

# تهیه‌ی خطوط هم‌شتاب طراحی براساس تحلیل خطر زلزله برای منطقه‌ی حرم مطهر امام‌رضا (ع)

غلامرضا قدرتی امیری (استاد)

سیدعلی رضویان امرونی (دانشجوی دکتری)  
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

سیدروح‌اله پاشانجاتی (کارشناس ارشد)  
دانشکده مهندسی زلزله، پژوهشکده‌ی ساختمان و مسکن

هدف از انجام این تحقیق، تحلیل خطر زلزله و تهیه‌ی نقشه‌های هم‌شتاب برای سطوح خطر لرزه‌ی مختلف در حرم مطهر امام‌رضا (ع) است. از آنجا که ساخت‌وسازهای حرم مطهر امام‌رضا (ع) طول عمری بیش از ۵۰ سال دارند و برخی بناها نیز از ارزش و اهمیت تاریخی و مذهبی برخوردارند، به‌منظور طراحی مناسب و بهسازی لرزه‌ی ابنیه‌ی قدیمی و باارزش، تهیه‌ی شتاب طراحی در سطوح خطر لرزه‌ی مختلف مورد نیاز است. از این رو با استفاده از منابع مختلف، کاتالوگ داده‌های لرزه‌خیزی در شعاع ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلومتری منطقه جمع‌آوری و سپس پارامترهای لرزه‌خیزی توسط روش کیکو محاسبه شد. در ادامه، گسل‌های گسترده‌ی طرح شناسایی و مدل‌سازی شد و به‌کمک روابط کاهندگی مناسب، با استفاده از نرم‌افزار *SEISRISKIII* مقادیر شتاب در سطوح خطر مختلف محاسبه و ضرایب درخت منطقی بر آنها اعمال شد. در نهایت نقشه‌های هم‌شتاب حاصل شد.

واژگان کلیدی: تحلیل خطر زلزله، پارامترهای لرزه‌خیزی، شتاب افقی، شتاب قائم، مشهد، حرم مطهر امام‌رضا (ع).

## ۱. مقدمه

فلات ایران در محل تلاقی صفحه‌های عربستان (عربستان - آفریقا)، هند (هند - استرالیا) و اوراسیا (اروپا - آسیا) واقع شده است. تلاقی این صفحه‌ها باعث تغییر شکل پوسته‌ی فلات ایران - که در کل ضعیف‌تر از صفحه‌های یادشده است - و احاطه‌ی آن توسط چین‌خوردگی‌ها و رشته‌کوه‌هایی چون زاگرس در غرب، البرز و کپه‌داغ در شمال و شمال‌شرق، کوه‌های شرق ایران در شرق، و مکران در جنوب‌شرق شده است.

ایران به‌دلیل قرارگرفتن بر روی کمربند آلپ هیمالیا هر ساله با زلزله‌های مخربی در نقاط مختلف آن مواجه است؛ منطقه‌ی شمال‌شرقی ایران - به‌خصوص شهر مقدس مشهد - از این قاعده مستثنی نیست. از مهم‌ترین زلزله‌های رویداده در این منطقه می‌توان به این موارد اشاره کرد:<sup>[۱]</sup>

- زمین‌لرزه‌های سال ۱۴۰۵ میلادی با بزرگی  $M_s = 7.6$  و شدت  $I = X$  در منطقه‌ی نیشابور که به‌کلی شهر را ویران کرده و حدود ۳۰۰۰۰ نفر جان خود را از دست داده‌اند.

- زمین‌لرزه‌ی سال ۱۶۷۳ میلادی با بزرگی  $M_s = 6.6$  و شدت  $I = VIII^+$  که به ویرانی دوسوم شهر مشهد و نیمی از نیشابور، و فروریختن گنبد حرم مطهر امام‌رضا (ع) انجامید.

تاریخ: دریافت ۱۳۸۶/۷/۱۷، دایره ۱۳۸۶/۱۰/۲۶، پذیرش ۱۳۸۷/۲/۱.

در حال حاضر از استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش سوم)<sup>[۲]</sup> به‌عنوان آئین‌نامه‌ی طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله استفاده می‌شود. هدف آئین‌نامه‌ی مذکور مقاوم‌سازی ساختمان‌ها در برابر زلزله‌های خفیف و متوسط (احتمال ۹۹/۵ درصد وقوع در ۵۰ سال) بدون واردشدن آسیب عمده‌ی سازه‌ی، و در برابر زلزله‌های شدید (احتمال ۱۰ درصد وقوع در ۵۰ سال) بدون فروریختن است. بدین ترتیب ملاحظه می‌شود که طول عمر سازه‌ها با توجه به سطح عملکرد تعریف‌شده در بالا ۵۰ سال در نظر گرفته شده و چنانچه ساختمانی با طول عمری بیش از ۵۰ سال و یا سطح عملکردی غیر از سطح عملکرد استاندارد ۲۸۰۰ مد نظر باشد، منطقی است که مطالعات خاص تحلیل خطر زلزله برای آن انجام پذیرد.

از سوی دیگر طبق دستورالعمل بهسازی لرزه‌ی ساختمان‌های موجود<sup>[۳]</sup> و تفسیر این دستورالعمل<sup>[۴]</sup> ساختمان‌ها باید با سطوح خطر دیگری مانند احتمال ۲ درصد وقوع در ۵۰ سال، علاوه بر سطح خطر موجود در استاندارد ۲۸۰۰، کنترل شوند. این در حالی است که شتاب و طیف مورد نظر در این سطوح خطر فقط طی مطالعه‌ی تحلیل خطر خاص در منطقه به دست می‌آید و تنها در این صورت است که شتاب مبنای طرح به‌درستی محاسبه می‌شود. لذا با توجه به اهمیت تاریخی و مذهبی اماکن مقدسه‌ی حرم مطهر امام‌رضا (ع) و لزوم بهسازی ساختمان‌های قدیمی، و نیز با ملحوظ داشتن این نکته که ساختمان‌های احداث‌شده طول عمری بیشتر از ۵۰ سال خواهند داشت، انجام مطالعات تحلیل خطر لرزه‌ی

حرم حرم مطهر امام رضا (ع) ضروری است. مراحل انجام تحلیل خطر عبارت است از:

۱. جمع‌آوری اطلاعات زمین‌شناسی و گسل‌های ساخت‌گاه گستره‌ی طرح و داده‌های لرزه‌خیزی تاریخی و دستگاہی؛
۲. برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی و دوره‌ی بازگشت بزرگی زمین‌لرزه‌ها؛
۳. انتخاب روابط کاهندگی مناسب؛
۴. تحلیل خطر زمین‌لرزه با روش قطعی، احتمالاتی و تجزیه و تحلیل درخت منطقی؛
۵. تهیه‌ی نقشه‌های هم‌شتاب برای سطوح خطر لرزه‌ی مختلف.

با توجه به اهمیت طرح و ساختمان‌های احداث‌شده، شعاع مطالعاتی ۱۵۰ کیلومتر برای انجام این پروژه انتخاب شد. در استخراج کاتالوگ زلزله و نیز به‌منظور جمع‌آوری اطلاعات مربوط به زلزله‌های رخ داده در ناحیه‌ی مورد مطالعه، از منابع و تحقیقات متفاوتی همچون تحقیقات پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله [۵] (IEES) و مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن [۶] (BHRC)، و نیز دیگر منابع مکتوب موجود [۷-۹] استفاده شده است.

## ۲. عمق کانونی زلزله‌های منطقه

تخمین صحیح عمق کانونی برای تفسیر خصوصیات تکنیکی منطقه ضروری است. ویژگی فعالیت لرزه‌ی ایالت که‌داغ، نشان‌دهنده‌ی فراوانی نسبی زمین‌لرزه‌های بزرگ با عمق کم است و زمین‌لرزه‌ی قابل اعتماد با عمق متوسط در این ناحیه به ثبت نرسیده است. اگرچه بسیاری از آمار زلزله‌ها نیز فاقد عمق کانونی اند یا عمق کانونی ارائه‌شده‌ی آنها فاقد دقت صحیح است.

مؤسسه‌ی بین‌المللی زلزله و مرکز اطلاعات بین‌المللی زلزله پژوهش‌نامه‌ی را منتشر کردند که عمق کانونی را با استفاده از روش امواج موجی محاسبه می‌کند. استفاده از روش انعکاس امواج موجی و اطلاعات حاصل از لرزه‌نگارها دقت بالایی در حدود ۴ کیلومتر دارد. در مثالی که با استفاده از این روش حل شد، عمق کانونی زلزله‌ی ۱۳ جولای ۱۹۹۴ در زاگرس معادل ۱۴ کیلومتر محاسبه شد؛ این در حالی است که عمق کانونی این زلزله در کاتالوگ CMT معادل ۴۹ کیلومتر، در کاتالوگ Engdahl معادل ۴۱ کیلومتر، در کاتالوگ ISC معادل ۴۴ کیلومتر، و در کاتالوگ NEISC معادل ۴۳ کیلومتر گزارش شده است. [۱۰] اگرچه نتایج روش مذکور دقیق به نظر نمی‌رسد، این اختلاف بیشتر از ۴ کیلومتر نیست و این زلزله کم‌عمق‌تر از چیزی است که توسط کاتالوگ‌های زلزله ارائه شده است. بنابراین توصیه می‌شود که عمق کانونی فقط با روش‌های دقیق نظیر روش انعکاس امواج موجی برای تعیین خطر لرزه‌ی و تفسیر تکنیکی منطقه استفاده شود.

از طرف دیگر، عمق کانونی برای زلزله‌های ایران بسیار ناقص است. براساس مطالعات زمین‌شناسی، بیشتر زلزله‌ها در کشور کم‌عمق‌اند و لذا اعداد ثبت‌شده در کاتالوگ‌های زلزله‌ی منطقه به علت بزرگی، غیرمنطقی‌اند. تعیین دقیق عمق کانونی نیازمند حضور شبکه‌ی با دقت بالا در کشور است که برای بسیاری از زلزله‌های رخ داده در گذشته، تعیین این موضوع به‌علت نبود چنین شبکه‌ی ممکن نبوده است و لذا براساس توصیه‌های زمین‌شناسان، عمق کانونی در حدود ۱۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است. باید توجه داشت که تغییرات عمق کانونی در حد  $\pm 4$  کیلومتر تأثیر

جدول ۱. عمق کانونی داده‌های لرزه‌ی در شعاع ۱۵۰ کیلومتری حرم حضرت رضا(ع).

درصد موجود در کاتالوگ نهایی	عمق کانونی
٪۲۶	$h < 10$
٪۱۱٫۶	$10 < h < 20$
٪۱۸٫۸	$20 < h < 33$
٪۲٫۹	$h > 33$
٪۴۰٫۷	فاقد عمق

قابل توجهی بر نتایج تحلیل خطر نخواهد داشت. [۱۱] در جدول ۱ آمار عمق کانونی ارائه‌شده توسط پایگاه‌های لرزه‌نگاری در شعاع ۱۵۰ کیلومتری ناحیه‌ی مورد مطالعه ارائه شده است.

## ۳. شناسایی گسل‌های گستره‌ی طرح

چشمه‌های لرزه‌زا عارضه‌هایی هستند که زمین‌لرزه از آنها نشأت می‌گیرد و موج‌های صادره از آن‌ها در تمام جهات در درون زمین پخش می‌شود. گسل‌ها مهم‌ترین چشمه‌های لرزه‌زا در گستره‌ی طرح‌اند.

برای شناسایی گسل‌های گستره‌ی طرح از نقشه‌ی گسل‌های فعال کشور [۱۲] استفاده شده است. علاوه بر این نقشه‌ها با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ و ۱:۱۰۰۰۰۰۰ گستره‌ی مورد مطالعه که توسط سازمان زمین‌شناسی کشور و اداره اکتشاف شرکت نفت تهیه شده است، مورد مطالعه قرار گرفت؛ به‌منظور بررسی گسل‌های موجود در خارج از ایران نیز از نقشه‌ی ۱:۵۰۰۰۰۰۰ خاورمیانه که توسط سازمان زمین‌شناسی تهیه شده استفاده شد.

گسل‌هایی که پیشینه‌ی لرزه‌خیزی آنها شناخته شده‌اند، در گستره‌ی طرح عبارت‌اند از (جدول ۲): گسل فشاری کشف‌رود، گسل شاندرین، گسل فشاری نیشابور، گسل بینالود، گسل‌های جنوب‌غرب مشهد، گسل جنگل، گسل خاف، گسل تربت‌جام، گسل بالهر، گسل قوچان، گسل ریوند، گسل داغ‌آباد، گسل مهدی‌آباد، گسل کاشمر، گسل بیجوار، گسل باغان‌گرماب، گسل اسفراین، گسل سبزوار، گسل که‌داغ و گسل درونه.

مه‌گسل‌های گستره‌ی مورد بررسی نیز عبارت‌اند از (جدول ۲): گسل فشاری جنوب‌چناران، گسل جنوب مشهد، گسل توس، گسل سرخ‌ده، راندگی شمال بوژان، راندگی بوژان، راندگی شمال برف‌رین، گسل کوچگی، راندگی بینالود، گسل فشاری شمال نیشابور، راندگی موشان، راندگی کال‌شور، گسل فشاری آبروان، گسل امروداک و گروه گسل‌های برشی دوتایی که‌داغ.

## ۴. برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی

پارامترهای لرزه‌خیزی روابطی هستند که بزرگای زلزله را با فراوانی زلزله‌های رخ داده مرتبط می‌سازند؛ این پارامترها به‌صورت  $\log N = a - bM$  بیان می‌شوند. پارامترهای این رابطه که به رابطه‌ی گوتنبرگ ریشتر [۱۳] معروف است، عبارت‌اند از:  $N$ : فراوانی تجمعی تعداد زمین‌لرزه‌های با بزرگی  $M$  و بزرگ‌تر در یک دوره‌ی مشخص؛  $b$ : ضریب لرزه‌خیزی؛  $M$ : بزرگای زلزله.

جدول ۲. گسل‌های مهم اطراف ساخت‌گاه در شعاع ۱۵۰ کیلومتری حرم حضرت رضا (ع).

نام گسل	طول (کیلومتر)	فاصله (کیلومتر)
جنوب چناران	۱۳۸	۴٫۶
توس	۷۷	۷٫۹
جنوب مشهد	۱۵	۵٫۱
کشفرو	۱۷۵	۱۹٫۵
شاندیز	۱۰۱	۲۶٫۳
شمال بوژان	۷۱	۲۳٫۲
بوژان	۷۴	۲۴
شمال بوژان ۲	۲۳٫۶	۱۵٫۹
بینالود	۱۰۲٫۴	۳۰
امروداک	۵۸٫۵	۳۹٫۷
ترت جام	۱۰۸٫۲	۴۹٫۲
موشان	۶۰٫۳	۴۲٫۳
شمال نیشابور ۱	۸۱٫۷	۵۰٫۱
کپه‌داغ	۳۱۸	۸۳٫۲
شمال نیشابور ۲	۳۲٫۶	۴۳٫۷
شمال نیشابور ۳	۱۸٫۱	۴۱٫۳
نیشابور	۶۸٫۶	۶۷٫۹
درونه	۳۰۵	۱۱۷
شمال برف‌ریز	۱۷٫۳	۵۱٫۲
بالهر	۱۳۵٫۹	۹۹٫۸
کال شور	۲۲٫۸	۵۶٫۳
ریوند	۶۵٫۴	۱۱۳٫۵
منیسک	۳۲٫۲	۹۵
بیجوارد	۷۷٫۵	۱۲۸٫۳
کاشمر	۸۴	۱۳۵٫۲۵
شاه‌تونک	۲۸٫۵	۱۰۵
داغ‌آباد	۵۲٫۳	۱۳۲٫۲

گاهی رابطه‌ی گوتنبرگ ریشتر به صورت  $\ln \lambda = \alpha - \beta M$  نیز بیان می‌شود که در این صورت:

$$\lambda = \frac{N}{t} \quad \text{و} \quad \alpha = a \ln 10 \quad \text{و} \quad \beta = b \ln 10 \quad (1)$$

فرضیات رابطه‌ی گوتنبرگ ریشتر عبارت‌اند از: همگن بودن لرزه‌خیزی گستره‌ی مورد نظر، استقلال رویدادها در حوزی زمان و مکان، ثابت بودن توزیع بزرگا درحوزه‌ی زمان. بنابراین به‌منظور پی‌بردن به سرنوشت لرزه‌خیزی گستره‌ی مورد مطالعه، برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی  $\beta$  و  $\lambda$  ضروری است. در این راستا ابتدا زمین‌لرزه‌های گذشته‌ی

دور و نزدیک گستره‌ی مورد پژوهش گردآوری شد و پس از یکسان‌سازی بزرگای مختلف به واحد  $M_s$ ، عملیات حذف پس‌لرزه‌ها و پیش‌لرزه‌ها انجام شد.

در این پژوهش ابتدا با داشتن حدود ۷۰ زلزله با بزرگای  $M_s$  و  $mb$  یک رابطه‌ی خطی بین این دو بزرگا به روش حداقل مربعات به صورت:  $M_s = 1.71 mb - 3.78$  به دست آمد. به دلیل این که در محاسبه‌ی این رابطه تعداد زلزله‌های بزرگ‌تر از بزرگای ۷ بسیار کم بود، این رابطه برای زلزله‌های بزرگ‌تر از ۷ نتایج خوبی نمی‌دهد. برای زلزله‌های کوچک‌تر از بزرگای ۷ با توجه به این که رابطه‌ی به دست آمده با تکنیک منطقه مناسب‌تر تشخیص داده شد، از رابطه‌ی فوق استفاده شد و برای زلزله‌های بزرگ‌تر از بزرگای ۷ از رابطه‌ی ارائه‌شده توسط کمیته‌ی ملی سدهای ایران [۱۵] به صورت:  $M_s = 1.29 mb - 1.21$  استفاده شد.

#### ۱.۴. حذف پس‌لرزه و پیش‌لرزه‌ها

چنان که اشاره شد، فرض اساسی در برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی این است که رویداد زمین‌لرزه‌ها مستقل از یکدیگر باشند. بنابراین حذف پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها برای هر یک از زمین‌لرزه‌های اصلی از فهرست رویداد زمین‌لرزه‌ها ضروری است. متداول‌ترین روش در حذف پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی و مکانی برای رویداد پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها با بزرگای معین است. در تحقیق حاضر این امر با به‌کارگیری مدل جهانی گاردنر و نوپوف [۱۶] انجام پذیرفت.

از آنجا که برخی از پژوهش‌گران داخلی با توجه به ماهیت زمین‌لرزه‌های ایران مدل‌های دیگری را نیز پیشنهاد می‌کنند، از مدلی که در گزارش تحلیل لرزه‌ی زمین‌ساخت سد دوستی [۱۷] ارائه شده نیز استفاده شد، و نتایج مقایسه‌ی آن نیز در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به اختلاف کم نتایج حاصل از به‌کارگیری دو روش فوق برای حذف پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها، در ادامه‌ی پژوهش از مدل گاردنر و نوپوف استفاده شد.

#### ۲.۴. برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی

##### ۱.۲.۴. روش کیکو [۱۸]

در این مطالعه از نرم‌افزار کیکو [۱۸] برای برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی استفاده شد. در این روش - که برای نقاطی مانند ایران که داده‌های زلزله‌ی کم و با دقت نامناسب دارند، بهترین و کامل‌ترین روش است - با دسته‌بندی اطلاعات به سه دوره‌ی تاریخی، دستگاهی نادقیق، و دستگاهی نسبتاً دقیق و نیز با در نظر گرفتن عدم قطعیت داده‌ها در هر دوره‌ی زمانی، پارامترهای لرزه‌خیزی محاسبه می‌شوند. در جدول ۴ پارامترهای لرزه‌خیزی محاسبه شده به روش کیکو در دو شعاع ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلومتری ارائه شده است. همچنین درصد مشارکت قسمت‌های مختلف فایل‌های کیکو در تعیین پارامترهای لرزه‌خیزی در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۳. مقایسه‌ی پارامترهای لرزه‌خیزی حاصل از روش کیکو [۱۸] براساس پنجره‌های مختلف زمانی و مکانی.

مدل حذف پیش‌لرزه و پس‌لرزه	$\beta$	$\lambda_{M_s=2}$	درصد اختلاف $\lambda$	درصد اختلاف $\beta$
گزارش تحلیل خطر سد دوستی	۱٫۷۷۷	۸٫۴۶	۰٫۰۵	۱۲
Gardner and Knopoff	۱٫۷۷۶	۹٫۷۳		

جدول ۴. پارامترهای لرزه خیزی محاسبه شده توسط روش کیکو.

شعاع مطالعاتی	$\beta$	b	$\lambda_{M_s=4}$	$M_{max}$
۱۵۰ کیلومتری	۱٫۹۲	۰٫۸۳	۳٫۱۳	۷٫۶۶
۲۰۰ کیلومتری	۱٫۸۴	۰٫۷۹	۵٫۰۴	۷٫۶۲

جدول ۶. پارامترهای لرزه خیزی ایالت کپه داغ [۲۰].

$M_{max}$	$\lambda_{(M=3.0)}$	$\beta$
$7.71 \pm 0.58$	$6.59 \pm 1.04$	$1.52 \pm 0.108$

مرز شمال شرقی فلات ایران را تشکیل می‌دهد. کپه داغ بر روی حاشیه‌ی جنوب غربی پوسته‌ی قاره‌ی ترکمنستان قرار دارد. در حدود ۱۰ کیلومتر نهشته‌های رسوبی متعلق به مزوزوئیک و تشریری در کپه داغ وجود دارد که در یک حوضه‌ی رسوبی فرونشستی - که خود در خلال فاز کششی مزوزوئیک تشکیل شده است - نهشته و در آخرین فاز کوه‌زایی آلپی دچار چین خوردگی شده‌اند. فرونشست کشف رود، کوه‌های کپه داغ (در شمال) را از کوه‌های بینالود (در جنوب) جدا می‌کند. پارامترهای لرزه خیزی محاسبه شده برای ایالت کپه داغ [۲۰] در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۵. درصد مشارکت داده‌های دوره‌های مختلف زمانی در برآورد پارامترهای لرزه خیزی با شعاع‌های مختلف مطالعاتی.

شعاع مطالعاتی	پارامتر لرزه خیزی	درصد مشارکت داده‌های بازه‌ی زمانی		
		۱۹۶۴-۲۰۰۴	۱۹۶۴-۲۰۰۴	۱۹۶۴-۲۰۰۴
۱۵۰ کیلومتر	$\beta$	۵۸٫۸	۱۴٫۸	۲۶٫۴
	$\lambda$	۶٫۷	۲۴٫۵	۶۸٫۸
۲۰۰ کیلومتر	$\beta$	۶۱٫۱	۱۵٫۲	۲۳٫۷
	$\lambda$	۵	۳۳	۶۲

## ۵. برآورد بزرگی زلزله

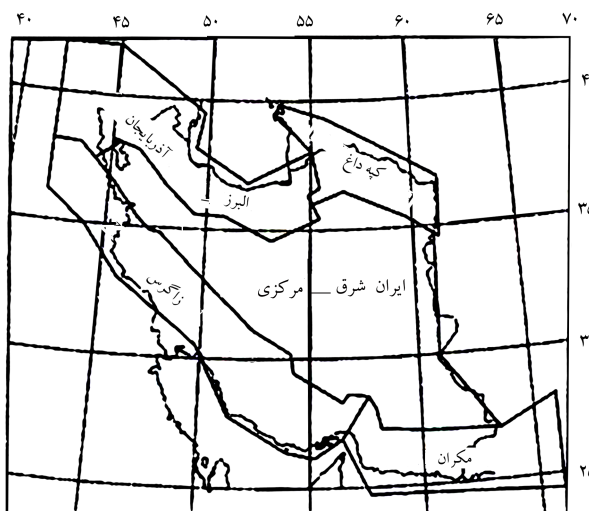
برای تعیین و برآورد بزرگی زلزله دو روش قطعی و احتمالاتی وجود دارد.

### ۱.۵. روش قطعی

در این روش بیشینه‌ی بزرگی زمین لرزه براساس روابط تجربی موجود که بر طول گسل فعال منطقه مبتنی است، محاسبه می‌شود. در این پژوهش از رابطه‌ی  $M_s = 1.244 \log(L) + 1.259$  که در آن  $L$  طول محتمل گسیختگی گسل برحسب متر است. با توجه به مطالب شرح داده شده بزرگی زلزله‌ی محتمل به روش قطعی در سایت پروژه تعیین، و نتایج آن در جدول ۷ ارائه شده است.

### ۲.۵. روش احتمالاتی

در این روش با در نظر گرفتن نظریه‌ی احتمالات، بزرگی احتمال رویداد زلزله‌ها و



شکل ۱. ایالت‌های اصلی لرزه زمین‌ساختی ایران [۲۰].

جدول ۷. بزرگای زلزله‌ی محتمل به روش قطعی.

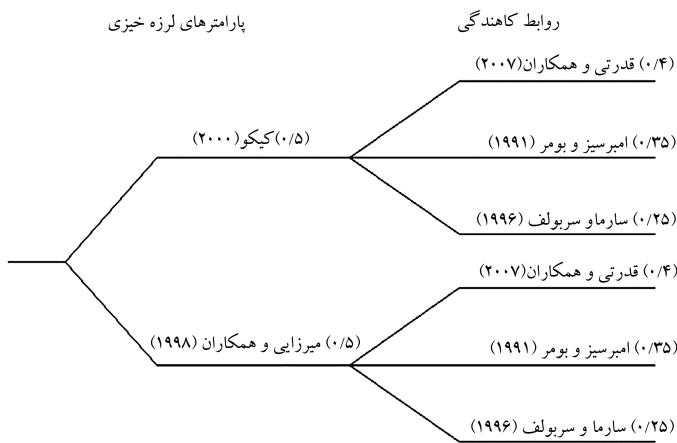
نام گسل	طول (کیلومتر)	حداکثر بزرگای زلزله (Ms)
کپه داغ	۳۱۸٫۵۳	۷٫۷
درونه	۳۰۵٫۱۵۱	۷٫۷
زون ۳	۲۵۲	۷٫۶
کشف رود	۱۷۵٫۶۶۱	۷٫۴
جنوب چناران	۱۳۷٫۷۸۳	۷٫۳
بالهر	۱۳۵٫۹۰۱	۷٫۳
زون ۴	۱۵۷٫۰۹	۷٫۳
درونه	۱۲۴٫۰۶۷	۷٫۲
سرخده	۱۰۰٫۸۲	۷٫۱
بینالود	۱۰۲٫۴۵	۷٫۱
ترتت جام ۳	۱۰۸٫۲۲۱	۷٫۱
توس	۷۷٫۳۳۷	۷

## ۲.۲.۴. ایالت‌های لرزه خیزی

ایالت لرزه زمین‌ساختی پهنه‌ی است که تحت رژیم‌های ژئودینامیکی کنونی، دارای جایگاه تکتونیکی همانند و الگوی لرزه خیزی یکسان باشد. با توجه به این مفهوم، محققین داخلی ایران را به پنج ایالت لرزه زمین‌ساختی عمده: ۱. البرز و آذربایجان؛ ۲. کپه داغ؛ ۳. زاگرس؛ ۴. ایران مرکزی و شرق ایران؛ ۵. مکران تقسیم کرده‌اند [۲۰].

از آنجا که در محاسبه‌ی ایالت‌های لرزه خیز به پارامترهای زمین‌ساختی و لرزه زمین‌ساختی توجه بیشتری داشته‌اند، تقسیم‌بندی صورت‌گرفته در این پژوهش به‌عنوان مکمل نتایج به دست آمده در بخش قبلی، مورد استفاده قرار گرفت. این تقسیم‌بندی در شکل ۱ نشان داده شده و از آنجا که گستره‌ی مورد مطالعه در این پژوهش در ایالت لرزه زمین‌ساخت کپه داغ قرار می‌گیرد، خصوصیات عمده‌ی این ایالت به‌اختصار در زیر بیان می‌شود:

نوار چین خورده کپه داغ بخشی از کمربند کوه‌زایی آلپ - هیمالیا در غرب آسیا است که



شکل ۴. نمایش درخت منطقی استفاده شده.

مقادیر ضرایب درخت منطقی براساس مطالب فوق چنان انتخاب شده که وزن بیشتری را به رابطه‌ی کاهندگی ایران، و در مرحله‌ی بعد به رابطه‌ی کاهندگی منطقه‌ی و در نهایت به رابطه‌ی کاهندگی جهانی اختصاص دهد.

## ۷. تعیین شتاب لرزه‌ی زمین در ساخت‌گاه

در این قسمت پارامترهای جنبش زمین که شتاب افقی و قائم جنبش زمین از مهم‌ترین آنهاست، محاسبه می‌شود. برای برآورد این پارامترها، نظیر تعیین بزرگا، دو روش قطعی و احتمالاتی وجود دارد.<sup>[۲۷،۲۶]</sup>

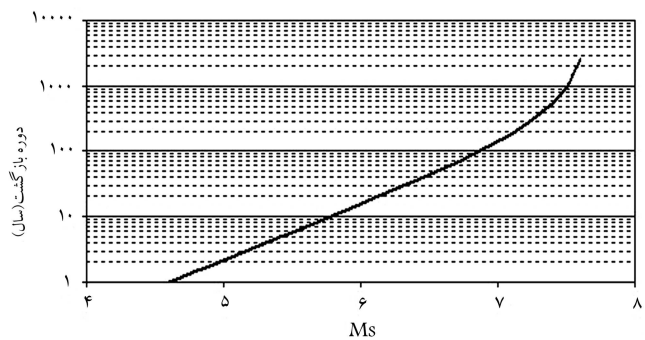
### ۱.۷. روش قطعی (DSHA)

در روش قطعی ایمنی ملاک قرار می‌گیرد و اقتصاد در نظر گرفته نمی‌شود. همچنین حداکثر شتاب زلزله‌ی که امکان وقوع دارد محاسبه می‌شود و احتمالات در آن در نظر گرفته نمی‌شود. با در نظر گرفتن روابط کاهندگی مناسب بیشینه شتاب افقی و قائم حاصل در سایت ناشی از زلزله‌ی رخ داده توسط هرگسل محاسبه می‌شود. در جدول ۸ شتاب بیشینه‌ی حاصل از چند گسل اصلی به ترتیب بزرگ به کوچک ارائه شده است.

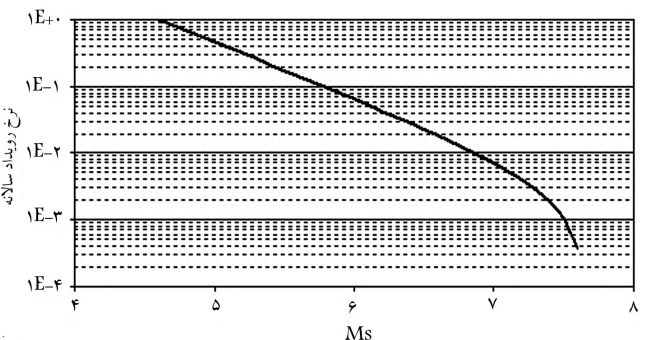
### ۲.۷. روش احتمالاتی (PSHA)

در روش احتمالاتی ضمن در نظر گرفتن ایمنی، مسئله‌ی اقتصاد نیز در نظر گرفته می‌شود و با مدل‌سازی سرچشمه‌های لرزه‌زای گسترده‌ی مورد مطالعه، و نظریه‌ی احتمالات به‌ازای هر درصدی از ریسک وقوع زلزله، بیشینه‌ی شتاب (PGA) محاسبه می‌شود. برای مدل‌سازی و تعیین بیشینه‌ی شتاب از نرم‌افزار SEISERIKIII استفاده شده است.<sup>[۲۸]</sup> و برای حصول نتیجه‌ی منطقی‌تر با انتخاب چند رابطه‌ی کاهندگی مناسب و استفاده از روش تحلیل درخت منطقی میانگین وزنی شتاب‌ها محاسبه شد.

با توجه به مطالب ارائه‌شده و شبکه‌بندی ناحیه‌ی اطراف ساخت‌گاه به ابعاد شبکه حدود ۵۰۰ متر و در نظر گرفتن ناحیه‌ی به مساحت تقریبی ۳۰ کیلومتر مربع و محاسبه‌ی شتاب در نقاط مختلف، نقشه‌ی هم‌شتاب در دو سطح خطر ۱۰ درصد احتمال وقوع در ۵۰ سال و ۲ درصد احتمال وقوع در ۵۰ سال محاسبه شد. (اشکال ۵ تا ۸) همچنین برای برخی از پروژه‌های حریم حرم به علت طول عمر بیشتری که



شکل ۲. بزرگا و دوره‌ی بازگشت محاسبه‌شده به روش کیکو.



شکل ۳. نرخ رویداد بزرگ‌های مختلف محاسبه‌شده به روش کیکو.

دوره‌ی بازگشت آنها در گستره‌ی شعاعی ۱۵۰ کیلومتر محاسبه شده است. بدین منظور از نرم‌افزار کیکو استفاده شد و نتایج آن در شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده است.

## ۶. انتخاب روابط کاهندگی

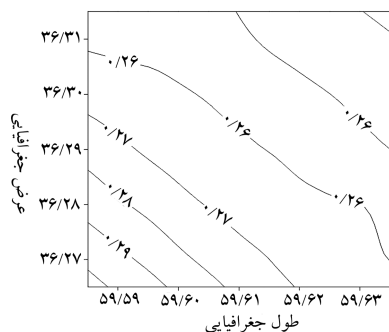
یکی از موارد اساسی در تعیین پارامترهای لرزه‌ی زمین، انتخاب روابط کاهندگی است که بستگی به نوع سازوکار زلزله (نحوه‌ی گسیختگی گسل)، نوع خاک منطقه، نوع بافت سنگ‌ها، عمق کانونی و نوع مؤلفه‌ی شتاب انتخابی دارد.

برای حصول نتیجه‌ی منطقی‌تر با انتخاب چند رابطه‌ی کاهندگی مناسب و استفاده از روش تحلیل درخت منطقی، میانگین وزنی شتاب‌ها محاسبه می‌شود. پارامتر مهم در انتخاب وزن روابط فوق، میزان تطابق آن با شرایط ساخت‌گاه مورد مطالعه و چگونگی محاسبه‌ی آنها و داشتن تطابق بهتر با منطقه‌ی مورد نظر است.<sup>[۲۴]</sup> در این پژوهش سه نوع رابطه‌ی کاهندگی<sup>[۲۵-۲۳]</sup> انتخاب شدند به‌گونه‌ی که با منطقه‌ی مورد نظر سنخیت داشته باشند. رابطه‌ی اول برای ایران، رابطه‌ی دوم برای خاورمیانه و رابطه‌ی سوم برای کلیه‌ی نقاط جهان مناسب بوده است. در شکل ۴ مقادیر ضریب هرکدام از این روابط در درخت منطقی ارائه شده است.

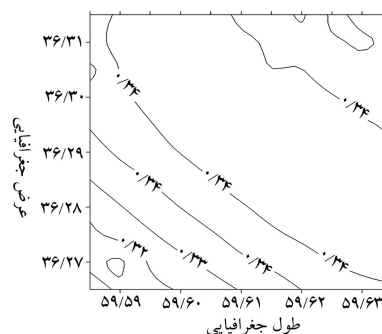
دلیل استفاده از روش درخت منطقی در مورد روابط کاهندگی این است که روابطی که از داده‌های ایران استفاده کرده‌اند به دلیل عدم دقت داده‌ها چندان قابل اطمینان نیستند. از سوی دیگر، برای تهیه‌ی مدل‌های روابط منطقه‌ی جهانی نیز که در مقایسه با روابط ایران از دقت خوبی برخوردارند، از داده‌های کشورهای مختلفی استفاده شده است. در نتیجه بهترین راه حل استفاده‌ی هم‌زمان این روابط کاهندگی که هر یک به‌نوعی کمبود دیگری را پوشش می‌دهد، استفاده از روش درخت منطقی است.

جدول ۸. حداکثر شتاب افقی و قائم در ساختگاه به روش قطعی.

نام گسل	طول (کیلومتر)	فاصله (کیلومتر)	حداکثر بزرگا (Ms)	PGA <sub>H</sub> (g)				PGA <sub>V</sub> (g)		
				امبرسینز و بومر (۱۹۹۱)	قدرتی و همکاران (۲۰۰۷)	سارما و سربولف (۱۹۹۶)	میانگین وزنی	امبرسینز و بومر (۱۹۹۱)	قدرتی و همکاران (۲۰۰۷)	میانگین وزنی
جنوب چناران	۱۳۸	۴٫۶	۷٫۳	۰٫۵۸۴	۰٫۶۱۲	۰٫۶۶۷	۰٫۶۱۶	۰٫۲۹۰	۰٫۳۰۷	۰٫۳۰۰
توس	۷۷	۷٫۹	۷	۰٫۳۷۶	۰٫۴۴۱	۰٫۴۳۴	۰٫۴۱۷	۰٫۱۸۸	۰٫۲۱۹	۰٫۲۰۷
جنوب مشهد	۱۵	۵٫۱	۶٫۱	۰٫۲۸۹	۰٫۲۸۴	۰٫۳۲۷	۰٫۲۹۶	۰٫۱۴۷	۰٫۱۴۰	۰٫۱۴۳
کشفرو	۱۷۵	۱۹٫۵	۷٫۴	۰٫۲۲۴	۰٫۳۳۵	۰٫۳۰۷	۰٫۲۸۹	۰٫۱۱۲	۰٫۱۶۴	۰٫۱۴۴
شان‌دیز	۷۹	۱۵٫۲	۷	۰٫۲۲۵	۰٫۳۱۱	۰٫۲۹۲	۰٫۲۷۶	۰٫۱۱۳	۰٫۱۵۳	۰٫۱۳۷



شکل ۸. نقشه هم‌شتاب شتاب قائم در سطح خطر ۲ درصد احتمال وقوع در ۵۰ سال (برحسب g).



شکل ۵. نقشه‌ی هم‌شتاب شتاب افقی در سطح خطر ۱۰ درصد احتمال وقوع در ۵۰ سال (برحسب g).

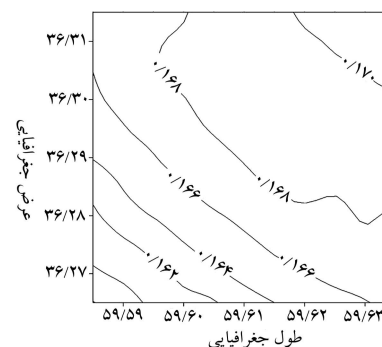
دارند نتایج سطح خطر ۱۰ درصد احتمال وقوع در ۱۰۰ سال عمر مفید که معادل زلزله‌یی با دوره بازگشت ۹۵ سال است، ارائه شده است.

### ۸. نتیجه‌گیری

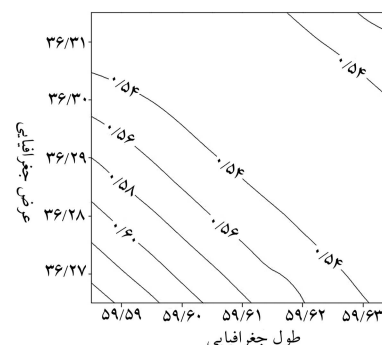
با توجه به نتایج حاصله برای ساختگاه حرم مطهر امام رضا (ع) که به‌طور خلاصه در جدول ۹ ارائه شده است، می‌توان نتیجه گرفت که شهر مشهد را باید در رده‌ی شهرهای با خطر بسیار بالای زلزله در طبقه‌بندی استاندارد ۲۸۰ - ویرایش سوم - در نظر گرفت. همچنین به‌منظور مقاوم‌سازی ابنیه‌ی قدیمی و طراحی براساس عملکرد، کارفرما می‌تواند به‌تناسب اهمیت ساختمان تصمیم به اتخاذ عملکرد لازم برای سطح خطر مورد نیاز بگیرد. لذا مطمئناً برای ساختمان‌های مهم سطوح عملکرد بالا برای سطح خطر زیاد می‌تواند منطقی باشد.

جدول ۹. خلاصه نتایج به دست آمده در ساختگاه حرم.

PGA <sub>V</sub> (g)	PGA <sub>H</sub> (g)	دوره بازگشت (سال)	سطح خطر
۰٫۱۶۸	۰٫۳۴۳	۴۷۵	۱۰ درصد احتمال وقوع در ۵۰ سال
۰٫۲۲۴	۰٫۴۵۸	۹۵۰	۱۰ درصد احتمال وقوع در ۱۰۰ سال
۰٫۲۶۱	۰٫۵۳۵	۲۴۷۵	۲ درصد احتمال وقوع در ۵۰ سال



شکل ۶. نقشه هم‌شتاب شتاب قائم در سطح خطر ۱۰ درصد احتمال وقوع در ۵۰ سال (برحسب g).



شکل ۷. نقشه هم‌شتاب شتاب افقی در سطح خطر ۲ درصد احتمال وقوع در ۵۰ سال (برحسب g).

منابع

- Berberian, M., Ghorashi, M., Shoja-Tabheri, J. & Talebian, M., *Contribution to the seismotectonics of Iran (part VIII): seismotectonic and earthquake-fault hazard investigation in the Mashad-Neyshabur region*, Geological Survey of Iran (2000).
- Building & Housing Research Center (BHRC), *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, Standard (2800), Third Revision*, Iran (2005).
- International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), *Seismic Rehabilitation Code for Existing Buildings in Iran*, Iran (2002).
- International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), *Comments on Seismic Rehabilitation Code for Existing Buildings in Iran*, Iran (2002).
- International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), <http://www.iiees.ac.ir>
- Building and Housing Research Center (BHRC), <http://www.bhrc.ir>
- Ambraseys, N.N., and Melville, C.P. *A History of Persian Earthquakes*, Cambridge University Press, Cambridge, Britain, (1982).
- Berberian, M. *Natural Hazards & the First Earthquake Catalogue of Iran, 1: Historical Hazards in Iran Prior to 1900*, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, (IIEES), (1994).
- US Geological Survey (USGS), <http://www.usgs.gov>
- Maggi, A.; Priestley, K., and Jackson, J.A., "Focal depths of moderate and large size earthquakes in Iran", *Journal of Seismology and Earthquake Engineering* 4 pp.1-10 (2& 3), (2002).
- Ghodrati Amiri, G.; Motamed, R., and Rabet Es-haghi, H. "Seismic hazard assessment of metropolitan Tehran, Iran", *Journal of Earthquake Engineering*, 7(3), pp. 347-372 (2003).
- Hesami, K., Jamali, F. and Tabassi, H., Active fault map of Iran, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran (2003).
- Gutenberg, B., and Richter, C.F. *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena*, Princeton University Press, New Jersey, (1954).
- Gutenberg, B., and Richter, C.F. "Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 46(2), pp. 105-145 (1956).
- IRCOLD, Iranian Committee of Large Dams, Relationship between  $M_S$  and  $m_b$ , Internal Report,(1994) (In Persian).
- Gardner, J.K., and Knopoff, L. "Is the sequence of earthquake in southern California, with aftershocks removed, Poissonian?" *Bulletin of the Seismological Society of America*, 64(5), pp. 1363-1367 (1974).
- Toos Ab Consulting Engineering Company, *Seismic Hazard Analysis Report of Doosti Dam*, Iran (1999).
- Kijko, A. *Statistical estimation of maximum regional earthquake magnitude  $M_{max}$* , Workshop of Seismicity Modeling in Seismic Hazard Mapping, Poljce, Slovenia, Geological Survey, 1-10 (2000).
- Council for Geoscience, Geological Survey of South Africa, HN2 Program, Release 2.08., (2001). (<http://www.geoscience.org.za/seismo>)
- Mirzaei, N.; Gao, M., and Chen, Y.T., Seismicity in major seismotectonic provinces of Iran, *Earthquake Research in China* 11, 351-361 (1997).
- Nowroozi, A. "Empirical relations between magnitude and fault parameters for earthquakes in Iran", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(5), pp. 1327-1338 (1985).
- Douglas, J. "Earthquake ground motion estimation using strong-motion records: a review of equations for the estimation of peak ground acceleration and response spectral ordinates", *Earth-Science Reviews* 61(1-2), 43-104 (2003).
- Ghodrati Amiri, G.; Mahdavian, A, and Manouchehri Dana, F. "Attenuation relationships for Iran", *Journal of Earthquake Engineering*, 11(4), pp. 469-492 (2007).
- Ambraseys, N.N., and Bommer, J.J. "The attenuation of ground accelerations in Europe", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 20, pp. 1179-1202 (1991).
- Sarma, S.K., and Srbulov, M. "A simplified method for prediction of kinematic soil-foundation interaction effects on peak horizontal acceleration of a rigid foundation", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25, pp. 815-836 (1996).
- Cornell, C. A., Engineering seismic risk analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America* 58 (5), 1583-1606 (1968).
- Green, A. R., and Hall, W. J., An Overview of Selected Seismic Hazard Analysis Methodologies, A Report on a Research Project, Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign (1994).
- Bender, B., and Perkins, D.M., SEISRISKIII: A computer program for seismic hazard estimation, U.S. Geological Survey, Bulletin 1772 (1987).

