مطالعه قابليت اعتماد كنترل فعال ارتعاشات مبتني بر شناسايي سيستم

امین قلیزاد*، مونا شعاعی پرچین دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. gholizad@uma.ac.ir

خلاصه: قابلیتاعتماد سامانههای کنترل ارتعاشات تحت تاثیر عدمقطعیتهای موجود در پارامترهای دینامیکی سازه، مشخصات کنترلر و تحریکات خارجی قرار میگیرد. در مواردی که هدف، طرح کنترل برای سازههاییست که مشخصات آنها در اختیار نمیباشد، استفاده از روشهای شناسایی در تخمین پارامترهای دینامیکی و طراحی کنترلر راهگشا است. کنترلر طراحیشده بر مبنای شناسایی از طرفی خطای ذاتی مدلسازی را بههمراه دارد و از سویی تحت تاثیر خطای روشهای شناسایی قرار میگیرد. میتوان از مقایسه عملکرد کنترلر مبتنی بر شناسایی با کنترلر مبتنی بر مدل فرضی، تخمینی از تاثیر دقت شناسایی در کنترل ارتعاشات بهدست آورد. این رویکرد ضمن صرفهجویی در هزینههای هوشمندسازی، نقش منفی عدمقطعیتها در پارامترهای سازه را کمرنگ نموده و میتواند با استخراج مشخصات سازه به طراحی کنترلر بپردازد. در این مطالعه با درنظرگرفتن عدمقطعیتهای موجود در پارامترهای سازه و تحریک خروجی، نخست سیستم گنترل اولیه طراحی شده بو در ادامه براساس پاسخهای ثبتشده، سازه با روش زیرفضای تصادفی شناسایی شده است تا کنترلر دیگری بر مبنای شناسایی طراحی گردد. در نهایت با تعریف تابع خرابی بسورت اخترافی میتنده، سازه با روش زیرفضای تصادفی شناسایی شده است تا کنترلر دیگری بر مبنای شناسایی طراحی آمده است. مطابق نتایج درصد موفقیت برای کنترلر مبتنی بر شناسایی نسبت به کنترلر اصلی شاه پرای دو کنترلر، تخمینی از قابلیتاعتماد سیستم میترد. در نهایت با تعریف تابع خرابی به و احرای کنترلر مبتنی بر شناسایی نسبت به کنترلر اصلی شناسایی شده است تا کنترلر دیگری بر مبنای شناسایی طراحی آمده است. مطابق نتایج درصد موفقیت برای کنترلر مبتنی بر شناسایی نسبت به کنترلر اصلی ۱۹۷۷ و کنترلر، تخمینی از قابلیتاعتماد سیستم کنترل به منترل میترین بر شناسایی از مینگین پایین تر و انحراف معیار بالاتری نسبت به کنترلر اصلی ۱۹۷۸ و توزیعهای آماری برای شاز می بازتر نسبتهای

كلمات كليدي

زيرفضاي تصادفي، شبيهسازي مونتكارلو، شناسايي سيستم، قابليت اعتماد، كنترل فعال.

۱– مقدمه

قابلیتاعتماد سیستمهای کنترل با در نظر گرفتن عدمقطعیتهای موجود در تحریکات خارجی، مشخصات سازه و کنترلر مورد بررسی قرار میگیرد. در سیستمهای فعال کنترل ارتعاشات که معمولا اعمال نیروهای نسبتا بزرگی به سازه مورد انتظار است، اهمیت مطالعهي مساله قابليتاعتماد از جهت تاثير خطاي پارامترها در محاسبهي جهت و بزرگي نيروي كنترل اعمالي و تحتالشعاع قرار گرفتن پایداری و ایمنی سازه دو چندان میشود. الگوریتمهای بهنگام کنترل نظیر روش کنترل بهینهی لحظهای و کنترل پیشبین مدل با اندازهگیری و اعمال مقادیر لحظهای تحریک خارجی در طرح کنترل میتوانند اثر عدمقطعیت موجود در بارهای جانبی را در طراحی سیستم کنترل فعال به حداقل برسانند. از طرفی وجود عدمقطعیت در پارامترهای سازه و کنترلر شامل عدمقطعیت در مقادیر پارامترها و ابعاد یا تغییرات بهوجود آمده در طول عمر مفید سازه نظیر رخداد آسیب نیز قابلیتاعتماد سازهی مجهز به ابزار کنترل رآ تحت تاثیر قرار میدهد. در مواردی که هدف، طرح کنترل برای سازههاییست که مشخصات آنها در اختیار نمیباشد، استفاده از روشهای شناسایی در تخمین پارامترهای دینامیکی و طراحی کنترلر راهگشا است. گرچه در واقعیت، دستیابی و دسترسی به ویژگیهای سیستمی که تحت تأثیر درهمتنیدگی عدمقطعیتها و خطاهای مدلسازی قرار دارد، دستنیافتنی به نظر میرسد؛ لیکن با در نظر گرفتن عدمقطعیتهای مدل سازه و تحریکات خارجی میتوان از اثرات نامطلوب خطاهای این پارامترها جلوگیری کرد و از طرفی با استفاده از پارامترهای شناسایی شدهی مدل، دقت طرح کنترل را افزایش داد. در طراحی سیستمهای کنترل ارتعاشات بهعنوان کار آمدترین تجهیزات نوین بهبود عملکرد لرزهای سازهها، اطلاع از مشخصات دینامیکی نظیر جرم، سختی و میرایی طبقات ضروری است. مسائل مختلفی پیش روى اندازه گيري و تعيين دقيق اين پارامترها وجود دارد كه سبب مي شود كنترلر طراحي شده بر مبناي اين مشخصات نيز عدمقطعيتهايي داشته باشد. در ادامه پیشینهی مطالعات انجام شده در زمینهی قابلیتاعتماد سیستمهای کنترل و ترکیب، ادغام و همگامسازی سیستمهای پایش سلامت و کنترل ارتعاشات مرور می گردد.

طراحی بر مبنای قابلیتاعتماد جهت کاربردهای کنترل غیرفعال سازدها توسط پایادیمیتریو⁽ و همکاران [۱] برای نخستین بار ارائه شده است. جنسن^۲ و سپالودا^۳ [۲] در سال ۲۰۱۲ طرح بهینه مبتنی بر قابلیت اعتماد سازه های تحت کنترل غیرفعال را مطالعه نمودند. منابع عدمقطعیت در این پژوهش شامل عدمقطعیت در مدل سازه (ظرفیت باربری) به همراه عدمقطعیت در زلزلههای وارده به سازه (بارگذاری) بودند. دو قاب بتنی سهبعدی مجهز به میراگر فلزی U شکل بهعنوان مثالهای عددی مورد بررسی قرار گرفتند. در مطالعه ای که در سال ۲۰۱۴ توسط جنسن و کوسانویک^۴ [۳] انجام گرفته اثرات تحریکات نزدیک به گسل بر عملکرد و طراحی بهینهی سیستم های جداساز پایهای بر مبنای قابلیتاعتماد بررسی شده است. تحریکهای وارده بهصورت احتمالاتی تعریف گردیده و از جداسازهای تشکیل یافته از المان های لاستیکی بهره گرفته شده است. دو قاب ساختمانی سهبعدی بزرگ مقیاس برای بررسی های عددی تحلیل شده و نتایج نشان دادهاند که تاثیر زلزلههای نزدیک گسل بر هزینه، عملکرد و قابلیتاعتماد سیستمهای جداساز چشمگیر بوده و باید در طراحی این سیستمها در نظر گرفته شود. همچنین باید عملکرد سازه و سیستم جداساز بهصورت همزمان مورد بررسی قرار گیرد. فرهمندآذر و همکاران [۴] یک روش تحلیل قابلیتاعتماد بر مبنای قابلیتاعتماد مرتبهی اول و روش سطح پاسخ برای مسائل با ابعاد بالا ارائه دادند که شاخص قابلیتاعتماد، محتمل ترین نقطه و احتمال خرابی سیستمهای نامشخص را با کارآیی و دقت بیش تری نسبت به شبیه سازی مونت کارلو، قابلیت اعتماد مرتبه اول و روش سطح پاسخ محاسبه می کند. سازه ی مجهز به سیستم کنترل غیرفعال (سیستم جداسازی پایه به همراه میراگر ستون مایع) تحت اثر زلزلههای غیرقطعی نزدیک گسل با منشا، نوع و میزان عدمقطعیت متفاوت جهت بررسی تاثیر روش پیشنهادی بر عملکرد و قابلیتاعتماد سیستمهای کنترل سازه و سازههای کنترل شده مورد مطالعه قرار گرفته است. باباییپور و خسروی [۵] یک قاب بتنی ۴ طبقه مجهز به میراگر ویسکوالاستیک را ابتدا با نرمافزار OpenSEES مدل کرده و سپس با قابلیتاعتماد مورد بررسی قرار دادند. یک روش یادگیری ماشین تحت عنوان جنگل تصادفی با هدف بررسی امکانسنجی اعمال و ارزیابی

¹ Papadimitriou

² Jensen

³ Sepúlveda

⁴ Kusanovic

عملکرد آن در مدلسازی و پیشبینی قابلیتاعتماد سازه در حالت کنترل غیرفعال توسط یو و همکارن [۶] مطالعه شده است. در پژوهشی لی^۲ و همکاران [۷] کنترل بهینه تصادفی مبتنی بر قابلیتاعتماد را از طریق روش انتگرال احتمالاتی مستقیم^۳ برای سازه ساختمانی پیشنهاد نمودهاند که در طراحی مبتنی بر عملکرد سیستمهای کنترل سازههای خطی تحت تحریکات تصادفی غیرایستا و غيرسفيد قابل اجرا است. روش تلفيقي شناسايي آسيب در كنار كنترل فعال براساس پاسخ شتاب سازه توسط كيم ً و همكاران [٨] ارائه گردیده است. در این پژوهش با تخمین پاسخ شتاب در گامهای زمانی آینده مقدار خطا بین دو دادهی رخداده و پیشبینی شده کمینه می گردد. با حل این مسالهی بهینهسازی مقادیر سختی و میرایی محاسبه شده و براساس این مقادیر که بهصورت لحظهای آپدیت می شوند، خرابی شناسایی شده و الگوریتم کنترل بهینهی لحظهای، نیروی کنترل را محاسبه نموده و فرمان کنترلی را به محرکها صادر مینماید. فتحیآذر و محبی [۹] اثر عدمقطعیت در پارامترهای سازه و سیستم کنترل را با ترکیب شبیهسازی مونتکارلو و شبکه عصبی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج بهدست آمده نشان میدهد رفتار قابلیت اعتماد برای دو حالت طراحی بر مبنای قابلیت اعتماد و طراحی يقينانديشانه وابسته به توابع هدف طراحي ميباشد. شعاعي و همكاران [١٠] تحليل قابليتاعتماد سازههاي مجهز به ميراگر مايع تنظيم شده را با درنظرگرفتن عدمقطعیت در شدت زلزله، جرم، سختی و میرایی سازه و مشخصات تسلیم مصالح مورد مطالعه قرار دادند که معیار شکست و خرابی بر مبنای دریفت طبقه تعریف شده است. دبارما^ه و همکاران [۱۱] مطالعهی پارامترهای بهینه میراگر مایع تنظیم شده⁹ تحت تحریک تصادفی زلزله را هدف مطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند هرچه میزان عدمقطعیت بیشتر می شود مزیت استفاده از TLCD کاهش یافته و مقرون به صرفه بودن استفاده از آن در کاهش ارتعاشات سازه پابرجا می ماند. هم چنین درنظر نگرفتن عدمقطعیت ها سبب می شود عملکرد TLCD دستبالا بر آورد شده و طرح ناایمنی حاصل گردد. جرم، سختی، ضریب میرایی، جابجایی تسلیم، نسبت سختی بعد از تسلیم به سختی پیش از تسلیم، طول مخزن، ارتفاع مایع درون مخزن و PGA زلزله به عنوان متغیرهای دارای عدمقطعیت در این پژوهش تعریف شدهاند. خان سفید و واعظزاده [۱۲] جهت تعیین مشخصات بهینه میراگرهای ویسکوز با روش احتمالاتی نمونه گیری، یک ساختمان فولادی ۶ طبقه با رفتار غیرخطی را به ازای شاخص های عملکرد متنوع که ترکیبی از شتاب و گریز طبقات است برای سطوح مختلفی از ریسکپذیری بهصورت بهینه طراحی نمودند. در این مطالعه شاخص قابلیتاعتماد بهعنوان معیاری از میزان ریسک پذیری استفاده شده و در نهایت روشی مبتنی بر آنالیز قابلیت اعتماد جهت طراحی میراگر ویسکوز ارائه گردیده است. آنالیز قابلیتاعتماد قاب فولادی ۵ طبقه مجهز به میراگر اصطکاکی و شاخص قابلیتاعتماد برای دو حالت با و بدون میراگر توسط دهنوی و خسروی [۱۳] مورد مقایسه قرار گرفته است. محبی و همکاران [۱۴] یک قاب برشی ده طبقه با میراگر جرمی تنظیم شده در طبقهی فوقاني تحت زلزلهي السنترو را به كمك الگوريتم ژنتيك بهينه نموده و آناليز حساسيت قابليتاعتماد را بر روى آن انجام دادند. تمامي پارامترهای سازه و میراگر متغیر تصادفی دارای عدمقطعیت در نظر گرفته شده و شبیهسازی مونت کارلو در تحلیل قابلیت اعتماد مورد استفاده قرار گرفته است. شریعتمدار و بهنامراد [۱۵] از روشی موسوم به شبیهسازی زیرمجموعهای برای محاسبه احتمال گسیختگی و قابلیتاعتماد سه سازهی برشی سه طبقه و یک دهانه با پارامترهای دارای عدمقطعیت مجهز به آرایشهای مختلفی از مکانیزم تاندون فعال استفاده نمودهاند. عسکری و شیرازی [۱۶] قابلیتاعتماد سیستمهای کنترل فعال، غیرفعال و نیمهفعال را تحت تاثیر عامل فاصله از گسل (عدمقطعیت بار خارجی) مورد مطالعه قرار دادند. اثر عدمقطعیتهای طراحی و قابلیتاعتماد پلهای مجهز به میراگر توسط پویان و همامی [۱۷] مورد بررسی قرار گرفته است. ژانگ^۷ و همکاران در سال ۲۰۲۳ [۱۸] طرح کنترل نیمهفعال را با در نظر گرفتن رواداری خرابی برای ابزار نیمهفعال (میراگر MR) توسعه دادند. این کنترلر هنگام خرابی میراگر، جبرانساز خروجی را وارد معادلات می نماید تا شرایط عدم عملکرد میراگر را در نظر بگیرد. مدل پل پیوسته مجهز به مکانیزم MR تحت رکوردهای مصنوعی زلزله با در نظر گرفتن تابع توزیع احتمال برای پارامترهای آن کنترل شده و قابلیتاعتماد مجموعهی کنترل محاسبه گردیده است. نتایج نشان میدهد که طرح کنترل نیمه فعال با در نظر گرفتن آسیب میراگر هم چنان می تواند باعث شود که سازه پل در سیستم کنترل دارای خطا به اهداف

¹ You

 $^{^{2}}$ Li

³ DPIM ⁴ Kim

⁵ Debbarma

⁶ Tuned Liquid Column Damper (TLCD)

⁷ Zhang

مورد انتظار دست یابد. حسینایی و همکاران ۲۰۲۲ [۱۹] بر ارزیابی احتمالاتی کنترل فعال سازه با در نظر گرفتن عدمقطعیت در مدل سازه و شتاب زمین تمرکز کردهاند. آنالیز حساسیت با استفاده از شاخص Borgonovo برای اندازه گیری اثرات منابع دارای عدمقطعیت بر پاسخهای سازه اصلی انجام شده است. تحلیل قابلیت اعتماد با استفاده از MCs و نمونه برداری اهمیت احتمالات شکست را در مناطق مختلف خطر لرزهای، ظرفیت محرکها و سطوح عملکرد لرزهای تخمین زدهاند. این مطالعه نشان داده است که عدمقطعیت در PGA شتاب زمین و سختی طبقه بهطور قابل توجهی بر پاسخ لرزهای تأثیر می گذارد و تأثیر ناچیزی بر حداکثر نیروی کنترل تقاضا دارد. جلالی و شریعتمدار ۲۰۲۳ [۲۰] تحلیل قابلیت اعتماد سازه های کنترل شده با استفاده از یک کنترلر منطق فازی احتمالات را مطالعه نمودند. در این پژوهش شبیه سازی مونت کارلو برای ارزیابی قابلیت اعتماد سازههای یک و چند طبقه با آرایش مختلف تاندونها استفاده شده است.

مساله یپایش سلامت و شناسایی سیستم هم اکنون مرحله ی مطالعات تکمیلی را در جهان طی مینماید و با بهبود دقت روشهای شناسایی، طراحی سیستمهای جاذب انرژی و مستهلک کننده ارتعاشات مطمئن ر و با خطای کم تری صورت خواهد پذیرفت. با الحاق ابزار مانیتورینگ به سازه امکان رصد مستمر وضعیت سازه و ثبت تغییرات در مشخصات دینامیکی آن که می تواند نشانی از آسیب باشد میسر شده و سطح هوشمندسازی سازهها ارتقا یافته است. شناسایی دقیق و پیوسته سیستم سازهای تحت ارتعاشات اجباری یا محیطی می تواند کاربردهای بسیاری در کنار کشف خرابی داشته باشد. یکی از این کاربردها تدقیق و همگامسازی سیستم کنترل ارتعاشات با روشهای شناسایی است. حسگرهای مورد نیاز برای پایش سلامت و کنترل ارتعاشات می توانند ادغام شده و ضمن صرفه جویی در هزینه ی هوشمندسازی سازه، مشکل حضور عدم قطعیتهای موجود در پارامترهای سازه را نیز تا حدی پوشش دهند.

در یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی بازوی مکانیکی با پیوند انعطافیذیر [۲۱] الگوریتم ژنتیک برای شناسایی تابع انتقال و طرح یک کنترلر براساس تابع انتقال شناسایی شده استفاده شده است. بهینهسازی تمام یارامترهای کنترل کننده با کمینهسازی نُرم حلقه بسته ∞H به كمك الگوريتم ژنتيك انجام يافته و در نهايت اثربخشي كنترلر طراحي شده جهت كاهش ارتعاش با استفاده از دو مود سيستم شناسايي شده براساس نتایج آزمایشگاهی تایید شده است. مرادمند و همکاران [۲۲] تلفیقی از روش شناسایی آسیب با کنترل نیمهفعال ارائه دادند. سازهی مجهز به سنسورهای تغییرمکان و سرعت و میراگر MR با پارامترهای دینامیکی مشخص در دسترس بوده و سازهی دیگری با دریافت مقادیر تغییرمکان و سرعت سازهی اولیه در مدت زمان کوتاهی با آن هماهنگ میشود. هدف مساله تعیین سختی، میرایی و نیروی کنترل سازهی ثانویه است تا پاسخ دو سازه با یکدیگر هماهنگ گردد. با نوشتن معادلهی پایداری لیاپانوف و اعمال شرط پایداری، مقادیر سه پارامتر مجهول محاسبه شده و جهت شناسایی آسیب و صدور فرمان کنترلی رصد می شوند. عزیزی و همکاران [۲۳] عملیات کنترل همزمان با شناسایی آسیب را در قالب مسالهی کنترل نیمهفعال با سختی متغیر ارائه دادهاند که سختی میراگر بهصورت لحظهای براساس پارامترهای سازه و بهعبارتی آسیب رخداده تنظیم میشود. نادری و همکاران [۲۴] با در دست داشتن تحریک اعمالی به سازه، مشخصات دینامیکی سازه و پاسخ دریافتی از حسگرها یک روش کنترل تطبیقی مبتنی بر مدل ارائه دادند که اختلاف مدل ریاضی (که دارای نیروی کنترلی متناسب با سختی و میرایی سازه است) و مدل سازهی سالم را از طریق تخمین سختی و میرایی حداقل نماید. نسترویچ و همکاران [۲۵] سیستم شناسایی مدل مبتنی بر زیرفضا و طراحی کنترل کننده ی فعال را بر روی تیر کنسول هوشمند پیزوالکتریک پیادهسازی نمودند. کارایی روش ارائه شده براساس نتایج آزمایشات تایید شده و نشان میدهد کاهش ارتعاشات به میزان بسیار بالایی نه تنها در مقایسه با حالت کنترلنشده، بلکه نسبت به نتایج مطالعات قبلی رخ داده است. الگوریتمهای کنترلی، مانند تخصيص قطب، PID و LQR، با فرض شرايط ايدهآل، معمولاً بر ويژگيهاي ديناميكي اوليه سازههاي سالم تكيه ميكنند. با اين حال، بارهای طبیعی و رخداد آسیبها میتواند این ویژگیها را در طول عمر سازه تغییر دهد و بهطور بالقوه منجر به نیروهای کنترلی نادرست شود. برای پرداختن به این چالش، یک تکنیک شناسایی متناوب مبتنی بر موجک در ترکیب با روش تخصیص قطب [۲۶] معرفی شده است. ابراهیمی و همکاران ۲۰۲۳ [۲۷] چارچوبی برای شناسایی قابها در حضور عدمقطعیتهای اندازه گیری و پارامترها ارائه نمودند. روشهای EKF و UKF^۳ رای ارزیابی معادلات سیستم غیرخطی و تخمین پارامترهای مجهول استفاده شده است. به کمک آنتروپی

¹ Nestorović

² Extended Kalman Filter

³ Unscented Kalman Filter

اطلاعات عدمقطعیت پارامترهای مدل بررسی شده و روشها بر روی یک قاب خمشی ۴ طبقه با عدمقطعیتهای ذاتی ارزیابی شدند. نتایج با همسو برای الگوریتمهای UKF و EKF گزارش شده است. UKF در شناسایی سیستم های غیرخطی، تخمین پارامترهای ناشناخته، بهتر از EKF عمل کرده است.

ایده اصلی این مطالعه استفاده از یک مجموعه حسگر مشترک برای شبکه مانیتورینگ سیستم و کنترل ارتعاشات است. با این عمل میتوان ضمن صرفهجویی در هزینههای هوشمندسازی سازهها با تدقیق روشهای شناسایی، عدمقطعیتهای موجود در پارامترهای سازه را مرتفع نمود و بهطور مستمر مشخصات سازه را تحت ارتعاشات محیطی استخراج کرده و در طرح کنترلر به کار گرفت. دقت کنترل کننده مبتنی بر شناسایی با دقت شناسایی ارتباط مستقیم دارد. در این مطالعه با در نظر گرفتن عدمقطعیتهای موجود در پارامترهای سازه و تحریک خروجی، نخست سیستم کنترل اولیه طراحی شده و در ادامه براساس پاسخهای ثبتشده، سازه با روش زیرفضای تصادفی شناسایی میشود تا کنترلر دیگری بر مبنای شناسایی طراحی گردد. با تعریف تابع خرابی بین پارامترهای دو کنترلر، تخمینی از قابلیتاعتماد سیستم کنترل با شبیهسازی مونت کارلو بهدست میآید. در این راستا ابتدا اصول شناسایی سیستم با روش زیرفضای تصادفی ارائه شده و در ادامه فرآیند استخراج پارامترهای سیستم مرتبه ی دو از معادلات مرتبه ی اول فضای حالت و انتقال سیستم به مختصات فیزیکی مورد بحث قرار می گیرد. در بخش بعد اصول کنترل فعال ارتعاشات سازه با روش زیرفضای تصادفی جهت ارزیابی عملکرد سیستم کنترل مایترهای سیستم مرتبه ی دو از معادلات مرتبه ی اول فضای حالت و انتقال سیستم شناسایی شده به مختصات فیزیکی مورد بحث قرار می گیرد. در بخش بعد اصول کنترل فعال ارتعاشات سازه با روش RAM بیان شده و معیارهای تشکیل میدهد. اتصال دو سیستم شناسایی و کنترل ارتعاشات در ادامه مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت با تعریف یک مدل عددی از تشکیل می دهد. اتصال دو سیستم شناسایی و کنترل ارتعاشات در ادامه مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت با تعریف یک مدل عددی از

۲- شناسایی سیستمهای سازهای

شناسایی؛ تعیین مشخصات دینامیکی سیستم بهویژه فرکانسهای طبیعی، اشکال مودی و نسبتهای میرایی است که عموما براساس اندازه گیریهای مبتنی بر شبکهی حسگرهای پایش سلامت انجام می پذیرد. براساس اطلاعات مودال محاسبه شده می توان وضعیت سلامت، خسارات احتمالی و درجه ایمنی سازه را ارزیابی نمود. ثبت دادههای ارتعاشی سیستم مبنای دسته ای از روشهای شناسایی را شکل می دهد که روشهای خروجی-تنها نامیده می شوند. در این میان استفاده از پاسخ سازه به ارتعاشات محیطی به سبب عدم نیاز به ابزار پیچیده جهت تحریک سازه و عدم توقف سرویس دهی سازه محبوبیت بیش تری یافته است. توسعه ی یک روش خروجی-محور مورت آفلاین علاوه بر کاربردهای شناسایی آسیب می تواند در مسائل مربوط به کنترل ارتعاشات نیز مورد استفاده قرار گیرد. ارتباط میان این دو حوزه از علم دینامیک می تواند در طراحی سیستم کنترل مبتنی بر اطلاعات دریافتی از چهار چوبهای شناسایی برای سازه های موجود که تخمین صحیحی از پارامترهای دینامیکی آنها در دسترس نیست موثر باشد. اگر معادلات دینامیکی حرکت سازه در فضای پیوسته زمانی به صورت رابطهی (۱) بیان شود [۸]، رابطهی (۲) بیان فضای حالت این معادلات است [۹].

$$M_{n\times n}\ddot{X}_{n\times 1}(t) + C_{n\times n}\dot{X}_{n\times 1}(t) + K_{n\times n}X_{n\times 1}(t) = B_{n\times r}U_{r\times 1}(t) + E_{n\times 1}\ddot{x}_{g_{b,1}}(t)$$
(1)

$$\begin{bmatrix} \dot{X}(t) \\ \vdots \\ \dot{X}(t) \\ \dot{Z}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} O & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \\ A_{c} & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X(t) \\ \dot{X}(t) \\ Z(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}B \\ B_{c} \end{bmatrix} U(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}E \\ E_{c} \end{bmatrix} \ddot{x}_{g}(t)$$
(2)

$$\dot{Z}(t) = A_{c}Z(t) + B_{c}U(t) + E_{c}\ddot{x}_{g}(t)$$
(3)

$$\dot{Y}(t) = C_{c}Z(t) + D_{c}U(t)$$
(4)

K, C K Y(t) X(t) X(t) X(t) X(t) Y(t) X(t) Y(t) X(t) X(t) Y(t) X(t) Y(t) Y(t) X(t) Y(t) Y(t) X(t) Y(t) Y

در نمایش فضای حالت سیستم، قطبها ($(p_{1,2})_i)$ برابر مقادیر ویژه ماتریس سیستم هستند و هر دو مقدار فرکانس طبیعی ($(\omega_{d_i})_i)$ و نسبت میرایی (ζ_i) را طبق رابطهی (۳) در خود جای میدهند. جهت پایداری سیستم قطبها باید در مکان مشخصی از دستگاه مختصات مختلط قرار بگیرند. این مکان برای سیستمهای پیوسته در سمت چپ محور مختلط قرار دارد و برای سیستمهای گسسته دایرهای محصات مختطات مختلط قرار بگیرند. این مکان برای سیستمهای پیوسته در سمت چپ محور مختلط قرار دارد و برای سیستمهای گسسته در سمت پی محور مختلط قرار دارد و برای سیستمهای گسسته دایرهای میدهای گسسته به مختصات مختلط قرار بگیرند. این مکان برای سیستمهای پیوسته در سمت چپ محور مختلط قرار دارد و برای سیستمهای گسسته دایرهای محصات مختلط قرار مرای میرای محصات و شعاع واحد است (شکل ۱). نرخ میرایی مودال و فرکانسهای طبیعی میرا شده طبق رابطه (۴) از بخشهای حقیقی (\Re) و موهومی (\Im) قطبهای سازه محاسبه میشوند.



(s-plane) شکل ۱. ناحیهی پایداری در سیستمهای گسسته (z-plane) و پیوسته زمانی (s-plane) Fig. 1. The stability range for discrete (z-plane) and continuous-time (s-plane) systems

$$\omega_{d_i} = \sqrt{(\Re(p_i))^2 + (\Im(p_i))^2}, \ \zeta_i = (\Re(p_i)) / \left(\sqrt{(\Re(p_i))^2 + (\Im(p_i))^2}\right)$$
(f)

هدف از شناسایی، توسعه مدل سیستم براساس پاسخهای آن است. روشهای حوزهی زمان همچون SSI توانایی رصد تغییرات در پاسخ ارتعاشی و استخراج ویژگیهای موثر بر پاسخ را براساس دادههای از پیش ثبتشده دارند و میتوانند یک چهارچوب موثر جهت شناسایی و کاربردهای دیگر نظیر طراحی کنترلرهای ارتعاشی فراهم کنند [۳۰]. در ادامه مبانی روش زیرفضای تصادفی بیان میگردد.

۱-۲- روش زیرفضای تصادفی (SSI)

روش زیرفضای تصادفی یکی از روش های استخراج اطلاعات مودال سازه است و به دنبال راهی برای شناسایی مدل فضای حالت تنها بر مبنای داده های خروجی می باشد. این روش نخستین بار در سال ۱۹۹۶ توسط ون اورشی و همکاران [۳۲, ۳۲] جهت شناسایی ماتریس های سیستم مرتبه اول در فضای حالت ارائه شده است. اساس SSI بر تشکیل ماتریس های مختلف هنکل از پاسخهای برداشت شده از سازه که تعدادی از سطر و ستون های آن حذف یا جابجا گردیده اند، در حوزهی زمان، استوار است. با تشکیل ماتریس های مختلف هنکل از پاسخ های برداشت شده از های سازه که تعدادی از سطر و ستون های آن حذف یا جابجا گردیده اند، در حوزهی زمان، استوار است. با تشکیل ماتریس های هنکل از پاسخ های سازه که تعدادی از سطر و ستون های آن حذف یا جابجا گردیده اند، در حوزهی زمان، استوار است. با تشکیل ماتریس های هنکل از پاسخ مای سازه که تعدادی از سطر و ستون های آن حذف یا جابجا گردیده اند، در حوزهی زمان، استوار است. با تشکیل ماتریس های هنکل از پاسخ می سازه که تعدادی از سطر و ستون های آن حذف یا جابجا گردیده اند، در حوزهی زمان، استوار است. با تشکیل ماتریس های هنگل از پاسخ می سازه، تحقق های مختلف از سیستم شناسایی شده و براساس تئوری اساسی تحقق، کمینه ترین تحقق متناظر با حداقل مرتبه سیستم شناسایی می شود. مطابق تئوری تحقق و اصل تحقق کمینه بی شمار تحقق با پاسخ یکسان وجود دارد و تنها تحقوه ایی می توانند پاسخ مساله باشند که قابل افزار به زیرماتریس و کاهش مرتبه نباشند. مزیت SSI نسبت به روش های دیگر پارامتریک بودن آن است و نیازی به تشخیص شکل مودها و سایر مشخصات مودال طی آنالیز نیست. در سال ۲۰۰۰ پیترز [۳۳] در رسالهی دکتری خود از SSI برای کاربردهای مهندسی عمران بهره گرفته است. نسخهی SSI دی SSI که از کوواریانس های پاسخ زمانی استفاده می کند اکنون توسعه یافته و کوواریانس دوبه دوی تعداد محدودی از پاسخها را محاسبه می کند [۳۳, ۳۳]. مول و همکاران [۳۵] از SSI در شناسایی آسیب سازه ی پل بهره گرفته و کارایی روش پیشنهادی را تحت دو سازیوی خرابی اثبات نمودند.

روشهای شناسایی زیرفضا در شناسایی سیستمهای خطی نامتغیر با زمان کارا میباشند. در این روش لازم است که سیستم به صورت مدلی با چندین مرتبه شناسایی شود؛ تا با استفاده از دیاگرامهای تثبیت کننده بتوان مودهای سازهای واقعی را از مودهای نادرست تشخیص داد. روش پیشنهادی به دلیل استفاده از پارامترهای مارکوف در فرآیند شناسایی سیستم شباهتهای زیادی با الگوریتم تحقق ویژه (ERA)^۱ دارد. SSI عملکرد مناسبی در مهار نویزهای موجود در پاسخهای ثبت شده از خود نشان میدهد و از معایب این روش آن است که برای شناسایی مودهای کامل سازه نیاز به نصب حسگر در تمام درجات آزادی سیستم میباشد. محدودهی خطی برای رفتار سازه، تغییرناپذیری مشخصات دینامیکی سازه با زمان (سیستم LTI) و عدم وجود همبستگی میان پاسخ سازه و نیروهای ورودی سه فرض حاکم بر معادلات روش SSI را شکل میدهند. خروجی SSI، ماتریس سیستم کمینه مستخرج از پارامترهای مارکوف سیستم شامل تمام ماتریسهای جرم، سختی و میرایی است. پاسخ ناشی از ارتعاشات محیطی، تحریکات واداشته یا تحریکات محیطی شدید میتواند بدین منظور به کار گرفته شود.

فرمول بندی روش SSI مبتنی بر معادلات دیفرانسیل مرتبه اول فضای حالت است. با توجه به داده برداری گسسته در مسائل عملی، معادلات به فضای گسسته زمانی نگاشت می شوند. اگر معادلات فضای حالت سیستم پیوسته (رابطه (۲)) گسسته سازی شوند: $Z_{\nu+1} = A_{\mu}Z_{\nu} + B_{\mu}U_{\nu} + w_{\nu}, \qquad Z_{\nu} = Z(k\Delta t)$ (۵)

$$A_d = e^{A_c \Delta t}, \quad B_d = (\int_0^T e^{A_c \tau} d\tau) B_c \tag{9}$$

$$Y_k = C_d Z_k + D_d U_k + v_k \tag{Y}$$

 Z_k ، U_k معرف فرم گسسته ماتریسهای فضای حالت و $\Delta t = T / k$ طول گام زمانی دادهبرداری میباشند. میباشند. Q_d و D_d C_d ، B_d ، A_d و Y_k به ترتیب مقادیر نیروی کنترل، حالتها و خروجیها در گام -1م هستند. ورودیها به سبب ناشناخته بودن بهعنوان نویز فرآیند (Y_k و Y_k) و نویز اندازه گیری (v_k) در معادلات اعمال میشوند. مراحل انجام شناسایی با SSI را میتوان در گامهای زیر خلاصه نمود:

۲. جمع آوری داده ها از شبکه ی حسگرهای پایش سلامت، تشکیل ماتریس هنکل (Y_H) و تقسیم آن به دو بلوک آینده (future) و گذشته (past).

$$Y_{H} = \begin{bmatrix} Y_{Hp} \\ Y_{Hf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{0} & y_{1} & \cdots & y_{s-2i+1} \\ y_{1} & y_{2} & \cdots & y_{s-2i+2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{i} & y_{i+1} & \cdots & y_{s-i} \\ y_{i+1} & y_{i+2} & \cdots & y_{s-i+1} \\ y_{i+2} & y_{i+3} & \cdots & y_{s-i+2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{2i} & y_{2i+1} & \cdots & y_{s} \end{bmatrix}_{2i \times j}^{\uparrow} Y_{H} \left((k-1) \times l + 1 : k \times l, : \right) = Y(:, k : k + j - 1)$$
(A)

۳. انتخاب تعداد سطرهای ماتریس هنکل (2i) توسط کاربر انجام می گیرد و باید به اندازهی کافی بزرگ باشد. تعداد ستونهای ماتریس هنکل (j=s-2i+1) نیز برابر با طول دادهها است.

9. محاسبه ی ماتریس تصویر ^۲ (*O*) که میانگین شرطی از ماتریس بلوکی هنکل گذشته و آینده است.
9.
$$(P_{Hf} | Y_{Hp}) = Y_{Hf} Y_{Hp}^T (Y_{Hp} Y_{Hp}^T)^{-1} Y_{Hp}$$
 (9)
۵. استخراج ماتریس مشاهده پذیری (Γ) از ماتریس تصویر. X_0 حالتهای کالمن در گام زمانی صفر هستند.
0. (1)
۵. استخراج ماتریس مشاهده پذیری (Γ) از ماتریس تصویر. T_0 حالتهای کالمن در گام زمانی صفر هستند.
0. (1)
۵. استخراج ماتریس مشاهده پذیری (Γ) از ماتریس تصویر. T_0 حالتهای کالمن در گام زمانی صفر هستند.
0. (1)
 (1)
 (1)
 (1)
 (1)
 (1)
 (1)
 (1)
 (1)
 $\hat{T} = USV^T$
 $\hat{T} = US^{\frac{1}{2}}$
 \hat{T}
 (1)
 $\hat{T} = US^{\frac{1}{2}}$
 (1)
 (1)
 (1)
 $\hat{T} = US^{\frac{1}{2}}V^T$

¹Eigensystem Realization Algorithm

² Projection

 D_d ماتریسهای محاسبهشده مشاهدهپذیری $\hat{\Gamma}$ و حالتهای کالمن \hat{X}_0 منحصربهفرد نیستند. لذا تحققهای مختلفی از A_d و D_d و ماتریسهای محاسبهشده میکنند.

۲. محاسبه ماتریسهای $A_d = A_d$ و $\hat{D}_d A_d$ به صورت مستقیم و A_d از رابطه $\hat{\Gamma}_d = \hat{\Gamma}_d$ به دست می آید. $\hat{\underline{T}}_d = \hat{\Gamma}$ ماتریسهای ستونی هستند که به ترتیب یک بلوک از پایین و بالای آن حذف شده است. پس از محاسبه ی A_d و D_d در فضای گسسته، مقادیر ویژه و بردارهای ویژه سیستم پیوسته زمانی (با میرایی زیربحرانی) از رابطه زیر محاسبه می گردد.

$$\begin{array}{c} A_d = \Psi_d \Lambda_d \Psi_d \\ A_c = \Psi_c \Lambda_c \Psi_c^{-1} \end{array} \end{array} \& \Psi_c = D_d \Psi_c$$

عناصر قطری Λ_c و Λ_c به ترتیب حاوی مقادیر ویژه در حالت پیوسته و گسستهی زمانی هستند و ماتریسهای Ψ_c و Ψ_d اشکال مودی را دربردارند. روشهای زیرفضا در تخمین فرکانسهای سازه دقت قابل قبولی دارند ولی در شناسایی مقادیر نسبت میرایی قابلیتاعتماد پایینی از خود نشان میدهند. برای شناسایی مرتبه سیستم از نمودار تثبیت (پایداری) استفاده میشود. تعداد فرکانسهایی قابلیتاعتماد پایینی از خود نشان میدهند. برای شناسایی مرتبه سیستم از نمودار تثبیت (پایداری) استفاده میشود. تعداد فرکانسهایی مقادیر نسبت میرایی که در تمام مرتبههای سیستم تکرار شده باشند فرکانسهای سازه بوده و مرتبهی سیستم دو برابر تعداد فرکانسهای شده که در تمام مرتبههای سیستم تکرار شده باشند فرکانسهای سازه بوده و مرتبهی سیستم دو برابر تعداد فرکانسهای شده است. گزینش و انتخاب پارامترهای مناسب روش SSI جهت افزایش دقت نتایج شناسایی در مرجع [76] مورد مطالعه قرار گرفته است. در این پژوهش مشخصات مودال سازه مورد مطالعه با روش زیرفضای تصادفی تعیین شده و با تبدیل سیستم گسسته شناسایی شده به سیستم پیوسته معادل، ماتریسهای دینامیکی سازه استرای می میناسی تعلیم می مربع و با تبدیل سیستم می مربع این می مربع و برابر تعداد می مربع می مربع.

۳- گسستهسازی سیستمهای پیوستهی زمانی

(14)

توسعه تکنولوژی دیجیتال در چند دهه اخیر عملکرد سیستمها را با مزایای بسیاری مواجه کرده است. از جمله مزایای سیستمهای دیجیتال در برابر کنترلهای آنالوگ میتوان به ارتقای عملکرد، انعطاف پذیری بهبودیافته و توانایی مانیتورینگ سیستم اشاره کرد. شیه^۱ و همکاران [۳۷] روشهایی را برای تبدیل مدل فضای حالت زمان پیوسته به مدل فضای حالت زمان گسسته ارائه نمودند. در این مطالعه یک روش مبتنی بر سری هندسی بهبودیافته برای تبدیل مدل پیوسته به مدل گسسته معادل ارائه شده است و با روشهای برش مستقیم و کسر مسلسل ماتریسی مورد مقایسه قرار گرفته است.

روشهای تبدیل با هدف نگاشت فضای پایدار در حالت پیوسته به فضای پایدار حالت گسسته فرمول بندی می شوند. روش تاستین به عنوان پرکاربردترین روش گسسته سازی به ویژه در مباحث کنترل و شناسایی سیستم می باشد؛ زیرا سیستم گسسته سازی شده با این روش تا فرکانسهای بالاتری رفتار مشابه تابع پیوسته از خود نشان می دهد. این روش نیم صفحهی سمت چپ صفحه لاپلاس (s-plane) را به درون دایره ی واحد در فضای مختلط (z-plane) نگاشت می کند. تفاضل مستقیم و معکوس نیز دو روش گسسته سازی هستند که اصول آنها مشابه یکدیگر و براساس اصل انتگرال گیری است. روش تفاضل مستقیم یا اولر ممکن است در برخی سیستم باعث ناپایداری شود و روش تفاضل معکوس در فرکانسهای پایین کاربردی است و تمام فضای پایدار را در اختیار سیستم قرار نمی دهد (شکل ۲). به همین دلیل این دو روش آمروزه برای گسته سازی از محبوبیت کمتری برخوردارند. جدول ۱ روابط تبدیل سیستم پیوسته به گسسته را با روشهای مختلف ارائه می دهد.



¹ Shieh

شکل ۲. نگاشت ناحیهی پایداری فضای پیوستهی زمانی به فضای گسسته با روشهای مختلف گسستهسازی Fig. 2. Mapping continuous-time to discrete-time stable region using various discretization methods

d	iscretization methods	stem parameters using	various
تاستين (تقريب دوخطی)	تفاضل معكوس	تفاضل مستقيم (اولر)	ماتريس
$(I - A_c T_s / 2)^{-1} (I + A_c T_s / 2)$	$(I + A_c T_s)^{-1}$	$I + A_c T_s$	A_d
$(I - A_c T_s / 2)^{-1} B_c T_s$	$(I + A_c T_s)^{-1} B_c T_s$	$B_c T_s$	B _d
$C_c \left(I - A_c T_s / 2\right)^{-1}$	$C_c \left(I + A_c T_s\right)^{-1}$	C_{c}	C_d
$D_{c} + C_{c} (I - A_{c}T_{s} / 2)^{-1} B_{c}T_{s} / 2$	$D_c + C_c \left(I + A_c T_s\right)^{-1} B_c T_s$	D_c	D_d

جدول ۱. ارتباط میان پارامترهای سیستم گسسته و پیوسته زمانی براساس روشهای مختلف گسستهسازی Table 1. The relationship between the continuous- and discrete-time system parameters using various discretization methods

بنابراین میتوان گفت نحوه گسسته سازی سیستم پیوسته یا دستیابی به سیستم پیوسته پس از شناسایی سیستم گسسته به ویژه زمان کار با سیستمهای دیجیتال بسیار موثر میباشد. با توجه به شکل ۲ برای تبدیل سیستم زمان پیوسته به زمان گسسته و بالعکس تقریب تاستین گزینه مناسبی است؛ زیرا دقت مناسبی ارائه میکند. لذا در این مطالعه پس از شناسایی ماتریس سیستم گسسته از روش تاستین برای محاسبهی ماتریس سیستم پیوسته جهت کاربرد در اهداف کنترل سازه استفاده می شود.

۴- استخراج ماتریسهای مشخصات دینامیکی سازه از ماتریسهای فضای حالت

در مدل فضای حالت دادههای ورودی و خروجی از طریق یک دسته کمیت واسطه به نام حالتهای سیستم بههم مرتبط می گردند. درصورتی که حالتهای سیستم مشتمل بر تغییرمکانها و سرعتهای درجات آزادی مختلف باشد، مدل فضای حالت تشکیل شده، مدل فضای حالت در مختصات فیزیکی نامیده می شود و المان های این مدل از ماتریس های جرم، سختی و میرایی که با روابط نسبتا ساده جبري با هم در ارتباط هستند، تشكيل مي گردد. اما در حالت كلي بردار حالت بدون اينكه روابط ورودي-خروجي را تحتالشعاع قرار دهد می تواند در هر سیستم مختصات دلخواهی بیان شود. این مساله در هنگام شناسایی سیستم رخ میدهد. تحقق فضای حالت شناسایی شده لزوما در مختصات فیزیکی مساله نبوده و مدل شناسایی شده اغلب سیستمی در مختصات تبدیلیافته را ارائه میدهد که ماتریس های مشخصات سازه در حالت پیچیدهای درهمتنیده شدهاند. در این حالت جهت دستیابی به پارامترهای فیزیکی سیستم، نخست باید مدل فضای حالت به مختصات فیزیکی معنی دار انتقال یابد. اغلب روشهای موجود در این زمینه برای دسترسی به مختصات فیزیکی از حل مسالهی مقدار ویژه بهره می گیرند. بنابراین یافتن راهکاری که بهصورت خطی و مستقیم نیل به این هدف را تسهیل نماید و حل غیرخطی مساله مقدار ویژه را از فرآیند محاسبات حذف نماید مطلوب است. در صورت استفاده از نتایج روشهای شناسایی سیستم، مسالهی دستیابی به ماتریسهای دینامیکی در دو گام انجام می پذیرد؛ ابتدا ماتریسهای فضای حالت به مختصات فیزیکی انتقال داده میشوند و سپس مشخصات دینامیکی از ماتریسهای سیستم در مختصات فیزیکی استخراج میگردند. کُه^۱ و همکاران و فان و لانگمن^۲ [۳۹, ۳۹] یک راهحل خطی برای مسالهی استخراج ماتریسهای جرم، سختی و میرایی یک سیستم از مدل فضای حالت آن ارائه دادند که برخلاف رویکردهای غیرخطی موجود، به حل مسالهی مقدار ویژه نیاز ندارد. راهکار خطی ارائه شده از ضرب کرونکر و عملگر Stack بهره می گیرد و طی فرآیندی دو مرحلهای ابتدا ماتریس تبدیلی محاسبه می شود تا مدل فضای حالت را از مختصات دلخواه به مختصات فیزیکی مساله ببرد و سپس در گام بعدی پارامترهای فیزیکی سیستم را از مدل فضای حالت در مختصات فیزیکی استخراج نماید. جهت . یکتایی یاسخ به دست آمده نیاز است تمام درجات آزادی به سنسور مجهز باشند و هر ترکیبی از اندازه گیری تغییرمکان، سرعت و شتاب می تواند مورد استفاده قرار گیرد. اگر سنسورهای تغییرمکان، سرعت و شتاب در تمام درجات آزادی مستقر باشند، رابطهی (۱۵) معرف خروجیها خواهد بود. در مختصات فیزیکی، ماتریسهای C_{p} و C_{v} (ماتریس ضرایب مربوط به اندازه گیری یاسخهای تغییرمکان

¹ Koh

² Phan and Longman

، سرعت و شتاب) معلوم بوده و طبق تئوری کنترل مدرن معادلات فضای حالت سیستم به شکل رابطه (۱۶) می باشد که شکل مناسب ماتریسهای C_c و D_c بسته به نوع حسگرها اختیار می شود.

$$y(t) = \begin{bmatrix} C_p X(t) \\ C_v \dot{X}(t) \\ C_a \ddot{X}(t) \end{bmatrix}$$
(1 Δ)

$$\dot{Z}(t) = A_{c_{2m\times 2n}} Z_{2n\times 1}(t) + B_{c_{2m\times n}} U(t)$$

$$y(t) = C_{c_{m\times 2n}} Z(t) + D_{c_{m\times n}} U(t)$$
(19)

در حالت در دسترس بودن کامل مجموعه ی تغییرمکان ها، سرعت ها و شتاب ها به ترتیب داریم:

$$C_{c} = \begin{bmatrix} C_{p} & 0_{n \times n} \end{bmatrix}, \quad D_{c} = 0_{n \times r}$$

$$C_{c} = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & C_{v} \end{bmatrix}, \quad D_{c} = 0_{n \times r}$$

$$(1 \wedge)$$

$$C_{c} = [-M^{-1}K \quad -M^{-1}C], \quad D_{c} = C_{a}M^{-1}B$$
(19)

در حالت کلی بردار خروجی y(t) ترکیبی از اندازه گیریهای تغییرمکان، سرعت و شتاب سازه است. معادلات فوق در حالت پیوسته تشکیل یافتهاند. اما در مسالهی شناسایی با دادههای گسسته سروکار داریم. لذا معادلات فضای حالت گسسته باید توسعه یابند: $Z_{k+1} = A_d Z_k + B_d U_k, \quad k = 0, 1, 2, \dots$

$$y_k = C_d Z_k + D_d U_k$$

پارامترهای استفاده شده در رابطهی (۲۰) پیشتر در روابط (۵) تا (۲) معرفی شدهاند.

با توجه به این که نمایش فضای حالت یک سیستم یکتا نیست، پس از شناسایی مدل فضای حالت در فرم گسسته و تبدیل آن به فرم پیوسته، مدل فضای حالت حاصل غالبا در مختصات فیزیکی نخواهد بود. در صورت تبدیل مختصات با ماتریس تبدیل معکوسپذیر $(A \sim D)_r$ رابطهی زیر بین ماتریسهای فضای حالت در دو مختصات فیزیکی (ماتریسهای $(A \sim D)_c$) و تبدیل یافته (ماتریسهای T) برقرار است.

$$\underbrace{(A_c, B_c, C_c, D_c)}_{Physical Coordinates} \rightleftharpoons \underbrace{(A_r, B_r, C_r, D_r) = (TA_c T^{-1}, TB_c, C_c T^{-1}, D_c)}_{Arbitrary Coordinates}$$
(71)

براساس مقادیر A_c و K ار (رابطه (۲))، استخراج پارامترهای فیزیکی بهدست آوردن ماتریسهای M، C و K از مجموعه معادلات (۲۲) تا (۲۴) است:

 $X^* = M^{-1}K$ (۲۲) $Y^* = M^{-1}C$ (۳۳) $Z^* = M^{-1}B$ (24) بخشهایی از ماتریسهای A_c و B_c بوده و معلوم هستند. B نیز موقعیت محرکها را نمایش میدهد و جزو X^st X^st

معلومات مساله است. اگر سیستم به مجموعه ی کاملی از حسگرها مجهز باشد، B مربعی بوده و رتبه ی کامل دارد؛ لذا:

(۲۵) (79) (۲۷)

و داريم:

$$M = BZ^{-1}$$
$$K = BZ^{-1}X^*$$
$$C = BZ^{-1}Y^*$$

درصورتی که مجموعه ی سنسورها کامل نباشد، مجموعه معادلات فوق به تنهایی کافی نبوده و شرایط تقارن ماتریسهای سازه نقش مهمی ایفا خواهد کرد. به کمک عملگر Stack [۴۰] (رابطه (۲۸))، رابطهی (۲۹) برای هر ماتریس P، S و R با ابعاد سازگار برقرار است

$$\begin{pmatrix} \Theta = \begin{bmatrix} \theta_{11} & \cdots & \theta_{1r} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \theta_{\rho 1} & \cdots & \theta_{\rho r} \end{bmatrix}_{\rho \times \tau} \end{pmatrix}^{s} = \Theta(:) = \left(\begin{bmatrix} \theta_{11} & \cdots & \theta_{1r} & \cdots & \theta_{\rho 1} & \cdots & \theta_{\rho r} \end{bmatrix}^{T} \right)_{\rho \tau \times 1}$$

$$(PSR)^{s} = (R^{T} \otimes P)S^{s}$$

$$(\Upsilon A)$$

$$K^{s} = (X^{*^{T}} \otimes I)M^{s}$$

$$C^{s} = (Y^{*^{T}} \otimes I)M^{s}$$

$$B^{s} = (Z^{*^{T}} \otimes I)M^{s}$$

$$(X^{*^{T}} \otimes I)M^{s} = (I \otimes X^{*^{T}})M^{s}$$

$$(Y^{*^{T}} \otimes I)M^{s} = (I \otimes Y^{*^{T}})M^{s}$$

$$(Y^{*^{T}} \otimes I)M^{s} = (I \otimes Y^{*^{T}})M^{s}$$

ک عملگر ضرب خارجی دو ماتریس و $I_{n imes n}$ ماتریس یکه بوده و معادلات فوق در رابطه (۳۱) قابل ادغاماند. ماتریس P'' شرایط \otimes تقارن ماتریس میرایی C را در خود دارد و اگر ماتریس میرایی متقارن نباشد سطر آخر P'' و P''' باید از معادلات کنار گذاشته شود.

$$P'P'' = P''' \to P' = \begin{bmatrix} X^* \otimes I & 0 & -I \\ Y^{*^T} \otimes I & -I & 0 \\ Z^{*^T} \otimes I & 0 & 0 \\ (X^{*^T} \otimes I) - (I \otimes X^{*^T}) & 0 & 0 \\ (Y^{*^T} \otimes I) - (I \otimes Y^{*^T}) & 0 & 0 \end{bmatrix}, P'' = \begin{bmatrix} M^s \\ C^s \\ K^s \end{bmatrix}, P''' = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B^s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$
(7)

۱-۴- انتقال مدل فضای حالت شناسایی شده به مختصات فیزیکی

در این بخش در مورد شرایطی که اندازه گیریهای تغییرمکان در دسترس باشند سخن گفته میشود. جزئیات بیشتر برای دیگر حالتها را می توان در مراجع (۳۹, ۴۱, ۴۲] یافت. با فرض داشتن مجموعهی کامل از اندازه گیری های تغییر مکان ($C_n = I_{n imes n}$): $C_c = [C_p = I_{n \times n} \quad 0_{n \times n}], \quad D_c = 0_{n \times r}$ (٣٢) (A^*, B^*, C^*) می توان گفت اگر رتبه کمک ماتریس Q به تحقق (A_r, B_r, C_r) از سیستم اصلی می تواند به کمک ماتریس Q به C_r تبدیل شود که: $A^* = OA_{\bullet}O^{-1}$ (۳۳) $B^* = Q(B_r)$ (۳۴) $C^* = (C_r)Q^{-1} = [I_{n \times n} \quad 0_{n \times n}] = C_c$ (۳۵) ماتریس تبدیل مشابهت Q برابر است با $Q = \begin{bmatrix} C_r & Q \end{bmatrix}^T$. که \overline{Q} ماتریسی دلخواه است بهطوری که Q^{-1} موجود باشد. با این تبدیل به فرم مطلوب تبدیل شده اما A^* و B^* به مختصات فیزیکی انتقال نمی یابند. لذا انتقال ثانویه ای نظیر T نیاز است که C^* را تغییر C^* ندهد ولی $A_c\,$ را به مختصات فیزیکی ببرد. $A_c = TA^*T^{-1}$ (36) $B_c = T(B^*)$ (۳۷) $C = (C^*)T^{-1}$ (۳۸) روابط (۳۶) تا (۳۸) الزام Z^* و X^* ، X^* و این تبدیل تبدیل T ضروری مینماید. پس از این تبدیل T، T و T = $(A^*)_{11} (A^*)_{12}$ که بخشهای مختلف ماتریسهای A_c و B_c هستند و ماتریسهای جرم، سختی و میرایی محاسبه خواهند شد. شکل ۳ روند کلی استخراج ماتریسهای سیستم در مختصات فیزیکی از تحقق فضای حالت شناسایی شده در شرایط دسترسی کامل به اندازهگیریهای تغییرمکان را نمایش میدهد.



اندازهگیریهای تغییرمکان

Fig. 3. The process of extracting system matrices in physical coordinates from identified state-space realizations under the assumption of complete access to displacement measurements

۵- کنترل ارتعاشات سازه

(٣٩)

ایده استفاده از سیستمهای کنترل پسخوراندی برای سازههای مهندسی عمران اولین بار توسط یائو در سال ۱۹۷۲ مطرح گردید. اساسیترین مساله در تئوری سیستمهای کنترل پسخوراندی، پایداری است تا ضامن عدم واگرایی خروجی سیستم باشد. در این مطالعه جهت جلوگیری از ناپایداری سیستم، تبدیل سیستم گسستهی شناساییشده به سیستم پیوستهی معادل با روش تاستین انجام مییابد. بدیهی است که برای نیل به این هدف بایستی خروجی در هر لحظه اندازه گیری شود که نیازمند شبکهای از حسگرها میباشد. در این مطالعه جهت اهداف کنترل از شبکه حسگرهایی استفاده میشود که برای اهداف پایش سلامت در سازه مستقر شدهاند.

-۵- پاسخ دینامیکی سازه به تحریک خارجی

اگر فرم ماتریسی معادلهی دینامیکی حرکت سازه مجهز به تجهیزات کنترل فعال بهصورت رابطهی (۱) باشد، ماتریس جرم یک قاب برشی براساس جرم طبقات (m_i) از رابطه (۳۹) و ماتریسهای سختی و میرایی آن براساس سختی و میرایی طبقات ((k,c)) از رابطه (۴۰) محاسبه میشوند:

 $M = diag([m_i])$

	$\gamma_i + \gamma_{i+1}$	$i = j \neq n$	
– –	γ_n	i = j = n	
$\Upsilon = \Upsilon_{ii} $	$\Upsilon_{ij} = \begin{cases} -\gamma_i \end{cases}$	i - j = 1	(4.)
$\Gamma = K \text{ or } C$	$-\gamma_{i+1}$	j - i = 1	
$\gamma = \kappa \text{ or } c$	L O	else	

تبدیل با استفاده از بردار حالت T[X, X] = Z معادلات حرکت مرتبهی دوم را به فرم مرتبهی اول فضای حالت تبدیل می کند [۴۳]. این انتقال روند حل معادلات حرکت را سادهتر می نماید، اما تعداد مجهولات معادله را دو برابر می سازد. معادلات فضای حالت به طور مستقیم قابل حل نیستند؛ زیرا به ازای ۲۱ معادله، ۲۰۰۲ مجهول وجود دارد که r تعداد محرکها می باشد. r معادله ی اضافی مورد نیاز قانون کنترل پسخور نامیده می شوند. در کنترل بهینه ثابت می شود که می توان با مینیم کردن یک شاخص مرتبهی دوم، نیروی کنترل بهینه را با رابطه ای خطی از حالتهای سیستم به دست آورد. الگوریتم LQR از پر کاربردترین روش های کنترل فعال سازه می باشد که در آن شاخص عملکرد مرتبه دوم I به عنوان نماد انرژی سیستم کمینه می شود (رابطهی (۴۱)). با اتخاذ قانون کنترل فیدبک،

$$J = \int_{t_0}^{t_f} (Z^T \tilde{Q} Z + U^T \tilde{R} U) dt$$

$$U(t)_{n\times 1} = -K_{G_{n\times 2n}} Z_{2n\times 1}(t) = -\left[\Delta K_{n\times n} \Delta C_{n\times n}\right] \underbrace{\left[\begin{matrix} X(t)_{n\times 1} \\ \dot{X}(t)_{n\times 1} \end{matrix}\right]_{2n\times 1}}_{Z(t)}$$
(f7)

در رابطهی (۴۱)، \tilde{Q} و \tilde{R} به ترتیب ماتریس های وزنی مربوط به پاسخها و نیروهای کنترلی هستند و اهمیت نسبی کاهش پاسخ یا نیروی کنترل را نمایش میدهند. در عمل انتخاب ماتریس های وزنی به کمک سعی و خطا و به کمک تجربهی طراح صورت می گیرد. \tilde{Q} ماتریس وزنی مربعی مثبت نیمهمعین ($0 \leq (\tilde{Q})$) با بعد 2n (تعداد حالات سیستم) و \tilde{R} ماتریس وزنی مربعی مثبت معین () $\det(\tilde{Q})$ ماتریس وزنی مربعی مثبت معین () \tilde{Q} (\tilde{R}) با بعد 2n (تعداد حالات سیستم) و \tilde{R} ماتریس وزنی مربعی مثبت معین () \tilde{Q} (\tilde{R}) ماتریس وزنی مربعی مثبت معین () ماتر \tilde{Q} ماتریس وزنی مربعی مثبت معین () ماتریس وزنی مربعی مثبت معین () ماتریس وزنی مربعی مثبت معین () معرف () ماتریس وزنی مربعی مثبت معین () معرف () ماتریس وزنی مربعی مثبت معین () معرف () معرف () ماتریس وزنی مربعی مثبت معین () معرف () م

$$A_c^T P + PA_c - PB_c \tilde{R}^{-1} B_c^T P + \tilde{Q} = -\dot{P}(t)$$

 $K_{C} = \tilde{R}^{-1} B_{a}^{T} P$

۵-۲- ارزیابی عملکرد کنترلر

(44)

بهمنظور ارزیابی عملکرد سیستم کنترلی، مجموعهای از شاخصهای عملکرد بنچمارک برای مقایسهی پاسخهای کنترلشده و کنترل نشده براساس ماکزیمم و نُرم پاسخها تعریف شدهاند [۴۴]. فرمولهای محاسبهی این شاخصها در جدول ۲ ارائه شده است.

Table 2. Formulas for benchmark performance indexes								
برش پايە	شتاب سازه	تغييرمكان سازه	نسبت دريفت بين طبقهاي					
$J_4 = \frac{\max_{t} \left \sum_{i} m_i \ddot{x}_{ai}^c(t) \right }{\max_{t} \left \sum_{i} m_i \ddot{x}_{ai}^{uc}(t) \right }$	$J_{3} = \frac{\max_{t,i} \left \ddot{x}_{ai}^{c}(t) \right }{\max_{t,i} \left \ddot{x}_{ai}^{uc}(t) \right }$	$J_{2} = \frac{\max_{t,i} x_{i}^{c}(t) }{\max_{t,i} x_{i}^{uc}(t) }$	$J_{1} = \frac{\max_{t,i} \left(\left d_{i}^{c}(t) \right / h_{i} \right)}{\max_{t,i} \left(\left d_{i}^{uc}(t) \right / h_{i} \right)}$					
RMS برش پایه	RMS شتاب سازه	RMS تغييرمكان سازه	RMS دريفت بين طبقهاي					
$J_8 = \frac{\max_{t} \left\ \sum_{i} m_i \ddot{x}_{ai}^c(t) \right\ }{\max_{t} \left\ \sum_{i} m_i \ddot{x}_{ai}^{uc}(t) \right\ }$	${J_7} = \frac{{\max _{t,i} {\left\ {{\ddot x}_{ai}^c\left(t \right)} \right\ }}}{{\max _{t,i} {\left\ {{\ddot x}_{ai}^{uc}\left(t \right)} \right\ }}}$	$\boldsymbol{J}_{6} = \frac{\max_{t,i} \left\ \boldsymbol{x}_{i}^{c}(t) \right\ }{\max_{t,i} \left\ \boldsymbol{x}_{i}^{uc}(t) \right\ }$	$J_{5} = \frac{\max_{t,i} \left(\left\ d_{i}^{c}(t) \right\ / h_{i} \right)}{\max_{t,i} \left(\left\ d_{i}^{uc}(t) \right\ / h_{i} \right)}$					

جدول ۲. فرمول های محاسبه ی شاخص های بنچمارک ماه مند محسوما معمل محمد ماه محمد محسوما ک

مستند و حروف c و ur به ترتیب دریفت، ارتفاع، تغییرمکان، شتاب و جرم طبقهی i ام هستند و حروف c و ur به حالت $\dot{X}_i(t)$, \dot

۶- شبیهسازی مونت کارلو (MCS)

مبانی روش مونت کارلو برای نخستین بار در سال ۱۹۴۹ توسط نیومن و اولام ارائه شد. بهره گیری از قابلیتهای این روش جهت مطالعه احتمالاتی مسائل تحلیل سازه با ظهور رایانههای دیجیتال بهصورت یک روش پر کاربرد رواج یافت و به سرعت پیشرفت کرد. فرآیند شبیهسازی توسط مونت کارلو را میتوان در قالب مراحل زیر انجام داد:

۱. تعریف مساله شامل تعیین متغیرهای تصادفی دارای عدمقطعیت و تفکیک آنها از پارامترهای قطعی و تعریف تابع حالت حدی $g(X_1, X_2, ..., X_{n'}) = 0$ بر مبنای این دو گروه متغیرها $0 = (n_v)$ و قطعی میباشد.

۲. در نظر گرفتن اطلاعات توزیع آماری لازم برای متغیرهای تصادفی.
۳. تعیین تعداد نمونههای شبیه سازی شده از معادله ی حالت حدی مطابق فرمول تقریبی
$$P_f / 100 \approx N$$
.
۴. تولید j نمونه تصادفی از n_v متغیر تصادفی (I_v, I_v) براساس توزیع احتمالاتی مشخص.
۵. انجام محاسبات شبیه سازی برای هر مجموعه از مقادیر تصادفی تولید شده.
۶. تجمیع نتایج و محاسبه آماره های میانگین، واریانس و دیگر کمیتهای آماری و تعیین توزیع های آماری برای نتایج شبیه سازی.
۷. شمارش تعداد عبور مقادیر تابع حدی از صفر (N_f). N مبین تعداد آزمون های آماری است که $g = g$ نقض گردیده است.
۹. محاسبهی احتمال خرابی تخمینی مطابق فرمول N_f / N مبین تعداد آزمون های آماری است که $g = g$ نقض گردیده است.
۹. ارزیابی دقت تخمین به دست آمده با تکنیکهای ارزیابی. اگر $P_f \approx N_f / N$ میاند، دقت احتمال تخمین زده شده (\hat{P}_f) (میانگین (\hat{P}_f)) (میانگین (\hat{P}_f)) معایر (\hat{P}_f) میاند (\hat{P}_f)) میانگین (\hat{P}_f) (میانگین (\hat{P}_f)) معایر است با (\hat{P}_f)) میانگین (\hat{P}_f) (میانگین (\hat{P}_f)) انحراف معیار (\hat{P}_f) و ضریب تغییرات (\hat{P}_f)) برابر است با ([\hat{P}_f]))

$$\mu_{\hat{P}_f} = P_{true}, \qquad \sigma_{\hat{P}_f} = \sqrt{\frac{P_{true}(1 - P_{true})}{N}}, \qquad V_{\hat{P}_f} = \sqrt{\frac{1 - P_{true}}{P_{true}N}}$$
(fd)

۱۰. تکرار مراحل ۳ تا ۹ با مقادیر j متفاوت تا زمان دستیابی به دقت تخمین قابل فبول و مطلوب.

۷- کنترل ارتعاشات سازه مبتنی بر شناسایی سیستم

۸- مدلسازی

مدل سازی، تحلیل سازه، تولید نمونه های تصادفی برای شبیه سازی مونت کارلو، شناسایی سیستم و کنترل ارتعاشات در نرم افزار متلب انجام شده است. در مرحله ی مدل سازی ابتدا مدل المان محدود سازه ی اصلی تشکیل شده و برای تشکیل مدل های تصادفی روش مونت کارلو (۱۲۰۰ مدل) تابع چگالی احتمال مناسب به پارامتر های دینامیکی سازه اختصاص می یابد. در ادامه این سازه ها بر اساس پاسخ شان به نویزهای سفید گاوسی تصادفی شناسایی شده و ارتعاشات هر دو گروه تحت تحریک زلزله ال سنترو مورد کنترل قرار می گیرد. در ادامه مشخصات سازه ی و تحریکات مورد استفاده معرفی می گردند.

۸-۱- قاب برشی دوبعدی مورد مطالعه

سازه مورد مطالعه قاب برشی ۱۱ درجه آزادی با مشخصات دینامیکی مندرج در جدول ۳ است [۴۶]. مشخصات مودال سازه در . جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۳. مشخصات دینامیکی سازهی ۱۱ درجه ازادی (TIDOF)								
Table 3. Dynamic properties of studied 11-DoF shear frame structure								
سختی طبقه (kN/m)	جرم طبقه (kg)	طبقه						
۴/۶۸×۱۰ ^۵	T10TV.	١						
۴/V۶×1۰ ^۵	7.140.	٢						
۴/۶۸×۱۰ ^۵	7.140.	٣						
$f/\Delta \times 1 \cdot \Delta$	798.	8-4						
۴/۵×۱۰۵	2.214.	γ						
۴/۳۷×۱۰ ^۵	7.791.	Α-Ρ						
۶/۳×۱۰ ^۵ ۱۷۶۱۰۰ ۱۰								
۳/۱۲×۱۰۵	8873.	11						

جدول ۴. مشخصات مودال سازهی ۱۱ درجه آزادی (11-DoF) Table 4. Modal characteristics of studied 11-DoF shear frame structure

قطب (s ⁻¹)	فرکانس طبیعی (rad/s)	نسبت میرایی (%)	فرکانس (Hz)	زمان تناوب (s)	شماره مود
- ι/λγδλ±٩٣/γγγδi	937/7913	•/•٢	14/9774	۰/ λ ٩λ۶	١
-1/1441±97/•1447i	٩٢/١٠٢٨	•/• ٢	14/8018	•/٣•۴٧	٢
-1/VV·V±AA/Q197i	۸۸/۵۳۶۹	•/• ٢	14/•911	•/\\Y\	٣
-1/80·8±25/0158i	11/2211	• / • ٢	13/1349	•/١٣٧١	۴
-1/2·88±82/8141i	ν۵/۳۲۹λ	·1·X	11/9891	•/11•۴	۵
-1/8841±88/8988i	<i>۶۶</i> /۷۰۶۹	•/•٢	1./8181	•/•945	۶
-1/1881±08/8919i	۵۶/۹۰۳۳	•/• ٢	9/+ 084	•/• ٨٣۴	٧
-•/9188±40/22•2i	40/8212	•/•٢	٧/٢٩۴٠	•/•Y&N	٨
-•/&VIV±TT/QVVTi	۳۳/۵۸۳۹	•/•٢	۵/۳۴۵۰	•/•Y\•	٩
-•/۴١٢۴±٢•/۶١٨۴i	2018220	•/•٢	٣/٢٨٢٢	·/·۶۸۲	۱.
-•/١٣٩٨± ۶/٩٩•۵i	8/9919	•/•٢	1/1178	•/•۶٧•	11

نسبت میرایی برای تمامی مودها برابر $\chi = 2$ در نظر گرفته می شود. پریود اصلی سازه برابر 0.898 است. برای اهداف شناسایی سیستم از نویز سفید گاوسی با میانگین صفر و انحراف معیار یک استفاده شده است. تاریخچه زمانی یک نمونه از ۱۲۰۰ نویز سفید تولیدشده در شکل ۴ ارائه شده است.







شکل ۵. الف. تاریخچه زمانی، ب. محتوای فرکانسی زلزله السنترو ۱۹۴۰ (PGA=3.41m/s²) Fig. 5. The a. time history, b. frequency content of El Centro 1940 earthquake acceleration (PGA= 3.41m/s²)

جدول ۵. مشخصات زلزلهی السنترو؛ تحریک مورد استفاده در بخش طراحی کنترلر Table 5. Input Earthquake (El Centro 1940) parameters; the excitation used in controller design section							
PGA	زمان نمونهبرداری	عمق	بزرگی	مدت زمان	تاريخ رخداد	منطقه تاثير	
۰/۳۵g	•/•)	۱۵ کیلومتر	۲/۱ M s	۵۳/۷۳ ثانیه	۱۹ مه ۱۹۴۰	آمريكا	

جهت دستیابی به یک دید کلی از دقت شناسایی، به عنوان نمونه مشخصات سازهی اصلی براساس پاسخ تغییرمکان سازه، شناسایی شده و نتایج و خطای شناسایی در جدول ۶ گزارش شده است. مطابق نتایج دقت شناسایی فرکانسهای سازه بالا بوده و نسبتهای میرایی با خطای بیشتری شناسایی شدهاند. در مرحلهی شناسایی مرتبهی سیستم بدون استفاده از نمودار تثبیت و مساوی دو برابر تعداد درجات آزادی قاب برشی (2n) و تعداد سطرهای ماتریس بلوکی هنکل برابر (4n) در نظر گرفته شده است.

جدول ۶. نتایج شناسایی سازه مورد مطالعه براساس پاسخ تغییرمکان آن به تحریک نویز سفید گاوسی تولیدشده با روش زیرفضای تصادفی Table 6. Identified structural properties based on displacement responses to generated GWN by SSI

قطبهای سیستم شناسایی شده (s ⁻¹)	قطبهای سیستم اصلی (S ⁻¹)	خطای شناسایی نسبت میرایی (%)	نسبت میرایی شناساییشده (%)	خطای شناسایی فرکانس (%)	، فرکانس شناسایی شده (Hz)	سیگنال شماره ورودی مود
-•/\lty \pm ۶/٩١٩٧i	- 1/λγδλ±٩٣/γγγδί	۳۲/۷۰	•/•785	١	14/1479	Y
-•/2919 ±2•/8221i	-1/1441±97/•1447i	۲٩/۲۰	•/•141	•	14/7739	٢
-•/24•1 ±37/2921i	-1/VV•V±AA/&197i	۱۵/۲۰	•/• \ \ •	•	١٣/٩٨٩٠	۳
-•/951X ±40/9•88i	-1/80.8±28/0188i	•/۴•	• / • 7 • 1	٠/٢	١٣/٠٧٩٢	لا ب
-1/1·LV $\pm \Delta \beta/9$ 36/1	-1/2·89±82/8141i	۲/۷۰	٠/٠١٩۵	• / ١	17/•797	े न
-1/392. ±88/2014i	-1/8841±88/8988i	۴/۵۰	٠/٠٢٠٩	٠/٢	1./847.	کے تع بر
-1/λ۴٩۶ ±γ۵/۵۶γιi	-1/131±08/2919i	22/4.	•/• ٣۴۵	۰/٣	٩/•۶۳۵	Y J
-1/VQ8Q ±25/18.1i	-•/9188±40/27•2i	۶/٩٠	./.714	٠/۴	۷/۳۰۷۷	<u>۸</u>

-1/V18V ±&V/&V&9i	-•/&nnt=mm/2nnti	۲/۳۰	٠/٠١٩۵	• /Y	۵/۳۴۷۷	٩
-1/1982 \pm 92/1.088 \pm 92/1.088 \pm	-•/۴١٢۴±٢•/۶١٨۴i	٠/۴٠	• / • ۲ • ١	• / ٨	٣/٢٨٣٠	١٠
-1/0017 ±98/7794i	-•/١٣٩٨± ۶/٩٩•۵i	۱۶/٩٠	•/• \۶۶	• /۵	١/١٠١٧	11

شکل ۶ مقایسهای میان اشکال مودی سیستم اصلی و شناساییشده است و شکل ۷ نمودار MAC دوبعدی و سهبعدی تشکیلیافته از اشکال مودی دو سیستم بوده که همبستگی مناسبی بین شکلهای مودی دو سیستم را نمایش میدهد.



Fig. 6. The modeshapes of the identified and original system

مطابق شکل ۶ تطابق مناسبی بین اشکال مودی دو سیستم تا مود نهم وجود دارد و اشکال مودی مودهای ۱۰ و ۱۱ با اختلاف بیشتری تعیین شدهاند.



شکل ۲. نمودار MAC دوبعدی و سهبعدی تشکیلیافته از اشکال مودی دو سیستم اصلی و شناسایی شده Fig. 7. 2D and 3D MAC diagrams for modeshapes between identified and original system

در شکل ۷ نیز مشابه شکل ۶ همبستگی کامل میان دو دسته اشکال مودی برای سیستم اصلی و سیستم شناسایی شده از مود ۱ تا ۹ و وجود خطا در تخمین اشکال مودی مودهای ۱۰ و ۱۱ مشهود است.

پس از شناسایی سیستم، انتقال آن به مختصات فیزیکی و استخراج مشخصات دینامیکی، عملیات کنترل ارتعاشات بر روی هر دو سازه انجام شده و شاخصهای بنچمارک مطابق جدول ۷ و شکل ۸ برای دو سیستم اصلی و شناساییشده استخراج میگردد. در مرحلهی کنترل ارتعاشات، ماتریسهای وزنی LQR برای هر دو کنترلر یکسان و به شکل زیر در نظر گرفته میشوند:

$$\tilde{Q} = diag[Q_{d_{n\times n}} \quad Q_{v_{n\times n}}]_{2n\times 2n}, \quad Q_{d} = 1, \quad Q_{v} = 0.1$$
(F9)

$$\tilde{R} = 10^{-6.5} I_{r \times r} \tag{(FV)}$$

هر چه مقادیر شاخصهای عملکرد از عدد یک فاصله بگیرد عملکرد کنترلر در کنترل ارتعاشات مناسبتر بوده و پاسخهای سازه بیش تر کاهش مییابند. براساس نتایج مدلسازی مشاهده میشود کنترلر مبتنی بر شناسایی شاخصهای عملکرد پایینتری داشته و علاوه بر کاهش پاسخ سازه نسبت به حالت کنترلنشده (دستیابی به مقادیر کوچکتر از یک برای شاخصها) در دستیابی به اهداف کنترل نسبت به کنترلر سازهی اصلی موفقتر عمل نموده است. شکل ۸ این نتیجه را به صورت گرافیکی نمایش میدهد.

جدول ۷. مقادیر شاخصهای بنچمارک کنترلر طراحی شده برای دو سیستم اصلی و شناسایی شده تحت تحریک زلزله ال سنترو Table 7. Values of benchmark indexes for identified and original model under El Centro earthquake avcitation

				e	xcitation			
J_8	\mathbf{J}_7	J 6	J5	J_4	J_3	J_2	\mathbf{J}_1	سازه
• /۳۳۲	• /٣۶۶	•/777	•/٣٢٩	•/۵۸۲	•/۵۵١	•/٣•٢	۰/۳۱۴	سیستم اصلی
•/777	٠/٣٩٧	·/YQX	•/184	•/۵۲۲	•/418	•/77۵	•/240	سيستم شناسايىشده
•/٢٧٧	•/٢٩٧	·//۵٨	•/184	•/۵۲۲	•/۴١۶	•/77ð	•/٢۴۵	ساییشدہ



شکل ۸. نمودار شاخصهای بنچمارک برای دو سیستم اصلی و شناسایی شده

Fig. 8. Benchmark indexes for identified and original model under El Centro earthquake excitation مقادیر RMS تغییرمکان و نیروی کنترل موردنیاز در طبقات اول و فوقانی سازههای اصلی و شناسایی شده در شکل ۹ ارائه شدهاند



شکل ۹. RMS تغییرمکان و نیروی کنترل مورد نیاز در طبقات اول و فوقانی سازههای اصلی و شناسایی شده Fig. 9. RMS of displacement and control force in the first and top floors of the main and identified structures

مطابق شکل ۹ RMS تغییرمکان و نیروی کنترل مورد نیاز در طبقات اول و فوقانی سازهی شناسایی شده از مقادیر متناظر برای سازهی اصلی کمتر بوده و تاثیر استفاده از دادههای شناسایی در طراحی کنترلر مثبت ارزیابی میشود.

براساس نتایج شبیهسازی یک سازه با روند پیشنهادی و طراحی کنترل مبتنی بر شناسایی سیستم برای این سازه مشاهده گردید ماهیت آماری و احتمالاتی مساله ایجاب می کند مدلهای متعددی جهت در نظر گرفتن تمامی حالات ممکن ایجاد شده و مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور ۱۲۰۰ سازه تولید شده و تحت نویزهای سفید گاوسی تصادفی برای تخمین قابلیتاعتماد کنترلر ارتعاشات مبتنی بر شناسایی سازه مورد آزمایش آماری قرار می گیرند. در نهایت میزان اطمینان و کارایی کنترلر مبتنی بر شناسایی سیستم ارزیابی می گردد. به دلیل اهمیت مساله بهتر است شیوهای که برای محاسبه قابلیتاعتماد انتخاب می گردد از دقت بالایی برخوردار باشد؛ از این رو در این پژوهش از روش نمونه گیری مونت کارلو استفاده شده است. بدین صورت که متغیرهایی تحت عنوان عدمقطعیت در نظر گرفته شده و به تعداد کافی نمونهی تصادفی ایجاد می شود. مشخصات پارامترهای دارای عدمقطعیت در شبیه ازی مونت کارلو در جدول ۸ ارائه شدهاند. تابع حالت حدی می تواند به صورت اختلاف معیارهای کنترلی دو سازی مونسایی شیه مونت کارلو در جدول ۸

Table 8. Statistical characteristics of uncertain parameters								
توزيع آمارى	ضريب تغييرات (٪)	ميانگين	پارامتر					
گاوسی	۵		جرم طبقات					
گاوسی	۵	 برابر با مقادیر اسمی سازه اصلی	سختي طبقات					
گاوسی	۱.		نسبت میرایی					

جدول ۸. مشخصات آماری پارامترهای دارای عدمقطعیت able 8. Statistical characteristics of uncertain parameters

۹- نتايج

در این بخش ارتعاشات سازههای تصادفی و سازههای شناسایی شدهی معادل آنها کنترل شده و شاخصهای عملکرد کنترلر نیز برای هر دو دسته از سیستمها محاسبه شده است. مطابق تحلیلها و از مقایسهی نتایج کنترل ارتعاشات این دو گروه سازه نتیجه گرفته می شود هر چه دقت شناسایی فرکانسها و نسبتهای میرایی افزایش یابد، نیاز سیستم شناسایی شده به نیروی کنترل کمتر بوده و پاسخهای آن بیشتر کنترل گردیدهاند. کنترل مناسبتر ارتعاشات سازه شناسایی شده میتواند به ضعف روش زیرفضای تصادفی در برآورد بالاتر از مقدار واقعی نسبتهایی میرایی مربوط باشد. البته در مسالهی مورد مطالعهی این پژوهش این امر منجر به کنترل بهتر پاسخهای سازه گردیده است. در ادامه نتایج بهدست آمده برای دو گروه سیستم در قالب نمودارهای توزیع چگالی احتمال با فرض توزیع نرمال برای شاخصهای عملکرد ارائه شده است.







Fig. 10. The probability density function of the performance indexes for the original and identified structures

مطابق نتایج مشاهده میشود توزیعهای چگالی برای شاخص عملکرد کنترلر مبتنی بر شناسایی از میانگین پایینتری نسبت به شاخصهای عملکرد کنترلرهای تصادفی اصلی برخوردار هستند؛ گرچه مقادیر انحراف میار بالاتر برای شاخص عملکرد کنترلر مبتنی بر شناسایی پراکندگی بیشتر نتایج را نسبت به عملکرد کنترلر اصلی نتیجه می دهد. مقادیر میانگینها برای شاخص عملکرد کنترلر مبتنی بر خروجیها نسبت به میانگینهای شاخصهای مرتبط با ماکزیمم خروجیها به هم نزدیکتر هستند. از این مساله میتوان دریافت شناسایی سیستم ماکزیمم پاسخها را در مقایسه با میانگین آنها بیشتر تحت تاثیر قرار داده است. یکی از عوامل تاثیرگذار بر میزان قابلیتاعتماد، سیستم ماکزیمم پاسخها را در مقایسه با میانگین آنها بیشتر تحت تاثیر قرار داده است. یکی از عوامل تاثیرگذار بر میزان قابلیتاعتماد، تابع حدی خرابی است. میزان قابلیتاعتماد از نوع تابع خرابی تاثیر میپذیرد. به عنوان مثال در مسالهی مورد مطالعه با انتخاب تابع حالت حدی به صورت اختلاف بیشینه پاسخ تغییرمکان طبقه ی فوقانی سازه و استفاده از فرمول N_f / R جهت محاسبهی احتمال خرابی تخمینی، مقدار احتمال خرابی برایر ٪۲۵٪ بهدست آمده است که مقدار قابل قبولی بوده و برابر با درصد موفقیت ۹۹/۱۵ کنترلر مبتنی بر شناسایی نسبت به کنترلر اصلی است. مطابق روابط (۴۵) درصورتیکه هدف، پیشبینی احتمال با ضریب تغییرات ۱/۰

به منظور بررسی عملکرد کنترلر طراحی شده در برابر زلزله های مختلف، علاوه بر زلزله ی ال سنترو، شبیه سازی ها در برابر دو زلزله ی کوبه و پارکفیلد نیز انجام شد که درصد موفقیت براساس تابع خرابی فوق برای کنترلر مبتنی بر شناسایی نسبت به کنترلر اصلی با ماتریس های وزنی مطابق روابط (۴۶) و (۴۷) به ترتیب برابر ۹۸/۵۰ و ۹۹/۸۳ به دست آمد. این مساله موفقیت رویکرد اتخاذ شده برای طراحی کنترلر را در برابر تحریک های مختلف زلزله نشان می دهد.

براساس نتایج شبیهسازیهای انجام شده استفاده از دادههای شناسایی سیستم در طرح کنترل فعال سبب کاهش بیشتر پاسخهای سازه می شود. این امر می تواند متاثر از دقت پایین و به عبارتی بر آورد بالاتر نسبتهای میرایی در سازههای شناسایی شده توسط روش زیرفضای تصادفی باشد. گرچه همین دقت پایین شناسایی قابلیت اعتماد بالایی برای کنترلر مبتنی بر شناسایی ایجاد می نماید. لذا می توان بیان نمود در سازههای موجود که مشخصات دقیقی از آنها جهت طرح کنترلر در اختیار نمی باشد، استفاده از دادههای شناسایی سیستم که با اتکا به شبکهی سنسور سیستم پایش سلامت قرار می گیرد، کنترلی می توان طراحی نمود که پاسخگوی نیازهای یک طرح قابل قبول کنترل بوده و چه بسا غالبا عملکرد مناسبتری نسبت به طرح یقین اندیشانه خواهد داشت. شکل ۱۱ دربر گیرندهی نتایج شناسایی پارامترهای مودال ۱۲۰۰ سازه تولید شده طی شبیه سازی مونت کارلو با استفاده از روش SSI است. همانطور که انتظار می رفت، مطابق با ویژگیهای حاکم بر روش SSI، دقت شناسایی نسبتهای میرایی در مقایسه با شناسایی فرکانس ها کم تر و پراکندگی نتایج آن



بیشتر است. شکل ۱۱ نشان میدهد عموما تخمین مقادیر میرایی بیشتر از مقدار واقعی نسبتهای میرایی بوده و عکس این اتفاق برای فرکانس های طبیعی رخ داده است.

Fig. 11. Results of identifying modal parameters of 1200 generated structures during the Monte Carlo simulation

۱۰- بحث و نتيجه گيري

در این مطالعه ایدهی استفاده از دادههای شناسایی سیستم در طراحی سیستم کنترلی و بررسی و محاسبهی میزان اعتماد به این طرح کنترل مورد مطالعه قرار گرفت. ماهیت آماری و احتمالاتی پارامترهای دینامیکی مدل سازه در قالب توابع چگالی یا توزیع احتمال تعریف شده و در عملکرد کل سیستم لحاظ گردید. با ثبت عکسالعمل تغییرمکان سازه به تحریکات تصادفی نویز سفید گاوسی، ورودی های سیستم شناسایی تامین شده و عملیات شناسایی با روش زیرفضای تصادفی انجام گردید. با کنترل دامنهی ارتعاشات دو گروه از سازههای اصلی و شناسایی شده کفایت عملکرد سازه براساس اهداف کنترل مورد بررسی قرار گرفت و با تفکیک واضح بین دو حالت خرابی و سلامت سازه، قابلیتاعتماد طرح ارزیابی گردید. مطابق نتایج مشاهده شد توزیعهای چگالی برای شاخص عملکرد کنترلر مبتنی بر شناسایی از میانگین پایینتری نسبت به شاخصهای عملکرد کنترلرهای تصادفی اصلی برخوردار هستند؛ گرچه مقادیر انحرافمعیار بالاتر برای شاخص عملکرد کنترلر مبتنی بر شناسایی پراکندگی بالاتر نتایج را نسبت به عملکرد کنترلر اصلی نتیجه میدهد. یکی از دستاوردهای این مطالعه استفاده از نتایج در طراحی کنترلر برای سازههایی است که مشخصات دقیق آنها در دسترس نمیباشد و در فقدان قوانين آييننامهاي طراحي احتمالاتي كنترلر براي آنها انجام مي پذيرد و احتمال عملكرد درست كنترلر در شرايط وجود عدمقطعیت تعیین می شود. حدود خرابی برای ماکزیمم پاسخهای تغییرمکان، سرعت، شتاب و تغییرمکان نسبی بسته به هدف طراح از طرح سیستم کنترل می تواند تعیین گردد. در این مطالعه نگاه آماری به شاخصهای عملکرد کنترلرها دید مناسبی از میزان قابلیت اعتماد به کنترلرهای مبتنی بر شناسایی سیستم ارائه داده است. براساس نتایج شبیهسازیهای انجام شده استفاده از دادههای شناسایی سیستم در طرح کنترل فعال سبب کاهش بیشتر پاسخهای سازه میشود. این امر میتواند متاثر از دقت پایین و به عبارتی برآورد بالاتر نسبت های میرایی در سازههای شناسایی شده توسط روش زیرفضای تصادفی باشد. گرچه همین دقت پایین شناسایی، قابلیتاعتماد بالایی برای کنترلر مبتنی بر شناسایی ایجاد مینماید. لذا میتوان بیان نمود در سازههای موجود که مشخصات دقیقی از آنها جهت طرح کنترلر در اختیار نمی باشد، استفاده از دادههای شناسایی سیستم که با اتکا به شبکهی حسگرهای سیستم پایش سلامت قرار می گیرد، کنترلری می توان طراحی نمود که پاسخگوی نیازهای یک طرح قابل قبول کنترل بوده و چه بسا غالبا عملکرد مناسب تری نسبت به طرح یقین اندیشانه خواهد داشت. لازم به ذکر است نتایج ارائه شده در چهارچوب فرضیات در نظر گرفته شده صادق بوده و جهت تعمیم به تمام سائل انجام شبیهسازیهایی که تمام ویژگیهای مساله را دربربگیرد الزامی است.

۱۱- منابع و مراجع

[1] C. Papadimitriou, L. Katafygiotis, S.K. Au, Effects of structural uncertainties on TMD design: A reliability-based approach, Journal of structural control, 4(1) (1997) 65–88.

[2] H.A. Jensen, J.G. Sepúlveda, On the reliability-based design of structures including passive energy dissipation systems, Structural safety, 34(1) (2012) 390–400.

[3] H.A. Jensen, D. Kusanovic, On the effect of near-field excitations on the reliability-based performance and design of base-isolated structures, Probabilistic Engineering Mechanics, 36 (2014) 28–44.

[4] B. Farahmandazar, A. Hadidi, A. Rafiee, An efficient simulation method for reliability analysis of systems with expensive-to-evaluate performance functions, Structural engineering and mechanics: An international journal, 55(5) (2015) 979–999.

[5] E. Babaeipour, H. Khosravi, Investigation of reliability in eccentrically-braced concrete frame with viscoelastic damper, in: National Congress Numerical Methods in Civil Engieering 2015, undefined, 2015 (in Persian).

[6] W. You, S. Alexandre, M. Ichchou, Z. Abdel, X. Zhong, Reliability modeling and prediction of passive controlled structures through Random Forest, in: MATEC Web of Conferences, EDP Sciences, 2018, pp. 01023.

[7] L. Li, M. Fang, G. Chen, D. Yang, Reliability-based stochastic optimal control of frame building under near-fault ground motions, Mechanical Systems and Signal Processing, 163 (2022) 108098.

[8] S.-M. Kim, S.-Y. Ok, J. Song, Multi-scale dynamic system reliability analysis of actively-controlled structures under random stationary ground motions, KSCE Journal of Civil Engineering, 23(3) (2019) 1259–1270.

[9] N. Fathiazar, M. Mohebbi, Optimal design of passive mass damper based on reliability, in: International Conference on Civil Engineering, Architecture and urban infrastructure, undefined, 2015 (in Persian).

[10] P. Shoaei, R. Karami-Mohammadi, N. Hoseini, Reliability analysis of structures equipped with adjusted liquid dampers considering uncertainty in model specifications and earthquake intensity, in: 2nd National Conference on Applied Researches in Structural Engineering and

Construction Management, undefined, 2016 (in Persian).

[11] R. Debbarma, S. Chakraborty, S.K. Ghosh, Optimum design of tuned liquid column dampers under stochastic earthquake load considering uncertain bounded system parameters, International journal of mechanical sciences, 52(10) (2010) 1385–1393.

[12] A. Khansefid, A. Vaezzadeh, Probabilistic optimization of viscous damper system in nonlinear structure, in: 5th International Conference on Acoustics and Vibration, University of Tehran,

Tehran, Iran, 2015 (in Persian).

[13] Z. Dehnavi, H. Khosravi, Investigation of reliability in steel eccentrically-braced frames with friction damper, in: The first national conference on sustainable urban development, undefined, 2013 (in Persian).

[14] M. Mohebbi, D. Valinezhad, N. Alesh-Nabidoust, Reliability sensitivity analysis of single passive mass damper parameters, in: International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Sustainable Development, undefined, 2013 (in Persian).

[15] H. Shariatmadar, G. Behnam-Rad, Reliability evaluation of active controlled structures using subset simulation method, in: 8th National Congress On Civil Engineering, undefined, 2014 (in Persian).

[16] S. Askari, A. Sirazi-Mamoureh, Reliability of semi-active seismic isolation in near-fault earthquakes, in: Sixth National Conference on New Technologies in Civil Engineering, Architecture and Urban Planning, undefined, 2019 (in Persian).

[17] S. Pooyan, P. Homami, Seismic reliability analysis of bridges equipped with dampers, in: 2nd Conference on Seismology & Earthquake Engincering, undefined, 2015 (in Persian).

[18] C. Zhang, W. Li, D. Liu, J. Xu, X. Feng, R. Wang, B. Wang, Seismic reliability research of continuous girder bridge considering fault-tolerant semi-active control, Structural Safety, 102 (2023) 102322.

[19] S. Hosseinaei, M.R. Ghasemi, S. Etedali, T.H. Chan, Sensitivity and reliability analyses in to actively controlled structures under earthquake, International Journal of Structural Stability and Dynamics, 22(12) (2022) 2250124.

[20] A. Jalali, H. Shariatmadar, Reliability analysis of controlled structures based on probabilistic active controller, in: Structures, Elsevier, 2023, pp. 106–116.

[21] R.R. Orszulik, J. Shan, Active vibration control using genetic algorithm-based system identification and positive position feedback, Smart Materials and Structures, 21(5) (2012) 055002.

[22] M. Moradmand, F. Amini, P. Ghaderi, Simultaneous Online Damage Detection and Vibration Control of Structures Using Synchronization and Semi-Active Control, International Journal of Structural Stability and Dynamics, (2021) 2150038.

[23] S. Azizi, K. Karami, S. Nagarajaiah, Developing a semi-active adjustable stiffness device using integrated damage tracking and adaptive stiffness mechanism, Engineering Structures, 238 (2021) 112036.

[24] S. Naderi, K. Karami, Y. Batmani, Real-time identification of damage in structures based on model-based adaptive identification, in: 12th National Congress of Civil Engineering, 2020 (in Persian).

[25] T. Nestorović, N. Durrani, M. Trajkov, Experimental model identification and vibration control of a smart cantilever beam using piezoelectric actuators and sensors, Journal of Electroceramics, 29 (2012) 42–55.

[26] S. Golestaneh Zadeh, M. Amin Afshar, Seismic control of damaged structure by pole assignment and intermittent wavelet-based identification, Journal of Vibration and Control, 29(3-4) (2023) 528–542.

[27] M. Ebrahimi, E. Nobahar, R.K. Mohammadi, E.N. Farsangi, M. Noori, S. Li, The influence of model and measurement uncertainties on damage detection of experimental structures through recursive algorithms, Reliability Engineering & System Safety, 239 (2023) 109531.

[28] F.Y. Cheng, H. Jiang, K. Lou, Smart structures: innovative systems for seismic response control, CRC press, 2008.
[29] J. Katebi, M. Shoaei-parchin, M. Shariati, N.T. Trung, M. Khorami, Developed comparative analysis of metaheuristic optimization algorithms for optimal active control of structures, Engineering with Computers, 36 (2020) 1539–1558.

[30] D. Skolnik, Y. Lei, E. Yu, J.W. Wallace, Identification, model updating, and response prediction of an instrumented 15-story steel-frame building, Earthquake Spectra, 22(3) (2006) 781–802.

[31] P. Van Overschee, B. De Moor, Continuous-time frequency domain subspace system identification, Signal Processing, 52(2) (1996) 179–194.

[32] P. Van Overschee, B. De Moor, W. Dehandschutter, J. Swevers, A subspace algorithm for the identification of discrete time frequency domain power spectra, Automatica, 33(12) (1997) 2147–2157.

[33] B. Peeters, System identification and damage detection in civil engeneering, (2000).

[34] M.R. Ashory, Investigation of the accuracy of SSI-COV method in estimation of Modal Parameters: numerical and experimental case studies, Modares Mechanical Engineering, 13(10) (2014) 127–139.

[35] L. Mevel, M. Goursat, M. Basseville, Stochastic subspace-based structural identification and damage detection and localisation—application to the Z24 bridge benchmark, Mechanical Systems and Signal Processing, 17(1) (2003) 143–151.

[36] C. Priori, M. De Angelis, R. Betti, On the selection of user-defined parameters in data-driven stochastic subspace identification, Mechanical Systems and Signal Processing, 100 (2018) 501–523.

[37] L. Shieh, H. Wang, R. Yates, Discrete-continuous model conversion, Applied Mathematical Modelling, 4(6) (1980) 449–455.

[38] B. Koh, S. Nagarajaiah, M. Phan, Reconstructing structural changes in a dynamic system from experimentally identified state-space models, Journal of mechanical science and technology, 22(1) (2008) 103–112.

[39] M. Phan, R. Longman, Extracting mass, stiffness, and damping matrices from identified state-space models, in: AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2004, pp. 5415.

[40] A. Graham, Kronecker Products and Matrix Calculus with Applications, Courier Dover Publications, 1981.

[41] B. Koh, S. Nagarajaiah, M. Phan, Reconstructing structural changes in a dynamic system from experimentally identified state-space models, Journal of mechanical science and technology, 22 (2008) 103–112.

[42] B. Koh, S. Nagarajaiah, M. Phan, Direct identification of structural damage through kronecker product method, Journal of Mechanical Science and Technology, 22(01) (2008) 103–112.

[43] W.K. Gawronski, Advanced structural dynamics and active control of structures, Springer, 2004.

[44] Y. Ohtori, R. Christenson, B. Spencer Jr, S. Dyke, Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings, Journal of engineering mechanics, 130(4) (2004) 366–385.

[45] A.S. Nowak, K.R. Collins, Reliability of structures, CRC press, 2012.

[46] A. Bathaei, S.M. Zahrai, M. Ramezani, Semi-active seismic control of an 11-DOF building model with TMD+ MR damper using type-1 and-2 fuzzy algorithms, Journal of vibration and control, 24(13) (2018) 2938–2953.

Reliability Study of Identification-based Active Control

ABSTRACT

The reliability of vibration control systems is influenced by uncertainties in dynamic parameters of structure, the characteristics of controller, and external excitations. When designing controllers for structures with unspecified or unavailable specifications, identification methods for estimating dynamic parameters and controller design offer a practical solution. However, controllers based on identification methods are subject to two main sources of error: modeling inaccuracies and identification errors. By comparing the performance of controllers designed using identification methods with those based on assumed models, it is possible to evaluate the impact of identification accuracy on control effectiveness. This approach minimizes the negative effects of uncertainties in structural parameters while reducing the costs associated with intelligentization. In this study, uncertainties considered in structural parameters and external excitations. Initially, a primary control system was designed, and the structure was identified using the stochastic subspace identification based on recorded responses. Subsequently, a secondary controller was designed based on identification. The failure function was defined as maximum difference in displacement response of the upper story of structure between two controllers. Using this metric, the reliability of control system was estimated. The results showed that the identification-based controller achieved a success rate of 99.75% compared to original controller. However, the statistical distributions of the performance indexes for the identification-based controller exhibited a lower mean and higher standard deviation than those of assumed-model-based controller. This improvement is likely influenced by the lower accuracy and higher estimated damping ratios of the identified structures, which contribute to increased reliability of identification-based controller.

KEYWORDS

Stochastic subspace identification, Monte Carlo simulation, system identification, reliability, active control.