

شناسایی لحظه‌ای سیستم در سازه‌های هوشمند به کمک روش آنالیز اجزای پراکنده برمبنای تبدیل موجک

سالار منیعی^{۱*}، کاوه کرمی^۲، پژمان فاتحی^۳

^۱ گروه مهندسی عمران، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران
^۲ استادیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
^۳ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۱-۲۷
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۳-۲۶
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۳-۲۶
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۴-۲۱

کلمات کلیدی:

آنالیز اجزای پراکنده
تبدیل موجک
شناسایی کورمنابع
شناسایی لحظه‌ای
میراگر جرمی تنظیم شونده نیمه
فعال

خلاصه: اخیراً شناسایی لحظه‌ای سازه‌ها تنها براساس خروجی اندازه‌گیری شده حین ارتعاش مورد توجه خاصی قرار گرفته است. یکی از روش‌های قدرتمند شناسایی آفلاین سیستم، روش آنالیز اجزای پراکنده می‌باشد که در زیرمجموعه روش‌های شناسایی کور منبع (BSI) قرار دارد. این روش با انتقال پاسخ‌های دینامیکی سازه از حوضه زمانی به فرکانسی موجب پراکندگی داده‌ها شده و بر اساس آن پارامترهای مودال سیستم شناسایی می‌گردد. در بخش انتقال داده‌ها به حوضه فرکانسی وجود مشکلاتی از قبیل حجم زیاد داده‌ها و نیاز به تغییر مداوم ابعاد پنجره‌های زمانی با توجه به تغییرات ورودی امکان شناسایی لحظه‌ای سیستم را دچار مشکل جدی می‌نماید. برای حل این چالش، در این پژوهش یک روش آنالیز اجزای پراکنده توسعه یافته برمبنای انتقال موجک (WT-SCA) به منظور شناسایی لحظه‌ای سیستم پیشنهاد می‌گردد. در ادامه، با بکارگیری WT-SCA و یک میراگر جرمی تنظیم شونده نیمه فعال (STMD) الگوریتمی برای توسعه یک سازه هوشمند ارائه می‌شود؛ به طوری که اگر در اثر تحریکات محیطی شدید در پارامترهای مودال سازه تغییری ایجاد شود مشخصات مکانیکی STMD به کمک WT-SCA به گونه‌ای تنظیم مجدد می‌گردد که همواره در برابر این تغییرات مقاوم و پایدار باشد. ارزیابی عملکرد و دقت روش پیشنهادی از طریق مثال‌های عددی انجام می‌گیرد. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که WT-SCA با دقت قابل قبول سیستم را به صورت لحظه‌ای شناسایی و پاسخ‌های دینامیکی سازه مجهز به STMD را نیز به طور موثری کاهش می‌دهد.

۱- مقدمه

خسارت‌های احتمالی به وجود آمده در سازه و میزان ایمنی سازه را پس از وقوع حوادث محاسبه نمود. روش‌های شناسایی مبتنی بر ارتعاش در چند دهه اخیر مورد توجه خاصی قرار گرفته است. در این راستا روش‌های مختلفی وجود دارد که می‌توان آن‌ها را به دو دسته کلی تقسیم کرد: روش‌های شناسایی بر اساس ورودی و خروجی‌ها و روش‌های شناسایی بر اساس تنها خروجی‌ها. در اوایل دهه ۱۹۸۰ روش‌های کلاسیک شناسایی سیستم که گستره وسیعی از روش‌های شناسایی را شامل می‌شود، جهت رفع مشکلات موجود در شناسایی سیستم توسعه یافتند. این روش‌ها جهت شناسایی سیستم‌های مکانیکی و سازه‌های با میرای کم مورد

یک سازه هوشمند شامل دو استراتژی پیش سلامت سازه‌ای و کنترل ارتعاشی است که در چند دهه اخیر بر روی هریک از این دو بخش و نحوه ادغام آن‌ها با یکدیگر مطالعات زیادی انجام شده است. بررسی و شناسایی رفتار و ویژگی‌های سازه بخش مهمی از فرآیند پیش سلامت سازه‌ای می‌باشد. شناسایی سیستم به معنای تعیین پارامترهای مودال (فرکانس طبیعی، نسبت میرایی و اشکال مودی) است که با استفاده از اندازه‌گیری‌های دینامیکی سازه به دست می‌آیند؛ و با استفاده از این اطلاعات به دست‌آمده می‌توان میزان

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: manie@iausdj.ac.ir



استفاده قرار گرفتند. در ابتدا از این روش‌ها در شرایط بدون وجود اغتشاش بهره گرفته می‌شد که به مرور زمان توانایی آن‌ها در مواجهه با اغتشاش افزایش یافت [۱]. از روش‌های متنوع ارائه شده جهت شناسایی مودال بر اساس سیستم‌های یک ورودی-خروجی می‌توان به روش‌های، حوضه زمانی ابراهیم که توسعه یافته روش پرانی است [۲]، روش تحقق سیستم ویژه که برای سیستم‌های دینامیکی خطی بر پایه تشریح کلی فضای حالت ایجاد شد [۳]، روش تحریک طبیعی و تکرار تصادفی زیر فضا اشاره نمود. اگرچه، در این روش‌ها کاستی‌های متعددی همچون نیاز به تعیین ورودی و خروجی به صورت همزمان، نیاز به استفاده از محرک‌ها در طبقات سازه، ضعف در شرایط وجود اغتشاش، ضعف در تشخیص مودهای نزدیک، ناکارآمدی برای ورودی متغیر با زمان و زمان زیاد محاسبات وجود دارد. با توجه به کاستی‌های موجود در روش‌های معرفی شده در دو دهه اخیر روش‌های که تنها بر اساس خروجی می‌باشند مورد توجه خاصی در زمینه شناسایی و کنترل سازه قرار گرفته‌اند. از جمله روش‌های پرکاربرد که به صورت گسترده در حوضه شناسایی سیستم بر اساس خروجی تنها مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش‌های شناسایی کور منابع می‌باشند. در این روش‌ها که برای اولین بار در حوضه پردازش سیگنال ارائه شدند، پاسخ‌های مودال سازه به عنوان سیگنال‌های منبع و اشکال مودی به عنوان ماتریس اختلاط در نظر گرفته می‌شوند. از جمله روش‌های پرکاربرد در این زمینه می‌توان به دو روش شناسایی کور درجه دوم و آنالیز اجزای مستقل اشاره نمود. گرچه از این دو روش برای شرایط مختلف و انواع سازه‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند اما دارای کاستی‌های نظیر ضعف روش آنالیز اجزای مستقل در شناسایی سازه‌های با میرایی بیشتر از ۱٪ و یا ناکارآمدی روش شناسایی کور درجه دوم در ورودی‌های متغیر با زمان مانند زلزله اشاره نمود. همچنین تمامی روش‌های پیشین معرفی شده در شرایط نامعین (شرایطی که تعداد حسگرهای موجود در سازه از درجات آزادی آن کمتر است) ناکارآمد بوده و توانایی شناسایی سیستم را ندارند. به همین دلیل روش جدید آنالیز اجزای پراکنده جهت غلبه بر این کاستی‌ها در سال ۲۰۰۵ معرفی شد [۴، ۵]. در این روش برخلاف دو روش شناسایی کور درجه دوم و آنالیز اجزای مستقل که از استقلال آماری داده‌ها بهره می‌گرفتند تنها شرط لازم، پراکنده‌گی داده‌ها در یک فضای مشخص می‌باشد. از دیگر مزایای این روش توانایی شناسایی پارامترهای مودال و اشکال

مودی در دو بخش می‌باشد که این امر به محققین توانایی بیشتری در جهت افزایش کارایی روش را خواهد داد. معمولاً، در سازه‌هایی با بیش از یک مود غالب (دارای چندین مود با ضریب مشارکت زیاد) استفاده از روش آنالیز اجزای پراکنده در شناسایی پارامترهای مودال به ویژه تحت اثر تحریکات لرزه‌ای زمین با خطا مواجه می‌شود. زیرا، همواره این امکان وجود دارد که در مودهای با انرژی کم و یا مودهای نزدیک به هم، تداخل و هم‌پوشانی به وجود آید؛ و همچنین به دلیل عدم گستردگی دامنه محتوای فرکانسی زلزله، تمام مودهای سازه تحریک نگردد. به همین دلیل لازم و ضروری است که با استفاده از یک فیلتر در حوضه زمان - فرکانس، داده‌هایی را که همزمان از چندین سیگنال منبع ایجاد شده‌اند برای جلوگیری از هم‌پوشانی حذف شوند. امینی و هدایتی [۶] با استفاده از روش نقطه تک منبع داده‌هایی با تاثیرپذیری از تنها یک منبع را استخراج نموده و دقت روش آنالیز اجزای پراکنده در شناسایی پارامترهای مودال سازه در شرایط نامعین تحت اثر زلزله را بهبود بخشیدند. یاؤ و همکاران [۷] با بکارگیری روش زمان-فرکانس امکان حذف داده‌های اصلی در روش نقطه تک منبع به دلیل محدودیت در تعداد حسگرها را برطرف نمودند. همانطور که اشاره شد به منظور تعیین پراکنده‌گی داده‌ها، پاسخ‌های سازه از حوضه زمانی به حوضه فرکانس-زمان منتقل خواهد شد. جهت انتقال داده‌ها به حوضه زمان-فرکانس روش‌های متنوعی همچون تبدیل کسینوس گسسته و انتقال زمان کوتاه فوریه (STFT) استفاده شده‌اند. اما با توجه به مطالعات انجام شده، این روش‌ها جهت انتقال داده‌ها به حوضه فرکانس-زمان با کاستی‌های همچون حساسیت قابل توجه به نحوه تعیین طول و تعداد پنجره مورد استفاده در روش STFT و نبود پارامترهای مشخص برای آن‌ها، مواجه هستند. این امر موجب شده است که اغلب این روش‌ها از جمله روش آنالیز اجزای پراکنده سیستم را به صورت آفلاین شناسایی نمایند. شناسایی لحظه‌ای سیستم در سازه‌های هوشمند از اهمیت خاصی برخوردار است و به همین دلیل در یک دهه اخیر شناسایی آنی سازه‌ها، تنها براساس پاسخ‌های دینامیکی اندازه‌گیری شده، حین ارتعاش مورد توجه خاصی قرار گرفته است. برای حل این مشکل در این مقاله یک روش آنالیز اجزای پراکنده توسعه یافته بر مبنای انتقال موجک (WT-SCA) به منظور شناسایی لحظه‌ای سیستم پیشنهاد می‌گردد.

مودال سازه نیاز به بررسی معادلات حرکت یک سازه n درجه آزادی تحت اثر نیروهای خارجی می‌باشد. که این معادلات را می‌توان به فرم زیر نوشت.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{X}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (1)$$

در این معادله \mathbf{M} ، \mathbf{C} و \mathbf{K} با ابعاد $n \times n$ به ترتیب نشان‌دهنده ماتریس جرم، میرایی و سختی سازه می‌باشند و همچنین $\mathbf{F}(t)$ با ابعاد $n \times 1$ نشان‌دهنده بردار نیروی وارده به سازه است. مقادیر $\mathbf{X}(t)$ نشان‌دهنده جابجایی هر یک از درجات آزادی سازه در زمان t است. در این حالت جهت انتقال پاسخ‌های جابجایی سازه به فضای مودال می‌توان از رابطه زیر بهره گرفت:

$$\mathbf{X}(t) = \boldsymbol{\varphi}\mathbf{q}(t) \quad (2)$$

در رابطه (۲)، $\boldsymbol{\varphi}$ با ابعاد $n \times n$ نشان‌دهنده ماتریس اشکال مودی سازه و $\mathbf{q}(t)$ با ابعاد $n \times 1$ نشان‌دهنده جابجایی‌های سازه در فضای مودال در طول بازه زمانی مورد نظر است. در روش‌های BSI با توجه به موارد ذکر شده هدف تعیین سیگنال‌های منبع بر اساس سیگنال‌های خروجی می‌باشد که رابطه میان آن‌ها با ماتریس اختلاط به صورت زیر است.

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{A}\mathbf{S}(t) \quad (3)$$

در رابطه (۳) مقادیر $\mathbf{Y}(t)$ سیگنال‌های خروجی، \mathbf{A} ماتریس اختلاط و $\mathbf{S}(t)$ برابر سیگنال‌های منبع می‌باشند. در این صورت با توجه به تشابه میان روابط (۲) و (۳) می‌توان نتیجه گرفت که تنها با استفاده از پاسخ‌های سازه می‌توان مقادیر ماتریس اشکال مودی و پاسخ‌های مودال سازه را بازیابی نمود؛ از این رو به این روش‌ها کور گفته می‌شود زیرا اطلاعاتی درباره چگونگی اختلاط داده‌ها (ماتریس اشکال مودی) و خود داده‌های اصلی (پاسخ‌های مودال) در دسترس نیست و این مقادیر فقط با استفاده از مشاهدات تعیین می‌گردند.

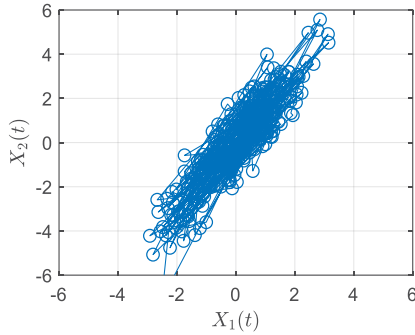
در روش‌های پیشین ارائه شده در زیر مجموعه BSI مانند دو روش شناسایی کور درجه دوم و آنالیز اجزای مستقل نیاز به بررسی روابط آماری و فرض استقلال داده‌ها بود که این امر موجب ایجاد کاستی‌های در این روش‌ها می‌گردید؛ و همچنین این روش‌ها به شرایط معین محدود شده بودند. از این رو در این تحقیق از روش آنالیز اجزای پراکنده برای غلبه بر این کاستی‌ها استفاده شده است.

در این روش از تبدیل موجک برای انتقال داده‌ها از حوضه زمانی به حوضه فرکانس-زمان استفاده می‌شود تا با این کار حجم داده‌ها و زمان تشخیص فرکانس‌های غالب سیستم کاهش یابد. با نائل شدن به این امر، با کاهش حجم داده‌ها مدت زمان مورد نیاز برای اندازه‌گیری پاسخ‌های سازه تا حد قابل توجهی کاهش یافته به طوری که می‌توان شناسایی را تقریباً لحظه‌ای در نظر گرفت.

همانطور که در ابتدا اشاره شد، یکی از کاربردهای مهم روش‌های شناسایی لحظه‌ای سیستم، استفاده در سازه‌های هوشمند است. در چند سال اخیر ترکیب همزمان دو استراتژی کنترل سازه‌ها و نظارت سلامت سازه‌ای در سازه‌های هوشمند مورد توجه خاصی قرار گرفته است [۸-۱۱]. میراگر جرمی تنظیم شده غیرفعال (PTMD) یکی از تجهیزات کنترلی می‌باشد که بسیار مورد استفاده قرار گرفته است؛ و به وسیله آن انرژی ورودی به سازه حذف و به PTMD منتقل می‌شود. PTMD با ارتعاش غیرهمفاز نسبت به سازه باعث می‌شود که پاسخ‌های دینامیکی سازه کاهش یابد [۱۲-۱۴]. در حالات بهینه، فرکانس PTMD براساس فرکانس غالب سازه طراحی می‌گردد و همواره ثابت است [۱۵-۱۷]. هر گونه تغییر در پارامترهای مودال سازه ناشی از زلزله و باد قوی منجر به از تنظیم خارج شدن PTMD می‌شود و ممکن است اثرات مخربی به سازه وارد نماید. در ادبیات مهندسی، برای رفع از این مشکل استفاده از STMD پیشنهاد شده است [۱۸-۲۲]. در بخش دوم این مقاله از WT-SCA پیشنهادی برای تنظیم مجدد مشخصات مکانیکی STMD برای مقابله با هرگونه تغییر در پارامترهای مودال سازه ناشی از آسیب در طول زلزله استفاده می‌شود. برای نائل شدن به این هدف، از یک الگوریتم براساس ترکیب همزمان دو استراتژی نظارت سلامت سازه‌ای و کنترل نیمه‌فعال سازه‌ها استفاده می‌گردد. در نهایت، با استفاده از مثال‌های عددی، عملکرد و دقت روش WT-SCA و همچنین کاربرد الگوریتم پیشنهادی در ایجاد یک سازه هوشمند به منظور کاهش پاسخ‌های دینامیکی در شرایط وجود آسیب مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲- شناسایی پارامترهای مودال با استفاده از روش شناسایی کور منبع

در ابتدا جهت بررسی توانایی روش BSI در استخراج پارامترهای



شکل ۱. سیگنال خروجی در فضای زمانی.
Fig. 1. Output signal in time domain.

دقت بهتر آن نسبت به سایر موجک‌ها در استخراج فرکانس‌های سازه، استفاده می‌گردد. در این حالت با انتقال طرفین رابطه (۲) به فضای فرکانسی به وسیله تبدیل موجک می‌توان رابطه (۲) را به صورت زیر باز نویسی نمود.

$$\mathbf{X}_{(t,f)} = \Phi \mathbf{q}_{(t,f)} \quad (5)$$

در این صورت مقادیر $\mathbf{X}_{(t,f)}$ به فضای فرکانس-زمان انتقال داده شده‌اند. جهت درک صحیح‌تر روابط ارائه شده در ادامه از یک مثال ساده استفاده خواهد شد. در این مثال از دو موج سینوسی و کسینوسی که به ترتیب دارای مقادیر فرکانس‌های ۵ و ۱۰ هرتز (HZ) می‌باشند بهره گرفته می‌شود که با استفاده از ماتریس اختلاط زیر با یکدیگر ترکیب شده و خروجی موردنظر را تعیین می‌کند.

$$A = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.8 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

در شکل (۱) نتیجه سیگنال‌های مخلوط شده در فضای زمانی نسبت به یکدیگر رسم شده است، همانطور که مشاهده می‌گردد رسم داده‌ها در فضای زمانی اطلاعات خاصی را در اختیار ما قرار نمی‌دهد. در ادامه جهت تعیین پراکندگی سیگنال‌های خروجی از اعمال تبدیل موجک پیوسته بر روی این سیگنال‌ها استفاده خواهد شد که در شکل (۲) نشان داده شده است.

با توجه به شکل (۲) مشاهده می‌گردد که در هر یک از سیگنال‌های خروجی دو فرکانس غالب وجود دارد که برابر با تعداد مودهای سازه می‌باشند. با در نظر گرفتن هریک از سیگنال‌های خروجی در فضای فرکانس-زمان، می‌توان تاریخچه زمانی دامنه متناظر با هر یک از

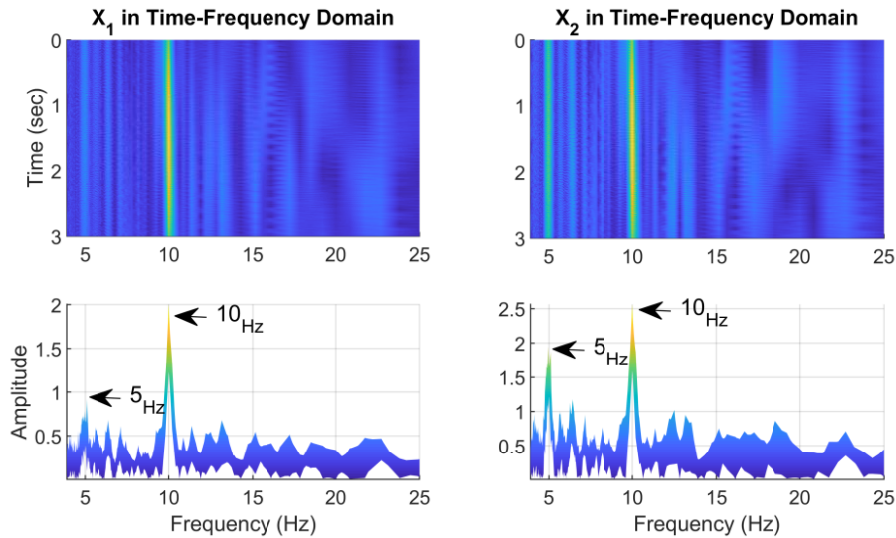
در این روش تنها شرط برقراری روابط پراکندگی داده‌ها در یک فضای معین است، که در این تحقیق با توجه به معایب انتقال‌های STFT و تبدیل کسینوس گسسته، از انتقال موجک جهت ایجاد پراکندگی داده‌ها بهره گرفته شده است.

۳- روش WT-SCA

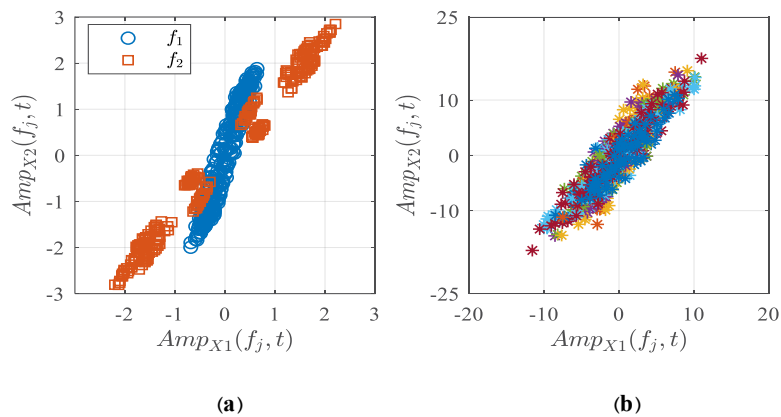
روش آنالیز اجزای پراکنده ابزار جایگزینی را جهت حل رابطه (۳) ارائه می‌دهد که توانایی حل این معادلات در شرایط نامعین را هم فراهم می‌سازد. در این روش برخلاف سایر روش‌های ارائه شده نیازی نیست که ماتریس اشکال مودی یک ماتریس معکوس‌پذیر (مربعی) باشد. همچنین فرض استقلال آماری داده‌ها در این روش در نظر گرفته نمی‌شود و تنها فرضی که داده‌ها باید آن را ارضاء نمایند، پراکندگی در یک فضای بخصوص می‌باشد. با توجه به اهمیت تعیین پراکندگی داده‌ها در روش WT-SCA پیشنهادی در این تحقیق برخلاف روش‌های پیشین ارائه شده که از انتقال STFT بهره می‌گرفتند، از انتقال موجک استفاده شده است، به این دلیل که در STFT انتخاب تابع پنجره از مشکلات اساسی می‌باشد. زیرا برای دستیابی به یک تقسیم‌بندی زمانی مناسب باید اندازه پنجره‌ها به اندازه کافی کوچک باشد. این در حالی است که اندازه‌گیری دقیق فرکانس نیازمند پنجره‌های به اندازه کافی بزرگ می‌باشد. بنابراین یک رابطه عکس بین دقت زمان و دقت فرکانس وجود دارد. همچنین تعیین مقادیر مناسب طول پنجره‌ها بسیار وابسته به داده‌های ورودی می‌باشد و در صورت تغییر ورودی نیاز است که مقادیر طول پنجره تغییر کرده و این امر سبب می‌گردد تا روش بر مبنای STFT حالت کلی نداشته باشد و در مواقع لازم از پنجره‌های زمانی با اندازه‌های مختلف استفاده کند. به همین دلیل در این تحقیق از روش تبدیل موجک بهره گرفته می‌شود که در آن نیازی به تعیین پارامترهای مختلف نمی‌باشد [۲۳، ۲۴]. معادله تبدیل موجک پیوسته به صورت زیر است:

$$CWT_{\mathbf{X}}^{\psi}(\tau, s) = \psi_{\mathbf{X}}^{\psi}(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{X}(t) \psi^* \left(\frac{t-\tau}{s} \right) dt \quad (4)$$

در رابطه (۴)، ψ موجک اصلی، s پارامتر مقیاس و τ پارامتر انتقال می‌باشند. در این مقاله از موجک اصلی Complex morlet به دلیل



شکل ۲. اعمال تبدیل موجک پیوسته بر روی سیگنال‌های خروجی.
 Fig. 2. Apply continuous wavelet transform on the output signals.



شکل ۳. (a) سیگنال خروجی در فضای فرکانس-زمان (Wavelet) (b) سیگنال خروجی در فضای فرکانس-زمان (STFT).
 Fig. 3. a) Output signal in frequency-time domain (Wavelet) b) Output signal in frequency-time domain (STFT).

رابط داد.

با توجه به شکل (۳-ب) می‌توان مشاهده نمود در صورت استفاده از تبدیل STFT جهت پراکندگی داده‌ها به درستی قابل تشخیص نیست؛ این امر به دلیل حساسیت این روش به تعیین مقادیر پنجره‌های زمانی و همپوشانی آن‌ها می‌باشد. در نتیجه همپوشانی زیادی بین داده‌ها در شکل (۳-ب) نمایان است. این در حالی است که، مقدار همپوشانی داده‌ها در شکل (۳-ا) کمتر است. با این وجود در موده‌های با انرژی کم و یا موده‌های نزدیک به هم، همواره تداخل و همپوشانی داده‌ها وجود خواهد داشت؛ که موجب کاهش دقت شناسایی پارامترهای مودال می‌گردد. از این رو قبل از اعمال الگوریتم

فرکانس‌های غالب را به صورت زیر مشخص نمود:

$$\begin{aligned} & i = 1, 2, 3, \dots, n_s \\ \text{Amp}_{X_i}(f_j, t) & \\ & j = 1, 2, 3, \dots, n \end{aligned} \quad (7)$$

که در آن f_j و n_s به ترتیب نشان دهنده فرکانس‌های غالب و تعداد سیگنال‌های خروجی می‌باشد. اگر بخش حقیقی (و یا موهومی) $\text{Amp}_{X_1}(f_i, t)$ برحسب $\text{Amp}_{X_2}(f_i, t)$ در یک فرکانس غالب مشخص رسم شود نموداری مانند آنچه که در شکل (۳-ا) نشان داده شده است به دست می‌آید. می‌توان مشاهده نمود که داده‌ها در دو جهت‌گیری کلی قرار گرفته‌اند؛ به طوری که این جهت‌گیری‌ها را می‌توان با استفاده از الگوریتم‌های خوشه‌بندی به ماتریس اختلاط

گردد تنها یکی از سیگنال‌های منبع در پاسخ‌ها حضور دارد، به طور مثال $S_1 \neq 0$ و $S_2 = 0$ رابطه (۹) به صورت زیر بازنویسی می‌گردد.

$$\begin{aligned} X_1 \xrightarrow{S_2=0} (R_{X1} + I_{X1}i) &= \\ a_{11}R_{S1} + a_{11}I_{S1}i &\Rightarrow \frac{R_{X1}}{R_{S1}} = a_{11}, \frac{I_{X1}}{I_{S1}} = a_{11} \\ X_2 \xrightarrow{S_2=0} (R_{X2} + I_{X2}i) &= \\ a_{21}R_{S1} + a_{21}I_{S1}i &\Rightarrow \frac{R_{X2}}{R_{S1}} = a_{21}, \frac{I_{X2}}{I_{S1}} = a_{21} \end{aligned} \quad (10)$$

در صورتی که $S_1 = 0$ و $S_2 \neq 0$ فرض شود.

$$\begin{aligned} X_1 \xrightarrow{S_1=0} (R_{X1} + I_{X1}i) &= a_{12}R_{S2} + a_{12}I_{S2}i \\ \Rightarrow \frac{R_{X1}}{R_{S2}} = a_{12}, \frac{I_{X1}}{I_{S2}} = a_{12} \\ X_2 \xrightarrow{S_1=0} (R_{X2} + I_{X2}i) &= a_{22}R_{S2} + a_{22}I_{S2}i \\ \Rightarrow \frac{R_{X2}}{R_{S2}} = a_{22}, \frac{I_{X2}}{I_{S2}} = a_{22} \end{aligned} \quad (11)$$

با توجه به روابط (۱۰) و (۱۱) ارتباط بین نسبت درایه‌های ماتریس اختلاط با نسبت‌های قسمت‌های موهومی و حقیقی سیگنال‌های خروجی، در حالتی که تنها یک سیگنال منبع حضور دارد، به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \text{if } S_2=0 \rightarrow \frac{R_{X1}}{R_{X2}} = \frac{a_{11}}{a_{21}} = \frac{I_{X1}}{I_{X2}} \\ \text{if } S_1=0 \rightarrow \frac{R_{X1}}{R_{X2}} = \frac{a_{12}}{a_{22}} = \frac{I_{X1}}{I_{X2}} \end{aligned} \quad (12)$$

با توجه به رابطه (۱۲) می‌توان مشاهده نمود که در صورت حضور تنها یکی از منابع، در پاسخ تعیین شده تنها یکی از ستون‌های ماتریس اختلاط حضور دارد. حال اگر فرض شود که هر دو سیگنال منبع در پاسخ‌ها حضور داشته باشند ($S_1 \neq 0$ و $S_2 \neq 0$) با توجه به رابط (۹) روابط (۱۳) و (۱۴) ارائه می‌گردد.

$$\begin{aligned} \text{real } X_1 \rightarrow R_{X1} &= a_{11}R_{S1} + a_{12}R_{S2} \\ \text{imag } X_1 \rightarrow I_{X1} &= a_{11}I_{S1} + a_{12}I_{S2} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{real } X_2 \rightarrow R_{X2} &= a_{21}R_{S1} + a_{22}R_{S2} \\ \text{imag } X_2 \rightarrow I_{X2} &= a_{21}I_{S1} + a_{22}I_{S2} \end{aligned} \quad (14)$$

خوشه‌بندی نیاز به حذف اغتشاشات و همپوشانی‌های موجود در پاسخ‌های سازه می‌باشد.

۳-۱- حذف اغتشاش و همپوشانی

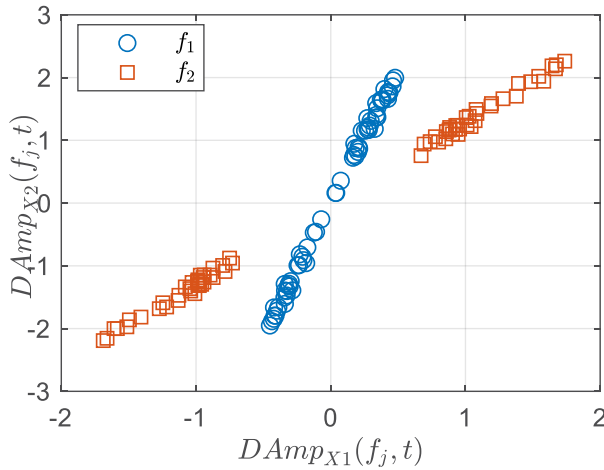
در جهت حذف اغتشاش و همپوشانی موجود در خروجی سازه روش‌های گوناگونی معرفی شده‌اند که در این تحقیق از روش نقطه تک منبع (SSP) استفاده می‌گردد [۶، ۲۵، ۲۶]. در این روش داده‌ها پس از انتقال به فضای فرکانسی مورد بررسی قرار می‌گیرند و همچنین پس از حذف داده‌های ناخواسته جهت جدا نمودن جهت گیری‌های داده‌ها نیاز به استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی سلسله مراتبی می‌باشد [۲۷، ۲۸]. در روش STFT علاوه بر استفاده از الگوریتم خوشه بندی میانگین فازی-C نیاز به استفاده از الگوریتم خوشه بندی سلسله مراتبی نیز می‌باشد. زیرا در این روش داده‌های مربوط به فرکانس‌های غالب که نشان دهنده جهت گیری‌ها می‌باشند از یک دیگر قابل تشخیص نبوده و به همین دلیل نیاز به استفاده از این الگوریتم جهت جدا نمودن هر یک از جهت گیری‌ها می‌باشد. این در حالی است که در روش تبدیل موجک داده‌های مربوط به هر فرکانس غالب مجزا بوده و دیگر نیاز به اعمال الگوریتم خوشه بندی سلسله مراتبی نمی‌باشد. در روش SSP هدف تعیین بازه‌های زمانی از سیگنال خروجی است، که تنها یکی از سیگنال‌های منبع (یکی از موده‌های سازه) در آن فعال هستند. رابطه (۲) برای یک سازه دو درجه آزادی به صورت زیر باز نویسی می‌گردد:

$$\begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{Bmatrix} \quad (8)$$

در صورت اعمال تبدیل موجک بر طرفین رابط (۸) این رابطه به صورت زیر تغییر می‌کند.

$$\begin{aligned} (R_{X1} + I_{X1}i) &= a_{11} (R_{S1} + I_{S1}i) + \\ &a_{12} (R_{S2} + I_{S2}i) \\ (R_{X2} + I_{X2}i) &= a_{21} (R_{S1} + I_{S1}i) + \\ &a_{22} (R_{S2} + I_{S2}i) \end{aligned} \quad (9)$$

که در این رابط R نشان دهنده مقادیر حقیقی و I نشان دهنده مقادیر موهومی می‌باشد. با توجه به رابط (۹) در صورتی که فرض



شکل ۴. حذف اغتشاش به روش SSP
Fig. 4. Remove noise by SSP.

از پاسخ‌های خروجی سازه، داده‌هایی که در آن‌ها تنها یکی از منابع یا یکی از مودهای سازه غالب است مشخص می‌گردد. همان‌طور که شکل (۴) نشان می‌دهد، به کمک فیلتر ارائه شده در رابطه (۱۹) و اعمال آن بر دامنه‌های مربوط به فرکانس‌های غالب $(Damp_{X_i}(f_j, t))$ محاسبه شده توسط تبدیل موجک، همپوشانی بین داده‌ها حذف می‌گردد. پارامتر $Damp_{X_i}(f_j, t)$ نشان دهنده فرکانس‌های غالب پس از اعمال روش SSP بر روی آنها است. پس از تعیین این داده‌ها جهت استخراج ماتریس اختلاط نیاز به استفاده از الگوریتم‌های خوشه‌بندی میانگین فازی-C بر روی مقادیر نرمال شده داده‌های بدون اغتشاش و همپوشانی است که این مقادیر نرمال شده به صورت زیر محاسبه می‌گردند.

$$Damp_{\bar{X}_i}(f_j, t_p) = \frac{Damp_{D_i}(f_j, t)}{\|Damp_{D_i}(f_j, t)\|}, \quad \begin{matrix} i = 1, 2, 3, \dots, n_s \\ j = 1, 2, 3, \dots, n \end{matrix} \quad (20)$$

۳-۲- خوشه‌بندی

در روش WT-SCA داده‌هایی که در آن‌ها تنها یکی از منابع حضور داشته باشند مورد نظر هستند؛ در این صورت اگر رابطه (۹) را به‌عنوان مثال برای شرایطی که سیگنال منبع S1 حضور دارد بازنویسی کنیم رابطه زیر حاصل می‌گردد.

$$\begin{aligned} (R_{X1} + I_{X1}i) &= a_{11}(R_{S1} + I_{S1}i) \\ (R_{X2} + I_{X2}i) &= a_{12}(R_{S1} + I_{S1}i) \end{aligned} \quad (21)$$

در بخش (۳-۱) اشاره شد که در صورت فعال بودن یکی از منابع

این روابط را می‌توان مانند رابطه (۱۲) به صورت زیر نوشت.

$$\frac{R_{X1}}{R_{X2}} = \frac{a_{11} + a_{21} \frac{R_{S1}}{R_{S2}}}{a_{12} + a_{22} \frac{R_{S1}}{R_{S2}}} \quad \frac{I_{X2}}{I_{X1}} = \frac{a_{11} + a_{21} \frac{I_{S1}}{I_{S2}}}{a_{12} + a_{22} \frac{I_{S1}}{I_{S2}}} \quad (15)$$

به منظور تعیین شرایطی که تنها یکی از منابع در داده‌های خروجی حضور داشته باشد مقادیر نسبت‌های موجود در رابطه (۱۵) مساوی هم قرار داده می‌شوند:

$$\frac{R_{X1}}{R_{X2}} = \frac{I_{X1}}{I_{X2}} \Rightarrow \frac{a_{11} + a_{21} \frac{R_{S1}}{R_{S2}}}{a_{12} + a_{22} \frac{R_{S1}}{R_{S2}}} = \frac{a_{11} + a_{21} \frac{I_{S1}}{I_{S2}}}{a_{12} + a_{22} \frac{I_{S1}}{I_{S2}}} \quad (16)$$

تنها شرط برقراری رابطه (۱۶) تساوی قسمت‌های حقیقی و موهومی سیگنال‌های منبع به صورت زیر می‌باشد.

$$\frac{R_{S1}}{R_{S2}} = \frac{I_{S1}}{I_{S2}} \Rightarrow \frac{R_{S1}}{I_{S1}} = \frac{R_{S2}}{I_{S2}} \quad (17)$$

با توجه به روابط ارائه‌شده این امر نتیجه می‌گردد که جهت تعیین داده‌های که در آن‌ها تنها یک سیگنال منبع حضور دارد باید نسبت قسمت حقیقی داده‌ها به قسمت موهومی آن‌ها با هم برابر باشد. به عبارت دیگر تفاضل این نسبت تقریباً برابر صفر باشد. به دلیل احتمال کم وقوع حالتی که اختلاف نسبت‌ها دقیقاً صفر گردد، از یک حاشیه اطمینان $0 < \nu \leq 0.1$ استفاده می‌شود (که در این تحقیق مقدار آن برابر ۵٪ لحاظ شده است). انتخاب ν خارج از دامنه مذکور اغلب باعث افزایش خطا در شناسایی مودهای بالاتر می‌گردد اما همواره مود حاکم سازه را با دقت قابل قبولی شناسایی می‌کند. این نسبت‌ها بیان‌کننده زاویه میان قسمت حقیقی یا موهومی هر یک از داده‌های موجود در هر دسته با داده‌های موجود در دسته دیگر می‌باشد. در این حالت می‌توان روابط زیر را تعیین نمود.

$$\theta_1 = \tan\left(\frac{R(X_2)}{R(X_1)}\right) \quad \theta_2 = \tan\left(\frac{I(X_2)}{I(X_1)}\right) \quad (18)$$

بر اساس روابط (۱۶) و (۱۸) می‌توان نتیجه گرفت.

$$\theta_1 - \theta_2 \cong 0 \pm \nu \quad \theta_1 \cong 1 \pm \nu \quad (19)$$

در این حالت با استفاده از فیلتر رابطه (۱۹) برای هر بازه زمانی

$$\sum_{i=1}^c u_{ik} = 1 \quad (k=1,2,3,\dots,n_p) \quad (25)$$

با استفاده از شروط فوق و مینیمم کردن توابع هدف داریم:

$$V_i = \frac{\sum_{k=1}^{n_p} u_{ik}^m x_k}{\sum_{k=1}^{n_p} u_{ik}^m} \quad u_{ik} = \frac{1}{\sum_{j=1}^c \left(\frac{\|x_k - V_j\|}{\|x_k - V_i\|} \right)^{\frac{2}{m-1}}} \quad (26)$$

با تعیین مختصات مرکز هریک از خوشه‌ها ماتریس V_i تشکیل می‌شود که پس از نرمال کردن آن به سطر n ام می‌توان آن را برابر با ماتریس اختلاط نرمال شده به سطر n ام در نظر گرفت.

۳-۴- تعیین پارامترهای مودال

تعیین پارامترهای مودال یک سازه در صورتی که سازه معین باشد با ضرب معکوس ماتریس اشکال مودی در پاسخ‌های سازه به صورت زیر قابل محاسبه است.

$$\mathbf{q}(t) = \Phi^{-1} \mathbf{X}(t) \quad (27)$$

اما در صورتی که سازه نامعین باشد ماتریس اشکال مودی معکوس‌پذیر نبوده و رابطه (۲۷) به یک رابطه خطی نامعین تبدیل می‌گردد. در این صورت نمی‌توان مقادیر پارامترهای مودال را محاسبه کرد. رابطه خطی نامعین ذکر شده دارای پاسخ‌های زیادی است اما در شرایطی که از پراکندگی داده‌ها استفاده گردد یک دسته از داده‌ها دارای پاسخ‌های معتبرتری می‌باشند. تعیین این پراکندگی‌ها برای حل معادله (۲۷) با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی مقدور می‌باشد از این رو در این مقاله از روش بهینه‌سازی norm-L0 بهره گرفته شده است [۳۱]. در این روش تابع هزینه زیر ارائه می‌گردد.

$$(P_0) : \min \|S\|_0 \quad (28)$$

همچنین رابطه کلی این روش به صورت رابطه (۲۹) می‌باشد.

$$v_{(s)} = \begin{cases} 1, & s \neq 0 \\ 0, & s = 0 \end{cases} \quad \|S\|_0 = \sum_{i=1}^n v_{(s_i)} \quad (29)$$

پس از بهینه کردن تابع هزینه مقادیر S تعیین می‌گردد. با

در داده‌ها اختلاف نسبت قسمت حقیقی و موهومی داده‌ها از یک مقدار موردنظر کوچک‌تر یا این مقادیر با یکدیگر برابر هستند این شرط تنها در صورت برقرار بودن رابطه زیر ارضاء گردد.

$$\frac{R_{x1}}{R_{x2}} = \frac{I_{x2}}{I_{x1}} = \frac{a_{11}}{a_{21}} \quad (22)$$

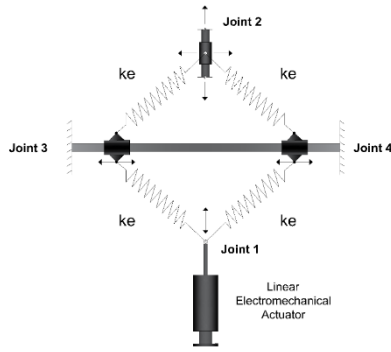
در صورتی که رابطه ماتریس A که نشان‌دهنده ماتریس اشکال مودی است را به سطر آخر نرمال کنیم رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

با توجه به رابطه‌های (۲۲) و (۲۳) می‌توان مشاهده کرد که در صورت حضور یکی از منابع در پاسخ، نسبت قسمت حقیقی یا موهومی داده‌ها به یکدیگر برابر ستون‌های ماتریس اشکال مودی نرمال شده به‌ردیف آخر است. در صورتی که درجات آزادی سازه افزایش یابد مقادیر رابطه (۲۲) به آسانی قابل محاسبه نیست، در این صورت برای تعیین این مقادیر از الگوریتم‌های خوشه‌بندی بهره گرفته می‌شود. در این مقاله از خوشه‌بندی میانگین فازی C- استفاده می‌گردد [۲۹، ۳۰]. در این الگوریتم تعداد خوشه‌ها (C) از قبل مشخص می‌باشد. تابع هدف تعریف شده در این الگوریتم به صورت زیر است:

$$J = \sum_{k=1}^{n_p} \sum_{i=1}^c u_{ik}^m \|x_k - V_i\|^2 \quad (24)$$

در رابطه (۲۴)، m یک عدد حقیقی بزرگ‌تر از یک است که در اکثر موارد برابر دو در نظر گرفته می‌شود و V_i مختصات مرکز خوشه i است. u_{ik} میزان تعلق نمونه k در خوشه i را نشان می‌دهد و علامت $\|\cdot\|$ میزان تشابه (فاصله) نمونه با مرکز خوشه را مشخص می‌کند که می‌توان از توابع دیگری که بیانگر تشابه نمونه و مرکز خوشه باشد نیز استفاده کرد. از این رو ماتریس نهایی U یک ماتریس با ابعاد $c \times n$ است که مؤلفه‌های آن هر مقداری ما بین صفر و یک می‌باشند. اگر مؤلفه‌های آن برابر اعداد صفر و یک باشد الگوریتم را الگوریتم C میانگین کلاسیک می‌نامند. مجموع مقادیر هریک از ستون‌های U باید برابر یک باشد.



شکل ۵. مدل مکانیکی دستگاه SAVIS.
Fig. 5. Mechanical model of SAVIS device.

بردار Φ_1 با ابعاد $n \times 1$ نشان‌دهنده مود حاکم سازه است. پارامتر $\bar{\phi}_n$ متناظر با n آمین درایه بردار $\bar{\Phi}$ می‌باشد. مقدار $\bar{\mu}$ نسبت جرم PTMD به جرم مود اول سازه در این مقاله برابر با ۰/۱ در نظر گرفته شده است. مشخصات مکانیکی PTMD در حالت بهینه به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$m_t = \bar{\mu} \bar{M}_1, \quad k_t = f_{opt}^2 \omega_1^2 m_t, \quad (32)$$

$$c_t = 2\zeta_{t,opt} m_t \omega_t, \quad \omega_t = \sqrt{\frac{k_t}{m_t}}$$

پارامترهای m_t ، k_t و c_t به ترتیب نشان‌دهنده جرم، سختی و میرایی PTMD در حالت بهینه است. همچنین، ω_1 و ω_t به ترتیب فرکانس حاکم سازه و فرکانس PTMD می‌باشد. یکی از مشکلات مهم در PTMD حساسیت زیاد و مقاوم نبودن آنها در برابر هرگونه تغییرات در پارامترهای مودال سازه ناشی از آسیب در طول زلزله‌های شدید است. به همین منظور، در اینجا از یک STMD مجهز به دستگاه کنترلی نیمه فعال با سختی متغیر (SAVIS^۳) استفاده می‌شود [۳۳]. در این حالت فرض می‌شود کل سختی STMD توسط دستگاه SAVIS تأمین می‌گردد. در تحقیقات مختلف کارایی SAVIS به صورت تحلیلی و تجربی در کاربردهای مختلف بررسی شده است [۱۸، ۲۰، ۲۱]. در دستگاه SAIVS سختی بین دو حد بیشینه و کمینه به طور پیوسته تغییر می‌کند. سختی این دستگاه توسط چهار جزء تأمین‌کننده سختی مجزا که هر یک به صورت خطی عمل می‌کنند و مطابق شکل (۵) بر روی یک پیکره لوزی شکل چیده شده‌اند تأمین می‌شود.

تعیین مقادیر S که برابر پاسخ‌های مودال سازه است می‌توان مقادیر فرکانس طبیعی سازه را تعیین نمود. برای این منظور با استفاده از انتقال سریع فوریه (FFT) بر روی پاسخ‌های مودال سازه، فرکانس‌های غالب هر سیگنال منبع استخراج شده که برابر با فرکانس طبیعی هریک از مودهای سازه می‌باشند. جهت تخمین مقادیر میرایی سازه آسیب دیده در این تحقیق در هر مرحله پس از محاسبه مقادیر اشکال مودی با استفاده از الگوریتم تکنیک کاهش تصادفی^۲ پاسخ‌های موجود در حوضه زمانی به صورت پاسخ‌های ارتعاش آزاد سازه تغییر یافته و با استفاده از انتقال هیلبرت یک پوش برای پاسخ‌های ارتعاش آزاد محاسبه شده ایجاد می‌گردد سپس با استفاده از تکنیک برازش منحنی‌ها شیب خط مورد نظر استخراج شده که این شیب برابر مقدار ضریب میرایی سازه در هر بازه زمانی می‌باشد [۲۸، ۳۲].

۴- مشخصات مکانیکی STMD

دستگاه PTMD شامل یک جرم، یک فنر و یک میراگر با مشخصات ثابت است که به منظور کاهش پاسخ‌های دینامیکی سازه معمولا در بالاترین ارتفاع سازه نصب می‌گردد. شروع حرکت PTMD در اثر نیروهای وارده بر سازه در جهت عکس حرکت سازه بوده و این امر موجب ایجاد انرژی اینرسی مخالف با حرکت سازه و کم کردن تغییر مکان ناشی از بارهای وارده بر سازه می‌شود [۱۴]. در یک سازه MDOF با نسبت جرم $\bar{\mu}$ و ضریب میرایی ζ_s مشخص، Sadek و همکاران [۱۵] پارامترهای بهینه طراحی PTMD شامل $\zeta_{t,opt}$ (ضریب میرایی بهینه PTMD) و f_{opt} (نسبت فرکانس بهینه) را صورت زیر ارائه دادند:

$$\zeta_{t,opt} = \bar{\phi}_n \left[\frac{\zeta_s}{1 + \bar{\mu}} + \sqrt{\frac{\bar{\mu}}{1 + \bar{\mu}}} \right] \quad (30)$$

$$f_{opt} = \frac{1}{1 + \bar{\mu} \bar{\phi}_n} \left[1 - \zeta_s \sqrt{\frac{\bar{\mu} \bar{\phi}_n}{1 + \bar{\mu} \bar{\phi}_n}} \right]$$

که در آن

$$\bar{\Phi} = \frac{\Phi_1^T \mathbf{m}_s \mathbf{L}}{\Phi_1^T \mathbf{m}_s \Phi_1} \Phi_1, \quad \bar{M}_1 = \bar{\Phi}^T \mathbf{m}_s \bar{\Phi}, \quad (31)$$

$$\bar{\mu} = \frac{m_t}{M_1}, \quad \mathbf{L}_{n \times 1} = \{1 \quad 1 \quad \dots \quad 1\}^T$$

1 Fast fourier transform (FFT)

2 Random Decrement Technique

در این رابطه اندیس i نشان‌دهنده i امین گام زمانی می‌باشد. در مطالعه ارائه‌شده توسط آبه و ایگوسا [۳۵] با حل پارامتریک سیستم سازه-میراگر نشان‌دهنده شد که چگونگی شارش انرژی میان سازه و میراگر بر نحوه جذب انرژی و کاهش آسیب مؤثر می‌باشد. از این رو براساس این ایده در بازه زمانی که انرژی از طرف سازه به میراگر منتقل می‌شود با قرار دادن ضریب میرای STMD برابر با صفر نرخ انتقال انرژی از سازه به میراگر قبل از به حداکثر رسیدن دامنه حرکتی STMD و حداقل شدن دامنه حرکتی سازه، به بیشترین مقدار خود خواهد رسید. در این حالت مقدار بیشینه جابجایی STMD در حال افزایش می‌باشد. در زمان تغییر جهت شارش انرژی و انتقال آن از STMD به سازه میرایی برابر مقادیر بهینه قرار داده می‌شود زیرا در این حالت شارش انرژی به تأخیر می‌افتد. در این بازه بیشینه جابجایی STMD در حال کاهش می‌باشد. با توجه به موارد ذکرشده پارامتر ضریب میرایی در زمانی‌هایی که حداکثر جابجایی STMD در حال افزایش است برابر با صفر و در زمانی‌های که حداکثر جابجایی در حال کاهش است ضریب میرایی برابر مقادیر بهینه محاسبه‌شده ($\zeta_{t_{opt}}$) تنظیم می‌گردد. بنابراین تنظیم میرایی SAVIS براساس رابطه زیر است:

$$\zeta_{t_{opt}} = \begin{cases} \zeta_{t_{opt}} & x_t^{peak(j)} \leq x_t^{peak(j-1)} \\ 0 & x_t^{peak(j)} > x_t^{peak(j-1)} \end{cases} \quad (35)$$

در رابطه بالا x_t^{peak} نشان‌دهنده حداکثر جابجایی میراگر و j نشان‌دهنده شماره نقاط اوج موجود در پاسخ کلی میراگر (x_t) می‌باشد. با توجه به موارد ذکرشده نحوه تعیین ضریب میرایی STMD به صورت شکل (۶) می‌باشد.

۵- ترکیب روش شناسایی سیستم و الگوریتم کنترلی پیشنهادی جهت ایجاد سازه هوشمند

معمولاً در حین تحریکات محیطی شدید مانند باد و زلزله‌های قوی در سازه آسیب اتفاق می‌افتد. وجود هرگونه آسیب در سازه باعث ایجاد تغییرات در پارامترهای مودال سازه می‌گردد در این بخش با ترکیب همزمان دو استراتژی بررسی سلامت سازه‌ای و کنترل نیمه فعال سازه‌ها یک طرح پیشنهادی جدید جهت توسعه یک سازه هوشمند ارائه می‌شود؛ به طوری که سیستم کنترلی در مقابل این تغییرات مقاوم و پایدار باشد. در اینجا از روش شناسایی WT-SCA

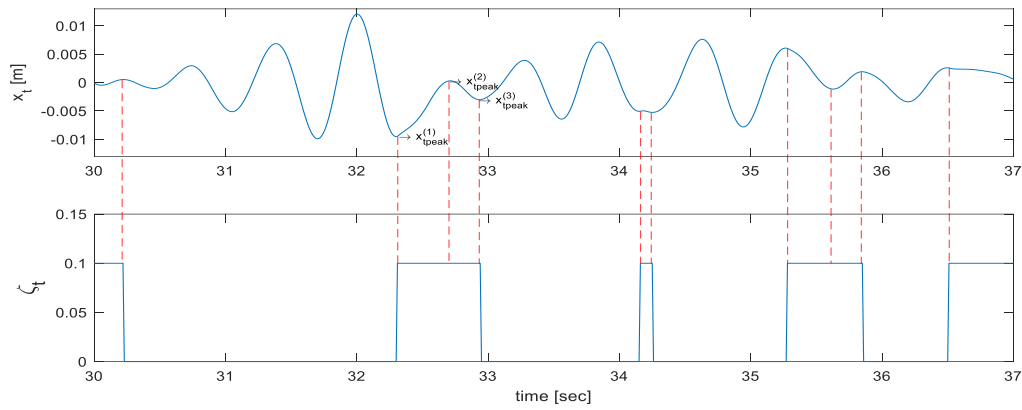
وضعیت دستگاه می‌تواند در دو حالت سختی کمینه (passive) و بیشینه (passive on) قرار بگیرد. مقدار سختی مورد نیاز دستگاه SAIVS بر اساس تغییرات در فرکانس اصلی سازه و اشکال مودی سازه تنظیم می‌شود. در هنگام وقوع زلزله یا ارتعاشات محیطی در صورت وقوع آسیب در سازه فرکانس و اشکال مودی سازه به صورت آنی تغییر کرده و این امر موجب تغییر ناگهانی در سختی دستگاه SAVIS خواهد شد. تغییر ناگهانی در سختی SAVIS بر روی شتاب PTMD اثر منفی دارد به همین جهت، به مدت زمان δ برای تغییر سختی دستگاه SAVIS، از مقدار ماکزیمم به مینیمم نیاز است که با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌گردد [۱۰، ۳۴].

$$\delta = \frac{1}{\alpha} \ln \left(\frac{2k_{s_{max}}}{k_{s_{min}}} - 1 \right) \quad (33)$$

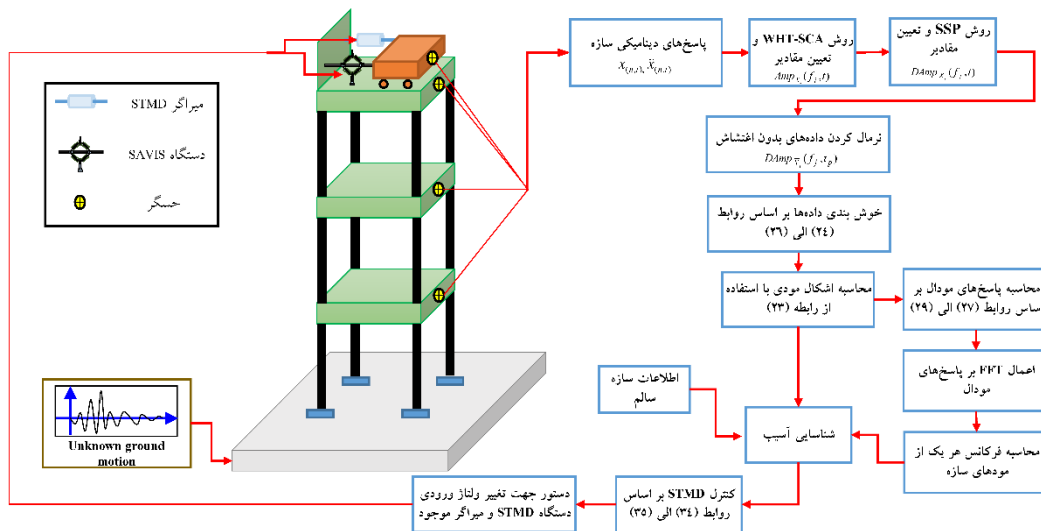
که در آن $k_{s_{min}}$ و $k_{s_{max}}$ به ترتیب سختی حداکثر و حداقل دستگاه SAIVS و پارامتر δ یک ثابت است که با تعیین مقدار α مناسب به دست می‌آید. بنابراین دستگاه SAIVS در هر لحظه به صورت پیوسته و مداوم می‌تواند سختی موردنیاز را تأمین کند. تنظیم لحظه‌ای پارامترهای بهینه STMD که شامل سختی و ضریب میرایی آن است، در این تحقیق بر اساس تغییر در اشکال مودی سازه و به تبع آن تغییر در فرکانس طبیعی موده‌های سازه می‌باشد.

قبل از بیان چگونگی تنظیم سختی دستگاه SAVIS و به تبع آن پارامتر فرکانس STMD باید به این نکته توجه گردد که پارامترهای بهینه PTMD بر اساس سازه خالص (سازه بدون PTMD) تعیین می‌شود. این در حالی است که الگوریتم WT-SCA، سازه را به همراه تأثیرات STMD شناسایی می‌کند. از این رو فرکانس شناسایی‌شده برای مود اول دارای اختلاف با فرکانس مود اول سازه خالص می‌باشد. با به کارگیری روش شناسایی سیستم WT-SCA می‌توان مقادیر فرکانس غالب سازه در هر لحظه ω_{si} و مود اول سازه را تعیین نمود، با در دست داشتن این مقادیر در صورت وقوع آسیب و تغییر در پارامترهای مودال سازه، با استفاده از رابطه (۳۰) مقادیر جدید $\zeta_{t_{opt}}$ و f_{opt} متناسب با وضعیت موجود سازه تعیین خواهد شد. در نهایت با استفاده از رابطه (۳۲)، مقدار سختی لحظه‌ای موردنیاز دستگاه SAVIS به صورت زیر تعیین می‌گردد.

$$k_{ii} = f_{opti}^2 \omega_{si}^2 m_i \quad (34)$$



شکل ۶. تغییر ضریب میرایی در دستگاه STMD.
Fig. 6. Damping coefficient change in STMD device.

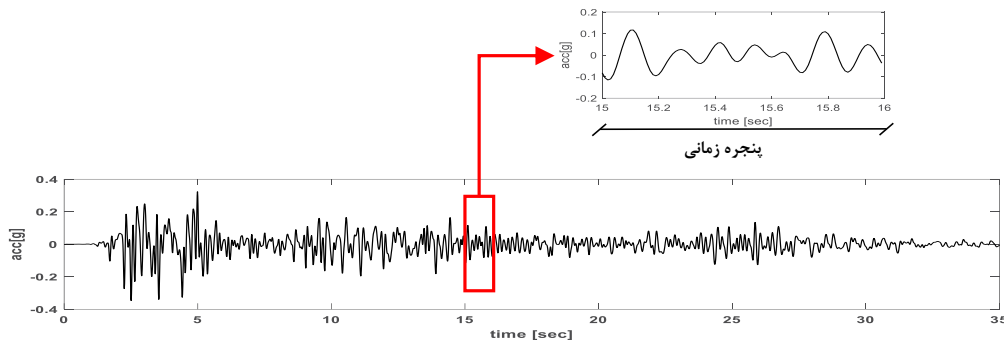


شکل ۷. دیاگرام بلوکی طرح پیشنهادی برای سازه هوشمند.
Fig. 7. Proposed block diagram for smart structures.

اینجا فرض می‌شود که اطلاعات مربوط به مشخصات سازه در شرایط سالم موجود است در دسترس می‌باشد.

با توجه به شکل (۷) در ابتدا پاسخ‌های دینامیکی سازه (در این تحقیق جابجایی یا شتاب) در هر بازه زمانی توسط حسگرهای نصب‌شده در طبقات سازه اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به الگوریتم شناسایی در حالت واقعی شناسایی سیستم به صورت لحظه‌ای (در هر گام زمانی) غیرممکن است. از این رو برای شناسایی سیستم به صورت تقریباً لحظه‌ای پنجره‌ای از پاسخ‌های سازه با اندازه مناسب جهت شناسایی مانند شکل (۸) در نظر گرفته می‌شود. در این حالت طول پنجره در نظر گرفته‌شده به نسبت کل زمان ارتعاش ناچیز بوده و

به منظور طراحی یک کنترل کننده جدید برای دستگاه STMD استفاده خواهد شد. در الگوریتم ارائه شده تغییرات پارامترهای سازه با استفاده از روش پیشنهادی WT-SCA تعیین شده و در صورت وقوع آسیب در سازه، مشخصات مکانیکی سیستم STMD به منظور حفظ بهینه‌ترین حالت و کاهش پاسخ‌های دینامیکی تنظیم مجدد می‌گردد. در این حالت همواره فرکانس عملکردی سیستم STMD در بهینه‌ترین حالت نسبت به سازه قرار دارد. در شکل (۷) می‌توان دیاگرام بلوکی طرح پیشنهادی را مشاهده نمود. دیاگرام بلوکی پیشنهادی از سه بخش اصلی شامل: جمع آوری داده‌ها، نظارت سلامت سازه‌ای و استراتژی کنترل نیمه فعال تشکیل شده است. در



شکل ۸. پنجره زمانی شناسایی.
Fig. 8. Identification time window.

تغییر کرده و سختی آن بدون تغییر باقی می ماند و الگوریتم با در نظر گرفتن پنجره زمانی بعدی ادامه می یابد؛ اما در صورت وقوع آسیب و تغییر پارامترهای مودال سازه، با استفاده از روابط (۲۴) تا (۲۶)، اشکال مودی و فرکانس های طبیعی سازه آسیب دیده شناسایی و براساس آن مقادیر جدید سختی مورد نیاز STMD تعیین شده و با استفاده از تغییر ولتاژ ورودی SAVIS این سختی مورد نظر تأمین می گردد. بدین صورت سیستم کنترلی ارائه شده در هر پنجره زمانی شناسایی، با توجه به تغییرات ایجاد شده در سازه واکنش نشان داده و جهت کاهش آسیب های ایجاد شده عمل می نماید. این روند در طول زمان اعمال زلزله و یا ارتعاشات خارجی بر سازه به ازای هر پنجره زمانی شناسایی تکرار می گردد.

۶- مثال عددی

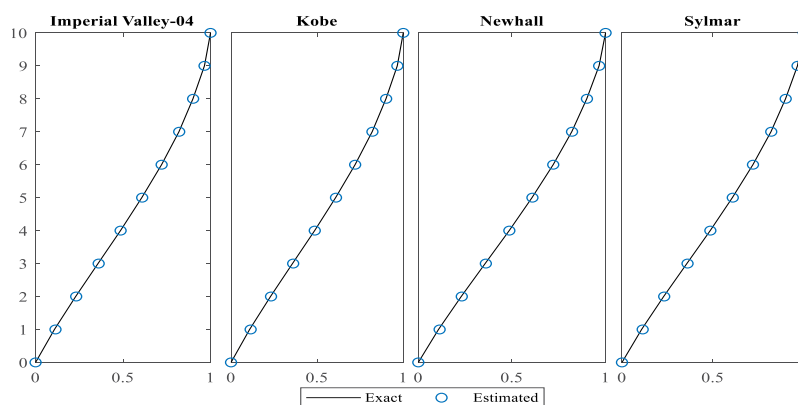
در ادامه روش WT-SCA با استفاده مثال های عددی مورد بررسی قرار می گیرد. برای این منظور از یک سازه ۱۰ طبقه با میرایی ۵٪ که مشخصات آن در جدول (۱) آورده شده است استفاده می گردد. در این مثال برای تحریک سازه از رکورد زلزله های (۱) Imperial Valley-04 (El Centro Array #9, PGA=1.97g)، (۲) Sylmar-Fire Station Sylmar (#91, PGA=0.69g) و (۳) Newhall (Firesta, PGA=0.32g) و (۴) KJMA, Kobe (PGA=0.06g) استفاده می شود. همچنین جهت بررسی دقت روش SSP در حذف اغتشاشات به خروجی سازه مقدار ۱۰٪ اغتشاش اعمال شده است. دقت تخمین اشکال مودی، $MAC1$ ، و فرکانس های سیستم، $MAC2$ ، با استفاده از رابطه (۳۶) تعیین می گردد؛ که در

می توان شناسایی را تقریباً آنی نامید.

با توجه به شکل (۸) پس از تعیین هر پنجره زمانی اولین گام جهت شناسایی سازه انتقال پنجره زمانی تعیین شده از خروجی های سازه به فضای فرکانس-زمان با استفاده از تبدیل موجک پیوسته معرفی شده است. در این حالت دامنه های متناظر با فرکانس های غالب موجود در هر پاسخ بر حسب زمان $(AmpX_i(Freq_j, t))$ محاسبه می شود. با توجه به موارد ذکر شده می توان دامنه های متناظر با فرکانس های غالبی را که در آن ها تنها یکی از مودهای سازه فعال است $DampX_i(Freq_j, t_{ep})$ را با اعمال روش SSP بر روی خروجی های تبدیل موجک تعیین نمود. سپس از مقادیر حقیقی نرمال شده این دامنه ها به عنوان ورودی الگوریتم خوشه بندی بهره گرفته می شود. با اعمال الگوریتم خوشه بندی اشکال مودی تخمینی سازه در پنجره زمانی مورد بررسی محاسبه خواهد شد. پس از محاسبه اشکال مودی تخمینی در صورت معین بودن سازه مورد بررسی با استفاده از معکوس مقادیر اشکال مودی و در صورت نامعین بودن سازه با استفاده از روابط (۲۷) و (۲۹) مقادیر پاسخ های مودال سازه تعیین می گردد. پس از تعیین این پاسخ های مودال با اعمال تبدیل FFT بر روی این پاسخ ها و تعیین فرکانس برابر با دامنه حداکثر مقادیر فرکانس های طبیعی سازه برای هر یک از پاسخ های مودال تخمین زده می شود. این فرکانس های تعیین شده با فرکانس طبیعی سازه در هر مود برابر است. در این حالت با در دست داشتن این مقادیر و مقایسه آن ها با پارامترهای مودال سازه در شرایط سالم می توان وقوع آسیب احتمالی در سازه راه تعیین نمود. در صورتی که آسیبی در سازه ایجاد نگردد با توجه به پاسخ های سازه تنها مقادیر میرایی STMD

جدول ۱. مشخصات سازه ۱۰ طبقه.
Table 1. Detail of 10-storey structure.

طبقه	جرم (ton)	سختی (Kn/m)	طبقه	جرم (ton)	سختی (Kn/m)	طبقه	جرم (ton)	سختی (Kn/m)
۱	۱۴۰	۲۲۰/۶	۵	۱۴۰	۱۵۸/۱	۹	۱۴۰	۱۱۴/۹
۲	۱۴۰	۱۹۲/۵	۶	۱۴۰	۱۴۹/۷	۱۰	۱۴۰	۱۱۰/۲
۳	۱۴۰	۱۷۶/۱	۷	۱۴۰	۱۴۲/۴	-	-	-
۴	۱۴۰	۱۶۴/۳	۸	۱۴۰	۱۳۷/۵	-	-	-



شکل ۹. شناسایی مود اول سازه تحت رکوردهای معرفی شده در شرایط وجود اغتشاش.
Fig. 9. Identify the first mode of the structure under the records in the presence of noise.

جدول ۲. نتایج شناسایی پارامترهای مودال سازه ده طبقه در اثر زلزله‌ها در شرایط وجود اغتشاش.

Table 2. Results of identifying the modal parameters of a ten-storey structure due to earthquakes in the presence of noise.

۳	۲	۱	مود	
۹۷/۸۳	۹۸/۹۹	۱۰۰	MAC ^۱	Kobe
۹۶/۳۸	۹۸/۷۵	۹۹/۹۹	MAC ^۲	
۹۷/۵۳	۹۷/۹۷	۱۰۰	MAC ^۱	Newhall
۹۶/۸۹	۹۸/۹۶	۹۹/۹۹۸	MAC ^۲	
۹۷/۰۸	۹۸/۹۳	۱۰۰	MAC ^۱	Sylmar
۹۶/۳۲	۹۷/۸۷	۱۰۰	MAC ^۲	
۹۷/۳۱	۹۹/۹۸	۹۹/۹۹۷	MAC ^۱	Imperial Valley-۰۴
۹۶/۲۹	۹۷/۶۸	۹۹/۹۸	MAC ^۲	

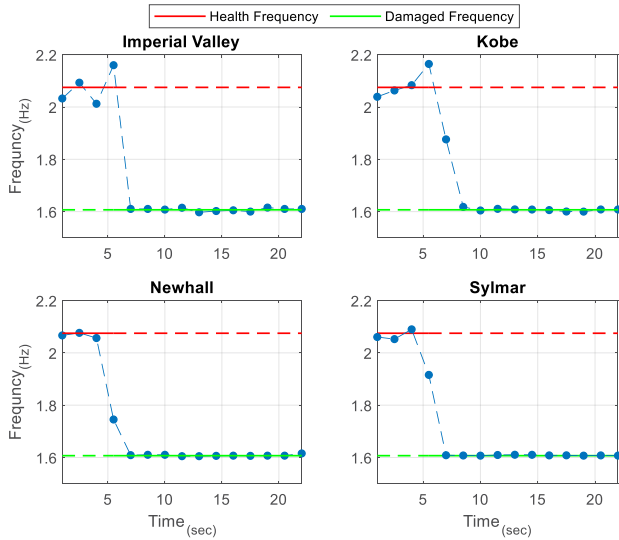
آن‌ها مقادیر یک نشان‌دهنده تشابه ۱۰۰٪ و صفر نشان‌دهنده عدم تشابه میان مقادیر شناسایی شده و اصلی می‌باشد.

$$MAC1 = \frac{(\tilde{\varphi}_i^T \varphi_i)^2}{(\tilde{\varphi}_i^T \tilde{\varphi}_i)(\varphi_i^T \varphi_i)}$$

$$MAC2 = \frac{(\tilde{\omega}_i^T \omega_i)^2}{(\tilde{\omega}_i^T \tilde{\omega}_i)(\omega_i^T \omega_i)} \quad (36)$$

φ_i

در رابطه بالا و ω_i مقادیر واقعی مود و فرکانس ω_i سازه و همچنین $\tilde{\omega}_i$ نشان‌دهنده مقادیر تخمین زده شده است. شکل (۹) مقایسه بین مود اول سازه در دو حالت واقعی و شناسایی شده را نشان می‌دهد. همچنین نتایج مربوط به شناسایی پارامترهای مودال سازه ده طبقه تحت اثر چهار زلزله در جدول (۲) آمده است.

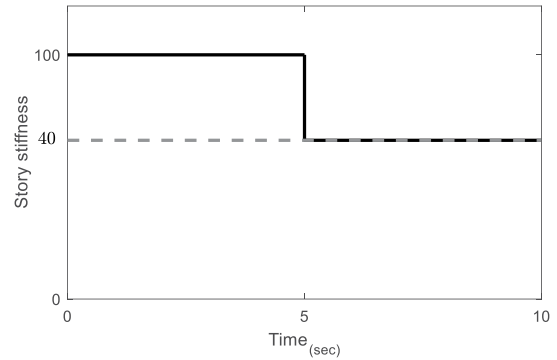


شکل ۱۲. شناسایی فرکانس مود اول سازه به صورت تقریباً آنی.
 Fig. 12. Identify the frequency of the first mode of the structure semi online.

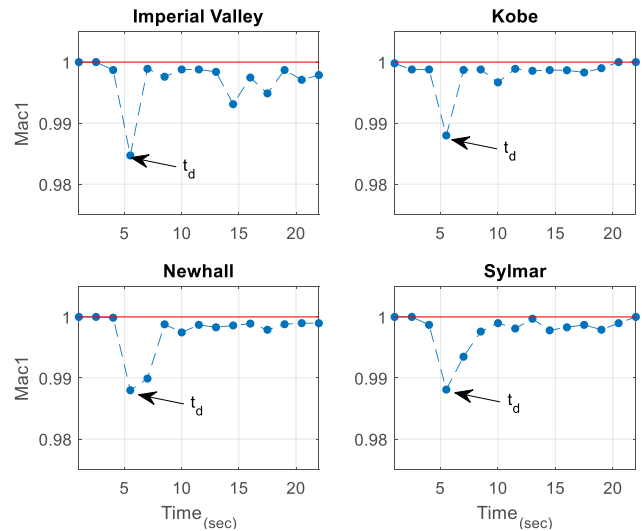
در تمامی رکوردهای مورد استفاده فرض می‌گردد که آسیب در ثانیه پنجم اتفاق می‌افتد. در شکل (۱۱) مقدار لحظه‌ای MAC1 دقت شناسای اشکال مودی سازه یک طبقه در طول زلزله‌ها را نشان می‌دهد. در محاسبه MAC1، مودهای شناسایی شده در بازه $t < 5 \text{ sec}$ با مودهای واقعی سازه در شرایط سالم و در بازه $t \geq 5 \text{ sec}$ با مودهای سازه در شرایط آسیب دیده مقایسه شده است.

با توجه به خطای تعیین شده در هر بازه زمانی از شناسایی مشاهده می‌گردد که در زمان ۵/۵ ثانیه مقادیر MAC1 کاهش شدید داشته و این همان زمان وقوع آسیب است که با تقریب نسبتاً خوبی به صورت لحظه‌ای شناسایی شده است. این امر به دلیل ایجاد آسیب در سازه و خطا در تشخیص مقادیر صحیح اشکال مودی به دلیل حضور پاسخ هر دو سازه آسیب دیده و سالم در بازه زمانی مورد نظر می‌باشد. در شکل (۱۲) می‌توان خطای تشخیص فرکانس مود اول سازه را بر اساس نتایج اعمال تبدیل موجک بر روی پاسخهای سازه مشاهده نمود. همانطور که نمایان است، تقریباً بعد از ثانیه پنجم روش پیشنهادی به طور موثری به صورت تقریباً آنی فرکانس سازه در حالت آسیب دیده را شناسایی نموده است.

در ادامه جهت بررسی طرح جدید ارائه شده در بخش (۵) به سازه‌های یک و ده طبقه معرفی شده سیستم PTMD و STMD اضافه خواهد شد. در این حالت می‌توان کارایی سیستم نیمه فعال معرفی شده نسبت به سیستم‌های غیرفعال را مشخص نمود و همچنین



شکل ۱۰. نحوه تغییر سختی طبقه در سازه یک طبقه در طول زمان.
 Fig. 10. Stiffness change of a floor in a one-story structure over time.



شکل ۱۱. خطای تشخیص MAC1 مود اول سازه تحت رکوردهای معرفی شد.
 Fig. 11. The first mode MAC1 error detection of the structure base on the records.

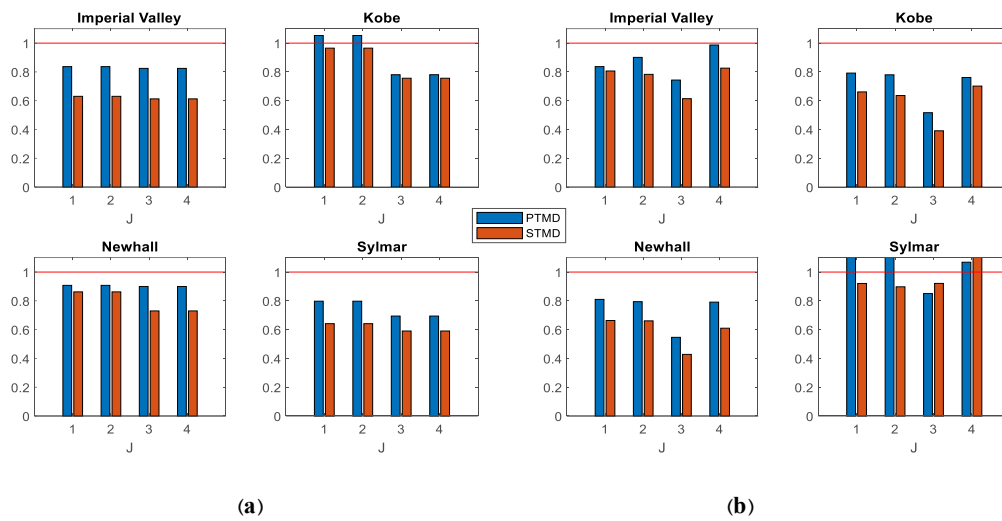
نتایج حاکی از آن است که، روش WT-SCA پیشنهادی با دقت بالایی حتی با وجود آلوده بودن داده‌ها به نویز ۱۰٪ پارامترهای مودال سازه را شناسایی کرده است.

به منظور بررسی کاربرد روش ارائه شده در شناسایی تقریباً آنی پارامترهای مودال سازه در ادامه از یک سازه یک طبقه دارای فرکانس $2/0.75$ هرتز و پنجره زمانی به طول ۱/۵ ثانیه استفاده می‌گردد. در این حالت با فرض وقوع آسیب در سازه مورد نظر در یک زمان مشخص توانایی روش شناسایی در تشخیص پارامترهای سازه پس از وقوع آسیب نیز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. آسیب مورد نظر با کاهش سختی سازه به میزان ۴۰٪ به صورت شکل (۱۰) در سازه ایجاد می‌گردد.

جدول ۳. شاخص‌های عملکرد.
Table 3. Performance index

شماره رابطه	شاخص عملکرد	توضیحات
(۳۷)	$J_1 = \frac{\max x_t(t) }{\max \hat{x}_t(t) }$	نشان‌دهنده نسبت بیشینه جابجایی طبقه‌های سازه با PTMD یا STMD به بیشینه جابجایی طبقه‌های سازه اصلی می‌باشد. در این رابطه $x_t(t)$ نشان‌دهنده پاسخ طبقه‌های سازه می‌باشد و همچنین علامت نشان‌دهنده سازه اصلی است.
(۳۸)	$J_2 = \frac{\max x_d(t) }{\max \hat{x}_d(t) }$	نشان‌دهنده نسبت بیشینه جابجایی نسبی (دریفت) طبقات در سازه با PTMD یا STMD به سازه اصلی می‌باشد. در رابطه زیر x_d نشان‌دهنده دریفت کلیه طبقه‌های سازه می‌باشد.
(۳۹)	$J_3 = \frac{\max x_{t,RMS} }{\max \hat{x}_{t,RMS} }$	نشان‌دهنده نسبت بیشینه جذر میانگین مربعات ^۱ جابجایی طبقه‌های سازه با PTMD یا STMD به سازه اصلی می‌باشد.
(۴۰)	$J_4 = \frac{\max x_{d,RMS} }{\max \hat{x}_{d,RMS} }$	نشان‌دهنده نسبت ماکزیمم جذر میانگین مربعات جابجایی نسبی طبقه‌های سازه با PTMD یا STMD به سازه اصلی می‌باشد.

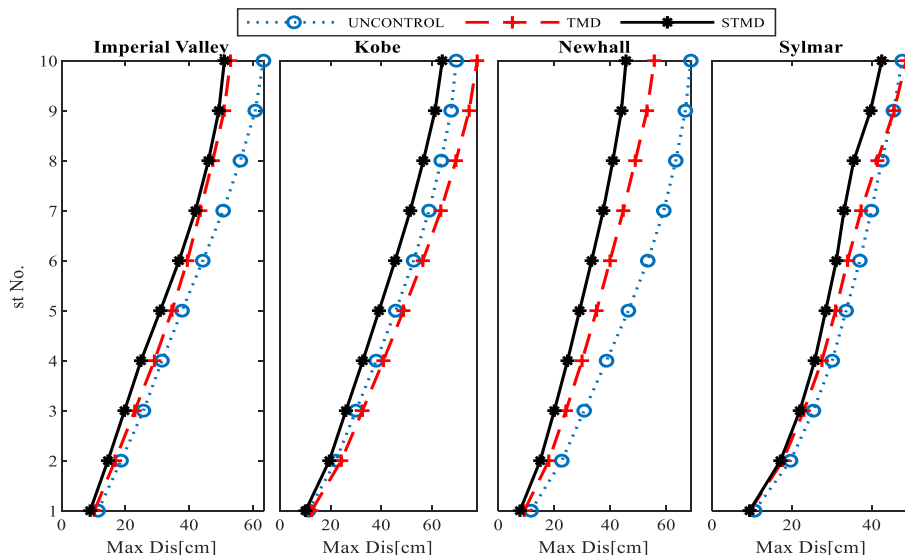
'Root-Mean-Square (RMS)



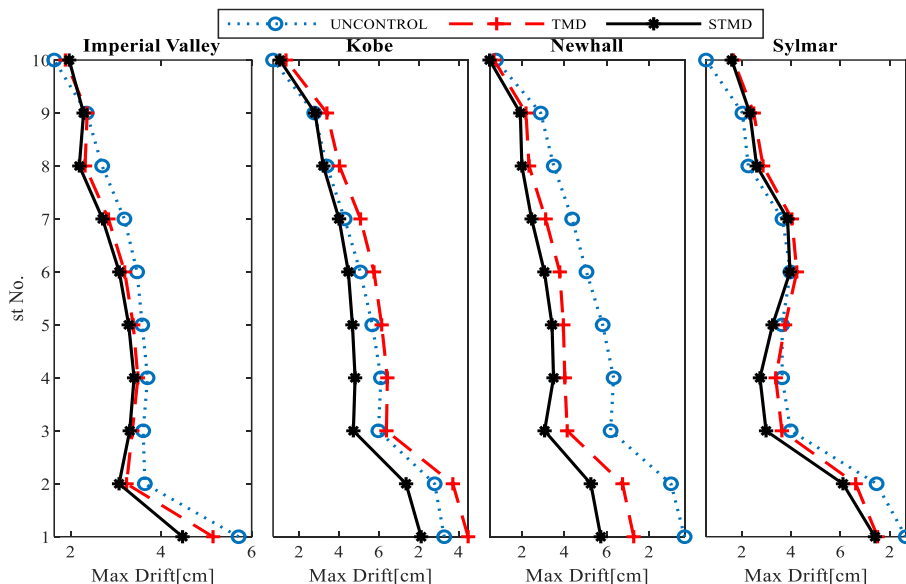
شکل ۱۳. نتایج شاخص‌های عملکرد سازه‌های (a) یک طبقه (b) ده طبقه.
Fig. 13. Results of performance index of structures a) one floor b) ten floors.

می‌گردد که در تمامی زلزله‌ها در ثانیه پنجم آسیب در سازه رخ داده و پس از آن سیستم کنترل نیمه فعال براساس پارامترهای سازه آسیب دیده تغییر خواهد نمود. جهت مقایسه عملکرد سازه با PTMD و STMD از چهار شاخص عملکرد J_1 الی J_4 استفاده می‌شود که در

توانایی کنترلی طرح جدید ارائه شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. مقادیر اولیه پارامترهای بهینه PTMD در حالت بدون آسیب برای سازه ده و یک طبقه شامل $\mu = 2\%$ و $k_t = 0.5 (kN/m)$ و $\xi_{t,opt} = 0.19$ با استفاده از روابط (۳۴) و (۳۵) به دست می‌آید. مانند حالت قبل فرض



شکل ۱۴. نتایج بیشینه جابجایی طبقات تحت رکوردهای معرفی شده.
 Fig. 14. Maximum storey displacement under the introduced records.



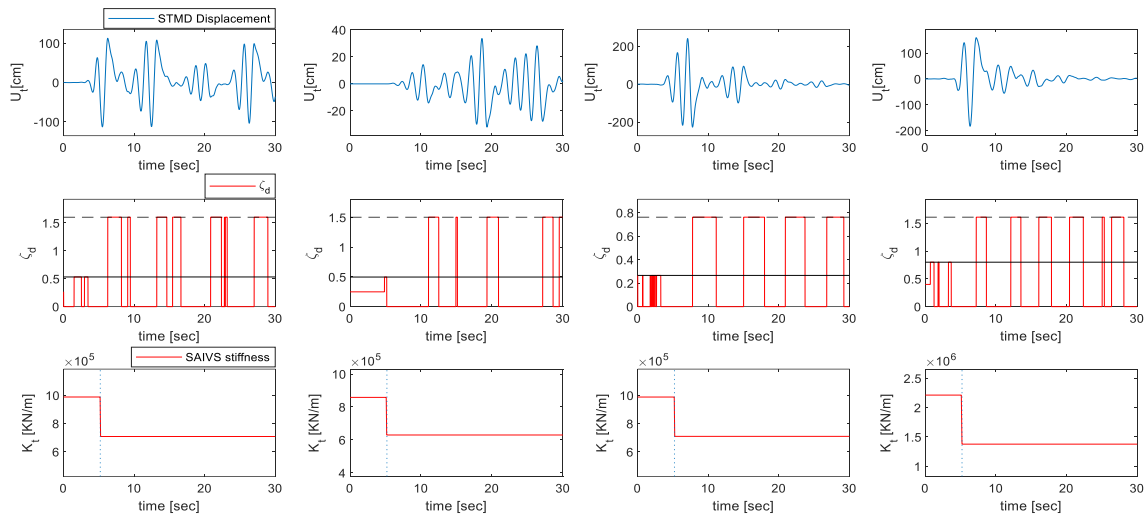
شکل ۱۵. نتایج بیشینه جابجایی نسبی طبقات تحت رکوردهای معرفی شده.
 Fig. 15. The results of the maximum drift of the storey under the introduced records.

در سیستم STMD به مراتب از سیستم PTMD دارای مقادیر کمتری است و همچنین در دو رکورد Kobe برای سازه یک طبقه و Sylmar برای سازه ده طبقه مشاهده می‌گردد که نتایج عملکرد PTMD نسبت به سازه اصلی بدتر بوده و این امر موجب آسیب در سازه می‌گردد. در شاخص‌های سوم و چهارم نیز عملکرد بهتر STMD قابل مشاهده است بجز در رکورد Sylmar برای سازه ده طبقه که در این رکورد با توجه به کاهش مقادیر بیشینه جابجایی و

جدول زیر به معرفی آن‌ها پرداخته شده است.

در شکل (۱۳) می‌توان نتایج شاخص‌های عملکرد ارائه شده را برای دو سازه یک و ده طبقه تحت رکوردهای معرفی شده مشاهده نمود.

با توجه به شاخص عملکردهای مشخص شده مشاهده می‌گردد که در تمامی رکوردهای معرفی شده نتایج شاخص‌های اول و دوم که مربوط به بیشینه جابجایی و جابجایی نسبی طبقات می‌باشد



شکل ۱۶. تغییرات سختی و ضریب میرایی STMD در طول زلزله‌ها.
 Fig. 16. Changes in stiffness and damping coefficient of STMD during earthquakes.

SCA پیشنهاد شده است. در این روش تنها نیاز به تعیین مقادیر موجک اصلی مورد استفاده می‌باشد که در این تحقیق از موجک اصلی Complex morlet بهره گرفته شده است؛ همچنین در بخش دوم این مقاله، یک کنترل کننده جدید برای توسعه یک سازه هوشمند با استفاده از ترکیب روش شناسایی سیستم پیشنهادی WT-SCA و STMD ارائه شده است. که در آن با استفاده از روش پیشنهادی WT-SCA مشخصات دینامیکی سازه تحت اثر زلزله‌های شدید شناسایی می‌شود. پس از بررسی نتایج مثالهای عددی ارائه شده، ذکر موارد زیر ضروری است:

- نتایج عددی به دست آمده نشان می‌دهد که حتی در شرایط وجود اغتشاش در پاسخ‌های اندازه‌گیری شده، روش پیشنهادی WT-SCA به طور موثر و کارایی، پارامترهای مودال سیستم را با دقت قابل قبولی به صورت لحظه‌ای شناسایی می‌کند؛ به طوری که تحت اثر زلزله‌های مختلف مود اول با دقت بالای ۹۹٪ و مودهای دوم و سوم با دقت بالای تقریباً ۹۷٪ شناسایی می‌گردد.

- با توجه به مثال‌های عددی ارائه شده مشاهده می‌گردد که در صورت وجود آسیب در حین زلزله روش پیشنهادی قابلیت مناسبی در شناسایی شکل مودی و فرکانس غالب سازه دارد.

- با بکارگیری کنترل کننده پیشنهادی، می‌توان سختی و میرایی دستگاه STMD را براساس تغییرات شناسایی شده در پارامترهای مودال سازه به طور تقریباً لحظه‌ای تنظیم مجدد نمود.

جابجایی نسبی می‌توان نتیجه عملکرد کلی STMD را کارآمد در نظر گرفت. در ادامه به دلیل محدودیت در صفحات تنها نتایج سازه ۱۰ طبقه آورده شده است. ماکزیمم جابجایی طبقات و ماکزیمم جابجایی نسبی طبقات تحت رکوردهای معرفی شده به ترتیب در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، در حالت STMD نسبت به حالت PTMD مقادیر بیشینه جابجایی (بخصوص در طبقات بالایی) و بیشینه دررفت (بخصوص طبقات میانی) سازه در همه زلزله‌ها کاهش بیشتری یافته است.

در ادامه نحوه کنترل میرایی سیستم STMD و همچنین تغییرات سختی در شکل (۱۶) نشان داده شده است. می‌توان مشاهده نمود که در بازه زمانی که بیشینه جابجایی STMD در حال افزایش است مقادیر ضریب میرایی برابر صفر است؛ و در بازه‌هایی که بیشینه جابجایی در حال کاهش است مقادیر ضریب میرایی اگر $t < 5 \text{ sec}$ برابر با $\xi_{t \text{ opt}}^d$ و یا اگر $t \geq 5 \text{ sec}$ برابر با $\xi_{t \text{ opt}}^d$ (ضریب میرایی بهینه سازه آسیب دیده) می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به کاستی‌های روش آنالیز اجزای پراکنده براساس STFT در شناسایی لحظه‌ای سیستم از قبیل نیاز به تعیین مناسب پارامترهای طول و تعداد پنجره براساس هر ورودی جهت انتقال داده‌ها به حوضه فرکانس زمان و همچنین حجم زیاد داده‌ها در این مقاله روش WT-

[9] K. Karami, S. Akbarabadi, Developing a smart structure using integrated subspace-based damage detection and semi-active control, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 31(11) (2016) 887-903.

[10] K. Karami, S. Nagarajaiah, F. Amini, Developing a smart structure using integrated DDA/ISMP and semi-active variable stiffness device, *SMART STRUCTURES AND SYSTEMS*, 18(5) (2016) 955-982.

[11] K. Karami, S. Manie, K. Ghafouri, S. Nagarajaiah, Nonlinear structural control using integrated DDA/ISMP and semi-active tuned mass damper, *Engineering Structures*, 181 (2019) 589-604.

[12] N. Fisco, H. Adeli, Smart structures: part I—active and semi-active control, *Scientia Iranica*, 18(3) (2011) 275-284.

[13] N. Fisco, H. Adeli, Smart structures: part II—hybrid control systems and control strategies, *Scientia Iranica*, 18(3) (2011) 285-295.

[14] M.G. Soto, H. Adeli, Tuned mass dampers, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 20(4) (2013) 419-431.

[15] F. Sadek, B. Mohraz, A.W. Taylor, R.M. Chung, A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 26(6) (1997) 617-635.

[16] N. Anh, N. Nguyen, Design of TMD for damped linear structures using the dual criterion of equivalent linearization method, *International Journal of Mechanical Sciences*, 77 (2013) 164-170.

[17] J.C. Miranda, Discussion of system intrinsic parameters of tuned mass dampers used for seismic response reduction, *Structural Control and Health Monitoring*, 23(2) (2016) 349-368.

[18] N. Varadarajan, S. Nagarajaiah, Wind response control of building with variable stiffness tuned mass damper using empirical mode decomposition/Hilbert transform, *Journal of engineering mechanics*, 130(4) (2004) 451-458.

[19] P.Y. Lin, L.L. Chung, C.H. Loh, Semiactive Control of Building Structures with Semiactive Tuned Mass Damper, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*,

- نتایج به دست آمده از بررسی عملکرد STMD پیشنهادی در مقایسه با حالت غیرفعال نشان می‌دهد که کنترل کننده پیشنهادی در مقابل هرگونه تغییرات در پارامترهای مودال سیستم ناشی از حرکات قوی زمین به‌طور مؤثری کارا است.

مراجع

[1] S.W. Doebling, C.R. Farrar, M.B. Prime, D.W. Shevitz, Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review, Los Alamos National Lab., NM (United States), 1996.

[2] S.R. Ibrahim, Modal confidence factor in vibration testing, *Journal of Spacecraft and Rockets*, 15(5) (1978) 313-316.

[3] J.-N. Juang, R.S. Pappa, An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction, *Journal of guidance, control, and dynamics*, 8(5) (1985) 620-627.

[4] P. Georgiev, F. Theis, A. Cichocki, Sparse component analysis and blind source separation of underdetermined mixtures, *IEEE transactions on neural networks*, 16(4) (2005) 992-996.

[5] R. Gribonval, S. Lesage, A survey of sparse component analysis for blind source separation: principles, perspectives, and new challenges, in: *ESANN'06 proceedings-14th European Symposium on Artificial Neural Networks*, d-side publi., 2006, pp. 323--330.

[6] F. Amini, Y. Hedayati, Underdetermined blind modal identification of structures by earthquake and ambient vibration measurements via sparse component analysis, *Journal of Sound and Vibration*, 366 (2016) 117-132.

[7] X.J. Yao, T.H. Yi, C. Qu, H.N. Li, Blind modal identification using limited sensors through modified sparse component analysis by time-frequency method, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 33(9) (2018) 769-782.

[8] K. Karami, F. Amini, Decreasing the damage in smart structures using integrated online DDA/ISMP and semi-active control, *Smart Materials and Structures*, 21(10) (2012) 105017.

- blind source separation, Digital Signal Processing, 23(1), 9-18.
- [28] S. Ghahari, F. Abazarsa, M. Ghannad, M. Celebi, E. Taciroglu, Blind modal identification of structures from spatially sparse seismic response signals, Structural Control and Health Monitoring, 21(5) (2014) 649-674.
- [29] J.C. Bezdek, R. Ehrlich, W. Full, FCM: The fuzzy c-means clustering algorithm, Computers & Geosciences, 10(2-3) (1984) 191-203.
- [30] V.G. Reju, S.N. Koh, Y. Soon, An algorithm for mixing matrix estimation in instantaneous blind source separation, Signal Processing, 89(9) (2009) 1762-1773.
- [31] D.L. Donoho, M. Elad, Optimally sparse representation in general (nonorthogonal) dictionaries via ℓ_1 minimization, Proceedings of the National Academy of Sciences, 100(5) (2003) 2197-2202.
- [32] J.C. Asmussen, Modal analysis based on the random decrement technique: application to civil engineering structures, Institutet for Bygningsteknik, Aalborg Universitet, 1997.
- [33] S. Nagarajaiah, Structural vibration damper with continuously variable stiffness, in, Google Patents, 2000.
- [34] S. Narasimhan, S. Nagarajaiah, A STFT semiactive controller for base isolated buildings with variable stiffness isolation systems, Engineering structures, 27(4) (2005) 514-523.
- [35] M. Abe, T. Igusa, Semi-active dynamic vibration absorbers for controlling transient response, Journal of Sound and Vibration, 198(5) (1996) 547-569.
- 20(1) (2005) 35-51.
- [20] S. Nagarajaiah, N. Varadarajan, Short time Fourier transform algorithm for wind response control of buildings with variable stiffness TMD, Engineering Structures, 27(3) (2005) 431-441.
- [21] S. Nagarajaiah, E. Sonmez, Structures with semiactive variable stiffness single/multiple tuned mass dampers, Journal of Structural Engineering, 133(1) (2007) 67-77.
- [22] C. Sun, S. Nagarajaiah, Study on semi-active tuned mass damper with variable damping and stiffness under seismic excitations, Structural Control and Health Monitoring, 21(6) (2014) 890-906.
- [23] B. Hazra, S. Narasimhan, Wavelet-based blind identification of the UCLA Factor building using ambient and earthquake responses, Smart Materials and Structures, 19(2) (2009) 025005.
- [24] U.P. Poudel, G. Fu, J. Ye, Wavelet transformation of mode shape difference function for structural damage location identification, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 36(8) (2007) 1089-1107.
- [25] Y. Yang, S. Nagarajaiah, Output-only modal identification with limited sensors using sparse component analysis, Journal of Sound and Vibration, 332(19) (2013) 4741-4765.
- [26] K. Yu, K. Yang, Y. Bai, Estimation of modal parameters using the sparse component analysis based underdetermined blind source separation, Mechanical Systems and Signal Processing, 45(2) (2014) 302-316.
- [27] J.J. Thiagarajan, K.N. Ramamurthy, A. Spanias, Mixing matrix estimation using discriminative clustering for

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Manie, K. Karami, P. Fatehi, Online system identification by sparse component analysis based on wavelet transform, Amirkabir J. Civil Eng., 52(9) (2020) 2301-2320.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16145.6140](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16145.6140)



