



## اولویت‌بندی خطرپذیری لرزه‌ای ساختمان‌های فولادی با استفاده از سیستم استنتاج فازی: مطالعه موردی ساختمان‌های مدارس مناطق منتخب شهر تهران

محمدحسین زهتاب یزدی<sup>۱</sup>، مرتضی رئیسی دهکردی<sup>۱\*</sup>، مهدی اقبالی<sup>۲</sup>، غلامرضا قدرتی امیری<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۵-۲۷

بازنگری: ۱۳۹۷-۰۸-۱۰

پذیرش: ۱۳۹۷-۰۹-۲۴

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۹-۲۴

### کلمات کلیدی:

اولویت‌بندی خطرپذیری لرزه‌ای

روش استنتاج فازی

ساختار سلسله‌مراتبی

ساختمان‌های فولادی

مدارس شهر تهران

**خلاصه:** اولین و مهم‌ترین گام در تهیه طرح بهسازی لرزه‌ای برای ساختمان‌های موجود، تحلیل آسیب‌پذیری از طریق انجام مطالعات بهسازی و تهیه گزارش‌های کیفی و کمی می‌باشد. از طرفی اغلب ساختمان‌های موجود در شهر تهران به خاطر وجود دلایلی از قبیل لرزه‌خیزی بالای منطقه، به‌روزرسانی آیین‌نامه‌های ساختمانی و لرزه‌ای، فراوانی ساختمان‌های قدیمی و غیره نیاز مبرمی به انجام مطالعات بهسازی دارند. در این مطالعات، شناسایی وضعیت ساختمان‌هایی که در اولویت اول بهسازی لرزه‌ای هستند، به ویژه برای ساختمان‌های با اهمیت زیاد دارای کاربری عمومی مانند مدارس، اهمیت بسیار زیادی دارد. در این مقاله، یک فرآیند اولویت‌بندی خطرپذیری لرزه‌ای ساختمان‌های فولادی با استفاده از ساختار سلسله‌مراتبی ارزیابی و به کمک روش استنتاج فازی پیشنهاد شده است. همچنین این روش برای ساختمان‌های فولادی مدارس شهر تهران به عنوان مطالعه موردی استفاده گردیده است. روند انجام فرآیند اولویت‌بندی به این ترتیب است که اطلاعات مورد نیاز ساختمان‌ها طبق ساختار سلسله‌مراتبی طراحی شده، جمع‌آوری و دسته‌بندی شده‌اند؛ سپس بعد از کمی‌سازی اطلاعات کیفی و فازی‌سازی آن‌ها، داده‌ها طبق سیستم استنتاج فازی، مدل‌سازی و ارزیابی و سپس فازی‌زدایی گردیده‌اند؛ فرآیند مذکور برای تمامی مراحل ساختار سلسله‌مراتبی انجام شده تا پارامتر خطرپذیری لرزه‌ای بدست آید. این پارامتر پس از کیفی‌سازی، وضعیت ریسک ساختمان‌ها و نیازمندی بهسازی یا بازسازی آن‌ها را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از این تحقیق، ساختمان‌های فولادی مدارس که خطرپذیری لرزه‌ای بالایی دارند و نیازمند انجام مطالعات بهسازی هستند را به تفکیک مناطق شهری، مشخص کرده و نقش هر یک از پارامترهای تأثیرگذار بر خطرپذیری لرزه‌ای ساختمان‌ها را نشان داده است.

### ۱- مقدمه

لرزه‌ای، یک پدیده طبیعی همچون شکست گسل، رانش زمین، روانگرایی و غیره است که توسط زلزله ایجاد می‌گردد و به وسیله سه پارامتر شدت زلزله (اندازه‌گیری فیزیکی)، موقعیت زلزله (اندازه‌گیری فضایی) و تعداد دفعات زلزله (اندازه‌گیری زمانی) مشخص می‌شود. حال آن‌که خطرپذیری لرزه‌ای، میزان احتمالی است که بر اثر خطر لرزه‌ای وارد، انسان محتمل زیان شود و یا محیط ساخته شده توسط وی، دچار خسارت گردد. این احتمال توسط چهار پارامتر احتمال، شدت زلزله (یعنی یک اندازه‌گیری فیزیکی یا مالی)، اندازه‌گیری فضایی و زمانی مشخص می‌گردد [۲۳].

زلزله به عنوان یک پدیده پیچیده و تصادفی یکی از بزرگترین خطرات طبیعی و تهدیدی جدی برای انسان‌ها به شمار می‌رود. لذا در رابطه با امور ساختمانی و عمرانی، این موضوع سبب تمرکز توجه مهندسیین و محققین سازه و زلزله به خصوص در مناطق لرزه‌خیز گردیده است. میزان پذیرش انواع آسیب‌های ناشی از زلزله شامل آسیب‌های مالی، جانی و غیره، نتیجه عملکرد پیش‌بینی شده برای سازه، بر اساس مطالعات تحلیل خطر زلزله می‌باشد [۱۷]. خطر

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mraissi@iust.ac.ir



در سال های اخیر شمار بسیاری از مقالات و مطالعات از روش فازی در زمینه مسائل اولویت بندی خطرپذیری لرزه ای ساختمان ها، به عنوان یکی از مؤثرترین و کاربردی ترین روش های تصمیم گیری معیارهای چندگانه استفاده کرده اند. تسفاماریام و ساعتچی اوغلو<sup>۳</sup> در سال ۲۰۰۸ یک روش ارزیابی براساس ریسک لرزه ای پیشنهاد نمودند که در آن با استفاده از تکنیک فازی به کمی سازی ارزیابی های لرزه ای پرداخته و یک فرآیند اولویت بندی لرزه ای برای ساختمان های بتن مسلح مطرح کردند [۱۹]. سپس در سال ۲۰۱۰ همان نویسندگان با ارزیابی آسیب پذیری لرزه ای ساختمان های بتن مسلح و در نظر گرفتن برخی از جزئیات پارامترهای ورودی لرزه ای، مقاله پیشین خود یعنی روش اولویت بندی ریسک لرزه ای ساختمان های بتن مسلح را به مدلی جزئی تر و دقیق تر تعمیم دادند [۲۰]. تسفاماریام در سال ۲۰۱۲ با همکاری وانگ<sup>۴</sup> مقاله ای با هدف اولویت بندی بهسازی لرزه ای بر مبنای خطرپذیری برای ساختمان های بتن مسلح مهم شهری منتشر کردند و به عنوان مطالعه موردی، بیش از ۶۰۰ ساختمان بتنی مراکز آموزشی و اورژانسی واقع در ایالت اورگان<sup>۵</sup> آمریکا را مورد ارزیابی قرار دادند [۲۱] که در طی آن براساس یک ساختار ارزیابی سلسله مراتبی، این ساختمان ها از نظر خطرپذیری لرزه ای و با استفاده از سیستم استنتاج فازی اولویت بندی شده اند. در سال ۲۰۱۶، سالگادو-گالوز و همکاران<sup>۶</sup> ضمن انجام یک مطالعه موردی بر روی ساختمان های شهر مدلین<sup>۷</sup> و حومه آن در کشور کلمبیا، با بررسی تفکیکی هر ساختمان به تعیین شاخص ریسک لرزه ای شهری براساس تخمین خسارات مالی و جانی احتمالی و ویژگی های لرزه ای منطقه شامل پاسخ دینامیکی خاک، پرداخته اند [۱۶].

از جمله مطالعات انجام شده در زمینه اولویت بندی خطرپذیری لرزه ای برای ساختمان های داخل کشور نیز می توان به مقاله قدرتی امیری و همکاران در سال ۲۰۱۳ اشاره نمود که در آن با استفاده از تکنیک فازی، مدلی جهت تحلیل ریسک زلزله و دسته بندی سازه ها به سطح پذیرش خطر لرزه ای پیشنهاد گردیده و کارایی آن نیز بر روی تعدادی از مدارس شهر تهران مورد بررسی قرار گرفته است [۱۷]. در سال ۲۰۱۴ وحدت و همکاران روش چندمعیاره فازی

اولین و مهم ترین گام در تهیه طرح بهسازی لرزه ای برای ساختمان های موجود، تحلیل آسیب پذیری ساختمان های موجود به وسیله انجام مطالعات بهسازی و تهیه گزارش های کیفی و کمی آسیب پذیری ساختمان، می باشد. امروزه به منظور تعیین میزان خطرپذیری لرزه ای سازه ها در مطالعات بهسازی، می توان از چک لیست های ارزیابی سریع برای تهیه شناسنامه فنی سازه های مورد مطالعه استفاده کرد. این چک لیست ها توسط دستورالعمل ارزیابی سریع ساختمان های موجود، نشریه شماره ۳۶۴ [۵] و دستورالعمل ارزیابی سریع بصری ساختمان ها برای خطرات لرزه ای احتمالی، استاندارد FEMA 154 [۲] تهیه گردیده اند که با استفاده از نتایج حاصله از آن می توان آسیب پذیری لرزه ای ساختمان ها را با توجه به ویژگی های مهم و مؤثر بر عملکرد لرزه ای، بدون صرف هزینه های ناشی از ارزیابی تفصیلی (براساس آیین نامه های مربوطه) بررسی نمود. نتایج ارزیابی لرزه ای سریع ساختمان ها برای دسته بندی و اولویت بندی ساختمان ها بسیار کاربردی است.

اولویت بندی خطرپذیری لرزه ای ساختمان های موجود به عنوان نتیجه مطالعات بهسازی، بسیار حائز اهمیت است. علت این اهمیت بالا آن است که در میان همه ساختمان های موجود، با توجه به آیین نامه های کنونی ممکن است میزان پذیرش خطر لرزه ای برخی از ساختمان ها بیشتر از سایر موارد باشد؛ لذا ساختمان های مذکور دارای اولویت بالاتری جهت اقدامات مربوط به بهسازی هستند. از این رو شناسایی و تفکیک این گونه ساختمان ها می بایست توسط یک ساختار دقیق، صحیح و جامع اولویت بندی خطرپذیری لرزه ای انجام شود.

ارزیابی خطرپذیری لرزه ای ساختمان ها به عوامل و معیارهای زیادی بستگی دارد. اگر این معیارها کمی باشند، با استفاده از روش های ریاضی می توان اولویت بندی را انجام داد؛ اما از آنجا که معیارهای اولویت بندی خطرپذیری، هم به صورت کمی و هم کیفی ظاهر می شوند و همچنین بعضاً با یکدیگر در تقابل هستند، مستلزم بهره جویی از روش هایی همچون سیستم استنتاج فازی<sup>۱</sup> می باشند. سیستم استنتاج فازی ابزاری است که جهت فرموله کردن یک فرآیند به کمک پایگاه قواعد فازی<sup>۲</sup> به کار برده می شود.

3 Tesfamariam and Saatcioglu

4 Wang

5 Oregon

6 Salgado-Galvez et al.

7 Medellin

1 Fuzzy Inference Systems

2 Fuzzy Rule Base

لرزه ای، جمعیتی و بافت سازه ای مورد بررسی قرار می گیرد که با استفاده از نتایج این تحقیق می توان مشخص نمود که کدام مدارس از نظر خطرپذیری، وضعیت بحرانی تری نسبت به سایر مدارس دارند و مستلزم توجه و رسیدگی بیشتری از طریق بهسازی و یا نوسازی هستند. از مزایای این طرح می توان به استفاده آسان، جامعیت محتوی و انعطاف پذیری در کاربرد فرآیند معرفی شده، اشاره نمود.

## ۲- روش استنتاج فازی

روش فازی (Fuzzy) که در سال ۱۹۶۵ توسط لطفی زاده مطرح گردید، حوزه نوینی در علم تصمیم گیری به وجود آورد [۲۶]. در روش فازی از مفاهیم ریاضی ساده در فرآیند مدل سازی استفاده می شود و انعطاف پذیری بسیار بالایی در حل مسائل تصمیم گیری دارد. این روش قابلیت پردازش داده های غیردقیق، گنگ و غیرمنظم فازی را دارا می باشد. از جمله اساسی ترین ویژگی های روش فازی می توان به قابلیت استفاده از تجربیات علمی و عملی موجود در مسئله مورد بررسی و قابلیت مدل کردن توصیفات کیفی مفاهیم ریاضی، اشاره نمود و به همین دلیل است که روش فازی به شکل گستره ای مورد استفاده قرار می گیرد چرا که همین توصیفات کیفی، مبنای ارتباط بشر و برآمده از ذهن وی می باشد [۲۴].

بر اساس این ویژگی ها می توان گفت روش استنتاج فازی جهت ارزیابی سازه ها و حل مسائل تصمیم گیری خطرپذیری و بهسازی لرزه ای کاربردی است؛ چرا که اکثر پارامترهای مورد استفاده در گزارش های ارزیابی سازه ها و خسارات آن ها، به شکل کیفی بیان می شود. این سیستم شامل سه ویژگی اساسی زیر است:

(الف) متغیرهای زبانی علاوه بر متغیرهای عددی؛

(ب) رابطه بین متغیرها از نوع گزاره های اگر - آنگاه (گزاره های پایه)؛

(ج) یک مکانیسم استنتاجی که از الگوریتم های استدلالی تقریبی جهت فرمول بندی روابط استفاده می کند [۲۷].

مدل سازی برمبنای سیستم استنتاج فازی به صورت زیر انجام می پذیرد:

- قدم یکم - جمع آوری اطلاعات مورد نیاز معیارها جهت مدل سازی.
- قدم دوم - تبدیل معیارهای کیفی به کمی و نسبت دادن اعداد

برای ایجاد یک سیستم مدیریت ریسک در مناطق لرزه خیز را مورد مطالعه قرار دادند [۲۲]. در این مقاله نویسندگان ضمن در نظر گرفتن معیارهای مؤثر شامل معیار خطر لرزه ای، آسیب پذیری، کاربری و مدیریت پاسخ براساس مطالعه ی موردی صورت گرفته، پنج استان کشور ایران را با استفاده از روش فازی از نظر خطرپذیری لرزه ای اولویت بندی کرده و میزان تأثیر هر یک از معیارها را بر روی پنج استان موردنظر مشخص نموده اند. همچنین بوستان و همکاران در سال ۲۰۱۵ یک مدل احتمالاتی برای ارزیابی خطر لرزه ای با استفاده از روش مجموعه های فازی ارائه دادند و سپس با بهره گیری از آن در محدوده استان تهران یک منحنی خطر فازی استخراج نمودند [۴]. در سال ۲۰۱۷ نیز زهرایی و همکاران با بکارگیری سیستم خبره فازی یک مدل تحلیل ریسک برای مدیریت پروژه های ساخت پیشنهاد دادند که طی آن ضمن ارائه ساختار سلسله مراتبی مبتنی بر قوانین فازی، به تعیین ریسک کلی پروژه و رده بندی آن ها بر مبنای بزرگی پرداختند و مدل پیشنهادی را در یک پروژه ساختمانی در شهر تهران پیاده سازی کردند [۲۸].

در مقاله حاضر، فرآیند اولویت بندی خطرپذیری لرزه ای ساختمان های فولادی با بهره گیری از ابزار استنتاج فازی معرفی گردیده است. در هسته اصلی این فرآیند، یک ساختار سلسله مراتبی ارزیابی خطرپذیری لرزه ای بهینه شده قرار دارد که به طور خاص برای تعیین میزان پذیرش خطر لرزه ای ساختمان های فولادی طراحی گردیده و البته به دلیل انعطاف پذیری بالا، قابلیت به روز رسانی و تغییرات را نیز دارد. پارامترهای ورودی فرآیند به گونه ای انتخاب شده اند که تمام عوامل تأثیرگذار بر خطرپذیری لرزه ای سازه ها را دربرداشته باشند و توسط روش استنتاج گر فازی که برای سیستم مدل سازی شده است، در طی چند مرحله ارزیابی می شوند تا پارامتر ریسک لرزه ای مشخص گردد. در راستای آزمایش میزان بهره وری این فرآیند، تعداد ۱۶۰ ساختمان فولادی مدارس مناطق منتخب شهر تهران مطالعه موردی شده اند و بدین وسیله اعتبارسنجی اولویت بندی مذکور، صورت پذیرفته است.

هدف از انجام این تحقیق، ارائه و گسترش یک فرآیند اولویت بندی خطرپذیری لرزه ای برای ساختمان های دارای اسکلت فولادی است و به عنوان یک مسئله خاص، وضعیت ریسک لرزه ای ساختمان های فولادی مدارس چند منطقه مهم شهر تهران با شرایط متفاوت

جدول ۱. نمونه ای از پایگاه قواعد فازی (اولین قانون فازی)

Table 1. A sample of the fuzzy rules base (The 1st Fuzzy Step)

گزاره	نامنظمی در پلان PI	نامنظمی در ارتفاع VI	نامنظمی سازه SI
۱	کم	کم	کم
۲	کم	متوسط	کم
۳	کم	زیاد	متوسط
۴	متوسط	کم	کم
۵	متوسط	متوسط	متوسط
۶	متوسط	زیاد	زیاد
۷	زیاد	کم	متوسط
۸	زیاد	متوسط	زیاد
۹	زیاد	زیاد	زیاد

$$R_i : \text{IF } x_1 \text{ is } A_{i1} \text{ AND } x_2 \text{ is } A_{i2} \text{ THEN } y \text{ is } B_i, \quad (1)$$

$i = 1, \dots, n$

$$R = \bigcup_{i=1}^n R_i = R_1 \text{ ALSO } R_2 \text{ ALSO } \dots \text{ ALSO } R_n \quad (2)$$

در این روابط  $R_i$  بیانگر گزاره نام،  $x_1$  و  $x_2$  متغیرهای زبانی ورودی،  $n$  تعداد کل گزاره ها،  $A_{i1}$  و  $A_{i2}$  مجموعه های فازی ورودی،  $y$  متغیر زبانی خروجی و  $B_i$  مجموعه فازی خروجی می باشند. همچنین پارامتر  $R$  بیانگر گزاره ای است که مجموع عملکرد گزاره های  $R_i$  در آن نشان داده شده است. معمولاً برای روابط AND و ALSO به ترتیب از عملگرهای کمینه  $\min$  و بیشینه  $\max$  استفاده می شود.

- قدم ششم - تبدیل نتایج پردازش به یک عدد غیر فازی توسط فرآیند فازی زدایی<sup>۲</sup>.

روش های فازی زدایی متداول شامل روش مرکز سطح<sup>۳</sup>، میانه<sup>۴</sup>، متوسط وزنی<sup>۵</sup>، میانگین ماکزیمم، بزرگترین مقدار ماکزیمم و کوچکترین مقدار ماکزیمم می باشد.

قوانین و مؤلفه های فازی مطرح شده که بر اساس سیستم استنتاج فازی از نوع ممدانی به کار برده شده اند، اساساً در همه تحلیل ها و ارزیابی ها یکسان بوده و به طور رایج در این نوع از تصمیم گیری های

فازی به داده های موجود.

جهت اندازه گیری یک شاخص کیفی به صورت کمی می توان از دو روش مقیاس های فاصله ای و رتبه ای استفاده نمود. اعداد فازی نیز توسط تصمیم گیرنده انتخاب و بر مبنای سعی و خطا، کالیبره می شوند.

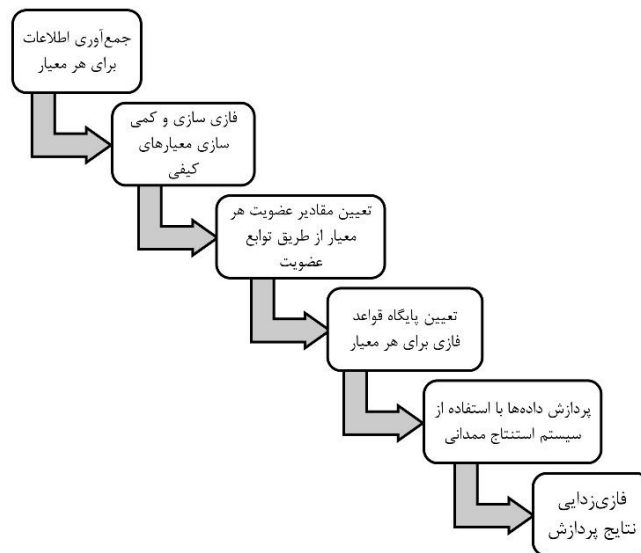
- قدم سوم - تعیین مقدار عضویت نظیر برای هر داده با استفاده از توابع عضویت تعریف شده برای هر معیار
- توابع عضویت برای تصمیمات از نوع MADM غالباً به صورت توابع مثلثی، دوزنقه ای، L-R مثلثی و L-R دوزنقه ای به کار گرفته می شوند.

- قدم چهارم - مشخص نمودن پایگاه قواعد فازی برای هر معیار پایگاه قواعد فازی، گزاره هایی بر مبنای قواعد "اگر-آنگاه" هستند که به طور کلی میان معیارها برقرار است و کارشناس خبره آن ها را مشخص می کند. نمونه ای از پایگاه قواعد فازی برای دو معیار ورودی نامنظمی در پلان (PI) و نامنظمی در ارتفاع (VI) و معیار خروجی نامنظمی سازه (SI) در جدول ۱ آمده است.

- قدم پنجم - استفاده از استنتاج از نوع ممدانی<sup>۱</sup> جهت پردازش داده ها با استفاده از روابط (۱) و (۲): [۱۰]

1 Mamdani

2 Defuzzification  
3 Centroid  
4 Bisector  
5 Weighted Average



شکل ۱. رویه مدل سازی برمبنای سیستم استنتاج فازی

Fig. 1. Modeling procedure based on fuzzy inference system

متصرف فضا، بهره برداری ساختمان و اثرات اقتصادی به عنوان پارامترهای ورودی سیستم اولویت بندی در نظر گرفته شده اند که می بایست اطلاعات آن ها در مورد هر ساختمان جمع آوری گردد و سایر پارامترهای ساختار سلسه مراتبی از پارامترهای مذکور بدست می آیند. در ادامه یازده پارامتر ورودی معرفی می گردند و توضیحاتی مختصر و کاربردی در خصوص هریک ارائه می شود.

فازی استفاده می شوند. با این وجود مؤلفه ها و قوانین زیرمجموعه آن می بایست با توجه به نوع کاربرد، مورد سعی و خطا قرار گیرد و برای هدف موردنظر، کالیبره گردند.

به عنوان خلاصه ای از مراحل مذکور، طرح شماتیک مدل سازی برمبنای سیستم استنتاج فازی در شکل ۱ نشان داده شده است.

### ۳- ساختار سلسله مراتبی ارزیابی خطرپذیری لرزه ای

مسئله پیچیده ارزیابی برمبنای خطرپذیری از طریق یک ساختار ساده و قابل کنترل سلسله مراتبی، قابل حل است. ساختار سلسله مراتبی نشان داده شده در شکل ۲ که می توان از آن تحت عنوان «ساختار آبشاری» نامبرد، مدلی پیشنهادی و توسعه یافته از مدل سلسله مراتبی ارزیابی خطرپذیری ارائه شده توسط تسفاماریام و ساعتچی اوغلو در سال ۲۰۰۸ [۱۹] می باشد که در هفت سطح و طی ده مرحله استنتاج فازی به ارزیابی خطرپذیری لرزه ای می پردازد. لازم به ذکر است که علت نامگذاری مراحل ده گانه با ترتیب معکوس در این ساختار آن است که فرآیند استنتاج فازی از پایینی ترین مرحله آبشار آغاز می گردد و به بالاترین مرحله ختم می شود.

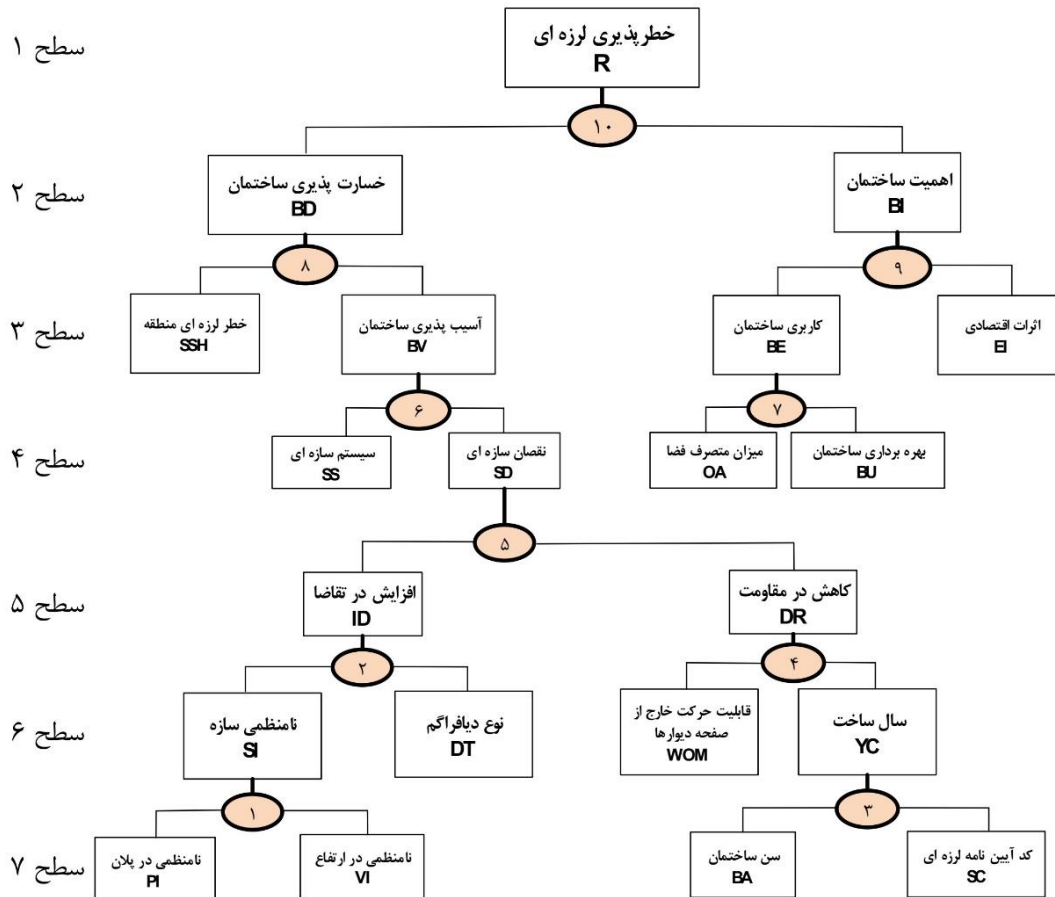
در این ساختار، پارامترهای نامنظمی در پلان، نامنظمی در ارتفاع، نوع دیافراگم، سن ساختمان، کد آیین نامه لرزه ای، قابلیت حرکت خارج از صفحه دیوارها، سیستم سازه ای، خطر لرزه ای منطقه، میزان

#### ۳-۱- نامنظمی در پلان (PI)

نامنظمی در پلان جهت تعیین آسیب پذیری ساختمان در برابر پیچش و ناحیه احتمالی تمرکز تنش زیاد استفاده می شود. در یک طراحی خوب، طرح پلان متقارن در نظر گرفته می شود. نامنظمی در پلان شامل نامنظمی هندسی، نامنظمی پیچشی، نامنظمی در دیافراگم، نامنظمی خارج از صفحه و نامنظمی سیستم های غیر موازی می باشد [۱۴].

#### ۳-۲- نامنظمی در ارتفاع (VI)

نیروی زلزله وارده به ساختمان، توسط کف ها از جایی که بیشترین جرم متمرکز شده به سمت فونداسیون به وسیله سیستم بار مقاوم جانبی منتقل می شود. پارامتر نامنظمی در ارتفاع نشان دهنده وجود ناپیوستگی و یا تغییر ناگهانی در مقاومت و سختی در راستای



شکل ۲. ساختار سلسله مراتبی ارزیابی خطرپذیری لرزه ای  
 Fig. 2. Hierarchical structure for evaluating the seismic risk

سایر قطعات سازه درگیر شده باشند که سازه و دیافراگم هنگام زلزله یکپارچه باقی بمانند. در تحلیل سازه ساختمان اثر صلبیت دیافراگم ها باید به طور مناسب در نظر گرفته شود. به طور کلی دیافراگم ها به سه دسته نرم (انعطاف پذیر) ، نیمه صلب و صلب تقسیم می شوند [۱۴].

#### ۴-۳- سن ساختمان (BA)

از دیگر شاخص های مؤثر در تعیین اولویت بندی ساختمان ها، میزان زوال یا فرسودگی ساختمان است. البته با توجه به این نکته که میزان زوال و فرسودگی ساختمان شاخصه ای کیفی است که استانداردی برای جمع آوری اطلاعات آن وجود ندارد، سن ساختمان به عنوان مولفه ای برای میزان فرسودگی ساختمان در نظر گرفته شده است. در واقع چنین فرض شده است که بر اثر افزایش سن ساختمان مقاومت، سختی و شکل پذیری المان های مختلف سازه

ارتفاع ساختمان است. نامنظمی در ارتفاع شامل نامنظمی هندسی، نامنظمی جرمی، نامنظمی قطع سیستم باربر جانبی، نامنظمی مقاومت جانبی، نامنظمی سختی جانبی، موانع عمودی و معکوس، طبقات نرم، تغییرات سختی ستون ها، ستون ضعیف و تیر قوی و هرگونه تغییرات به وجود آمده در سیستم سازه ای اولیه می باشد [۱۴، ۱].

#### ۳-۳- نوع دیافراگم (DT)

به اجزای افقی یا تقریباً افقی منتقل کننده نیروهای جانبی، دیافراگم افقی و یا به اختصار دیافراگم گفته می شود. در ساختمان های متعارف دیافراگم ها شامل کف ها و سقف ها (افقی) و یا با شیب کم) می باشند. دیافراگم ها باید با توجه به فرضیات منظور شده در محاسبات کل سازه در برابر بارهای جانبی، دارای سختی و صلبیت مناسب همراه با مقاومت کافی بوده و طوری با

### ۷-۳- سیستم سازه ای (SS)

سه نوع سیستم سازه ای در نظر گرفته شده برای ساختمان های فولادی در مطالعه موردی حاضر شامل سیستم قاب خمشی، سیستم قاب ساختمانی با استفاده از مهاربند فولادی و سیستم دوگانه یا ترکیبی خمشی و مهاربندی می باشند. سیستم قاب های خمشی مستعد جابه جایی های جانبی اضافی و جابه جایی های ثانویه ناشی از عملکرد  $P-\Delta$  می باشند. مهاربندهای مورد استفاده در سیستم قاب های ساختمانی، نیروهای جانبی زلزله را تقریباً به طور کامل تحمل می کنند. این سیستم به دلیل دارا بودن یک ستون مهاربندی در امتداد ارتفاع سازه، باعث به وجود آمدن جابه جایی های کلی به مراتب کمتری نسبت به سیستم قاب های خمشی می گردند. سیستم ترکیبی خمشی و مهاربندی نوعی سیستم سازه ای است که در آن بارهای قائم عمدتاً توسط قاب های ساختمانی تحمل می شوند و مقاومت در برابر بارهای جانبی نیز توسط مجموعه ای از قاب های مهاربندی شده فولادی همراه با مجموعه ای از قاب های خمشی تأمین می شود. به دلیل استفاده از هر دو سیستم خمشی و مهاربندی می توان گفت ساختمان های با سیستم ترکیبی، میزان جابه جایی بیشتری از سیستم مهاربندی و میزان جابه جایی کمتری نسبت به قاب خمشی دارند.

### ۸-۳- خطر لرزه ای منطقه (SSH)

خطر لرزه ای منطقه معمولاً از طریق جمع آوری اطلاعاتی در مورد زمین لرزه شامل اثرات شرایط زمین محاسبه می شود، در حالی که بعضاً اثرات رانش زمین و روانگرایی نیز به آن می پیوندند [۳]. شاخص دیگری که خطر لرزه ای منطقه را تحت تأثیر قرار می دهد، شرایط محلی است که موج لرزه ای در آن سفر می کند. اختلاف قابل توجهی در بزرگی و محتوای فرکانسی امواج لرزه ای میان محل ساختمانی که دارای خاک نرم و سنگ سخت می باشد، وجود دارد [۱۹] که این موضوع در هنگام انتخاب روابط کاهندگی طی فرآیند تحلیل خطر لرزه ای محل لحاظ می گردد.

### ۹-۳- میزان متصرف فضا (OA)

میزان متصرف فضا در واقع میزان تراکم دانش آموزی در واحد زیربنای فضای آموزشی است. به بیان دیگر این شاخص نمایانگر

اعم از تیرها، ستون ها و به خصوص اتصالات کاهش پیدا می کند و این موضوع در زمان تغییرات کاربری ساختمان و یا بروز حوادثی نظیر زمین لرزه، آتش سوزی، انفجار و غیره بسیار حائز اهمیت می گردد. یک مثال خوب برای نشان دادن اهمیت پارامتر سن ساختمان، از بین رفتن رویه ستون های فلزی و تشدید زنگ زدگی فولاد در معرض هوا و رطوبت مستقیم و در نتیجه کاهش شدید مقاومت ستون می باشد. از این رو می توان سن ساختمان را از جمله پارامترهای زیرشاخه پارامتر کاهش در مقاومت در نظر گرفت.

### ۵-۳- کد آیین نامه لرزه ای (SC)

در طی بررسی های اولیه محل، ممکن است نقشه های طراحی اصلی موجود نباشد. سال ساخت می تواند به عنوان پارامتر مهمی در خصوص اطلاعات طراحی لرزه ای سازه و نتایج حاصل از جزییات ساخت در نظر گرفته شود. از آنجا که از دیرباز رعایت آیین نامه های ساختمانی جهت ساخت سازه ها اجباری بوده، لذا پارامتر کد آیین نامه لرزه ای را می توان براساس سال ساخت سازه برآورد کرد. برای این منظور می توان آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله (نشریه ۲۸۰۰)، که زمان انتشار ویرایش های مختلف آن مشخص است، را به عنوان این پارامتر در نظر گرفت.

### ۶-۳- قابلیت حرکت خارج از صفحه دیوارها (WOM)

قاب های ساختمانی قدیمی شامل دیوارهای با مصالح بنایی می باشند. باوجود این که مصالح بنایی غیر مسلح حالت ترد شکنندگی دارند و به عنوان مصالح ساختمانی نامطلوب برای مناطق لرزه ای فعال به شمار می روند، اما ممکن است در کنترل تغییرمکان ها همانند دیوارهای برشی عمل کنند [۲۰]. از طرفی از گذشته نظارت دقیق و معیار کنترل کننده ای جهت کنترل مهاربندی دیوارها و جلوگیری از حرکت خارج از صفحه آن ها وجود نداشته است. از آنجا که در حوادث لرزه ای، حرکت خارج از صفحه دیوارها تلفات و خسارات بعضاً جبران ناپذیری به وجود آورده است و پایداری دیوارهای باربر نیز سهم زیادی در حفظ مقاومت کل سازه دارد، لذا توجه به این امر به ویژه در مورد ساختمان های مراکز آموزشی بسیار حائز اهمیت است. در مطالعه حاضر، این پارامتر به عنوان پارامتر کاهش در مقاومت در نظر گرفته شده است.

دارای مدل سازی نسبتاً ساده در عین در نظر گرفتن تمامی پارامترهای مورد نیاز برای اولویت بندی خطرپذیری لرزه ای ساختمان های فولادی می باشد. این مهم باعث می شود این روش سرعت بیشتری نسبت به روش های موجود اولویت بندی که بعضاً بر پایه روش های کلاسیک هستند، داشته باشد.

۲- روش پیشنهادی عدم قطعیت ها را در پارامترهای ورودی و خروجی لحاظ می نماید. بدین طریق نزدیک بودن نتایج به واقعیت و انعطاف پذیری این روش در قبال اکثر پارامترهای فنی و مهندسی، روشن می گردد.

۳- قابلیت کمی سازی پارامترهای کیفی از دیگر مزایای این روش می باشد. از آن جا که برخی از پارامترهای مهم ورودی همچون نوع دیافراگم، کد آیین نامه لرزه ای، سیستم سازه ای و پارامتر بهره برداری ساختمان تنها به شکل کیفی قابل بیانند، لذا این مزیت بسیار حائز اهمیت تلقی می گردد.

۴- در روش پیشنهادی از سیستم استنتاج فازی استفاده شده است. این سیستم در زمینه مطالعات مربوط به بهسازی لرزه ای نسبت به سایر روش های تصمیم گیری بسیار کاربردی و مؤثر می باشد. به صراحت می توان اشاره کرد که بارزترین قابلیت این سیستم، پیروی مستقیم از قواعد اگر- آن گاه و در نظر گرفتن عدم قطعیت ها می باشد.

#### ۴- مطالعه موردی: اولویت بندی خطرپذیری لرزه ای

##### ساختمان های فولادی مدارس مناطق منتخب شهر تهران

شهر تهران به علت قرار گرفتن بر روی چند گسل فعال و نیمه فعال، جزو مناطق با خطر لرزه ای بالا محسوب می شود. از طرفی وجود تراکم جمعیت ۷.۸ میلیون نفری [۱۷]، متمرکز بودن ساختار سیاسی، اداری، علمی، صنعتی و اقتصادی ایران در این شهر، دارا بودن بافت کهنه شهری، وجود سازه های غیراستاندارد فراوان در سطح شهر و غیره، اهمیت پایتخت کشور ایران را دوچندان کرده است. این عوامل مهم نشان دهنده لزوم توجه و مطالعه بیش از پیش به خصوص در زمینه بهبودی و استحکام سازه ها در مقابله با زمین لرزه های احتمالی می باشد. مدارس شهر تهران نیز از این قاعده مستثنی نیستند. باتوجه به آنکه قریب به ۱۵٪ جمعیت شهر تهران روزانه اوقات خویش را در مدارس سپری می کنند [۱۷]، می بایست به دلیل تغییر

تعداد دانش آموزان در یک متر مربع فضای آموزشی می باشد. بدیهی است هر چه تعداد دانش آموز در یک متر مربع فضا بیشتر باشد اهمیت آن مدرسه از نظر خطرپذیری لرزه ای بیشتر می شود [۱۱].

#### ۱۰-۳- بهره برداری ساختمان (BU)

در مطالعه مورد بررسی، برخی مدارس علاوه بر فضای آموزشی دارای فضاها و ساختمان های با کاربری غیرآموزشی نظیر کارگاه، آزمایشگاه، سالن ورزشی، دفاتر اداری، نمازخانه، سالن چندمنظوره، آمفی تئاتر، انبار و سایر موارد هستند. بررسی پارامتر بهره برداری ساختمان از دو دیدگاه دارای اهمیت است. نخست، قشر دانش آموزی که بیشتر زمان خود را در فضاهای آموزشی هستند، از آگاهی کمتری در خصوص شرایط بحرانی برخوردارند و کنترل آن ها نسبت به افراد بزرگسال در آن شرایط سخت تر است. همچنین فضاهای آموزشی محل تمرکز دانش آموزان در بیشتر ساعات آموزشی می باشد، در حالی که ساعات استفاده از فضاهای غیرآموزشی محدودتر و تمرکز جمعیت در آن ها کمتر است. بنابراین پارامتر بهره برداری ساختمان در اولویت بندی ساختمان های مدارس شامل کاربری آموزشی و غیرآموزشی می باشد که بنا به دلایل ذکر شده، ساختمان با کاربری آموزشی اولویت بیشتری نسبت به کاربری غیرآموزشی دارد.

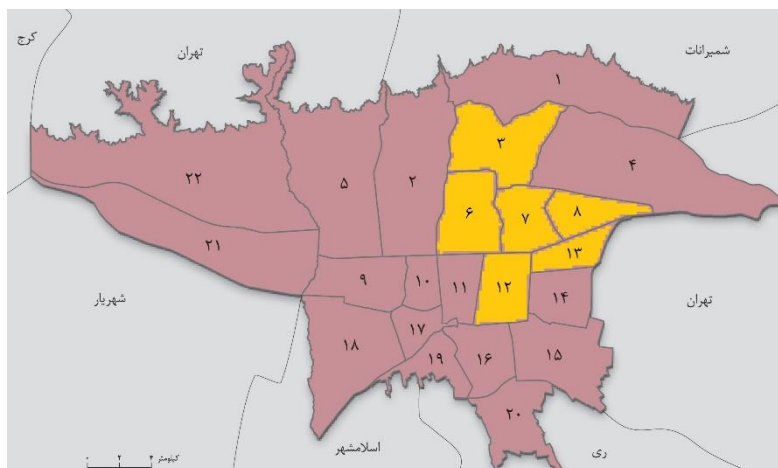
#### ۱۱-۳- اثرات اقتصادی (EI)

میزان تخریب ساختمان ها بر اثر زمین لرزه های بزرگ، اهمیت نتایج شکست در تحلیل خطرپذیری را نشان می دهد [۱۶]. اثرات اقتصادی مستقیم یک ساختمان را می توان به عنوان زیان بازار و زیان غیر بازار و یا به عنوان زیان در کاربرد و هزینه تعمیرات مستقیم دسته بندی کرد [۱۲]. بحث در مورد جزییات و استنتاج این شاخص ها فراتر از حوزه این بخش است. با این وجود در مطالعه حاضر، مساحت زیربنای هر ساختمان مدرسه به عنوان پارامتر اثرات اقتصادی در نظر گرفته می شود. علت این انتخاب آن است که کارشناسان اغلب، میزان هزینه های بازسازی و یا بهسازی ساختمان های آسیب دیده در برابر زلزله را بر مبنای مساحت زیربنا محاسبه و بیان می نمایند.

پس از ارائه فرآیند و مشخصات روش پیشنهادی، خلاصه ای از مزایای آن در ادامه ذکر شده است:

۱- روش پیشنهادی به دلیل استفاده از روابط ریاضی کم حجم،





شکل ۳. مناطق منتخب شهر تهران جهت مطالعه اولویت بندی خطرپذیری لرزه ای  
 Fig. 3. Selected districts of Tehran for seismic risk prioritization study

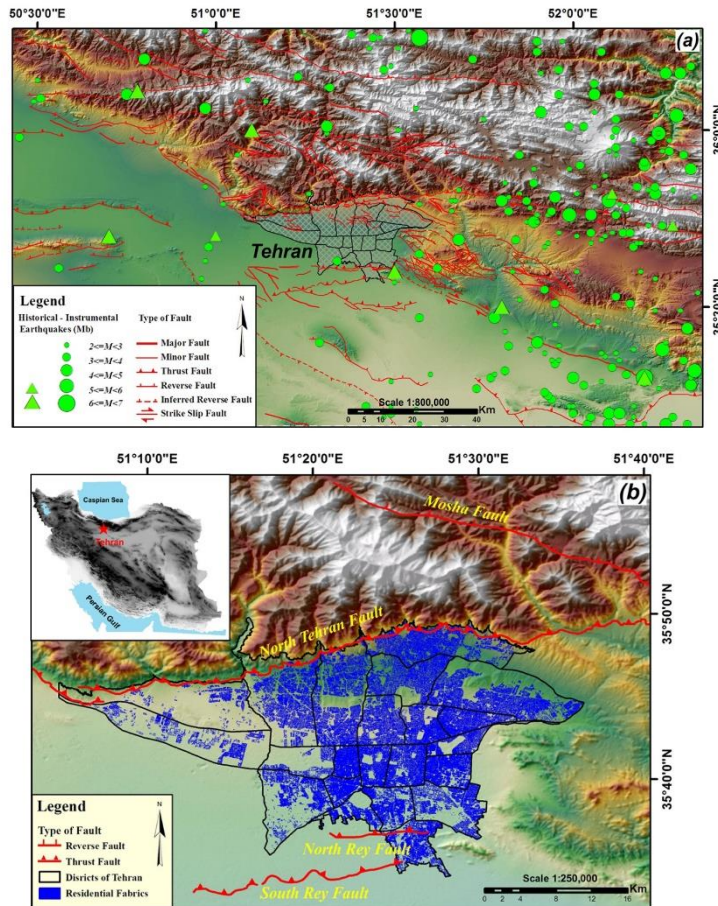
کارشناسان سازمان نوسازی مدارس کشور یک بانک اطلاعاتی در خصوص مشخصات فنی و عمومی مدارس سراسر کشور ایجاد نموده اند. در این خصوص اطلاعات ۳۱۹۴ ساختمان مدارس واقع در مناطق ۳، ۶، ۷، ۸، ۱۲ و ۱۳ شهر تهران از این سازمان دریافت گردید که از آن ها تعداد ۸۰۸ ساختمان اسکلت فولادی استخراج گردیده است. در میان این تعداد ساختمان اسکلت فولادی، ۱۶۰ ساختمان دارای اطلاعات مورد نیاز جهت انجام اولویت بندی خطرپذیری لرزه ای بوده اند که اطلاعات آن ها به وسیله فرم های مشخصات فنی ساختمان، مشخصات فضای آموزشی و پرورشی و ارزیابی کیفی سریع ساختمان های اسکلتی جمع آوری گردیده است. یک ارزیابی اولیه جهت بررسی نیاز بهسازی ساختمان های مدارس موجود در سال ۱۳۸۳ توسط کارشناسان سازمان نوسازی مدارس کشور انجام شده است که بخش اعظم آن را قضاوت کارشناس یا بازرس مربوطه بر مبنای اطلاعات سازه ای بدست آمده تشکیل داده است [۱۱]. با این حال استاندارد و فرآیند علمی مشخص و مدونی برای اولویت بندی خطرپذیری لرزه ای ساختمان های مدارس تاکنون ارائه نشده است و نیاز به آن جداً احساس می گردد.

همان گونه که پیش تر عنوان شد، به منظور انجام فرآیند اولویت بندی خطرپذیری لرزه ای، ابتدا لازم است اطلاعات خام جمع آوری شده، دسته بندی گردند و سپس ضمن کمی سازی معیارهای کیفی، جهت استفاده از داده ها در محیط فازی، به هر داده ورودی اعداد فازی معینی نسبت داده شود تا به وسیله توابع عضویت

آیین نامه های لرزه ای، تغییر کاربری ساختمان ها، نواقص طراحی و اجرایی و نیز فرسودگی مصالح ساختمانی به امر بهبود ساختمان های مدارس بیش از پیش توجه شود. مطابق آن چه پیش تر گفته شد، مطالعات اولیه جهت شناسایی ساختمان های بحرانی مدارس از نظر خطرپذیری لرزه ای نقش پراهمیتی برای بهسازی و یا نوسازی آن ساختمان ها دارد.

در این راستا مطالعه موردی انجام شده شامل اولویت بندی خطرپذیری لرزه ای ساختمان های فولادی مدارس مناطق ۳، ۶، ۷، ۸، ۱۲ و ۱۳ شهر تهران می باشد (شکل ۳). هر یک از مناطق مذکور به علت مواردی همچون خطر لرزه ای بالای آن مناطق به دلیل نزدیکی فوق العاده به گسل های فعال و نیمه فعال [۱۳] (مطابق شکل ۴)، وجود تنوع در بافت سازه ای مدارس، اهمیت بالای اقتصادی، تاریخی و سیاسی و جمعیت نسبتاً زیاد متمرکز در این مناطق نسبت به سایر مناطق شهر تهران، برگزیده شده اند.

اطلاعات یازده پارامتر ذکر شده در بخش دوم که جهت اولویت بندی خطرپذیری لرزه ای ساختمان های مدارس شهر تهران به کار برده می شوند، به همت کارشناسان سازمان نوسازی، توسعه و تجهیز مدارس کشور جمع آوری گردیده است. سازمان نوسازی، توسعه و تجهیز مدارس کشور به منظور احداث، توسعه، ترمیم و نوسازی ساختمان های مدارس تابع وزارت آموزش و پرورش و تهیه وسائل و تجهیزات مورد نیاز آن ها و تعیین معیارها و استانداردهای مطلوب تأسیس گردیده است.



شکل ۴. گسل های شهر تهران (a) گسل های بزرگ و کوچک اطراف شهر (b) گسل های بزرگ به همراه بافت مسکونی شهر [۱۳]  
 Fig. 4. Tehran Faults map; a) Large and small faults around the city, b) Large faults along with the residential urban

- در پارامتر نوع دیافراگم که از دو توصیف صلب و انعطاف پذیر تشکیل شده است، پوشش سقف طاق ضربی از نوع انعطاف پذیر و سایر دیافراگم های موجود از نوع صلب در نظر گرفته شده اند.
- دیوارهایی که از قطعات پیش ساخته سبک و یا بلوک های سیمانی تشکیل شده اند، مقاومت در برابر حرکت خارج از صفحه بیشتری نسبت به دیوارهای آجری دارند. لذا در مطالعه موردی حاضر فرض شده است که دیوارهای آجری قابلیت حرکت خارج از صفحه را دارا می باشند.
- پارامتر خطر لرزه ای مناطق مورد بررسی، برابر با میانگین شتاب های افقی حداکثر زمین (PGA) طبق سه رابطه کاهندگی امبرسیس و همکاران<sup>۱</sup> (۱۹۹۶ و ۲۰۰۳)، زارع (۱۹۹۹ و ۲۰۰۶) و

در نظر گرفته شده برای هر معیار، مقادیر عضویت نظیر هر داده تعیین گردد. بدین منظور در جدول ۲ اعداد فازی و توابع عضویت کالیبره شده برای پارامترهای ورودی نشان داده شده است. لازم به ذکر است که کالیبره کردن مفروضات، که جهت اعتبارسنجی فرآیند مطرح شده بسیار حائز اهمیت است، به طور کامل در بخش پنجم ارائه گردیده است.

چند نکته مهم در خصوص جدول ۲ به شرح زیر است:

- در مطالعه موردی حاضر، مطابق مطالب ذکر شده در بخش سوم، پارامتر نامنظمی در پلان از طریق سه معیار وجود بازشوهای بزرگ در دیافراگم، نامتقارنی در پلان نسبت به محور اصلی و وجود پیش آمدگی یا پس رفتگی تعیین گردیده است.
- همچنین پارامتر نامنظمی در ارتفاع نیز، مطابق اطلاعات جمع آوری شده، توسط معیارهای وجود ستون کوتاه و توزیع غیریکنواخت جرم در ارتفاع، بدست می آید.

1 Ambraseys et al.

جدول ۲. اعداد فازی و توابع عضویت کالیبره شده برای پارامترهای ورودی (دومین قانون فازی)

Table 2. Fuzzy numbers and calibrated membership functions for the input parameters (The 2nd Fuzzy Step)

ردیف	نام پارامتر ورودی	مقدار / توصیف هر پارامتر	اعداد تبدیل نظیر	تابع عضویت
۱	نامنظمی در پلان PI	بله	۰.۸	$[L; M; H] = [(0, 0, 0.5); (0, 0.5, 1); (0.5, 1, 1)]$
		خیر	۰.۱	
۲	نامنظمی در ارتفاع VI	بله	۰.۸	$[L; M; H] = [(0, 0, 0.5); (0, 0.5, 1); (0.5, 1, 1)]$
		خیر	۰.۱	
۳	نوع دیافراگم DT	انعطاف پذیر	۰.۶	$[L; M; H] = [(0, 0, 0.5); (0, 0.5, 1); (0.5, 1, 1)]$
		صلب	۰.۲	
۴	سن ساختمان BA	۸ تا ۵۵ سال	۸ تا ۵۵ سال	$[L; M; H] = [(0, 0, 25); (0, 25, 65); (25, 65, 65)]$
۵	کد آیین نامه لرزه‌ای SC	قبل از ویرایش ۱	۰.۷	$[L; M; H] = [(0, 0, 0.5); (0, 0.5, 1); (0.5, 1, 1)]$
		ویرایش ۱	۰.۶	
		ویرایش ۲	۰.۴	
		ویرایش ۳	۰.۲	
۶	قابلیت حرکت خارج از صفحه دیوارها WOM	بله	۰.۶	$[L; M; H] = [(0, 0, 0.5); (0, 0.5, 1); (0.5, 1, 1)]$
		خیر	۰.۲	
۷	سیستم سازه‌ای SS	قاب خمشی	۰.۷	$[L; M; H] = [(0, 0, 0.5); (0, 0.5, 1); (0.5, 1, 1)]$
		ترکیبی	۰.۴	
		مهاربندی	۰.۲	
۸	خطر لرزه‌ای منطقه SSH	g ۰.۴ تا ۰.۴	g ۰.۴ تا ۰.۴	$[L; M; H] = [(0.4, 0.4, 0.425); (0.4, 0.425, 0.45); (0.425, 0.45, 0.45)]$
۹	میزان متصرف فضا OA	۰ تا ۱۰۰ درصد	۰ تا ۱۰۰ درصد	$[L; M; H] = [(0, 0, 50); (0, 50, 100); (50, 100, 100)]$
۱۰	بهره‌برداری ساختمان BU	آموزشی	۰.۶	$[L; M; H] = [(0, 0, 0.5); (0, 0.5, 1); (0.5, 1, 1)]$
		غیرآموزشی	۰.۲	
۱۱	اثرات اقتصادی EI	۰ تا ۵۵۰۰ مترمربع	۰ تا ۵۵۰۰ مترمربع	$[L; M; H] = [(0, 0, 1000); (0, 1000, 5500); (1000, 5500, 5500)]$

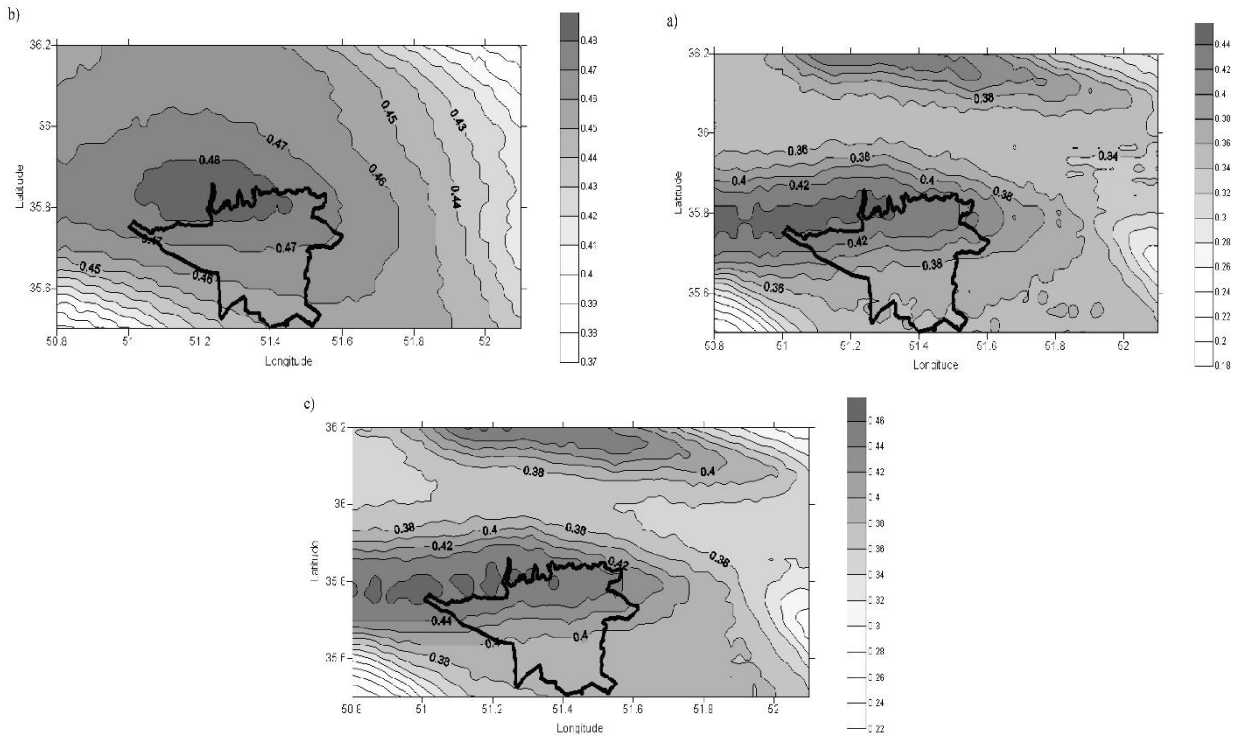
۶. نمونه‌ای از نمودارهای توابع عضویت مثلثی مربوط به دو پارامتر ورودی OA و BU و پارامتر خروجی BE را در طی یک فرآیند پردازش بر مبنای ۹ گزاره پایگاه قواعد فازی نشان می‌دهد.

• شایان ذکر است که مقادیر تمامی یازده پارامتر مورد بررسی به جهت حصول روند یکنواخت در فرآیند استنتاج فازی، از نوع «هزینه» مرتب گردیده‌اند. بدین معنی که هر چه مقدار پارامتر بیشتر باشد و یا از نوع توصیفی بله باشد، مطلوبیت آن پارامتر کمتر می‌شود (یا به عبارتی ریسک آن بیشتر می‌شود).

کمپل و بزرگ‌نیا<sup>۱</sup> (۲۰۰۳ و ۲۰۰۶) که در تحلیل خطر پهنه شهر تهران به کار برده شده‌اند [۱۸]، در نظر گرفته شده است (شکل ۵).

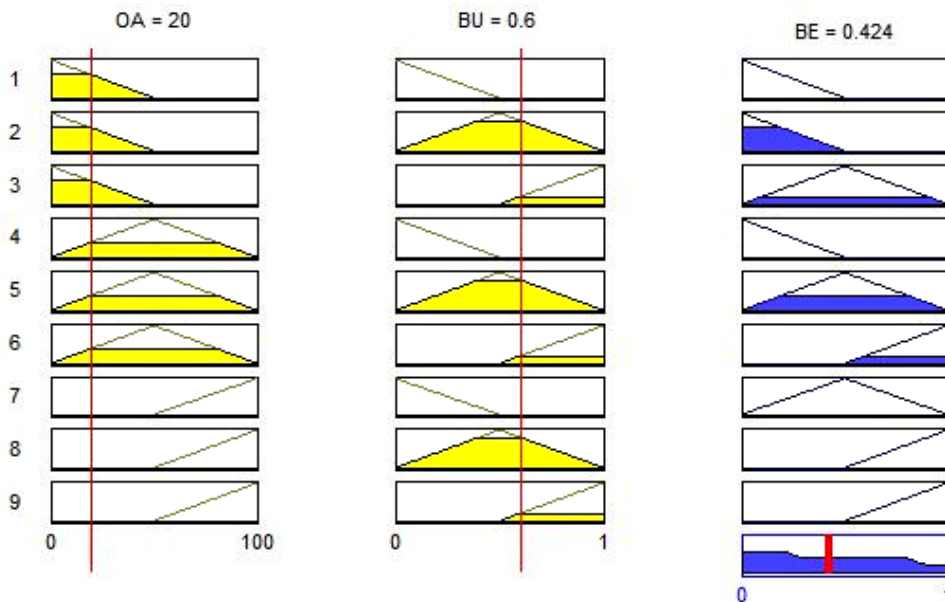
• به دلیل وجود عدم قطعیت در هر یک از پارامترهای ورودی، در نظر گرفتن سه محدوده گرانولاسیون حداقلی (کم، متوسط و زیاد) [۲۵] برای توابع عضویت هر پارامتر و همچنین به منظور ساده‌تر کردن محاسبات ریاضی، توابع عضویت برای هر یازده پارامتر، به صورت مثلثی و با مقادیر عددی مشخص، تعیین شده است. شکل

1 Campbell & Bozorgnia



شکل ۵. نقشه شتاب افقی حداکثر زمین (PGA)، با احتمال وقوع ۱۰٪ در طول ۵۰ سال با استفاده از روابط کاهندگی (a) امبرسیس و همکاران (۱۹۹۶ و ۲۰۰۳)، (b) زارع (۱۹۹۹ و ۲۰۰۶) و (c) کمپل و بزرگنیا (۲۰۰۳ و ۲۰۰۶) [۱۸]

Fig. 5. Peak ground acceleration (PGA) maps with occurrence probability of 10% in 50 years using attenuation relationships of (a) Ambraseys et al. (1996 & 2003); (b) Zare et al. (1999 & 2006); and (c) Campbell and Bozorgnia (2003 & 2006)



شکل ۶. نمونه‌ای از نمودارهای توابع عضویت مثلثی مربوط به دو پارامتر ورودی OA و BU و پارامتر خروجی BE در طی یک فرآیند پردازش بر مبنای ۹ گزاره پایگاه قواعد فازی

Fig. 6. A sample of triangular membership functions diagrams related to 2 input parameters of OA and BU and the output parameter of BE, using an evaluation process based on the fuzzy rules base

جدول ۳. توابع عضویت و ضرایب وزنی کالیبره شده برای پارامترهای خروجی مراحل ده گانه (سومین قانون فازی)

Table 3. Membership functions and calibrated weight factors for the output parameters of the ten stages (The 3rd Fuzzy Step)

شماره مرحله	نام پارامتر خروجی	ضریب وزنی $q_i$	تابع عضویت
۱	نامنظمی سازه SI	$q_1 = [0.25 \ 0.5 \ 1]$	$[L; M; H] = [(0, 0, 0.5); (0, 0.5, 1); (0.5, 1, 1)]$
۲	افزایش در تقاضا ID	$q_2 = [0.01 \ 0.6 \ 1]$	
۳	سال ساخت YC	$q_3 = [0.01 \ 0.5 \ 1]$	
۴	کاهش در مقاومت DR	$q_4 = [0.01 \ 0.5 \ 1]$	
۵	نقصان سازه‌ای SD	$q_5 = [0.01 \ 0.4 \ 1]$	
۶	آسیب‌پذیری ساختمان BV	$q_6 = [0.01 \ 0.5 \ 1]$	
۷	کاربری ساختمان BE	$q_7 = [0.01 \ 0.6 \ 1]$	
۸	خسارت‌پذیری ساختمان BD	$q_8 = [0.01 \ 0.5 \ 0.9]$	
۹	اهمیت ساختمان BI	$q_9 = [0.01 \ 0.5 \ 1]$	
۱۰	خطرپذیری لرزه‌ای R	$q_{10} = [0.01 \ 0.4 \ 1]$	

می باشد که در اینجا برابر با سه است.  $q_i$  که در محدوده  $[0, 1]$  قرار می گیرد، یک ضریب وزنی کیفی ترتیبی را مشخص می کند. مقادیر  $q_i$  براساس اعتبارسنجی طی مجموعه ای از عملیات سعی و خطا بدست می آید. مؤلفه  $\mu_i$  نیز مقادیر تابع عضویت در هریک از محدوده های Low، Medium، High را نشان می دهد.

در تکمیل فرآیند اولویت بندی خطرپذیری لرزه ای، پردازش داده ها با استفاده از سیستم استنتاج فازی که به کمک بسته نرم افزاری مذکور انجام شد، می بایست از مرحله یکم تا مرحله دهم ساختار سلسله مراتبی پیشنهاد شده (شکل ۲) برای هر مرحله صورت گیرد. بنابراین این ارزیابی شامل ده خروجی خواهد بود و این موضوع مورد توجه است که به علت سلسله مراتبی بودن ساختار مذکور، در برخی از مراحل شاهد آن هستیم که خروجی مرحله قبلی به عنوان ورودی مرحله جدید قرار می گیرد و لذا مشابه تمامی مشخصات و فرضیاتی که برای ورودی های اولیه ساختار در نظر گرفته شد، می بایست برای ده پارامتر خروجی نیز در نظر گرفته شود.

در جدول ۳، مشخصات مربوط به توابع عضویت و ضرایب وزنی کالیبره شده برای پارامترهای خروجی مراحل ده گانه نشان داده شده است. بدیهی است این مشخصات نیز نیازمند کالیبراسیون هستند که در بخش پنجم ارائه خواهند شد. تنها نکته حائز اهمیت در خصوص

پس از دسته بندی و فازی سازی داده های مربوط به پارامترهای ورودی، می بایست با استفاده از پایگاه قواعد فازی مشخص شده (همانند جدول ۱ در بخش دوم) و روابط استنتاج فازی از نوع ممدانی، (روابط ۱ و ۲) پردازش فرآیند را انجام داد. برای این منظور به جهت تسهیل اولویت بندی خطرپذیری لرزه ای، یک بسته نرم افزاری موسوم به Fuzzy-Based SRP در بستر نرم افزار MATLAB توسط نویسندگان تهیه گردید. این بسته نرم افزاری اطلاعات ورودی را دریافت کرده و از طریق سیستم استنتاج فازی طراحی شده از نوع ممدانی، تابع عضویت و مقدار فازی زدایی شده خروجی را در اختیار کاربر قرار می دهد.

از میان انواع روش های فازی زدایی که در بخش دوم مطرح گردید، روش متوسط وزنی ریاضی مطابق با رابطه (۳)، انتخاب شده است متوسط وزنی ریاضی که نباید با متوسط وزنی هندسی اشتباه شود، یک روش تعیین میانگین است که در آن به جای اینکه داده ها به طور یکسان و هم وزن به میانگین نهایی نسبت داده شوند، به نسبت وزن معین به میانگین نهایی مربوط می شوند [۹،۸]:

$$I' = \sum_{i=1}^n q_i * i \quad (3)$$

در این رابطه  $n$  نشان دهنده تعداد مؤلفه های پایگاه قواعد فازی

جدول ۴. تبدیل مقادیر خطرپذیری لرزه ای به سطوح کیفی

Table 4. Transforming the value of seismic risk to the linguistic levels

وضعیت استحکام	سطوح خطرپذیری ساختمان	محدوده خطرپذیری لرزه‌ای R
حداقل شرایط استحکام	ناچیز	( ۰,۰.۲ )
	کم	( ۰.۲, ۰.۴ )
نیازمند به مقاوم سازی	زیاد	( ۰.۴, ۰.۶ )
	شدید	( ۰.۶, ۰.۸ )

دریافت گردیده، استفاده شده است. به همین جهت، تمامی فرضیات اولیه که برای داده های ورودی و خروجی در نظر گرفته شده اند، از طریق اعتبارسنجی نتایج اولویت بندی، کالیبره می گردند. اعتبار سنجی نتایج خطرپذیری لرزه ای در خصوص مطالعه موردی حاضر، توسط دو کنترل زیر، صورت پذیرفته است:

- تعیین درصد نتایج صحیح. این کنترل از طریق مقایسه وضعیت ریسک ساختمان بر اساس ارزیابی صورت گرفته و وضعیت ریسک ساختمان بر اساس ارزیابی دریافتی از سازمان انجام می شود. با توجه به محتوای جداول ۴ و ۵ در بخش چهارم، ملاحظه می شود که از میان نتایج وضعیت ریسک ۲۰ ساختمان مدرسه، وضعیت ریسک ۱۶ ساختمان ارزیابی شده دارای تطابق کامل با وضعیت ریسک دریافتی از سازمان می باشد. بنابراین درصد نتایج صحیح اولویت بندی خطرپذیری لرزه ای برابر با ۸۰٪ می باشد.

- تعیین درصد پراکندگی نتایج خطرپذیری لرزه ای محاسبه شده در مقایسه با نتایج ارزیابی خطرپذیری لرزه ای دریافتی از سازمان. این کنترل نیز از طریق محاسبه مجموع جذر میانگین مجذورات خطاها<sup>۱</sup> (RMSE) مطابق رابطه (۴) به دست می آید:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (R'_i - R_i)^2}{N}} \quad (4)$$

در این رابطه  $N$  نمایان گر تعداد کل ساختمان ها (در این جا برابر با ۲۰)،  $R'_i$  خطرپذیری لرزه ای دریافتی از سازمان برای ساختمان  $i$ ام و  $R_i$  خطرپذیری لرزه ای محاسبه شده برای ساختمان  $i$ ام می باشد. میزان درصد پراکندگی نتایج خطرپذیری لرزه ای برای ۲۰ ساختمان مدرسه ارزیابی شده، برابر با ۱۹٪ می باشد.

شکل ۷، مقایسه بین نتایج خطرپذیری لرزه ای دریافتی از

این جدول نیز، استفاده از تابع عضویت مثلثی یکسان برای هر ده خروجی می باشد.

برای اولویت بندی ساختمان های ارزیابی شده جهت تعیین ساختمان های بحرانی، به منظور تدوین یک برنامه بهسازی مناسب، نتایج پارامتر خطرپذیری لرزه ای به صورت کیفی در چهار سطح شدید، زیاد، کم و ناچیز طبقه بندی شده اند. این طبقه بندی کالیبره شده در جدول ۴ نمایش داده شده است. این جدول بنا به نظر کارشناس خبره، مشابه با مقادیر "قطع شده" موجود در مقاله سال ۲۰۰۸ تسفاماریام و ساعتچی اوغلو [۱۹]، طی یک فرآیند پیچیده با در نظر گرفتن قضاوت کارشناس خبره و ارزش های اجتماعی به دست آمده است. با استفاده از این جدول، می توان وضعیت هر یک از ساختمان های تحت بررسی را به صورت کیفی مشخص نمود. از این رو در جدول ۵، جزئیاتی از مشخصات سازه ای و نتایج کمی و کیفی خطرپذیری لرزه ای ۲۰ ساختمان فولادی مدارس (از میان ۱۶۰ ساختمان فولادی مورد مطالعه واقع در مناطق تحت بررسی)، که از سازمان نوسازی مدارس کشور دریافت گردیده اند، نشان داده شده است. در مورد جدول ۵ لازم به ذکر است که برخی مشخصات سازه ای مورد نیاز مانند نوع سیستم سازه ای و نوع دیافراگم که صریحاً در جدول ذکر نشده اند، در عبارت کد ساختمان گنجانده شده اند (به پی نوشت جدول توجه شود). از نتایج ۲۰ ساختمان مدرسه اشاره شده، متعاقباً در بخش پنجم جهت کالیبراسیون استفاده خواهد شد.

### ۵- اعتبارسنجی نتایج

به منظور اعتبار سنجی نتایج حاصل از اولویت بندی خطرپذیری لرزه ای ساختمان های فولادی مدارس، همان گونه که پیش تر در بخش چهارم بدان اشاره شد، از ارزیابی ۲۰ ساختمان مدرسه که نتایج ارزیابی ریسک لرزه ای آن ها از سازمان نوسازی مدارس کشور

1 Root Mean Squared Error

جدول ۵. مشخصات سازه‌ای و نتایج کمی و کیفی خطرپذیری لرزه‌ای ۲۰ ساختمان فولادی مدارس

Table 5. Structural features and the qualified/quantified seismic risk results of the 20 steel school buildings

نتیجه ارزیابی سازمان	خطرپذیری لرزه‌ای R		مساحت زیربنا (مترمربع)	کد آیین‌نامه لرزه‌ای	تعداد طبقات	قابلیت حرکت خارج از صفحه دیوارها	نامنظمی در ارتفاع	نامنظمی در پلان	کد ساختمان	ردیف
	کیفی	کمی								
نیازمند به مقاوم سازی	شدید	۰.۶۹	۱۲۳۶	قبل از ویرایش ۱	۳	بله	خیر	خیر	SS03MF28	۱
حداقل شرایط استحکام	کم	۰.۳۶	۱۵۷	ویرایش ۲	۱	بله	خیر	خیر	SS03MR13	۲
نیازمند به مقاوم سازی	شدید	۰.۷۰	۴۵۴۱	قبل از ویرایش ۱	۳	خیر	خیر	خیر	SS03DR34	۳
حداقل شرایط استحکام	ناچیز	۰.۰۳	۵۴	ویرایش ۱	۱	بله	خیر	خیر	SS06BR20	۴
نیازمند به مقاوم سازی	زیاد	۰.۵۲	۱۹۴۶	ویرایش ۱	۴	بله	بله	بله	SS06BR21	۵
نیازمند به مقاوم سازی	زیاد	۰.۵۳	۵۳۵	قبل از ویرایش ۱	۳	بله	بله	بله	SS06BF36	۶
نیازمند به مقاوم سازی	زیاد	۰.۵۹	۲۳۷۲	ویرایش ۲	۴	خیر	بله	بله	SS07BF15	۷
نیازمند به مقاوم سازی	کم	۰.۳۱	۴۰۳	قبل از ویرایش ۱	۲	بله	خیر	بله	SS07BF35	۸
حداقل شرایط استحکام	زیاد	۰.۵۹	۱۷۵۸	قبل از ویرایش ۱	۳	بله	خیر	خیر	SS07MR31	۹
نیازمند به مقاوم سازی	زیاد	۰.۵۹	۱۲۸۸	قبل از ویرایش ۱	۴	بله	بله	بله	SS08MF55	۱۰
حداقل شرایط استحکام	کم	۰.۲۲	۱۷۰	قبل از ویرایش ۱	۲	بله	خیر	خیر	SS08MF37	۱۱
حداقل شرایط استحکام	ناچیز	۰.۰۵	۹۸	ویرایش ۳	۱	بله	خیر	خیر	SS08BR08	۱۲
نیازمند به مقاوم سازی	شدید	۰.۶۴	۲۷۹۰	ویرایش ۲	۴	خیر	بله	بله	SS08BR18	۱۳
حداقل شرایط استحکام	کم	۰.۳۴	۶۶۳	ویرایش ۱	۲	بله	خیر	خیر	SS12MF22	۱۴
نیازمند به مقاوم سازی	ناچیز	۰.۱۷	۱۶۶۱	قبل از ویرایش ۱	۳	بله	خیر	بله	SS12BF28	۱۵
حداقل شرایط استحکام	کم	۰.۲۰	۱۴۴	قبل از ویرایش ۱	۲	بله	بله	خیر	SS12MF35	۱۶
حداقل شرایط استحکام	زیاد	۰.۵۵	۲۷۰۰	ویرایش ۲	۵	بله	خیر	خیر	SS13BR14	۱۷
حداقل شرایط استحکام	ناچیز	۰.۰۹	۱۹۱	قبل از ویرایش ۱	۱	بله	خیر	خیر	SS13BR35	۱۸
نیازمند به مقاوم سازی	زیاد	۰.۵۵	۱۱۸۰	ویرایش ۲	۴	بله	خیر	خیر	SS13BR14	۱۹
نیازمند به مقاوم سازی	شدید	۰.۶۳	۲۷۵۰	ویرایش ۱	۵	بله	بله	بله	SS13BF22	۲۰

\* SS: ساختمان فولادی مدرسه؛ 03: منطقه آموزشی؛ M: سیستم سازه‌ای (سیستم قاب خمشی M، سیستم مهاربندی قاب ساختمانی B و سیستم دوگانه یا ترکیبی (D)؛ F: نوع دیافراگم (صلب R و انعطاف پذیر F)؛ 28: سن ساختمان



شکل ۷. مقایسه نتایج خطرپذیری لرزه‌ای دریافتی از سازمان و نتایج خطرپذیری لرزه‌ای محاسبه شده  
 Fig. 7. Comparison between seismic risk results obtained from the DRES and evaluated results in this study

چشم می‌خورد. این پارامتر از طریق رابطه (۵) و بر اساس ارتفاع ساختمان‌های فولادی مدارس محاسبه شده است:

$$T = 0.08H^{0.75}$$

که در این رابطه  $H$  بیانگر ارتفاع ساختمان‌ها از سطح زمین بر حسب متر و  $T$  نشان‌دهنده دوره تناوب تجربی سازه برحسب ثانیه می‌باشد [۱۴].

در یک طبقه بندی کلی، وضعیت خطرپذیری لرزه‌ای ۱۶۰ ساختمان مدارس در شکل ۸ آورده شده است. مطابق این شکل، تعداد ۳۲، ۵۱، ۴۲ و ۳۵ ساختمان مورد بررسی به ترتیب در وضعیت ریسک شدید، زیاد، کم و ناچیز قرار دارند. به عبارت دیگر حدود ۵۲ درصد ساختمان‌های فولادی مدارس شش منطقه مورد بررسی نیازمند تدابیر لازم برای بهسازی و یا بازسازی هستند که از این میزان، تعداد ۲۰ درصد آن‌ها، می‌بایست مورد توجه فوری و جدی قرار گیرند. با این وجود، تعداد ۴۸ درصد باقیمانده، حداقل شرایط استحکام را دارا می‌باشند.

از دیدگاهی دیگر، یک خروجی مشابه برای ۱۶۰ ساختمان مدارس موردنظر، به تفکیک مناطق مورد بررسی استخراج گردیده است که در شکل ۹ نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل دیده می‌شود، بحرانی‌ترین مناطق از لحاظ میزان نیازمندی به بهسازی، بدین ترتیب می‌باشد: مناطق ۶، ۸، ۳، ۷، ۱۳ و ۱۲ که طی آن ساختمان‌های فولادی مدارس منطقه ۶ به میزان ۷۱٪، منطقه ۸ به میزان ۶۰٪، منطقه ۳ به میزان ۵۵٪، منطقه ۷ به میزان ۵۳٪، منطقه

سازمان و نتایج خطرپذیری لرزه‌ای محاسبه شده برای ۲۰ ساختمان فولادی مدرسه را نشان می‌دهد. مطابق این شکل ملاحظه می‌گردد به غیر از چهار ساختمان با شماره ردیف ۸، ۹، ۱۵ و ۱۷، نتایج ریسک بقیه ساختمان‌ها در هر دو حالت بسیار نزدیک به یکدیگر هستند. از مهم‌ترین دلایل این مغایرت می‌توان به خطای انسانی کارشناسان مربوطه در نتایج ارزیابی پیشین انجام شده توسط سازمان نوسازی کشور اشاره نمود. به این ترتیب، با عنایت به مقادیر درصد نتایج صحیح، درصد پراکندگی نتایج و با توجه به شکل ۷، می‌توان نتیجه گرفت که روش اولویت بندی پیشنهادی، دقت مناسبی در تعیین خطرپذیری لرزه‌ای ساختمان‌های فولادی مدارس را دارد و همچنین دقت و کالیبره بودن فرضیات و مشخصات در گرفته شده، مسلم گردیده است. بنابراین روش پیشنهادی را می‌توان برای کل ۱۶۰ ساختمان فولادی مدرسه به کار برد و از دقت نتایج به دست آمده، اطمینان حاصل نمود.

## ۶- نتایج و بحث

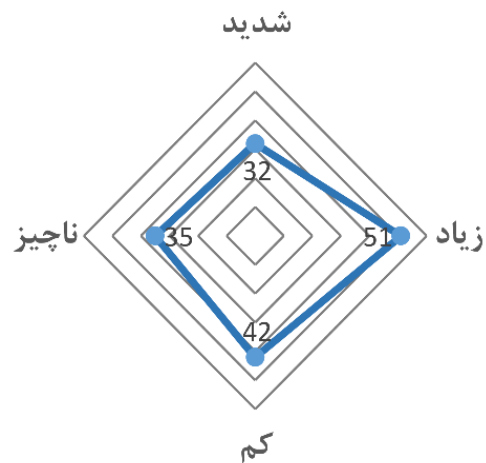
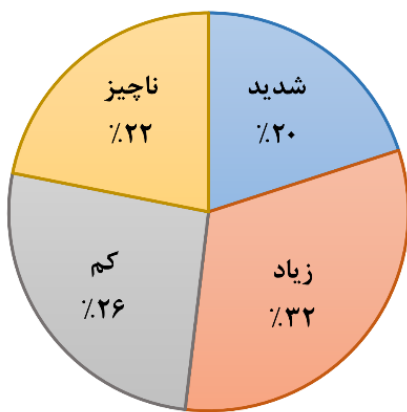
به منظور بررسی مشخصات سازه‌ای ۱۶۰ ساختمان مدارس که اطلاعات آن‌ها از سازمان نوسازی مدارس کشور دریافت گردیده ابتدا یک دسته‌بندی در قالب جدول ۶ ارائه می‌گردد. سپس این اطلاعات به همراه سایر مشخصات ساختمان‌های مدارس مطابق با روش اولویت‌بندی ارائه شده در بخش‌های قبل، مورد پردازش قرار می‌گیرند. در این دسته‌بندی، پارامتر دوره تناوب تجربی سازه‌ها به



جدول ۶. دسته‌بندی مشخصات سازه‌ای ۱۶۰ ساختمان فولادی مدرسه

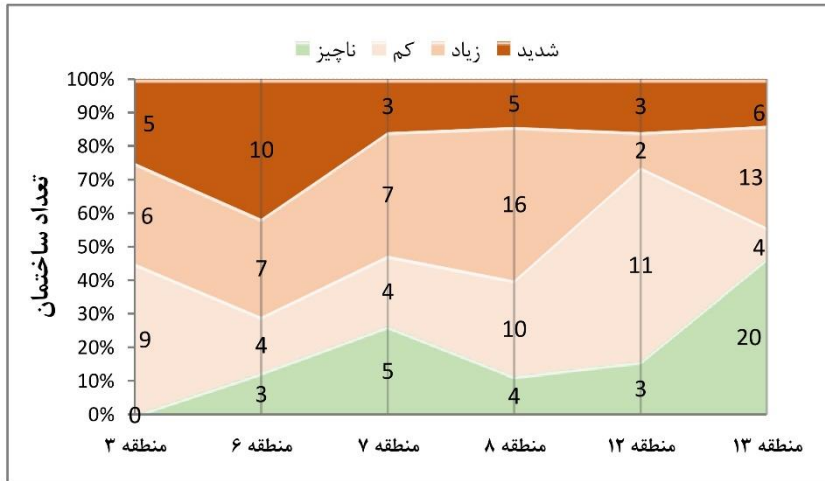
Table 6. Classification of the structural features of the 160 steel school buildings

ردیف	مشخصات سازه‌ای	مقدار / توصیف هر مشخصه	تعداد ساختمان‌های دارای این مشخصه
۱	نامنظمی در پلان	بله	۲۴
		خیر	۱۳۶
۲	نامنظمی در ارتفاع	بله	۲۰
		خیر	۱۴۰
۳	نوع دیافراگم	انعطاف‌پذیر	۹۶
		صلب	۶۴
۴	کد آیین نامه لرزه‌ای	قبل از ویرایش ۱	۷۱
		ویرایش ۱	۵۷
		ویرایش ۲	۲۹
		ویرایش ۳	۳
۵	قابلیت حرکت خارج از صفحه دیوارها	بله	۱۳۹
		خیر	۲۱
۶	سیستم سازه‌ای	قاب خمشی	۵۳
		ترکیبی	۵
		مهاربندی	۱۰۲
۷	دوره تناوب تجربی	از ۰.۲ تا ۰.۳ ثانیه	۳۴
		از ۰.۳ تا ۰.۴ ثانیه	۳۶
		از ۰.۴ تا ۰.۵ ثانیه	۳۷
		از ۰.۵ تا ۰.۶ ثانیه	۳۸
		از ۰.۶ تا ۰.۷ ثانیه	۱۵

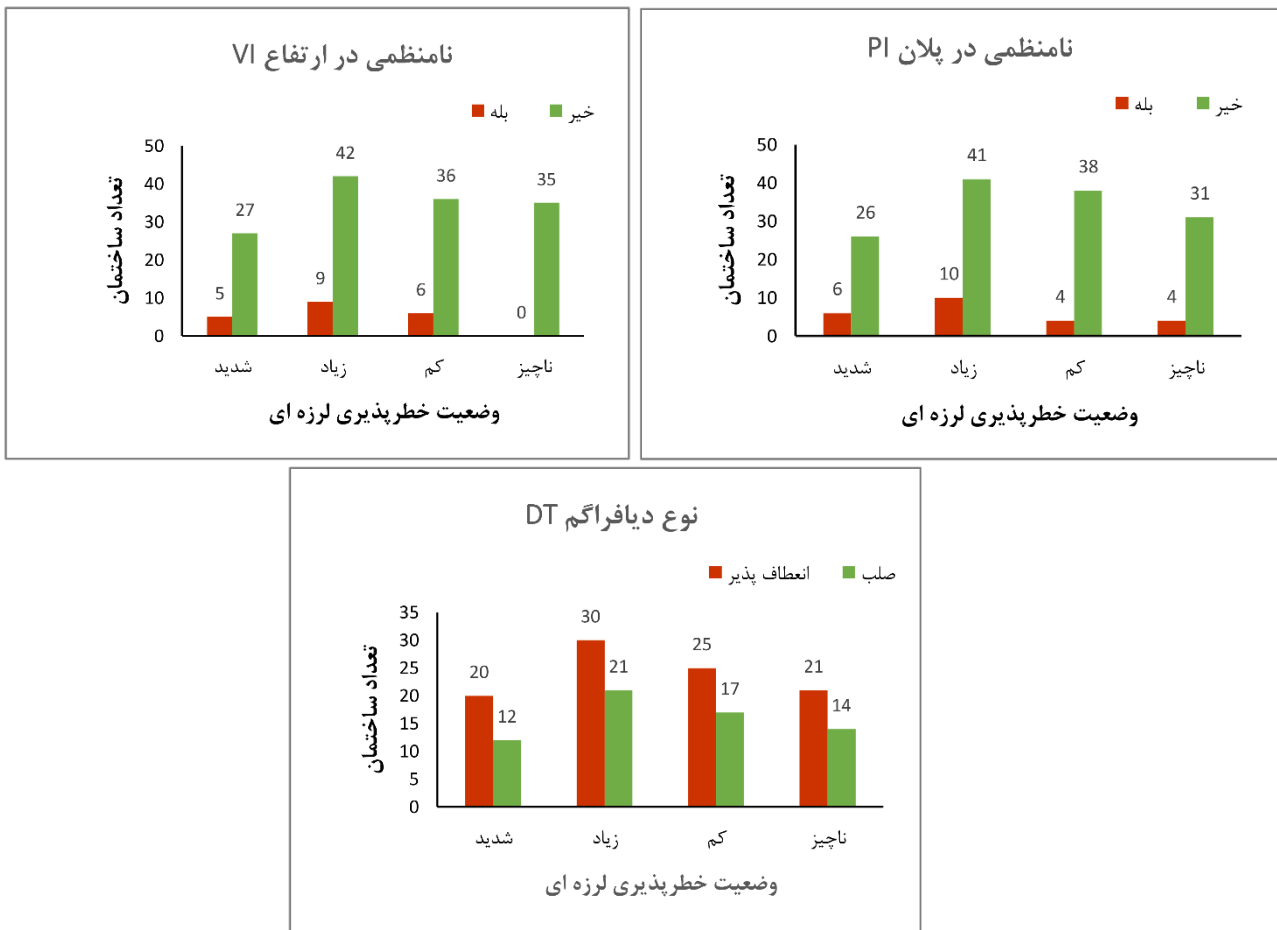


شکل ۸. وضعیت خطرپذیری لرزه‌ای ۱۶۰ ساختمان فولادی مدرسه شهر تهران

Fig. 8. Seismic risk status of 160 steel school buildings in Tehran

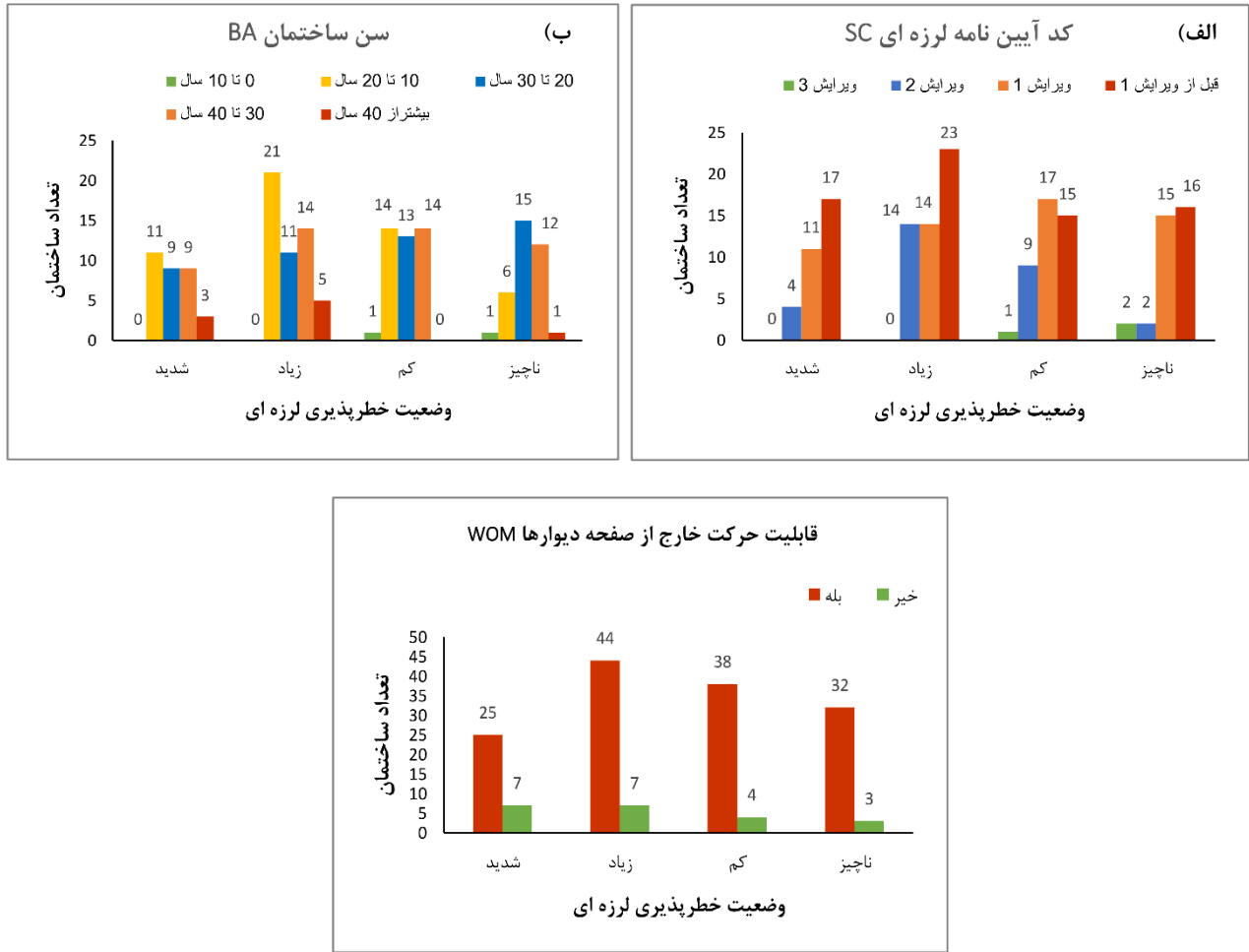


شکل ۹. وضعیت خطرپذیری لرزه ای ۱۶۰ ساختمان فولادی مدرسه شهر تهران به تفکیک شش منطقه مورد بررسی  
 Fig. 9. Seismic risk status of 160 steel school buildings in the selected districts of Tehran



شکل ۱۰. وضعیت خطرپذیری لرزه ای ۱۶۰ ساختمان فولادی مدرسه شهر تهران به تفکیک پارامترهای ورودی الف و ب) زیرمجموعه پارامتر نامنظمی سازه و ج) زیرمجموعه پارامتر افزایش در تقاضا

Fig. 10. Seismic risk status of 160 steel school buildings of Tehran based on the input parameters of a,b) subset of structural irregularity parameter; c) subset of increase in demand parameter



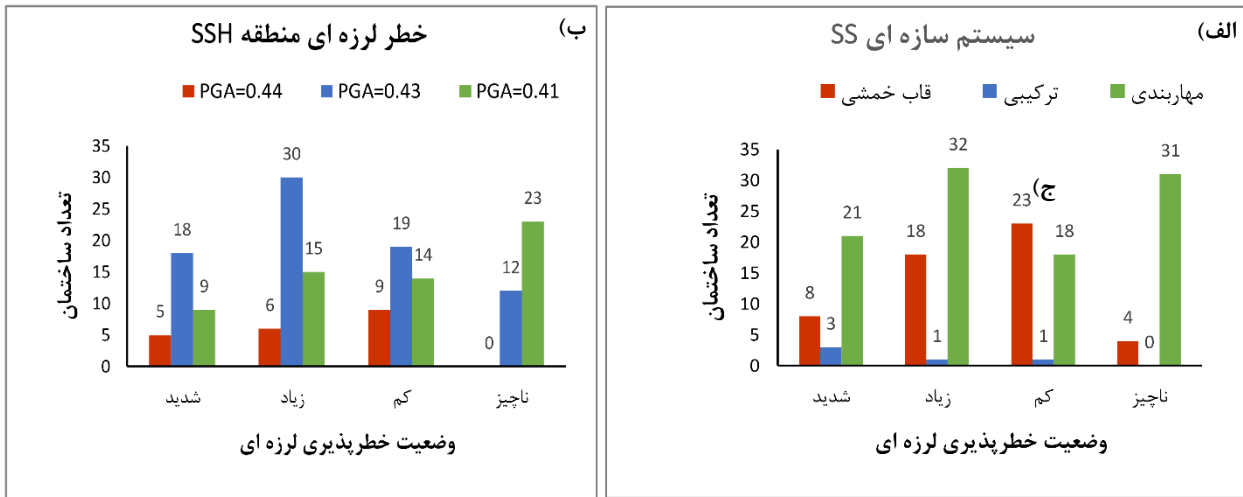
شکل ۱۱. وضعیت خطرپذیری لرزه ای ۱۶۰ ساختمان فولادی مدرسه شهر تهران به تفکیک پارامترهای ورودی الف و ب) زیرمجموعه پارامتر سال ساخت و ج) زیرمجموعه پارامتر کاهش در مقاومت

Fig. 11. Seismic risk status of 160 steel school buildings of Tehran based on the input parameters of a,b) subset of year of construction parameter; c) subset of decrease in resistance parameter

در این اشکال به طور کلی می‌توان گفت هرچه رنگ نمودار از سبز به قرمز می‌رود، وضعیت خطرپذیری لرزه‌ای شدیدتر می‌شود و برعکس. نتایج نمودارهای شکل ۱۰ حاکی از آن است که ساختمان‌های با ریسک شدید و زیاد، غالباً در پلان و ارتفاع نامنظم هستند و بیش از نیمی از ساختمان‌های دارای دیافراگم صلب را به خود اختصاص داده‌اند. شکل ۱۱ نیز بیانگر آن است که ساختمان‌هایی که بیشتر از ۳۰ سال عمر دارند و در نتیجه از آیین‌نامه‌های منسوخ در طراحی و ساخت آن‌ها استفاده شده‌است، دارای وضعیت خطرپذیری شدیدتری هستند و دیوارهای با قابلیت حرکت خروج از صفحه عمدتاً در این گروه جای دارند. از طرفی در شکل ۱۲-الف این موضوع کم‌رنگ‌تر دیده می‌شود بدین معنا که با وجود اینکه سیستم قاب‌های خمشی مستعد جابه‌جایی جانبی بیشتری نسبت به سیستم مهاربندی است،

۱۳ به میزان ۴۴٪ و منطقه ۱۲ به میزان ۲۶٪ در وضعیت ریسک شدید و زیاد قرار دارند. لازم به یادآوری است که ۱۶۰ ساختمان مدارس مناطق مذکور، همه مدارس فولادی آن مناطق نبوده و فقط آن دسته از ساختمان‌ها هستند که اطلاعات مربوط به آن‌ها به صورت کامل جمع‌آوری شده است.

در ادامه، به عنوان یک نتیجه‌گیری کاربردی و اختصاصی، وضعیت کل ۱۶۰ ساختمان فولادی موجود از لحاظ یازده پارامتر ورودی مستقل، به تفکیک وضعیت خطرپذیری لرزه‌ای در چهار سطح مذکور، در اشکال ۱۰ تا ۱۴ نشان داده شده‌اند. مطابق این نمودارها، ملاحظه می‌شود که نتایج اولویت بندی لرزه‌ای ساختمان‌های فولادی مدارس شهر تهران، تطابق خوبی با وضعیت این ساختمان‌ها از لحاظ یازده پارامتر مستقل ساختار سلسله مراتبی نشان می‌دهد.



شکل ۱۲. وضعیت خطرپذیری لرزه ای ۱۶۰ ساختمان فولادی مدرسه شهر تهران به تفکیک پارامترهای ورودی الف) زیرمجموعه پارامتر آسیب پذیری ساختمان و ب) زیرمجموعه پارامتر خسارت پذیری ساختمان

موردی تعیین شد و اطلاعات مورد نیاز آن نیز از سازمان نوسازی، توسعه و تجهیز مدارس کشور دریافت گردید. نتایج روش مذکور که از طریق چند نوع روند کنترلی اعتبارسنجی گردید و از دقت بالا و کارایی مناسب این روش اطمینان حاصل شد، در مطالعات اولیه بهسازی قابل استناد و استفاده است.

نتایج بدست آمده از این اولویت بندی حاکی از آن است که از میان ۱۶۰ ساختمان فولادی مدارس در مناطق مورد بررسی شهر تهران، تعداد ۸۳ ساختمان نیازمند تدابیر لازم برای بهسازی و یا بازسازی هستند که از میان آنها ۳۲ ساختمان مدرسه وضعیت بحرانی تری دارند. همچنین در بررسی دیگری نشان داده شد که در مناطق ۶ و ۸ درصد بالایی از ساختمان های فولادی مدارس (بالتر از ۶۰٪) در وضعیت ریسک شدید و زیاد قرار دارند و مستلزم توجه ویژه ای هستند.

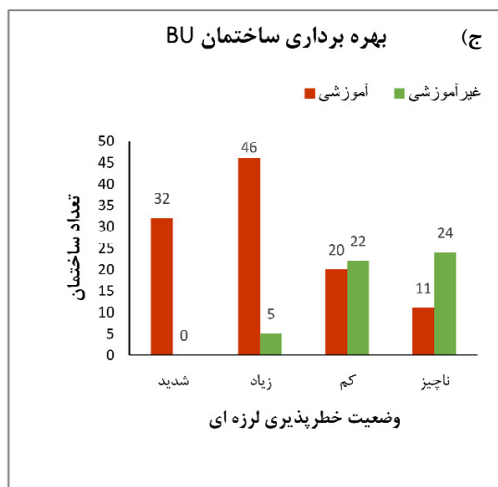
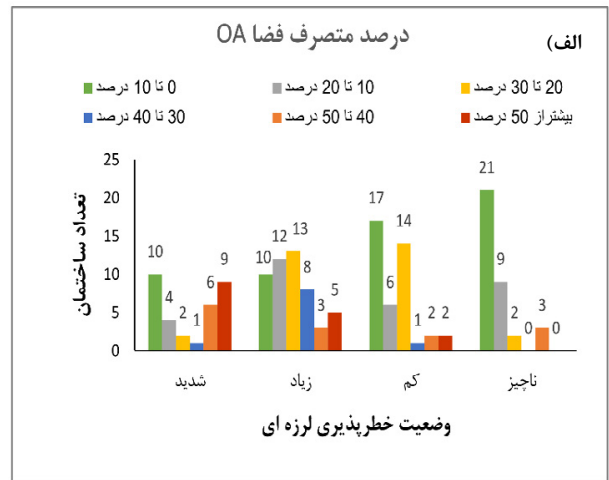
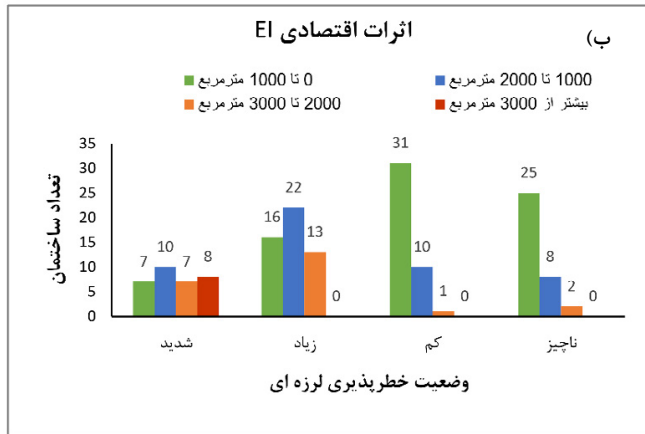
سپس در طی یک بررسی جزئی تر نقش هر یک از پارامترهای اولیه ساختمان های مدارس بر روی وضعیت ریسک لرزه ای آنها مورد مشاهده قرار گرفت و نتیجه حاصل شده بدین سان بود که ساختمان های با ریسک شدید و زیاد، عمدتاً در پلان و ارتفاع نامنظم هستند، در اثر عمر زیاد، استحکام کمتری دارند و در نتیجه از کدهای لرزه ای پیشین در طراحی و ساخت آنها استفاده شده، تراکم جمعیت و در نتیجه درصد متصرف فضا در آنها بالاتر است، میزان ضرر و

اما این سیستم در ساختمان های با وضعیت ریسک کم نیز دیده می شود. از طرف دیگر شکل ۱۲- ب به روشنی نشان می دهد که با افزایش خطر لرزه ای منطقه، وضعیت خطرپذیری لرزه ای به سمت شدیدتر شدن می رود. مطابق شکل ۱۳، ساختمان های با وضعیت ریسک شدید و زیاد، پارامترهای درصد متصرف فضا و اثرات اقتصادی بالاتری دارند و اکثراً دارای بهره برداری از نوع آموزشی هستند.

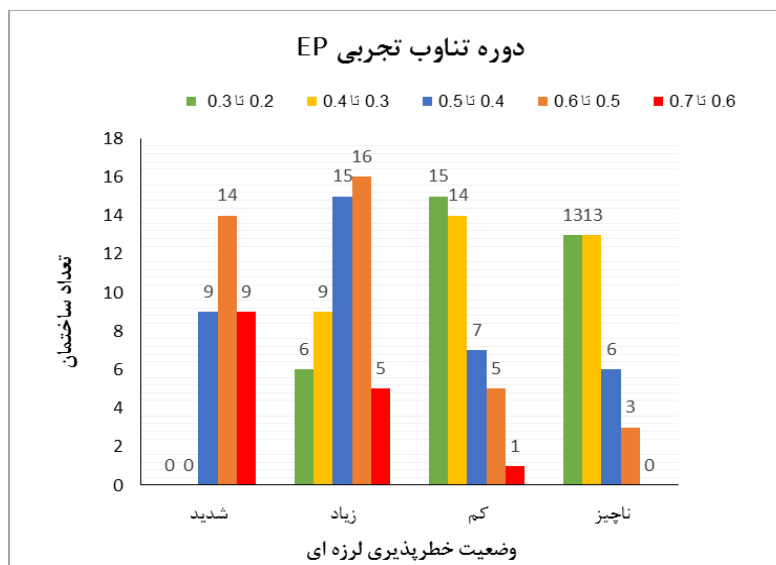
همچنین وضعیت خطرپذیری لرزه ای ساختمان های مدارس نسبت به پارامتر دوره تناوب تجربی سازه ها نیز در شکل ۱۴ نشان شده است و نتایج آن به روشنی روند حاضر در سایر نمودارهای بدست آمده از وضعیت ریسک لرزه ای ساختمان های فولادی را نشان می دهد. به گونه ای که با افزایش دوره تناوب تجربی سازه ها، وضعیت ریسک لرزه ای به سمت شدیدتر شدن می رود و در حالت های ناچیز و کم، شاهد فراوانی سازه های با پررود تجربی پایین هستیم.

## ۷- نتیجه گیری

در این مقاله، یک روش اولویت بندی خطرپذیری لرزه ای برای ساختمان های فولادی ارائه گردید که در آن طی یک ساختار سلسله مراتبی در هفت سطح و ده مرحله و با بهره گیری از روش استنتاج فازی، وضعیت خطرپذیری لرزه ای ۱۶۰ ساختمان فولادی مدرسه واقع در مناطق ۳، ۶، ۷، ۸، ۱۲ و ۱۳ شهر تهران، به عنوان مطالعه



شکل ۱۳. وضعیت خطرپذیری لرزه ای ۱۶۰ ساختمان فولادی مدرسه شهر تهران به تفکیک پارامترهای ورودی الف و ب) زیرمجموعه پارامتر کاربری ساختمان و ج) زیرمجموعه پارامتر اهمیت ساختمان



شکل ۱۴. وضعیت خطرپذیری لرزه ای ۱۶۰ ساختمان فولادی مدرسه شهر تهران به تفکیک پارامتر دوره تناوب تجربی سازه

- [6] D. Elms, Structural safety—issues and progress, *Progress in Structural Engineering and Materials*, 6(2) (2004) 116-126.
- [7] G. Ghodrati Amiri, S. AsmariSaad Abad, A. ZareHossein Zadeh, Earthquake risk assessment using fuzzy inference systems and its application in seismic rehabilitation studies, *Modares Civil Engineering journal*, 13(4) (2013) 71-84.
- [8] H. Hellendoorn, C. Thomas, Defuzzification in fuzzy controllers, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 1(2) (1993) 109-123.
- [9] Y.-T. Liou, S.-L. Lo, A fuzzy index model for trophic status evaluation of reservoir waters, *Water Research*, 39(7) (2005) 1415-1423.
- [10] E.H. Mamdani, Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis, *IEEE transactions on computers*, (12) (1977) 1182-1191.
- [11] Organization for Development, Renovation and Equipping Schools of Iran. Website: <http://www.dres.ir> (2014).
- [12] K.A. Porter, A.S. Kiremidjian, J.S. LeGrue, Assembly-based vulnerability of buildings and its use in performance evaluation, *Earthquake spectra*, 17(2) (2001) 291-312.
- [13] F. Rezaie, M. Panahi, GIS modeling of seismic vulnerability of residential fabrics considering geotechnical, structural, social and physical distance indicators in Tehran using multi-criteria decision-making techniques, *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 15(3) (2015).
- [14] Road, Housing and Urban Development Research Center. “Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings Standard No.2800 (4th Edition)”, Tehran (2015). (in Persian)
- [15] R. Sadiq, T. Husain, B. Veitch, N. Bose, Risk-based decision-making for drilling waste discharges using a fuzzy synthetic evaluation technique, *Ocean Engineering*, 31(16) (2004) 1929-1953.
- [16] M.A. Salgado-Gálvez, D.Z. Romero, C.A. Velásquez,

زیان‌های اقتصادی در اثر تخریب ناشی از زلزله در آن‌ها بیشتر است، اکثراً به صورت آموزشی از آن‌ها بهره‌برداری می‌شود و دوره تناوب تجربی آن‌ها نسبت به سایر ساختمان‌ها مقدار بیشتری است. همچنین وضعیت ریسک بحرانی‌تر ساختمان‌های دارای دیافراگم انعطاف پذیر و دیوارهای با قابلیت حرکت خروج از صفحه، گویای آن است که این دو پارامتر تأثیر بسزایی در اولویت بندی خطرپذیری لرزه ای دارند و شایسته است در اولویت بندی های لرزه ای ساختمان‌ها بیشتر مورد توجه واقع شوند.

به علت انعطاف پذیری و کارایی بالای ساختار سلسله مراتبی ارائه شده در روش پیشنهادی، این روش برای سایر ساختمان‌های بتن مسلح و با مصالح بنایی و همچنین برای ساختمان‌ها با سایر کاربری‌ها همچون مراکز اورژانسی و درمانی و یا سایر مراکز مهم، کاربردی و قابل استفاده است. همچنین کاربران این روش می‌توانند به پارامترهای موجود در ساختار بیفزایند و یا آن‌ها را تغییر دهند.

### سپاسگزاری

نویسندگان از «سازمان نوسازی، توسعه و تجهیز مدارس کشور» به منظور ارائه اطلاعات مدارس تشکر و قدردانی می‌نمایند.

### مراجع

- [1] C. Arnold, R. Reitherman, D. Whitaker, Building configuration and seismic design: The architecture of earthquake resistance, *STIN*, 82 (1981) 29506.
- [2] F.E.M. Agency, Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards: A handbook, Government Printing Office, 2017.
- [3] J.F. Bird, J.J. Bommer, Earthquake losses due to ground failure, *Engineering geology*, 75(2) (2004) 147-179.
- [4] E. Boostan, N. Tahernia, A. Shafiee, Fuzzy—probabilistic seismic hazard assessment, case study: Tehran region, Iran, *Natural Hazards*, 77(2) (2015) 525-541.
- [5] Bureau of Technical Execution Systems. “Rapid seismic evaluation of existing buildings No.364”, Tehran: Office of Deputy for Strategic Monitoring (2008). (in Persian)

- for developing a risk management system in seismically prone areas, *Socio-Economic Planning Sciences*, 48(4) (2014) 235-248.
- [23] Z. Wang, Seismic hazard vs. seismic risk, *Seismological Research Letters*, 80(5) (2009) 673-674.
- [24] R.R. Yager, Y. RR, On a general class of fuzzy connectives, (1980).
- [25] L.A. Zadeh, Fuzzy logic, neural networks, and soft computing, in: *Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, And Fuzzy Systems: Selected Papers by Lotfi A Zadeh*, World Scientific, 1996, pp. 775-782.
- [26] L.A. Zadeh, Fuzzy sets, in: *Fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy systems: selected papers by Lotfi A Zadeh*, World Scientific, 1996, pp. 394-432.
- [27] L.A. Zadeh, Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes, *IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics*, (1) (1973) 28-44.
- [28] B. Zahraie, A. Roozbahani, Risk assessment model based on fuzzy expert systems for construction project Management, *Sharif Journal of Civil Engineering*, 32(4.1) (2017) 61-70.
- M.L. Carreño, O.-D. Cardona, A.H. Barbat, Urban seismic risk index for Medellín, Colombia, based on probabilistic loss and casualties estimations, *Natural hazards*, 80(3) (2016) 1995-2021.
- [17] Statistical Center of Iran. Statistical Data and Information. Website: <https://www.amar.org.ir/> (2018).
- [18] M. Tehranizade, P.M. Seirafian, Determination of uniform hazard spectra with respect to the near field effects for tehran region, (2010).
- [19] S. Tesfamariam, M. Saatcioglu, Risk-based seismic evaluation of reinforced concrete buildings, *Earthquake Spectra*, 24(3) (2008) 795-821.
- [20] S. Tesfamariam, M. Saatcioglu, Seismic vulnerability assessment of reinforced concrete buildings using hierarchical fuzzy rule base modeling, *Earthquake Spectra*, 26(1) (2010) 235-256.
- [21] S. Tesfamariam, Y. Wang, Risk-based seismic retrofit prioritization of reinforced concrete civic infrastructure: Case study for state of Oregon schools and emergency facilities, *Natural Hazards Review*, 13(3) (2012) 188-195.
- [22] K. Vahdat, N.J. Smith, G.G. Amiri, Fuzzy multicriteria

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M.H. Zehtab Yazdi, M. Raissi Dehkordi, M. Eghbali, Gh. Ghodrati, *Seismic Risk Prioritization of Steel Buildings Using Fuzzy Inference System: A Case Study of School Buildings in Selected Regions of Tehran*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(3) (2020) 733-756.

DOI: [10.22060/ceej.2018.14809.5761](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14809.5761)



