

جمهوری اسلامی ایران

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور

# راهنمای کاربردی انجام تحلیل خطر زلزله

نشریه شماره ۶۲۶

معاونت نظارت راهبردی

امور نظام فنی

[nezamfanni.ir](http://nezamfanni.ir)

۱۳۹۳



## اصلاح مدارک فنی

### خواننده گرامی:

امور نظام فنی معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، با استفاده از نظر کارشناسان برجسته مبادرت به تهیه این نشریه نموده و آن را برای استفاده به جامعه مهندسی کشور عرضه نموده است. با وجود تلاش فراوان، این اثر مصون از ایرادهایی نظیر غلط‌های مفهومی، فنی، ابهام، ابهام و اشکالات موضوعی نیست.

از این‌رو، از شما خواننده گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده هرگونه ایراد و اشکال فنی مراتب را به صورت زیر

گزارش فرمایید:

- ۱- شماره بند و صفحه موضوع مورد نظر را مشخص کنید.
  - ۲- ایراد مورد نظر را به صورت خلاصه بیان دارید.
  - ۳- در صورت امکان متن اصلاح شده را برای جایگزینی ارسال نمایید.
  - ۴- نشانی خود را برای تماس احتمالی ذکر فرمایید.
- کارشناسان این امور نظرهای دریافتی را به دقت مطالعه نموده و اقدام مقتضی را معمول خواهند داشت. پیشاپیش از همکاری و دقت نظر جنابعالی قدردانی می‌شود.

نشانی برای مکاتبه: تهران، میدان بهارستان، خیابان صفی علی‌شاه - مرکز تلفن ۳۳۲۷۱

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، امور نظام فنی

Email: [info@nezamfanni.ir](mailto:info@nezamfanni.ir)


web: [nezamfanni.ir/](http://nezamfanni.ir/)





بسمه تعالی

معاون برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور

شماره:	۹۳/۱۶۵۳۹	بخشنامه به دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور و پیمانکاران
تاریخ:	۱۳۹۳/۰۲/۲۴	
موضوع: راهنمای کاربردی انجام تحلیل خطر زلزله		
<p>به استناد ماده (۲۳) قانون برنامه و بودجه و مواد (۶) و (۷) آیین‌نامه استانداردهای اجرایی طرح‌های عمرانی- مصوب سال ۱۳۵۲ و در چارچوب نظام فنی و اجرایی کشور (موضوع تصویب‌نامه شماره ۴۲۳۳۹/ت۳۳۴۹۷-هـ مورخ ۱۳۸۵/۴/۲۰ هیأت محترم وزیران)، به پیوست نشریه شماره ۶۲۶ امور نظام فنی، با عنوان «<b>راهنمای کاربردی انجام تحلیل خطر زلزله</b>» از نوع گروه سوم ابلاغ می‌شود.</p> <p>رعایت مفاد این ضابطه برای دستگاه‌های اجرایی، مشاوران، پیمانکاران و سایر عوامل ذینفع نظام فنی اجرایی در صورت نداشتن ضوابط معتبر بهتر، از تاریخ ۱۳۹۳/۷/۱ الزامی است.</p> <p>امور نظام فنی این معاونت در مورد مفاد نشریه پیوست، دریافت‌کننده نظرات و پیشنهادهای اصلاحی مربوط بوده و عهده‌دار اعلام اصلاحات لازم به طور ادواری خواهد بود.</p>		
<p>محمدباقر نوبخت</p> 		



## بسمه تعالی

### پیشگفتار

شرایط لرزه‌زمین‌ساخت و تنوع نوع خاک محل قرارگیری سازه و تجهیزات مختلف، موجب شده‌است تا در پروژه‌های بهسازی لرزه‌ای با اهمیت، تحلیل خطر لرزه‌ای ساختگاه، امری اجتناب‌ناپذیر شود. امروزه با توجه به تعداد روزافزون پروژه‌های بهسازی لرزه‌ای ساختمانها و شریانهای حیاتی کشور و علیرغم انجام مطالعات تحلیل خطر لرزه‌ای در بسیاری از این پروژه‌ها، متأسفانه به دلیل نبودن راهنمایی جامع و کامل، پراکندگی شدیدی در نتایج حاصل از مطالعات، در پروژه‌های مختلف مشاهده می‌شود. هرچند بخشی از این پراکندگی ناشی از ماهیت موضوع می‌باشد اما لازم است تا با تدوین راهنمایی مناسب به‌منظور شفاف‌سازی فرآیندهای مورد نیاز، آشفتگی موجود را به حداقل رساند.

معاونت نظارت راهبردی (امور نظام فنی) در راستای وظایف و مسؤلیتهای خود بر اساس ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه، نظام فنی و اجرایی کشور (مصوبه شماره ۴۲۳۳۹/ت ۳۳۴۹۷ هـ مورخ ۱۳۸۵/۰۴/۲۰ هیأت محترم وزیران) و برنامه مقاوم‌سازی ساختمانهای دولتی مهم، تأسیسات زیربنایی و شریانهای حیاتی کشور، اقدام به تهیه و تدوین این نشریه با عنوان «راهنمای کاربردی انجام تحلیل خطر زلزله» نموده است. هدف این راهنما، ایجاد وحدت رویه در انجام تحلیل خطر ویژه ساختگاه برای پروژه‌های بهسازی لرزه‌ای و نیز پروژه‌های مهم طراحی ساختمانی و صنعتی است. مباحث اصلی ارائه شده در این راهنما شامل چارچوب کلی تحلیل خطر زلزله، توصیه‌های کلی در خصوص جمع‌آوری و پردازش داده‌های پایه برای شناخت و مدلسازی چشمه‌های لرزه‌زا، توسعه مدل لرزه‌خیزی بر مبنای داده‌های پایه، انتخاب روابط کاهندگی و تشریح فرآیند تحلیل خطر احتمالی و تعیینی می‌باشد. همچنین در خصوص روشهای تهیه طیف و انتخاب شتاب‌نگاشت نیز مطالبی ارائه شده است.

معاونت نظارت راهبردی به این وسیله از جناب آقای دکتر غفوری آشتیانی که مسؤلیت انجام این پروژه را بر عهده داشته‌اند و همچنین تمامی افرادی که در تهیه، تدوین و پیشبرد این نشریه اهتمام ورزیده‌اند، جناب آقای مهندس حمزه مصطفوی رئیس امور نظام فنی، کارشناسان محترم امور نظام فنی و نیز کارشناسانی که با اظهار نظرهای ارشادی و اصلاحی، این معاونت را در جهت تکمیل آن یاری نموده‌اند، سپاسگزاری و قدردانی می‌نماید. امید است که اینگونه حمایتها و همکاریها ادامه یافته و در آینده نیز ما را در جهت افزایش غنای فنی این نشریه مساعدت نماید.

معاون نظارت راهبردی

بهار ۱۳۹۳

## تهیه و کنترل راهنمای کاربردی انجام تحلیل خطر زلزله (نشریه شماره ۶۲۶)

### مجری طرح:

محسن غفوری آشتیانی      دکترای مهندسی زلزله      استاد پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

### اعضای گروه تهیه کننده:

محسن غفوری آشتیانی      دکترای مهندسی زلزله      استاد پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله  
سید مهدی موسوی      دکترای عمران، مهندسی زلزله      استادیار دانشگاه اراک

### اعضای گروه بررسی و تایید (به ترتیب حروف الفبا):

علی اکبر آقاچوچک      دکترای عمران - سازه‌های دریایی      دانشگاه تربیت مدرس  
حمیدرضا خاشعی      کارشناس ارشد عمران - زلزله      امور نظام فنی  
محمد رضا ذوالفقاری      دکترای مهندسی زلزله و لرزه‌شناسی      دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
مهدی زارع      دکترای زلزله‌شناسی مهندسی      پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله  
حمید زعفرانی      دکترای عمران - مهندسی زلزله      پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

### اعضای گروه هدایت و راهبری:

علیرضا توتونچی      معاون امور نظام فنی  
فرزانه آقارمضانعلی      رئیس گروه امور نظام فنی  
فرزاد پارسا      کارشناس امور نظام فنی



## فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
	<b>فصل اول - کلیات</b>
۳	۱-۱ مقدمه
۳	۲-۱- محدودده کاربرد
۳	۳-۱- چارچوب کلی تحلیل خطر زلزله
۴	۱-۳-۱- مطالعه لرزه‌زمین‌ساخت و مدلسازی چشمه‌های لرزه‌ای
۴	۲-۳-۱- توسعه مدل لرزه‌خیزی
۴	۳-۳-۱- انتخاب رابطه کاهندگی یا مدل برآورد جنبش‌های قوی زمین
۴	۴-۳-۱- تحلیل خطر احتمالی و تعیین زلزله
	<b>فصل دوم - جمع‌آوری داده‌های پایه</b>
۷	۱-۲- چشمه‌های لرزه‌ای
۸	۲-۲- کاتالوگ لرزه‌خیزی
۹	۱-۲-۲- داده‌های زلزله‌های تاریخی (قبل از سال ۱۹۰۰ میلادی)
۹	۲-۲-۲- داده‌های دستگاهی (بعد از سال ۱۹۰۰ میلادی)
۱۱	۳-۲-۲- تجمیع کاتالوگ داده‌های تاریخی و دستگاهی
۱۱	۴-۲-۲- حذف زلزله‌های وابسته در کاتالوگ
	۵-۲-۲- لحاظ عدم قطعیت‌ها در بزرگا و مختصات مکانی کاتالوگ
۱۲	۶-۲-۲- ارزیابی کامل بودن کاتالوگ
	<b>فصل سوم - مطالعات لرزه‌خیزی</b>
۱۵	۱-۳- استخراج پارامترهای لرزه‌خیزی
۱۵	۲-۳- تحلیل عمق رخدادها در کاتالوگ
۱۵	۳-۳- مدلسازی چشمه‌های لرزه‌زا
۱۶	۴-۳- انتخاب روابط کاهندگی یا روابط برآورد جنبش شدید زمین

#### فصل چهارم- تحلیل خطر احتمالی و تعیین

۲۱	۱-۴- تحلیل خطر احتمالی
۲۱	۱-۴-۱- برآورد منحنی خطر
۲۳	۱-۴-۲- انتخاب و اعتبارسنجی نرم افزار تحلیل خطر احتمالی
۲۳	۱-۴-۳- طیف یکنواخت خطر
۲۴	۱-۴-۴- تحلیل حساسیت نتایج تحلیل خطر
۲۵	۱-۴-۵- تحلیل تفکیک برای تعیین زلزله کنترل کننده
۲۵	۲-۴- تحلیل خطر تعیینی

#### فصل پنجم- تهیه طیف های طراحی و انتخاب شتاب نگاشت

۲۹	۱-۵- کلیات
۲۹	۲-۵- طیف طرح شتاب
۲۹	۲-۵-۱- فرآیند استفاده از شکل طیف ثابت
۲۹	۲-۵-۱-۱- روش استفاده از شکل طیف استاندارد ۲۸۰۰
۳۰	۲-۵-۲-۱- روش استفاده از شکل طیف دستورالعمل بهسازی
۳۳	۲-۵-۲-۲- فرآیند استفاده از شکل طیف حاصل از تحلیل خطر ویژه ساختگاه
۳۳	۲-۵-۲-۲-۱- روش استفاده از طیف خطر یکنواخت
۳۳	۲-۵-۲-۲-۲- روش استفاده از طیف طرح آماری
۳۴	۳-۵- انتخاب شتاب نگاشت سازگار با خطر زلزله

۳۵	مراجع
----	-------

# فصل ۱

---

---

## کلیات



## ۱-۱- مقدمه

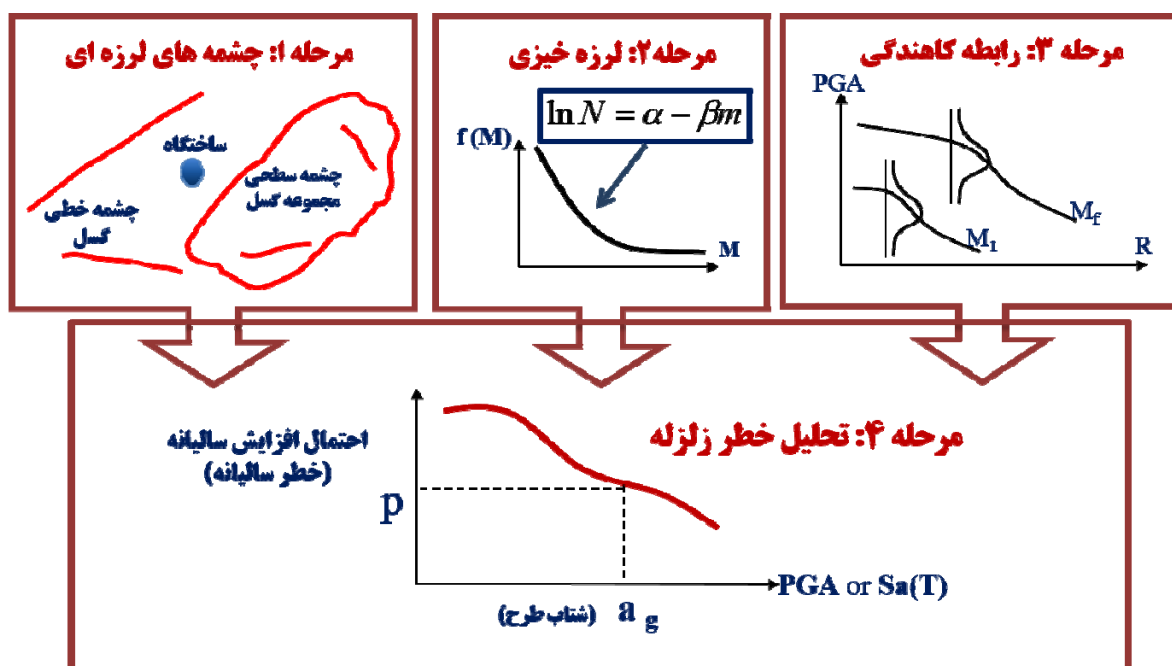
چارچوب کلی تحلیل خطر زلزله، توصیه‌های کلی در خصوص جمع‌آوری و پردازش داده‌های پایه برای شناخت و مدلسازی چشمه‌های لرزه‌زا، توسعه مدل لرزه‌خیزی بر مبنای داده‌های پایه، انتخاب روابط کاهندگی و تشریح فرآیند تحلیل خطر احتمالی و تعیینی، بخش‌های اصلی این راهنما می‌باشد. همچنین در پایان به روشهای تهیه طیف و انتخاب شتاب‌نگاشت پرداخته شده است.

## ۱-۲- محدوده کاربرد

این راهنما برای ایجاد وحدت رویه در انجام تحلیل خطر ویژه ساختگاه برای پروژه‌های بهسازی لرزه‌ای و نیز پروژه‌های مهم ساختمانی و صنعتی تدوین شده است. مادامی که نقشه‌های ریز پهنه‌بندی برای گستره کشور به صورت رسمی ابلاغ نگردیده است، انجام تحلیل خطر برای برآورد پارامترهای طراحی، مانند شتاب مبنای طرح و طیف طراحی، لازم است. همچنین، چنانچه شرایط ژئوتکنیکی ویژه‌ای در ساختگاه حاکم باشد، لازم است با انجام مطالعات میدانی و تهیه مدل‌های رفتار دینامیکی مناسب، اثر بزرگنمایی خاک را بر روی طیف بدست آمده برای سنگ بستر لحاظ نمود.

## ۱-۳- چارچوب کلی تحلیل خطر زلزله

تحلیل خطر ویژه ساختگاه مطابق شکل (۱-۱) شامل چهار گام اساسی است.



شکل ۱-۱-۱ گام‌های اصلی تحلیل خطر

### ۱-۳-۱- مطالعه لرزه‌زمین‌ساخت و مدلسازی چشمه‌های لرزه‌ای

مهمترین هدف در این گام، مدلسازی چشمه‌های لرزه‌زا (گسل‌های فعال و پهنه‌های لرزه‌ای) برای برآورد خطر در ساختگاه مورد نظر است. برای این منظور لازم است، مطالعات پیشین که در رابطه با خصوصیات زمین‌ساختی چشمه‌های فعال و تاریخچه لرزه‌ای منطقه مورد نظر صورت پذیرفته جمع‌آوری گردد. افزون بر این اطلاعات کتابخانه‌ای، در صورت نیاز به سطح دقیق‌تری از داده‌های پایه، انجام مطالعات میدانی لازم خواهد بود.

### ۱-۳-۲- توسعه مدل لرزه‌خیزی

با مطالعه سوابق زلزله‌های تاریخی و نیز زلزله‌های دستگامی (از ابتدای سال ۱۹۰۰ میلادی)، کاتالوگی برای منطقه تهیه می‌شود. با پردازش مناسب این کاتالوگ شامل بررسی کامل بودن کاتالوگ در طول زمان، یکنواختی مکانی آن و حذف زلزله‌های وابسته در کاتالوگ، قابلیت اعتماد کاتالوگ افزایش می‌یابد تا با استفاده از آن رابطه بزرگا- فراوانی  $(\ln N = \alpha - \beta m)$  بدست آید.

### ۱-۳-۳- انتخاب رابطه کاهندگی یا مدل برآورد جنبش‌های قوی زمین

روابط کاهندگی در شمار کلیدی‌ترین عناصر تحلیل خطر بوده و لازم است به نحو مناسبی انتخاب شده و عدم قطعیت‌های مربوطه، به نحو مناسبی مدلسازی گردد.

### ۱-۳-۴- تحلیل خطر احتمالی و تعیین زلزله

با بهره‌گیری از یک چارچوب محاسباتی نظام‌مند، بر مبنای چشمه‌های لرزه‌زا و نیز مدل لرزه‌خیزی بدست آمده در مرحله قبل، پارامترهای مورد انتظار از جنبش زمین در ساختگاه مورد نظر با دو رهیافت احتمالی و تعیین برآورد می‌شود. مراحل انجام هر کدام از دو رهیافت در فصل چهارم ارائه شده است. در ادامه این راهنما، بخشهای فوق‌الذکر برای انجام تحلیل خطر به تفصیل شرح داده خواهد شد.

## فصل ۲

---

---

### جمع آوری داده‌های پایه





## ۲-۱- چشمه‌های لرزه‌ای

پیش‌نیاز بنیادین برای انجام تحلیل خطر زلزله جمع‌آوری و توسعه یک بانک داده یکپارچه و جامع از چشمه‌های لرزه‌ای منطقه مورد مطالعه است. هر یک از عناصر تشکیل دهنده بانک اطلاعاتی، پیش از قرار گرفتن در کنار سایر داده‌ها، باید به صورت کامل از جنبه‌های گوناگون مورد پردازش قرار گیرد. تعیین ساز و کار گسلها، هندسه پهنه‌های لرزه‌زا، طول گسیختگی و حداکثر زلزله منتسب به هر چشمه، خروجی اصلی این بخش است. اهم ملاحظات مربوط به جمع‌آوری داده‌های پایه به قرار زیر است:

الف- هدف از جمع‌آوری داده‌های منطقه‌ای کسب آگاهی لازم از وضعیت ژئودینامیکی منطقه و نیز شناسایی مولفه‌های زمین‌شناختی موثر در خطر لرزه‌ای ساختمانی است. مولفه‌های زمین‌شناختی مورد اشاره در واقع همان چشمه‌های لرزه‌زایی‌اند که عمدتاً به صورت گسل‌های فعال شناخته می‌شوند و پتانسیل ایجاد تغییرشکل لرزه‌ای در پوسته زمین را دارند. این اطلاعات از منابع گوناگونی قابل استحصال است. گزارش‌های منتشر شده از نتایج عملیات زمین‌شناسی که البته با اهداف گوناگونی تهیه شده‌اند مرجع مناسبی برای شناسایی گسل‌ها و چشمه‌ها در یک منطقه‌اند. برخی از این گزارش‌ها اساساً با منظور شناسایی این سازندها تهیه شده‌اند اما بعضاً اکتشاف زمین‌شناسی با اهداف دیگر انجام گرفته (مثلاً اکتشافات نفتی) که در اثنای آن برخی از گسل‌ها آشکار شده‌اند. شعاع مطالعاتی در این تراز بسته به وضعیت زمین‌شناسی و زمین‌ساختی می‌تواند بسیار متغیر باشد و شکل محدوده مطالعاتی نیز الزاماً متقارن نیست و ممکن است از الگویی نامتقارن برای منظور نمودن برخی گسل‌های تعیین‌کننده برخوردار باشد. به صورت یک توصیه کلی، شعاع یا محدوده شناسایی در این تراز حداقل ۱۵۰ کیلومتر است.

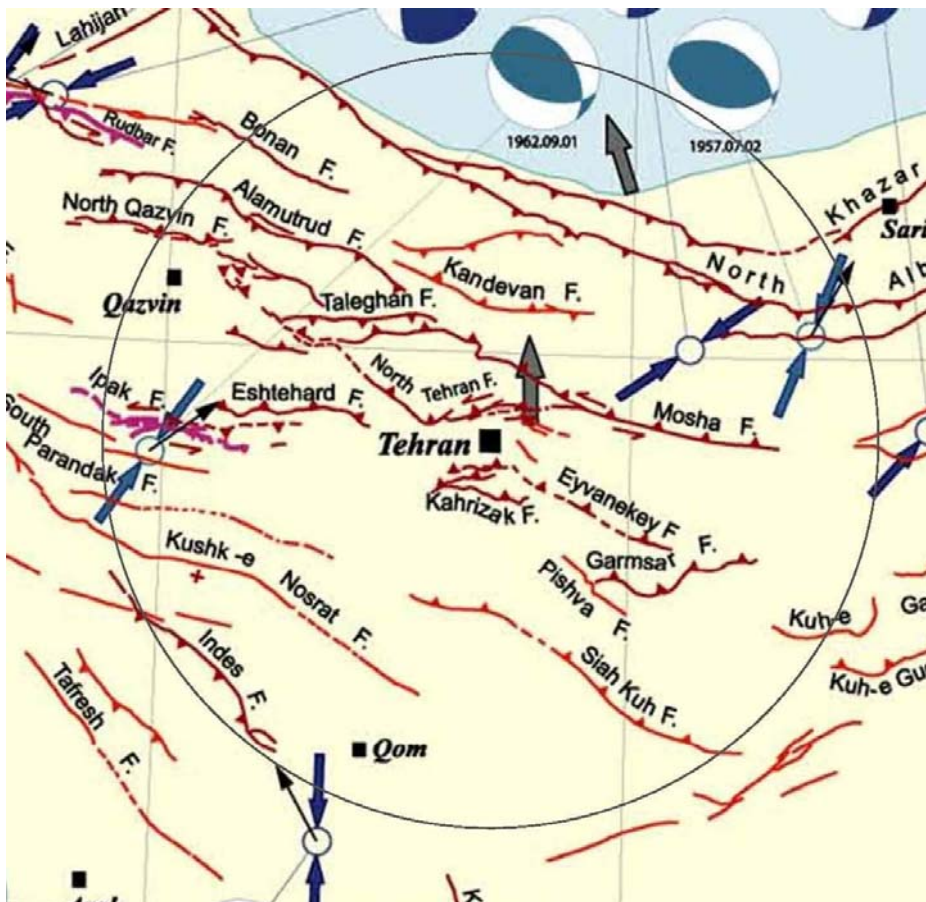
ب- هنگامی که اطلاعات کافی در مورد تاریخچه زلزله‌شناسی جنبش‌های یک گسل در اختیار باشد، مانند عرض (پهنای) گسل، افت تنش میانگین، وضعیت قطعه قطعه شدگی گسل و نظایر آن و چنانچه بتوان حداکثر طول گسیختگی و میزان لغزش را برآورد نمود، می‌توان از روابط تجربی، حداکثر بزرگای بالقوه را تعیین کرد.

ج- در نبود داده‌های با جزییات مناسب، می‌توان حداکثر بزرگای بالقوه را از روی ابعاد کلی گسل برآورد نمود. البته برای این منظور عموماً کسری از طول کل یک قطعه گسل که می‌تواند در یک زلزله فعال شود لحاظ می‌گردد (مثلاً ۵۰ درصد). این کسر به خصوصیات گسل و مشخصاً به وضعیت قطعه بندی شدگی آن مرتبط است.

صرفنظر از روش مورد استفاده برای برآورد بزرگای حداکثر بالقوه که الزاماً باید با شواهد زمین‌شناختی همخوان باشد، عدم قطعیت در این برآورد موضوعی کلیدی است و باید در مدلسازی منظور شود.

د- کسب اطلاعات لازم از گسلها عمدتاً بر اساس مطالعات کتابخانه‌ای صورت می‌پذیرد. در صورت نیاز به افزایش دقت در اطلاعات، لازم است از شناسایی میدانی بهره برد. مطالعه جابجایی‌های اخیر در گسلهای مهم به منظور تعیین میزان و نوع تغییرمکان، نرخ‌های فعالیت و نیز یافتن شواهد احتمالی از قطعه قطعه شدن احتمالی گسل، از جمله اطلاعات تکمیلی برای شناسایی دقیق‌تر ساختار لرزه‌زمین ساخت منطقه است. به تناسب اهمیت پروژه، استخراج داده‌های

زیرسطحی حاصل از کاوش‌های ژئوفیزیکی (مثل روش‌های گرانی‌سنجی، مغناطیسی و الکتریکی، انعکاس و تفرق امواج لرزه‌ای و غیره) از جمله روش‌های میدانی برای تدقیق ساختار لرزه‌زمین ساخت است. برای درک نرخ لغزش تکتونیکی و نوع آن می‌توان از فناوریهای مدرن امروزی مثل سامانه موقعیت‌یابی (GPS) و داده‌های اینترفرومتری راداری و نیز داده‌های اندازه‌گیری کرنش زمین بهره برد. با استفاده از این اطلاعات پایه و نیز داده‌های لرزه‌خیزی، چشمه‌های لرزه‌ای تعیین و مدلسازی می‌شوند. شکل (۱-۲) به عنوان یک نمونه، گسل‌های فعال را در شعاع ۱۵۰ کیلومتری تهران نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲- گسل‌های اطراف تهران در شعاع ۱۵۰ کیلومتری (برگرفته از «نقشه گسل‌های فعال ایران»، حسامی و همکاران، ۱۳۸۲)

## ۲-۲- کاتالوگ لرزه‌خیزی

برای شناخت سرشت لرزه‌ای و الگوی لرزه‌خیزی منطقه باید اطلاعات تمام زلزله‌های رخ داده در محدوده لازم جمع‌آوری شود. محدوده مورد اشاره الزاماً محصور به مرزهای جغرافیایی ایران نخواهد بود. داده‌ها به دو دوره «زلزله‌های تاریخی» قبل از سال ۱۹۰۰ میلادی و «زلزله‌های معاصر یا دستگاهی» بعد از سال ۱۹۰۰ میلادی تقسیم‌بندی می‌شود. از تجمیع داده‌های تاریخی و دستگاهی کاتالوگ لرزه‌خیزی منطقه آماده می‌گردد.

## ۲-۲-۱- داده‌های زلزله‌های تاریخی (قبل از سال ۱۹۰۰ میلادی)

همه داده‌های مربوط به زلزله‌های منطقه مورد مطالعه پیش از بکارگیری دستگاه‌های ثبت زلزله تا آنجایی که امکان‌پذیر است باید جمع‌آوری گردد. اطلاعات زلزله‌های تاریخی ایران عمدتاً در دو مرجع تاریخ زمین‌لرزه‌های ایران (امبرسیز و ملویل ۱۹۸۲) و کاتالوگ زمین‌لرزه‌های ایران (بربریان ۱۹۹۴) موجود است. مطالعات دیرینه لرزه‌شناسی نیز در صورت وجود می‌تواند اطلاعات بسیار ارزشمندی را در این خصوص در اختیار قرار دهد. برای هر یک از زلزله‌های تاریخی لازم است تا حد ممکن اطلاعات زیر مشخص شود:

- ۱- زمان رخداد
- ۲- مکان تخمینی رومرکز
- ۳- بزرگای تخمینی
- ۴- عمق تخمینی
- ۵- حداکثر شدت و نیز منحنی هم شدت در مقیاس مرکالی
- ۶- برآورد عدم قطعیت‌ها در تخمین پارامترهای فوق

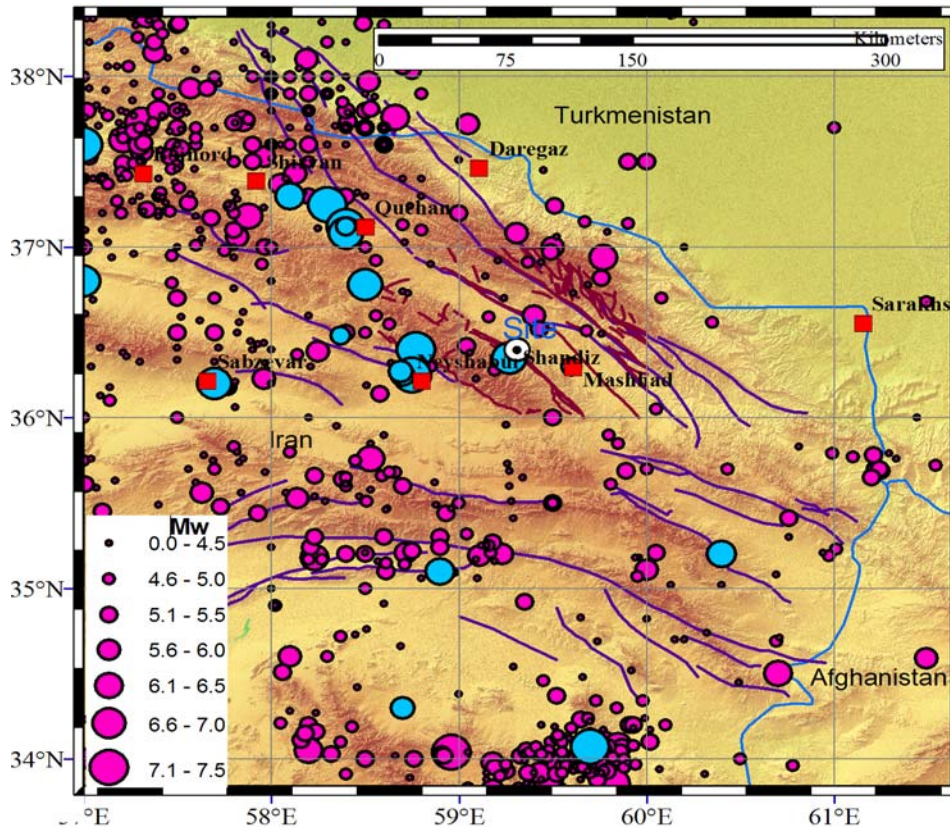
## ۲-۲-۲- داده‌های دستگاهی (بعد از سال ۱۹۰۰ میلادی)

تمامی داده‌های زلزله‌های بعد از سال ۱۹۰۰ میلادی باید جمع‌آوری و اطلاعات زیر تکمیل شود:

- ۱- زمان رخداد
- ۲- مکان تخمینی رومرکز
- ۳- موقعیت رومرکز
- ۴- بزرگای ثبت شده (بزرگای ثبت شده در مقیاس‌های مختلف ارائه شده است، برای یکسان سازی بزرگای می‌توان از روابط بخش ۲-۲-۳ استفاده کرد)
- ۵- عمق رخدادها
- ۶- ابعاد و هندسه ناحیه در بردانده پیش و پس‌لرزه‌ها در صورت موجود بودن
- ۷- سایر اطلاعات مفید در شناخت لرزه‌زمین ساخت مانند سازوکار کانونی، افت تنش و پارامترهای چشمه
- ۸- برآورد عدم قطعیت در برآوردهای فوق

معمولاً داده‌های لرزه‌ای گزارش شده توسط سازمانهای مختلف (مثل ISC، NEIC، EMME، BHRC، HRVD و IGU و IEES) دارای اختلافاتی می‌باشد، که این اختلاف عموماً به دلیل ویژگیهای پیچیده زمین‌لرزه و خطای موجود در اندازه‌گیری توسط پایگاههای لرزه‌ای مربوط ایجاد می‌شود. میزان خطا در بزرگا و موقعیت زلزله‌ها در اوایل قرن حاضر زیاد بوده و بعد از استقرار شبکه لرزه‌نگاری جهانی در سال ۱۹۶۳ دقت اطلاعات از نظر مکان‌یابی و بزرگا بیشتر شده‌است.

شکل (۲-۲) مثالی از آرایش مکانی داده‌های دستگاهی را برای یک ساختگاه انتخابی دلخواه آشکار ساخته و جدول (۱-۲) مثالی از داده‌های زلزله دستگاهی را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲- زلزله های دستگاهی برای یک ساختگاه مشخص (برگرفته از گزارش تحلیل خطر زلزله منطقه‌ای در خراسان رضوی. ذوالفقاری، آشتیانی، مختاری، ۱۳۹۱)

جدول ۱-۲- نمونه داده های زلزله دستگاهی

Date	Time(UTC)	Latitude	Longitude	Depth	Magnitude	Reference
2002/04/08	18:30:58.5	36.42	52.03	46	M <sub>b</sub> :4.8	NEIC
2002/06/22	02:58:20.8	35.62	49.05	10	M <sub>w</sub> :6.5	NEIC
2002/06/22	14:27:16.2	35.50	49.14	10	M <sub>b</sub> :4.8	NEIC
2002/06/26	18:18:15.0	35.34	49.11	10	M <sub>b</sub> :4.6	NEIC
2002/10/10	12:13:43.6	35.89	52.33	33	M <sub>b</sub> :4.7	NEIC
2003/12/24	03:49:59.8	34.91	50.72	15	M <sub>L</sub> :4.5	IIEES
2004/05/28	12:38:46.1	36.3710	51.6430	28	M <sub>s</sub> :6.3	IIEES
2004/05/28	13:15:07.4	36.4470	51.5920	37	M <sub>L</sub> :4.6	IIEES
2004/05/28	19:47:05.6	36.3680	51.4480	28	M <sub>L</sub> :4.8	IIEES
2004/05/29	09:23:51.3	36.41	51.35	28	M <sub>L</sub> :4.7	IIEES
2004/05/29	18:38:07.9	36.4510	51.3760	28	M <sub>L</sub> :4.6	IIEES
2004/05/30	01:42:41.8	36.4030	51.6130	28	M <sub>L</sub> :4.5	IIEES

### ۲-۲-۳- تجمیع کاتالوگ داده‌های تاریخی و دستگامی

واحدهای متنوعی برای توصیف بزرگای زلزله مورد استفاده قرار گرفته است. برای تجمیع و تدوین کاتالوگ، لازم است با بهره‌گیری از روابط مناسب تبدیل بزرگا، به یک بیان یکنواخت از بزرگا (مثلاً بزرگای گشتاوری،  $M_W$ ) دست یافت. بزرگای گشتاوری ( $M_W$ ) یک از مناسب‌ترین معیارها است که ماهیت فیزیکی داشته و مستقل از تجهیزات لرزه‌نگاری است. برای تبدیل بزرگای  $M_S$ ،  $m_b$  و  $M_L$  به  $M_W$  در فلات ایران می‌توان از روابط زیر استفاده نمود:

تبدیل  $M_S$  به  $M_W$  (EMME, 2011)

$$M_w = 0.66M_s + 2.11 \quad 2.8 \leq M_s < 6.2 \quad (1-2)$$

$$M_w = 0.93M_s + 0.45 \quad 6.2 \leq M_s \leq 8.2 \quad (2-2)$$

تبدیل  $m_b$  به  $M_W$  (Scordilis, 2006):

$$M_w = 0.85m_b + 1.03 \quad 3.5 \leq m_b \leq 6.2 \quad (3-2)$$

تبدیل  $M_L$  به  $M_W$  (Shoja-taheri, 2007)

$$M_L = 3.73 \ln(M_w) - 0.51 \quad 4.5 \leq M_L \leq 7.5 \quad (4-2)$$

### ۲-۲-۴- حذف زلزله‌های وابسته در کاتالوگ

فرآیند تحلیل خطر لرزه‌ای با فرض پواسنی بودن وقوع زمین لرزه‌ها (وقوع مستقل زمین لرزه‌ها) انجام می‌گیرد. اگرچه این فرض با سازوکار وقوع زلزله‌ها کاملاً سازگار نیست اما به خاطر سادگی و کاربردی بودن آن در مطالعات تحلیل خطر استفاده می‌شود. برای ارضاء شرایط پواسنی بودن داده‌ها، لازم است پس لرزه‌ها و پیش لرزه‌های زلزله‌های بزرگ (داده‌های وابسته) از بانک اطلاعاتی حذف شوند.

برای جداسازی پیش و پس لرزه‌ها از رخداد‌های اصلی، روشهای مختلفی ارایه شده است. به عنوان یک پیشنهاد می‌توان از روش پنجره‌های زمانی- مکانی (Gardner and Knopoff, 1974) و یا روش نظام‌مندتر (Reasenber, 1985) یا (Grunthal, 1998) استفاده نمود. همچنین، برخی از مراکزی که تدوین کاتالوگ لرزه‌خیزی را برعهده دارند، داده‌های جداسازی شده را در اختیار قرار می‌دهند. به عنوان مثال می‌توان به کاتالوگ EMME که در سال ۲۰۱۲ تولید شده‌است، اشاره نمود.

### ۲-۲-۵- لحاظ عدم قطعیت‌ها در بزرگا و مختصات مکانی کاتالوگ

در نظرگرفتن عدم قطعیت‌های قابل ملاحظه داده‌های تاریخی، نقش قابل توجهی در تعیین پارامترهای لرزه‌خیزی دارد. جدول (۲-۲) می‌تواند برای برآورد عدم قطعیت‌های موجود در تعیین محل رومرکز زلزله بر اساس بزرگا و زمان

رخداد، مورد استفاده قرار گیرد. این جدول بر اساس گزارشهای مستندی مانند (Berberian, 2005) و (Engdahl, 2006) تهیه شده است.

جدول ۲-۲- عدم قطعیت در تعیین محل رومرکز زلزله (بر حسب کیلومتر)

بزرگا ( $M_w$ )					دوره زمانی (میلادی)
۳-۴	۴-۵	۵-۶	۶-۷	>۷	
-	-	۷۵-۵۰	۳۵-۵۵	۳۰-۵۰	پیش از ۱۸۰۰
-	۵۰-۷۰	۳۰-۵۰	۲۵-۴۵	۲۰-۴۰	از ۱۸۰۰ تا ۱۹۱۸
-	-	-	۱۸	۱۲	از ۱۹۱۸ تا ۱۹۶۴
-	۹/۵	۶/۵	۵/۴	۵/۵	از ۱۹۶۴ تا ۱۹۸۰
۱۳/۵	۸/۵	۴	۴	۳/۵	پس از ۱۹۸۰

عدم قطعیت‌های موجود در بزرگای ثبت شده مربوط به داده‌های تاریخی و داده‌های دستگاهی یکسان نیست. به طوریکه برای داده‌های تاریخی این عدم قطعیت را می‌توان برابر ۰/۵ واحد بزرگا، برای داده‌های دستگاهی پیش از سال ۱۹۶۳ میلادی برابر ۰/۳ و برای داده‌های دستگاهی پس از سال ۱۹۶۳ میلادی برابر ۰/۱ واحد در نظر گرفت.

### ۲-۲-۶- ارزیابی کامل بودن کاتالوگ

پس از جمع‌آوری اطلاعات تاریخی و دستگاهی، میزان قابلیت اعتماد و کامل بودن کاتالوگ باید مورد ارزیابی قرار گیرد. به دلیل عدم گزارش زلزله‌های کوچک در منابع تاریخی و دوره‌های آغازین داده‌های دستگاهی، غیرکامل بودن کاتالوگ لرزه‌ای برای یک منطقه چندان دور از انتظار نیست. استفاده از روش آماری (Stepp, 1972) برای بررسی کامل بودن کاتالوگ، پیش از برآورد پارامترهای رابطه بازگشتی گوتنبرگ ریشتر توصیه می‌شود.

# فصل ۳

---

---

## مطالعات لرزه‌خیزی





### ۳-۱- استخراج پارامترهای لرزه‌خیزی

برای کمی‌سازی لرزه‌خیزی یک پهنه مشخص، روابط مختلفی با استفاده از نحوه توزیع زلزله‌ها و بزرگای آنها ارائه شده است. یکی از معتبرترین آنها، رابطه گوتنبرگ-ریشر کلاسیک است:

$$\ln \lambda_m = \alpha - \beta m \quad (۱-۳)$$

$$\ln N_m = \alpha - \beta m \quad (۲-۳)$$

در این رابطه  $N_m$  تعداد زلزله‌های بزرگتر از  $m$  و  $\lambda_m$  نرخ رخداد یا تعداد زلزله‌های بزرگتر از  $m$  در سال است.  $\alpha$  و  $\beta$  ثابت‌های لرزه‌ای چشمه پهنه‌ای مورد نظر می‌باشند. پارامترهای  $\alpha$  و  $\beta$  از تحلیل آماری داده‌های لرزه‌ای محاسبه می‌شوند. در فرآیند تخمین پارامترهای  $\alpha$  و  $\beta$ ، نتایج تحلیل برازش رابطه گوتنبرگ-ریشر الزاماً باید به صورت چشمی به تصویر درآمده و مورد بررسی قرار گیرد.

عدم قطعیت‌های موجود در بزرگای ثبت شده مربوط به داده‌های تاریخی و داده‌های دستگاهی یکسان نیست. برای ترکیب نظام‌مند این داده‌ها با لحاظ تفاوت در عدم قطعیت‌های مربوطه، می‌توان از روش پیشنهادی (Kijko and Sellevoll, 1992) استفاده نموده و با بهره‌گیری از روش بیشینه تمایل پارامترهای لرزه‌خیزی را برآورد نمود.

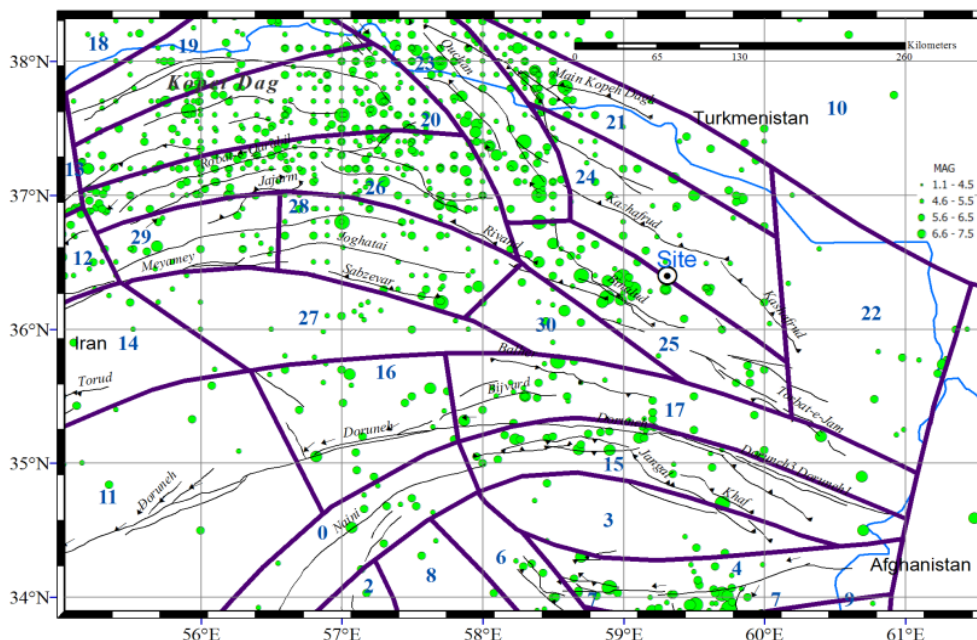
### ۳-۲- تحلیل عمق رخدادها در کاتالوگ

با تحلیل آماری داده‌های مربوط به عمق زلزله‌های پیشین (با استناد به مراجع معتبر)، باید به تخمین مناسبی از عمق مورد انتظار زلزله‌ها دست یافت. میانگین عمق زلزله‌های ایران (به استثنای ناحیه مکران) عموماً بین ۸ تا ۱۵ کیلومتر است.

### ۳-۳- مدلسازی چشمه‌های لرزه‌زا

برای برآورد خطر زلزله در یک ساختگاه باید گسلها و متغیرهای لرزه‌ای آنها به نحو مناسبی مدلسازی شود. نواحی با گسلهای پراکنده یا خردشده به صورت پهنه‌های لرزه‌ای با لرزه‌خیزی یکنواخت در نظر گرفته می‌شود. از چشمه‌های سطحی (پهنه لرزه‌ای) زمانی بهره برده می‌شود که زلزله‌های رخداده در یک ناحیه را نتوان به گسل مشخصی نسبت داد و به عبارتی مجموعه‌ای از گسلهای کوچک یا پنهان واقع در آن ناحیه را مسبب رخدادها قلمداد کرد. در مقابل چشمه‌های سطحی، چشمه‌های خطی قرار دارند که معرف گسلهای با طول قابل ملاحظه و شناخته شده‌اند. شکل (۳-۱) زلزله‌های ثبت شده تاریخی و دستگاهی به همراه گسلهای شناسایی شده را برای یک ساختگاه فرضی نشان می‌دهد. در

این شکل، همچنین منابع لرزه‌زای خطی و چشمه‌های سطحی انتخاب شده نیز نشان داده شده است. معمولاً در مدلسازی یک منطقه، ترکیبی از چشمه‌های خطی و سطحی در نظر گرفته می‌شود.

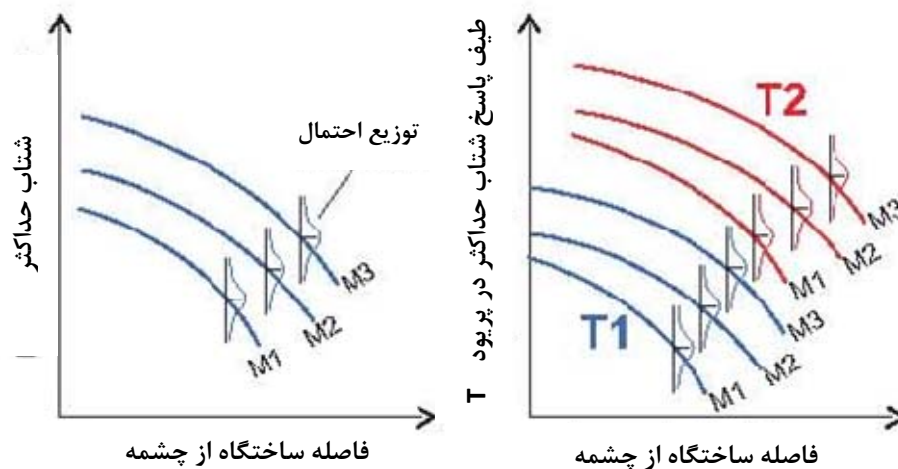


شکل ۳-۱- انتخاب پهنه‌های لرزه‌ای و چشمه‌های خطی و سطحی (برگرفته از گزارش تحلیل خطر زلزله منطقه‌ای در خراسان رضوی. ذوالفقاری، آشتیانی، مختاری، ۱۳۹۱)

تعیین مدل چشمه لرزه‌ای یک منطقه جزء عدم قطعیت‌های ذاتی در برآورد خطر است و در صورت نیاز به تحلیل این عدم قطعیت می‌توان از روش درخت منطقی استفاده نمود.

### ۳-۴- انتخاب روابط کاهندگی یا روابط برآورد جنبش شدید زمین

یکی از عناصر کلیدی در برآورد احتمالی خطر در یک ساختمان، روابط کاهندگی انتخابی است (شکل ۳-۲). بر اساس یافته‌های تحقیقاتی، انتخاب روابط کاهندگی بیشترین عدم قطعیت نهایی در برآورد خطر در ساختمان را رقم می‌زند. بنابراین برخورد مناسب با این عدم قطعیت که جنس آن از نوع عدم قطعیت ذاتی است، کاملاً ضروری است.



شکل ۳-۲- فرم کلی روابط کاهندگی

پیشنهاد می‌شود روابط کاهندگی کاندیدا برای بکارگیری در تحلیل خطر، از هر سه گروه زیر انتخاب شود:

- ۱- روابط بومی، که عمدتاً داده‌های لرزه‌ای کشور مبنای توسعه آنها بوده است
- ۲- روابط منطقه‌ای که بر پایه داده‌های منطقه‌ای ارایه شده‌اند (مثلاً روابط توسعه یافته برای منطقه خاورمیانه)
- ۳- روابط جهانی، که بر پایه داده‌های سراسر دنیا توسعه یافته‌اند. به عنوان مثال مشخص، روابط توسعه یافته در پروژه NGA مرکز تحقیقات PEER گزینه مناسبی است.

در مورد انتخاب رابطه کاهندگی از هر یک از سه گروه فوق باید نکات کلی زیر مدنظر قرار گیرد:

- ۱- روابط انتخابی با ساختار تکتونیکی، لرزه زمین ساختی و لرزه خیزی منطقه سازگار باشند
- ۲- روابط مورد استفاده از اعتبار علمی برخوردار باشند
- ۳- معیار سنجش بزرگای واحدی داشته باشد (توصیه می‌شود از روابطی استفاده شود که از بزرگای گشتاوری بهره برده‌اند)
- ۴- روابط کاهندگی انتخابی قادر به برآورد شتاب حداکثر و نیز مقدار طیف پاسخ شتاب در پیوندهای مختلف باشند
- ۵- نوع تعریف فاصله از چشمه لرزه زا در روابط انتخابی مورد توجه قرار گیرد

به عنوان نمونه از روابط کاهندگی زیر برای تحلیل خطر در پهنه ایران می‌توان استفاده نمود:

- ۱- (Zafarani et al., 2012) توسعه یافته برای ایران
- ۲- (Ghasemi and Zare, 2009) توسعه یافته برای ایران
- ۳- (Akkar and Bommer, 2010) توسعه یافته برای ناحیه مدیترانه و خاورمیانه
- ۴- (Chiou and Youngs, 2008) داده‌های سراسری پروژه NGA
- ۵- (Boore and Atkinson, 2008) داده‌های سراسری پروژه NGA

داده‌های سراسری پروژه NGA

۶- (Abrahamson and Silva, 2008)

داده‌های سراسری پروژه NGA

۷- (Campell and Bozorgnia, 2008)

توسعه یافته برای ناحیه مدیترانه و خاورمیانه

۸- (Akkar, et.al., 2013)

حداقل سه رابطه کاهندگی باید برای بکارگیری در تحلیل خطر استفاده شود. برای منظور کردن عدم قطعیت انتخاب روابط، استفاده از درخت منطقی توصیه می‌شود. برای این منظور لازم است از سه کارشناس خبره برای وزن‌دهی به روابط انتخاب شده بهره برده شود.

در صورت عدم دسترسی به کارشناسان خبره و یا عدم همگرایی کلی در نظرات آنان، به عنوان یک توصیه می‌توان به مقالات منتشر شده‌ای رجوع کرد که بر پایه تحلیل آماری داده‌های کشور، به آزمون برازندگی روابط کاهندگی پرداخته‌اند و بر اساس آن روابط رتبه‌بندی شده و وزن‌های پیشنهادی برای بکارگیری در درخت منطقی ارائه شده است. صرفنظر از روش مورد استفاده برای انتخاب روابط کاهندگی، لازم است آنالیز حساسیت نتایج تحلیل خطر و همچنین رایاه مستندات مربوط به انتخاب روابط کاهندگی در گزارش نهایی گنجانده شود.

# فصل ۴

---

---

## تحليل خطر احتمالي و تعيني



## ۴-۱- تحلیل خطر احتمالی

## ۴-۱-۱- برآورد منحنی خطر

مراحل اصلی تحلیل خطر احتمالی عبارتند از:

- ۱- تعیین چشمه‌های لرزه‌ای یا مؤثرترین چشمه لرزه‌ای در ایجاد خطر و مدل‌سازی آنها به صورت خطی و یا سطحی
- ۲- تعیین تابع چگالی احتمال فاصله ساختگاه از چشمه لرزه‌ای،  $f_R(r)$
- ۳- تعیین تابع چگالی احتمال بزرگی زلزله محتمل در پهنه یا ساختگاه مورد نظر،  $f_M(m)$
- ۴- انتخاب روابط کاهندگی مناسب و سازگار با لرزه‌زمین ساخت منطقه
- ۵- برآورد احتمالی خطر با منظور نمودن عدم قطعیت‌های ذاتی و تصادفی و محاسبه منحنی خطر (پارامتر شتاب طیفی زلزله برحسب احتمال وقوع سالیانه در پیوندهای مختلف)
- ۶- تعیین پارامتر شتاب حداکثر زمین (PGA) در سطح خطر مدنظر و نیز طیف خطر یکنواخت
- ۷- تهیه طیف‌های طراحی

با در نظر داشتن طبیعت احتمالی توابع کاهندگی، تابع توزیع بزرگا برای هر چشمه، توزیع احتمال فاصله نقطه آغاز گسلش زمین تا محل ساختگاه و بهره‌گیری از تئوری احتمال کل می‌توان برهم‌نهی نظام‌مندی از آثار گسل‌های مختلف ترتیب داد و در نهایت احتمال فراگذشت سالیانه پارامترهای جنبش زمین را در هر سطح دلخواه محاسبه و به صورت "منحنی خطر" ترسیم نمود.

تابع توزیع احتمال رخداد بزرگاهای مختلف را می‌توان از رابطه گوتنبرگ - ریشتر بدست آورد. برای این منظور، نخست تابع توزیع تجمعی رخداد زلزله‌های بزرگتر از یک بزرگای حداقل ( $m_{\min}$ ) از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$F_M(m) = P(M \leq m | m_{\max} > M > m_{\min}) = \frac{N_{m_{\min}} - N_m}{N_{m_{\min}} - N_{m_{\max}}} = \frac{\lambda_{m_{\min}} - \lambda_m}{\lambda_{m_{\min}} - \lambda_{m_{\max}}} = C(1 - e^{-\beta(m - m_{\min})}) \quad (1-4)$$

$$m_{\max} > m > m_{\min}$$

که در این رابطه  $F_M(m)$  تابع توزیع تجمعی برای  $M$  است. ضریب  $C$  به جهت محدود کردن  $m$  به بزرگای حداکثر ( $m_{\max}$ ) است:

$$C = \frac{1}{1 - e^{-\beta(m_{\max} - m_{\min})}} \quad (2-4)$$

با مشتق‌گیری از تابع توزیع تجمعی، تابع چگالی احتمال ( $f_M(m)$ ) محاسبه می‌شود:

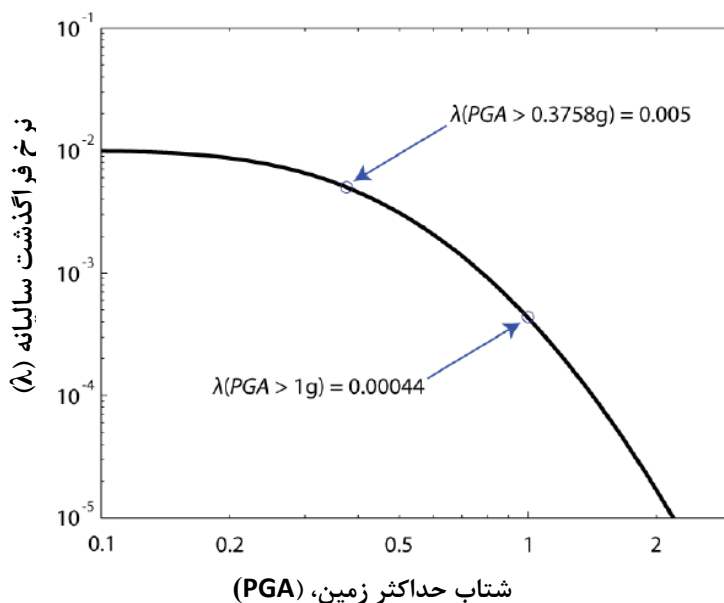
$$f_M(m) = C\beta e^{-\beta(m - m_{\min})} \quad m_{\max} > m > m_{\min} \quad (3-4)$$

تابع چگالی احتمال فاصله نقطه آغاز گسلش زمین تا محل ساختگاه ( $f_R(r)$ )، با تقسیم‌بندی هر چشمه لرزه‌زا به جزء‌های کوچکتر و اندازه‌گیری فاصله هر جزء از محل ساختگاه و انجام محاسبات فراوانی نمونه‌ها بدست می‌آید. با در دست داشتن تابع چگالی احتمال بزرگای هر چشمه ( $f_M(m)$ )، تابع چگالی احتمال فاصله نقطه آغاز گسلش زمین تا محل ساختگاه ( $f_R(r)$ ) و تابع توزیع احتمال رخداد سطوح مختلف شدت لرزه‌ای به شرط رخداد بزرگای  $m$  در فاصله  $r$  از ساختگاه،  $P(IM > x) | m, r$ ، می‌توان احتمال فراگذشت پارامتر جنبش زمین از یک سطح مشخص را از رابطه زیر بدست آورد:

$$P(IM > x) = \sum_{i=1}^{n_{sources}} \lambda(M_i > m_{min}) \int_{m_{min}}^{m_{max}} \int_0^{r_{max}} P(IM > x) | m, r f_{M_i}(m) f_{R_i}(r) dr dm \quad (4-4)$$

در رابطه فوق،  $\lambda(M_i > m_{min})$  نرخ رخداد زلزله‌های بزرگتر از  $m_{min}$  برای چشمه  $i$  ام است. احتمال رخداد سالیانه  $IM > x$  است که  $IM$  پارامتر جنبش زمین مورد نظر است (مثلاً شتاب حداکثر زمین یا شتاب طیفی در پریود مشخص و ...) و عکس آن بیانگر دوره بازگشت رخداد زلزله‌های بزرگتر از آن است.  $n_{sources}$  تعداد چشمه‌های منظور شده است. شایان ذکر است که عبارت  $P(IM > x) | m, r$  از رابطه کاهندگی انتخابی بدست می‌آید.

با محاسبه نرخ رخداد سالیانه سطوح مختلف پارامتر جنبش زمین با استفاده از فرآیند انتگرال‌گیری فوق و ترسیم نتیجه حاصل، منحنی موسوم به منحنی خطر حاصل می‌شود. شکل (۴-۱) نمونه‌ای از یک منحنی خطر را برای شتاب حداکثر (PGA) در یک ساختگاه فرضی نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱- منحنی خطر برای یک ساختگاه فرضی

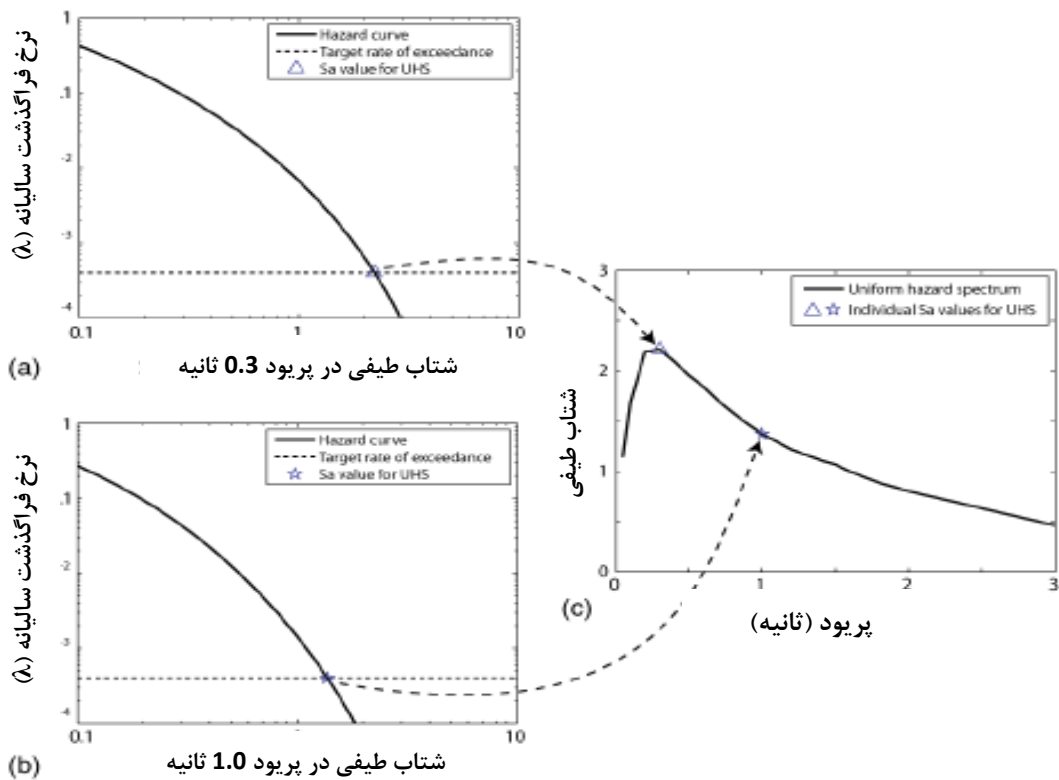


## ۴-۱-۲- انتخاب و اعتبارسنجی نرم‌افزار تحلیل خطر احتمالی

فرآیند انتگرالگیری پیچیده برای برآورد تحلیل خطر، در کنار نیاز به وارد نمودن عدم قطعیت‌ها در برآورد خطر باعث شده‌است تا امروزه استفاده از یک بسته نرم‌افزاری حرفه‌ای برای انجام تحلیل خطر اجتناب‌ناپذیر باشد. امروزه نرم‌افزارهای متنوعی برای انجام تحلیل خطر مورد استفاده مجامع حرفه‌ای قرار می‌گیرد. تفاوت این نرم‌افزارها در تفاوت در شیوه‌های متفاوت پیاده‌سازی فرآیند محاسبات خطر، فرضیات، ظرفیت مدلسازی، حجم و نیز میزان پیچیدگی اطلاعات ورودی است. برخی از این نرم‌افزارها از چارچوب کلاسیک تحلیل خطر احتمالی (PSHA) برای محاسبات خطر بهره می‌برند و برخی دیگر از روشهای مبتنی بر شبیه‌سازی رخدادها استفاده می‌کنند. از میان نرم‌افزارهای معروف و قابل تایید که بر اساس چارچوب کلاسیک PSHA طرح‌ریزی شده‌اند می‌توان به نرم‌افزارهای CRISIS، SEISRISK III، FRISK88M، OpenSHA، اشاره کرد و از بین نرم‌افزارهای مبتنی بر شبیه‌سازی مونت کارلو می‌توان به عنوان نمونه به EQRM و MoCaHAZ اشاره نمود.

## ۴-۱-۳- طیف یکنواخت خطر

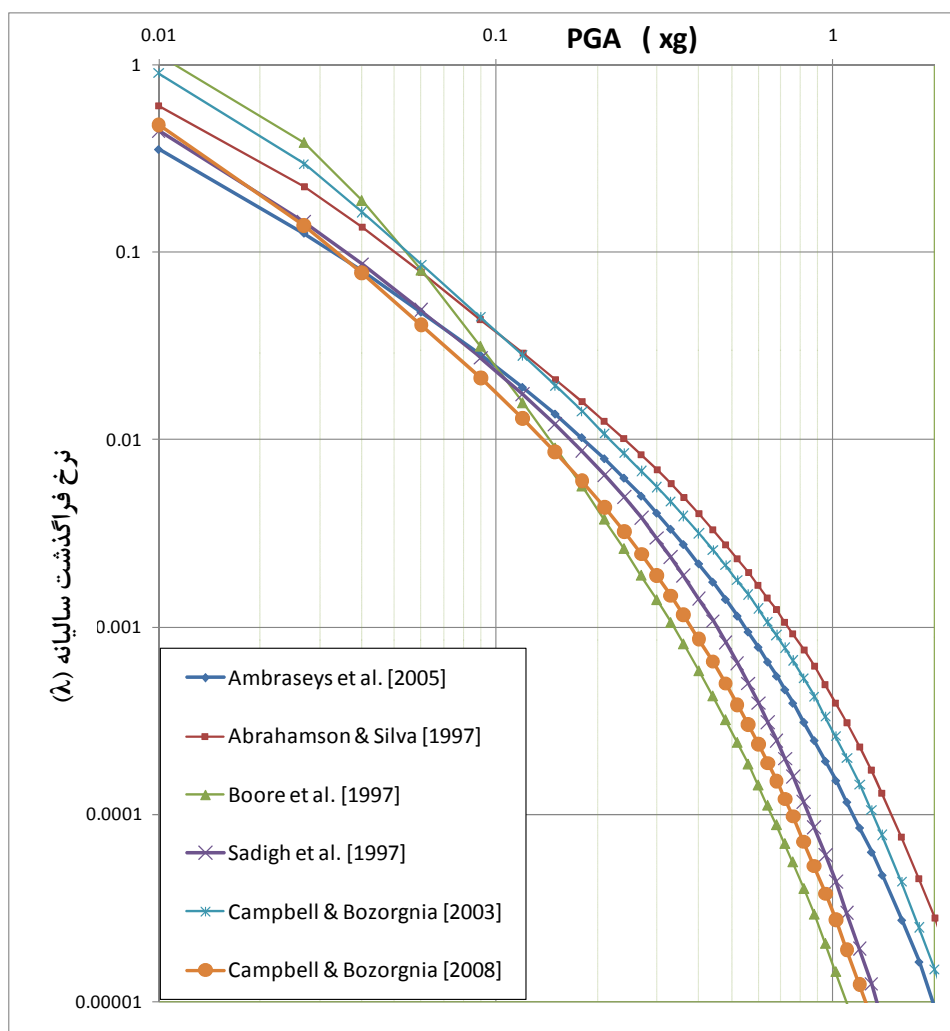
با استفاده از منحنی‌های خطر متناظر با مقادیر شتاب طیفی در پریودهای مختلف، طیف‌های خطر یکنواخت در سطوح مختلف خطر ترسیم می‌گردد. شکل (۲-۴) به صورت نمادین فرآیند ساخت طیف را برای یک سطح خطر مشخص نشان می‌دهد.



شکل ۲-۴- فرآیند تهیه طیف یکنواخت برای یک سطح خطر مشخص

#### ۴-۱-۴- تحلیل حساسیت نتایج تحلیل خطر

پس از تکمیل فرآیند تحلیل خطر در نرم‌افزار، لازم است میزان حساسیت نتایج نهایی (مثلاً منحنی خطر یا طیف خطر یکنواخت) به برخی از عدم قطعیت‌های تعیین‌کننده، بررسی و به نحو مناسبی گزارش و تفسیر آن ارائه شود. مدل لرزه‌زمین‌ساخت مورد استفاده، پارامتر بزرگای حداکثر چشمه‌ها و روابط کاهندگی از جمله پارامترهای کلیدی هستند که لازم است میزان حساسیت نتایج نهایی به این پارامترها تجزیه و تحلیل شده و تفسیر مناسبی برای تغییرپذیری نتایج نسبت به این پارامترها ارائه شود. شکل (۳-۴) نمونه‌ای از تحلیل حساسیت منحنی خطر یک ساختگاه فرضی را نسبت به روابط کاهندگی نشان می‌دهد.



شکل ۳-۴- تحلیل حساسیت منحنی‌های خطر به روابط کاهندگی در یک ساختگاه فرضی

#### ۴-۱-۵- تحلیل تفکیک (De-aggregation) برای تعیین زلزله کنترل کننده

در روش تحلیل احتمالی خطر زلزله، اثر تمام چشمه‌های واقع در منطقه مورد مطالعه وارد فرآیند محاسبه خطر می‌شود. پس از تکمیل فرآیند تحلیل خطر احتمالی، پرسش طبیعی آن است که «کدام رخداد زلزله عامل ایجاد سطح خطر حاصل شده، مثلاً  $a > \text{PGA}$  است؟» از آنجایی که همه رخداد‌های ممکن در فرآیند تحلیل خطر تجمیع شده‌اند، پاسخ به این پرسش چندان ساده نیست. نرخ فراگذشت پارامتر جنبش زمین از یک سطح مشخص، حاصل جمع نرخ فراگذشت به ازای رخداد‌های مختلف بزرگا و فاصله است. نرخ فراگذشت متناظر با هر رخداد در واقع نمایانگر میزان مشارکت آن رخداد در خطر کل است.

با محاسبه میزان مشارکت رخداد‌های مختلف زلزله در خطر کل، رخدادی که بیشترین مشارکت را در خطر لرزه‌ای نشان می‌دهد، به عنوان «زلزله کنترل کننده» معرفی می‌گردد. اغلب نرم‌افزارهای حرفه‌ای تحلیل خطر، زلزله کنترل کننده را به عنوان یکی از خروجی‌ها در اختیار قرار می‌دهند.

#### ۴-۲- تحلیل خطر تعینی

در تحلیل خطر تعینی، رخداد خاصی از زلزله بر اساس گسل مسبب و فاصله از ساختمان بر اساس قضاوت کارشناسانه انتخاب شده و با بهره‌گیری از یک یا چند رابطه کاهندگی انتخابی مقدار پارامترهای جنبش زمین برآورد می‌شود. فرآیند آن عبارت است از:

۱- تعیین چشمه‌های لرزه‌ای یا مؤثرترین چشمه لرزه‌ای در ایجاد خطر

۲- تعیین فاصله ساختمان از چشمه لرزه‌ای R

۳- تعیین بزرگای زلزله محتمل در پهنه یا ساختمان مورد نظر M

۴- انتخاب رابطه کاهندگی سازگار با ساختمان مورد بررسی

۵- محاسبه شتاب زلزله PGA یا طیف شتاب

با توجه به عدم قطعیت‌های متنوعی که در پارامترهای تحلیل خطر وجود دارد، تعیین این رخداد غالب، کار چندان ساده‌ای نیست و مستلزم قضاوت مهندسی است. به عنوان یک پیشنهاد، می‌توان رخداد غالب حاصل از تحلیل تفکیک خطر را به عنوان رخداد انتخابی در تحلیل تعینی لحاظ نمود.



# فصل ۵

---

---

تهیه طیف‌های طراحی و

انتخاب شتاب‌نگاشت



## ۵-۱- کلیات

تحلیل خطر ویژه ساختگاه با هدف برآورد پارامترهای حرکت قوی زمین انجام می‌گیرد. خطر ناشی از زلزله به دو صورت «طیف طرح شتاب» و «تاریخچه زمان شتاب» تعریف و به دو صورت «احتمالی» یا «تعیینی» برآورد می‌شود. در بخش ۵-۲ به ارایه روشهای برآورد طیف طرح شتاب و در بخش ۵-۳ به انتخاب شتاب‌نگاشت‌های سازگار با سطوح مختلف خطر پرداخته شده است.

## ۵-۲- طیف طرح شتاب

دستورالعمل عمومی این بخش می‌تواند برای تعیین طیف طرح شتاب در مورد هر یک از سطوح خطر زلزله زیر استفاده شود:

۱- سطح خطر ۱: معادل سطحی از حرکت‌های قوی زمین است که احتمال فراگذشت از آن،  $10\%$  در  $50$  سال باشد. این سطح خطر معادل دوره بازگشت  $475$  سال است. سطح خطر ۱ در استاندارد  $2800$  ایران «زلزله‌ی طرح» نامیده شده است.

۲- سطح خطر ۲: معادل سطحی از حرکت‌های قوی زمین است که احتمال فراگذشت از آن،  $2\%$  در  $50$  سال باشد. این سطح خطر معادل دوره بازگشت  $2475$  سال است.

۳- سطح خطر انتخابی (زلزله با هر احتمال رویداد در  $50$  سال): معادلی سطحی از حرکت‌های قوی زمین است که احتمال فراگذشت از آن انتخابی است. این سطح خطر برای موارد خاص و با ملاحظات ویژه استفاده می‌شود.

طیف طرح شتاب با یکی از دو فرآیند استفاده از «شکل طیف ثابت» و یا «شکل طیف حاصل از تحلیل خطر ویژه ساختگاه» تعیین می‌شود.

## ۵-۲-۱- فرآیند استفاده از شکل طیف ثابت

فرآیند استفاده از شکل طیف ثابت به یکی از دو روش زیر صورت می‌پذیرد.

### ۵-۲-۱-۱- روش استفاده از شکل طیف استاندارد $2800$

در این روش، طیف طرح ارتجاعی شتاب از حاصل ضرب مقادیر ضریب شتاب مبنای طرح (A) و طیف ضریب بازتاب ساختمان (B) بدست می‌آید. ضریب شتاب طرح (A) برابر است با شتاب بیشینه زمین (PGA) تقسیم بر شتاب ثقل زمین (g). در استاندارد  $2800$  ایران، طیف ضریب بازتاب، برای میرایی  $5\%$  ارایه شده است.

میزان شتاب مبنای طرح مربوط به زلزله سطح خطر ۱ با استفاده از نقشه پهنه‌بندی خطر زلزله استاندارد ۲۸۰۰ تعیین می‌شود.

میزان شتاب مبنای طرح مربوط به زلزله سطح خطر ۲ با یکی از دو روش زیر تعیین می‌شود:

۱- ۱/۵ برابر ضریب A استاندارد ۲۸۰۰ برای ساختمان‌هایی که برای هدف بهسازی مطلوب بهسازی می‌شوند.

۲- انجام تحلیل خطر ویژه ساختگاه برای محاسبه مقدار شتاب موثر حرکت قوی زمین در تراز پایه ساختمان برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال.

#### ۵-۲-۱-۲-۵- روش استفاده از شکل طیف دست‌ورعمل بهسازی

تهیه طیف در این روش مستلزم برآورد مقدار شتاب طیفی در پرپود کوتاه ۰/۲ ثانیه ( $S_S$ ) و نیز مقدار شتاب طیفی در پرپود بلند ۰/۱ ثانیه ( $S_1$ ) در سطح خطر مدنظر است. این مقادیر برای نسبت میرایی ۰/۵٪ و در سنگ بستر (سطح بستر لرزه‌ای) محاسبه می‌شود. مقادیر فوق با یکی از دو روش زیر برآورد می‌شود:

۱- نقشه‌های ریزپهنه‌بندی معتبر که مقادیر شتاب طیفی را در سنگ بستر برای دوره بازگشت مورد نظر در اختیار

قرار دهند (از جمله پایگاه اینترنتی [IranHazard.ir](http://IranHazard.ir))

۲- انجام تحلیل خطر ویژه ساختگاه برای محاسبه مقادیر شتاب طیفی در سنگ بستر برای دوره بازگشت مورد نظر

با استفاده از روابط زیر می‌توان اثرات ساختگاهی را بر مقادیر طیفی لحاظ نمود:

$$S_{XS} = F_a S_S \quad (۱-۵)$$

$$S_{X1} = F_v S_1 \quad (۲-۵)$$

در این روابط  $F_a$  و  $F_v$  ضرایب نمایانگر اثرات ساختگاهی‌اند که از جداول (۱-۵) و (۲-۵) بر اساس نوع خاک و مقدار پارامترهای  $S_S$  و  $S_1$  قابل برآوردند.

جدول ۵-۱- مقادیر  $F_a$  بر حسب نوع خاک و مقدار  $S_S$

نوع خاک	مقدار شتاب طیفی در پرپود کوتاه، $S_S$				
	$S_S < 0.25$	$S_S = 0.50$	$S_S = 0.75$	$S_S = 1.00$	$S_S > 1.25$
1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
3	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
4	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9



جدول ۵-۲- مقادیر  $F_v$  بر حسب نوع خاک و مقدار  $S_1$ 

نوع خاک	مقدار شتاب طیفی در پیوند بلند، $S_1$				
	$S_1 < 0.1$	$S_1 = 0.20$	$S_1 = 0.3$	$S_1 = 0.4$	$S_1 > 0.50$
1	1	1	1	1	1
2	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
3	2.4	2	1.8	1.6	1.5
4	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4

در جداول (۱-۵) و (۲-۵)، برای برآورد مقادیری از  $S_1$  و  $S_s$  که در میانه حدود ارائه شده قرار دارند، از درونیایی خطی استفاده می‌شود.

اگر شرایط ژئوتکنیکی ویژه‌ای در ساختگاه حاکم باشد، استفاده از ضرایب فوق‌الذکر کافی نیست و لازم است با انجام مطالعات میدانی و تهیه مدل‌های رفتار دینامیکی مناسب اثر بزرگنمایی خاک را بر روی طیف بدست آمده برای سنگ بستر لحاظ نمود. هرگاه حداقل یکی از شرایط زیر برقرار باشد، شرایط ژئوتکنیکی ساختگاه، ویژه تلقی می‌شود:

- ۱- خاکهای مستعد فروریزش تحت بارهای لرزه‌ای مانند خاکهای با قابلیت روانگرایی بالا، رسهای بسیار حساس
- ۲- خاکهای دستی و یا خاکهای متشکل از مواد آلی با عمق بیش از ۳ متر
- ۳- رسهای بسیار خمیری با اندیس خمیری  $PI > 75$  و عمق بیش از ۸ متر
- ۴- وجود لایه‌ای با ضخامت بیش از ۴۰ متر از رس نرم یا با سختی متوسط

پس از برآورد  $S_{XS}$  و  $S_{X1}$ ، طیف طرح شتاب افقی مطابق شکل (۱-۵) ساخته می‌شود. در این خصوص روابط زیر قابل استفاده هستند.

$$S_a = S_{XS} \left[ \left( \frac{5}{B} - 2 \right) \frac{T}{T_s} + 0.4 \right] \quad 0 < T < T_0 \quad (۳-۵)$$

$$S_a = S_{XS} / B \quad T_0 < T < T_s \quad (۴-۵)$$

$$S_a = S_{X1} / (BT) \quad T > T_s \quad (۵-۵)$$

که در این روابط  $T_0$  و  $T_s$  عبارتند از:

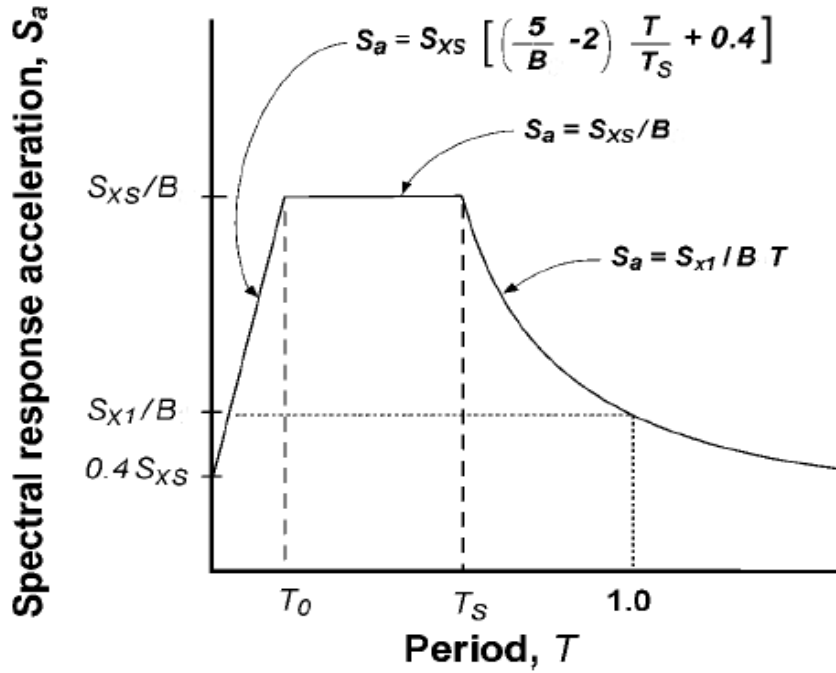
$$T_0 = 0.2T_s \quad (۶-۵)$$

$$T_s = S_{X1} / S_{XS} \quad (۷-۵)$$

همچنین ضریب  $B$  به صورت تابعی از نسبت میرایی موثر،  $\beta$ ، بیان می‌شود:

$$B = 4 / [5.6 - \ln(100\beta)] \quad (۸-۵)$$

برای نسبت میرایی ۰/۰۵ مقدار  $B$  واحد است.



شکل ۵-۱- طیف طرح شتاب افقی

شایان ذکر است که در صورت نیاز به طیف طرح شتاب قائم (در حوزه دور زلزله) می‌توان طیف فوق را در ۰.۶۷ ضرب

کرده و به عنوان طیف قائم مورد استفاده قرار داد.

### ۵-۲-۲- فرآیند استفاده از شکل طیف حاصل از تحلیل خطر ویژه ساختگاه

فرآیند استفاده از شکل طیف حاصل از تحلیل خطر ویژه ساختگاه با دو روش صورت می‌پذیرد.

#### ۵-۲-۲-۱- روش استفاده از طیف خطر یکنواخت

با انجام تحلیل خطر ویژه ساختگاه و بدست آوردن مقادیر طیف برای دوره‌های تناوب مختلف در سطح خطر مدنظر، طیف خطر یکنواخت محاسبه می‌شود. استفاده از طیف خطر یکنواخت به شرطی مجاز است که مقدار این طیف کمتر از ۷۰ درصد طیف ثابت دستورالعمل بهسازی (بخش ۵-۲-۱-۲) نباشد.

برای لحاظ اثرات ساختگاهی در محاسبه طیف یکنواخت خطر روی سطح خاک می‌توان از دو راهکار زیر استفاده نمود:

- ۱- برآورد طیف خطر یکنواخت در سنگ بستر و محاسبه طیف خطر روی سطح خاک با لحاظ اثرات بزرگنمایی حاصل از مدلسازی رفتار دینامیکی خاک
- ۲- برآورد مستقیم طیف خطر یکنواخت در سطح خاک با بهره‌گیری از روابط کاهندگی که قادر به لحاظ اثرات ساختگاهی باشند

#### ۵-۲-۲-۲- روش استفاده از طیف طرح آماری

طیف طرح آماری ویژه ساختگاه پس از تکمیل تحلیل خطر و مطابق مراحل زیر تهیه می‌شود:

- ۱- انتخاب شتاب‌نگاشت‌های مناسب همخوان با زلزله کنترل کننده و متناسب با شرایط ژئوتکنیکی ساختگاه
- ۲- همپایه کردن شتاب‌نگاشت‌ها برحسب حداکثر دامنه شتاب به دست آمده از تحلیل خطر ویژه ساختگاه
- ۳- تهیه طیف پاسخ برای هر یک از شتاب‌نگاشت‌ها در نسبت میرایی ۵٪ یا درصد میرایی موردنیاز
- ۴- تحلیل آماری و به عنوان مثال محاسبه طیف میانگین یا میانگین به علاوه یک انحراف معیار طیف‌های پاسخ، جهت تهیه طیف طرح

استفاده از طیف طرح میانگین یا طیف طرح میانگین به علاوه یک انحراف معیار در صورتی مجاز است که مقدار این

طیف کمتر از ۷۰ درصد طیف ثابت دستورالعمل بهسازی (بخش ۵-۲-۱-۲) نباشد.

### ۵-۳- انتخاب شتاب‌نگاشت سازگار با خطر زلزله

هرگاه انجام تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی مدنظر باشد، لازم است حداقل سه جفت شتاب‌نگاشت افقی با رعایت شرایط زیر انتخاب و در تحلیل مورد استفاده قرار گیرد:

۱- بزرگا، فاصله و نیز سازوکار گسلش شتاب‌نگاشت‌ها، نزدیک به شرایط زلزله کنترل‌کننده ساختگاه باشد. زلزله کنترل‌کننده ساختگاه با انجام تحلیل تفکیک‌پذیری قابل تعیین است.

۲- با محاسبه مجذور حاصل جمع مربعات طیف پاسخ هر جفت شتاب‌نگاشت، یک طیف منفرد بدست می‌آید.

۳- شتاب‌نگاشت‌ها به نحوی مقیاس می‌شوند که طیف میانگین حاصل، در محدوده پریودی 0.2T تا 1.5T از 1.3 برابر طیف سازگار با سطح خطر مدنظر، کمتر نباشد (T معرف زمان تناوب اصلی سازه مورد نظر برای تحلیل دینامیکی است). طیف سازگار با سطح خطر به یکی از روشهای مندرج در بخش ۵-۲ ساخته می‌شود.

## مراجع

حسامی آذر، خالد. (۱۳۸۲)، نقشه گسل‌های فعال ایران، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

Abrahamson, N. and Silva, W. (2008) "Summary of the Abrahamson & Silva NGA Ground Motion Relations," *Earthquake Spectra* 24(1), 67–97.

Akkar, S. and Bommer, J.J. (2010). "Empirical Equations for the Prediction of PGA, PGV and Spectral Accelerations in Europe, the Mediterranean Region and the Middle East," *Seismological Research Letters* 81(2), 195-206.

Akkar, S. and Cagnan, Z. (2010). "A Local Ground-Motion Predictive Model for Turkey, and Its Comparison with Other Regional and Global Ground-Motion Models," *Bull Seismol Soc Am* 100, 2978–2995.

Ambraseys, N.N, Douglas, J., Sarma, S.K. and Smit, P.M. [2005]. "Equations for the Estimation of Strong Ground Motions from Shallow Crustal Earthquakes Using Data from Europe and the Middle East: Horizontal Peak Ground Acceleration and Spectral Acceleration," *Bulletin of Earthquake Engineering* 3, 1–53.

Ambraseys N., Melville C. (1982) *A history of Persian earthquakes*, Cambridge Univ. Press.  
Berberian, M. [1976] "Contribution to the seismotectonics of Iran (Part 2)," *Geological Survey of Iran*, Report 39.

Baker J.W. (2013). "An Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA)," White Paper, Version 2.0, 79 pp.

Boore, D. and Atkinson, G. [2008]. "Ground motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s," *Earthquake Spectra* 24(1), 99–138.

Campbell, K. and Bozorgnia, Y. [2008]. "NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5%-damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s", *Earthquake Spectra* 24(1), 139–171.

Chiou, B.S. and Youngs, R.R [2008]. "An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra," *Earthquake Spectra* 24(1), 173– 215.

Gardner JK, Knopoff L (1974) Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian? *Bull Seismol Soc Am* 64: 1363–1367

Ghasemi, H., Zare, M., Fukushima Y., Koketsu, K. [2009]. "An empirical spectral ground-motion model for Iran," *J. Seism.* doi 10.1007/s10950-008-9143-x.

Kijko, A., and Sellevoll, M. A. (1992), Estimation of Earthquake Hazard Parameters from Incomplete Data Files. Part II. Incorporation of Magnitude Heterogeneity, Bull. Seismol. Soc. Am. 82, 120–134.

Kalkan, E., and Gülkan, P. [2004]. “Site-dependent spectra derived from ground motion records in Turkey,” Earthquake Spectra 20(4), 1111–1138.

Reasenber PA (1985) Second-order moment of Central California seismicity. J Geophys Res 90:5479–5495. doi:10.1029/JB090iB07p05479

Scordilis EM (2006) Empirical global relations converting MS and mb to moment magnitude. J Seismol 10:225–236

Shoja-Taheri, J., Naserieh, S., and Ghofrani, H.,(2007). ML and MW scale in the Iranian Plateau base on the strong motion records. Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 97, No. 2, pp. 661-669.

Stepp, J.C., 1972. Analysis of completeness of the earthquake sample in the Puget Sound area and its effect on statistical estimates of earthquake hazard. Proc. of the 1st Int. Conf. on Microzonation, Seattle, vol. 2, pp. 897–910

Zafarani, H. and Soghrat, M. [2012a] “Simulation of ground motion in the Zagros region, Iran using the specific barrier model and stochastic method,” Bulletin of the Seismological Society of America 102.

**Islamic Republic of Iran**  
**Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision**

# **Guideline for Seismic Hazard Analysis**

**No. 626**

**Office of Deputy for Strategic Supervision**

**Department of Technical Affairs**

[nezamfanni.ir](http://nezamfanni.ir)

**2014**

## این نشریه

با عنوان "راهنمای کاربردی انجام تحلیل خطر زلزله" برای ایجاد وحدت رویه در انجام تحلیل خطر ویژه ساختگاه برای پروژه‌های بهسازی لرزه‌ای و نیز پروژه‌های مهم ساختمانی و صنعتی تدوین شده‌است و شامل چارچوب کلی تحلیل خطر زلزله، توصیه‌های کلی در خصوص جمع‌آوری و پردازش داده‌های پایه برای شناخت و مدلسازی چشمه‌های لرزه‌زا، توسعه مدل لرزه‌خیزی بر مبنای داده‌های پایه، انتخاب روابط کاهندگی و تشریح فرآیند تحلیل خطر احتمالی و تعیین می‌باشد. همچنین در خصوص روشهای تهیه طیف و انتخاب شتاب‌نگاشت نیز مطالبی ارائه شده است.