

Assessing the performance of a high rise building equipped with general type 2 fuzzy controller under seismic excitation

Farzaneh Shahabian Moghaddam¹, Hashem Shariatmadar^{2*}

1- PhD in Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- professor, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

ABSTRACT

So far no reports have been presented for the use of general type 2 fuzzy systems to control civil engineering structures. Considering the increasing success of this algorithm in other fields the importance of addressing general type 2 fuzzy systems becomes evident. Control systems always deal with Uncertainty; therefore, studying innovative algorithms that can effectively manage uncertainty seems necessary. The fuzzy membership functions in general type 2 systems provides additional degrees of freedom for design, giving these systems a higher potential for considering uncertainties. To evaluate the effectiveness of the proposed general type 2 fuzzy control system, type 1 and interval type 2 fuzzy systems and a linear quadratic Gaussian controller (LQG) as a classic control method have been designed. The performance of the controllers on a 20-story nonlinear benchmark structure has been evaluated through computer simulation in MATLAB. By comparing the responses of the structure equipped with these four proposed controllers, it can be concluded that general type 2 fuzzy controller performs better in reducing structural responses and preventing damage to structural members. It is hoped that this research can serve as a starting and encouraging point for the application of powerful general Type 2 fuzzy tool in civil engineering purposes, especially in structural vibration control.

ARTICLE INFO

Receive Date: 14 May 2024

Revise Date: 05 August 2024

Accept Date: 12 September 2024

Keywords:

*High rise building
General Type-2 Fuzzy
Controller
Active Control
Nonlinear Benchmark
Structures
Seismic Vibration*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.456045.3409](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.456045.3409)

*Corresponding author: Hashem Shariatmadar.

Email address: shariatmadar@um.ac.ir

بررسی عملکرد سازه بلند مرتبه مجهز به کنترلگر فازی نوع ۲ عمومی تحت تحریک لرزه ای

فرزانه شهبابیان مقدم^۱، هاشم شریعتمداری^{۲*}

۱- دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

با توجه به اینکه تا کنون هیچ گزارشی مبنی بر استفاده از سیستم‌های فازی نوع ۲ عمومی در کنترل سازه‌های مهندسی عمران ارائه نشده است و با توجه به موفقیت‌های روز افزون کاربرد این الگوریتم در علوم دیگر، اهمیت پرداختن به این سیستم‌ها به منظور کنترل سازه‌های عمرانی کاملاً مشخص می‌گردد. عدم قطعیت جزء پارامترهایی می‌باشد که سیستم‌های کنترلی همیشه با آن سروکار دارند؛ مطالعه و به کارگیری الگوریتم‌های نوینی که این عدم قطعیت‌ها رو بتوانند به خوبی مدیریت کنند کاملاً لازم و ضروری به نظر می‌رسد. ماهیت فازی توابع عضویت در سیستم‌های فازی نوع ۲ عمومی درجات آزادی اضافه تری را جهت طراحی سیستم در اختیار قرار می‌دهند، لذا سیستم‌های فازی نوع ۲ عمومی پتانسیل بالاتری برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها دارند. به منظور ارزیابی اثربخشی سیستم کنترل فازی نوع ۲ عمومی پیشنهادی، سیستم‌های کنترل فازی نوع ۱، نوع ۲ بازه‌ای و یک کنترلگر بهینه خطی (LQG) به عنوان روش کنترل کلاسیک نیز طراحی شده و مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته‌اند. عملکرد کنترلگرها بر روی سازه ۲۰ طبقه مینا با رفتار غیر خطی از طریق شبیه‌سازی کامپیوتری در محیط نرم افزار MATLAB ارزیابی شده است. با مقایسه پاسخ‌های مختلف سازه مجهز به چهار کنترلگر پیشنهادی می‌توان نتیجه گرفت که سیستم‌های مجهز به کنترلگر فازی نوع ۲ عمومی در مقایسه با سیستم‌های کنترلی دیگر در کاهش پاسخ‌های سازه و جلوگیری از خسارت رسیدن به اعضای سازه بهتر عمل کرده و می‌توان با آسودگی خاطر از سیستم‌های فازی نوع ۲ عمومی در کاربردهای عمرانی بهره جست. امید می‌رود این پژوهش بتواند سرآغازی برای کاربرد ابزار قدرتمند فازی نوع ۲ عمومی در مباحث مهندسی عمران و به خصوص کنترل سازه قرار گیرد.

کلمات کلیدی: سازه بلند مرتبه، کنترلگر فازی نوع ۲ عمومی، کنترل فعال سازه، سازه مینا با رفتار غیر خطی، تحریک لرزه ای.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
10.22065/jsce.2024.456045.3409	۱۴۰۴/۰۲/۳۱	۱۴۰۳/۰۶/۲۲	۱۴۰۳/۰۶/۲۲	۱۴۰۳/۰۵/۱۵	۱۴۰۳/۰۲/۲۵
*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی: shariatmadar@um.ac.ir			هاشم شریعتمداری		

۱- مقدمه

زلزله واژه‌ای که هر انسانی با شنیدن آن مضطرب می‌گردد. علت این است که ذهن آدمی با شنیدن این واژه به یاد خسارت‌های مالی و جانی ناشی از زلزله می‌افتد. به همین دلیل است که انسان‌ها جهت بنای ساختمان‌های خود به فکر ایمن ساختن آن در مقابل زلزله افتاده‌اند. اندیشه کنترل سازه در مهندسی عمران را می‌توان به میلن^۱، افزون بر ۱۰۰ سال قبل، نسبت داد. کسی که با ساختن یک خانه چوبی و قرار دادن آن بر روی تکیه‌گاه‌هایی خاص تلاش داشت که جداسازی آن از ارتعاش را نشان دهد. سیستم‌های کنترل را می‌توان بر اساس نیاز به انرژی و یا بر اساس روش و نحوه عملکرد به چهار دسته اصلی: الف) سیستم‌های کنترل غیرفعال، ب) سیستم‌های کنترل فعال، ج) سیستم‌های کنترل نیمه فعال و د) سیستم کنترل ترکیبی یا هیبرید تقسیم نمود [۱].

سیستم‌های کنترل فعال^۲ شامل محرک‌های خارجی اند که مطابق یک الگوی تعریف شده نیروها را اعمال می‌نمایند. فعال سازی نیروی خارجی بر اساس میزان اغتشاش خارجی و یا پاسخ سازه صورت می‌گیرد. حسگرها برای اهداف اندازه گیری به کار گرفته می‌شود، و آنگاه به کمک کامپیوترها، سیگنال دیجیتال تبدیل به سیگنال آنالوگ گردیده و نیروی خارجی لازم را فعال می‌نماید. اولین کاربرد کنترل فعال روی یک ساختمان واقعی مربوط به شرکت کاجیما^۳ به سال ۱۹۸۹ بر می‌گردد [۲]. در سال‌های اخیر توجه زیادی به تحقیقات در زمینه کنترل فعال سازه‌ها شده است [۳، ۴، ۵]. سونگ^۴ [۶] در زمینه کنترل فعال و ارائه الگوریتم‌های آن تحقیقات متعددی را انجام داده است که زمینه تمامی این تحقیقات به وسیله یانگ^۵ مهیا شده است و در اصل وی پایه گذار تحقیقات نوین در زمینه کنترل سازه می‌باشد. راهکارهای بی شماری برای ایجاد نیروی کنترلی وجود دارد. این روش‌ها در مجموع در دو مجموعه کنترل سنتی (کلاسیک) و هوشمند قابل طبقه بندی هستند. کنترل سنتی در مواردی که کار می‌آید که مساله ساده بوده و روابط شناخته شده باشند. در مواردی که مساله قابل شناسایی نبوده و نوشتن روابط دشوار یا ناممکن است بایستی از روش‌های کنترل هوشمند بهره جویی نمود. از جمله الگوریتم‌های کلاسیک و هوشمند می‌توان به ترتیب روش کنترل بهینه خطی و منطق فازی را نام برد. در بسیاری از مسائل کنترل، مدل سیستم ناشناخته می‌باشد و یا اینکه پارامترهای ورودی در محدوده بزرگی تغییر می‌کنند. در این موارد، کنترل کننده‌های فازی به دلیل توانایی در تعیین خروجی‌ها برای یک مجموعه از ورودی‌ها بدون استفاده از مدل‌های ریاضی مرسوم می‌توانند به کار گرفته شوند. این کنترل کننده‌ها علاوه بر حساسیت کمتر به تغییر متغیرها، به دلیل بهره گرفتن از عبارات‌های زبانی معمول و روش‌های تصمیم گیری فرد خبره، درک بیشتری را از سیستم کنترلی سبب می‌شوند. منطق فازی امروزه در سیستم‌های کنترل بسیار کارا و موثر ظاهر شده است.

نخستین بار زاده^۶ [۷] در سال ۱۹۶۵ نظریه مجموعه فازی (فازی نوع ۱) را ارائه کرد. در منطق فازی همه چیز به‌طور نسبی درست یا غلط است و درستی هر چیزی را با یک عدد که مقدار آن بین صفر و یک متغیر است، نشان می‌دهند؛ درحالی‌که منطق کلاسیک (منطق بولین) هر چیزی را بر اساس سیستم دوتایی معرفی می‌کند (درست یا غلط، ۰ یا ۱). در سال ۱۹۷۴ با سمیناری که ممدانی^۷ [۸] ارائه نمود منطق فازی از صرف یک نظریه خارج شد و کنترل فازی پس از آن به صورت کاربردی در عمل مورد استفاده قرار گرفت. اولین کاربرد منطق فازی در صنعت، به یک کوره سیمان ساخته شده در دانمارک (سال ۱۹۷۵) بر می‌گردد. به طور کلی سیستم‌های فازی بطور گسترده در ابتدا در ژاپن پیاده سازی شدند. پس از پرداختن به سیستم‌های فازی نوع ۱، اولین مساله ای که ذهن محققین را مشغول ساخت، این بود که با توجه به مفهوم کلمه فازی به معنای عدم قطعیت استفاده از توابع غیر فازی و قطعی مناسب به نظر نمی‌رسد. تا اینکه در سال ۱۹۷۵، زاده [۹] مجموعه‌های فازی عمومی‌تری را معرفی نمود که توابع عضویت فازی داشتند و بعدها به مجموعه‌های فازی نوع ۲ معروف شدند. زاده این مجموعه‌ها را فازی نوع ۲ یا فازی مقداری نامید. مجموعه‌های فازی نوع ۲ تا اوایل دهه ۹۰ دارای کاربرد قابل توجهی نبود. علت این امر، عدم توسعه مجموعه‌ها و سیستم‌های فازی نوع ۱ و عدم کاربرد آن‌ها در مسائل عملی بود. در اواخر دهه ۹۰ و پس از کاربرد

¹ Milne

² Active Control

³ Kajima Cooperation

⁴ Soong

⁵ Yang

⁶ Zadeh

⁷ Mamdani

موفق سیستم‌های فازی نوع ۱، در مسائل کنترلی، به تدریج تمایل و توجه به سیستم‌های فازی نوع ۲ افزایش یافت و نشان داده شد که در صورت وجود منابع عدم قطعیت، این سیستم‌ها از قابلیت و انعطاف‌پذیری بالاتری برخوردار بوده و نسبت به فازی نوع ۱ کارتر می‌باشند.

از جمله کاربردهای موفقیت‌آمیز سیستم‌های فازی نوع ۲ عمومی در سال‌های اخیر در مسائل پزشکی بوده است. به عنوان نمونه کارواجال^۸ و همکاران [۱۰] پژوهشی به هدف گسترش و کاربرد سیستم‌های فازی نوع ۲ عمومی برای تعیین سطح عملکرد قلب انجام داده‌اند. امروزه استفاده از الگوریتم‌های نوین جهت کمک به پزشکان در تشخیص سریع و دقیق بیماری‌ها بسیار مورد توجه است. انتیوروس^۹ و همکاران [۱۱] در پژوهشی جامع به بررسی و مقایسه عملکرد الگوریتم‌های GT2^{۱۰} با IT2^{۱۱} و T1^{۱۲} در سیستم‌های تشخیص پزشکی^{۱۳} پرداخته است و موارد بسیاری را با هم مقایسه نموده است. میتال^{۱۴} و همکاران [۱۲] مطالعات جامعی روی کاربرد سیستم‌های فازی نوع ۲ در زمینه‌های مختلف از گذشته تاکنون انجام داده است. سیستم‌های فازی نوع ۲ در موارد بسیاری در مواجهه با عدم قطعیت‌ها کاربرد موفقیت‌آمیز داشته‌اند که از آن جمله می‌توان: کنترل هوشمند، سیستم‌های طبقه‌بندی، الگویابی، پیش‌پردازش عکس‌های رادیوگرافی، تخمین زدن میزان سلامتی نوزاد تازه متولد شده، تشخیص بیماری، کنترل روبات‌های فوتبالیست، تشخیص لبه در عکس‌های دیجیتال، مدل سازی فرایند جداسازی سولفور از فولاد، پیاده سازی سیستم اطلاعات جغرافیایی و ... را نام برد.

در رشته عمران تا به امروز از سیستم‌های فازی نوع ۲ عمومی استفاده نشده است و تنها چندین نمونه کاربرد سیستم‌های فازی نوع ۲ بازه‌ای در کنترل سازه موجود می‌باشد. در پژوهش بهمنی^{۱۵} و همکار [۱۳] عملکرد میراگر سیال مغناطیسی با استفاده از کنترل فازی نوع ۱ و ۲ بازه‌ای، روی سازه‌های معیار سه و نه طبقه مجاور تحت تحریک لرزه‌ای با بیشینه شتاب‌های مختلف بررسی می‌شود؛ با توجه به نتایج به دست آمده، عملکرد کنترلگر فازی نوع ۲ که عدم قطعیت‌ها را در خود جای می‌دهد، در مقایسه با فازی نوع ۱ بهتر بوده است. خطر برخورد سازه‌ها با استفاده از کنترلگرهای فازی نوع ۱ و ۲ به ترتیب ۵/۳۷ و ۷/۳۹ درصد کاهش یافته است. آزادوار و همکاران [۱۴] از یک سیستم فازی بازه‌ای نوع ۲ برای کاهش خسارت در سازه مجهز به میراگرهای MR استفاده نمودند؛ این کنترلگر خسارت وارد به سازه را ۵ تا ۱۵ درصد کاهش داد. رضانی و همکاران [۱۵] در یک سیستم کنترل نیمه فعال با در نظر گرفتن عدم قطعیت به مقایسه عملکرد الگوریتم فازی نوع ۱ با فازی نوع ۲ بازه‌ای در تعیین نسبت میرایی پرداختند؛ نتیجه گیری شد که IT2FLC عملکرد موفق تری در برابر عدم قطعیت‌ها در مقایسه با سایر سیستم‌های کنترلی دارد. بنابراین، می‌توان از آن در کاربردهای واقعی با اطمینان بیشتری استفاده کرد. الغزالی و شریعتمدار [۱۶] در ۲۰۲۱ از IT2FLC برای کنترل فعال هیبرید دو ساختمان مجاور که توسط میراگرهای ویسکوز به هم متصل شده‌اند استفاده نمود. لواسانی و شنگاپور [۱۷] در ۲۰۲۲ به طور موثر از یک کنترل کننده فازی نوع ۲ بازه‌ای برای کنترل هیبرید یک ساختمان مرتفع واقعی با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه تحت زمین لرزه‌های میدان دور و میدان نزدیک استفاده نمودند. آنها به این نتیجه رسیدند که IT2FLC در کاهش پاسخ‌های سازه بسیار موثر عمل می‌کند.

جهت پیاده سازی سیستم کنترل فازی نوع ۲ عمومی و بررسی و مقایسه عملکرد آن؛ بهتر آن است که از سازه‌های مینا (محک) بهره جویی شود. چه بسا امکان مقایسه و بررسی اصولی تر و جهانی تری را در اختیار قرار می‌دهند. سازه، شتاب نگاشت و اصول ارزیابی یکسان و مشابه امکانی است که سازه‌های مینا در اختیار محقق قرار می‌دهند. از آنجا که کنترل کننده فازی نوع ۲ عمومی قابلیت‌های بالایی دارد و همچنین امروزه لزوم در نظر گرفتن رفتار غیر خطی سازه‌ها در مقابل زلزله کاملاً احساس می‌شود؛ از سازه‌های مینا رفتار غیر خطی بهتر است استفاده گردد. اکثر کارهایی که تاکنون در زمینه کنترل انجام گرفته رفتار سازه را خطی در نظر گرفته‌اند و از مدل‌های خطی بهره جویی کرده‌اند اما به دلیل آنکه رفتار سازه در مقابل زلزله‌های بزرگ و حتی متوسط غیر خطی است بهتر است از مدل‌های غیر خطی استفاده نمود. با پیاده سازی کنترلگر فازی نوع ۱، فازی نوع ۲ بازه‌ای و فازی نوع ۲ عمومی بر روی سازه‌های مینا با رفتار غیر

⁸ Carvajal

⁹ Ontiveros

¹⁰ General type 2

¹¹ Interval type 2

¹² Type 1

¹³ Diagnosis Systems

¹⁴ Mittal

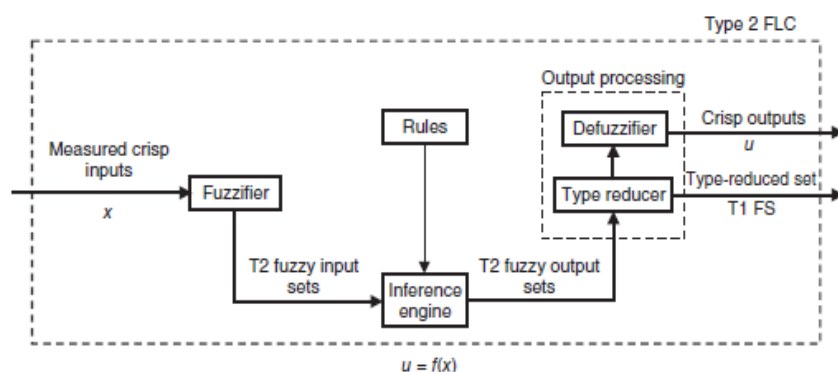
¹⁵ Bahmaei

خطی؛ با در نظر گرفتن توابع عضویت ورودی و خروجی با شکل و تعداد یکسان و پایگاه قواعد مشابه برای تمامی حالات، می توان نتایج به دست آمده را به خوبی با هم مقایسه نمود. جهت مدل سازی سازه مبنا و کنترلر فازی از نرم افزار MATLAB و امکانات آن استفاده شده است.

۲- سیستم های فازی نوع ۲ عمومی

یکی از کاستی های سیستم های فازی رایج (فازی نوع ۱) را می توان در منظور نشدن عدم قطعیت در پایگاه قوانین فازی دانست. برای در نظر گرفتن این نوع از عدم قطعیت ها، سیستم های فازی نوع ۲ پیشنهاد می شوند [۱۸]. این سیستم ها قابلیت در نظر گرفتن عدم قطعیت در پایگاه قوانین فازی را دارند. به عبارت دیگر هنگامی که افراد مختلف، برداشت های متفاوتی در ارتباط با بیان یک مسئله داشته باشند، عدم قطعیت گفتاری بوجود می آید و نمی توان از تابع عضویت دقیقی برای بیان آن استفاده نمود. در این حالت است که مجموعه های فازی نوع ۲ بیش از هر زمان دیگری، ارزش خود را نشان داده و قادر به در نظر گرفتن تمامی احتمالات و نظرات ممکن می باشند. به عبارت دیگر می توان گفت که گرچه هر دو نوع سیستم فازی نوع ۱ و نوع ۲ قادر به در نظر گرفتن عدم قطعیت ها هستند، ولی سیستم های فازی نوع ۲ می توانند به نحو مطلوبی به مدیریت این عدم قطعیت ها بپردازند. سیستم های فازی نوع ۲ دارای توابع عضویت با ماهیت فازی هستند. در نظر گرفتن رد پای عدم قطعیت (FOU^{16}) و توابع عضویت ثانویه هر کدام درجه آزادی اضافه تری را جهت طراحی سیستم در اختیار قرار می دهند لذا سیستم های فازی نوع ۲ عمومی پتانسیل بالاتری برای در نظر گرفتن عدم قطعیت ها دارند. طبق پژوهش هایی که در زمینه مقایسه کارایی سیستم های فازی نوع ۱، نوع ۲ بازه ای و نوع ۲ عمومی انجام گرفته است، محققین بدین نتیجه رسیده اند که از مهمترین مزیت های سیستم های نوع ۲ عمومی، ویژگی های پایداری بهتر و قدرت انطباق بالاتر آنها در مواجهه با نویزهای سیستمی است همچنین نشان داده شده است که در نظر گرفتن توابع عضویت پیچیده تر می تواند منجر به پایگاه قواعد ساده تر با تعداد قواعد کمتر شود.

می توان اجزای اصلی سیستم فازی نوع ۲ که برای نخستین بار توسط کارنیک و مندل [۱۹] جهت پیاده سازی عملی ارائه گردید، در شکل ۱ مشاهده نمود. این اجزا عبارتند از فازی ساز، موتور استنتاج فازی، پایگاه قواعد فازی و فرآیند خروجی شامل کاهنده مرتبه و غیرفازی ساز. تفاوت اصلی سیستم های فازی نوع ۲ با نوع ۱ در قسمت پردازشگر خروجی است. در سیستم فازی نوع ۱ پردازشگر خروجی تنها شامل غیرفازی ساز است. درحالی که در سیستم فازی نوع ۲ پردازشگر خروجی شامل کاهنده نوع و غیرفازی ساز است. کاهنده نوع در واقع خروجی را تبدیل به خروجی فازی نوع ۱ می کند و غیرفازی ساز خروجی قطعی را ایجاد می کند. یک سیستم فازی نوع ۲ با قواعد اگر-آنگاه فازی مشخص می شود؛ در واقع اگر حداقل یکی از توابع عضویت در بخش مقدم و یا تالی گزاره شرطی به صورت فازی نوع ۲ باشند؛ آنگاه سیستم مربوطه یک سیستم فازی نوع ۲ نامیده می شود.



شکل ۱: اجزای اصلی سیستم های فازی نوع ۲ [۱۸]

¹⁶Footprint of uncertainty

توابع عضویت در سیستم‌های فازی نوع ۱ دو بعدی و در سیستم‌های فازی نوع ۲ سه بعدی هستند. برخلاف مجموعه‌های فازی نوع ۱ که در آنها مقدار تعلق یک عضو مقداری بین صفر و یک است؛ در مجموعه‌های فازی نوع ۲ میزان تعلق یک عضو به یک مجموعه خود مقداری فازی است و بین صفر و یک تغییر می‌کند. بنابراین در فازی نوع ۲ متناظر با هر تابع تعلق اولیه^{۱۷} یک تابع تعلق ثانویه^{۱۸} وجود دارد که خود می‌تواند مقداری بین صفر و یک داشته باشد [۲۰]. روش‌های مختلفی برای نمایش و رابطه‌سازی مجموعه‌های فازی نوع ۲ ارائه شده‌اند که از آن جمله می‌توان به نمایش برش عمودی اشاره نمود. در ادامه به بررسی این روش پرداخته می‌شود [۲۱].

۲-۱- نمایش برش عمودی سیستم‌های فازی نوع ۲

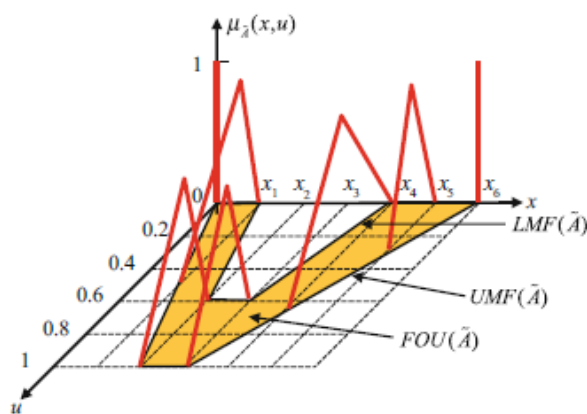
تابع عضویت سیستم فازی نوع ۲ عمومی سه بعدی می‌باشد (شکل ۲). محور x مقادیر اولیه را نشان می‌دهد. محور y به عنوان متغیر ثانویه با u نمایش داده شده است. و مقادیر محور z یا همان بعد سوم مقادیر تعلق ثانویه بوده که با $\mu_{\tilde{A}}(x)$ نمایش داده می‌شود. مجموعه فازی نوع ۲ به صورت (۱) رابطه‌سازی می‌شود:

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \left(\frac{\mu_{\tilde{A}}(x)}{x} \right) \quad (1)$$

که در این رابطه $x \in X$ و عبارت است از دامنه مقادیر اولیه که x می‌تواند اختیار کند. تابع عضویت ثانویه را می‌توان به صورت (۲) رابطه‌سازی نمود که نمایش برش عمودی گفته می‌شود. نمایش سیستم‌های فازی نوع ۲ به روش برش عمودی، گونه‌ای بسطیافته از نمایش سیستم‌های فازی نوع ۱ می‌باشد.

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \int_{u \in J_x} \left(\frac{f_x(u)}{u} \right), J_x \in [0,1] \quad (2)$$

پارامترهای به کار رفته در رابطه (۲) عبارتند از: $\mu_{\tilde{A}}(x)$ که تابع عضویت ثانویه و $f_x(u)$ که درجه تابع عضویت ثانویه بوده و مقادیری بین ۰ تا ۱ می‌تواند اختیار کند [۲۲]. نمایش برش عمودی تابع عضویت فازی نوع ۲ را می‌توان در شکل ۲ مشاهده نمود.



شکل ۲: نمایش برش عمودی تابع عضویت فازی نوع ۲ به صورت سه بعدی [۲۲]

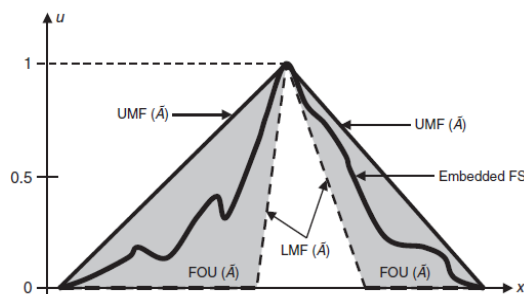
چنانچه به ازای تمامی مقادیر دامنه تابع عضویت ثانویه، مقدار درجه تابع عضویت ثانویه $f_x(u)$ برابر با ۱ باشد، مجموعه‌های فازی نوع ۲ عمومی به مجموعه فازی نوع ۲ بازه‌ای تبدیل می‌شود. این گونه ساده شده از مجموعه‌های فازی نوع ۲، به دلیل حجم محاسباتی پایین بسیار مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۲۳ تا ۲۶]. عدم قطعیت در تابع تعلق اولیه را با ردپای عدم قطعیت نشان می‌دهند. در IT2FLS¹⁹ تنها با دانستن توابع عضویت بالا و پایین تمامی مشخصات قابل دستیابی است. تابع عضویت بالا²⁰ UMF و تابع عضویت پایین

¹⁷ Primary Membership

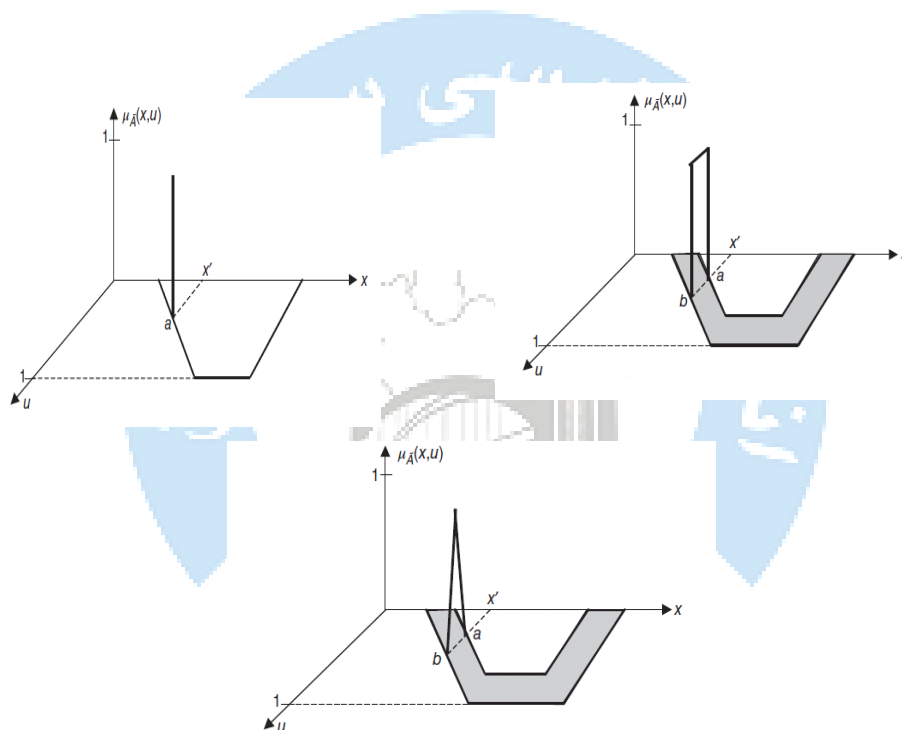
¹⁸ Secondary Membership

¹⁹ Interval Type 2 Fuzzy Logic System

LMF²¹ برای مجموعه \tilde{A} ، دو تابع عضویت نوع ۱ هستند که به ترتیب کران بالا و پایین ردپای عدم قطعیت FOU را می‌سازند. در شکل ۳ به عنوان نمونه تابع تعلق مثلثی نوع ۲ بازه‌ای با قاعده نامعین رسم شده است. در شکل ۴ تابع تعلق ثانویه برای سه نوع سیستم فازی نوع ۱، نوع ۲ بازه‌ای و نوع ۲ عمومی با هم مقایسه شده‌اند.



شکل ۳: تابع عضویت مثلثی با قاعده نامعین در فازی نوع ۲ بازه‌ای [۲۲]



شکل ۴: نمای سه بعدی تابع تعلق ثانویه در فازی نوع ۱، نوع ۲ بازه‌ای و نوع ۲ عمومی [۲۲]

۲-۲- ساده سازی سیستم‌های فازی نوع ۲ عمومی با استفاده از روش صفحات α

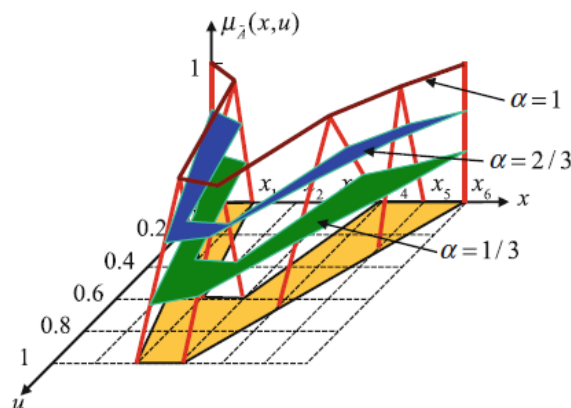
رابطه سازی سیستم‌های فازی نوع ۲ عمومی و نمایش آنها با استفاده از روش برش‌های افقی هم از نظر تئوری و هم محاسباتی بسیار کارا می‌باشد. به دلیل آنکه روش برش‌های افقی برای سیستم‌های فازی نوع ۲ شبیه تئوری صفحات α در سیستم‌های فازی نوع ۱ می‌باشد به عنوان روش صفحات α نیز نامیده می‌شود. یک صفحه α برای یک مجموعه فازی نوع ۲ عمومی \tilde{A} ، که با \tilde{A}_α نشان داده می‌شود؛ برابر است با اجتماع تمام توابع عضویت اولیه \tilde{A} که درجه ثانویه آنها بزرگتر مساوی α باشد. به بیان دیگر [۲۷]:

²⁰ Upper Member Function

²¹ Lower Member Function

$$\tilde{A}_\alpha = \bigcup_{x \in X} \{(x, u) \mid \mu_{\tilde{A}}(x, u) \geq \alpha\} \quad (3)$$

در این روش در واقع هر سیستم فازی نوع ۲ عمومی را می توان به صورت اجتماع فازی α صفحه افقی در نظر گرفت. این روش بسیار مورد توجه قرار گرفته است زیرا در هر صفحه α با یک سیستم فازی نوع ۲ بازه‌ای سروکار داریم که روابط شناخته شده تری دارند [۲۸].



شکل ۵: نمایش صفحات α برای سیستم فازی نوع ۲ عمومی [۲۲]

همانطور که در شکل ۵ مشاهده می شود اگر مقدار α صفر اختیار شود، صفحه α حاصل، همان FOU خواهد بود. با انتخاب این روش، بخش تئوری مجموعه‌های فازی نوع ۲ عمومی و همچنین بار محاسباتی بخش کاهنده نوع بسیار ساده می شود چراکه تمامی قضایای مربوط به سیستم‌های فازی نوع ۱ و همچنین سیستم‌های نوع ۲ بازه‌ای در این حالت قابل استفاده‌اند. فرض شده است که خواننده تا حدودی آشنایی با محاسبات سیستم‌های فازی نوع ۱ و نوع ۲ بازه‌ای داشته و از بازگویی مجدد خودداری شده و تمرکز روی روند محاسبات سیستم‌های نوع ۲ عمومی می باشد. در پژوهش حاضر نیز از روش صفحات α برای محاسبات سیستم فازی نوع ۲ عمومی استفاده شده است. محاسبات سیستم فازی نوع ۲ عمومی با تابع عضویت ثانویه مثلث شکل و به کارگیری روش کاهنده نوع COS^{22} و غیرفازی سازی به روش میانگین گیری نقاط انتهایی و با استفاده از تئوری صفحات α به صورت زیر مرحله به مرحله انجام می گردد:

(۱) تعداد صفحات α به صورت بهینه حدود ۵ انتخاب می گردد [۲۹].

(۲) برای هر صفحه α ، برش تابع مثلثی ثانویه حساب می گردد:

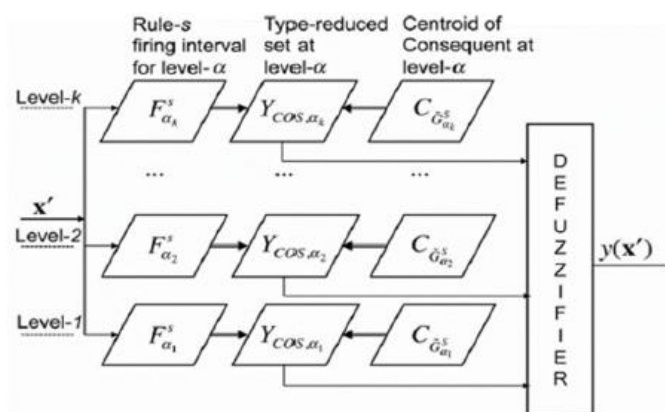
$$\tilde{A}_\alpha(x) = [a_\alpha(x), b_\alpha(x)] \quad (4)$$

$$a_\alpha(x) = \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x) + w [\bar{\mu}_{\tilde{A}}(x) - \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x)]\alpha \quad (5)$$

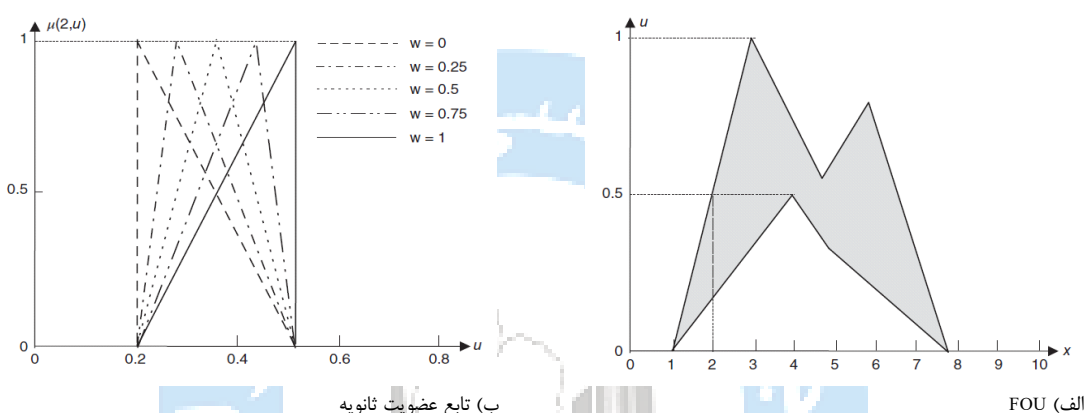
$$b_\alpha(x) = \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x) - (1-w) [\bar{\mu}_{\tilde{A}}(x) - \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x)]\alpha \quad (6)$$

در روابط بالا $\tilde{A}_\alpha(x)$ در واقع رد پای عدم قطعیت تصویر شده در سطح α می باشد. w نشانگر راس مثلث می باشد که هر عددی در بازه $[0,1]$ را می تواند اختیار کند. انتخاب هر مقدار برای این شاخص شکل تابع ثانویه را طبق شکل ۷ تغییر می دهد.

²² Center of sets



شکل ۶: ساختار بررسی سیستم فازی نوع ۲ عمومی با استفاده از صفحات α [۲۲]



شکل ۷: نمایش FOU نمونه و تغییر تابع عضویت ثانویه در $x=2$ با تغییر شاخص w [۲۲]

(۳) به دلیل استفاده از روش COS برای کاهش نوع نیازی به معادله سه بعدی قسمت نتیجه گزاره ها نیست و تنها کافی است در هر سطح α یک بار نقاط انتهایی راست و چپ طبق روابط زیر محاسبه و به حافظه سپرده شود. فرض می شود که توابع ثانویه همه مثلث های متقارن باشند. m^l راس مثلث بود که برای هر قانون به دلخواه انتخاب می شود و ثابت نگه داشته می شود. m_1^l محل راس چپ و m_2^l محل راس راست در $\alpha=0$ می باشد. مرکز حدودی هر مثلث در هر صفحه α با روابط (۷) و (۸) به دست می آید:

$$C_{l\alpha} \approx m_1^l + (m^l - m_1^l)\alpha \tag{۷}$$

$$C_{r\alpha} \approx m_2^l - (m_2^l - m^l)\alpha \tag{۸}$$

(۴) بازه های آتش شده برای همه قوانین با استفاده از t-norm حاصل ضرب در هر سطح α محاسبه می گردد.

(۵) با در دست داشتن بازه آتش شده و مرکز نتیجه ها برای هر صفحه α ، کاهش نوع، با استفاده از الگوریتم KM^{23} ، اجرا شده تا یک بازه به دست آید. نقطه انتهایی سمت چپ برای هر برش α با رابطه (۹) بدست می آید:

$$y_{l\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^L w_{la}^i \bar{f}_{i\alpha} + \sum_{i=L+1}^N w_{ia}^i \bar{f}_{i\alpha}}{\sum_{i=1}^L \bar{f}_{i\alpha} + \sum_{i=L+1}^N \bar{f}_{i\alpha}} \tag{۹}$$

به همین ترتیب نقطه انتهایی سمت راست برای یک برش α با رابطه (۱۰) بدست می آید:

²³ Karnik Mendel

$$y_{ra} = \frac{\sum_{i=1}^R w_{ra}^i f_{ia} + \sum_{i=R+1}^N w_{ra}^i \bar{f}_{ia}}{\sum_{i=1}^R f_{ia} + \sum_{i=R+1}^N \bar{f}_{ia}} \quad (10)$$

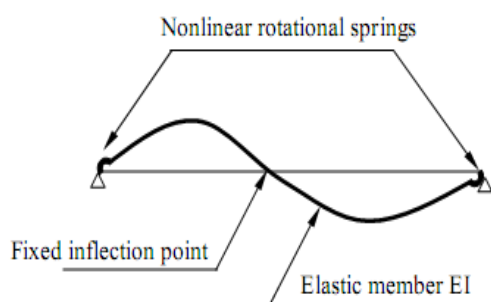
مقادیر L و R هم بر طبق الگوریتم KM به دست می‌آیند. در نهایت با استفاده از غیرفازی ساز خروجی سیستم فازی نوع ۲ از رابطه (۱۱) بدست می‌آید [۳۰]:

$$y(x) = \frac{\sum \alpha [(y_{ia}(x) + y_{ra}(x)) / 2]}{\sum \alpha} \quad (11)$$

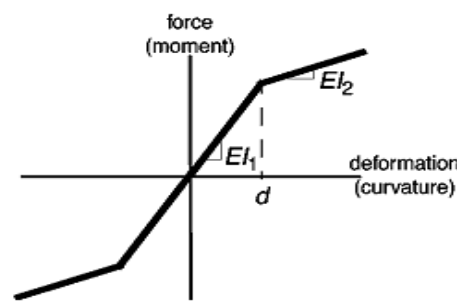
۳- مدل سازی

۳-۱- مشخصات سازه مبنا (محک) ۲۰ طبقه با رفتار غیرخطی

در گذشته محققین، با در نظر گرفتن سازه‌های مختلف و معیارهای متفاوت سعی در نشان دادن اثر روش یا وسیله کنترلی خاصی داشتند. اما با توجه به فقدان اصول مشترک در این تحقیقات، امکان مقایسه روش‌ها و یا وسایل کنترلی آنها با یکدیگر موجود نبود. کمیته کنترل سازه انجمن مهندسان آمریکا (ASCE) با درک اهمیت وجود سازه‌های معیار در بحث کنترل سازه، سعی در ایجاد و توسعه آنها نمود. سازه‌های معیار شامل مشخصات چند سازه، نحوه مدل سازی آنها، شتابنگاشت تحریک لرزه‌ای و معیارهای ارزیابی عملکرد می‌باشند که در اختیار محققین قرار گرفت اند تا با در نظر گرفتن سیستم کنترل مورد نظرشان، معیارهای ارزیابی را برای ساختمان‌های مبنا ارائه شده بررسی کنند. مشخصات کامل این سازه‌ها و نحوه مدل سازی آنها در مرجع [۳۱] آمده است. سازه مبنا غیر خطی مورد استفاده در این پژوهش عبارت است از سازه ۲۰ طبقه تمام مقیاس با اسکلت فولادی که نماینده سازه با ارتفاع بلند می‌باشند. این سازه‌ها برای منطقه لس‌آنجلس کالیفرنیا طراحی شده است.



شکل ۹: مدل گیبسون [۳۱]

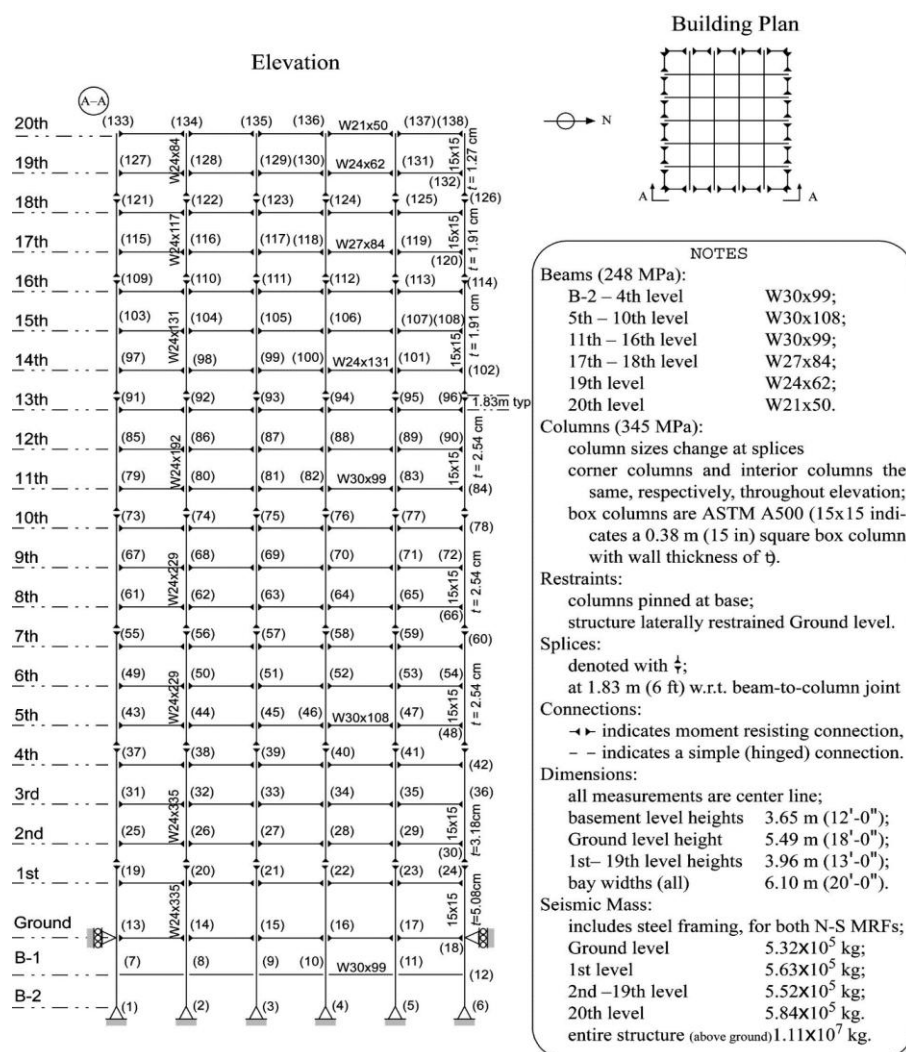


شکل ۸: نمودار رفتار دوخطی مصالح [۳۱]

سازه مدل شده مبنا، به صورت قاب دو بعدی بوده که تمامی المان‌ها به صورت یک جز محوری- خمشی-برشی با بعد خطی مدل شده‌اند. یعنی همان چیزی که معمولاً در تئوری تحلیل سازه‌ها از آن استفاده می‌شود و بدان مدل حد واسط^{۲۴} گویند. از آنجا که مدل غیر خطی سازه می‌تواند به خوبی نمایانگر رفتار واقعی سازه در مقابل زلزله باشد، روش تحلیل در این پژوهش تحلیل غیر خطی انتخاب شده و چون تحلیل دینامیکی یک سیستم در محدوده فراتر از حد الاستیک خطی معمولاً امکان پذیر نیست، از روش نیومارک بتا با فرض یک رفتار دو خطی برای مصالح مطابق شکل ۸ بهره گرفته شده است. گره‌ها در محل اتصال تیرها به ستون‌ها تعریف شده، در نتیجه اعضا بین گره‌ها شکل گرفته که شامل تیر و ستون می‌باشند. هر گره می‌تواند سه درجه آزادی مشتمل بر جابجایی در جهات x و y و چرخش حول محور z (محور خارج از صفحه) داشته باشد. فرض می‌شود جرم در گره‌ها متمرکز بوده، لذا ماتریس جرم سازه بصورت قطری خواهد بود.

²⁴ Center-line Model

از آنجایی که غالباً رفتار غیر خطی بصورت متمرکز در دو سر تیر یا ستون اتفاق می افتد یک رویکرد اولیه برای مدل سازی رفتار غیر خطی اعضا، استفاده از فنرهای غیر خطی در دو انتهای عضو می باشد. اولین مدل متمرکز توسط گیبسون^{۲۵} در سال ۱۹۶۷ معرفی شده است. این مدل از یک عضو الاستیک به علاوه دو فنر دورانی غیر خطی متصل به دو سر عضو الاستیک تشکیل شده است. به گفته دیگر رفتار غیر خطی عضو تنها در دو فنر (با طول صفر) متمرکز شده و مابقی عضو الاستیک می ماند. شکل ۹ این مدل را نشان می دهد. ساختمان مینا ۲۰ طبقه دارای ابعاد ۳۰/۴۸ و ۳۶/۵۸ متر در پلان و ۸۰/۷۷ متر در ارتفاع می باشد. در جهت شمال- جنوب ۵ دهانه و در جهت شرق- غرب ۶ دهانه وجود دارد که طول تمام آنها یکسان و هر کدام ۶/۱۰ متر می باشد. ساختمان از نوع فولادی و سیستم باربر جانبی آن قاب های خمشی پیرامونی می باشد و قاب های داخلی از نوع قاب ساده مفصلی هستند. کف ها نیز از نوع فلزی مرکب می باشند. سازه دارای دوطبقه زیرزمین می باشد. مشخصات کامل این سازه در شکل ۱۰ آمده است.



شکل ۱۰: مشخصات سازه بیست طبقه مینا [۳۱]

۲-۳- شتاب نگاشت های مورد استفاده

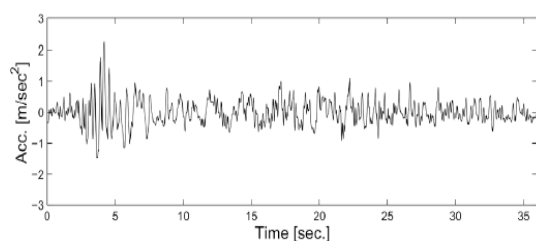
ده شتاب نگاشت که از چهار زلزله اصلی با شدت های مختلف به دست آمده است، جهت بررسی سازه معیار پیشنهاد شده است. دو زلزله از نوع زلزله های نگاشت دور که عبارتند از ال سنترو^{۲۶} و هاچینو^{۲۷} که با ضرایب ۰/۵ و ۱/۵ مقیاس شده اند. دو زلزله دیگر که از

²⁵ Gibson

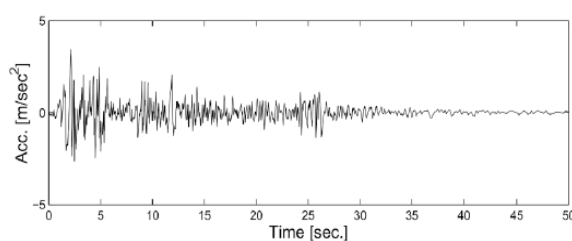
²⁶ El Centro

²⁷ Hachinohe

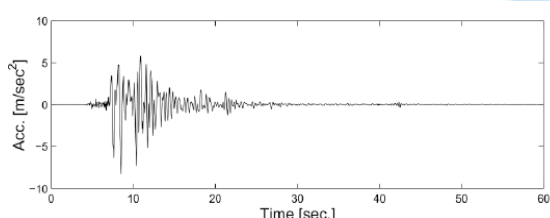
نوع زلزله‌های نگاشت نزدیک بوده و عبارت‌اند از نورثریج^{۲۸} و کوبه^{۲۹} که با ضرایب ۰/۵ و ۱ مقیاس شده‌اند. شتاب بیشینه این زلزله‌ها به ترتیب ۳/۴۱۷، ۲/۲۵۰، ۸/۲۶۷۶ و ۸/۱۷۸۲ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد. شتاب نگاشت زلزله‌های مذکور در شکل ۱۱ ترسیم شده است [۳۱].



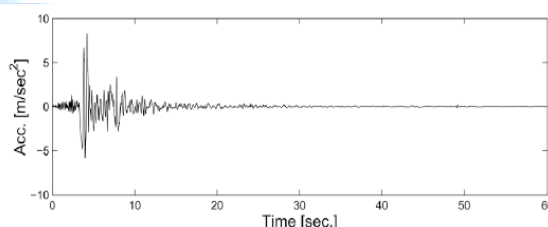
ب) هاجینو



الف) السنترو



د) کوبه



ج) نورثریج

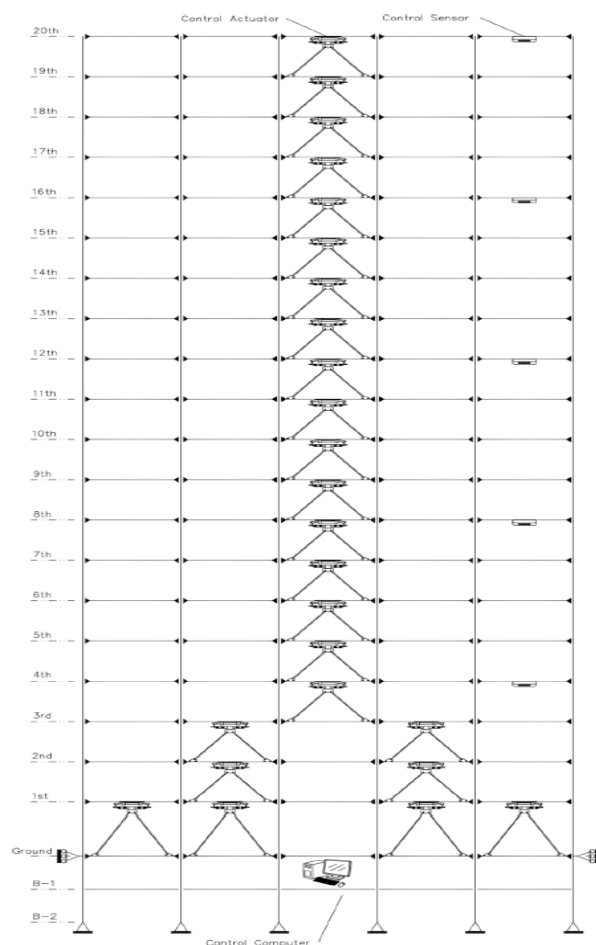
شکل ۱۱: شتاب نگاشت‌های مورد استفاده در بررسی سازه مبنا [۳۱]

۳-۳- طراحی سیستم کنترلی

طراحی یک سیستم کنترلی شامل تعیین مشخصات و مکان حسگرها و عملگرها و تعیین پارامترهای کنترلگر جهت تعیین نیروی کنترل از روی پاسخ‌های اندازه‌گیری شده است. در ساختمان ۲۰ طبقه حسگرها در طبقات ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ طبقه قرار دارند. ظرفیت عملگرها به تولید حداکثر نیروی کنترلی ۱۰۰۰ کیلونیوتن محدود است. قابل به ذکر است که عملگرهایی با این ظرفیت به راحتی در دسترس هستند. هر عملگر در سازه با استفاده از مهاربند شورون (هشتی) اجرا می‌شود که در آن عملگر به صورت افقی بین دو طبقه متوالی ساختمان متصل می‌شود. بنابراین، عملگرهای قرار گرفته در طبقه اول، نیروهای کنترلی برابر و مخالف را در طبقات اول و دوم تولید می‌کنند. اگرچه در برخی از طبقات چندین عملگر کارگذاری شده است، فرض بر این است که همه عملگرها در یک طبقه ورودی‌های یکسانی را تجربه کرده و به یک رویه عمل کنند. برای ساختمان ۲۰ طبقه در مجموع ۲۵ عملگر داریم که شامل ۴ عملگر در طبقه اول و دو عملگر در طبقه دوم و سوم و یک عملگر در مابقی طبقات می‌شود. در شکل ۱۲ محل قرارگیری سنسورها و عملگرها در سازه ۲۰ طبقه نشان داده شده است.

²⁸ Northridge

²⁹ Kobe



شکل ۱۲: محل قرارگیری عملگرها و سنسورها در سازه ۲۰ طبقه

۴-۳- طراحی کنترلگر فازی

سیستم کنترل کننده فازی که در اینجا مد نظر قرار گرفته از نوع ممدانی انتخاب شده است. حسگرها مقادیر جابجایی و سرعت نسبی طبقات مختلف را به عنوان ورودی به کنترلگر فازی اندازه گیری می کنند. روش اجتماع و روی هم گذاری مورد استفاده در این پژوهش، روش حاصلضرب لارسن^{۳۰} می باشد. برای طراحی یک سیستم فازی باید ورودی ها، خروجی ها، توابع عضویت و قوانین فازی تعیین شوند. این پارامترها را می توان با دانش یک متخصص یا با روش های بهینه یابی تعیین نمود [۳۲ و ۳۳]. در این تحقیق ساختار کلی سیستم کنترلی شامل متغیرهای ورودی و خروجی، تعداد و ساختار توابع عضویت و قوانین فازی بر اساس دانش و تجربه پژوهشگران تعیین شده است. مقادیر ورودی جابجایی و سرعت نسبی هر طبقه از سازه و مقادیر خروجی، مربوط به مقدار نیروی کنترل که به سازه وارد می شود، است. شرح عبارات اختصاری متغیرهای فازی در جدول ۱ و مشخصات سیستم های فازی T1 و T2 در جدول ۲ آورده شده است.

موتور استنتاج فازی از مجموعه قوانینی تشکیل شده است که در جدول ۳ آورده شده است. مبنای قوانین گذاشته شده به گونه ای است که نیروی کنترل، سازه را در هر مرحله از تحلیل به سمت نقطه تعادل سوق دهد. استفاده از سیستم فازی نوع ۲ برای نمایش ورودی ها و خروجی ها می تواند منجر به پایگاه قوانین کوچک تر شود. عدم قطعیت های ذاتی نهفته در تابع عضویت سیستم فازی نوع ۲، که با FOU و تابع تعلق ثانویه نشان داده می شوند، اجازه می دهند که تابع عضویت نوع ۲ حیطه ای شامل طیف وسیعی از توابع عضویت نوع ۱ را پوشش دهند. این کاهش در ابعاد پایگاه قوانین به کاهش حجم و زمان محاسبات کمک می کند. در پژوهش حاضر توابع عضویت انتخاب

³⁰ Larsen

شده برای متغیرهای ورودی و خروجی همگی مثلثی شکل بوده و در شکل‌های ۱۲ تا ۱۶ نشان داده شده‌اند. برای پژوهش حاضر تمامی محاسبات فازی در قالب m-file نوشته شده و از هیچ گونه جعبه ابزار از پیش نوشته شده متلب استفاده نشده است.

جدول ۱: مقادیر کلامی پارامترهای فازی

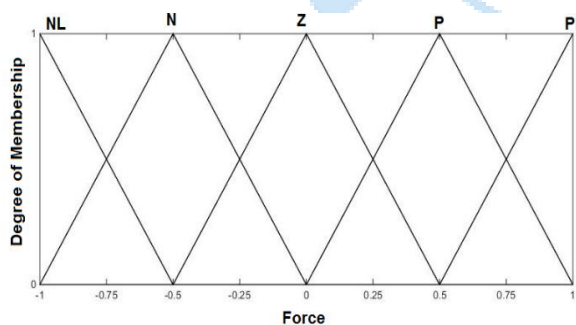
مقادیر منفی بزرگ	Large Negative Value	NL
مقادیر منفی	Negative Value	N
مقادیر نزدیک صفر	Zero Value	Z
مقادیر مثبت	Positive Value	P
مقادیر مثبت بزرگ	Large Positive Value	PL

جدول ۲: مشخصات سیستم‌های فازی T1 و T2

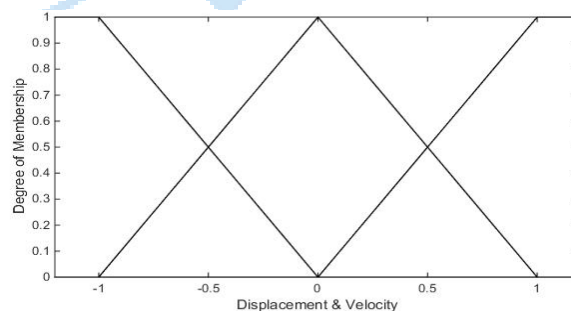
T2	T1	
ممدانی	ممدانی	نوع سیستم فازی
منفرد	منفرد	فازی ساز
حاصلضرب	حاصلضرب	مکانیزم استدلال
مرکز مجموعه‌ها	-----	کاهنده نوع
میانگین گیری	مرکز مجموعه‌ها	غیر فازی ساز

جدول ۳: پایگاه قوانین

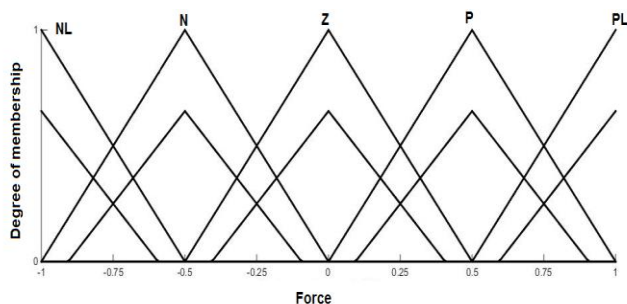
Relative Velocity	Relative Displacement		
	P	Z	N
P	NL	NL	NL
Z	P	Z	N
N	PL	PL	PL



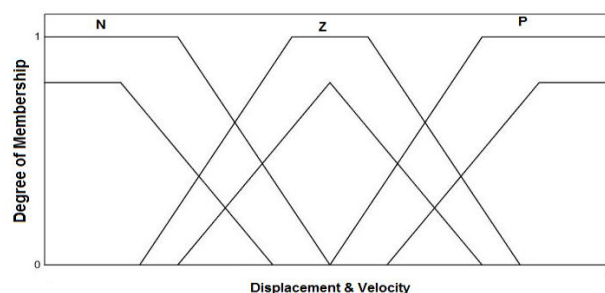
شکل ۱۴: تابع عضویت متغیر خروجی در سیستم فازی نوع ۱



شکل ۱۳: تابع عضویت متغیرهای ورودی در سیستم فازی نوع ۱



شکل ۱۶: تابع عضویت متغیر خروجی در سیستم فازی نوع ۲



شکل ۱۵: تابع عضویت متغیرهای ورودی در سیستم فازی نوع ۲

قابل ذکر است که متغیرهای ورودی و خروجی باید با استفاده از ضریب مقیاس^{۳۱} در بازه [۱، -۱] مقیاس شوند. از آنجایی که چهار زلزله کاملاً متفاوت (از نظر نوع زلزله و محتوی فرکانسی) می‌باشند، باید سیستم فازی به گونه ای طراحی شود که سازه را در مقابل همه زلزله‌ها به خوبی کنترل کند. اولین ایده جهت تعیین ضریب مقیاس استفاده از معکوس بیشینه پاسخ در حالت کنترل نشده می‌باشد. از آنجا که پاسخ جابجایی و سرعت بیشینه سازه در حالت کنترل نشده برای زلزله‌های مختلف متفاوت است، از نوعی میانگین گیری وزن دار با احتساب شتاب بیشینه زلزله‌ها استفاده گردید. بدین منظور از رابطه (۱۲) برای محاسبه ضریب مقیاس می‌توان بهره برد:

$$SF = \frac{0.34(X)_{Elc} + 0.22(X)_{Hach} + 0.84(X)_{North} + 0.83(X)_{Kobe}}{(0.34 + 0.22 + 0.74 + 0.83)} \quad (12)$$

در رابطه (۱۲) بیشینه شتاب زلزله‌ها به عنوان ضریب وزنی استفاده شده است. به جای X در رابطه بالا معکوس بیشینه جابجایی و سرعت سازه کنترل نشده تحت زلزله‌های مختلف قرار می‌گیرد.

۳-۵- معیارهای ارزیابی

برای ارزیابی عملکرد کنترلگرها از اندیس‌های (J1-J14) معرفی شده برای ساختمان‌های مبنا غیر خطی، که به طور خلاصه در جدول ۴ ارائه شده است، استفاده می‌گردد [۳۱]. این معیارها به عنوان نسبتی از پاسخ‌های کنترل شده به کنترل نشده محاسبه می‌شوند و مقادیر کوچک‌تر معیارهای ارزیابی عموماً مطلوب هستند. معیارهای ارزیابی به سه دسته تقسیم می‌شوند: پاسخ‌های ساختمان، خسارت ساختمان و دستگاه‌های کنترل. این سه دسته دارای معیارهایی به صورت محاسبه مقادیر بیشینه و نرم^{۳۲} می‌باشند.

۴- تحلیل و ارائه داده‌ها

به منظور ارزیابی اثربخشی سیستم کنترلی فازی نوع ۲ عمومی در مدیریت عدم قطعیت‌های حاکم بر سازه، پاسخ سازه کنترل نشده و کنترلگرهای فازی نوع ۱ و نوع ۲ بازه‌ای و کنترلگر LQG مورد بررسی قرار گرفته است. کنترلگر LQG مورد استفاده در این پژوهش دقیقاً طبق مشخصات داده شده در مرجع [۳۱] طراحی شده است. در جدول ۶ معیارهای ارزیابی محاسبه شده برای چهار کنترلگر گزارش شده است. با بررسی جدول ۵ می‌توان نتیجه گرفت که با ساختار فازی و کنترلی یکسان، کنترلگر فازی نوع ۲ عمومی تقریباً در همه معیارها عملکرد بهتری از خود نشان داده است و تقریباً هیچ گاه پاسخ بدتر نداشته است.

³¹ Scale Factor

³² Norm

Interstory Drift Ratio $J1 = \max \left\{ \frac{\max_{t,i} \left\{ \frac{ d_i(t) }{h_i} \right\}}{\delta^{max}} \right\}$	Level Acceleration $J2 = \max \left\{ \frac{\max_{t,i} \{ \ddot{x}_{ai}(t) \}}{\ddot{x}_a^{max}} \right\}$	Base Shear $J3 = \max \left\{ \frac{\max_{t,i} \{ \sum_i m_i \ddot{x}_{ai}(t) \}}{F_b^{max}} \right\}$	Normed Interstory Drift Ratio $J4 = \max \left\{ \frac{\max_{t,i} \left\{ \frac{\ d_i(t)\ }{h_i} \right\}}{\ \delta^{max}\ } \right\}$
Normed level Acceleration $J5 = \max \left\{ \frac{\max_i \{ \ \ddot{x}_{ai}(t)\ \}}{\ \ddot{x}_a^{max}\ } \right\}$	Normed base Shear $J6 = \max \left\{ \frac{\ \sum_i m_i \ddot{x}_{ai}(t)\ }{\ F_b^{max}\ } \right\}$	Ductility $J7 = \max \left\{ \frac{\max_{t,j} \left\{ \frac{ \phi_j(t) }{\phi_{yj}} \right\}}{\phi^{max}} \right\}$	Dissipated Energy $J8 = \max \left\{ \frac{\max_{t,j} \left\{ \frac{\int dE_j}{F_{yj} \cdot \phi_{yj}} \right\}}{E^{max}} \right\}$
Plastic Connections $J9 = \max \left\{ \frac{N_d^c}{N_d} \right\}$	Normed Ductility $J10 = \max \left\{ \frac{\max_j \left\{ \frac{\ \phi_j(t)\ }{\phi_{yj}} \right\}}{\ \phi^{max}\ } \right\}$	Control Force $J11 = \max \left\{ \frac{\max_{t,i} \{ f_i(t) \}}{w} \right\}$	Control Device stroke $J12 = \max \left\{ \frac{\max_{t,i} \{ y_i^d(t) \}}{x^{max}} \right\}$
Control Power $J13 = \max \left\{ \frac{\max_{t,i} \{ \sum_i P_i(t) \}}{\dot{x}^{max} W} \right\}$	Normed Control Power $J14 = \max \left\{ \frac{\left(\sum_{t_f}^1 \int_0^{t_f} P_i(t) dt \right)}{\dot{x}^{max} W} \right\}$		

جدول ۴: معیارهای ارزیابی [۳۱]

جدول ۵: معیارهای ارزیابی برای سازه بیست طبقه

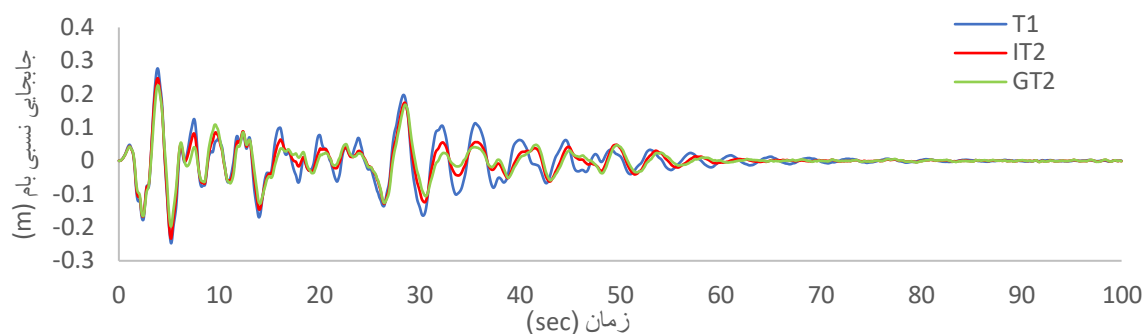
کوبه	نثریج		هاچینو			ال سنترو			زلزله		
	۱/۰	۰/۵	۱/۰	۰/۵	۱/۵	۱/۰	۰/۵	۱/۵	۱/۰	۰/۵	شدت
۰/۷۱۸	۰/۷۵۹	۰/۹۶۰	۱/۰۲۳	۰/۸۴۵	۰/۸۳۳	۰/۸۳۱	۰/۷۹۰	۰/۷۹۱	۰/۷۹۱	۰/۷۹۱	T1
۰/۶۹۸	۰/۶۶۹	۰/۹۵۲	۰/۹۷۰	۰/۸۲۶	۰/۸۰۶	۰/۸۳۱	۰/۷۱۹	۰/۶۸۴	۰/۶۳۸	۰/۶۳۸	IT2
۰/۶۲۱	۰/۵۳۴	۰/۸۹۶	۱/۰۲۷	۰/۸۲۰	۰/۷۶۰	۰/۸۲۹	۰/۶۳۷	۰/۶۴۹	۰/۶۳۱	۰/۶۳۱	GT2
۰/۷۲۸	۰/۸۱۶	۰/۹۴۲	۰/۸۵۹	۰/۹۰۷	۰/۸۸۷	۰/۸۸۳	۰/۷۴۸	۰/۷۴۸	۰/۷۴۷	۰/۷۴۷	LQG
۰/۸۷۳	۰/۷۰۱	۱/۰۳۰	۰/۹۱۹	۰/۸۷۹	۰/۷۹۶	۰/۸۱۲	۰/۷۵۲	۰/۷۳۰	۰/۷۴۱	۰/۷۴۱	T1
۰/۸۳۹	۰/۵۹۴	۱/۰۲۰	۰/۹۲۳	۰/۸۷۰	۰/۷۹۰	۰/۸۲۴	۰/۶۵۸	۰/۵۹۹	۰/۶۲۸	۰/۶۲۸	IT2
۰/۷۷۲	۰/۴۷۷	۱/۰۰۲	۰/۹۵۴	۰/۸۹۵	۰/۶۶۴	۰/۸۱۰	۰/۵۴۹	۰/۵۸۲	۰/۶۲۰	۰/۶۲۰	GT2
۰/۸۳۹	۰/۷۰۲	۰/۹۰۴	۰/۸۰۷	۰/۸۳۳	۰/۷۴۳	۰/۷۴۶	۰/۶۶۴	۰/۶۴۶	۰/۶۴۸	۰/۶۴۸	LQG
۱/۰۶۸	۰/۹۱۶	۱/۰۴۹	۰/۹۲۶	۰/۹۹۱	۰/۹۵۴	۰/۹۷۹	۰/۸۱۳	۰/۷۰۴	۰/۷۳۹	۰/۷۳۹	T1
۱/۰۴۴	۰/۸۷۲	۱/۰۵۳	۰/۹۲۰	۰/۹۷۵	۰/۹۵۳	۰/۹۷۰	۰/۸۱۴	۰/۶۹۶	۰/۷۳۸	۰/۷۳۸	IT2
۱/۰۴۰	۰/۷۴۵	۱/۰۰۳	۰/۹۹۸	۰/۹۴۴	۰/۹۳۴	۰/۹۵۰	۰/۸۰۱	۰/۶۹۱	۰/۷۳۱	۰/۷۳۱	GT2
۱/۰۶۶	۰/۹۲۵	۰/۹۶۹	۰/۸۸۵	۱/۰۰۹	۰/۹۸۲	۰/۹۷۷	۰/۹۰۹	۰/۷۸۲	۰/۷۸۰	۰/۷۸۰	LQG
۰/۴۸۱	۰/۶۲۳	۱/۱۲۰	۰/۶۷۱	۰/۸۳۱	۰/۸۱۷	۰/۸۲۰	۰/۶۸۹	۰/۶۸۵	۰/۶۹۱	۰/۶۹۱	T1
۰/۲۵۸	۰/۵۰۶	۱/۱۱۰	۰/۵۶۴	۰/۷۴۹	۰/۷۱۹	۰/۷۱۳	۰/۵۸۱	۰/۵۶۸	۰/۵۸۰	۰/۵۸۰	IT2
۰/۱۹۵	۰/۴۴۸	۱/۰۰۲	۰/۵۳۳	۰/۷۷۲	۰/۷۶۷	۰/۶۹۳	۰/۵۷۴	۰/۵۸۱	۰/۵۷۹	۰/۵۷۹	GT2
۰/۲۳۰	۰/۶۴۸	۰/۹۲۹	۰/۷۲۴	۰/۹۰۳	۰/۸۸۴	۰/۸۸۵	۰/۶۷۰	۰/۶۶۳	۰/۶۶۲	۰/۶۶۲	LQG
۰/۷۸۷	۰/۶۴۳	۰/۷۰۱	۰/۶۴۹	۰/۶۸۲	۰/۶۷۶	۰/۷۱۹	۰/۶۲۳	۰/۶۰۸	۰/۶۳۳	۰/۶۳۳	T1
۰/۷۵۷	۰/۶۱۱	۰/۶۷۲	۰/۶۰۳	۰/۶۲۹	۰/۶۷۱	۰/۷۱۲	۰/۵۲۶	۰/۶۰۴	۰/۶۰۰	۰/۶۰۰	IT2
۰/۷۱۷	۰/۵۹۶	۰/۶۴۵	۰/۷۰۶	۰/۷۲۹	۰/۶۷۲	۰/۷۰۰	۰/۵۲۴	۰/۶۰۰	۰/۵۹۱	۰/۵۹۱	GT2
۰/۷۱۳	۰/۵۷۹	۰/۶۳۷	۰/۵۹۲	۰/۶۶۱	۰/۶۵۲	۰/۶۵۸	۰/۵۷۸	۰/۵۶۰	۰/۵۶۳	۰/۵۶۳	LQG
۰/۷۸۹	۰/۶۵۵	۰/۷۷۶	۰/۶۴۹	۰/۷۶۳	۰/۷۵۵	۰/۷۷۷	۰/۶۹۰	۰/۶۸۸	۰/۷۰۹	۰/۷۰۹	T1
۰/۷۱۰	۰/۵۵۹	۰/۷۲۲	۰/۵۵۲	۰/۶۹۴	۰/۶۹۰	۰/۸۲۸	۰/۵۹۴	۰/۶۰۲	۰/۷۴۴	۰/۷۴۴	IT2
۰/۶۶۷	۰/۵۲۲	۰/۶۸۶	۰/۴۹۴	۰/۶۲۴	۰/۶۵۵	۰/۸۹۸	۰/۵۴۸	۰/۵۹۳	۰/۷۴۱	۰/۷۴۱	GT2
۰/۸۴۰	۰/۶۸۹	۰/۸۴۱	۰/۷۷۶	۰/۸۵۸	۰/۸۴۸	۰/۸۴۹	۰/۷۲۹	۰/۷۲۳	۰/۷۲۴	۰/۷۲۴	LQG
۰/۶۵۴	۰/۶۶۵	۰/۹۸۲	۰/۷۸۹	۰/۸۷۱	۰/۹۰۷	۰/۹۰۸	۰/۶۷۹	۰/۷۲۸	۰/۷۳۳	۰/۷۳۳	T1
۰/۶۵۳	۰/۵۵۸	۰/۹۸۵	۰/۷۴۳	۰/۷۹۱	۰/۸۳۹	۰/۸۳۱	۰/۶۱۹	۰/۶۳۱	۰/۵۹۹	۰/۵۹۹	IT2
۰/۶۳۶	۰/۴۲۰	۰/۹۱۳	۰/۸۰۷	۰/۷۳۲	۰/۷۸۹	۰/۷۹۰	۰/۵۱۳	۰/۵۴۷	۰/۵۴۴	۰/۵۴۴	GT2
۰/۶۸۸	۰/۶۸۸	۰/۹۷۸	۰/۷۲۸	۰/۹۴۳	۰/۹۵۹	۰/۹۵۵	۰/۷۲۲	۰/۷۷۳	۰/۷۷۲	۰/۷۷۲	LQG
۰/۴۴۶	۰/۱۳۹	۰/۶۷۲	۰/۳۴۲	۰/۲۲۴	-----	-----	۰/۰۰۱	-----	-----	-----	T1
۰/۳۳۰	۰/۰۱۰	۰/۶۴۲	۰/۲۴۴	۰/۰۷۳	-----	-----	۰/۰۰۰	-----	-----	-----	IT2
۰/۱۱۷	۰/۰۰۰	۰/۶۱۷	۰/۳۸۰	۰/۰۰۴	-----	-----	۰/۰۰۰	-----	-----	-----	GT2
۰/۳۲۳	۰/۱۴۴	۰/۵۴۸	۰/۲۲۰	۰/۷۱۴	-----	-----	۰/۰۷۸	-----	-----	-----	LQG
۰/۸۸۱	۰/۳۰۸	۰/۹۲۷	۰/۶۸۸	۰/۴۶۵	-----	-----	۰/۰۷۰	-----	-----	-----	T1
۰/۸۱۰	۰/۱۵۴	۰/۹۳۸	۰/۴۷۹	۰/۳۰۲	-----	-----	۰/۰۰۰	-----	-----	-----	IT2
۰/۷۷۴	۰/۰۰۰	۰/۹۰۶	۰/۴۳۸	۰/۰۴۷	-----	-----	۰/۰۰۰	-----	-----	-----	GT2
۰/۸۱۰	۰/۳۰۸	۰/۹۰۶	۰/۵۴۲	۰/۷۹۱	-----	-----	۰/۳۷۲	-----	-----	-----	LQG
۰/۵۲۶	۰/۶۱۴	۱/۱۳۷	۰/۵۱۷	۰/۸۰۳	۰/۷۸۰	۰/۷۷۹	۰/۶۳۰	۰/۷۰۵	۰/۷۰۵	۰/۷۰۵	T1
۰/۲۳۸	۰/۴۴۱	۱/۲۰۵	۰/۴۱۴	۰/۷۰۱	۰/۶۶۸	۰/۶۲۸	۰/۵۱۸	۰/۵۵۶	۰/۵۲۴	۰/۵۲۴	IT2
۰/۱۹۳	۰/۳۵۹	۱/۲۵۱	۰/۴۴۳	۰/۶۰۷	۰/۵۸۳	۰/۵۷۶	۰/۴۵۱	۰/۴۹۷	۰/۴۹۷	۰/۴۹۷	GT2
۰/۲۲۷	۰/۷۷۷	۰/۹۴۴	۰/۶۳۲	۰/۸۹۰	۰/۸۴۷	۰/۸۴۷	۰/۶۵۶	۰/۷۳۳	۰/۷۳۳	۰/۷۳۳	LQG
۰/۰۰۹	۰/۰۰۶	۰/۰۰۹	۰/۰۰۹	۰/۰۰۷	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۷	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	T1

0/009	0/006	0/009	0/008	0/007	0/006	0/004	0/006	0/005	0/004	IT2	J11
0/009	0/009	0/009	0/009	0/009	0/009	0/007	0/009	0/009	0/007	GT2	
0/009	0/005	0/008	0/007	0/005	0/004	0/002	0/005	0/003	0/002	LQG	
0/113	0/124	0/103	0/090	0/073	0/069	0/068	0/073	0/073	0/073	T1	J12
0/112	0/108	0/101	0/086	0/069	0/065	0/065	0/067	0/063	0/059	IT2	
0/110	0/085	0/099	0/091	0/067	0/063	0/064	0/059	0/060	0/061	GT2	
0/114	0/126	0/103	0/078	0/081	0/076	0/075	0/073	0/072	0/072	LQG	J13
0/100	0/005	0/101	0/005	0/005	0/004	0/002	0/006	0/004	0/003	T1	
0/101	0/006	0/101	0/007	0/007	0/005	0/004	0/007	0/006	0/004	IT2	
0/106	0/009	0/107	0/102	0/101	0/008	0/005	0/101	0/008	0/005	GT2	J14
0/009	0/004	0/005	0/004	0/003	0/002	0/001	0/004	0/002	0/001	LQG	
0/0002	0/0001	0/0003	0/0001	0/0002	0/0002	0/0001	0/0003	0/0002	0/0001	T1	
0/0003	0/0002	0/0003	0/0002	0/0004	0/0003	0/0003	0/0004	0/0003	0/0003	IT2	J14
0/0004	0/0002	0/0005	0/0003	0/0005	0/0004	0/0004	0/0005	0/0004	0/0004	GT2	
0/00015	0/00008	0/00012	0/00008	0/00011	0/00007	0/00004	0/00016	0/00010	0/00005	LQG	

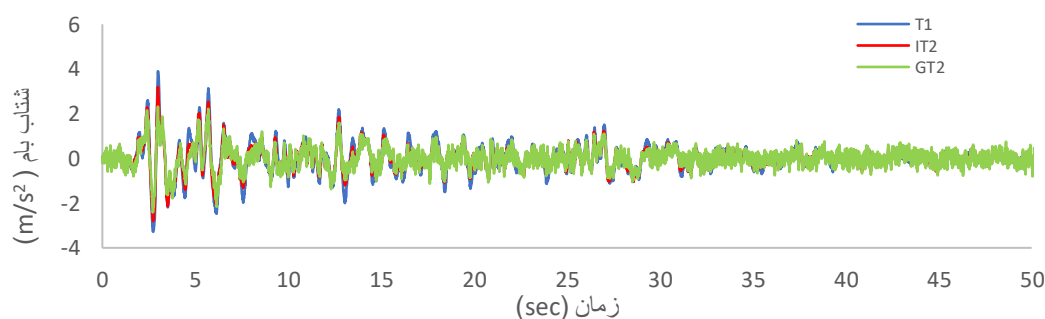
نتایج نشان دهنده توانایی کنترلگر فازی GT2 در کاهش دسته اول معیارهای ارزیابی (J1 تا J6) که مربوط به پاسخهای سازه هستند، می باشد. پاسخهای سازه برای کنترلگر فازی نوع 2 عمومی در حالت زلزله های میدان دور تا حدود 20 درصد کاهش نسبت به کنترلگر فازی نوع 1 و 15 درصد نسبت به فازی نوع 2 بازه ای داشته است. برای زلزله های میدان نزدیک این مقادیر حدود 11 درصد می باشد. کنترلگر فازی GT2 در دسته زلزله های میدان نزدیک روی زلزله کوبه بیشترین اثرگذاری را داشته است. کنترلگر فازی نوع 2 عمومی در مقایسه با کنترلگر LQG برای همه زلزله ها به جز نورث ریج تا حدود 20 درصد باعث بهبود در پاسخهای سازه بیست طبقه شده است. دسته دوم معیارهای ارزیابی، خسارت ساختمان را بررسی می کند. این معیارها به دلیل غیرخطی در نظر گرفتن رفتار سازه ها در نظر گرفته شده و عملکرد هر دو انتهای هر عضو سازه در این معیارها به حساب آمده است. هنگامی که ساختمان کنترل نشده الاستیک باقی بماند مقادیر معیارهای ارزیابی J8 و J9 به دلیل غیر قابل محاسبه بودن با خطوط تیره در جدول 6 ارائه شده است. معیار شکل پذیری J7 در حالت کنترل فازی نوع 2 عمومی تا حدود 14 درصد نسبت به فازی نوع 2 بازه ای و 24 درصد نسبت به فازی نوع 1 برای زلزله های میدان دور کاهش داشته است. که بیشترین اثرگذاری مربوط به زلزله السنترو بوده است. این معیار در حالت زلزله های میدان نزدیک در حالت کنترلگر فازی GT2 در بهترین حالت برای زلزله نورث ریج حدود 7 درصد نسبت به IT2 و T1 بهبود داشته است. معیار J7 در حالت کنترل کننده فازی نوع 2 عمومی به نسبت کنترلگر LQG برای زلزله های میدان دور و میدان نزدیک تا حدود 40 درصد در بهترین حالت اثرگذار بوده است. معیارهای ارزیابی J8 و J9 به ترتیب مربوط به انرژی تلف شده و تشکیل اتصالات پلاستیکی در زلزله های میدان دور به دلیل تشکیل نشدن مفصل پلاستیکی در سازه کنترل نشده قابل محاسبه و مقایسه نیست و برای زلزله های میدان نزدیک در حالت کنترلگر فازی نوع 2 عمومی در بهترین شرایط برای زلزله کوبه 70 درصد نسبت به دو کنترل کننده دیگر بهبود داشته است. نتایج حاصل از مقایسه حداکثر انحنای و میزان انرژی اتلاف شده در انتهای اعضای سازه ثابت می کند که سازه با کنترلگر GT2 به خوبی قادر به مقاومت در برابر زلزله های شدید می باشد. دسته سوم معیارها مربوط به عملکرد دستگاه های کنترلی است. ضربه دستگاه کنترلی (J12) برای کنترلگر فازی GT2 در بهترین حالت تا حدود 20 درصد در مقایسه با کنترلگر فازی T1 بهبود داشته است.

در شکل 17 و 18 نمودارهای تاریخچه زمانی عکس العمل های جابجایی و شتاب بام سازه به عنوان نمونه برای زلزله السنترو آورده شده است. عملکرد سازه های ساختمان از دو دیدگاه ایمنی سازه و آسایش ساکنین بررسی می شود. نسبت دریافت و میزان برش پایه به عنوان شاخص میزان آسیب سازه و شتاب به عنوان شاخصی برای برآورد سطح آسایش حائز اهمیت می باشند. در نمودارهای میله ای ترسیم شده در شکل 19 این سه معیار را برای سه کنترلگر فازی در یک نگاه می توان با هم مقایسه نمود. هر دو عامل آسایش و ایمنی برای کنترلگر

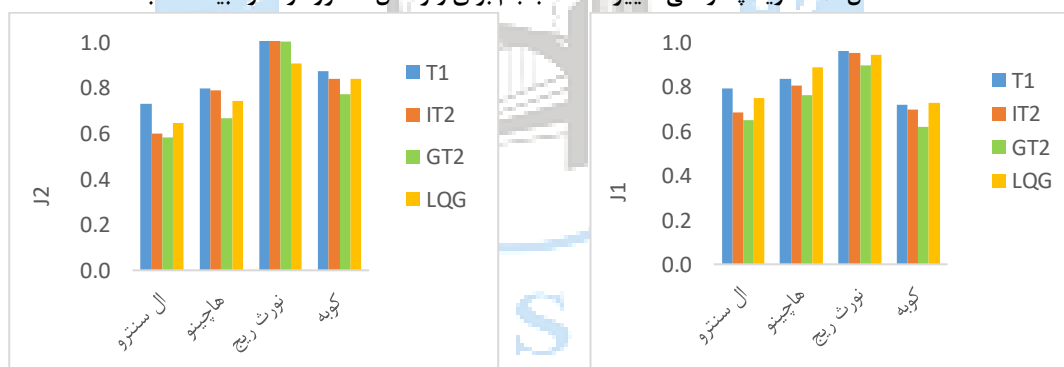
فازی نوع ۲ عمومی پیشنهادی به بهترین وجه برای زلزله‌های میدان دور و به طور قابل قبولی برای زلزله‌های میدان نزدیک تضمین شده است.



شکل ۱۷: تاریخچه زمانی تغییرات جابجایی بام برای زلزله ال سنترو در سازه بیست طبقه



شکل ۱۸: تاریخچه زمانی تغییرات شتاب بام برای زلزله ال سنترو در سازه بیست طبقه



شکل ۱۹: مقایسه سه معیار اصلی در سازه بیست طبقه: الف) دریفت ب) شتاب ج) برش پایه

۵- نتیجه گیری

به دلیل عدم قطعیت‌ها و نامعینی‌های موجود در پارامترهای سازه (مانند هندسه، جرم، سختی، میرایی و ...)، بارگذاری، اجرای سازه، نویزها، تاخیر زمانی و ... الگوریتم‌های کنترلی که تاکنون توسط محققین ارائه شده، توانایی ارائه پاسخ‌هایی با دقت بالا را ندارند. مطالعه و به کارگیری الگوریتم‌های نوینی که این عدم قطعیت‌ها رو بتواند به خوبی مدیریت کند کاملاً لازم و ضروری به نظر می‌رسد. سیستم‌های فازی نوع ۲ عمومی در زمانی که عدم قطعیت‌ها و پیچیدگی مساله زیاد باشد، بهترین گزینه به شمار می‌آیند. با مطالعه و مرور کارهای پژوهشی مرتبط انجام شده، مشخص گردید که تا به امروز در زمینه کاربرد الگوریتم فازی نوع ۲ عمومی در کنترل سازه‌ها کاری انجام نشده است. با توجه به موفقیت‌های روز افزون کاربرد این الگوریتم در علوم دیگر و نیاز به پیشرفت و معرفی روش‌های نوین، اهمیت پرداختن به این سیستم‌ها به منظور کنترل سازه‌های عمرانی کاملاً مشخص می‌گردد.

ترس از ریاضی و مفهوم پیچیده الگوریتم فازی نوع ۲ عمومی وعدم وجود برنامه و ابزارهای محاسباتی آماده و از پیش نوشته شده برای این الگوریتم را می‌توان یکی از دلایل عمده کمتر به کارگیری این الگوریتم در مسایل مهندسی تا به امروز دانست. در برنامه نویسی انجام شده برای این پژوهش، در فضای نرم افزار متلب، سعی شده است از روابط ساده سازی شده توسط متخصصین فن فازی و روابط قابل کاربرد در کنترل سازه استفاده شود. در واقع تلاش شده است که برنامه‌ای ساده و سریع و در عین حال با دقت و کارایی بالا طراحی شود. به این امید که مهندسان از این فرآیند برای استفاده در تحقیقات آینده الهام بگیرند و این پژوهش بتواند سرآغازی باشد برای ورود ابزار قدرتمند فازی نوع ۲ عمومی به حیطه مهندسی عمران و حتی سایر علوم. یک ایده و یا روش نو برای اینکه در واقعیت کاربردی شود لازم است که در پژوهش‌های متعددی به کار برده شده و نقاط ضعف و قوت آن کاملاً مشخص گردد.



- (۱) با مقایسه پاسخ‌های سازه و نمودارهای ترسیم شده می‌توان نتیجه گرفت که سیستم‌های کنترل فازی نوع ۲ عمومی در کاهش پاسخ‌های سازه و جلوگیری از خسارت رسیدن به اعضای سازه بسیار تاثیرگذار بوده است. به عنوان مثال کنترلگر فازی نوع ۲ عمومی پاسخ‌های سازه ۲۰ طبقه را حدود ۲۵ درصد برای زلزله‌های میدان دور در مقایسه با سایر کنترلگرها کاهش داده است. در نتیجه می‌توان به عنوان ابزاری قدرتمند در بحث کنترل سازه به کار گرفته شود.
- (۲) توانایی در نظر گرفتن حداکثر انحنا در انتهای اعضای سازه و میزان انرژی اتلاف شده به عنوان شاخصی برای رفتار غیرخطی سازه از مزایای این پژوهش به شمار می‌آید. کاهش این دو پارامتر از اهداف مهم کنترل سازه بوده که به خوبی توسط سیستم فازی نوع ۲ عمومی برآورده شده است. در سازه ۲۰ طبقه کنترلگر فازی نوع ۲ عمومی موفق به کاهش ۷۰ درصدی این پارامترها در مقایسه با سایر کنترلگرها برای زلزله کوبه بوده است. در نتیجه سیستم کنترل فازی نوع ۲ عمومی می‌تواند در کاهش خسارت در مقابل زلزله‌های بزرگ موثر واقع گردد.
- (۳) در نظر گرفتن توابع عضویت پیچیده تر (رد پای عدم قطعیت و تابع عضویت ثانویه) می‌تواند منجر به پایگاه قواعد ساده تر با تعداد قوانین کمتر شود. که این امر باعث کاهش بار محاسباتی، سادگی و قابل فهم بودن مساله می‌گردد.
- (۴) باید توجه نمود که دستیابی به همه مزایای سیستم‌های فازی نوع ۲ عمومی به قیمت زمان محاسباتی و مصرف قدرت بیشتر می‌باشد، که البته بحث زمان محاسباتی با گسترش سرعت کامپیوترها مساله قابل توجهی نمی‌باشد.
- (۵) استفاده خلاقانه از فرمول میانگین گیری وزن دار و در نظر گرفتن شتاب بیشینه زلزله‌ها در محاسبه ضریب مقیاس ورودی‌های سیستم فازی باعث اثرگذاری نسبی کنترلگرها روی پاسخ‌های بیشینه سازه تحت همه زلزله‌ها شده است.
- (۶) الگوریتم‌های فازی در قالب m-file نوشته شده و از هیچ گونه جعبه ابزار از پیش نوشته شده در محیط نرم افزار متلب استفاده نشده است. این امر باعث شده است که بتوان کنترلگرها را به گونه‌ای طراحی نمود که با هم قابل مقایسه باشند. از طرفی دسترسی به روابطی کارا و سازگار برای انواع روش‌های کنترل و انواع سازه‌ها در شرایط مختلف فراهم گردد.
- (۷) سیستم کنترل فازی نوع ۲ عمومی در مقایسه با کنترل کننده LQG قادر به کاهش ۴۰ درصدی خسارت سازه در مقابل زلزله‌های مختلف می‌باشد.
- (۸) در صورت طراحی صحیح سیستم فازی و در صورت وجود عدم قطعیت‌ها قاعده کلی در زمینه تغییر هوشمندانه سیستم‌های فازی نوع ۱ به نوع ۲ بازه ای و بعد نوع ۲ عمومی مبنی بر این انتظار است که پاسخ‌ها یا ثابت مانده یا بهبود پیدا می‌کنند. این قاعده به طور مشهود در این پژوهش مشاهده و اثبات گردیده است.

مراجع

- [1] Wani, Z. R., Tantray, M., Farsangi, E. N., Nikitas, N., Noori, M., Samali, B., & Yang, T. Y. (2022). A critical review on control strategies for structural vibration control. *Annual Reviews in Control*, 54, 103-124.
- [2] Ikeda, Y. (2004). Active and semi-active control of buildings in Japan. *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, 4(3), 278-282.
- [3] Jalaeifar, A., & Kiani, M. (2021). Assessing the Efficiency of an Active Viscous Damper in Near-Field and Far-Field Earthquakes. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(6), 280-300.
- [4] Fazaeli Hosseini Nejad, H. and Karamodin, A. (2022). Semi-active control of three-story benchmark structure using LQG algorithm with a fuzzy-genetic system. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 9(5), pp.107-123.
- [5] Bahrami Rad, A., Nouri, M., Katebi, J. and Mousavi Ghasemi, S.A. (2021). A Kalman Filter-based model predictive control scheme with actuator saturation consideration for active control of a nine-story benchmark SAC building. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(8), pp.155-173.
- [6] Soong, T.T. (1988). State-of-the-art review: active structural control in civil engineering. *Engineering Structures*, 10(2), pp.74-84.
- [7] Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), pp.338-353.
- [8] Mamdani, E. H. (1974, December). Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. In *Proceedings of the institution of electrical engineers* (Vol. 121, No. 12, pp. 1585-1588). IET Digital Library.
- [9] Zadeh, L.A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I. *Information sciences*, 8(3), pp.199-249.

- [10] Carvajal, O., Melin, P., Miramontes, I., & Prado-Arechiga, G. (2021). Optimal design of a general type-2 fuzzy classifier for the pulse level and its hardware implementation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 97, 104069.
- [11] Ontiveros-Robles, E., Melin, P. and Castillo, O. (2018), "Comparative analysis of noise robustness of type 2 fuzzy logic controllers" , *Kybernetika*, 54(1), 175-201.
- [12] Mittal, K., Jain, A., Vaisla, K.S., Castillo, O. and Kacprzyk, J. (2020), "A comprehensive review on type 2 fuzzy logic applications: Past, present and future" , *Eng. Applicat. Artif. Intell.* 95, 103916.
- [13] Bahmaei, M. and Zahrai, S.M. (2022). Semi-active control of adjacent 3-and 9-story structures using type-1 and type-2 fuzzy algorithms. *Journal of Vibration and Sound*, 11(21), pp.30-45.
- [14] Azadvar, M., Hajkazemi, H., & Karamoddin, A. (2018). structural damage control with interval type-2 fuzzy logic controller. *AUT Journal of Civil Engineering*, 2(2), 125-134.
- [15] Ramezani1a, M., Bathaei, A., & Zahrai, S. M. (2019). Comparing fuzzy type-1 and-2 in semi-active control with TMD considering uncertainties. *Smart Struct Systems*, 23(2), 155-171.
- [16] Al-Ghazali, A. S., & Shariatmadar, H. (2021, October). Hybrid active control of adjacent buildings interconnected by viscous dampers utilizing type-2 fuzzy controller considering soil-structure interaction. In *Structures* (Vol. 33, pp. 292-306). Elsevier.
- [17] Hosseini Lavassani, S. H., & Shangapour, S. (2022). Interval type-2 fuzzy hybrid control of a high-rise building including soil-structure interaction under near-field and far-field ground motions. *Structural Engineering International*, 32(3), 316-327.
- [18] Mendel, J. M. (2007). Advances in type-2 fuzzy sets and systems. *Information sciences*, 177(1), 84-110.
- [19] Karnik, N. N., & Mendel, J. M. (1998, May). Introduction to type-2 fuzzy logic systems. In *1998 IEEE international conference on fuzzy systems proceedings. IEEE world congress on computational intelligence (Cat. No. 98CH36228)* (Vol. 2, pp. 915-920). IEEE.
- [20] Hagrass, H. (2007). Type-2 FLCs: A new generation of fuzzy controllers. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2(1), 30-43.
- [21] John, R., & Coupland, S. (2007). Type-2 fuzzy logic: A historical view. *IEEE computational intelligence magazine*, 2(1), 57-62.
- [22] Mendel, J., Hagrass, H., Tan, W. W., Melek, W. W., & Ying, H. (2014). *Introduction to type-2 fuzzy logic control: theory and applications*. John Wiley & Sons.
- [23] Wu, H., & Mendel, J. M. (2002). Uncertainty bounds and their use in the design of interval type-2 fuzzy logic systems. *IEEE Transactions on fuzzy systems*, 10(5), 622-639.
- [24] Wu, D., & Mendel, J. M. (2010). On the continuity of type-1 and interval type-2 fuzzy logic systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 19(1), 179-192.
- [25] Mendel, J. M., John, R. I., & Liu, F. (2006). Interval type-2 fuzzy logic systems made simple. *IEEE transactions on fuzzy systems*, 14(6), 808-821.
- [26] Liang, Q., & Mendel, J. M. (2000). Interval type-2 fuzzy logic systems: theory and design. *IEEE Transactions on Fuzzy systems*, 8(5), 535-550.
- [27] Mendel, J. M., & Liu, F. (2008, June). On new quasi-type-2 fuzzy logic systems. In *2008 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (IEEE World Congress on Computational Intelligence)* (pp. 354-360). IEEE.
- [28] Mendel, J. M., Liu, F., & Zhai, D. (2009). α -plane representation for type-2 fuzzy sets: Theory and applications. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 17(5), 1189-1207.
- [29] Liu, F. (2008). An efficient centroid type-reduction strategy for general type-2 fuzzy logic system. *Information Sciences*, 178(9), 2224-2236.
- [30] Kamik, N. N., & Mendel, J. M. (2001). Centroid of a type-2 fuzzy set. *Information Sciences*, 132(1-4), 195-220.
- [31] Ohtori, Y., Christenson, R. E., Spencer Jr, B. F., & Dyke, S. J. (2004). Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings. *Journal of engineering mechanics*, 130(4), 366-385.
- [32] Cuevas, F., Castillo, O., & Cortes, P. (2022). Optimal setting of membership functions for interval type-2 fuzzy tracking controllers using a shark smell metaheuristic algorithm. *International Journal of Fuzzy Systems*, 24(2), 799-822.
- [33] Shahabian Moghaddam, F., Shariatmadar, H. and Golnargesi, S. (2023). Tuning the Type-2 Fuzzy Controller for Active Control of Buildings under Seismic Vibrations. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 47(3), pp.1643-1656.