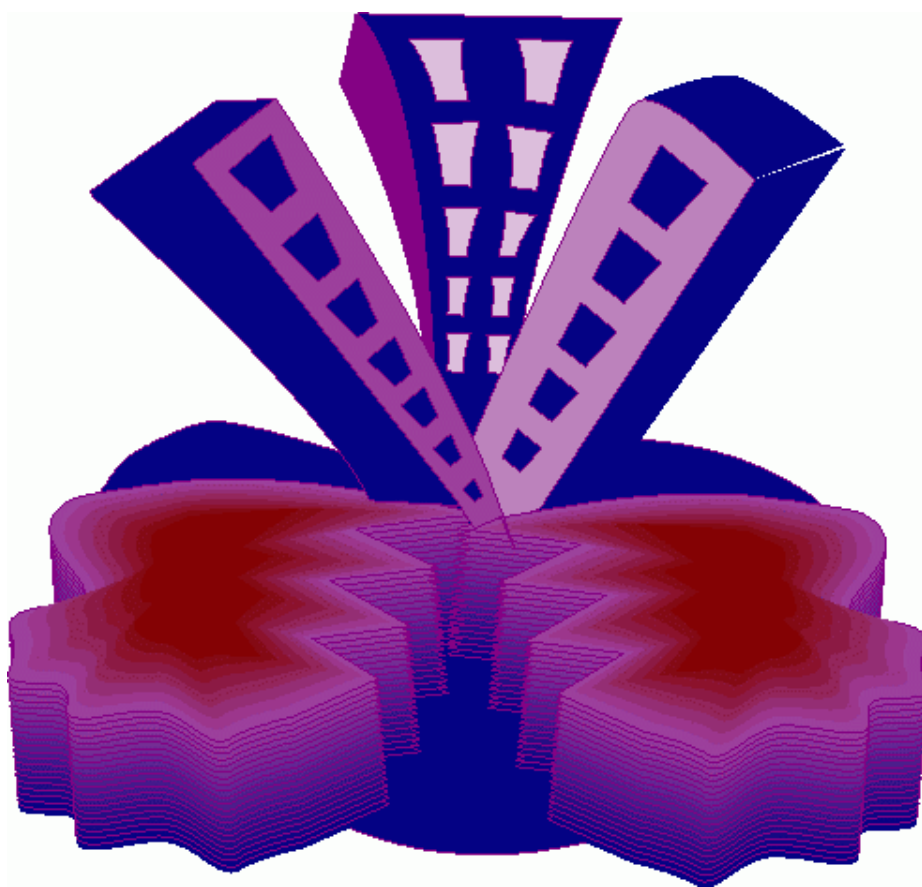


تحليل خطر زلزله



ترجمه و تالیف:

مهدی شاداب فر

تحليل خطر زلزله

تحليل خطر زلزله

ترجمه و تاليف: مهدي شاداب فر

گروه سازه و ژئوتكنيك، دانشگاه صنعت آب و برق (شهيد عباسپور)

پیشگفتار:

درس تحلیل خطر زلزله از جمله دروس مهم و اساسی در رشته مهندسی زلزله می باشد. نبود مرجعی مناسب به زبان فارسی نگارنده را بر آن داشت تا دست به ترجمه و تالیف کتاب حاضر بزند. در تالیف این کتاب از جزوات درسی جناب آقای دکتر عباس مهدویان، جناب آقای دکتر فرهاد دانشجو و جناب آقای دکتر مهدی زارع استفاده شده است که بدین وسیله از ایشان تقدیر و تشکر می گردد.

امید است که کتاب حاضر مفید بوده و مورد توجه دانشجویان و اساتید محترم قرار گیرد. در پایان، نگارنده از نظرات و پیشنهادات خوانندگان استقبال می کند.

با تشکر

مهدی شاداب فر

صفحه	عنوان
	فصل اول - مبانی تحلیل خطر زلزله
۱	۱-۱-مقدمه
۱	۲-۱-زلزله
۲	۳-۱-مدل های چشمه های لرزه ای
۳	۱-۳-۱-چشمه نقطه ای
۳	۲-۳-۱-چشمه خطی
۳	۳-۳-۱-چشمه پهنه ای یا سطحی
۳	۴-۱-گسل ها
۳	۱-۴-۱-گسل فعال
۶	۱-۱-۴-۱-مدلسازی گسل های فعال بر سطح زمین
۸	۲-۴-۱-گسل غیر فعال
۹	۳-۴-۱-گسل توانمند
۹	۴-۴-۱-گسل خزشی
۹	۵-۴-۱-گسل با فعالیت نامعلوم
۹	۶-۴-۱-گسل پنهان
۹	۷-۴-۱-خطرزائی
	فصل دوم - تحلیل خطر تعیینی
۱۱	۱-۲-مقدمه
۱۱	۲-۲-انواع مختلف بزرگهای زلزله
۱۱	۱-۲-۲-بزرگای محلی ریشتر (ML)
۱۱	۲-۲-۲-بزرگای سطحی (Ms)
۱۲	۳-۲-۲-بزرگای موج حجمی (Mb)
۱۲	۴-۲-۲-بزرگای گشتاوری (Mw)
۱۳	۳-۲-تکمیل بانک اطلاعاتی
۱۵	۴-۲-تحلیل خطر تعیینی
۱۵	۱-۴-۲-شناسائی چشمه های لرزه زا
۱۶	۱-۱-۴-۲-انواع فاصله های چشمه های لرزه زا تا سایت
۱۶	۲-۴-۲-تعیین زمین لرزه کنترلی برای پارامترهای جنبش زمین
۱۷	۱-۲-۴-۲-استفاده از درخت منطقی جهت برآورد زمین لرزه کنترلی
۱۸	۳-۴-۲-انتخاب روابط کاهندگی برای پارامترهای جنبش زمین
۱۸	۱-۳-۴-۲-رابطه کاهندگی بور
۱۹	۲-۳-۴-۲-رابطه کاهندگی بزرگنیا
۲۰	۴-۴-۲-محاسبه پارامترهای طراحی جنبش زمین
۲۱	۵-۲-یک مثال از تحلیل خطر تعیینی

فصل سوم- مفاهیم و توابع احتمالاتی مورد نیاز

۲۳	..... ۱-۳-مقدمه
۲۳	..... ۲-۳- تابع توزیع گوتنبرگ ریشتر
۲۳	..... ۳-۳- توابع توزیع مقادیر نهائی
۲۴	..... ۱-۳-۳- تابع توزیع تجمعی گامبل نوع I
۲۴	..... ۲-۳-۳- تابع توزیع تجمعی گامبل نوع III
۲۵	..... ۳-۳-۳- تابع توزیع تجمعی گامبل نوع S
۲۵	..... ۴-۳- توابع توزیع احتمال زمان
۲۵	..... ۱-۴-۳- تابع توزیع احتمال پواسون
۲۶	..... ۲-۴-۳- تابع توزیع احتمال دو جمله ای
۲۷	..... ۵-۳- مفاهیم دوره بازگشت، احتمال سالیانه وقوع و عدم وقوع زلزله
۲۸	..... ۶-۳- مفهوم ریسک وقوع زلزله

فصل چهارم- تحلیل خطر احتمالاتی

۳۰	..... ۱-۴-مقدمه
۳۰	..... ۲-۴- تحلیل خطر احتمالاتی
۳۰	..... ۱-۲-۴- شناسائی چشمه های لرزه ای و بررسی لرزه خیزی منطقه
۳۱	..... ۲-۲-۴- محاسبه رابطه فراوانی زلزله ها و بزرگای آنها و محاسبه چگالی و توزیع احتمال
۳۱	..... ۱-۲-۲-۴- وضعیت لرزه خیزی در هر ایالت لرزه خیز
۳۵	..... ۳-۴- مثالی از روش تحلیل خطر احتمالاتی

عنوان	صفحه
فصل اول - مبانی تحلیل خطر زلزله	
شکل ۱-۱ نقشه گسل ها و منحنی های هم شتاب	۲
شکل ۱-۲ مدل های چشمه های لرزه ای در یک ایالت لرزه زمین ساخت	۳
شکل ۱-۳ گسل ناشناخته که به علت ارتباط ساختاری با گسل فعال، فعال در نظر گرفته می شود	۴
شکل ۱-۴ تقسیم بندی گسل به قطعات کوچکتر	۵
شکل ۱-۵ ساخت سازه در قسمت های راست و چپ گسل	۵
شکل ۱-۶ استفاده از بلوک های کوچک در محل برخورد با گسل	۶
شکل ۱-۷ محل سایت سد	۶
شکل ۱-۸ گسل های A و B با دو زاویه مختلف	۷
شکل ۱-۹ پلان های قائم و افق از گسل ها	۸
شکل ۱-۱۰ گسل پنهان در یک منطقه آبرفتی	۹
فصل دوم - تحلیل خطر تعیینی	
شکل ۲-۱ اشباع شدگی انواع مختلف بزرگاها	۱۲
شکل ۲-۲ تعیین رابطه بین M_s و M_b جهت تکمیل بانک اطلاعات لرزه ای	۱۴
شکل ۲-۳ گام های روش تحلیل خطر تعیینی	۱۵
شکل ۲-۴ انواع فاصله های چشمه لرزه زا تا سایت مورد نظر	۱۶
شکل ۲-۵ موقعیت سایت و چشمه های لرزه زای اطراف آن	۲۱
فصل سوم - مفاهیم و توابع احتمالاتی مورد نیاز	
فصل چهارم - تحلیل خطر احتمالاتی	
شکل ۴-۱ گام های روش تحلیل خطر احتمالاتی	۳۱
شکل ۴-۲ رابطه برازش داده شده بین M و $\log(N_c)$	۳۴
شکل ۴-۳ موقعیت هندسی سایت و چشمه های لرزه ای	۳۶
شکل ۴-۴ تابع چگالی احتمال بزرگا برای چشمه خطی	۳۷
شکل ۴-۵ منحنی خطر زلزله برای چشمه خطی	۴۳
شکل ۴-۶ منحنی خطر کلی ساختگاه	۴۶

فصل اول - مبانی تحلیل خطر زلزله

فصل دوم - تحلیل خطر تعیینی

۱۳	جدول ۱-۲ بانک اطلاعاتی مربوط به یک سایت فرضی
۱۴	جدول ۲-۲ بانک اطلاعاتی تکمیل شده مربوط به یک سایت فرضی
۱۷	جدول ۳-۲ روش درخت منطقی جهت انتخاب زمین لرزه کنترلی
۱۹	جدول ۴-۲ تعیین ضرائب G_B و G_C با توجه به نوع خاک
۱۹	جدول ۵-۲ ضرائب رابطه کاهندگی بور برای محاسبه بزرگترین مؤلفه شتاب افقی
۲۰	جدول ۶-۲ ضرائب رابطه کاهندگی بزرگنیا
۲۰	جدول ۷-۲ دسته بندی نوع خاک در رابطه کاهندگی بزرگنیا
۲۰	جدول ۸-۲ دسته بندی مکانیزم گسلش در رابطه کاهندگی بزرگنیا
۲۱	جدول ۹-۲ فاصله چشمه های لرزه زا تا سایت
۲۲	جدول ۱۰-۲ نتایج اصل از رابطه کاهندگی برای چشمه های لرزه زا

فصل سوم - مفاهیم و توابع احتمالاتی مورد نیاز

فصل چهارم - تحلیل خطر احتمالاتی

۳۲	جدول ۱-۴ بانک اطلاعاتی با بزرگای $M_s \leq 5$ در شعاع ۲۰۰ کیلومتری از ساختگاه سد سفید رود تا سال ۱۹۹۰
۳۳	جدول ۲-۴ بزرگای زلزله در برابر تعداد تجمعی
۳۶	جدول ۳-۴ خصوصیات چشمه های لرزه ای
۳۷	جدول ۴-۴ حد فاصل بزرگاها برای چشمه خطی
۳۸	جدول ۵-۴ نتایج حاصل از رابطه کاهندگی جویبر-بور-فومال
۳۹	جدول ۶-۴ احتمال افزایش PGA از شتاب g 0.05
۳۹	جدول ۷-۴ احتمال افزایش PGA از شتاب g 0.1
۳۹	جدول ۸-۴ احتمال افزایش PGA از شتاب g 0.15
۴۰	جدول ۹-۴ احتمال افزایش PGA از شتاب g 0.2
۴۰	جدول ۱۰-۴ احتمال افزایش PGA از شتاب g 0.25
۴۰	جدول ۱۱-۴ احتمال افزایش PGA از شتاب g 0.3
۴۰	جدول ۱۲-۴ احتمال افزایش PGA از شتاب g 0.35
۴۱	جدول ۱۳-۴ احتمال افزایش PGA از شتاب g 0.4
۴۱	جدول ۱۴-۴ احتمال افزایش PGA از شتاب g 0.45
۴۱	جدول ۱۵-۴ احتمال افزایش PGA از شتاب g 0.5
۴۱	جدول ۱۶-۴ احتمال افزایش PGA از شتاب g 0.55

۴۲	..... جدول ۴-۱۷ احتمال افزایش PGA از شتاب 0.6 g
۴۲	..... جدول ۴-۱۸ احتمال افزایش PGA از شتاب 0.65 g
۴۳	..... جدول ۴-۱۹ احتمال رویداد یک زمین لرزه در یک چشمه خطی
۴۵	..... جدول ۴-۲۰ احتمال افزایش PGA از شتاب های مختلف برای چشمه های خطی و سطحی
۴۵	..... جدول ۴-۲۱ نتایج احتمال های محاسبه شده برای شتاب های مورد نظر

فصل اول - مبانی تحلیل خطر زلزله

۱-۱- مقدمه

در زلزله های ایران بیشتر خسارت وارد بر ساختمان ها، مربوط به ساختمان های با مصالح بنائی بوده است. البته دلیل این امر این است که مرکز زلزله های ایران در شهرهای بزرگ و پرجمعیت قرار نگرفته است و گرنه اکثر ساختمان های فلزی و بتنی نیز بشدت آسیب می دیدند.

خسارات وارد بر سازه ها در اثر زلزله ناشی از کاستی و ضعف در سه عامل زیر می باشد:

۱ - برآورد مشخصات زلزله بیشینه وارد بر سازه در طول عمر مفید آن

۲ - نحوه محاسبه و طراحی سازه در مقابل زلزله برآورد شده

۳ - کیفیت اجرا و نگهداری سازه در طول عمر مفید سازه

در درس تحلیل خطر زلزله، بر روی مورد اول متمرکز خواهیم شد.

۱-۲- زلزله

به طور کلی زمین لرزه ها در اثر افزایش تدریجی تنش و ایجاد گسیختگی^۱ در یک منطقه، به علت حرکت صفحات تکتونیک پوسته زمین به وجود می آیند. زیرا از نظر فیزیکی هر سنگ تا حد مشخصی توانائی ذخیره (تحمل) تنش را دارد و با رسیدن به آن حد از تنش، در منطقه مورد نظر یک گسیختگی همراه با جابجائی در گسل ایجاد شده و در اثر این جابجائی، امواج زلزله به وجود آمده و به اطراف محل گسیختگی منتشر می شوند.

بنابراین می توان گفت زمین لرزه ها با گسل ها در ارتباط هستند و بایستی علاوه بر بانک اطلاعاتی داده های لرزه ای در هر چشمه لرزه ای^۲ اطلاعات زمین شناسی و زمین ساختی گسل ها نیز گردآوری شود. با ترکیب اطلاعات حاصل از مطالعات زمین شناسی، زمین ساختی و داده های لرزه ای بر روی یک نقشه می توان نقاطی را تعیین نمود که از نظر توان لرزه زائی مستقل بوده و با مناطق مجاور خود اختلاف داشته باشند. به این مناطق ایالت های لرزه زمین ساختی^۳ یا به طور خلاصه ایالت های لرزه خیز می گویند. با توجه به مطالب بیان شده می توان گفت اساس کار در تحلیل خطر زلزله بر پایه دو گروه از داده هاست که می بایست درست انتخاب شوند:

۱ - نقشه های تکتونیک در محدوده طرح

۲ - اطلاعات زمین لرزه های گذشته در محدوده طرح

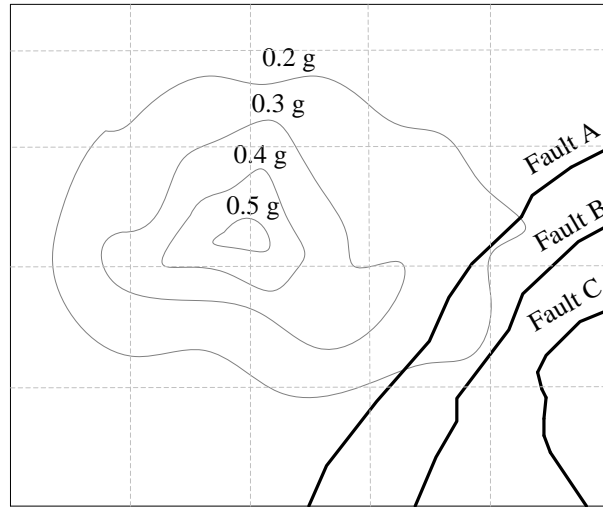
اگر گسل ها را شناسیم، منشا زلزله ها را نداریم و در نتیجه محل زلزله های آینده را نداریم.

¹ Rupture

² Seismic Sources

³ Seismotectonic Provinces

به اشتباه رایج در شکل زیر دقت کنید:



شکل ۱-۱ نقشه گسل ها و منحنی های هم شتاب

در این شکل که اثر بزرگنمایی خاک نیز در تهیه آن دیده نشده است، هر چه از گسل دور شده ایم شتاب هم بیشتر شده است. درک صحیحی از رفتار گسل ها از این گونه اشتباهات جلوگیری می کند.

سوال) محدوده طرح چیست؟ یعنی در چه محدوده ای باید گسل ها را بشناسیم؟

- پروژه های معمولی: در محدوده ۱۰۰ کیلومتر
- پروژه های مهم تر: در محدوده ۲۰۰ کیلومتر
- پروژه های حساس: در محدوده ۳۰۰ کیلومتر

۱-۳-مدل های چشمه های لرزه ای

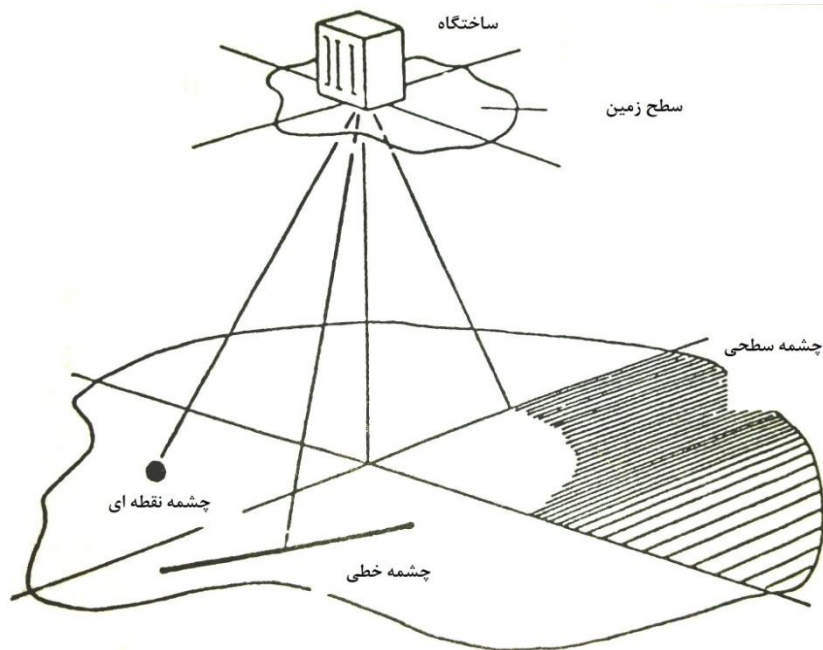
به طور کلی سه نوع چشمه لرزه ای داریم:

- ۱ - چشمه نقطه ای^۴
- ۲ - چشمه خطی^۵
- ۳ - چشمه پهنه ای یا سطحی^۶

^۴ Point Source

^۵ Line Source

^۶ Area Source



شکل ۱-۲ مدل های چشمه های لرزه ای در یک ایالت لرزه زمین ساخت

۱-۳-۱- چشمه نقطه ای

برای این نوع از چشمه لرزه ای، فرض می شود که مرکز همه رویدادهای زلزله (گذشته و آینده) در یک نقطه اتفاق می افتد. این مدل معمولاً برای چشمه هایی که از ساختگاه پروژه خیلی دور باشند به کار می رود. رابطه لرزه خیزی در این مدل تنها نسبت به زمان (فاصله زمانی داده ها) باید بهنجار شود.

۱-۳-۲- چشمه خطی

برای این نوع چشمه لرزه ای، فرض می شود که مرکز زمین لرزه ها در طول یک الگوی خطی قرار می گیرد. برای یک چشمه خطی روابط لرزه خیزی باید نسبت به زمان و طول خط بهنجار شوند.

۱-۳-۳- چشمه پهنه ای یا سطحی

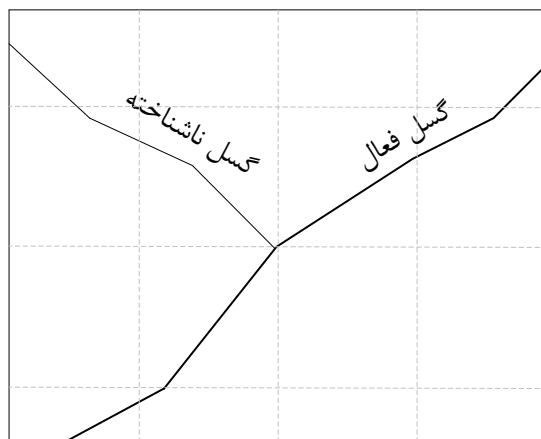
وقتی مرکز سطحی زمین لرزه های گذشته بر روی یک خط قرار نگیرند یا وقتی هیچ اطلاعاتی از مکان گسل ها وجود نداشته باشد ولی رویدادهای زمین لرزه در منطقه ای محدود پراکنده شده باشند چشمه لرزه ای به صورت یک چشمه پهنه ای در نظر گرفته می شود. برای یک چشمه پهنه ای رابطه لرزه خیزی باید نسبت به زمان و مساحت چشمه بهنجار شود.

۱-۴-۱- گسل ها

۱-۴-۱-۱- گسل فعال

در بین گسل هایی که در سایت شناسائی می شوند، می بایست گسل های فعال مشخص شوند. اما سوال اینجاست که چه گسل هایی را فعال می نامیم. تعریف دقیق و ثابتی از گسل فعال وجود ندارد و هر سازمان و استاندارد بنابر نظر خودش تعریفی را برای گسل فعال ارائه داده است. به عنوان مثال:

- کمیته بین المللی سد های بزرگ ایران: گسلی فعال است که در ۱۱۰۰۰ سال گذشته تا امروز فعالیت داشته باشد.
 - USCOLD: گسلی فعال است که در ۳۵۰۰۰ سال گذشته تا امروز فعالیت داشته باشد.
 - سازمان نیروگاههای هسته ای: گسلی فعال است که در ۵۰۰۰۰۰ سال گذشته تا امروز فعالیت داشته باشد.
- گاهی نیز گسلی را فعال می گوئیم که بتوانیم ارتباط ساختاری بین آن و یک گسل فعال در گذشته پیدا کنیم (شکل ۱-۳).

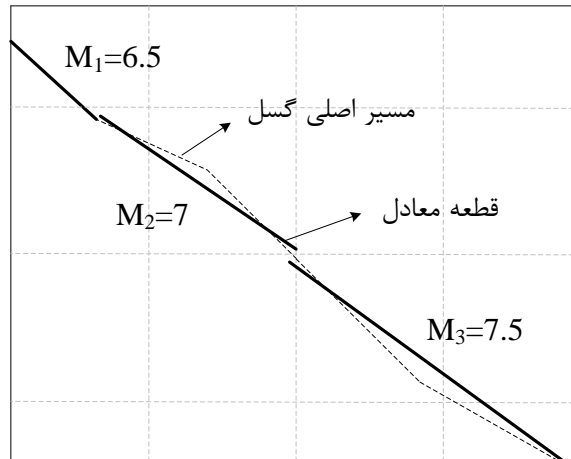


شکل ۱-۳ گسل ناشناخته که به علت ارتباط ساختاری با گسل فعال، فعال در نظر گرفته می شود.

اما به هر حال در تشخیص گسل های فعال می توان از موارد زیر استفاده کرد و آنها را مد نظر قرار داد:

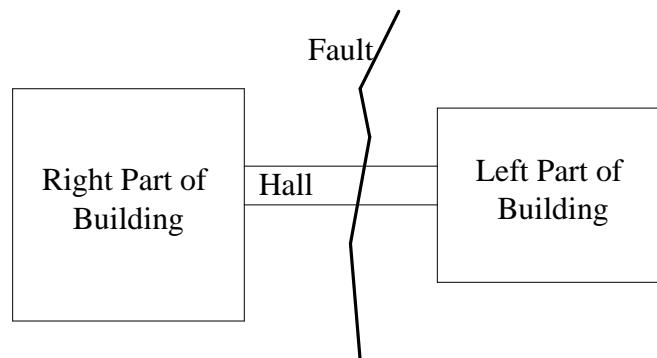
- پرتگاه ها مؤید وجود گسل فعال هستند.
- جابجائی در راستای آبراهها نشانه وجود گسل فعال هستند.
- ایجاد فرونشست ها نشانه وجود گسل فعال هستند.
- چاک ها و درزهای خالی نشانه وجود گسل فعال هستند.
- محل تجمع زلزله ها مؤید وجود گسل فعال در منطقه هستند.
- گسلی که رسوبات آبرفتی جوان را بریده باشد، گسل فعال است.
- گاهی گسل های فعال حرکت می کنند اما آثارشان به سطح زمین نمی رسد.
- گاهی حرکت گسل های فعال به صورت پیچ و خم سینوسی است.

حرکت گسل فعال یک حرکت یکنواخت نیست و همانند یک پازل، هر قطعه آن می تواند یک نوع حرکت داشته باشد. به این نوع حرکت block motion می گویند. از طرفی نیز گاهی نمی توان کل گسل را یک شاخه در نظر گرفت بلکه باید هر قطعه آن را یک گسل در نظر گرفت. به این کار segmentation یا قطعه بندی گسل می گویند. در این حالت باید برای هر قطعه یک بزرگا در نظر بگیریم و آن را در محاسبات وارد کنیم. (شکل ۱-۴)



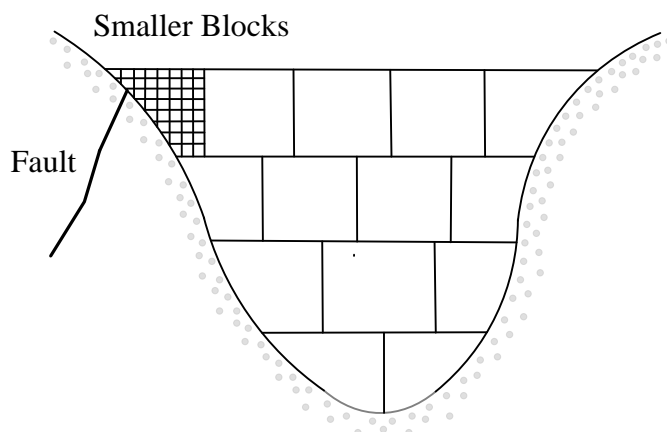
شکل ۴-۱ تقسیم بندی گسل به قطعات کوچکتر

به صراحت می توان گفت که می بایست از ساخت هر سازه ای روی گسل فعال دوری کنیم. اما در جاهائی که مجبوریم این کار را انجام دهیم می بایست مباحث ویژه مربوط به تاثیر گسلس بر سازه را مد نظر قرار دهیم. به عنوان مثال ساختمان کتابخانه ملی ایران در یک قسمت با گسل برخورد داشت. به همین دلیل طراحان تصمیم گرفتند که ساختمان های اصلی کتابخانه را در دو طرف گسل قرار داده و این دو را با یک راهرو به یکدیگر متصل کنند. (شکل ۵-۱)



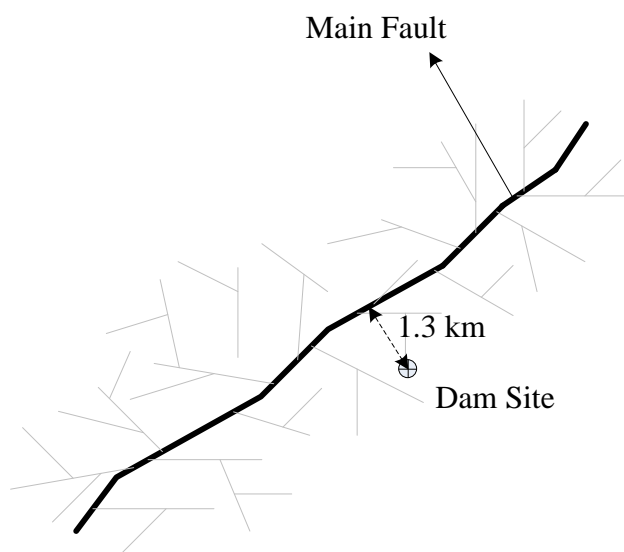
شکل ۵-۱ ساخت سازه در قسمت های راست و چپ گسل

در یک سد نیز گسلی در گوشه سمت چپ با سد برخورد داشت. به همین دلیل این قسمت از سد با بلوک های ریز ساخته شد تا قابلیت تحمل تغییر مکان گسل را داشته باشد.



شکل ۶-۱ استفاده از بلوک های کوچک در محل برخورد با گسل

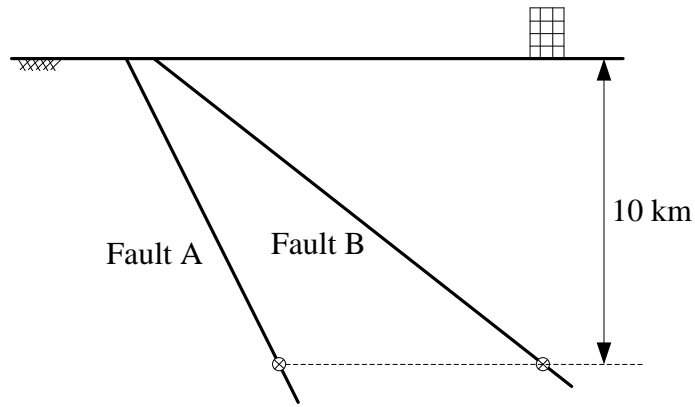
در یک دیگر از سدهای کشور نیز محل سد در فاصله ۱,۳ کیلومتری گسل اصلی و در محل گسل های فرعی قرار داشت. به همین دلیل طرح ساخت بدنه سد که سد بتنی دو قوسی بود به سد خاکی با روبه سنگریزه ای تغییر کرد. چون در سدهای خاکی بر عکس سدهای بتنی امکان تحمل تغییر مکان وجود دارد.



شکل ۷-۱ محل سایت سد

۱-۱-۴-۱- مدلسازی گسل های فعال بر سطح زمین

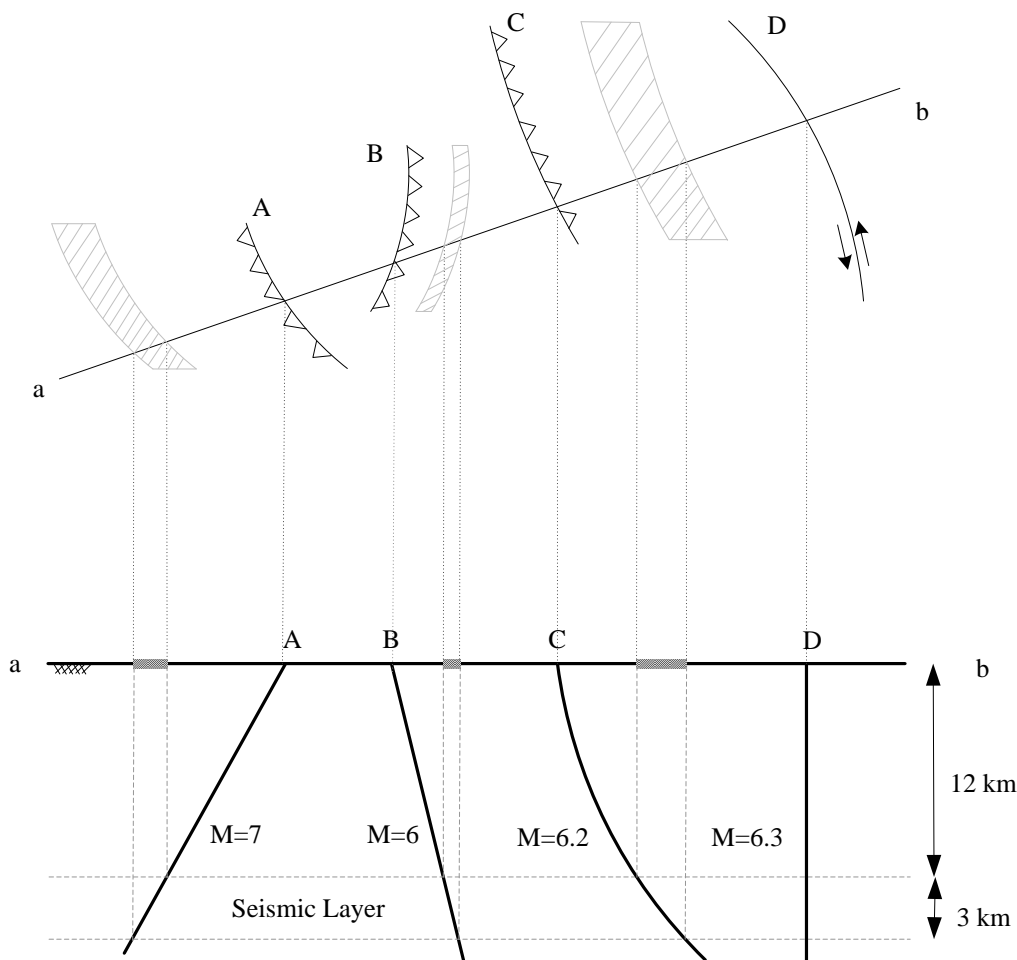
یکی از سوال های اساسی در برخورد با گسل ها این است که چرا زاویه گسل ها برای ما مهم است؟ برای پاسخ به این سوال به شکل زیر دقت کنید:



شکل ۸-۱ گسل های A و B با دو زاویه مختلف

همانطور که مشاهده می کنید در هر دو گسل A و B که محل آنها در سطح زمین تقریباً یکسان است، زلزله در یک عمق اتفاق افتاده است. اما محل وقوع زلزله در گسل B درست در زیر سازه قرار دارد و قطعاً اثر مخرب تری بر سازه خواهد داشت. به همین دلیل در برخورد با گسل ها زاویه آنها را نیز باید مد نظر قرار داد.

در نقشه های تکتونیکی تاثیر زاویه گسل را در تصویر آن بر سطح زمین می بینند. برای توضیح بیشتر به شکل ۹-۱ دقت کنید.



شکل ۹-۱ پلان های قائم و افق از گسل ها

همانطور که مشاهده می کنید، گسل ها در عمق 12 km لایه ای را به ضخامت 3 km قطع کرده اند. این لایه همان لایه ایست که زلزله ها در آن به وجود می آیند. این لایه را لایه لرزه زا^۷ می نامند. تصویر گسل ها در لایه لرزه زا بر روی زمین می تواند خط، نقطه یا یک سطح باشد. این تصویر تاثیر پذیری زیادی از زاویه گسل دارد.

هر چه عمقی که زلزله در آن اتفاق می افتد کمتر باشد، امواج زلزله در ناحیه کوچکتری توزیع می شوند اما شدت خرابی بیشتر خواهد بود و پارامترهای لرزه ای بزرگتر می باشند. به عنوان مثال یک زلزله با بزرگای ۵ ریشتر در عمق 5 km شتابی در حدود 0.6 g و در عمق 13 km شتابی به اندازه 0.3 g تولید خواهد کرد. اما معمولا زلزله های با بزرگای بالای ۷ ریشتر دارای عمقی بین ۱۵ تا ۲۰ کیلومتر هستند.

۱-۴-۲- گسل غیر فعال

گسلی را غیر فعال می گویند که یا مطمئن هستیم فعال نیست و یا اینکه طول گسل کمتر از 15 km است.

⁷ Seismic layer

۱-۴-۳- گسل توانمند

گسل های توانمند گسل هایی هستند که توان به وجود آوردن زلزله های قابل حس (با بزرگای بیش از ۳,۵ ریشتر) را دارند. گسل های فعال (که می توانند زلزله های با بزرگای ۱,۵، ۲، ۳ و ... هم تولید کنند) می توانند توانمند باشند یا نباشند.

۱-۴-۴- گسل خزشی

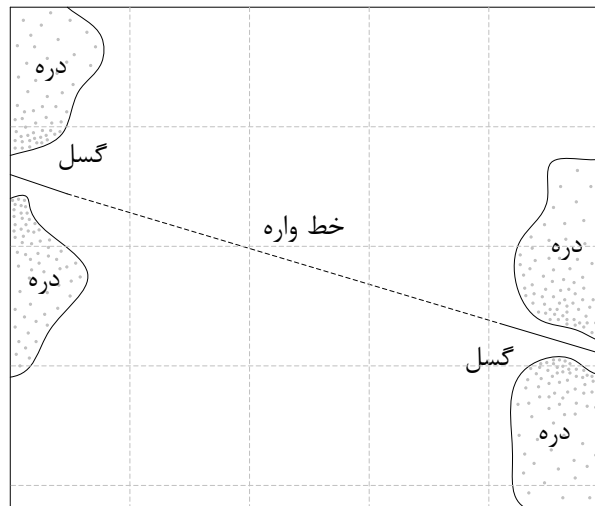
گسل هایی که توانائی ایجاد زلزله های قابل حس را ندارند، گسل های خزشی گویند. این گسل ها اگر در زیر ساختگاه قرار نگیرند، خطرناک نیستند.

۱-۴-۵- گسل با فعالیت نامعلوم

گسل های با فعالیت نامعلوم را مشروط بر اینکه دارای طولی بیش از 15 km باشند را در تحلیل خطر زلزله، به عنوان گسل فعال مد نظر قرار می دهیم.

۱-۴-۶- گسل پنهان

گاهی عکس های هوائی گسلی را پیدا نکرده اند، اما بر پایه تجربیات زمین شناسی حدس می زنند گسلی وجود داشته باشد. به گسل های پنهانی که بر این مبنا در در نقشه های تکتونیکی ترسیم وارد می شوند خط واره گویند. باید خط واره ها را شناخت اما عمدتاً دلیلی بر فعالیتشان وجود ندارد. (شکل ۱-۶)



شکل ۱-۱۰ گسل پنهان در یک منطقه آبرفتی

۱-۴-۷- خطر زائی

- اگر شتاب زلزله ای که گسل تولید می کند کمتر از 0.1 g باشدف گسل دارای خطر زائی کم است.

- اگر $0.1 \text{ g} < a < 0.25 \text{ g}$ باشد، گسل از نظر خطرزائی متوسط است.
- گسل هائی که می توانند شتابی بیش از 0.25 g تولید کنند و در فاصله بیش از 10 km سازه قرار داشته باشند، دارای درجه خطر زائی زیادند.
- اگر شتاب تولیدی گسل بیش از 0.25 g باشد و در محدوده 10 km ساختگاه قرار داشته باشد، دارای خطرزائی زیاد است.

فصل دوم - تحلیل خطر تعیینی^۸

۲-۱-۱- مقدمه

تحلیل خطر زلزله تخمین کمی خطرات لرزش زمین در یک محل بخصوص می باشد. در تحلیل خطر پذیری از پارامترهایی همچون فاصله، بزرگا، روابط کاهندگی، شرایط خاک محلی و ... استفاده شده و پارامتر مشخصی از حرکت زمین (مثلاً شتاب) در سایت مورد نظر پیش‌بینی می شود.

دو روش مختلف برای تحلیل خطر وجود دارد روش اول، روش تعیینی می باشد. در این روش همه پارامترها از جمله بزرگای تولید شده در چشمه و فاصله از سایت به طور قطعی انتخاب شده و سپس تحلیل خطر انجام می گیرد. اما در صورتی که بخواهیم عدم قطعیت‌ها را در عوامل فوق بپذیریم و بخواهیم تحلیل را با در نظر گرفتن موارد غیر قطعی انجام دهیم، روش دوم یعنی روش احتمالاتی^۹ را انتخاب می‌کنیم. از آنجائیکه زلزله و پدیده‌های مربوط به آن فرآیندهایی غیر قطعی می‌باشند روش احتمالاتی نتایج قابل استنادتری را عرضه می کند اما بدیهی است که حجم داده‌ها و زمان لازم برای انجام این روش بیشتر از روش تعیینی خواهد بود. در این فصل تحلیل خطر به روش تعیینی را بررسی می‌کنیم.

۲-۲-۱- انواع مختلف بزرگاهای زلزله

قبل از وارد شدن به موضوع تحلیل خطر زلزله می بایست با انواع بزرگاهای زلزله آشنا باشیم.

۲-۲-۱-۱- بزرگای محلی ریشتر (ML)

این بزرگا توسط Richter در سال ۱۹۳۵ معرفی گردید. در این روش دامنه حرکت زمین در فاصله ۱۰۰ کیلومتری محل وقوع زلزله توسط دستگاه لرزه نگار Wood-Anderson ثبت می شود. پس بزرگای محلی ریشتر به صورت لگاریتم مبنای ۱۰ دامنه لرزه‌نگار فوق در فاصله ۱۰۰ کیلومتری تعریف می گردد. این بزرگا براساس مشاهدات انجام شده در کالیفرنیا ابداع شده است. با توجه به اینکه بزرگای محلی محدود به زلزله‌های نسبتاً کوچک، سطحی و لرزه‌نگارهای کالیفرنیا یا اطراف آن است، نیاز به تعریف بزرگاهای دیگر برای سایر نقاط جهان که دربرگیرنده زلزله‌های بزرگتر و با عمق کانونی بیشتر و مبتنی بر سایر انواع لرزه‌نگارها باشد، احساس می‌شد.

۲-۲-۱-۲- بزرگای سطحی (Ms)

این بزرگا جهانی بوده و مبتنی بر دامنه اندازه‌گیری شده موج رایلی با پریود حدود ۲۰ ثانیه است. این بزرگا عمدتاً برای زلزله‌های مخرب به کار می‌رود. با این وجود با توجه به اینکه امواج رایلی در عمق‌های کانونی کمتر از ۷۰

^۸ Deterministic Seismic Hazard Analysis

^۹ Probabilistic Seismic Hazard Analysis

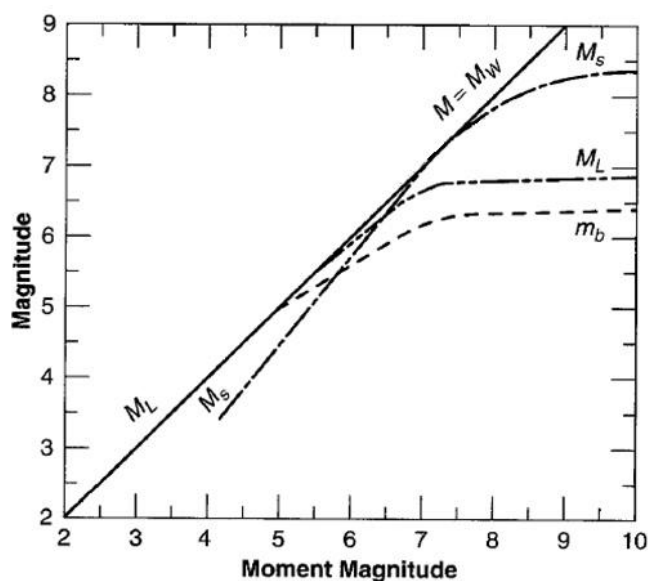
کیلومتر و در فواصل بیش تر ۱۰۰۰ کیلومتر به خوبی ایجاد می‌شوند، این بزرگا را نمی‌توان برای زلزله‌های کوچک محلی استفاده نمود.

۲-۲-۳- بزرگای موج حجمی (Mb)

این بزرگا نیز جهانی بوده و براساس دامنه اندازه‌گیری شده چند سیکل اول موج P بر روی مولفه قائم لرزه‌نگاشت می‌باشد. این امواج دارای پیرودی در حد ۱ ثانیه می‌باشند. این بزرگا بهترین بزرگا برای ثبت زلزله‌های عمیق است چراکه در زلزله‌های عمیق امواج P به خوبی ثبت می‌شوند. با این وصف کاربرد این بزرگا محدود است، زیرا آن دسته از امواج P که در زیر پوسته گسترش می‌یابند، در فواصل بیش از ۱۰۰۰ کیلومتر به راحتی ثبت می‌شوند. به علاوه با توجه به اینکه بزرگا براساس دامنه چند سیکل اول موج اندازه‌گیری می‌شود، برای زلزله‌های بسیار بزرگ کاربرد ندارد، زیرا در این زلزله‌ها ممکن است انرژی در سیکلهای بیشتری نیز تجمع داشته باشد. بنابراین این بزرگا برای زلزله‌های کوچک محلی و یا زلزله‌های خیلی بزرگ کاربرد ندارد.

۲-۲-۴- بزرگای گشتاوری (Mw)

با توجه به محدودیت‌های مختلف در بزرگاهای لرزه‌ای فوق، نیاز به بزرگایی است که برای کلیه بزرگاها، فاصله‌ها و مکان‌ها قابل استفاده باشد. به علاوه در بزرگاهای لرزه‌ای فوق مشکل اشباع شدن^{۱۰} به وجود می‌آید. به این معنی که هر بزرگا از یک مقدار مشخصی به بعد، ثابت می‌ماند و نمی‌تواند زلزله‌های مخرب‌تر از زلزله حد اشباع را شناسایی کند. این موضوع در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. بنابراین نیاز به بزرگایی است که مشکل اشباع نداشته باشد. این بزرگا براساس مفهوم گشتاور لرزه‌ای تعریف شده و کلیه نقایص فوق را مرتفع می‌سازد. بزرگای گشتاوری اساساً وابسته به جابجایی گسل، سطح گسیختگی و خواص مصالح ناحیه شکست می‌باشد.



شکل ۱-۲ اشباع شدگی انواع مختلف بزرگاها

¹⁰ Saturation

۲-۳- تکمیل بانک اطلاعاتی

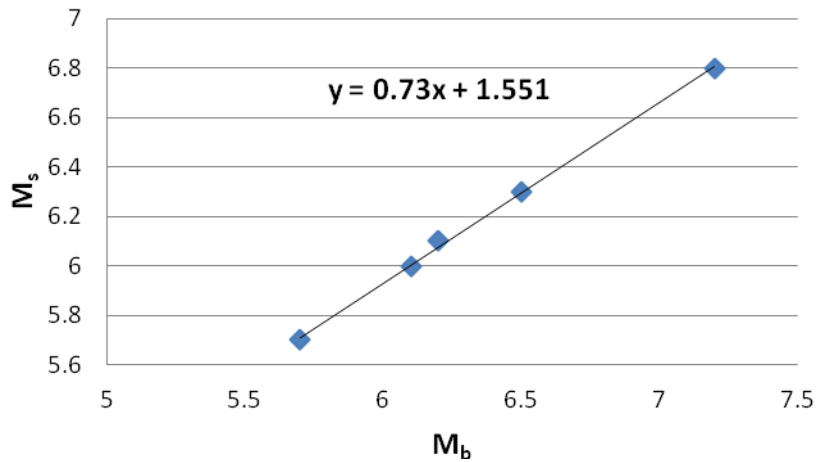
جهت انجام تحلیل خطر تعیینی نیاز به اطلاعات مربوط به زلزله های گذشته می باشد. این اطلاعات را که اصطلاحاً بانک اطلاعات لرزه ای می نامیم می بایست شامل بزرگای زلزله ها، تاریخ وقوع و محل وقوع آنها باشد. به عنوان مثال بخشی از بانک اطلاعاتی مربوط به یک سایت فرضی در جدول ۲-۱ نشان داده شده است.

جدول ۲-۱ بانک اطلاعاتی مربوط به یک سایت فرضی

بزرگای موج حجمی	بزرگای گشتاوری	فاصله از سایت		زمان رویداد			تاریخ رویداد		
		عرض جغرافیائی	طول جغرافیائی	ثانیه	دقیقه	ساعت	سال	ماه	روز
6.1	6.2	36	52.5	12	18	16	1385	مهر	5
5.8		37	49.5	20	45	17	1385	دی	24
6.3	6.5	36.17	51.72	24	52	10	1386	فروردین	8
	5.8	35.65	50.08	12	28	05	1386	خرداد	2
	6.9	35.09	50.25	50	34	03	1386	تیر	11
5.9		38.01	49.21	38	32	11	1386	شهریور	30
6.2		37.71	48.95	24	17	01	1386	آبان	17
5.3		36.94	49.27	59	57	18	1386	آذر	13
6.8	7.2	36.74	49.4	41	24	02	1386	اسفند	1
6.0	6.1	37.39	50.47	13	13	17	1387	اردیبهشت	9
	5.4	37.02	48.68	00	34	22	1387	مرداد	14
5.7	5.7	38.14	48.17	03	12	20	1387	شهریور	12

همانطور که در جدول ۲-۱ می بینید ممکن است اطلاعات مربوط به بزرگاهای مختلف ناقص باشد، از این رو می بایست با برازش یک رابطه^{۱۱} بین بزرگاهای مختلف، بانک اطلاعاتی را تکمیل کنیم. این کار برای جدول ۲-۱ انجام شده و با استفاده از رابطه بدست آمده تکمیل گردیده است. (شکل ۲-۲ و جدول ۲-۲)

¹¹ Correlation



شکل ۲-۲ تعیین رابطه بین M_b و M_s جهت تکمیل بانک اطلاعات لرزه ای

جدول ۲-۲ بانک اطلاعاتی تکمیل شده مربوط به یک سایت فرضی

بزرگای موج حجمی	بزرگای گشتاوری	فاصله از سایت		زمان رویداد			تاریخ رویداد		
		عرض جغرافیائی	طول جغرافیائی	ثانیه	دقیقه	ساعت	سال	ماه	روز
6.1	6.2	36	52.5	12	18	16	1385	مهر	5
5.8	5.8	37	49.5	20	45	17	1385	دی	24
6.3	6.5	36.17	51.72	24	52	10	1386	فروردین	8
5.8	5.8	35.65	50.08	12	28	05	1386	خرداد	2
7.3	6.9	35.09	50.25	50	34	03	1386	تیر	11
5.9	5.9	38.01	49.21	38	32	11	1386	شهریور	30
6.2	6.1	37.71	48.95	24	17	01	1386	آبان	17
5.3	5.4	36.94	49.27	59	57	18	1386	آذر	13
6.8	7.2	36.74	49.4	41	24	02	1386	اسفند	1
6.0	6.1	37.39	50.47	13	13	17	1387	اردیبهشت	9
5.3	5.4	37.02	48.68	00	34	22	1387	مرداد	14
5.7	5.7	38.14	48.17	03	12	20	1387	شهریور	12

رابطه بدست آمده بین M_b و M_s به فرم کلی زیر می باشد:

$$M_s = aM_b + b \quad (1-2)$$

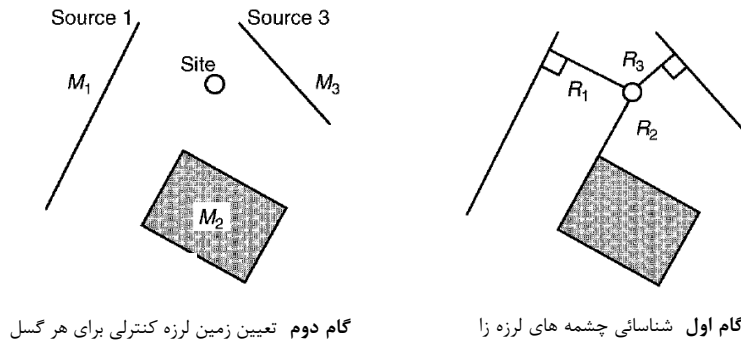
باید دقت کرد که محل مساوی شدن M_b و M_s در محدوده $5 < M_s < 6.5$ اتفاق بیفتد در غیر این صورت پراکندگی داده ها بسیار زیاد بوده و برای تحلیل خطر قابل استناد نمی باشند. به عنوان مثال برای رابطه نوشته شده در بخش قبل داریم:

$$M_s = 0.73M_b + 1.551 \rightarrow M_s = M_b \Rightarrow M_s = 0.73M_s + 1.551 \Rightarrow M_s = 5.74 \Rightarrow OK$$

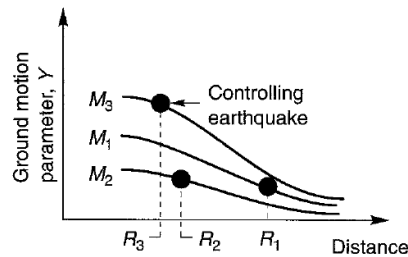
۲-۴-تحلیل خطر تعیینی

همانطور که در شکل ۲-۳ نیز نشان داده شده است، تحلیل خطر به روش تعیینی از چهار گام اصلی تشکیل می شود:

- شناسائی چشمه های لرزه زا
- تعیین زمین لرزه کنترلی برای هر گسل
- انتخاب روابط کاهندگی برای پارامترهای جنبش زمین
- محاسبه پارامترهای طراحی جنبش زمین



$$Y = \begin{Bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_N \end{Bmatrix}$$



گام سوم انتخاب روابط کاهندگی برای پارامترهای جنبش زمین گام چهارم محاسبه پارامترهای طراحی جنبش زمین

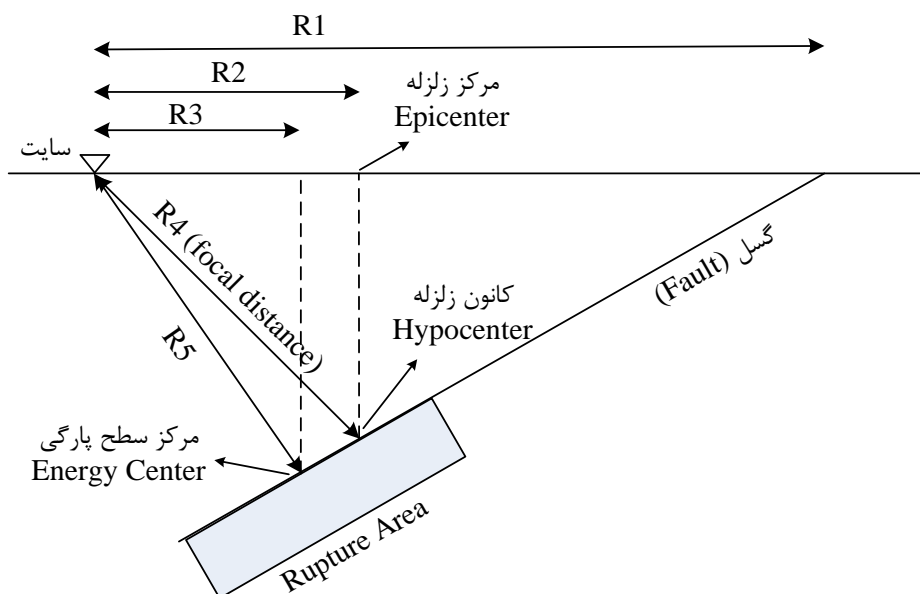
شکل ۲-۳ گام های روش تحلیل خطر تعیینی

۲-۴-۱-شناسائی چشمه های لرزه زا

در گام اول می بایست تمام چشمه های لرزه زا که امکان ایجاد خرابی در سایت مد نظر را دارند، شناسائی گردند. این شناسائی ها بر اساس نقشه های زمین شناسی معتبر، بازدیدهای محلی و همچنین از تفسیر داده های ژئوفیزیکی و زلزله شناسی حاصل می گردند. در این گام می بایست فاصله هر کدام از چشمه های لرزه زا تا سایت مورد نظر تعیین گردد. در ادامه انواع فاصله های چشمه های لرزه زا تا سایت را بررسی می کنیم.

۲-۴-۱-۱- انواع فاصله های چشمه های لرزه زا تا سایت

همانطور که در شکل ۲-۴ نیز مشاهده می کنید می توان ۵ نوع فاصله از چشمه لرزه زا تا سایت مورد نظر تعریف کرد.



شکل ۲-۴ انواع فاصله های چشمه لرزه زا تا سایت مورد نظر

معمولا روابط مورد استفاده در تحلیل خطر زلزله بر اساس فاصله کانونی (R4) می باشد اما با این وجود باید این موضوع را کنترل کنیم.

۲-۴-۲- تعیین زمین لرزه کنترلی برای پارامترهای جنبش زمین

زمین لرزه کنترلی مقدار حداکثر زمین لرزه ناشی از فعالیت گسل می باشد و با توجه به خصوصیات لرزه خیزی گسل و با استفاده از روابط تجربی محاسبه می شود. بعضی از این روابط تجربی عبارتند از:

$$M_s = 1.259 + 1.244 \log L, \quad L(m) \quad (2-2)$$

$$M_s = 5.4 + \log L, \quad L(km) \quad (3-2)$$

$$\text{رابطه ولز و کوپراسمیت: } \begin{cases} M_s = 5.16 + 1.12 \log L, & \text{گسل راستالغز} \\ M = 5 + 1.22 \log L, & \text{گسل معکوس} \\ M = 5 + 1.16 \log L, & \text{کلیه گسل ها} \end{cases} \quad L(km) \quad (4-2)$$

$$\text{رابطه سولماز: } \begin{cases} M = 1.404 + 1.16 \log L, & \text{گسل راستالغز} \\ M = 2.021 + 1.142 \log L, & \text{گسل معکوس} \\ M = 0.809 + 1.341 \log L, & \text{گسل نرمال} \end{cases} \quad L(m) \quad (5-2)$$

← نکته) با توجه به روابط بالا، گسل معکوس برآورد بیشتری از بزرگای زلزله انجام می دهد.

۲-۴-۱- استفاده از درخت منطقی^{۱۲} جهت برآورد زمین لرزه کنترلی

با استفاده از روابط بالا برای یک گسل چندین بزرگا محاسبه می شود. جهت انتخاب زمین لرزه کنترلی می بایست به هر کدام از این بزرگاها یک وزن اختصاص دهیم (به گونه ای که مجموع اوزان داده شده به همه بزرگاها یک شود). و سپس با ضرب این اوزان در بزرگاها و جمع آنها زمین لرزه کنترلی را انتخاب کنیم. به این روش، درخت منطقی گویند.

به عنوان مثال در جدول ۲-۳ فرض شده است که مقدار M از شش رابطه مختلف محاسبه شده است و با دادن وزن به هر کدام از این مقادیر زمین لرزه کنترلی انتخاب شده است.

جدول ۲-۳ روش درخت منطقی جهت انتخاب زمین لرزه کنترلی

رابطه	1	2	3	4	5	6
بزرگا	7.1	7.4	6.8	7.5	7	7.1
وزن	0.3	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1
بزرگا × وزن	2.13	1.48	0.68	0.75	1.4	0.71

$$M = 2.13 + 1.48 + 0.68 + 0.75 + 1.4 + 0.71 = 7.15 \approx 7.2$$

← نکته) در جدول بالا فرض بر این بوده است که بزرگای بدست آمده از رابطه اول همخوانی بیشتری با منطقه مورد مطالعه داشته است به همین جهت وزن بیشتری برای آن در نظر گرفته شده است.

← نکته) اگر برای یک گسل با استفاده از درخت منطقی زمین لرزه کنترلی را مثلا 7.4 بدست آوردیم اما زمین لرزه 7.6 برای آن رکورد شده بود، زمین لرزه 7.6 را به عنوان زمین لرزه کنترلی انتخاب می کنیم.

¹² Logic Tree

۲-۴-۳- انتخاب روابط کاهندگی برای پارامترهای جنبش زمین

با دور شدن از مرکز زمین لرزه، جنبش زمین با شدت کمتری احساس می شود و این مطلب نشان دهنده میرایی جنبش زمین می باشد. میزان این میرایی به عوامل مختلفی از جمله شرایط زمین شناسی و نوع حرکت گسل ربط دارد.

بنابراین میزان این میرایی در مناطق مختلف متفاوت می باشد و در نقاط مختلف دنیا مطالعات گسترده ای توسط محققان انجام شده و روابطی به نام روابط کاهندگی ارائه شده است. این روابط عموماً بر حسب بزرگای (M) و فاصله کانونی (R) می باشند و فرم کلی آنها به شکل زیر است.

$$Y = b_1 f_1(M) f_2(R) f_3(M, R) f_4(\rho) \varepsilon$$

که M بزرگای زمین لرزه، R فاصله چشمه تا ساختگاه، ρ مشخصات چشمه لرزه زا و مسیر انتقال موج و ε عبارت مربوط به خطا می باشد.

با استفاده از روابط کاهندگی مورد نظر، پارامتر حرکتی چشمه لرزه زا را در محل سایت تعیین می کنیم. در صورتی که برای یک گسل از بیش از یک رابطه کاهندگی استفاده کرده باشیم، می توانیم از روش درخت منطقی جهت استخراج نتیجه نهائی استفاده کنیم. برخی از مهمترین روابط کاهندگی در ادامه بیان می شوند.

۲-۴-۳-۱- رابطه کاهندگی بور^{۱۳}

این رابطه کاهندگی برای تخمین مؤلفه افقی جنبش زمین برای شمال غربی آمریکا و برای زمین لرزه های با $5 \leq M \leq 7.7$ و فاصله کمتر از ۱۰۰ کیلومتر تهیه شده است. رابطه کاهندگی بور از قرار زیر است:

$$\log(Y) = b_1 + b_2(M - 6) + b_3(M - 6)^2 + b_4 r + b_5 \log(r) + b_6 G_B + b_7 G_C + \delta_{\log(Y)} \quad (6-2)$$

که در رابطه بالا:

$$r \text{ برابر است با } (R^2 + h^2)^{1/2}$$

Y = پارامتر مورد محاسبه، اگر سرعت باشد، واحد آن cm/s و اگر شتاب باشد، واحد آن g خواهد بود.

M = بزرگای گشتاوری

R = کوتاهترین فاصله روی سطح زمین، از سایت مورد نظر تا گسل

G_B, G_C = ضرائب نوع خاک

¹³ Boore et al. (1997)

$$\delta_{\log(Y)} = \text{انحراف معیار}$$

$$h, b_1 \text{ تا } b_7 = \text{ضرائب ثابت}$$

دسته بندی خاک در این روش بر اساس سرعت موج برشی در ۳۰ متر اول خاک می باشد.

جدول ۲-۴ تعیین ضرائب G_B و G_C با توجه به نوع خاک

نوع خاک	دسته بندی	تعداد رکورد	
A	$V_{S30} > 750 \text{ m/s}$	48	$G_B = G_C = 0$
B	$360 < V_{S30} \leq 750 \text{ m/s}$	118	$G_B = 1, G_C = 0$
C	$180 < V_{S30} \leq 360$	105	$G_B = 0, G_C = 1$

برای بزرگترین مؤلفه افقی شتاب، ضرائب رابطه قبل به شکل زیر می باشند:

جدول ۲-۵ ضرائب رابطه کاهندگی بور برای محاسبه بزرگترین مؤلفه شتاب افقی

$b_1 = -0.038$	$b_2 = 0.216$	$b_3 = 0$	$b_4 = 0$	$b_5 = -0.777$	$b_6 = 0.158$	$b_7 = 0.254$	$h = 5.48$	$\delta = 0.205$
----------------	---------------	-----------	-----------	----------------	---------------	---------------	------------	------------------

۲-۳-۴-۲-۲ رابطه کاهندگی بزرگنیا^{۱۴}

رابطه کاهندگی بزرگنیا برای زمین لرزه های کم عمق پوسته ای با بزرگای $6 \leq M_w \leq 7$ استخراج شده است. این رابطه از قرار زیر می باشد:

$$\begin{aligned} \ln Y = & c_1 + c_2 M_w + c_3 (8.5 - M_w)^2 + c_4 \ln \left(\{ R_S^2 + [(c_5 S_{SH} + c_6 \{ S_{PS} + S_{SR} \}) + c_7 S_{HR}] \right. \\ & \left. \exp (c_8 M_w + c_9 (8.5 - M_w)^2) \}^{1/2} \right) + c_{10} F_{SS} + c_{11} F_{RV} + c_{12} F_{TH} + c_{13} S_{SH} + \\ & c_{14} S_{PS} + c_{15} S_{SR} + c_{16} S_{HR} \end{aligned} \quad (7-2)$$

که در رابطه بالا Y پارامتر مورد محاسبه می باشد که می تواند شتاب افقی تصحیح شده و نشده و همچنین شتاب قائم تصحیح شده و نشده باشد. سایر ضرائب نیز از قرار زیرند:

¹⁴ Bozorgnia et al. (2000)

جدول ۲-۶ ضرائب رابطه کاهندگی بزرگنیا

مؤلفه افقی شتاب تصحیح نشده	$c_1=-2.896$	$c_2=0.812$	$c_3=0$	$c_4=-1.318$	$c_5=0.187$	$c_6=-0.029$
	$c_7=-0.064$	$c_8=0.616$	$c_9=0$	$c_{10}=0$	$c_{11}=0.179$	$c_{12}=0.307$
	$c_{13}=0$	$c_{14}=-0.062$	$c_{15}=-0.195$	$c_{17}=-0.320$	$\sigma=0.509$	
مؤلفه افقی شتاب تصحیح شده	$c_1=-4.033$	$c_2=0.812$	$c_3=0.036$	$c_4=-1.061$	$c_5=0.041$	$c_6=-0.005$
	$c_7=-0.018$	$c_8=0.766$	$c_9=0.034$	$c_{10}=0$	$c_{11}=0.343$	$c_{12}=0.351$
	$c_{13}=0$	$c_{14}=-0.123$	$c_{15}=-0.138$	$c_{16}=-0.289$	$\sigma=0.465$	
مؤلفه قائم شتاب تصحیح نشده	$c_1=-2.807$	$c_2=0.756$	$c_3=0$	$c_4=-1.391$	$c_5=0.191$	$c_6=0.044$
	$c_7=-0.014$	$c_8=0.544$	$c_9=0$	$c_{10}=0$	$c_{11}=0.091$	$c_{12}=0.223$
	$c_{13}=0$	$c_{14}=-0.096$	$c_{15}=-0.212$	$c_{16}=-0.199$	$\sigma=0.548$	
مؤلفه قائم شتاب تصحیح شده	$c_1=-3.108$	$c_2=0.756$	$c_3=0$	$c_4=-1.287$	$c_5=0.142$	$c_6=-0.046$
	$c_7=-0.040$	$c_8=0.587$	$c_9=0$	$c_{10}=0$	$c_{11}=0.253$	$c_{12}=0.173$
	$c_{13}=0$	$c_{14}=-0.135$	$c_{15}=-0.138$	$c_{19}=-0.256$	$\sigma=0.520$	

دسته بندی نوع خاک در رابطه کاهندگی بزرگنیا از قرار زیر می باشد:

جدول ۲-۷ دسته بندی نوع خاک در رابطه کاهندگی بزرگنیا

Holocene Soil (HS)	رسوبات	$V_{S30}=290$ m/s	$S_{HS}=1$	$S_{PS}=0$	$S_{SR}=0$	$S_{HR}=0$
Pleistocene Soil (PS)	رسوبات قدیمی تر	$V_{S30}=370$ m/s	$S_{HS}=0$	$S_{PS}=0$	$S_{SR}=1$	$S_{HR}=0$
Soft Rock (SR)	سنگ نرم	$V_{S30}=420$ m/s	$S_{HS}=0$	$S_{PS}=0$	$S_{SR}=1$	$S_{HR}=0$
Hard Rock (HR)	سنگ سخت	$V_{S30}=800$ m/s	$S_{HS}=0$	$S_{PS}=0$	$S_{SR}=0$	$S_{HR}=1$

دسته بندی مکانیزم گسلش در رابطه کاهندگی بزرگنیا از قرار زیر می باشد:

جدول ۲-۸ دسته بندی مکانیزم گسلش در رابطه کاهندگی بزرگنیا

Strike Slip	$F_{TH}=0$	$F_{SS}=1$	$F_{RV}=0$
Reverse	$F_{TH}=0$	$F_{SS}=0$	$F_{RV}=1$
Thrust	$F_{TH}=1$	$F_{SS}=0$	$F_{RV}=0$

۲-۴-۴- محاسبه پارامترهای طراحی جنبش زمین

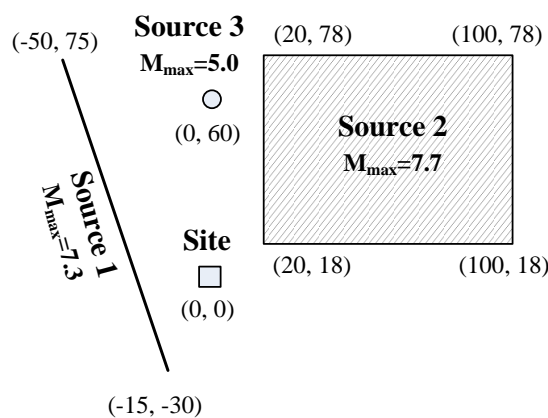
پس از طی کردن گام سوم، برای تمامی گسل های اطراف سایت مورد بررسی یک پارامتر حرکتی در محل سایت محاسبه می شود. بزرگترین پارامتر حرکتی محاسبه شده به عنوان خروجی روش تحلیل خطر تعیینی انتخاب می گردد.

◀ نکته) زلزله ای را که ماکزیمم پارامتر حرکتی در محل سایت را تولید می کند، زلزله سناریو می نامیم. و گسل مربوط به آن را گسل سناریو می نامیم.

◀ نکته) ممکن است زلزله سناریو دارای بزرگای کوچکتری نسبت به سایر زلزله ها باشد اما به دلیل فاصله کمتر یا شرایط مسیر متفاوت، تولید پارامتر حرکتی بیشتری کرده باشد.

۲-۵- یک مثال از تحلیل خطر تعیینی

مثال) سایت نشان داده شده در شکل ۲-۴ در همسایگی سه چشمه لرزه زا قرار دارد. با استفاده از روش تحلیل خطر تعیینی ماکزیمم شتاب در محل سایت را محاسبه کنید.



شکل ۲-۵ موقعیت سایت و چشمه های لرزه زا اطراف آن

گام ۱) شناسایی چشمه های لرزه زا

همانطور که در شکل نشان داده شده است، سه چشمه لرزه زا در اطراف سایت وجود دارند که کمترین فاصله هر یک از آنها از سایت از قرار زیر است.

جدول ۲-۹ فاصله چشمه های لرزه زا تا سایت

چشمه لرزه زا	فاصله تا سایت (km)
1	23.7
2	25
3	60

گام ۲) تعیین زمین لرزه کنترلی برای هر گسل

همانطور که در شکل نیز نشان داده شده است زلزله کنترلی چشمه های لرزه ای 1، 2 و 3 به ترتیب 7.3، 7.7 و 5 می باشند.

گام ۳) انتخاب روابط کاهندگی برای پارامترهای جنبش زمین

رابطه کاهندگی انتخاب شده در این مسئله رابطه کاهندگی کرنل^{۱۵} می باشد که از قرار زیر است:

$$\ln(PHA) = 6.74 + 0.859 M - 1.80 \ln(R + 25) \quad (8-2)$$

که در آن PHA ماکزیمم شتاب افقی زمین بر حسب g می باشد. با استفاده از این رابطه داریم:

جدول ۱۰-۲ نتایج اصل از رابطه کاهندگی برای چشمه های لرزه زا

چشمه لرزه زا	M	R (km)	PHA
1	7.3	23.7	0.42 g
2	7.7	25	0.57 g
3	5	60	0.02 g

گام ۴) محاسبه پارامترهای طراحی جنبش زمین

با توجه به جدول ۱۰-۲ ماکزیمم PHA ، 0.57 g بوده و ناشی از چشمه لرزه زای دوم می باشد.

¹⁵ Cornell et al (1979)

فصل سوم - مفاهیم و توابع احتمالاتی مورد نیاز

۳-۱- مقدمه

روش های آماری لازمه برآورد خطر زلزله می باشند و اساس کار چنین است که با استفاده از آمار زلزله های قبلی در یک ساختگاه و انتخاب یک مدل ریاضی، احتمال وقوع زلزله های با بزرگای مشخص در آینده برآورد می شود.

پدیده زلزله هم از نظر بزرگی و هم از نظر زمان وقوع آن فرآیندی تصادفی است، لذا جهت تجزیه و تحلیل داده های بانک اطلاعاتی و پیش بینی وضعیت آینده لازم است پس از دسته بندی و مرتب نمودن داده ها، برای بزرگای زلزله و همچنین برای زمان وقوع آن توابع توزیع مناسب انتخاب گردد.

در این فصل به توابع احتمالاتی پر کاربرد در تحلیل خطر زلزله می پردازیم.

۳-۲- تابع توزیع گوتنبرگ ریشتر^{۱۶}

این روش یکی از قدیمی ترین و در عین حال ساده ترین روش ها در برآورد پارامترهای لرزه خیزی می باشد. این روش هر کجا که آمار بزرگ-فرآوانی در دسترس باشد، قابل استفاده است. رابطه گوتنبرگ-ریشتر از قرار زیر است:

$$M = (a - \log N_c) / b \quad (1-3)$$

که در آن N_c تعداد زلزله های با بزرگای M و بیشتر در بازه زمانی T سال می باشد.

تابع توزیع گوتنبرگ ریشتر در گستره بزرگای بالا دقت خوبی نداشته و مقادیر بزرگتر از واقع از خود نشان می دهد به طوریکه به اعتقاد برخی از زلزله شناسان مقیاس بزرگا معنای خود را در بزرگاهای خیلی بالا به روش فوق از دست می دهد. از آنجا که با توجه به ساختار پوسته زمین حداکثر بزرگای زمین لرزه ها از ۹ ریشتر نمی تواند تجاوز کند، این سوال مطرح می شود که آیا نباید الگوی وقوع زمین لرزه ها بتواند بالاترین حد بزرگا را نشان دهد؟

۳-۳- توابع توزیع مقادیر نهائی^{۱۷}

نوردکوئیست^{۱۸} نشان داد که تئوری مقادیر نهائی را می توان در تخمین بیشینه بزرگای زمین لرزه مورد استفاده قرار داد. وی با بررسی زمین لرزه های بزرگ رویداده در دنیا و مناطق لرزه خیز نشان داد که احتمال وقوع زمین لرزه ها

¹⁶ Gutenberg-Richter

¹⁷ Extreme Value Distributions

¹⁸ Nordquist

را می توان از توابع تجمعی گامبل^{۱۹} محاسبه نمود. در این بخش به بررسی سه تابع که کاربرد بیشتری دارند می پردازیم.

نکته قابل توجه این است که در استفاده از این توابع می بایست به شرایط زیر دقت کرد. در غیر اینصورت تمامی محاسبات و نتایج حاصل اشتباه خواهند بود:

- آمار تعداد بزرگای زمین لرزه ها در سال به طور نمائی نسبت به بزرگا کاهش یابد.
- رویداد زمین لرزه ها مستقل از یکدیگر باشد. به عبارتی می بایست آمار پیش لرزه ها و پس لرزه ها از داده های بانک اطلاعاتی کنار گذاشته شود.

۳-۳-۱- تابع توزیع تجمعی گامبل نوع I

از این تابع زمانی استفاده می شود که حد بالای زمین لرزه ها (بیشینه زمین لرزه ها) مشخص نباشد. صورت کلی این تابع به شکل زیر می باشد:

$$P(M \leq M_i) = \exp \left\{ -C \cdot \exp \left(B \cdot (-M_i) \right) \right\} \quad (2-3)$$

که در این رابطه $P(M \leq M_i)$ احتمال رخداد زمین لرزه ای در سال با بزرگای کمتر یا مساوی M_i می باشد که از نظر احتمالاتی معادل احتمال عدم وقوع زلزله بزرگتر از M_i در هر سال می باشد. B و C نیز ضرایب ثابتی هستند که می بایست محاسبه شوند.

رابطه فوق را بر حسب شتاب زلزله نیز می توان بیان نمود:

$$P(a \leq a_i) = \exp \left\{ -C \cdot \exp \left(B \cdot (-\ln a_i) \right) \right\} \quad (3-3)$$

۳-۳-۲- تابع توزیع تجمعی گامبل نوع III

این تابع زمانی استفاده می شود که حد بالای زمین لرزه ها (بیشینه زمین لرزه ها) مشخص نباشد. صورت کلی این تابع به شکل زیر می باشد:

$$P(M \leq M_i) = \exp \left\{ -C \cdot \exp \left(B \cdot \ln(-M_{\max} - M_i) \right) \right\} \quad (4-3)$$

رابطه فوق بر حسب شتاب به شکل زیر تعریف می شود:

¹⁹ Gumbel

$$P(a \leq a_i) = \exp \left\{ -C \cdot \exp \left(B \cdot \ln(\ln a_{\max} - \ln a_i) \right) \right\} \quad (5-3)$$

۳-۳-۳- تابع توزیع تجمعی گامبل نوع S

این تابع که توسط هاول^{۲۰} ارائه گردید، به تابع توزیع نوع S معروف است. این تابع زمانی قابل استفاده است که علاوه بر مشخص بودن حد بالا و پائین زلزله، یک نقطه عطف (a_a or M_a) نیز وجود داشته باشد. نقطه عطف، زلزله ای بین زلزله حداکثر و مرز زلزله های محسوس (حدود ۵ ریشتر) فرض می شود که در ساده ترین روش تعداد زلزله های بزرگتر از آن با تعداد زلزله های کوچکتر از آن، در محدوده یاد شده مساوی است.

صورت کلی این تابع برای بزرگا و شتاب زلزله از قرار زیر است:

$$P(M \leq M_i) = \exp \left\{ -C \cdot \exp \left(B \times 0.5 \ln \left(\frac{M_{\max} - 2M_a + M_i}{M_{\max} - M_i} \right) \right) \right\} \quad (6-3)$$

$$P(a \leq a_i) = \exp \left\{ -C \cdot \exp \left(B \times 0.5 \ln \left(\frac{\ln a_{\max} - 2 \ln a_a + \ln a_i}{\ln a_{\max} - \ln a_i} \right) \right) \right\} \quad (7-3)$$

۳-۴- توابع توزیع احتمال زمان

نقص تابع توزیع گوتنبرگ-ریشتر و توابع توزیع مقادیر نهائی آن است که در محاسبه بزرگی زلزله و یا شتاب زلزله، درصد احتمال وقوع زلزله که معمولا موسسات تحقیقاتی و یا استانداردهای خاص توصیه می کنند، دخالتی ندارد. برای جبران این نقص از توابع توزیع احتمال وقوع زلزله استفاده می شود.

توابع مختلفی به عنوان تابع توزیع احتمال زمان، نظیر توزیع پواسون، توزیع دو جمله ای، توزیع گاما، توزیع وایبل و ... توسط محققین مورد آزمایش قرار گرفته و پس از اثبات کارائی آن ها مورد استفاده قرار گرفته اند. در این بخش به توضیح توابع توزیع پواسون و دو جمله ای که سادگی و مقبولیت بیشتری دارند می پردازیم.

۳-۴-۱- تابع توزیع احتمال پواسون

تابع توزیع احتمال پواسون که توسط کرنل پیشنهاد گردید به عنوان تابع چگالی احتمال زمان در برآورد خطر لرزه ای با سه فرض زیر قابل استفاده است:

²⁰ Howell

- احتمال اینکه بیش از یک رویداد لرزه ای در یک مکان و در یک زمان روی دهد نسبت به احتمال یک رویداد لرزه ای در همان مکان و زمان قابل چشم پوشی است. (احتمال بیش از یک رویداد لرزه ای در یک زمان و در یک مکان با احتمال یک رویداد مساوی است).
- در دو مقطع زمانی متفاوت تعداد رویدادهای لرزه ای از هم مستقل است.
- احتمال اینکه دقیقاً یک رویداد لرزه ای در یک فاصله زمانی کوچک (h) اتفاق بیفتد برابر $N.h$ است. که N میانگین زمین لرزه ها با بزرگای M و بیشتر می باشد.

صورت کلی تابع توزیع پواسون برای تعداد وقوع رویدادهای لرزه ای در یک دوره زمانی t ساله به شکل زیر است:

$$P_n(t) = \frac{(N.t)^n \exp(-N.t)}{n!} \quad (8-3)$$

که در این رابطه $P_n(t)$ احتمال وقوع n رویداد لرزه ای با بزرگای M و بیشتر در دوره زمانی t سال می باشد. اگر در رابطه فوق $n=0$ فرض شود، احتمال هیچ رویداد لرزه ای با بزرگای M و بیشتر در دوره زمانی t سال محاسبه می گردد.

$$P_0[M_t > M, t, n=0] = \exp(-N.t) \quad (9-3)$$

بنابراین می توان گفت احتمال اینکه حداقل یک رویداد لرزه ای با بزرگای M و بیشتر در دوره زمانی t سال اتفاق بیفتد برابر است با:

$$P[M_t > M, t, n > 1] = 1 - P_0 = 1 - \exp(-N.t) \quad (10-3)$$

۳-۴-۲- تابع توزیع احتمال دو جمله ای

معادله کلی این تابع به صورت زیر است:

$$P(x) = \frac{n!}{x!(n-x)!} p^x q^{n-x} \quad (11-3)$$

که در این رابطه $P(x)$ احتمال موفقیت x موفقیت از n آزمایش می باشد و p و q نیز به ترتیب احتمال موفقیت و عدم موفقیت در هر آزمایش می باشند.

حال اگر احتمال رویداد هیچ موفقیت در n آزمایش مورد نظر باشد خواهیم داشت:

$$x=0 \Rightarrow P(0) = q^n \quad (12-3)$$

حال اگر پارامترهای رابطه بالا را به شکل زیر تعریف کنیم، خواهیم داشت:

q = احتمال سالیانه عدم رویداد زلزله با بزرگای M و بیشتر از آن

$n=t$ = مدت عمر مفید سازه به سال

$P(x>1) = P_t$ = میزان احتمال حداقل یک زلزله با بزرگای M و بیشتر در مدت t سال

$$P(t) = 1 - q^t \quad (13-3)$$

۳-۵- مفاهیم دوره بازگشت، احتمال سالیانه وقوع و عدم وقوع زلزله

میانگین فاصله زمانی بین دو بار وقوع متوالی زمین لرزه با بزرگای M را "دوره بازگشت" آن زلزله می گویند. از نظر آماری احتمال وقوع سالیانه زلزله با بزرگای M برابر عکس دوره بازگشت آن زلزله می باشد، یعنی:

$$P = \frac{1}{T_R} \quad (14-3)$$

از آنجا که تمام توابع احتمالی برآورد خطر زلزله، فقط برای فراوانی تجمعی تعداد زلزله نوشته شده اند، لذا دوره بازگشت و احتمال سالیانه در تعریف فوق نیز بایستی بر اساس فراوانی تجمعی تعداد زلزله با بزرگای M و بیش از آن محاسبه گردند. بنابراین در رابطه با دوره بازگشت زلزله باید گفت که اگر در دامنه زمانی جمع آوری داده های بانک اطلاعاتی (T سال)، تعداد N_c زلزله با بزرگای M و بیشتر رخ داده باشد در آن صورت TR عبارتست از:

$$TR = \frac{T}{N_c} \quad (15-3)$$

و یا اینکه:

$$p = \frac{1}{TR} = \frac{N_c}{T} \quad (16-3)$$

به این ترتیب اثبات می شود که احتمال سالیانه وقوع زلزله در واقع همان میانگین تعداد وقوع زلزله در واد زمان می باشد.

$$N = \frac{N_c}{T} \Rightarrow p = N \quad (17-3)$$

مثال) در یک ایالت لرزه خیز در مدت زمان ۹۹ سال تعداد ۱۱ زلزله با بزرگای ۶ ریشتر و بیشتر از آن رخ داده است. مطلوبست محاسبه دوره بازگشت و احتمال سالیانه وقوع زلزله با بزرگای ۶ و بیشتر از آن.

$$T = 99, N_c = 11 \Rightarrow TR = \frac{T}{N_c} = \frac{99}{11} = 9$$

$$p = \frac{1}{TR} = \frac{1}{9} = 0.11$$

یعنی به طور متوسط در هر ۹ سال یک زلزله با بزرگای ۶ یا بزرگتر در ایالت مورد نظر رخ می دهد.

← نکته) اگر احتمال وقوع پیشامدی p باشد، احتمال عدم وقوع آن برابر با $p-1$ خواهد بود یعنی:

$$q = p - 1 \quad (18 - 3)$$

عدم وقوع زلزله با بزرگای M و بیشتر به آن مفهوم است که یا زلزله رخ نداده ($M_i=0$) و یا زلزله با بزرگای زلزله کمتر از M ($M_i < M$) رخ داده است. بنابراین احتمال عدم وقوع سالیانه زلزله با بزرگای M و بیشتر برابر احتمال سالیانه وقوع زلزله با بزرگای کوچکتر از M خواهد بود. یعنی:

$$q = P(M_i < M) \quad (19 - 3)$$

رابطه فوق در واقع همان احتمال مورد استفاده در توابع مقادیر نهائی است.

۳-۶- مفهوم ریسک وقوع زلزله

در اصطلاحات مهندسی زلزله، ریسک زلزله^{۲۱} به مفهوم احتمال وقوع زلزله با بزرگای M و بیشتر در مدت زمان مورد نظر می باشد. بنابر این ریسک زلزله در مدت t سال همان P_t یا احتمال وقوع زلزله با بزرگای M و بیشتر در مدت t سال خواهد بود که آن را با R_t نمایش می دهند.

با تبدیل P_t به R_t در روابط مربوط به توزیع احتمال پواسون و دوجمله ای، روابط زیر به دست می آیند:

$$R_t = 1 - \exp(-p.t) \quad (20 - 3)$$

$$R_t = 1 - q^t \quad (21 - 3)$$

که در این روابط p احتمال سالیانه وقوع زلزله، q احتمال سالیانه عدم وقوع زلزله و t مدت زمان مورد نظر (معمولا عمر مفید سازه) می باشد.

²¹ Seismic Risk

چون در عمل درصد ریسک زلزله (R_t) توسط آئین نامه ها مشخص می گردد لذا با مشخص بودن عمر مفید سازه (t) بایستی احتمال سالیانه وقوع زلزله (p) و یا احتمال عدم وقوع زلزله (q) محاسبه گردد تا طبق روابط موجود، مشخصات زلزله طراحی بدست آید. بنابراین از روابط فوق بایستی p و q بر حسب R_t و t محاسبه شود.

$$p = \frac{-Ln(t - R_t)}{t} \quad (22-3)$$

$$q = (1 - R_t)^{1/t} \quad (23-3)$$

از روابط فوق می توان جهت استفاده در توابع توزیع معرفی شده در بخش های قبل استفاده کرد.

از آنجائیکه در برخی موارد لازم است دوره بازگشت زلزله بر اساس ریسک وقوع آن محاسبه گردد، لذا در روش گوتنبرگ-ریشتر و توزیع پواسون خواهیم داشت:

$$TR = \frac{1}{p} \Rightarrow TR = \frac{1}{-Ln(1 - R_t)} \quad (24-3)$$

و در روش مقدار نهائی و توزیع دو جمله ای خواهیم داشت:

$$p = 1 - q, TR = \frac{1}{1 - q} \Rightarrow TR = \frac{1}{1 - (1 - R_t)^{1/t}} \quad (25-3)$$

مثال) دوره بازگشت زلزله سطح خطر یک با احتمال وقوع ۱۰ درصد در ۵۰ سال عمر مفید سازه را محاسبه کنید.

$$TR = \frac{1}{1 - (1 - R_t)^{1/t}} = \frac{1}{1 - (1 - 0.1)^{1/50}} = 473.9 \text{ year}$$

که این مقدار را حدوداً ۴۷۵ سال فرض می کنیم.

فصل چهارم - تحلیل خطر احتمالاتی^{۲۲}

۴-۱- مقدمه

همانطور که توضیح داده شد در تحلیل خطر احتمالاتی با جمع آوری اطلاعات لرزه خیزی منطقه، کلیه احتمالات و عدم قطعیت های موجود در بزرگا، محل و نرخ وقوع زلزله ها در محاسبات تحلیل خطر وارد می گردند.

۴-۲- تحلیل خطر احتمالاتی

همانند تحلیل خطر تعینی، تحلیل خطر احتمالاتی نیز از چهار گام تشکیل شده است. (شکل ۴-۱)

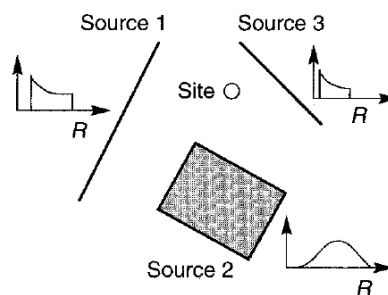
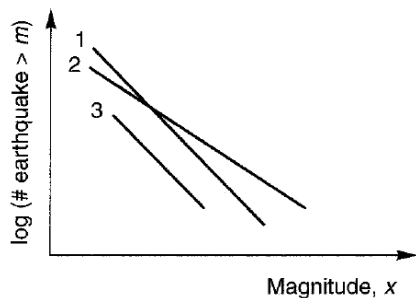
- شناسائی چشمه های لرزه ای و بررسی لرزه خیزی منطقه
- محاسبه رابطه فراوانی زلزله ها و بزرگای آنها و محاسبه چگالی و توزیع احتمال
- انتخاب رابطه کاهندگی
- محاسبه و بدست آوردن منحنی خطر لرزه ای سایت مورد نظر

۴-۲-۱- شناسائی چشمه های لرزه ای و بررسی لرزه خیزی منطقه

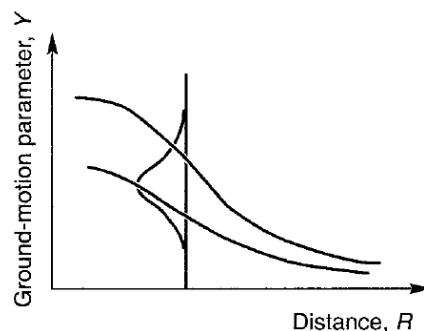
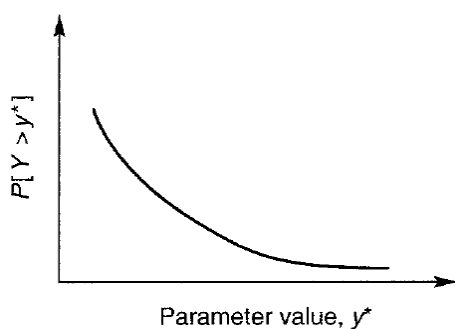
برای بررسی لرزه خیزی در محدوده مطالعاتی انتخاب شده، تمام زلزله های به وقوع پیوسته از بانک داده های لرزه ای استخراج می شوند. مشخصات و ویژگی های زمین لرزه های تاریخی با استفاده از کاتالوگ زمین لرزه های تاریخی و یا با استفاده از علم دیرینه لرزه شناسی به دست می آیند.

چشمه های لرزه ای و مکانیسم حرکتی و مشخصات هندسی آنها باید به گونه ای ساده شده که بتوان آن ها را به عنوان چشمه نقطه ای، خطی، سطحی و یا حجمی در نظر گرفت، تعیین شوند.

²² Probabilistic



گام اول شناسایی چشمه های لرزه ای و بررسی لرزه خیزی منطقه
گام دوم محاسبه رابطه فراوانی زلزله ها و بزرگای آنها و محاسبه چگالی و توزیع احتمال



گام چهارم محاسبه و بدست آوردن منحنی خطر لرزه ای سایت مورد نظر

گام سوم انتخاب رابطه کاهندگی

شکل ۴-۱ گام های روش تحلیل خطر احتمالاتی

۴-۲-۲- محاسبه رابطه فراوانی زلزله ها و بزرگای آنها و محاسبه چگالی و توزیع احتمال

در این گام به محاسبه رابطه بین فراوانی زلزله ها، توزیع بزرگای آن ها و محاسبه متوسط میزان رخداد زمین لرزه ها و تشکیل یک مدل برازشی می پردازیم. این موارد را تحت عنوان وضعیت لرزه خیزی در هر ایالت لرزه خیز و در قالب یک مثال ادامه می دهیم.

۴-۲-۲-۱- وضعیت لرزه خیزی^{۲۳} در هر ایالت لرزه خیز

برای تعیین وضعیت لرزه خیزی در یک ایالت لرزه خیز به سه پارامتر نیاز داریم:

- ۱- آهنگ فعالیت (N)
- ۲- ضریب لرزه خیزی (b)
- ۳- بیشینه بزرگای زلزله قابل رویداد (M_{max})

²³ Seismicity

برای محاسبه آهنگ فعالیت (N) و ضریب لرزه خیزی (b) از روشی به نام روش گوتنبرگ-ریشتر²⁴ استفاده می کنیم. برای استفاده از این روش ابتدا می بایست بانک اطلاعاتی ایالت لرزه خیز مورد نظر خود را گردآوری نمائیم. بانک اطلاعات لرزه ای می بایست شامل زلزله های به وجود آمده در ایالت لرزه ای و بزرگای گشتاوری آن ها باشد. نمونه ای از این بانک اطلاعاتی برای سد سفید رود در جدول ۴-۱ نمایش داده شده است.

جدول ۴-۱ بانک اطلاعاتی با بزرگای $M_s \geq 5$ در شعاع ۲۰۰ کیلومتری از ساختگاه سد سفید رود تا سال ۱۹۹۰

بزرگی زمین لرزه M_s	فاصله از سد (km)	مرکز سطحی زمین لرزه		زمان			تاریخ رویداد زمین لرزه		
		عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ثانیه	دقیقه	ساعت	سال	ماه	روز
5.4	106	36.39	50.48	00	29	12	1901	آوریل	20
5.6	456	36.58	47.65	00	18	05	1902	فوریه	9
5.9	88	37.48	48.96	00	56	16	1903	مارس	24
6.2	68	37	48.68	00	17	06	1905	ژانویه	9
5	159	38	48.5	12	28	00	1917	ژوئن	2
5.5	188	35.5	48	00	05	09	1924	نوامبر	8
5	188	35.5	48	20	45	17	1924	نوامبر	8
5	188	35.5	48	56	08	21	1924	نوامبر	10
5	188	35.5	48	40	53	15	1924	نوامبر	11
5	177	38.14	48.17	29	53	10	1928	مارس	24
5.5	19.4	36.59	49.44	31	08	14	1948	ژوئن	17
5	13.7	36.66	49.48	50	31	19	1948	ژوئن	30
5	84.5	36.5	48.5	50	34	03	1951	ژوئن	5
5.5	93.8	37.25	52.25	48	34	22	1956	آوریل	12
5.5	91.4	36	49	30	18	16	1985	سپتامبر	21
5.5	189	37	51.5	04	24	08	1959	مه	1
6.5	28.4	37	49.5	42	37	03	1960	ژوئن	23
7.2	123	35.17	49.81	00	30	19	1962	سپتامبر	1
5	130	35.59	49.33	04	12	07	1962	سپتامبر	2
5.3	137	35.6	49.9	12	30	13	1962	سپتامبر	4
5.5	130	35.74	50.09	38	23	10	1962	اکتبر	13
5	149	35.53	50.06	31	21	22	1962	دسامبر	2
5.5	126	35.7	49.9	00	38	17	1963	ژانویه	2
5.3	134	35.86	50.39	06	36	17	1964	نوامبر	3
5	135	36.16	50.17	14	14	03	1966	نوامبر	8
5.1	198	35.09	50.15	24	58	02	1968	آوریل	26

²⁴ Gutenberg-Richter (1985)

5.2	94	37.57	49.07	14	41	22	1970	ژوئیه	11
5	144	38	48.9	04	12	21	1972	ژانویه	18
5.4	148	38	50	15	56	04	1973	اوت	31
5	148	38	50	23	19	03	1975	اکتبر	20
5.2	142	38	49	34	42	07	1975	دسامبر	16
6.3	60.5	37	50	41	42	13	1978	مه	26
5	145	37	51	59	52	18	1978	نوامبر	3
6.1	112.6	37.71	48.95	20	22	15	1978	نوامبر	4
6.1	150	38.09	49.07	20	35	18	1980	مه	4
5.4	86	37.19	50.2	10	17	05	1980	ژوئیه	22
5.6	145	38.07	49.34	41	35	18	1981	اوت	4
5.6	28.2	36.59	49.18	01	41	02	1983	ژوئیه	22
7.7	1.5	36.75	49.4	-	-	21	1990	ژوئن	20
6.6	1.5	36.75	49.4	-	30	08	1990	ژوئن	21

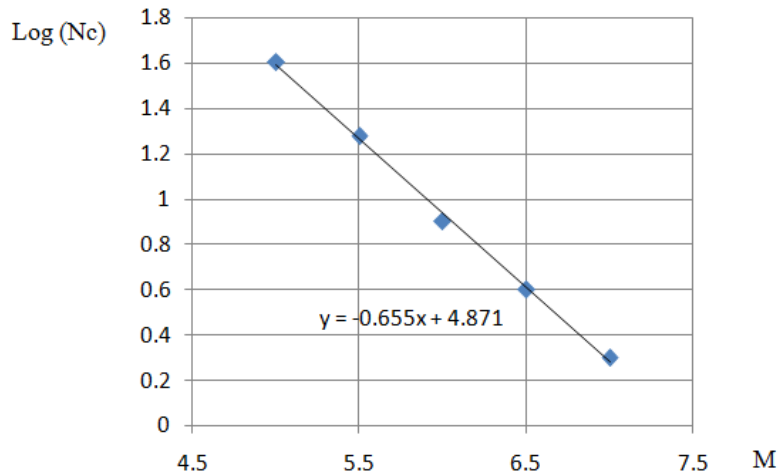
در گام بعد N_c یا فراوانی تجمعی تعداد زمین لرزه های با بزرگای M و بزرگتر را همانند جدول زیر تهیه می کنیم:

جدول ۴-۲ بزرگای زلزله در برابر تعداد تجمعی

بزرگای زلزله M	تعداد تجمعی N_c
7	2
6.5	4
6	8
5.5	19
5	40

سپس رابطه زیر را بین N_c و M برآزش می دهیم.

$$\text{Log } N_c = a - b \times M \quad (1-4)$$



شکل ۴-۲ رابطه برازش داده شده بین M و $\text{Log}(N_c)$

بدین ترتیب مقادیر a و b محاسبه می شوند. در اینجا داریم:

$$a = 4.871 \quad \text{and} \quad b = 0.655$$

← نکته) با تغییر دامنه زمان جمع آوری اطلاعات، T ، (که در پروژه مورد بررسی ما ۹۰ سال بود)، ضرائب a و b تغییر می کنند. برای گریز از این مشکل اصطلاحاً رابطه لرزه خیزی را نسبت به زمان بهنجار می کنند، یعنی به جای برازش منحنی بین N_c و M منحنی گوتنبرگ-ریشتر را بین M و $N = N_s/T$ برازش می دهند. با این کار نتایج در واحد زمان ارائه می شوند.

← نکته) می توان ضرایب a و b را برای یک گسل هم تعیین کرد. در این صورت بهتر است اطلاعات خود را نسبت به طول و یا مساحت گسل هم بهنجار کنیم.

← نکته) b ضریب لرزه خیزی نامیده می شود، چرا که کاهش مقدار b در طول یک دوره زمانی مشخص نشاندهنده افزایش درجه بزرگی زلزله قابل رویداد خواهد بود. به عبارتی کاهش b به معنای زیاد بودن زلزله های با بزرگای بالا یا کم بودن زلزله های با بزرگای پایین بوده است.

همچنین محققین نشان داده اند که با افزایش تنش (انرژی کرنشی) در سنگ ها مقدار b کاهش می یابد. یعنی اگر توانائی تولید زلزله های بزرگ زیاد باشد، b کم خواهد بود. در واقع تغییرات منطقه ای در مقدار b نشان دهنده تغییر مقدار تنش در پوسته زمین می باشد.

← نکته) خط گوتنبرگ ریشتر همواره با محور افقی (بزرگای زلزله) متقاطع خواهد بود. این یعنی اینکه توان حداکثر زمین لرزه هر ایالت مقدار مشخصی است.

← نکته) b برای مناطق مختلف در محدوده 0.5 تا 1.5 تغییر می کند، اما تغییرات a بسیار زیاد است.

← نکته) آهنگ فعالیت، N ، که در ابتدای کار ذکر شد عبارتست از تعداد متوسط زمین لرزه ها در واحد زمان و مکان.

← نکته) مهاجر، اشجعی و نوروزی بر اساس مطالعات لرزه خیزی ایران، مقادیر a و b را به صورت حدودی به ترتیب 5.4 و 1 بیان کرده اند.

برای محاسبه بیشینه بزرگای قابل رخداد نیز یک بار از بنک اطلاعاتی بزرگترین زلزله رخ داده را می خوانیم و یک بار هم با توجه به طول گسیختگی گسل و با استفاده از روابط تجربی موجود بین طول گسیختگی و بزرگا، بیشینه بزرگای قابل رخداد را استخراج می کنیم. هر کدام از این دو که بیشتر بود را به عنوان M_{max} انتخاب می کنیم.

به طور کلی این روابط تجربی به فرم $M=a+\log(L)$ می باشد. که L طول گسیختگی گسل²⁵ است.

سوال) چرا در روابط تجربی بین بالا، تنها از طول گسیختگی گسل استفاده می شود؟

از آنجائیکه تمام طول گسل در امر ذخیره سازی انرژی و آزاد نمودن آن (وقوع زمین لرزه) دخالت ندارد، فقط طول گسیختگی گسل در رابطه $M=a+\log(L)$ وارد می شود.

← نکته) تحقیقات سلمونز²⁶ مبین این مسئله است که برای گسل های با طول 300 تا 1300 کیلومتر، طول گسیخته شده بین 17 تا 37 درصد می باشد و هر چه طول گسل بیشتر می شود میزان گسیختگی گسل نسبت کمتری با طول آن دارد. البته تعیین دقیق طول گسیختگی در یک گسل کار مشکلی است و نیاز به مطالعات خاص دارد.

ادامه روش تحلیل خطر احتمالاتی را در قالب یک مثال بررسی می کنیم.

۴-۳-مثالی از روش تحلیل خطر احتمالاتی

مثال) همانطور که در شکل ۴-۳ نشان داده شده است، ساختمانی با دو چشمه خطی و سطحی مفروض است. سرچشمه خطی به سه قطعه مساوی و سرچشمه سطحی به چهار قسمت مساوی (از نظر ابعاد) تقسیم شده است. فاصله سایت تا وسط هر کدام از قطعات با R_1 تا R_6 نشان داده شده اند (جدول ۴-۳). مقدار بیشینه بزرگا برای چشمه خطی 7.5 و برای چشمه سطحی 6.5 محاسبه شده است. با فرض رابطه کاهندگی جویئر-بور-فومال که از قرار زیر است، تحلیل خطر احتمالاتی را انجام دهید.

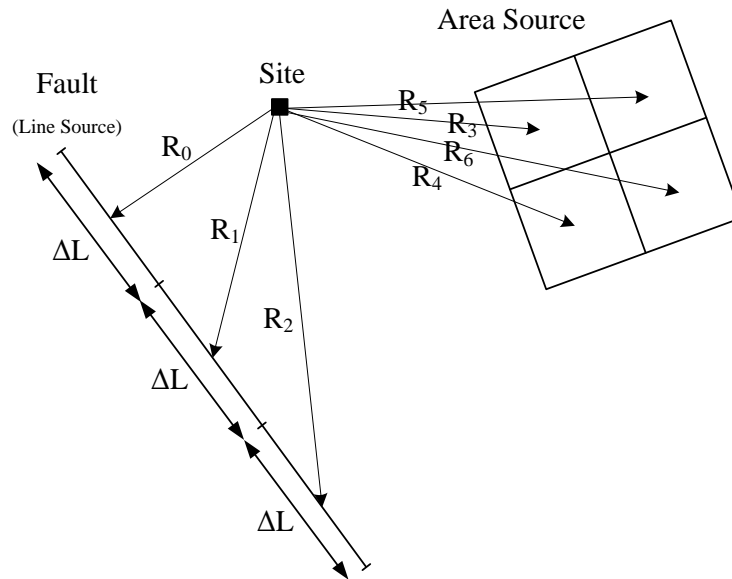
$$\text{Log } PGA = -0.038 + 0.216(M_{mid} - 6) - 0.777 \text{Log} \left(\sqrt{R^2 + 30.03} \right) \quad (2-4)$$

²⁵ Rupture Length

²⁶ Slemmons (1982)

جدول ۳-۴ خصوصیات چشمه های لرزه ای

	Ln (N ₁)=a-b M					
Line Source 1	a=1.29	b=1.32	L=30 km	ΔL=10 km		
	R ₀ =15 km	R ₁ =18 km	R ₂ =24 km	M _{max} =7.5	M _{min} =5	
	Ln (N ₂)=a-b M					
Line Source 2	a=-5.89	b=0.95	A=400 km ²	ΔA=100 km ²		
	R ₃ =22 km	R ₄ =28 km	R ₅ =32 km	R ₆ =37 km	M _{max} =6.5	M _{min} =5



شکل ۳-۴ موقعیت هندسی سایت و چشمه های لرزه ای

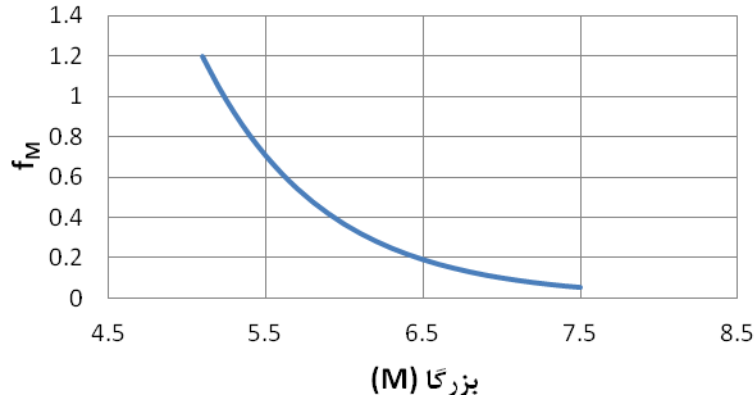
برای چشمه خطی ۱ داریم:

$$\ln N_1 = a - bM$$

$$a = 1.29, b = 1.32, M_0 = 5, M_{\max} = 7.5$$

$$f_M(m) = \frac{b \exp(-b(M - M_0))}{1 - \exp(-b(M_{\max} - M_0))} = \frac{1.32 \exp(-1.32(M - 5))}{1 - \exp(-1.32(7.5 - 5))} = 1.37 \times \exp(-1.32(M - 5))$$

بنابراین تابع چگالی احتمال بزرگ برای چشمه خطی به شکل زیر می باشد:



شکل ۴-۴ تابع چگالی احتمال بزرگا برای چشمه خطی

با در نظر گرفتن حدفاصل های $\Delta M=0.5$ برای بزرگا، مرکز هر حد فاصل (M_{mid}) را در ادامه مورد استفاده قرار می دهیم.

جدول ۴-۴ حد فاصل بزرگاها برای چشمه خطی

$\Delta M=0.5$	
$5.0 < M < 5.5$	$M_{mid0}=5.25$
$5.5 < M < 6.0$	$M_{mid1}=5.75$
$6.0 < M < 6.5$	$M_{mid2}=6.25$
$6.5 < M < 7.0$	$M_{mid3}=6.75$
$7.0 < M < 7.5$	$M_{mid4}=7.25$

احتمال اینکه بزرگای رویداد زلزله در حد فاصل های قبل بیفتد، به شکل زیر بدست می آید:

$$P\left(M_{mid} - \frac{\Delta M}{2} < M < M_{mid} + \frac{\Delta M}{2}\right) = f_M(M_{mid}) \cdot \Delta M$$

$$P(5.0 < M < 5.5 | EQ) = f_M(M_{mid0}) \cdot \Delta M = f_M(5.25) \times 0.5 = 0.493$$

$$P(5.5 < M < 6 | EQ) = f_M(M_{mid1}) \cdot \Delta M = f_M(5.75) \times 0.5 = 0.255$$

$$P(6 < M < 6.5 | EQ) = f_M(M_{mid2}) \cdot \Delta M = f_M(6.25) \times 0.5 = 0.132$$

$$P(6.5 < M < 7 | EQ) = f_M(M_{mid3}) \cdot \Delta M = f_M(6.75) \times 0.5 = 0.068$$

$$P(7.0 < M < 7.5 | EQ) = f_M(M_{mid4}) \cdot \Delta M = f_M(7.25) \times 0.5 = 0.035$$

$$\sum f_M(M_{mid}) \Delta M = 0.493 + 0.255 + 0.132 + 0.068 + 0.035 \approx 1 \quad OK$$

گام ۳) تخمین جنبش شدید زمین با استفاده از رابطه کاهندگی

از رابطه کاهندگی جویئر-بور-فومال که از فرار زیر است، استفاده می کنیم.

$$\text{Log } PGA = -0.038 + 0.216(M_{mid} - 6) - 0.777 \text{Log} \left(\sqrt{R^2 + 30.03} \right)$$

$$\sigma_{\text{Log } PGA} = 0.205$$

به عنوان مثال تعیین PGA متوسط برای $M=5.25$ در فاصله $R=15 \text{ km}$ به شکل زیر می باشد:

$$\text{Log } PGA = -0.038 + 0.216(5.25 - 6) - 0.777 \text{Log} \left(\sqrt{15^2 + 30.03} \right) = -1.135$$

$$PGA = 10^{-1.135} = 0.073 \text{ g}$$

جدول ۴-۵ نتایج حاصل از رابطه کاهندگی جویئر-بور-فومال

	R=15 km	R=18 km	R=24 km
M=2.25	0.073	0.065	0.052
M=5.75	0.094	0.083	0.067
M=6.25	0.121	0.106	0.086
M=6.75	0.155	0.136	0.11
M=7.25	0.198	0.174	0.142

گام ۴) محاسبه و بدست آوردن منحنی خطر لرزه ای سایت مورد نظر

در این قسمت می خواهیم احتمال اینکه PGA از شتاب مورد نظر در هر ترکیب بزرگ-فاصله بیشتر شود را تعیین کنیم. شتاب مورد نظر در حد 0.05 g تا 0.65 g با گام های 0.05 g مورد محاسبه قرار می گیرد. برای انجام این کار از فرمول زیر استفاده می کنیم:

$$P(PGA < a | EQ : R, M) = \phi \left(\frac{\text{Ln}(a) - \lambda}{\xi} \right)$$

$$\lambda = E(\text{Ln}(PGA))$$

$$\xi = \sigma(\text{Ln}(PGA))$$

$$P(PGA > a | EQ : R, M) = 1 - \phi \left(\frac{\text{Ln}(a) - \lambda}{\xi} \right) \quad (3-4)$$

که در معادله بالا تابع ϕ نماینده احتمال نرمال استاندارد بوده و برای محاسبه آن می توان از جداول استاندارد آن استفاده کرد.

به عنوان نمونه برای $R=15$ km و $M=5.25$ داریم:

$$\lambda = E(\ln(PGA)) = \ln(0.073) = -2.617$$

$$\xi = \sigma(\ln(PGA)) = 2.303 \sigma(\log(PGA)) = 2.303 \times 0.205 = 0.472$$

$$P(PGA > 0.05 \text{ g} | EQ: R=15, M=5.25) = 1 - \phi\left(\frac{\ln(0.05) + 2.617}{0.472}\right)$$

$$= 1 - \phi(-0.802) = \phi(0.8017) = 0.791$$

بالتمام روند بالا برای هر ترکیب های بزرگا- فاصله جداول زیر حاصل می شوند.

جدول ۴-۶ احتمال افزایش PGA از شتاب 0.05g

P(PGA>0.05g|EQ:R, M)			
	R=15 km	R=18 km	R=24 km
M=5.25	0.791	0.705	0.539
M=5.75	0.909	0.857	0.734
M=6.25	0.969	0.945	0.875
M=6.75	0.992	0.983	0.953
M=7.25	0.998	0.996	0.986

جدول ۴-۷ احتمال افزایش PGA از شتاب 0.1g

P(PGA>0.1g|EQ:R, M)			
	R=15 km	R=18 km	R=24 km
M=5.25	0.255	0.177	0.085
M=5.75	0.448	0.344	0.199
M=6.25	0.654	0.55	0.376
M=6.75	0.822	0.743	0.583
M=7.25	0.926	0.881	0.769

جدول ۴-۸ احتمال افزایش PGA از شتاب 0.15g

P(PGA>0.15g|EQ:R, M)			
	R=15 km	R=18 km	R=24 km
M=5.25	0.065	0.037	0.013
M=5.75	0.161	0.104	0.044
M=6.25	0.321	0.232	0.12
M=6.75	0.525	0.418	0.258
M=7.25	0.722	0.626	0.451

جدول ۴-۹ احتمال افزایش PGA از شتاب 0.2g

P(PGA>0.2g|EQ:R, M)			
	R=15 km	R=18 km	R=24 km
M=5.25	0.017	0.008	0.002
M=5.75	0.055	0.031	0.01
M=6.25	0.142	0.09	0.037
M=6.75	0.292	0.207	0.104
M=7.25	0.492	0.386	0.232

جدول ۴-۱۰ احتمال افزایش PGA از شتاب 0.25g

P(PGA>0.25g|EQ:R, M)			
	R=15 km	R=18 km	R=24 km
M=5.25	0.005	0.002	0.00046
M=5.75	0.019	0.01	0.003
M=6.25	0.061	0.035	0.012
M=6.75	0.154	0.099	0.042
M=7.25	0.311	0.223	0.114

جدول ۴-۱۱ احتمال افزایش PGA از شتاب 0.3g

P(PGA>0.3g|EQ:R, M)			
	R=15 km	R=18 km	R=24 km
M=5.25	0.001	0.00057	0.00011
M=5.75	0.007	0.003	0.00076
M=6.25	0.027	0.014	0.004
M=6.75	0.08	0.047	0.017
M=7.25	0.19	0.125	0.056

جدول ۴-۱۲ احتمال افزایش PGA از شتاب 0.35g

P(PGA>0.35g|EQ:R, M)			
	R=15 km	R=18 km	R=24 km
M=5.25	0.00046	0.00017	2.9E-05
M=5.75	0.003	0.001	0.00024
M=6.25	0.012	0.006	0.001
M=6.75	0.042	0.023	0.007
M=7.25	0.114	0.07	0.028

جدول ۴-۱۳ احتمال افزایش PGA از شتاب 0.4g

P(PGA>0.4g|EQ:R, M)			
	R=15 km	R=18 km	R=24 km
M=5.25	0.00016	5.6E-05	8.3E-06
M=5.75	0.001	0.00042	7.8E-05
M=6.25	0.006	0.002	0.00057
M=6.75	0.022	0.011	0.003
M=7.25	0.068	0.039	0.014

جدول ۴-۱۴ احتمال افزایش PGA از شتاب 0.45g

P(PGA>0.45g|EQ:R, M)			
	R=15 km	R=18 km	R=24 km
M=5.25	6E-05	1.9E-05	2.6E-06
M=5.75	0.00045	0.00017	2.8E-05
M=6.25	0.003	0.001	0.00023
M=6.75	0.012	0.006	0.001
M=7.25	0.041	0.022	0.007

جدول ۴-۱۵ احتمال افزایش PGA از شتاب 0.5g

P(PGA>0.5g|EQ:R, M)			
	R=15 km	R=18 km	R=24 km
M=5.25	2.4E-05	7.19E-06	8.75E-07
M=5.75	0.0002	6.92E-05	1.05E-05
M=6.25	0.001	0.000511	0.000097
M=6.75	0.006	0.003	0.000688
M=7.25	0.025	0.013	0.004

جدول ۴-۱۶ احتمال افزایش PGA از شتاب 0.55g

P(PGA>0.55g|EQ:R, M)			
	R=15 km	R=18 km	R=24 km
M=5.25	9.8E-06	2.82E-06	3.14E-07
M=5.75	9.1E-05	0.00003	4.19E-06
M=6.25	0.00065	0.000245	4.27E-05
M=6.75	0.004	0.002	0.000335
M=7.25	0.015	0.007	0.002

جدول ۴-۱۷ احتمال افزایش PGA از شتاب 0.6g

P(PGA>0.6g|EQ:R, M)			
	R=15 km	R=18 km	R=24 km
M=5.25	4.2E-06	1.16E-06	1.19E-07
M=5.75	4.3E-05	1.35E-05	1.74E-06
M=6.25	0.00034	0.000121	1.95E-05
M=6.75	0.002	0.000834	0.000168
M=7.25	0.009	0.004	0.001

جدول ۴-۱۸ احتمال افزایش PGA از شتاب 0.65g

P(PGA>0.65g|EQ:R, M)			
	R=15 km	R=18 km	R=24 km
M=5.25	1.9E-06	4.95E-07	4.75E-08
M=5.75	2.1E-05	6.3E-06	7.57E-07
M=6.25	0.00018	6.15E-05	9.24E-06
M=6.75	0.001	0.000461	8.64E-05
M=7.25	0.006	0.003	0.000622

در این قسمت به ایجاد منحنی های خطر زمین لرزه می پردازیم.

تمام جداول قسمت قبل مربوط به محاسبه احتمال افزایش PGA از شتاب مورد نظر برای تمام ترکیب های بزرگا و فاصله و در صورت رویداد زمین لرزه ای با بزرگای M در فاصله R از ساختمان بودند. اما در این مرحله احتمال رویداد یک زمین لرزه مد نظر می باشد، بدین جهت از فرمول زیر استفاده می کنیم:

$$P(PGA > a | EQ) = \int_{R_{min}}^{R_{max}} \int_{m_0}^{m_{max}} P(PGA > a | EQ : M, R) f(M) f(R) dM dR$$

که می توان این معادله را به صورت تقریبی به شکل زیر بیان کرد:

$$P(PGA > a | EQ) = \sum_R \sum_M P(PGA > a | EQ : M, R) f(M) \Delta M f(R) \Delta R$$

از طرفی هم با استفاده از مدل پواسون می توان نوشت:

$$P(PGA > acc) = 1 - \exp(-v_1 t p(a))$$

$$p(a) = P(PGA > acc | EQ)$$

اگر $v.t.p$ خیلی کوچکتر از یک باشد، $P(PGA > acc)$ را می توان با می توان با رابطه زیر تخمین زد:

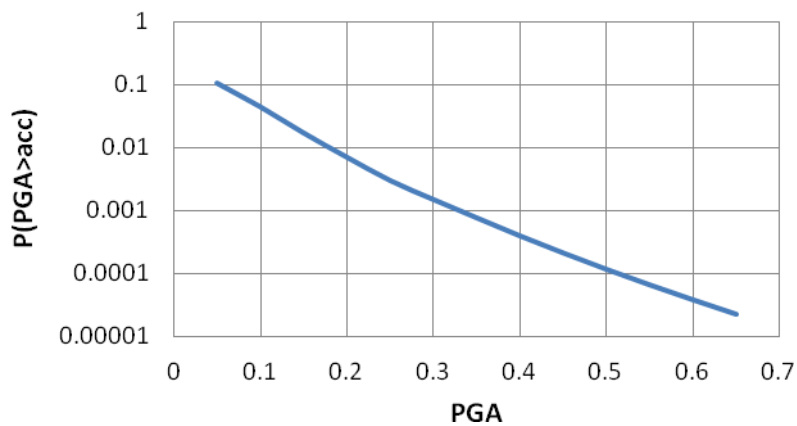
$$P(PGA > acc) = v_1 p(a)$$

حال با استفاده از دو رابطه بالا خواهیم داشت:

جدول ۴-۱۹ احتمال رویداد یک زمین لرزه در یک چشمه خطی

acc	P(PGA>acc | EQ)	P(PGA>acc)	P(PGA>acc) [approx]
0.05 g	0.77	0.104	0.11
0.1 g	0.317	0.044	0.045
0.15 g	0.123	0.017	0.018
0.2 g	0.051	0.007	1.007
0.25 g	0.023	0.003	0.003
0.3 g	0.011	0.002	0.002
0.35 g	0.005	0.00077	0.000771
0.4 g	0.003	0.000399	0.000399
0.45 g	0.001	0.000214	0.000214
0.5 g	0.000827	0.000118	0.000118
0.55 g	0.000468	0.0000669	0.0000669
0.6 g	0.000271	0.0000388	0.0000388
0.65 g	0.000161	0.0000229	0.0000229

با رسم منحنی $P(\text{PGA} > \text{acc})$ نسبت به acc منحنی خطر زلزله برای چشمه خطی بدست می آید:



شکل ۴-۵ منحنی خطر زلزله برای چشمه خطی

این محاسبات فقط برای چشمه خطی صورت گرفته است و نه برای چشمه سطحی. از این پس صرفاً نتایج محاسبات برای چشمه سطحی ارائه می شود.

در این مثال چشمه سطحی به چهار قسمت مساوی تقسیم شده است و احتمال وقوع زلزله در همه محدوده ها یکسان می باشد. پس از ارائه منحنی خطر برای چشمه سطحی، مراحل محاسبات مربوط به منحنی خطر کل ساختگاه آورده شده است.

$$R_3 = 22 \text{ km}$$

$$R_4 = 28 \text{ km}$$

$$R_5 = 32 \text{ km}$$

$$R_6 = 37 \text{ km}$$

$$f(R) \Delta R = \frac{1}{4}$$

$$a_2 = 5.89, b_2 = 0.95$$

رابطه بازگشتی عبارتست از:

$$\lambda_2 = e^{a_2 - b_2 M} \Rightarrow \lambda_2 = e^{(-5.89 - 0.95M)}$$

تعداد متوسط زمین لرزه های با بزرگای M یا بیشتر (در سال، در کیلومتر مربع)، برای چشمه سطحی برابر با $M_0=5$ و $M_{\max}=6.5$ است.

تابع چگالی احتمال بزرگا نیز برابر است با:

$$f_2(M) = 1.251 e^{-0.95(M-5)}$$

$$\Delta M = 0.5$$

بنابراین تقریباً داریم:

$$P(5 < M < 5.5) = f_2(5.25) \Delta M = 0.493$$

$$P(5.5 < M < 6) = f_2(5.75) \Delta M = 0.307$$

$$P(6 < M < 6.5) = f_2(6.25) \Delta M = 0.191$$

آهنگ رویداد میانگین زمین لرزه با بزرگای مورد نظر در مساحت ۴۰۰ کیلومتر مربع چشمه سطحی در سال عبارتست از:

$$v_2 = 0.007$$

در جدول ۴-۲۰ احتمال رخداد برای چشمه های خطی و سطحی آورده شده است.

جدول ۴-۲۰ احتمال افزایش PGA از شتاب های مختلف برای چشمه های خطی و سطحی

acc	P(PGA>acc) ₁ [Line source]	P(PGA>acc) ₂ [Area source]
0.05 g	0.104	0.004
0.1 g	0.044	0.000868
0.15 g	0.017	0.000196
0.2 g	0.007	0.0000503
0.25 g	0.003	0.0000145
0.3 g	0.002	0.00000465
0.35 g	0.00077	0.00000162
0.4 g	0.000399	0.000000607
0.45 g	0.000214	0.000000242
0.5 g	0.000118	0.000000101
0.55 g	0.0000669	4.46E-08
0.6 g	0.0000388	2.04E-08
0.65 g	0.0000229	9.71E-09

حال با استفاده از رابطه زیر نتایج احتمال های محاسبه شده برای چشمه های خطی و سطحی با هم ترکیب می شوند:

$$P(PGA > acc) = 1 - \prod_k (PGA < acc)_k \Rightarrow P(PGA > acc) = 1 - \underbrace{P(PGA < acc)_1}_{LineSource} \times \underbrace{P(PGA < acc)_2}_{AreaSource}$$

$$= 1 - \{1 - P(PGA > acc)_1\} \times \{1 - P(PGA > acc)_2\}$$

به عنوان مثال برای شتاب 0.05 g داریم:

$$P(PGA > 0.05 g) = 1 - (1 - 0.104) \times (1 - 0.004) = 1 - 0.896 \times 0.996 = 0.108$$

نتایج این محاسبات برای شتاب های مورد نظر تکرار شده و در جدول زیر آورده شده است:

جدول ۴-۲۱ نتایج احتمال های محاسبه شده برای شتاب های مورد نظر

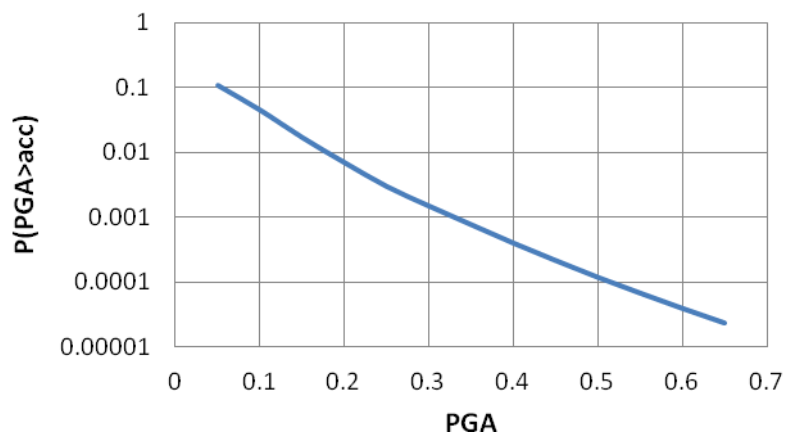
acc	P(PGA>acc)
0.05 g	0.108
0.1 g	0.045
0.15 g	0.017
0.2 g	0.007
0.25 g	0.003
0.3 g	0.002
0.35 g	0.000775
0.4 g	0.000403
0.45 g	0.000217
0.5 g	0.00012
0.55 g	0.0000684

0.6 g	0.0000398
0.65 g	0.0000237

با استفاده از درونیایی، بیشینه شتابی که با احتمال 0.001 (دوره بازگشت $T_R=1000$ سال) رخ می دهد برابر است با:

$$PGA_{0.001} = 0.34 \text{ g}$$

منحنی خطر کلی بر اساس جدول بالا به شکل زیر ترسیم می گردد:



شکل ۴-۶ منحنی خطر کلی ساختگاه

← نکته) در نمودار بالا محل تلاقی منحنی خطر با محور y یعنی $PGA=0 \text{ g}$ تقریباً به 0.15 می رسد. اما سوال اینجاست که چرا احتمال روداد شتاب صفر، 100 درصد نیست؟ آیا این منحنی اشتباه است؟

- ۱ - "جزوه درسی ژئوتکنیک"، مقطع کارشناسی، عباس مهدویان، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)
- ۲ - "جزوه درسی مهندسی زلزله"، مقطع کارشناسی، عباس مهدویان، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)
- ۳ - "جزوه درسی تحلیل خطر زلزله"، مقطع کارشناسی ارشد، عباس مهدویان، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)
- ۴ - "مبانی مهندسی زلزله و آنالیز ریسک"، فرهاد دانشجو، انتشارات دانش فردا، تابستان ۱۳۷۸
- ۵ - "مبانی تحلیل خطر زمین لرزه"، مهدی زارع، انتشارات پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۸۸

6-"An overview of selected seismic hazard analysis methodologies, civil engineering studies [Report, structural research series, No.592]. Green, R.A., Hall, W.J. (1994), Urbana USA: Univ. of Illinois at Urbana Champaign.

7-"Geotechnical earthquake engineering", Kramer, S.L. (1995), Upper Saddle River, NJ 07458: Prentice Hall.