



کد مقاله: ۲-۱۰۴

تحلیل ریسک احتمالاتی سازه فولادی برای بررسی خسارت لرزه ای سازه در طول عمر سازه

محمد حسن زاده^۱، حسان صالحی^۲

۱- کارشناس ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه کردستان، سنندج، hasanzade@my.com

۲- کارشناس ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه کردستان، سنندج

چکیده

ایران از جمله کشورهایی است که از نظر خطر لرزه‌ای شرایط بحرانی دارد که سالانه بر اثر زلزله خسارت‌های مالی و جانی زیادی را متحمل می‌شود. از این رو نیاز به کاهش مخاطرات، اطمینان در ارتباط با کنترل ریسک مخاطرات و دیگر اقدامات مهم مدیریتی در جهت تهیه طرح‌های بازدارنده از بروز آسیب‌پذیری‌های بیشتر ضروری می‌باشد. تحلیل ریسک احتمالاتی، روشی مناسب برای تصمیم‌گیری کلی در زمینه ایمنی لرزه‌ای و نشان دادن رویدادهای محتمل و گزینه‌های تصمیم‌گیری پیش رو برای تصمیم‌گیرندگان است و به عنوان پیش‌بینی میزان خسارت وارد بر سازه در اثر رویداد زمین لرزه در یک ناحیه خاص تعریف می‌شود. هدف تحلیل ریسک لرزه‌ای، محاسبه احتمال اثرات ناگوار اقتصادی و اجتماعی زمین لرزه محتمل در یک منطقه خاص است. در این مقاله به بررسی ریسک زمین لرزه احتمالی بر اساس نتایج تحلیل خسارت احتمالی بروی یک سازه فلزی در کلان شهر مشهد به علت تراکم بالای ساختمانی و جمعیتی و اهمیت مذهبی و تاریخی این شهر، پرداخته شده است. هدف از تحقیق حاضر ارائه راهکاری جهت بررسی خسارت‌های سازه‌ای (جابجایی و نسبت تغییر مکان جانبی طبقات سازه) و همچنین عملکرد سازه در طول عمر سازه می‌باشد. بدین منظور برای تعیین میزان نیروهای وارد بر سازه در اثر زلزله یا به عبارتی تعیین بیشینه مقدار پارامتر جنبش زمین در منطقه مورد مطالعه یا زمین ساخت، با یک دوره بازگشت مشخص، از تحلیل خطر لرزه‌ای استفاده شد، همچنین برای تخمین آسیب‌های لرزه‌ای و بررسی عملکرد لرزه‌ای سازه و تخمین میزان خرابی برای سطوح مختلف لرزه‌ای از تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده استفاده شد.

کلمات کلیدی: تحلیل ریسک احتمالاتی، تحلیل خطر احتمالاتی زمین لرزه کلان شهر مشهد، تحلیل غیرخطی استاتیکی، عمر سازه

۱- مقدمه

کشور ایران به دلیل قرار گرفتن بر روی کمربند آلپ - هیمالیا و واقع شدن در بین صفحات اوراسیا، عربی و هندوستان به عنوان یکی از مناطق زلزله خیز در جهان شناخته شده است. با توجه به توسعه شهرنشینی و تراکم بالای ساختمانی بخصوص در شهرهای بزرگ ریسک خسارت مالی و تلفات انسانی توسط زمین لرزه بطور چشم‌گیری زیاد است لذا جهت کاهش اثرات مخرب ناشی از زمین‌لرزه، مطالعات

ارزیابی خطر و خسارت در اقسا نقاط ایران خصوصا نواحی پرجمعیت و قطب کشوری از لحاظ اقتصادی، توریستی و غیره به صورت جزئی تر، امری ضروری است. شهر مشهد از جمله کلان شهرهای با بناهی تاریخی و مذهبی و همچنین ساختمان های با اهمیت ویژه زیاد می- باشد بنابراین از اهمیت ویژه ای در ایران برخوردار است.

تحلیل ریسک احتمالاتی رویکردی سیستماتیک است که با ترکیب دانش ها و علوم مختلف به بررسی آسیب پذیری می پردازد. در این تحقیق بمنظور ارائه راهکاری برای بررسی خسارت در طول عمر سازه براساس مبانی اساسی تحلیل ریسک در ابتدا مفاهیم پایه تحلیل ریسک احتمالاتی^۱ PSRA و بخش اساسی آن، تحلیل خطر احتمالاتی زمین لرزه (PSHA^۲) مورد بررسی قرار گرفته و گامهای اساسی آن برای نمونه سازه ای انجام می شود.

از جمله کارهای صورت گرفته در زمینه تحلیل ریسک میتوان به یک مثال کاربردی از جایگاه تحلیل ریسک در تصمیم گیری مربوط به انجمن^۳ EERR [۱] نام برد که نتایج تحلیل ریسک را بصورت خسارت واقعی بیان کرده و مورد بررسی قرار می دهد.

برای پیش بینی عملکرد ساختمانها در مقابل زلزله نیاز به روشهای تحلیلی غیرخطی می باشد که در این زمینه سرو مقدم و روشن تحقیقات گسترده ای انجام دادند [۲]. همچنین دیلمی و نادعلی به مطالعه موردی رفتار سازه با استفاده از روشهای نوین تحلیل استاتیکی و بررسی مزایا و معایب و مقایسه نتایج حاصل از تحلیل بار افزون پرداختند [۳]. همچنین در زمینه تحلیل خطر احتمالاتی کیکو [۴] و گرین [۵] با بررسی جامع داده های موجود به ارائه روش احتمالاتی تحلیل خطر و همچنین مطالعات مروری در زمینه تحلیل خطر احتمالاتی پرداخته اند.

۲- تحلیل ریسک احتمالاتی

تحلیل ریسک احتمالی دارای دو جزء اصلی، شامل خسارت یا کمی کردن اثرات ناگوار (اغلب به صورت خسارت های مالی و جانی) و تعیین احتمال وقوع خسارت در بازه زمانی مشخص شده است. مراحل تحلیل ریسک احتمالاتی زمین لرزه بطور خلاصه به ترتیب زیر می- باشد:

مرحله اول: تحلیل غیر خطی سازه مورد نظر

این مرحله شامل تخمین آسیب های زمین لرزه محتمل برای سازه مورد نظر و بررسی توابع خرابی و خسارت است. تابع خرابی مقدار سطح خرابی در سطوح مختلف شدت زمین لرزه بیان می کند. تابع خسارت دید کلی و پیوسته ای از رفتار سازه در مراحل الاستیک و جاری شدن و تا رسیدن به فروریزش در اختیار قرار می دهد. برای بدست آوردن تابع خرابی، از تحلیل پوش آور که یک تحلیل استاتیکی غیر خطی می- باشد، استفاده می شود که حاصل این تحلیل منحنی ظرفیت سازه می باشد.

مرحله دوم: ارزیابی احتمالی خطر لرزه ای ساختگاه

تحلیل خطر لرزه ای ابزاری است که احتمال وقوع یک رویداد زلزله با اندازه مشخص در منطقه مورد مطالعه را مورد بررسی قرار می دهد. به عبارتی دیگر پارامتری از زلزله را در سطوح مختلف لرزه ای آیین نامه ای برای منطقه مورد مطالعه بیان می کند.

مرحله سوم: تبدیل خطر زمین لرزه به ریسک سازه و ارزیابی ریسک

در این مرحله تابع نمودار تحلیل خطر در منطقه مورد نظر با توابع خسارت سازه مورد نظر در همان منطقه ترکیب می شود و نتایج تحلیل ریسک بدست می آید. در تحلیل ریسک فروانی رویداد زمین لرزه بر حسب خرابی یا خسارت بیان می گردد. در این تحقیق تلاش بر آن است

¹ - Probabilistic Seismic Risk Analysis

² - Probabilistic Seismic Hazard Analysis

³ - Earthquake Engineering Research Institute

که با توجه به مبانی تحلیل خطر و تحلیل سازه، خسارت و عملکرد سازه در مقابل طول عمر سازه ارائه گردد. اهمیت این رویکرد زمانی آشکار می گردد که بررسی عملکرد سازه بمنظور مقاوم سازی و طراحی برای سازه هایی با طول عمر زیاد، مد نظر باشد.

۱-۲- تحلیل غیر خطی سازه مورد نظر

برای بررسی ریسک سازه در سطوح مختلف لرزه ای، نیاز به ارزیابی مناسبی از رفتار سازه در سطوح مختلف لرزه ای وجود دارد. برای اینکار می بایست از تحلیل های غیرخطی استفاده کرد که رفتار واقعی سازه را تحت بارهای لرزه ای متفاوت نشان می دهند.

تحلیل غیرخطی می تواند به دو صورت استاتیکی یا دینامیکی صورت گیرد. استفاده از تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی راه حل منطقی برای حل این مشکل می باشد اما انجام چنین تحلیلی برای طراحی سازه های معمولی بدلیل صرف هزینه و زمان بسیار زید کاربردی نیست و تنها برای سازه های مهم استفاده می شود. از طرف دیگر روش های موجود در آیین نامه های ساختمانی منطبق بر فرض عملکرد الاستیک خطی سازه می باشد که توانایی تأمین اطلاعاتی درباره مقاومت، شکل پذیری و توانایی اتلاف انرژی در سازه را ندارد. بنابراین استفاده از تحلیل های غیرخطی ساده شده مانند تحلیل استاتیکی غیرخطی راه حل منطقی برای تحلیل و ارزیابی رفتار سازه می باشد.

تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده یکی از روش ها جهت مطالعه رفتار سازه در حوزه رفتار خطی و غیرخطی است. آنالیز پوش آور یک تحلیل استاتیکی غیر خطی تحت اثر بارهای جانبی فزاینده است. اساس کلی این روش بدین صورت است که یک مدل ریاضی غیرخطی از سازه تحت یک الگوی بار جانبی قرار گرفته و این بار جانبی با آهنگ ثابتی افزایش پیدا می کند، در طول فرایند افزایش صعودی بار جانبی، مقاومت سختی اعضاء در اثر ایجاد مفاصل پلاستیک تعریف شده کاهش می یابد تا زمانیکه سازه به یک تغییر مکان هدف از پیش تعیین شده برسد و یا اینکه سازه دچار فروریزش شود. این تغییر مکان هدف در یک نقطه کنترلی اندازه گیری می شود.

اصلی ترین و مهم ترین محصول این فرایند، منحنی تغییرات برش پایه در مقابل تغییر مکان بام می باشد که به آن منحنی ظرفیت سازه گفته می شود که هر نقطه روی این منحنی بیان کننده یک حالت خسارت خاص برای سازه در مقابل برش پایه خاص است که برش پایه بیانگر مقدار بارگذاری جانبی ناشی از شدت زلزله است.

در این تحقیق سازه انتخابی یک قاب خمشی فولادی ۶ طبقه می باشد که طبق آیین نامه ۲۸۰۰ برای شهر مشهد و بر اساس نوع خاک II طرح و کنترل شده است. این سازه دارای ۱۸ متر ارتفاع و دارای سه دهانه سه و نیم متری است. مقاطع تیرها از نوع IPE و ستون ها دارای مقاطع تیروورق با عمق ۳۰ سانتی متری، عرض بال مقاطع ۲۰۰ میلیمتر، ضخامت جان ثابت ۵ میلیمتر و دارای ضخامت بال های متفاوت می باشند هندسه و مدل طرح شده این سازه در شکل ۱ نشان داده شده است.

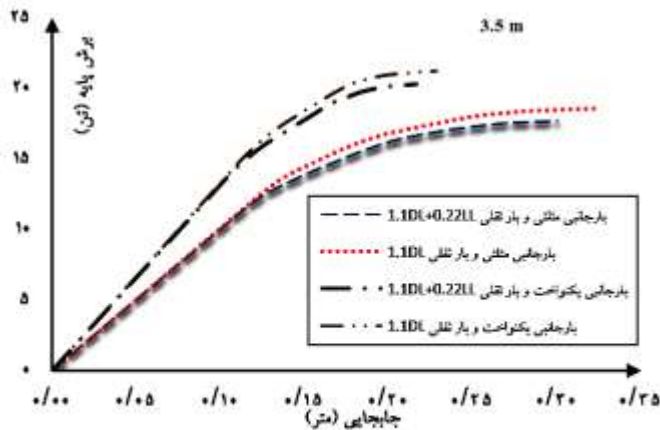
مقدار جابجایی کل سازه در طبقه بام برابر ۰/۰۷۵ متر می باشد که از مقدار مجاز خود طبق آیین نامه ۲۸۰۰ ($0.005H = 0.005 \times 18 = 0.09 m$) کمتر می باشد. با توجه به اینکه در این سازه زمان تناوب اصلی با توجه به رابطه تجربی آیین نامه ۲۸۰۰، کمتر از ۰,۷ ثانیه می باشد لذا حداکثر جابجایی نسبی مجاز سازه براساس آیین نامه ۲۸۰۰ از رابطه (۱) بدست می آید:

$$Drift Ratio < \frac{0.0357}{R} = \frac{0.0357}{7} = 0.0051 \quad (1)$$

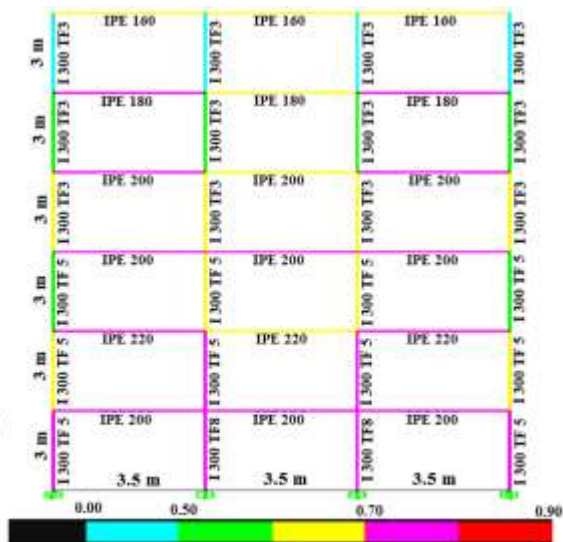
در این رابطه Drift Ratio معرف حداکثر جابجایی مجاز و R معرف ضریب رفتار سازه است که طبق نتایج تحلیل حداکثر مقدار جابجایی نسبی در طبقه چهارم و برابر ۰/۰۰۵۰۶ می باشد که از مقدار مجاز آیین نامه ای کمتر است.

در انجام تحلیل پوش آور مدلسازی الگوهای بارگذاری مطابق ضوابط دستورالعمل FEMA-356 [۶] و نشریه ۳۶۰ [۷] صورت گرفته است. برای انجام تحلیل از دو الگوی بار جانبی یکنواخت و مثلثی و دو الگوی بار ثقلی $1.1DL + 0.22LL$ و $1.1DL$ در نظر گرفته شده است که

در اینجا QD بار مرده و QL برابر ۲، ۰ بار زنده می‌باشد. با انجام تحلیل استاتیکی غیر خطی فزاینده به ازای هر مقدار برش پایه برای هر چهار الگوی بارگذاری جانبی مقدار جابجایی برای تمامی نقاط کنترلی موجود است. با استفاده از این داده ها منحنی ظرفیت را برای هر طبقه حاصل می‌شود. به عنوان نمونه به ترتیب در نمودارهای شکل ۲ منحنی ظرفیت برای طبقه بام و حداکثر جابجایی سازه با الگوی بارگذاری مختلف نشان داده شده است.



شکل ۲- نمودار منحنی ظرفیت سازه برای الگوی بارهای جانبی برای طبقه بام



شکل ۱- قاب طراحی شده با این نامه ۲۸۰۰ ایران

۲-۲- ارزیابی احتمالی خطر لرزه ای ساختگاه

در حالت کلی دو رویکرد به منظور تحلیل خطر زمین لرزه در یک ساختگاه وجود دارد: رویکرد تعینی و رویکرد احتمالی که هر یک از این دو رویکرد دارای مزایا و معایب مخصوص به خود است. مراحل انجام مطالعات تحلیل خطر لرزه ای احتمالاتی عبارت است از:

- شناسایی چشمه های لرزه زا؛
- تحلیل داده های لرزه ای و تخمین پارامترهای لرزه ای منطقه مورد مطالعه؛
- بدست آوردن تابع توزیع چگالی بزرگا؛
- منظور کردن انحراف معیار از میانگین مشخصه زمین لرزه؛
- انتخاب رابطه کاهش دگی مناسب؛
- تحلیل خطر زمین لرزه با روش احتمالاتی و بدست آوردن نمودار APE^4 ؛

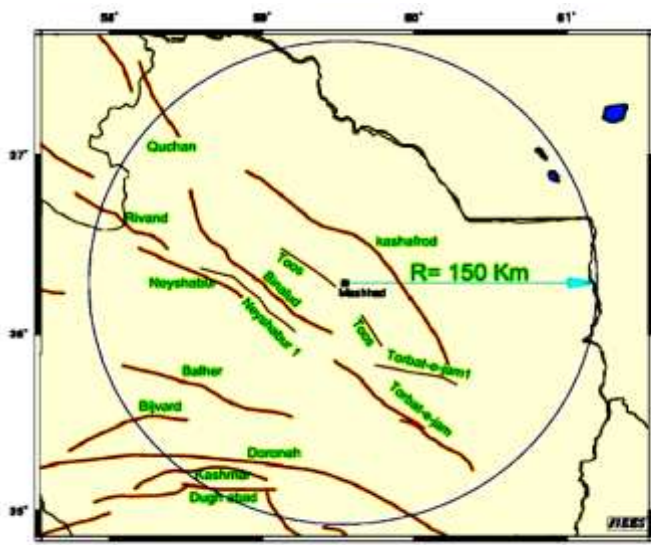
در استخراج کاتالوگ زلزله و نیز به منظور جمع آوری اطلاعات مربوط به زمین لرزه های رخ داده در منطقه مورد مطالعه، از منابع متفاوتی همچون مرکز تحقیقات پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله (IIIEES) [۸] و مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی (BHRC) [۹] و دیگر منابع مکتوب برای داده های تاریخی [۱۰] استفاده شده است.

۲-۲-۱- شناسایی چشمه های لرزه زا

برای شناسایی گسل های فعال منطقه از نقشه گسل های فعال ایران [۱۱] و منبع مرکز تحقیقات پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله [۱۲] استفاده شد. مهمترین گسل ها برای کلان شهر مشهد، گسل طوس و گسل کشفرو در شعاع ۱۵۰ کیلومتری، به طول های ۴۵ و

⁴ - Annual Probability Event

۱۸۰ کیلومتر است. گسل های محدوده ۱۵۰ کیلومتری شهر مشهد در شکل ۳ و مشخصات این گسل ها در محدوده ۱۵۰ کیلومتری شهر مشهد در جدول ۱ بیان شده‌اند.



شکل ۳- گسل های موجود در گستره ۱۵۰ کیلومتری از ساختگاه

جدول ۱- گسل های موجود در گستره ۱۵۰ کیلومتری از ساختگاه

طول گسل در محدوده ۱۵۰ کیلومتری (کیلومتر)	نام گسل	طول گسل در محدوده ۱۵۰ کیلومتری (کیلومتر)	نام گسل
۱۸۰	کشفورد	۱۱۰	بالهر
۵۰	ریوند	۱۵۰	درونه
۱۳۲	بینالود	۵۰	کاشمر
۵۷	نیشابور	۳۰	بیجوار
۶۸	نیشابور ۱	۲۰	چنگل
۱۱۹	تریت جام	۲۰	قوچان
۵۰	تریت جام ۱	۴۵	طوس

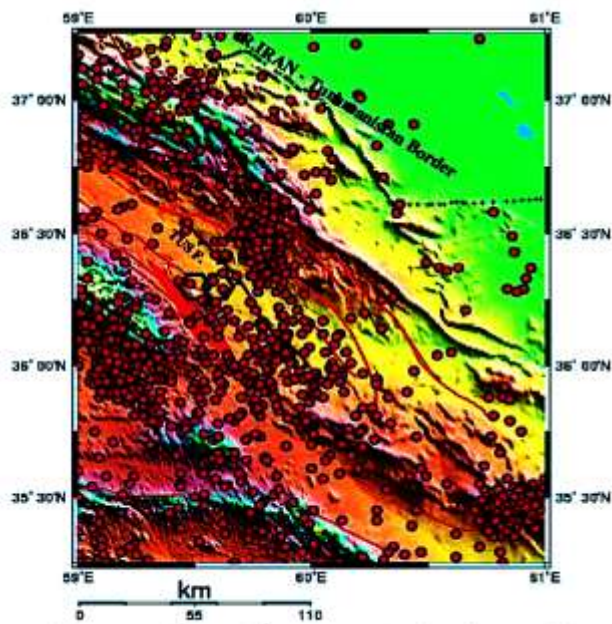
۲-۲-۲- تحلیل داده‌های لرزه‌ای و تخمین پارامترهای لرزه‌ای

تعیین صحیح پارامترهای لرزه خیزی برای چشمه‌های لرزه‌زا، از مهمترین بخش های تحلیل زمین‌لرزه‌ها هستند که در حقیقت نشان دهنده میزان لرزه خیزی ناحیه و فعالیت چشمه‌های لرزه‌ای گستره طرح می‌باشند و خود مبنای محاسبات دوره بازگشت و احتمال رویداد و نیز محاسبه پارامترهای جنبش نیرومند زمینی به روش احتمالی هستند.

معتبرترین فرضیه ارائه شده در مورد رویداد زمین‌لرزه‌ها، فرآیند پواسانی می‌باشد. در این گزارش نیز مطالعات براساس این فرآیند انجام شده است و بر این اساس روابط بزرگا - فراوانی با روش گوتنبرگ - ریشتر [۱۳] و تخمین بیشینه درست نمایی برآورد گردیده و ضرایب ثابت گوتنبرگ - ریشتر شامل پارامترهای لرزه خیزی منطقه مانند β و λ و همچنین حداکثر بزرگای محتمل و دوره بازگشت و احتمال رویداد زمین‌لرزه‌ها با بزرگای مختلف در یک بازه زمانی محاسبه می‌شوند. در این راستا ابتدا زمین لرزه‌های تاریخی و جدید گستره‌ی مورد پژوهش گردآوری شد و پس از یکسان سازی بزرگاهای مختلف به واحد بزرگای گشتاوری^۵ (M_w)، عملیات حذف پس لرزه‌ها و پیش لرزه‌ها انجام شد. شکل ۴ توزیع مکانی زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی مشهد و اطراف آن را نشان می‌دهد.

در این مطالعه برای محاسبه پارامترهای لرزه‌ای از نرم افزار کیکو استفاده شد. این روش برای نقاطی مانند ایران که داده‌های زلزله کم و با دقت پایین دارند، مناسب‌ترین روش است. در جدول ۲ پارامترهای لرزه خیزی محاسبه شده به روش کیکو در شعاع ۱۵۰ کیلومتری ارائه شده است.

⁵ - Moment Magnitude



جدول ۲- پارامترهای لرزه ای محاسبه شده به روش کیکو

شعاع مطالعاتی	۱۵۰ کیلومتر
β	۲/۰۷
λ_{Mw}	۰/۶۸
M_{Max}	۸/۱
M_{Min}	۴/۵

شکل ۴- توزیع مکانی زمین لرزه‌های تاریخی و دستگاهی در گستره ۱۵۰ کیلومتری ساخنگاه

۲-۲-۳- منظور کردن انحراف معیار از میانگین مشخصه زمین لرزه

بررسی رکوردهای ثبت شده و مشاهدات تجربی نشان می‌دهد که حتی به ازای مقادیر بزرگا و فواصل یکسان، مقدار پراکندگی زیادی در مشخصه زمین لرزه وجود دارد. این تغییرپذیری در مشخصه زمین لرزه با متغیر ε نمایش داده می‌شود. متغیر ε به عنوان ضریبی در مقدار انحراف معیار مربوط به رابطه کاهندگی تحلیل خطر تعریف می‌شود [۱۴]. در صورتی که مشخصه زمین لرزه بصورت لگاریتمی باشد، این متغیر از توزیع نرمال استاندارد پیروی می‌کند که تابع چگالی احتمال آن به صورت رابطه (۲) می‌باشد.

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-\varepsilon^2/2) \quad (2)$$

در محاسبات تحلیل خطر احتمالاتی معمولاً مقدار ε در بازه $+3$ تا -3 در نظر گرفته می‌شود که با توجه به حاکم بودن توزیع نرمال بر مقدار عدم قطعیت، این محدوده بیش از ۹۹ درصد عدم قطعیت را تحت پوشش دارد [۱۴]. در اینجا تغییرات بازه ε به اندازه واحد ($\Delta\varepsilon = 1$) و مقدار ε از $+2/5$ تا $-2/5$ در نظر گرفته شده است.

از این رو با فرض رویداد زمینلرزه، احتمال اینکه این مقدار در بازه‌های اشاره شده در بالا رخ دهد برابر است با رابطه (۳):

$$P\left(\varepsilon_{mid_i} - \frac{\Delta\varepsilon}{2} < \varepsilon < \varepsilon_{mid_i} + \frac{\Delta\varepsilon}{2}\right) = f_{\varepsilon_{mid_i}} \cdot \Delta\varepsilon \quad (3)$$

که در این حالت هم مجموع حاصلضرب توابع توزیع عدم قطعیت در بازه‌های مختلف در مقدار تغییرات بازه مطابق با رابطه (۴) برابر با واحد می‌باشد، به عبارت دیگر:

$$\sum f(\varepsilon_{mid_i}) \cdot \Delta\varepsilon = 1.0 \quad (4)$$

که در اینجا برابر با ۰/۹۹۱ می‌باشد که دلیل این اختلاف جزئی انتخاب بازه‌ای نسبتاً بزرگ برای ε است.

۲-۲-۴- انتخاب رابطه کاهندگی مناسب

انتخاب رابطه کاهندگی مناسب از اهمیت بسزایی در چگونگی و قابلیت اعتماد به نتایج نهایی تحلیل خطر برخوردار است. رابطه مورد استفاده (در روش تحلیل احتمالاتی خطر زلزله) برای محاسبه شتاب زمین در این مطالعه، رابطه کاهندگی امبرسیز^۶ [۱۵] است که به صورت رابطه (۵) می‌باشد:

$$\text{Log}Y = a_1 + a_2M_w + (a_3 + a_4M_w)\log\sqrt{(d^2 + a_5^2)} + a_6S_s + a_7S_A + a_8F_N + a_9F_T + a_{10}F_0 + \varepsilon\sigma \quad (5)$$

در اینجا چون نوع گسلش مشخص نیست مقدار $F_0 = 1$ و مقادیر $F_T, F_N = 0$ منظور می‌گردد. همچنین با توجه به نوع خاک سخت برای ساختگاه $S_A = 0$ و $S_S = 1$ در نظر گرفته می‌شود. مقدار انحراف (σ) برابر با مقدار برای زمین لرزه های درون صفحه ای در نظر گرفته شده است.

مقادیر ضرایب a_i بیان شده توسط امبرسیز و همکاران (۲۰۰۵) برای برای دوره تناوب سازه مورد نظر متفاوت می‌باشد. طبق آیین نامه ۲۸۰۰ ایران مقدار دوره تناوب تجربی برای سازه های فولادی از رابطه (۶) محاسبه می‌گردد:

$$T = 0.08 H^{(3/4)} \quad (6)$$

در این رابطه (H) معرف ارتفاع سازه می‌باشد. با توجه به ارتفاع ۱۸ متری قاب مورد نظر، دوره تناوب تجربی سازه برابر با ۰/۶۶۹ حاصل می‌شود که مقادیر ضرایب رابطه (۵) برای این دوره تناوب طبق جداول مربوطه در نظر گرفته شده و نهایتاً رابطه کاهندگی به صورت تابع (۷) خلاصه می‌شود:

$$\text{Log}(PGA) = 0.011 - 0.198M_w + (-2.305 + 0.205M_w)(\text{Log}(R^2 + 4.8^2))^{0.5} \quad (7)$$

در این تابع PGA معرف حداکثر شتاب زمین است.

۲-۲-۵- روند حل و بدست آوردن نمودار APE

در روش احتمالی خطر زمین لرزه، تحلیل بر پایه تمامی حالات ممکن از مقادیر ممکن بزرگای زمینلرزه حاصل از توان لرزه‌زایی چشمه‌های مدل شده لرزه‌زا در گستره مورد نظر و در کلیه فاصله های ممکن از ساختگاه مورد مطالعه با در نظر گرفتن هر ترکیب از مقادیر با عدم قطعیت های مختلف مورد نظر، انجام می‌گیرد. در نتیجه با استفاده از روش احتمالی امکان برآورد پتانسیل جنبش نیرومند زمین با در نظر گرفتن احتمال فراگذشت مشخص، میسر می‌گردد.

راهکار مورد استفاده در تحلیل خطر زمینلرزه بر پایه مدل کرنل (۱۹۶۸ و ۱۹۷۱) [۱۶] و مگگایر (۱۹۷۶ و ۱۹۷۸) و با استفاده از روش بندر و پرکینز (۱۹۸۷) [۱۷] بوده است. در این روش پس از تعیین چشمه‌های لرزه‌زای محدوده مورد مطالعه، آهنگ رویداد زمینلرزه‌ها برای این چشمه‌ها محاسبه و مشخص گردیده و با محاسبه شتاب حاصل از چشمه‌های متفاوت، دوره بازگشت بیشینه جنبش نیرومند زمین برای محدوده ساختگاه مورد مطالعه محاسبه شده است.

⁶-Ambraseys(2005)

حال احتمال اینکه بیشینه شتاب زمین از یک شتاب مشخص بیشتر شود تعیین می‌گردد. در اینجا شتاب مورد نظر یا همان acc در بازه بین $0.05g$ تا $1/7g$ و با افزایش $0.05g$ در هر مرحله مورد استفاده قرار میگیرد. به منظور تعیین احتمال فراگذشت بیشینه شتاب زمین از شتاب مشخص مورد نظر با فرض رویداد زمین لرزه با بزرگای M و فاصله R و استفاده از تابع توزیع نرمال استاندارد (تابع Φ) می‌توان نوشت:

$$P(PGA > acc|EQ; M, R) = 1 - \Phi\left(\frac{\log(acc) - \log PGA}{\sigma_{\log PGA}}\right) \quad (8)$$

در اینجا طبق رابطه کاهندگی انتخابی، برای بیشینه شتاب زمین، مقدار $\sigma_{\log PGA}$ برابر $(0.222 - 0.022M_w)$ می‌باشد. این احتمال برای مقادیر مختلف فاصله و بزرگای مورد نظر در acc های $0.05g$ و $0.1g$ و $0.15g$ و ... $1/7.0g$ برای هر گسل محاسبه می‌شود. حال احتمال سالیانه اینکه بیشینه شتاب زمین از شتاب مورد نظر به شرط وقوع یک رویداد زمین لرزه بیشتر شود، از رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

$$P(PGA > acc)|EQ) = \sum_R \sum_M P(PGA > acc|EQ; M, R) f(M) f(R) \Delta M \Delta R \quad (9)$$

با فرض اینکه رویداد زمین لرزه‌ها از توزیع پواسون پیروی کند احتمال رویداد یک زمین لرزه برابر است با تابع (۱۰):

$$P(PGA > acc)|EQ) = \sum_R \sum_M P(PGA > acc|EQ; M, R) f(M) f(R) \Delta M \Delta R \quad (10)$$

پس از انجام این محاسبات برای همه ی گسل ها، چون تحلیل خطر احتمالی زمین لرزه در یک منطقه به طور همزمان اثر تمام چشمه های زمین لرزه در خطرپذیری ساختگاه را مورد مطالعه قرار می‌دهد، بنابراین با استفاده از رابطه (۱۱) نتایج احتمالات محاسبه شده برای تمام گسل ها با یکدیگر ترکیب می‌شود.

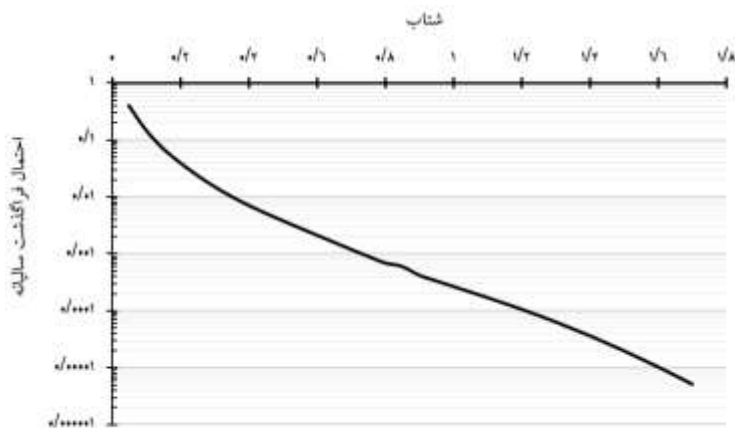
$$P(PGA > acc) = 1 - \prod_{F.i} (PGA < acc)_{F.i} \quad (11)$$

$F.i$ گسل های مورد نظر در این مطالعه می باشند.

بدین صورت نمودار احتمال فراگذشت سالیانه به ازای acc های $0.05g$ و $0.1g$ و $0.15g$ و ... $1/7.0g$ محاسبه شد و در نمودار شکل ۵ نشان داده شده است. همچنین نتایج حاصل از نمودار شکل ۵ بر اساس رابطه پواسون (۱۲) در جدول ۳ ارائه شده است.

$$P_1(t) = 1 - e^{-vt} \quad (12)$$

که در آن $P_1(t)$ احتمال وقوع ۱ زلزله در دوره زمانی t است و v متوسط نرخ وقوع زمین لرزه در واحد زمان است.

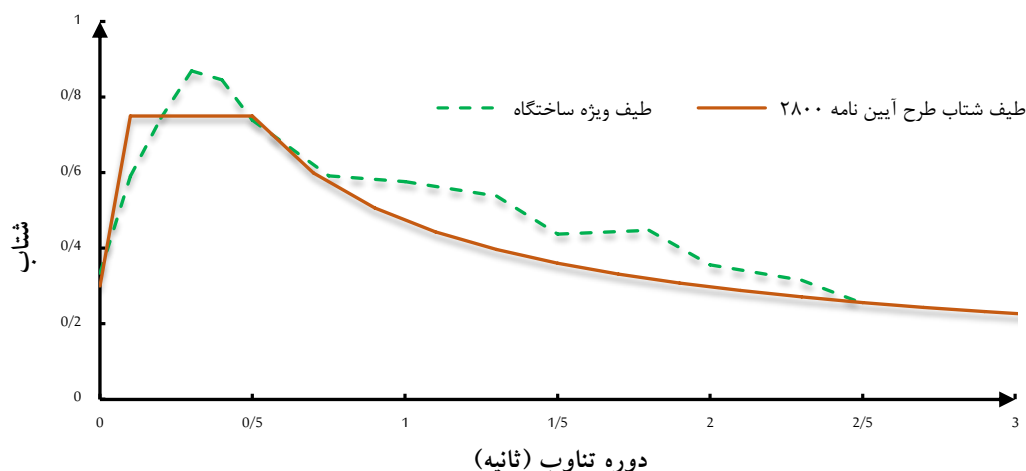


شکل ۵- نمودار تحلیل خطر احتمالی برای سازه با دوره تناوب ۰/۶۹۹ ثانیه برای شهر مشهد

جدول ۳- پیشینه شتاب افقی زمین در ساختمان به روش احتمالی برای شهر مشهد

سطح خطر	دوره بازگشت (سال)	PGA
۵۰ درصد احتمال وقوع در ۵۰ سال (سطح بهره برداری آیین نامه ۲۸۰۰ ایران [۱])	۷۲	۰/۲۳۳
۱۰ درصد احتمال وقوع در ۵۰ سال (سطح طراحی آیین نامه ۲۸۰۰ ایران)	۴۷۵	۰/۳۳۴
۲ درصد احتمال وقوع در ۵۰ سال (زلزله غیر قابل یادآوری)	۲۴۷۵	۰/۴۳۴

همچنین با تغییر در مقادیر پریود (تغییر ضرایب a_1 الی a_{10} در رابطه کاهندگی) و انجام روند تحلیل خطر و ثبت کردن مقادیر acc برای سطح خطر مورد نظر (APE برابر ۰/۰۰۲۱)، می توان طیف ویژه ساختمان نظیر ۱۰٪ در ۵۰ سال را برای منطقه مورد نظر و نوع خاک مورد نظر رسم کرد. در شکل ۶ طیف شتاب طرح در نظر گرفته شده برای شهر مشهد با نوع خاک II و طیف ویژه ساختمان نظیر ۱۰٪ در ۵۰ سال نشان داده شده اند.



شکل ۶- طیف شتاب طرح آیین نامه ۲۸۰۰ و طیف ویژه ساختمان نظیر ۱۰٪ در ۵۰ سال شهر مشهد با نوع خاک II

۳-۲- تبدیل خطر زمین لرزه به ریسک سازه و ارزیابی ریسک

با استفاده از نتایج تحلیل پوش آور سازه و نتایج تحلیل خطر، نتایج تحلیل ریسک بدست می آید. در اینجا مطابق رابطه (۱۳) نتایج حاصل از تحلیل خطر را با استفاده از رابطه برش پایه آیین نامه ۲۸۰۰ به صورت جابجایی در مقابل acc محاسبه و رسم می گردد.

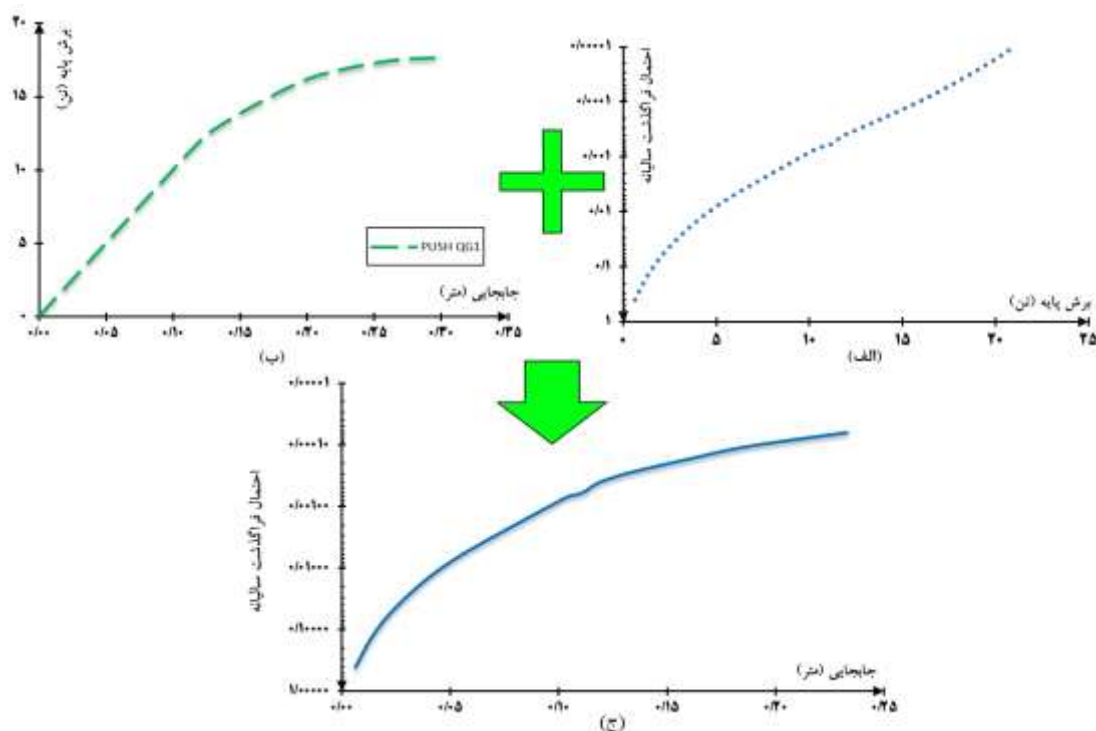
$$V = \frac{ABI}{R} \times w = \frac{(acc)I}{R} \times w \quad (13)$$

که در اینجا A شتاب مبنای طرح، B ضریب بازتاب، I ضریب اهمیت، R ضریب رفتار سازه و w وزن کل سازه می باشد که با توجه مقادیر $W=91.7$ TON و $R=7, I=1.0$ برای سازه طرح شده داریم:

$$V = 13.1 \times acc \quad (TON) \quad (14)$$

با توجه به نمودار APE در بخش ۲-۲-۵ و رابطه (۱۴)، نتایج تحلیل خطر بصورت نمودار شکل ۷-الف ارائه میگردد. حال با ترکیب نمودار حاصله با منحنی ظرفیت سازه منحنی ریسک احتمالاتی زمین لرزه حاصل می شود.

منحنی‌های حاصل از تحلیل خطر (نمودار شکل ۷-الف) و منحنی ظرفیت سازه (نمودار شکل ۷-ب) برای جابجایی طبقه بام را ترکیب شده و منحنی ریسک زلزله برای جابجایی مرکز جرم طبقه بام در مقابل احتمال فراگذشت سالیانه ارائه می شود (نمودار شکل ۷-ج).



شکل ۷-الف) منحنی حاصله از منحنی تحلیل خطر احتمالاتی (احتمال فراگذشت سالیانه-برش پایه) ، (ب) منحنی ظرفیت سازه برای طبقه بام (برش پایه-جابجایی مرکز جرم) و (ج) منحنی ریسک زلزله برای جابجایی مرکز جرم طبقه بام در مقابل احتمال فراگذشت سالیانه

۳-منحنی ریسک عملکرد سازه در طول عمر سازه

اکنون با استفاده از نتایج تحلیل ریسک، برای نشان دادن ریسک پذیرفته شده ی رفتار سازه که برای زلزله ای با احتمال رخداد کمتر از ۱۰ درصد در ۵۰ سال طراحی گردیده است می توان رفتار سازه طراحی شده را در طول عمر سازه را به کمک رابطه پواسون نشان داد. همانطور که گفته شد با توجه به اینکه فرض شده رخداد زلزله از توزیع پواسون پیروی کند، بنابراین طبق رابطه پواسون (رابطه ۱۲) که در آن رابطه U متوسط نرخ وقوع زمین لرزه در واحد زمان می باشد و t بازه زمانی در نظر گرفته شده (در اینجا بعنوان عمر سازه در نظر گرفته می شود) می باشند. که برای سطح طراحی آیین نامه ۲۸۰۰ که زلزله ای با احتمال رویداد کمتر از ۱۰ درصد است، داریم:

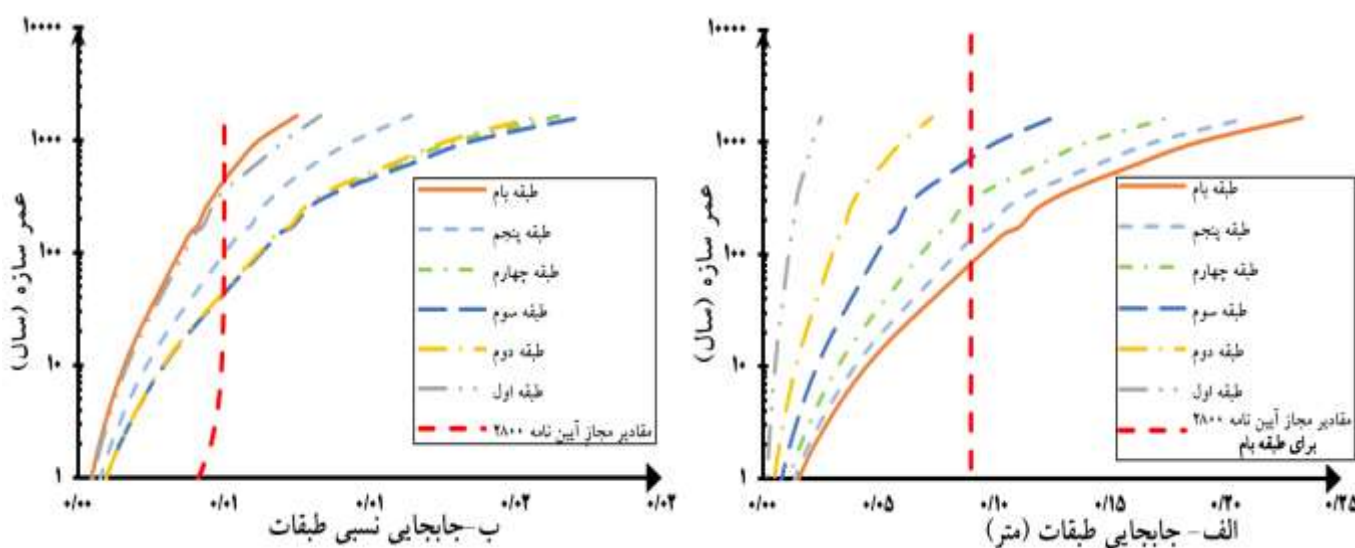
$$0.1 = 1 - e^{-(APE)t} \quad (15)$$

که عمر سازه به ازای مقادیر مختلف APE بصورت رابطه زیر حاصل می گردد:

$$t = -\frac{\ln(0.9)}{APE} \quad (16)$$

بنابراین می‌توان نمودار ریسک را به ازای جابجایی در مقابل $-\frac{Ln(0.9)}{APE}$ که همان عمر سازه را نشان می‌دهد، رسم کرد. این نمودار، مقدار ریسک پذیرفته شده از طرف طراح را برای سازه‌ای که با آیین نامه ۲۸۰۰ طراحی گردیده است، در طول عمر سازه بیان می‌کند. به عبارت ساده‌تر این منحنی خسارت سازه را در مقابل عمر سازه در اختیار قرار می‌دهد. از نتایج حاصل از این منحنی می‌توان به برداشت میزان خسارت سازه‌ای در عمر سازه طراحی شده اشاره کرد. شکل ۸-الف نمودار ذکر شده برای جابجایی تمامی طبقات به همراه مقادیر جابجایی مجاز آیین نامه‌ای نشان می‌دهد.

همچنین باتوجه به نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی غیرخطی می‌توان برای مقادیر نسبت جابجایی نسبی طبقات و حداکثر نسبت جابجایی نسبی سازه را برای سازه‌ای که با آیین نامه ۲۸۰۰ طراحی گردیده است، در طول عمر سازه مطابق شکل ۸-ب بیان کرد.



شکل ۸-الف: منحنی های ریسک لرزه‌ای برای جابجایی طبقات در عمر سازه و ب: منحنی های ریسک لرزه‌ای برای نسبت جابجایی نسبی طبقات در عمر سازه

این نمودارها بیان مناسبی از رفتار سازه را در زمان آینده از عمر سازه را نشان می‌دهد. این را نیز باید در نظر گرفت که نتایج حاصله با توجه به وضعیت لرزه خیزی منطقه و با استفاده از روابط احتمالاتی صورت گرفته است.

۴- نتیجه گیری:

با تحلیل خطر زلزله صورت گرفته به روش احتمالاتی در منطقه مورد مطالعه نتایج زیر را می‌توان استنتاج کرد:

- ۱) مقدار شتاب مبانی طرح برای شهر مشهد با نوع خاک II معادل 0.334 برابر شتاب زمین و مقدار شتاب سطح بهره برداری 0.233 برابر شتاب زمین حاصل شد که مقادیر آنها طبق آیین نامه ۲۸۰۰ بترتیب برابر 0.3 و 0.05 برابر شتاب زمین است.
 - ۲) با توجه به طیف طرح بدست آمده از تحلیل خطر و مقایسه آن با طیف طرح آیین نامه ۲۸۰۰ مشخص می‌شود که نتایج بدست آمده برای پریرودهای بالاتر، از مقادیر آیین نامه ۲۸۰۰ فاصله گرفته و مقادیر بیشتری را حاصل می‌دهد.
 - ۳) مشخص است که در نظر گرفتن مقدار انحراف معیار از میانگین لگاریتمی در روند تحلیل خطر که یک معیار زمین لرزه ای می‌باشد، نتایج مقادیر بالاتری را نسبت به مقادیر آیین نامه ۲۸۰۰ بیان می‌کنند.
- با توجه به تحلیل پوش آور صورت گرفته بروی قاب مورد نظر و بیان کردن نتایج تحلیل ریسک احتمالاتی زلزله آن نتایج زیر را استنتاج می‌گردد:

- ۱) طراحی براساس نتایج طراحی را به اقتصادی ترین حالت ممکن سوق می دهد، زیرا در این نوع طراحی هم اثرات ساختگاه بطور مستقیم در محاسبات وارد می شود و هم رفتار واقعی سازه.
- ۲) باتوجه نمودارهای تحلیل پوش آور وبه دنبال آن نمودارهای ریسک درمقابل زلزله به وضوح مشاهده می شود که نوع ترکیب بار ثقلی برای انجام پیش تحلیل تاثیر چندانی بروی نتایج ندارد. اما نوع الگوی توزیع بار جانبی است که در نتایج بسیار تاثیرگذار می باشد.
- ۳) مشاهده شد که الگوی توزیع بار جانبی به صورت مثلثی نتایج بالاتری را نسبت الگوی بار جانبی بصورت یکنواخت را حاصل می کند. همانطور که می دانیم الگوی بار جانبی مثلثی تابعیت زیادی از مود ارتعاش اول سازه می باشد. اختلاف حاصله از دو نوع الگوی بارگذاری جانبی به ازای APE های کمتر (زلزله های بزرگتر) و یا به ازای گذشت عمر بیشتر از سازه، بیشتر می باشد.
- ۴) در این تحقیق راهکاری جهت محاسبه ریسک خسارت در مقابل عمر سازه ارائه گردید. اهمیت این راهکار تنها به ارائه خسارت در برابر عمر سازه محدود نمی گردد و زمانی اهمیت این رویکرد بیشتر نمایان می گردد که به بررسی و کنترل عملکرد سازه در عمر سازه پرداخته شود. برای مثال تامین کردن سطح طراحی در طول عمر ۵۰ سال برای سازه طراحی شده با آیین نامه. همچنین از نتایج کاربردی این رویکرد می توان به تخمین عملکرد سازه در عمر مشخص سازه اشاره نمود که در این بخش سازه های با عمر زیاد و بناهای مهم تاریخی اهمیت این رویکرد را به وضوح روشن می سازد.
- ۵) نمودارهای ریسک بیان شده بصورت عمر سازه در مقابل خسارت، بطور مناسبی ریسک پذیرفته شده ای از طرف طراح را برای این سازه که با آیین نامه ۲۸۰۰ ایران طراحی شده است، نشان دهد.
- ۶) از روی نمودار ریسک بیان شده بصورت عمر سازه می توان عمر مفید واقعی تر سازه را با توجه به لرزه خیزی منطقه و سازه طرح شده را مورد بررسی قرار داد.
- ۷) مطابق نمودارهای ریسک بیان شده بصورت عمر سازه مشخص می شود که برای سازه طراحی شده در این تحقیق، سازه در عمری کمتر از ۵۰ سال به مقادیر مجاز جابجایی نسبی خود خواهد رسید. علت این مسئله وجود نتایج تحلیل خطر بالاتر نسبت به مقادیر آیین نامه ۲۸۰۰ می باشد.

مراجع

1. EERI committee on seismic risk (1989) Basics of Seismic Risk Analysis . Earthquake Spectra, 5 , pp. 675-702.
۲. عبدالرضا سرومقدم و رامین روشن (۱۳۸۷). " کاربرد آنالیز استاتیکی فزاینده غیر خطی در ارزیابی لرزه های ساختمانها" اولین کنفرانس علمی-تخصصی انجمن مهندسان راه و ساختمان ایران.
۳. اردشیر دیلمی و حسن نادعلی (۱۳۸۳). "بررسی و تحلیل سازه های موجود توسط روشهای نوین همراه با مطالعات موردی" اولین کنگره مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.
4. Kijko,A. "Statistical estimation of maximum regional earthquake magnitude", Workshop of seismicity Modeling in Seismic Hazard Mapping, Polhce, Slovenia, Geological Survey 1-10 (2000).
5. Green R.A, Hall W.J. "An overview of selected seismic hazard analysis methodologies" Department of civil engineering, university of Illinois at Urbana-Champaign, (1194).
6. FEMA 356, "Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings", Federal Emergency Management Agency, 2000.
۷. سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور (۱۳۸۵)، «دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمانهای موجود-نشریه شماره ۳۶۰»، تهران: سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، دفتر تدوین ضوابط و معیارهای فنی.
8. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIIES), <http://www.iiies.ac.ir/>
9. Building and Housing Research Center (BHRC) , <http://www.bhrc.ac.ir/>
۱۰. امبرسیز، ن.ن. و ملویل، ج.پ. (۱۳۷۰)، «تاریخ زمین لرزه های ایران»، ترجمه رده، ا. انتشارات آگاه، تهران.
۱۱. نقشه گسل های فعال ایران، (۱۳۸۲)، پژوهشگاه بین المللی لرزه شناسی، وزارت علوم، تحقیقات و فن آوری.
12. [http://www.iiies.ac.ir/EQsearch/\(qwsuenbjukp_xj_imiix\)/EventQuery](http://www.iiies.ac.ir/EQsearch/(qwsuenbjukp_xj_imiix)/EventQuery).
13. Gutenberg, B., and Rishter, C.F. "Seismicity of the Earth and Associated Phenomena", Princeton University Press, New Jersey, 1954.

۱۴. یزدانی آزاد، کوثری میلاد، (۱۳۹۱)، «مقدمه ای بر تحلیل خطر احتمالاتی زمین لرزه». انتشارات دانشگاه کردستان.
15. Ambraseys NN, Douglas J, SarmaSK,Smit PM (2005) “*Equation for the Estimation of Strong Ground motion from Shallow Crustal Earthquakes Using Data from Europe and the Middle East*”: Horizontal Peak ground Acceleration and Spectral Acceleration. Bull Earthquake Eng,pp.1-53.
16. Cornel, C.A., 1968, “*Engineering Seismic Risk analysis*” Bull. Seism. Soc. Am., 58, 1583-1606.
17. Bender, B. and Perkins, D., 1987, “*A computer program for seismic hazard estimation*”, SEISRISK III. US Geological Surv. Bull. 1772.
۱۸. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، «آیین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله: استاندارد ۲۸۰۰»، (ویرایش سوم).