

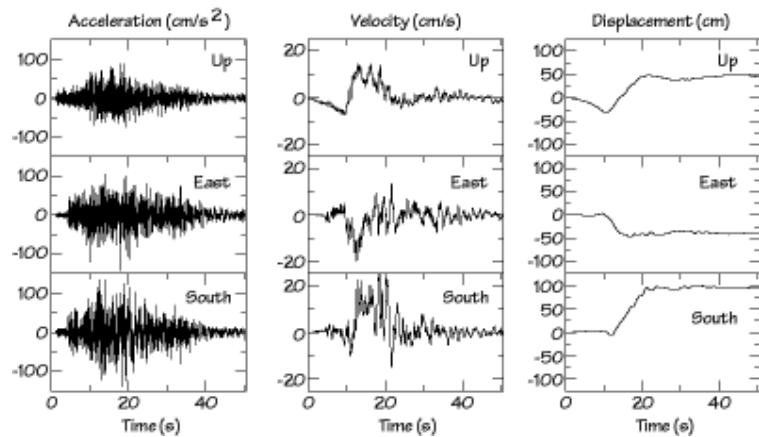


## مبانی پهنه بندی لرزه‌ای و روش‌های تحلیل خطر زمینلرزه

مهندس مالکی، کارشناس ژئوفیزیک شرکت مهاب قدس

### مقدمه:

برای طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله، شناخت جنبش نیرومند زمین که انتظار می‌رود در طول عمر مفید سازه رخ دهد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بهترین راه برای شناخت ویژگیهای جنبش نیرومند زمین، بدست آوردن نمودار حرکت زمین از جمله شتاب نیرومند زمین در هنگام رویداد زمینلرزه‌های متوسط تا بزرگ می‌باشد و این امر بوسیله دستگاه شتابنگار موجود در محل و رخداد زمینلرزه در گستره نزدیک میسر می‌شود. با توجه به اینکه برای طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله در مناطق لرزه‌خیز، نمی‌توان برای هر محل دستگاه شتابنگار مستقر نمود و در انتظار رویداد زمینلرزه‌ای در گستره نزدیک به آن باقی ماند تا یک رکورد مناسب از جنبش نیرومند زمین فراهم شود، در مناطق لرزه‌خیز جهان اقدام به طراحی و استقرار شبکه شتابنگاری و لرزه نگاری می‌شود تا پس از رکورد جنبش نیرومند زمین از تعداد زیادی از زمینلرزه‌ها در گستره این شبکه‌ها بتوانند با پژوهش‌های متعدد به نتایجی دست یابند که منتج به تهیه نقشه‌های پهنه بندی لرزه‌ای شود و پارامترهای جنبش نیرومند زمین برای هر ساختگاهی برپایه این نقشه‌ها پیش‌بینی و برای بارگذاری زمینلرزه برروی سازه‌ها از آن بهره گرفته شود.

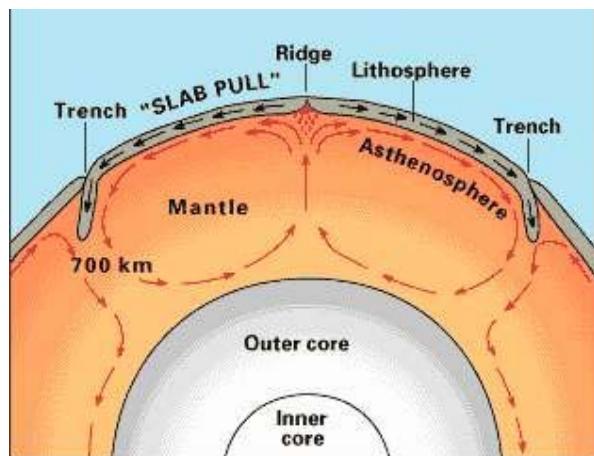


## ۱- عوامل موثر در جنبش نیرومند زمین:

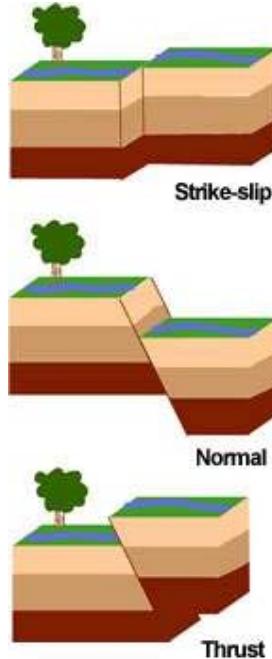
تصویرت کلی عوامل موثر در جنبش نیرومند زمین در اثر رویداد زمینلرزه را می‌توان در سه بخش مورد بررسی قرار داد، این سه بخش شامل ویژگیهای چشم‌های زمینلرزه، خصوصیات فیزیکی لایه‌های پوسته زمین که در مسیر عبور امواج زمینلرزه قرار می‌گیرد و شرایط ژئوتکنیک لرزه‌ای ساختگاه سازه‌ها می‌باشد. بنابراین هریک از بخش‌ها و نقش آنها در جنبش نیرومند زمین باید مورد بررسی قرار گیرد تا ویژگیهای جنبش نیرومند زمین در شالوده سازه‌ها و بهینه کردن معیارهای طراحی سازه‌ها در برابر زمینلرزه تخمین و در محاسبات مورد استفاده قرار گیرد.

### ۱-۱- ویژگیهای چشم‌های لرزه‌ها:

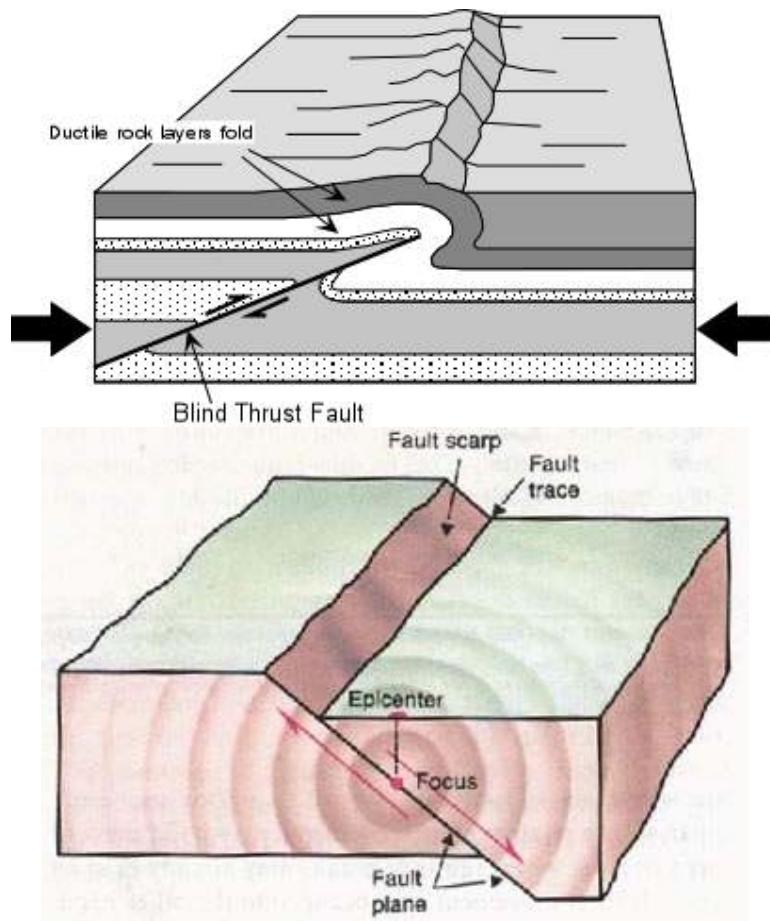
رویداد زمینلرزه‌ها در بخش پوسته زمین ناشی از نیروهای زمینساختی است که برپایه تئوری زمینساخت ورقه‌ای از سال ۱۹۶۰ مطرح گردید در این تئوری بیان می‌شود که سنگ کره از تعداد زیادی بلوكها بصورت ورقه تشکیل شده است که این ورقه‌ها نسبت به یکدیگر در حال حرکت می‌باشند. مرز این بلوكها همواره با رویداد زمینلرزه‌های بزرگ روبرو است. معتبرترین تشریح برای علت ایجاد حرکت ورقه‌ها برپایه تعادل ترمودینامیک مواد تشکیل دهنده زمین استوار است. بخش فوقانی گوشه در تماس با پوسته سرد می‌باشد، درحالیکه بخش تحتانی در تماس با هسته داغ زمین است. بدیهی است که باستی یک گرadiان دما در گوشه برقرار باشد.



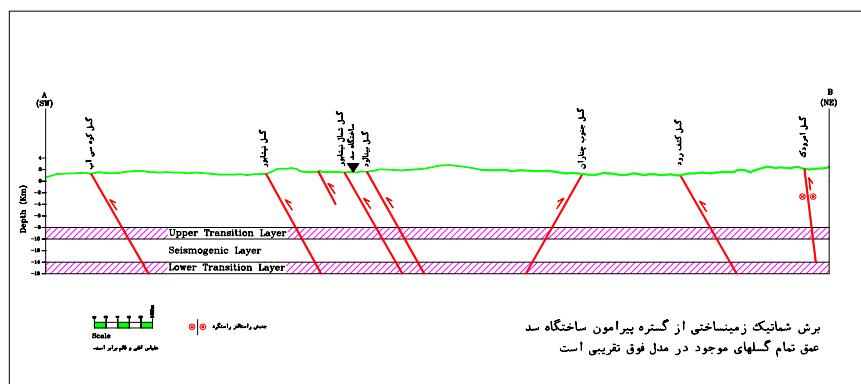
تئوری زمینساخت ورقه‌ای حرکت نسبی ورقه‌ها را با توجه به سه نوع مرز ورقه‌ای (فروزانشی، گسترش جانبی و گسترش انتقالی)، به سادگی توصیف و تعیین می‌نماید. در دیگر موارد نیز ممکن است در اثر گسترش، لبه ورقه‌ها شکسته و سبب تشکیل ورقه کوچکتر یا خرد ورقه محصور بین ورقه‌های بزرگتر شود. حرکت بین دو بخش از پوسته سبب انقطاع جدید یا پیشروی خطوط شکست موجود در ساختار زمین شناسی پوسته می‌شود که به آن گسل می‌گویند. گسلها بسته به نوع حرکتشان به سه گروه اصلی دسته بندی می‌شوند (گسلهای شبی لغز، امتداد لغز و یا ترکیبی از آنها).



تئوری بازگشت الاستیک بیان می‌کند که وقوع زمینلرزها موجب آزادی تنش در امتداد بخشی از گسل می‌شود و تا زمانیکه تنشهای فرسخت کافی برای ذخیره شدن مجدد را داشته باشند گسیختگی بعدی و یا به عبارت دیگر زمینلرزه بعدی اتفاق خواهد افتاد. از آنجائیکه زمینلرزهای موجب رهاسازی انرژی جمع شده بر روی گسل می‌شوند، وقوع آنها در محدوده‌ای که فعالیت لرزه‌ای برای مدتی کم و یا اصلاً اتفاق نیفتاده است محتمل‌تر است. با شناسایی حرکات گسل در طی لرزه‌خیزی گذشته و در امتداد آن می‌توان به نبود فعالیت لرزه‌ای در پاره‌ای از مکانهای آن پی برد.



با مطالعات لرزه زمینساخت می‌توان از شکستگی ساختارهای زمین شناسی و هندسه آنها پیرامون ساختگاه سازدها مطلع شد و نهایتاً می‌توان مدل لرزه زمینساختی یا درعمق برش لرزه زمینساختی از آنها تهیه نمود و مخاطرات احتمالی گسلش زمین و یا رویداد احتمالی زمینلرزه برروی آنها را برای تخمین رویداد زمینلرزه‌های آتی و چگونگی ویژگیهای آنها پیش‌بینی نمود.



هندسه گسلها، زون خرد شده، نوع و سازوکار آنها می‌تواند در برآورد پتانسیل حداکثر زمینلرزه محتمل برروی آنها را کمک نماید و این امر در مطالعات زمینساخت و لرزه زمینساخت صورت می‌پذیرد. سن گسلها از عوامل مهم در رویداد زمینلرزه برروی آنهاست بطوریکه گسلهای جوان از اهمیت بیشتری برخوردار هستند و مطالعات نوزمینساخت می‌تواند کمک زیادی در کلاسه‌بندی گسل‌ها از دیدگاه فعالیت لرزه‌ای داشته باشد.

معمولًاً روابط تجربی در پیوند با هندسه گسل، حداکثر توان لرزه‌زایی و میزان بیشینه جابجایی برروی آن وجود دارد که تا حدودی در تخمین رویدادهای زمینلرزه‌ای آتی منطقه می‌تواند موثر واقع شود. بزرگای زمینلرزه رابطه مستقیم با انرژی آزاد شده توسط زمینلرزه دارد.

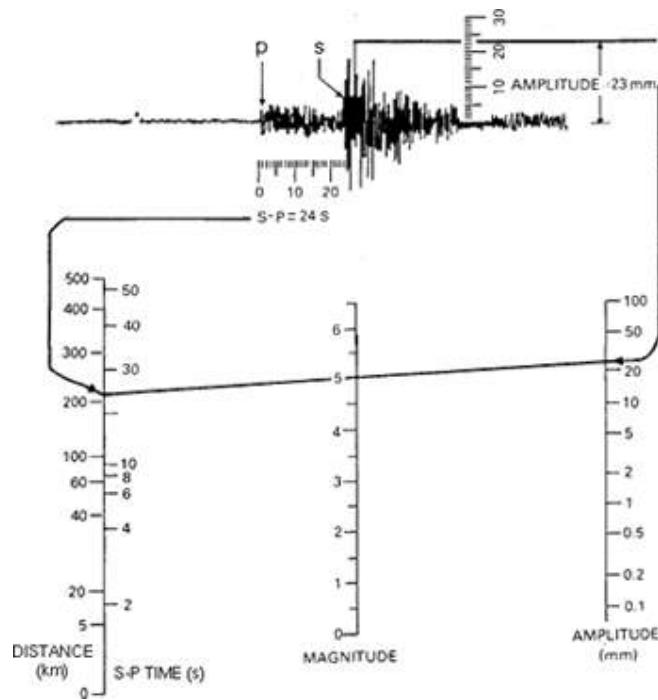
Richter Magnitude/ TNT Equivalent		
1.0	6 ounces	
1.5	2 pounds	
2.0	13 pounds	
2.5	63 pounds	
3.0	397 pounds	
3.5	1,000 pounds	
4.0	6 tons	Small atomic bomb
4.5	32 tons	Average tornado
5.0	199 tons	
5.5	500 tons	
6.0	6,270 tons	
6.5	31,550 tons	
7.0	199,000 tons	San Francisco (7.1) 1989
7.5	1,000,000 tons	Los Angeles (7.4) 1992
8.0	6,270,000 tons	San Francisco (8.3) 1906
8.5	31,550,000 tons	Anchorage, Alaska 1964
9.0	199,999,000 tons	

در سال ۱۹۳۵ چارلز ریشرتر یا ریختر با استفاده از لرزه‌نگار Wood-Andersoon یک مقیاس برای بزرگای زمینلرزه تعریف نمود و در حال حاضر بزرگای زمینلرزه به صورت‌های گوناگون بیان می‌شود که عبارتند از ML بزرگای محلی، Md بزرگاً برابر مدت دوام لرزش، mb بزرگاً برابریه دامنه امواج حجمی، Ms بزرگاً برابریه دامنه امواج سطحی و Mw بزرگای کشتاوری و ... می‌باشد. از بین بزرگای زمینلرزه، بزرگای Ms و Mw کاربرد بیشتری در تحلیل خطر زمینلرزه دارد و بیشتر زمینلرزه‌های مخرب و بزرگ که معمولًاً بین ۶ تا ۷ می‌باشند در بازه‌ای که تقریباً Ms و Mw با یکدیگر برابرند، روی می‌دهند. برای مثال دو رابطه بین دامنه امواج سطحی و امواج حجمی بصورت زیر توسط گوتبرگ - ریشرتر در سال ۱۹۳۶ ارائه گردیده است.

$$Ms = \log A + 1/66 \log d + 2/.$$

$$mb = \log A - \log T + 0.01 d + 5/9$$

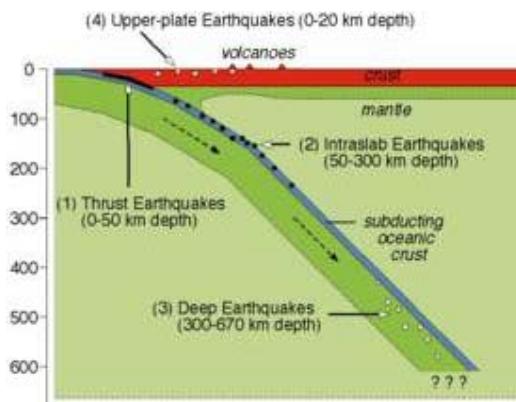
که در روابط فوق A دامنه موج P یا S بر حسب میکرون، T پریود موج P و d فاصله لرزه‌نگار از مرکز سطحی زمینلرزه بر حسب درجه می‌باشد.



بزرگای گشتاوری توسط کاناموری و هنکز در سال ۱۹۷۹ بصورت زیر تعریف گردید که یک معیار مستقیم از عوامل ایجاد گسیختگی در امتداد گسل می‌باشد:

$$M_w = \frac{\log M_o}{1.5} - 10.7$$

یکی از ویژگیهای چشمی لرزه‌زا ژرفای کانونی زمینلرزه‌ها می‌باشد. تحقیقات و پژوهش‌های زیادی بر روی ژرفای کانونی زمینلرزه‌ها انجام شده است. بصورت کلی ژرفای زمینلرزه‌ایی که در پیوند با حرکت فرورانش ایجاد می‌شود نسبتاً عمیق و ژرف می‌باشد که تا عمق ۸۰۰ کیلومتری سطح زمین نیز گزارش شده است. ولی ژرفای کانونی زمینلرزه‌ایی که در پیوند با گسترش جانبی اقیانوسی مشاهده شده کم عمق بوده و ژرفای آنها کمتر از ۲۰ کیلومتر می‌باشد و ژرفای کانونی زمینلرزه‌ایی که با گسترش انتقالی در پوسته قاره‌ای مشاهده شده‌اند دارای ژرفای کمتر از سنتراز پوسته زمین می‌باشند یعنی کمتر از ۶۰ کیلومتر. رویداد زمینلرزه‌های ایران بسیار سطحی بوده است و به جز منطقه مکران تقریباً در تمام ایران کمتر از ۲۰ کیلومتر برآورد شده است و به همین دلیل لایه لرزه‌زا درفلات ایران را می‌توان بین ژرفای ۱۰ تا ۲۰ کیلومتر درنظر گرفت.

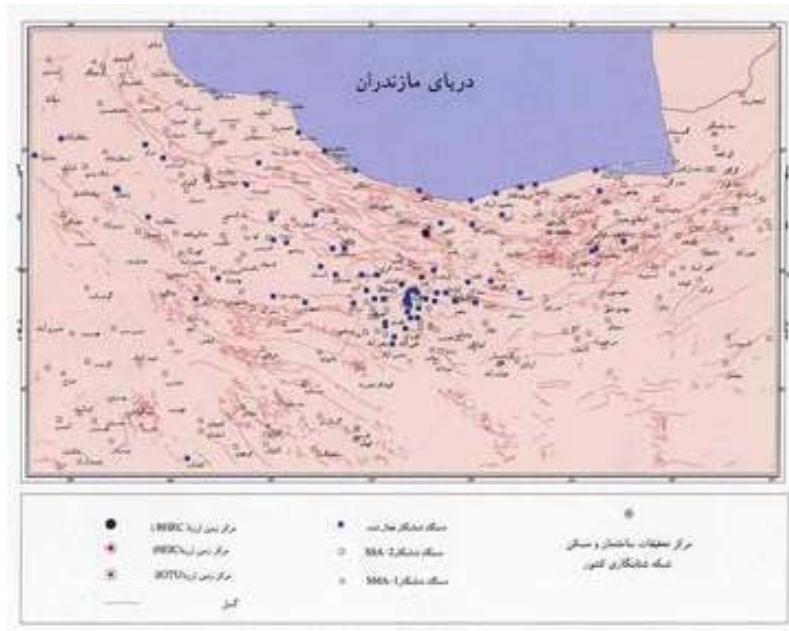


از دیگر ویژگیهای چشم‌های لرزه‌زا می‌توان به سازوکار ژرفی چشمه‌های لرزه‌زا اشاره نمود. سازوکار ژرفی زمینلرزه‌ها می‌تواند شبیل لغز (راندگی یا نرمال)، راستالغز یا مایل لغز باشند. مایل لغز ترکیبی از دو سازوکار قبلی می‌باشد. آثار جنبش نیرومند زمین به بخش فرادیواره گسله‌های رانده به مراتب بیشتر از بخش فرادیواره آن می‌باشد، بطوریکه این امر توسط دستگاههای شتابنگار در دو سوی گسل با سازوکار راندگی به ثبت رسیده است.

## ۲-۱- ویژگیهای عبور امواج لرزه‌ای از لایه‌های مختلف :

آنچه مسلم است، رویداد زمینلرزه در مرکز سطحی آن با جنبش نیرومند زمین همراه است و هرچه از این منطقه دورتر شویم از انرژی امواج لرزه‌ای کاسته می‌شود بطوریکه دامنه اوج شتاب، سرعت و تغییر مکان امواج کاهش می‌یابد. بنابراین دامنه امواج لرزه‌ای با عکس توان دوم فاصله تضعیف می‌شود. در سازندهای با ستبرای زیاد این تضعیف کمتر و در سازندهای متنوع با ستبرای کمتر، بیشتر تضعیف یا کاهیده می‌شوند.

از سال ۱۹۳۳ به بعد دستگاه شتابنگار برای ثبت جنبش نیرومند زمین در کشور امریکا استقرار یافت و تا سال ۱۹۸۶ بیش از ۴۰۰۰ رکورد از زمینلرزه‌های مختلف گردآوری شد. در حال حاضر در بیشتر کشورهای لرزه‌خیز شبکه‌های شتابنگاری استقرار یافته است، از جمله می‌توان به شبکه شتابنگاری مرکز تحقیقات مسکن-وزارت مسکن و شهرسازی ایران با پوشش آزمیوتی خوب آن در مرکز شهرها و حتی بخشها و دهستانهای ایران گسترش یافته و قادر است رکوردهایی از رویداد زمینلرزه‌های متوسط تا نسبتاً بزرگ تهیه نماید، اشاره نمود.



پارامترهای جنبش نیرومند زمین با مشخص نمودن دامنه، محتوى فرکانسى و مدت دوام جنبش نیرومند زمین و ... معرفى مى شوند. به علت پیچیدگى جنبش نیرومند زمین در هنگام رویداد زمینلرزه تعريف يك پارامتر منفرد که دقیقاً کلیه ویژگیهای مهم جنبش نیرومند زمین را توصیف کند وجود ندارد. متداولترین روش که تشریح کننده جنبش نیرومند زمین است، بهره‌گیری از تاریخچه زمانی می‌باشد. معمولاً يکی از این پارامترها بصورت مستقیم اندازه‌گیری می‌شود و پارامترهای دیگر جنبش نیرومند زمین با انتگرال گیری یا مشتق گیری محاسبه می‌شوند. تفاوت فرکانسهای غالب در شتاب، سرعت، جابجایی تاریخچه زمانی قابل تعمق است. تاریخچه زمانی شتاب، فرکانس نسبتاً بالایی دارد. تاریخچه زمانی سرعت، از فرکانسهای بالای کمتری نسبت به تاریخچه زمانی شتاب برخوردار بوده و تاریخچه زمانی جابجایی با انتگرال گیری مجدد از تاریخچه زمانی شتاب حاصل می‌شود که فرکانس آن نسبت به شتاب و سرعت پایین‌تر است.

متداولترین پارامتر در جنبش نیرومند زمین اوج دامنه شتاب افقی PHGA و اوج دامنه شتاب قائم PVGA می‌باشد. شتابهای افقی معمولاً بعلت رابطه طبیعی آنها با نیروهای اینرسی برای تشریح جنبش نیرومند زمین استفاده می‌شوند و در واقع بزرگترین دینامیک حاصل در انواع سازه‌های اصلی رابطه نزدیکی با PGA دارند.

نظر به اینکه در ساختگاه باید میزان اوج شتاب جنبش نیرومند زمین تعیین شود و امکان اندازه‌گیری این شتاب بصورت مستقیم بسیار دشوار و نیاز به زمان کافی دارد. بتاراین از اواسط قرن بیست مدلهای کاهیدگی برای برآورد اوج شتاب، سرعت و جابجایی جنبش نیرومند زمین از روی داده‌های شتابگاشتی ارائه گردید. بر اساس پژوهش‌های صورت گرفته و بصورت ساده اوج شتاب، سرعت و جابجایی تابعی از بزرگای زمینلرزه و فاصله از چشمۀ لرزه‌زا بوده و شکل کلی آن بصورت زیر می‌باشد.

$$PGA = f(M_s, \frac{1}{R2})$$

در سالهای اخیر پس از گردآوری داده‌های نسبتاً زیادی از شتابنگاشتهای زمینلرزه‌های بزرگ و مخرب جهان، مدل‌های کاهیدگی شتاب را برای مولفه‌های افقی و قائم برای شرایط ژئوتکنیکی ساختگاههای سنگی سخت، سنگی و سنگی نرم و یا خاک سفت، خاک نرم و سازوکار چشمۀ لرزه‌زا (راندگی، امتداد لغز و نرمال) در پریودهای مختلف تهیه شده است و شکل کلی آن بصورت زیر می‌باشد:

$$LnPGA = f(Mw, R, FM, S)$$

به عبارت دیگر مدل‌های کاهیدگی جنبش نیرومند زمین بصورت تجربی می‌توانند چگونگی تاثیر سازندهای زمین شناسی تشکیل دهنده پوسته زمین در حد فاصل بین چشمۀ (های) لرزه‌زا تا ساختگاه سازه را بررسی دامنه امواج لرزه‌ای روشن سازند.

با یک تحلیل ساده بررسی تاریخچه زمانی شتاب می‌توان پی بردن که پاسخ دینامیکی اجسام اثرپذیر مانند ساختمان، پل، شیبها یا خاکریزها به فرکانسی که آنها بارگذاری شده‌اند، حساس است. زمینلرزه‌ها بارگذاری پیچیده‌ای با مولفه‌های جنبش نیرومند زمین در یک محدوده وسیعی از فرکانس ایجاد می‌کنند. محتوی فرکانسی نحوه توزیع دامنه جنبش نیرومند زمین را در فرکانسهای مختلف تشریح می‌نماید. چون محتوی فرکانسی جنبش نیرومند زمین ناشی از رویداد زمینلرزه، شدیداً تحت تاثیر اثرات آن جنبش نیرومند است. لذا تعیین خصوصیات جنبش نیرومند زمین بدون درنظر گرفتن محتوی فرکانسی امکان پذیر نمی‌باشد.

هرتابع پریودیک را می‌توان با بهره‌گیری از تحلیل فوریه بصورت مجموع یک سری از عبارات هارمونیک ساده با فرکانس، دامنه و فاز مختلف بیان نمود. با استفاده از سری فوریه، یک تابع پریودیک ( $x(t)$ ) را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$x(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(\omega_n t + \varphi_n)$$

که در رابطه فوق  $C_n$  و  $\varphi_n$  به ترتیب دامنه و زاویه فاز  $n$  امین هارمونی سری فوریه می‌باشد. سری فوریه توصیف کاملی از جنبش نیرومند زمین را ارائه می‌دهد، زیرا امکان بازیابی کامل جنبش نیرومند زمین با تبدیل فوریه معکوس وجود دارد.

مدت دوام لرزش زمین در اثر رویداد زمینلرزه در ساختگاه به عوامل و فرآیندهای فیزیکی مانند کاهش سختی و مقاومت انواع سازه‌ها و افزایش آب منفذی در ماسه نرم اشیاع و سیکل بار و ... بستگی دارند. یک جنبش نیرومند زمین بامدت دوام لرزش کوتاه حتی اگر دامنه بزرگ داشته باشد، ممکن است تعداد کافی سیکل بار، برای رسیدن ساره به گسیختگی ایجاد ننماید. از طرف دیگر یک جنبش نیرومند زمین با دامنه متوسط اما مدت دوام لرزش طولانی سیکلهای بارگذاری کافی برای ایجاد خرابی در سازه به بار خواهد آورد.

مدت دوام جنبش نیرومند زمین به زمان لازم برای آزاد شدن انرژی کرنشی جمع شده در امتداد گسل بستگی دارد. با افزایش طول گسیختگی در گسل، زمان لازم برای آزاد شدن انرژی کرنشی افزایش می‌یابد. مدت دوام موثر بر اساس فاصله زمانی بین نقاطی که ۵٪ و ۹۵٪ انرژی کل آزاد شده، استوار است.

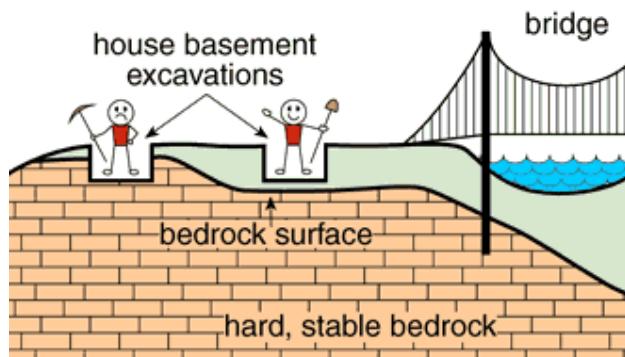
مدت دوام موثر بر پایه پژوهش (Chang & Krinitzky ۱۹۷۷) بپایه بزرگاً و شرایط ژئوتکنیکی ساختگاههای خاکی و سنگی در ژرفای کانونی کوتاه (کمتر از ۱۰ کیلومتر) بصورت زیر برآورد شده است.

مدت دوام موثر در ساختگاه خاکی (ثانیه)	مدت دوام موثر در ساختگاه سنگی (ثانیه)	بزرگای زمینلرزه
۸	۴	۵
۱۲	۶	۵۵
۲۳	۱۱	۶/۵
۳۲	۱۶	۷
۴۵	۲۲	۷/۵

### ۱-۳-۱- ویژگیهای شرایط ژئوتکنیک لرزه‌ای ساختگاهی برجنبش نیرومند زمین

در اوآخر قرن نوزدهم میلادی در پی رویداد زمینلرزه‌هایی در مناطق شهری که دارای شرایط ژئوتکنیکی لرزه ای ساختگاهی متفاوتی بودند، مشاهده گردید که ساختمانهای موجود بر روی ساختگاه سنگی آسیب کمتری نسبت به شرایط ساختگاهی خاکی دیده‌اند. در اوایل قرن بیستم گوتبرگ (۱۹۲۷) ضرایب تشید مریبوط به ساختگاه را از خرد لرزه‌های ثبت شده در شرایط مختلف خاک تدوین نمود. از زمان این مشاهدات اولیه تا به حال اثرات شرایط ژئوتکنیک لرزه‌ای ساختگاهی برجنبش نیرومند زمین در زمینلرزه‌های سراسر جهان تشریح شده است. در سالهای اخیر دسترسی به تجهیزات و دستگاههای شتابنگار، امکان اندازه‌گیری کیفی اثرات ساختگاهی را فراهم نموده است.

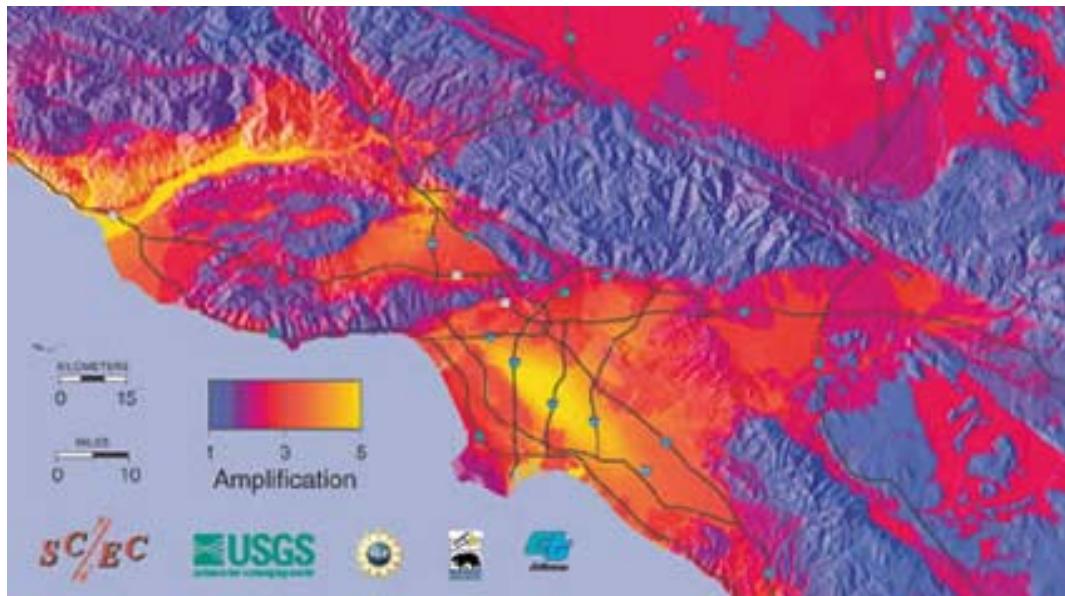
با آنکه شواهد بسیاری در باب اثرات ساختگاهی وجود داشته اما مبانی فنی و نحوه ارزیابی آن هنوز موضوع بحث سالهای اخیر می‌باشد.



شرایط ژئوتکنیک لرزه‌ای ساختگاهی برکلیه پارامترهای مهم جنبش نیرومند زمین نظیر دامنه، محتوى فرکانسى و مدت دوام لرزش اثر قابل ملاحظه‌ای می‌گذارد. میزان تاثیر، تابع هندسه، خواص مصالح لایه‌های زیر سطحی، توپوگرافی ساختگاه و ویژگیهای امواج لرزه‌ای که از چشمۀ لرزه‌زا تولید و از لایه‌های سنگی مختلف عبور نموده تا به پی سنگ ساختگاه وارد شود، می‌باشد.

طبعیت اثرات ژئوتکنیک لرزه‌ای ساختگاهی بر تقویت جنبش نیرومند زمین را می‌توان با بهره‌گیری از روش‌های مختلف مانند تحلیل ساده تئوری پاسخ زمین، اندازه‌گیریهای جنبش واقعی سطحی و زیرسطحی در همان ساختگاه و اندازه‌گیری جنبش نیرومند سطح زمین در ساختگاههایی با شرایط متفاوت از ساختگاه موردنظر تشریح نمود.

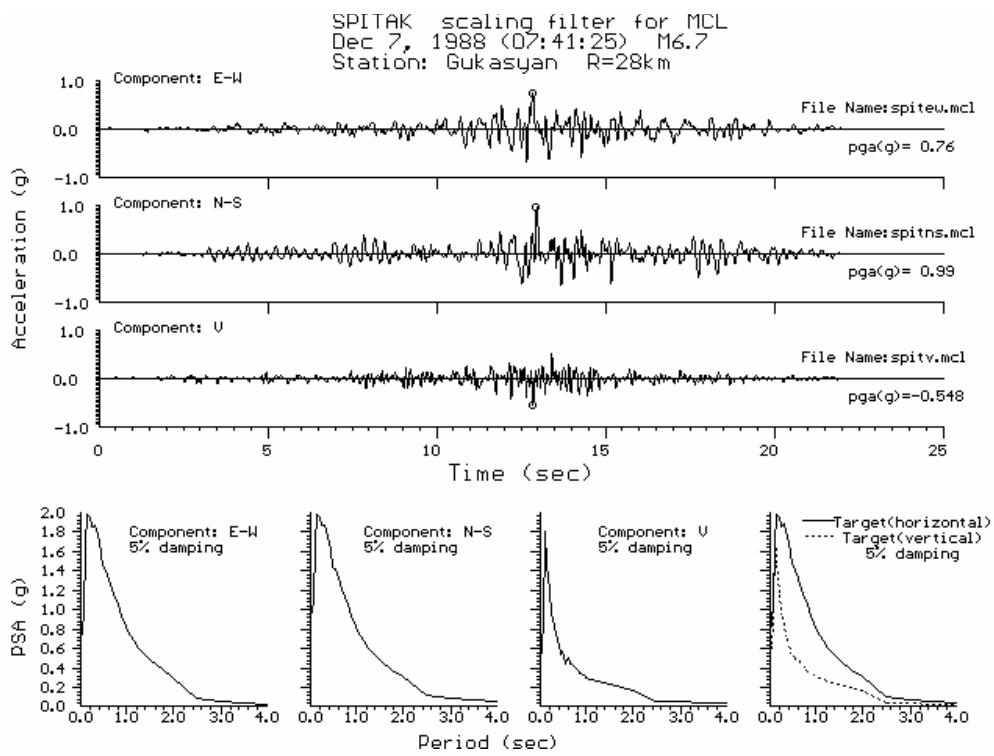
اثرات هندسی سنگ بستر بر روی جنبش نیرومند زمین تاثیر پذیر می‌باشد. گرچه بی‌قاعدگیهای توپوگرافی سنگ بستر موجب پراکنده ساختن امواج زمینلرزه شده و الگوهای پیچیده‌ای از تقویب یا کاهیدگی جنبش نیرومند زمین را ایجاد می‌کند لیکن به هر حال جنبش نیرومند زمین در بالای ارتفاعات معمولاً تقویت و تشدید می‌شوند.



در طراحی مقاوم سازه‌های جدید در برابر زمینلرزه و ارزیابی مخاطرات لرزه‌ای سازه‌های موجود باید پاسخ آنها به جنبش نیرومند زمین برای طراحی پیش‌بینی شود. جنبش نیرومند زمین برای طراحی، از زمینلرزه طرح یا از تحلیل خطر زمینلرزه بدست می‌آید.

اصل‌الاً پارامترهای جنبش نیرومند زمین برای طراحی برپایه شرایط ژئوتکنیک لرزه‌ای ساختگاه و یا از آئین‌نامه‌های ساختمانی نظری آئین‌نامه ۲۸۰۰ ایران بدست می‌آید و آئین‌نامه‌های ساختمانی با توجه به تحقیقات و پژوهش‌های مرحله‌ای پس از رویداد زمینلرزه‌های بزرگ مورد بازنگری قرار می‌گیرند. هدف از تدوین آئین‌نامه‌های ساختمانی از میان بردن کلیه خسارات ناشی از زمینلرزه نبوده و بلکه هدف طراحی سازه‌ها بگونه‌ای است که در زمینلرزه‌های کوچک بدون خسارت و در زمینلرزه‌های متوسط بدون خسارت سازه‌ای و در زمینلرزه‌های بزرگ و مخرب بدون فروریزی باقی بمانند.

تاریخچه زمانی جنبش نیرومند زمین برای طراحی با مطالعات موردنی تحلیل خطر زمینلرزه در ساختگاه برپایه روش‌های به مقیاس درآوردن جنبش نیرومند زمین و یا ایجاد جنبش نیرومند زمین به صورت مصنوعی تهیه می‌شود.



## ۲- تحلیل خطر زمینلرزه

خطر زمینلرزه با توجه به پارامترهای جنبش نیرومند زمین در ساختگاه سازه برای زمینلرزه طرح که احتمال رویداد آن در طول عمر مفید سازه وجود دارد، معرفی می‌شود. معمولاً سطوح مختلفی برای طراحی درنظر گرفته می‌شود که بستگی به درجه اهمیت سازه یا ساختمان دارد. مطابق آئین نامه ساختمانی International Building Code (IBC) چهار سطح بصورت زیر برای طراحی ساختمانها درنظر گرفته می‌شود:

- سطح اول سطح بهره‌برداری می‌باشد که با احتمال رویداد ۶۴ درصد در طول عمر مفید ساختمان برابر ۵۰ سال درنظر گرفته می‌شود که دوره بازگشت رویداد زمینلرزه برای چنین سطحی برابر ۵۰ سال است.
- سطح دوم سطح مبنای طراحی می‌باشد که با احتمال رویداد ۱۰ درصد در طول عمر مفید ساختمان برابر ۵۰ سال درنظر گرفته می‌شود که دوره بازگشت رویداد زمینلرزه برای چنین سطحی برابر ۵۰۰ سال است.
- سطح سوم سطح بالای طراحی می‌باشد که با احتمال رویداد ۵ درصد در طول عمر مفید ساختمان برابر ۵۰ سال درنظر گرفته می‌شود که دوره بازگشت رویداد زمینلرزه برای چنین سطحی برابر ۱۰۰۰ سال است.
- سطح چهارم سطح حداقل مطرح شده برای طراحی می‌باشد که با احتمال رویداد ۲ درصد در طول عمر مفید ساختمان برابر ۵۰ سال درنظر گرفته می‌شود که دوره بازگشت رویداد زمینلرزه برای چنین سطحی برابر ۲۵۰۰ سال است.

باتوجه به سطوح لرزا های در طراحی فوق مشخص می شود که تحلیل خطر زمینلرزه باید به روش احتمالی صورت پذیرد و نتیجه آن باید منحنی خطر زمینلرزه باشد به عبارت دیگر نیاز به منحنی است که میزان جنبش نیرومند زمین را در دوره بازگشت های مختلف در ساختگاه مورد نظر در شالوده ساختمان نشان دهد.

#### ۱-۲- مطالعات لرزا زمینساخت:

گام نخست در تحلیل خطر زمینلرزه شناسایی چشممه های لرزا های احتمالی آتی گستره پیرامون ساختگاه ساختمان یا سازه های مختلف می باشد. برای این منظور ابتدا باید نسبت به گردآوری کلیه اطلاعات زمینلرزه ای و زمین ساختی از گستره مورد مطالعه اقدام لازم صورت می پذیرد و پس از بررسی های مقدماتی با استفاده از نگاره های هوایی و تصاویر ماهواره ای صحت و سقم داده های زمین ساختی و نو زمینساختی شناسایی شده، مورد بازنگری قرار می گیرد و در صورت شناسایی داده جدید، کلیه اطلاعات در مقیاس کاربری برای این دانش به نقشه درآورده می شود. مقیاس نقشه های مورد استفاده در مطالعات لرزا زمینساخت در گستره نزدیک در مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ و در گستره دورتر در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ کفایت می کند. با بررسی رویداد زمینلرزه هایی باستانی در دستگاهی در گستره این نقشه ها، چگونگی فعالیت لرزا های آنها در گذشته مورد پژوهش قرار می گیرد. در سرزمین لرزا خیزی نظیر ایران که از تمدن کهن برخوردار است گاهی اوقات رویداد زمینلرزه هایی باستانی در مطالعات باستان لرزا شناسی به چشم می خورد که حداکثر می تواند مربوط به ۵۰۰۰ سال گذشته باشد ولی این اطلاعات که از عدم قطعیت زیادی برخوردار هستند، بدستی نمی توانند فعالیت لرزا های داده های زمینساختی گستره مورد مطالعه را روشن سازند و در کنار این پژوهشها نیاز به انجام مطالعات نو زمینساختی می باشد و در مواردی نیاز به حفر ترانشه بر روی چشممه های لرزا نظیر گسل ها وجود داشته و با نمونه گیری از زون خرد شده گسل ها با استفاده از روشهای سن یابی می توان فعالیت های چشممه های لرزا کنترل و تعیین نمود. در این گامه از مطالعات تحلیل خطر زمینلرزه، چشممه های احتمالی لرزا شناسایی و مدل لرزا زمینساختی از هندسه آنها فراهم می شود. این مدلها حالت ساده ای از هندسه پیچیده چشممه های لرزا (خطی و ناحیه ای) می باشند. در این مطالعات کوشش می گردد تا مدل ریاضی چشممه های لرزا از قطعیت مکانی بیشتری برخوردار باشد و سعی می شود که پارامترهای موثر در برآورد پتانسیل رویداد زمینلرزه بر روی آنها شناسایی و تخمین زده شود. این پارامترهای شامل هندسه چشممه لرزا (طول، عرض، عمق و شیب و ...)، پتانسیل حداکثر زمینلرزه محتمل بر روی آن، چگونگی لایه لرزا در محدوده آن (ژرفای کانونی زمینلرزه های احتمالی آتی)، سازوکار حرکت های آتی بر روی آن چشممه و ... می باشد.

#### ۲-۲- برآورد پارامترهای لرزا خیزی

با گردآوری داده های زمینلرزه های تاریخی و دستگاهی امکان بررسی های آماری بر روی این داده ها فراهم می شود. سرشت لرزا خیزی هر گستره و ویژگی های لرزا خیزی آن بر پایه چگونگی رویداد زمینلرزه ها در آن گستره توصیف می گردد. هر چند رویداد زمینلرزه ها از گذشته تا حال از عدم قطعیت یکسانی برخوردار نیستند ولی با درنظر گرفتن خطاهای بویژه برای بزرگا و موقعیت مکانی آنها می توان با بکار گیری توابع توزیع مناسب به روشهای آماری پارامترهای لرزا خیزی گستره مورد مطالعه را تخمین زد. به منظور برآورد ویژگی های لرزا خیزی یک گستره لازم است که داده های زمینلرزه ای از کاتالوگ زمینلرزه های تاریخی و دستگاهی استخراج و مورد پردازش قرار گیرند. پس از تکمیل مشخصات زمینلرزه ها نظیر موقعیت

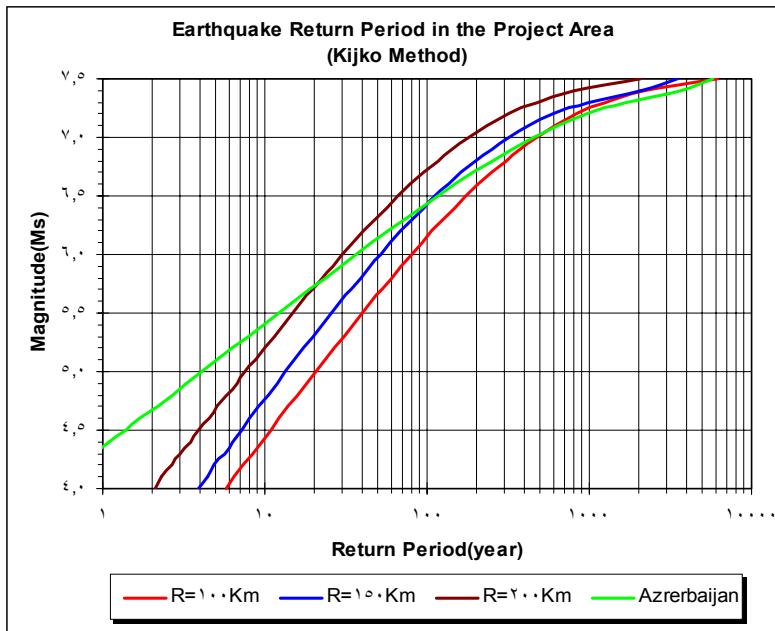
رومکز، بزرگای زمینلرزه، ژرفای کانونی زمینلرزه و .... می‌توان از روش‌های آماری بهره برد و سرنشت لرزه‌خیزی گستره مورد مطالعه را روشن ساخت. اولین کار آماری در سال ۱۹۴۴ توسط گوتنبرگ و ریشتر بر روی زمینلرزه‌های جنوب کالیفرنیا آمریکا صورت پذیرفت و به قانون تکرار رویداد زمینلرزه شهرت یافت. در این روش با دسته بندی و تکرار رویداد زمینلرزه‌ها در یک دوره مشاهده‌ای می‌توان پارامترهای یک رابطه خطی نظیر زیر را با بکارگیری روش‌های آماری کمترین مربعات برآورد نمود.

$$\text{Log } Nc = a - bm$$

در رابطه فوق  $Nc$  فراوانی تجمعی رویداد زمینلرزه و  $m$  بزرگای زمینلرزه و  $a$  و  $b$  پارامترهای لرزه‌خیزی گستره مورد پژوهش می‌باشد.

یکی از شاخص‌های فهرست زمینلرزه‌های یک گستره مورد مطالعه، تهیه فهرستی از رویداد زمینلرزه‌هایی است که رویداد آنها باید پدیده‌ای مستقل از یکدیگر باشند و توزیع آنها باید از فرآیند پوآسونی تبعیت نماید این شاخص سبب می‌شود که رویداد پسلرزه‌ها و پیشلرزه‌های یک زمینلرزه اصلی از فهرست رویداد زمینلرزه‌ها شناسایی و حذف گردند تا قطعیت پارامترهای لرزه‌خیزی  $a$  و  $b$  بیشتر شود. در دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ بیشترین بحث پیرامون تهیه فهرست مناسب رویداد زمینلرزه‌ها و چگونگی حذف پیشلرزه‌ها و پسلرزه‌ها گذشت و در دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ بکارگیری توابع توزیع غیرخطی بدون کران و کراندار مطرح شد و روش آماری برآشش مقادیر نهایی (Extreme Value Fiting) مورد آزمون قرار گرفت و سرانجام در دهه‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۰ روش‌های مناسبی برای برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی و دوره بازگشت رویداد زمینلرزه‌ها مطرح گردید که منتج به بکارگیری رویداد زمینلرزه‌های تاریخی بصورت Extreme در کنار داده‌های دستگاهی بصورت قانون تکرار گوتنبرگ- ریشتر اصلاح شده قرار گرفت و روش آماری درست نهایی یا روش تخمین بیشینه محتمل (Maximum Likelihood Estimation) آماری با بکارگیریتابع توزیع دو کراندار گوتنبرگ- ریشتر برآورده با قطعیت بیشتر برای دوره بازگشت رویداد زمینلرزه‌ها در تعیین سرشت لرزه‌خیزی گستره مورد مطالعه حاصل گردید.

وقوع احتمالی زمینلرزه‌ها با مدل پوآسونی به معمولترین شکل قابل توصیف است. مدل پوآسونی یک چارچوب ساده برای ارزیابی احتمالی وقایعی که از فرآیند پوآسونی تبعیت می‌نمایند، ارائه میدهد. فرآیندی که مقادیری از یک تغییر تصادفی برای توصیف تعداد وقوع یک حادثه خاص در یک فاصله زمانی یا یک گستره مکانی معین ارائه می‌دهد.



### ۳-۲-برآوردهای پارامترهای جنبش نیرومند زمین:

همانطوریکه در بخش نخست مطرح شد پارامترهای جنبش نیرومند زمین که در مقاوم سازی ساختمانها و یا سازه‌ها در برابر زمینلرزه بکار گرفته می‌شوند، شکلی از پارامترهای جنبش نیرومند زمین می‌باشد که به شالوده ساختمان و یا سازه وارد می‌شود و اندازه آن تابع رویداد زمینلرزه طرح برای سطوح مختلف لرزه‌ای در طراحی می‌باشد. متداولترین پارامتر جنبش نیرومند زمین، شتاب مولفه‌های افقی و قائم می‌باشد که می‌تواند بصورت تاریخچه زمانی شتاب معروفی شود و شامل محتوای فرکانسی و مدت دوام لرزش است.

بخشی از تحلیلهای استاتیکی ساختمان و سازه برای بارگذاری زمینلرزه با اوج دامنه شتاب جنبش نیرومند زمین انجام می‌شود. بنابراین لازم است که مقادیر آن برای زمینلرزه طرح در سطوح مختلف لرزه‌ای در طراحی تهیه شود، به تهیه این بخش از پارامترهای جنبش نیرومند زمین منحنی خطر زمینلرزه می‌گویند. این منحنی می‌تواند برای یک چشمۀ لرزه‌زا و یا ترکیبی از چشمۀ‌های لرزه‌زا برای ساختگاهی معین تهیه شود. مفهوم پایه‌ای محاسبات مورد نیاز برای تهیه منحنی‌های خطر زمینلرزه نسبتاً ساده می‌باشد. احتمال فزوئی یک مقدار خاص ( $y$ ) از اوج شتاب جنبش نیرومند زمین ( $Y$ ) برای زمینلرزه محتمل در یک موقعیت از چشمۀ لرزه‌ای محتمل، محاسبه شده و سپس در احتمال رویداد آن زمینلرزه ضرب خواهد شد. این مرافق سپس برای تمامی اندازه‌های زمینلرزه (بزرگا) و برای تمامی موقعیت‌های ممکن از یک چشمۀ لرزه‌زا با احتمال‌های هر مجموعه تکرار خواهد شد و مدل احتمالی آن بصورت زیر می‌باشد:

$$P(Y > y) = P(Y > y|E).P(E)$$

یا

$$P(Y > y) = P(M > m).P(R < r + dr).P(E)$$

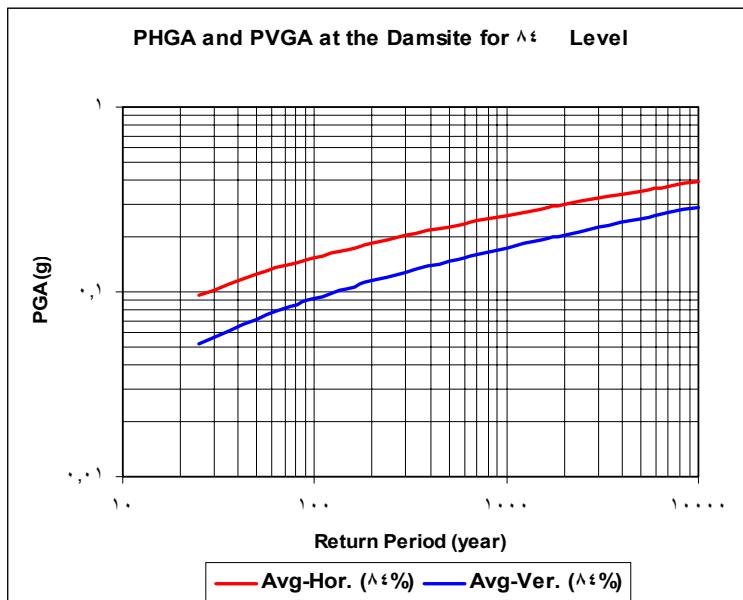
در مدل احتمالی فوق بزرگای زمینلرزه  $M$  مستقل از مکان رویداد  $R$  می‌باشد.

اگر در گستره مورد مطالعه  $n$  سرچشمه لرزه‌زا وجود داشته باشد، آنگاه تابع احتمال فزونی  $P(Y > y)$  بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$P(Y > y) = \sum_{i=1}^n P(M > m_i) \cdot P(R < r_i + dr) \cdot P(E)$$

بنابراین باید توزیع دو کراندر گوتبرگ- ریشر که در برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی  $a$  و  $b$  بکار گرفته شده است برای هر یک از سرچشمه‌های لرزه‌زا تعریف شود تا چگونگی رویداد زمینلرزه برروی آنها در برآورد احتمال رویداد پارامتر(ها) جنبش نیرومند زمین در ساختگاه سازه درنظر گرفته شود.

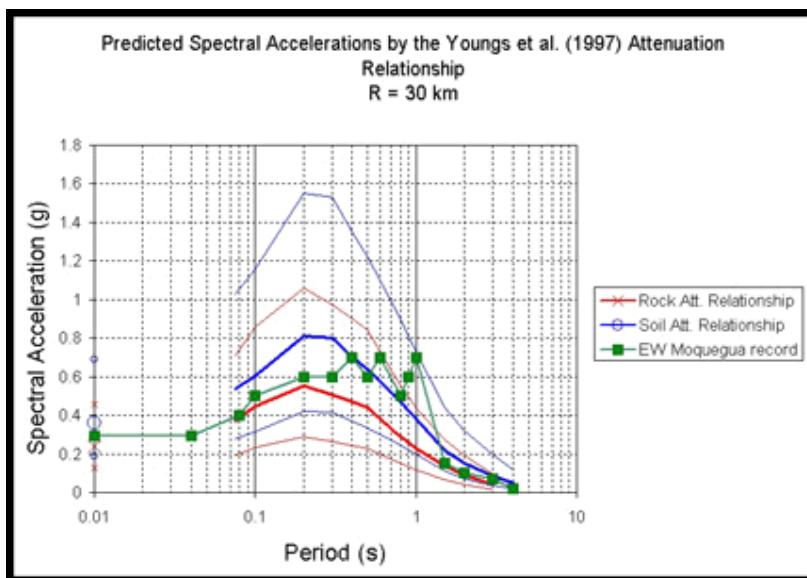
با توجه به مدل احتمال فزونی فوق می‌توان احتمال رویداد اوج پارامترهای جنبش نیرومند زمین را برحسب مقدار آن بدست آورد که آنگاه می‌توان منحنی خطر زمینلرزه را برای ساختگاه موردنظر محاسبه نمود. در این محاسبات باید مدل کاهیدگی از پارامتر موردنظر که می‌تواند بین چشمیه لرزه‌زا تا شالوده ساختمان تضعیف نماید برای برآورد پارامتر جنبش نیرومند زمین در ساختگاه موردنظر لحاظ شود.



بکارگیری مدل کاهیدگی حائز اهمیت بسیاری است. در انتخاب مدل کاهیدگی باید کوشش شود که از قطعیت بیشتری برخوردار باشد و برای افزایش قطعیت آن باید از راهکار درخت منطقی استفاده شود و حداقل از سه مدل کاهیدگی مناسب جهانی برای برازش و تخمین پارامتر جنبش نیرومند زمین بهره برد. روشی غیر احتمالی در برآورد پارامترهای جنبش نیرومند زمین وجود دارد که می‌تواند حداقل پارامترهای جنبش نیرومند زمین را در پیوند با چشمه‌های بسیار نزدیک به ساختگاه را برآورد نماید، به این روش قطعی می‌گویند زیرا احتمال رویداد را برابر یک درنظر می‌گیرند. از این روش صرفاً برای برآورد پارامترهای جنبش نیرومند زمین برای سطح کنترل و پایداری سازه‌هایی استفاده می‌شود که دارای مخاطرات (hazard) می‌باشند (نظیر بدنه سدهای بزرگ و نیروگاههای هسته‌ای). در روش قطعی بیشینه بزرگای زمینلرزه برروی چشمیه لرزه‌زا در

نزدیکترین فاصله ممکن به ساختگاه درنظر گرفته می‌شود و آنگاه برپایه مدل گاهیدگی بیشینه پارامتر جنبش نیرومند زمین در ساختگاه برآورد می‌گردد.

متداول‌ترین پارامتر جنبش نیرومند زمین اوج شتابهای افقی و قائم می‌باشد که به این روش محاسبه و برآورد می‌گردد. علاوه برای آن می‌توان از مدل‌های تجربی کاهیدگی طیف پاسخ زمین را برای احتمال رویداد یکسان تهیه نمود. در این روش احتمالی عیناً نظیر پارامتر اوج شتاب عمل می‌شود و برای پریودهای مختلف برپایه مدل‌های کاهیدگی در پریودهای ۰/۰۴ تا ۰/۰۴ ثانیه محاسبات انجام می‌شود. کلیه محاسبات برای میرایی ۵ درصد انجام شده و در صورت لزوم می‌توان طیف پاسخ را برای میرایی‌های دیگر نرم‌الیزه نمود.



معمولًاً در طراحی ساختمانهای و مقاوم سازی آنها در برابر زمینلرزه باتوجه به اهمیت آنها سطوح لرزه‌ای در طراحی تعریف می‌شود. پارامترهای جنبش نیرومند زمین از روی منحنی خطر برای این سطوح تعیین و به طراح پیشنهاد می‌شود. این پارامترها عبارتند از اوج شتابهای افقی و قائم جنبش نیرومند زمین و طیف پاسخ زمین برای هر یک از سطوح لرزه‌ای در میرایی‌های مختلف نظیر ۰/۰۵، ۱، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷، ۰/۱۰، ۰/۱۵، ۰/۲۰ درصد و می‌توان برای انجام آنالیز دینامیکی، تاریخچه زمانی شتاب جنبش نیرومند زمین را برای سطوح مختلف لرزه‌ای در طراحی یا بصورت مصنوعی و یا برپایه داده‌های شتابنگاشتی به مقیاس درآورد شده برای طراحی تهیه و در اختیار طراح قرار داد.

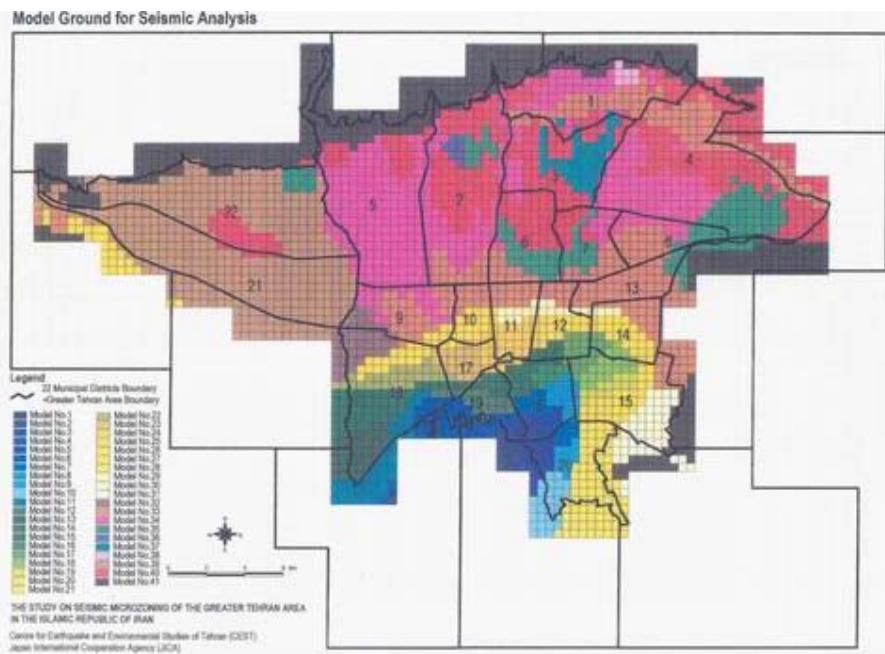
### ۳- پهنۀ بندی لرزه‌ای:

هنگامیکه ابعاد سازه یا ساختمان کوچک باشد پارامترهای جنبش نیرومند زمین برای نقطه‌ای که در مرکز آن قرار می‌گیرد محاسبه می‌شود (نظیر ساختمان مسکونی یا اداری، پل، سد، نیروگاه و ..) و در صورتیکه ابعاد سازه و یا ساختمانها بزرگ باشد نظیر گسترش یک شهر یا شریانهای حیاتی یک شهر نظیر ساماندهی آب و فاضلاب، سامانه برق یا گازرسانی و مخابرات یک کشور که یک منطقه وسیع را پوشش میدهد و یا در مورد سازه‌های

صنعتی نظیر قطبهای صنعتی، پالایشگاهها و... باید گستره این نوع ساختمانها یا سازه‌ها را از نظر معرفی پارامترهای جنبش نیرومند زمین پنهن بندی نمود.

پنهن بندی لرزه‌ای با توجه به کاربرد آن می‌تواند از دقت متفاوتی برخوردار باشد. برای مثال اگر هدف از مطالعات لرزه‌خیزی تهیه نقشه پنهن بندی لرزه‌ای کشور بر طبق آئین نامه های ساختمانی مقاوم سازی در برابر زمینلرزه باشد در این صورت نمی‌توان شرایط ساختگاهی را در پارامترهای جنبش نیرومند زمین لحاظ نمود و صرفاً می‌توان پارامترهای جنبش نیرومند زمین را برای پی سنج لرزه‌ای برآورد نمود و مقیاس کاربری آن می‌تواند نقشه‌های در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ یا ۱:۱۰۰۰۰۰ و نهایتاً ۱:۲۵۰۰۰۰۰ باشد و به ترتیب برای نقاطی با فاصله ۵۰، ۵۰ و یا ۱۰ کیلومتر از یکدیگر پارامترهای نظیر شتاب جنبش نیرومند زمین را برای پی سنج لرزه‌ای تهیه نمود. و سپس خمهای هم اوج شتاب را برای دوره بازگشت رویداد معین مطابق با تعاریف مورد نیاز تهیه نمود.

در صورتیکه پنهن بندی لرزه‌ای برای گستره یک شهر یا شریانهای حیاتی آن تهیه می‌شود ضرورت دارد که در فاصله نقاطی برابر با ۵، ۵/۲ و ۱ کیلومتر از یکدیگر پارامترهای نظیر شتاب جنبش نیرومند زمین را برای شالوده ساختمان یا سامانه شریانهای حیاتی شهری تهیه نمود. تهیه نقشه پنهن بندی در این مقیاس را ریز پنهن بندی لرزه‌ای می‌نامند و باید شرایط ساختگاه در پارامترهای جنبش نیرومند زمین لحاظ شود. نمونه‌ای از این کار توسط مطالعات ریز پنهن بندی لرزه‌ای شهر تهران توسط مرکز مطالعات زمینلرزه شهر تهران با همکاری گروه مطالعاتی جایکا ژاپن صورت گرفته است.



نمونه‌ای از نقشه‌های پنهن بندی لرزه‌ای در کشور آمریکا برای آئین نامه ساختمانی UBC در سال ۲۰۰۰ تهیه شده و پارامترهای جنبش نیرومند زمین برای پریودهای ۰/۰ ثانیه و یک ثانیه برای احتمال رویداد ۲ درصد در ۵۰ سال برروی سنگ سخت با سرعت برشی معادل ۷۶۰ متر بر ثانیه و ضریب میرایی ۵ درصد ارائه گردیده است.

