

بررسی قابلیت اطمینان روش‌های شناسایی زیرفضای تصادفی و تجزیه حوزه فرکانسی در تخمین پارامترهای مودال سازه تحریک شده توسط نیروی زلزله

المیرا شمشکی* (کارشناسی ارشد)

حسین کارگر (دکتری)

علی نیکخو (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و فرهنگ

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۴۰۲ (۱۱۱-۱۲۰)، (پژوهشی)
دوره ۳۹، شماره ۴، صص. ۱۱۱-۱۲۰

از کاربردی‌ترین روش‌های شناسایی پارامترهای مودال می‌توان به روش‌های شناسایی زیر فضای تصادفی و تجزیه حوزه فرکانسی اشاره کرد. با این حال، دامنه کاربرد این روش‌ها به سیگنال‌های ایستا با زمان ثبت نسبتاً بلند محدود می‌شود و در صورت مواجهه با سیگنال‌هایی که شرایط فوق در رابطه با آن‌ها صادق نیست، نتایج با خطا همراه می‌باشد. در این پژوهش، قابلیت اعتماد به نتایج این روش‌ها با تحلیل خطاهای ایجاد شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به همین منظور، زلزله به‌عنوان سیگنالی که هر دو شرط در رابطه با آن صادق نیست، به‌عنوان سیگنال تحریک در نظر گرفته می‌شود و پارامترهای مودال دو قاب تحریک‌شده توسط بیست رکورد زلزله جهت مقایسه با پارامترهای مودال مدل عددی به‌دست می‌آید. همچنین، با مطالعه آماری خطاهای موجود در تخمین فرکانس سازه، تابع توزیع احتمالاتی خطا و یک برآورد فاصله‌ای از خطا پیشنهاد می‌شود. نتایج مطالعه نشان داد که به‌طور کلی، روش شناسایی زیر فضای تصادفی نسبت به روش تجزیه حوزه فرکانسی از عملکرد بهتری برخوردار است.

واژگان کلیدی: پایش سلامت سازه، تجزیه حوزه فرکانسی، تحلیل مودال عملیاتی، شناسایی زیرفضای تصادفی.

۱. مقدمه

با رشد و توسعه ابزارهای اندازه‌گیری، ثبت و تحلیل داده‌ها، رویکردهای موجود در پایش سلامت سازه‌ها در حوزه شناسایی و تشخیص آسیب نیز با تحولات چشمگیری مواجه شده است. یکی از این روش‌ها، پایش سلامت سازه‌ها بر پایه ارتعاش^۱ است که در آن یکپارچگی عملکرد سازه از طریق ارزیابی تغییرات پارامترهای مودال در طول زمان مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در دهه‌ی اخیر، مطالعات گسترده‌ای در حوزه شناسایی پارامترهای مودال سیستم‌های سازه‌ای انجام گرفته است.^[۱-۳] این مطالعات منجر به ارائه روش‌های قدرتمندی مانند روش زیرفضای تصادفی^۲، تجزیه حوزه فرکانسی^۳ و غیره شده است. روش زیرفضای تصادفی توسط ون اورشی و دی مور^[۴] و پیترز و روکی^[۵] توسعه یافته است. در این روش، ابتدا ماتریس‌های فضای حالت از طریق تکنیک‌های عددی مانند تجزیه QR، تجزیه مقادیر منفرد و حداقل

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۳۰، اصلاحیه ۱۴۰۲/۱/۳۰، پذیرش ۱۴۰۲/۲/۱۰

استناد به این مقاله:

شمشکی، المیرا، کارگر، حسین، و نیکخو، علی، ۱۴۰۲. بررسی قابلیت اطمینان روش‌های شناسایی زیرفضای تصادفی و تجزیه حوزه فرکانسی در تخمین پارامترهای مودال سازه تحریک شده توسط نیروی زلزله. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۴)، صص. ۱۱۱-۱۲۰. DOI:10.24200/J30.2023.61746.3195

به روش‌های دیگر دارای هزینه‌های محاسباتی و عملیاتی کمتری می‌باشند.^[۹] در همین راستا، آلتونیشکا و همکارانش، پارامترهای مودال یک تیر را از طریق دو روش زیرفضای تصادفی و تجزیه حوزه فرکانسی استخراج نمودند. نتایج این مطالعه نشان داد که روش زیرفضای تصادفی از عملکرد خوبی در حوزه شناسایی پارامترهای مودال برخوردار است.^[۱۰] در مطالعه‌ای که توسط مهران پورقلی و همکاران انجام شد، تأثیر ابعاد ماتریس هتکل بر نتایج حاصل از روش شناسایی زیرفضای تصادفی مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه به بررسی حساسیت ابعاد ماتریس هتکل برای یک قاب دو بعدی بتنی و پل روگذر شهر نمین پرداخته شده است. نتایج مطالعه نشان داد که بعد به دست آمده منجر به تخمین مناسبی از پارامترهای مودال با استفاده از این روش می‌شود.^[۱۱] در مطالعه‌ای دیگر، روش زیرفضای تصادفی بر پایه تحلیل همبستگی استاندارد توسط رضا تازی نژاد و همکاران ارائه شد. از مزایای این روش می‌توان به دقت بیشتر در تعیین پارامترهای مودال سازه و سرعت بالاتر در فرایند شناسایی اشاره نمود.^[۱۲-۱۴] چالش اصلی و مشترک در روش‌های اشاره شده، محدود بودن دامنه کاربرد آن‌ها به سیگنال‌های ایستا با زمان برداشت بلند است. برای غلبه بر این مشکل، در دهه‌های اخیر تلاش‌های بسیاری توسط محققین صورت گرفته و روش‌های متعددی نیز ارائه شده است. در مطالعه‌ای که توسط لین جون لو و همکاران انجام شد، الگوریتم جدیدی برای روش شناسایی زیرفضای تصادفی پیشنهاد شد. این روش قادر به شناسایی سیگنال‌های غیر ایستا و غیر همزمان می‌باشد. نتایج مطالعه نشان داد که این روش عملکرد مناسبی در شناسایی و اندازه‌گیری پارامترهای مودال از سیگنال‌های غیر ایستا و غیر همزمان دارد.^[۱۵] یو و رن در مطالعه‌ای دیگر، روش شناسایی زیرفضای تصادفی بر پایه تجزیه مود تجربی را جهت شناسایی پارامترهای مودال ارائه نمودند. نتایج مطالعه نشان داد که روش ارائه شده قادر به استخراج پارامترهای مودال از سیگنال‌های غیر ایستا می‌باشد.^[۱۶] در مطالعه‌ای مشابه، هی و همکاران با ترکیب روش کاهش تصادفی و تجزیه مود تجربی پارامترهای مودال، پل رودخانه یانگ تسه نانجینگ را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج مطالعه نشان داد که روش کاهش تصادفی بر پایه تجزیه مود تجربی می‌تواند به عنوان یک روش موثر و کارآمد برای شناسایی پارامترهای مودال پل‌های بزرگ و دیگر سازه‌ها مورد استفاده قرار گیرد.^[۱۷] در مطالعه‌ای دیگر، نیکخو و همکاران دامنه کاربرد روش اتورگرسیو در استخراج پارامترهای مودال سیستم‌های خروجی تنها را از طریق روش تجزیه مود تجربی به سیگنال‌های غیر ایستا توسعه دادند.^[۱۸] در مطالعه‌ای مشابه، پارامترهای مودال پل معلق تسینگ تحت گردباد ویکتور^۶ با استفاده از روش تبدیل هیلبرت بر پایه تجزیه مود تجربی^۷ توسط چن و همکاران به دست آمد.^[۱۹]

با وجود تمامی تلاش‌های صورت گرفته در این حوزه، همچنان به علت ترکیبی بودن روش‌های ارائه شده و هزینه‌های محاسباتی زیاد، در بسیاری از مطالعات همچنان از روش‌های زیرفضای تصادفی و تجزیه حوزه فرکانسی در مواجهه با سیگنال‌های غیر ایستا استفاده می‌شود که نتیجه آن بروز خطا در نتایج است. تاکنون مطالعه‌ای جامع در رابطه با این خطاها صورت نگرفته و عملکرد این روش‌ها نیز در این شرایط بررسی نشده است. به همین دلیل و به منظور رفع این کاستی، در این مطالعه میزان خطاها و قابلیت اعتماد به این روش‌ها در زمانی که محدودیت‌های مربوط به آن‌ها نقض می‌شود (پاسخ سازه به نیروی زلزله از مواردی است که هر دو محدودیت به طور همزمان نقض می‌شود)، مورد بررسی قرار گرفته است. به همین منظور، دو قاب دو بعدی با ارتفاع‌های مختلف به صورت عددی مدل می‌شود و به منظور بررسی آماری میزان خطاها، توسط بیست زلزله (حوزه دور و نزدیک) تحریک می‌شوند. با استفاده از پاسخ‌های به دست آمده و از طریق دو روش شناسایی زیرفضای تصادفی و تجزیه حوزه فرکانسی پارامترهای مودال سازه به دست می‌آید.

با استفاده از نتایج به دست آمده و مقایسه آن‌ها با پارامترهای مودال به دست آمده از مدل‌های عددی، مقادیر خطا برای فرکانس‌ها، میرایی‌ها و اشکال مودی به دست می‌آید. از این طریق، درصد قابلیت اعتماد به این روش‌ها در مواجهه با سیگنال‌های غیر ایستا با طول برداشت کم به صورت عددی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. همچنین، با مطالعه آماری خطاهای موجود در تخمین فرکانس سازه از طریق دو روش نام برده شده، تابع توزیع احتمالاتی خطا و یک برآورد فاصله‌ای از خطا پیشنهاد می‌شود.

۲. روش تجزیه حوزه فرکانسی و زیرفضای تصادفی

در دهه‌های اخیر، روش‌های متعددی به منظور شناسایی و استخراج پارامترهای مودال در حوزه آزمایش مودال عملیاتی ارائه شده است. این مطالعات منجر به ارائه طیف وسیعی از روش‌ها در حوزه‌های زمان، فرکانس و زمان - فرکانس شده است. از جمله این روش‌ها در حوزه زمان می‌توان به روش زیرفضای تصادفی و روش ابراهیم و در حوزه فرکانس نیز می‌توان به روش‌های تجزیه حوزه فرکانسی، تجزیه حوزه فرکانسی ارتقاء یافته شده و تجزیه حوزه فرکانسی ارتقاء یافته متناسب با منحنی^۸ اشاره نمود. برخی از این روش‌ها به علت دقت بالای نتایج، دامنه کاربرد وسیع‌تر، حساسیت به نسبت پایین به نویز و همچنین سرعت بالای تحلیل، نظر بسیاری از محققان را در مسائل اجرایی به خود جلب کرده و بخش زیادی از مطالعات کاربردی از طریق این روش‌ها انجام می‌شود. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش تجزیه حوزه فرکانس و شناسایی زیرفضای تصادفی که به ترتیب در حوزه فرکانس و زمان ارائه شده‌اند، اشاره نمود.

۱.۲. روش تجزیه حوزه فرکانس

روش تجزیه حوزه فرکانس یکی از روش‌های پرکاربرد جهت استخراج پارامترهای مودال در حوزه فرکانس می‌باشد. این روش بر پایه دو اصل اساسی نوفه سفید بودن سیگنال‌ها و میرایی کم سازه توسعه یافته است و انحراف از این فرضیات می‌تواند موجب کاهش دقت نتایج این روش گردد. در این روش، با استفاده از پاسخ‌های ثبت شده از سازه، ماتریس چگالی طیفی توان محاسبه شده و از طریق روش تجزیه مقادیر تکین به مجموعه‌ای از توابع چگالی طیفی تجزیه می‌شود. در نهایت، با استفاده از توابع چگالی طیفی به دست آمده در مرحله قبل که هر یک معادل با یک سیستم یک درجه آزادی می‌باشند، فرکانس‌های طبیعی و اشکال مودی سازه به دست می‌آید. فرایند فوق را می‌توان به طور خلاصه به صورت زیر توضیح داد: روش تجزیه حوزه فرکانسی بر پایه ماتریس چگالی طیفی توان خروجی‌های یک سیستم توسعه یافته است که می‌توان آن را به صورت زیر بیان کرد.^[۷]

$$G_{yy}(j\omega) = \bar{H}(j\omega)G_{xx}(j\omega)H(j\omega)^T \quad (۱)$$

در این رابطه $G_{yy}(j\omega)$ ماتریس چگالی طیفی توان خروجی، $G_{xx}(j\omega)$ ماتریس چگالی طیفی توان نیروهای ورودی و $H(j\omega)$ تابع پاسخ فرکانسی سیستم می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود.^[۷]

$$H(j\omega) = \sum_{k=1}^n \left(\frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{\bar{R}_k}{j\omega - \bar{\lambda}_k} \right) \quad (۲)$$

در رابطه فوق λ_k قطب‌ها، n تعداد مودها و R_k باقی مانده می‌باشد.^[۷]

$$R_k = \phi_k Y_k^T \quad (۳)$$

در رابطه فوق Y_{hp} که نیمه بالایی ماتریس است، ماتریس گذشته^{۱۰} که نیمه پایینی ماتریس است، ماتریس آینده^{۱۱} نامیده می‌شود. برای ایجاد ارتباط بین پاسخ‌ها در زمان گذشته و آینده، ماتریس آینده بر روی ماتریس گذشته تصویر شده و به این ترتیب ماتریس تصویر^{۱۲} تشکیل می‌گردد. ماتریس تصویر به صورت مستقیم از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$O = Y_{hf} Y_{hp}^T (Y_{hp} Y_{hp}^T)^{-1} Y_{hp} \quad (10)$$

با تجزیه ماتریس تصویر از طریق روش تجزیه مقدار تکین ماتریس مشاهده پذیری^{۱۳} استخراج می‌شود.

$$O_{col} = \Gamma_s X_s \quad \Gamma_s = \begin{bmatrix} C \\ CA^d \\ CA^T d \\ \vdots \\ CA^{s-1} d \end{bmatrix} \quad (11)$$

در این رابطه، Γ_s ماتریس مشاهده‌پذیری و X_s حالت کالمن^{۱۴} است. با استفاده از ماتریس مشاهده‌پذیر و حذف یک بلوک از بالا و پایین آن ماتریس، سیستم (Ad) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\hat{\Gamma}(\nu : S) \hat{A} d = \hat{\Gamma}(\nu : s - 1) \quad (12)$$

در نهایت، پارامترهای مودال سیستم با تجزیه ماتریس سیستم با استفاده از روش تجزیه مقادیر ویژه محاسبه می‌شود.

$$\hat{A} d = \Psi \mu_i \Psi^{-1} \quad (13)$$

$$\omega_i = |\lambda_i| \quad f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad \zeta_i = \frac{\text{Re}(\lambda_i)}{|\lambda_i|} \quad (14)$$

$$\Phi = \hat{C} \Psi \quad (15)$$

با توجه به ماهیت روش‌های موجود در این حوزه، کاربرد این روش‌ها به سیگنال‌های ایستا با مدت زمان برداشت بلند محدود می‌باشد و استفاده از آن‌ها در شرایطی که فرضیات مطرح شده صادق نباشد، با خطا همراه خواهد بود. در نتیجه، می‌توان انتظار داشت که استفاده از روش‌های نام برده شده در ارتباط با سیگنال‌های زلزله (هر دو شرط در مورد آن نقض می‌شود) با خطا همراه باشد.

۳. مدل‌سازی عددی

همانطور که عنوان شد، نتایج روش‌های تجزیه حوزه فرکانسی و زیرفضای تصادفی در مواجهه با سیگنال‌های زلزله (سیگنال‌های غیرایستا با مدت زمان برداشت کوتاه) با خطا همراه می‌باشد. هدف از این بخش، بررسی خطاهای موجود در این روش‌ها به صورت عددی می‌باشد تا بتوان قابلیت اعتماد به این روش‌ها را به صورت کمی تحلیل نمود. به همین منظور، دو سازه با ارتفاع‌های متفاوت (پنج و ده طبقه) دارای سه دهانه به طول‌های ۴، ۵ و ۴ متر و ارتفاع طبقات ۳ متر با مشخصات مقاطع ذکر شده در جدول ۱ به صورت عددی مدل شده و توسط بیست رکورد زلزله حوزه دور و نزدیک (جدول ۲) تحریک می‌شود. زلزله‌های حوزه نزدیک دارای پالس‌هایی با پیوند بلند و محتوای فرکانسی بالا می‌باشند. رکوردهای زلزله بر اساس دو معیار

در این رابطه ϕ_k و y_k به ترتیب شکل مودی و بردار مشارکت می‌باشند. بر پایه روابط ۱ و ۲ و با توجه به خاصیت نطفه سفید بودن نیروهای ورودی، رابطه تابع چگالی طیفی توان بین نیروهای ورودی و پاسخ‌های سیستم مطابق رابطه زیر به دست می‌آید.

$$G_{yy}(jw) = \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^n \left[\frac{R_k}{jw - \lambda_k} + \frac{\bar{R}_k}{jw - \bar{\lambda}_k} \right] \times c \times \left[\frac{R_s}{jw - \lambda_s} + \frac{\bar{R}_s}{jw - \bar{\lambda}_s} \right] \quad (4)$$

رابطه فوق را می‌توان در حالت قطب - مانده به صورت زیر بازنویسی نمود.

$$G_{yy}(jw) = \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{jw - \lambda_k} + \frac{\bar{A}_k}{jw - \bar{\lambda}_k} + \frac{B_k}{-jw - \lambda_k} + \frac{\bar{B}_k}{-jw - \bar{\lambda}_k} \quad (5)$$

در این رابطه، A_k ، K امین ماتریس باقی‌مانده از تابع چگالی طیفی توان خروجی است. با فرض میرایی کم سیستم، باقی‌مانده‌ها با بردار شکل مودی متناسب خواهند بود.

$$A_k \propto R_k C \bar{R}_k = \varphi_k Y_k^T C Y_k \varphi_k^T = d_k \varphi_k \varphi_k^T \quad (6)$$

در رابطه فوق، d_k یک کمیت اسکالر، φ_k بردار شکل مودی k ام و Y_k بردار دخالت مود می‌باشد. بر این اساس می‌توان تابع چگالی طیفی توان پاسخ را بر حسب شکل مودها و قطب‌های سیستم به صورت زیر بازنویسی نمود.

$$G_{yy}(jw) = \sum_{k \in \text{sub}(w)} \frac{d_k \varphi_k \varphi_k^T}{jw - \lambda_k} + \frac{\bar{d}_k \bar{\varphi}_k \bar{\varphi}_k^T}{jw - \bar{\lambda}_k} \quad (7)$$

بر اساس رابطه ۷ می‌توان نشان داد که:

۱. در هر باند فرکانسی، تعداد محدودی مود در پاسخ سیستم مشارکت می‌کند.
۲. در فواصل فرکانسی نزدیک به فرکانس‌های طبیعی سیستم، پاسخ سیستم متأثر از ارتعاش یک مود می‌باشد و در نتیجه پاسخ سازه در فواصل نزدیک به این فرکانس، شکل مودی سازه را نمایش می‌دهد. در نهایت با تجزیه تابع چگالی طیفی توان خروجی با استفاده از روش تجزیه مقادیر تکین خواهیم داشت.

$$\hat{G}_{yy}(jwi) = \sum_{i=1}^n U_i S_i U_i^T \quad (8)$$

در رابطه فوق U_i بردار تکین و S_i ماتریس مقادیر تکین سیستم در فرکانس w_i می‌باشد.

۲.۲. روش شناسایی زیرفضای تصادفی

روش شناسایی زیر فضای تصادفی یکی از روش‌های ارائه شده در حوزه زمان می‌باشد که بر پایه تشکیل ماتریس‌های بلوک هنکل^۹ توسعه یافته است. در این روش، ابتدا ماتریس بلوک هنکل (Y_n) با استفاده از پاسخ‌های زمانی ثبت شده از سازه تشکیل می‌شود.^[۴]

$$Y_k = \begin{bmatrix} Y(\nu : N - 2S) \\ Y(\nu : N - 2S + 1) \\ \vdots \\ Y(2S : N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{hp} \\ Y_{hf} \end{bmatrix} \quad (9)$$

جدول ۱. مشخصات مقاطع در قاب پنج و ده طبقه.

قاب پنج طبقه			
ستون		تیر	
مقاطع	محل قرارگیری	مقاطع	محل قرارگیری
C - W35 * 1/2 - F35 * 2/5	دهانه های کناری	PG - W35 * 1 - F15 * 1	دهانه کناری طبقات سوم تا پنجم
C - W40 * 0/8 - F34 * 2	دهانه های میانی	PG - W40 * 0/8 - F20 * 1/5	دهانه میانی در تمام طبقات
		PG - W35 * 1 - F15 * 1/5	دهانه کناری طبقات اول و دوم
قاب ده طبقه			
C - W45 * 2 - F45 * 3	پنج طبقه اول		
C - W40 * 0/8 - F34 * 2	طبقه ششم	PG - W40 * 0/8 - F20 * 1/5	تمام طبقات
C - W35 * 1/2 - F35 * 2/5	طبقات هفتم تا دهم		

جدول ۲. رکوردهای منتخب حوزه دور و نزدیک.

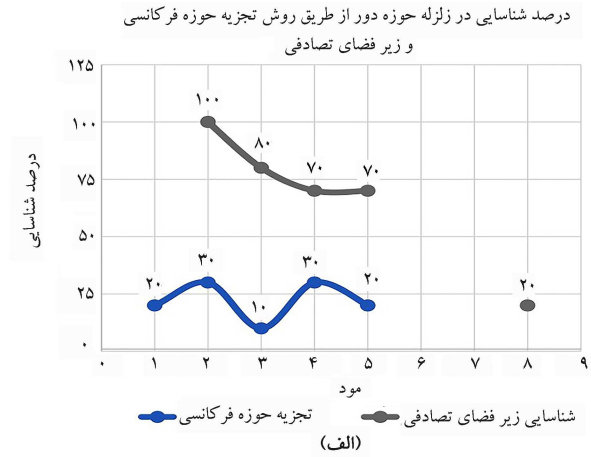
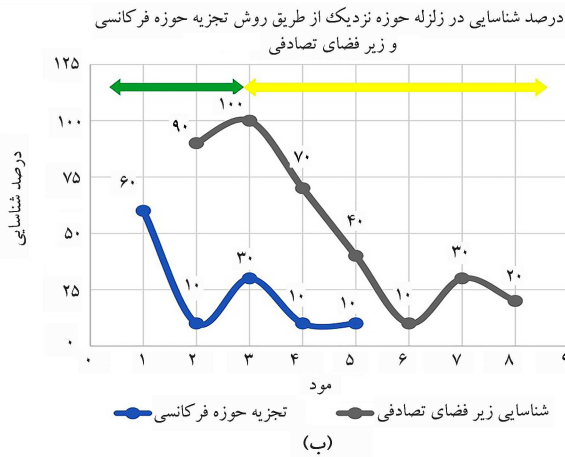
بیشینه		فاصله		بزرگا	ایستگاه	نام
شتاب	جابجایی	سرعت	(کیلومتر)			
زلزله حوزه دور						
0/0318	0/1661	1/698	54/7	6	Messina 1	BTIRRENO
0/0543	1/3609	6/118	65/1	6/2	SPFS	CCHURCH
0/189	18/052	31/341	60/2	7/62	HWA 045	CHI CHI
0/6319	9/5734	76/904	64/2	6/8	Iizuna Imokawa	CHUETSU
0/0607	0/9115	4/855	51/33	6/2	Zem	GEORGIA
0/1566	12/517	15/733	61/8	7/13	Big Bear Lake - Fire Station	HECTOR
0/0639	0/345	2/6575	65/8	7/1	Dubrovnik - Pomorska Skola	MONTENE
0/0667	0/1205	1/371	66/5	6	Lake Mathews Dike Toe	PALMSPR
0/0736	1/985	4/681	52/6	6/6	Puddingstone Dam	SFERN
0/135	6/727	14/428	51/3	7/3	SMART 1 E 2	SMART
زلزله حوزه نزدیک						
0/544	4/1791	34/511	7/3	6/46	Big Bear Lake - Civic Center	BIGBEAR
0/1773	39/004	67/89	6/49	7/01	Bunker Hill FAA	CAPEMEND
0/161	9/955	20/905	13	6/2	TCU 076	CHI CHI
0/1523	10/195	12/863	4/1	7/14	Lamont 1059	DUZCE
0/483	8/4058	46/824	7/08	6/9	Nishi-Akashi	KOBE
0/276	23/185	28/236	14/18	6/93	San Jose - Santa Teresa Hills	LOMAP
0/258	4/759	20/042	4/5	6	Hog Canyon	PARK
0/382	1/548	16/367	14	6/61	Lake Hughes #12	SANFER
0/435	13/193	39/193	5/07	6/52	Templeton - 1-story Hospital	SANSIMEO
0/63	16/999	39/767	8/8	6/61	TTR 009	TOTTORI

فاصله از گسل (جهت تفکیک حوزه دور و نزدیک) و بزرگای زلزله (بیش از ۶ ریشتر) انتخاب شدند. در نهایت، پاسخ های شتاب سازه (در شرایط عملیاتی از حسگرهای

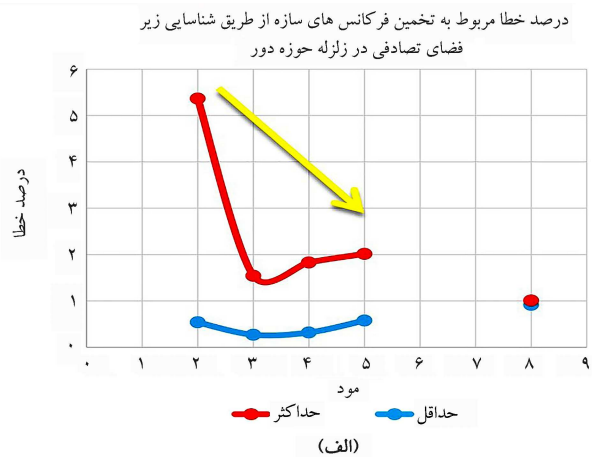
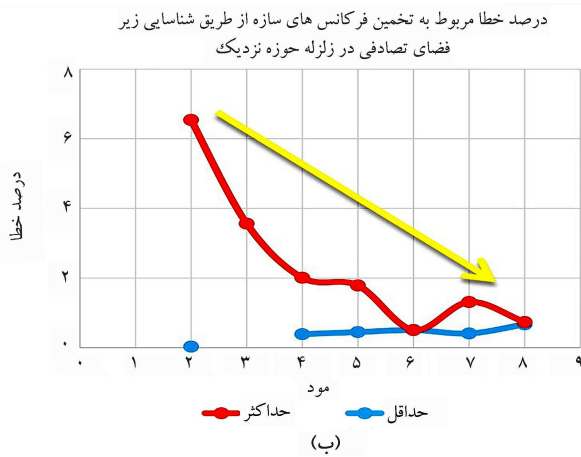
$$\left| \frac{f_{estimate} - f_{target}}{f_{target}} \right| \quad (16)$$

$$\left| \frac{\xi_{estimate} - \xi_{target}}{\xi_{target}} \right| \quad (17)$$

انتخاب شدند. در نهایت، پاسخ های شتاب سازه (در شرایط عملیاتی از حسگرهای شتابسنج استفاده می شود) در درجات آزادی تعیین شده (با توجه به تعداد و مکان جانمایی حسگرها) به دست می آید. با توجه به پاسخ های به دست آمده و با استفاده از روش های تجزیه حوزه فرکانسی و زیرفضای تصادفی، پارامترهای مودال سازه استخراج می شود. سپس، این پارامترها از طریق روابط ۱۶ تا ۱۸ با مقادیر واقعی



شکل ۱. الف) درصد شناسایی در زلزله حوزه دور از طریق روش تجزیه حوزه فرکانسی و زیر فضای تصادفی ب) درصد شناسایی در زلزله حوزه نزدیک از طریق روش تجزیه حوزه فرکانسی و زیر فضای تصادفی.



شکل ۲. الف) درصد خطا مربوط به تخمین فرکانس های سازه از طریق روش شناسایی زیر فضای تصادفی در زلزله حوزه دور ب) درصد خطا مربوط به تخمین فرکانس های سازه از طریق روش شناسایی زیر فضای تصادفی در زلزله حوزه نزدیک.

در زلزله حوزه نزدیک در نود درصد حالات قادر به شناسایی مود دوم است که این عدد برای روش تجزیه حوزه فرکانسی تنها ده درصد می باشد.

۲. روش تجزیه حوزه فرکانسی عملکرد بهتری نسبت به روش شناسایی زیر فضای تصادفی در شناسایی مود اول (مودهای پایین) دارد.

۳. روش شناسایی زیر فضای تصادفی در هیچ یک از حالات قادر به شناسایی مود اول نبوده و برای شناسایی مودهای بالاتر پیشنهاد می شود.

۴. دامنه شناسایی روش شناسایی زیر فضای تصادفی در زلزله حوزه نزدیک به مراتب گسترده تر از حوزه دور می باشد.

۵. به صورت یک روند کلی، قابلیت شناسایی روش زیر فضای تصادفی و تجزیه حوزه فرکانسی در زلزله حوزه دور و نزدیک با افزایش شماره مود، کاهش می یابد.

۲.۱.۳. بررسی میزان خطاهای موجود در تخمین پارامترهای مودال

در این بخش، به منظور کمی سازی خطاهای موجود در پارامترهای مودال استخراج شده از طریق روش زیر فضای تصادفی و تجزیه حوزه فرکانسی (با توجه به مودهای شناسایی شده)، دامنه خطا برای پارامترهای مودال به دست می آید. همانطور که در شکل های ۲، ۳، ۴ و جدول ۳ دیده می شود:

$$\frac{(\phi_{estimate}^H \phi_{target}^T)^2}{(\phi_{estimate}^H \phi_{estimate}^H)(\phi_{target}^H \phi_{target}^H)} \quad (18)$$

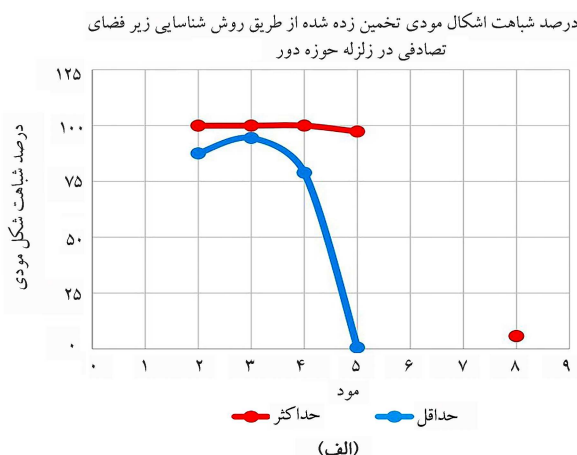
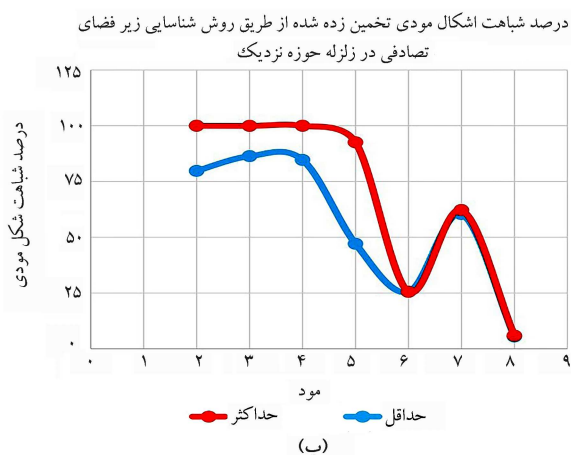
۱.۳. سازه پنج طبقه

در این بخش، یک سازه پنج طبقه به وسیله رکوردهای زلزله ارائه شده در جدول ۲ تحریک می شود و پاسخ شتاب سازه در تمامی طبقات (با فرض جانمایی حسگر شتاب سنج در تمامی طبقات) به دست می آید. با توجه به پاسخ های به دست آمده و با استفاده از روش های تجزیه حوزه فرکانسی و زیر فضای تصادفی، پارامترهای مودال سازه استخراج شده و با مقادیر واقعی مقایسه می شود.

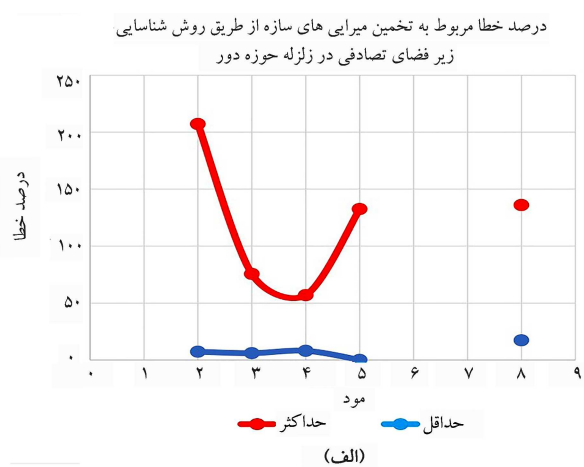
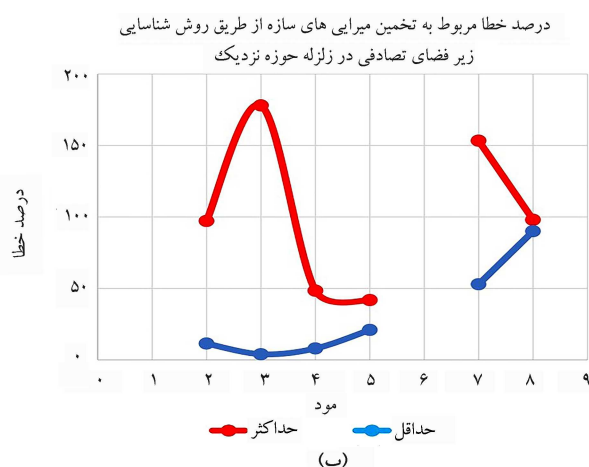
۱.۱.۳. قابلیت شناسایی مودهای سازه

از مهم ترین نتایج به دست آمده می توان به قابلیت شناسایی مودهای سازه اشاره نمود. شکل ۱ قابلیت شناسایی دو روش تجزیه حوزه فرکانسی و شناسایی زیر فضای تصادفی را به تفکیک حوزه دور و نزدیک بودن زلزله نشان می دهد. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می شود:

۱. روش شناسایی زیر فضای تصادفی نسبت به روش تجزیه حوزه فرکانسی از عملکرد بهتری برخوردار است. به عنوان مثال، روش شناسایی زیر فضای تصادفی



شکل ۳. الف) درصد شباهت اشکال مودی تخمین زده شده از طریق روش شناسایی زیر فضای تصادفی برای زلزله حوزه دور ب) (درصد شباهت اشکال مودی تخمین زده شده از طریق روش شناسایی زیر فضای تصادفی برای زلزله حوزه نزدیک).



شکل ۴. الف) درصد خطا مربوط به تخمین میرایی‌های سازه از طریق روش شناسایی زیر فضای تصادفی در زلزله حوزه دور ب) (درصد خطا مربوط به تخمین میرایی‌های سازه از طریق روش شناسایی زیر فضای تصادفی در زلزله حوزه نزدیک).

تجزیه حوزه فرکانسی و زیر فضای تصادفی، پارامترهای مودال سازه استخراج شده و با مقادیر واقعی مقایسه می‌شود.

۱.۲.۳. قابلیت شناسایی

شکل ۵ قابلیت شناسایی دو روش فوق را به تفکیک حوزه دور و نزدیک بودن زلزله نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود:

۱. روش شناسایی زیر فضای تصادفی نسبت به روش تجزیه حوزه فرکانسی از عملکرد بهتری برخوردار است.
۲. روش شناسایی زیر فضای تصادفی در هیچ یک از حالات قادر به شناسایی مود اول نبوده و برای شناسایی مودهای بالاتر پیشنهاد می‌شود.
۳. روش تجزیه حوزه فرکانسی در مواجهه با سیگنال‌های غیر ایستا (زلزله‌های حوزه دور و نزدیک) در سازه‌های بلند مرتبه از عملکرد قابل قبولی برخوردار نیست.
۴. محدوده کاربرد روش تجزیه حوزه فرکانسی به سیگنال‌های زلزله حوزه نزدیک محدود باشد.
۵. در یک روند کلی، قابلیت روش شناسایی زیر فضای تصادفی با افزایش شماره مودها کاهش می‌یابد.

۱. دامنه خطا در تخمین فرکانس‌های سازه با افزایش شماره مودها کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، حداکثر خطا در تخمین پارامتر فرکانس مربوط به مود دوم در روش شناسایی زیر فضای تصادفی پنج درصد می‌باشد که این مقدار در مود پنجم به دو درصد کاهش می‌یابد.

۲. دامنه خطا در تخمین میرایی سازه بسیار بزرگ می‌باشد و نشان‌دهنده عملکرد نامناسب روش شناسایی زیر فضای تصادفی در شناسایی پارامتر میرایی است. با این وجود با افزایش شماره مودها، دامنه خطا کاهش می‌یابد.

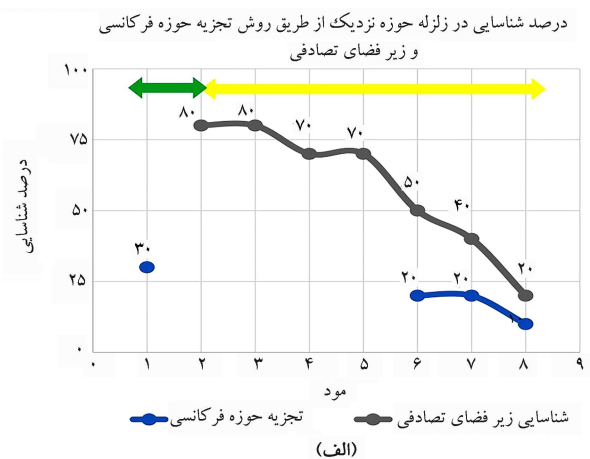
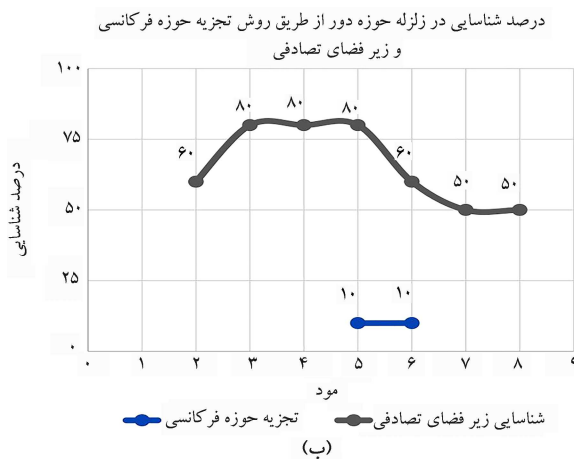
۳. به طور کلی درصد شباهت شکل مودی با افزایش شماره مود کاهش می‌یابد.

۲.۳. سازه ده طبقه

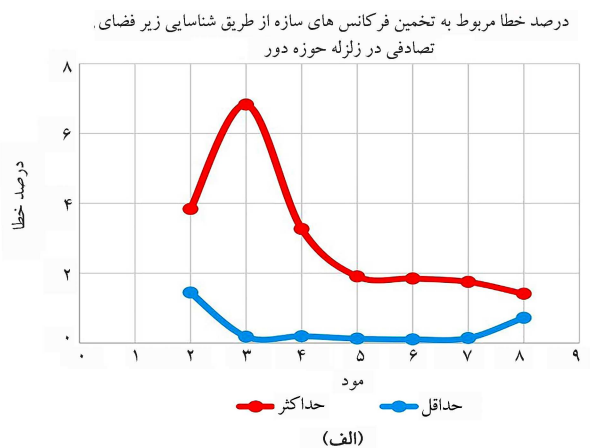
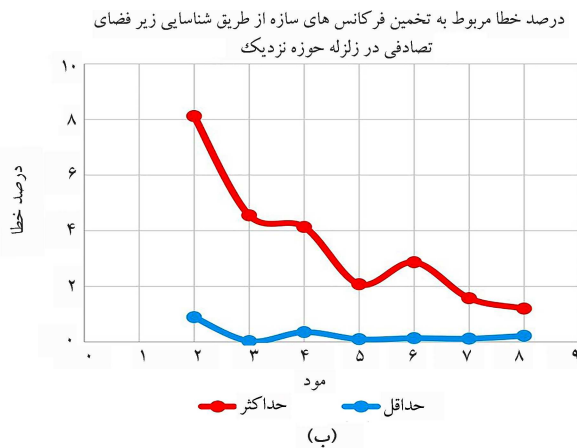
در این بخش، به منظور بررسی عملکرد روش‌های شناسایی نام برده شده، یک سازه ده طبقه به وسیله رکوردهای زلزله ارائه شده در جدول ۲ تحریک می‌شود و پاسخ شتاب سازه در تمامی طبقات (با فرض جانمایی حسگر شتاب‌سنج در تمامی طبقات) به دست می‌آید. با توجه به پاسخ‌های به دست آمده و با استفاده از روش‌های

جدول ۳. مودهای شناسایی شده و درصد خطا فرکانس مربوط به آنها از طریق روش شناسایی زیرفضای تصادفی در زلزله حوزه دور.

نام زلزله	مود							
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
BTIRRENO		۱/۶۵	۱/۴۸		۰/۹۵			
CCHURCH		۱/۲۴	۰/۲۷	۱/۱۶	۲/۰۲			
CHI CHI		۲/۹۸	۰/۴۰	۱/۷۹				
CHUETSU		۴/۵۱		۰/۴۰	۰/۵۸		۰/۹۲	
GEORGIA		۳/۱۱	۱/۴۵	۱/۰۲	۱			
HECTOR		۵/۳۷	۰/۵۹				۱/۰۱	
MONTENE		۳/۱۴		۱/۸۳	۱/۰۷			
PALMSPR		۰/۵۴	۰/۸۹	۱/۴۵	۱/۷۸			
SFERN		۱/۱۷	۱/۵۴	۰/۳۲				
SMART		۲/۰۳	۰/۶۴		۰/۷۰			



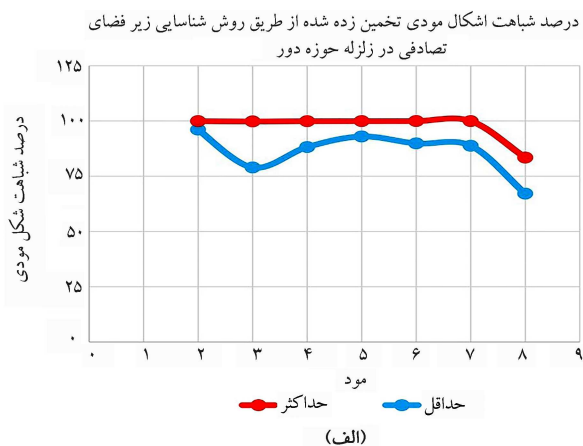
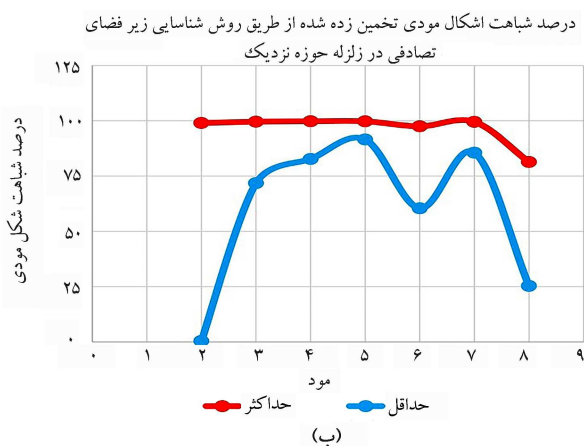
شکل ۵. الف) درصد شناسایی در زلزله حوزه نزدیک از طریق روش تجزیه حوزه فرکانسی و زیر فضای تصادفی ب) درصد شناسایی در زلزله حوزه دور از طریق روش تجزیه حوزه فرکانسی و زیر فضای تصادفی.



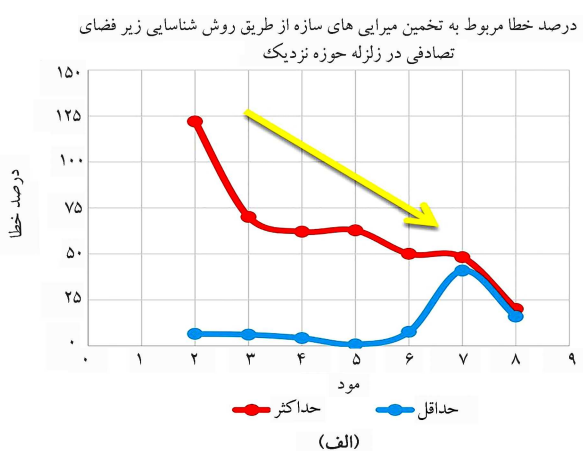
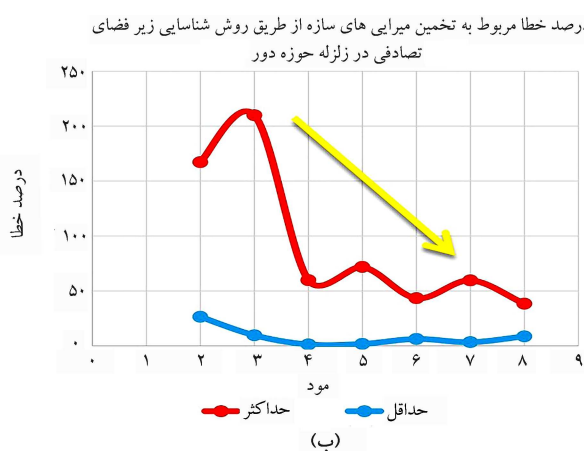
شکل ۶. الف) درصد خطا مربوط به تخمین فرکانس های سازه از طریق روش شناسایی زیر فضای تصادفی در زلزله حوزه دور ب) درصد خطا مربوط به تخمین فرکانس های سازه از طریق روش شناسایی زیر فضای تصادفی در زلزله حوزه نزدیک.

- دامنه خطا در تخمین فرکانس های سازه با افزایش شماره مودها کاهش می یابد.
- دامنه خطا در تخمین میرایی سازه بسیار بزرگ می باشد و نشان دهنده عملکرد نامناسب روش شناسایی زیر فضای تصادفی در شناسایی پارامتر میرایی است.

۲.۲.۳. بررسی میزان خطاهای موجود در تخمین پارامترهای مودال در این بخش، به منظور کمی سازی خطاهای موجود در پارامترهای مودال استخراج شده از طریق روش های فوق، دامنه خطا برای پارامترهای مودال به دست می آید. همانطور که در شکل های ۶، ۷ و ۸ دیده می شود:



شکل ۷. الف) درصد شباهت اشکال مودی تخمین زده شده از طریق روش شناسایی زیرفضای تصادفی در زلزله حوزه دور (ب) درصد شباهت اشکال مودی تخمین زده شده از طریق روش شناسایی زیرفضای تصادفی در زلزله حوزه نزدیک.



شکل ۸. الف) درصد خطا مربوط به تخمین میرایی‌های سازه از طریق روش شناسایی زیرفضای تصادفی در زلزله حوزه نزدیک (ب) درصد خطا مربوط به تخمین میرایی‌های سازه از طریق روش شناسایی زیرفضای تصادفی در زلزله حوزه دور.

از روش‌های تجزیه حوزه فرکانسی و زیرفضای تصادفی، پارامترهای مودال سازه استخراج شده و با مقادیر واقعی مقایسه می‌شود. همانطور که در شکل‌های ۹ و ۱۰ دیده می‌شود:

۱. با کاهش تعداد حسگرها و جانمایی مناسب آن‌ها، عملکرد روش تجزیه حوزه فرکانسی به‌طور چشم‌گیری بهبود می‌یابد. اما در روش شناسایی زیرفضای تصادفی، قابلیت شناسایی با افزایش تعداد حسگرها افزایش می‌یابد.

۲. کارایی روش تجزیه حوزه فرکانسی در مواجهه با سیگنال‌هایی با مشخصات زلزله‌های حوزه نزدیک از سیگنال‌هایی با مشخصات زلزله‌های حوزه دور بهتر می‌باشد.

۳. قابلیت شناسایی توسط دو روش، با افزایش شماره مودها کاهش می‌یابد.

۴.۳. فاصله اطمینان برای خطای تخمین پارامتر فرکانس

در این بخش، یک برآورد فاصله‌ای برای میزان خطای قابل انتظار در تخمین پارامتر فرکانس استخراج شده از طریق روش شناسایی زیرفضای تصادفی و تجزیه حوزه فرکانسی ارائه می‌شود. همانطور که در بخش ۲.۱.۳ و ۲.۲.۳ نشان داده شد، نتایج شناسایی فرکانس سازه از طریق دو روش فوق در مواجهه با سیگنال‌های غیرایستا با

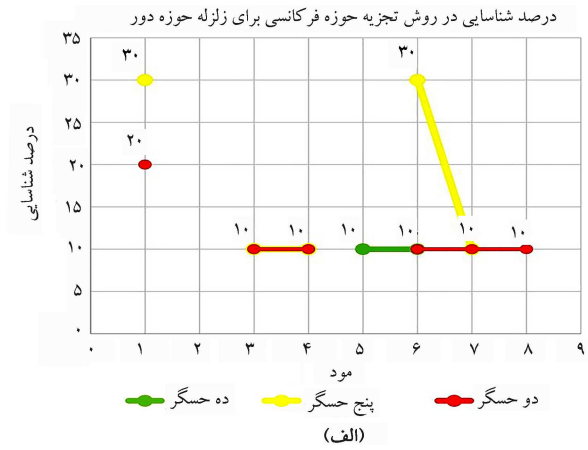
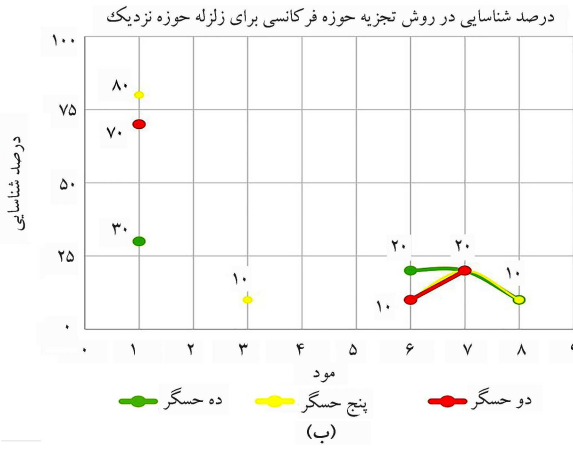
با این وجود، با افزایش شماره مودها، دامنه خطا کاهش می‌یابد.

۳. بازه درصد شباهت شکل مودی در روش شناسایی زیرفضای تصادفی برای زلزله حوزه دور دارای پراکندگی بسیار کمتری نسبت به زلزله حوزه نزدیک است.

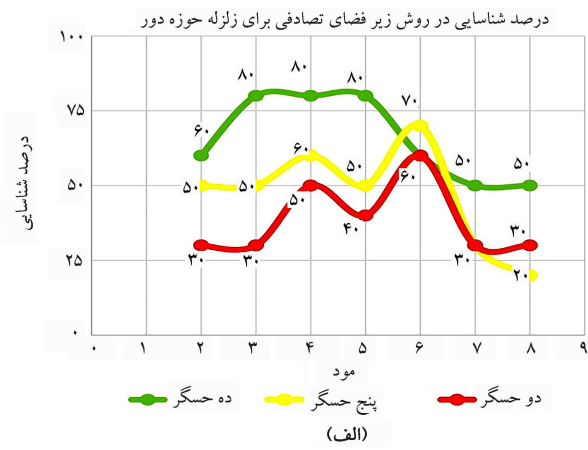
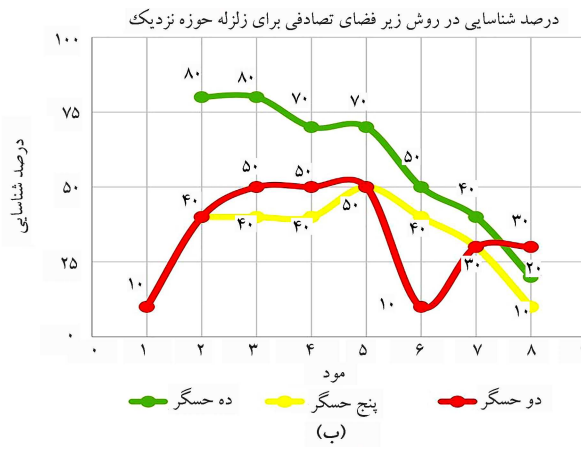
۴. به‌طور کلی درصد شباهت شکل مودی با افزایش شماره مود کاهش می‌یابد.

۳.۳. جانمایی بهینه حسگرها

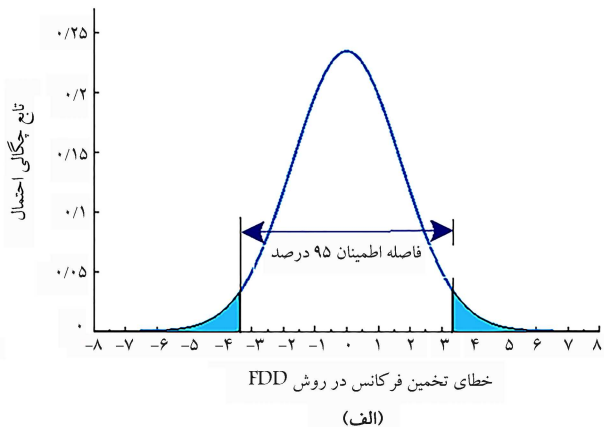
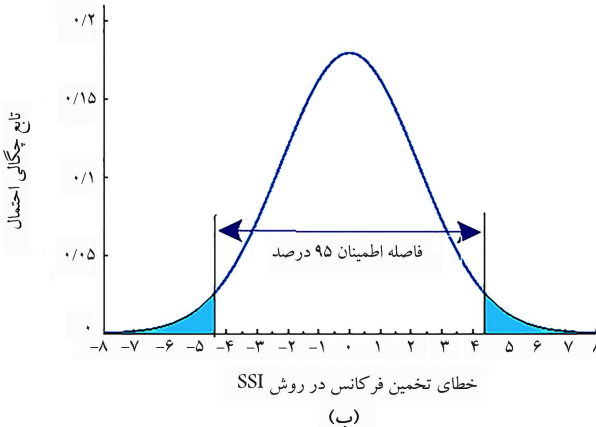
در مسایل عملیاتی مرتبط با پایش سلامت سازه‌ها به منظور کاهش هزینه‌های اجرایی، معمولاً از تعداد محدودی حسگر استفاده می‌شود. در این بخش، عملکرد روش‌های شناسایی فوق در حالتی که داده‌ها توسط پنج و دو حسگر ثبت شده باشند، مورد بررسی قرار می‌گیرد. جهت جانمایی حسگرها در دهه‌های اخیر، روش‌های زیادی با نگرش‌های متفاوت ارائه شده است. در این مطالعه از روش حاصل ضرب مولفه بردار ویژه^{۱۵} که بر پایه دامنه مودهای هدف توسعه یافته است، استفاده می‌شود. در این روش، محل جانمایی حسگرها از طریق حاصل ضرب درایه‌های متناظر مودهای هدف استخراج می‌شود.^[۲۰] به همین منظور، یک سازه ده طبقه به وسیله رکوردهای زلزله ارائه شده در جدول ۲ تحریک می‌شود و پاسخ شتاب سازه در پنج و دو طبقه به‌دست می‌آید. با توجه به پاسخ‌های به‌دست آمده و با استفاده



شکل ۹. الف) درصد شناسایی در روش تجزیه حوزه فرکانسی برای زلزله حوزه دور ب) درصد شناسایی در روش تجزیه حوزه فرکانسی برای زلزله حوزه نزدیک.



شکل ۱۰. الف) درصد شناسایی در روش زیرفضای تصادفی برای زلزله حوزه دور ب) درصد شناسایی در روش زیرفضای تصادفی برای زلزله حوزه نزدیک.



شکل ۱۱. الف) تابع توزیع نرمال پارامتر فرکانس در روش تجزیه حوزه فرکانسی ب) تابع توزیع نرمال پارامتر فرکانس در روش شناسایی زیرفضای تصادفی.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عملکرد روش شناسایی زیرفضای تصادفی و تجزیه حوزه فرکانسی در مواجهه با سیگنال‌های غیرایستا با طول برداشت کوتاه مورد ارزیابی قرار گرفت. به همین منظور، زلزله به‌عنوان یک سیگنال غیرایستا با طول زمان کوتاه به‌عنوان سیگنال تحریک در نظر گرفته شد و پارامترهای مودال دو قاب تحریک شده توسط

طول مدت زمان کوتاه با خطا همراه است. با تحلیل آماری خطاهای موجود می‌توان تابع توزیع نرمال را برای هر دو روش پیشنهاد داد (شکل ۱۱) با فرض سطح اطمینان ۹۵ درصدی برای خطاهای مشاهده شده در روش شناسایی زیرفضای تصادفی و تجزیه حوزه فرکانسی، فاصله اطمینان به صورت نشان داده شده در شکل ۱۱ پیشنهاد می‌شود.

که به‌طور کلی، نتایج به دست آمده از طریق روش شناسایی زیرفضای تصادفی نسبت به روش تجزیه حوزه فرکانسی از دقت بالاتری برخوردار است. در روش تجزیه حوزه فرکانسی با جانمایی مناسب حسگرها عملکرد آن به‌طور چشم‌گیری بهبود می‌یابد و این در حالی است که در روش شناسایی زیرفضای تصادفی با افزایش تعداد حسگرها قابلیت شناسایی افزایش می‌یابد. در هر دو روش با افزایش شماره مودها، دامنه خطا در فرکانس و میرایی کاهش می‌یابد. با این وجود، تخمین میرایی سازه در شرایط فوق از طریق روش شناسایی زیرفضای تصادفی پیشنهاد نمی‌شود.

بیست رکورد زلزله از طریق دو روش شناسایی زیرفضای تصادفی و تجزیه حوزه فرکانسی جهت مقایسه با پارامترهای مودال مدل عددی به‌دست آمد. با استفاده از نتایج به‌دست آمده و مقایسه با نتایج حاصل از مدل عددی، مقادیر خطا برای پارامترهای مودال محاسبه و از این طریق درصد قابلیت اعتماد به نتایج این روش‌ها در مواجهه با سیگنال‌های غیرایستا با طول برداشت کوتاه به‌صورت کمی مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین، با مطالعه آماری خطاهای موجود در تخمین فرکانس سازه از طریق دو روش فوق، تابع توزیع احتمالاتی نرمال برای میزان خطا پیشنهاد و از طریق آن یک برآورد فاصله‌ای از خطا برای هر دو روش ارائه شد. نتایج مطالعه نشان داد

پانویس‌ها

1. Vibration Based Structural Health Monitoring
2. Stochastic Subspace Identification (SSI)
3. Frequency Domain Decomposition (FDD)
4. Ibrahim Time Domain
5. Singular Value Decomposition
6. Victor
7. Empirical Mode Decomposition
8. Curve-Fitted Enhanced Frequency Domain Decomposition
9. Hankel Matrix
10. Past Matrix
11. Future Matrix
12. Image Matrix
13. Observable Matrix
14. Kalman
15. Eigenvector Component Product

منابع (References)

1. Ghannadi, P., Kourehli, S.S. and Mirjalili, S., 2022. The application of PSO in structural damage detection: An analysis of the previously released publications (2005-2020). *Frattura ed Integrità Strutturale*, 16(62), pp.460-489. <http://dx.doi.org/10.3221/IGF-ESIS.62.32>.
2. Ghannadi, P., Kourehli, S.S. and Mirjalili, S., 2023. A review of the application of the simulated annealing algorithm in structural health monitoring (1995-2021). *Frattura ed Integrità Strutturale*, 17(64), pp.51-76.
3. Gharehbaghi, V.R., Noroozinejad Farsangi, E., Noori, M. and et al., 2021. A critical review on structural health monitoring: Definitions, methods, and perspectives. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29(12), pp.1-27. <http://dx.doi.org/10.1007/s11831-021-09665-9>.
4. Van Overschee, P. and De Moor, B., 2012. Subspace Identification for Linear Systems: Theory-Implementation-Applications. Springer Science & Business Media.
5. Peeters, B. and De Roeck, G., 2000. Reference based stochastic subspace identification in civil engineer-
ing. *Inverse Problems In Engineering*, 8(1), pp.47-74. <https://doi.org/10.1080/174159700088027718>.
6. Yi, J.H. and Yun, C.B., 2004. Comparative study on modal identification methods using output-only information. *Structural Engineering and Mechanics: An International Journal*, 17(3), pp.445-466. http://dx.doi.org/10.12989/sem.2004.17.3_4.445.
7. Brincker, R., Ventura, C.E. and Andersen, P., 2001. Damping estimation by frequency domain decomposition. *Proceedings of IMAC 19: A Conference on Structural Dynamics: Februar 5-8, 2001, Hyatt Orlando, Kissimmee, Florida, 2001*, pp.698-703.
8. Gentile, C. and Saisi, A., 2013. Operational modal testing of historic structures at different levels of excitation. *Construction and Building Materials*, 48, pp.1273-1285. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.013>.
9. Weng, J.H., Loh, C.H., Lynch, J.P. and et al., 2008. Output-only modal identification of a cable-stayed bridge using wireless monitoring systems. *Engineering Structures*, 30(7), pp.1820-1830. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.12.002>.
10. Altunışık, A.C., Bayraktar, A. and Sevim, B., 2012. Operational modal analysis of a scaled bridge model using EFDD and SSI methods.
11. Pourgholi, M., Gilarlue, M.M., Vahdani, T. and et al., 2023. Influence of Hankel matrix dimension on system identification of structures using stochastic subspace algorithms. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 186, p.109893. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109893>.
12. Tarinejad, R., Pourgholi, M. and Yaghmaei-Sabegh, S., 2017. System identification of arch dams using balanced stochastic subspace identification. *Modares Civil Engineering Journal*, 17(1), pp.53-64.
13. Tarinejad, R., Pourgholi, M. and Yaghmaei-Sabegh, S., 2016. Signal processing of dynamic tests results using subspace identification based on orthogonal decomposition technique (SI-ORT). *Modares Mechanical Engineering*, 15(10), pp.104-116. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1394.15.10.34.8>.
14. Tarinejad, R. and Pourgholi, M., 2015. Processing of ambient vibration results using stochastic subspace

- identification based on canonical correlation analysis. *Modares Mechanical Engineering*, 15(7), pp.107-118. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1394.15.7.51.9>.
15. Lu, L.J., Zhou, H.F., Ni, Y.Q. and et al., 2021. Output-only modal analysis for non-synchronous data using stochastic sub-space identification. *Engineering Structures*, 230, p.111702. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111702>.
 16. Yu, D.J. and Ren, W.X., 2005. EMD-based stochastic subspace identification of structures from operational vibration measurements. *Engineering Structures*, 27(12), pp.1741-1751. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.04.016>.
 17. He, X., Hua, X., Chen, Z. and et al., 2011. EMD-based random decrement technique for modal parameter identification of an existing railway bridge. *Engineering Structures*, 33(4), pp.1348-1356. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.01.012>.
 18. Nikkhoo, A., Karegar, H., Mohammadi, R.K. and et al., 2020. Improving the performance of the autoregressive method in modal identification of output-only systems using the empirical mode decomposition. *Structures*, pp.1165-1173. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.07.006>.
 19. Chen, J., Xu, Y.L. and Zhang, R., 2004. Modal parameter identification of Tsing Ma suspension bridge under typhoon vector: EMD-HT method. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 92(10), pp.805-827. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2004.04.003>.
 20. Papadopoulos, M. and Garcia, E., 1998. Sensor placement methodologies for dynamic testing. *AIAA Journal*, 36(2), pp.256-263.