

چکیده

یکی از مسائل اساسی در استفاده از کنترل بهینه خطی مرتبه دوم (LQR)، تنظیم مقادیر ماتریس‌های وزنی آن می‌باشد که بر اساس سعی و خطا و استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌یابی فراکاوشی تعیین می‌گردند. در صورت وجود عدم قطعیت پارامتری و نویز در حس‌گرها عملکرد این کنترلر دچار اختلال می‌شود. در این مطالعه به منظور حل این مشکل یک کنترلر ترکیبی Fuzzy-LQR پیشنهاد شده که در آن از یک ناظر فازی برای تعیین آنالاین ماتریس وزن LQR استفاده شده است. برای ارزیابی عملکرد کنترلر پیشنهادی از دو سازه ۳ و ۸ طبقه استفاده شده که تمام طبقات آنها مجهز به عملگر کابل فعال است. این سازه‌ها تحت ارتعاش دو زمین‌لرزه مصنوعی با سطح خطر ۱۰ و ۲ درصد در ۵۰ سال قرار گرفته و پاسخ‌های مختلفی از سازه اعم از حداکثر مقدار پاسخ‌ها و ریشه میانگین مربعات آنها مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه با مقایسه نتایج حاصل از کنترلر پیشنهادی و کنترلر LQR مبتنی بر الگوریتم‌های فراکاوشی مختلف می‌توان به توانایی بالای کنترلر Fuzzy-LQR اشاره کرد که حتی در حضور عدم قطعیت پارامتری و نویز در حس‌گرها نیز می‌تواند تا ۹۰ درصد منجر به کاهش پاسخ گردد. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که کنترلر پیشنهادی دارای رفتاری مقاوم و پایدار در برابر تحریک‌های گوناگون و عدم قطعیت‌های سیستم می‌باشد.

واژگان کلیدی: کابل فعال، ناظر فازی، کنترلر Fuzzy-LQR، عدم قطعیت، نویز حس‌گر.

تعیین آنالاین ماتریس وزنی کنترلر LQR با استفاده از ناظر فازی تحت رکوردهای زمین لرزه مصنوعی

رضا دربانیان (نویسنده مسئول)

دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران،
rezadarbanian@shahroodut.ac.ir

سید علی موسوی گاوگانی

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

وحیدرضا کلات‌جاری

دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود،
ایران

۱- مقدمه

سیستم‌های کنترل سازه جهت افزایش کارایی و ایمنی آنها در برابر خطرات طبیعی از جمله زلزله و تندباد انجام شده است. این سیستم‌ها برحسب انرژی مورد نیاز و نحوه عملکرد به چهار گروه غیرفعال، فعال، نیمه‌فعال و ترکیبی تقسیم می‌شوند [۴]. روش‌های کنترل غیرفعال ابتدایی‌ترین نوع کنترل محسوب می‌شوند که برای اولین بار توسط جان میلن پیشنهاد و ارائه شد که شامل یک مدل اولیه از جداساز لرزه‌ای بود [۵]؛ اما این روش کنترلی به دلیل معایب قابل توجه آن (از جمله عدم کارایی مناسب در باندهای فرکانسی مختلف و توانایی پایین آن در میرا نمودن ارتعاشات)، مورد توجه محققین قرار نگرفت [۶]. به همین سبب در ادامه روش‌های کنترل فعال مورد توجه قرار گرفت و ایده استفاده از آن در اوایل دهه ۱۹۶۰ توسط زوک ارائه شد [۷]. کنترلر فعال

وقوع حوادث طبیعی نظیر زلزله و تندبادها سبب اعمال انرژی زیاد در مدت زمان اندک به سازه می‌گردد. این انرژی می‌بایست به طریقی مستهلک گردد تا خسارت‌های احتمالی به حداقل کاهش یابد و سازه پس از وقوع حادثه، سطح عملکرد مورد نظر را تأمین نماید. بدین جهت حفظ سازه‌ها از هرگونه آسیب پس از زلزله، به جهت سرویس‌دهی مناسب و دائمی و ایمنی جانی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. آسیب‌های شدید در اثر وقوع زمین‌لرزه‌هایی نظیر زلزله‌ی ۱۹۹۴ نورث‌ریج، ۱۹۹۵ کوبه و ۲۰۰۳ بم اهمیت این موضوع را بیش‌ازپیش نشان می‌دهد [۱-۳]. یکی از ایده‌های مناسب برای کاهش ارتعاشات سازه‌ها و تأمین پایداری آنها استفاده از روش‌های کنترل سازه می‌باشد.

در سال‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای بر روی انواع مختلف

دارای اجزای مختلفی می‌باشد که شامل حس گر، کنترلر و عملگر است.

در کنترل فعال عملگرهای مختلفی نیز برای اعمال نیروی کنترل به سازه وجود دارد که از آن جمله می‌توان به میراگر جرمی هماهنگ شده فعال، کابل فعال، مهاربند فعال، سیستم‌های با میرایی و یسکوز فعال و... اشاره کرد. در این بین کابل فعال جزو عملگرهای پر کاربرد در کنترل فعال می‌باشد که برای اولین بار در سال ۱۹۶۰ کاربردهای آن توسط فریسنه معرفی گردید [۸]. این سیستم کنترلی شامل کابل، سرومکانیزم‌های هیدرولیکی و یک قاب فولادی سخت که کابل و عملگر را به هم متصل کرده می‌باشد و نیروی کنترلی از این طریق به کابل‌ها اعمال می‌شود [۹]. محققین مختلفی کارایی این عملگر را مورد بررسی قرار داده‌اند. به‌عنوان مثال نیگدلی و بودورواوغلو [۱۰] موقعیت قرارگیری کابل فعال را در سازه‌ای سه طبقه و تحت تحریک زمین لرزه به صورت خطی مورد ارزیابی قرار دادند و نتیجه گرفتند که بهترین حالت ممکن قرارگیری کابل در تمام طبقات است. در ادامه جغتائی و محبی [۱۱] با بررسی عملکرد غیرخطی سازه نیز به این نتیجه رسیدند که قرارگیری یک کابل در تمام طبقات منجر به تولید کمترین مقدار نیروی کنترل لازم و بهبود عملکرد کنترلر می‌شود. یانیک و آلدمیر [۱۲] در سال ۲۰۱۹ یک سیستم کنترلی دو گانه با استفاده از میراگر سیال مغناطیسی و کابل فعال ارائه دادند. رادر و عالم [۱۳] در سال ۲۰۲۰ به مقایسه دو الگوریتم انتساب قطب و کنترل بهینه خطی مرتبه‌ی دوم (LQR)^۱ در صورت استفاده از عملگر کابل فعال پرداختند و نتیجه گرفتند که الگوریتم LQR منجر به کاهش بیشتر پاسخ نسبت به میزان نیروی کنترل تولیدی می‌شود. آلسوی و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۲۱ نسبت به کنترل سازه‌ای چند درجه آزادی با استفاده از کابل فعال و الگوریتم کنترلی PID^۲ با موقعیت‌های قرارگیری کابل مختلف پرداختند و با چندین الگوریتم فراکاوشی نسبت به تعیین پارامترهای الگوریتم کنترلی اقدام کردند. در این سال همچنین محمدی و همکاران [۱۵] یک الگوریتم کنترل فعال جدید با استفاده از تئوری تغییر شکل یکنواخت سازه‌ای معرفی و برای اعمال آن به سازه از کابل فعال

بهره گرفتند.

برای کاهش پاسخ سیستم‌ها توسط کنترلر فعال، نیاز به یک کنترل کننده است تا فرمان مناسب به جهت تنظیم عملکرد سیستم را به عملگر صادر نماید. تاکنون انواع کنترل کننده‌ها بر پایه الگوریتم‌های گوناگون نظیر LQR، PID، LQG، COC^۳، SMC^۴، شبکه‌های عصبی، منطق فازی و... طراحی شده‌اند که یکی از متداول‌ترین روش‌های محاسبه‌ی نیروهای کنترل در کنترل فعال سازه‌ها، کنترل بهینه خطی مرتبه‌ی دوم است. کنترل LQR به دلیل سادگی در مطالعات بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است [۱۶-۲۰]. در کنترل LQR با تعریف یک شاخص عملکرد مرتبه‌ی دوم و بهینه‌سازی آن، امکان برقراری تعادل بین هزینه‌ی کنترل و کارایی سیستم میسر می‌شود. مهم‌ترین نکته در خصوص این الگوریتم تنظیم کردن مقادیر ماتریس وزنی می‌باشد که وابسته به حالات سیستم و ورودی کنترلی بوده و عدم انتخاب مناسب آن می‌تواند منجر به عملکرد نامناسب سازه کنترل شده گردد [۲۱]. لذا در مطالعات گوناگونی مقادیر مختلفی برای این دو ماتریس پیشنهاد شده است. به‌طور کلی فرآیند محاسبه ماتریس‌های وزنی در این کنترلر بر مبنای سعی و خطا می‌باشد [۲۲].

از اولین ایده‌ها برای محاسبه این دو ماتریس می‌توان به استفاده از روش‌های بهینه‌یابی پارامتریک و غیرپارامتریک اشاره کرد. از جمله روش‌های بهینه‌یابی غیرپارامتریک می‌توان به الگوریتم بهینه‌یابی بیزی اشاره کرد که مارکو و همکاران [۲۳] با استفاده از این الگوریتم مقادیر بهینه کنترلر LQR را محاسبه نمودند و در ادامه میاموتو و همکاران [۱۷] از این روش در کنترل فعال سازه‌ها استفاده کردند. استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی نیز از جمله روش‌های بهینه‌یابی پارامتریک می‌باشد که به‌عنوان مثال سولیهین و آکمیلیاواتی [۲۴] در سال ۲۰۱۰ از الگوریتم ازدحام ذرات برای این کار استفاده کردند. همچنین شن [۲۵] مقادیر بهینه ماتریس‌های وزنی را با استفاده از الگوریتم فراکاوشی ژنتیک محاسبه کرد. در ادامه کاتبی و همکاران [۲۶] در سال ۲۰۱۹ با استفاده از شش الگوریتم بهینه‌یابی مختلف نسبت به بهینه کردن ماتریس‌های وزنی در کنترلر LQR اقدام نمودند. در راستای

ماتریس Q و R استفاده شده است [۳۰]. دلیل انتخاب الگوریتم فازی نیز دارا بودن مزایایی اعم از سادگی، مقاوم بودن و توانایی نگاهت غیرخطی می‌باشد و یکی از بهترین گزینه‌ها برای سیستم‌های کنترلی است [۳۱]. لذا این روش نسبت به استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌یابی و تحلیل‌های آماری می‌تواند کارایی بهتر و مناسب‌تری داشته باشد. همچنین این روش نسبت به روش‌های اشاره شده ساده‌تر بوده و به زمان کمتری برای اصلاح نیاز دارد. علاوه بر این روش Fuzzy-LQR اثرات غیرخطی شدن سیستم را نیز به راحتی پشتیبانی می‌کند.

عملکرد سیستم‌های کنترل علاوه بر عملکرد و الگوریتم کنترلی به عوامل مختلفی همچون پارامترهای سازه‌ای نیز بستگی دارد [۳۲]؛ لذا در تحقیقات جدید سعی شده است عدم قطعیت‌های ناشی از طبیعت آماری پارامترهای سازه‌ای به صورت روابط ریاضی پیاده گردد. همچنین از طرفی مشکلات سیستم‌های کنترلی اغلب شامل غیرخطی بودن زیاد، نادرستی مدل و عدم قطعیت‌های موجود می‌باشد [۳۳]؛ بنابراین در روند ارزیابی رفتار یک سیستم سازه‌ای در شرایط بهره‌برداری واقعی، وجود عدم قطعیت‌ها می‌تواند سبب رفتاری کاملاً متفاوت با آنچه در مدل ریاضی به صورت تعینی منظور کرده‌ایم شود و بر عملکرد و پایداری سیستم کنترل، انتخاب و طراحی کنترل‌کننده تأثیر بگذارند. لذا به منظور طراحی یک کنترلر مقاوم نیاز است تا عدم قطعیت‌های پارامتری لحاظ گردد [۳۴]. عدم قطعیت‌ها، به دلیل خطاهای مدل‌سازی، خطاهای حین ساخت، نقص‌های فرضیات تحلیل، تغییرات در خصوصیات مصالح، تغییر در مشخصات بارهای دینامیکی وارد بر سازه، تغییر در مشخصات دینامیکی سازه حین وقوع زلزله و... حاصل می‌شوند [۳۵]. از اولین مطالعات برای در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامتری در سیستم‌های کنترل سازه می‌توان به مطالعه کافمن و همکاران [۳۶] اشاره کرد که در سال ۱۹۹۴ روشی موسوم به MRAC^۶ ارائه دادند. پادامیترو و همکاران [۳۷] نیز در سال ۱۹۹۷ به بررسی تأثیر عدم قطعیت‌های پارامتری در طراحی و ارزیابی عملکرد میراگر جرمی هماهنگ شده غیرفعال پرداخت و در نهایت به این نتیجه رسیده است که در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامتری در

تکمیل و گسترش روش بهینه‌یابی در تعیین مقادیر بهینه ماتریس‌های وزنی، داس و چاکرابورتی [۲۷] نیز از الگوریتم فراکاشی ژنتیک و به صورت چند هدفه برای تعیین مقادیر دو ماتریس وزنی Q و R استفاده کردند که اهداف بهینه‌یابی آنها در این مطالعه کاهش تغییر مکان و شتاب طبقه بام بود. مطالعات دقیق‌تر نشان داد که الگوریتم‌های فراکاشی معمولی دارای برخی ویژگی‌های دینامیکی نامطلوب در تعیین مقادیر ماتریس‌های وزنی می‌باشند که منجر به کاهش توانایی اکتشاف آنها می‌شود. برای حل این مشکلات کاریک و همکاران [۲۸] از الگوریتم ازدحام ذرات انطباقی برای تعیین ماتریس‌های LQR استفاده کردند. با این حال ایده استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌یابی بر مبنای تکرار بوده و بایستی به ازای هر تغییر در سیستم به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گیرد. علاوه بر این، روش ذکر شده برای سازه‌ای تحت بارهای دینامیکی مختلف و ناشناخته (باد یا زمین‌لرزه) نمی‌تواند به درستی کار کند [۲۹]؛ بنابراین در سال ۲۰۱۹ مقدسیه و جلائی فر [۲۹] روش جدیدی برای برقراری تعادل بین انرژی سازه و نیروی کنترل با محاسبه مقادیر مناسب دو ماتریس وزنی Q و R ارائه دادند. آنها با بررسی آماری ۳۹۵ سازه تک‌درجه آزادی با پیوند و نسبت میرایی متفاوت تحت هشت زمین‌لرزه اقدام به تعریف یک پارامتر تنظیم‌کننده نمودند که در ادامه مقدار مناسب این پارامتر را به ازای تمام ۳۹۵ سازه و به صورت سعی و خطا به دست آوردند که در نهایت این فرآیند منجر به بیش از ۷۰۰ هزار تحلیل گردید. در ادامه نویسندگان فرمولی برای تخمین پارامتر تنظیم‌کننده به عنوان تابعی از پیوند طبیعی، نسبت میرایی و حداکثر نیروی کنترل معرفی کردند. سپس روش پیشنهادی را برای سازه‌های چند درجه آزادی تعمیم دادند. با وجود برتری این روش نسبت به بهینه‌یابی، به دلیل احتمال وقوع اتفاقی غیرقابل پیش‌بینی در هر لحظه از عملکرد سیستم، این روش نیز نمی‌تواند تضمین‌کننده پایداری و بهترین عملکرد کنترلر در هر لحظه باشد. لذا بایستی از روشی هوشمند که قابلیت تشخیص و حل مشکلات را به صورت آنالین داشته باشد، استفاده کرد. لذا در مهندسی مکانیک از الگوریتم هوشمندی نظیر فازی برای تعیین دو

۲- معادلات حرکت سازه‌ای

معادله حرکت دینامیکی سازه برشی و چند درجه آزادی در حالت کنترل شده و تحت ارتعاش زمین‌لرزه را می‌توان به صورت رابطه (۱) نوشت.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = -\mathbf{M}\mathbf{E}\ddot{\mathbf{x}}_g(t) + \mathbf{G}\mathbf{f}(t) \quad (1)$$

که در آن \mathbf{M} ، \mathbf{C} و \mathbf{K} به ترتیب بیانگر ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه می‌باشند. $\mathbf{x}(t)$ و $\mathbf{f}(t)$ و $\ddot{\mathbf{x}}_g(t)$ به ترتیب بردار جابه‌جایی سازه، بردار نیروی کنترل حاصل از کابل فعال و شتاب حاصل از تحریک زمین‌لرزه را نشان می‌دهند. ماتریس‌های \mathbf{E} و \mathbf{G} نیز به ترتیب شتاب تکیه‌گاهی ناشی از زلزله و موقعیت قرارگیری کابل فعال را نشان می‌دهند. رابطه فوق را در فرم فضای حالت می‌توان به صورت روابط (۲) و (۳) بیان کرد.

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{z}(t) + \mathbf{B}_1\ddot{\mathbf{x}}_g(t) + \mathbf{B}_2\mathbf{f}(t) \quad (2)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_s\mathbf{z}(t) + \mathbf{D}_1\ddot{\mathbf{x}}_g(t) + \mathbf{D}_2\mathbf{f}(t) \quad (3)$$

که در رابطه (۲)، $\mathbf{z}(t) = [\mathbf{x}(t) \quad \dot{\mathbf{x}}(t)]^T$ معرف بردار حالت بوده و \mathbf{A} ، \mathbf{B}_1 و \mathbf{B}_2 به ترتیب ماتریس‌های سیستم، موقعیت تحریک خارجی و موقعیت نیروی کنترل هستند که مطابق روابط (۴) الی (۶) تعریف می‌شوند.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix}_{2n \times 2n} \quad (4)$$

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 0_{n \times 1} \\ -\mathbf{I}_{n \times 1} \end{bmatrix}_{2n \times 1} \quad (5)$$

$$\mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} 0_{n \times p} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{S}_{n \times p} \end{bmatrix}_{2n \times p} \quad (6)$$

همچنین در رابطه (۳)، $\mathbf{y}(t)$ بردار خروجی اندازه‌گیری شده و \mathbf{C}_s ، \mathbf{D}_1 و \mathbf{D}_2 به ترتیب ماتریس‌های خروجی و انتقال مستقیم هستند که به صورت روابط (۷) الی (۹) تعریف می‌شوند.

$$\mathbf{C}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{2n \times 2n} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix}_{m \times 2n} \quad (7)$$

$$\mathbf{D}_1 = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 1} \\ -\mathbf{I}_{n \times 1} \end{bmatrix}_{m \times 1} \quad (8)$$

مسائل کنترلی می‌تواند منجر به مقاوم بودن الگوریتم طراحی شده گردد. در ادامه دو و همکاران [۳۸] در سال ۲۰۱۲ با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامتری (سختی و میرایی) و اشباع عملگر اقدام به طراحی یک کنترلر مقاوم برای حفظ پایداری سازه‌ای ۳ طبقه تحت ارتعاشات زمین‌لرزه نمودند. آنها در این مطالعه نتیجه گرفتند، کنترلرهایی که در حضور عدم قطعیت پارامتری و محدودیت اشباع عملگر طراحی شوند، می‌توانند به طور مؤثری جهت کاهش پاسخ مورد استفاده قرار گیرند.

با توجه به آنچه بیان شد، بسیاری از استراتژی‌های کنترل بر اساس ویژگی‌های دینامیکی سازه که به صورت ثابت فرض شده‌اند، طراحی می‌گردند. در طول عمر سازه‌ها و حتی حین وقوع بارهای دینامیکی این خصوصیات تغییر می‌کند، درحالی‌که استراتژی الگوریتم کنترل ثابت باقی می‌ماند؛ بنابراین نیاز به اصلاح الگوریتم کنترل در طی فرآیند تحلیل وجود دارد. هدف اصلی این مقاله ارائه یک راهکار ساده و عملی برای مواجهه با این مشکل می‌باشد. همچنین از آنجا که پارامترهای سختی و میرایی سازه به دلیل تغییر شرایط محیطی همیشه در معرض تغییر قرار دارند و اندازه‌گیری تغییر آنها در زمان واقعی دشوار است، یک الگوریتم کنترلر مقاوم و طراحی شده بایستی توانایی پیش‌بینی و حل این مشکلات را داشته باشد. لذا انگیزه کلی این مقاله ترکیب ویژگی‌های کنترل فازی و LQR برای دستیابی به کمترین میزان انرژی مصرفی و کسب بیشترین کاهش پاسخ سازه و غلبه بر اثرات نامطلوب عدم قطعیت پارامتری و وجود نویز در حس‌گرها می‌باشد. این مطالعه جزو نخستین پژوهش‌ها در خصوص استفاده از الگوریتم ترکیبی Fuzzy-LQR برای کنترل فعال سازه به خصوص برای عملگر کابل فعال می‌باشد. اثرات اشباع عملگر و تأخیر زمانی به عنوان دو مورد از مشکلات سیستم‌های کنترلی در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه دو سازه دو بعدی ۳ و ۸ طبقه مجهز به کابل فعال در تمام طبقات تحت تأثیر دو رکورد زمین‌لرزه مصنوعی با سطح خطر متفاوت قرار گرفته است و نتایج حاصل از روش پیشنهادی Fuzzy-LQR با الگوریتم LQR بهینه شده با الگوریتم‌های فراکاوشی مختلف مقایسه شده است.

بزرگ‌تر به اعضای ماتریس R نشان‌دهنده‌ی لزوم استفاده از انرژی کنترل‌ی کمتر می‌باشد. انتخاب ماتریس‌های وزنی Q و R در هر مسئله بر عهده طراح بوده و هیچ قانون مشخصی برای انتخاب این ماتریس‌ها وجود ندارد. بنابراین با انتخاب مقادیر مناسب برای عناصر ماتریس‌های Q و R ، می‌توان یک تعادل نسبی مابین درجه‌ی کاهش پاسخ و میزان انرژی مصرفی مورد نیاز برقرار نمود [۱۶]. کمینه‌سازی رابطه‌ی (۱۱) منجر به ماتریس بهره‌ی K_{lqr} می‌شود که نیروی فیدبک $u = -K_{lqr}z$ را ایجاد می‌کند که K_{lqr} ماتریس بهره بازخورد می‌باشد که مطابق رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$K_{lqr} = R^{-1}B^T P \quad (12)$$

P ماتریس ریکاتی فضای حالت نیمه مثبت معین می‌باشد که از معادله ریکاتی غیرخطی زیر حاصل می‌گردد:

$$PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (13)$$

محدودیت اصلی این روش پیچیدگی زیاد در تعیین ماتریس‌های وزنی اشاره شده می‌باشد [۳۹-۴۰]. معادلات فوق در فضای حالت را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\dot{z} = Az + Bu = (A - BK_{lqr})z \quad (14)$$

با فرض وجود عدم قطعیت در مشخصات اصلی سازه، رابطه فوق به صورت رابطه (۱۵) اصلاح می‌شود:

$$\dot{z} = ((A \pm \Delta_A) - (B \pm \Delta_B)K_{lqr})z \quad (15)$$

که در آن Δ نشان‌دهنده‌ی دامنه‌ی تغییرات عدم قطعیت پارامترها در ماتریس‌های A و B است. بنابراین، طراحی یک کنترلر مقاوم LQR می‌تواند به سادگی با پایدارسازی در بدترین حالت تحقق یابد. ماتریس بهره بازخورد K_{lqr} ، در طول فرآیند تحلیل ثابت است. همان‌طور که اشاره شد این موضوع در حالتی که حس‌گرها بدون نویز و سازه بدون عدم قطعیت باشد مناسب بوده و کنترلر LQR توانایی کاهش پاسخ سازه را تحت تحریکات خارجی مختلف داراست؛ اما هنگامی که اطلاعات وارده از حس‌گرها آغشته به نویز و سیستم دارای عدم قطعیت باشد، کنترلر LQR با بهره ثابت قابلیت چندانی در کاهش مناسب پاسخ سیستم ندارد.

$$D_2 = \begin{bmatrix} 0_{2 \times p} \\ M^{-1}S \end{bmatrix}_{m \times p} \quad (9)$$

همچنین 0 و I به ترتیب ماتریس صفر و همانی هستند. زیرنویس‌های n ، m و p نیز به ترتیب بیانگر تعداد طبقات، تعداد خروجی اندازه‌گیری شده و تعداد عملگر نصب شده می‌باشند. S نیز ماتریس موقعیت قرارگیری عملگرها بوده و در یک ساختمان سه طبقه اگر عملگر فقط در طبقه همکف قرار داشته باشد همانند رابطه (۱۰) تعریف می‌شود.

$$S = [-1 \ 0 \ 0]_{1 \times 3}^T \quad (10)$$

۳- الگوریتم کنترلی

در این بخش ابتدا به توضیح الگوریتم پرکاربرد LQR پرداخته شده و نحوه محاسبه نیروی کنترل با استفاده از این الگوریتم در حضور عدم قطعیت شرح داده شده است. در ادامه با معرفی نقاط ضعف این الگوریتم و مشکلاتی که می‌تواند در استفاده عملی از این الگوریتم پیش‌آید، به معرفی ایده اصلی مقاله پرداخته شده که قادر است با رفع تمامی موارد، عملکرد بسیار مناسبی از خود نشان دهد.

۳-۱- الگوریتم کنترل بهینه خطی درجه دوم

کنترل بهینه خطی درجه دوم یکی از تکنیک‌های کنترل بهینه است که با توجه به محدودیت‌ها، نیروی کنترلی بهینه را محاسبه می‌کند. در کنترل LQR، بردار نیروی کنترل $u(t)$ باید به گونه‌ای انتخاب شود که شاخص عملکردی J رابطه (۱۱)، که ترکیبی از حالات سیستم و نیروی کنترلی است، کمینه گردد [۷].

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [z^T Qz + u^T Ru] dt \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، z بردار حالت و u بردار نیروی کنترل هستند. همچنین Q و R ماتریس‌های مربعی به ترتیب از مرتبه‌ی $2n \times 2n$ و $m \times m$ هستند و موسوم به ماتریس‌های وزن می‌باشند. مقادیر اعضای دو ماتریس مذکور نشان‌دهنده‌ی اهمیت نسبی متغیرهای حالت و نیروهای کنترل در فرآیند کمینه‌سازی رابطه (۱۱) می‌باشند. تخصیص مقادیر بزرگ‌تر به اعضای ماتریس Q بیانگر درجه‌ی اهمیت کاهش پاسخ سازه و تخصیص مقادیر

بهره اولیه از پیش طراحی شده را متناسب با شرایط به وجود آمده از طریق تغییر در ماتریس وزن R ، تعدیل می‌کند تا نیروی کنترلی وارد شده به سازه متناسب با نیروی کنترلی مورد نیاز بوده و از حد مجاز ظرفیت عملگر عبور ننماید. این تغییر نگاهی به کمینه کردن میزان انرژی مصرف شده توسط عملگر نیز دارد.

به‌طور کلی ایده منطق فازی در سال ۱۹۶۵ میلادی توسط پروفسور لطفی زاده و در مقاله‌ای تحت عنوان «مجموعه‌های فازی» ارائه گردید [۴۱]. سیستم‌های فازی به دلیل محاسبات کیفی، توانایی در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود را دارند. در واقعیت نیز عدم قطعیت‌های موجود در سیستم‌های فازی دارای دلایل زیادی است که از آن جمله می‌توان به استفاده از داده‌های دارای اغتشاش اشاره کرد که به این ترتیب اغلب مقداری عدم قطعیت وابسته به داده‌ها در سیستم‌های فازی موجود است [۴۲].

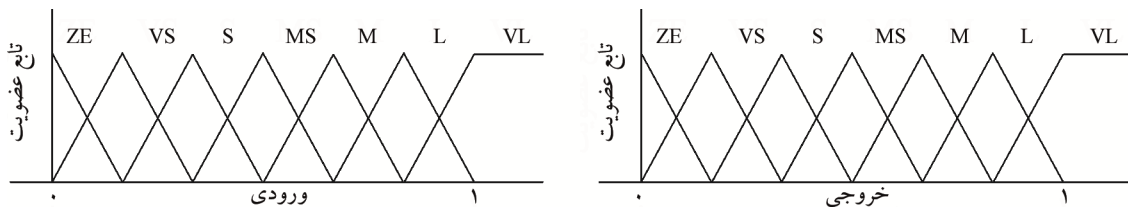
تنظیم کننده فازی پیشنهادی در این مطالعه به‌صورت تک‌ورودی، تک‌خروجی طراحی شده است. با توجه به آنچه پیش‌تر بیان شد، خروجی کنترلی فازی ماتریس وزن متغیر با زمان $R(t)$ ، انتخاب شده است اما ورودی بلوک فازی می‌تواند هر سیگنالی باشد. در این مطالعه قدر مطلق سرعت نسبی طبقه‌ای که عملگر در آن نصب گردیده، به‌عنوان ورودی تنظیم کننده فازی انتخاب شده است. لازم به ذکر است که این انتخاب با سعی و خطای بسیار و با در نظر گرفتن محدودیت‌های موجود با هدف کمینه کردن مصرف انرژی و کمترین زمان ممکن برای استنتاج فازی صورت گرفته است. منطق فازی دارای چهار بخش اصلی فازی‌سازی، پایگاه قواعد، موتور استنتاج و غیرفازی‌سازی می‌باشد. در بخش اول به‌منظور فازی‌سازی داده‌ها و در ادامه برای غیرفازی‌سازی خروجی منطق فازی به‌ترتیب از توابع عضویت مختص ورودی و خروجی استفاده شده است که برای این منظور در هر دو مورد از هفت تابع عضویت مثلثی با همپوشانی ۵۰ درصد در بازه ۰ تا ۱ استفاده شده است [۴۳]. شکل‌های مربوط به توابع عضویت ورودی و خروجی در شکل (۱) نشان داده شده است. در بخش بعد که مربوط به پایگاه قواعد فازی می‌باشد، از قوانین ارائه شده در جدول (۱) استفاده شده است.

برای رفع این مشکل در کنار کنترلر LQR از یک کنترلر فازی استفاده شده است. کنترل فازی به علت عدم نیاز به مدل ریاضی دقیق سیستم، توانایی مقابله با نویز و نامعینی سیستم (عدم قطعیت) را داراست. لذا با ترکیب کنترلر LQR و کنترل فازی هم‌زمان از مزایای این دو کنترلر استفاده می‌شود.

در کنترل ترکیبی Fuzzy-LQR، با یک روش بسیار ساده و هوشمندانه کنترل فازی می‌تواند با نویز موجود در حس‌گرها و عدم قطعیت کنار بیاید. این امکان از طریق اصلاح ماتریس وزن R ، در هر لحظه با توجه به شرایط سیستم تحقق می‌یابد.

۲-۳- الگوریتم Fuzzy-LQR پیشنهادی

همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، کنترلر LQR یک کنترل کننده فیدبک حالت بهینه است که برای به دست آوردن عملکرد بهینه سیستم با به حداقل رساندن تابع هزینه که مربوط به بردار حالت و بردار ورودی کنترلی است، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در رویکرد کنترلر LQR، تعیین بهره کنترلر K_{lqr} بر اساس ماتریس‌های وزنی ثابت Q و R می‌باشد که در این حالت و در طول فرآیند تحلیل ماتریس بهره کنترلر ثابت و بدون تغییر است که اصطلاحاً به آن ماتریس بهره استاتیک^۷ نیز گفته می‌شود. لذا افزایش Q یا کاهش R در رابطه (۱۱) ماتریس بهره کنترلر بزرگ‌تر را موجب می‌شود که در نهایت منجر به افزایش نیروی کنترل u ، و برعکس منجر به کاهش حالات (یا پاسخ) سیستم می‌شود. بنابراین اگر بهره کنترلی با استفاده از ماتریس Q خیلی بزرگ طراحی شده باشد، و در طول فرآیند شبیه‌سازی مقدار آن ثابت باشد، احتمال تولید نیروی کنترل با حداکثر ظرفیت بسیار محتمل است. در صورت اتفاق این موضوع، ممکن است نیروی ایجاد شده توسط عملگر طی فرآیند شبیه‌سازی بیش از نیروی مورد نیاز باشد و اختلاف بین نیروی کنترل طراحی شده و نیروی کنترل اعمال شده در برخی موارد می‌تواند باعث افت قابل توجه عملکرد کنترلر و یا مصرف انرژی بیش از مقدار مورد نیاز گردد. برای جلوگیری از چنین مشکلی، ما یک رویکرد تنظیم فازی را معرفی کرده‌ایم که با استفاده از یک تنظیم کننده فازی،



شکل (۱): توابع عضویت ورودی و خروجی ناظر فازی [۴۳].

به بررسی کارایی انواع توابع عضویت از نظر شکلی اعم از مثلثی، ذوزنقه‌ای، سهمی و... پرداخت و با بررسی تمامی حالات ممکن به این نتیجه رسید که تمامی انواع توابع عضویت در کاهش پاسخ جابه‌جایی عملکردی تقریباً یکسان داشته‌اند ولی در کاهش پاسخ شتاب سازه، تابع عضویت مثلثی به‌طور محسوس عملکردی مطلوب‌تر ارائه می‌دهد. همچنین با توجه به حجم عملیات سبک در تابع عضویت مثلثی نیز، استفاده از این تابع اقتصادی می‌باشد. در ادامه پژوهش فوق، جوئی [۴۶] با بررسی پاسخ سازه در حالتی که دو ورودی (تغییر مکان و سرعت) و یا سه ورودی (تغییر مکان، سرعت و شتاب) به کنترل‌کننده فازی وارد شود، نشان داده که پاسخ تغییر مکان سازه در هر دو حالت با خطای بسیار اندکی یکسان می‌باشد. درخصوص انتخاب سیستم استنتاج ممدانی نیز می‌توان به سادگی و شهودی بودن آن در مقایسه با سیستم استنتاج تاکاگی-سوگنو اشاره کرد. سیستم تاکاگی-سوگنو اصولاً برای مدل‌سازی سیستم‌های غیرخطی پیچیده با قوانین کم و دقت بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴۷].

۴- تولید رکورد مصنوعی

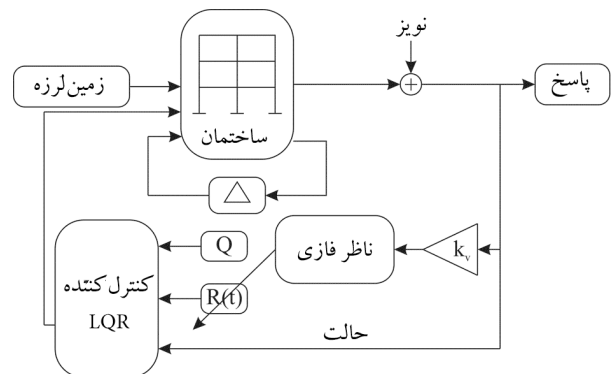
لزوم استفاده از رکوردهایی منطبق بر خصوصیات لرزه‌خیزی یک منطقه در طراحی و ارزیابی سیستم‌های کنترلی سبب گرایش به تولید و استفاده از رکوردهایی مصنوعی شده است [۴۸]. مدل‌های مختلفی برای تولید این رکوردهای مصنوعی معرفی شده است که به‌طور کلی این مدل‌ها به دو دسته مدل‌های ژئوفیزیکی و تصادفی تقسیم می‌شوند که مدل اول بر اساس داده‌های لرزه‌خیزی هر منطقه و مدل دوم بر اساس تئوری ارتعاشات تصادفی منجر به ایجاد شتاب‌نگاشت مصنوعی می‌شوند که مدل‌های مبتنی بر ارتعاشات تصادفی از مقبولیت بالایی نزد محققین برخوردار

جدول (۱): قوانین فازی مربوط به ناظر فازی.

توابع عضویت							
VL	L	M	MS	S	VS	ZE	ورودی
ZE	VS	S	MS	M	L	VL	خروجی

متغیرهای زبانی مربوط به ورودی و خروجی تنظیم‌کننده فازی به هفت عبارت زبانی مختلف، ZE، VS، S، MS، M، L، VL، مخفف «صفر»، «خیلی کوچک»، «کوچک»، «متوسط کوچک»، «متوسط»، «بزرگ» و «خیلی بزرگ» تقسیم شده‌اند. علاوه بر این، یک ضریب مقیاس برای بی‌بعد کردن متغیرهای ورودی در بازه [0,1] پیش از ورود به بلوک فازی در نظر گرفته شده است. در نهایت در بخش چهارم که مربوط به موتور استنتاج فازی می‌باشد از سیستم استنتاج ممدانی بهره گرفته شده است که برای اولین بار در سال ۱۹۷۵ توسط ممدانی و آسیلین [۴۴] معرفی گردید. مراحل الگوریتم کنترلی پیشنهادی به‌صورت خلاصه در شکل (۲) ارائه شده است که در آن k_v معرف ضریب مقیاس متغیر ورودی فازی می‌باشد.

به‌طور کلی تعیین تعداد و شکل توابع عضویت به‌صورت سعی و خطا بوده و مبنایی تجربی دارد [۴۵]. جوئی [۴۶] در مطالعه خود



شکل (۲): نمایی شماتیک از الگوریتم کنترلی ارائه شده.

$$G(\omega) = \frac{|F(\omega)|^2}{\pi T_D} \quad (19)$$

که در آن $F(\omega)$ و T_D به ترتیب تبدیل فوریه متناهی و مدت زمان رکورد زمین‌لرزه با سطح خطر یکنواخت هستند. در ادامه پنج پارامتر اشاره شده بر اساس تساوی رابطه (۱۹) با رابطه (۱۶) به دست می‌آیند. تابع پوش دامنه نیز مطابق رابطه (۲۰) حاصل می‌گردد.

$$\begin{aligned} a(t) &= \left(\frac{t}{t_1}\right)^\alpha & \text{for } 0 \leq t \leq t_1 \\ a(t) &= 1 & \text{for } t_1 \leq t \leq t_2 \\ a(t) &= \exp\left(-\frac{t-t_2}{\beta}\right) & \text{for } t_2 \leq t \leq T_D \end{aligned} \quad (20)$$

که در آن، t_1 زمان لازم برای رسیدن رکورد به حداکثر مقدار خود می‌باشد و t_2 نیز مدت‌زمانی است که شتاب در ناحیه حداکثر خود قرار دارد. دو پارامتر α و β نیز به ترتیب تابع و یک ثابت نمایی برای نشان دادن زوال زمان می‌باشند.

بعد از تعیین پارامترهای اشاره شده، می‌توان نسبت به ایجاد رکورد اقدام کرد. اولین پاسخ فیلتر شده را می‌توان مطابق رابطه (۲۲) و بر اساس رابطه (۲۱) محاسبه کرد.

$$\ddot{x}(t) + 2\xi_g \omega_g \dot{x}(t) + \omega_g^2 x(t) = n(t) \quad (21)$$

$$\ddot{x}_1(t) = -2\xi_g \omega_g \dot{x}(t) - \omega_g^2 x(t) \quad (22)$$

$n(t)$ بیانگر یک فرآیند نویز سفید گاوسی ایستا بوده و x_1 نیز اولین پاسخ فیلتر شده می‌باشد. در ادامه دومین پاسخ فیلتر شده نیز مطابق رابطه (۲۳) محاسبه می‌شود.

$$\ddot{x}_2(t) + 2\xi_f \omega_f \dot{x}_2(t) + \omega_f^2 x_2(t) = \ddot{x}_1(t) \quad (23)$$

در نهایت شتاب زمین‌لرزه تولید با سطح خطر یکنواخت (\ddot{x}_g) به ازای سطوح خطر مختلف مطابق رابطه (۲۴) به دست می‌آید.

$$\ddot{x}_g(t) = \ddot{x}_2(t)a(t) \quad (24)$$

در این مطالعه برای ارزیابی عملکرد سیستم کنترلی پیشنهادی از دو رکورد مصنوعی با سطوح خطر ۱۰ درصد در ۵۰ سال و ۲ درصد در ۵۰ سال برای منطقه لس‌آنجلس استفاده شده است که پارامترهای لازم برای محاسبه این رکوردها در جدول (۲) ارائه شده است. تاریخچه زمانی این رکوردها نیز به همراه حداکثر مقدار آنها در شکل (۳) نشان داده شده است.

هستند. در زیرمجموعه مدل‌های معرفی شده نیز روش‌های گوناگونی برای تولید رکوردهای مصنوعی معرفی شده است که در حالت کلی به دو دسته روش‌های ایستا و غیر ایستا تقسیم‌بندی می‌شوند [۴۹]. روش‌های غیر ایستا بعد از روش‌های ایستا به منظور رفع کاستی‌های این روش در تولید رکوردهای مصنوعی معرفی گردید. از جمله روش‌های غیر ایستای معرفی شده برای تولید این رکوردها توسط فاطمی و همکاران [۵۰] ارائه شده است که مجموعه‌ای از رکوردهایی با سطح خطر ۱۰ و ۲ درصد در ۵۰ سال برای مناطق مختلف تولید کرده‌اند.

در این مطالعه به منظور ارزیابی سیستم کنترلی ارائه شده از دو رکورد زلزله مصنوعی استفاده شده است. برای تولید این رکوردها به ازای سطوح خطر مختلف از روش ارائه شده توسط فاطمی و همکاران [۵۰] استفاده شده است. در ابتدا نحوه تعیین پارامترهای لازم برای این روش شرح داده می‌شود و در ادامه روابط مورد نیاز برای تولید رکوردها ارائه می‌گردد. تابع چگالی طیفی توان یک رکورد را می‌توان مطابق رابطه (۱۶) تعریف نمود:

$$G(\omega) = G_0 |H_g(\omega)|^2 |H_h(\omega)|^2 \quad (16)$$

که در آن G_0 ثابت شدت طیفی توان می‌باشد. همچنین $H_g(\omega)$ و $H_h(\omega)$ نیز به ترتیب توابع پاسخ فرکانسی بالا و پایین هستند که این توابع پاسخ فرکانسی بالا و پایین به ترتیب مطابق روابط (۱۷) و (۱۸) به دست می‌آیند.

$$|H_g(\omega)|^2 = \frac{\omega_g^4 + (2\xi_g \omega_g \omega)^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_g \omega_g \omega)^2} \quad (17)$$

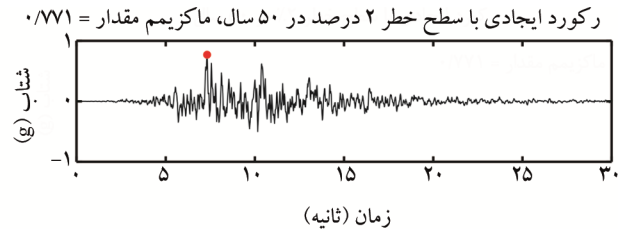
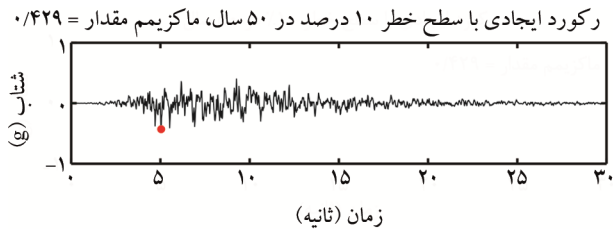
$$|H_h(\omega)|^2 = \frac{\omega^4}{(\omega_h^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_h \omega_h \omega)^2} \quad (18)$$

در این روابط ξ_g و ω_g به ترتیب ضریب میرایی غالب موقعیت مورد مطالعه و فرکانس زمین برای محتوای فرکانسی بالا است. برای محتوای فرکانسی پایین نیز از دو پارامتر ξ_h و ω_h استفاده می‌شود.

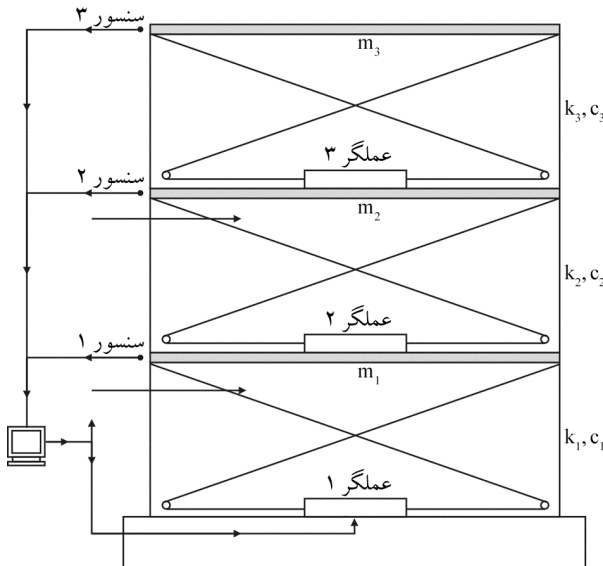
به منظور محاسبه پارامترهای G_0 ، ξ_g ، ξ_h ، ω_g و ω_h برای یک زمین‌لرزه با سطح خطر یکنواخت در یک منطقه، چگالی طیفی توان مطابق رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود.

جدول (۲): مقادیر پارامترهای لازم برای منطقه لس آنجلس در سطوح خطر مختلف [۵۰].

سطح خطر	پارامتر	G_0	ζ_g	ω_g	ζ_h	ω_h	t_1	t_2	α	β
۱۰٪ در سال	میانگین	۲۶۳/۴	۱/۶۰	۱۱/۷۴	۰/۷۹	۰/۴۳	۴/۷۸	۸/۹۶	۲/۶۰	۰/۱۳
	انحراف معیار	۳۶۲/۷۱	۱/۰۶	۷/۹۸	۰/۰۷	۰/۷۳	۴/۱۲	۵/۲۴	۰/۵۰	۰/۰۵
۲٪ در سال	میانگین	۷۸۸/۴	۱/۴۲	۹/۷۵	۰/۷۳	۰/۹۵	۷/۱۶	۱۰/۵۶	۲/۷۰	۰/۱۶
	انحراف معیار	۸۵۱/۳۴	۰/۵۱	۳/۱۳	۰/۰۷	۰/۵۳	۲/۷۴	۳/۵۳	۰/۴۷	۰/۰۴



شکل (۳): تاریخچه زمانی رکوردهای مصنوعی تولید شده.



شکل (۴): مدل سازه‌های برشی ۳ طبقه به همراه موقعیت کابل فعال [۲۶].

مقایسه‌ای بین نتایج کنترل نشده و کنترل شده حاصل از مدل‌سازی و مقاله مرجع و به تفکیک رکوردهای ۱۰ درصد در ۵۰ سال و ۲ درصد در ۵۰ سال در جدول (۳) ارائه شده است. نتایج ارائه شده در حالت کنترل شده حاصل از عملکرد کنترلر LQR بوده و مقادیر ماتریس‌های وزنی آن بدون استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی و تنها با مقداردهی اولیه تعیین شده است. با مقایسه نتایج ارائه شده اعم از فرکانس طبیعی و پاسخ‌های کنترل نشده و کنترل شده می‌توان به تطابق مناسب نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج ارائه شده در مقاله مرجع اشاره کرد.

۵- صحت‌سنجی و مطالعه عددی

در این بخش به منظور اطمینان از روند حل مسئله، ابتدا به صحت‌سنجی مدل‌سازی و روش تحلیل پرداخته شده و در ادامه مدل‌سازی صورت گرفته در این مطالعه به همراه کنترلر پیشنهادی شرح داده شده است.

۵-۱- صحت‌سنجی

در این قسمت ابتدا قاب برشی ۳ طبقه مورد مطالعه توسط کاتی و شعاعی پرچین [۵۱] مدل شده است. جرم و سختی هر طبقه از این سازه به ترتیب برابر ۱۰۰۰ کیلوگرم و ۹۸۰ کیلو نیوتن بر متر می‌باشد. نسبت میرایی طبقات نیز به ترتیب برابر ۰/۰۱، ۰/۰۲۸ و ۰/۰۴ فرض شده است. کابل‌های فعال در هر سه طبقه قرار گرفته و منجر به کنترل ارتعاشات ناشی از دو رکورد مصنوعی تولید شده گردیده است که تاریخچه زمانی این رکوردها در شکل (۳) نشان داده شده است. سه فرکانس طبیعی این سازه نیز به ترتیب ۱۳/۹۳۲، ۳۹/۰۳۶ و ۵۶/۴۰۹ رادیان بر ثانیه می‌باشد. نمایی شماتیک از سازه ۳ طبقه به همراه موقعیت کابل فعال در شکل (۴) نشان داده شده است که در آن m_i ، k_i و c_i به ترتیب معرف جرم، سختی و میرایی هر طبقه می‌باشد [۲۶]. فرکانس‌های طبیعی حاصل از مدل‌سازی نیز به ترتیب ۱۳/۹۳۲، ۳۹/۰۳۶ و ۵۶/۴۰۹ رادیان بر ثانیه به دست آمده است.

جدول (۳): مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی و مقاله مرجع.

نتایج حاصل از	تحریک	حالت کنترلی	حداکثر تغییر مکان طبقه فوقانی (متر)	حداکثر سرعت طبقه فوقانی (متر بر ثانیه)	حداکثر شتاب طبقه فوقانی (متر بر مجذورثانیه)	حداکثر نیروی کنترل طبقه فوقانی (کیلو نیوتن)
کاتبی و شعاعی پرچین [۵۱]	۱۰ درصد	کنترل نشده	۰/۱۰۵۱	۱/۴۴۶۹	۱۹/۸۱۹۳	---
	در ۵۰ سال	کنترل شده	۰/۰۲۹۵	۰/۴۱۰۷	۶/۱۸۱۷	۱/۸۷۵۰
حاصل از مدل‌سازی	۲ درصد	کنترل نشده	۰/۲۳۹۸	۳/۲۸۱۵	۴۸/۱۳۷۸	---
	در ۵۰ سال	کنترل شده	۰/۰۶۳۳	۰/۶۹۷۸	۱۲/۶۵۴۷	۳/۲۵۰۸
حاصل از مدل‌سازی	۱۰ درصد	کنترل نشده	۰/۱۰۵۱	۱/۴۴۶۳	۱۹/۸۱۰۷	---
	در ۵۰ سال	کنترل شده	۰/۰۳۰۰	۰/۴۰۸۹	۶/۳۷۹۲	۲/۰۰۰۱
	۲ درصد	کنترل نشده	۰/۲۳۹۷	۳/۲۸۰۰	۴۸/۱۱۶۰	---
در ۵۰ سال	کنترل شده	۰/۰۶۳۵	۰/۷۰۵۷	۱۱/۹۷۱۵	۳/۲۹۳۹	

جدول (۴): مشخصه‌های پارامترهای تصادفی مورد بررسی.

متغیر تصادفی	C.O.V	تابع توزیع
میرایی	۳۰ درصد	نرمال
سختی	۱۰ درصد	لوگ نرمال
جرم	۱۰ درصد	نرمال

در ابتدا پاسخ‌های سازه در حالت کنترل نشده و تحت هر دو رکورد زلزله مصنوعی تولید شده به دست می‌آید. در ادامه بدون در نظر گرفتن اثر عدم قطعیت پارامتری و نویز در حس گرها، با استفاده از الگوریتم LQR با ماتریس‌های وزنی ثابت پاسخ‌های سازه در حالت کنترل شده و با استفاده از پسخوراند حالت محاسبه می‌شود. برای این منظور بهره کنترل با استفاده از دو مقدار ثابت محاسبه شده که به عنوان نمونه برای سازه ۳ طبقه در زیر نشان داده شده است.

$$R = 0.5 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$Q = 2.3810 \times 10^7 \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 \end{bmatrix}$$

با توجه به عملکرد نامناسب الگوریتم پر کاربرد LQR در حضور نویز و عدم قطعیت، از الگوریتم فازی برای تغییر آنالاین ماتریس وزنی R به صورت تابعی از زمان $R(t)$ ، برای مواجهه با نویز و عدم قطعیت بهره برده شده است. همان‌طور که پیش‌تر بیان

۵-۲- مطالعه عددی

در این مطالعه به منظور بررسی کارایی الگوریتم کنترل پیشنهادی و نشان دادن توانایی آن نسبت به الگوریتم‌های LQR و LQR بهینه شده با الگوریتم‌های فراکاوشی مختلف، ابتدا از سازه ۳ طبقه استفاده شده توسط کاتبی و شعاعی پرچین [۵۱] استفاده شده است که در بخش صحت‌سنجی به مشخصات آن اشاره گردید تا در نهایت بتوان مقایسه بین نتایج حاصل از الگوریتم LQR پیشنهادی و الگوریتم LQR بهینه شده با الگوریتم‌های فراکاوشی انجام داد. در ادامه به منظور بررسی توانایی روش پیشنهادی در سازه‌هایی با تعداد طبقات مختلف، از سازه‌ای ۸ طبقه استفاده شده است که جرم، سختی و میرایی تمام طبقات آن به ترتیب ۳۴۵/۶ تن، ۶۸۰ مگانیوتن بر متر و ۷۳۴ کیلو نیوتن ثانیه بر متر می‌باشد [۲۶]. در این سازه‌ها عملکرد کابل فعال در تمامی طبقات مورد استفاده قرار گرفته است. همان‌طور که در بخش صحت‌سنجی اشاره شد، این سازه‌ها تحت تأثیر دو رکورد زلزله مصنوعی با سطح خطر ۱۰ درصد در ۵۰ سال و ۲ درصد در ۵۰ سال قرار گرفته است. در ادامه به منظور واقعی‌تر شدن مدل‌سازی، تأثیر نویز در حس گرها به همراه اثر عدم قطعیت مدل‌سازی در فرآیند شبیه‌سازی نیز منظور شده است. جدول (۴) مقادیر ضریب تغییرات^۸ را برای عدم قطعیت‌های مورد بررسی با توابع توزیع مربوطه نشان می‌دهد [۵۲].

مورد بررسی قرار گرفته است. به‌طور کلی ابتدا به بررسی توانایی این روش با حضور عدم قطعیت و نویز حس‌گرها در برابر الگوریتم LQR پرداخته شده است و در ادامه نتایج این روش با الگوریتم LQR که ماتریس‌های وزنی آن با الگوریتم‌های فراکاوشی مختلف بهینه‌یابی شده‌اند، مقایسه گردیده است.

۶-۱- بررسی توانایی الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم

LQR

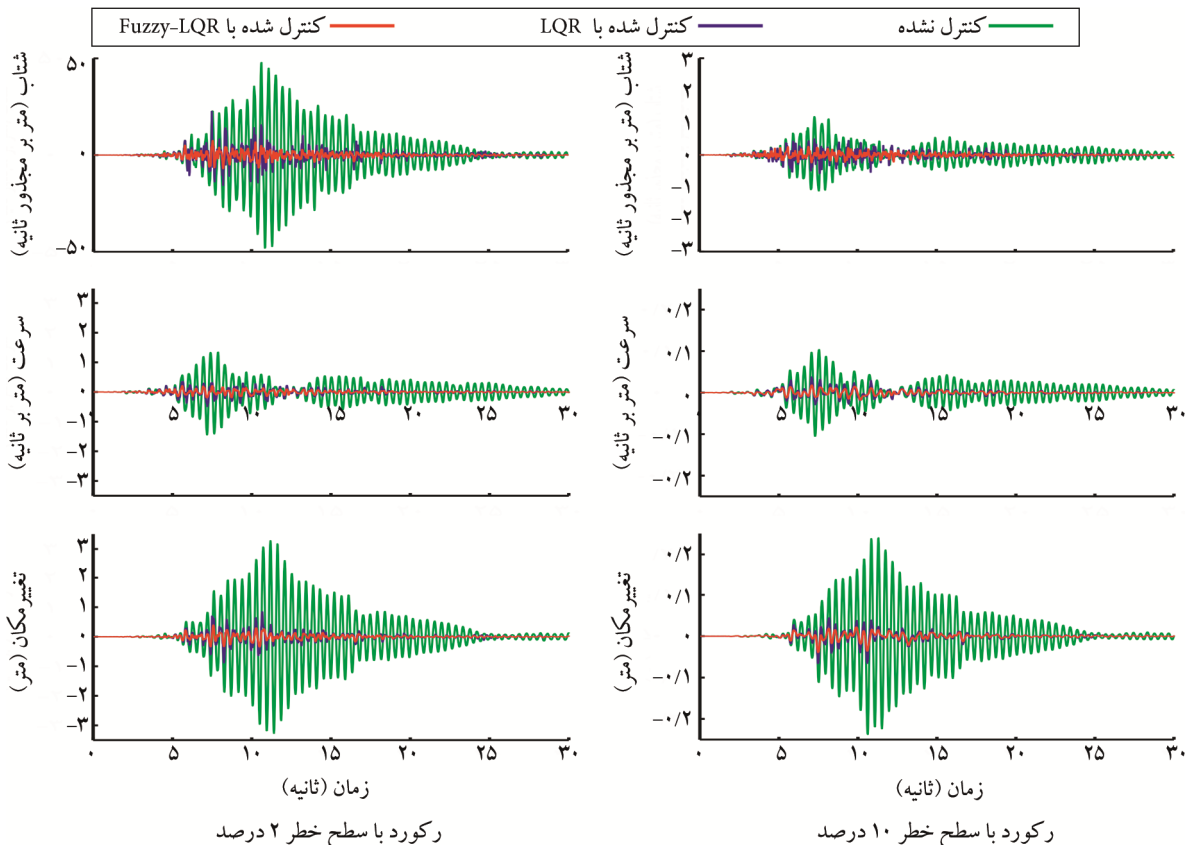
تاریخچه زمانی پاسخ‌های تغییر مکان، سرعت و شتاب طبقه بام سازه ۳ طبقه به تفکیک حالت کنترل نشده، کنترل شده با الگوریتم LQR با ماتریس‌های ثابت و کنترل شده با الگوریتم پیشنهادی Fuzzy-LQR تحت هر دو رکورد با سطح خطر ۱۰ درصد در ۵۰ سال و ۲ درصد در ۵۰ سال و در حضور عدم قطعیت پارامتری و نویز در حس‌گرها در شکل (۵) نشان داده شده است. با مقایسه اولیه نتایج می‌توان به کاهش بیشتر پاسخ‌های تراز بام سازه توسط الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم LQR پی برد.

شد تنظیم کننده فازی به صورت تک‌ورودی تک‌خروجی با سیستم استنتاج ممدانی طراحی شده است. توابع عضویت مربوط به مقادیر ورودی و خروجی کنترل کننده فازی در شکل (۱) به تصویر کشیده شده است. متغیرهای ورودی فازی بین بازه $[0,1]$ با استفاده از ضریب ارائه شده در رابطه (۲۵)، که در آن v_{max} برابر حداکثر سرعت ایجاد شده در طبقه بام سازه کنترل نشده می‌باشد، بی‌بعد شده‌اند. این ضریب مقیاس بر اساس مطالعات ویلسون و عبدالله [۵۳] به صورت درصدی از معکوس حداکثر سرعت انتخاب شده است و مقدار این درصد بر اساس سعی و خط و با هدف بهبود عملکرد کنترلر تعیین می‌گردد [۵۴]. قوانین فازی مورد استفاده نیز در جدول (۱) ارائه گردیده است.

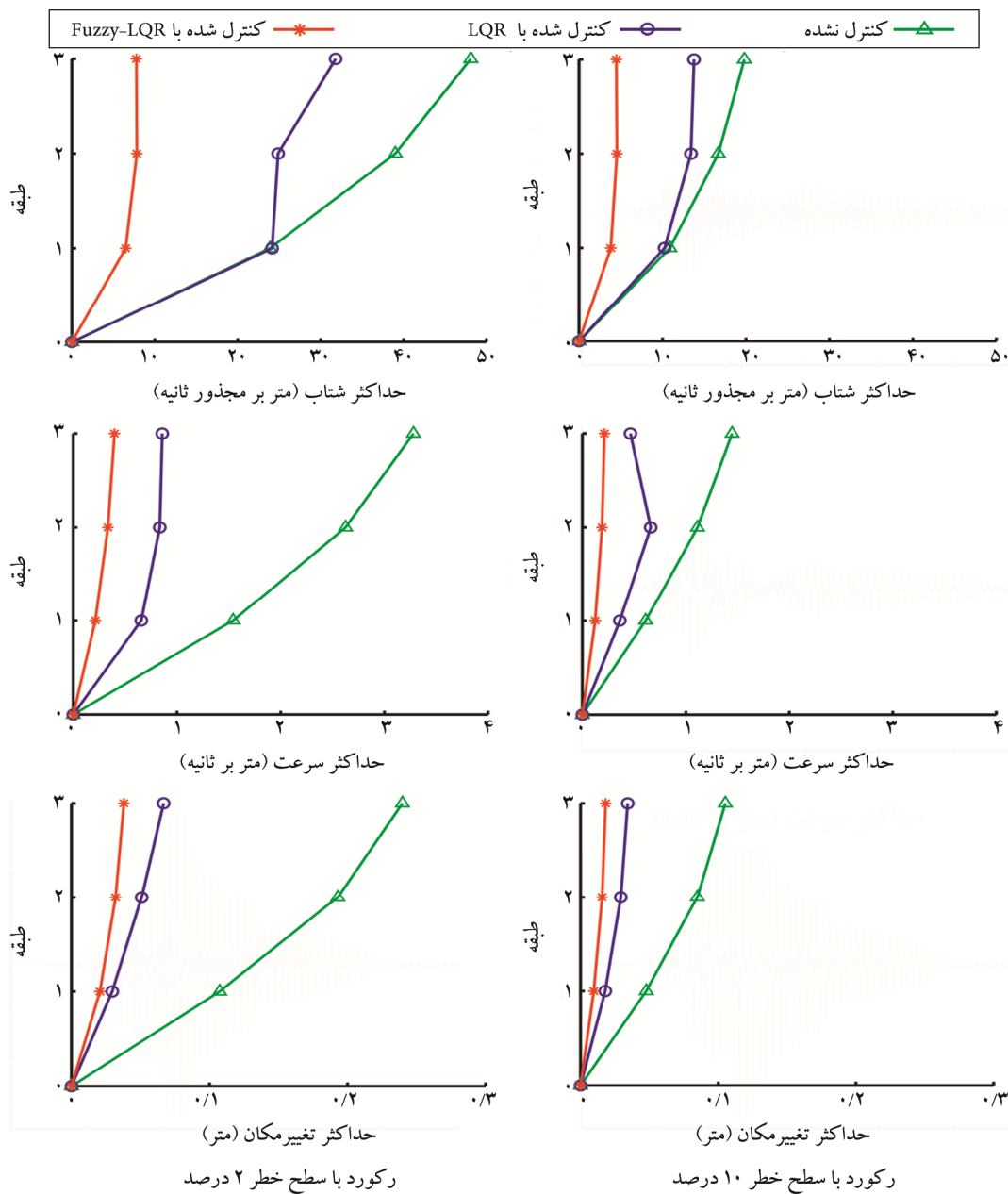
$$k_v = \frac{1}{20|v_{max}|} \quad (25)$$

۶- ارزیابی نتایج

در این بخش نتایج مربوط به الگوریتم کنترلی پیشنهادی برای رفع مشکلات الگوریتم LQR ارائه شده است و پاسخ‌های مختلفی



شکل (۵): مقایسه تاریخچه زمانی پاسخ‌های تراز بام سازه ۳ طبقه.



شکل (۶): مقایسه حداکثر پاسخ‌های سازه ۳ طبقه در تمام طبقات تحت هر دو رکورد مصنوعی تولید شده.

پاسخ‌های کنترل شده با الگوریتم LQR و Fuzzy-LQR افزایش می‌یابد که نشان از بهبود کارایی الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم LQR می‌باشد.

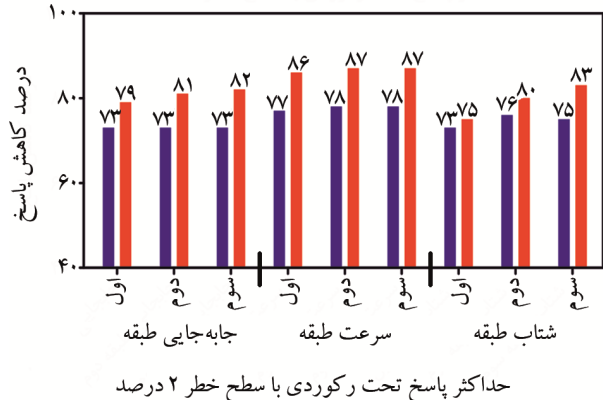
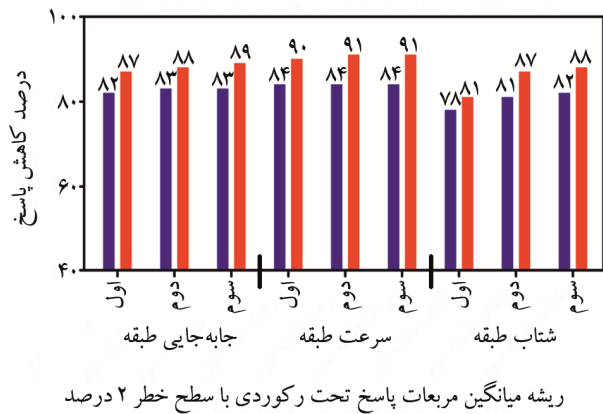
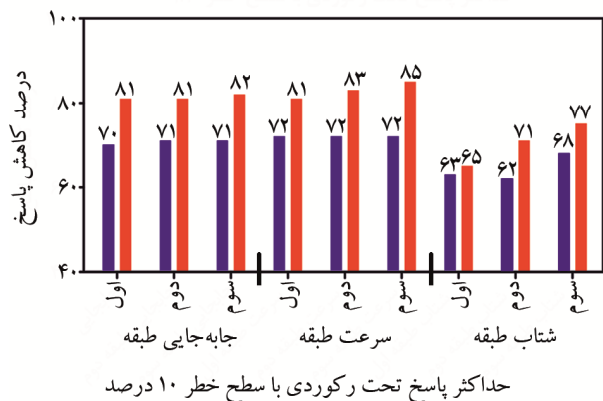
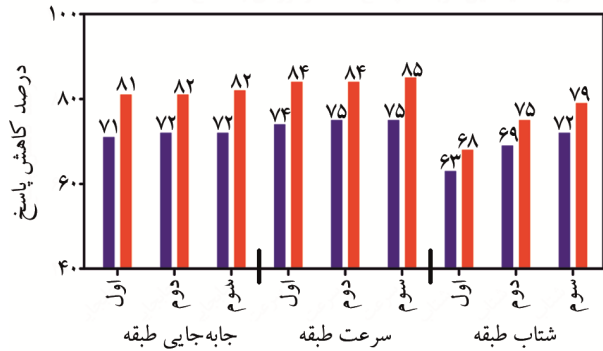
با توجه به شکل‌های (۵) و (۶) می‌توان به کاهش مناسب حداکثر پاسخ سازه در صورت استفاده از الگوریتم پیشنهادی اشاره کرد. در ادامه به منظور بررسی دقیق عملکرد الگوریتم Fuzzy-LQR در طول زمان تحریک، ریشه میانگین مربعات ۹ پاسخ‌ها مورد توجه قرار گرفته است. در شکل (۷) درصد کاهش حداکثر و ریشه میانگین

در شکل (۶) حداکثر پاسخ‌های تمام طبقات سازه ۳ طبقه در حالات کنترل نشده (سبز)، کنترل شده با الگوریتم LQR با ماتریس‌های ثابت (آبی) و کنترل شده با الگوریتم پیشنهادی Fuzzy-LQR (قرمز) نشان داده شده است. با مقایسه نتایج ارائه شده در این شکل می‌توان به کارایی بالایی الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم LQR در کاهش پاسخ‌های سازه در تمام طبقات پی برد. همچنین با توجه به شکل (۶) می‌توان به این نکته نیز اشاره کرد که با کاهش سطح خطر زمین‌لرزه، تفاوت بین

مربعات تمامی پاسخ‌های سازه ۳ طبقه در صورت استفاده از الگوریتم LQR (آبی) و الگوریتم Fuzzy-LQR (قرمز) ارائه شده است. به‌عنوان مثال تحت زمین‌لرزه با سطح خطر ۱۰ درصد و در صورت استفاده از الگوریتم‌های LQR و Fuzzy-LQR حداکثر پاسخ شتاب طبقه بام سازه به ترتیب ۶۸ و ۷۷ درصد کاهش می‌یابد، در صورتی که ریشه میانگین مربعات این پاسخ نیز به ترتیب ۷۲ و ۷۹ درصد کاهش یافته است. با توجه به شکل (۷) می‌توان دریافت که در تمامی پاسخ‌ها عملکرد الگوریتم پیشنهادی به مراتب بهتر از الگوریتم LQR می‌باشد. همچنین این الگوریتم علاوه بر عملکرد مناسب در کاهش حداکثر پاسخ‌ها، در طول مدت‌زمان تحریک نیز کارایی قابل قبولی دارد و میزان کاهش ریشه میانگین مربعات پاسخ‌ها بیشتر از حداکثر پاسخ‌ها می‌باشد. از دیگر نکات مربوط به این شکل می‌توان به این نکته اشاره کرد که عملکرد کنترلر پیشنهادی در کاهش پاسخ‌ها با بالاتر رفتن طبقات سازه بهبود می‌یابد. با کاهش سطح خطر زمین‌لرزه عملکرد کنترلر بهتر شده و در برخی موارد تا ۹۰ درصد کاهش پاسخ اتفاق می‌افتد.

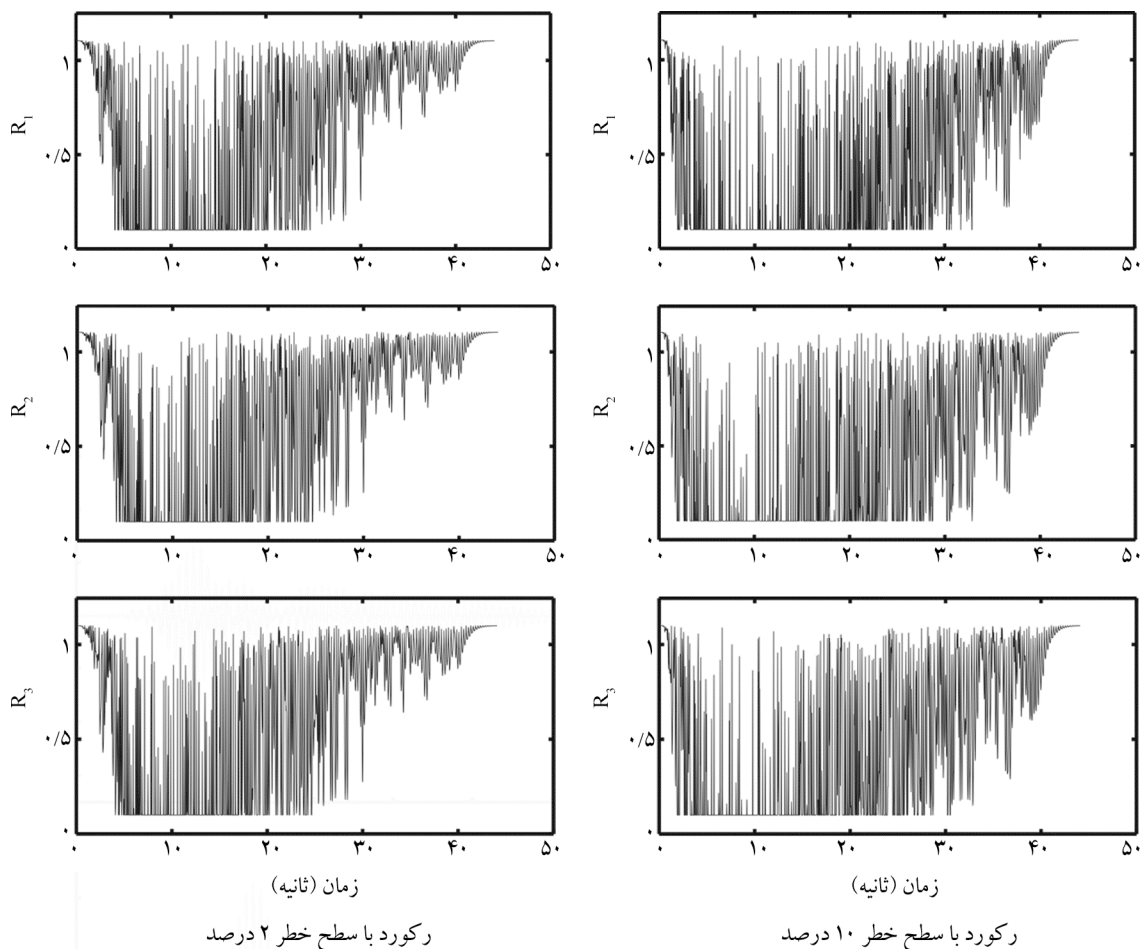
همان‌طور که قبلاً اشاره شد، الگوریتم کنترل پیشنهادی مقدار ماتریس وزنی R را در هر لحظه مطابق با تحریک ورودی تغییر می‌دهد که در شکل (۸) تاریخچه زمانی این ماتریس به تفکیک رکوردهای مورد استفاده نشان داده شده است. از آنجایی که در تمام طبقات سازه ۳ طبقه عملگر کابل فعال استفاده شده است، سه ضریب برای ماتریس وزنی R وجود دارد که در شکل (۸) به ترتیب با R_1 ، R_2 و R_3 نشان داده شده است. با توجه به شکل (۸) باید به این نکته اشاره کرد که در این روش برخی مواقع و به‌ناچار از حداکثر ظرفیت عملگر استفاده شده ولی در اکثر مواقع (بسته به محتوای فرکانسی زلزله) از انرژی خیلی پایین عملگر استفاده شده است و این در حالی است که الگوریتم LQR از حداکثر ظرفیت عملگر در طول مدت‌زمان رکورد استفاده می‌کند که این روش اصلاً اقتصادی و اجرایی نیست.

شکل (۷): میزان درصد کاهش حداکثر و ریشه میانگین مربعات پاسخ‌های سازه ۳ طبقه به تفکیک الگوریتم‌های کنترلی مورد استفاده.



مقدار برای سازه ۳ طبقه ۷۱ درصد می‌باشد. با این حال الگوریتم پیشنهادی پاسخ سازه ۸ طبقه را بیش از ۸۱ درصد کاهش می‌دهد که این مقدار نیز برای سازه ۳ طبقه ۸۲ درصد می‌باشد. به عبارتی این مقایسه نشان می‌دهد که برخلاف الگوریتم LQR، روش پیشنهادی عملکرد مناسب و تقریباً ثابتی در سازه‌هایی با طبقات مختلف دارد و نتایج به افزایش یا کاهش طبقات حساس نیست.

در ادامه به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی در سازه‌های بلندمرتبه، از سازه‌ای ۸ طبقه استفاده شده است که نتایج آن تحت رکوردهایی با سطح خطر ۱۰ و ۲ درصد در ۵۰ سال به ترتیب در جدول‌های (۵) و (۶) ارائه شده است. نتایج ارائه شده در جدول (۵) نشان می‌دهد که الگوریتم LQR قادر است حداکثر پاسخ تغییر مکان بام سازه ۸ طبقه را به میزان ۵۴ درصد کاهش دهد که این



شکل (۸): تاریخچه زمانی ماتریس‌های وزنی R در سازه ۳ طبقه مورد مطالعه برای الگوریتم Fuzzy-LQR پیشنهادی.

جدول (۵): مقایسه پاسخ سازه ۸ طبقه در صورت استفاده از انواع الگوریتم‌های کنترلی تحت رکوردی با سطح خطر ۱۰ درصد در ۵۰ سال.

حداکثر نیروی کنترل طبقه فوقانی (کیلو نیوتن)	حداکثر شتاب طبقه فوقانی (متر بر مجذور ثانیه)	حداکثر سرعت طبقه فوقانی (متر بر ثانیه)	حداکثر تغییر مکان طبقه فوقانی (متر)	حالت کنترلی
---	۱۵/۶۹۸۴	۱/۲۱۷۹	۰/۱۳۶۱	Uncontrolled
۲۱۰۳/۴	۸/۰۳۸۷	۰/۴۳۰۴	۰/۰۶۲۸	LQR
۵۰۷/۶۷	۱۱/۷۵۲۱	۰/۱۹۵۸	۰/۰۲۵۱	Fuzzy-LQR (without)
۵۴۳/۴۳	۱۰/۴۱۷۹	۰/۲۱۵۲	۰/۰۲۷۶	Fuzzy-LQR (with)

جدول (۶): مقایسه پاسخ سازه ۸ طبقه در صورت استفاده از انواع الگوریتم‌های کنترلی تحت رکوردی با سطح خطر ۲٪ در ۵۰ سال.

حداکثر نیروی کنترل طبقه فوقانی (کیلو نیوتن)	حداکثر شتاب طبقه فوقانی (متر بر مجذور ثانیه)	حداکثر سرعت طبقه فوقانی (متر بر ثانیه)	حداکثر تغییر مکان طبقه فوقانی (متر)	حالت کنترلی
---	۱۸/۵۷۴۰	۱/۹۳۹۲	۰/۲۳۵۱	Uncontrolled
۱۱۵۷/۷	۴/۷۱۴۶	۰/۲۴۴۴	۰/۰۳۱۱	LQR
۲۷۷/۳۴	۴/۹۶۳۶	۰/۰۹۲۰	۰/۰۱۵۸	Fuzzy-LQR (without)
۲۰۸/۲۵	۳/۹۶۹۷	۰/۰۹۲۰	۰/۰۱۵۳	Fuzzy-LQR (with)

(Uncontrolled)، کنترل شده با الگوریتم LQR با ضرایب ثابت (LQR)، کنترل شده با الگوریتم LQR با ضرایب بهینه شده توسط الگوریتم‌های رقابت استعماری (ICA)^{۱۰}، تکامل تفاضلی (DE)^{۱۱}، خفاش (BA)^{۱۲}، کرم شب تاب (FA)^{۱۳}، اجسام در حال برخورد (CB)^{۱۴}، جستجوی هارمونی (HS)^{۱۵} ارائه شده است. همچنین در این دو جدول مقادیر پاسخ‌های محاسبه شده با استفاده از الگوریتم پیشنهادی Fuzzy-LQR بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامتری و نویز در حس گرها (without) و با در نظر گرفتن آنها (with) آورده شده است.

با مقایسه نتایج ارائه شده در جدول‌های (۷) و (۸) می‌توان نتیجه گرفت که کمترین میزان پاسخ‌ها مربوط به الگوریتم پیشنهادی می‌باشد که نسبت به تمامی روش‌های مبتنی بر بهینه‌یابی عملکرد بهتری دارد.

۲-۶- بررسی توانایی الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم LQR بهینه شده

در این بخش به منظور نشان دادن توانایی کنترلر پیشنهادی Fuzzy-LQR که در آن ماتریس وزنی بر اساس یک ناظر فازی تعیین می‌شود نسبت به زمانی که ماتریس‌های وزنی کنترلر LQR با استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی بهینه شوند، مقایسه‌ای صورت گرفته است. در این مقایسه نتایج حاصل از بهینه‌یابی انجام شده توسط کاتی و شعاعی پرچین [۵۱] بر روی سازه ۳ طبقه با نتایج حاصل از کنترلر پیشنهادی Fuzzy-LQR بر روی همان سازه مورد بررسی قرار گرفته است. این نتایج در جدول‌های (۷) و (۸) به ترتیب برای زمین‌لرزه‌ای با سطح خطر ۱۰ و ۲ درصد در ۵۰ سال ارائه شده‌اند.

در این جداول نتایج مربوط به حالات کنترل نشده

جدول (۷): مقایسه پاسخ سازه ۳ طبقه در صورت استفاده از انواع الگوریتم‌های کنترلی تحت رکوردی با سطح خطر ۱۰ درصد در ۵۰ سال.

حداکثر نیروی کنترل طبقه فوقانی (کیلو نیوتن)	حداکثر شتاب طبقه فوقانی (متر بر مجذور ثانیه)	حداکثر سرعت طبقه فوقانی (متر بر ثانیه)	حداکثر تغییر مکان طبقه فوقانی (متر)	حالت کنترلی
---	۱۹/۸۱۰۷	۱/۴۴۶۳	۰/۱۰۵۱	Uncontrolled
۲/۰۰۰۱	۶/۳۷۹۲	۰/۴۰۸۹	۰/۰۳۰۰	LQR
۱/۷۲۷۲	۶/۵۸۷۱	۰/۳۱۹۸	۰/۰۲۷۶	[۵۱] ICA
۱/۷۷۶۶	۶/۵۷۴۹	۰/۲۹۰۵	۰/۰۲۵۸	[۵۱] DE
۱/۷۷۹۴	۶/۵۲۹۱	۰/۳۰۸۲	۰/۰۲۶۷	[۵۱] BA
۱/۸۰۷۸	۶/۹۹۱۱	۰/۳۱۹۹	۰/۰۲۵۸	[۵۱] FA
۱/۷۰۸۴	۷/۰۳۷۶	۰/۳۲۰۱	۰/۰۲۸۸	[۵۱] CB
۱/۶۹۹۹	۷/۰۴۷۱	۰/۳۱۸۷	۰/۰۲۸۵	[۵۱] HS
۱/۹۹۸۸	۴/۴۳۷۰	۰/۲۱۳۴	۰/۰۱۸۳	Fuzzy-LQR (without)
۲/۱۲۷۰	۴/۴۵۵۸	۰/۲۲۱۷	۰/۰۱۹۰	Fuzzy-LQR (with)

جدول (۸): مقایسه پاسخ سازه ۳ طبقه در صورت استفاده از انواع الگوریتم‌های کنترلی تحت رکوردی با سطح خطر ۲ درصد در ۵۰ سال.

حداکثر نیروی کنترل طبقه فوقانی (کیلو نیوتن)	حداکثر شتاب طبقه فوقانی (متر بر مجذور ثانیه)	حداکثر سرعت طبقه فوقانی (متر بر ثانیه)	حداکثر تغییر مکان طبقه فوقانی (متر)	حالت کنترلی
---	۴۸/۱۱۶۰	۳/۲۸۰۰	۰/۲۳۹۷	Uncontrolled
۳/۲۹۳۹	۱۱/۹۷۱۵	۰/۷۰۵۷	۰/۰۶۳۵	LQR
۳/۱۳۳۵	۱۱/۶۴۴۲	۰/۶۶۹۹	۰/۰۵۴۷	[۵۱] ICA
۳/۱۶۹۷	۱۲/۲۹۲۵	۰/۶۶۴۸	۰/۰۵۵۹	[۵۱] DE
۳/۲۲۲۴	۱۰/۷۹۳۴	۰/۶۶۱۰	۰/۰۵۳۵	[۵۱] BA
۳/۲۰۸۹	۱۱/۸۸۶۴	۰/۶۶۱۱	۰/۰۵۳۹	[۵۱] FA
۳/۲۲۴۷	۱۱/۸۳۸۰	۰/۶۶۸۳	۰/۰۵۴۱	[۵۱] CB
۳/۲۰۴۴	۱۱/۹۷۳۴	۰/۶۵۶۶	۰/۰۵۴۴	[۵۱] HS
۳/۲۹۲۶	۸/۲۴۴۱	۰/۴۲۲۱	۰/۰۴۰۶	Fuzzy-LQR (without)
۴/۳۴۸۲	۷/۹۴۴۳	۰/۴۱۶۹	۰/۰۴۰۵	Fuzzy-LQR (with)

۶۸ درصدی در میزان حداکثر نیروی کنترل طبقه سوم نسبت به روش بهینه‌یابی BA در حالتی که پاسخ‌های مشابه به دست آید، دارد. با تجسم مساحت زیر منحنی نیرو-تغییر مکان به‌عنوان شاخصی از انرژی، می‌توان به میزان زیاد انرژی صرفه‌جویی شده در فرآیند کنترل پی برد.

۱۲- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به ارائه روشی برای افزایش کارایی الگوریتم پرکاربرد LQR در حضور عدم قطعیت و نویز در حس‌گرها پرداخته شده است. به این منظور از ناظر فازی برای تغییر آنالاین ماتریس وزنی مربوط به نیروی کنترل (R) در الگوریتم LQR استفاده شده است. برای بررسی این روش از دو سازه دو بعدی ۳ و ۸ طبقه با کابل فعال و دو رکورد زلزله مصنوعی با سطوح خطر مختلف استفاده شده است. نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

- کنترلر Fuzzy-LQR پیشنهادی قادر است تمامی پاسخ‌های سازه را در تمام طبقات بیشتر از کنترلر LQR کاهش دهد. به‌عنوان مثال پاسخ‌های تغییر مکان، سرعت و شتاب طبقات سازه ۳ طبقه با استفاده از کنترلر پیشنهادی و تحت زلزله با سطح خطر ۱۰ درصد به‌طور میانگین به‌ترتیب ۸۱، ۸۳ و

با وجود افزایش حداکثر مقدار نیروی کنترلی در صورت وجود عدم قطعیت و نویز، روش پیشنهادی سعی کرده است مقادیر پاسخ افزایشی نداشته باشد که با توجه به مقادیر ماتریس وزنی R در طول زمان تحریک می‌توان نتیجه گرفت که در حالت کلی میانگین مقادیر این ماتریس کمتر از الگوریتم LQR با ضرایب ثابت می‌باشد که نشان از صرف انرژی کم در طول زمان تحریک دارد. لازم به ذکر است که افزایش نیروی کنترلی در روش پیشنهادی نسبت به دیگر روش‌ها فقط در کسری از ثانیه و آن هم در بیشینه شتاب زمین اتفاق افتاده است و در طول فرآیند شبیه‌سازی مقدار نیروی مصرفی به‌مراتب پایین‌تر از روش‌های دیگر می‌باشد.

به‌منظور نشان دادن توانایی روش پیشنهادی در کاهش نیروی کنترل و به دنبال آن انرژی لازم برای کاهش پاسخ سیستم، با تنظیم ظرفیت عملگر تحت ارتعاش ناشی از زمین‌لرزه با سطح خطر ۲٪، سعی گردید مقادیر پاسخ‌های (تغییر مکان، سرعت و شتاب) حاصل از روش بهینه‌یابی BA ارائه شده در جدول (۸) حاصل شود. نیروی کنترل طبقه فوقانی در حالت استفاده از روش BA برابر با ۳/۲۲۲۴ کیلو نیوتن می‌باشد که این مقدار با استفاده از روش پیشنهادی در این مطالعه برابر با ۱/۰۰۷۳ کیلو نیوتن به دست می‌آید. مقادیر به‌دست آمده نشان از کاهش

- learned in seismic-resistant bridge design. *Public Roads*, **58**(1).
2. Ghasemi, H. and Otsuka, H. (1996) Aftermath of the Kobe earthquake. *Public Roads*, **60**(2), 17-22.
 3. Liel, A.B. and Haselton, C.B. (2009) Lessons learned from seismic collapse assessment of buildings for evaluation of bridge structures. in *TCLÉE 2009: Lifeline Earthquake Engineering in a Multihazard Environment*. p. 1-12.
 4. Soong, T. and Spencer Jr, B. (2002) Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice. *Engineering Structures*, **24**(3), 243-259.
 5. Anajafi, H. and Medina, R.A. (2018) Comparison of the seismic performance of a partial mass isolation technique with conventional TMD and base-isolation systems under broad-band and narrow-band excitations. *Engineering Structures*, **158**, 110-123.
 6. Warburton, G. and Ayorinde, E. (1980) Optimum absorber parameters for simple systems. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **8**(3), 197-217.
 7. Soong, T. (1988) State-of-the-art review: active structural control in civil engineering. *Engineering Structures*, **10** (2), 74-84.
 8. Spencer, Jr, B., Dyke, S. and Deoskar, H. (1998) Benchmark problems in structural control: part II—active tendon system. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **27**(11), 1141-1147.
 9. Farzam, M.F., Jalali, H.H., Mousavi Gavgani, S.A.M., Kayabekir, A.E. and Bekdaş, G. (2021) Current Trends in the Optimization Approaches for Optimal Structural Control. *Advances in Structural Engineering—Optimization*, 133-179.
 10. Nigdeli, S. and Boduroğlu, M. (2010) Active Tendons for Seismic Control of Buildings. *World Academy of Science, ICMSE, Paris July*, **68**, 1258-1264.
 11. Joghataie, A. and Mohebbi, M. (2012) Optimal control of nonlinear frames by Newmark and distributed genetic algorithms. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **21**(2), 77-95.
 12. Yanik, A. and Aldemir, U. (2019) A simple structural control model for earthquake excited

- ۷۱ درصد کاهش می‌یابد که این مقادیر در صورت استفاده از کنترلر LQR به ترتیب برابر با ۷۱، ۷۲ و ۶۴ درصد می‌باشد.
- با کاهش سطح خطر زمین‌لرزه و یا به عبارتی افزایش شدت رکورد، عملکرد کنترلر Fuzzy-LQR نسبت به LQR بهتر می‌شود.
 - ریشه میانگین مربعات پاسخ‌ها نسبت به حداکثر مقدار آنها کاهش بیشتری را تجربه کرده است که نشان از عملکرد مناسب الگوریتم پیشنهادی در طول زمان تحریک می‌باشد.
 - کنترلر پیشنهادی در صورت وجود عدم قطعیت پارامتری و نویز در حس‌گرها نیز قادر است عملکرد خویش را حفظ کرده و مشکل الگوریتم LQR در این زمینه را بهبود بخشد.
 - کنترلر Fuzzy-LQR با تغییر آنالین ماتریس وزنی توسط ناظر فازی عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم‌های فراکاووشی در تعیین این ماتریس‌ها دارد.
 - در کنترلر پیشنهادی و در برخی مواقع (وجود عدم قطعیت) به‌ناچار از حداکثر ظرفیت عملگر استفاده شده ولی در اکثر مواقع از انرژی خیلی پایین عملگر استفاده می‌گردد و این در حالی است که الگوریتم LQR از حداکثر ظرفیت عملگر در طول مدت‌زمان رکورد استفاده می‌کند. با این وجود با استفاده از روش پیشنهادی، کاهش بیشتری در پاسخ‌های سازه روی داده است.
 - برخلاف الگوریتم LQR، کنترلر Fuzzy-LQR پیشنهادی حساس به تعداد طبقات سازه نیست و دچار افت عملکرد نمی‌شود.
 - در نهایت می‌توان اظهار داشت که الگوریتم پیشنهادی Fuzzy-LQR رفتاری مقاوم و پایدار در کاهش پاسخ‌ها حتی در صورت وجود عدم قطعیت پارامتری و نویز در حس‌گرها از خود نشان می‌دهد.

مراجع

1. Cooper, J.D., Friedland, I.M., Buckle, I.G., Nimis, R.B. and McMullin Bobb, N. (1994) The Northridge earthquake: progress made, lessons

- 129(11), 1268-1276.
23. Marco, A., Hennig, P., Bohg, J., Schaal, S. and Trimpe, S. (2016) Automatic LQR tuning based on Gaussian process global optimization. *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*.
 24. Solihin, M.I. and Akmeliawati, R. (2010) Particle swam optimization for stabilizing controller of a self-erecting linear inverted pendulum. *International Journal of Electrical and Electronic Systems Research*, **3**, 410-415.
 25. Shen, P. (2014) Application of genetic algorithm optimization LQR weighting matrices Control Inverted Pendulum. *Applied Mechanics and Materials*, Trans. Tech. Publ.
 26. Katebi, J., Shoaie-parchin, M., Shariati, M., Trung, N.T. and Khorami, M. (2019) Developed comparative analysis of metaheuristic optimization algorithms for optimal active control of structures. *Engineering with Computers*, 1-20.
 27. Das, S. and Chakraborty, A. (2020) Optimal Design of MRTLCD for Semi-active Vibration Control of Building Structures Using Genetic Algorithm, *Advances in Rotor Dynamics, Control, and Structural Health Monitoring*. Springer, 615-625.
 28. Karthick, S., Jerome, J., Kumar, E.V. and Raaja, G. (2016) APSO based weighting matrices selection of LQR applied to tracking control of SIMO system. *Proceedings of 3rd International Conference on Advanced Computing, Networking and Informatics*, Springer.
 29. Moghaddasie, B. and Jalaefar, A. (2019) Optimization of LQR method for the active control of seismically excited structures. *Smart Structures and Systems*, **23**(3), 243-261.
 30. Yazdanpanah, R., Mahjoob, M. and Abbasi, E. (2013) Fuzzy LQR controller for heading control of an unmanned surface vessel. *International Conference in Electrical and Electronics Engineering*.
 31. Sugeno, M. and Yasukawa, T. (1993) A fuzzy-logic-based approach to qualitative modeling. *IEEE Transactions on fuzzy systems*, **1**(1), 7-31.
 13. Rather, F. and Alam, M. (2020) Relative performance of linear quadratic regulator and pole placement technique for active seismic control of structures. in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.
 14. Ulusoy, S., Bekdaş, G., Nigdeli, S.M., Kim, S. and Geem, Z.W. (2021) Performance of optimum tuned PID controller with different feedback strategies on active-controlled structures. *Applied Sciences*, **11**(4), 1682.
 15. Mohammadi, R.K., Ghamari, H. and Farsangi, E.N. (2021) Active control of building structures under seismic load using a new uniform deformation-based control algorithm, *Structures*.
 16. Yanik, A. (2019) Absolute instantaneous optimal control performance index for active vibration control of structures under seismic excitation. *Shock and Vibration*.
 17. Miyamoto, K., and She, J., Sato, D., and Yasuo, N. (2018) Automatic determination of LQR weighting matrices for active structural control. *Engineering Structures*, **174**, 308-321.
 18. Heidari, A.H., Etedali, S. and Javaheri-Tafti, M.R. (2018) A hybrid LQR-PID control design for seismic control of buildings equipped with ATMD. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, **12**(1), 44-57.
 19. Sato, D., Chen, Y., Miyamoto, K. and She, J. (2019) A spectrum for estimating the maximum control force for passive-base-isolated buildings with LQR control. *Engineering Structures*, **199**, 109600.
 20. Miyamoto, K., Sato, D. and She, J. (2018) A new performance index of LQR for combination of passive base isolation and active structural control. *Engineering Structures*, **157**, 280-299.
 21. Alavinasab, A., Moharrami, H. and Khajepour, A. (2006) Active control of structures using energy-based LQR method. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **21**(8), 605-611.
 22. Bahar, O., Banan, M., Mahzoon, M. and Kitagawa, Y. (2003) Instantaneous optimal Wilson- θ control method. *Journal of Engineering Mechanics*,

- ATMD through a fuzzy PID controller. *Nonlinear Dynamics*, **58**(3), 553-564.
44. Mamdani, E.H. and Assilian, S. (1975) An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, **7**(1), 1-13.
 45. Fahimi Farzam, M., Alinejad, B. and Mousavi Gavvani, S.A. (2019) Seismic control of 10-Storey Shear frame using active tuned mass dampers and optimization by particle swarm optimization algorithm. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, **52**(8), 2073-2092.
 46. Joei, P. (2012) Multi-objective and semi-active control of buildings using variable stiffness and fuzzy logic. *University of Guilan* (in Persian).
 47. Kwak, S.-I., Choe, G., Kim, I.-S., Jo, G.-H. and Hwang, C.-J. (2015) A Study of an Modeling Method of TS fuzzy System Based on Moving Fuzzy Reasoning and Its Application. *arXiv preprint arXiv:1511.02432*.
 48. Katebi, J. and Shoaeei-Parchin, M. (2018) Optimal vibration control of structures using wavelet transform and colonial competitive algorithm. *Sharif Journal of Civil Engineering*, **33.2**(4.1), 135-143 (in Persian).
 49. Basone, F., Cavaleri, L., Di Trapani, F. and Muscolino, G. (2017) Incremental dynamic based fragility assessment of reinforced concrete structures: Stationary vs. non-stationary artificial ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **103**, 105-117.
 50. Fatemi, A., Bagheri, A., Amiri, G.G. and Ghafory-Ashtiany, M. (2012) Generation of uniform hazard earthquake accelerograms and near-field ground motions. *Journal of Earthquake and Tsunami*, **6**(02), 1250013.
 51. Katebi, J. and Shoaeei-Parchin, M. (2020) Comparison of the Performance of Metaheuristic Algorithms in Optimal Selection of LQR Weighting Matrices. *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, **7**(1), 71-91 (in Persian).
 52. Rathi, A.K. and Chakraborty, A. (2017) Reliability-based performance optimization of TMD for vibration control of structures with
 32. Yu, W. and Thenozhi, S. (2016) Active structural control with stable fuzzy PID techniques, *Springer*.
 33. Son, N.N., Van Kien, C. and Anh, H.P.H. (2019) Uncertain nonlinear system control using hybrid fuzzy LQR-sliding mode technique optimized with evolutionary algorithm. *Engineering Computations*.
 34. Housner, G., Bergman, L.A., Caughey, T.K., Chassiakos, A.G., Claus, R.O., Masri, S.F., Skelton, R.E., Soong, T., Spencer, B. and Yao, J.T. (1997) Structural control: past, present, and future. *Journal of Engineering Mechanics*. **123**(9), 897-971.
 35. Wang, S.-G., Yeh, H. and Roschke, P.N. (2001) Robust control for structural systems with parametric and unstructured uncertainties. *Journal of Vibration and Control*, **7**(5), 753-772.
 36. Kaufman, H., Barkana, I. and Sobel, K. (2012) Direct adaptive control algorithms: theory and applications. *Springer Science & Business Media*.
 37. Papadimitriou, C., Katafygiotis, L. and Au, S.K. (1997) Effects of structural uncertainties on TMD design: A reliability-based approach. *Journal of Structural Control*, **4**(1), 65-88.
 38. Du, H., Zhang, N., Samali, B. and Naghdy, F. (2012) Robust sampled-data control of structures subject to parameter uncertainties and actuator saturation. *Engineering Structures*, **36**, 39-48.
 39. Shahi, M., Sohrabi, M.R. and Etedali, S. (2018) Seismic control of high-rise buildings equipped with ATMD including soil-structure interaction effects. *Journal of Earthquake and Tsunami*, **12**(03), 1850010.
 40. Fisco, N. and Adeli, H. (2011) Smart structures: part II—hybrid control systems and control strategies. *Scientia Iranica*, **18**(3), 285-295.
 41. Zadeh, L.A. (1965) Information and control. *Fuzzy Sets*, **8**(3), 338-353.
 42. Mendel, J.M. and John, R.B. (2002) Type-2 fuzzy sets made simple. *IEEE Transactions on fuzzy systems*, **10**(2), 117-127.
 43. Guclu, R. and Yazici, H. (2009) Seismic-vibration mitigation of a nonlinear structural system with an

uncertainty in parameters and excitation, *Structural Control and Health Monitoring*, **24**(1).

53. Wilson, C.M.D. and Abdullah, M.M. (2010) Structural vibration reduction using self-tuning fuzzy control of magnetorheological dampers. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **8**(4), 1037-1054.
54. Bashir, A.O., Rui, X. and Zhang, J. (2019) Ride comfort improvement of a semi-active vehicle suspension based on hybrid fuzzy and fuzzy-PID controller. *Stud. Inform. Control.*, **28**, 421-30.

واژه‌نامه

- ۱- کنترل بهینه خطی مرتبه دوم
Linear Quadratic Regulator Control (LQR)
- ۲- کنترل تناسبی-انتگرالی-مشتقی
Proportional Integral Derivative Control (PID)
- ۳- کنترل گوسی خطی مرتبه دوم
Linear Quadratic Gaussian Control (LQG)
- ۴- کنترل قطع و وصل بهینه
Clipped Optimal Control (COC)
- ۵- کنترل مود لغزشی
Sliding Mode Control (SMC)
- ۶- کنترل تطبیقی مدل مرجع
Model Reference Adaptive Control (MRAC)
- ۷- ماتریس بهره استاتیک
Static Gain Matrix
- ۸- ضریب تغییرات
Coefficient of Variation (C.O.V)
- ۹- ریشه میانگین مربعات
Root Mean Square (RMS)
- ۱۰- الگوریتم رقابت استعماری
Imperialist Competitive Algorithm (ICA)
- ۱۱- الگوریتم تکامل تفاضلی
Differential Evolution (DE)
- ۱۲- الگوریتم خفاش
Bat Algorithm (BA)
- ۱۳- الگوریتم کرم شب‌تاب
Firefly Algorithm (FA)
- ۱۴- الگوریتم اجسام در حال برخورد
Colliding Bodies (CB)
- ۱۵- الگوریتم جستجوی هارمونی
Harmony Search (HS)

Online Determination of LQR Controller Weight Matrix Using Fuzzy Supervisor under Artificial Earthquake Records

Reza Darbanian^{1*}, Seyyed Ali Mousavi Gavvani² and Vahid Reza Kalatjari³

1. Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran, *Corresponding Author, email: rezadarbanian@shahroodut.ac.ir
2. M.Sc. Graduate, Department of Civil Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran
3. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

The linear quadratic regulator algorithm (LQR) is one of the common algorithms in control engineering that is used in many studies due to its simplicity. This controller is used to achieve optimal system performance by minimizing the cost function related to the state vector and the control input vector. In LQR control, the control gain is determined based on the weight matrices Q and R . One of the main issues in using this algorithm is adjusting the values of its weight matrices, which are determined based on trial and error or the use of meta-heuristic optimization algorithms. The improper determination of the weight matrices can reduce the performance of the controller. For example, increasing Q or decreasing R leads to a larger control gain matrix, which ultimately increases the control force and decreases system states (or responses). Therefore, if the control gain is designed using a very large Q matrix and its value remain constant during the simulation process, the possibility of producing a control force with the maximum capacity is very high. If this happens, the force generated by the actuator during the simulation process may be more than the required force, and the differences between the designed control force and the applied control force can in some cases reduce the control performance significantly or consume more energy than required. On the other hand, it is appropriate to assume the values of these two matrices to be constant in the case of sensors without noise and structure without uncertainty, and LQR control has the ability to reduce the response of the structure under various external vibrations. However, when the information coming from the sensors include noises and the system has uncertainty, the LQR control with constant gain has little ability to reduce the system response properly. In order to solve this problem in this study, a hybrid Fuzzy-LQR controller is proposed in which a fuzzy supervisor is used to change the LQR gain matrix online. In general, fuzzy logic has the ability to deal with noise and system uncertainty due to the lack of need for an accurate mathematical model of the system. Therefore, by combining LQR control and fuzzy control, the advantages of both controllers can be used. This fuzzy supervisor adjusts the pre-designed initial gain according to the created conditions by changing R weight matrix, so that the control force applied to the structure is proportional to the required control force and does not exceed the allowable actuator capacity. This change is implemented also with the aim of minimizing the amount of energy consumed by the actuator. To evaluate the performance of the proposed controller, three-story and eight-story buildings are used, all stories of which are equipped with the active tendon actuator. This structure has been subjected to the vibrations of two artificial earthquakes with a risk level of 10% and 2% in 50 years and different responses of the structure including the maximum value of responses and root of their mean squares have been determined. Then, the high capability of the Fuzzy-LQR controller, which even in the presence of parametric uncertainty and noise in the sensors can reduce the response by up to 90%, can be proved by comparing the results of the proposed controller and LQR controller based on different meta-heuristic algorithms. For example, the responses of displacement, velocity and acceleration of stories are reduced by an average of 81%, 83% and 71%, respectively using the proposed controller and under earthquake with a risk level of 10%. While using only the LQR controller, these values are 71%, 72% and 64%, respectively. The following results show that the root mean square of the responses has decreased more than their maximum value, which indicates the proper performance of the proposed algorithm during the excitation.

Finally, it can be concluded that the proposed controller has a robust and stable behavior against various vibration and system uncertainties.

Keywords: Active tendon, Fuzzy supervisor, Fuzzy-LQR controller, Uncertainty, Sensor noise.