

# مروری بر مفاهیم زلزله و کاربرد تحلیل خطر لرزه‌ای و معرفی

## روش DSHA و PSHA

آرش بخشی پور صدایشته\*، دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد

مراغه، آذربایجان شرقی، ایران

مازیار فهیمی فرزام، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه مراغه، آذربایجان شرقی، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: arash.bakhsipoor@yahoo.com

دریافت: ۹۶/۱۰/۰۸ - پذیرش: ۹۷/۰۱/۱۸

صفحه ۸۷-۱۰۴

### چکیده

در مناطق بسیاری از جهان خطر زلزله برای فعالیت‌های بشر عاملی کافی جهت توجه دقیق در طراحی سازه‌ها و تاسیسات می‌باشد. تحلیل خطر زمین لرزه به تخمین کمی خطرات لرزش زمین در یک محل خاص مربوط می‌شود. خطرات لرزه‌ای در شرایطی که زلزله مشخصی مدنظر باشد، بصورت تعیینی و در شرایطی که اندازه، زمان و مکان زلزله قطعی نباشد به صورت احتمالی بررسی می‌شود. در روش تعیینی میزان بزرگی تولید شده و فاصله گسیختگی از سایت بطور دقیق و قطعی مشخص می‌باشد و خطرات ناشی از یک زلزله مشخص مورد بررسی قرار می‌گیرد ولی در روش احتمالی ما حدود را در نظر می‌گیریم. در تحلیل ریسک عوامل مختلف از جمله فاصله از چشمه وقوع زلزله، بزرگی زلزله، نوع خاک و ... ترکیب شده و در نهایت یک پارامتر طراحی را ارائه می‌دهد. هدف از این مقاله با توجه به کمبود منابع فارسی و لزوم بررسی نکات و توضیحات مهم و اساسی در این موضوع برای مهندسان و دانشجویان، مروری بر کلیات تحلیل خطر لرزه‌ای و بررسی روش‌های آن می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل خطر، گسیختگی، لرزه خیزی، PSHA، DSHA

### ۱- مقدمه

می‌باشد (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، ۱۳۹۳). در زلزله‌های ایران بیشتر خسارت وارد بر ساختمان‌ها، مربوط به ساختمان‌های با مصالح بنائی بوده است، البته دلیل این امر این است که مرکز زلزله‌های ایران در شهرهای بزرگ و پرجمعیت قرار نگرفته است و گرنه

چارچوب کلی تحلیل خطر زلزله، توصیه‌های کلی در خصوص جمع آوری و پردازش داده‌های پایه برای شناخت و مدل‌سازی چشمه‌های لرزه‌زا، توسعه مدل لرزه خیزی بر مبنای داده‌های پایه، انتخاب روابط کاهندگی و تشریح فرآیند تحلیل خطر احتمالی و تعیینی

وجود سرمایه‌های زیست محیطی و فرهنگی می‌شود. تغییر در هریک از این فاکتورها، بر میزان ریسک موثر است (زارع، م، ۱۳۹۶).

## ۲- پیشینه تحقیق

بطور کلی زمین لرزه‌ها در اثر افزایش تدریجی تنش و ایجاد گسیختگی در یک منطقه، به علت حرکت صفحات تکتونیک پوسته زمین به وجود می‌آیند. زیرا از نظر فیزیکی هر سنگ تا حد مشخصی توانایی ذخیره و 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 بوجود آمده و به اطراف محل گسیختگی منتشر می‌شوند. بنابراین می‌توان گفت زمین لرزه‌ها با گسل‌ها در ارتباط هستند و بایستی علاوه بر بانک اطلاعاتی داده‌های لرزه‌ای در هر چشمه لرزه‌ای اطلاعات زمین‌شناسی و زمین‌ساختی گسل‌ها نیز گردآوری شود. با ترکیب اطلاعات حاصل از مطالعات زمین‌شناسی، زمین‌ساختی و داده‌های لرزه‌ای بر روی یک نقشه می‌توان نقاطی را تعیین نمود که از نظر توان لرزه‌زائی مستقل بوده و با مناطق مجاور خود اختلاف داشته باشند. به این مناطق ایالت‌های لرزه زمین‌ساختی یا بطور خلاصه ایالت‌های لرزه‌خیز می‌گویند. شکل‌های شماره ۱ تا ۴ مراحل وقوع زمین لرزه و بطور کلی تعاریف را نشان می‌دهند. با توجه به مطالب بیان شده می‌توان گفت اساس کار در تحلیل خطر زلزله بر پایه دو گروه از داده‌هاست که می‌بایست درست انتخاب شوند (شاداب فر، ۱۳۹۲).

۱- نقشه‌های تکتونیک در محدوده طرح

۲- اطلاعات زمین لرزه‌های گذشته در محدوده طرح

اکثر ساختمان‌های فلزی و بتنی نیز بشدت آسیب می‌دیدند. خسارت وارد بر سازه‌ها در اثر زلزله ناشی از کاستی و ضعف در موارد زیر می‌باشد:

الف- برآورد مشخصات زلزله پیشینه وارد بر سازه در طول عمر مفید آن ب- نحوه محاسبه و طراحی سازه در مقابل زلزله برآورد شده ج- کیفیت اجرا و نگهداری سازه در طول عمر مفید سازه می‌باشد (شاداب فر، ۱۳۹۶). در طبیعت پدیده‌ها به سه دسته پدیده‌های معین، نامعین و رندم تقسیم بندی می‌شوند که زمین لرزه و نیروهای ناشی از آن، معین نمی‌باشند بلکه بایستی با استفاده از اطلاعات گذشته و به کارگیری علم احتمالات به بررسی تاثیرات و برآورد پارامترهای طراحی لرزه ای اقدام نمود (بیت‌اللهی، ۱۳۹۳).

## Hazard Earthquake و Earthquake Risk

هر دو در لغت به معنی خطر لرزه‌ای می‌باشند ولی در واقع دو کلمه‌ای متفاوت در مهندسی زلزله می‌باشند.

Earthquake Risk برای توضیح دادن شدت جنبش زمین بدون در نظر گرفتن پیامدهای آن در سایت مورد نظر بکار می‌رود (Anderson, J.G, 2002). واژه ریسک (Risk) به بررسی پیامدهای جنبش نیرومند زمین در سایت مورد نظر اشاره دارد. در محاسبه ریسک لرزه‌ای در سایت مورد نظر پارامترهایی همچون میزان مقاومت سازه‌ها و مدیریت بحران و ... نیز دخیل می‌باشند (Jordanovski, L.R, 1991).

ریسک = خطر × آسیب پذیری × معرضیت

آسیب‌پذیری شامل فاکتورهایی همچون، فیزیکی (فنی - سازه‌ای)، سازمانی، روانی، اجتماعی و اقتصادی می‌باشد. معرضیت شامل جمعیت انسان‌ها، تراکم سازه‌ها و زیرساخت‌ها، توزیع شریان‌های حیاتی، مقدار یا تعداد سرمایه و اموال، وجود و تراکم فعالیت‌های اقتصادی و

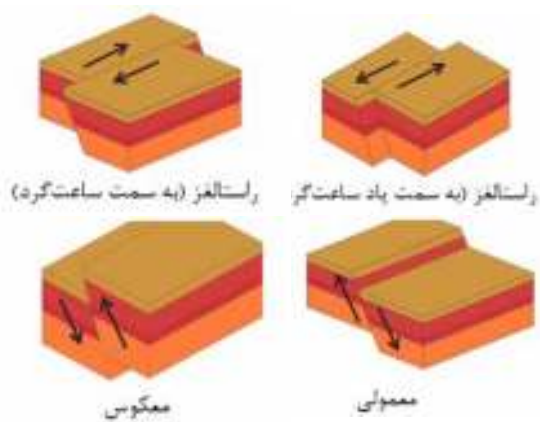


شکل ۲. موقعیت رخ داد زلزله ها از ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۰ (تابش پور، ۱۳۹۴)

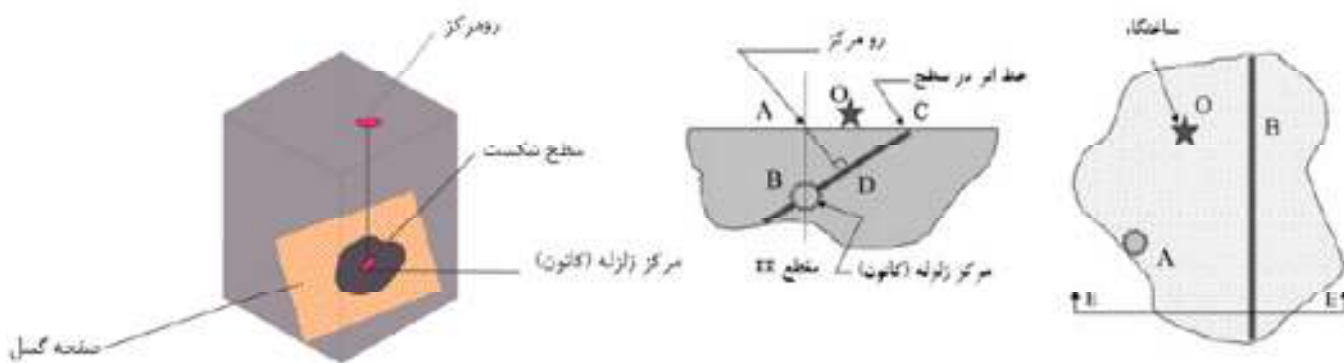


شکل ۱. مرز صفحات زمین ساختی و جهت حرکت آن ها

(تابش پور، ۱۳۹۴)



شکل ۳. انواع گسلش (تابش پور، ۱۳۹۴)



OA - فاصله رو مرکز تا ساختگاه، OB - فاصله کانون تا ساختگاه

OC - فاصله تا خط اثر در سطح، OD - فاصله تا شکست

شکل ۴. تعریف عبارات مربوط به زلزله و گسل (تابش پور، ۱۳۹۴)

جدول ۱. بزرگای زلزله و انرژی معادل (تابش پور، ۱۳۹۴)

| بزرگای زلزله | انرژی آزاد شده (Millions of Erges) | زلزله معادل                 |
|--------------|------------------------------------|-----------------------------|
| ۰            | ۶۳۰,۰۰۰                            | ۱ پوند مواد منفجره          |
| ۱            | ۲۰,۰۰۰,۰۰۰                         |                             |
| ۲            | ۶۳۰,۰۰۰,۰۰۰                        | ۳۰ پوند مواد منفجره         |
| ۳            | ۲۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰                     |                             |
| ۴            | ۶۳۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰                    | ۱۰۰۰ پوند مواد منفجره       |
| ۵            | ۲۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰                 |                             |
| ۶            | ۶۳۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰                | زلزله‌ی نورتریج، ۱۹۹۴       |
| ۷            | ۲۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰             | زلزله‌ی لوماپریتا، ۱۹۸۹     |
| ۸            | ۶۳۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰            | زلزله‌ی سان فرانسیسکو، ۱۹۰۶ |
| ۹            | ۲۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰         | زلزله‌ی شیلی و آلاسکا، ۱۹۶۰ |
| ۱۰           | ۶۳۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰        | مصرف سالانه ی انرژی امریکا  |

### ۳- پارامترهای اندازه گیری زمین لرزه

چندین پارامتر برای شدت زمین لرزه که بیانگر بزرگی و اثر آن‌ها است وجود دارد. برخی بصورت مستقیم و برخی به صورت غیر مستقیم و به کمک روابط تجربی و از اطلاعات ثبت شده از زلزله های دیگر بدست می‌آیند. بنابراین روابط تجربی گوناگونی به وجود آمده‌اند که می‌توانند یک پارامتر شدت را به پارامتر دیگر نسبت دهند. در زیر به برخی از پارامترهای شدت زلزله اشاره می‌کنیم (پارمحمدی، ۱۳۹۰). جدول شماره ۱ بزرگای زلزله، انرژی آزاد شده و زلزله معادل آن را نشان می‌دهد.

### ۳-۱- بزرگای محلی (ML)

بزرگای محلی ML مربوط به رابطه‌ای است که ریشتر در سال ۱۹۳۵ برای زمین لرزه‌های محلی در

کالیفرنیا ارائه داد. بزرگای محلی ML به عنوان لگاریتم حداکثر دامنه‌ای که از ثبت رکوردهای زمین لرزه به وسیله لرزه نگار وود - اندرسون که واقع در ۱۰۰ کیلومتری مرکز سطحی زمین لرزه قرار داشت تعریف شده است. لرزه نگار باید پیروود طبیعی ۰/۸ ثانیه، بزرگنمایی ۲۸۰۰ و ضریب میرایی ۰/۸۰٪ میرایی بحرانی را دارا باشد. اندازه یک زمین لرزه با یک اندازه مرجع مقایسه می‌شود.

$$ML = \log A - \log A_0 \quad (1)$$

A دامنه حداکثر بر حسب میکرومتر که توسط یک لرزه نگار کوچک استاندارد ثبت شده است و A<sub>0</sub> مقدار استاندارد است که تابعی از فاصله می باشد (کمتر از ۱۰۰ کیلومتر). بر حسب زلزله مرجع می‌توان رابطه ۲ را به صورت زیر نوشت.

$$ML = \log A - 2.48 + 2.7 \log \Delta \quad (2)$$

که  $\Delta$  فاصله رو مرکزی تا محل زلزله نگار است. امروزه از ML بندرت استفاده می شود بدلیل اینکه استفاده از لرزه نگار وود - اندرسون زیاد رایج نیست.

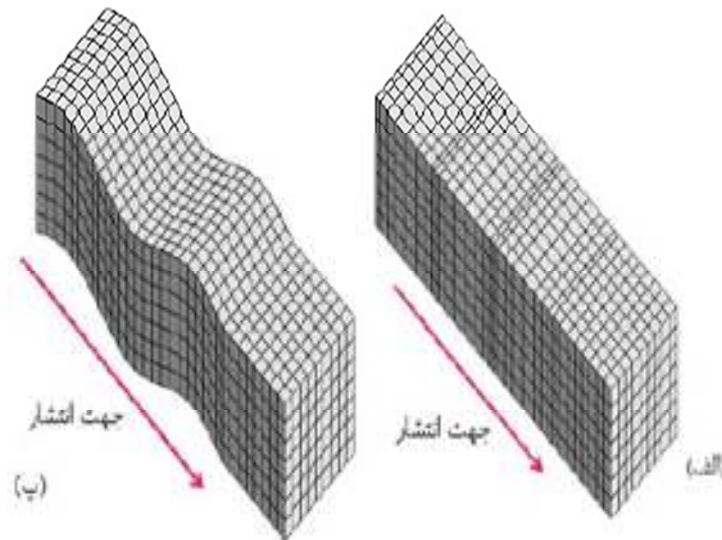
### ۳-۲- بزرگای امواج حجمی (Mb)

اگرچه بزرگی محلی مفید است اما بدلیل محدودیت های اعمال شده از نوع ابزار زلزله نگار و محدودیت فاصله نمی تواند خصوصیات جهانی بزرگای زمین لرزه ها را پوشش دهد. گوتنبرگ و ریشتر، Mb را بر پایه دامنه امواج حجمی P با پرپود (مدت زمان رفت و برگشت سازه) بر حسب ثانیه، پیشنهاد کردند.

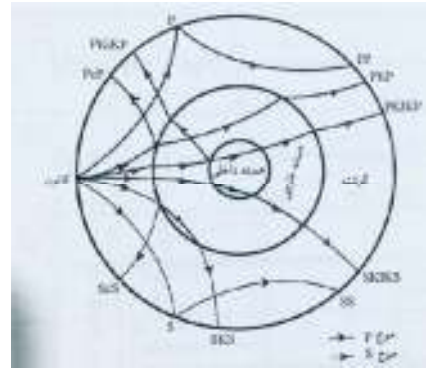
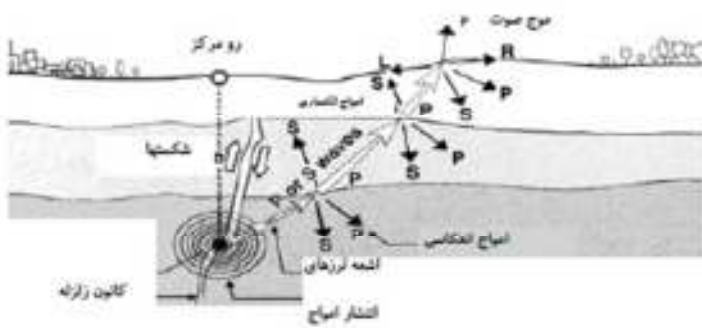
$$M_b = \log \left( \frac{A}{T} \right) + Q(h, \Delta) \quad (3)$$

که A دامنه جنبش زمین بر حسب میکرون، T پرپود

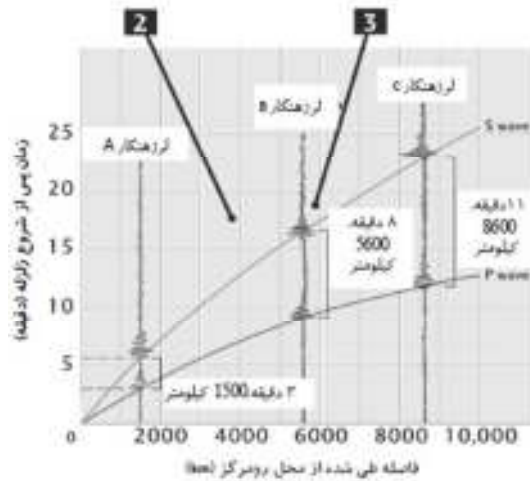
بر حسب ثانیه و Q تابعی از فاصله  $\Delta$  و عمق h است. شکل های شماره ۵ و ۶ انواع امواج حجمی که شامل موج P و S می شود را نشان داده و همچنین نحوه انتشار این امواج در حجم زمین را نشان می دهد. شکل شماره ۷ نحوه انکسار و انتشار امواج لرزه ای در درون زمین نسبت به منبع انتشار و شکل شماره ۸ نمودار فاصله زمانی رسیدن امواج P و S بر حسب فاصله تا رو مرکز زلزله را نشان می دهد.



شکل ۵. انواع موج حجمی (درونی)، (الف) موج فشاری (P)، (ب) موج برشی (S) (تابش پور، م، ۱۳۹۴)



شکل ۶. نحوه انتشار امواج در حجم زمین (زارع، ۱۳۸۴) شکل ۷. انکسار و انتشار امواج لرزه ای در درون زمین نسبت به منبع انتشار (تابش پور، ۱۳۹۴)



شکل ۸. نمودار فاصله زمانی رسیدن امواج P و S بر حسب فاصله تا رو مرکز زلزله (تابش پور، ۱۳۹۴)

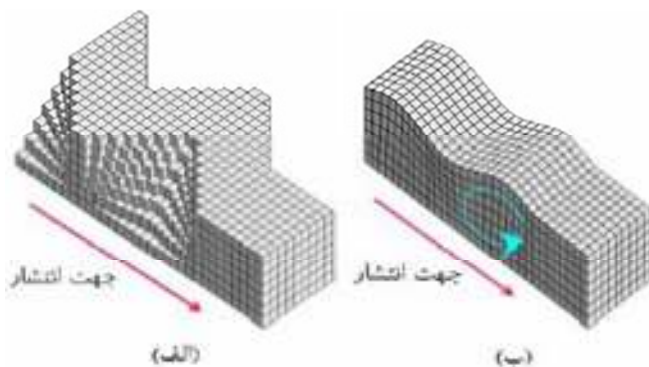
اندازه‌گیری شده است،  $T$  پریود موج زلزله بر حسب ثانیه و  $\Delta$  فاصله رو مرکزی بر حسب کیلومتر است. شکل شماره ۹ جهت و نحوه انتشار انواع موج سطحی که شامل موج لاو و موج رایلی می‌شود را نشان می‌دهد.

بزرگای امواج سطحی ( $M_s$ )

بزرگای  $M_s$  نیز توسط گوتنبرگ و ریشتر ارائه شد و رابطه آن به صورت زیر است.

$$M_s = \log \left( \frac{A}{T} \right) + 1.66 \log \Delta + 20 \quad (4)$$

که  $A$  بزرگای طیفی مولفه افقی موج رایلی با پریود ۲۰ ثانیه است که در سطح زمین و برحسب میکرون



شکل ۹. انواع موج سطحی، (الف) موج لای، (ب) موج رایلی (تابش پور، ۱۳۹۴)

گسل‌هایی با طول گسیختگی بسیار نزدیک ممکن است به نظر یک چشمه نقطه‌ای بیایند.

$$M_W = \left(\frac{2}{3}\right) \log_{10} M_0 \quad (6)$$

شدت زلزله

شدت یک زلزله بر حسب احساس انسان‌ها از آن و تاثیر قابل رویت آن بر سازه‌ها و زندگی افراد سنجیده می‌شود. واحد شدت مرکالی است و شامل ۱۲ درجه می‌باشد. شدت زلزله مقیاسی است که بیشتر برای پی بردن به بزرگی زلزله‌های تاریخی استفاده می‌شود. این درجات شدت زلزله با کمک روابطی به واحدهای بزرگی رایج قابل تبدیل است. شکل شماره ۱۰ انواع مختلف مقیاس برای شدت زلزله را با یکدیگر مقایسه کرده است.

بزرگای گشتاوری ( $M_w$ )

بهترین روش اندازه‌گیری زلزله‌های بزرگ استفاده از ممان لرزه‌ای  $M_0$  است. نیروهای مساوی و خلاف جهت ایجاد شده در طول گسیختگی گسل، لنگری ایجاد می‌کنند که به آن لنگر لرزه‌ای گفته می‌شود.

$$M_0 = GUA \quad (5)$$

که در این رابطه  $A$  مساحت گسل (طول  $X$  عرض) بر حسب مترمربع،  $U$  جابجایی طولی گسل بر حسب متر و  $G$  مدول صلیبیت سنگ‌ها است. بزرگای گشتاوری توسط لرزه‌نگاری که امواجی با طول موج‌های بسیار زیاد را اندازه‌گیری می‌کند سنجیده می‌شود. با این وسیله گاهی

|     |   |    |     |     |    |    |     |      |    |   |    |     |
|-----|---|----|-----|-----|----|----|-----|------|----|---|----|-----|
| MMB | I | II | III | IV  | V  | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
| RF  | I |    | II  | III | IV | V  | VI  | VII  | IX | X |    |     |
| JMA | I |    | II  | III | IV | V  | VI  | VII  |    |   |    |     |
| MRK | I | II | III | IV  | V  | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |

شکل ۱۰. مقایسه مقیاس‌های مختلف برای شدت زلزله (تابش پور، ۱۳۹۴)

## ۴- تحلیل خطر لرزه‌ای

### ۱-۴- تعریف تحلیل خطر

برآورد برخی از پارامترهای طراحی لرزه ای جنبش نیرومند زمین برای زمین لرزه محتمل در آینده با استفاده از دانش گذشته را تحلیل خطر لرزه ای گویند (بیت‌اللهی، ع). زلزله‌ها رویدادهای طبیعی با ماهیت تصادفی هستند. اثرات زلزله‌های آینده را نمی‌توان دقیقاً مشخص کرد و تنها با روش‌های احتمالاتی می‌توان تا حدی این اثرات را پیش‌بینی نمود. تحلیل خطر زلزله شامل تحقیقات و روش‌هایی است که بوسیله آنها می‌توان اثرات زمین لرزه‌های آینده را در ساختگاه تخمین زد. این اثرات اصولاً شامل پارامترهای حرکتی زمین است. در گذشته به دلیل فقدان ابزارهای اندازه‌گیری جنبش زمین از پارامتر شدت زلزله استفاده می‌شد. بعد از توسعه ابزارهای ثبت اطلاعات جنبش زمین، از حداکثر شتاب زمین  $PGA$  در مطالعات تحلیل خطر استفاده شد. حداکثر سرعت زمین  $PGV$  و حداکثر جابجایی زمین  $PGD$  و همین‌طور شتاب طیفی  $SA$  در پریودهای مختلف سازه‌ای، مثال‌هایی از پارامترهای سنجش جنبش زمین در سالهای اخیر است. تحلیل خطر زلزله یک جزء ضروری طراحی لرزه‌ای سازه‌ها، تحلیل ریسک لرزه‌ای، تخمین تلفات و خسارات و محاسبات بیمه‌ای مربوط به آن محسوب می‌شود.

### ۲-۴- نتایج تحلیل خطر

نتایج تحلیل خطر به صورت نقشه‌های پهنه بندی تحلیل خطر که هر کدام از این نقشه‌ها، در اصل بیان‌کننده یکی از پارامترهای لرزه‌ای یا طیف‌های پاسخ هستند، ارائه می‌گردند (Dravinski, M, 1980).

## ۴-۳- مراحل اساسی در تحلیل خطر لرزه‌ای

از جمله مراحل اساسی در تحلیل خطر لرزه‌ای می‌توان به این موارد اشاره کرد. تعیین چشمه‌های لرزه‌ای و بررسی لرزه‌خیزی منطقه، استفاده از قانون کاهندگی پارامترهای لرزه‌ای (بدست آوردن روابط کاهندگی یا استفاده از روابط کاهندگی معتبر)، تهیه منحنی خطر، تهیه طیف‌های طراحی (بیت‌اللهی، ع).

### ۴-۴- سطوح طراحی

در آیین‌نامه‌های لرزه‌ای و همچنین در استاندارد ۲۸۰۰ با توجه به درجه اهمیت سازه یکی از ۴ نوع سطح طراحی برای سازه‌ها انتخاب می‌شوند، که عبارتند از: (ICSRDB, 1999)

سطح حداکثر زمین لرزه قابل وقوع (MCL)

سطح ماکزیمم طراحی (MDL)

سطح مبنای طراحی (DBL)

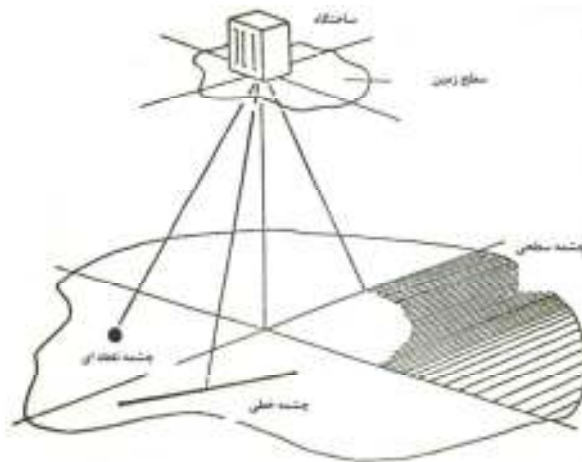
سطح ساخت (CL)

در سطح طراحی  $MCL$  به صورت پارامترهای بزرگترین زمین لرزه ناشی از نزدیک‌ترین گسل یا بزرگترین زمین لرزه تاریخی یا بزرگترین زمین لرزه‌ای که از لحاظ تکنونیک امکان وقوع در منطقه را دارد، تعریف می‌شود. در سطح طراحی  $MDL$  پارامترهای زمین لرزه با دوره بازگشت ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ ساله برای طراحی در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که بخواهیم سازه را برای زمین لرزه محتمل در عمر مفید سازه (زمین لرزه‌ای با دوره بازگشت ۱۵۰ تا ۵۰۰ ساله (معمولاً ۴۷۵ ساله)) طراحی کنیم از سطح طراحی  $DBL$  استفاده می‌شود. در این سطح طراحی امکان خرابی جزئی به سازه و اجزای غیر سازه‌ای مورد قبول می‌باشد ولی

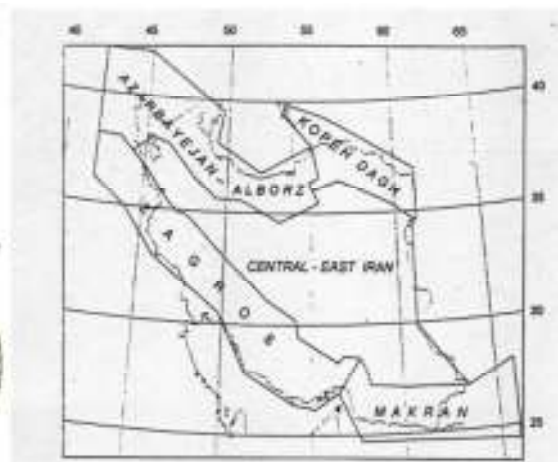


افزار SEISRISK II را که در واقع نسخه بهبود یافته نرم افزار SEISRISK I که در سال ۱۹۷۶ توسط آلگرمیسن و همکاران و در زمان تهیه نقشه‌های ملی تحلیل خطر زلزله تدوین شده بود را توسعه دادند. در سال ۱۹۸۴ چیانگ و همکاران برنامه کامپیوتری STASHA را در دانشگاه استنفورد نوشتند. در سال ۱۹۸۷، بندر و پرکینز، نرم افزار SEISRISK II را ارتقا داده و برنامه SEISRISK III را ارائه نمودند. در سال ۱۹۹۶، USGS توسط فرانکل و همکاران و در حین تدوین نقشه‌های تحلیل خطر ملی در همان سال ارائه کرد. نرم افزارهای زیر در سال‌های اخیر برای مطالعات تحلیل خطر احتمالاتی به کار رفته‌اند. , EZ-FRISK , CRISIS-2007 , CRISIS 2003 , FRISK88M

نبایستی سازه به مرحله انهدام برسد. پایین‌ترین سطح طراحی لرزه ای مربوط به سطح ساخت CL می باشد، بدین معنی که سازه‌های در حال ساخت بایستی بتوانند حداقل این زمین لرزه (زمین لرزه ای با دوره بازگشت ۵۰ ساله) را در صورت وقوع تحمل نمایند. برای سطوح طراحی که در بالا اشاره گردید زمین لرزه محتمل در آینده با دوره بازگشت ۵۰ تا ۱۰۰۰۰ ساله پیشینه تدوین نرم افزارهای تحلیل خطر زلزله در گذشته همزمان با توسعه روش برنامه های کامپیوتری مختلفی در این زمینه تدوین شد. در بین نرم افزارهای اولیه انجام PSHA بیشترین استفاده را برنامه EQRISK داشت که در سال ۱۹۷۶ توسط مک گایر تدوین شده بود. در سال ۱۹۷۸ مک گایر آن را با نام FRISK توسعه داد. در سال ۱۹۸۲، بندر و پرکینز، نرم



شکل ۱۲. مدل‌های چشمه‌های لرزه ای در یک ایالت لرزه زمین ساخت (شاداب فر، ۱۳۹۶)



شکل ۱۱. ایالت‌های لرزه زمین ساختی ایران (بیت الهی، ۱۳۹۵)

عناصر تشکیل دهنده بانک اطلاعاتی، پیش از قرارگرفتن در کنار سایر داده‌ها، باید به صورت کامل از جنبه‌های گوناگون مورد پردازش قرار گیرد. تعیین ساز و کار گسلها، هندسه پهنه‌های لرزه‌زا، طول گسیختگی و حداکثر زلزله

#### ۴-۶- مدل‌های چشمه‌های لرزه‌ای

پیش نیاز بنیادین برای انجام تحلیل خطر زلزله جمع آوری و توسعه یک بانک داده یکپارچه و جامع از چشمه‌های لرزه‌ای منطقه مورد مطالعه است. هر یک از

پهنه ای رابطه لرزه خیزی باید نسبت به زمان و مساحت چشمه بهنجار شود.

#### ۴-۷- کاتالوگ لرزه خیزی

برای شناخت لرزه‌ای و الگوی لرزه‌خیزی منطقه باید اطلاعات تمام زلزله‌های رخ داده در محدوده لازم جمع آوری شود. محدوده مورد اشاره الزاماً محصور به مرزهای جغرافیایی ایران نخواهد بود. داده‌ها به دو دوره زلزله‌های تاریخی قبل از سال ۱۹۰۰ میلادی و زلزله‌های معاصر یا دستگامی بعد از سال ۱۹۰۰ میلادی تقسیم بندی می‌شود. از تجمیع داده‌های تاریخی و دستگامی کاتالوگ لرزه خیزی منطقه آماده می‌گردد. برای هر یک از زلزله‌های تاریخی لازم است اطلاعاتی همچون زمان رخداد، مکان تخمینی رومرکز، بزرگای تخمینی، عمق تخمینی، حداکثر شدت و نیز منحنی هم شدت در مقیاس مرکالی و برآورد عدم قطعیت‌ها در تخمین پارامترهای فوق، مشخص شوند. برای زلزله‌های بعد از سال ۱۹۰۰ میلادی جمع آوری و اطلاعاتی همچون زمان رخداد، مکان تخمینی رومرکز، موقعیت رومرکز، بزرگای ثبت شده، عمق رخدادها، ابعاد و هندسه ناحیه در بردانده پیش و پس لرزه‌ها، برآورد عدم قطعیت در برآوردهای فوق و سایر اطلاعات مفید در شناخت لرزه زمین ساخت مانند ساز و کار کانونی، افت تنش و پارامترهای چشمه، باید تکمیل شوند.

فرآیند تحلیل خطر لرزه‌ای با فرض پواسنی بودن وقوع زمین لرزه‌ها (وقوع مستقل زمین لرزه‌ها) انجام می‌گیرد. با پردازش مناسب این کاتالوگ شامل بررسی کامل بودن کاتالوگ در طول زمان، یکنواختی مکانی آن و حذف زلزله‌های وابسته در کاتالوگ، قابلیت اعتماد کاتالوگ افزایش می‌یابد تا با استفاده از آن رابطه بزرگا - فراوانی

منتسب به هر چشمه، خروجی اصلی این بخش است، شعاع یا محدوده شناسایی در این تراز حداکثر ۱۵۰ کیلومتر است (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، ۱۳۹۳). شکل شماره ۱۱ ایالت‌های لرزه زمین ساختی ایران و شکل شماره ۱۲ مدل‌های چشمه‌های لرزه‌ای در یک ایالت لرزه زمین ساخت را نشان می‌دهد. بطور کلی سه نوع چشمه لرزه‌ای وجود دارد (شاداب فر، ۱۳۹۶).

#### ۴-۶-۱- چشمه نقطه‌ای

برای این نوع از چشمه لرزه‌ای، فرض می‌شود که مرکز همه رویدادهای زلزله (گذشته و آینده) در یک نقطه اتفاق می‌افتد. این مدل معمولاً برای چشمه‌هایی که از ساختگاه پروژه خیلی دور باشند به کار می‌رود. رابطه لرزه خیزی در این مدل تنها نسبت به زمان (فاصله زمانی داده‌ها) باید بهنجار شود.

#### ۴-۶-۲- چشمه خطی

برای این نوع چشمه لرزه‌ای، فرض می‌شود که مرکز زمین لرزه‌ها در طول یک الگوی خطی قرار می‌گیرد. برای یک چشمه خطی روابط لرزه خیزی باید نسبت به زمان و طول خط بهنجار شود.

#### ۴-۶-۳- چشمه پهنه ای یا سطحی

وقتی مرکز سطحی زمین لرزه‌های گذشته بر روی یک خط قرار نگیرند یا وقتی هیچ اطلاعاتی از مکان گسل‌ها وجود نداشته باشد ولی رویدادهای زمین لرزه در منطقه ای محدود پراکنده شده باشد، چشمه لرزه‌ای بصورت یک چشمه پهنه ای در نظر گرفته می‌شود. برای یک چشمه

$\ln N = \alpha - \beta m$  (رابطه گوتنبرگ - ریشتر) بدست آید (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، ۱۳۹۳).

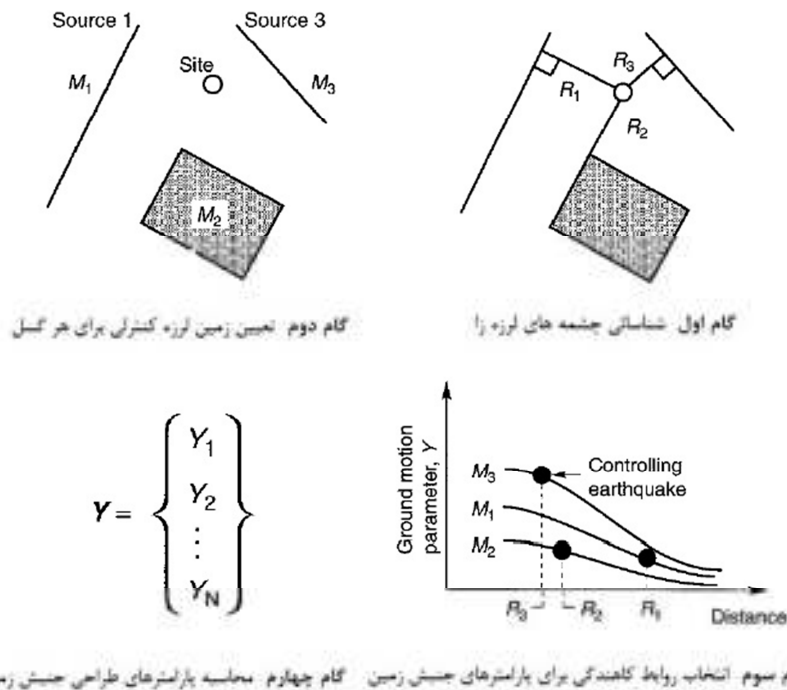
لرزه‌ای به روش احتمالاتی. از نظر زمانی ابتدا روش احتمالاتی در دنیا مطرح گردید و مورد استفاده قرار گرفت. در زیر هر کدام از روش‌ها به طور خلاصه توضیح داده شده‌اند.

#### ۴-۸- روش‌های تحلیل خطر لرزه‌ای

تحلیل خطر زلزله تخمین کمی خطرات لرزش زمین در یک محل بخصوص می‌باشد. برای انجام تحلیل خطر لرزه‌ای دو روش کلی در دنیا مطرح گردیده‌اند که عبارتند از تحلیل خطر لرزه‌ای به روش تعیینی و تحلیل خطر

#### ۴-۸-۱- تحلیل خطر لرزه‌ای به روش تعیینی

در این روش همه پارامترها از جمله بزرگای تولید شده در چشمه و فاصله از سایت بطور قطعی انتخاب شده و سپس تحلیل خطر انجام می‌گیرد.



شکل ۱۳. گام‌های روش تحلیل خطر تعیینی (Kramer, ۱۹۹۶)

#### ۴-۸-۱-۱- تکمیل بانک اطلاعاتی

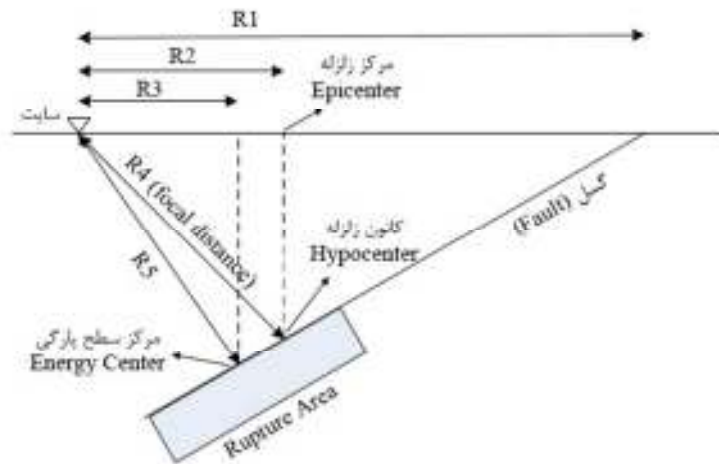
جهت انجام تحلیل خطر تعیینی نیاز به اطلاعات مربوط به زلزله‌های گذشته می‌باشد. این اطلاعات را که اصطلاحاً بانک اطلاعات لرزه‌ای می‌نامیم می‌بایست شامل بزرگای زلزله‌ها، تاریخ وقوع و محل وقوع آنها باشد.

همانطور که در شکل ۱۳ نیز نشان داده شده است، تحلیل خطر به روش تعیینی از چهار گام اصلی تشکیل می‌شود. شناسایی چشمه‌های لرزه‌زا، تعیین زمین لرزه‌های کنترل‌ی برای هر گسل، انتخاب روابط کاهندگی برای پارامترهای جنبش زمین و محاسبه پارامترهای طراحی جنبش زمین (Bour, M, ۲۰۰۰). اطلاعات زلزله‌های تاریخی ایران عمدتاً در دو مرجع تاریخ زمین لرزه‌های ایران (امبرسیز و ملویل ۱۹۸۲) و کاتالوگ زمین لرزه‌های ایران (بربریان ۱۹۹۴) موجود است. میزان خطا در بزرگای موقعیت زلزله‌ها در اوایل قرن حاضر زیاد بوده و بعد از

استقرار شبکه لرزه‌نگاری جهانی در سال ۱۹۶۳ دقت اطلاعات از نظر مکانیابی و بزرگای بیشتر شده است.

#### ۴-۸-۱-۲- شناسایی چشمه‌های لرزه‌زا

در گام اول می‌بایست تمام چشمه‌های لرزه‌زا که امکان ایجاد خرابی در سایت مدنظر را دارند، براساس نقشه‌های زمین شناسی معتبر، بازدیدهای محلی و همچنین از تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی و زلزله شناسی، شناسایی گردند. در این گام باید فاصله هر کدام از چشمه‌های لرزه‌زا تا سایت مورد نظر تعیین گردد. شکل ۱۴ انواع فاصله‌های چشمه لرزه‌زا تا سایت مورد نظر را نشان می‌دهد که معمولاً روابط مورد استفاده در تحلیل خطر زلزله بر اساس فاصله کانونی R4 می‌باشد، اما با این وجود باید این موضوع را کنترل کنیم.



شکل ۱۴. انواع فاصله‌های چشمه لرزه‌زا تا سایت مورد نظر (شاداب فر، م)

#### ۴-۸-۱-۳- تعیین زمین لرزه کنترلی

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

(۷) رابطه نوروژی

$$MS = 1.259 + 1.244 \log L, L(m)$$

(۸) رابطه امبرسیز و ملویل

$$MS = 5.4 + \log L, L(km)$$

(۹) رابطه ولز و کوپر اسمیت

|                              |                   |
|------------------------------|-------------------|
| $MS = 5.16 + 1.12 \log L,$   | گسل راستالغز      |
| $L(km)$                      |                   |
| $M = 5 + 1.22 \log L, L(km)$ | گسل معکوس         |
| $M = 5 + 1.16 \log L, L(km)$ | گسل نرمال         |
|                              | (۱۰) رابطه سولماز |

|                             |              |
|-----------------------------|--------------|
| $MS = 1.404 + 1.16 \log L,$ | گسل راستالغز |
| $L(m)$                      |              |
| $M = 2.021 + 1.142 \log L,$ | گسل معکوس    |
| $L(m)$                      |              |
| $M = 0.809 + 1.341 \log L,$ | گسل نرمال    |
| $L(m)$                      |              |

در روابط بالا  $M$  بزرگای زلزله و  $MS$  بزرگای سطحی و  $L$  طول گسلش می‌باشد.

با استفاده از روابط بالا برای یک گسل چندین بزرگا محاسبه می‌شود. جهت انتخاب زمین لرزه کنترلی می‌بایست به هرکدام از این بزرگاها یک وزن اختصاص دهیم و سپس با ضرب این اوزان در بزرگاها و جمع آنها زمین لرزه کنترلی را انتخاب کنیم. به این روش درخت منطقی گویند (شاداب فر، م). برای سایتی که دارای سازه‌ها و یا عناصر غیر سازه ای مهم و حیاتی می‌باشد (مانند نیروگاه اتمی و پالایشگاه های نفت و ...) زمین لرزه قابل

وقوع بر اساس حداکثر پتانسیل گسل های منطقه انتخاب می‌شود.

بزرگترین زمین لرزه تاریخی در یک ناحیه و یا یک منبع لرزه‌ای به عنوان حداقل مقدار برای  $M_{max}$  محتمل برای آن ناحیه یا منبع لرزه‌ای می‌باشد. برای کارهای دقیق‌تر، با ترانسه‌زنی روی گسل‌ها و مطالعه حرکت آنها می‌توان به بزرگای دقیق‌تری از زمین لرزه‌های تاریخی دست پیدا کرد (Krnitzsky, E.L., ۱۹۹۵ و Romeo, R, ۲۰۰۰).

#### ۴-۸-۱-۴- انتخاب روابط کاهندگی برای پارامترهای جنبش زمین

کاهش پارامترهای جنبش نیرومند زمین با دور شدن از منبع زمین لرزه را کاهندگی گویند. برای محاسبه و برآورد خطر زمین لرزه در یک سایت یا تهیه نقشه‌های لرزه ای مناطق، ما به رابطه‌ای نیاز داریم که بتواند کاهندگی و میزان کاهیده شدن پارامترهای جنبش نیرومند زمین را به پارامترهایی همچون فاصله سایت از منبع زمین لرزه، اندازه زمین لرزه و شرایط تکتونیکی و زمین شناسی و ... پیوند دهد. که این رابطه، رابطه کاهندگی نامیده می‌شود. روابط کاهندگی به طور عمده برای برآورد پارامتر حداکثر شتاب زمین مورد استفاده قرار می‌گیرند. دو مورد از مهمترین روابط کاهندگی مهم جهان به شرح زیر می‌باشند:

(۱۱) رابطه کاهندگی بور

$$\log(y) = b_1 + b_2(M-6) + b_3(M-6)^2 + b_4r + b_5 \log(r) + b_6GB + b_7GC + \delta \log(y)$$

در رابطه بالا  $Y$  پارامتر مورد محاسبه،  $M$  بزرگای گشتاوری،  $R$  کوتاه‌ترین فاصله روی سطح زمین از سایت مورد نظر تا گسل،  $\delta \log(y)$  انحراف معیار،  $b_1$  تا  $b_7$  ضرایب ثابت می‌باشند.

(۱۲) رابطه بزرگنیا

$$\ln Y = c_1 - c_2 M_w + c_3 (S_5 - M_w)^2 + c_4 \ln((M_5^2 - (c_5 S_{SH} + c_6 S_{PS} + S_{SR})^2 + c_7 S_{HR}) \\ \exp(c_8 M_w + c_9 (S_5 - M_w)^2)^{1/2}) + c_{10} F_{SS} + c_{11} F_{FRV} + c_{12} F_{FTH} + c_{13} S_{SH} + \\ c_{14} S_{PS} + c_{15} S_{SR} + c_{16} S_{HR}$$

بزرگای معین روی همه منابع لرزه‌ای و در تمام فواصل ممکن از سایت در نظر گرفته شده و با همدیگر ترکیب می‌شوند و در نتیجه با استفاده از تحلیل خطر لرزه ای به روش احتمالاتی می‌توان با توجه به درجه اهمیت سایت مورد نظر، پارامترهای طراحی جنبش نیرومند زمین را با در نظر گرفتن سطوح خطر و سطوح طراحی متناسب با آن بدست آورد. در شکل شماره ۱۶ گام های روش تحلیل خطر احتمالاتی نشان داده شده است.

در رابطه بالا Y پارامتر مورد محاسبه، c1 تا c16 ضرایب مربوط به مولفه افقی و قائم شتاب، SSH, SPS, SSR, SHR دسته بندی نوع خاک می باشند، FSS, FRV, FTH دسته بندی مکانیزم گسلش می باشند.

#### ۴-۸-۲-۱- فرضیات در تحلیل خطر لرزه‌ای به روش

##### احتمالاتی

در اغلب موارد، واقعیت با در نظر گرفتن فرضیات ساده کننده، به صورت ریاضی، مدل و ساده‌سازی می‌شود. اعتبار مدل ریاضی محدود به سناریوها و فرضیات آنها می‌شود. هر قدر این فرضیات دقیق‌تر و به واقعیت نزدیک‌تر باشد به همان اندازه مدل ریاضی بهتر و دقیق‌تر خواهد بود.

#### ۴-۸-۲-۲- مراحل اساسی تحلیل خطر لرزه‌ای به روش

##### احتمالاتی

- ۱- شناسایی منابع لرزه ای و بررسی لرزه‌خیزی منطقه
  - ۲- محاسبه رابطه بین فراوانی زلزله‌ها و بزرگای آنها و محاسبه چگالی و توزیع احتمال
  - ۳- انتخاب رابطه کاهندگی
  - ۴- محاسبه و بدست آوردن منحنی خطر لرزه‌ای سایت مورد نظر
- برای بررسی لرزه خیزی در محدوده مطالعاتی انتخاب شده، تمام زلزله‌های بوقوع پیوسته از بانک داده‌های لرزه‌ای استخراج می‌شوند. مشخصات و ویژگی‌های زمین

#### ۴-۸-۱-۵- محاسبه پارامترهای طراحی جنبش زمین

در آخر برای تمامی گسل‌های اطراف سایت مورد بررسی یک پارامتر حرکتی در محل سایت محاسبه می‌شود. بزرگترین پارامتر حرکتی محاسبه شده به عنوان خروجی روش تحلیل خطر تعیینی انتخاب می‌گردد. پارامترهای طراحی لرزه ای از جمله PGA, PGV و ... با استفاده از همان رابطه کاهندگی که انتخاب کرده ایم برای سایت مورد نظر محاسبه می‌گردد. زلزله ای را که ماکزیمم پارامتر حرکتی در محل سایت را تولید می‌کند، زلزله سناریو می‌نامیم و گسل مربوط به آن را گسل سناریو می‌نامیم.

#### ۴-۸-۲- تحلیل خطر لرزه ای به روش احتمالاتی

همانطوری که در بخش قبل اشاره گردید، پارامترهای طراحی جنبش زمین در روش تحلیل خطر لرزه‌ای تعیینی برای یک بزرگای معین از زمین لرزه، روی یک منبع معین و در یک فاصله معین از سایت بدست می‌آیند و در این روش ما قادر به برآورد سطح خطرهای مختلف برای سایت مورد نظر نیستیم. بالعکس در تحلیل خطر لرزه‌ای به روش احتمالاتی همه زمین لرزه‌های با

۴-۸-۲-۳- خط برازش گوتنبرگ - ریشتر

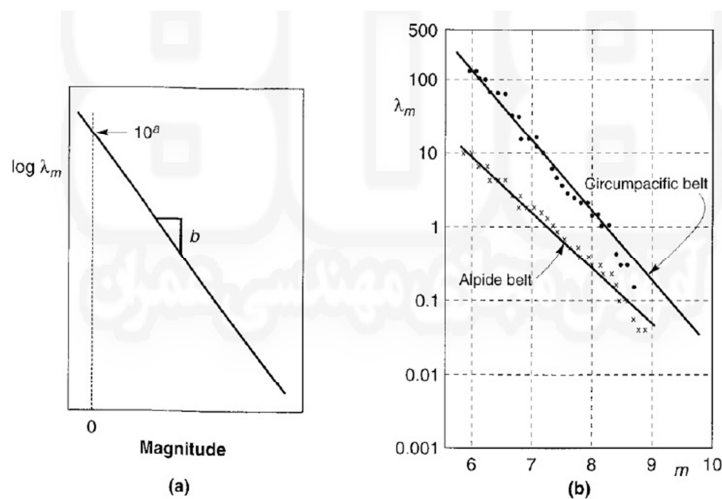
معادله خط برازشی گوتنبرگ - ریشتر بصورت زیر می‌باشد:

$$\log N = a - bM$$

که در آن  $M$ ، بزرگای زمین لرزه و  $N$  تعداد زمین لرزه‌های مورد انتظار بزرگتر از زمین لرزه‌ای با بزرگای  $M$ ،  $a$  و  $b$  اعداد ثابت رابطه گوتنبرگ - ریشتر بالا می‌باشند که رابطه بالا در مقیاس لگاریتمی به صورت یک رابطه خطی از متغیر مستقل  $M$  و متغیر وابسته  $N$  و با خروج از محور  $a$  و شیب  $b$  تعریف می‌شود (Gutenberg, B, ۱۹۵۴).

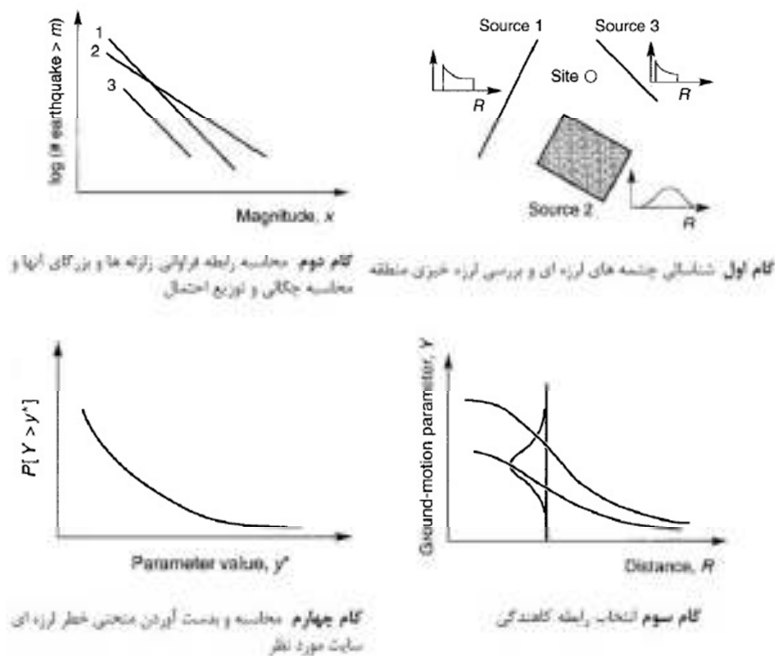
لرزه‌های تاریخی با استفاده از کاتالوگ زمین لرزه‌های تاریخی و یا با استفاده از علم دیرینه لرزه‌شناسی بدست می‌آیند.

محاسبه رابطه بین فراوانی زلزله‌ها، توزیع بزرگای آنها و محاسبه متوسط میزان رخ داد زمین لرزه‌ها و تشکیل یک مدل برازشی از جمله مراحل انجام کار می‌باشد. یک مدل برازش، تعداد نسبی زمین لرزه‌های با سطوح مختلف بزرگا را نشان می‌دهد. در اغلب این موارد، مدل برازشی به صورت رابطه گوتنبرگ ریشتر انتخاب می‌شود.

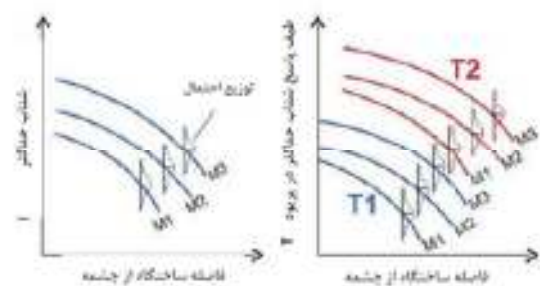


شکل ۱۵. الف. قانون گوتنبرگ - ریشتر که بیانگر مفهوم  $a$  و  $b$  است و ب. نشان دهنده کاربرد قانون بازگشت گوتنبرگ ریشتر در لرزه خیزی

جهانی است (Steven L. Kramer, ۱۹۹۶)



شکل ۱۶. گام های روش تحلیل خطر احتمالاتی (Steven L. Kramer, ۱۹۹۶)



شکل ۱۷. فرم کلی روابط کاهندگی (معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، ۱۳۹۳)

بنابراین برخورد مناسب با این عدم قطعیت که جنس آن از نوع عدم قطعیت ذاتی است، کاملاً ضروری است. حداقل سه رابطه کاهندگی باید برای بکارگیری در تحلیل خطر استفاده شود (معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، ۱۳۹۳).

۴-۲-۸-۴- انتخاب روابط کاهندگی یا روابط برآورد جنبش شدید زمین یکی از عناصر کلیدی در برآورد احتمالی خطر در یک ساختمان، روابط کاهندگی انتخابی است (شکل ۱۷) یافته های تحقیقاتی، انتخاب روابط کاهندگی بیشترین عدم قطعیت نهایی در برآورد خطر در ساختمان را رقم می زند.



### جنبش شدید زمین

با در نظر داشتن طبیعت احتمالی توابع کاهندگی، تابع توزیع بزرگا برای هر چشمه، توزیع احتمال فاصله نقطه آغاز گسلش زمین تا محل ساختگاه و بهره گیری از تئوری احتمال کل میتوان برهم نهی نظام مندی از آثار گسلهای مختلف ترتیب داد و در نهایت احتمال فراگذشت سالیانه پارامترهای جنبش زمین را در هر سطح دلخواه محاسبه و به صورت منحنی خطر ترسیم نمود (معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، ۱۳۹۳).

### ۶- نتیجه گیری

در این مقاله سعی شده تا به مفاهیم اساسی در تحلیل خطر لرزه‌ای اشاره شود و موضوعات مهم توضیح داده شود، سعی بر آن شد تا برخی لغات مهم لاتین همراه با ترجمه آنها در پاورقی‌ها آورده شود. هدف معرفی روش‌های تحلیل خطر احتمالاتی و تعیینی بوده است و به مهندسين زلزله و دانشجویان در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری برای مطالعات و پژوهش‌های بیشتر پیشنهاد می‌شود که کتاب مبانی تحلیل خطر زمین لرزه نوشته دکتر مهدی زارع از انتشارات پژوهشگاه بین المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و همچنین کتاب مهندسی ژئوتکنیک لرزه ای تألیف STEVEN L.KRAMER و ترجمه دکتر سید مجیدالدین میر حسینی از انتشارات پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله را بخوانند. در این مقاله به اختصار روند تحلیل خطر زلزله به روش احتمالاتی و تعیینی بیان شد. به منظور طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله همواره عدم قطعیت در اندازه و موقعیت و اثر شدت لرزش یک زلزله در آینده موضوع بسیار مهمی است.

هدف روش تحلیل خطر احتمالاتی زلزله بررسی و لحاظ این عدم قطعیت‌ها است. در مبحث تحلیل خطر لرزه‌ای به بررسی ریسک لرزه‌ای نمی پردازیم، بلکه منظور ما در کل متن از تحلیل خطر لرزه‌ای بررسی خطر در سایت مورد نظر می‌باشد. در اغلب موارد، واقعیت با در نظر گرفتن فرضیات ساده‌کننده، به صورت ریاضی مدل‌سازی و ساده‌سازی می‌شود. اعتبار مدل ریاضی محدود به سناریوها و فرضیات آنها می‌شود. هر قدر این فرضیات دقیق تر و به واقعیت نزدیک تر باشد به همان اندازه مدل ریاضی بهتر و دقیق تر خواهد بود. پس در نتیجه بکاربردن روش های مهندسی بدون توجه به فرضیات کار، ممکن است ما را به سمت نتایج غلط رهنمون سازد، تحلیل خطر لرزه‌ای با روش احتمالاتی نیز از این قاعده مستثنی نمی باشد.

### ۷- مراجع

- بیت‌اللهی، ع.، و گل آرا، م.، "جزوه آموزشی تحلیل خطر لرزه‌ای"، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
- تابش پور، م.ر. (۱۳۹۴)، "مبانی مهندسی زلزله"، دستنامه مهندسی زلزله شماره ۳، انتشارات بنای دانش.
- زارع، م.، (۱۳۸۴)، "مقدمه‌ای بر زلزله شناسی کاربردی"، انتشارات پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله.
- زارع، م.، و کامران‌زاد، ف. (۱۳۹۶)، "ریسک آتش سوزی پس از زلزله در شهر تهران"، نشست علمی زمین، محیط و ایمنی، باغ کتاب تهران.

Amplitudes for Different Probabilities of Exceedance and for Shallow, Random.

-Seismicity Surrounding the Site”, Report CE 80-02, Dept. of Civil Eng., Univ. of Southern California Los Angeles, California, U.S.A.

-ICSRDB (1999), “Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, standard no.2800, 2nd ed., building and Housing Research Center, Publication BHRC PN S 253, Tehran.

-Bour, M., P Dominique, J. L. Ble’s, P. Godefroy, C. Martin, and M. Terrier (2000), Zonation of metropolitan France for the application of earthquake resistant building regulations to critical facilities, Part eismotectonic zonation, J. Seism. 4, pp.231–245.

-Krinitsky, E.L. (1995), “Deterministic versus Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Critical Structures”, Int. Jour. Eng. Geol., Vol. 40, pp. 1-7.

-Romeo, R. and Prestininzi, A. (2000), “Probabilistic versus Deterministic Seismic Hazard Analysis: An Integrated Approach for Siting Problems”, Soil Dyn. Earthq. Eng. Vol. 20, pp. 75-84.

-Gutenberg, B. and Richter, C.F. (1954), “Seismicity of the Earth and Associated Phenomena”, Princeton Univ. Press, Princeton, New Jersey, U.S.A.

-زارع، م.، (۱۳۸۸) "مبانی تحلیل خطر زمین لرزه"، انتشارات پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله.

-شادابفر، م.، "تحلیل خطر زلزله"، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور).

-معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور (۱۳۹۳)، "راهنمای کاربردی انجام تحلیل خطر زلزله" نشریه شماره ۶۲۶.

-یارمحمدی، ع.، (۱۳۹۰)، "تشریح روش تحلیل خطر احتمالاتی زلزله PSHA"، انتشارات سایت CIVIL 808.

-Anderson, J.G. and Trifunac, M.D. (1978a), “Uniform Risk Functional for Characterization of Strong ....Earthquake Ground Motion”, Bull. Seismic Soc. Am. Vol. 68, pp. 205-218. ISET Journal of Earthquake Technology, December 2002.

-Jordanovski, L.R., Todorovska, M.I. and Trifunac, M.D. (1991), “A Model for Assessment of the Total Loss in a Building Exposed to Earthquake Hazard”, Report CE 92-05, Dept. of Civil Eng., Univ. of Southern California, Los Angeles, California, U.S.A.

-Steven L. Kramer, (1996), "Geotechnical Earthquake Engineering", University of Washington.

-Dravinski, M., Trifunac, M.D. and Westermo, B.D. (1980), “Ratios of Uniform Risk plectrum

