

# تحلیل ریسک زلزله با استفاده از سیستم استنتاج گر فازی و کاربرد آن در مطالعات بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود

غلامرضا قدرتی امیری<sup>۱\*</sup>، سهیل اثمیری سعدآباد<sup>۲</sup>، علی زارع حسین‌زاده<sup>۳</sup>

۱- استاد، قطب علمی پژوهش‌های بنیادین در مهندسی سازه، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران- مهندسی زلزله، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- مهندسی زلزله، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

ghodrati@iust.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۸/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۷/۰۶

**چکیده-** یکی از مشکلات مهم در مطالعات بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود، تصمیم‌گیری به موقع برای ختم و یا ادامه‌ی مطالعات مراحل مختلف بهسازی، به منظور صرفه‌جویی در وقت و هزینه است. برای حل این مشکل و اظهار نظر منطقی‌تر پیرامون این مسئله، می‌توان از سیستم‌های تصمیم‌گیر در ارزیابی سازه کمک گرفت. در این مقاله، روند استفاده از ابزار فازی برای دسته‌بندی سازه‌ها به سطح پذیرش خطر لرزه‌ای با توصیف کیفی ارائه شده است. هدف از این تحقیق، تهیه‌ی مدلی است که بتواند مطالعات اولیه‌ی بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود و همچنین، تصمیم‌گیری درباره‌ی ادامه‌ی روند مطالعات آن‌ها را تسریع بخشد. از جمله مهم‌ترین مزایای روش پیشنهادی می‌توان به امکان مدل کردن عدم قطعیت‌ها، ورود اطلاعات برداشت شده از سازه به صورت کیفی و سرعت بسیار بالای روند تحلیل ریسک، اشاره کرد. در نهایت، برای بررسی کارایی روش پیشنهادی، مدل طرح شده روی تعدادی از مدارس تهران و حومه، آزمایش شد که نتایج حاکی از کارایی مناسب آن است.

**واژگان کلیدی:** ارزیابی سریع، انتخاب ویژگی یا پارامتر، یادگیری درخت تصمیم، توابع عضویت فازی، سیستم کنترل کننده‌ی فازی.

## ۱- مقدمه

سازه، بر اساس مطالعات تحلیل خطر می‌باشد. امروزه روند تحلیل خطر و خطرپذیری زلزله برپایه‌ی محاسبات آمار و احتمالاتی استوار است. تحلیل خطر زلزله<sup>۱</sup> عبارت است از تحلیل احتمالاتی روی شدت زلزله، تعداد دفعات و محل وقوع آن [۱]. حال آن‌که، تحلیل خطرپذیری زلزله یا تحلیل ریسک زلزله<sup>۲</sup> عبارت است از تحلیل روی اطلاعات برداشت

پدیده‌ی زلزله یکی از زیان‌بارترین بلاهای طبیعی است که ماهیتی بسیار پیچیده و غیرقابل پیش‌بینی دارد. آنچه به عنوان تبعات رخداد زلزله در ذهن مهندس سازه، تداعی می‌شود، رخداد آسیب‌هایی با سطوح مختلف در سازه‌هاست که این آسیب‌ها، می‌توانند تبعات مستقیم یا غیر مستقیمی اعم از آسیب‌های جانی، مالی و ... داشته باشند؛ حال آن‌که، میزان پذیرش این آسیب‌ها، نتیجه‌ی عملکرد پیش‌بینی شده برای

1- Earthquake Hazard Analysis  
2- Earthquake Risk Analysis

می‌گردد. روند کلی ارزیابی سریع به این صورت است که اطلاعات مربوط به سازه از سوی ارزیاب جمع‌آوری شده و به سازه امتیازی داده می‌شود. سپس با توجه به امتیاز کسب شده و طبق نظر کارشناسان، در مورد ادامه‌ی روند مطالعات به‌سازی تصمیم‌گیری می‌شود.

در سال‌های اخیر، مطالعات زیادی در زمینه‌ی کاربرد منطق فازی در علم تحلیل خطر و تحلیل ریسک انجام شده است. Hüllermeier و همکارانش، در سال ۲۰۰۵ میلادی، با هدف تکمیل تئوری احتمالاتی موجود در زمینه‌ی تحلیل ریسک، مدل جدیدی بر اساس ادغام تئوری فازی با تئوری احتمالاتی، پیشنهاد دادند [۵ و ۵]. آنها در مدل پیشنهادی خود، عدم قطعیت‌های موجود در روابط شدت خطر، خسارت، هزینه و آسیب‌پذیری را همزمان و به‌صورت یکجا به‌وسیله‌ی ابزار فازی مدل کردند و با ابداع روش فازی - احتمالاتی<sup>۱</sup> به نتایج دقیق‌تری نسبت به مدل مقایسه شده‌ی احتمالاتی رسیدند. حجم محاسبات بالا و فرمولاسیون پیچیده‌ی مبتنی بر محاسبات احتمالاتی، جزء مهم‌ترین معایب این روش بود. Sen در سال ۲۰۱۰ میلادی، روشی نوین جهت ارزیابی سیستماتیک خطر لرزه‌ای سازه‌ها، با استفاده از ابزار منطق فازی، پیشنهاد داد [۶]. در این روش، با توجه به ویژگی‌های مختلف سازه‌ها، میزان پذیرش خطر لرزه‌ای به دسته‌هایی با توصیفات زبانی یا کیفی تقسیم شده بود. یکی از مهم‌ترین معایب این روش این بود که در آن، میزان تأثیر پارامترهای ورودی بر خروجی سیستم، و اینکه این پارامترها بر چه اساسی به عنوان پارامترهای ورودی سیستم ارزیاب انتخاب شده‌اند، مشخص نبود. هم‌چنین دقت عملکرد مدل پیشنهادی، ارزیابی نشده بود. به بیان دیگر، میزان دقت و صحت محاسبات مدل فازی طراحی شده، بررسی نشده بود.

شده از موقعیت سازه‌ی موجود و مجاورت آن با عوامل لرزه‌زا که نتیجه‌ی این تحلیل، ارزیابی میزان اختلاف سازه با استانداردهای موجود کنونی در زمینه‌ی طراحی و اجراست [۲]. امروزه برای تعیین میزان پذیرش خطر لرزه‌ای سازه‌ها در مطالعات به‌سازی، به‌صورت گسترده‌ای از آیین‌نامه‌های ATC و Fema و موارد مشابه آن استفاده می‌شود. روند مطالعه‌ی کامل و کنترل بند بند ضوابط این آیین‌نامه‌ها، غالباً امری وقت‌گیر و هزینه‌بر است. از طرف دیگر، بسیاری از سازه‌های موجود به‌قدری از استانداردهای طراحی دورند که ارزش ارزیابی تفصیلی را ندارند. بر این اساس، آیین‌نامه‌های مذکور از چک لیست‌های ارزیابی سریع برای تهیه‌ی شناسنامه‌ی فنی سازه‌های مورد مطالعه در فرایند به‌سازی، استفاده می‌کنند. اطلاعات حاصله از چک لیست‌های ارزیابی سریع سازه‌ها، باعث می‌شود تا تصمیم‌گیری در موارد زیر، راحت‌تر و سریع‌تر صورت پذیرد:

چنانچه سازه با استانداردهای موجود کنونی اختلاف زیادی نداشته و میزان پذیرش خطر لرزه‌ای آن کم باشد، احتمالاً به ادامه‌ی مطالعات به‌سازی نیاز نیست و میزان پذیرش خطر لرزه‌ای سازه متناسب با سطح عملکرد مورد نیاز است.

چنانچه سازه با استانداردهای موجود کنونی، اختلاف داشته و احتمالاً به‌سازی آن ممکن و اقتصادی نباشد، روند مطالعات به‌سازی ادامه می‌یابد.

چنانچه سازه، اختلاف زیادی با استانداردهای موجود کنونی داشته و سطح پذیرش خطر لرزه‌ای آن بالا باشد، احتمالاً نیاز به ادامه‌ی مطالعات به‌سازی نیست و باید تخریب یا تغییر کاربری آن در دستور کار قرار گیرد [۳].

در ایران برای تهیه‌ی شناسنامه‌ی فنی به‌سازی لرزه‌ای ساختمان، از دستورالعمل ارزیابی سریع ساختمان‌های موجود، نشریه‌ی شماره‌ی ۳۶۴، روش ATC و آریا استفاده

در این مقاله، با کمک تئوری فازی، روشی جهت تعیین سطح خطر لرزه‌ای سازه‌ها ارائه شده است. برای طراحی یک سیستم ارزیاب سریع، از روش انتخاب ویژگی یا پارامتر به‌وسیله‌ی الگوریتم یادگیری درخت تصمیم<sup>۱</sup> استفاده شده و پارامترهای ورودی سیستم انتخاب شده‌اند. استفاده از این الگوریتم باعث بهینه‌سازی و کاهش تعداد ورودی‌های سیستم می‌گردد. سپس یک مدل استنتاج‌گر فازی برای سیستم طراحی شده است. آموزش سیستم استنتاج‌گر، بر اساس داده‌های حاصل از مطالعات به‌سازی سازه‌های شماری از مدارس کشور، صورت پذیرفته است. دقت استنتاج سیستم طراحی شده، از طریق آزمایش اولیه‌ی داده‌ها، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

هدف از انجام این تحقیق، تلاشی برای گسترش تهیه‌ی یک نرم‌افزار ارزیابی ریسک سازه است تا کاربر بتواند با وارد کردن پارامترهای مختلف مورد نیاز در تحلیل ریسک، اعم از پارامترهای ژئوتکنیکی و سازه‌ای، یک ارزیابی سریع از ساختمان داشته باشد. از مزایای این طرح می‌توان به عدم وجود فرمولاسیون پیچیده (به دلیل استفاده از مباحث غیراحتمالاتی) و استفاده‌ی آسان از نرم‌افزار طراحی شده اشاره کرد. نهایتاً، جهت بررسی کارایی مدل طراحی شده، مطالعه‌ای پیرامون ارزیابی میزان ریسک سازه‌های تعدادی از مدارس تهران و حومه انجام گرفته است که نتایج به‌دست آمده حاکی از کارایی مناسب روش پیشنهادی می‌باشد. در ادامه، ضمن معرفی اجمالی تئوری فازی، به تشریح بخش‌های مختلف مدل فازی طراحی شده می‌پردازیم.

## ۲- تئوری فازی

در سال ۱۹۶۵ با مطرح شدن تئوری فازی<sup>۲</sup> حوزه‌ای جدید در علم ریاضیات گشوده شد که بسیار بحث برانگیز بود.

واژه‌ی فازی در لغت به معنای «مبهم، گنگ، نادقیق، مغشوش، درهم و نامشخص» می‌باشد. گرچه تئوری فازی به‌منظور مدل کردن پدیده‌های غیر خطی و نامشخص به کار می‌رود، ولی خود تئوری فازی، یک تئوری کاملاً دقیق می‌باشد. به کمک این تئوری منطق انسانی و زبان طبیعت وارد ریاضیات می‌گردد [۸ و ۷]. علم فازی ابزار مناسبی است که هم به عنوان یک روش تصمیم‌گیر<sup>۳</sup> در حل مسائل به کار برده می‌شود و هم اینکه عدم قطعیت‌ها و گنگی‌ها<sup>۴</sup> را مدل‌سازی می‌نماید [۹]. برخی از مهم‌ترین ویژگی‌ها و توانایی‌های تئوری فازی، عبارتند از:

الف- استفاده از مفهوم‌های ریاضی بسیار ساده در فرایند مدل‌سازی؛

ب- انعطاف پذیری بسیار بالا در حل مسائل مشابه؛

ج- توان تحمل مطلوب در پردازش داده‌های غیر دقیق فازی و پردازش سازمان یافته‌ی داده‌های غیرمنظم؛

د- قابلیت مدل‌سازی توابع غیرخطی پیچیده؛

ه- قابلیت استفاده از تجربیات علمی و عملی موجود در مسئله‌ی مورد بررسی به‌منظور تولید مدلی پویا؛

و- قابلیت مدل کردن توصیفات کیفی و زبانی شکل مفاهیم ریاضی.

شاید بتوان ادعا کرد که دو مورد (ه) و (و)، جزو اساسی‌ترین ویژگی‌های تئوری فازی می‌باشند. قابلیت استفاده از تجربیات علمی و عملی موجود در رابطه با مسئله‌ی مورد بررسی، باعث می‌شود تا بر خلاف تکنیک شبکه‌های عصبی مصنوعی که با دریافت داده‌های آموزشی مدلی مبهم تولید می‌نماید، مدل طرح شده در تئوری فازی، پویا تر و واضح تر باشد. هم‌چنین، قابلیت مدل کردن توصیفات کیفی باعث شده است تا تئوری فازی به‌شکل گسترده‌ای مورد استفاده قرار گیرد. چرا که همین توصیفات

3- Fuzzy decision making

4- Uncertainties

5- Ambiguous

1- Decision tree learning

2- Fuzzy theory

از بین ده پارامتر مذکور بایستی مؤثرترین پارامترها را برای طراحی ورودی‌های سیستم فازی برای تعیین میزان خطرپذیری سازه، برگزید. هم‌چنین در این مجموعه داده، نتایج تصمیم بر توقف مطالعات به‌سازی به خاطر مقرون به صرفه نبودن، و یا میزان هزینه‌ی به‌سازی هر متر مربع از سازه برای سازه‌هایی که عملیات به‌سازی تا مراحل پایانی روی آن‌ها انجام گرفته است نیز موجود می‌باشد، که از این دسته از اطلاعات برای طراحی خروجی سیستم استفاده شده است. بدین صورت که سازه‌هایی که هزینه‌ی هر مترمربع عملیات اجرایی مربوط به به‌سازی آن‌ها کم‌تر و یا بیش‌تر از هزینه‌ی میانگین عملیات به‌سازی (طبق فهرست بهای ۱۳۸۷) می‌باشد، به ترتیب به دسته‌ی خطرپذیری «کم» و «متوسط»، تقسیم‌بندی می‌شوند. هم‌چنین، سازه‌هایی که در آنها، ادامه‌ی مطالعات یا عملیات به‌سازی از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست، در دسته‌ی خطرپذیری «زیاد» قرار می‌گیرند. برای دسته‌بندی پارامترها و انتخاب بهترین پارامتر به عنوان ورودی سیستم، از تکنیک درخت تصمیم، استفاده شده است. درخت تصمیم به‌منظور نمایش یک مطلب علمی براساس شاخه‌های یک درخت، طراحی می‌شود که از آن برای دسته‌بندی پارامترها و مقایسه‌ی آن‌ها از طریق امتیازهای هر شاخه از درخت، استفاده می‌شود. بدیهی است هر چه امتیاز شاخه‌ای بیش‌تر باشد، پارامتر نظیر آن شاخه از اهمیت بیش‌تری برخوردار بوده و می‌تواند به‌عنوان پارامتر ورودی منتخب برای سیستم مورد مطالعه، استفاده شود. برای ساخت درخت تصمیم، روش‌های مختلفی وجود دارد که مهم‌ترین و پرکاربردترین آن‌ها، الگوریتم J48 نرم‌افزار «وکا»<sup>۴</sup> می‌باشد [۱۲]. همانطور که اشاره شد، یکی از کاربردهای مهم درخت تصمیم استخراج مؤثرترین پارامترهاست. در درخت تصمیم ارزش هر پارامتر رابطه‌ی مستقیم با دفعات تکرار آن در گره‌ها دارد [۱۲].

4- Weka  
5- Node

کیفی، مبنای ارتباط و اظهارنظر بشر می‌باشد [۱۰ و ۱۱]. بر این اساس، تصور می‌شود که بتوان از تئوری فازی در بحث ارزیابی سازه‌ها نیز استفاده کرد؛ چراکه اکثر پارامترهای مورد استفاده در گزارش‌های ارزیابی سازه‌ها و خسارات آن‌ها، به‌شکل کیفی بیان می‌شود. در ادامه، مدل فازی پیشنهاد شده به منظور ارزیابی سریع سازه‌ها، مطرح می‌گردد.

### ۳- مدل فازی ارزیابی لرزه‌ای سریع FuzzyRapid Seismic Risk Evaluation

جهت تعریف یک مدل فازی کارآ و طراحی یک سیستم خبره<sup>۱</sup>، نیاز به اطلاعاتی جامع، به‌منظور تعلیم و آموزش سیستم طراحی شده، داریم. بنابراین در قدم اول، برای مدل‌سازی و منطبق کردن هر چه بیش‌تر مدل بر واقعیت، از مجموعه داده‌های به‌سازی مدارس ایران استفاده می‌شود. مجموعه‌ی این داده‌ها می‌تواند در طراحی یک سیستم خبره کمک‌کننده باشد. از این مجموعه داده‌ها، اطلاعاتی از سازه به شرح زیر در دست است:

الف- ماکزیمم شتاب زمین<sup>۲</sup> در محل؛

ب- نوع خاکی که سازه روی آن بناست<sup>۳</sup>؛

ج- عمر سازه؛

د- مساحت زیربنای سازه؛

ه- سیستم باربر جانبی سازه؛

و- نوع اسکلت سازه؛

ز- نوع سقف سازه؛

ح- نوع فونداسیون سازه؛

ط- وضعیت منظمی سازه در پلان؛

ی- وضعیت منظمی سازه در ارتفاع.

1- Expert system

2- Peak Ground Acceleration (PGA)

۳- این مقادیر بر اساس مندرجات آیین‌نامه‌ی طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (آیین‌نامه‌ی زلزله‌ی ۲۸۰۰؛ ویرایش سوم) استخراج شده‌اند.

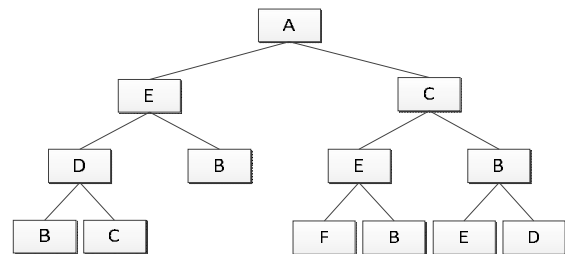
بر اساس امتیازهای فوق هفت پارامتر «عمر سازه»، «نوع خاک»، «ماکزیمم شتاب زمین در محل»، «وضعیت نامنظمی سازه در پلان»، «نوع فونداسیون سازه»، «نوع سیستم سازه‌ای» و «وضعیت نامنظمی در ارتفاع سازه»، به عنوان مؤثرترین پارامترها در ارزیابی خطرپذیری سازه‌ها برگزیده می‌شوند. به بیان دیگر می‌توان گفت که در سیستم فازی طراحی شده، سطح خطرپذیری سازه را با دانستن هفت پارامتر فوق تعیین خواهیم کرد. اگر این هفت پارامتر را به ترتیب با  $\alpha_1$ ،  $\alpha_2$ ، ... و  $\alpha_7$  نمایش دهیم، داریم:

$$f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_7) = \text{سطح خطر پذیری سازه} \quad (1)$$

شایان ذکر است که پارامترهای دیگری نظیر میزان فاصله‌ی ساختمان تا گسل‌های لرزه‌زای موجود در منطقه نیز می‌تواند ارزیابی شود، ولی چون داده‌های در دسترس (داده‌های مربوط به بررسی مدارس کشور)، فاقد اطلاعات مربوط به این پارامتر بودند، بنابراین امکان آموزش سیستم مورد طراحی در این زمینه وجود نداشت؛ در نتیجه آثار این پارامتر در محاسبات وارد نشد. هم‌چنین پارامتر تعداد طبقات سازه نیز می‌تواند بحث برانگیز باشد؛ ولی به‌خاطر مشابه بودن تعداد طبقات اکثر مدارس موجود، این نیز وارد محاسبات نشده است.

مهم‌ترین بخش طراحی یک سیستم فازی، طراحی توابع عضویت فازی<sup>۳</sup> برای هر یک از پارامترهای ورودی و خروجی است. به‌منظور اعمال عدم قطعیت‌ها در یک مدل، استفاده از توابع عضویت پیوسته<sup>۴</sup> توصیه شده است [۱۴]. نظر به عدم قطعیت در داده‌های اندازه‌گیری شده برای تعیین سطح خطر سازه‌ها (پارامترهای منتخب)، در مدل طراحی شده، از توابع عضویت پیوسته استفاده می‌شود. شایان ذکر است که در عمل، همیشه خطاهایی در داده‌های

هم‌چنین در درخت تصمیم، گره فوقانی، یعنی ریشه‌ی درخت، بهترین گره برای دسته‌بندی است و پارامترهای دیگر در گره‌های پایینی درخت تصمیم به ترتیب ارزش و اهمیت کم‌تری پیدا می‌کنند [۱۳]. از این رو می‌توان پارامترهای مؤثرتر را با ارزش‌بندی هر ردیف از درخت و محاسبه‌ی امتیاز هر پارامتر به‌دست آورد. برای مثال در شکل ۱، اگر ردیف آخر امتیاز ۲۰ بگیرد، ردیف‌های فوقانی تا ریشه به ترتیب ۲<sup>۱</sup> و ۲<sup>۲</sup> و ۲<sup>۳</sup> ارزش‌گذاری می‌شوند.<sup>۲</sup> بر اساس این تعریف درخت تصمیم شماتیک مذکور، امتیاز ارزشی پارامترهای به ترتیب برابر با ۱، ۷، ۳، ۵، ۶، ۸ و ۱ خواهد بود.



شکل (۱) درخت تصمیم فرضی برای ارزش‌گذاری پارامترهای

F, E, D, C, B, A

بر اساس نتایج حاصل از درخت تصمیم خروجی از نرم‌افزار وکا برای داده‌های این مسئله، ۱۲ ردیف شاخه‌ی درخت خروجی، از ۲۰ تا ۲<sup>۱۱</sup> ارزش‌گذاری شده و ده پارامتر مذکور مطابق جدول ۱، امتیاز کسب کرده‌اند:

جدول (۱) امتیاز پارامترهای موجود در درخت تصمیم

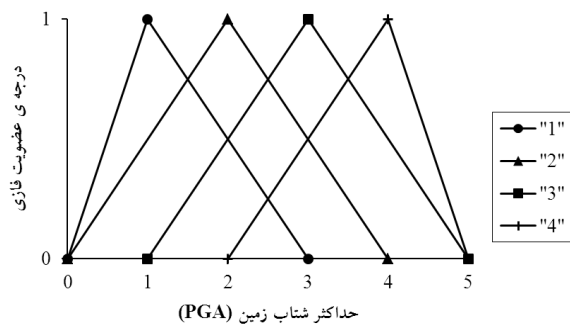
پارامتر	امتیاز	پارامتر	امتیاز
نوع سیستم سازه‌ای	۱۰۸۸	ماکزیمم شتاب زمین	۱۲۸۰
نوع سقف سازه	۵۲۸	نوع خاک	۱۷۹۲
نوع فونداسیون	۱۰۸۸	عمر سازه	۲۳۸۹
وضعیت نظم در ارتفاع	۱۰۲۸	سطح زیر بنا	۱۶۶
وضعیت نظم در پلان	۱۰۸۸	سیستم باربر جانبی	۳۸۴

۱- Root

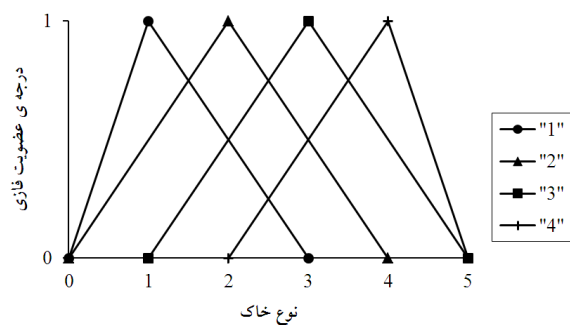
۲- این ارزش‌گذاری بسته به نظر اشخاص خبره، می‌تواند به مقادیر یا مدل‌های ریاضی متفاوتی، تغییر یابد.

3- Fuzzy membership function

4- Continuous



شکل (۲) توابع عضویت فازی PGA.



شکل (۳) توابع عضویت فازی نوع خاک.

**تابع عضویت عمر سازه:** برای طراحی توابع عضویت عمر سازه و همچنین تعیین میزان تأثیر این پارامتر بر پذیرش خطر لرزه‌ای سازه‌ها، از سه دسته توصیف کیفی «کم»، «متوسط» و «زیاد» استفاده می‌شود. برای طراحی توابع عضویت این سه مجموعه، از توابع پیوسته دوزنقه‌ای<sup>۲</sup> استفاده شده است. عدم قطعیت مطرح، به قضاوت‌های مختلف طرح شده پیرامون این قضیه که یک سازه با سن معلوم، در چه رده‌ای از توصیفات کیفی قرار می‌گیرد، مربوط می‌شود. این توابع در شکل ۴ ترسیم شده‌اند. در این شکل توصیفات کیفی «کم»، «متوسط» و «زیاد» به ترتیب با کدهای «1»، «2» و «3» مشخص شده است.

**تابع عضویت وضعیت منظمی سازه در پلان و ارتفاع:** تابع عضویت وضعیت منظمی سازه در ارتفاع و پلان مطابق شکل ۵ طراحی شده است. برای این منظور از توابع

ثابت شده وجود دارد و اعمال عدم قطعیت در مدل طراحی شده، باعث می‌شود تا مدل، دقیق‌تر و واقع‌بینانه‌تر عمل نماید. در ادامه، توابع عضویت فازی پارامترهای منتخب ورودی و پارامتر خروجی سیستم، تعریف خواهد شد.

**تابع عضویت ماکزیمم شتاب زمین:** برای هر چهار PGA موجود در داده‌ها،  $0.20g$ ،  $0.25g$ ،  $0.30g$ ،  $0.35g$ ، یک تابع عضویت مثلثی<sup>۱</sup> شکل، به گونه‌ای رسم می‌شود که هر مورد از PGAها در مقدار متناظر خود یک برابر بوده و با مقدار مجاورش همپوشانی داشته باشد. عدم قطعیت در PGAها را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که این احتمال وجود دارد که PGA حاصل از تحلیل خطر برای هر مکان خاص با مقدار مندرج در آیین‌نامه ۲۸۰۰ متفاوت باشد. شکل ۲ نماینده‌ی تابع عضویت PGA می‌باشد که در آن شتاب‌های  $0.20g$  و  $0.25g$ ،  $0.30g$ ،  $0.35g$ ، به ترتیب با کدهای «1»، «2»، «3» و «4» مشخص شده است.

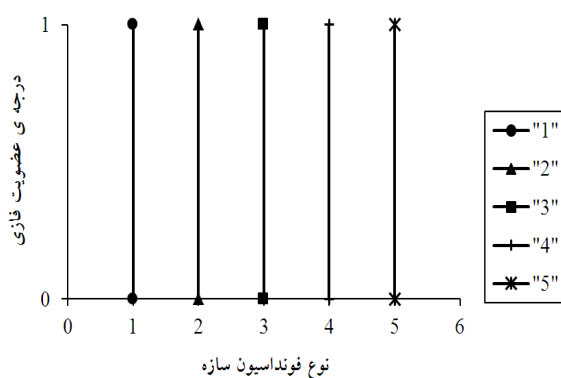
**تابع عضویت نوع خاک محل:** عدم قطعیت در نوع خاک را نیز می‌توان این‌گونه توجیه کرد که در بسیاری از موارد نوع خاک محل با نوع خاک مندرج در آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ متفاوت است و یا این‌که نوع خاک محل سازه می‌تواند آمیزه‌ای از خصوصیات دو نوع خاک مختلف باشد. شکل ۳، نماینده‌ی توابع عضویت نوع خاک است که در آن نوع خاک I، II، III و IV به ترتیب با کدهای «1»، «2»، «3» و «4» مشخص شده‌اند. مدل طرح شده برای تابع عضویت هر نوع خاک به‌گونه‌ای است که در طول از مبدأ متناظر خود مقداری برابر با واحد دارد؛ ولی در مجاورت خود مقدارش صفر نمی‌شود. به عنوان مثال، برای خاک نوع II،  $100\%$  خصوصیات خاک نوع II و  $50\%$  خصوصیات خاک‌های نوع I و III، در نظر گرفته شده است.

فونداسیون از توابع واحد<sup>۱</sup> استفاده شده است، چرا که هیچ‌گونه عدم قطعیتی در قضاوت انواع مختلف آن‌ها وجود ندارد. در کل چهار نوع سیستم سازه‌ای و پنج تیپ فونداسیون در داده‌ها دیده می‌شود. بر این اساس، در توابع عضویت سیستم سازه‌ای، کدهای "1"، "2"، "3" و "4" به ترتیب نماینده‌ی «ساختمان‌های فولادی بدون مهاربند»، «ساختمان‌های فولادی با مهاربند»، «ساختمان‌های بتنی» و «ساختمان‌های بتنی» می‌باشند.



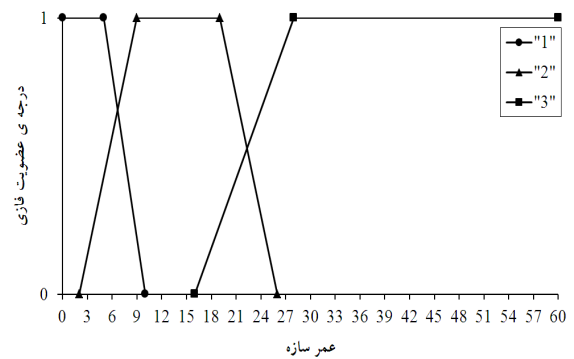
شکل (۶) توابع عضویت فازی نوع سیستم سازه‌ای

در توابع عضویت نوع فونداسیون سازه هم، کدهای "1"، "2"، "3"، "4" و "5" به ترتیب نماینده‌ی «پی منفرد بدون شناژ رابط»، «پیمنفرد با شناژ رابط»، «پی نواری»، «پی گسترده» و «کلاف افقی زیر دیوار» می‌باشند (شکل ۷).

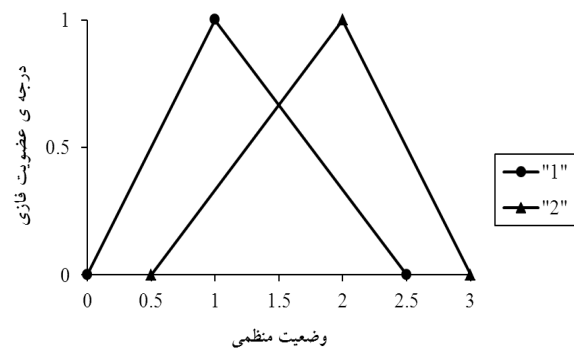


شکل (۷) توابع عضویت فازی نوع فونداسیون سازه

عضویت پیوسته مثلثی استفاده شده است. در این شکل به «منظمی» کد "1" و به «نامنظمی» کد "2" اختصاص داده شده است. عدم قطعیت مطرح پیرامون پارامتر منظم را این‌گونه می‌توان توجیه کرد که دو ساختمان فرضی که هر دو نامنظم هستند، می‌توانند به دو میزان متفاوت نامنظمی داشته باشند، حال آن‌که گزارش منظمی به صورت آری یا نه، می‌تواند از دیدگاه افراد مختلف، متفاوت باشد. به بیان دیگر، گزارش وضعیت منظمی سازه به صورت صفر و یک، چندان منطقی نیست و امکان قضاوت‌های متفاوت را فراهم می‌آورد. بنابراین دخیل کردن بحث عدم قطعیت در این زمینه، ضروری به نظر می‌رسد.



شکل (۸) توابع عضویت فازی عمر سازه



شکل (۹) توابع عضویت فازی وضعیت منظمی سازه در ارتفاع و پلان

توابع عضویت نوع سیستم سازه‌ای و نوع فونداسیون: همان‌طور که در شکل‌های ۶ و ۷ دیده می‌شود، برای طراحی توابع عضویت نوع سیستم سازه‌ای و نوع

۲۳ قاعده‌ی شرطی نوشته شده، که از نظر میزان تأثیرگذاری و دقت کار بهینه شده‌اند. به بیان دیگر، این ۲۳ قاعده‌ی شرطی، فقط شامل ۵ پارامتر منتخبی می‌باشند که توابع عضویت پیوسته داشته‌اند. چند نمونه از قواعد کلی اگر-آن‌گاه با پیروی از قوانین سیستم استنتاجی ممدانی<sup>۳</sup> که با برنامه متلب<sup>۴</sup> [۱۵]، نوشته شده است در زیر ارائه می‌گردد:

If (PGA is 3) and (SoilType is 1) and (Age is 1) and (OrderHeight is 1) then (Hazard is 1)

If (PGA is 3) and (Age is 2) and (OrderHeight is 2) and (OrderPlan is 2) then (Hazard is 2)

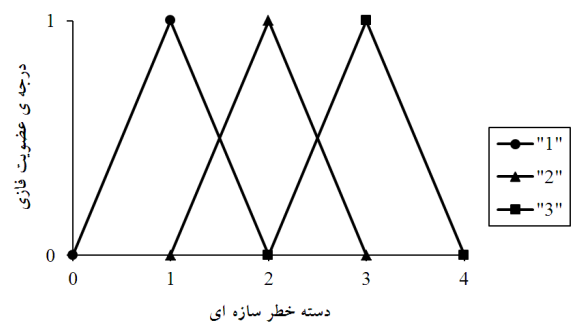
If (PGA is 2) and (Age is 3) and (OrderHeight is 2) and (OrderPlan is 2) then (Hazard is 3)

در نهایت، تک تک این قاعده‌ها در دو مرحله با هر یک از توابع عضویت سیستم سازه‌ها و نوع فونداسیون سازه‌ها (که تابع عضویت واحد و قطعی داشتند)، تکمیل می‌گردند و خروجی سیستم یا همان سطح خطر بهینه، از طریق آزمون و خطا برای یک‌یک آن‌ها، تعیین می‌شود. بدین صورت که در مرحله‌ی اول کل ۲۳ قاعده با ۴ نوع تابع عضویت سیستم سازه‌ای (شکل ۶)، بهینه می‌شوند (یعنی نوشتن قواعد شرطی با ۶ پارامتر ورودی: ۵ پارامتر دارای تابع عضویت پیوسته به علاوه توابع نظیر پارامتر نوع سیستم سازه‌ای) و سپس در مرحله‌ی بعدی کل قواعد با ۵ نوع تابع عضویت مربوط به نوع فونداسیون (شکل ۷)، به حالت بهینه می‌رسد (یعنی نوشتن قواعد شرطی با ۷ پارامتر ورودی که مرحله‌ی کامل شده‌ی قاعده‌نویسی است). در نهایت سیستم استنتاج فازی با ۲۸۶ قاعده شرطی شامل ۷ ورودی و یک خروجی (نه لزوماً همه ورودی‌ها با هم در هر قاعده) طراحی شده است که در زیر چند نمونه از آن‌ها آورده شده است:

If (PGA is 3) and (SoilType is 2) and (Age is 2) and (OrderHeight is 1) and (OrderPlan is 1) and (StrucType is 3) and (FoundType is 5) then (Hazard is 2)

If (PGA is 1) and (SoilType is 4) and (Age is 3) and (OrderPlan is 2) and (StrucType is 4) and (FoundType is 5) then (Hazard is 3)

تابع عضویت خروجی سیستم: خروجی سیستم میزان خطرپذیری سازه است که به سه دسته‌ی «کم»، «متوسط» و «زیاد» گروه‌بندی شده است. همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است، برای طراحی توابع عضویت آن‌ها از توابع مثلثی به صورت متقارن استفاده شده است. به این صورت، که هر تابع در طول از مبدأ متناظر خود مقداری برابر با واحد دارد. هم‌چنین هر تابع عضویت با مقادیر مجاورش هم‌پوشانی دارد. علت این نوع طراحی، برای بالا بردن دقت طراحی است؛ چرا که در اکثر مواقع میزان خروجی مدل طرح شده یک عدد صحیح (۱ و ۲ و ۳) نیست و می‌تواند مقدار غیر صحیح نیز اختیار کند. در این شکل سطوح خطر «کم»، «متوسط» و «زیاد» به ترتیب با کدهای «1»، «2» و «3» مشخص شده است.



شکل (۸) توابع عضویت فازی سطح خطرپذیری سازه

پس از طراحی توابع عضویت در سیستم فازی، نوبت به طراحی سیستم کنترل‌کننده‌ی آن می‌رسد، یعنی طراحی یک سیستم استنتاج گر فازی<sup>۱</sup> که از مجموعه قواعد شرطی اگر-آن‌گاه<sup>۲</sup> شکل گرفته است. در طی روند طراحی برای رسیدن به دقت بالا و بهینه، ابتدا دو ورودی سیستم سازه‌ای و نوع فونداسیون که توابع عضویت منفرد دارد، کنار گذاشته می‌شوند. با بررسی اجمالی مجموعه‌ی داده‌های موجود، نتایج آنالیز درخت تصمیم و هم‌چنین روابط منطقی علمی،

3- Mamdani  
4- Matlab

1- Fuzzy Inference System  
2- If-then rules



پارامتر ورودی، استفاده می‌شود. چرا که اطلاعات این مجموعه بدون دخالت در آموزش سیستم، خود به خود دارای عدم قطعیت می‌باشند.

دو کنترل زیر برای ارزیابی دقت مدل طرح شده، روی نتایج حاصله از سیستم صورت می‌گیرد:

الف- بررسی تعداد نتایج درست طبقه‌بندی شده. این کار، از طریق مقایسه‌ی سطح خطر پیش‌بینی شده به وسیله‌ی سیستم، طراحی و سطح خطر واقعی (که در داده‌ها وجود داشت) بررسی می‌شود.

ب- محاسبه‌ی میزان پراکنندگی خروجی‌های مدل (سطح خطر برآورد شده در سیستم) در مقایسه با نتایج موجود در داده‌ها (سطح خطر دیتاها). این کار از طریق محاسبه‌ی مجموع جذر میانگین مربعات خطاها، از طریق فرمول زیر انجام می‌شود:

$$(۲) \quad \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{سطح خطر برآورد شده با سیستم} - \text{سطح خطر دیتاها})^2}{\text{تعداد کل دیتاها}}}$$

نتایج به دست آمده از انجام دو کنترل فوق، روی دو مجموعه داده (۵۰۰ تایی در سه حالت الف، ب و ج؛ ۵۰ تایی در یک حالت کلی) در جدول ۲، ارائه شده است. بدیهی است پاسخ سیستم روی داده‌های رندم و تصادفی (مجموعه‌ی ۵۰ تایی)، دقتی کم‌تر، ولی منطقی‌تر نسبت به داده‌هایی دارد که سیستم روی آن‌ها آموزش داده شده<sup>۳</sup> است. همانطوری که دیده می‌شود، در نهایت مدل طرح شده نتیجه‌ی ۸۶ درصد صحت کلاسه‌بندی دیتاها و مجموع جذر میانگین مربعات خطاها به مقدار ۰/۲۹ در بررسی مجموعه‌ی ۵۰۰ تایی رسیده است. هم‌چنین، در بررسی نمونه‌ی ۵۰ تایی، ۷۸ درصد داده‌ها درست کلاسه‌بندی شده‌اند و جذر میانگین مربعات خطاها نیز

If (PGA is 2) and (Age is 3) and (OrderHeight is 2) and (OrderPlan is 2) and (StrucType is 3) and (FoundType is 3) then (Hazard is 3)

If (PGA is 3) and (SoilType is 1) and (Age is 1) and (StrucType is 2) and (FoundType is 2) then (Hazard is 1)<sup>۱</sup>

#### ۴- بررسی دقت مدل طراحی شده

در این بخش، میزان دقت مدل طراحی شده ارزیابی می‌شود. داده‌های مربوط به ۵۵۰ مدرسه از سراسر کشور در دسترس می‌باشد که از اطلاعات مربوط به ۵۰۰ مدرسه برای آموزش سیستم استفاده شده و اطلاعات ۵۰ مدرسه نیز به صورت رندومی انتخاب و برای تست نهایی صحت آموزش سیستم استتاج‌گر، کنار گذاشته شده است. در این بخش، میزان دقت مدل طراحی شده را یک‌بار برای اطلاعات ۵۰۰ مدرسه (داده‌هایی که سیستم روی آن‌ها طراحی شده) و یک‌بار نیز برای مجموعه اطلاعات ۵۰ مدرسه‌ای که در آموزش سیستم دخالت نداشته‌اند، ارزیابی می‌شود. در اعتبارسنجی مدل بر اساس اطلاعات ۵۰۰ مدرسه، سه حالت زیر را در نظر می‌گیریم:

الف- ۵ ورودی با توابع عضویت پیوسته؛ ب- ۵ ورودی با توابع عضویت پیوسته به علاوه نوع سیستم سازه‌ای (که این ورودی، دارای تابع عضویت منفرد می‌باشد)؛ ج- ۵ ورودی با توابع عضویت پیوسته به علاوه دو ورودی با توابع عضویت منفرد (کل ۷ ورودی).

شایان ذکر است که این حالات صرفاً برای بررسی و تعیین دقت مدل در صورت بروز نوعی نقصان و کمبود در داده‌های ورودی مطرح شده است. در اعتبارسنجی دقت مدل بر اساس اطلاعات ۵۰ مدرسه‌ی باقی‌مانده، از همه‌ی ۷

عمر: Age: نوع خاک: SoilType: ماکزیمم شتاب زمین: PGA- 1

نوع: FoundType: نوع سیستم سازه‌ای: StrucType: سازه

OrderHeight: وضعیت نظم در پلان: OrderPlan: فونداسیون

دسته خطرپذیری سازه‌ای: Hazard: وضعیت نظم در ارتفاع

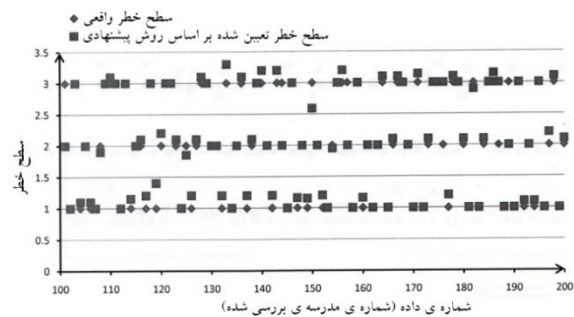
2- Root mean square error

3- System learning

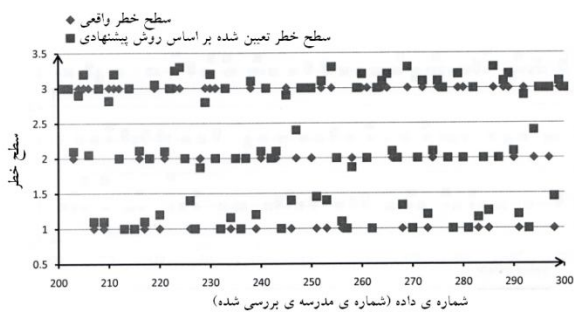
حدود ۰/۳۴ شده است.

جدول (۲) نتایج بررسی دقت مدل طراحی شده.

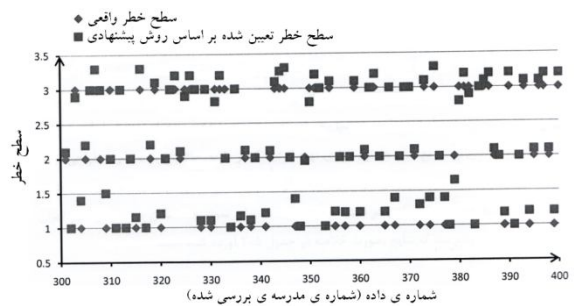
تعداد ورودی	داده‌های درست کلاسه‌بندی شده	جذر میانگین مربعات خطاها
۵؛ حالت (الف)	٪۶۹	۰/۵۳
۶؛ حالت (ب)	٪۷۸	۰/۳۳
۷؛ حالت (ج)	٪۸۶	۰/۲۹
۷ ورودی	٪۷۸	۰/۳۴



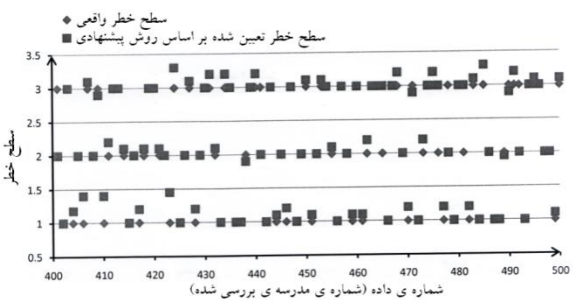
شکل (۹-ب) نتایج بررسی مدارس شماره‌ی ۱۰۱ تا ۲۰۰



شکل (۹-ج) نتایج بررسی مدارس شماره‌ی ۲۰۱ تا ۳۰۰



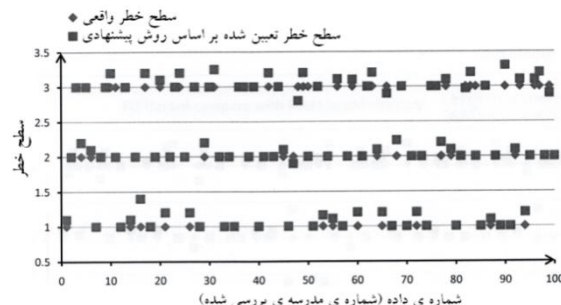
شکل (۹-د) نتایج بررسی مدارس شماره‌ی ۳۰۱ تا ۴۰۰



شکل (۹-ه) نتایج بررسی مدارس شماره‌ی ۴۰۱ تا ۵۰۰

شکل ۱۰ نشانگر معماری مدل پیشنهادی است. طراحی سیستم به‌گونه‌ای است که با گرفتن هفت پارامتر به‌عنوان

در اشکال ۹-الف تا ۹-ه، نتیجه‌ی مقایسه‌ی بین خروجی‌های دسته خطر بر اساس روش پیشنهادی و دسته خطر اصلی موجود در داده‌ها، برای اطلاعات ۵۰۰ مدرسه، ارائه شده است. در این شکل‌ها، محور افقی، بیانگر شماره‌ی مدرسه‌ی بررسی شده و محور قائم بیانگر سطح خطر تعیین شده به کمک روند پیشنهادی در این مقاله و سطح خطر تعیین شده‌ی اصلی موجود در داده‌هاست. خروجی مدل طرح شده ممکن است به‌صورت اعشاری نیز باشد، حال آن‌که سطح خطر اصلی داده‌ها که مدل طرح شده با آن مقایسه می‌شود به‌صورت عدد صحیح است (۱ و ۲ و ۳). لذا به منظور از بین بردن خطای خروجی‌های مدل طرح شده، اختلاف کوچک‌تر مساوی ۰/۲ با سطح خطر اصلی داده‌ها، برابر فرض می‌شود. باین ترتیب، از جدول ۲ و شکل ۹ واضح است که روش پیشنهادی دقت مناسبی در تعیین سریع سطح خطر سازه‌ها با کمک ۷ ورودی اولیه است.

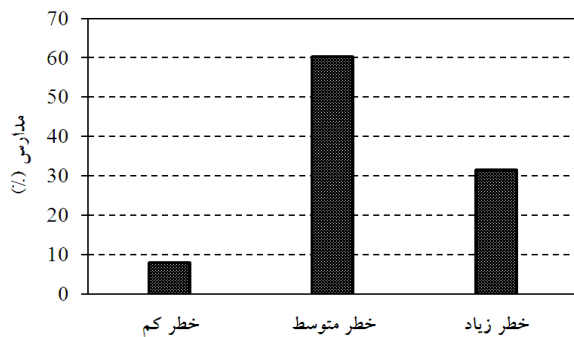


شکل (۹-الف) نتایج بررسی مدارس شماره‌ی ۱ تا ۱۰۰

خطر ۶ مورد از این مدارس، بر اساس فرم ارزیابی کیفی سریع سازمان نوسازی، توسعه و تجهیز مدارس کشور، در دسترس می‌باشد. از این رو ضمن تعیین سطح خطر تمامی مدارس به کمک روند پیشنهادی در این مقاله، مقایسه‌ای بین نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی و نتایج موجود از مطالعات اولیه‌ی صورت پذیرفته به وسیله‌ی سازمان نوسازی، توسعه و تجهیز مدارس کشور، در مورد این ۶ مدرسه صورت می‌گیرد.

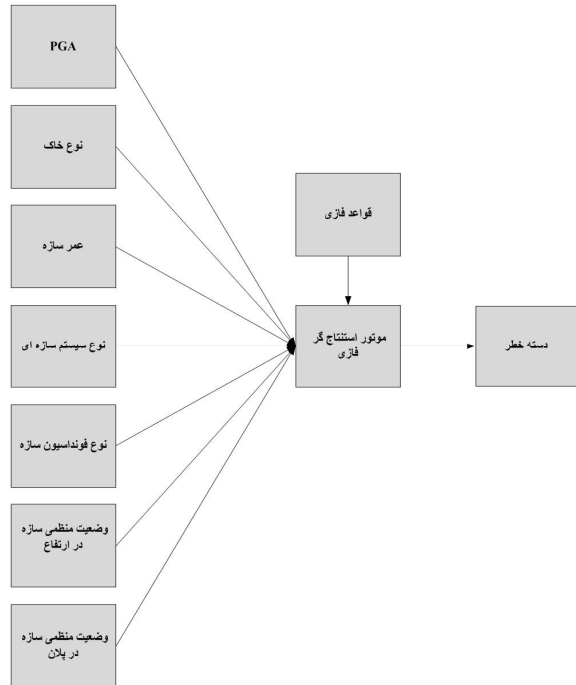
در روش پیشنهاد شده، به هفت پارامتر اشاره شده در شکل ۱۰ نیاز داریم. نرم‌افزار طراحی شده، این هفت پارامتر را به عنوان ورودی دریافت و سطح خطر را به عنوان خروجی ارائه می‌دهد. بر اساس سطح خطر به دست آمده، می‌توان پیرامون انجام سایر مراحل به‌سازی لرزه‌ای، اظهار نظر کرد. پارامترهای مذکور، برای هر ۱۳۶ مدرسه استخراج و به نرم‌افزار داده شده و سطح خطر هر مدرسه تعیین می‌شود. نتایج حاصل از این مطالعه، در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور از این شکل واضح است، ۳۱/۶ درصد از مدارس در سطح خطر زیاد، ۶۰/۳ درصد از مدارس در سطح خطر متوسط و ۸/۱ درصد از مدارس در سطح خطر کم، قرار دارند.

آن دسته از مدارسی که در گروه خطرپذیری «متوسط» قرار گرفته‌اند، برای ادامه‌ی مطالعات به مرحله‌ی کیفی می‌روند ادامه‌ی روند مطالعات به‌سازی مدارس دیگر با کمک نتایج خروجی نرم‌افزار و تصمیم کارشناسان انجام می‌پذیرد.



شکل (۱۱) طبقه‌بندی مدارس در دسته‌های خطر سه گانه.

ورودی، سطح خطر سازه را به عنوان خروجی، در اختیار کاربر قرار می‌دهد.



شکل (۱۰) معماری مدل فازی پیشنهادی

## ۵- مطالعه موردی مدارس تهران

به منظور تسهیل امر ارزیابی سریع سازه‌ها و تعیین سطح پذیرش خطر لرزه‌ای سازه‌ها، برنامه‌ای به کمک نرم‌افزار متلب تحت عنوان «ارزیابی سریع خطرپذیری لرزه‌ای» تهیه شد که از طریق استنتاج قواعد فازی طراحی شده، اطلاعات سازه را به صورت ورودی گرفته و خروجی را برای مطالعات اولیه به‌سازی لرزه‌ای سازه در اختیار کاربر قرار می‌دهد. کارایی و دقت این برنامه، از طریق مطالعات بخش ۴، به طور کامل ارزیابی است. نظر به این که این سیستم بر اساس اطلاعات ۵۰۰ مدرسه در سطح کشور طراحی شده بود، در این بخش برای بررسی کارایی آن در مطالعات اولیه به‌سازی، به مطالعه‌ی موردی ۱۳۶ مدرسه در شهر تهران و حومه می‌پردازیم. اطلاعات تعیین سطح

جدول (۳) نتایج تعیین سطح خطر برای مدارسی که نتایج تحلیل ریسک آن‌ها موجود است.

(سطح خطر اصلی دیتاها، همان سطح خطر موجود در فرم‌هاست)

شماره ردیف	نوع کاربری	تعداد طبقات	زیر بنا (مترمربع)	عمر سازه (سال)	نوع سازه	نوع فونداسیون	منظمی		سطح خطر اصلی دیتاها
							پلان	ارتفاع	
۱	دبستان	۲	۳۵۰	۳۲	بنایی	منفرد	منظم	منظم	زیاد
۲	دبستان	۲	۴۲۰	۲۷	بنایی	منفرد	منظم	منظم	متوسط
۳	مهدکودک	۳	۶۰۰	۲۹	بنایی	منفرد	نامنظم	منظم	زیاد
۴	موسسه آموزش عالی	۳	۸۳۰	۲۹	فولادی بدون مهاربندی	منفرد بدون شناژ رابط	منظم	منظم	زیاد
۵	پژوهش سرا	۲	۳۵۰	۳۵	بنایی	منفرد بدون شناژ رابط	نامنظم	نامنظم	زیاد
۶	مدرسه راهنمایی	۴	۱۸۰۰	۱۵	فولادی دو جهت مهاربند	گسترده	منظم	منظم	متوسط

حال آن‌که مطالعات قبلی آن‌را در طبقه‌ی سطح خطر زیاد قرار داده است. علت این نوع تفاوت را می‌توان با کمک بحث عدم قطعیت موجود در روند پیشنهادی توجیه نمود.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی جهت تحلیل ریسک و ارزیابی سریع خطرپذیری لرزه‌ای سازه‌ها، بر اساس سیستم‌های استنتاج گر فازی ارائه شد. کارایی روش مذکور، به‌صورت مطالعه‌ی موردی روی داده‌های موجود از مطالعات به‌سازی ۱۳۶ مدرسه در شهر تهران و حومه، بررسی شد. دقت مدل طراحی شده از طریق چند نوع روند کنترلی ارزیابی شد که نتایج حاصله، حاکی از دقت بالا و کارایی مناسب مدل طراحی شده در تعیین سطح خطر است. مهم‌ترین مزایای روش پیشنهادی به‌شرح ذیل است:

- ۱- روش پیشنهادی، قابلیت در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در پارامترهای مورد بررسی را داراست. عدم قطعیت‌ها به‌صورت‌های مختلفی، می‌تواند نتایج را تحت‌الشعاع قرار داده و باعث تفاسیر نادرست شود. لذا، ارائه‌ی مدلی برای در نظر گیری عدم قطعیت‌ها باعث شده است تا روش پیشنهادی، به نتیجه‌گیری‌های واقعی‌تر منجر شود.
- ۲- در روش پیشنهادی، امکان بیان کیفی ورودی‌ها فراهم

همانطورکه اشاره شد، در شش مورد، نتایج مربوط به تعیین سطح خطر بر اساس فرم‌های سازمان نوسازی، توسعه و تجهیز مدارس کشور، موجود است. بنابراین میزان کارایی روش پیشنهادی را با تعیین سطح خطر این مدارس و مقایسه‌ی آن‌ها با نتایج موجود، بررسی می‌شود. این شش مدرسه، در حوالی مناطق مرکزی شهر تهران بوده و از این‌رو، حداکثر شتاب محل و نوع خاک آن‌ها، به ترتیب  $0.35g$  و II، در نظر گرفته می‌شود. جدول ۳ بیانگر سایر اطلاعات ورودی به نرم‌افزار و هم‌چنین نتایج به‌دست آمده است.

همانطورکه قبلاً اشاره شد، با توجه با این‌که نرم‌افزار بسط داده شده، سطح خطر را به‌صورت اعداد اعشاری بیان می‌کند، لذا باید عدد خروجی از نرم‌افزار را گرد کنیم. با در نظر گرفتن این نکته، نتایج جدول ۳، بیانگر کارایی مناسب روش پیشنهادی در تعیین سطح خطر سازه و ارزیابی سریع آن است.

همانطورکه ملاحظه می‌شود، نتایج به‌دست آمده از روش پیشنهادی، با نتایج موجود انطباق بسیار مناسبی دارد؛ از این‌رو می‌توان گفت روش پیشنهادی، می‌تواند به عنوان روش ارزیابی سریع، سطح خطر سازه را تعیین نماید. البته در مورد سازه‌ی شماره‌ی ۳ در جدول فوق، اختلافی بین نتایج دیده می‌شود؛ به‌طوری‌که این سازه بر اساس روند پیشنهادی در این مقاله، در سطح خطر متوسط قرار دارد،

طرح به‌سازی، داشته باشد.

## ۷- تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند تا از سازمان نوسازی، توسعه و تجهیز مدارس کشور، به‌خاطر ارائه‌ی داده‌های مطالعات مدارس کشور، کمال تشکر و قدردانی را به‌جای آورند.

## ۸- مراجع

- [1] Green, R.A. and Hall, W.J., "An overview of selected seismic hazard analysis methodologies", Dept. of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, pp. 1-91, 1994.
- [2] EERI Committee on Seismic Risk. "The basics of seismic risk analysis", Earthquake Spectra, 5(4). pp. 675-702, 1989.
- [۳] «دستورالعمل ارزیابی لرزه‌ای سریع ساختمان‌های موجود، نشریه‌ی شماره ۳۶۴»، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۸۷.
- [4] I.Karimi, E.Hüllermeier, K.Meskouris. "An Earthquake risk assessment method based on fuzzy probability", Proc. Sixth Internal. FINS conf, applied computational Intelligence, Blankenberge, Belgium, world Scientific, Singapore, pp. 376-381, 2004.
- [5] ImanKarimi and EykeHüllermeier. "Risk assessment system of natural hazards: A new approach based on fuzzy probability", Fuzzy Sets and System, 158(9). pp. 987-999, 2007.
- [6] Sen, Z., "Rapid visual earthquake hazard evaluation of existing buildings by fuzzy logic modeling", Expert Systems with Applications, 37(8). pp. 5653-5660, 2010.
- [7] Zadeh, L.A., "Fuzzy sets", Information and control, 8(3), pp. 338-353, 1965.
- [8] Zadeh, L.A., "Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1, pp 28-44, 1973.

شده است. بنابراین می‌توان پارامترهایی مثل وضعیت ظاهری سازه، میزان کهولت سن ساختمان و امثالهم را به‌صورت کیفی وارد سیستم کرد. بیان کیفی داده‌های برداشت شده نه تنها باعث سادگی فرایند ارزیابی سازه‌ها می‌شود، بلکه خطاهای موجود در داده‌های کمی را هم از بین می‌برد.

۳- در روش پیشنهادی، از مدل تصمیم‌گیری فازی استفاده شده است. این مدل جزء روش‌های بسیار قوی در حل مناسب و معقولانه‌ی مسائل موجود در یک سیستم محاسباتی بوده و قابلیت رقابت با مدل‌های تصمیم‌گیری شبکه‌ی عصبی مصنوعی و عصبی و فازی را دارا می‌باشد. به‌صراحت می‌توان گفت که بارزترین قابلیت مدل به‌کار رفته در این مقاله در قیاس با مدل‌های تلفیقی با سیستم عصبی، قابلیت پیروی مستقیم از قواعد اگر-آنگاه، در بررسی و امکان‌یابی تصمیم‌های مختلف محتمل می‌باشد.

۴- مدل‌سازی نسبتاً ساده و محاسبات ریاضی کم حجم در روند تحلیل ریسک پیشنهادی، باعث شده است تا روند تعیین سطح خطر، با سرعت بسیار بیش‌تری نسبت به روش‌های کلاسیک موجود دنبال شود. چرا که، اکثر روش‌های کلاسیک موجود، بر پایه‌ی آنالیزهای احتمالاتی منطبق بر مدل احتمالات پواسون استوار بوده و لذا حجم محاسباتی بالایی دارند.

اکثر مزیت‌های اشاره شده در فوق، به‌خاطر استفاده از بحث منطق فازی در مدل‌سازی مسئله است؛ از این‌رو، استفاده از سیستم‌های استنتاج‌گر فازی باعث می‌شود تا تحلیل ریسک سازه و به تبعیت از آن، تصمیم‌گیری درباره‌ی روند مراحل به‌سازی سازه، با سرعت بسیار بیش‌تری صورت پذیرد. بنابراین، استفاده از روش پیشنهادی در این مقاله، می‌تواند کاربرد مناسبی در بخش ارزیابی سریع ساختمان‌های مورد مطالعه در مرحله‌ی اول

- [13] Michalski, R.S., Carbonell, J.G. and Mitchell, T.M. "*Machine learning: An artificial intelligence approach*", Morgan Kaufmann Pub, pp. 52-77, 1983.
- [۱۴] منہاج، محمد باقر، «محاسبات فازی (جلد سوم): هوش محاسباتی»، تهران، انتشارات دانش نگار، ۱۳۸۸.
- [15] MATLAB, "*Matlab user manual*", MathworkInc, Lowell, MA, U.S.A. 2005.
- [۹] وانگ، لی، ترجمه محمد تشنه لب، نیما صفارپور، داریوش افیونی، «سیستم‌های فازی و کنترل فازی»، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصرالدین طوسی، ۱۳۷۸.
- [10] Yager, R., "*On a general class of fuzzy connectives*", Fuzzy sets and systems, 4, pp. 235-242, 1980.
- [۱۱] کیا، سید مصطفی، «محاسبات نرم در متلب»، انتشارات کیان رایانه سبز، ۱۳۸۹.
- [12] Sugumaran, V. and Muralidharan, V. and Ramachandran, KI, "*Feature selection using Decision Tree and classification through Proximal Support Vector Machine for fault diagnostics of roller bearing*", Mechanical systems and signal processing, 21(2), pp. 930-942, 2007.