

الحمد لله الذي
خلقنا من
الحمم



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه

بهبود تکنیک مبتنی بر روش SOBSS در شناسایی پارامترهای مودال سازه

نگارنده:

محمد شفیعی

اساتید راهنما:

دکتر فرنوش باسلیقه

دکتر علی کیهانی

تقدیم بہ پدر دلسوز و مادر مہربانم

بہ پاس تمام صوری ہائشان

و بہ امید جبران اندکی از زحمات بی دریغ شان

تشکر و قدردانی

شکر خدا که هرچه طلب کردم از خدا

بر منتهای همت خود کامران شدم

سپاسگزار الطاف ایزد منان که به یاری و مددش برگی دیگر از دفتر زندگی ورق خورد و مرحله‌ای از مراحل تحصیل به اتمام رسید. خداوند را شاکرم که توفیق قدم گذاشتن در مسیر علم و دانش را بر من روا داشت و از درگاهش طلب یاری برای گذراندن دوره‌های بعدی از این مسیر زیبا و مقدس را دارم.

از اساتید راهنمای گرانقدرم جناب آقای دکتر فرنوش باسلیقه و جناب آقای دکتر علی کیهانی که در تمامی مراحل تحقیق زحمات بی‌دریغی کشیدند و از راهنمایی‌هایشان بنده را بهره‌مند ساختند، سپاسگزارم. از جناب آقای دکتر سعید محمدی که در انجام این پژوهش کمک شایانی به بنده کردند، صمیمانه تشکر می‌کنم. از خداوند مهربان برای همه اساتید گرانقدر سلامتی و توفیق می‌طلبم. از اساتید محترم داور که با وجود مشغله زیاد زحمت مطالعه و داوری این پایان‌نامه را برعهده گرفتند، قدردانی و تشکر می‌نمایم.

از خانواده‌ام که در تمامی مراحل تحصیل و انجام این تحقیق با صبر و شکیبایی مشوقم بودند، ممنون و سپاسگزارم و برای پدر و مادر مهربانم از درگاه خداوند منان طلب طول عمر می‌نمایم. از تمامی دوستان عزیزم که در مدت انجام تحقیق با همفکری و روحیه بخشی موجب دلگرمی بنده شدند، تشکر می‌کنم.

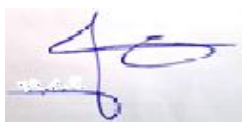
در انتها تمامی نقایص و کاستی‌های احتمالی این پایان‌نامه را به عهده گرفته و از همه عزیزانی که آن را مطالعه می‌کنند خواهشمندم این کاستی‌ها را به بنده گزارش نموده تا در صورت امکان در اولین فرصت اصلاحات را انجام دهم.

تعهد نامه

اینجانب محمد شفیعی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش سازه دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان **بهبود تکنیک مبتنی بر روش SOBSS در شناسایی پارامترهای مودال سازه تحت راهنمایی دکتر فرنوش باسلیقه و دکتر علی کیهانی** متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه 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 پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، 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: ۹۹/۱۲/۶



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 می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

امروزه برای پایش سلامت، کنترل و بهسازی سازه‌هایی که در گذشته ساخته شده‌اند، به دست آوردن مشخصات دینامیکی بسیار حائز اهمیت است. در این سال‌ها روش‌های متنوعی بر پایه دانش پردازش سیگنال که اخیراً پیشرفت‌های قابل توجهی داشته، ارائه شده است. هرکدام از روش‌های مذکور محدودیت‌هایی دارند که در این پایان‌نامه تلاش شده برخی از محدودیت‌های روش جداسازی ناپیدای منابع برطرف شود.

در سازه‌هایی با میرایی بالا، شناسایی مشخصات دینامیکی مانند فرکانس طبیعی، نسبت میرایی و اشکال مودی از اهمیت بسیاری برخوردار است. زیرا وجود ابزار مستهلک کننده انرژی، شناسایی پارامترهای دینامیکی را دشوار می‌کند. در مواردی که خروجی‌ها دارای نویز زیادی هستند و در سازه ابزارهای مستهلک کننده انرژی استفاده شده، روش جداسازی ناپیدای منابع دقت کافی را جهت برآورد پارامترهای مودال ندارد.

از نکات مورد توجه در شناسایی پارامترهای مودال، نحوه تحریک خارجی سازه می‌باشد. این تحریک‌ها می‌توانند از نوع سیگنال‌های ایستا و سیگنال‌های نایستا در نظر گرفته شوند. روش‌های معمول شناسایی سازه قادر به شناسایی پارامترهای مودال تحت تحریک با سیگنال نایستا نیستند.

در این پایان‌نامه روشی ارائه شده که با کارگیری تکنیک همبستگی متقابل اصلاح شده و انجام عملیات بر روی همبستگی متقابل پاسخ‌های سازه، امکان شناسایی پارامترهای مودال تحت تحریک با سیگنال نایستا را فراهم می‌کند. همچنین دقت محاسبه نسبت میرایی در صورت وجود میرایی‌های متوسط به بالا افزایش پیدا کرده است. برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، از شبیه سازی عددی استفاده شده که نتایج نشان می‌دهد با روش پیشنهادی، فرکانس‌های طبیعی و شکل مدهای سازه با خطای کمتر از ۱ درصد برآورد گردیده است. همچنین نسبت‌های میرایی نیز با خطای کمتر از ۶ درصد به دست آمده‌اند. جهت صحت سنجی روش از یک مدل آزمایشگاهی استفاده شده است.

کلمات کلیدی: پایش سلامت سازه، شناسایی سیستم، تحلیل مودال عملیاتی، الگوریتم SOBSS، فیلتر

کردن بازتاب‌ها، روش همبستگی متقابل اصلاح شده

فهرست مطالب

۱- مقدمه.....	۲
۱-۱- پیشگفتار.....	۲
۱-۲- بیان مسئله.....	۳
۱-۳- سوال های تحقیق.....	۵
۱-۴- فرض های تحقیق.....	۵
۱-۵- روش انجام تحقیق.....	۵
۲- مرور چند روش شناسایی سازه.....	۸
۲-۱- پیشگفتار.....	۸
۲-۲- روش زیرفضای تصادفی (SSI).....	۸
۲-۳- روش خوشه کردن بازتاب ها.....	۱۲
۲-۴- روش جداسازی ناپیدای منابع (BSS).....	۱۵
۳- بهبود تکنیک جداسازی ناپیدای منابع در شناسایی پارامترهای مودال سازه.....	۲۴
۳-۱- پیشگفتار.....	۲۴
۳-۲- شناسایی سازه با استفاده از روش جداسازی ناپیدای منابع در صورت محدودیت تعداد سنسورها.....	۲۴
۳-۲-۱- تشریح تکنیک فیلترکردن.....	۲۵
۳-۳- شناسایی سازه با استفاده از روش جداسازی ناپیدای منابع در صورت وجود میرایی های بالا در سازه.....	۳۰
۳-۳-۱- تشریح تکنیک همبستگی متقابل اصلاح شده.....	۳۰
۳-۴- روش پیشنهادی جهت رفع چالش های شناسایی پارامترهای مودال سازه با استفاده از روش جداسازی ناپیدای منابع.....	۳۸
۳-۴-۱- مطالعه موردی اول: شناسایی پارامترهای مودال قاب برشی پنج درجه آزادی.....	۴۱
۳-۴-۲- مطالعه موردی دوم: شناسایی پارامترهای مودال یک سازه معیار.....	۵۳

۴- نتیجه گیری ۶۰

۴- ۱- پیشگفتار ۶۰

۴- ۲- روش پیشنهادی در شناسایی پارامترهای مودال و تشریح نتایج آن ۶۰

۴- ۳- پیشنهاد برای مطالعات آینده ۶۲

پیوست‌ها ۶۴

منابع و مراجع ۶۷

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲- توزیع سنسورهای شتاب در ارتفاع برج کانتون [۲]..... ۱۱
- شکل ۲-۲- بازتاب شتاب برداشت شده در راستای محور X [۲]..... ۱۱
- شکل ۳-۲- فلوجارت روش خوشه کردن [۳]..... ۱۴
- شکل ۴-۲- فلوجارت روش BSS در شناسایی پارامترهای مودال سازه [۶]..... ۱۶
- شکل ۵-۲- فلوجارت روش STFT-ICA برای شناسایی سازه [۱۲]..... ۱۸
- شکل ۶-۲- تأثیر افزایش میرایی در دقت شناسایی مودهای یک سیستم سه درجه آزادی؛ سمت چپ: الگوریتم ICA؛ سمت راست: الگوریتم SOBSS؛ [۵]..... ۲۰
- شکل ۱-۳- (a) تا (c) بازتاب درجه آزادی اول با سطوح مختلف نویز؛ (d) تا (f) بازتاب درجه آزادی چهارم با سطوح مختلف نویز [۱۶]..... ۲۷
- شکل ۲-۳- طیف فوری بازتاب‌های شتاب در درجات آزادی اول و چهارم (a) درجه آزادی اول؛ (b) درجه آزادی چهارم [۱۶]..... ۲۸
- شکل ۳-۳- بازتاب‌های مودال شناسایی شده در دو حالت بدون نویز و نویز ده درصد [۱۶]..... ۲۹
- شکل ۴-۳- مقایسه تأثیر میرایی روی دقت روش‌های شناسایی سازه [۱۸]..... ۳۵
- شکل ۵-۳- تأثیر تعداد پنجره‌ها و تأخیرهای زمانی روی قطری سازی همزمان [۱۸]..... ۳۵
- شکل ۶-۳- همبستگی متقابل بازتاب‌های شتاب [۱۸]..... ۳۶
- شکل ۷-۳- عملیات پنجره کردن روی بازتاب‌های نرمال سفیدسازی شده [۱۸]..... ۳۷
- شکل ۸-۳- فلوجارت روش پیشنهادی..... ۴۰
- شکل ۹-۳- قاب برشی پنج درجه آزادی تحت ارتعاش اجباری..... ۴۱
- شکل ۱۰-۳- سیگنال‌های تحریک در هر درجه آزادی..... ۴۳
- شکل ۱۱-۳- بازتاب شتاب درجه آزادی سوم بدون نویز (الف) و با سطح نویز ۱۰ درصد (ب)؛ بازتاب شتاب درجه آزادی پنجم بدون نویز (پ) و با سطح نویز ۱۰ درصد (ت)..... ۴۴
- شکل ۱۲-۳- طیف فوری بازتاب شتاب درجه آزادی سوم (الف)؛ درجه آزادی پنجم (ب)..... ۴۵
- شکل ۱۳-۳- همبستگی بازتاب‌های درجه آزادی سوم و پنجم که فیلتر اول بر آن‌ها اعمال شده؛ همبستگی بازتاب درجه آزادی سوم با خودش (الف)؛ همبستگی بازتاب درجه آزادی سوم با بازتاب درجه آزادی پنجم (ب)..... ۴۶
- شکل ۱۴-۳- پاسخ‌های مودال قاب برشی پنج درجه آزادی حاصل از شناسایی پارامترهای مودال به روش پیشنهادی..... ۴۸
- شکل ۱۵-۳- سیگنال‌های تحریک در هر درجه آزادی؛ درجه آزادی اول: (الف)، دوم: (ب)، سوم: (پ)، چهارم: (ت)، پنجم: (ث)..... ۴۹
- شکل ۱۶-۳- بازتاب‌های شتاب اندازه‌گیری شده در هر درجه آزادی؛ درجه آزادی اول: (الف)، دوم: (ب)، سوم: (پ)، چهارم: (ت)، پنجم: (ث)..... ۵۰
- شکل ۱۷-۳- پاسخ‌های مودال قاب برشی پنج درجه آزادی حاصل از شناسایی پارامترهای مودال به روش پیشنهادی تحت تحریک سیگنال نایبستا..... ۵۲
- شکل ۱۸-۳- (الف) تصویر از سازه معیار [۲۱]؛ (ب) تصویر مدل اجزا محدود آن [۲۱]..... ۵۳
- شکل ۱۹-۳- بازتاب‌های شتاب در درجات آزادی طبقه اول: (الف) امتداد X ، (ب) امتداد Y ، (پ) پیچشی..... ۵۴
- شکل ۲۰-۳- طیف فوری بازتاب‌های شتاب در درجات آزادی طبقه اول: (الف) امتداد X ، (ب) امتداد Y ، (پ) پیچشی..... ۵۵
- شکل ۲۱-۳- بازتاب‌های شتاب مودال نرمال شده برای مود اول در هر مجموعه از درجات آزادی: (الف) امتداد X ، (ب) امتداد Y ، (پ) پیچشی..... ۵۷

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲- مقایسه فرکانس‌های مودال بدست آمده از برج کانتون برای دو مجموعه داده [۲]..... ۱۲
- جدول ۲-۲- خلاصه نتایج فرکانس‌های طبیعی مودال شناسایی شده توسط روش خوشه کردن [۳]..... ۱۵
- جدول ۳-۲- خلاصه نتایج نسبت‌های میرایی مودال شناسایی شده توسط روش خوشه کردن [۳]..... ۱۵
- جدول ۱-۳- نتایج حاصل از شناسایی پارامترهای مودال سازه با استفاده از روش فیلتر کردن بازتاب‌ها تحت ارتعاش آزاد [۱۶]..... ۲۸
- جدول ۲-۳- نتایج حاصل از مقایسه روش MCC با روشهای SOBI, ICA و SSI برای سازه سه درجه آزادی [۱۸]..... ۳۵
- جدول ۳-۳- نتایج شناسایی پارامترهای مودال به روش پیشنهادی و روش فیلتر کردن در دو حالت $C = 0.50m$ و $C = 0.75m$ ۴۷
- جدول ۴-۳- نتایج شناسایی پارامترهای مودال به روش پیشنهادی و روش فیلتر کردن در دو حالت $C = 1m$ و $C = 1.15m$ ۴۷
- جدول ۵-۳- نتایج شناسایی پارامترهای مودال به روش پیشنهادی و روش فیلتر کردن در دو حالت $C = 1m$ و $C = 1.15m$ ۵۱
- جدول ۶-۳- محدوده‌های فرکانسی جهت طراحی فیلترها در هر مجموعه از درجات آزادی..... ۵۵
- جدول ۷-۳- پارامترهای مودال شناسایی شده به وسیله روش پیشنهادی..... ۵۶

علائم و اختصارات

f : فرکانس طبیعی مودهای سازه (Hz)	A یا $[A]$: ماتریس ترکیب در تکنیک BSS
f_{pb} : محدوده فرکانس عبور در فیلترهای میان گذر	C یا $[C]$: ماتریس میرایی سازه
m : تعداد سنسورها یا تعداد بازتاب‌های اندازه‌گیری شده	$E(.)$: عملگر امید ریاضی
n : تعداد درجات آزادی سازه	$F(t)$: نیروی وارد بر سازه
n_f : تعداد فیلترهای مورد نیاز	$[I]$: ماتریس یکه
$q(t)$: بردار بازتاب‌های مودال سازه	K یا $[K]$: ماتریس سختی سازه
t : زمان	M یا $[M]$: ماتریس جرم سازه
$x(t)$: بردار تغییر مکان سازه	MAC : معیار اطمینان مودی
$\ddot{x}(t)$: بردار بازتاب شتاب سازه	N : طول سیگنال یا بازتاب سازه
$\ddot{z}(t)$: بردار بازتاب شتاب فیلترشده سازه	$R_{x,y}(\cdot)$: تابع همبستگی متقابل بردارهای x و y
ω_i : فرکانس طبیعی مود i ام	R_{nij} : سطح نویز در بازتاب درجه آزادی i ام سازه
ω_{dj} : فرکانس میرا شونده در مود j ام	W یا $[W]$: معکوس ماتریس ترکیب در تکنیک BSS
ζ_i : نسبت میرایی مود i ام	BSS : جداسازی ناپیدای منابع
$[\varphi]$: ماتریس حاوی شکل مودهای سازه	EMD : روش تجزیه مودی تجربی
$[\hat{\varphi}]$: ماتریس شکل مودهای ناقص سازه	EMA : آنالیز مودال عملیاتی
	ICA : تحلیل مولفه‌های مستقل
	JAD : قطری‌سازی تقریبی مشترک
	MCC : همبستگی متقابل اصلاح شده
	SOBSS : جداسازی ناپیدای منابع با استفاده از آمار مرتبه دوم
	SSI : روش شناسایی زیرفضای تصادفی
	STFT : تبدیل فوریه زمان کوتاه

فصل اول: مقدمه

۱- مقدمه

۱-۱- پیشگفتار

سازه‌ها در طول عمر مفید خود در اثر شرایط محیطی و بارهای خارجی مانند زلزله، باد، انفجار و ... دچار آسیب می‌شوند. این آسیب‌ها باید قبل از اینکه به سلامت سازه خسارت شدیدی وارد کنند شناسایی شوند. به طور کلی سلامت سازه باید در طول زمان مورد پایش قرار گیرد تا از خرابی ناشی از شرایط محیطی و بارهای وارد بر سازه جلوگیری شود. پایش سلامت سازه^۱ علاوه بر جلوگیری از وقوع آسیب‌های جدی به سازه و افزایش ایمنی، موجب کاهش هزینه‌های نگهداری و افزایش قابلیت اطمینان نیز می‌گردد. همه این موارد در سال‌های اخیر منجر به این شده است که پایش سلامت سازه از موضوعات با اهمیت در حوزه مسائل پژوهشی مهندسی عمران واقع شود.

تغییراتی از قبیل تغییرات هندسی و فیزیکی که بر روی کارایی سازه اثر منفی بگذارد، به عنوان آسیب شناخته می‌شود. به طور عمده این آسیب‌ها باعث تغییراتی در مشخصات دینامیکی سازه مانند فرکانس طبیعی، نسبت میرایی و اشکال مودی می‌گردند. در این مرحله است که شناسایی سیستم به عنوان یک گام اولیه و بنیادی، در زمینه پایش سلامت سازه مطرح می‌شود. در واقع شناسایی سیستم گامی ابتدایی برای پایش سلامت،

¹ Structural health monitoring (SHM)

کنترل و بهسازی سازه نیز می‌باشد. با به دست آوردن مشخصات دینامیکی سازه موجود و مقایسه آن‌ها با مشخصات سیستم بدون آسیب می‌توان گام‌های بعدی یعنی شناسایی و کشف آسیب را برداشت.

در دهه‌های گذشته تعیین مشخصات سازه با عناوینی مانند تحلیل مودال عملیاتی^۱، تحلیل مودال تجربی^۲ و شناسایی مودال^۳ یاد می‌شد. همچنین روش‌های شناسایی سازه، مبتنی بر اندازه‌گیری تحریک خارجی وارد بر سازه و اندازه‌گیری بازتاب آن بود که به روش‌های ورودی-خروجی^۴ معروف بودند. از آن جایی که محاسبه تحریک‌های خارجی در طول عمر مفید سازه به راحتی و دقت قابل اندازه‌گیری نیست، اخیراً جهت شناسایی سازه روش‌هایی که تنها مبتنی بر بازتاب‌های سازه می‌باشند، ارائه می‌شود. این روش‌ها که تحت عنوان خروجی محور^۵ مطرح شدند از دانش پردازش سیگنال بهره می‌برند. از مزیت‌های استفاده از روش‌های خروجی محور این است که سازه تحت بارهای واقعی مورد بررسی قرار می‌گیرد و نیاز به آزمایش‌های مصنوعی که هزینه‌بر و زمان‌بر هستند و گاهی ایمنی سازه را به مخاطره می‌اندازند، نیست. در واقع پاسخ‌های سازه به بارهای واقعی وارد بر آن به شکل سیگنال دریافت می‌شوند. با اعمال فرایندهایی که مبتنی بر روش‌های مختلف شناسایی سازه می‌باشند، از سیگنال‌های دریافتی می‌توان مشخصات سیستم را شناسایی کرد.

۱-۲- بیان مسئله

روش‌های شناسایی سازه را می‌توان بسته به این که در حوزه زمان، فرکانس یا زمان-فرکانس انجام می‌گیرند،

¹ Operational Modal Analysis (OMA)

² Experimental Modal Analysis (EMA)

³ Modal Identification (MI)

⁴ Input-Output methods

⁵ Output-Only method

دسته بندی کرد. مهم ترین روش هایی که جهت شناسایی سازه استفاده می شود و در حوزه زمان انجام می گیرد روش زیرفضای تصادفی^۱ (SSI)، خوشه کردن و روش های مبتنی بر الگوریتم جداسازی ناپیدای منابع^۲ (BSS) می باشند. از میان این روش ها، الگوریتم های مبتنی بر جداسازی ناپیدای منابع مورد توجه این پایان نامه قرار گرفته اند و بررسی خواهند شد.

جداسازی ناپیدای منابع بدون اطلاع از چگونگی منابع و نحوه ترکیب آنها و تنها از روی خروجی های مجموعه ای از سنسورها که ترکیب های مختلف منابع را دریافت می کنند قادر به محاسبه منابع اولیه است. بر همین اساس جزو دسته روش های خروجی محور قرار می گیرد. این روش تحت دو الگوریتم اساسی، یعنی تحلیل مؤلفه مستقل^۳ (ICA) و جداسازی ناپیدای منابع با استفاده از آمار مرتبه دوم^۴ (SOBSS) انجام می شود. روش شناسایی BSS تحت هر دو الگوریتم اساسی خود دارای نقاط ضعفی نیز بوده که پژوهشگران به منظور رفع هر کدام از این نقاط ضعف تکنیک هایی در نظر گرفته اند. تکنیک های فیلتر کردن، پنجره کردن، خوشه کردن و استفاده از تبدیل فوریه زمان کوتاه^۵ (STFT) از این دسته تکنیک ها می باشند که هر کدام درصدد رفع نقیصی از الگوریتم BSS در شناسایی پارامترهای مودال برآمدند.

در این پایان نامه پس از تشریح تکنیک فیلتر کردن به عنوان تکنیکی خلاقانه در ارتقا روش شناسایی ناپیدا با استفاده از آمار مرتبه دوم^۶ (SOBI)، تلاش می شود تا در صورت وجود میرایی های بالای ۶ درصد هم شناسایی پارامترهای مودال سازه از دقت کافی برخوردار باشد.

¹ Stochastic Subspace Identification (SSI)

² Blind Source Separation (BSS)

³ Independent Component Analysis (ICA)

⁴ Second-Order Blind Source Separation (SOBSS)

⁵ Short-Time Fourier Transform (STFT)

⁶ Second-Order Blind Identification

۱-۳- سوال‌های تحقیق

- ۱- آیا تکنیک‌های به کار رفته برای بهبود روش SOBSS قابلیت این را دارند تا به شکل یک روش واحد در کنار هم استفاده شوند؟
- ۲- در صورت استفاده از تعداد سنسورهای کمتر از تعداد درجات آزادی در سازه‌های با میرایی بالا، فرایند شناسایی چگونه انجام خواهد گرفت؟
- ۳- آیا به وسیله بازتاب‌های ناشی از تحریک خارجی سیستم با سیگنال‌های ناپیدا، می‌توان شناسایی سازه را انجام داد؟

۱-۴- فرض‌های تحقیق

- ۱- نویز موجود در داده‌ها از نوع گوسی سفید^۱ است.
- ۲- مودهای سازه نرمال و حقیقی هستند و به خوبی از یکدیگر تفکیک شده‌اند.
- ۳- سازه دارای رفتار خطی است.

۱-۵- روش انجام تحقیق

پس از مرور تکنیک‌های فیلتر کردن و همبستگی متقابل اصلاح شده و بررسی چالش‌های استفاده هم‌زمان

¹ White Gaussian Noise

این دو تکنیک، روش پیشنهادی در نرم افزار متلب برنامه نویسی می گردد و عملکرد آن با استفاده از شبیه سازی عددی مورد ارزیابی قرار می گیرد و در نهایت از یک مدل آزمایشگاهی جهت صحت سنجی روش استفاده می شود.

فصل دوم: مرور چند روش شناسایی سازه

۲- مرور چند روش شناسایی سازه

۲-۱- پیشگفتار

تاکنون روش‌های متنوعی جهت شناسایی سازه توسط پژوهشگران ارائه شده است که هر کدام ویژگی‌های منحصر به فرد خود را دارد. همانطور که اشاره شد این روش‌ها در حوزه‌های زمان^۱، فرکانس^۲ و زمان-فرکانس^۳ می‌باشند. در این فصل سه مورد از روش‌های شناسایی سازه تشریح می‌گردد.

۲-۲- روش زیر فضای تصادفی (SSI)

الگوریتم زیر فضای تصادفی به منظور شناسایی مشخصات سازه توسط آورشی و مور ارائه شد [۱]. این الگوریتم بدون استفاده از ماتریس کوواریانس و در فضای حالت، فرایند تعیین پارامترهای مودال سازه را انجام می‌دهد. جهات و زوایای اصلی که با استفاده از تجزیه مقدار منفرد^۴ حاصل می‌شوند، اساس الگوریتم زیر فضای

¹ Time Domain

² Frequency Domain

³ Time-Frequency Domain

⁴ Singular Value Decomposition

تصادفی را شکل می‌دهند.

در این روش شناسایی، می‌توان از ماتریس کوواریانس بازتاب‌ها (SSI-COV) به جای استفاده مستقیم از بازتاب‌ها استفاده کرد [۲]. فرمول‌بندی روش SSI-COV در ادامه تشریح می‌گردد.

در ابتدا فرض می‌شود که بارهای وارد بر سازه غیر قابل اندازه‌گیری باشند در نتیجه مدل فضای حالت به فرم زیر می‌باشد:

$$x_{k+1} = Ax_k + w_k \quad (1-2)$$

$$y_k = Cx_k + v_k$$

در این رابطه A ماتریس سیستم، C ماتریس خروجی، x_k بردار حالت و y_k بردار بازتاب می‌باشند. w_k و v_k به ترتیب نویز سیستم و نویز اندازه‌گیری شده هستند.

حل مسئله در روش SSI-COV نیاز به یافتن یک مدل فضای حالت تصادفی از روی داده‌های خروجی دارد. گام اول ایجاد ماتریس هنکل^۱ و تشکیل ماتریس تاپلیتس^۲ قطعه‌ای^۳ می‌باشد.

$$H = \frac{1}{\sqrt{N}} \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & \cdots & y_N & y_{i+1} & y_{i+2} & \cdots & y_{i+N} \\ y_2 & y_3 & \cdots & y_{N+1} & y_{i+2} & y_{i+3} & \cdots & y_{i+N+1} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ y_i & y_{i+1} & \cdots & y_{i+N-1} & y_{2i} & y_{2i+1} & \cdots & y_{2i+N-1} \end{bmatrix} = \frac{Y_p}{Y_f} \quad (2-2)$$

$$T_{1/i} = \begin{bmatrix} R_i & R_{i-1} & \cdots & R_1 \\ R_{i+1} & R_i & \cdots & R_2 \\ R_{2i-1} & R_{2i-2} & \cdots & R_i \end{bmatrix} = Y_f (Y_p)^T \quad (3-2)$$

در این روابط نیز Y_p بازتاب‌های اندازه‌گیری شده و Y_f بازتاب‌هایی را که در آینده اندازه‌گیری می‌شوند، نشان می‌دهند. بالانویس T هم به معنای ترانهاده ماتریس می‌باشد. R_i کوواریانس خروجی در تأخیر زمانی i می‌باشد و از رابطه (۴-۲) قابل محاسبه است:

¹ Hankel matrix

² Block Toeplitz matrix

$$R_i = E[y_k \ y_{k-1}] = CA^{i-1}G \quad (4-2)$$

که G ماتریس کوواریانس بردار حالت سیستم مرحله بعد و بازتاب‌های موجود می باشد و از رابطه زیر به دست می آید:

$$G = E[x_{k+1} \ y_k^T] \quad (5-2)$$

از طرفی می توان نشان داد ماتریس تاپلیتس از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$T_{1/i} = O_i \Gamma_i = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{i-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A^{i-1}G & \cdots & AG & G \end{bmatrix} \quad (6-2)$$

که O_i ماتریس مشاهده پذیری و Γ_i ماتریس کنترل پذیری هستند. همچنین با تجزیه مقدار منفرد ماتریس تاپلیتس داریم:

$$T_{1/i} = USV^T = (U_1 \ U_2) \begin{pmatrix} S_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1^T \\ V_2^T \end{pmatrix} = U_1 S_1 V_1^T \quad (7-2)$$

که در این رابطه U و V ماتریس‌های متعامد و S یک ماتریس قطری شامل مقادیر منفرد مثبت، از بزرگ به کوچک هستند. از مقایسه روابط (۶-۲) و (۷-۲) داریم:

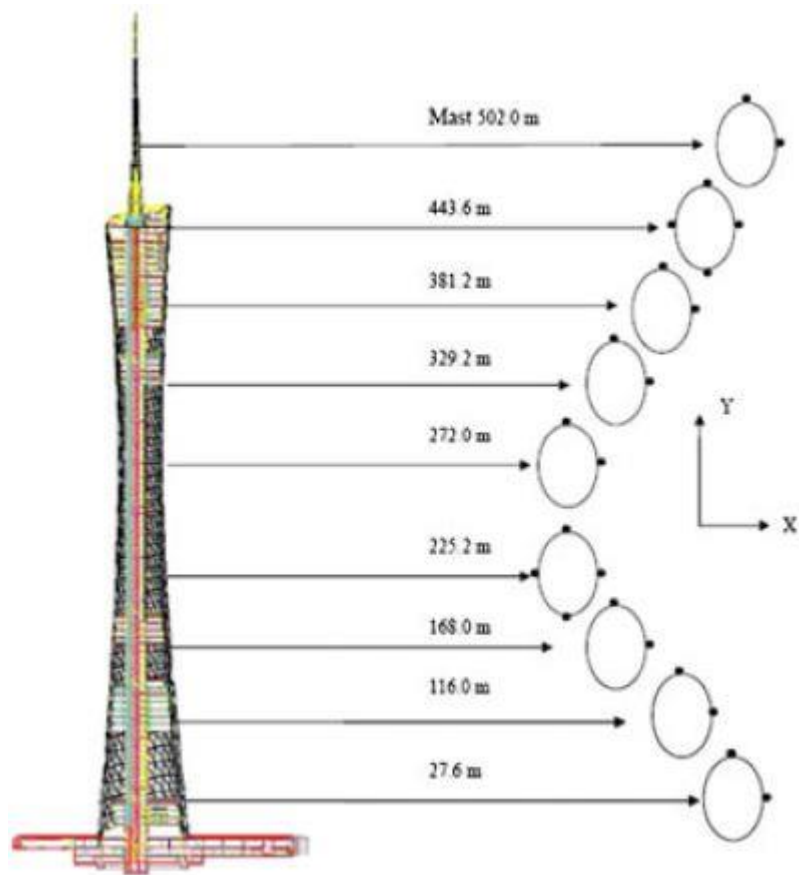
$$O_i = U_1 S_1^{1/2} \quad (8-2)$$

$$\Gamma_i = S_1^{1/2} V_1^T \quad (9-2)$$

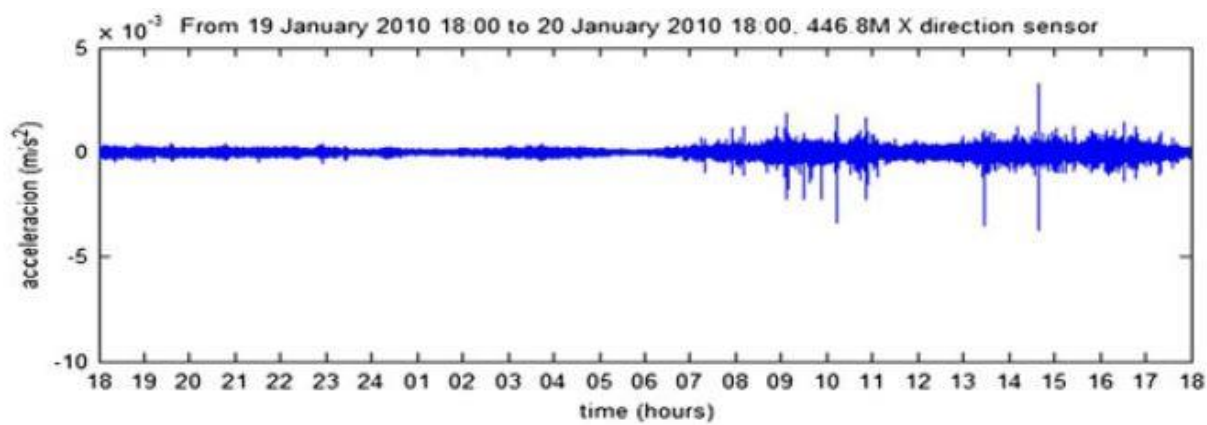
با به دست آمدن ماتریس O_i محاسبه ماتریس‌های A و C ساده خواهد شد.

الگوریتم ارائه شده جهت پایش مشخصات سازه برج کانتون^۱ در چین تحت بارگذاری‌های محیطی و زلزله استفاده گردید. نتایج این پژوهش در ادامه آورده خواهد شد.

¹ Canton Tower



شکل ۱-۲- توزیع سنسورهای شتاب در ارتفاع برج کانتون [۲]



شکل ۲-۲- بازتاب شتاب برداشت شده در راستای محور X [۲]

جدول ۱-۲ - مقایسه فرکانس‌های مودال بدست آمده از برج کانتون برای دو مجموعه داده [۲]

	Mode	1-Yb	Extra 1-XYb	1-Xb	Extra	2-Yb	2-Xb	1-T	2-Yb (2)	2-Xb (2)	3-Yb (extra)
1	First data set (ambient)	0.0902	—	0.1392	—	0.3652	0.4243	0.4752	0.5060	0.5223	—
2	Second data set (ambient)	0.0914	—	0.1364	—	0.3706	—	0.4645	0.4966	0.5786	—
3a	24 March data at 1:59:24	0.0876 ^a	0.1076 ^{ab}	0.1532 ^a	0.2785 ^{ab}	0.3562 ^c	0.4567 ^c	0.5137 ^c	0.5673 ^c	0.5957 ^c	0.7288
3b	24 March data at 2:00:28	0.0892	—	0.1354	0.2290 ^b	0.3685	0.4578 0.4785	0.4982	0.5755	0.5997	—
	Mode	3-Yb	3-Xb	4-Yb	11	12	13	14	15	16	
1	First data set (ambient)	0.7982	0.9649	1.1507	1.2031	1.2525	—	1.3981	1.6401	1.9463	
2	Second data set (ambient)	0.8010	0.8010	1.1697	1.2172	1.2534	1.2856	1.4149	1.6459	1.9226	
3a	24 March data at 1:59:24	0.8038	0.8038	—	—	—	1.2906 ^a	—	—	—	
3b	24 March data at 2:00:28	0.7993	0.7993	—	1.2126	1.2600	1.2891	1.4028	1.6325	—	

۲-۳- روش خوشه کردن بازتاب‌ها

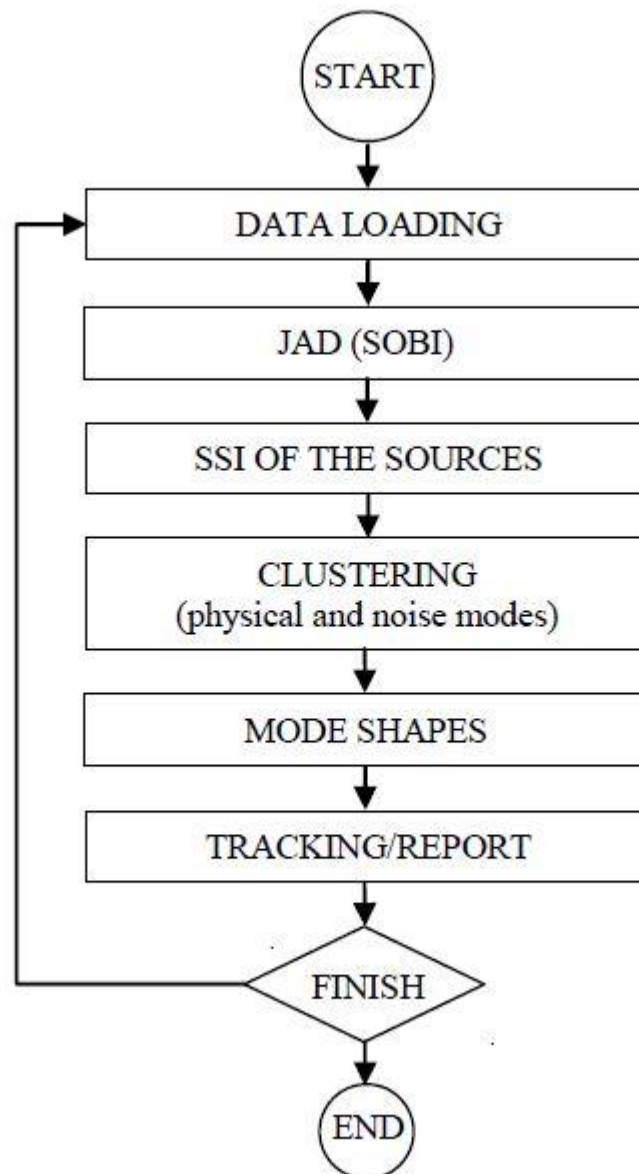
این روش به صورت خودکار عملیات شناسایی سازه را انجام داده و از دقت قابل قبولی برخوردار است. روش-های رایج شناسایی در صورت وجود میرایی‌های بالا قادر به محاسبه دقیق میرایی نبوده و یا خروجی‌های پراکنده دارند [۳]. از آنجایی که مقایسه تغییرات در شکل مودها، میرایی و فرکانس طبیعی سازه نقش تعیین کننده‌ای در شناسایی آسیب دارد از این تکنیک جهت شناسایی آسیب نیز استفاده می‌گردد [۴].

این روش مبتنی بر تکنیک زیر فضای تصادفی است و برای ساده سازی تفسیر نمودار تثبیت^۱ از روش جداسازی ناپیدای منابع با استفاده از آمار مرتبه دوم استفاده می‌شود. در بخش ۲-۴ به تشریح تکنیک جداسازی ناپیدای منابع خواهیم پرداخت. برای انجام عملیات شناسایی پارامترهای مودال سازه، منابع به صورت تک به تک براساس تکنیک زیر فضای تصادفی آنالیز شده و قطب‌های فیزیکی و قطب‌های نادرست به وسیله تکنیک

¹ Stabilization diagram

کلاستر^۱ و معیارهای اعتبارسنجی مودها از یکدیگر جدا می‌شوند. فلوچارت این روش در شکل ۲-۳ آمده است. همانطور که در فلوچارت ارائه شده قابل مشاهده است به وسیله قطری‌سازی تقریبی مشترک، جداسازی اولیه بین مودهای سیستم و نویز انجام می‌گیرد، سپس به وسیله الگوریتم SSI منابع تک به تک مورد تحلیل قرار گرفته و فرکانس‌های طبیعی و نسبت‌های میرایی تخمین زده می‌شوند. این مرحله از تحلیل از مزیت روش کلاستر بهره می‌برد. برای هر منبع قطب‌هایی که توسط روش SSI محاسبه شده براساس سلسله مراتب روش کلاستر کردن دسته بندی می‌شوند و دسته‌ای که دارای بیشترین المان است به عنوان نماینده مود انتخاب می‌گردد. در ادامه بر روی هر دسته عملیات اعتبارسنجی اعمال شده و قطب‌های فیزیکی استخراج می‌شوند و دسته‌هایی که از مرحله اعتبارسنجی عبور نکنند از مجموعه داده‌ها خارج می‌گردند. میانگین میرایی در هر دسته بین ۰ تا ۵ درصد و ضریب تغییرات متناظر کمتر از ۱۰ درصد است. در مرحله آخر فرکانس‌های طبیعی و میرایی‌ها در هر دسته بین صفر تا یک نرم می‌شوند. برای ارزیابی عملکرد این روش از یک سیستم چهار درجه آزادی و نویز سفید گوسی استفاده شده که در جداول ۲-۲ و ۲-۳ نتایج قابل مشاهده است. این مقادیر پس از حذف مقادیر اضافی به دست آمده و نشان می‌دهد الگوریتم از دقت خوبی برخوردار می‌باشد.

¹ Cluster



شکل ۲-۳- فلوچارت روش خوشه کردن [۳]

جدول ۲-۲- خلاصه نتایج فرکانس‌های طبیعی مودال شناسایی شده توسط روش خوشه کردن [۳]

Mode #	f_{nominal} [Hz]	μ_f [Hz]	σ_f [Hz]	f_{min} [Hz]	25 th centile	50 th centile	75 th centile	95 th centile	f_{max} [Hz]
I	0.668	0.668	0.000745	0.666	0.667	0.668	0.668	0.669	0.670
II	1.137	1.137	0.000901	1.135	1.137	1.137	1.138	1.139	1.141
III	1.526	1.526	0.001164	1.520	1.525	1.526	1.527	1.528	1.531
IV	1.879	1.879	0.001467	1.873	1.878	1.879	1.880	1.881	1.884

جدول ۳-۲- خلاصه نتایج نسبت‌های میرایی مودال شناسایی شده توسط روش خوشه کردن [۳]

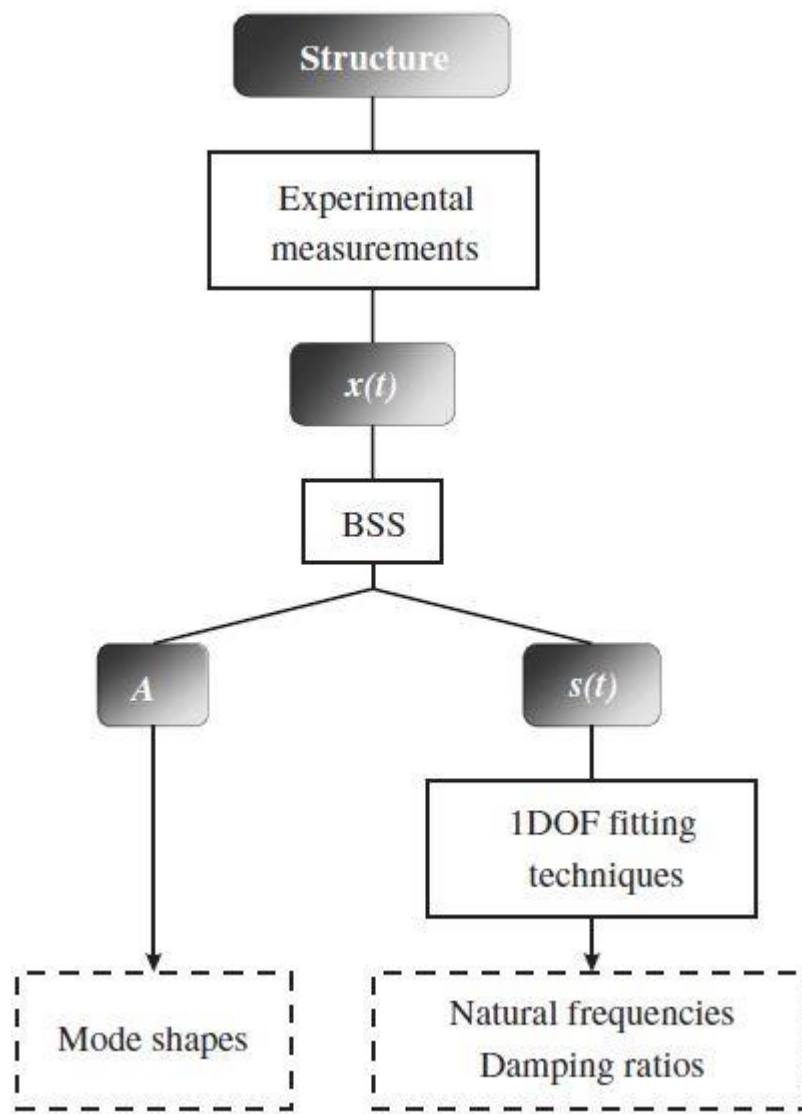
Mode #	ξ_{nominal} [%]	μ_{ξ} [%]	σ_{ξ} [%]	ξ_{min} [%]	25 th centile	50 th centile	75 th centile	95 th centile	ξ_{max} [%]
I	1.00	1.02	0.11	0.70	0.94	1.02	1.10	1.21	1.36
II	0.88	0.89	0.08	0.67	0.84	0.89	0.94	1.02	1.13
III	0.92	0.93	0.07	0.73	0.88	0.93	0.98	1.05	1.15
IV	1.00	1.01	0.08	0.79	0.96	1.01	1.06	1.14	1.23

۲-۴- روش جداسازی ناپیدای منابع (BSS)

استفاده از روش BSS جهت شناسایی یک سیستم توسط کرشن و همکاران ارائه شد [۵]. این تکنیک در

گذشته در زمینه پردازش سیگنال استفاده می‌شد و با مرور زمان پیشرفت‌های قابل توجهی داشته و محققین آن

را در علوم مختلف به کار می‌بردند. فلوچارت روش BSS را در شکل ۲-۴ مشاهده می‌نمایید.



شکل ۲-۴- فلوچارت روش BSS در شناسایی پارامترهای مودال سازه [۶]

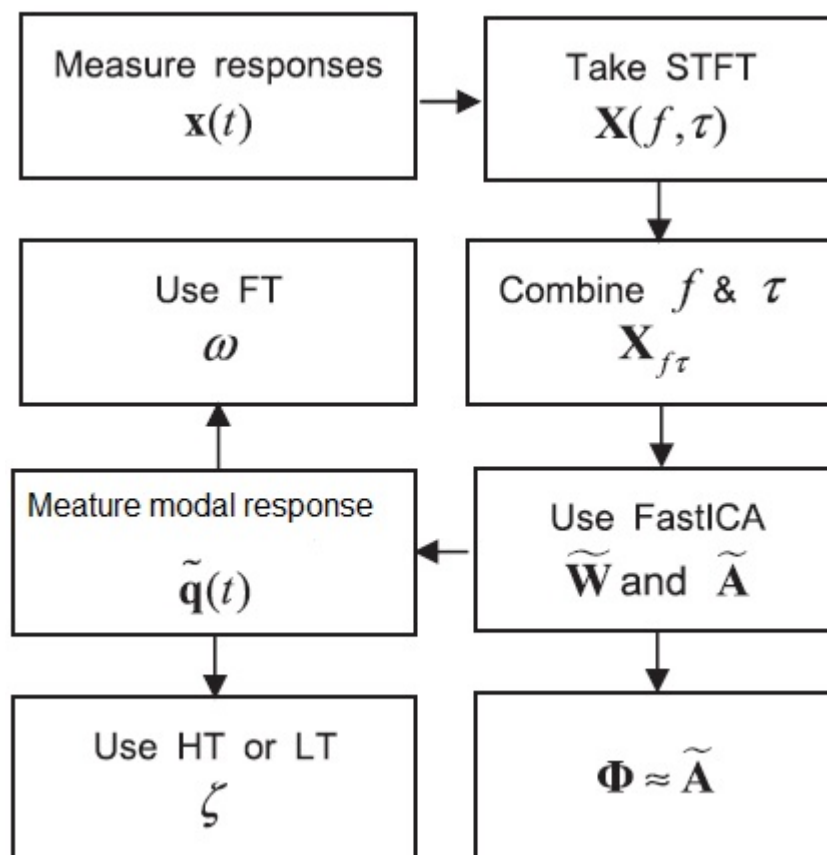
در تکنیک BSS تنها با مشخص بودن خروجی‌هایی که ناشی از ترکیب منابع هستند به دنبال یافتن این منابع نامعلوم هستیم. قابل مشاهده نبودن منابع و عدم اطلاع از نحوه ترکیب آن‌ها از دلایل انتخاب صفت ناپیدا می‌باشد ولی یافتن منابع تحت این شرایط از نقاط قوت این روش است [۷]. فرض استقلال آماری موضوعی است که در یافتن این منابع کمک شایانی می‌نماید. این فرض به لحاظ آماری بسیار قوی بوده و البته از لحاظ فیزیکی هم کاملاً قابل پذیرش می‌باشد.

مثال کوکتل پارتی^۱ به زبانی ساده روش جداسازی ناپیدای منابع را تشریح می‌کند [۸]. فرض کنید در اتاقی چند فرد همزمان در حال صحبت کردن باشند و به تعداد افراد، میکروفون برای ضبط صداها در نقاط مختلف اتاق کارگذاری شود. این میکروفون‌ها فقط ترکیبی از صدای افراد را ضبط می‌کنند. کار ارزشمندی که روش BSS برای ما انجام می‌دهد این است که به طور جداگانه صدای هر فرد را شناسایی و جداسازی می‌کند. نمود فیزیکی فرض استقلال آماری منابع هم به وضوح مشهود است زیرا صدای هر فرد مختص خود او می‌باشد و به دیگر افراد ارتباطی ندارد.

در این روش پاسخ‌های مودال سیستم به عنوان منابعی که به دنبال آن‌ها هستیم شناخته شده و ماتریس ترکیب هم به عنوان شکل موده‌های ارتعاشی سیستم بیان گردید. همانطور که در فصل گذشته اشاره شد، دو الگوریتم اساسی روش جداسازی ناپیدای منابع، تحلیل مولفه مستقل (ICA) و جداسازی ناپیدای منابع با استفاده از آمار مرتبه دوم (SOBSS) می‌باشند که به ترتیب در دو مرجع [۹] و [۱۰] تشریح می‌گردند. در روش ICA بر اصل غیر گوسی بودن سیگنال‌های منبع تأکید شده است و در SOBSS از ساختار زمانی خروجی‌ها استفاده می‌گردد. ICA حساسیت بالایی به میرایی سیستم نشان داده و با افزایش نسبت میرایی دقت آن به شکل قابل توجهی کاهش می‌یابد [۸]. تحقیقات مختلف جهت رفع این نقص انجام شده است که از نمونه این پژوهش‌ها می‌توان به کاری که توسط یانگ و ناگاراچایا^۲ انجام شده اشاره کرد. در این پژوهش یک مرحله پیش پردازش که با استفاده از تبدیل فوریه زمان کوتاه شکل می‌گرفت، پیشنهاد شد [۱۱]. طبق این تحقیق دیگر فرض بر ایستا بودن سیگنال‌های ورودی نیاز نبود و حساسیت روش ICA به میرایی کاهش یافت. فلوچارت روش STFT-ICA در شکل ۲-۵ نشان داده شده است.

¹ Cocktail party

² Y Yang and Nagarajaiah



شکل ۲-۵- فلوچارت روش STFT-ICA برای شناسایی سازه [۱۲]

همانطور که اشاره شد در شناسایی سازه به روش جداسازی ناپیدای منابع با استفاده از آمار مرتبه دوم فرض استقلال آماری منابع نقش تعیین کننده‌ای دارد و به وسیله قطری‌سازی همزمان ماتریس کوواریانس تأخیری بازتاب‌ها، منابع یافت می‌شوند. رابطه (۲-۱۰) مدل ریاضی روش BSS است:

$$\{x(t)\} = [A]\{s(t)\} + \{n(t)\} \quad (2-10)$$

$\{x(t)\}$ بردار بازتاب‌های اندازه‌گیری شده، $\{s(t)\}$ بردار منابع مجهول هستند. $[A]$ هم ماتریس ترکیب منابع است که همچون منابع مجهول می‌باشد. $\{n(t)\}$ بردار نویز داده‌ها است که مستقل از منابع در نظر گرفته می‌شود. بنابراین طبق الگوریتم SOBSS داریم:

$$E(\{n(t)\}\{n(t+\tau)\}) = \sigma^2 \delta(t)[I] \quad (2-11)$$

$E(\cdot)$ عملگر امید ریاضی، σ واریانس، $\delta(t)$ دلتای کرونکر و $[I]$ ماتریس یکه می‌باشند. اکنون با توجه به روابط (۱۰-۲) و (۱۱-۲) داریم:

$$[R(x, \tau)] = [A][R(s, \tau)][A]^H \quad ; \quad \tau \neq 0 \quad (12-2)$$

$[R(x, \tau)]$ ماتریس همبستگی سیگنال‌های خروجی برای تأخیر زمانی τ است.

$$[R(x, \tau)] = E(\{x(t)\}\{x(t, \tau)\}) \quad (13-2)$$

همچنین $[R(s, \tau)]$ ماتریس همبستگی سیگنال‌های منبع می‌باشد.

$$[R(s, \tau)] = E(\{s(t)\}\{s(t, \tau)\}) \quad (14-2)$$

با توجه به فرض استقلال آماری منابع، ماتریس $[R(s, \tau)]$ یک ماتریس قطری است و در صورت معکوس پذیری و کامل بودن $[A]$ داریم:

$$[W][R(x, \tau)][W]^H = D \quad (15-2)$$

$$D = [R(s, \tau)] \quad (16-2)$$

$$[W] = [A]^{-1} \quad (17-2)$$

بنابراین با محاسبه همبستگی بازتاب‌ها برای چند تأخیر زمانی ماتریس ترکیب و ماتریس منابع به دست می‌آیند.

از چالش‌هایی که همواره با استفاده از جداسازی ناپیدای منابع با آن‌ها مواجه هستیم در ادامه آورده شده است:

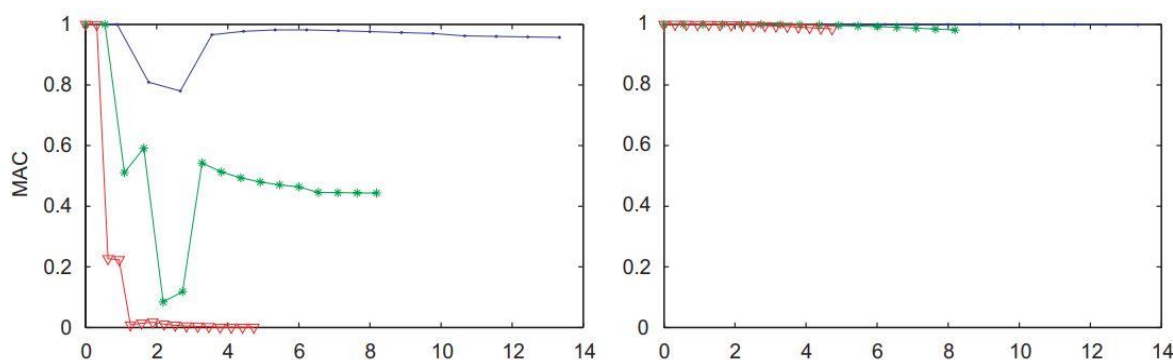
۱- در استفاده از این روش جهت شناسایی سیستم، باید تعداد بازتاب‌های اندازه‌گیری شده بیشتر یا برابر تعداد درجات آزادی باشد. این موضوع بدین معناست که در صورت محدودیت تعداد سنسورها استفاده از روش BSS دچار مشکل خواهد شد.

۲- نتایج حاصل از این روش در شناسایی سازه‌هایی که میرایی بالا دارند و در آنها از انواع میراگرها استفاده

شده، دقت کافی را ندارد.

۳- سیگنال های ورودی باید از نوع سیگنال های ایستا باشند.

البته الگوریتم SOBSS نسبت به الگوریتم ICA در مواجهه با تغییرات میرایی از حساسیت کمتری برخوردار است اما هر دو در میرایی های بالاتر از حدود معمول دچار مشکل می شوند. در شکل ۲-۶ مقایسه دقت اندازه گیری روش ICA و SOBSS را مشاهده می نمایید.



شکل ۲-۶- تأثیر افزایش میرایی در دقت شناسایی مدهای یک سیستم سه درجه آزادی؛ سمت چپ: الگوریتم ICA؛ سمت راست: الگوریتم SOBSS؛ [۵]

تکنیک های زیادی توسط محققین جهت رفع این چالش ها ارائه شده است. از جمله این تکنیک ها می توان به استفاده از تکنیک عامل موازی برای استخراج شکل مودها از ماتریس کوواریانس تأخیری اشاره کرد [۱۳]. در پژوهشی دیگر از روش تجزیه مودی تجربی^۱ (EMD) برای حالت محدود بودن تعداد سنسورها استفاده شده است [۱۴]. الگوریتم EMD در زمینه پردازش سیگنال یک الگوریتم تازه توسعه یافته محسوب می شود. در این روش سیگنال های ورودی به توابع مودی ذاتی^۲ (IMF) تجزیه می گردند، سپس تبدیل هیلبرت^۳ برای شناسایی پارامترهای مودال به کار برده می شود [۱۵]. روش فیلتر کردن برای رفع چالش محدود بودن تعداد سنسورها نیز

¹ Empirical Mode Decomposition

² Inherent Modal Function (IMFs)

³ Hilbert Transform

پیشنهاد گردیده که در این روش با کاهش مودهای فعال به جای ساخت بازتاب‌های مصنوعی، این محدودیت برطرف شده است. در این پژوهش میرایی سازه تا $6/28$ درصد در نظر قرار گرفته و در صورت وجود میرایی‌های بالاتر، نتایج از دقت کافی برخوردار نخواهند بود [۱۶]. در فصل آینده با تشریح روش فیلتر کردن به رفع این نقص خواهیم پرداخت.

برای رفع چالش میرایی‌های بالا در شناسایی سازه، مانند چالش قبلی تکنیک‌های متنوعی توسط پژوهشگران پیشنهاد شد. تکنیک تعقیب پیچیدگی^۱ (CP) امکان شناسایی سازه با میرایی غیر کلاسیک را فراهم کرد [۱۷]. تکنیک همبستگی متقابل اصلاح شده^۲ (MCC) با استفاده از همبستگی متقابل بازتاب‌ها به جای استفاده مستقیم از بازتاب‌ها در هر درجه آزادی، شناسایی سازه با حدود میرایی بالاتر از ۵ درصد را نیز فراهم آورد [۱۸].

¹ Complexity Pursuit (CP)

² Modified Cross-Correlation (MCC)

فصل سوم: بهبود تکنیک جداسازی ناپیدای منابع در شناسایی پارامترهای مودال سازه

۳- بهبود تکنیک جداسازی ناپیدای منابع در شناسایی پارامترهای مودال سازه

۳-۱- پیشگفتار

همانطور که در فصل گذشته اشاره شد در روش جداسازی ناپیدای منابع با استفاده از آمار مرتبه دوم با دو چالش مهم روبرو هستیم. در مرجع [۱۶] تکنیک فیلتر کردن برای رفع محدودیت تعداد سنسور ارائه شده است که در بخش ۳-۲-۱ به تشریح آن خواهیم پرداخت. همچنین در ادامه فصل با کمک گرفتن از روش همبستگی متقابل اصلاح شده (MCC)، چالش وجود میرایی‌های بالا در سازه که دقت شناسایی را کاهش می‌دهد بهبود بخشیده شده است.

۳-۲- شناسایی سازه با استفاده از روش جداسازی ناپیدای منابع در صورت محدودیت

تعداد سنسورها

برای بهره بردن از روش SOBSS در شناسایی سازه باید بازتاب‌ها در تمام درجات آزادی برداشت شوند. در صورت محدود بودن سنسورها و برابر نبودن تعداد بازتاب‌های برداشت شده با تعداد درجات آزادی کار شناسایی سازه با این روش امکان پذیر نخواهد بود. برای حل این چالش بعضی از محققین از روی همان بازتاب‌های

موجود بازتاب‌های مصنوعی ایجاد کرده و عملیات شناسایی را ادامه داده‌اند. در یکی از این پژوهش‌ها با به کارگیری قطری‌سازی تقریبی ماتریس هنکل و در ادامه الگوریتم SOBI، کار شناسایی پارامترهای مودال سازه انجام می‌گیرد [۱۹]. در پژوهشی دیگر در همین زمینه، یک تکنیک مبتنی بر خوشه کردن در حوزه زمان-فرکانس برای شناسایی سازه ارائه شده است [۲۰].

۳-۲-۱- تشریح تکنیک فیلتر کردن

با فرض کمتر بودن تعداد درجات آزادی که بازتاب‌های شتاب در آنها اندازه گیری شده (m) نسبت به تعداد کل درجات آزادی سیستم (n)، پاسخ معادله دیفرانسیل ارتعاش آزاد حاکم بر سیستم به فرم رابطه (۳-۱) است.

$$\ddot{x}_i(t) = \sum_{j=1}^n \varphi_{ij} q_j(t) \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (1-3)$$

شکل برداری این رابطه این چنین می باشد:

$$\{\ddot{x}(\omega)\}_{m \times N} = [\hat{\varphi}]_{m \times n} \{\ddot{q}(t)\}_{n \times N} \quad (2-3)$$

در این روابط، N مدت زمان اندازه گیری بازتاب و φ_{ij} درایه سطر i ام و ستون j ام ماتریس شکل مودهای ناقص سازه، $[\hat{\varphi}]$ می باشد. از طرفی شتاب مودال سازه تحت بار ضربه‌ای به فرم زیر است.

$$\ddot{q}_j(t) = B_{0j} e^{-\zeta_j \omega_j t} \cos(\omega_{dj} t + \theta_{0j}) \quad (3-3)$$

که B_0 و θ_0 ثابت‌های وابسته به شرایط اولیه مسئله برای هر مود، ω_i و ζ_i به ترتیب فرکانس طبیعی و نسبت میرایی مود i ام و ω_{dj} فرکانس میرا شونده در مود j ام می باشند. این رابطه به ما نشان می‌دهد بازتاب‌های مودال، توابع تک‌فرکانسی هستند. با توجه به این موضوع در تکنیک فیلتر کردن با تعیین فیلترهای فرکانسی، کمبود بازتاب‌های اندازه‌گیری شده جبران می‌شود. این فیلترها به گونه‌ای طراحی می‌شوند که پس از اعمال روی بازتاب‌های اندازه‌گیری شده، سیگنال‌هایی حاوی تعداد دلخواه مودهای فعال ایجاد می‌گردند. تعداد فیلترها با گرد کردن نسبت تعداد کل درجات آزادی به تعداد بازتاب‌ها اندازه گیری شده، به سمت نزدیکترین عدد صحیح بزرگتر، به دست می‌آید. رابطه بازتاب‌های فیلتر شده در رابطه (۳-۴) آمده است.

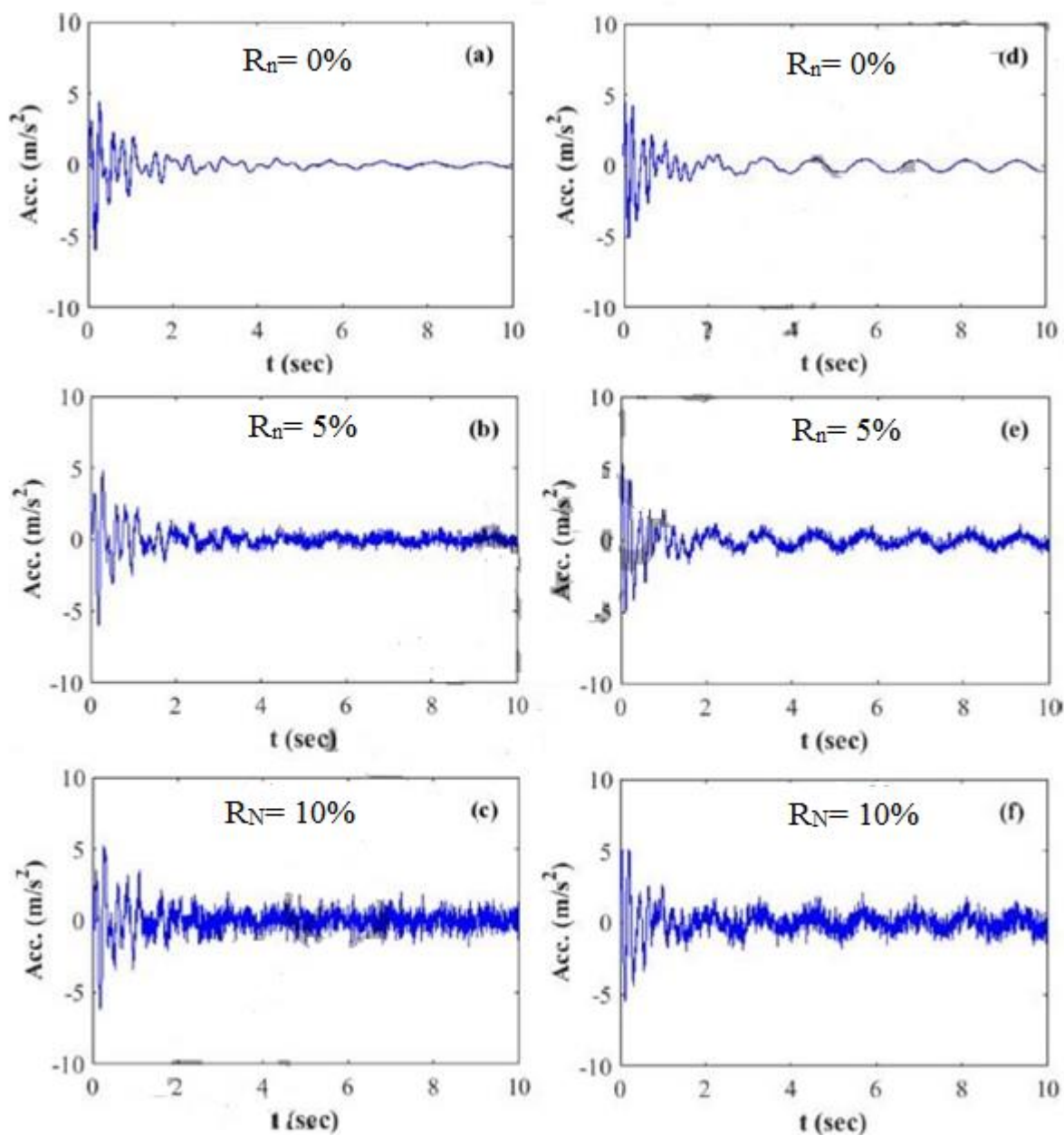
$$\ddot{z}_{ij} = G_j(\ddot{x}_i) = \varphi_{ir} \ddot{q}_r(t) + \varphi_{i(r+1)} \ddot{q}_{(r+1)}(t) + \dots + \varphi_{i(r+m-1)} \ddot{q}_{(r+m-1)}(t)$$

$$= \sum_{p=r}^{r+m-1} \varphi_{ip} \ddot{q}_p(t) \quad ; i=1, 2, \dots, m; \quad j=1, 2, \dots, n_f; \quad (4-3)$$

زیرنویس r شماره مود متناسب با کوچک‌ترین فرکانس فیلتر مورد نظر است. فرم برداری رابطه (۳-۵) به شکل زیر می‌باشد.

$$\{\ddot{z}(t)\}_{m \times N}^{(i)} = [\hat{\phi}]_{m \times m}^{(j)} \{\ddot{q}(t)\}_{m \times N}^{(j)} \quad (5-3)$$

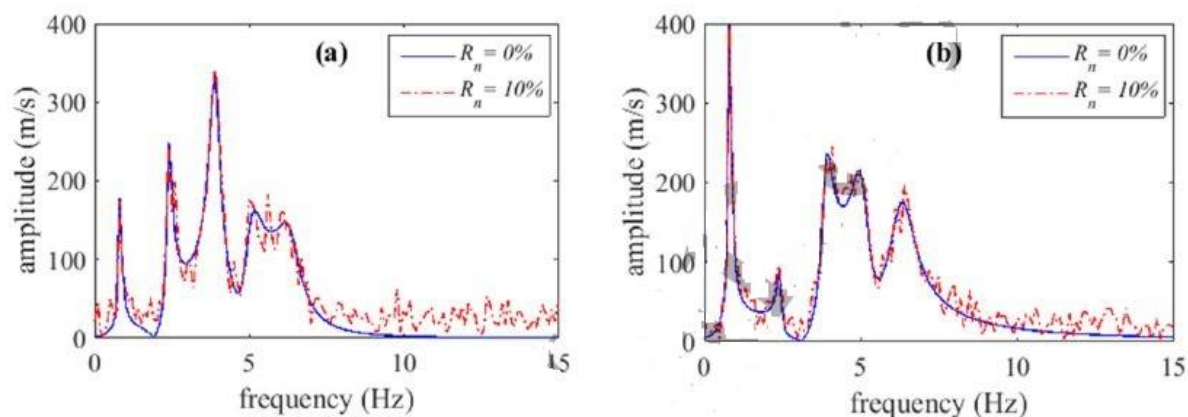
جهت ارزیابی عملکرد این روش از یک سیستم پنج درجه آزادی تحت بار ضربه‌ای که در درجه آزادی دوم بر سازه وارد شده، استفاده گردیده است و تنها بازتاب‌های درجات آزادی یک و چهار اندازه‌گیری شده می‌باشد. در این سازه مقدار میرایی کمتر از $6/3$ درصد است. بازتاب‌های درجات آزادی اول و چهارم با سطح مختلف نویز در شکل ۳-۱ ملاحظه می‌شود.



شکل ۳-۱ (a) تا (c) بازتاب درجه آزادی اول با سطوح مختلف نویز؛ (d) تا (f) بازتاب درجه آزادی چهارم با سطوح مختلف نویز [۱۶]

در این ارزیابی ابتدا بارسم طیف فوریه بازتاب‌های درجات آزادی اول و چهارم فیلترهای فرکانسی مد نظر، طراحی می‌گردند. با توجه به طیف فوریه رسم شده و نسبت تعداد کل درجات آزادی به تعداد بازتاب‌های اندازه گیری شده، فیلترهای فرکانسی با باندهای گذر مناسب طراحی می‌شوند. این باندهای گذر عبارتند از:

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

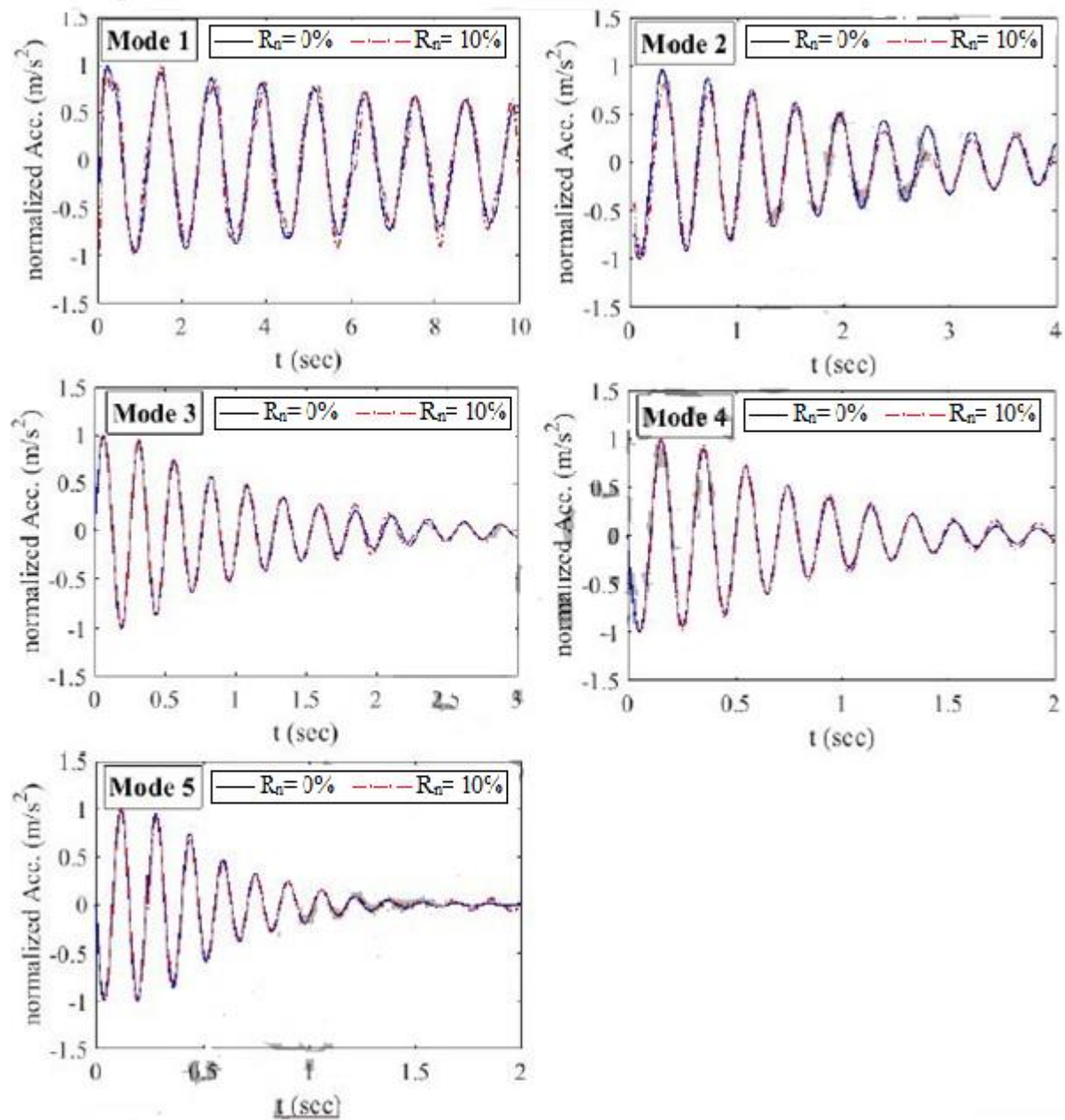


شکل ۳-۲- طیف فوریه بازتاب‌های شتاب درجات آزادی اول و چهارم (a) درجه آزادی اول؛ (b) درجه آزادی چهارم [۱۶]

نتایج حاصل از آزمون بار ضربه‌ای در جدول ۳-۱ آمده که نشان می‌دهد روش فیلتر کردن در شناسایی پارامترهای مودال سازه از دقت کافی برخوردار است. این روش به وسیله ارتعاش اجباری تصادفی هم مورد ارزیابی قرار گرفته و برای تحریک تصادفی از نویز گوسی سفید استفاده گردیده است. نویز سفید گوسی یک سیگنال ایستا بوده که در ادامه فصل برای بهبود این تکنیک در جهت شناسایی پارامترهای مودال سازه با تحریک سیگنال نایستا اقداماتی انجام می‌شود.

جدول ۳-۱- نتایج حاصل از شناسایی پارامترهای مودال سازه با استفاده از روش فیلتر کردن بازتاب‌ها تحت ارتعاش آزاد [۱۶]

Mode	analytical values		Identified values $R_{nj} = 0\%$			Identified values $R_{nj} = 5\%$			Identified values $R_{nj} = 10\%$		
	f_n (Hz)	ξ (%)	f_n (Hz)	ξ (%)	MAC	f_n (Hz)	ξ (%)	MAC	f_n (Hz)	ξ (%)	MAC
1st	0.83	0.94	0.83	0.96	1.00	0.83	0.91	1.00	0.83	0.74	0.999
2nd	2.41	2.69	2.41	2.68	1.00	2.41	2.64	0.998	2.42	2.98	1.00
3rd	3.89	4.25	3.89	4.22	0.999	3.88	3.94	0.999	3.90	3.91	1.00
4th	5.06	5.40	5.06	5.41	0.999	5.11	4.86	0.999	5.09	4.13	1.00
5th	6.34	6.25	6.33	6.49	0.995	6.42	6.04	0.994	6.42	6.04	0.997



شکل ۳-۳- بازتاب‌های مودال شناسایی شده در دو حالت بدون نویز و نویز ده درصد [۱۶]

۳-۳- شناسایی سازه با استفاده از روش جداسازی ناپیدای منابع در صورت وجود

میرایی های بالا در سازه

انجام عملیات شناسایی در صورت وجود میرایی های بالا در سازه با روش SOBI از دقت کافی برخوردار نیست. همانطور که در قسمت ۳-۲-۱ اشاره شد، در نتایج روش فیلترکردن، بالاترین میرایی که با دقت کافی شناسایی گردیده کمتر از ۶/۵ درصد است. از روش هایی که برای رفع این چالش انجام گرفته روش STFT-ICA می باشد که با کمک گرفتن از تبدیل فوریه زمان کوتاه، الگوریتم ICA را تقویت می کند. همچنین تکنیک خوشه کردن هم در این زمینه ارائه گردید. تکنیکی که در این پایان نامه مورد توجه قرار گرفته، همبستگی متقابل اصلاح شده (MCC) می باشد. در این تکنیک علاوه بر شناسایی میرایی های بالا، از سیگنال ناپیدا^۱ برای تحریک سازه استفاده شده و نتایج بدست آمده قابل قبول بوده است.

۳-۳-۱- تشریح تکنیک همبستگی متقابل اصلاح شده

معادله دیفرانسیل حاکم بر حرکت سیستم چند درجه آزادی تحت تحریک خارجی $F(t)$ به فرم زیر است:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = F(t) \quad (۳-۶)$$

که M ، C و K به ترتیب ماتریس های جرم، میرایی و سختی سازه، $x(t)$ معادله جابه جایی درجات آزادی و $F(t)$ بردار تحریک می باشند. اگر $F(t) = 0$ باشد سازه تحت ارتعاش آزاد قرار گرفته است و پاسخ معادله به فرم زیر خواهد بود.

$$x = \psi q \quad (۳-۷)$$

¹ Non-stationary signal

ψ ماتریس شکل موده‌های سازه و q ماتریس حاوی پاسخ‌های مودال می باشد.

از طرفی روش BSS رابطه بین بازتاب‌ها و منابع را به شکل معادله زیر تعریف کرده است.

$$x(k) = As(k) \quad (۸-۳)$$

که x و s به ترتیب بیانگر بازتاب‌های اندازه‌گیری شده و منابع می باشند. A نیز ماتریس ترکیب منابع است. با مقایسه رابطه (۷-۳) و (۸-۳) می‌توان پی‌برد که پاسخ‌های مودال نوعی خاص از منابع کلی و وابسته به زمان می‌باشند. پاسخ‌های مودال شرایط استقلال و ناهمبستگی منابع در روش BSS را برآورده می‌کنند.

همبستگی پاسخ‌ها در محل درجات آزادی i و j ناشی از یک ورودی در درجه آزادی k به شکل زیر است:

$$R_{ijk}(T) = E[x_{ik}(t+T)x_{jk}(t)] \quad (۹-۳)$$

با فرض تحریک به شکل نویز سفید داریم:

$$E[f_k(\tau_1)f_k(\tau_2)] = \alpha_k \delta(\tau_1 - \tau_2) \quad (۱۰-۳)$$

α_k یک ثابت است و δ دلتای دیراک^۱ می‌باشد. تحت این شرایط، رابطه (۹-۳) به شکل رابطه (۱۱-۳)

درخواهد آمد.

$$R_{ijk}(T) = \sum_{r=1}^s A_r e^{-\zeta_r \omega_{nr} T} [\alpha_r \cos \omega_{dr} T + \beta \sin \omega_{dr} T] \quad (۱۱-۳)$$

$$A_r = \frac{\alpha^k \varphi_{ri} \varphi_{kr}}{m^r \omega_{dr}} \quad (۱۲-۳)$$

$$\alpha_r = \sum_{s=1}^n \frac{\varphi_{sj} \varphi_{ks}}{m^s \omega_{ds}} \int_0^\infty e^{-(\zeta_r \omega_{nr} + \zeta_s \omega_{ns})\lambda} \sin(\omega_{dr} \lambda) \sin(\omega_{ds} \lambda) d\lambda \quad (۱۳-۳)$$

$$\beta_r = \sum_{s=1}^n \frac{\varphi_{sj} \varphi_{ks}}{m^s \omega_{ds}} \int_0^\infty e^{-(\zeta_r \omega_{nr} + \zeta_s \omega_{ns})\lambda} \cos(\omega_{dr} \lambda) \sin(\omega_{ds} \lambda) d\lambda \quad (۱۴-۳)$$

در این روابط $\lambda = t - \tau$ و ω_d فرکانس میراثونده می‌باشد و برای مود r ام به شکل زیر است.

¹ Dirac delta

$$\omega_{dr} = \omega_{nr} \sqrt{1 - \zeta_r^2} \quad (15-3)$$

ω_{nr} و ζ_r به ترتیب فرکانس طبیعی میراننده و نسبت میرایی بحرانی مود r ام می باشند.

با جایگذاری

$$s_r = e^{-\zeta_r \omega_{nr} T} [\alpha_r \cos(\omega_{dr} T) + \beta_r \sin(\omega_{dr} T)] \quad (16-3)$$

در رابطه (۱۱-۳) داریم:

$$r(t) = R(T) = A_r s_r(t) \quad (17-3)$$

در روش MCC به جای استفاده مستقیم از بازتاب‌های اندازه‌گیری شده از همبستگی متقابل بازتاب‌ها در تمام تأخیرهای زمانی در فرایند شناسایی استفاده می‌شود. عملیات قطری‌سازی در روش SOBI روی ماتریس کوواریانس تأخیری انجام می‌گیرد، در صورتی که در تکنیک MCC برای ماتریس کوواریانس از چندین پنجره بدون همپوشانی استفاده می‌گردد.

همبستگی بازتاب‌ها در صورت حضور نویز از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$R_{ijk}(T) = E[(x_{ik}(t+T) + n_i(t))(x_{jk}(t) + n_j(t))] \quad (18-3)$$

n_i و n_j نویزهای i امین و j امین درجه آزادی هستند و در این رابطه فرض سفید بودن نویز و ناهمبسته بودن با بازتاب‌ها برقرار است.

مرحله بعدی، قطری‌سازی همزمان دو ماتریس کوواریانس $\hat{R}_r(0)$ و $\hat{R}_r(p)$ که در تأخیر زمانی صفر و p محاسبه شده‌اند، می‌باشد.

$$\hat{R}_r(0) = E\{r(k)r^T(k)\} = A_r R_s(0) A_r^T \quad (19-3)$$

$$\hat{R}_r(p) = E\{r(k)r^T(k-p)\} = A_r R_s(p) A_r^T \quad (20-3)$$

در این روابط

$$R_s(p) = E \{ s_r(k) s_r^T(k-p) \} \quad (21-3)$$

برقرار است.

قطری سازی همزمان شامل سه مرحله است. این سه مرحله عبارتند از: سفید سازی، متعامد سازی و تبدیل یکه. اولین قطری سازی با استفاده از تجزیه مقدار منفرد¹ (SVD) به فرم رابطه (22-3) می باشد.

$$\hat{R}_r(0) = (1/N) \left(\sum_{k=1}^N r(k) r^T(k) \right) \quad (22-3)$$

همچنین رابطه

$$\hat{R}_r(0) = V_r \Lambda_r V_r^T \quad (23-3)$$

برقرار است. که V_r ماتریس شامل بردارهای ویژه ماتریس کوواریانس r می باشد.

در مرحله بعد سفید سازی استاندارد به وسیله یک تبدیل غیر خطی تعریف می شود.

$$\bar{r}(k) = Qr(k) = \Lambda_r^{-1/2} V_r^T r(k) \quad (24-3)$$

به دلیل این سفید سازی $\hat{R}_r(p)$ به $R_{\bar{r}}(p)$ تبدیل می شود که مطابق رابطه (25-3) به دست می آید.

$$R_{\bar{r}}(p) = (1/N) \left(\sum_{k=1}^N \bar{r}(k) \bar{r}^T(k-p) \right) = Q R_r(p) Q \quad (25-3)$$

گام بعدی متعامد سازی نام دارد. این عملیات بر روی ماتریس قطری که به فرم، $\hat{R}_{\bar{r}}(p) = V_{\bar{r}} \Lambda_{\bar{r}} V_{\bar{r}}^T$

می باشد، اعمال می گردد.

اکنون با توجه به رابطه (24-3) و (25-3) داریم:

$$\hat{R}_{\bar{r}}(p) = Q A_r R_s(p) A_r^T Q^T \quad (26-3)$$

¹ Singular Value Decomposition (SVD)

اگر ماتریس قطری Λ_r مقادیر ویژه معین داشته باشد، آنگاه ماتریس ترکیب می‌تواند به طور منحصر به فرد به وسیله معادله (۲۷-۳) تخمین زده شود.

$$\hat{H} = Q^{-1}V_r = V_r \Lambda_r^{1/2} V_r^T \quad (27-3)$$

که $\hat{H}$ ماتریس تخمین زده شده و یا همان A_r می‌باشد.

به راحتی می‌توان دریافت که QA_r به دست آمده یک ماتریس واحد است. زیرا در ابتدا فرض شده منابع ناهمبسته و مقیاس‌پذیرند که دارای واریانس واحد هستند. اکنون مسئله به قطری‌سازی ماتریس همبستگی $\hat{R}_r(p)$ در یک یا چند تأخیر زمانی تبدیل می‌گردد.

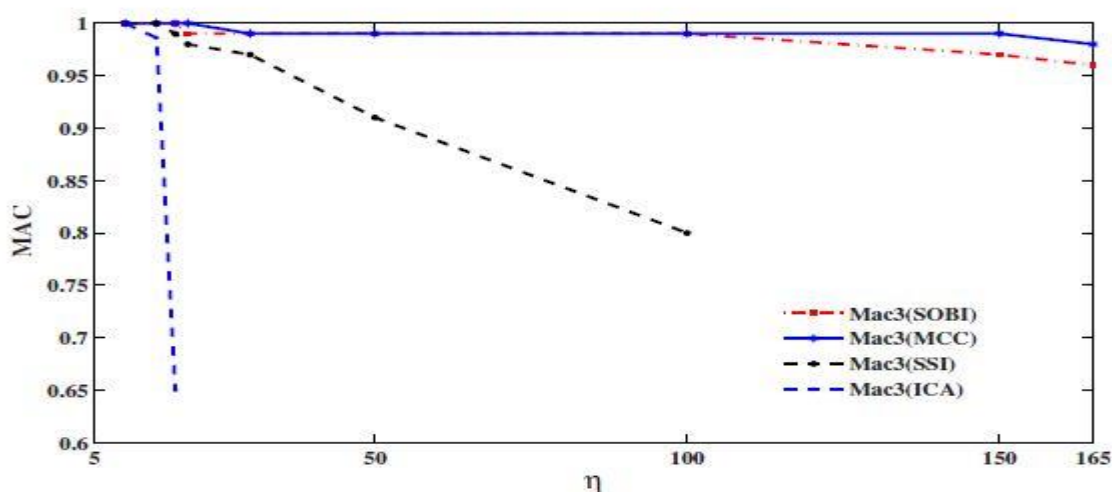
معادله (۲۵-۳) نتیجه‌ای کلیدی است که بیان می‌کند ماتریس سفیدسازی شده $\hat{R}_r(p)$ در هر تأخیر زمانی غیر صفر p به وسیله ماتریس واحد QA_r قطری‌سازی می‌شود.

به علت خطاهای تخمین و پیدا نکردن ماتریس قطری به شکل دقیق، ماتریس QA_r به صورت تقریبی محاسبه می‌گردد و چالش بعدی این است که اطلاعاتی برای انتخاب تعداد تأخیرهای زمانی از قبل وجود ندارد. در این پژوهش چند تأخیر زمانی انتخاب شده و ماتریس $\hat{R}_r(p)$ برای چند پنجره بدون همپوشانی قطری گردیده شده است. سپس مجموعه درایه‌های غیرقطر اصلی برای همه تأخیرهای زمانی حداقل شده‌اند. نتایج مطالعات عددی که روی یک سیستم سه درجه آزادی جرم و فنر انجام شده حاکی از این است که روش MCC در مقایسه با روش‌های SOBI و ICA و SSI در صورت وجود میرایی‌های بالا از دقت قابل ملاحظه‌ای برخوردار است.

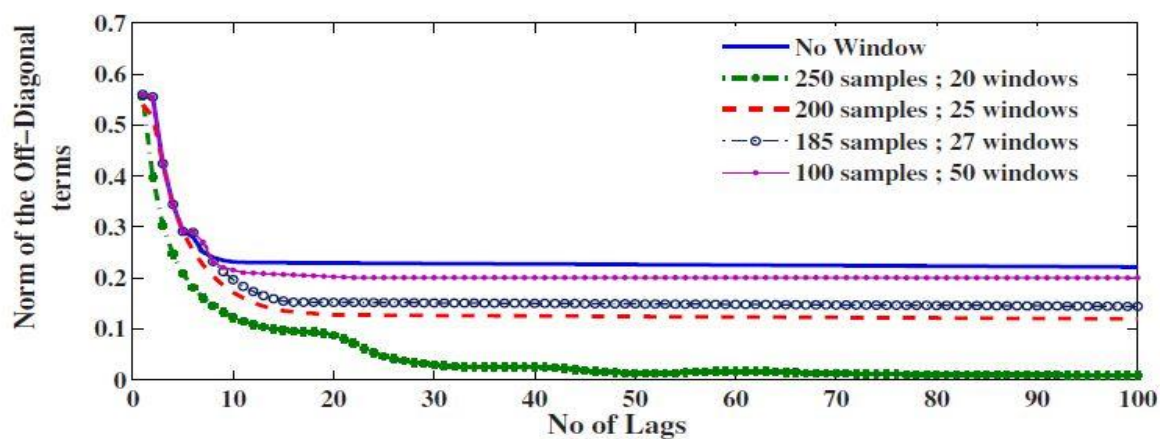
در این مطالعه عددی از صفر تا ۵۰ پنجره زمانی استفاده گردیده که نتایج آن در شکل ۳-۵ آمده است. همبستگی متقابل بازتاب‌های هر سه درجه آزادی و نحوه پنجره کردن آنها در شکل‌های ۳-۶ و ۳-۷ ملاحظه می‌شود. همانطور که قبلاً اشاره شد در انجام مطالعه عددی برای تحریک سیستم از سیگنال نایستا استفاده گردیده است.

جدول ۳-۲- نتایج حاصل از مقایسه روش MCC با روش‌های ICA، SOBI و SSI برای سازه سه درجه آزادی [۱۸]

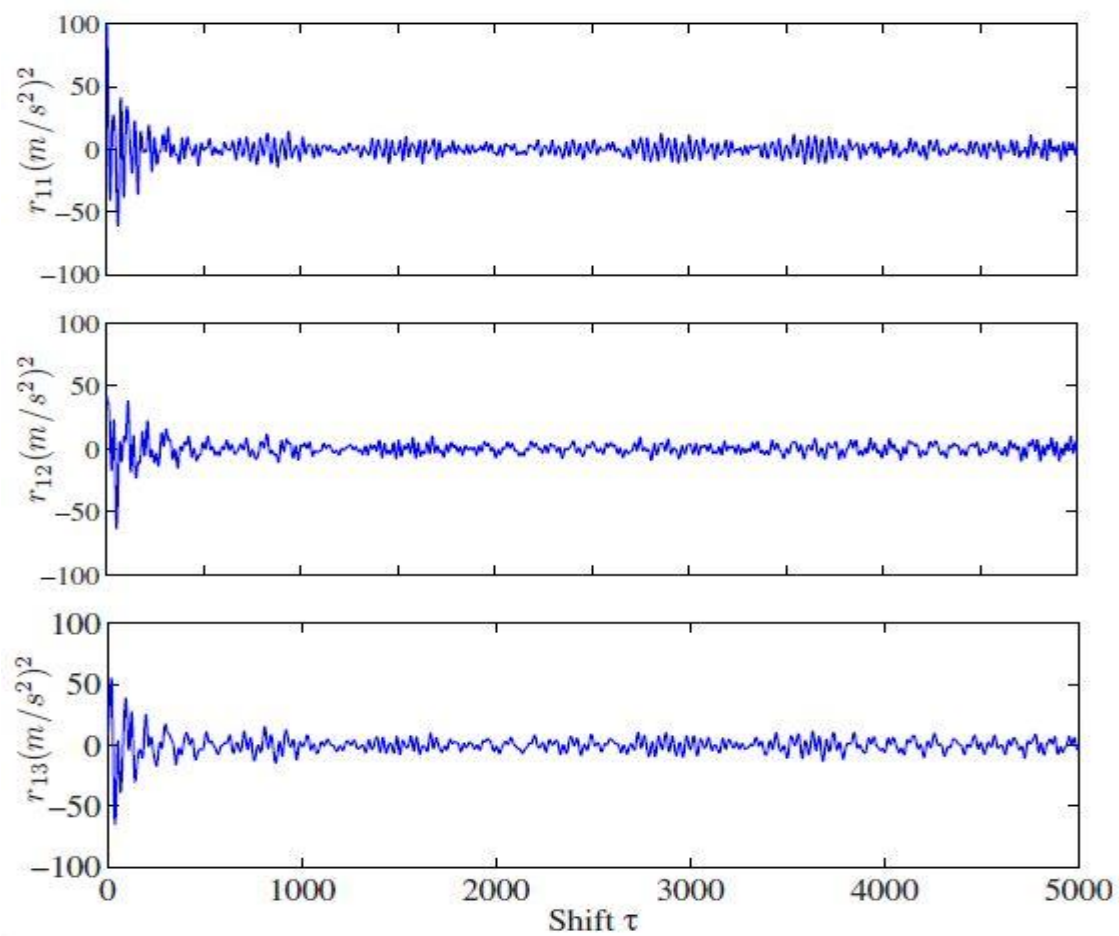
η	Mac1	Mac2 (ICA)	Mac3	Mac1	Mac2 (SOBI)	Mac3	Mac1	Mac2 (SSI)	Mac3	Mac1	Mac2 (MCC)	Mac3
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	1	1	0.99	1	1	1	1	1	1	1	1	1
18	0.99	0.77	0.64	1	1	1	1	1	0.99	1	1	1
20				0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	1	1	1
30				0.99	0.99	0.99	0.99	0.97	0.97	1	1	1
50				0.99	0.99	0.99	0.94	0.92	0.91	1	1	1
100				0.99	0.99	0.99	0.9	0.82	0.8	1	1	1
150				0.98	0.98	0.97	0.86	0.74	0.72	1	0.99	0.99
165				0.97	0.96	0.95	0.81	0.7	0.67	0.99	0.99	0.98



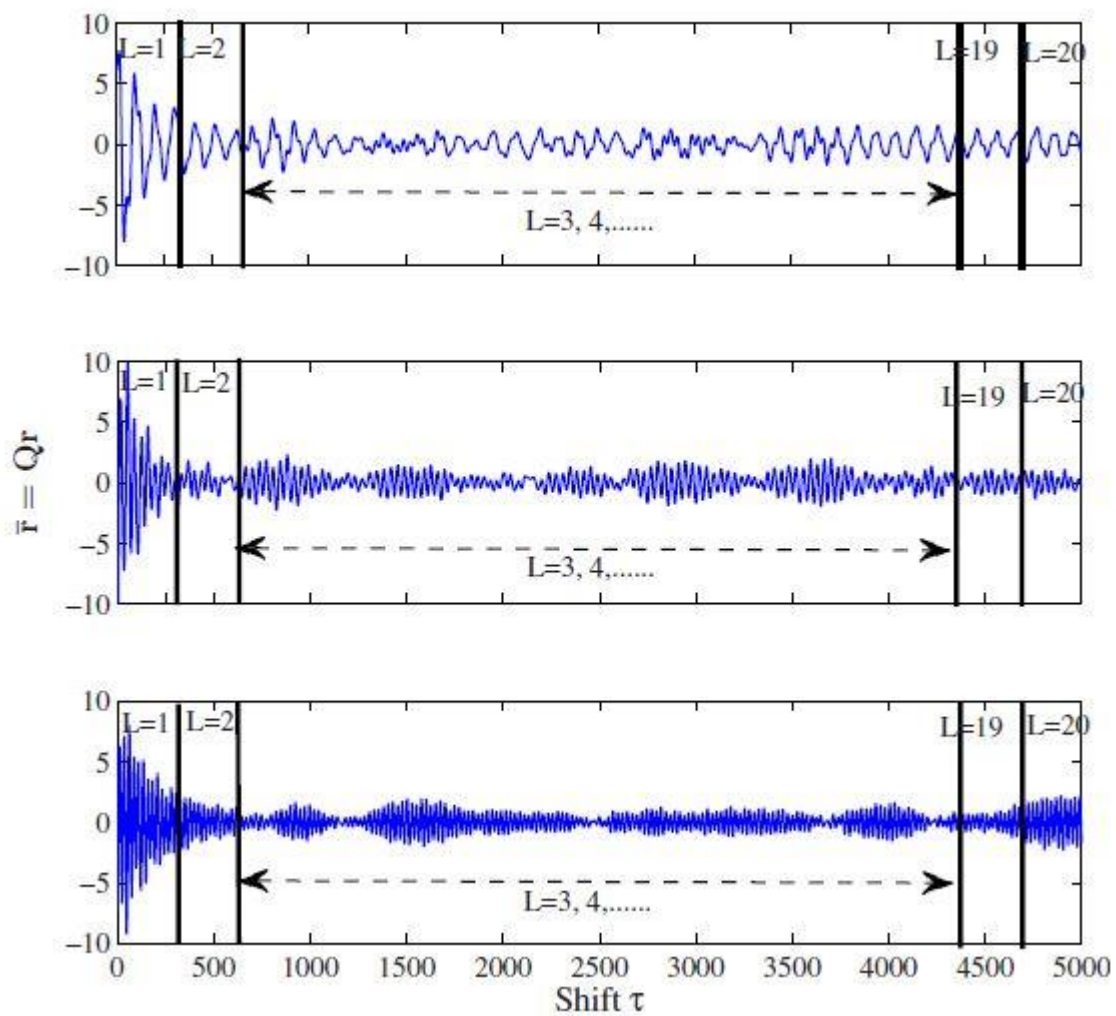
شکل ۳-۴- مقایسه تاثیر میرایی روی دقت روش‌های شناسایی سازه [۱۸]



شکل ۳-۵- تاثیر تعداد پنجره‌ها و تأخیرهای زمانی روی فطری سازی همزمان [۱۸]



شکل ۳-۶- همبستگی متقابل بازتاب‌های شتاب [۱۸]



شکل ۳-۷- عملیات پنجره کردن روی بازتاب‌های نرمال سفیدسازی شده [۱۸]

۳-۴- روش پیشنهادی جهت رفع چالش‌های شناسایی پارامترهای مودال سازه با استفاده

از روش جداسازی ناپیدای منابع

در این روش با کمک گرفتن از تکنیک فیلتر کردن برای رفع چالش محدودیت تعداد سنسورها و تکنیک همبستگی متقابل اصلاح شده برای رفع چالش کاهش دقت در میرایی‌های بالا، قصد بهبود روش SOBSS را داشته و در ادامه، مراحل آن تشریح می‌گردد.

در گام اول با برداشت بازتاب‌ها در چند درجه آزادی طیف فوریه آن‌ها ترسیم می‌شود. با استفاده از طیف فوریه می‌توان حدود فرکانس‌های مودال را تعیین کرد که بر اساس آن‌ها نیز باندهای گذر مناسب جهت طراحی فیلترهای فرکانسی مشخص می‌گردند.

فیلترهایی که با توجه به محدوده‌های فرکانسی طراحی می‌شوند، انواع مختلف دارند. از انواع آن‌ها می‌توان فیلترهای پایین‌گذر، فیلترهای میان‌گذر و فیلترهای بالاگذر نام برد. در جعبه ابزار پردازش سیگنال نرم افزار متلب، الگوریتم‌های متنوع برای طراحی و اعمال فیلترها وجود دارد که از دستوره‌های design.lowpass و design.bandpass به ترتیب برای طراحی فیلترهای پایین‌گذر و فیلترهای میان‌گذر در این پایان‌نامه استفاده گردیده است. در ادامه جهت اعمال فیلترها به بازتاب‌های برداشت شده از دستور filtfilt استفاده می‌گردد. عموماً پس از اعمال فیلتر، یک تغییر فاز خطی به بازتاب‌ها اضافه می‌شود که این تغییر فاز را باید حذف کرد اما از مزیت‌های دستور filtfilt در نرم‌افزار متلب این است که به طور خودکار تغییر فاز ایجاد نمی‌کند.

در گام بعدی همبستگی متقابل بازتاب‌های فیلتر شده بدست آورده می‌شود. درواقع این مرحله، وجه تمایز روش پیشنهادی و روش فیلتر کردن می‌باشد، چون از بازتاب‌های فیلتر شده جهت فرایند شناسایی به طور مستقیم استفاده نمی‌گردد. در مرحله بعدی نتایج حاصل از همبستگی متقابل بازتاب‌ها، سفیدسازی می‌شوند. سفیدسازی همان ناهمبسته سازی به معنای صفر بودن کوواریانس سیگنال‌ها می‌باشد. برای انجام فرایند سفید

سازی سیگنال‌ها، باید یک تبدیل خطی پیدا کرد تا شرایط ذکر شده در بالا را به وجود آورد که این تبدیل از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$V = D^{-1/2} E^T \quad (28-3)$$

ماتریس D شامل مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس سیگنال‌ها در تأخیر زمانی صفر می‌باشد، E ماتریسی است که ستون‌های آن، بردارهای ویژه نرمال شده ماتریس کوواریانس سیگنال‌ها در تأخیر زمانی صفر می‌باشد. پس از سفیدسازی باید خروجی‌ها به چندین پنجره بدون همپوشانی تقسیم شوند و برای این پنجره‌ها ماتریس کوواریانس در چندین تأخیر زمانی محاسبه گردد و سپس فرایند قطری‌سازی همزمان ماتریس‌های کوواریانس انجام شود. در این روش برای تعیین تعداد پنجره‌ها و تأخیرهای زمانی اطلاعاتی از قبل وجود ندارد و این کار نیازمند آزمون و خطا می‌باشد. به این صورت که با تغییر در تعداد پنجره‌ها و تعداد تأخیرهای زمانی، مجموع درایه‌های غیر از قطر اصلی در ماتریس کوواریانس به حداقل خود می‌رسد. در انتها از روی ماتریس قطری‌ساز می‌توان ماتریس ترکیب منابع را یافت. همان طور که در قبل تشریح شد، ماتریس ترکیب منابع همان ماتریس شامل شکل مودها می‌باشد و با مشخص شدن آن نیز می‌توان منابع که همان پاسخ‌های مودال هستند پیدا کرد.

از روی پاسخ‌های مودال به دست آمده نیز می‌توان فرکانس طبیعی و میرایی را محاسبه کرد. برای این منظور، پس از ترسیم بازتاب‌های مودال، تابعی لگاریتمی بر نقاط پیک آن برازش می‌گردد. در نرم افزار متلب با دستور fit کار برازش تابع انجام می‌گیرد. ضابطه این تابع به شکل زیر است:

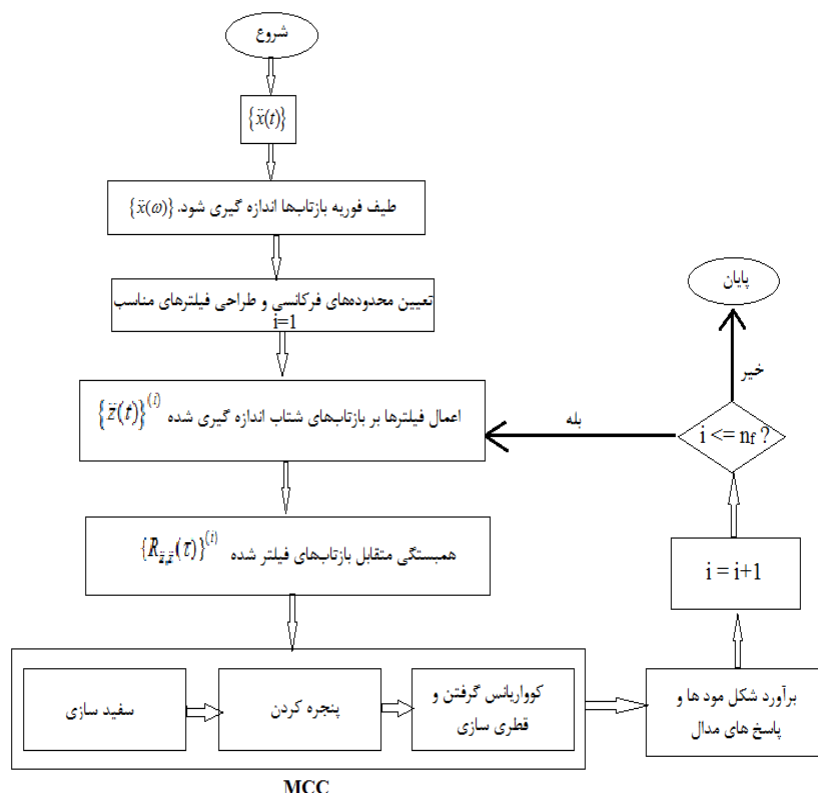
$$f(t) = A_0 e^{-\zeta \omega t} \quad (29-3)$$

که مقدار $(\zeta \omega)$ طی عملیات برازش تابع لگاریتمی معلوم می‌شود و A_0 با توجه به شرایط اولیه محاسبه می‌گردد. با تعیین فاصله زمانی بین دو پیک رخ داده که در واقع همان دوره تناوب می‌باشد، فرکانس میرا شده به دست می‌آید. سپس با توجه به رابطه $(30-3)$ فرکانس طبیعی قابل محاسبه است.

(۳-۳۰)

$$\omega^2 = \omega_d^2 + (\zeta\omega)^2$$

برای درک بهتر از فرایند طی شده در روش پیشنهادی، فلوچارت آن در شکل زیر ارائه گردیده است.

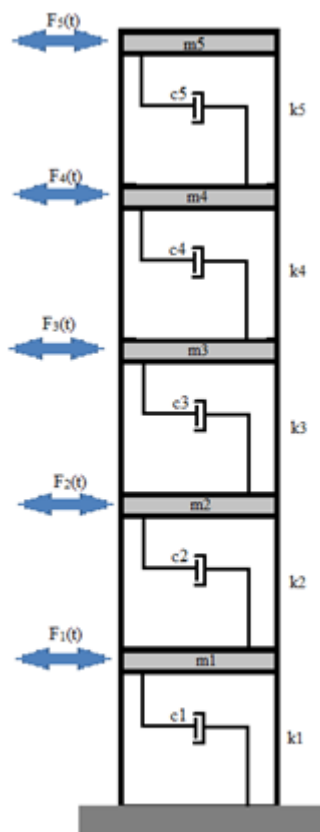


شکل ۳-۸- فلوچارت روش پیشنهادی

جهت ارزیابی روش پیشنهادی، از یک شبیه سازی عددی روی یک قاب برشی پنج طبقه تحت تحریک با سیگنالهای ایستا و نایستا استفاده شده است. تفاوت عمده سیگنالهای ایستا و نایستا، وابستگی یا عدم وابستگی مشخصات آماری آنها به زمان می باشد. در سیگنال نایستا مشخصات آماری وابسته به زمان است که مانند بار زلزله می باشد اما مشخصات آماری سیگنال ایستا وابسته به زمان نیست. همچنین جهت صحت سنجی، عملیات شناسایی پارامترهای مودال بر روی یک سازه معیار انجام گرفت که در ادامه تشریح خواهد شد.

۳-۴-۱- مطالعه موردی اول: شناسایی پارامترهای مودال قاب برشی پنج درجه آزادی

همانطور که اشاره شد یک قاب برشی پنج درجه آزادی برای ارزیابی عملکرد در نظر گرفته که جرم، میرایی و سختی طبقات آن به ترتیب ماتریس‌های M ، C و K می باشند.



شکل ۳-۹- قاب برشی پنج درجه آزادی تحت ارتعاش اجباری

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & -k_4 & 0 \\ 0 & 0 & -k_4 & k_4 + k_5 & -k_5 \\ 0 & 0 & 0 & -k_5 & k_5 \end{bmatrix}$$

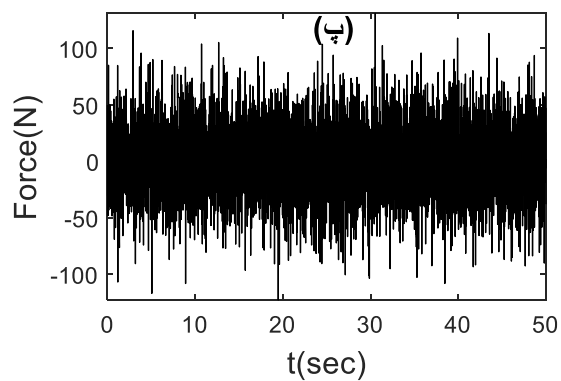
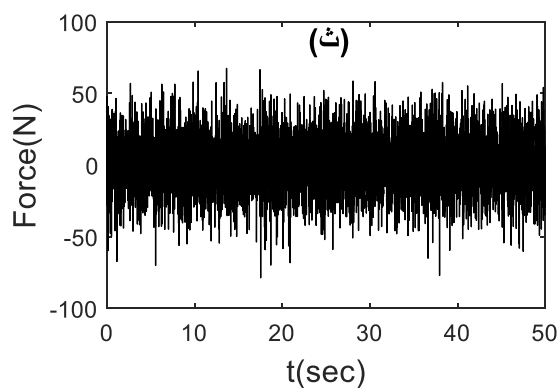
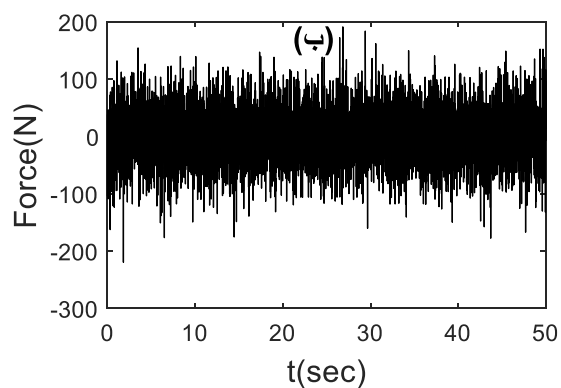
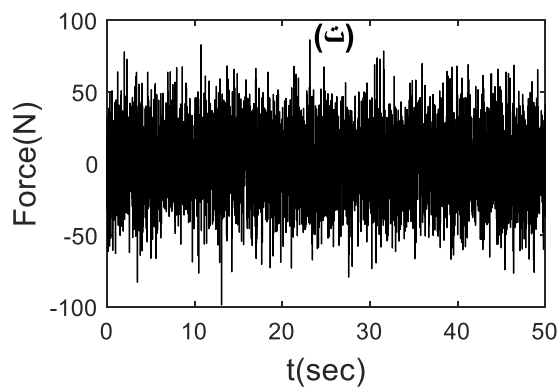
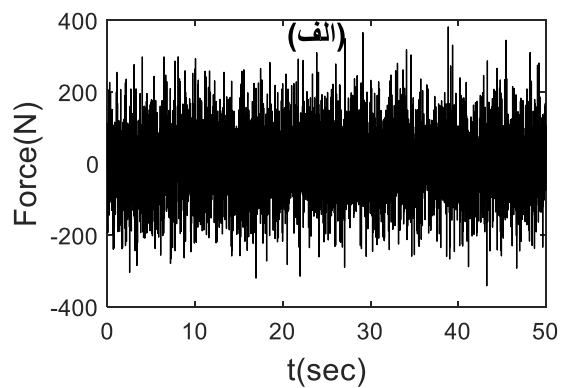
مقدار m برای هر طبقه ۱۰ کیلوگرم و همچنین مقادیر k_1, k_2, k_3, k_4 و k_5 برابر ۲ کیلونیوتن بر متر در نظر گرفته شده است. میرایی طبقات هم به عنوان ضریبی از جرم می باشد ($c = am$) که در طول آزمایش این ضریب از ۰/۵ تا ۱/۱۵ تغییر می نماید. نسبت میرایی بحرانی مود اول متناظر با $a = ۰/۵$ برابر با ۶/۴۲ درصد و برای $a = ۱/۱۵$ برابر با ۱۴/۲۸ درصد می باشد. بازتاب‌های شتاب، تنها در درجه آزادی ۳ و درجه آزادی ۵ محاسبه گردیده و با سطح نویز ۱۰ درصد در نظر گرفته شده اند. میزان سطح نویز مطابق با رابطه (۳-۳۱) تعریف می شود.

$$R_{ij} = \sigma_i / \max |\ddot{x}_i(t)| \quad (31-3)$$

که σ_i انحراف معیار نویز شبیه سازی شده از نوع گوسی سفید است.

۳-۴-۱-۱- آزمون ارتعاش اجباری تصادفی: تحریک با سیگنال ایستا

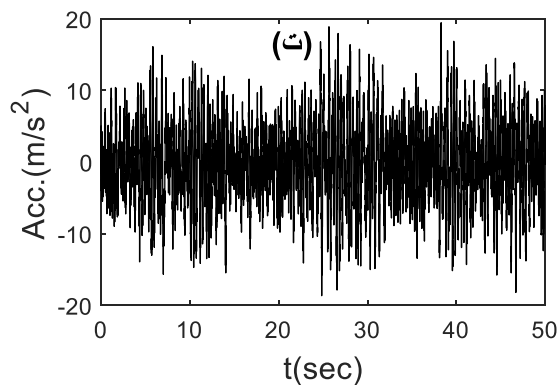
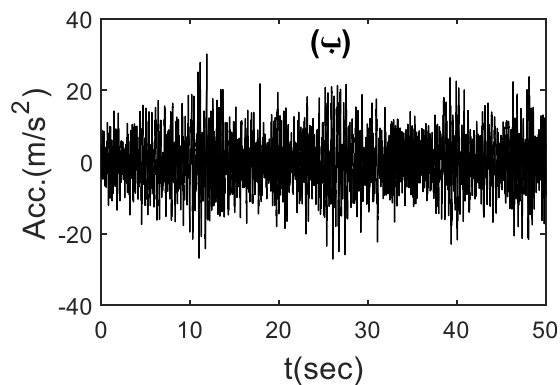
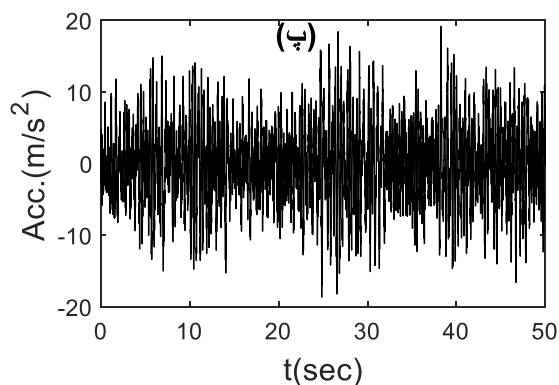
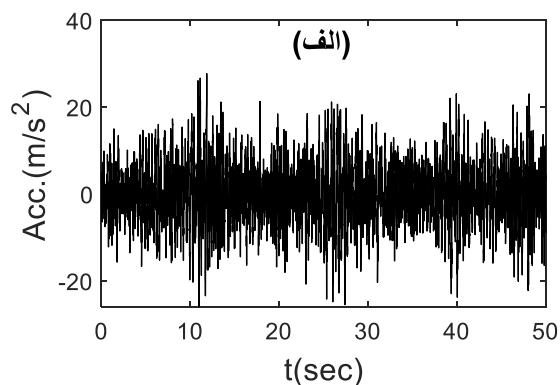
در این آزمون برای تحریک سیستم از نویز گوسی سفید در تمام درجات آزادی استفاده گردیده که در شکل ۳-۱۰ سیگنال‌های تحریک در هر پنج درجه آزادی آورده شده است.



شکل ۳-۱۰- سیگنال‌های تحریک در هر درجه آزادی

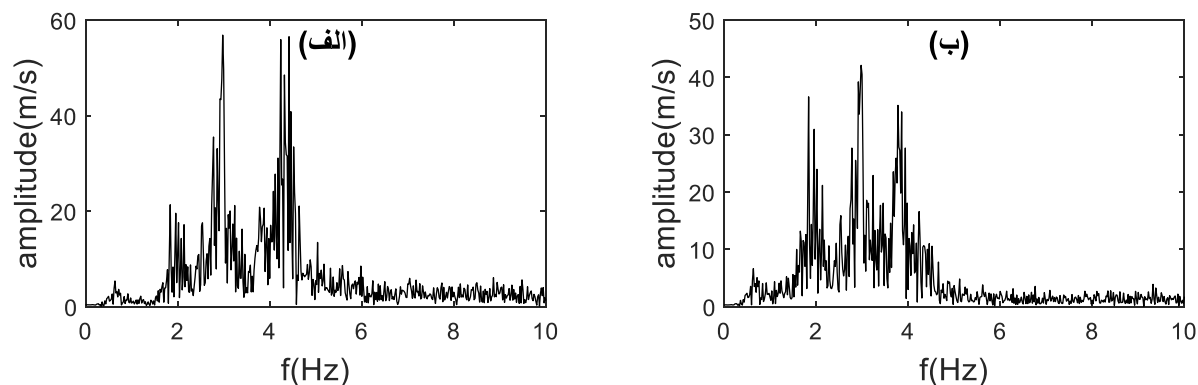
بازتاب‌های شتاب در درجات آزادی سوم و پنجم برای انجام فرایند شناسایی پارامترهای مودال انتخاب شده

که این بازتاب‌ها را در صورت وجود و عدم وجود نویز برای حالت $a=1/15$ در شکل ۳-۱۱ ملاحظه می کنید.



شکل ۳-۱۱- بازتاب شتاب درجه آزادی سوم بدون نویز (الف) و با سطح نویز ۱۰ درصد (ب)؛ بازتاب شتاب درجه آزادی پنجم بدون نویز (پ) و با سطح نویز ۱۰ درصد (ت)

همانطور که در تشریح روش اشاره شد، برای تعیین باندهای فرکانسی در طراحی فیلترها، باید طیف فوریه بازتاب‌ها رسم گردد. با توجه به طیف فوریه بازتاب‌ها و نسبت تعداد کل درجات آزادی به تعداد درجات آزادی که بازتاب‌های شتاب آن‌ها اندازه‌گیری شده (n/m) و گرد کردن این نسبت به نزدیکترین عدد صحیح بزرگتر، سه فیلتر فرکانسی مورد نیاز خواهد بود که به بازتاب‌های موجود به طور جداگانه اعمال می‌شوند.



شکل ۳-۱۲- طیف فوریه بازتاب شتاب درجه آزادی سوم (الف)؛ درجه آزادی پنجم (ب)

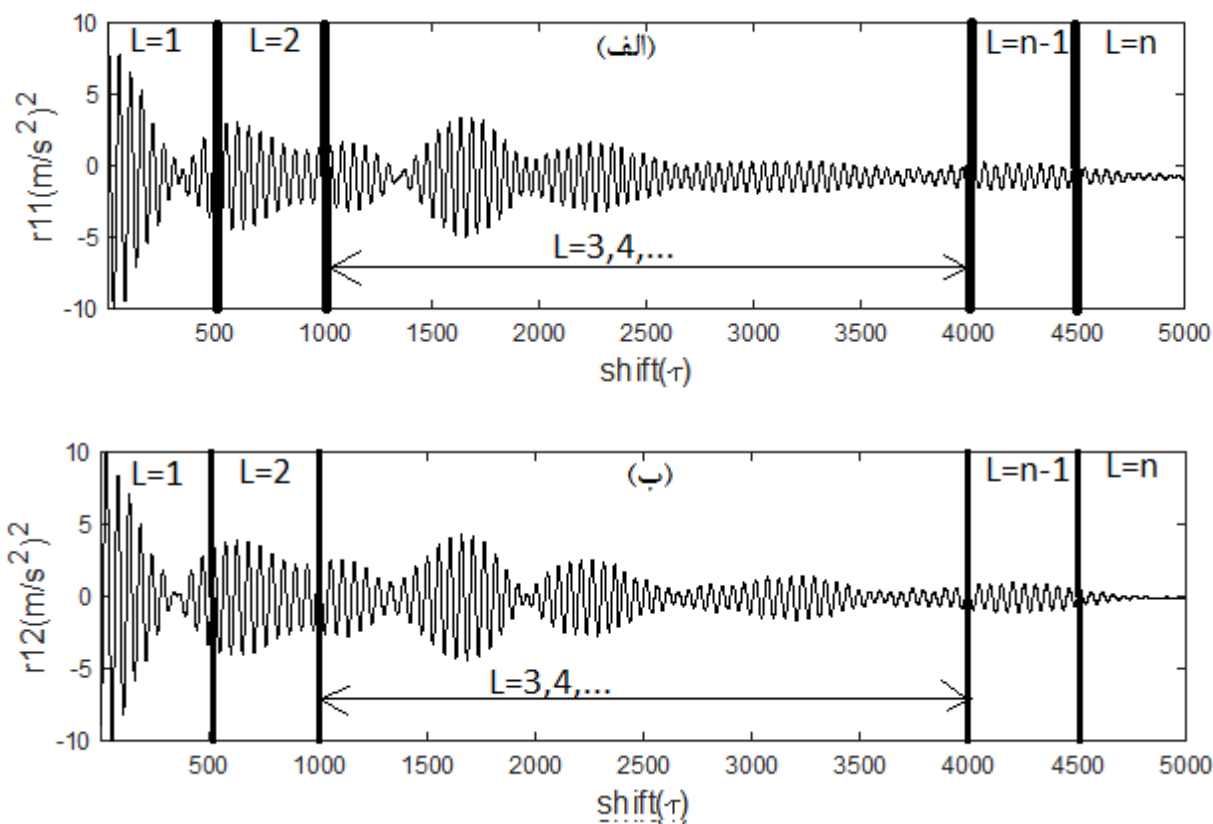
با توجه به تحریک کم فرکانس مود اول، احتمال تأثیر گذاشتن مودها روی یکدیگر وجود دارد و خطا در بدست آوردن پاسخهای مودال امکان پذیر است. بنابراین یک فیلتر به شناسایی مود اول اختصاص داده می شود. نهایتاً فیلترهای طراحی شده به فرم زیر در خواهند آمد:

فیلتر اول : $f_{pb1} < 1$

فیلتر دوم : $1.5 < F_{pb2} < 3.2$

فیلتر سوم : $3.5 < f_{pb3} < 5$

اکنون همبستگی متقابل دو سیگنال که فیلتر شده اند، محاسبه می شود. در شکل ۳-۱۳ نتیجه همبستگی متقابل دو سیگنال که به تعداد دلخواه پنجره بدون همپوشانی تقسیم شده، برای حالتی که $a = 1/15$ می باشد، ملاحظه می کنید.



شکل ۳-۱۳- همبستگی بازتاب‌های درجه آزادی سوم و پنجم که فیلتر اول بر آن‌ها اعمال شده؛ همبستگی بازتاب درجه آزادی سوم با خودش (الف)؛ همبستگی بازتاب درجه آزادی سوم با بازتاب درجه آزادی پنجم (ب)

در ادامه سیگنال‌ها وارد فرآیند شناسایی با روش SOBI می‌گردند. این فرآیند برای دو فیلتر دیگر نیز تکرار

می‌شود که نتایج نهایی را در جداول ۳-۳ و ۴-۳ ملاحظه می‌نمایید. در این جداول مقادیر معیار اطمینان مودی^۱

(MAC) به وسیله رابطه (۳۲-۳) به دست می‌آید.

$$MAC_i = \frac{(\phi_i^T \bar{\phi}_i)^2}{(\phi_i^T \phi_i)(\bar{\phi}_i^T \bar{\phi}_i)} \quad (۳۲-۳)$$

که ϕ_i و $\bar{\phi}_i$ به ترتیب مقادیر تئوریک و برآورده شده بردار شکل مود نام هستند.

^۱ Modal Assurance Criterion (MAC)

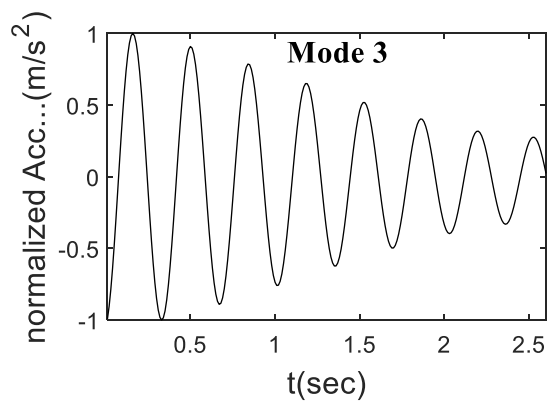
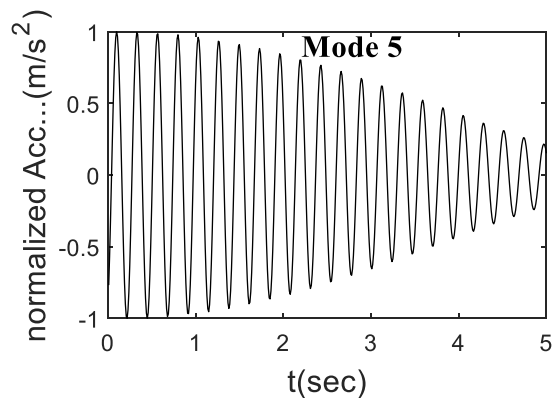
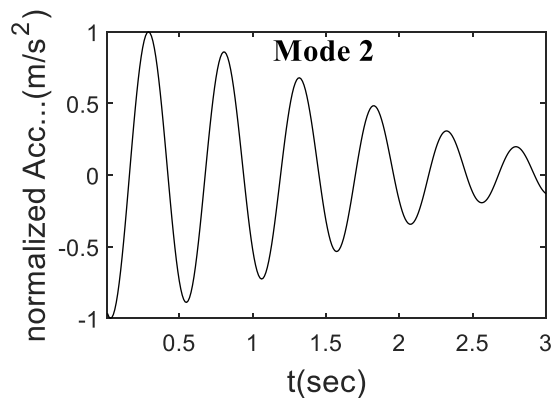
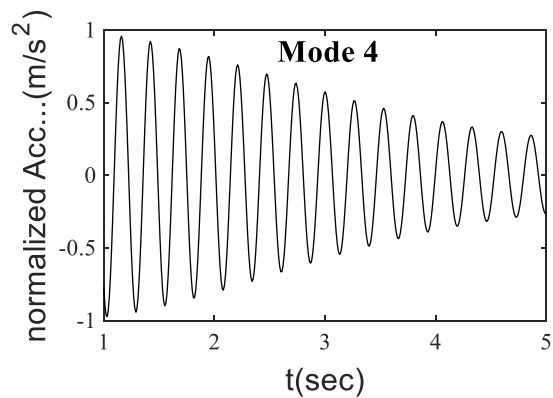
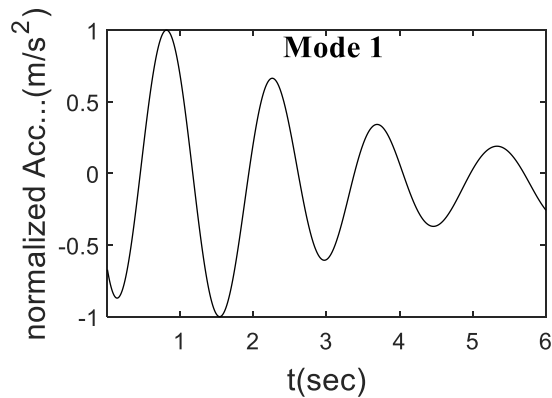
جدول ۳-۳- نتایج شناسایی پارامترهای مودال به روش پیشنهادی و روش فیلتر کردن در دو حالت $c = 0.75m$ و $c = 0.50m$ و $R_{nj} = 10\%$

شماره مود ها	$\alpha=0.50$									$\alpha=0.75$								
	مقادیر تحلیلی			روش فیلتر کردن			روش پیشنهادی			مقادیر تحلیلی			روش فیلتر کردن			روش پیشنهادی		
	f (Hz) ξ (%)			f (Hz) ξ (%) MAC			f (Hz) ξ (%) MAC			f (Hz) ξ (%)			f (Hz) ξ (%) MAC			f (Hz) ξ (%) MAC		
اول	0.64 6/42			0.66 6/92 0.99			0.67 6/01 1/00			0.64 9/32			0.70 4/96 0.98			0.63 10/06 1/00		
دوم	1/89 2/34			1/85 2/39 1/00			1/85 2/14 1/00			1/89 3/19			1/85 2/95 0.99			1/84 3/34 1/00		
سوم	2/95 1/35			2/94 1/10 1/00			2/94 1/41 1/00			2/95 2/20			2/95 2/09 1/00			2/92 2/32 1/00		
چهارم	3/87 1/05			3/07 0/80 1/00			3/84 1/28 1/00			3/87 1/58			3/84 1/80 1/00			3/84 1/64 1/00		
پنجم	4/31 0/92			4/35 0/63 1/00			4/35 1/23 1/00			4/31 1/38			4/31 0/96 1/00			4/32 1/32 1/00		

جدول ۴-۳- نتایج شناسایی پارامترهای مودال به روش پیشنهادی و روش فیلتر کردن در دو حالت $c = 1m$ و $c = 1.15m$ و $R_{nj} = 10\%$

شماره مود ها	$\alpha=1$						$\alpha=1/15$									
	مقادیر تحلیلی		روش فیلتر کردن		روش پیشنهادی	مقادیر تحلیلی		روش فیلتر کردن		روش پیشنهادی						
	f (Hz)	ξ (%)	f (Hz)	ξ (%)	MAC	f (Hz)	ξ (%)	MAC	f (Hz)	ξ (%)	MAC					
اول	۰/۶۴	۱۲/۴۲	۰/۵۹	۴/۶۱	۰/۹۵	۰/۶۱	۱۱/۸۳	۱/۰۰	۰/۶۴	۱۴/۲۸	۰/۶۰	۴/۹۵	۰/۹۲	۰/۶۲	۱۴/۹۲	۰/۹۹
دوم	۱/۸۹	۴/۲۶	۱/۸۶	۳/۸۷	۱/۰۰	۱/۸۵	۴/۱۴	۱/۰۰	۱/۸۹	۴/۸۹	۱/۸۳	۴/۵۶	۰/۹۹	۱/۸۲	۵/۳۶	۰/۹۹
سوم	۲/۹۵	۲/۷۰	۲/۸۴	۲/۵۱	۱/۰۰	۲/۹۴	۲/۸۳	۱/۰۰	۲/۹۵	۳/۱۰	۲/۸۶	۳/۳۱	۱/۰۰	۲/۹۷	۳/۲۴	۱/۰۰
چهارم	۳/۸۷	۲/۱۰	۳/۸۳	۲/۲۳	۱/۰۰	۳/۸۴	۲/۳۲	۱/۰۰	۳/۸۷	۲/۴۲	۳/۷۹	۲/۲۶	۱/۰۰	۳/۸۵	۲/۳۱	۱/۰۰
پنجم	۴/۳۱	۱/۸۴	۴/۳۲	۱/۶۶	۱/۰۰	۴/۳۵	۱/۷۶	۱/۰۰	۴/۳۱	۲/۱۲	۴/۳۴	۲/۰۱	۱/۰۰	۴/۲۸	۱/۹۶	۱/۰۰

در شکل ۳-۱۴ پاسخهای مودال قاب برشی پنج درجه آزادی حاصل از شناسایی پارامترهای مودال به روش پیشنهادی ارائه شده است.

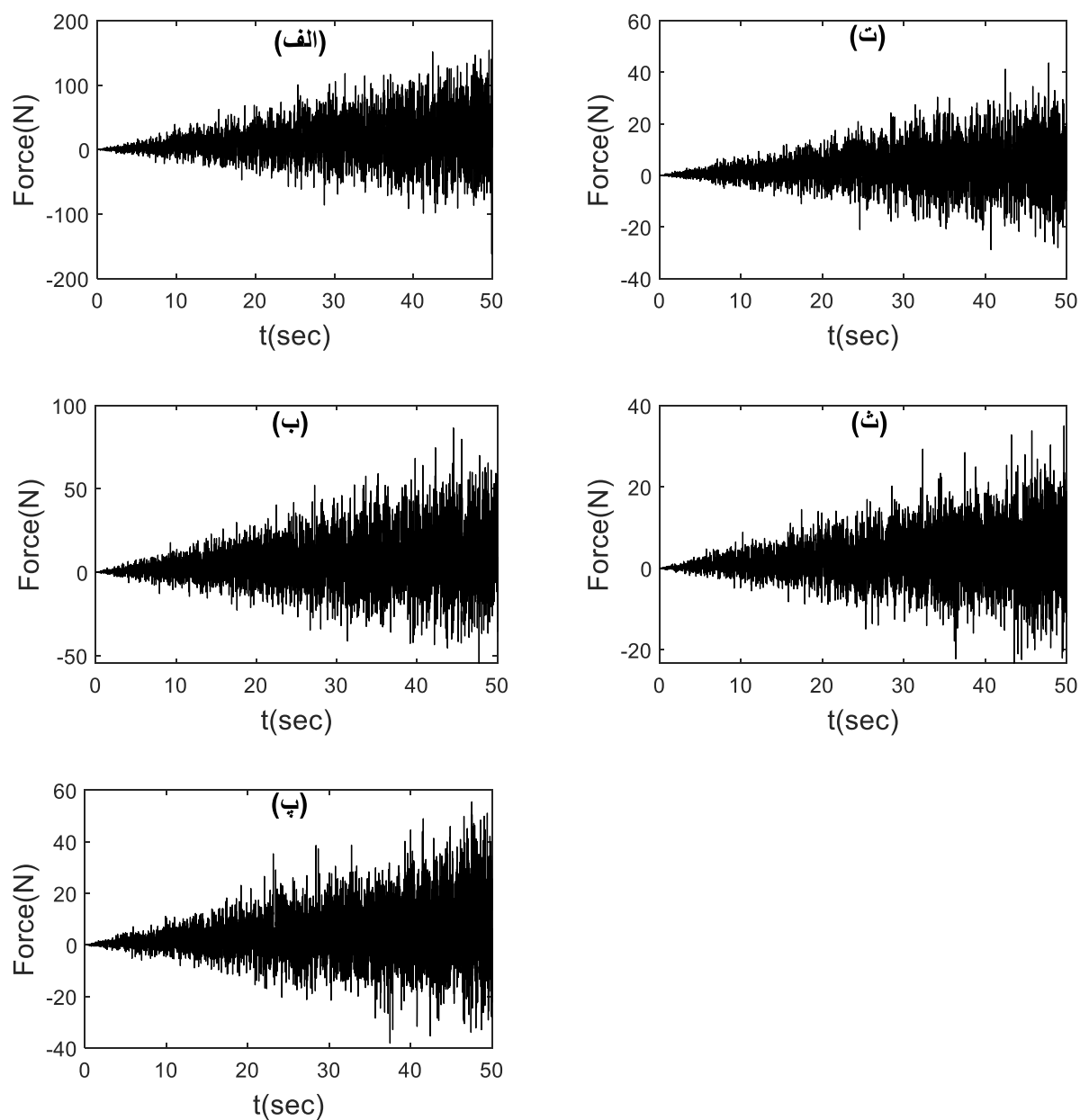


شکل ۳-۱۴- پاسخ‌های مودال قاب برشی پنج درجه آزادی حاصل از شناسایی پارامترهای مودال به روش پیشنهادی

۳-۴-۱-۲- آزمون ارتعاش اجباری تصادفی: تحریک با سیگنال نایستا

همانطور که در قبل اشاره شد تفاوت سیگنال‌های ایستا و نایستا در وابستگی و یا عدم وابستگی مشخصات آماری به زمان می باشد. در این قسمت سیستم قاب برشی پنج درجه آزادی به وسیله یک سیگنال نایستا تحت تحریک قرار گرفته و پارامترهای مودال نیز به دست آورده شده است. این سیگنال می‌تواند بار ناشی از زلزله را

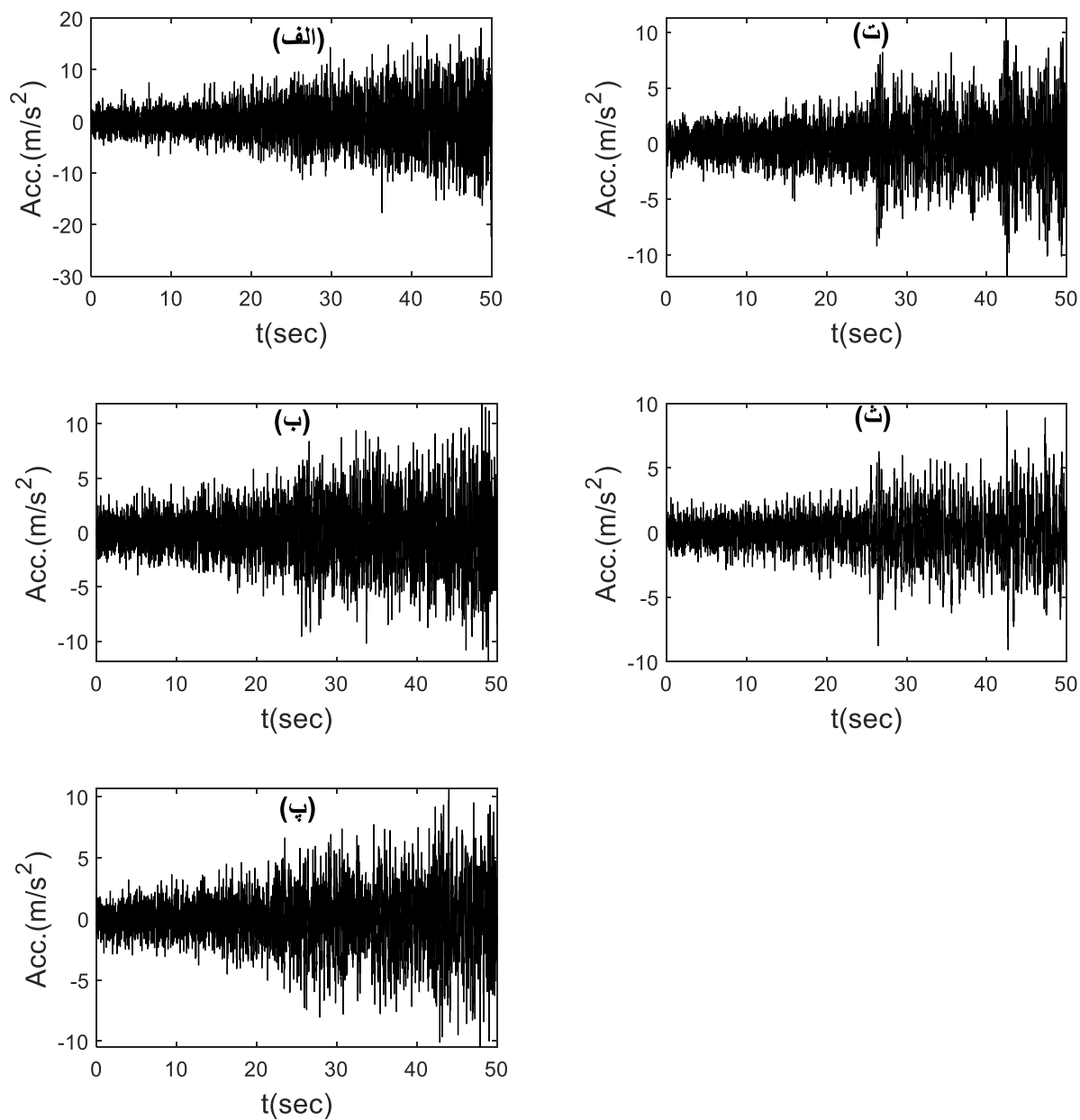
شبیه سازی کرده و به دست آوردن پارامترهای مودال تحت این شرایط از مزیت‌های این روش به شمار می‌آید.



شکل ۳-۱۵- سیگنال‌های تحریک در هر درجه آزادی؛ درجه آزادی اول: (الف)، دوم: (ب)، سوم: (پ)، چهارم: (ت)، پنجم: (ث)

در شکل ۳-۱۶ بازتاب‌های شتاب در هر پنج درجه آزادی در صورت وجود سطح نویز ۱۰ درصد قابل مشاهده

است.

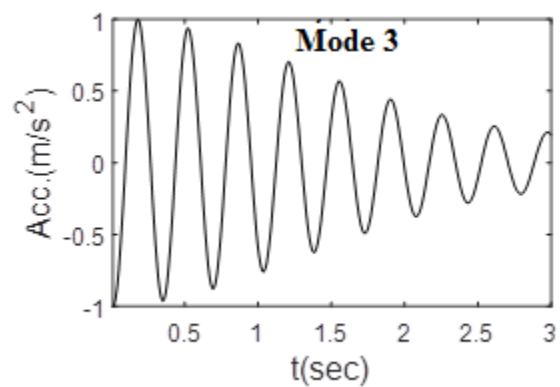
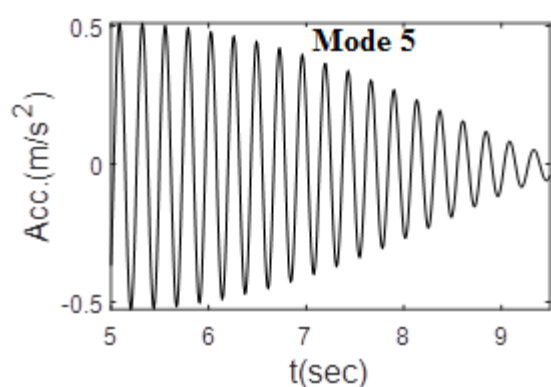
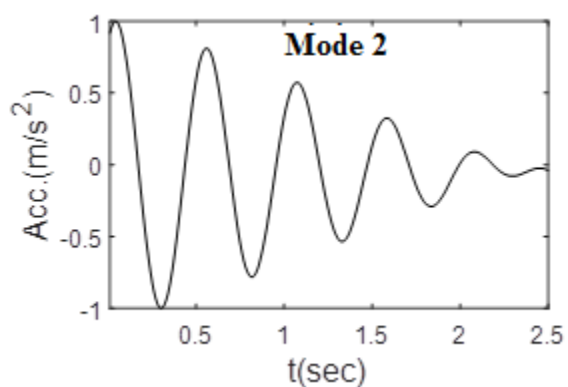
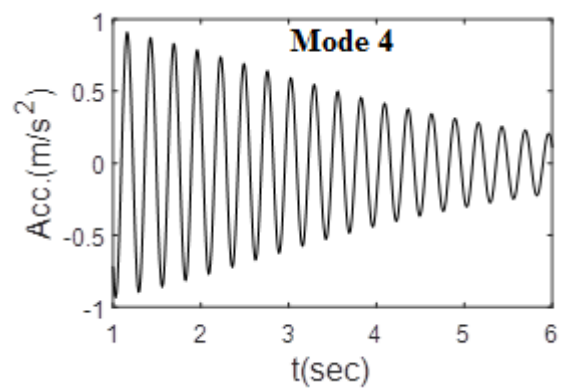
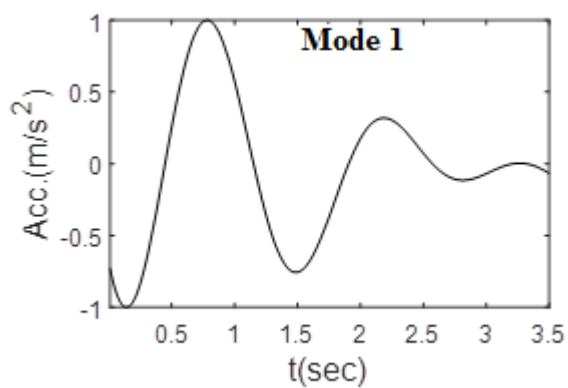


شکل ۳-۱۶- بازتاب‌های شتاب اندازه‌گیری شده در هر درجه آزادی؛ درجه آزادی اول: (الف)، دوم: (ب)، سوم: (پ)، چهارم: (ت)، پنجم: (ث)

در این آزمون مشابه با آزمون اول تنها از بازتاب‌های درجات آزادی سوم و پنجم برای شناسایی پارامترهای مودال استفاده شده و تمام مراحل مطابق با آزمون اول می‌باشد. نتایج حاصل از شناسایی به روش پیشنهادی و روش فیلتر کردن در جدول ۳-۵ آمده است.

جدول ۳-۵- نتایج شناسایی پارامترهای مودال به روش پیشنهادی و روش فیلتر کردن در دو حالت $c=1m$ و $c=1/15m$
 $R_{nj} = 10\%$

شماره مودها	$\alpha=1$									$\alpha=1/15$								
	مقادیر تحلیلی			روش فیلتر کردن			روش پیشنهادی			مقادیر تحلیلی			روش فیلتر کردن			روش پیشنهادی		
	f (HZ) ξ (%)			f (HZ) ξ (%) MAC			f (HZ) ξ (%) MAC			f (HZ) ξ (%)			f (HZ) ξ (%) MAC			f (HZ) ξ (%) MAC		
اول	۰/۶۴	۱۲/۴۲	—	—	—	۰/۸۲	۰/۶۱	۱۱/۶۹	۱/۰۰	۰/۶۴	۱۴/۲۸	—	—	—	۰/۶۷	۰/۶۶	۱۵/۱۷	۱/۰۰
دوم	۱/۸۹	۴/۲۶	—	—	—	۰/۹۱	۱/۸۵	۴/۰۹	۱/۰۰	۱/۸۹	۴/۸۹	—	—	—	۰/۸۹	۱/۹۳	۴/۵۳	۱/۰۰
سوم	۲/۹۵	۲/۷۰	—	—	—	۰/۹۴	۲/۹۴	۲/۴۶	۱/۰۰	۲/۹۵	۳/۱۰	—	—	—	۰/۹۲	۲/۸۸	۳/۴۵	۱/۰۰
چهارم	۳/۸۷	۲/۱۰	—	—	—	۰/۹۴	۳/۸۴	۲/۲۱	۱/۰۰	۳/۸۷	۲/۴۲	—	—	—	۰/۹۴	۳/۹۴	۲/۱۲	۱/۰۰
پنجم	۴/۳۱	۱/۸۴	—	—	—	۰/۹۶	۴/۳۵	۲/۰۱	۱/۰۰	۴/۳۱	۲/۱۲	—	—	—	۰/۹۸	۴/۳۴	۲/۰۳	۱/۰۰



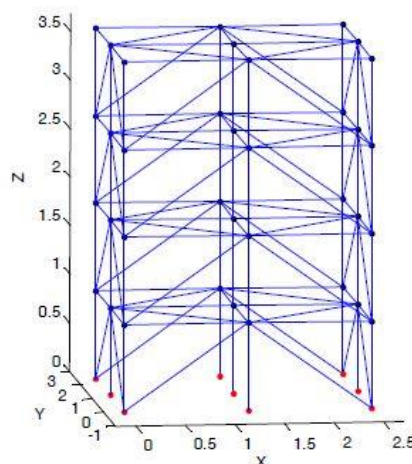
شکل ۳-۱۷- پاسخ‌های مودال قاب برشی پنج درجه آزادی حاصل از شناسایی پارامترهای مودال به روش پیشنهادی تحت تحریک سیگنال نایستا

۳-۴-۲- مطالعه موردی دوم: شناسایی پارامترهای مودال یک سازه معیار

در این بخش به منظور صحت‌سنجی روش پیشنهادی، پارامترهای مودال یک سازه معیار^۱ با استفاده از همین روش برآورد می‌شود. این سازه یک نمونه آزمایشگاهی چهار طبقه با سیستم باربر جانبی مهاربندی در هر دو امتداد می‌باشد. سازه معیار مذکور در سال ۲۰۰۳ در دانشگاه بریتیش کلمبیا^۲ جهت ارزیابی روش‌های موجود در زمینه پایش سلامت سازه ساخته شده است [۲۱]. همانطور که در شکل ۳-۱۸ دیده می‌شود این سازه چهار طبقه، در هر راستا دو دهانه دارد و ارتفاع طبقات ۰/۹ متر و عرض تمامی دهانه‌ها ۱/۲۵ متر می‌باشد. به منظور اعمال سناریوهای مختلف بارگذاری یک مدل تحلیلی اجزا محدود از این سازه طراحی شده است [۲۲]. تمامی داده‌ها و برنامه‌های کامپیوتری در محیط متلب که کار انجام تحلیل اجزا محدود روی این مدل آزمایشگاهی را انجام می‌دهد در سایت اینترنتی مرجع [۲۳] در دسترس قرار گرفته است.



(الف)



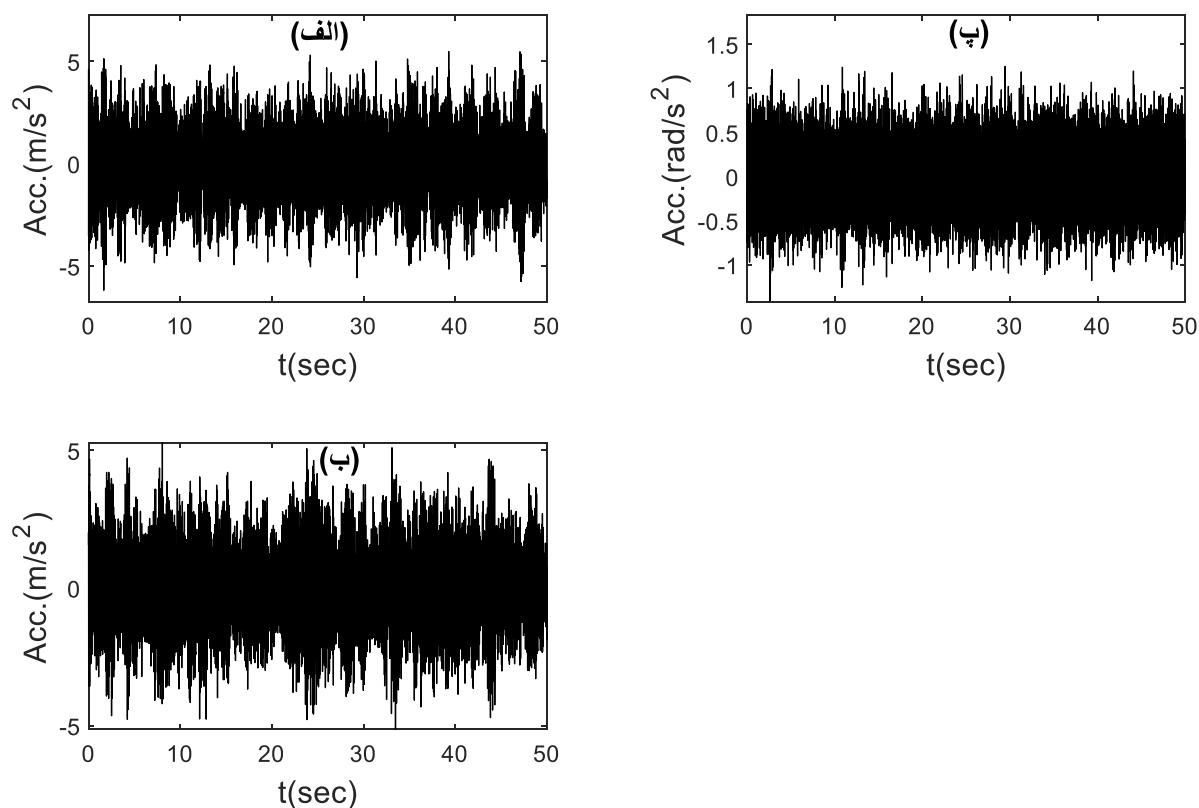
(ب)

شکل ۳-۱۸- (الف) تصویر از سازه معیار [۲۱]؛ (ب) تصویر مدل اجزا محدود آن [۲۱]

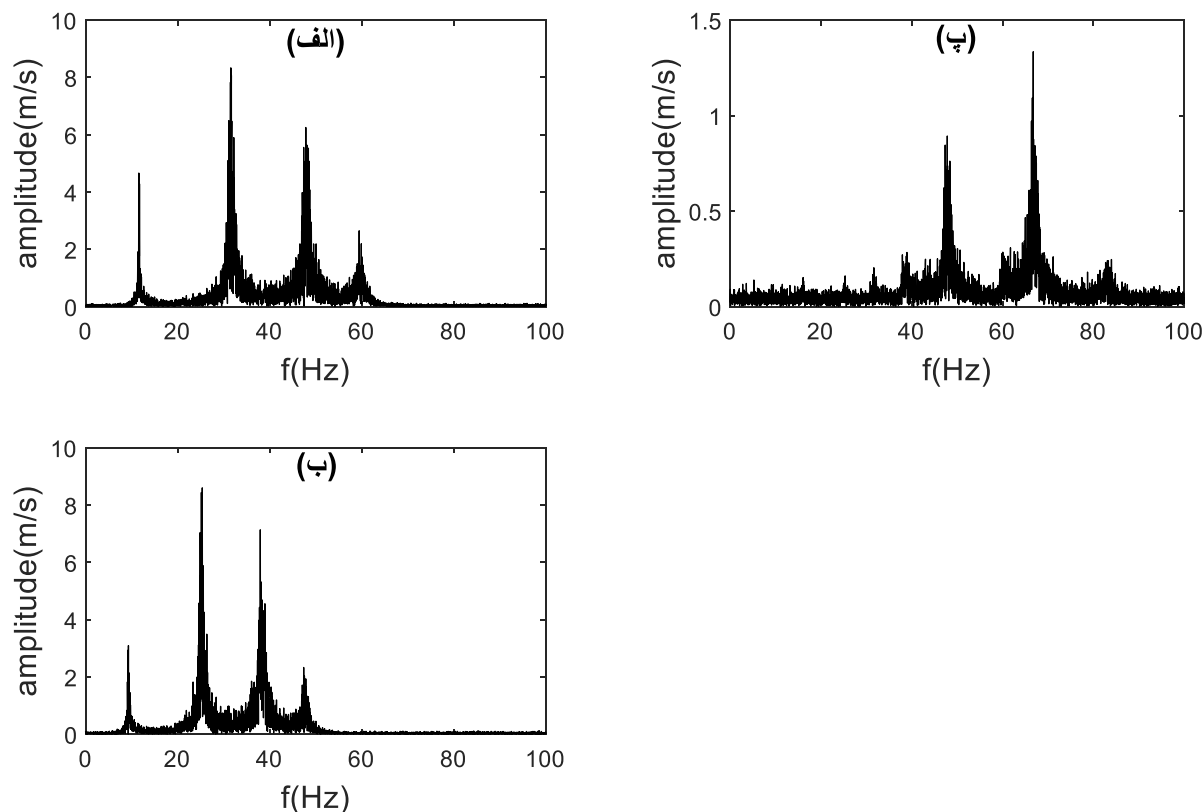
¹ Benchmark structure

² University of British Columbia

برای انجام این ارزیابی از مدل اجزا محدود استفاده گردیده است. در مدل تحلیلی مذکور برای هر طبقه ۳ درجه آزادی در نظر گرفته شده که دو درجه آزادی آن انتقالی، یکی درجهت x و دیگری درجهت y و یک درجه آزادی پیچشی می باشد. بنابراین در مجموع ۱۲ درجه آزادی برای این مدل تعیین گردیده است. بازتاب‌های شتاب این سازه در طبقات یک و چهار که ناشی از تحریک خارجی نامعلوم نویز گوسی سفید می باشد، جهت شناسایی پارامترهای مودال برداشت شده است. در شکل ۳-۱۹ بازتاب‌های شتاب هر سه درجه آزادی در طبقه اول قابل مشاهده می باشد. همچنین طیف فوریه این بازتاب‌ها که برای طراحی فیلترهای فرکانسی کمک می کنند، در شکل ۳-۲۰ نشان داده شده است. لازم به ذکر می باشد بازتاب‌های شتاب در مدت ۱۰۰ ثانیه ابتدایی برداشت شده که به منظور حذف اثر گذرا از ۵۰ ثانیه اول صرف نظر شده و همچنین سطح نویز ۱۰ درصد ($R_{nj} = 10\%$) بر بازتاب‌ها اعمال گردیده است.



شکل ۳-۱۹- بازتاب‌های شتاب در درجات آزادی طبقه اول: (الف) امتداد x ، (ب) امتداد y ، (پ) پیچشی



شکل ۳-۲۰- طیف فوریه بازتاب‌های شتاب در درجات آزادی طبقه اول: (الف) امتداد x ، (ب) امتداد y ، (پ) پیچشی

با توجه به نسبت تعداد کل درجات آزادی به تعداد بازتاب‌های برداشت شده (n/m) ، دو فیلتر فرکانسی جهت شناسایی مورد نیاز است. نکته قابل توجه در طراحی فیلترها، تحریک کم مودهای اول و چهارم، در مجموعه درجات آزادی پیچشی می‌باشد که به همین دلیل فیلترهایی جداگانه برای این دو مود در نظر گرفته شده است. جزئیات این فیلترها در جدول ۳-۶ قابل ملاحظه می‌باشد.

جدول ۳-۶- محدوده‌های فرکانسی جهت طراحی فیلترها در هر مجموعه از درجات آزادی

فیلتر فرکانسی سوم		فیلتر فرکانسی دوم		فیلتر فرکانسی اول		نوع درجات آزادی
$f_{pb6} \text{ (HZ)}$	$f_{pb5} \text{ (HZ)}$	$f_{pb4} \text{ (HZ)}$	$f_{pb3} \text{ (HZ)}$	$f_{pb2} \text{ (HZ)}$	$f_{pb1} \text{ (HZ)}$	
—	—	۶۵	۴۲	۴۰	۱۰	انتقالی امتداد x
—	—	۶۰	۳۰	۳۰	۵	انتقالی امتداد y
۸۶	۸۰	۷۰	۴۵	۴۱	۳۷	پیچشی θ

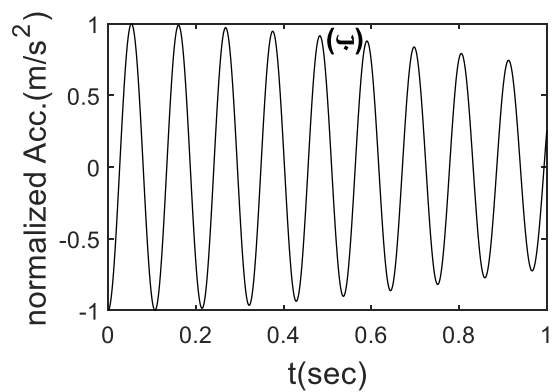
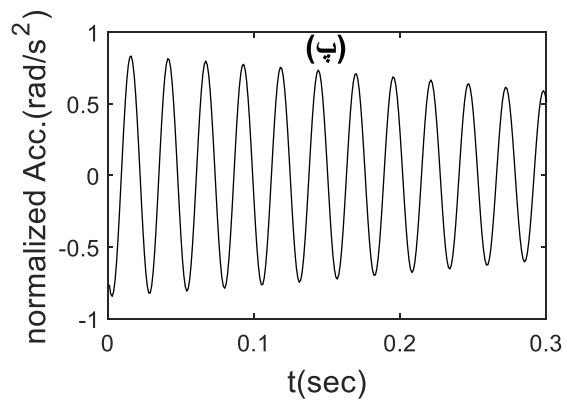
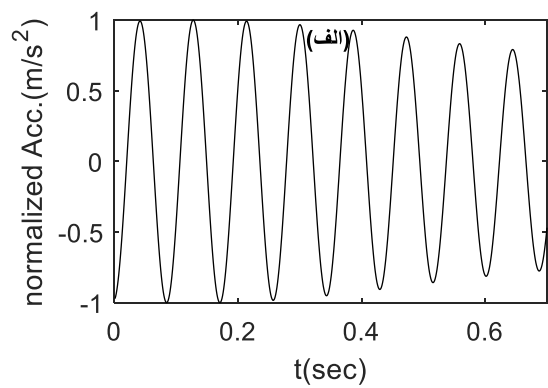
در ادامه، با محاسبه همبستگی متقابل بازتاب‌های موجود و تقسیم آن‌ها به چند پنجره بدون همپوشانی

ورودی الگوریتم SOBSS تعیین می‌شود. در جدول ۳-۷ نتایج شناسایی سازه با استفاده از روش پیشنهادی نشان داده شده است. برای این صحت سنجی تعداد ۱۰ پنجره بدون همپوشانی در نظر گرفته و تعداد تأخیرهای زمانی ۶۰۰ می‌باشد.

جدول ۳-۷- پارامترهای مودال شناسایی شده به وسیله روش پیشنهادی

مقدار شناسایی شده	مقادیر تحلیلی [۲۲]		مود
	ξ (%)	f (HZ)	
MAC			
۱/۰۰	۰/۹۶	۹/۳۲	۱(x)
۱/۰۰	۰/۹۱	۱۱/۶۹	۲(y)
۱/۰۰	۱/۱۷	۱۶/۱۲	۳(θ)
۱/۰۰	۰/۸۶	۲۵/۳۱	۴(y)
۱/۰۰	۰/۹۳	۳۱/۷۳	۵(x)
۱/۰۰	۰/۸۳	۳۸/۲۱	۶(y)
۱/۰۰	۱/۰۸	۴۴/۲۵	۷(θ)
۱/۰۰	۱/۱۳	۴۷/۸۹	۸(y)
۱/۰۰	۰/۷۴	۴۸/۰۸	۹(x)
۱/۰۰	۱/۲۹	۵۹/۷۴	۱۰(x)
۱/۰۰	۱/۱۰	۶۶/۹۶	۱۱(θ)
۱/۰۰	۰/۸۵	۸۳/۱۲	۱۲(θ)

در شکل ۳-۲۱ بازتاب‌های نرمال شتاب مودال برای مود اول در هر مجموعه از درجات آزادی ارائه گردیده است.



شکل ۳-۲۱- بازتاب‌های شتاب مودال نرمال شده برای مود اول در هر مجموعه از درجات آزادی: (الف) امتداد x ، (ب) امتداد y ، (پ) پیچشی

فصل چهارم: نتیجه گیری

۴- نتیجه گیری

۴-۱- پیشگفتار

در این فصل پس از توضیح مختصر از کلیات روش پیشنهادی، نتایج حاصل از آن تشریح می‌شود.

۴-۲- روش پیشنهادی در شناسایی پارامترهای مودال و تشریح نتایج آن

در این پایان‌نامه با بهره بردن از روش همبستگی متقابل اصلاح شده (MCC)، تکنیک فیلترکردن مبتنی بر الگوریتم SOBSS جهت شناسایی پارامترهای مودال در سازه‌هایی با میرایی بالا بهبود بخشیده شد. در روش MCC به جای استفاده مستقیم از بازتاب‌های اندازه‌گیری شده از همبستگی متقابل آن‌ها به عنوان ورودی فرایند شناسایی استفاده می‌گردد. در ادامه این سیگنال‌ها به تعدادی پنجره بدون همپوشانی تقسیم شده و برای هر پنجره، ماتریس کوواریانس در چندین تأخیر زمانی محاسبه می‌شود. با قطری‌سازی تقریبی همزمان ماتریس‌های کوواریانس، شناسایی پارامترهای مودال سازه انجام می‌گیرد. برای تعیین تعداد پنجره‌های بدون همپوشانی و تأخیرهای زمانی اطلاعاتی از قبل وجود ندارد و نیاز به سعی و خطا و قضاوت مهندسی است تا مجموع درایه‌های غیر قطر اصلی در ماتریس‌های کوواریانس به حداقل خود برسد. از نتایج این پژوهش نیز بهبود روش MCC با کمک گرفتن از روش فیلتر کردن می‌باشد. در واقع یک درهم‌تنیدگی بین تکنیک MCC و تکنیک فیلتر کردن حاصل گردید تا نقایص هر کدام با بهره بردن از یکدیگر برطرف شود. در موده‌های با تحریک

کم، با تغییر در حدود فرکانسی و اختصاص فیلتر جداگانه به آن‌ها دقت فرایند شناسایی پارامترهای مودال بهبود پیدا کرد. از دیگر نتایج به دست آمده از این پژوهش می‌توان به قابلیت شناسایی سازه در صورت تحریک خارجی با سیگنال نایب اشاره کرد. در الگوریتم استاندارد SOBSS و تکنیک فیلتر کردن که مبتنی بر الگوریتم SOBSS می‌باشد، امکان شناسایی سازه در صورت تحریک سیستم با سیگنال نایب وجود ندارد. با به کار بردن روش MCC این چالش نیز برطرف گردید. برطرف شدن این چالش به این معناست که اگر سیستم تحت تحریکی مشابه با بار زلزله باشد، باز هم فرایند شناسایی امکان پذیر خواهد بود. به طور خلاصه مهم‌ترین نتایج بررسی‌های انجام شده موارد زیر می باشند:

- روش ارائه شده در این پایان‌نامه قادر به شناسایی پارامترهای مودال سازه تحت تحریک خارجی با سیگنال نایب می باشد.
- دو محدودیت از محدودیت‌های الگوریتم استاندارد SOBSS یعنی لزوم برابر یا بیشتر بودن تعداد سنسورها نسبت به درجات آزادی و وجود میرایی‌های بالاتر از حدود معمول در سازه‌های فولادی و بتنی، به طور همزمان برطرف گردیده شده‌است.
- شکل مودهای نسبی و فرکانس‌های طبیعی در روش ارائه شده با دقت قابل ملاحظه‌ای برآورد شده است. (خطای برآورد کمتر از یک درصد)
- نسبت میرایی در مقایسه با دیگر پارامترهای مودال با دقت کمتری بدست آمده است. با این وجود در صورت میرایی‌های بالاتر از حدود معمول دقت برآورد نسبت میرایی قابل قبول می‌باشد.
- به دلیل فیلتر کردن بازتاب‌ها در پیش پردازش داده‌ها، اثر وجود نویز بر عملکرد روش ارائه شده نسبت به الگوریتم استاندارد SOBSS کمتر است.
- برای تخمین تعداد پنجره‌های بدون همپوشانی و تعداد تأخیرهای زمانی اطلاعاتی از قبل وجود ندارد و باید با سعی و خطا تعداد آن‌ها را تخمین زد که این نیز سرعت شناسایی سازه را کاهش

می‌دهد.

۴-۳- پیشنهاد برای مطالعات آینده

- انجام مطالعات آزمایشگاهی جهت بررسی نقاط ضعف و قوت روش پیشنهادی
- بررسی شبیه سازی‌های متعدد و ارائه یک مدل ریاضی برای تعیین تعداد پنجره‌های بدون همپوشانی و تعداد تأخیرهای زمانی
- ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی برای حالتی که فرکانس مودها نزدیک به هم هستند.

پوست

پیوست‌ها

پ-۱ برنامه کامپیوتری روش پیشنهادی

```
% sobi() - Second Order Blind Identification (SOBI) by joint diagonalization
of
%          correlation matrices. THIS CODE ASSUMES TEMPORALLY CORRELATED
SIGNALS,
%          and uses correlations across times in performing the signal
separation.
%          Thus, estimated time delayed covariance matrices must be
nonsingular
%          for at least some time delays.
% Usage:
%          >> winv = sobi(data);
%          >> [winv,act] = sobi(data,n,p);
% Inputs:
%   data - data matrix of size [m,N] ELSE of size [m,N,t] where
%           m is the number of sensors,
%           N is the number of samples,
%           t is the number of trials (here, correlations avoid epoch
boundaries)
%   n - number of sources {Default: n=m}
%   p - number of correlation matrices to be diagonalized {Default:
min(100, N/3)}
%   Note that for noisy data, the authors strongly recommend using at
least 100
%   time delays.
%
% Outputs:
%   winv - m,n], aMatrix of size [n estimate of the *mixing* matrix. Its
%           columns are the component scalp maps. NOTE: This is the inverse
%           of the usual ICA unmixing weight matrix. Sphering (pre-whitening),
%           used in the algorithm, is incorporated into winv. i.e.,
%           >> icaweights = pinv(winv); icasphere = eye(m);
%   act - matrix of dimension [n,N] an estimate of the source activities
%           >> data          = winv          * act;
%           [size m,N]      [size m,n]      [size n,N]
%           >> act = pinv(winv) * data;
%
function [H,S,D]=sobi_mcc(X,n,p)

[m,N,ntrials]=size(X);
```

```

if nargin<1 || nargin > 3
    help sobi
elseif nargin==1,
    n=m; % Source detection (hum...)
    p=min(100,ceil(N/3)); % Number of time delayed correlation matrices to be
    diagonalized
    % Authors note: For noisy data, use at least p=100 the time-delayed
    covariance matrices.
elseif nargin==2,
    p=min(100,ceil(N/3)); % Default number of correlation matrices to be
    diagonalized
                                % Use < 100 delays if necessary for short data epochs
end;
%
%% Make the data zero mean
%X(:,:)=normal_mat(X(:,:),'',0)';
X(:,:)=X(:,:)-kron(mean(X(:,:))',ones(1,N*ntrials));

%% Pre-whiten the data based directly on SVD
Rx0=X(:,:)*X(:,:)'/(N*ntrials);
[~,S,VV]=svd(Rx0);
Q= sqrtm(S)\VV';
X(:,:)=Q*X(:,:);

%% Estimate the correlation matrices
num_win=10;
L_win=floor(N/num_win);
% p=ceil(L_win/4);
p=600;
u=1;
for k=2:p
    for jj=0:num_win-1
        for t = 1:ntrials
            if t == 1

Rxp=X(:,jj*L_win+k:(jj+1)*L_win,t)*X(:,jj*L_win+1:(jj+1)*L_win-
k+1,t)'/( (jj+1)*L_win-k+1)/ntrials;
                else

Rxp=Rxp+X(:,jj*L_win+k:(jj+1)*L_win,t)*X(:,jj*L_win+1:(jj+1)*L_win-
k+1,t)'/( (jj+1)*L_win-k+1)/ntrials;
                end;
            end;
            Rxp=0.5*(Rxp+Rxp'); % to symmetrize the covariance matrices
            (recommended)
            M(:,u:u+m-1)=Rxp; % (Frobenius norm = sqrt(sum(diag(Rxp'*Rxp))))----
            ---> this code line (Frobenius norm) was deleted in this version and no
            significant change observed!
            u=u+m;
        end;
    end
end
%% Perform Joint Approximate Diagonalization (JAD)
[m,pm]=size(M);
epsil=1/sqrt(N)/100;
encore=1;
V=eye(m);

```

```

iter=0;
while encore,
    iter=iter+1;
    encore=0;
    for p=1:m-1,
        for q=p+1:m,
            % Perform Givens rotation
            g=[ M(p,p:m:pm)-M(q,q:m:pm) ;
                M(p,q:m:pm)+M(q,p:m:pm) ;
                1i*(M(q,p:m:pm)-M(p,q:m:pm)) ];
            [vcp,D] = eig(real(g*g'));
            [~,K]=sort(diag(D));
            angles=vcp(:,K(3));
            angles=sign(angles(1))*angles;
            c=sqrt(0.5+angles(1)/2);
            sr=0.5*(angles(2)-1j*angles(3))/c;
            sc=conj(sr);
            oui = abs(sr)>epsil ;
            encore=encore | oui ;
            if oui , % Update the M and V matrices
                colp=M(:,p:m:pm);
                colq=M(:,q:m:pm);
                M(:,p:m:pm)=c*colp+sr*colq;
                M(:,q:m:pm)=c*colq-sc*colp;
                rowp=M(p,:);
                rowq=M(q,:);
                M(p,:)=c*rowp+sc*rowq;
                M(q,:)=c*rowq-sr*rowp;
                temp=V(:,p);
                V(:,p)=c*V(:,p)+sr*V(:,q);
                V(:,q)=c*V(:,q)-sc*temp;
            end%% if
        end%% q loop
    end%% p loop
end%% while
off_diag_M=0;
diag_M=0;q
for jj=1:m:pm
    diag_M=diag_M+sum(diag(M(:,jj:jj+m-1)).^2);
    off_diag_M=off_diag_M+sum(sum(M(:,jj:jj+m-1).^2))-sum(diag(M(:,jj:jj+m-1)).^2);
end
off_diag_M
%
% Estimate the mixing matrix
%
H = pinv(Q)*V;

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

```

منابع و مراجع

منابع ومراجع

- [1] P. Vanoverschee, "Subspace algorithm for the stochastic identification problem," *Automatica*, vol. 29, no. ISSN: 0005-1098 , 1873-2836. Oxford , p. 660, 1993, doi: 10.1016/0005-1098(93)90061-W.
- [2] Y. C. Liu, C. H. Loh, and Y. Q. Ni, "Stochastic subspace identification for output-only modal analysis: Application to super high-rise tower under abnormal loading condition," *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 42, no. 4, 2013, doi: 10.1002/eqe.2223.
- [3] C. Rainieri and G. Fabbrocino, "Accurate Damping Estimation by Automated OMA Procedures," in *Topics in Dynamics of Civil Structures - Proceedings of the 31st IMAC, A Conference on Structural Dynamics, 2013*, vol. 39, 2013, pp. 1–9.
- [4] S. W. S. Doebling, C. R. C. Farrar, M. B. M. Prime, and D. W. D. Shevitz, "Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review," *Los Alamos Natl. Lab.*, 1996, doi: 10.2172/249299.
- [5] F. Poncelet, G. Kerschen, J.-C. Golinval, and D. Verhelst, "Output-only modal analysis using blind source separation techniques," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 21, no. 6, pp. 2335–2358, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2006.12.005>.
- [6] G. Kerschen, F. Poncelet, and J.-C. Golinval, "Physical interpretation of independent component analysis in structural dynamics," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 21, no. 4, pp. 1561–1575, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2006.07.009>.
- [7] C. JF, "Blind signal separation: statistical principle," 1998.
- [8] F. Poncelet, "Experimental modal analysis using blind source separation techniques," Liege, Belgium, 2010.
- [9] A. Hyvärinen and E. Oja, "Independent component analysis: Algorithms and applications," *Neural Networks*, vol. 13, no. 4–5, 2000, doi: 10.1016/S0893-

6080(00)00026-5.

- [10] A. Belouchrani, K. Abed-Meraim, J. F. Cardoso, and E. Moulines, "A blind source separation technique using second-order statistics," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 45, no. 2, 1997, doi: 10.1109/78.554307.
- [11] Y. Yang and S. Nagarajaiah, "Time-frequency blind source separation for output-only modal identification using independent component analysis," in *Safety, Reliability, Risk and Life-Cycle Performance of Structures and Infrastructures - Proceedings of the 11th International Conference on Structural Safety and Reliability, ICOSSAR 2013*, 2013, pp. 1977–1983, doi: 10.1201/b16387-288.
- [12] Y. Yang and S. Nagarajaiah, "Time-frequency blind source separation using independent component analysis for output-only modal identification of highly damped structures," *J. Struct. Eng. (United States)*, vol. 139, no. 10, pp. 1780–1793, 2013, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000621.
- [13] F. Abazarsa, S. F. Ghahari, F. Nateghi, and E. Taciroglu, "Response-only modal identification of structures using limited sensors," *Struct. Control Heal. Monit.*, vol. 20, no. 6, pp. 987–1006, 2013, doi: 10.1002/stc.1513.
- [14] N. S. Hazra B, Sadhu A, Roffel AJ, Paquet PE, "Underdetermined Blind Identification of Structures by Using the Modified Cross-Correlation Method," *J. Eng. Mech.*, vol. 138, no. 4, pp. 327–337, 2012.
- [15] N. E. Huang *et al.*, "The empirical mode decomposition and the Hubert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis," *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, 1998, doi: 10.1098/rspa.1998.0193.
- [16] S. Mohammadi and A. Keyhani, "A new method for blind identification of structures with limited sensors," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 30, no. 5, 2019, doi: 10.1088/1361-6501/ab09c1.
- [17] Y. Yang and S. Nagarajaiah, "Blind modal identification of output-only structures in time-domain based on complexity pursuit," *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 2013, doi: 10.1002/eqe.2302.
- [18] B. Hazra, A. J. Roffel, S. Narasimhan, and M. D. Pandey, "Modified Cross-Correlation Method for the Blind Identification of Structures," *J. Eng. Mech.*, 2010, doi: 10.1061/(asce)em.1943-7889.0000133.

- [19] L. Cheng and D. Zheng, “The identification of a dam’s modal parameters under random support excitation based on the Hankel matrix joint approximate diagonalization technique,” *Mech. Syst. Signal Process.*, 2014, doi: 10.1016/j.ymssp.2013.07.015.
- [20] S. F. Ghahari, F. Abazarsa, M. A. Ghannad, M. Çelebi, and E. Taciroglu, “Blind modal identification of structures from spatially sparse seismic response signals,” *Struct. Control Heal. Monit.*, 2014, doi: 10.1002/stc.1593.
- [21] D. F. Giraldo, W. Song, S. J. Dyke, and J. M. Caicedo, “Modal identification through ambient vibration: comparative study,” *J. Eng. Mech.*, vol. 135, no. 8, pp. 759–770, 2009.
- [22] E. A. Johnson, H.-F. Lam, L. S. Katafygiotis, and J. L. Beck, “Phase I IASC-ASCE structural health monitoring benchmark problem using simulated data,” *J. Eng. Mech.*, vol. 130, no. 1, pp. 3–15, 2004.
- [23] S. Dyke, “Report on the Building Structural Health Monitoring Problem Phase 1 Experimental,” 2011.

Abstract

Nowadays, it is very important to obtain dynamic specifications to monitor the health and control and improve the structures that were built in the past. Over the years, a variety of methods based on signal processing knowledge have been proposed that have recently made significant progress. These methods have limitations that some of blind source separation limitations have been addressed in this dissertation.

In structures with high damping, identification of mechanical properties such as natural frequency, damping ratio and modal shapes is very important because the presence of energy depreciating tools makes it difficult to identify dynamic parameters. In cases where the outputs have a lot of noise and in the structure that energy depreciating tools are used, blind source separation method is not accurate enough to estimate modal parameters.

One of the important points in identifying the modal parameters is the type of external excitation of the structure. These excitations can be considered as stationary signals and nonstationary signals. Conventional structural identification methods are not able to identify modal parameters excited by nonstationary signals.

In this dissertation, a method is proposed that by using the modified cross-correlation technique and performing operations on the cross-correlation of structural responses, it is possible to identify the modal parameters stimulated by the unstable signal. Also, the accuracy of calculating the damping ratio in the presence of medium to high damping has increased. To evaluate the performance of the proposed method, numerical simulation has been used which the results show that with the proposed method, natural frequencies and shape of structural

modes with an error of less than 1% have been estimated. Damping ratios with less than 6% error were also obtained. A laboratory model has been used to validate presented method.

Keywords: Structural health monitoring, System identification, Operational modal analysis, SOBSS algorithm, Response filtering, Modified cross-correlation method.



Shahrood University of Technology

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

Improved SOBSS Based Technique for Identifying Structural Modal Parameters

By:
Mohammad Shafiei

Supervisors:
Dr. Farnoosh Basalighe
Dr. Ali Keyhani

February 2021