای میزان غیرگوسی بودن

مفهوم غیرگوسی بودن نقش کلیدی در تخمین مدل ICA دارد. این مفهوم از قضیه‌ی حد مرکزی نتیجه می‌شود. طبق قضیه‌ی حد مرکزی ترکیب چندین متغیر تصادفی دارای توزیعی خواهد بود که نسبت به هریک از متغیرهای اولیه به توزیع گوسی نزدیک‌تر است [۴۲].

از طرفی بر اساس مطالب بیان‌شده در بخش‌های قبل دریافتیم که مسئله BSS به جداسازی سیگنال‌های اولیه از روی ترکیبات آن‌ها می‌پردازد به‌نحوی که اگر سیگنال‌های تخمین زده‌شده را با نماد  $Y$  نمایش دهیم، خواهیم داشت:

$$Y(t) = B.X(t) \quad (3-3)$$

که  $B$  ماتریس جداساز<sup>۲</sup> است و در واقع وظیفه‌ی BSS یافتن ماتریس جداسازی است که با استفاده از آن مولفه‌های  $y_i$  تا حد امکان مستقل از یکدیگر باشند.

---

<sup>۱</sup>Independent component analysis (ICA)

<sup>۲</sup>Un-mixing matrix



بنابراین اگر با یک تغییر متغیر به صورت  $K = A^T B$  و با استفاده از  $X = A.S$ ، رابطه ۳-۳ را به صورت زیر در نظر بگیریم:

$$Y = B^T X = B^T A S = K^T S \quad (۴-۳)$$

بر اساس قضیه عنوان شده می توان نتیجه گرفت که  $K^T S$  گوسی تر از هر یک از  $s_i$  ها است و وقتی که این ترکیب فقط شامل یکی از  $s_i$  ها باشد توزیع آن کمترین میزان گوسی بودن را داراست. بر این اساس می توان ماتریس تفکیک کننده  $B$  را ماتریسی تعریف کرد که میزان غیرگوسی بودن  $B^T X$  را ماکزیمم می کند. در حقیقت ماتریس جداساز  $B$  برای تخمین هر یک از منابع مستقل، با طرح مسئله‌ی بیشینه سازی میزان غیرگوسی بودن  $Y$  به دست می آید.

بنابراین میزان غیرگوسی بودن می تواند به عنوان معیاری از استقلال مطرح شود. بر این اساس در این الگوریتم‌ها از آمار مرتبه بالاتر<sup>۱</sup> به عنوان توابع هدف استفاده می شود. چراکه در روش‌های مرتبه بالاتر نیز اساس کار بر غیرگوسی بودن توزیع است به دلیل اینکه از اطلاعاتی از توزیع  $X$ ، غیر از ماتریس کوواریانس استفاده می کنند، در صورتی که همه‌ی اطلاعات متغیرهای گوسی (میانگین صفر)، در ماتریس کوواریانس موجود است و در نتیجه در این روش‌ها برای معنادار شدن موضوع نباید توزیع  $X$  گوسی فرض شود. البته در صورت وجود تنها یک سیگنال گوسی در منابع اولیه باز هم امر جداسازی ممکن است. اما اگر تعداد منابع گوسی بیشتر باشد حتی در شرایطی که جداسازی آن‌ها از سایر سیگنال‌ها امکان پذیر است، تفکیک خود این سیگنال‌های گوسی از یکدیگر کاری مشکل و پیچیده خواهد بود.

---

<sup>۱</sup>Higher-order statistics

معیارهای سنجش میزان گوسی بودن عبارت‌اند از کورتیز<sup>۱</sup>، نگانترویی<sup>۲</sup> و آنترویی<sup>۳</sup> که در ادامه به معرفی هر یک به صورت مختصر می‌پردازیم.

### ۳-۱-۳-۱- کورتیز

کورتیز یکی از معیارهای رایج برای سنجش میزان گوسی بودن توزیع یک سیگنال است. می‌توان نشان داد که برای یک متغیر تصادفی که دارای توزیع گوسی است مقدار کورتیز برابر با صفر و برای دیگر توزیع‌های تصادفی مقداری مثبت یا منفی خواهد داشت. میزان غیرگوسی بودن با قدر مطلق کورتیز اندازه‌گیری می‌شود و در واقع هر چه قدر مطلق آن به صفر نزدیک‌تر باشد، آن متغیر گوسی‌تر است.

### ۳-۱-۳-۲- آنترویی

یکی از مفاهیم مهم تئوری اطلاعات<sup>۴</sup> که می‌تواند معیار مهمی برای تعیین میزان اطلاعات موجود در متغیرها باشد، آنترویی است. در واقع آنترویی یک متغیر تصادفی، معیاری برای تعیین میزان تصادفی بودن مولفه‌های آن متغیر است. به طوری که هر چه یک بردار تصادفی تر و غیرقابل پیش‌بینی‌تر باشد، آنترویی آن بیشتر خواهد بود. یک نتیجه‌ی اساسی در تئوری اطلاعات این است که متغیر تصادفی گوسی، بیشترین مقدار آنترویی را در بین متغیرهای تصادفی با واریانس یکسان داراست.

---

<sup>۱</sup>Kurtosis

<sup>۲</sup>Negentropy

<sup>۳</sup>Entropy

<sup>۴</sup>Information theory

### ۳-۱-۳-۳- نگانترویی

نگانترویی نیز یکی دیگر از معیارهای مورد استفاده برای تعیین میزان گوسی بودن یک سیگنال است. محاسبه‌ی نگانترویی برای تعیین میزان گوسی بودن سیگنال بر حسب آنتروپی خواهد بود. نگانترویی همیشه مثبت بوده و تنها در صورت گوسی بودن توزیع صفر خواهد شد.

### ۳-۴- الگوریتم‌های مبتنی بر ناهمبستگی منابع

این نوع از الگوریتم‌ها معمولاً از آمار مرتبه دوم<sup>۱</sup> (ماتریس کوواریانس) استفاده می‌کنند و از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به آنالیز مولفه‌های اصلی [۴۳] و شناسایی کور مرتبه‌ی دوم<sup>۲</sup> [۳۸،۳۹] اشاره کرد. الگوریتم‌هایی که در این دسته قرار دارند از همبستگی زمانی سیگنال‌ها بهره می‌گیرند. نکته‌ی قابل توجه در این الگوریتم‌ها نسبت به روش‌های دسته‌ی قبل با فرض استقلال سیگنال‌ها، امکان جداسازی سیگنال‌های گوسی است. یک دلیل دیگر بر عمومیت روش‌های مرتبه دوم، سادگی محاسباتی آن‌ها است، که اغلب فقط به یکسری دست‌کاری‌های ماتریسی کلاسیک نیاز دارند.

### ۳-۴-۱- آنالیز مولفه‌های اصلی

آنالیز مولفه‌های اصلی یک روش شناخته‌شده است که در بسیاری از رشته‌های مهندسی برای تحلیل و کاهش بعد یک مجموعه داده استفاده می‌شود. ایده اساسی در PCA پیدا کردن مولفه‌هایی است که به ترتیب دارای بیشترین واریانس ممکن باشند. از این رو PCA به‌عنوان یک تبدیل خطی متعامد داده‌های موجود را بر روی یک سیستم مختصات جدید بر اساس واریانس مولفه‌های آن پیش‌بینی می‌کند

---

<sup>۱</sup>Second-order statistics

<sup>۲</sup>Second order blind identification (SOBI)

به نحوی که بزرگترین واریانس بر روی اولین محور مختصات (به عنوان اولین مولفه‌ی اصلی)، بزرگترین واریانس بعد از آن بر روی دومین محور مختصات و ... قرار می‌گیرد.

بردار داده  $X(t)$ ، با ماتریس کوواریانس  $C^X$  را در نظر بگیرید، در این صورت PCA را بر اساس گام‌بندی زیر می‌توان بر آن اعمال کرد:

۱. محاسبه‌ی تجزیه‌ی مقدار ویژه ماتریس کوواریانس  $X$ :

$$C^X = E\{XX^T\} = VDV^T \quad (5-3)$$

که  $V$  ماتریس متعامد بردارهای ویژه و  $D$  ماتریس قطری مقادیر ویژه است که به صورت نزولی مرتب شده‌اند.

۲. محاسبه‌ی مجموعه داده تبدیل یافته  $Y(t)$ :

$$Y = V^T X \quad (6-3)$$

می‌توان اثبات کرد که:

$$C^Y = E\{YY^T\} = D \quad (7-3)$$

با توجه به رابطه ۷-۳، بر اساس قطری بودن ماتریس کوواریانس داده‌های تبدیل یافته می‌توان نتیجه گرفت که سیگنال‌های  $y_i(t)$  ناهمبسته هستند. همچنین اثبات می‌شود که سیگنال‌ها بر اساس واریانس خود مرتب شده‌اند.

---

'Eigenvalue decomposition (EVD)

نوع دیگری از PCA که به عنوان تبدیل سفیدکننده شناخته می شود، می تواند در یک روند مشابه با آنچه در قسمت قبل بیان شد، انجام شود. هدف از سفیدسازی<sup>۱</sup>، تبدیل داده  $X(t)$  به یک مجموعه داده ی جدید با مولفه های ناهمبسته و دارای واریانس واحد است.

ماتریس سفیدکننده  $W$  با استفاده از حل ویژه انجام شده در گام ۱، به صورت زیر محاسبه می شود:

$$Y = WX \quad , W = D^{-1/2}V^T \quad (۸-۳)$$

همچنین قابل اثبات است که:

$$E\{YY^T\} = I \quad (۹-۳)$$

از طرفی با توجه به اینکه مقادیر ویژه کوچک دارای مشارکت کمی هستند، اغلب به عنوان مولفه ی نویزی شناخته می شوند. در عمل نیز این مقادیر به همراه بردارهای ویژه متناظرشان، قبل از تشکیل ماتریس سفید شده حذف می شوند.

### ۳-۴-۲- شناسایی کور مرتبه دوم (SOBI)

شناسایی کور مرتبه دوم با مدنظر قرار دادن فرض ناهمبستگی منابع که نسبت به استقلال آن ها فرض ضعیف تری است، از همبستگی زمانی هر منبع (تابع خودهمبستگی<sup>۲</sup>) بهره می گیرد. روند کار الگوریتم با در نظر گرفتن معادله عمومی ۳-۱۰ آغاز می شود:

$$X(t) = Z(t) + \sigma_{\text{noise}}(t) = As(t) + \sigma_{\text{noise}}(t) \quad (۱۰-۳)$$

---

<sup>۱</sup>Whitening

<sup>۲</sup>Autocorrelation functionz

که  $\sigma_{\text{noise}}(t)$  بردار نویز است.

از طرفی در جهت ساده تر کردن روند حل مسئله، می توان بدون از دست دادن جامعیت موضوع، علاوه بر فرض ناهمبستگی، از فرض واریانس واحد نیز برای سیگنال های منبع بهره برد. بنابراین ماتریس کوواریانس آن ها به صورت رابطه زیر خواهد بود:

$$C_0^s = E\{s(t)s^*(t)\} = I \quad (11-3)$$

که بالانویس "\*" به معنی ترانهاده مزدوج است.

همچنین ماتریس کوواریانس ترکیبات مشاهده شده نیز بر اساس معادله ۳-۱۰ بیان می شود:

$$C_0^X = E\{X(t)X^*(t)\} = AC_0^s A^H + E\{\sigma_{\text{noise}}(t)\sigma_{\text{noise}}^*(t)\} = AA^H + \sigma_{\text{noise}}^2 I \quad (12-3)$$

بالانویس "H" به معنی ترانهاده مزدوج مختلط ماتریس A است.

در ادامه الگوریتم SOBI طی دو گام فرمول بندی می شود [۳۸]:

- سفیدسازی.
- تخمین ماتریس ترکیب کننده.

### ۳-۴-۲-۱- سفیدسازی (پیش پردازش)

در مرحله ی سفیدسازی، یک مجموعه داده مانند  $q$  طی یک انتقال خطی از طریق ضرب در ماتریس سفید کننده  $W$  به سیگنال های سفید شده ای تبدیل می شود که اجزای آن ناهمبسته و دارای واریانس

---

<sup>\</sup>Conjugate transpose

<sup>\</sup>Complex conjugate transpose

واحد هستند. به عبارتی ماتریس کوواریانس سیگنال‌های سفید شده  $q_w$  برابر ماتریس همانی خواهد بود:

$$q_w = Wq \quad (۱۳-۳)$$

$$E\{q_w q_w^*\} = I \quad (۱۴-۳)$$

بنابراین اگر تبدیل خطی  $W$  بر داده‌های مشاهده شده  $Z(t)$  اعمال شود (در این مرحله فرض می‌شود نویز وجود ندارد)، داده‌ی سفید شده‌ی حاصل  $Z_w(t)$  ناهمبسته و دارای واریانس واحد است.

$$C_0^{Z_w} = E\{Z_w Z_w^*\} = E\{WZ(t)Z^*(t)W^H\} = I \quad (۱۵-۳)$$

بر اساس مطالب بیان شده، داده‌ی سفید شده شناسایی ماتریس ترکیب را تسهیل می‌کند. با استفاده از معادلات ۱۰-۳ و ۱۱-۳ می‌توان به اثبات این قضیه پرداخت:

$$\begin{aligned} C_0^{Z_w} &= E\{WZ(t)Z^*(t)W^H\} = WAE\{ss^*\}A^H W^H \\ &= WAC_0^s A^H W^H = WAA^H W^H \end{aligned} \quad (۱۶-۳)$$

همچنین طبق معادله ۱۵-۳ داریم:

$$WAA^H W^H = I \quad (۱۷-۳)$$

از طرفی می‌توان ماتریس همانی  $I^1$  را در ترم‌هایی از ماتریس یکانی  $U^2$  نوشت چنانکه  $I = UU^H$  باشد، بنابراین معادله ۱۷-۳ را می‌توان به فرم زیر بازنویسی کرد:

---

<sup>۱</sup>Identity matrix

<sup>۲</sup>Unitary matrix

$$WAA^H W^H = UU^H \quad (18-3)$$

در نهایت می توان نتیجه گرفت که برای هر ماتریس سفیدکننده  $W$  یک ماتریس یکانی مانند  $U$  وجود دارد به نحوی که:

$$U = WA \quad (19-3)$$

دو تکنیک رایج برای تشکیل ماتریس سفیدکننده، استفاده از آنالیز مولفه های اصلی و تجزیه مقادیر ویژه است. در بخش ۳-۴-۱ روند پردازش داده با استفاده از PCA مورد بررسی قرار گرفت. حال در این بخش برای انجام این مرحله از تجزیه ی مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس داده ها بهره گرفته می شود. به این صورت که با اعمال EVD بر داده های مشاهده شده ماتریس متعامد بردارهای ویژه ( $V$ ) و ماتریس قطری مقادیر ویژه ( $D$ ) طبق معادله زیر حاصل می شود:

$$C_0^Z = E\{ZZ^*\} = VDV^H \quad (20-3)$$

به این ترتیب، ماتریس سفید شده به صورت معادله ۳-۲۱ قابل محاسبه است:

$$W = D^{-1/2} V^H \quad (21-3)$$

حال ماتریس  $W$  به  $Z(t)$  اعمال می شود تا مجموعه داده سفید شده  $Z^*(t)$  ایجاد شود. سفید شدن داده های مشاهده شده را می توان به شرح زیر اثبات کرد:

$$E\{Z_W Z_W^*\} = WE\{ZZ^*\}W^H = WV^H VDV^H W^H = D^{-1/2} V^H VDV^H V D^{-1/2} = I \quad (22-3)$$

در حالت کلی که نویز نیز وجود دارد (یعنی  $X(t) \neq Z(t)$ ) و معادله ۳-۱۲ معتبر است، ماتریس کوواریانس داده ی سفید شده  $X_W(t) = WX(t)$  به صورت زیر محاسبه می شود:



$$\begin{aligned} E\{X_w(t)X_w^*(t)\} &= E\{WX(t)X^*(t)W\} = WAA^H W^H + W\sigma_{\text{noise}}^2 W^H \\ &= W(C_0^X - \sigma_{\text{noise}}^2 I)W^H + W\sigma_{\text{noise}}^2 W^H = WC_0^X W^H \end{aligned} \quad (23-3)$$

معادله فوق نشان می‌دهد که ماتریس سفیدکننده  $W$  می‌تواند بر اساس ماتریس کوواریانس داده‌های مشاهده‌شده ( $C_0^X$ ) تعیین شود.

### ۳-۴-۲- تخمین ماتریس ترکیب

هدف از این مرحله تخمین ماتریس یکانی  $U$  و به دنبال آن ماتریس ترکیب  $A$  با استفاده از معادله ۳-۱۹ است. برای این منظور ماتریس کوواریانس تأخیری<sup>۱</sup> بر اساس داده‌های سفید شده در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{aligned} C_\tau^{X_w} &= E\{X_w(t+\tau)X_w^*(t)\} = WE\{X(t+\tau)X^*(t)\}W^H \\ &= WAE\{s(t+\tau)s^*(t)\}A^H W^H \quad \forall \tau \neq 0 \end{aligned} \quad (24-3)$$

در نتیجه داریم:

$$C_\tau^{X_w} = UC_\tau^s U^H \quad \forall \tau \neq 0 \quad (25-3)$$

که  $C_\tau^s = E\{s(t+\tau)s^*(t)\}$  ماتریس کوواریانس تأخیری منابع است.

با توجه به اینکه  $U$  یک ماتریس یکانی است رابطه ۳-۲۵ نشان می‌دهد که هر ماتریس کوواریانس سفید شده  $C_\tau^{X_w}$  قابل قطری شدن با ماتریس یکانی  $U$  است. بنابراین اثبات می‌شود که ماتریس  $U$  می‌تواند از طریق تجزیه‌ی مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس تأخیری سفید شده تعیین شود. در نهایت ماتریس ترکیب  $A$  به سادگی با استفاده از رابطه ۳-۱۹ قابل محاسبه است.

---

<sup>۱</sup>Time-lagged covariance

نکته‌ی قابل توجه دیگر این است که المان‌های قطری  $C_{\tau}^S$  باید مقادیر متفاوتی داشته باشند به دلیل اینکه  $C_{\tau}^{XW}$  مقادیر ویژه و بردارهای متناظر منحصر به فردی دارد. بنابراین تأخیر زمانی  $\tau$  باید به دقت انتخاب شود. از طرفی مطالعات انجام شده در این مورد، نشان داده‌اند در مواردی که چندین تأخیر زمانی به صورت هم‌زمان در نظر گرفته می‌شود، استحکام روش به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. همچنین احتمال انتخاب تأخیر زمانی نامناسب کاهش یافته و ماتریس  $U$  از مجموعه‌ی آماری بزرگ‌تری استنباط می‌شود.

در نتیجه در طول گام دوم الگوریتم SOBI، ماتریس کوواریانس با چندین تأخیر زمانی به طور مشترک قطری‌سازی می‌شود.

### ۳-۵- پیش‌پردازش‌های لازم برای حل مسئله BSS

به منظور ساده‌سازی روند الگوریتم‌های جداساز کور منابع، انجام یکسری پیش‌پردازش‌ها ضروری و مفید است. این پیش‌پردازش‌ها با کاهش پارامترهای مجهول از پیچیدگی مسئله می‌کاهند و در نتیجه مسئله سریع‌تر به بهترین جواب همگرا می‌شود.

#### ۳-۵-۱- متمرکز کردن داده‌ها حول صفر

متمرکز کردن سیگنال‌های ترکیبی حول نقطه صفر به عنوان یکی از اساسی‌ترین پیش‌پردازش‌ها در مسئله‌ی تفکیک کور منابع به شمار می‌آید. در این پیش‌پردازش که به عنوان مرکزی‌سازی<sup>۱</sup> داده‌ها نیز شناخته می‌شود، مقدار میانگین ( $m$ ) سیگنال‌های ترکیبی از هر یک از آن‌ها کسر می‌شود. با انجام این مرحله فرض می‌شود که منابع اصلی نیز دارای میانگین صفر هستند.

---

<sup>۱</sup>Centering

در ادامه، بعد از اجرای الگوریتم و تخمین ماتریس ترکیب  $A$  می‌توان با اضافه کردن مقدار  $A^{-1}m$  به منابع تخمینی، کسر شدن میانگین در مرحله پیش‌پردازش را جبران کرد. لازم به ذکر است که مرکزی‌سازی داده‌ها تنها در جهت ساده‌سازی روند اجرای الگوریتم بوده، انجام نشدن این مرحله، تخمین منابع اصلی را غیرممکن نمی‌سازد.

### ۳-۵-۲- سفیدسازی

پیش‌پردازش دیگری که بعد از مرحله مرکزی‌سازی انجام می‌شود، سفید کردن سیگنال‌های ترکیبی است. به‌طور کلی سفیدسازی برای تمام الگوریتم‌های جداساز منابع توصیه می‌شود زیرا با کاهش تعداد پارامترهای آزاد، عملکرد روش را به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌بخشد. به این صورت که مسئله را به‌جای یافتن ماتریس ترکیب با  $n^2$  درجه آزادی به تخمین ماتریس متعامد با  $\frac{n(n-1)}{2}$  مولفه کاهش می‌دهد.

دو تکنیک اصلی برای سفیدسازی، استفاده از آنالیز مولفه‌های اصلی و تجزیه مقادیر ویژه است که روند اجرای هر کدام به ترتیب در بخش‌های ۳-۴-۱ و ۳-۴-۲ تشریح شده است.

### ۳-۶- بزرگنمایی حرکت

بزرگنمایی حرکت یک تکنیک برای تقویت حرکت‌های کوچک در فیلم‌ها (ویدیو) است که به‌عنوان نوعی میکروسکوپ حرکتی عمل می‌کند. این تکنیک طی سه گام کلی ارائه شده در زیر قابل اجرا است:

۱. تبدیل هر فریم ویدیو به سری سیگنال‌های نشان‌دهنده‌ی حرکت اشیاء مختلف در تصاویر با استفاده از تبدیل چندمقیاسی.

۲. فیلتر و تقویت سیگنال‌ها در باند فرکانسی مشخص.

۳. بازسازی ویدیوی حرکت شی موردنظر که در باند فرکانسی تعیین شده بزرگنمایی شده است.

در این راستا یکی از الگوریتم‌هایی که به‌طور گسترده مورد پذیرش قرار گرفته، الگوریتم بزرگنمایی حرکت مبتنی بر فاز [۲۱] است. در رویکرد مبتنی بر فاز ابتدا هر فریم با استفاده از یک بانک فیلتر با عنوان هرم مختلط جهت‌دار، به زیرباندهای مختلط که نسخه‌های میان‌گذر<sup>۲</sup> مکانی آن تصویر است، تجزیه می‌شود. این نوع از تجزیه در روند تکنیک بزرگنمایی، امری حیاتی است، چراکه طی آن قالب‌های چندوضوحی<sup>۳</sup> و چندمقیاسی در جهت‌گیری‌های مختلف پیشنهاد می‌شود که با سیستم بصری انسان مطابقت دارند. از طرفی تقویت فریم‌های ویدیویی تنها بر اساس ضرایب تصویر، موجب افزایش نویز و تقویت نامناسب حرکت می‌شود. بنابراین تقیسمات هرمی از ارزش بالایی برخوردار هستند زیرا آن‌ها یک تصویر نهایی را بدون افزایش نویز تضمین می‌کنند.

علت استفاده از بانک فیلتر را در مثالی دیگر می‌توان به این صورت بیان کرد که تبدیل فوریه به‌عنوان یک روش تجزیه، تصویر را به ترکیبی خطی از سینوسی‌های مختلط (هر یک به‌عنوان یک زیرباند در نظر گرفته می‌شوند) تبدیل می‌کند. فاز هر کدام از این زیرباندها با توجه به قضیه‌ی انتقال فوریه<sup>۴</sup> با حرکت کلی در تصویر مرتبط است:

$$I(x) = \sum_{n=0}^N A_n e^{-inx} \quad \Rightarrow \quad I(x-\delta) = \sum_{n=0}^N A_n e^{-inx} e^{-in\delta} \quad (26-3)$$

در رابطه فوق I شدت تصویر با مختصات پیکسل x و حرکت کلی  $\delta$  است.  $A_n$  دامنه و ضریب i در  $e^{-inx}$  معرف فاز در زیر باند n ام هستند که با ایجاد حرکت  $\delta$  دامنه ثابت باقی‌مانده و فاز به اندازه‌ی  $n\delta$  تغییر می‌کند.

---

<sup>۱</sup>Subband

<sup>۲</sup>Bandpass

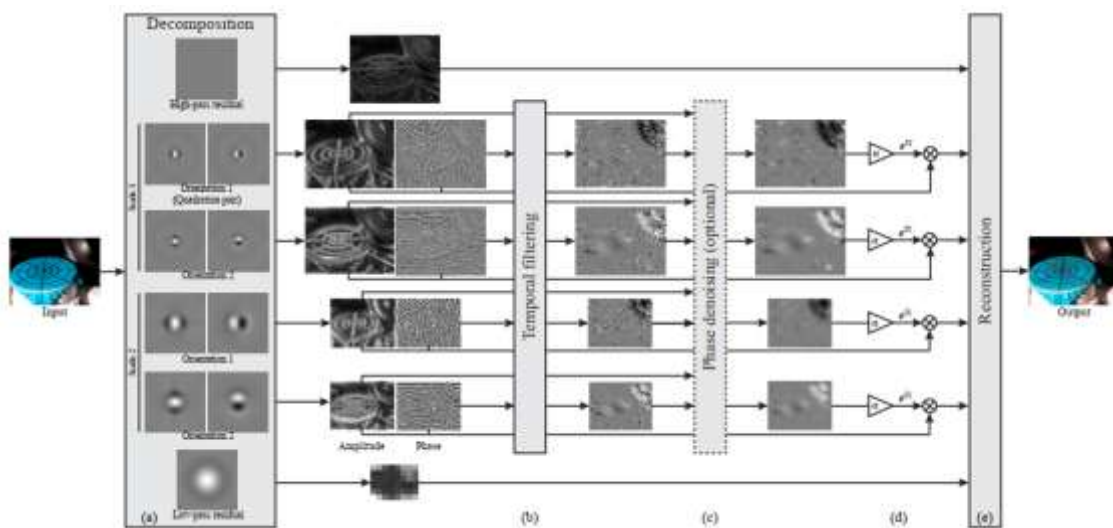
<sup>۳</sup>Multi-resolution

<sup>۴</sup>Orientation

<sup>۵</sup>Fourier shift theorem

با این حال تبدیل فوریه تنها قادر به تجزیه‌ی تصویر به زیرباند‌های کلی است که نمایشی از حرکت کلی در تصاویر خواهند بود، در حالی که بیشتر حرکت‌ها در ویدیو محلی هستند. بنابراین بهتر است تصویر با استفاده از تبدیلی مانند هرم مختلط جهت‌دار که فیلتری چندمقیاسی و محلی است به زیرباند‌های محلی تجزیه شود چراکه تغییرات فاز در هر یک از آن زیرباند‌ها بیانگر حرکت‌های محلی در تصویر خواهند بود.

بنابراین الگوریتم بزرگنمایی حرکت مبتنی بر فاز با بهره‌گیری از ارتباط بین حرکت در تصاویر با فاز استخراج‌شده از نسخه‌های میان‌گذر آن تصویر به پردازش حرکت موردنظر می‌پردازد. به این صورت که با ضرب فاز با یک فاکتور بزرگ‌تر از یک، در مقیاس‌ها و جهت‌گیری‌های مختلف به تقویت آن و در واقع بزرگنمایی حرکت در باند فرکانسی فیلتر شده می‌پردازد. نتیجه‌ی کار ویدیویی خواهد بود که حرکت را در یک باند مشخص از فرکانس‌های زمانی بزرگ‌تر نشان می‌دهد. یک دیاگرام از این جریان پردازش در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.



شکل ۲-۳. نمایشی از روند پردازش فریم‌های ویدیویی با استفاده از تکنیک بزرگنمایی حرکت [۲۱]

توضیحات دقیق در مورد روش معرفی شده را می‌توان در مرجع [۲۱] یافت.

نکته‌ی قابل توجه در کاربرد این تکنیک در اندازه‌گیری ویدیویی از سازه‌ی مرتعش این است که اگر باند فرکانس به‌درستی انتخاب شود، نتیجه یک ویدیوی بزرگنمایی شده از شکل انحراف محیطی سازه در یک فرکانس رزونانس آن خواهد بود.

### ۳-۷- هرم مختلط جهت‌دار

اهمیت تجزیه و تحلیل تصاویر در مقیاس‌های مختلف از ماهیت خود تصاویر حاصل می‌شود. صحنه‌های جهان از مناظر با ابعاد متفاوت تشکیل شده‌اند که خود این مناظر نیز دارای ویژگی‌هایی از اندازه‌های مختلف هستند و علاوه بر این می‌توانند در فاصله‌های مختلف از بیننده قرار بگیرند. در نتیجه، هر روش تجزیه و تحلیل که تنها از یک مقیاس استفاده می‌کند، ممکن است اطلاعات در مقیاس‌های دیگر را از دست بدهد. راه‌حل این است که تجزیه و تحلیل به‌طور همزمان در همه‌ی مقیاس‌ها انجام شود. بنابراین ساختار داده‌ی مورد استفاده برای نمایش اطلاعات تصویر به‌اندازه‌ی الگوریتم‌های اعمال شده به داده‌ها، برای تکمیل موفقیت‌آمیز یک کار پردازش تصویر حیاتی است.

در این راستا یکی از ساختارهایی که توجه بسیاری را به خود جلب کرده، تشکیل هرم تصویر است. تبدیلی با عنوان هرم مختلط جهت‌دار [۲۲] تصویر را بر اساس مقیاس‌های مکانی<sup>۱</sup> و جهت‌گیری تجزیه می‌کند. در واقع این تبدیل به‌عنوان یک فرمت چندوضوحی شامل مجموعه‌ای از نسخه‌های پایین‌گذر<sup>۲</sup> یا میان‌گذر (با مقادیر مختلط) یک تصویر است که هر یک اطلاعات الگو در یک مقیاس و جهت‌گیری

---

<sup>۱</sup>Spatial scale

<sup>۲</sup>Lowpass

متفاوت را نشان می‌دهند. همچنین ضرایب بالاگذر<sup>۱</sup> و پایین‌گذر این تبدیل اجزای باقی‌مانده<sup>۲</sup> سیگنال را که توسط فیلترهای میان‌گذر عبور نکرده‌اند، توصیف می‌کند. توابع پایه تبدیل نیز، شبیه موجک گابور<sup>۳</sup> است، یعنی سینوسی‌هایی که توسط یک پوش گوسی<sup>۴</sup> پنجره‌گیری شده‌اند و جهت‌پذیر نیز هستند.

هرم تصویر با تشکیل دنباله‌ای از نسخه‌های تصویر اصلی، با کاهش منظم دو پارامتر تراکم نمونه<sup>۵</sup> و وضوح آن به وجود می‌آید. سطح پایین یا صفر هرم،  $G_0$ ، با تصویر اصلی بعد یکسانی دارد. این تصویر به صورت پایین‌گذر فیلتر شده و برای به دست آوردن سطح بعدی هرم،  $G_1$ ، با ضریب ۲ نمونه‌برداری می‌شود.  $G_1$  نیز پس از آن در جهت تشکیل  $G_2$ ، به همان صورت فیلتر و نمونه‌برداری می‌شود. تکرار بیشتر مراحل فیلتر و نمونه‌برداری موجب ایجاد دیگر سطوح هرم می‌شود. زیرباندهای جهت‌دار نیز در هر سطح هرم با استفاده از نسخه‌های جهت‌دار (چرخشی) و مقیاس‌شده از فیلتر پایه ایجاد می‌شوند [۴۵]. در شکل ۳-۳ هرم تشکیل‌شده در سه مقیاس مختلط به همراه آخرین مولفه پایین‌گذر تصویر نمایش داده شده است، که هر مقیاس نیز شامل سه نسخه جهت‌دار از آن زیرباند است.

---

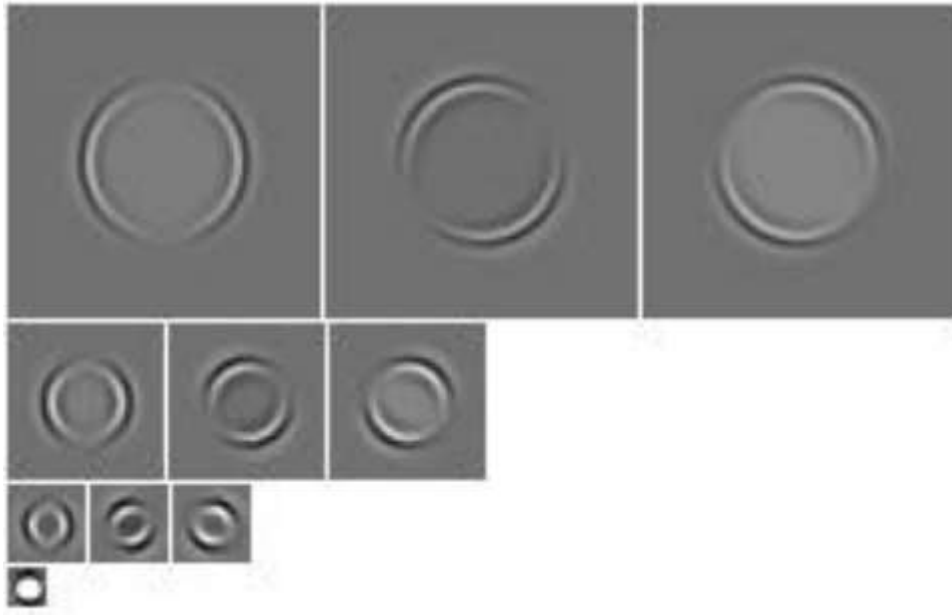
<sup>۱</sup>Highpass

<sup>۲</sup>Residual

<sup>۳</sup>Gabor wavelet

<sup>۴</sup>Gaussian envelope

<sup>۵</sup>Sample density



شکل ۳-۳. هرم تشکیل شده در سه سطح به همراه آخرین مولفه پایین گذر تصویر [۲۲]

### ۳-۸- نحوه‌ی به‌کارگیری الگوریتم‌های معرفی شده جهت حل مسئله

در این فصل به ترتیب الگوریتم‌های جداساز کور منابع، بزرگنمایی حرکت مبتنی بر فاز و فیلتر چندمقیاسی هرم مختلط جهت‌دار معرفی شده‌اند. حال به‌صورت مختصر به کاربرد هر یک در روند توسعه‌ی الگوریتم پیشنهادشده در این پایان‌نامه می‌پردازیم.

همان‌طور که در بخش ۲-۳ تشریح شد، الگوریتم‌های BSS تنها با استفاده از ترکیبات مشاهده‌شده از مجموعه‌ی منابع مستقل به استخراج مولفه‌ها و ماتریس ضرایب ترکیب‌کننده آن‌ها می‌پردازند. یکی از این الگوریتم‌ها که جداسازی را بر اساس ناهمبستگی بین منابع انجام می‌دهد تکنیک SOBI است. نسخه‌ی ارتقا یافته‌ی این الگوریتم با نام شناسایی کور مودال<sup>۱</sup> برای تخمین پاسخ‌های مودال و اشکال مودی سازه‌ها به‌کار می‌رود [۴۳]. BMID، درواقع اعمال SOBI پس از پیش‌پردازش و آماده‌سازی مقدماتی داده‌ها است. در این تکنیک داده‌های ورودی به‌منظور بهبود کیفیت پاسخ‌های مودال تخمینی

<sup>۱</sup>Blind modal identification (BMID)



و به‌طور کلی در جهت کاربرد گسترده‌تر الگوریتم اصلاح می‌شوند. در پژوهش انجام‌شده در این پایان‌نامه از این تکنیک جهت جداسازی مودهای ارتعاشی سازه بر اساس ترکیبات مشاهده‌شده از آن‌ها (مشاهدات به‌دست‌آمده از فریم‌های ویدیویی) استفاده‌شده است. به‌طوری‌که هر یک از منابع استخراج‌شده، در واقع پاسخ مودال مودهای ارتعاشی سازه می‌باشند. ماتریس ضرایب نیز در راستای بازسازی ویدیوی بزرگ‌نمایی شده حاوی تنها یک مود ارتعاشی مورد استفاده قرار گرفته است. جزئیات بیشتر در مورد استفاده از این تکنیک در جهت توسعه‌ی الگوریتم پیشنهادی در فصل چهارم بیان شده است.

بزرگ‌نمایی حرکت مبتنی بر فاز، تکنیک دیگری است که در توسعه‌ی الگوریتم ارائه‌شده طی این پایان‌نامه مورد استفاده قرار گرفته است. این تکنیک امکان بزرگ‌نمایی و بازسازی ویدیوی تنها یک مود ارتعاشی فعال در سازه را بر اساس ویدیوی ارتعاش کلی آن فراهم می‌کند. زیرا با اعمال فیلتر هرم مختلط جهت‌دار به هر یک از فریم‌های ویدیویی، سیگنال‌های فاز و دامنه در مقیاس‌ها و جهت‌گیری‌های مختلف قابل اندازه‌گیری هستند. از طرفی تکنیک BMID امکان جداسازی هر یک از مودهای ارتعاشی را بر اساس سیگنال‌های ترکیبی آن‌ها فراهم کرده است. بنابراین بزرگ‌نمایی حرکت هر یک از این مودهای ارتعاشی با تقویت اطلاعات فازی مربوط به آن مود امکان‌پذیر است.



## فصل چهارم: روش تحقیق

## ۴-۱- مقدمه

ویدیوها از مجموعه‌ای از تصاویر متوالی ساخته می‌شوند، بنابراین دارای دو دامنه هستند: دامنه‌ی مکانی<sup>۱</sup> مربوط به یک میدان دوبعدی از مقادیر روشنایی<sup>۲</sup> در یک تصویر واحد و دامنه‌ی زمانی<sup>۳</sup>، بر اساس تشکیل ویدیو در طول زمان. تصاویر مشابه با آنچه که در استفاده از تبدیل فوریه برای استخراج دامنه و فاز حرکت نوسانی انجام می‌شود، می‌توانند با فیلتر شدن در دامنه‌ی مکانی به سیگنال‌های دامنه و فاز تجزیه شوند [۳۵]. حرکت ارتعاش سازه‌ای نیز در این سیگنال‌های فاز و دامنه کدگذاری شده است. از طرفی نشان داده شده است که اطلاعات فازی به دلیل حساسیت کمتر نسبت به تغییرات نور و شرایط سطحی، در مقایسه با دامنه تقریب بهتری از حرکت را ارائه می‌دهند [۳۳]. این امر آن را در بسیاری از کاربردهای دنیای واقعی، نسبت به اطلاعات خام<sup>۴</sup> شدت تصویر نیز، برتری داده است. از این رو در این فصل به توسعه‌ی یک روش شناسایی مودال خروجی-محور مبتنی بر فاز برای استخراج فرکانس‌های مودال، نسبت‌های میرایی و اشکال مودی سازه با وضوح بالا می‌پردازیم.

## ۴-۲- نمایش محلی حرکت ارتعاشی مبتنی بر فاز

از آنجایی که حرکت سازه در تصاویر مختلف، از نظر مکانی، محلی است برای استخراج سیگنال فاز حاوی حرکت ارتعاشی باید از فیلترهای محلی و چندمقیاسی در بعد مکان استفاده شود. فیلتر هرم مختلط جهت‌دار [۲۱، ۲۲] دارای زیرباندهایی با این دو ویژگی است. با اعمال این فیلتر به هر فریم (حاوی  $N$  پیکسل) از ویدیو (شامل  $T$  فریم)، فاز محلی در مقیاس‌های مختلف مکانی به دست می‌آید:

---

<sup>۱</sup>Spatial domain

<sup>۲</sup>Brightness values

<sup>۳</sup>Temporal domain

<sup>۴</sup>Raw

$$I(x, \delta(x, t)) = \sum_{\omega=-\infty}^{\infty} R_{\omega}(x, t) = \sum_{\omega=-\infty}^{\infty} \rho_{\omega}(x, t) e^{j2\pi\omega_0(x+\delta(x, t))} \quad (1-4)$$

در رابطه‌ی فوق  $I$  شدت تصویر با مختصات پیکسل  $x$  و حرکت محلی  $\delta(x, t)$  در فضا و زمان است.  $R_{\omega}(x, t)$  نیز پاسخ فیلتر (نمایش زیرباند) در مقیاس مکانی  $\omega$  است

$$R_{\omega}(x, t) = \rho_{\omega}(x, t) e^{j2\pi\omega_0(x+\delta(x, t))} \quad (2-4)$$

با دامنه‌ی محلی  $\rho_{\omega}(x, t)$  و فاز محلی  $\psi(x, t) = 2\pi\omega_0(x + \delta(x, t)) = 2\pi\omega_0 x + 2\pi\omega_0 \delta(x, t)$  که ارتعاش سازه در طول زمان را کدگذاری می‌کند.

با حذف میانگین زمانی از فاز محلی می‌توان بر اساس  $\delta'(x, t) = 2\pi\omega_0 \delta(x, t)$  شناسایی مودال خروجی-محور را انجام داد.

### ۴-۳- برهم‌نهی مودال حرکت ارتعاشی مبتنی بر فاز

ماتریس حرکت به‌دست‌آمده در بخش قبل می‌تواند با استفاده از اصل برهم‌نهی مودال به‌صورت ترکیب خطی از پاسخ‌های مودال بیان شود [۲۳]:

$$\delta'(x, t) = \Phi(x)q(t) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(x)q_i(t) \quad (3-4)$$

که  $\delta' \in \mathbb{R}^{N \times T}$  ماتریس حرکت (در مقیاس اول با تعداد  $N$  پیکسل)،  $\Phi \in \mathbb{R}^{N \times n}$  ماتریس شکل‌های مودی،  $q \in \mathbb{R}^{n \times T}$  پاسخ‌های مودال و  $n$  تعداد مودها است.

---

<sup>1</sup>Modal superposition

برای حل معادله‌ی فوق می‌توان از الگوریتم شناسایی کور منبع معرفی شده در بخش ۳-۴-۲ استفاده کرد اما به دلیل اینکه در اندازه‌گیرهای ویدیویی از سازه، تعداد پیکسل‌ها (که هر یک نقش یک حسگر را ایفا می‌کنند) بسیار بالاتر از تعداد موده‌های فعال (در نقش مولفه‌های منبع) سازه است، مسئله شناسایی مودال معرفی شده در رابطه ۳-۴، معرف یک مدل فرامعین بوده و به‌صورت مستقیم قابل حل نیست. بنابراین عملیات شناسایی طی دو گام فرمول‌بندی می‌شود: کاهش بعد و جداسازی مودال.

### ۴-۳-۱- کاهش بعد با استفاده از آنالیز مولفه‌های اصلی

طبق تعریف بیان شده در بخش ۳-۴-۱ می‌توان نتیجه گرفت که PCA ضمن کاهش بعد ماتریس حرکت، وضوح مکانی بالای اطلاعات ارتعاشی را حفظ می‌کند. بنابراین می‌توان از آن در راستای حل سیستم فرامعین تعریف‌شده استفاده کرد و نشان داد که مولفه‌های اصلی که شامل بیشترین اطلاعات ماتریس حرکت سازه است، ارتباط نزدیکی با مولفه‌های مودال دارند. مرحله کاهش بعد با تجزیه‌ی مقادیر تکین ماتریس حرکت آغاز می‌شود:

$$\delta' = U \Sigma V^* = \sum_{i=1}^n \sigma_i u_i v_i^* \quad (4-4)$$

که  $\Sigma \in \mathbb{R}^{N \times T}$  یک ماتریس قطری حاوی  $T$  المان قطری  $\sigma_i$  به‌عنوان  $i$ امین مقدار تکین  $(\sigma_1 \geq \dots \geq \sigma_i \geq \dots \geq \sigma_T \geq 0)$  است،  $U = [u_1, \dots, u_N] \in \mathbb{R}^{N \times N}$  و  $V = [v_1, \dots, v_T] \in \mathbb{R}^{T \times T}$  نیز ماتریس‌هایی از بردارهای تکین چپ و راست هستند که با تجزیه‌ی مقدار ویژه ماتریس‌های کوواریانس  $\delta'$  به‌دست می‌آیند.

---

<sup>۱</sup>Singular value decomposition (SVD)

$$\delta' \delta'^* = U \Sigma^2 U^* \quad (5-4)$$

$$\delta'^* \delta' = V \Sigma^2 V^* \quad (6-4)$$

همچنین  $r$  مرتبه‌ی ماتریس حرکت  $\delta'$  است اگر تعداد مقادیر تکین غیر صفر آن برابر  $r$  باشد  
 $(\sigma_1 \geq \dots \geq \sigma_r > \sigma_{r+1} = \dots = \sigma_T = 0)$ .

بدیهی است که  $i$ امین مقدار تکین،  $\sigma_i$ ، به انرژی پیش‌بینی شده برای  $i$ امین جهت اصلی ( $u_i$ ) ماتریس  $\delta'$  مرتبط است. در تحلیل دینامیکی سازه نیز نشان داده شده است که اگر یک سازه نامیرا یا با میرایی بسیار کم دارای ماتریس جرم متناسب با ماتریس همانی باشد، جهت‌های اصلی با توجه به مقادیر تکین مربوطه که نشان‌دهنده‌ی انرژی شرکت آن‌ها در پاسخ سازه  $\delta'$  است، به سمت اشکال مودی همگرا خواهند بود [۴۶]. به عبارت دیگر مودهای فعال سازه بر روی  $r$  مولفه‌ی اصلی پیش‌بینی می‌شوند. از طرفی مشاهده‌ی تجربی اما درست نشان می‌دهد که معمولاً تنها چند مود فعال و غالب در پاسخ ارتعاش سازه‌ای وجود دارد. بنابراین مرتبه‌ی  $\delta'$  که تقریباً برابر با تعداد مقادیر تکین فعال است در مقایسه با بعد مکانی  $\delta'$  بسیار کوچک‌تر است ( $r \ll N$ ). پس می‌توان نتیجه گرفت که PCA با پیش‌بینی خطی بیشترین انرژی (مولفه‌های مودال)  $\delta'$  بر روی تعداد کمی از مولفه‌های اصلی قادر به انجام کاهش بعد قابل توجهی در  $\delta'$  است:

$$\eta = U_r^* \delta' \quad (7-4)$$

که  $U_r = [u_1, \dots, u_r] \in \mathbb{R}^{N \times r}$  اولین  $r$  ( $r \ll N$ ) ستون از  $U$  است و  $i$ امین ردیف از  $\eta = [\eta_1, \dots, \eta_r]^* \in \mathbb{R}^{r \times T}$  نیز معرف  $i$ امین مولفه‌ی اصلی  $\delta'$  است.

همچنین می‌توان به اثبات ویژگی PCA در خصوص حفظ اطلاعات با وضوح مکانی بالا پرداخت، به این صورت که با معکوس کردن تبدیل خطی مذکور با استفاده از  $r$  مولفه‌ی اصلی می‌توان به ماتریس حرکت با وضوح مکانی اولیه دست یافت:

$$\delta' \approx U_r \eta \quad (۸-۴)$$

#### ۴-۳-۲- جداسازی کور مودهای ارتعاشی

در بخش قبل مسئله‌ی شناسایی کور از حالت فرامعین مربوط به ماتریس حرکت سازه، به مسئله‌ی معین بر اساس مولفه‌های اصلی کاهش یافت. اما از آنجایی که در بسیاری از مسائل فرض توزیع جرم یکنواخت برقرار نیست، هر مولفه‌ی اصلی هنوز ترکیبی از مودهای فعال است و می‌تواند به صورت ترکیب خطی از پاسخ‌های مودال بیان شود [۴۶]:

$$\eta(t) = \Upsilon q(t) = \sum_{i=1}^r \gamma_i q_i(t) \quad (۹-۴)$$

در اینجا  $\Upsilon \in \mathbb{R}^{r \times r}$  حاوی ضرایب ترکیب و  $q(t)$  ماتریس مختصات مودال است.

با جایگذاری معادله‌های ۳-۴ و ۹-۴ در معادله‌ی ۸-۴ خواهیم داشت:

$$\sum_{i=1}^n \varphi_i q_i(t) = \delta' \approx U_r \eta = U_r \Upsilon q(t) = U_r \sum_{i=1}^r \gamma_i q_i(t) = \sum_{i=1}^r (U_r \gamma_i) q_i(t) \quad (۱۰-۴)$$

با مقایسه‌ی دو انتهای معادله ۱۰-۴ و با فرض  $r \approx n$  نیز می‌توان نشان داد که:

$$\varphi_i = U_r \gamma_i \quad (۱۱-۴)$$

در رابطه‌ی فوق  $\varphi_i$  معرف  $i$ امین شکل مودی است.



از طرفی با اعمال مدل خطی الگوریتم BSS به مولفه‌های اصلی، می‌توان به پاسخ‌های مودال دست یافت [۲۳]:

$$q(t) = W\eta(t) \quad (12-4)$$

در این بخش ماتریس تجزیه  $W \in R^{r \times r}$  و مختصات مودال  $q(t)$  به صورت هم‌زمان استخراج می‌شوند. همچنین با توجه به معادله‌های ۹-۴ و ۱۲-۴ می‌توان نشان داد که:

$$\Upsilon = W^{-1} \quad (13-4)$$

بنابراین با توجه به معادله‌های ۱۱-۴ و ۱۳-۴ اشکال مودی با وضوح مکانی بسیار بالا قابل بازیابی هستند. فرکانس‌های مودال و نسبت‌های میرایی نیز بر اساس پاسخ‌های مودال به دست آمده، قابل محاسبه هستند.

## ۴-۴- بزرگنمایی حرکت مودهای ارتعاشی

از آنجایی که روش پیشنهاد شده، فرضی بر روی تعداد مودها ندارد، قادر به شناسایی بسیاری از مودهای موجود در پاسخ ارتعاشی سازه خواهد بود. اما مسئله‌ی قابل توجه این است که در شناسایی مودال خروجی\_محور برخی مودها (معمولاً مودهای بالاتر) به سختی تحریک می‌شوند و در نتیجه در اندازه‌گیری پاسخ ارتعاش سازه‌ای به صورت خفیف ظاهر می‌شوند. به همین دلیل علی‌رغم توانایی الگوریتم در تخمین منطقی فرکانس و میرایی این مودها، دقت تخمین شکل مودی آن‌ها به شدت تضعیف و شکل مود به راحتی به نویز آلوده می‌شود.

راهکار پیشنهادی برای مقابله با این موضوع استفاده از تکنیک بزرگنمایی حرکت مبتنی بر فاز است که در بخش ۳-۶ مبانی آن بیان شد و در ادامه به بررسی کاربرد آن در جهت رفع مسئله‌ی عنوان شده می‌پردازیم.

#### ۴-۴-۱- بزرگنمایی مودهای ارتعاشی منفرد

بزرگنمایی و یا حتی تضعیف حرکت را می‌توان بعد از مرحله‌ی جداسازی مودها بر روی مختصات مودال منفرد<sup>۱</sup> اعمال کرد، به این صورت که در ابتدا پاسخ مودال مود موردنظر (مود  $i$ ام) با یک ضریب بزرگنمایی  $\alpha$  و پاسخ مودال دیگر مودها با فاکتور تضعیف‌کننده  $\beta = -1$  ضرب شده [۲۳] و سپس در معادله‌ی ۴-۹ جایگذاری می‌شوند:

$$\hat{\eta}(t) = \Upsilon \hat{q}(t) = \gamma_i (\alpha q_i(t)) + \sum_{l=1, l \neq i}^r \gamma_l (\beta q_l(t)) = \alpha \gamma_i q_i(t) + \sum_{l=1, l \neq i}^r -\gamma_l q_l(t) \quad (14-4)$$

در اینجا  $\hat{\quad}$  بیانگر بزرگنمایی است.

در ادامه با جایگذاری معادله ۴-۹ در معادله ۴-۱۴ خواهیم داشت:

$$\hat{\eta}(t) = \alpha \gamma_i q_i(t) + \sum_{l=1, l \neq i}^r -\gamma_l q_l(t) = \alpha \gamma_i q_i(t) + \gamma_i q_i(t) - \eta = (1 + \alpha) \gamma_i q_i(t) - \eta \quad (15-4)$$

پس در ادامه می‌توان ماتریس حرکت بزرگنمایی شده،  $\hat{\delta}'$ ، را با استفاده از معادله‌های ۴-۸ و ۴-۱۵ بازسازی کرد:

$$\hat{\delta}' \approx U_r \hat{\eta} = U_r [(1 + \alpha) \gamma_i q_i(t) - \eta] = (1 + \alpha) (U_r \gamma_i) q_i(t) - U_r \eta \quad (16-4)$$

---

<sup>1</sup>Individual modal coordinates

از طرفی با جایگذاری معادله ۸-۴ و ۱۱-۴ در معادله ۱۶-۴ می‌رسیم به:

$$\hat{\delta}' \approx (1+\alpha)(U_r \gamma_i) q_i(t) - U_r \eta = (1+\alpha) \varphi_i q_i(t) - \delta' \quad (17-4)$$

در نهایت تأثیر بزرگنمایی حرکت را می‌توان از طریق دست‌کاری (انتقال) فاز زیرباند اصلی مشاهده نمود

[۲۳]. به این صورت که با ضرب نمایش زیرباند اصلی  $R_\omega(x, t)$  در  $e^{j\hat{\delta}'}$  و استفاده از معادله‌های ۲-۴

و ۱۷-۴ می‌توان پاسخ فیلتر را به صورت زیر بازسازی نمود:

$$\begin{aligned} \hat{R}_\omega(x, t) &= R_\omega(x, t) e^{j\hat{\delta}'} = \rho_\omega(x, t) e^{j(2\pi\omega_0 x + \delta' + \hat{\delta}')} \\ &= \rho_\omega(x, t) e^{j\{2\pi\omega_0 [x + (1+\alpha)\varphi_i q_i(t)] / (2\pi\omega_0)\}} \end{aligned} \quad (18-4)$$

از طرفی با جایگذاری معادله ۳-۴ در معادله ۲-۴ خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} R_\omega(x, t) &= \rho_\omega(x, t) e^{j[2\pi\omega_0 x + \delta'(x, t)]} \\ &= \rho_\omega(x, t) e^{j\left\{2\pi\omega_0 \left[ x + \varphi_i(x) q_i(t) / (2\pi\omega_0) + \sum_{l=1, l \neq i}^n \varphi_l(x) q_l(t) / (2\pi\omega_0) \right] \right\}} \end{aligned} \quad (19-4)$$

حال با مقایسه‌ی انتهای راست دو معادله ۱۸-۴ و ۱۹-۴ می‌توان مشاهده نمود که هم‌زمان با بزرگنمایی

حرکت مود  $i$ ام با ضریب  $(1+\alpha)$ ، حرکت دیگر مودها حذف شده است. به عبارت دیگر، مود  $i$ ام با

حذف دیگر مودها به صورت کور استخراج شده است. با انجام روند مشابه بر روی هر مقیاس از زیرباند

اصلی می‌توان تصاویر (ویدیو) حاوی حرکت ارتعاشی تنها یک شکل مود بزرگنمایی شده را بازسازی

نمود:

$$\hat{I}(x + \hat{\delta}(x, t)) = \sum_{\omega=-\infty}^{\infty} \hat{R}_\omega(x, t) = \sum_{\omega=-\infty}^{\infty} \rho_\omega(x, t) e^{j\{2\pi\omega_0 [x + (1+\alpha)\varphi_i q_i(t)] / (2\pi\omega_0)\}} \quad (20-4)$$

در گام آخر نیز می‌توان تکنیک تشخیص لبه استاندارد را بر روی  $\hat{I}$  اعمال کرد تا با جدا شدن سازه از پس‌زمینه، شکل مود با وضوح مکانی بالا قابل‌نمایش باشد.

دیگر مودهای سازه نیز می‌توانند در روند مشابه با آنچه که طبق معادله‌های ۴-۱۴ تا ۴-۲۰ انجام شد، استخراج و بزرگنمایی شوند.

#### ۴-۴-۲- تحلیل نسبت سیگنال به نویز

تا اینجا بر اساس معادله‌های ۴-۱۴ تا ۴-۲۰ اثبات شد که در الگوریتم پیشنهادی حتی حرکت ارتعاشی مودهای ضعیف نیز با ضریب  $(1+\alpha)$  در یک ویدیوی بازسازی‌شده حاوی تنها همان مود منفرد، قابل بزرگنمایی است. از این‌رو در این بخش به پایداری الگوریتم نسبت به نویز می‌پردازیم و نشان می‌دهیم که چگونه در حضور نویز و بدون بزرگنمایی آن می‌توان مود موردنظر را به‌صورت مجزا و با ضریب  $(1+\alpha)$  بزرگنمایی کرد.

اگر تصویر  $I(x+\delta(x,t))$  آلوده به نویز  $z(x,t)$  باشد، نمایش زیرباند تصویر نویزی  $I(x+\delta(x,t))+z(x,t)$  به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\tilde{R}_\omega(x,t) = \rho_\omega(x,t)e^{j2\pi\omega_0(x,\delta(x,t))} + N_\omega(x,t) \quad (۴-۲۱)$$

که " $\sim$ " علامت نویزی بودن و  $N_\omega(x,t)$  نشان‌دهنده‌ی زیرباند نویز است. فرض می‌کنیم که دامنه‌ی تصویر بدون نویز،  $\rho_\omega(x,t)$ ، نسبت به  $N_\omega(x,t)$  بسیار بزرگ‌تر است، پس فاز استخراج‌شده از  $\tilde{R}_\omega(x,t)$  هنوز برابر با  $\psi(x,t) = 2\pi\omega_0(x+\delta(x,t))$  خواهد بود، مانند آنچه که در معادلات ۴-۳ تا ۴-۱۷ ملاحظه گردید. در ادامه با استفاده از معادله ۴-۱۸ بزرگنمایی فاز را به  $\tilde{R}_\omega(x,t)$  اعمال می‌کنیم:

$$\begin{aligned}\hat{R}_\omega(x, t) &= R_\omega(x, t)e^{j\delta'} + N_\omega(x, t)e^{j\delta'} \\ &= \rho_\omega(x, t)e^{j\left\{2\pi\omega_0\left[x + \frac{(1+\alpha)\varphi_1 q_i(t)}{2\pi\omega_0}\right]\right\}} + N_\omega(x, t)e^{j[(1+\alpha)\varphi_1 q_i(t) - 2\pi\omega_0\delta(x, t)]}\end{aligned}\quad (22-4)$$

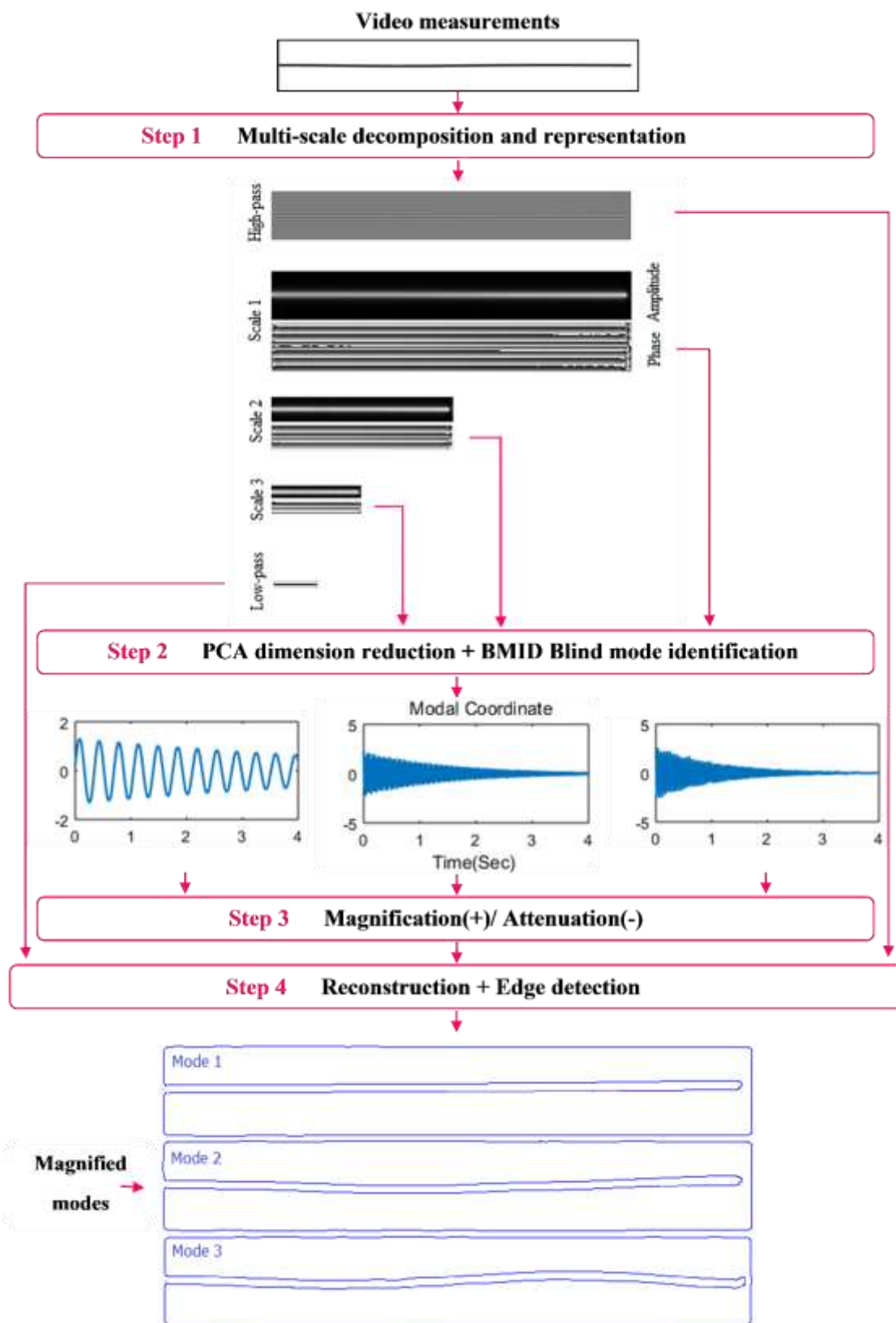
بر اساس معادله ۲۲-۴ مشاهده می‌شود که علی‌رغم بزرگنمایی حرکت ارتعاشی مود  $i$ ام با ضریب  $(1+\alpha)$  در تصویر بدون نویز، تکنیک بزرگنمایی حرکت مبتنی بر فاز تنها منجر به انتقال فاز مولفه‌ی نویزی می‌شود و دامنه‌ی آن تغییر نمی‌کند. بنابراین پس از جمع زیرباندها، مود  $i$ ام در تصویر بازسازی‌شده، با ضریب  $(1+\alpha)$  و با همان سطح شدت نویز پیشین بزرگنمایی خواهد شد:

$$\begin{aligned}\hat{I} &= \sum_{\omega=-\infty}^{\infty} \hat{R}_\omega(x, t) \\ &= \sum_{\omega=-\infty}^{\infty} \rho_\omega(x, t)e^{j\left\{2\pi\omega_0\left[x + \frac{(1+\alpha)\varphi_1 q_i(t)}{2\pi\omega_0}\right]\right\}} + N_\omega(x, t)e^{j[(1+\alpha)\varphi_1 q_i(t) - 2\pi\omega_0\delta(x, t)]}\end{aligned}\quad (23-4)$$

## ۵-۴- خلاصه روش پیشنهادی

نمودار جریان ترسیم‌شده در شکل ۴-۱ خلاصه موارد ارائه‌شده در معادلات ۴-۱ تا ۴-۲۰ را نشان می‌دهد که بر اساس مراحل زیر انجام می‌شوند:

۱. در مرحله‌ی اول با اعمال فیلتر هرم مختلط جهت‌دار به هر فریم  $I(x, \delta(x, t))$  از ویدیو، تجزیه و نمایش چندمقیاسی انجام می‌شود تا پاسخ فیلتر  $R_\omega(x, t)$  در مقیاس‌های مکانی مختلف به‌دست آید. از پاسخ به‌دست‌آمده  $R_\omega(x, t)$  فاز محلی  $\psi(x, t)$  در هر پیکسل از فریم استخراج‌شده و با حذف میانگین زمانی آن، ماتریس حرکت  $\delta'(x, t)$  در مقیاس‌های مختلف حاصل می‌شود.



شکل ۴-۱. نمودار جریان روش پیشنهادشده برای آنالیز مودال عملیاتی مبتنی بر اندازه‌گیری و پردازش ویدیویی

۲. در هر مقیاس، با اعمال PCA بر  $\delta'(x, t)$  کاهش بعد انجام می‌شود تا  $r$  مولفه اصلی  $\eta$  به دست آید. سپس با اعمال BSS بر  $\eta$  پاسخ‌های مودال  $q_i(t)$  ( $i=1, \dots, r$ ) حاصل می‌شوند. بر اساس پاسخ‌های به دست آمده فرکانس و نسبت میرایی هر یک از مودهای فعال در سازه قابل محاسبه است.

۳. در هر مقیاس، بزرگنمایی مود  $i$ ام با ضرب  $q_i(t)$  با ضریب  $\alpha$  و  $q_k(t)$  ( $k \in [1, r] \neq i$ ) با  $\beta = -1$  انجام می‌شود. سپس روند معکوس مراحل ۲ و ۱ به منظور بازسازی ماتریس فاز بزرگنمایی شده  $\hat{\delta}'(x, t)$  اجرا شده و در نهایت با ضرب  $R_\omega(x, t)$  در  $e^{j\hat{\delta}'}$ ، پاسخ فیلتر بزرگنمایی شده  $\hat{R}_\omega(x, t)$  محاسبه می‌شود.

۴. در گام آخر با جمع پاسخ‌ها  $\hat{R}_\omega(x, t)$ ،  $i$ امین مود بزرگنمایی شده  $\hat{I}(x + \hat{\delta}(x, t))$  بازسازی شده و در نهایت با اعمال تکنیک لبه‌یابی بر  $\hat{I}$  شکل مود آن نیز با وضوح بالا استخراج می‌شود. گام‌های ۳ و ۴ برای سایر مودها تکرار می‌شوند.





## فصل پنجم: بحث و نتیجہ

## ۵-۱- مقدمه

در این فصل به اعتبارسنجی و بررسی عملکرد الگوریتم توسعه یافته می پردازیم. به همین منظور در ادامه دو آزمون انجام شده در طول این پایان نامه را مورد تجزیه و تحلیل قرار می دهیم. آزمون اول جهت صحت سنجی الگوریتم پیشنهادی انجام شده است. به این صورت که ویدیویی از ارتعاش آزاد و تصادفی دو تیر با پارامترهای مودال معلوم در محیط نرم افزار متلب بازسازی و الگوریتم پیشنهادی بر آن اعمال شده است. سپس با مقایسه ی نتایج به دست آمده و مقادیر تئوری، صحت و دقت الگوریتم ارائه شده در جهت شناسایی پارامترهای مودال مورد بررسی قرار گرفت. در گام بعد با طراحی آزمونی دیگر، عملکرد الگوریتم در شرایط آزمایشگاهی نیز مورد سنجش قرار گرفته است. به این صورت که با اعمال الگوریتم توسعه یافته بر ویدیوی به دست آمده از ارتعاش آزاد یک تیر یکسر گیردار که در مقیاس آزمایشگاهی و در محیط آزمایشگاه تهیه شده بود، پارامترهای مودال آن شناسایی شدند. همچنین ویدیوی ارتعاش تصادفی یک تیر یکسر گیردار که در پژوهش دیویس و همکاران [۲۴] مورد مطالعه قرار گرفته بود، به عنوان مدل آزمایشگاهی تحریک شده تحت ارتعاش تصادفی مورد بررسی و شناسایی قرار گرفته است. در ادامه به بررسی جزییات و نتایج هر یک از دو آزمون عنوان شده می پردازیم.

## ۵-۲- آزمون اول: مدل عددی

هدف از این آزمون اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی بوده است. به همین منظور در ابتدا پارامترهای مودال یک تیر فولادی با مشخصات ارائه شده در جدول ۵-۱ با استفاده از روابط تئوری برای دو حالت اتصال یکسر گیردار و دو سر مفصل محاسبه شده است. در شکل ۵-۱ تصویری از این دو نوع اتصال نمایش داده شده است. در گام بعد ویدیوی ارتعاش آزاد و اجباری هر یک از دو تیر در محیط نرم افزار متلب بازسازی و پارامترهای مودال آن ها با استفاده از الگوریتم توسعه یافته تخمین زده شده اند. نتایج به دست آمده نیز با مقادیر تئوری مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفته اند.

جدول ۵-۱. مشخصات تیر فولادی

ضخامت (متر)	عرض (متر)	طول (متر)	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	مدول الاستیسیته (نیوتون بر مترمربع)
۰.۰۰۵	۰.۱	۱.۲	۷۸۰۰	$۲ \times ۱۰^{۱۱}$



شکل ۵-۱. نمایش تیر: الف. اتصال یکسرگیردار، ب. اتصال دو سر مفصل

در ادامه هر یک از ۴ آزمایش را به صورت مجزا مورد بررسی قرار می‌دهیم. قبل از بررسی مدل عددی، روابط تحلیل دینامیکی تیرها به صورت خلاصه ارائه می‌شود.

### ۵-۲-۱- تحلیل دینامیکی تیرها

برای مدل‌سازی تیر از مدل تیر برنولی اویلر استفاده شده است. برای یک تیر به طول  $L$ ، سطح مقطع  $A$  و ممان اینرسی  $I$  که تحت اثر بار  $P(x, t)$  قرار گرفته است جابجایی  $y(x, t)$  در موقعیت  $x$  و زمان  $t$ ، از معادله دیفرانسیل زیر به دست می‌آید:

$$EI \frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} + c \frac{\partial y(x, t)}{\partial t} + \rho A \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} = P(x, t) \quad (۱-۵)$$

که در آن  $EI$  سختی خمشی،  $E$  مدول یانگ مصالح تیر،  $c$  میرایی سازه‌ای،  $\rho A$  جرم واحد طول و  $\rho$  جرم واحد حجم تیر است. برای حل این مسئله روش‌های مختلف عددی و همچنین حل بسته وجود

دارد. در ادامه، روش تحلیل مودال که یکی از قدیمی‌ترین و معروف‌ترین روش‌های حل دستگاه معادلات دیفرانسیل است مورد بحث قرار می‌گیرد.

در روش تحلیل مودال، پاسخ حرکت تیر را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$y(x, t) = \sum_{k=1}^n \phi_k(x) q_k(t) \quad (2-5)$$

که در آن  $\phi_k(x)$  شکل مود شماره  $k$  است که با حل مسئله‌ی مقدار ویژه به دست می‌آید و  $q_k(t)$  پاسخ تعمیم‌یافته برای مود شماره  $k$  است. برای به دست آوردن  $q_k(t)$ ، با جایگذاری رابطه‌ی بالا در معادله دیفرانسیل حرکت، به معادله‌ی زیر خواهیم رسید:

$$\ddot{q}_k(t) + 2\xi_k \omega_k \dot{q}_k(t) + \omega_k^2 q_k(t) = \frac{1}{m d_k} \tilde{P}_k(t), \quad k = 1, 2, \dots \quad (3-5)$$

در این رابطه  $d_k = \int_0^L \phi_k^2(x) dx$ ،  $\tilde{P}_k(t) = \int_0^L P(x, t) \phi_k(x) dx$  و  $\xi_k = \frac{c}{2m\omega_k}$  است.

برای حل این معادله دیفرانسیل مرتبه اول می‌توان از انتگرال دوهمال استفاده نمود. بنابراین با توجه به انتگرال کانولوشن داریم:

$$q_k(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} G_k(t - \tau) \tilde{P}_k(\tau) d\tau \quad (4-5)$$

که در آن  $G_k(t)$  تابع گیرین (در اینجا پاسخ ارتعاش آزاد) است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$G_k(t) = \begin{cases} \frac{1}{m d_k \omega_k} e^{-\xi_k \omega_k t} \sin \omega_{dk} t & \text{for } t \geq 0 \\ 0 & \text{for } t < 0 \end{cases} \quad (5-5)$$

که  $\omega_{dk} = \omega_{dk} \sqrt{1 - \xi_k^2}$  است. در نهایت پاسخ کلی سیستم از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است:

$$y(x, t) = \sum_{k=1}^n \phi_k(x) \int_{-\infty}^{+\infty} G_k(t - \tau) \tilde{P}_k(\tau) d\tau \quad (6-5)$$

## ۵-۲-۲- تیر یکسر گیردار

### ۵-۲-۱- ارتعاش آزاد

ویدیوی ارتعاش آزاد تیر مذکور با شرایط تکیه‌گاهی گیردار تنها با ترکیب ۳ مود فعال با نرخ نمونه‌برداری ۱۳۰ فریم بر ثانیه به مدت ۴ ثانیه در محیط نرم‌افزار متلب بازسازی شده است. سپس با اعمال الگوریتم پیشنهادی بر ویدیوی تهیه‌شده، پارامترهای مودال تیر یکسر گیردار فولادی تحت ارتعاش آزاد شناسایی و استخراج شده‌اند. ذکر این نکته لازم است که در تمامی آزمون‌های انجام‌شده در این پایان‌نامه نرخ نمونه‌برداری بر اساس قضیه نایکوئیست<sup>۱</sup> [۴۷] انتخاب شده است.

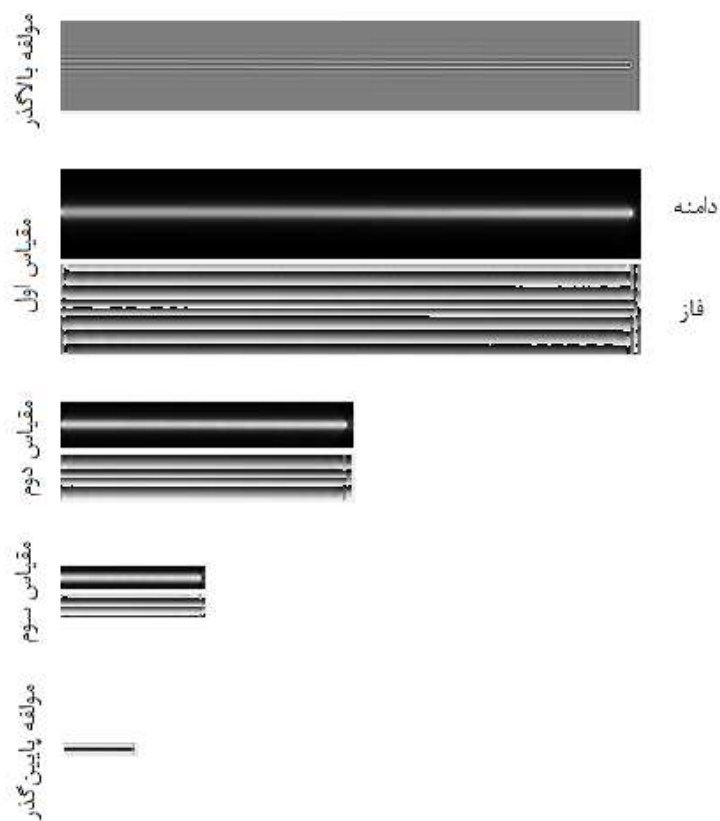
قضیه نمونه‌برداری نایکوئیست-شانون بیان می‌کند که سیگنال را می‌توان از روی سیگنال نمونه‌برداری شده به‌طور دقیق بازسازی کرد، اگر فرکانس نمونه‌برداری بزرگتر از دو برابر بالاترین مولفه‌ی فرکانسی سیگنال باشد. در عمل، غالباً فرکانس نمونه‌برداری را بزرگتر از دو برابر پهنای باند لازم در نظر می‌گیرند.

در ادامه به‌منظور درک بهتر عملکرد الگوریتم، روند اجرای آن به‌صورت گام‌به‌گام، به همراه نتایج هر گام ارائه شده است:

گام ۱: ابتدا با اعمال فیلتر محلی و چندمقیاسی هرم مختلط جهت‌دار بر هر فریم از ویدیو، پاسخ فیلتر در مقیاس‌های مختلف مکانی محاسبه می‌شود. شایان ذکر است که در تمامی آزمون‌های انجام‌شده در این پژوهش به دلیل سادگی هندسه‌ی سازه، از ویژگی جهت‌دار بودن هرم مختلط جهت‌دار استفاده نشده و پاسخ فیلتر در هر مقیاس، تنها در یک جهت مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۵-۲ یک فریم از ویدیو در ۳ مقیاس مختلط به همراه مولفه‌های بالاگذر و پایین‌گذر آن نمایش داده شده است.

---

<sup>۱</sup>Nyquist theorem

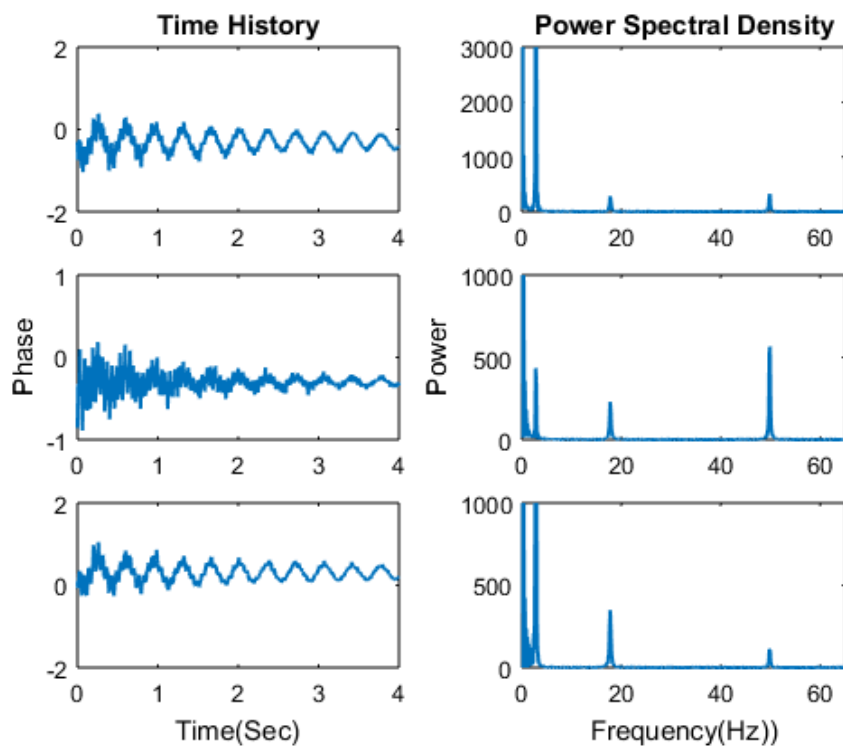


شکل ۲-۵. فریم تجزیه شده به ۳ مقیاس مکانی مختلط به همراه مولفه های بالاگذر و پایین گذر

گام ۲: در مرحله ی دوم، بر اساس پاسخ فیلتر به دست آمده در گام اول، فاز محلی در هر پیکسل از هر فریم استخراج و ماتریس فاز مکانی\_زمانی در مقیاس های مختلف تشکیل شده است. در شکل ۳-۵ نمودار تاریخچه زمانی و چگالی طیفی توان متناظر با آن برای فاز محلی استخراج شده از سه پیکسل دلخواه در مقیاس اول رسم شده است.

---

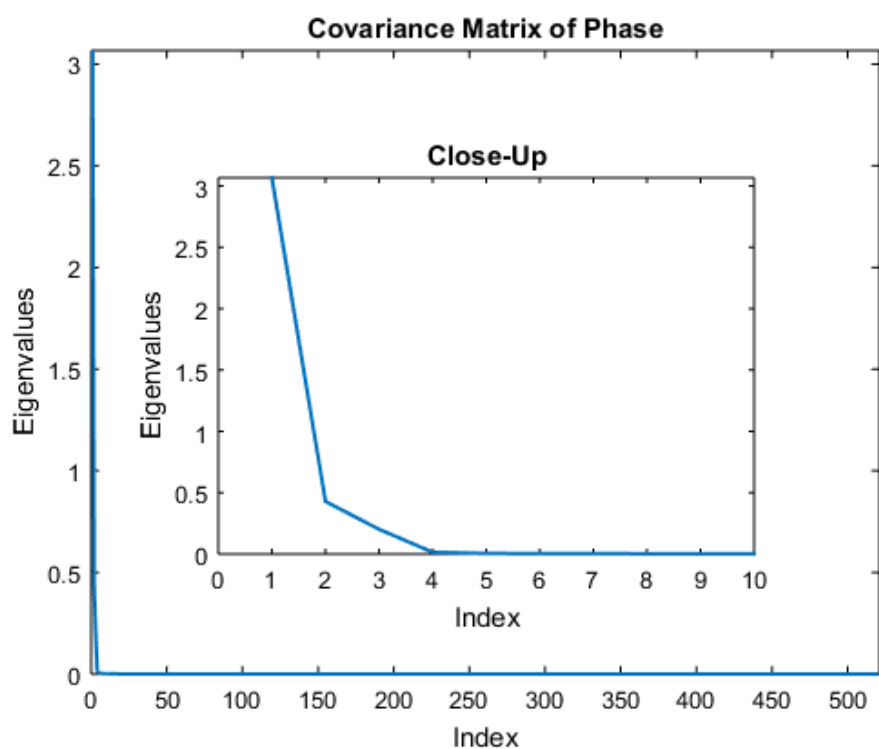
<sup>۱</sup>Power spectral density (PSD)



شکل ۳-۵. نمودار تاریخچه زمانی و چگالی طیفی توان متناظر با آن برای فازهای محلی استخراج شده از سه پیکسل دلخواه در مقیاس اول ( ویدیوی بازسازی شده ارتعاش آزاد تیر یکسر گیردار فولادی در محیط نرم افزار متلب)

با توجه به شکل فوق، هر یک از سیگنال‌های ترسیم شده که معرف حرکت سازه در طول زمان هستند حضور تنها ۳ مود فعال در پاسخ ارتعاش سازه‌ای را نشان می‌دهند.

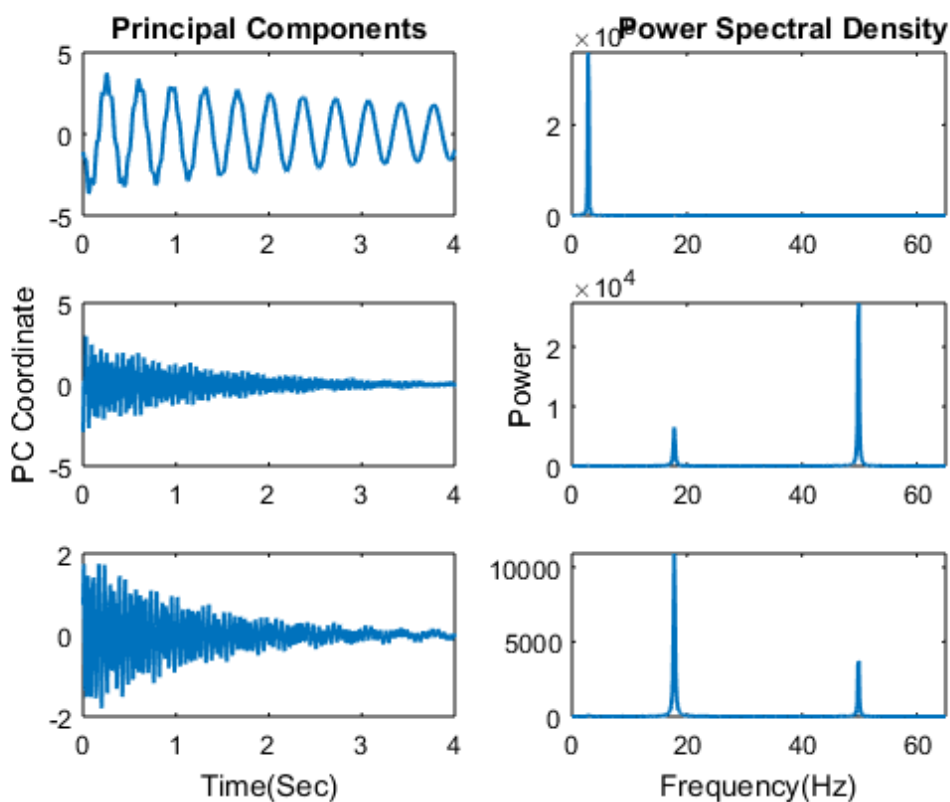
گام ۳: در این گام با اعمال PCA بر ماتریس فاز به دست آمده در گام قبل، هم‌زمان با کاهش بعد می‌توان به مولفه‌های اصلی نیز دست یافت. با اعمال تبدیل فوریه بر هر یک از مولفه‌های به دست آمده مشاهده می‌شود که هر مولفه‌ی اصلی ترکیبی از پاسخ‌های مودال غالب در سازه است. از طرفی توزیع مقادیر ویژه (مربع مقادیر تکین) ماتریس کوواریانس فاز نیز وجود تنها سه مولفه‌ی اصلی فعال را در پاسخ سازه نشان می‌داد، زیرا ویدیوی مورد بررسی نیز تنها بر اساس سه مود اول سازه بازسازی شده بود. در شکل ۴-۵ توزیع مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس فاز نمایش داده شده است.



شکل ۴-۵. توزیع مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس فاز (ارتعاش آزاد تیر یکسر گیردار فولادی)

همچنین می‌توان در شکل ۵-۵ مولفه‌های اصلی را به همراه چگالی طیفی توان متناظر با آن‌ها که در واقع نمایشی از مدهای فعال در سازه است، مشاهده کرد. نتایج نشان‌دهنده‌ی آن است که PCA وظیفه کاهش بعد خود را به درستی انجام داده و مسئله فرامعین را به حالت برابری تعداد منابع و ترکیبات تبدیل کرده است.

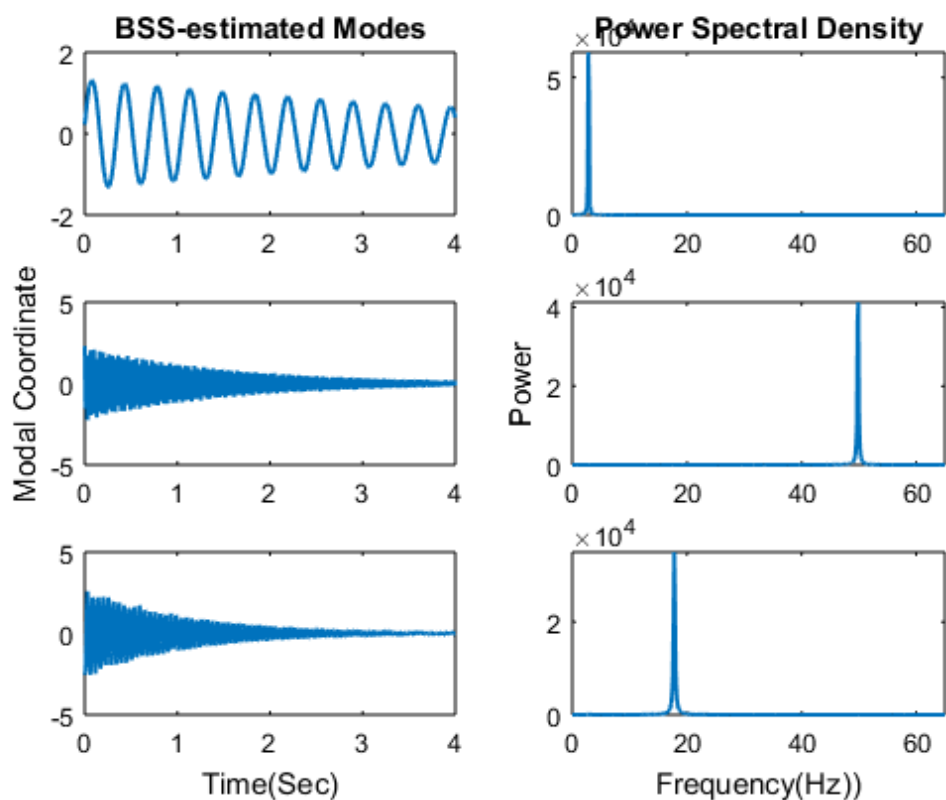




شکل ۵-۵. مولفه‌های اصلی ماتریس فاز مکانی-زمانی در مقیاس اول و چگالی طیفی توان متناظر با هریک (ارتعاش آزاد تیر یکسر گیردار فولادی)

گام ۴: در گام چهارم مولفه‌های اصلی با استفاده از تکنیک BSS تجزیه شده و پاسخ‌های مودال سازه به دست می‌آیند. همان‌طور که در شکل ۵-۶ نیز مشاهده می‌شود هر یک از پاسخ‌های مودال تنها شامل یک مولفه فرکانسی هستند. بنابراین می‌توان با استفاده از تبدیل فوریه و تکنیک کاهش لگاریتمی<sup>۱</sup> به ترتیب فرکانس و میرایی هر مود را بر اساس پاسخ مودال آن محاسبه کرد. پارامترهای محاسبه شده در مقایسه با مقادیر تئوری آن‌ها در جدول ۵-۲ نشان داده شده است.

<sup>۱</sup>Logarithm decrement techniques



شکل ۵-۶. پاسخ‌های مودال تخمین زده شده با استفاده از الگوریتم BSS و چگالی طیفی توان متناظر با هر یک (ارتعاش آزاد تیر یکسر گیردار فولادی)

جدول ۵-۲. پارامترهای مودال تئوری در مقایسه با مقادیر تخمینی برای ویدیوی بازسازی شده ارتعاش آزاد تیر یکسر گیردار فولادی

مود	فرکانس (هرتز)		نسبت میرایی (درصد)	
	تئوری	تخمینی	تئوری	تخمینی
۱	۲,۸۳	۲,۷۹	۱	۰,۹۵
۲	۱۷,۷۹	۱۷,۷۷	۰,۸	۰,۸
۳	۴۹,۸۴	۴۹,۸۹	۰,۲	۰,۲

جدول فوق و مقایسه‌ی انجام شده بیانگر دقت و سازگاری بالای نتایج الگوریتم پیشنهادی و محاسبات تئوری است.

گام ۵: هدف از این گام بازسازی ویدیوی بزرگنمایی شده‌ی هر یک از موده‌های فعال در سازه و در واقع استخراج اشکال مودی آن‌ها است. به همین منظور در این مرحله تکنیک بزرگنمایی حرکت، در هر مقیاس مکانی، بر روی پاسخ‌های مودال تخمین زده شده اعمال می‌شود.

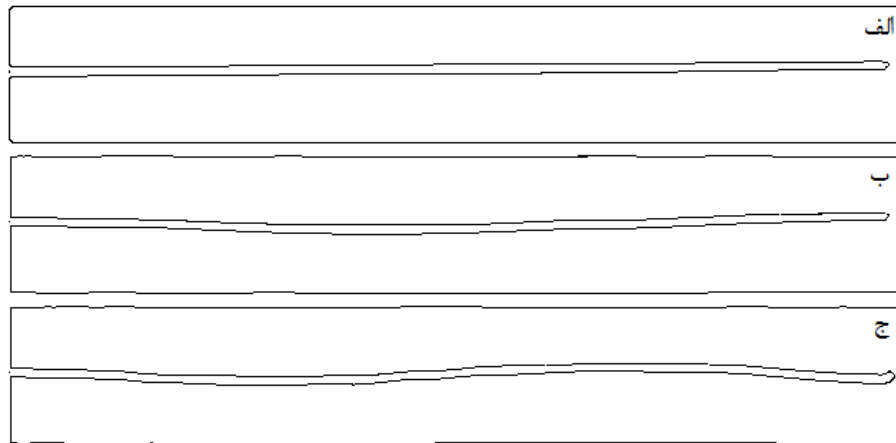
به‌عنوان مثال برای بزرگنمایی مود اول ابتدا پاسخ مودال آن ( $q_1$ ) با ضریب بزرگنمایی  $\alpha = 40$  و پاسخ دیگر مودها ( $q_2, q_3$ ) با ضریب کوچکنمایی  $\beta = -1$  ضرب شده‌اند، سپس معکوس تکنیک BSS و PCA در جهت بازسازی ماتریس فاز انجام شده است. در نهایت با ضرب ماتریس فاز بازسازی شده در زیرباند اصلی و جمع پاسخ‌های بزرگنمایی شده فیلتر در مقیاس‌های مختلف، ویدیوی بزرگنمایی شده مود اول حاصل شده است.

گام ۶: در گام آخر نیز به‌منظور استخراج شکل مود با وضوح بالا، روش تشخیص لبه‌ی گنی<sup>۱</sup> بر روی هر فریم از ویدیوی بزرگنمایی شده اعمال شده است.

گام‌های ۵ و ۶ به‌منظور استخراج سایر شکل‌های مودی و بازسازی ویدیوی بزرگنمایی شده‌ی آن‌ها تکرار شده است. ضرایب بزرگنمایی موده‌های دوم و سوم به ترتیب برابر ۱۷۰ و ۲۰۰ در نظر گرفته شده است. در شکل ۵-۷ اشکال مودی استخراج شده برای هر ۳ مود فعال در سازه نمایش داده شده‌اند.

---

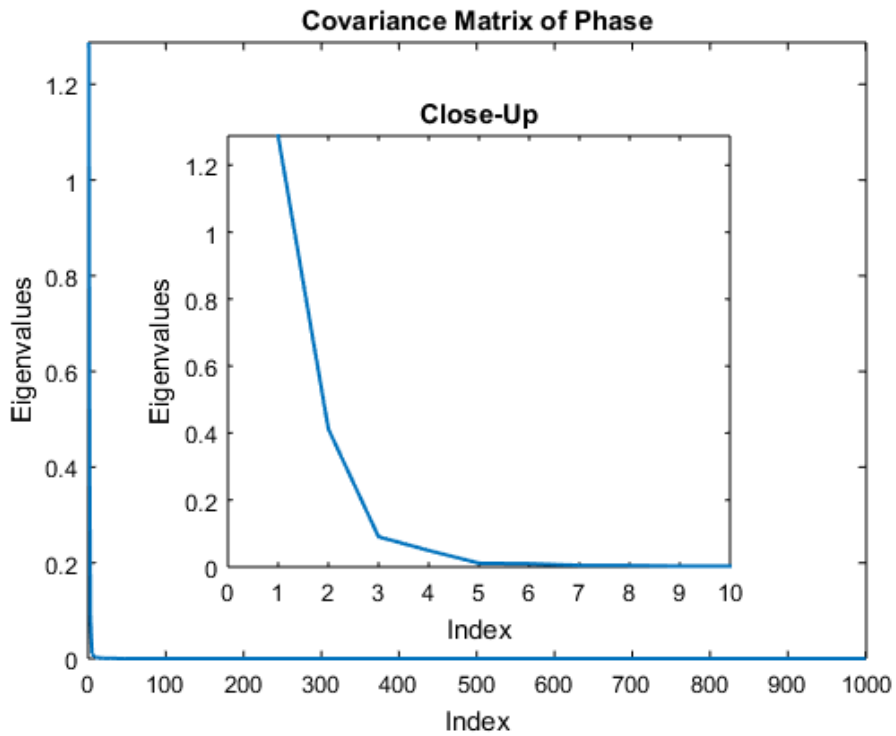
<sup>۱</sup>Canny



شکل ۵-۷. اشکال مودی استخراج شده: الف. شکل مود اول ( $\alpha = 40$ )، ب. شکل مود دوم ( $\alpha = 170$ )، ج. شکل مود سوم ( $\alpha = 200$ ) - (ارتعاش آزاد تیر یکسر گیردار فولادی)

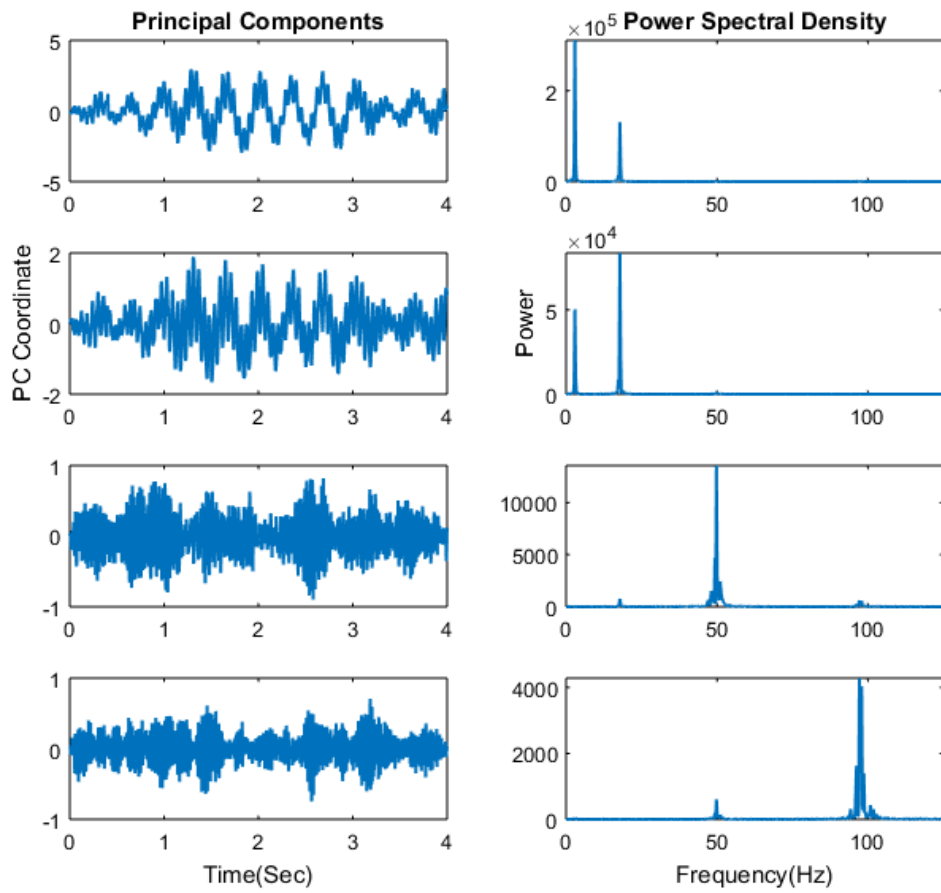
### ۵-۲-۲-۲- ارتعاش تصادفی

در این آزمون پارامترهای مودال تیر یکسر گیردار فولادی تحت اثر ورودی تصادفی (نویز سفید) و با استفاده از روش اجزای محدود محاسبه شده است. سپس ویدیوی ارتعاش آن با نرخ نمونه برداری ۲۵۰ فریم بر ثانیه و تنها بر اساس ترکیب ۴ مود اول سازه در مدت زمان ۴ ثانیه بازسازی و ذخیره شد. در گام بعد پس از اعمال الگوریتم بر ویدیوی به دست آمده، طی روند اجرای آن مشاهده شد که مقادیر ویژه محاسبه شده برای ماتریس کوواریانس فاز، وجود تنها ۴ مود فعال در ارتعاش سازه را نشان می دهد. در شکل ۵-۸ توزیع این مقادیر قابل مشاهده است.



شکل ۵-۸. توزیع مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس فاز (ارتعاش تصادفی تیر یکسر گیردار فولادی)

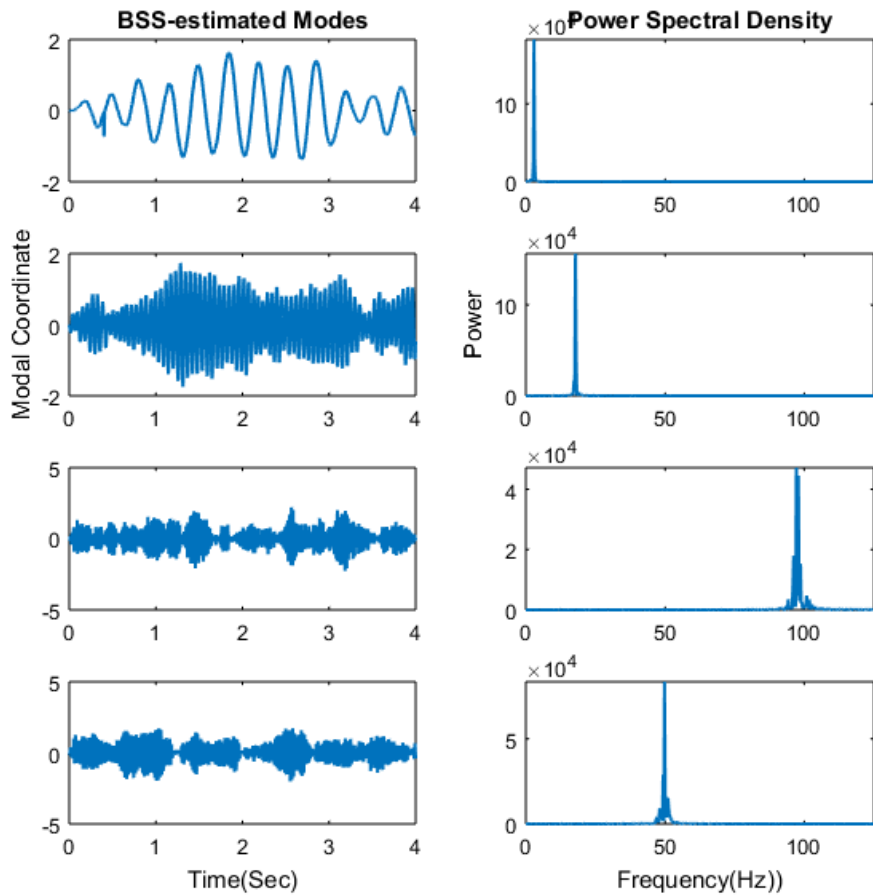
همچنین هر یک از مولفه‌های اصلی به دست آمده که در شکل ۵-۹ نمایش داده شده‌اند، به صورت ترکیبی از ۴ مود فعال نمایان شده‌اند. در مرحله‌ی بعد مولفه‌های اصلی با استفاده از روش جداساز کور منابع به پاسخ‌های مودال منفرد، مطابق با شکل ۵-۱۰ تجزیه شدند.



شکل ۵-۹. مولفه‌های اصلی ماتریس فاز مکانی-زمانی در مقیاس اول و چگالی طیفی توان متناظر با هریک (ارتعاش تصادفی تیر یکسر گیردار فولادی)

فرکانس و میرایی هریک از موده‌های به‌دست‌آمده نیز به‌ترتیب با استفاده از تبدیل فوریه و تکنیک کاهش تصادفی<sup>۱</sup> محاسبه و در جدول ۵-۳ ارائه شده‌اند. مقایسه‌ی پارامترهای محاسبه‌شده با مقادیر تئوری، بار دیگر دقت و صحت نتایج روش پیشنهادی را به اثبات رسانید. درگام آخر حرکت هر یک از مودها با استفاده از تکنیک بزرگنمایی حرکت تقویت و ویدیوی بزرگنمایی شده آن‌ها بازسازی شد. شکل ۵-۱۱ نیز شکل‌های مودی استخراج شده را نشان می‌دهد.

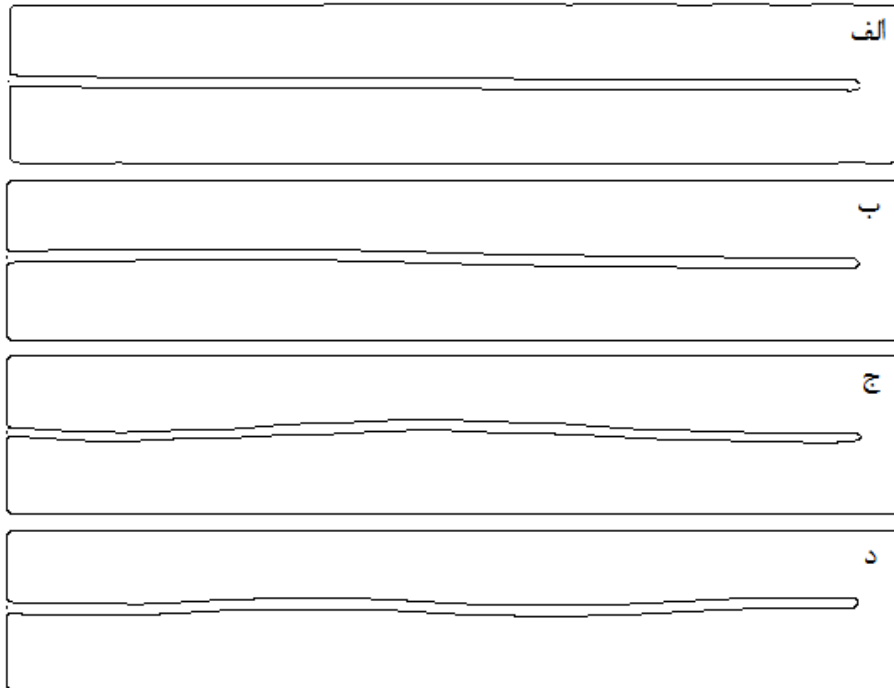
<sup>۱</sup>Random decrement technique (RDT)



شکل ۵-۱۰. پاسخ‌های مودال تخمین زده شده با استفاده از الگوریتم BSS و چگالی طیفی توان متناظر با هر یک (ارتعاش تصادفی تیر یکسر گیردار فولادی)

جدول ۵-۳. پارامترهای مودال تئوری در مقایسه با مقادیر تخمینی برای ویدیوی بازسازی شده‌ی ارتعاش تصادفی تیر یکسر گیردار فولادی

نسبت میرایی (درصد)		فرکانس (هرتز)		مود
تخمینی	تئوری	تخمینی	تئوری	
۱,۹۵	۲	۲,۹۳	۲,۸۴	۱
۰,۸۴	۰,۸	۱۷,۸۲	۱۷,۸۳	۲
۱,۰۶	۱	۴۹,۸۰	۴۹,۹۳	۳
۰,۸۳	۰,۹	۹۷,۹۰	۹۷,۸۴	۴



شکل ۵-۱۱. اشکال مودی استخراج شده: الف. شکل مود اول ( $\alpha = 200$ )، ب. شکل مود دوم ( $\alpha = 300$ )، ج. شکل مود سوم ( $\alpha = 600$ )، د. شکل مود چهارم ( $\alpha = 700$ )\_ ارتعاش تصادفی تیر یکسر گیردار فولادی

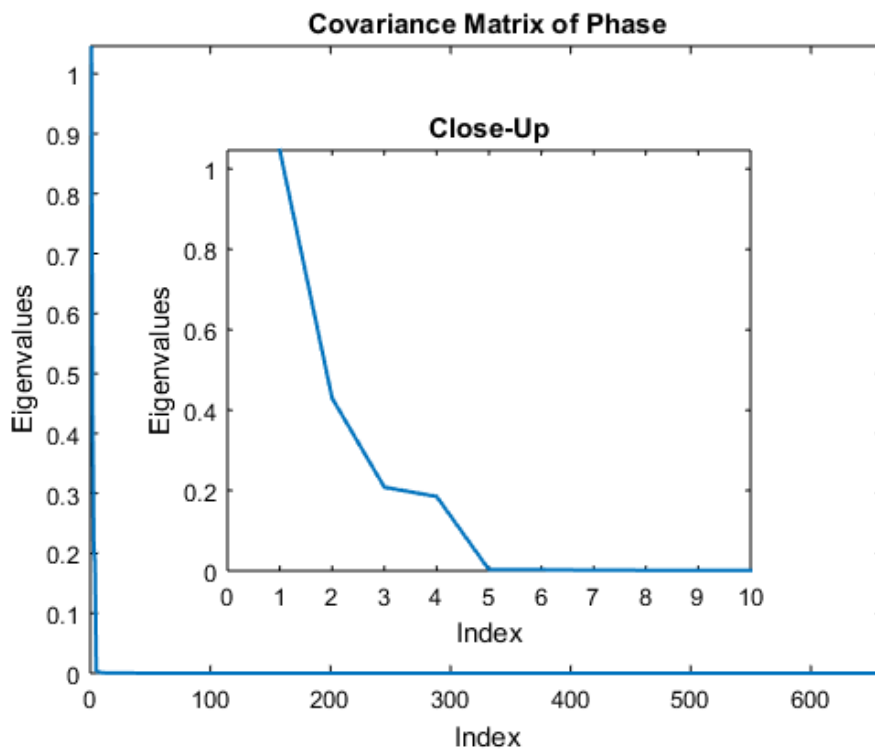
### ۵-۲-۳- تیر دو سر مفصل

### ۵-۲-۳-۱- ارتعاش آزاد

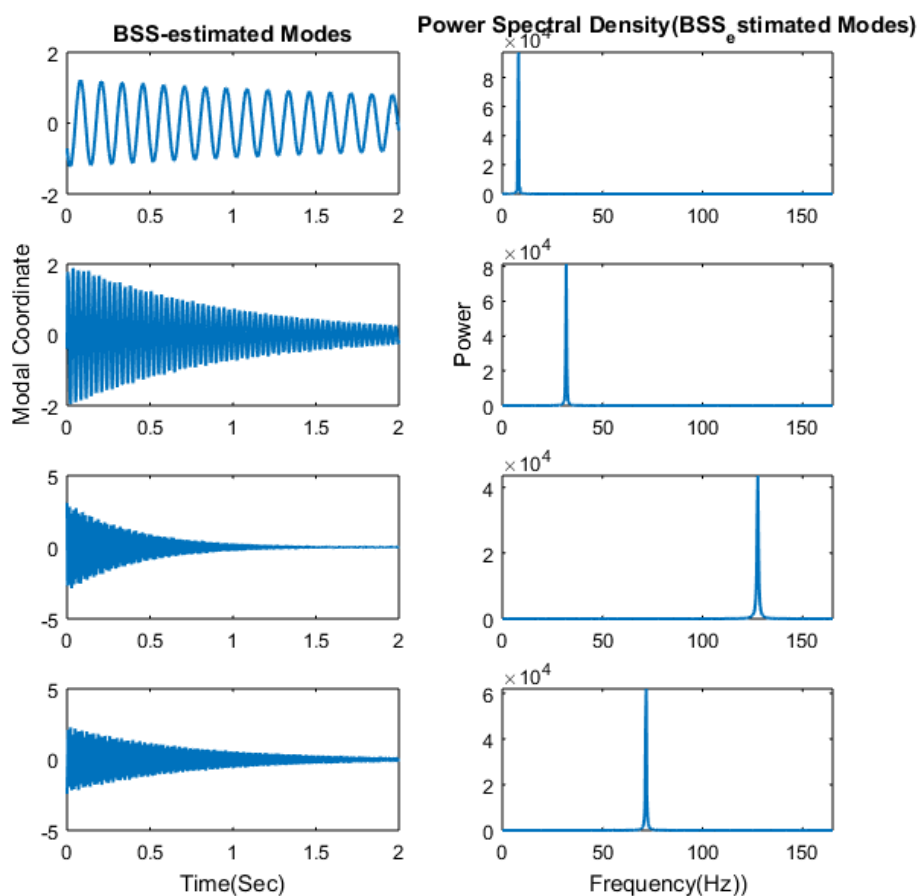
در این حالت پارامترهای مودال یک تیر فولادی دو سر مفصل با مشخصات ارائه شده در جدول ۵-۱ محاسبه گردید. سپس با اعمال الگوریتم توسعه یافته بر ویدیوی ارتعاش آزاد آن که با نرخ ۳۰۰ فریم بر ثانیه و در مدت زمان ۲ ثانیه بازسازی شده بود، پارامترهای مودال ۴ مود فعال در سازه تخمین زده شدند. تشخیص تعداد مودهای فعال در سازه بر اساس توزیع مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس فاز، مطابق با شکل ۵-۱۲ انجام شده است. مقادیر فرکانس و میرایی محاسبه شده بر اساس شکل ۵-۱۳، در مقایسه



با محاسبات تئوری، در جدول ۴-۵ ارائه شده است. شکل مود استخراج شده برای هریک از مودهای فعال در سازه نیز در شکل ۱۴-۵ نمایش داده شده است.



شکل ۱۴-۵. توزیع مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس فاز (ارتعاش آزاد تیر دو سر مفصل فولادی)



شکل ۵-۱۳. پاسخ‌های مودال تخمین زده‌شده با استفاده از الگوریتم BSS و چگالی طیفی توان متناظر با هر یک (ارتعاش آزاد تیر دو سر مفصل فولادی)

جدول ۴-۵. پارامترهای مودال تئوری در مقایسه با مقادیر تخمینی برای ویدیوی بازسازی شده‌ی ارتعاش آزاد تیر دو سر مفصل فولادی

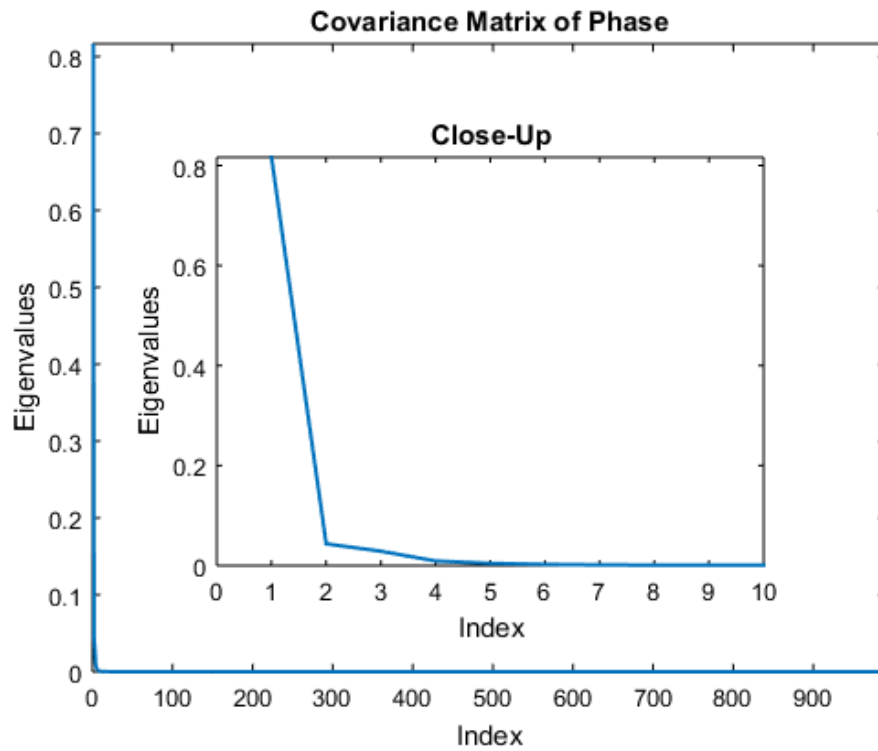
نسبت میرایی (درصد)		فرکانس (هرتز)		مود
تخمینی	تئوری	تخمینی	تئوری	
۰,۴۳	۰,۴	۸,۰۰	۷,۹۷	۱
۰,۵	۰,۵	۳۱,۹۰	۳۱,۸۹	۲
۰,۳	۰,۳	۷۱,۸۷	۷۱,۷۵	۳
۰,۳	۰,۳	۱۲۷,۶	۱۲۷,۵۶	۴

الف
ب
ج
د

شکل ۵-۱۴. اشکال مودی استخراج شده: الف. شکل مود اول ( $\alpha = 200$ )، ب. شکل مود دوم ( $\alpha = 250$ )، ج. شکل مود سوم ( $\alpha = 300$ )، د. شکل مود چهارم ( $\alpha = 300$ ) (ارتعاش آزاد تیر دو سر مفصل فولادی)

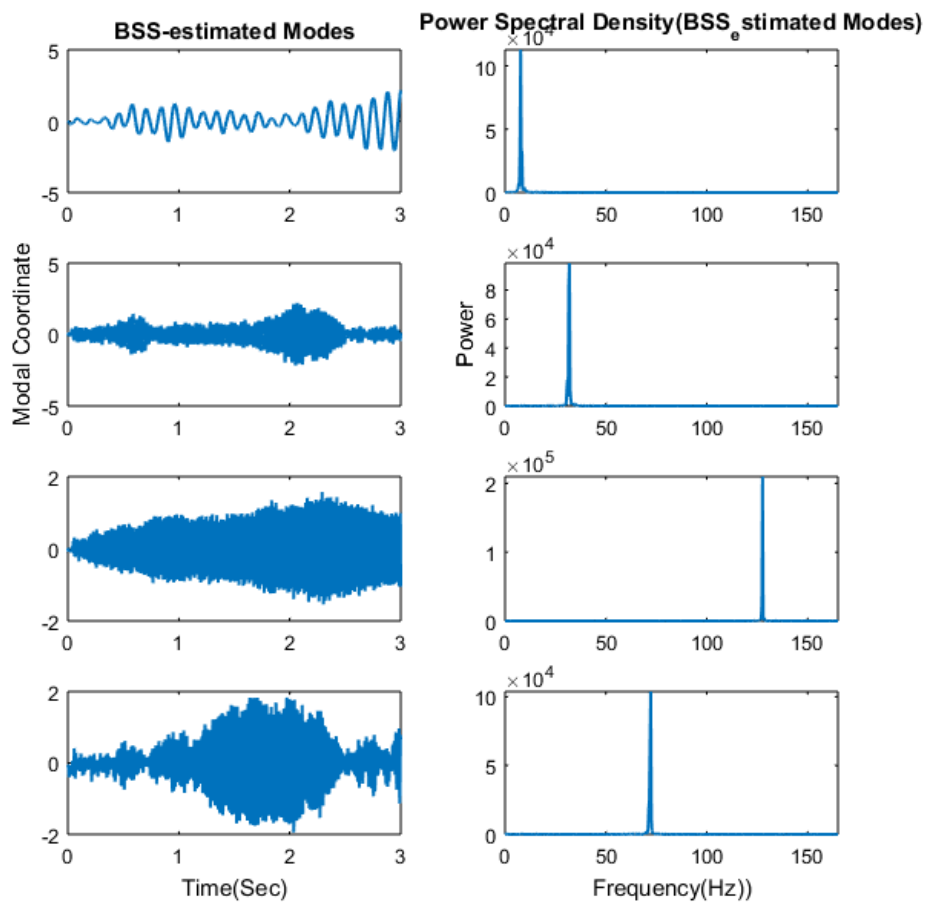
### ۵-۲-۳-۲- ارتعاش تصادفی

در این بخش به بررسی ارتعاش تصادفی تیر دو سر مفصل فولادی می‌پردازیم که پارامترهای مودال تئوری آن با استفاده از روش المان محدود محاسبه و به مدت ۳ ثانیه با نرخ نمونه‌برداری ۳۰۰ فریم بر ثانیه بازسازی شده است. برای ایجاد ارتعاش تصادفی سازه، از نویز سفید به‌عنوان نیروی خارجی استفاده شده است. با اعمال الگوریتم پیشنهادی بر این ویدیو، بر اساس توزیع مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس فاز مطابق با شکل ۵-۱۵ چهار مود فعال در سازه شناسایی شده است، زیرا ویدیوی ارتعاش سازه بر اساس ترکیب ۴ مود اول سازه بازسازی شده بود.



شکل ۵-۱۵. توزیع مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس فاز (ارتعاش تصادفی تیر دو سر مفصل فولادی)

پاسخ هر یک از مودهای فعال سازه در شکل ۵-۱۶ ترسیم شده است. فرکانس‌ها و میرایی هر یک نیز در مقایسه با مقادیر تئوری در جدول ۵-۵ گزارش شده است. همچنین شکل‌های مودی استخراج شده در شکل ۵-۱۷ قابل مشاهده هستند.



شکل ۵-۱۶. پاسخ‌های مودال تخمین زده شده با استفاده از الگوریتم BSS و چگالی طیفی توان متناظر با هر یک (ارتعاش تصادفی تیر دو سر مفصل فولادی)

جدول ۵-۵. پارامترهای مودال تئوری در مقایسه با مقادیر تخمینی برای ویدیوی بازسازی شده‌ی ارتعاش تصادفی تیر دو سر مفصل فولادی

نسبت میرایی (درصد)		فرکانس (هرتز)		مود
تخمینی	تئوری	تخمینی	تئوری	
۱,۱۵	۱	۷,۷۳	۷,۷۹	۱
۰,۴۹	۰,۵	۳۱,۹	۳۱,۸۹	۲
۰,۳	۰,۳	۷۲,۱۹	۷۱,۷۵	۳
۰	۰	۱۲۷,۶	۱۲۷,۵۶	۴

الف
ب
ج
د

شکل ۵-۱۷. اشکال مودی استخراج شده: الف. شکل مود اول ( $\alpha = 150$ )، ب. شکل مود دوم ( $\alpha = 400$ )، ج. شکل مود سوم ( $\alpha = 700$ )، د. شکل مود چهارم ( $\alpha = 1000$ )\_ (ارتعاش تصادفی تیر دو سر مفصل فولادی)

نتایج بررسی شده در چهار حالت فوق بیانگر این است که الگوریتم خروجی\_محور توسعه یافته قادر به شناسایی و تخمین دقیق فرکانس های تشدید و نسبت های میرایی مودهای فعال در سازه است. همچنین توانایی آن در ارائه اشکال مودی با وضوح بالا تنها با استفاده از اندازه گیری های ویدیویی به دست آمده از سازه نیز مورد تأیید قرار گرفته است.

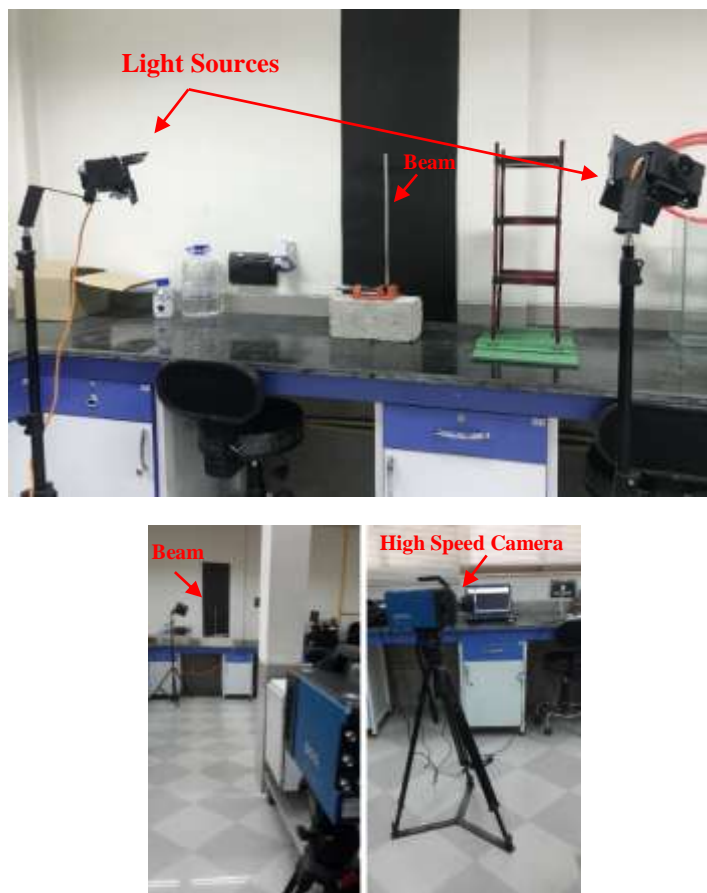
### ۵-۳- آزمون دوم: مدل آزمایشگاهی

پس از صحت سنجی الگوریتم توسعه یافته، در این بخش به ارزیابی عملکرد آن در شرایط آزمایشگاهی می پردازیم. به همین منظور در ابتدا با بررسی شرایط اندازه گیری ویدیویی به دست آمده از ارتعاش آزاد یک مدل آزمایشگاهی تیر یکسر گیردار آلومینیومی که در محیط آزمایشگاه و با استفاده از دوربین سرعت\_بالا تهیه شده است، به شناسایی پارامترهای مودال آن می پردازیم. در گام بعد نیز ارتعاش تصادفی

تیر یکسر گیردار آلومینیومی را که در پژوهش دیویس و همکاران [۲۴] تهیه شده است، مورد بررسی قرار می‌دهیم.

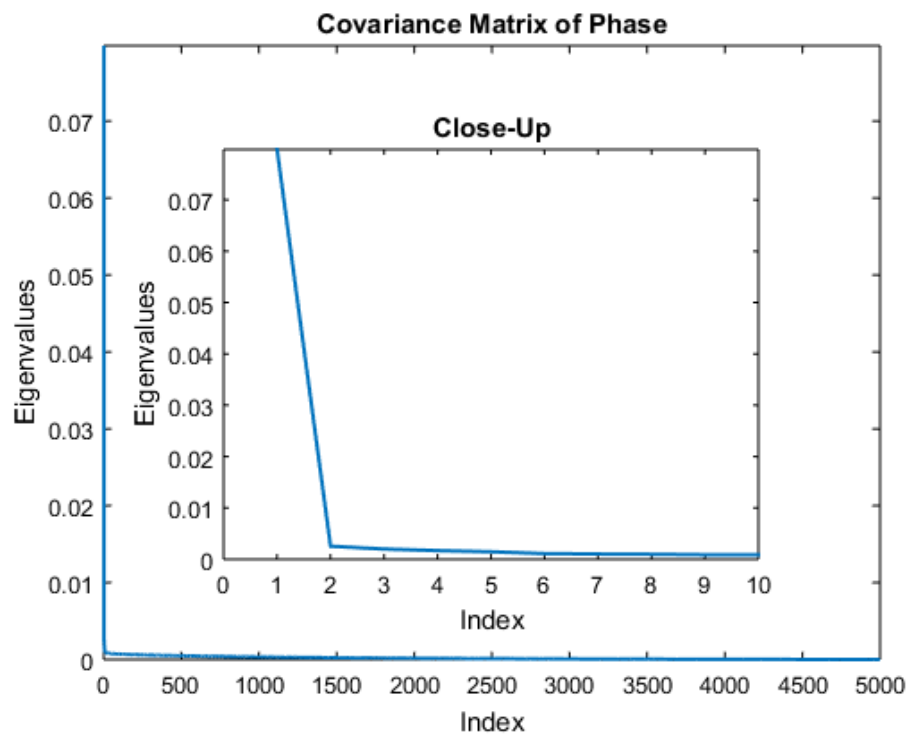
### ۵-۳-۱- ارتعاش آزاد مدل آزمایشگاهی تیر یکسر گیردار

این آزمون با تحریک یک مدل آزمایشگاهی تیر یکسر گیردار آلومینیومی در ناحیه‌ی نزدیک به تکیه‌گاه آغاز شد. هم‌زمان با اعمال ضربه، پاسخ سازه با یک دوربین فیلم‌برداری سرعت‌بالا با وضوح پیکسل  $1008 \times 1008$  و نرخ فریم ۶۰۰ بر ثانیه به مدت ۸٫۳ ثانیه اندازه‌گیری شد. در شکل ۵-۱۸ مدل آزمایشگاهی تیر یکسر گیردار نمایش داده شده است.



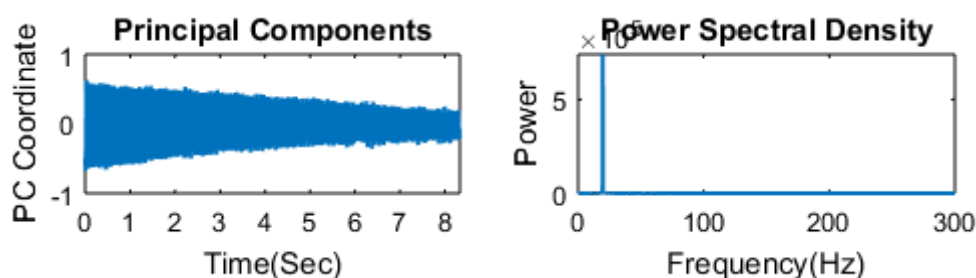
شکل ۵-۱۸. مدل آزمایشگاهی اندازه‌گیری ویدیویی در آزمایش ارتعاش آزاد تیر یکسر گیردار آلومینیومی

در گام بعد جهت بهبود عملکرد الگوریتم و کاهش زمان محاسبات تعداد پیکسل‌ها به  $504 \times 504$  نمونه‌برداری و سپس الگوریتم خروجی-محور و مبتنی بر فاز توسعه یافته اجرا شد. حین اجرای الگوریتم، تجزیه ویژه ماتریس کوواریانس فاز، نشان‌دهنده‌ی حضور تنها یک مود فعال (مود اول) در پاسخ سازه بود. شکل ۵-۱۹ توزیع این مقادیر را نشان می‌دهد. همچنین پاسخ مودال به دست آمده به همراه چگالی طیفی توان متناظر با آن در شکل ۵-۲۰ نمایش داده شده است.



شکل ۵-۱۹. توزیع مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس فاز (ارتعاش آزاد مدل آزمایشگاهی)





شکل ۵-۲۰. مولفه‌ی اصلی ماتریس فاز مکانی-زمانی در مقیاس اول و چگالی طیفی توان متناظر با آن (ارتعاش آزاد مدل آزمایشگاهی)

بر اساس شکل فوق فرکانس مود فعال در سازه ۱۹,۶۳ هرتز محاسبه شد که در مقایسه با مقدار تئوری ۲۰,۳ هرتز دارای دقت نسبتاً خوبی است. نسبت میرایی به‌دست آمده برای مود موردنظر نیز ۰,۱۱ درصد است. به‌طور کلی نسبت میرایی آلومینیوم در مقایسه با فلزات دیگر مانند فولاد و برنج کمتر است [۴۸-۴۹] اما عوامل دیگری هم در کاهش این نسبت برای مود مورد بررسی در این آزمایش، دخیل هستند؛ از جمله آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

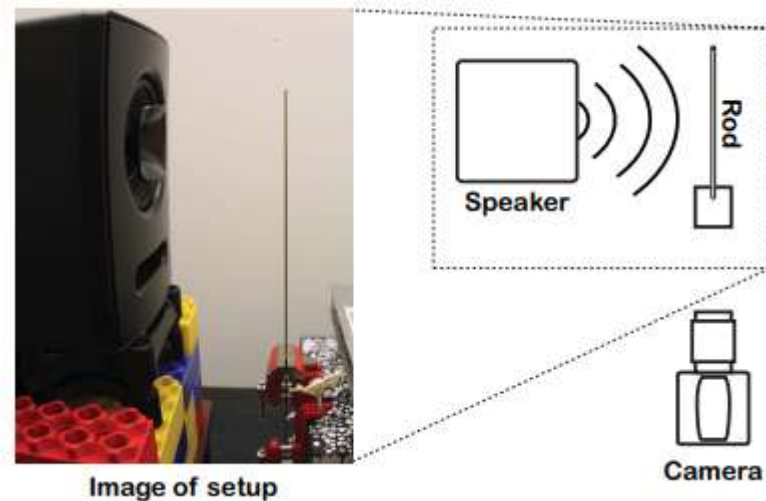
مدل آزمایشگاهی در محدوده‌ی الاستیک مرتعش‌شده است درحالی‌که سازه‌ها در حالت واقعی و تحت محرک‌های طبیعی تا حدی وارد ناحیه‌ی غیرالاستیک شده و میرایی آن‌ها افزایش می‌یابد.

همچنین اتصالات در سازه باعث افزایش میرایی می‌شود در صورتیکه مدل مورد بررسی در این آزمایش مدلی پیوسته بوده و تنها دارای یک اتصال است.

### ۵-۳-۲- ارتعاش تصادفی مدل آزمایشگاهی تیر یکسر گیردار

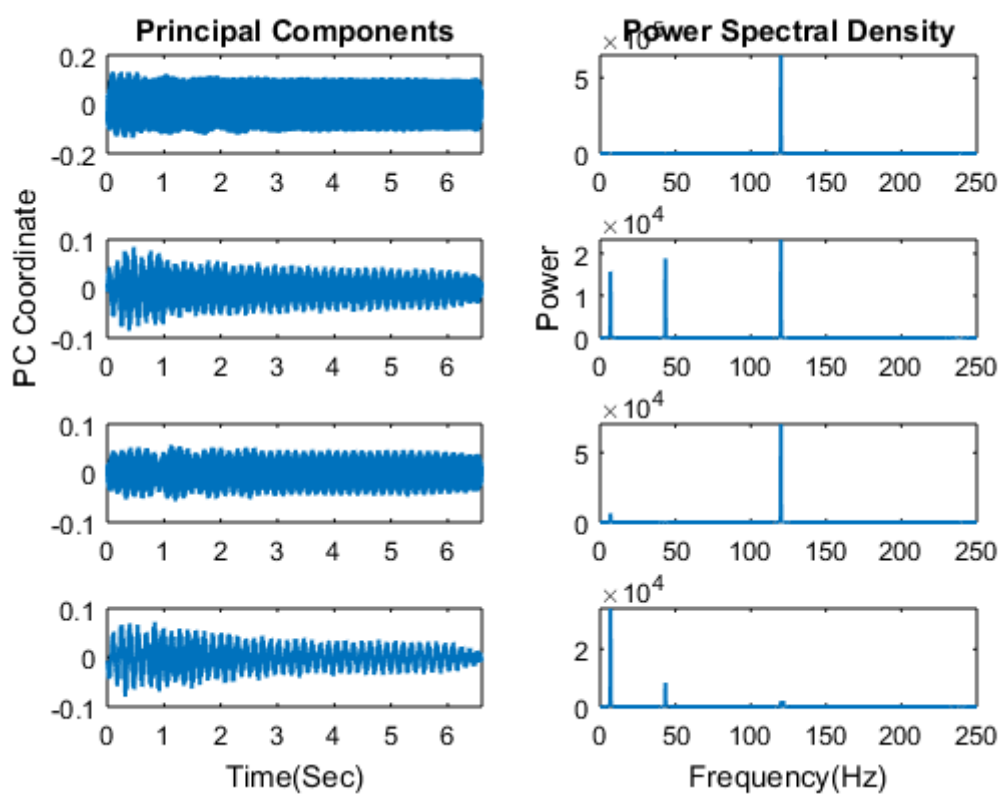
در این آزمون از ویدیوی تهیه‌شده در پژوهش دیویس و همکاران [۲۴] استفاده شده است. در این کار میله‌هایی از فلزات مختلف (فولاد، آلومینیوم، مس و برنج) متصل شده به بلوک بتنی، در طول‌های ۱۵ و ۲۲ اینچ مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. میله‌ها با قرارگیری در مقابل یک بلندگو مرتعش شده و ارتعاش

آن‌ها با یک دوربین سرعت\_بالا با وضوح پیکسل  $2016 \times 80$  و نرخ  $2500$  فریم بر ثانیه به مدت  $17$  ثانیه فیلم‌برداری شده است. نمایی از مدل آزمایشگاهی اندازه‌گیری ویدیویی در شکل ۵-۲۱ نمایش داده شده است.

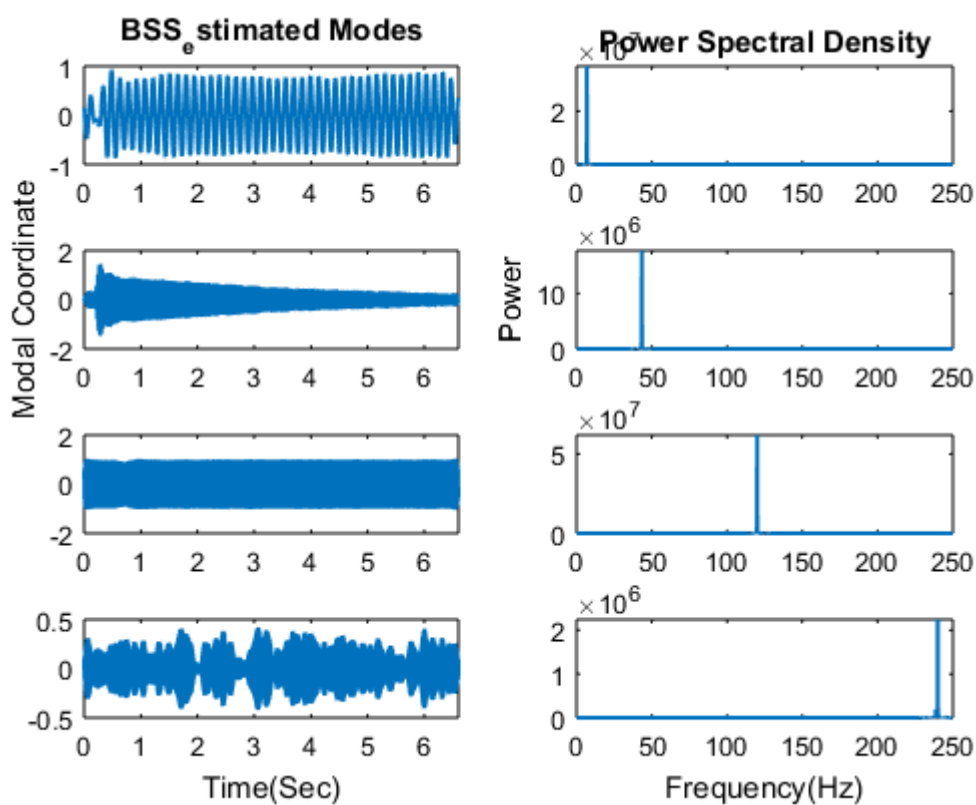


شکل ۵-۲۱. مدل آزمایشگاهی اندازه‌گیری ویدیویی در آزمایش ارتعاش تصادفی تیر یکسر گیردار با استفاده از بلندگو [۲۴]

در پژوهش حاضر، با اعمال الگوریتم پیشنهادی بر ویدیوی ارتعاش تیر آلومینیومی به طول  $22$  اینچ پارامترهای مودال برای چهار مود اول آن استخراج شدند. به منظور کاهش زمان محاسبات تنها  $6,6$  ثانیه از اندازه‌گیری ویدیویی به عنوان ورودی الگوریتم توسعه‌یافته در نظر گرفته شد. مولفه‌های اصلی و پاسخ‌های مودال به دست آمده به همراه چگالی طیفی توان متناظر با هر یک در شکل‌های ۵-۲۲ و ۲۳-۵ ترسیم شده است. فرکانس‌ها و میرایی‌های محاسبه شده نیز در مقایسه با نتایج اعلام شده در مرجع [۲۴] در جدول ۵-۶ ارائه شده‌اند.



شکل ۵-۲۲. مولفه‌های اصلی ماتریس فاز مکانی-زمانی در مقیاس اول و چگالی طیفی توان متناظر با هریک (ارتعاش تصادفی مدل آزمایشگاهی [۲۴])



شکل ۵-۲۳. پاسخ‌های مودال تخمین زده شده با استفاده از الگوریتم BSS و چگالی طیفی توان متناظر با هر یک (ارتعاش تصادفی مدل آزمایشگاهی [۲۴])

جدول ۵-۶. پارامترهای مودال تخمینی برای تیر یکسر گیردار آلومینیومی به طول ۲۲ اینچ در مقایسه با نتایج مرجع [۲۴]

نسبت میرایی (درصد)		فرکانس (هرتز)		مود
روش حاضر	مرجع [۲۴]	روش حاضر	مرجع [۲۴]	
۰,۲۷	—	۶,۸۶	۶,۸۶	۱
۰,۵	—	۴۳,۳۳	۴۳,۳۵	۲
۰	—	۱۲۰	۱۲۱,۴۸	۳
۰	—	۲۳۹,۹۱	۲۳۸,۱۷	۴

\* در مرجع [۲۴] میرایی محاسبه نشده است.

بر اساس مقایسه انجام شده در جدول فوق، مشاهده می شود که خروجی الگوریتم توسعه یافته و مقادیر ارائه شده در مرجع [۲۴] دارای تطابق خوبی هستند. اشکال مودی این سازه به دلیل فرمت خاص ویدیوی مورد استفاده قابل بازسازی نبود.



## فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادها

## ۶-۱- نتیجه گیری

در پایان نامه‌ی حاضر به پیاده‌سازی یک الگوریتم آنالیز مودال خروجی-محور پرداخته شده است. الگوریتم پیشنهادی از یک تکنیک نمایش و تجزیه‌ی چندمقیاسی و رویکرد جداسازی کور منبع، برای استخراج مدل‌سازی و دست‌کاری فاز پیکسل‌های مکانی-زمانی و میدان-کامل استفاده می‌کند که ارتعاش محلی سازه را تنها در اندازه‌گیری‌های ویدیویی کدگذاری می‌کنند. بنابراین قادر به استخراج فرکانس‌های تشدید، نسبت‌های میرایی و اشکال مودی با وضوح بالا، با استفاده از اندازه‌گیری‌های ویدیویی به دست آمده از سازه است.

در مقایسه با روش‌های مبتنی بر دید متداول، این تکنیک نیاز به آماده‌سازی سطح سازه‌ای ندارد. همچنین قادر است هر یک از مولفه‌های مودال در سازه را بدون دخالت کاربر شناسایی و استخراج کند، بنابراین در یک کارآمد و نسبتاً مستقل قابل اجرا است. علت استفاده از تکنیک بزرگنمایی حرکت نیز برای شناسایی و تقویت مودهای ضعیف که در شناسایی مودال عملیاتی به‌ویژه در حضور نویز، بسیار شایع و چالش‌برانگیز است، ارائه شده است.

به منظور صحت‌سنجی الگوریتم پیشنهادی، ویدیوی ارتعاش آزاد و تصادفی دو تیر فولادی یکسر گیردار و دو سر مفصل با پارامترهای مودال مشخص، در محیط نرم‌افزار متلب بازسازی شد. با پیاده‌سازی الگوریتم بر ویدیوهای تهیه شده و مقایسه‌ی خروجی آن‌ها با مقادیر تئوری، عملکرد روش مورد تایید قرار گرفت. طی روند تعیین مقادیر تئوری پارامترهای مودال و بازسازی ویدیوی ارتعاش هر یک از تیرها، در انتخاب مقادیر فرکانس‌های تشدید هیچ‌گونه محدودیتی وجود نداشت و تنها باید نرخ نمونه‌برداری مناسب در نظر گرفته می‌شد تا تمامی فرکانس‌های مورد نظر قابل شناسایی باشند. این امر با استفاده از قضیه‌ی نایکوئیست میسر شد. نسبت‌های میرایی سازه نیز در جهت انطباق با میرایی مودال سازه‌های متعارف کمتر از ۵ درصد در نظر گرفته شد حال آن‌که با در نظر گرفتن نسبت‌های میرایی بالاتر نیز نتایج رضایت‌بخش بود. به‌طور کلی دقت مقادیر محاسبه شده برای نسبت میرایی قابل افزایش است اگر تعداد



نمونه‌های زمانی مورد بررسی افزایش یابد، زیرا روش مورد استفاده برای محاسبه‌ی میرایی بر اساس خروجی الگوریتم، در نمونه‌های زمانی بیشتر دقت بهتری را ارائه می‌دهد. اما در این پژوهش به منظور کاهش زمان و حجم محاسبات تعداد نمونه‌های زمانی کمتری مورد بررسی قرار گرفته است. ویدیوی ارتعاش هر یک از مودهای منفرد و به دنبال آن استخراج اشکال مودی نیز با موفقیت انجام شد. همچنین بر اساس آزمایشات انجام‌شده مشخص شد که می‌توان مقدار ضریب بزرگنمایی هر یک از آن‌ها را در یک طیف گسترده با نتایج رضایت‌بخش تنظیم کرد.

پس از صحت‌سنجی الگوریتم توسعه‌یافته، در گام بعد به ارزیابی عملکرد الگوریتم در شرایط آزمایشگاهی پرداخته شد. به این صورت که طی یک آزمون آزمایشگاهی، ویدیوی ارتعاش آزاد یک تیر یکسر گیردار آلومینیومی در مقیاس آزمایشگاهی، با استفاده از یک دوربین سرعت-بالا ثبت و پارامترهای مودال برای تنها مود فعال در آن با موفقیت شناسایی شده‌اند. علت شناسایی تنها یک مود فعال در این آزمون، عدم وجود دوربین مناسب برای تهیه‌ی ویدیو از ارتعاش سازه شناخته‌شد که قادر به ثبت ارتعاشات ریز سازه نبوده و تنها حرکت کلی آن را که در قالب شکل مود اول سازه نمایان شده، ذخیره کرده است. زیرا تنها مود اول سازه از نسبت سیگنال به نویز بالایی برخوردار بوده و دامنه‌ی سایر مودها به علت نویز بالا و عدم وجود دوربین مناسب قابل تشخیص و ثبت نبوده است. در پایان با اعمال الگوریتم بر ویدیوی تهیه‌شده در پژوهشی دیگر، عملکرد الگوریتم پیشنهادی در شناسایی مودال سازه تیر یکسر گیردار در محیط آزمایشگاه، تحت ارتعاش تصادفی نیز مورد بررسی و تأیید قرار گرفت.

در این پژوهش، الگوریتم ارائه‌شده تنها در جهت شناسایی پارامترهای مودال سازه‌های ساده مورد استفاده قرار گرفته است درحالی‌که برای شناسایی سازه‌های پیچیده نیز قابل اجرا است. برای اثبات این قضیه ارتعاش آزاد یک سازه‌ی ۳ طبقه در محیط آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفت. در این مورد نیز مجدداً به دلیل کمبود امکانات آزمایشگاهی، از جمله دوربین مناسب برای ثبت اندازه‌گیری صحیح و

کامل از سازه، باز هم تنها مود اول سازه قابل شناسایی بود. به همین دلیل از ارائه‌ی نتایج آن صرف‌نظر شد.

## ۶-۲- پیشنهادها

با توجه به پتانسیل الگوریتم ارائه‌شده در آنالیز مودال عملیاتی، پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آتی به توسعه آن در کارهای عملی و در محیط باز پرداخته شود. همچنین با توجه به اینکه سازه‌ها در دنیای واقعی دارای حرکت ارتعاش درون صفحه‌ای و خارج از صفحه هستند، لازم است روش پیشنهادی به سه بعد گسترش یابد. تعمیم روش ارائه‌شده برای اندازه‌گیری‌ها با استفاده از دوربین‌های معمولی (با نرخ نمونه‌برداری پایین)، پیشنهاد دیگری برای پژوهشگران است.

مراج

- [1] Doebling, S. W., Farrar, C. R., & Prime, M. B. (1998). A summary review of vibration-based damage identification methods. *Shock and vibration digest*, 30(2), 91-105.
- [2] McNeill, S. I. (2007). Modal identification using blind source separation techniques. ProQuest.
- [3] Friswell, M., & Mottershead, J. E. (2013). *Finite element model updating in structural dynamics* (Vol. 38). Springer Science & Business Media.
- [4] Ewins, D. J. (2000). Modal testing: theory, practice and application, vol. 2. *Mechanical engineering research studies*. Research Studies Press.
- [5] Brincker, R., & Ventura, C. (2015). *Introduction to operational modal analysis*. John Wiley & Sons.
- [6] Yang, Y., Dorn, C., Mancini, T., Talken, Z., Nagarajiah, S., Kenyon, G., ... & Mascareñas, D. (2017). Blind identification of full-field vibration modes of output-only structures from uniformly-sampled, possibly temporally-aliased (sub-Nyquist), video measurements. *Journal of Sound and Vibration*, 390, 232-256.
- [7] Fan, W., & Qiao, P. (2011). Vibration-based damage identification methods: a review and comparative study. *Structural health monitoring*, 10(1), 83-111.
- [8] Stanbridge, A. B., & Ewins, D. J. (1999). Modal testing using a scanning laser Doppler vibrometer. *Mechanical systems and signal processing*, 13(2), 255-270.

- [9] Castellini, P., Martarelli, M., & Tomasini, E. P. (2006). Laser Doppler Vibrometry: Development of advanced solutions answering to technology's needs. *Mechanical systems and signal processing*, 20(6), 1265-1285.
- [10] Di Maio, D., & Ewins, D. J. (2011). Continuous Scan, a method for performing modal testing using meaningful measurement parameters; Part I. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(8), 3027-3042.
- [11] Sutton, M. A., Orteu, J. J., & Schreier, H. (2009). Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications. Springer Science & Business Media.
- [12] Horn, B. K., & Schunck, B. G. (1981). Determining optical flow. *Artificial intelligence*, 17(1-3), 185-203.
- [13] Olaszek, P. (1999). Investigation of the dynamic characteristic of bridge structures using a computer vision method. *Measurement*, 25(3), 227-236.
- [14] Patsias, S., & Staszewskiy, W. J. (2002). Damage detection using optical measurements and wavelets. *Structural Health Monitoring*, 1(1), 5-22.
- [15] Wahbeh, A. M., Caffrey, J. P., & Masri, S. F. (2003). A vision-based approach for the direct measurement of displacements in vibrating systems. *Smart materials and structures*, 12(5), 785.
- [16] Schmidt, T., Tyson, J., & Galanulis, K. (2003). Pull-field dynamic displacement and strain measurement using advanced 3D image correlation photogrammetry: Part 1. *Experimental Techniques*, 27(3), 47-50.
- [17] Lee, J. J., & Shinozuka, M. (2006). A vision-based system for remote sensing of bridge displacement. *Ndt & E International*, 39(5), 425-431.

- [18] Chang, C. C., & Ji, Y. F. (2007). Flexible videogrammetric technique for three-dimensional structural vibration measurement. *Journal of engineering mechanics*, 133(6), 656-664.
- [19] Morlier, J., & Michon, G. (2010). Virtual vibration measurement using KLT motion tracking algorithm. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 132(1), 011003.
- [20] Sadhu, A., Narasimhan, S., & Antoni, J. (2017). A review of output-only structural mode identification literature employing blind source separation methods. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 94, 415-431.
- [21] Wadhwa, N., Rubinstein, M., Durand, F., & Freeman, W. T. (2013). Phase-based video motion processing. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 32(4), 80.
- [22] Simoncelli, E. P., & Freeman, W. T. (1995, October). The steerable pyramid: A flexible architecture for multi-scale derivative computation. In *Proceedings., International Conference on Image Processing* (Vol. 3, pp.444-447). IEEE.
- [23] Yang, Y., Dorn, C., Mancini, T., Talken, Z., Kenyon, G., Farrar, C., & Mascareñas, D. (2017). Blind identification of full-field vibration modes from video measurements with phase-based video motion magnification. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 85, 567-590.
- [24] Davis, A., Bouman, K. L., Chen, J. G., Rubinstein, M., Durand, F., & Freeman, W. T. (2015). Visual vibrometry: Estimating material properties from small motion in video. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 5335-5343).

- [25] Caetano, E., Silva, S., & Bateira, J. (2011). A vision system for vibration monitoring of civil engineering structures. *Experimental Techniques*, 35(4), 74-82.
- [26] Feng, M. Q., Fukuda, Y., Feng, D., & Mizuta, M. (2015). Nontarget vision sensor for remote measurement of bridge dynamic response. *Journal of Bridge Engineering*, 20(12), 04015023.
- [27] Siebert, T., Wood, R., & Splitthof, K. (2009). High speed image correlation for vibration analysis. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol.181, No. 1, p. 012064). IOP Publishing.
- [28] Helfrick, M. N., Niezrecki, C., Avitabile, P., & Schmidt, T. (2011). 3D digital image correlation methods for full-field vibration measurement. *Mechanical systems and signal processing*, 25(3), 917-927.
- [29] Wang, W., Mottershead, J. E., Ihle, A., Siebert, T., & Schubach, H. R. (2011). Finite element model updating from full-field vibration measurement using digital image correlation. *Journal of Sound and Vibration*, 330(8), 1599-1620.
- [30] Warren, C., Niezrecki, C., Avitabile, P., & Pingle, P. (2011). Comparison of FRF measurements and mode shapes determined using optically image based, laser, and accelerometer measurements. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(6), 2191-2202.
- [31] Wang, W., Mottershead, J. E., Siebert, T., & Pipino, A. (2012). Frequency response functions of shape features from full-field vibration measurements using digital image correlation. *Mechanical systems and signal processing*, 28, 333-347.

- [32] Baqersad, J., Niezrecki, C., & Avitabile, P. (2015). Extracting full-field dynamic strain on a wind turbine rotor subjected to arbitrary excitations using 3D point tracking and a modal expansion technique. *Journal of Sound and Vibration*, 352, 16-29.
- [33] Fleet, D. J., & Jepson, A. D. (1990). Computation of component image velocity from local phase information. *International journal of computer vision*, 5(1), 77-104.
- [34] Gautama, T., & Van Hulle, M. A. (2002). A phase-based approach to the estimation of the optical flow field using spatial filtering. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 13(5), 1127-1136.
- [35] Chen, J. G., Wadhwa, N., Cha, Y. J., Durand, F., Freeman, W. T., & Buyukozturk, O. (2015). Modal identification of simple structures with high-speed video using motion magnification. *Journal of Sound and Vibration*, 345, 58-71.
- [36] Cardoso, J. F. (1998). Blind signal separation: statistical principles. *Proceedings of the IEEE*, 86(10), 2009-2025.
- [37] McNeill, S. I., & Zimmerman, D. C. (2008). A framework for blind modal identification using joint approximate diagonalization. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 22(7), 1526-1548.
- [38] Poncelet F., (2010), PhD. thesis, "Experimental Modal Analysis using Blind Source Separation Techniques", Aerospace and Mechanical Engineering Department, University of Liege.



[۳۹] آقابرگی صحاف م ر، (۱۳۸۲)، رساله دکتری: "جداسازی کور منابع همبسته مشترکا ایستان با اجزاء قابل پیش‌بینی کانال لحظه‌ای خطی و تغییرناپذیر با زمان"، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان.

[40] Hazra B., (2010), PhD. thesis, "Hybrid Time and Time-Frequency Blind Source Separation Towards Ambient System Identification of Structures", Civil Engineering Department, University of Waterloo.

[۴۱] بالو پ، (۱۳۹۵)، پایان‌نامه ارشد: "حذف آرتیفکت از سیگنال نوار مغزی با استفاده از جداسازی کور منابع"، دانشکده برق، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.

[42] Hyvärinen, A., & Oja, E. (2000). Independent component analysis: algorithms and applications. *Neural networks*, 13(4-5), 411-430.

[43] McNeill, S. I. (2007). Modal identification using blind source separation techniques. ProQuest.

[44] Antoni, J., & Chauhan, S. (2013). A study and extension of second-order blind source separation to operational modal analysis. *Journal of Sound and Vibration*, 332(4), 1079-1106.

[45] Adelson, E. H., Anderson, C. H., Bergen, J. R., Burt, P. J., & Ogden, J. M. (1984). Pyramid methods in image processing. *RCA engineer*, 29(6), 33-۴۱.

[46] Feeny, B. F., & Kappagantu, R. (1998). On the physical interpretation of proper orthogonal modes in vibrations. *Journal of sound and vibration*, 211(4), 607-616.

[47] Freeman, R. L. (2004). *Telecommunication system engineering* (Vol.82). John Wiley & Sons.

[48] Umashankar, K. S., Abhinav, A., Gangadharan, K. V., & Vijay, D. (2009). Damping behaviour of cast and sintered aluminium. *ARPAN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 4(6), 66-71.

[49] Mevada, H., & Patel, D. (2016). Experimental determination of structural damping of different materials. *Procedia Engineering*, 144, 110-115.

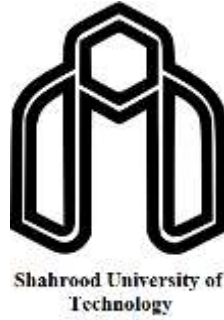
# Abstract

Techniques of health monitoring and assessment of engineering structures by vibrational data are one of the most common methods for identifying structural damages. The basic accepted idea for damage detection based on structural dynamic is variations in physical properties such as mass, damping, and stiffness due to damages that cause the modal properties (natural frequencies, modal ratios and mode shapes) would be detectable. Thus, changes in the modal parameters of a structure implies the changes of structural health condition, i.e., damage. So, experimental measurement and determination of dynamic behaviour of structure are very important. The central technique to describe the dynamic of structures is modal analysis, in which modal parameters controlling dynamic behaviour of the structure are identified. Digital video cameras are one of the measuring systems that are welcomed in this regard. Despite numerous advantages, modal analyses done based on video measurements have created some challenges due to much dependence on high-contrast markers. On the other hand, wide acceptance of these techniques reveals the necessity of developing methods that utilize only the video measurements without additional structural surface preparation.

Hence, providing an operational modal analysis algorithm is the goal of this dissertation. This algorithm doesn't require extra preparation of surface structures by only measured full-field responses taken from high-speed video camera. In order to achieve this goal, the phase of pixels of each frame of video are extracted at different spatial scales by a multi-scale decomposition technique because the local phase indicates the local vibration of structure. Based on extracted phase for each pixel of each frame, the full-field spatial-time matrix of motion can be formed in different spatial scales. Given that the calculated response has a much higher spatial dimension than the modal dimension of the structure, it is required to use dimension reduction technique. The output of dimension reduction technique is the linear combinations of the modal responses in which the number of these mixtures is as same as the number of active modes of structure. So, using output-only algorithms the modal responses can be separated based on the observed mixtures. In the last step, the frequencies and damping ratios for each mode of structure are calculated. Also, by applying the magnification technique to each of these responses and performing the reverse process of video processing, the modes of the structure with high spatial resolution can be reconstructed.

For verification, the free and random vibration video of two simple and cantilever beams with given modal parameters was reconstructed in MATLAB software environment. Then the performance of the proposed method was verified by applying the proposed algorithm to the prepared videos and comparing its output with the theoretical values. In addition, in order to evaluate the performance of the algorithm in experimental condition, a free and random vibration videos of an aluminum beam made in a laboratory environment was investigated using a high-speed camera. Finally, using the developed algorithm, the modal parameters of the aluminum structure were successfully identified.

**Keywords:** Operational Modal Analysis, Non-contact Measurement, Video Processing, Complex Steerable Pyramid, Blind Source Separation, Motion Magnification



Faculty of Civil Engineering  
M.Sc. Thesis in Structural Engineering

# **Modal Identification of Structures via Processing of Recorded Videos and Out- put-only Algorithms**

**By:** Afsaneh Bekrpoushideh

**Supervisor**

Dr. Ali Keyhani

**Advisor**

Dr. Alireza Ahmadyfard

January 2020