

آشنایی با زلزله و اثر آن بر سازه‌ها

فصل اول: مبانی لرزه‌شناسی

۱-۱- مقدمه

زمین‌لرزه که از آن به عنوان مهیب‌ترین پدیده طبیعی یاد می‌شود، به ظاهر بدون هیچ هشدار روی می‌دهد و موجب تحمیل خسارات جانی و مالی فراوانی به جامعه‌ی بشری می‌شود. به طور متوسط سالانه ۱۰/۰۰۰ نفر در سراسر دنیا جان خود را در اثر وقوع زمین‌لرزه از دست می‌دهند. کشور ایران نیز به دلیل قرار گرفتن بر روی کمربند آلپ-همیمالیا جزو نقاط لرزه‌خیز جهان محسوب می‌شود. از جمله زمین‌لرزه‌های ویران‌گری که در سده اخیر در ایران به وقوع پیوسته و زیان‌های جانی و مالی بسیاری را موجب شده است می‌توان به زمین‌لرزه‌های سیلاخور (۱۹۰۹)، سلماس (۱۹۳۰)، مازندران (۱۹۵۷)، لار (۱۹۶۰)، بوئین‌زهرا (۱۹۶۲)، دشت بیاض (۱۹۶۸)، طبس (۱۹۷۸)، رودبار-منجیل (۱۹۹۰) و بم (۲۰۰۳) اشاره کرد که سه زمین‌لرزه اخیر به تنهایی باعث از دست رفتن جان نزدیک به ۱۰۰/۰۰۰ نفر شده است.

با توجه به موارد اشاره شده در مورد خسارات جبران ناپذیر زمین‌لرزه، محققین به دنبال روش‌هایی به منظور پیش‌بینی این پدیده طبیعی هستند. پیش‌بینی به معنای دانش بشر در مورد مکان، زمان رویداد و بزرگای زمین‌لرزه است. از لحاظ زمانی، پیش‌بینی زمین‌لرزه در دو رویکرد پیش‌بینی کوتاه مدت و بلند مدت بررسی می‌شود. منظور از کوتاه مدت، پیش‌بینی زمین‌لرزه در طی چندین روز یا هفته و منظور از بلند مدت، پیش‌بینی در بازه زمانی چندین ساله است. پیش‌بینی کوتاه مدت شامل نظارت بر فرآیندهایی است که در مجاورت گسل‌های مسبب زمین‌لرزه صورت می‌گیرد، اما با این حال به دلایل مختلفی پیش‌بینی کوتاه‌مدت امری بسیار دشوار است. یکی از دلایل این است که زمین‌لرزه در نواحی و در طول گسل‌های مختلفی روی می‌دهد که هر یک رفتار خاص خود را دارند و هیچ الگوی رفتاری سازگاری تاکنون به منظور پیش‌بینی کوتاه‌مدت شناخته نشده است. همچنین دلیل دیگر این است که این فرآیندها در زیر سطح زمین و در اعماق زیادی صورت می‌گیرد که این امر نظارت بر آن را بسیار مشکل می‌سازد. در پیش‌بینی کوتاه‌مدت حتی با فرض دانستن زمان قطعی وقوع زمین‌لرزه، به دلیل فرصت زمانی کوتاه، بوجود آوردن هراس در جامعه و از طرف دیگر مناسب نبودن به عنوان یک معیار در مسائل مهندسی و ساخت و ساز، این پیش‌بینی نمی‌تواند مثر و ثمر واقع شود. با توجه به مباحث مطرح شده لازم است به دنبال رویکردی بود که تمام جنبه‌های موجود را در نظر بگیرد و از این رو بحث پیش‌بینی بلندمدت طرح می‌شود. از مزایای پیش‌بینی بلندمدت زمین-

لرزه این است که می‌تواند معیار مناسبی در مناطق لرزه‌خیز برای بالا بردن سطح آگاهی مردم و آموزش نهادها به منظور مدیریت بحران، مناسب ساختن سازه‌ها، بهسازی و مقاوم‌سازی ساختمان‌ها باشد.

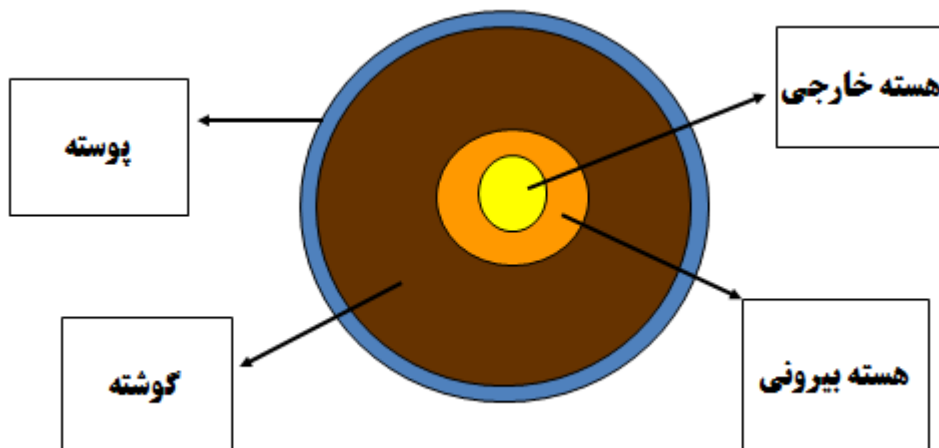
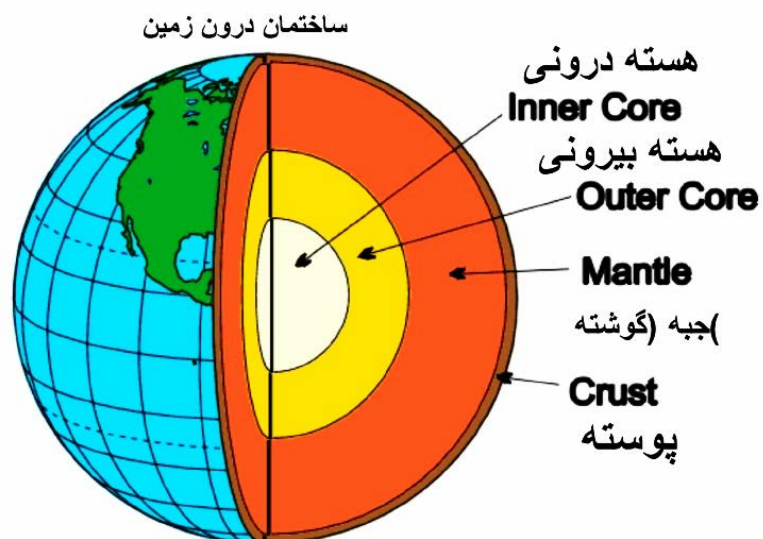
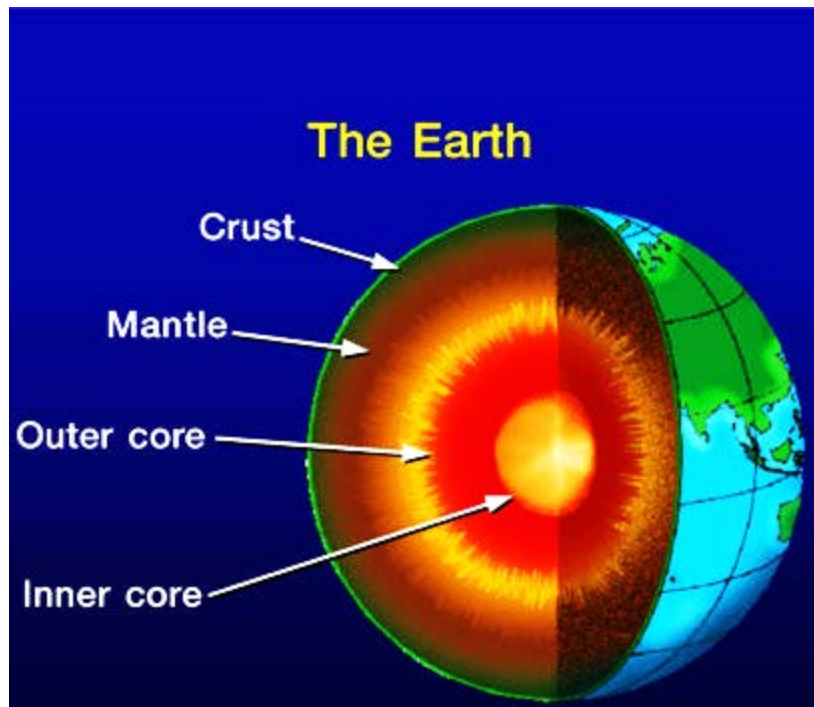
مهندسی زلزله از جمله رشته‌های جوان در مهندسی است که طی چند دهه‌ی اخیر توسعه فراوانی پیدا کرده و تحولاتی را در این شاخه از علوم کاربردی ایجاد کرده است. اساساً هدف از این رشته این است که روش‌ها و دستورالعمل‌های عملی و کاربردی در اختیار مهندسان و دست‌اندرکاران ساختمان قرار گیرد تا طرح و اجرای سازه‌ها در مناطق زلزله‌خیز به گونه‌ای باشد که در مقابل زلزله مقاومت نموده، و تلفات و خسارت‌ها را به حداقل ممکن کاهش دهد. بدون تردید این مهم عملی نخواهد بود مگر اینکه یک سلسله پژوهش‌ها و مطالعات مستمر از دیدگاه مهندسی برای مناطق زلزله‌خیز صورت گیرد. بدیهی است ماحصل کار تحقیقات و مطالعات در قالب آئین‌نامه‌های مختلف در اختیار مهندسان قرار می‌گیرد تا با استفاده و کاربرد این تجربیات بتوانند به هدف اصلی که همان کاهش خطرهای ناشی از زلزله است دست یابند. البته کاربردهای این رشته به آنچه گفته شد محدود نشده، بلکه موارد استفاده فراوانی را بویژه در زلزله‌شناسی و تعیین خطر زلزله داراست.

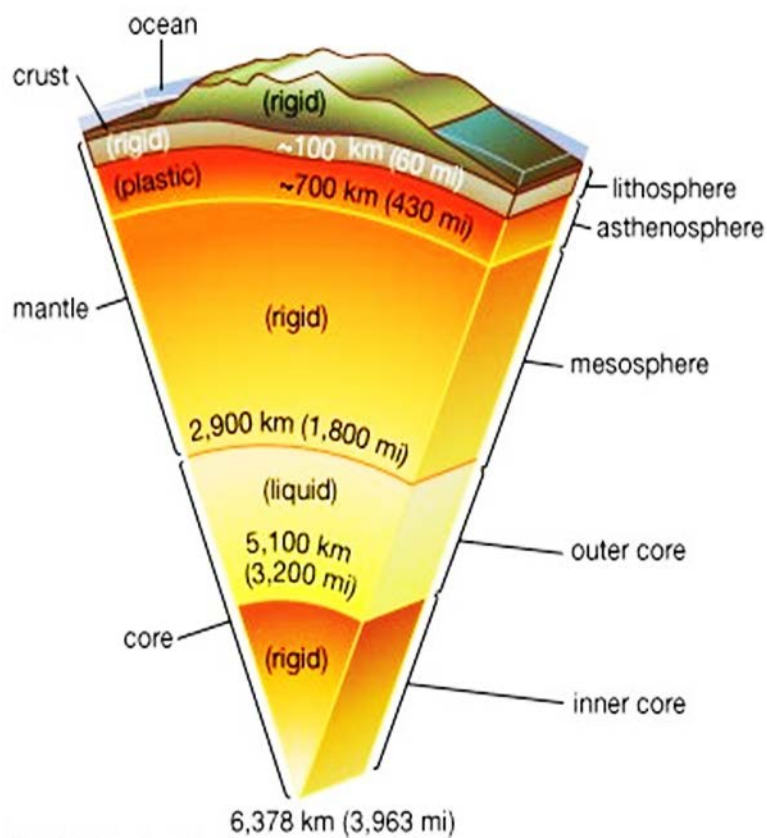
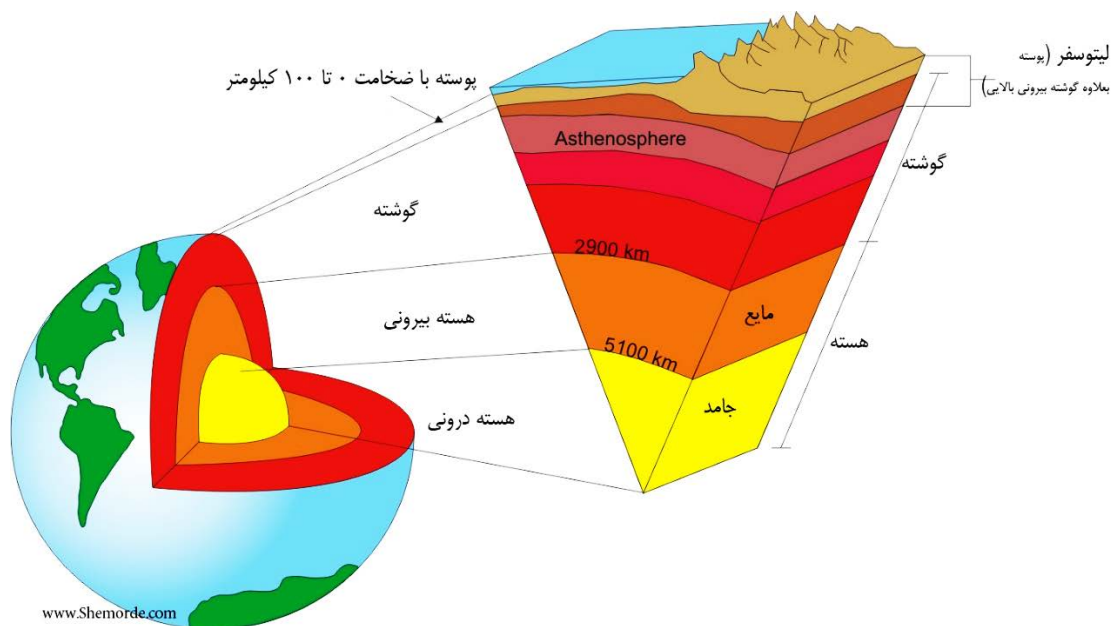
اثر زلزله روی مردم و محیط اطرافشان و همچنین روش‌های کاهش این آثار در مهندسی زلزله بررسی می‌گردد. مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای رشته‌ای برگرفته از مهندسی ژئوتکنیک است. در این رشته به عوامل مؤثر در طراحی و ساخت پروژه‌ها پرداخته می‌شود به قسمی که بتوانند در مقابل زمین‌لرزه‌ها مقاومت نمایند. مطالعات مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای مستلزم دانش درک مناسبی از: زمین‌شناسی، لرزه‌شناسی و مهندسی زلزله می‌باشد.

در رشته‌ی زمین‌شناسی، اصول و داده‌های برگرفته شده از زمین برای شناخت پارامترهای مؤثر در طراحی، ساخت و حفظ سازه‌های مهندسی بکار گرفته می‌شود. در واقع وظیفه‌ی اصلی یک زمین‌شناس، تعیین محل گسل‌ها، تشخیص فعال بودن یا غیرفعال بودن گسل‌ها، و همچنین ارزیابی تاریخیچه رکوردهای زلزله و آثار مربوط به آنها در مکان‌های خاص است. مطالعات مزبور منجر به معرفی پارامترهای لرزه‌ای طراحی می‌گردند. اهم پارامترهای لرزه‌ای عبارتند از: حداکثر شتاب زمین و بزرگای زلزله طرح.

۱-۲- لایه‌های تشکیل‌دهنده‌ی زمین

در حالت کلی زمین به سه لایه‌ی پوسته، جبه و هسته طبقه‌بندی می‌شود. می‌توان لایه‌های تشکیل‌دهنده‌ی زمین را با تخم مرغ معادل نمود. به قسمی که پوسته‌ی تخم مرغ همانند پوسته‌ی زمین، سفیده تخم مرغ مانند جبه، و در نهایت زرده تخم مرغ مانند هسته زمین می‌باشد.



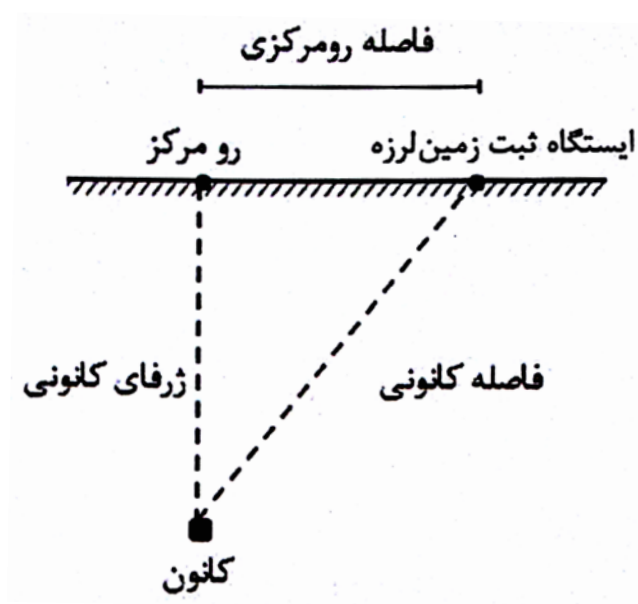
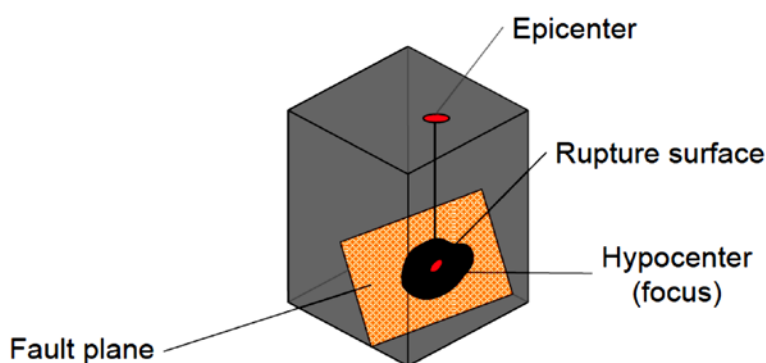


شکل (۱-۱): لایه‌های تشکیل‌دهنده‌ی زمین

۳-۱- زمین‌لرزه

زمین‌لرزه رها شدن ناگهانی انرژی ذخیره شده در پوسته زمین می‌باشد که منجر به شکل‌گیری امواج لرزه‌ای می‌گردد. هنگامی که این رویداد در داخل دریا یا اقیانوس به وقوع پیوندد باعث ایجاد پدیده‌ی سونامی^۱ می‌شود. محلی که منشأ زمین‌لرزه است و انرژی از آنجا خارج می‌شود را کانون^۲ زمین‌لرزه گویند و تصویر کانون بر روی سطح زمین، رومرکز^۳ یا مرکز زمین‌لرزه نامیده می‌شود. فاصله قائم میان کانون یک زمین‌لرزه و سطح زمین را نیز ژرفای کانونی^۴ گویند. همچنین فاصله بین کانون و ایستگاه ثبت زمین‌لرزه، فاصله کانونی و نیز فاصله بین رومرکز و ایستگاه ثبت زمین‌لرزه، فاصله رومرزی خوانده می‌شود که این اصطلاحات در شکل (۱-۲) نشان داده شده است.

Faults and Fault Rupture



شکل (۱-۲): شمایی از کانون زمین‌لرزه

1. *Tsunami*
2. *Hypocenter*
3. *Epicenter*
4. *Focal depth*

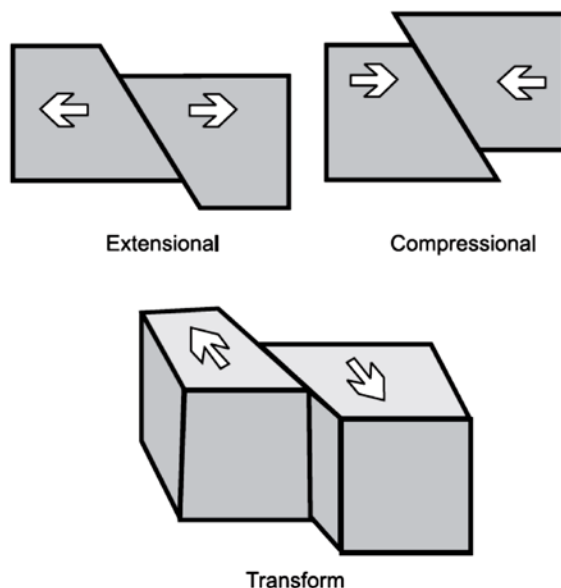
نکته: محل کانون زلزله‌ها می‌تواند در فواصل نزدیک به سطح زمین بوده و یا تا فواصلی به اندازه‌ی ۷۰۰ کیلومتر در عمق زمین باشد. بر این اساس زلزله‌ها بر حسب عمق کانونی به سه دسته‌ی سطحی، متوسط و عمیق دسته‌بندی می‌شوند. عمق کانونی زلزله‌های سطحی حداکثر به ۷۰ کیلومتر می‌رسد، درحالی‌که در زلزله‌های متوسط این عمق از ۷۰ تا ۳۰۰ کیلومتر و در زلزله‌های عمیق از ۳۰۰ تا ۷۰۰ کیلومتر متغیر می‌باشد. زلزله‌های سطحی عمدتاً در نواحی کوچک مانند چند شهر نزدیک به هم اثر می‌کنند ولی زلزله‌های عمیق، در فواصل بسیار دور نیز قابل احساس هستند. معمولاً زلزله‌های مخرب از نوع سطحی هستند و زلزله‌های عمیق اثر تخریبی چندانی ندارند.

زمین‌لرزه‌ها بنا به دلایل مختلفی به وقوع می‌پیوندند که در ادامه به چندین نوع از این عوامل اشاره شده است:

۱-۳-الف- زمین‌لرزه‌های تکتونیکی

تکتونیک یا زمین‌ساخت، شاخه‌ای از زمین‌شناسی است که ساختار و جنبش بالاترین قسمت زمین را مورد مطالعه قرار می‌دهد. بر اساس این تئوری، سطح زمین شامل صفحات تکتونیکی است که به عنوان سنگ‌کره^۱ نیز شناخته می‌شود. این صفحات که بر روی لایه نرم‌کره^۲ که حالتی نرم و مذاب دارند قرار گرفته و پس از لغزش روی همدیگر تولید زمین‌لرزه می‌کنند. اکثر زمین‌لرزه‌هایی که سالانه در جهان روی می‌دهند زمین‌لرزه‌های تکتونیکی هستند. امروزه کره زمین را به چندین صفحه اصلی و فرعی دسته‌بندی می‌کنند.

در حالت کلی سه نوع مکانیزم برای صفحات تکتونیکی متصور است: کششی، انتقالی، و فشاری (شکل ۱-۳). مرزهای صفحات تکتونیکی در نقاط متفاوت تحت اثر تنش‌های داخل صفحه‌ای قرار گرفته و منجر به تولید یکی از مکانیزم‌های فوق‌الذکر می‌شوند.



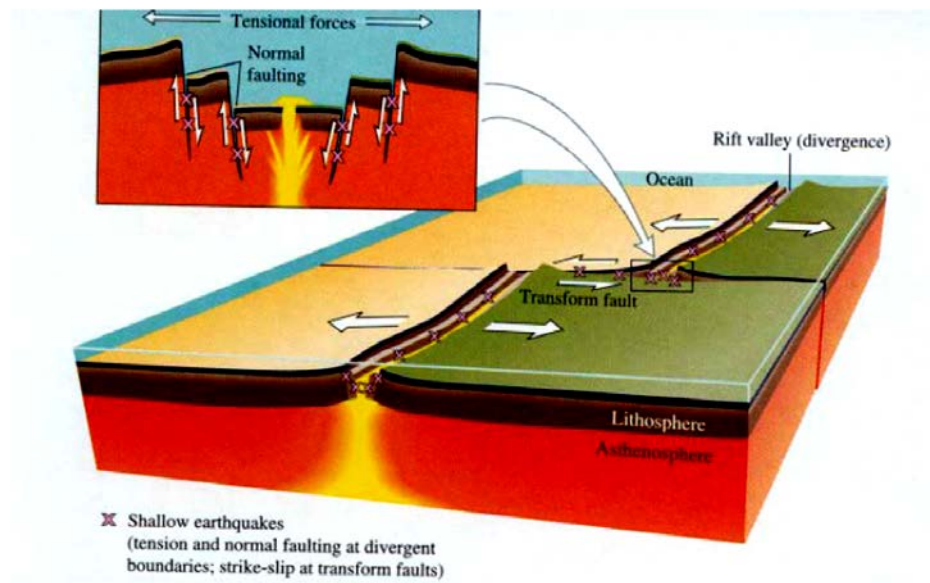
شکل (۱-۳): حالات تکتونیک‌های صفحه‌ای

^۱ . Lithosphere

^۲ . Asthenosphere

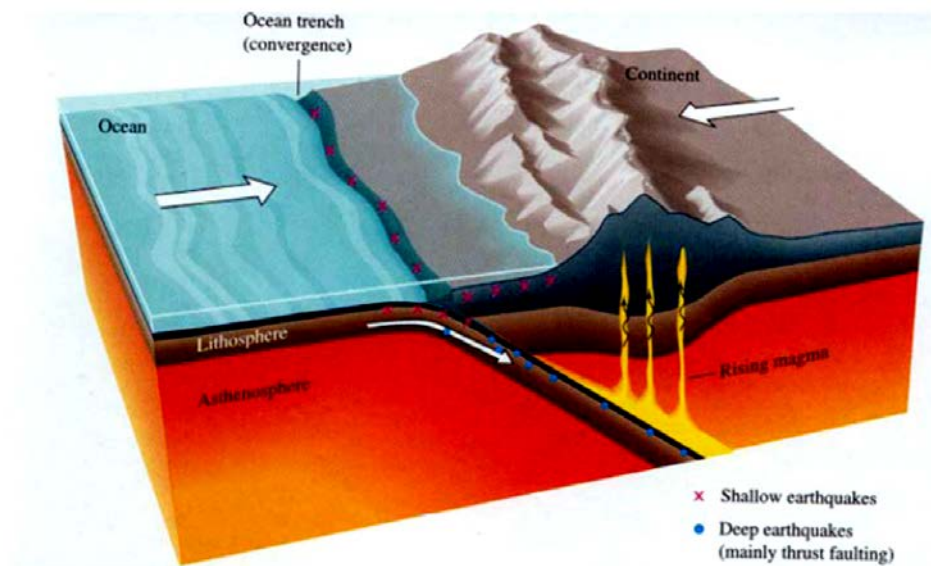
هر یک از حالت‌های نامبرده شده ویژگی‌ها و خطرات مربوط به خود را دارد.

Plate Tectonics: Driving Mechanism



شکل (۱-۴): حالات تکتونیک‌های صفحه‌ای

Plate Tectonics: Details in Subduction Zone



شکل (۱-۵): حالات تکتونیک‌های صفحه‌ای

۱-۳-ب- زمین‌لرزه‌های آتشفشانی

زمین‌لرزه‌های آتشفشانی^۱ بر اثر باز شدن ناگهانی کانالهایی در پوسته زمین، حرکت سریع ماگما، فروریختن سقف کانالهای زیرزمینی و مخازن تخلیه شده از ماگما و یا بر اثر تراکم بیش از اندازه‌ی گاز و فشار ناشی از آن ایجاد می‌شوند.

۱-۳-پ- زمین‌لرزه‌های القایی

در حالی که اکثر زمین‌لرزه‌ها توسط حرکت صفحات تکتونیکی زمین ایجاد می‌شود، فعالیت‌های انسانی مانند احداث سدها و سازه‌های بزرگ، استخراج از معادن، تزریق سیال‌ها به داخل زمین و یا استخراج آنها، ذخیره حجم زیاد آب در پشت سدها و آزمایش‌های نظامی نیز می‌تواند تولید زمین‌لرزه کند که به این نوع از زمین‌لرزه‌ها، زمین‌لرزه‌ی القایی^۲ گویند. به عنوان نمونه، بر اثر تغییرات ناگهانی سطح آب پشت سدها، تزریق آب یا سیال‌های دیگر به داخل زمین و یا استخراج آنها، به ویژه در جاهایی که گسل‌های فعال قرار گرفته‌اند، امکان وقوع زمین‌لرزه وجود دارد که دلیل این پدیده را می‌توان بارگذاری یا باربرداری سریع بر روی زمین دانست. نمونه‌ای از این نوع را می‌توان در زمین‌لرزه یازده دسامبر ۱۹۶۷ در کوینا در هند مشاهده کرد. پس از ذخیره کردن آب در پشت سد که از سال ۱۹۶۲ شروع شد گزارش‌هایی مبنی بر تکان‌های موضعی در آن ناحیه که البته سابقه‌ی لرزه‌خیزی نیز داشت منتشر شد. لرزه‌نگارهای موجود در منطقه کانون این زمین‌لرزه‌ها را در زیر دریاچه و در اعماق کم نشان می‌دادند تا اینکه در سال ۱۹۶۷ تعدادی زمین‌لرزه نسبتاً بزرگ روی داد و در نهایت منجر به وقوع زمین‌لرزه ۱۱ دسامبر با بزرگای ۶/۵ شد. همچنین بر اثر فروریختن غارها، معادن و کانالهای زیرزمینی، لرزه‌های کوچکی ایجاد می‌شود که به زمین‌لرزه‌های فروریختی^۳ معروفند که این پدیده در معادن آفریقایی جنوبی امری متداول است. از طرفی دیگر انفجارهای نظامی و صنعتی به ویژه آزمایشات هسته‌ای نیز به دلیل آزاد سازی مقدار زیادی انرژی می‌تواند عامل وقوع زمین‌لرزه شود.

۱-۴- سونامی

سونامی امواج بلندی هستند که هنگام وقوع زلزله در کف دریا یا اقیانوس، نواحی ساحلی را مورد حمله قرار می‌دهند. این امواج بلند سریعاً مستهلک نشده و به فواصل بسیار دور نیز می‌رسند. ارتفاع موج یک سونامی دارای تغییرات شدید بوده و به تراز خط ساحلی بستگی دارد. در نواحی که دارای خط ساحلی یکنواختی است، ارتفاع موج زیاد نخواهد بود اما در سواحل که ناهمواری زیاد باشد، امواجی که مثلاً در دهانه خلیج زیاد بلند نیستند، در داخل خلیج به ارتفاع‌های بلند و غیرطبیعی می‌رسند. شدت افزایش در ارتفاع موج بستگی به توپوگرافی خلیج و طول موج سونامی دارد.

۱-۵- روانگرایی

-
1. *Volcanic Earthquakes*
 2. *Induced Earthquakes*
 3. *Collapse Earthquakes*

بین ذرات خاک‌های سست (شل) که از آب اشباع شده باشد، منافذی پر از آب وجود دارند که در هنگام زمین‌لرزه و ایجاد تراکم در زمین، فشار آب داخل این منافذ افزایش یافته و آب به طرف بالا حرکت می‌کند تا وقتی که به صورت فوران و جوشش گل و ماسه در سطح زمین پایدار می‌گردد. در این حال زمین به آبگونگی در می‌آید و از مقاومت آن به مقدار زیادی کاسته می‌شود. چنین زمینی دیگر نمی‌تواند وزن ساختمان‌هایی را که قبل از وقوع زلزله تحمل می‌نمود، تحمل نمایند. در نتیجه ممکن است ساختمان‌های روی زمین شروع به فرو رفتن در داخل زمین نمایند و یا کج شوند یا بصورت شناور در آیند. علاوه بر پدیده‌هایی که بدانها اشاره رفت در زمان وقوع زلزله ممکن است پدیده‌های دیگر نظیر زمین‌لغزه، نشست، تغییر در سطح آب‌های زیرزمینی و مسدود شدن چشمه‌ها و همینطور آتش‌سوزی مشاهده شوند که مورد آخر به علت وجود شبکه‌های گازرسانی و سیستم‌های جریان برق در شهرهای بزرگ هنگام زلزله بسیار اتفاق افتاده است.

۱-۶- امواج لرزه‌ای

انرژی آزاد شده به هنگام رویداد زمین‌لرزه، به صورت امواج ارتعاشی منتشر می‌شود. امواج ناشی از زمین‌لرزه با توجه به حرکت امواج در داخل یا سطح زمین به دو دسته امواج **حجمی**^۱ و **سطحی**^۲ تقسیم می‌شوند.

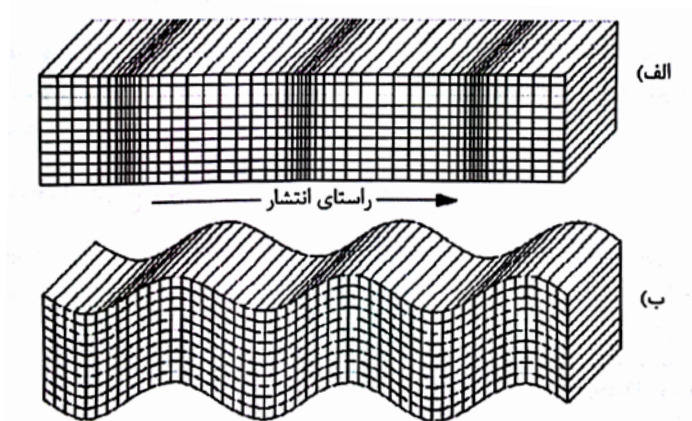
۱-۶- الف- امواج حجمی

این امواج به دو دسته امواج اولیه^۳ (P) و ثانویه^۴ (S) دسته‌بندی می‌شوند. موج P که به موج فشاری یا طولی نیز معروف است سریع‌ترین و اولین موجی است که در هنگام وقوع زمین‌لرزه به ساختگاه می‌رسد. حرکت این امواج شبیه به حرکت امواج صوتی در یک سیال است به طوری که در هنگام گسترش، باعث ایجاد فشار و کشش در لایه‌هایی که از آن عبور می‌کند می‌گردند. این امواج قادر به عبور از جامدات، مایعات و گازها هستند و به دلیل اینکه خاک و سنگ در مقابل تأثیرات فشار و کشش مقاوم هستند، این امواج تأثیر کمی روی حرکت سطحی زمین دارند. از این رو در هنگام وقوع زمین‌لرزه ابتدا امواج اولیه احساس می‌شود که تنها اثر آنها این است که باعث تکان دادن و به صدا درآوردن پنجره‌ها می‌گردد.

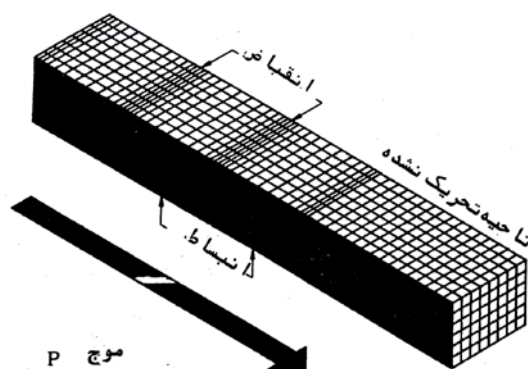
موج S که با نام‌های موج برشی یا عرضی نیز خوانده می‌شود، سرعت کمتری نسبت به موج اولیه دارد و قادر است که همزمان حرکات قائم و افقی در سطح زمین ایجاد کند. این موج با انتشار در سنگ‌ها در امتداد عمود بر جهت انتشار در آنها برش ایجاد می‌کند و به دلیل اینکه مایعات و گازها دارای مقاومت برشی نیستند، این امواج تنها می‌توانند از جامدات عبور کنند. مقاومت برشی خاک و سنگ، معمولاً نسبت به مقاومت فشاری آنها کمتر است، از این رو موج S با سرعت کمتری نسبت به موج P در درون زمین حرکت می‌کند و این امواج تأثیر بیشتری روی حرکت سطحی

-
1. *Body Waves*
 2. *Surface Waves*
 3. *Primary*
 4. *Secondary*

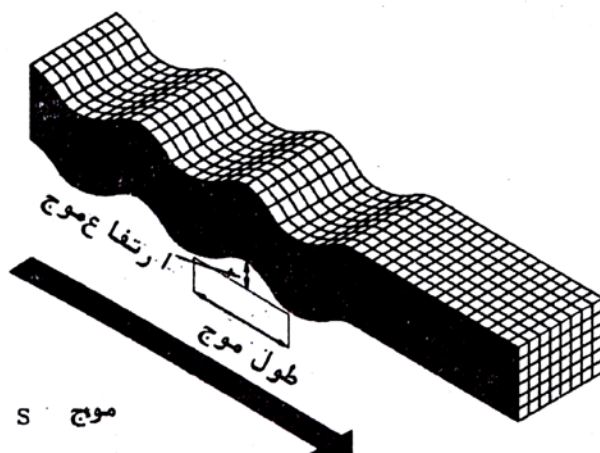
زمین دارند. از آنجایی که امواج ثانویه باعث تکان دادن سطح زمین هم در جهت افقی و هم در جهت قائم می‌شوند، حرکت این امواج نقش بسزایی در آسیب رساندن به ساختمان‌ها دارد. در اشکال (۶-۱) الی (۸-۱)، نحوه انتشار امواج حجمی نشان داده شده است.



شکل (۶-۱): نحوه انتشار امواج حجمی در محیط همگن و ایزوتروپیک: (الف) موج اولیه (ب) موج ثانویه



شکل (۷-۱): حرکت زمین نزدیک سطح ناشی از امواج طولی



شکل (۸-۱): حرکت زمین نزدیک سطح ناشی از امواج برشی

نکته: موج طولی باعث نوسان زمین در راستای انتشار امواج می‌شود، درحالی‌که موج عرضی باعث نوسان زمین در امتداد عمود بر راستای انتشار موج می‌گردد. به عبارت دیگر در امواج طولی، جهت انتشار موج و جهت تغییر شکل در یک راستا اتفاق می‌افتد، ولی در امواج عرضی این دو بر هم عمود هستند.

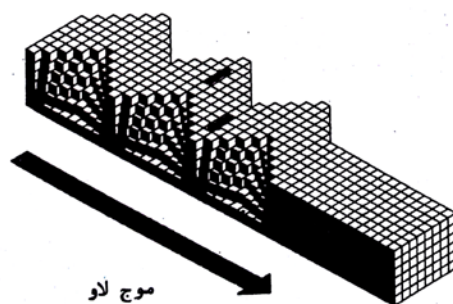
سرعت انتشار این امواج در ناحیه رفتار خطی مصالح به ضرایب ثابت الاستیک محیطی که امواج از آن عبور می‌کند بستگی دارد که به ترتیب در روابط زیر نشان داده شده است:

$$V_P = \sqrt{\frac{(1 - \nu)E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)\rho}} \quad (1-1)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2(1 + \nu)\rho}} \quad (2-1)$$

۱-۶-ب - امواج سطحی

این نوع از امواج به دلیل انتشار در نزدیکی سطح زمین به امواج سطحی معروفند. قسمت اعظم انتشار این امواج در سطح خارجی پوسته زمین صورت می‌گیرد و جابجایی‌های ناشی از آنها با افزایش عمق به تدریج کاهش می‌یابند. این امواج به دو دسته امواج لَو^۱ و امواج ریلی^۲ (رایلی) تقسیم می‌شوند. امواج لَو، امواج برشی - عرضی هستند که در نزدیکی سطح زمین عبور می‌کنند. حرکت این امواج همانند امواج ثانویه ولی بدون تغییر مکان قائم است به طوری که زمین را از پهلوی در یک صفحه افقی موازی سطح زمین، ولی در جهت عمود بر امتداد انتشار موج، به حرکت در می‌آورد. شمایی از موج لَو را می‌توان در شکل (۹-۱) مشاهده نمود.



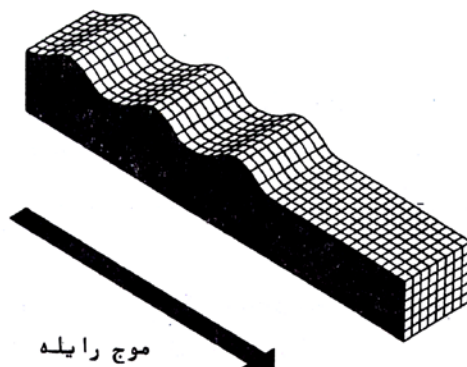
شکل (۹-۱): حرکت زمین نزدیک سطح ناشی از امواج لَو

نوع دیگر از امواج سطحی امواج ریلی هستند که باعث به حرکت در آوردن مواد در جهت قائم و افقی در صفحه‌ای قائم در امتداد انتشار امواج می‌شوند به طوری که با عبور این امواج، مواد در یک مسیر بیضوی حرکت می‌کنند. امواج

1 . Love

2 . Rayleigh

ریلی نسبت به امواج لائو قدری کندتر حرکت کرده و دیرتر بر روی لرزه‌نگار ظاهر می‌شوند. شمایی از موج ریلی را می‌توان در شکل (۱۰-۱) مشاهده نمود.



شکل (۱۰-۱): حرکت زمین نزدیک سطح ناشی از امواج ریلی

نکته: موج لائو در سطی موازی سطح زمین و عمود بر راستای انتشار نوسان می‌کند ولی موج ریلی دارای حرکت بیضی شکل است.

۷-۱- تعیین کانون زلزله

تعیین محل کانون زلزله با توجه به اختلاف سرعت امواج حجمی زلزله انجام می‌شود. با توجه به اینکه سرعت موج حجمی طولی بیشتر از سرعت موج حجمی عرضی است، موج طولی زودتر از موج عرضی به ایستگاه‌های ثبت امواج زلزله می‌رسد. با توجه به این موضوع، لرزه‌شناسان از روی نتایج ثبت شده‌ی زلزله می‌توانند فاصله‌ی ایستگاه ثبت زلزله را از کانون زلزله (فاصله کانونی) به صورت زیر بدست آورند:

$$t_P = \frac{d}{V_P} \quad (۳-۱)$$

$$t_S = \frac{d}{V_S} \quad (۴-۱)$$

$$t_S - t_P = \frac{d}{V_S} - \frac{d}{V_P} = d \left(\frac{1}{V_S} - \frac{1}{V_P} \right) \Rightarrow d = \frac{t_S - t_P}{\frac{1}{V_S} - \frac{1}{V_P}} \quad (۵-۱)$$

d = فاصله‌ی کانونی

V_P = سرعت موج طولی

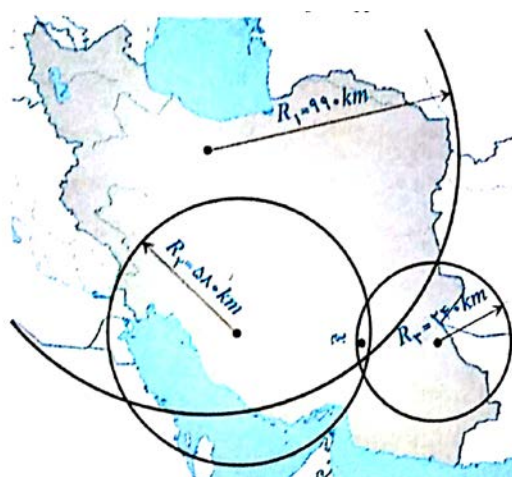
V_S = سرعت موج عرضی

$t_S - t_P$ = اختلاف زمان رسیدن امواج طولی و عرضی به محل ایستگاه لرزه‌نگاری

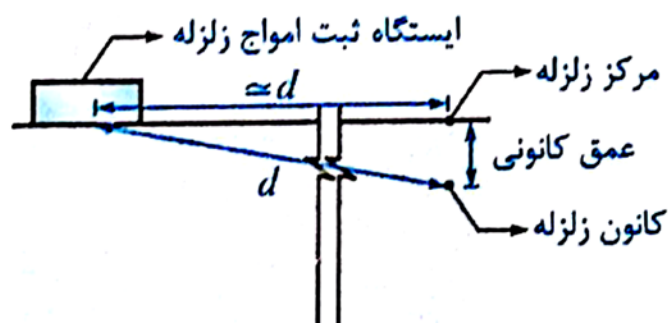
با معلوم بودن سه نتیجه‌ی ثبت شده از زلزله در سه ایستگاه لرزه‌نگاری متفاوت، برای هر کدام از آنها یک فاصله کانونی بدست می‌آید. در ادامه برای هر یک از ایستگاه‌های ثبت زلزله، دایره‌ای به مرکز ایستگاه و با شعاعی برابر

فاصله‌ی بدست آمده رسم می‌شود که ناحیه‌ی اشتراک این سه دایره برای سه ایستگاه، محدوده مرکز زلزله را مشخص می‌کند، شکل (۱۱-۱).

نکته: در محاسبات مربوط به تعیین محل مرکز زلزله، با توجه به اینکه در بیشتر زلزله‌ها عمق کانونی در مقایسه با فاصله‌ی کانونی کم است، فاصله‌ی کانونی بدست آمده برای هر ایستگاه لرزه‌نگاری را تقریباً معادل با فاصله‌ی رومرکز در نظر می‌گیرند. این موضوع را می‌توان در شکل (۱۲-۱) مشاهده نمود.



شکل (۱۱-۱): مشخص کردن محدوده‌ی محل مرکز زلزله با کمک نتایج سه ایستگاه لرزه‌نگاری



شکل (۱۲-۱): تقریب زدن فاصله‌ی کانونی با فاصله‌ی رومرکز

۸-۱- گسل

ناپیوستگی ثانویه زمین‌شناختی که در آن جابجایی نسبی روی داده باشد را گسل گویند. این جابجایی‌ها یا بصورت جابجایی آرام می‌باشند که هیچ‌گونه لرزشی در زمین ایجاد نمی‌کنند، و یا بصورت ناگهانی اتفاق می‌افتند که اغلب همراه با رویداد زمین‌لرزه می‌باشند. بنا به تعریفی دیگر گسل‌ها به عنوان مناطقی ضعیف در پوسته زمین می‌باشند که اعمال نیروهای زمین‌ساختی، موجب حرکت و تولید زمین‌لرزه‌ها توسط آنها می‌شود. حرکت برشی در هر طرف گسل که از روی زمین تا عمق زیادی (۳۰ کیلومتر و یا بیشتر) ادامه می‌یابد به سبب انباشتگی تنش‌های ناشی از جنبش قاره‌ها نسبت به یکدیگر روی می‌دهد. گسل‌ها از لحاظ میزان فعالیت به سه دسته طبقه‌بندی می‌شوند:

۱-۸-۱- طبقه‌بندی گسل‌ها به لحاظ نحوه فعالیت

الف- گسل فعال

به گسل‌هایی که در امتداد خود دارای تغییر مکان هستند، گسل فعال گفته می‌شود.

ب- گسل غیرفعال

به گسل‌هایی که قابل تشخیص بوده، اما سبب تولید زلزله نمی‌شوند گسل غیرفعال گفته می‌شود.

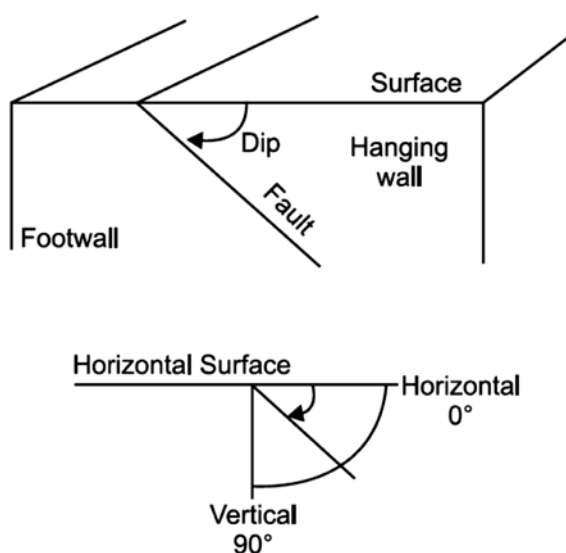
پ- گسل بازفعال شده

هنگامی که حرکات شکل گرفته در کنار گسل‌های غیرفعال سبب کاهش کرنش در پوسته یا جبهه فوقانی شوند، به آن گسل بازفعال شده گفته می‌شود. تغییر شکل در ناحیه لرزه‌ای نیومادرید واقع در مرکز ایالات متحده نمونه‌ای از باز-فعال شدن یک گسل غیرفعال است.

۱-۸-۲- طبقه‌بندی گسل‌ها به لحاظ هندسه و نحوه حرکت

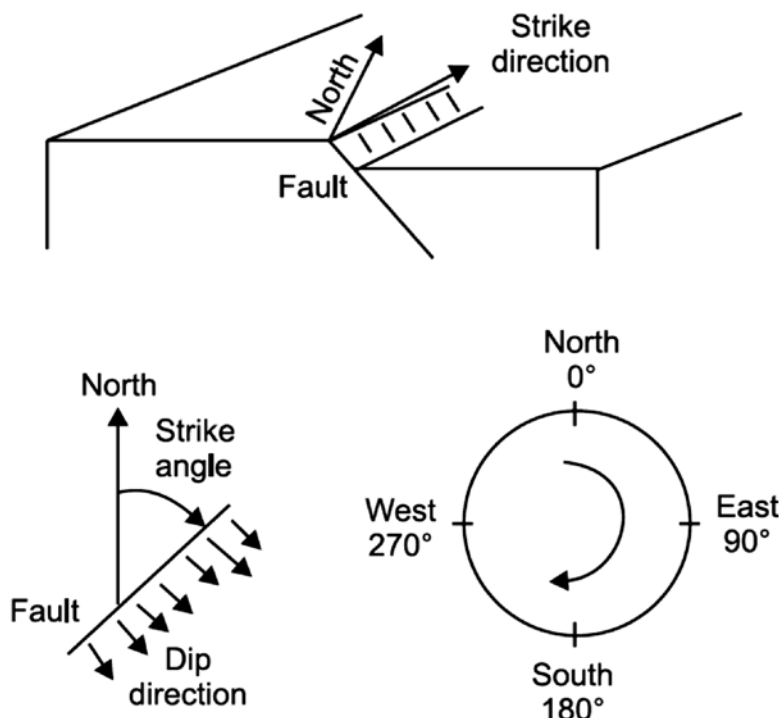
گسل‌ها از لحاظ هندسه و نحوه حرکت نسبت به هم به سه دسته شیب‌لغز، امتداد لغز و مایل لغز طبقه‌بندی می‌شوند. در حالت کلی گسلش (نحوه حرکت و رفتار گسل‌ها نسبت به یکدیگر) پروسه‌ای پیچیده بوده و انواع متفاوتی از آن وجود دارد. انواع هندسه‌ای ساده شده و کلی گسلش بر اساس تعریف سه نوع مقیاس زاویه‌ای *strike*، *dip* و *slip* معرفی می‌شوند.

گسل‌های موجود در زمین می‌توانند نسبت به هم حرکت کنند. به زاویه‌ای که بیانگر شیب قرارگیری سطح گسل است، *dip* گفته می‌شود. این زاویه نسبت به سطح زمین و یا صفحه‌ای موازی سطح زمین سنجیده می‌شود. زاویه *dip* یک گسل افقی برابر صفر درجه و زاویه *dip* یک گسل قائم برابر نود درجه است.



شکل (۱-۱۳): جزئیات زاویه *dip*

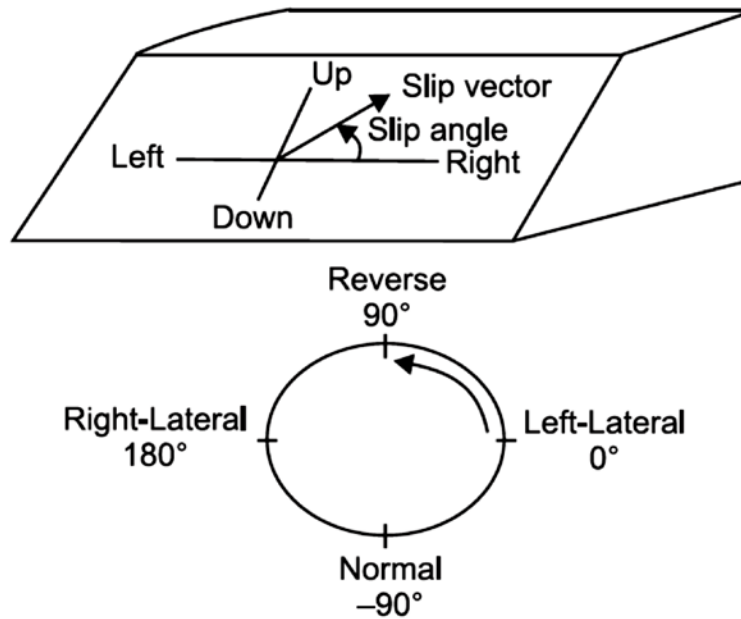
زاویه *strike* زاویه‌ای است که با آن جهت قرارگیری گسل در راستای ساعتگرد نسبت به شمال سنجیده می‌شود. به عنوان مثال زاویه *strike* صفر درجه یا ۱۸۰ درجه بیانگر گسلی است که در جهت شمال-جنوب واقع شده، و زاویه *strike* نود درجه یا دویست و هفتاد درجه بیانگر گسلی است که در جهت شرق-غرب واقع شده است.



شکل (۱-۱۴): جزئیات زاویه *strike*

زاوای *dip* و *strike* تنها راستای قرارگیری گسل را مشخص می‌کنند، اما جهت حرکت گسل نیز باید تعیین گردد. به پارامتری که این حرکت را مشخص می‌نماید، *slip* گفته می‌شود. *Slip* دارای دو مؤلفه است: یک مؤلفه بزرگا که بیانگر میزان حرکت سنگ‌ها است، و یک مؤلفه برداری که نشان دهنده جهت حرکت گسل است. بزرگا و جهت معمولاً به صورت مجزا تعریف می‌گردند. بزرگای *slip* به مقدار جابجایی دو سمت گسل نسبت به هم گفته می‌شود. این فاصله برای زلزله‌های کوچک در حدود چند سانتی‌متر و برای زلزله‌های بزرگ به حدود چند متر می‌رسد. جهت *slip* نسبت به سطح گسل سنجیده شده و مشابه *dip* و *strike* به صورت یک زاویه معرفی می‌گردد. در واقع زاویه *slip* زاویه‌ای است که دیواره‌ی قراردادی متحرک به اندازه آن نسبت به دیواره‌ی قراردادی پایه حرکت می‌کند. در صورتی که دیواره قراردادی متحرک به سمت راست حرکت کند، زاویه *slip* برابر صفر خواهد بود، اگر به سمت بالا حرکت کند، زاویه *slip* برابر نود درجه، اگر به سمت چپ حرکت کند، زاویه *slip* برابر ۱۸۰ درجه، و اگر به سمت پایین حرکت کند، زاویه *slip* برابر ۲۷۰ درجه و یا منفی ۹۰ درجه خواهد بود، شکل (۱-۱۵).

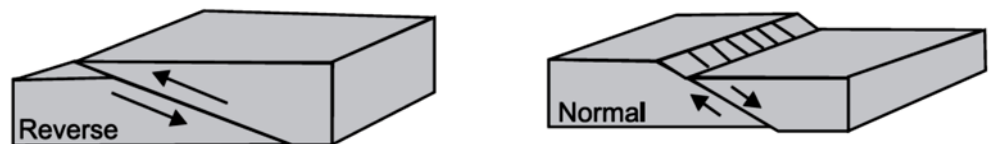
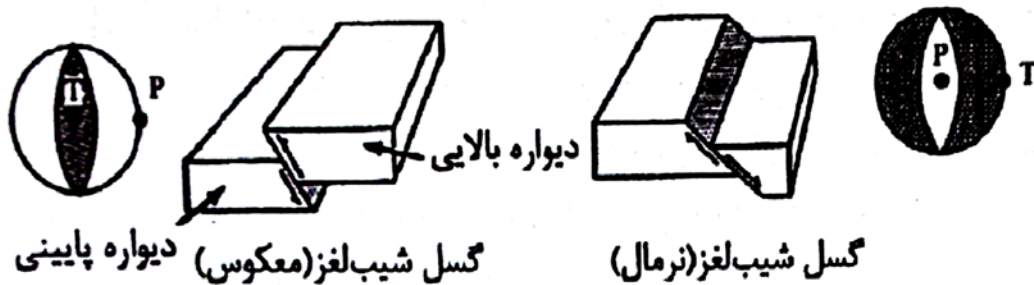
گسل‌ها بر حسب نحوه حرکت صفحات پوسته‌ی زمین در دو طرف آنها، به سه دسته‌ی اصلی زیر تقسیم می‌شوند:



شکل (۱-۱۵): جزئیات زاویه *slip*

الف - گسل شیب لغز (*Dip-slip*)

در حالتی که صفحات پوسته‌ی زمین در طرفین یک گسل می‌خواهند نسبت به هم در امتداد شیب گسل حرکت کنند، گسل را شیب‌لغز می‌نامند. این گسل‌ها به دو نوع گسل عادی و گسل معکوس دسته‌بندی می‌شوند.

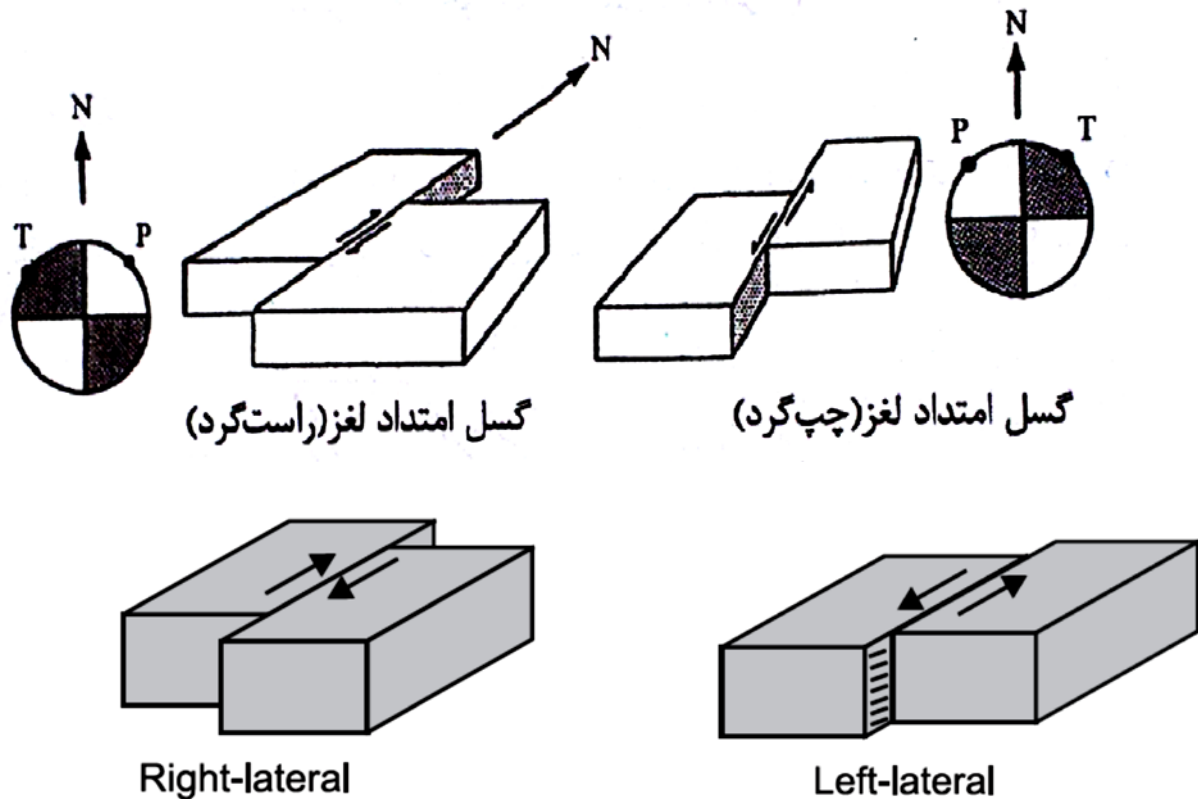


شکل (۱-۱۶): نحوه حرکت گسل شیب‌لغز

ب - گسل امتداد لغز (*Strike-slip*)

گسل امتداد لغز گسلی است که لغزش یا جابجایی کلی به موازات امتداد گسل داشته باشد، به عبارتی در این نوع گسل‌ها لغزش امتدادی غالب بر لغزش شیبی است. بر اساس جهت حرکت در امتداد راستای گسل، این گسل‌ها به دو دسته‌ی گسل‌های امتدادی چپ‌گرد و راست‌گرد تقسیم می‌شوند، به طوری که اگر در امتداد طبقه جابجا شده به

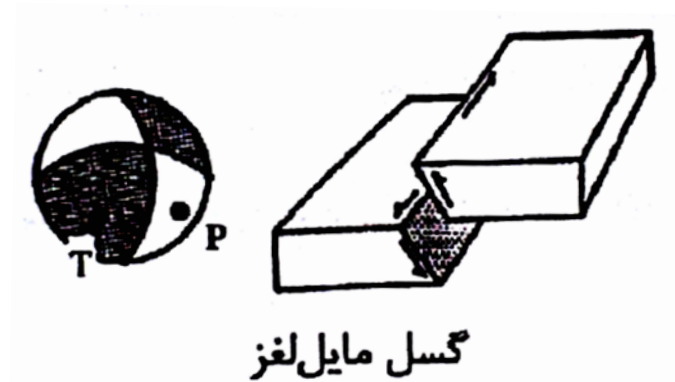
سطح گسل نگریسته شود، در صورتی که قطعه بالایی به طرف راست حرکت کرده باشد راست‌گرد و در حالت عکس، چپ‌گرد نامیده می‌شود که در شکل (۱۷-۱) به خوبی نمایش داده شده است.

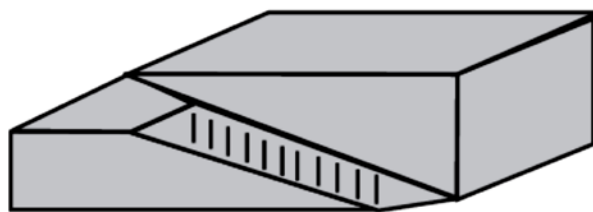


شکل (۱۷-۱): نحوه حرکت گسل امتداد لغز

پ- گسل مایل لغز (*Oblique-slip*)

اگر حرکات صفحات پوسته‌ی زمین در طرفین یک گسل، ترکیبی از حرکت گسل امتداد لغز و گسل شیب لغز باشد، اصطلاحاً به آن گسل مایل لغز یا گسل مورب می‌گویند.





شکل (۱-۱۸): نحوه حرکت گسل مایل لغز

۹-۱- کاتالوگ زمین لرزه

برای ارزیابی خطرپذیری لرزه‌ای در یک منطقه لازم است داده‌های زمین لرزه که در گذشته و در طول تاریخ در گستره مورد بررسی اتفاق افتاده، بررسی شود که در اصطلاح به این داده‌ها کاتالوگ زمین لرزه گفته می‌شود. در حالت کلی کاتالوگ زمین لرزه را می‌توان به دو دسته تقسیم‌بندی کرد: دسته اول زمین لرزه‌های تاریخی هستند که قبل از سال ۱۹۰۰ میلادی روی داده‌اند و تنها بر اساس داده‌های مه‌لرزه‌ای، با مطالعات منابع و کتب تاریخی به دست می‌آیند. داده‌های مه‌لرزه‌ای اطلاعاتی هستند که بدون کمک گرفتن از دستگاه‌های لرزه‌نگاری به دست آمده باشند. زمین لرزه‌هایی که بعد از ۱۹۰۰ میلادی روی داده‌اند در دسته دوم جای می‌گیرند که به زمین لرزه‌های دستگاهی معروفند. زمین لرزه‌های دستگاهی خود به دو دسته زمین لرزه‌های "دستگاهی قدیم" و "دستگاهی جدید" تقسیم می‌شوند. زمین لرزه‌های دستگاهی قدیم بازه زمانی ۱۹۰۰ تا ۱۹۶۳ میلادی را پوشش می‌دهند که این دوره با توسعه دستگاه‌های لرزه‌نگاری از لحاظ کمی و کیفی همراه بوده است. زمین لرزه‌های دستگاهی جدید به رویدادهای بعد از سال ۱۹۶۴ میلادی گفته می‌شود که در این دوره زمانی کاتالوگ زمین لرزه تقریباً همگن و کامل است. مطالعات تحلیل خطر نیازمند کاتالوگی صحیح، کامل و همگن می‌باشد. کاتالوگ زمین لرزه‌ای که از منابع مختلف گردآوری شده باشد، ناهمگن است. برای حل این موضوع بایستی داده‌های زمین لرزه تنها بر حسب یک نوع بزرگا بیان شود. در مورد زمین لرزه‌های ایران محققین روابطی را برای تبدیل مقیاس‌های مختلف بزرگا به یکدیگر پیشنهاد داده‌اند.

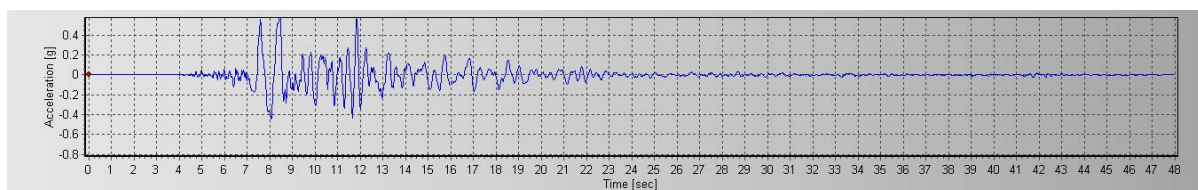
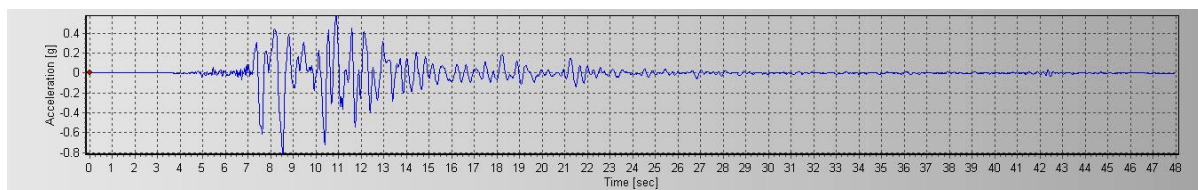
۱۰-۱- لرزه‌خیزی تاریخی

لرزه‌خیزی تاریخی به مطالعات زمین لرزه‌های گذشته گفته می‌شود که بر اساس مدارک ثبت شده‌ای که تأثیر زمین لرزه‌ها بر روی محیط جامعه و تمدن را تشریح می‌کند، تهیه شده است. ماهیت و اعتمادپذیری این مدارک بر اساس زمان وقوع رویدادها و همچنین سابقه تاریخی منطقه تحت مطالعه دستخوش تغییرات عمده‌ای می‌شود. در مناطقی که این مدارک از حدود چندین قرن گذشته موجود باشد و تمام رویدادهای بزرگ در این دوره‌ها گزارش شده باشد، لرزه‌خیزی تاریخی نقش مهمی را در مطالعات تحلیل خطر ایفا می‌کند. از مناطقی که مدارک و مستندات تاریخی نسبتاً قابل اطمینانی دارند می‌توان به اروپا، حوزه دریای مدیترانه، کشورهای جنوب و شرق آسیا و ایران اشاره کرد. صحت‌سنجی این منابع و وقایع شرح داده شده در آن نیز مسئله‌ای حائز اهمیت است به طوری که یک گزارش اشتباه یا حتی اغراق‌آمیز می‌تواند تأثیر بسزایی در لرزه‌شناسی گستره مورد مطالعه داشته باشد. انتقال یافتن و بازماندن داده‌های لرزه‌ای وابستگی بسیار زیادی به اوضاع و احوال تاریخی و جغرافیایی دارد که لزوماً برای همه

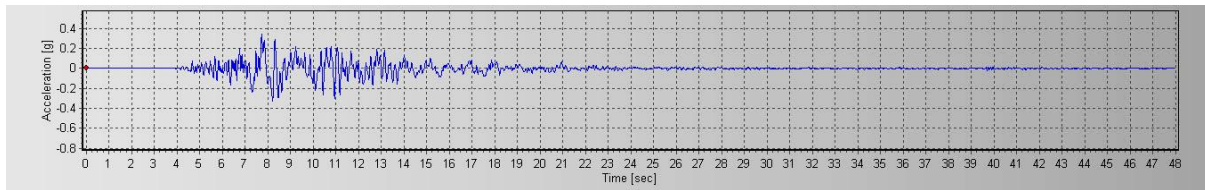
مناطق در طی دوره‌های گوناگون گذشته یکنواخت و همخوان نیست. از این رو باید داده‌ها در پرتو اوضاع و احوالی که در آن ثبت شده‌اند، بازبینی شوند.

۱۱-۱- زمین‌لرزه‌های دستگاهی

همانطوری که پیش‌تر اشاره شد رکوردهای تاریخی شامل زمین‌لرزه‌هایی است که در طول صدها یا هزاران سال تاریخ بشریت به وقوع پیوسته است اما رکوردهای دستگاهی قدمتی کمتر از صد سال دارند و زمین‌لرزه‌هایی هستند که شواهد دستگاهی آنها موجود است. عبارت لرزه‌خیزی برای توصیف جوانب مختلف این زمین‌لرزه‌ها بکار می‌رود. در برخی موارد این عبارت به تعداد زمین‌لرزه‌هایی که در اندازه‌های مختلف در یک مکان مشخص و در طول یک یا دو سال گذشته به وقوع پیوسته اشاره می‌کند. در بعضی موارد نیز این عبارت نمایان‌گر تعداد زمین‌لرزه‌های مخربی است که در یک ناحیه وسیع و در طول چند سال گذشته روی داده است. ارتعاش زمین یا امواج لرزه‌ای که از چشمه زمین‌لرزه ساطع می‌شوند ناشی از یک حرکت ناگهانی در امتداد شکستگی (گسل) جدید یا قدیمی در زمین است. جابجایی زمین که ناشی از ارتعاشات رویداد زمین‌لرزه است که توسط دستگاهی به نام لرزه‌نگار ثبت می‌شود. این دستگاه‌ها طوری طراحی شده‌اند که قادر به بزرگ‌نمایی حرکت ضعیف زمین نیز هستند به طوری که بتوانند امواج لرزه‌ای که توسط زمین‌لرزه‌های کوچک یا زمین‌لرزه‌هایی که در فواصل دور از لرزه‌نگار روی می‌دهند را ثبت کنند. از این اطلاعات به منظور مشخص کردن محل وقوع زمین‌لرزه، مشخصات چشمه لرزه‌زا، فیزیک امواج لرزه‌ای، بازتاب و انکسار امواج و همچنین فراهم کردن اطلاعاتی در مورد آن قسمتی از زمین که بین چشمه و لرزه‌نگار قرار دارد، استفاده می‌شود. در مهندسی عمران و به ویژه در بحث طراحی سازه‌ها، عنصر کلیدی و حائز اهمیت **شتاب زمین-لرزه** است. با توجه به رابطه بین شتاب و جابجایی به ظاهر می‌توان از روی لرزه‌نگاشت‌ها شتاب حرکت زمین را به دست آورد اما در عمل این مهم تاکنون محقق نشده است، از این رو نیاز به نصب دستگاهی برای حل این مشکل وجود دارد. دستگاهی که شتاب حرکت زمین را ثبت می‌کند، شتاب‌نگار نامیده می‌شود. این دستگاه‌ها حرکت زمین را در سه راستا ثبت می‌کنند که دو مؤلفه آن در راستای افقی و عمود بر هم (L و T) و یک مؤلفه به صورت قائم (V) می‌باشد که نمونه‌ای از آن در اشکال (۱-۱۹) و (۱-۲۰) نشان داده شده است.



شکل ۱۹۹۵^۱ (۱۹-۱): مؤلفه‌های افقی شتاب زلزله کوبه



شکل (۲۰-۱): مؤلفه قائم شتاب زلزله کوبه ۱۹۹۵

به مجموعه دو شتاب‌نگاشت مربوط به دو مؤلفه افقی متعامد و یک شتاب‌نگاشت مربوط به یک مؤلفه قائم، اصطلاحاً یک رکورد زلزله^۲ گفته می‌شود.

نکته: با توجه به اشکال فوق می‌توان مشاهده نمود که یک رکورد زلزله، دارای سه اوج شتاب^۳ (PGA) است که دوتا از آنها مربوط به مؤلفه‌های افقی و یکی از آنها مربوط به مؤلفه قائم زلزله می‌باشد. در حالت کلی این سه (PGA) با هم متفاوت هستند.

نکته: معمولاً به رکورد زلزله‌ای که محل ثبت شتاب‌نگاشت آن در فواصل بیش از ۱۵ کیلومتر از گسل ایجادکننده زلزله باشد، اصطلاحاً رکورد زلزله‌ی دور از گسل^۴ گفته شده و به رکورد زلزله با فاصله‌ای نزدیک‌تر از ۱۵ کیلومتر اصطلاحاً رکورد زلزله‌ی نزدیک گسل^۵ گفته می‌شود. شایان ذکر است که در جریان یک زلزله، رکوردهای ثبت شده به صورت دور از گسل و نزدیک گسل تفاوت‌هایی با یکدیگر دارند، به طوری که می‌توان گفت:

- در یک رکورد زلزله‌ی دور از گسل، نسبت PGA برای مؤلفه‌ی کوچکتر افقی به مؤلفه‌ی بزرگتر افقی معمولاً حدود ۰/۸۵ است، این در حالی است که مقدار این نسبت در یک رکورد زلزله‌ی نزدیک گسل قاعده‌ی خاصی ندارد.
- در یک رکورد زلزله‌ی دور از گسل، شتاب‌نگاشت مؤلفه‌ی قائم زلزله نسبت به امتدادهای افقی خفیف‌تر است و PGA مربوط به آن به‌طور قابل ملاحظه‌ای کوچکتر می‌باشد. این درحالی است که در یک رکورد زلزله‌ی نزدیک گسل، PGA امتداد قائم نه تنها نسبت به PGA امتدادهای افقی کمتر نیست، بلکه با توجه به مکانیزم عملکرد گسل، ممکن است بزرگتر از PGA مربوط به مؤلفه‌های افقی نیز باشد. شایان ذکر است که تأثیر شتاب‌های قائم زلزله می‌تواند مخرب‌تر از شتاب‌های افقی باشد و نمونه‌ای از این حالت در زلزله دلخراش بم در سال ۱۳۸۲ اتفاق افتاد، به گونه‌ای که گسل مسبب زلزله در نزدیکی شهر بم بوده و آثار

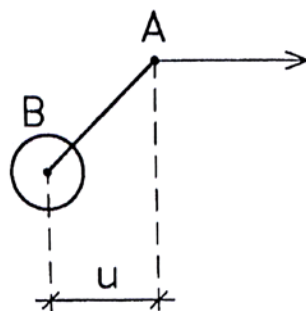
1. Kobe
2. Earthquake Record
3. Peak Ground Acceleration
4. Far- Field Earthquake Record
5. Near- Field Earthquake Record

تخریبی زیادی را ایجاد کرد. بیشینه‌ی شتاب ثبت شده در زمین‌لرزه‌ی بم، برای مؤلفه‌ی قائم ۰/۹۸۹ برابر شتاب ثقل بوده که این موضوع و همچنین نزدیک بودن به کانون و گسل مسبب زلزله، این شتاب‌نگاشت را به یکی از بارزترین شتاب‌نگاشت‌های دنیا در آورده است.

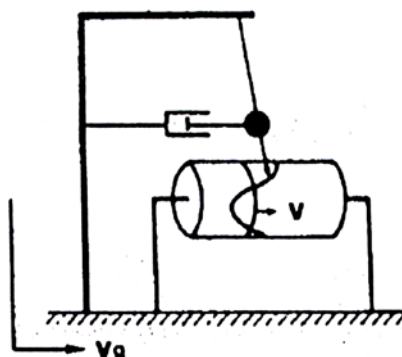
نکته: شتاب‌نگاشت‌های مربوط به رکورد زلزله‌های نزدیک گسل، عمدتاً پالس گونه هستند، در حالیکه با فاصله گرفتن از گسل، شتاب‌نگاشت‌ها هموارتر شده و معمولاً PGA آنها کاهش می‌یابد.

۱-۱۲- لرزه‌نگار^۱ و شتاب‌نگار^۲

کار دستگاه‌های لرزه‌نگار که عموماً در لرزه‌شناسی مورد استفاده قرار می‌گیرند، ثبت جابجایی زمین ناشی از ارتعاشات حاصل از زلزله می‌باشد. اصول کار این دستگاه‌ها بر اساس حرکت آزاد آونگ است. اگر آونگی با زمان تناوب زیاد تحت حرکتی با زمان تناوب نسبتاً کم قرار گیرد جابجایی افقی آونگ نسبت به پایه (u) ، با جابجایی افقی پایه آونگ (جابجایی نقطه A در شکل (۱-۲۱)) برابر خواهد شد. با وصل یک قلم رسام به نقطه B و چرخش منظم توپ کاغذ در زیر این قلم، همینکه دستگاه تحت حرکت قرار گیرد آن را روی کاغذ ثبت کرده و پس از باز کردن توپ کاغذ از دستگاه این حرکت را (که در واقع همان ارتعاش زمین در محل نصب دستگاه است) نسبت به زمان در دست خواهیم داشت. ساده‌ترین ساختمان یک لرزه‌نگار در شکل (۱-۲۲) نشان داده شده است.



شکل (۱-۲۱): ارتعاش آونگ در اثر زلزله



- 1 . Seismograph
- 2 . Accelerograph

شکل (۱-۲۲): لرزه‌نگار

اگر زمان تناوب دستگاه نسبت به تناوب زلزله خیلی کوچک باشد جابجایی آونگ با شتاب زمین متناسب خواهد بود. این چنین دستگاهی را شتاب‌نگار و نمودار حاصله را شتاب‌نگاشت می‌خوانند. ساخت شتاب‌نگار به مراتب ساده‌تر از لرزه‌نگار بوده و نصب و نگهداری آن نیز آسان‌تر می‌باشد. امروزه شتاب‌نگارهای الکترونیک به بازار آمده‌اند که ارزانتر و سبکتر از انواع قدیمی‌اند و شتاب زلزله را به صورت عددی ثبت می‌کنند که می‌تواند مستقیماً برای تحلیل رایانه‌ای مورد استفاده محققان قرار گیرد.

باید توجه داشت که شتاب در سه جهت عمود بر هم ثبت می‌شود که یکی قائم و بقیه افقی هستند. منابع خطا در شتاب‌نگار به قرار زیرند:

الف- خواص دینامیکی شتاب‌نگار

اگر فرکانس و استهلاک شتاب‌نگار درست تنظیم نشده باشند تداخل دینامیکی بین ورودی که همان ارتعاش زلزله است و خواص دینامیکی شتاب‌نگار صورت گرفته و خروجی (شتاب‌نگاشت) غیر از ورودی خواهد بود.

ب- کش آمدن کاغذی که نمودار بر آن ثبت شده است.

پ- لق‌ی و کجی قلم ثبات و اصطکاک بین قلم و کاغذ ثبات.

ت- خطاهای ناشی از خواندن نمودار و عددی کردن آن.

۱-۱۳- شبکه‌های لرزه‌نگاری و شتاب‌نگاری

هنگامی که زمین‌لرزه‌ای روی می‌دهد برای دسترسی به اطلاعاتی نظیر محل وقوع رویداد و اندازه آن نیاز به تشکیل شبکه‌های لرزه‌نگاری است. این شبکه‌ها در انواع و اندازه‌های مختلفی هستند که از بزرگترین آنها می‌توان به شبکه لرزه‌نگاری استاندارد جهانی اشاره کرد. این شبکه شامل بیش از ۱۰۰ ایستگاه در بیش از ۶۰ کشور دنیاست. شبکه‌های منطقه‌ای وسعت کمتری را نسبت به شبکه‌های جهانی پوشش می‌دهند. این شبکه‌ها که صدها کیلومتر از یک منطقه را تحت پوشش قرار می‌دهند شامل ده‌ها ایستگاه با دوره تناوب کوتاه هستند که این دستگاه‌ها اقتصادی‌ترین روش برای تعیین محل رویداد زمین‌لرزه هستند. یکی دیگر از انواع شبکه‌های لرزه‌نگاری، شبکه لرزه‌نگاری محلی است که تنها چندین کیلومتر از یک گستره را پوشش می‌دهد. کاربرد این شبکه‌ها نظارت بر لرزه‌خیزی مناطقی است که تأسیسات و سازه‌های مهم حیاتی در آن واقع شده‌اند یا همچنین برای بررسی لرزه‌خیزی یک ساختار زمین-شناسی ویژه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در ایران شبکه لرزه‌نگاری در سال ۱۹۷۳ میلادی کار خود را زیر نظر سازمان برنامه و بودجه وقت آغاز کرد و در سال ۱۹۸۱ میلادی با انتقال به مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن وارد مرحله جدیدی از فعالیت‌های خود شد. این شبکه تا سال ۱۹۹۲ میلادی شامل ۲۷۴ شتاب‌نگار بود که در اوایل سال ۲۰۱۱ تعداد ایستگاه‌های شتاب‌نگار این مجموعه به ۱۱۰۸ دستگاه رسید. نمونه‌ای از دستگاه‌های شتاب‌نگاری ایران را می‌توان در شکل (۱-۲۳) مشاهده نمود.



شکل (۱-۲۳): دستگاه‌های شتابنگاری ایران

شتابنگارهای شبکه لرزه‌نگاری ایران در دو دسته آنالوگ ($SMA-1$) و دیجیتال ($SSA-2$) موجود هستند. دستگاه شتابنگار $SSA-2$ از جدیدترین دستگاه‌های شتابنگار دیجیتالی است که در حال حاضر مورد استفاده شبکه شتاب-نگاری زلزله ایران می‌باشد. دستگاه شتابنگار $SSA-2$ به دلیل باند بسامد وسیع‌تر و دامنه دینامیکی بیشتر نسبت به $SMA-1$ ، داده‌های کامل‌تری در حافظه ثبت می‌کند، لذا پردازش داده‌ها از طریق نرم‌افزارهای خاص پردازش به مراتب سریع‌تر و با اطمینان بیشتری از $SMA-1$ می‌باشد.

۱-۱۴- مقیاس‌های سنجش زلزله

جهت بیان اندازه یک زمین‌لرزه معمولاً دو نوع مقیاس بکار گرفته می‌شود که یکی از آنها شدت زلزله می‌باشد که بر مشاهدات و تأثیرات زلزله بر سازه و انسانها استوار است و در حقیقت یک مقیاس نظری می‌باشد، و دیگری یک اندازه‌گیری کمی از گستردگی و وسعت عمل زلزله می‌باشد که بزرگی زلزله نامیده می‌شود.

۱-۱۴-۱- بزرگای زلزله (*Earthquake Magnitude*)

بزرگای زلزله معیاری است که با آن مقدار انرژی آزاد شده از زلزله سنجیده می‌شود. اصطلاح بزرگا نخستین بار در سال ۱۹۳۱ میلادی توسط واداتی^۱ بکار گرفته شد که او زمین‌لرزه‌های ژاپن را با استفاده از لگاریتم بیشینه دامنه جنبش زمین رده‌بندی کرد. در حالت کلی چهار نوع مقیاس برای سنجش بزرگای زلزله وجود دارد.

۱-۱۴-۱- الف - بزرگای محلی^۲ (M_L)

1 . Wadati

2 . Local magnitude scale

این مقیاس که به عنوان مقیاس ریشتر هم نامگذاری می‌شود برای زلزله‌هایی با حداکثر فاصله‌ی ۶۰۰ کیلومتر کاربرد دارد.

$$M_L = \log A - \log A_0 = \log \left(\frac{A}{A_0} \right) \quad (۶-۱)$$

در این رابطه:

M_L = مقیاس محلی (مقیاس بزرگای ریشتر)

A = حداکثر دامنه بر حسب میلی‌متر که توسط دستگاه لرزه‌نگار وود- اندرسون^۱ استاندارد ثبت شده است. لرزه‌نگار مزبور دارای زمان تناوب طبیعی ۰/۸ ثانیه، ضریب میرایی ۰/۸٪ و بزرگ‌نمایی استاتیکی ۲۸۰۰ بوده و در فاصله ۱۰۰ کیلومتری از مرکز زمین لرزه قرار دارد.

A_0 = دامنه متناظر با کوچکترین زمین لرزه ثبت شده است (برابر ۰/۰۰۱ میلی‌متر).

لازم به ذکر است که مقیاس بزرگای محلی در بزرگای حدود ۶/۸ به سطح اشباع می‌رسد. همانگونه که گفته شد بخشی از انرژی زلزله به صورت امواج زلزله انتشار می‌یابد و بخشی دیگر صرف جابجایی گسل‌ها و خرد شدن سنگ‌ها می‌شود. گوتنبرگ و ریشتر در سال ۱۹۵۶ رابطه‌ای بین مقدار انرژی آزاد شده و بزرگای زمین لرزه ارائه نمودند که به صورت رابطه زیر نمایش داده می‌شود:

$$\log E = 4.8 + 1.5M \quad (۷-۱)$$

در این رابطه:

E = انرژی آزاد شده بر حسب ژول

M = بزرگای زمین لرزه است.

همانطوری که این رابطه بیان می‌کند بین انرژی آزاد شده و بزرگای زلزله، یک رابطه لگاریتمی برقرار است و این امر نشان‌دهنده این موضوع است که به ازای یک واحد افزایش در بزرگا، انرژی آزاد شده زمین لرزه تقریباً ۳۲ برابر و به ازای دو واحد افزایش بزرگی، انرژی ۱۰۰۰ برابر می‌گردد. پس مشخص می‌شود که تفاوت بین دو زلزله با بزرگی‌های ۶ تا ۷ زیاد است. جدول (۱-۱) رابطه‌ی تقریبی بین بزرگای محلی، بیشینه شتاب زمین، و مدت زمان لرزش را نشان می‌دهد.

1 . Wood- Anderson seismograph

جدول (۱-۱): رابطه‌ی تقریبی بین بزرگای محلی، بیشینه شتاب زمین، و مدت زمان لرزش

<i>Local Magnitude (M_L)</i>	<i>Typical peak ground acceleration a_{max} near the vicinity of the fault rupture</i>	<i>Typical duration of ground shaking near the vicinity of the fault rupture</i>
≤ 2	-	-
3	-	-
4	-	-
5	0.09g	2 sec
6	0.22g	12 sec
7	0.37g	24 sec
≥ 8	≥ 0.50 g	≥ 34 sec

۱-۱۴-۱-ب- بزرگا در مقیاس امواج سطحی ^۱ (M_s)

بزرگا در مقیاس امواج سطحی بر اساس دامنه امواج سطحی که دوره تناوبی در حدود ۲۰ ثانیه دارند محاسبه شده و معمولاً برای زمین‌لرزه‌هایی که در فاصله‌ی بیش از ۲۰۰۰ کیلومتر ثبت می‌شوند، کاربرد دارد. یکی از مزیت‌های این مقیاس بزرگا نسبت به بزرگای محلی این است که به جای استفاده از بیشینه دامنه‌ای که از لرزه‌نگار استاندارد وود-اندرسون به دست می‌آید، از بیشینه جابجایی زمین استفاده می‌شود، از اینرو با استفاده از هر نوع لرزه‌نگاری می‌توان این مقیاس از بزرگا را تعیین نمود. این مقیاس بزرگا برای زمین‌لرزه‌های متوسط و بزرگ که دارای عمق کانونی کمی هستند به کار می‌رود و همچنین لرزه‌نگار بایستی حداقل ۱۰۰۰ کیلومتر از رومرکز زمین لرزه فاصله داشته باشد.

۱-۱۴-۱-پ- بزرگا در مقیاس امواج حجمی ^۲ (M_b)

برای زمین‌لرزه‌هایی که در فواصل بیش از ۶۰۰ کیلومتری اندازه‌گیری می‌شوند از واحد بزرگا در مقیاس امواج حجمی استفاده می‌شود.

نکته: بزرگا در مقیاس امواج حجمی برای زمین‌لرزه‌هایی که عمق کانونی آنها زیاد است بکار می‌رود.

نکته: امبرسیز و ملویل با بررسی زمین‌لرزه‌های ایران به این نتیجه رسیدند که بزرگی‌های برآورد شده از موج حجمی نسبت به بزرگی‌های برآورد شده از موج سطحی دارای خطای بیشتری هستند که این امر به سبب نبود اطلاعات در مورد ژرفای کانونی زمین‌لرزه‌هاست زیرا ژرفای بیشتر رویدادها تا حدودی به طور تقریبی بدست آمده‌اند.

۱-۱۴-۱-ت- بزرگای گشتاوری ^۳ (M_w)

- 1 . Surface wave magnitude scale
- 2 . Body wave magnitude scale
- 3 . Moment magnitude

بزرگای گشتاوری امروزه به عنوان مناسب‌ترین معیار برای اندازه‌گیری زمین‌لرزه‌های بزرگ شناخته می‌شود. دلیل استفاده گسترده این معیار، توانایی و قدرت فیزیکی آن و سازگاری با اصول و مبانی لرزه‌شناسی است. از مزایای استفاده از بزرگای گشتاوری می‌توان به این موارد اشاره کرد که این مقیاس بزرگا می‌تواند به تنهایی اندازه زمین‌لرزه را نشان دهد و دارای سطح اشباع نیز نمی‌باشد. بزرگای گشتاوری را می‌توان از تغییر شکل و یا از امواج لرزه‌ای بدست آورد و همچنین می‌توان آن را به نرخ لغزش گسل ارتباط داد.

زلزله‌های با بزرگی کمتر از ۵ برای ابنیه خطری را در بر ندارند و حتی ساختمان‌های نسبتاً سست روستایی هم به زحمت آسیب می‌بینند. زلزله‌های با بزرگی بین ۵ تا ۶ برای ساختمان‌های شهری چندان خطری ندارند اما می‌توانند روستاها را خراب کنند، به عنوان مثال زلزله ۱۳۰۲ در کج درخت با بزرگی ۵/۸ به کشته شدن ۷۸۰ نفر انجامید و یا زلزله ۱۳۵۶ کرمان با بزرگی ۵/۷ باعث مرگ ۶۶۰ نفر شد. این تلفات عمدتاً ناشی از انهدام ساختمان‌های روستایی بوده است. زلزله‌های با بزرگی ۶ تا ۷ می‌تواند به ساختمان‌های شهری آسیب برساند. مثلاً زلزله سال ۱۳۴۷ فردوس با بزرگی ۶/۴ این شهر را با خاک یکسان کرد. زلزله‌های با بزرگی بیش از ۷ را باید زلزله‌های مخرب نامید. زلزله‌های آل‌سنترو آمریکا ۱۹۴۰، گزلی شوروی ۱۹۷۶ و طبس ایران ۱۳۵۷ از این گروه‌اند. در این زلزله‌ها ساختمان‌های شهری منهدم شده و حتی ابنیه مهندسی ساز نیز از خسارت دور نمی‌مانند. بیشترین بزرگی ثبت شده برای زلزله‌های بسیار مخرب که موجب تلفات شده است، از ۸/۴ تجاوز نمی‌کند.

۱-۱۴-۲- شدت زلزله (*Earthquake Intensity*)

مقیاس شدت زلزله به صورت تابعی از احساس و دریافت انسان و موجودات زنده از زلزله و نیز تأثیر زلزله بر ساختمان‌ها بیان می‌شود. از آنجاییکه شدت یک رویداد زمین‌لرزه بر مبنای اثرات قابل مشاهده زمین‌لرزه در محل وقوع تعیین می‌شود، دقت در تعیین شدت زمین‌لرزه به دقت مشاهده‌کننده وابسته است. مقیاس‌های مختلفی برای تعیین شدت زمین‌لرزه همانند شدت مرکالی اصلاح شده (*MMI*)، آژانس هواشناسی ژاپن (*JMA*)، مقیاس کلان لرزه‌ای اروپا (*EMS*)، ارائه شده است. شدت زمین‌لرزه با نمایه‌ای عددی تعریف می‌شود که درجه‌بندی این نمایه‌ها بر پایه‌ی یک مقیاس شدت زمین‌لرزه است که متداول‌ترین آنها مقیاس اصلاح شده مرکالی^۱ می‌باشد که در جدول (۱-۲) با اعداد رومی از ۱ تا ۱۲ نشان داده شده است. البته این مقیاس برای اندازه‌گیری شدت تکان زمین یک مقیاس دقیق مهندسی نیست، لیکن یک مقیاس نظری برای اثرات ناشی از تکان زمین است.

جدول (۱-۲): مقیاس اصلاح شده مرکالی

شدت	وصف زمین‌لرزه و میزان خسارت
I	زمین‌لرزه به سختی توسط افراد بسیار کمی و تنها تحت شرایط خاصی احساس می‌شود و هیچگونه

1. *Modified Mercalli*

	خسارتی به همراه ندارد.
II	تنها به وسیله‌ی افراد اندکی که در حال استراحت هستند حس می‌شود به ویژه افرادی که در طبقات بالایی ساختمان هستند و اکثر مردم نمی‌توانند تشخیص دهند که زمین لرزه‌ای روی داده است.
III	کاملاً در داخل منازل احساس می‌شود خصوصاً در طبقات بالایی ساختمان. ارتعاشات این زمین لرزه مانند عبور کامیون از نزدیکی منازل است اما با این حال خیلی از مردم قادر به تشخیص این ارتعاش به عنوان زمین لرزه نیستند. آسیبی به همراه ندارند و تنها اتومبیل‌های ساکن ممکن است اندکی تکان بخورند.
IV	ارتعاشاتی نظیر عبور کامیون سنگین از نزدیکی منازل حس می‌شود. در طول روز در داخل منازل توسط افراد بسیاری و در خارج از منازل توسط افراد اندکی احساس می‌شود. درها و پنجره‌ها به لرزه در می‌آیند. دیوارها به صدا در می‌آیند و اتومبیل‌های ساکن به طور قابل محسوسی تکان می‌خورند.
V	تقریباً به وسیله هر کسی در داخل و خارج از ساختمان احساس می‌شود و افرادی که خوابیده‌اند بیدار می‌شوند. برخی از ظروف، درها و پنجره‌ها ممکن است بشکنند و برخی از گچکاری‌ها ترک بر می‌دارند. همچنین ممکن است آونگ ساعت‌ها از حرکت بایستند.
VI	همه آن را احساس می‌کنند و بسیاری از مردم ترسیده و از ساختمان‌ها خارج می‌شوند. خسارات سازه‌ای اندکی به همراه دارد. برخی از مبلمان سنگین به حرکت در می‌آیند و دودکش‌ها آسیب می‌بینند.
VII	همه از ترس به خارج از ساختمان فرار می‌کنند. توسط رانندگان احساس می‌شود. خسارت ناچیزی به ساختمان‌های خوب طراحی شده، خسارت اندک تا متوسط به ساختمان‌های معمولی و خسارت قابل ملاحظه به ساختمان‌های ضعیف می‌زند.
VIII	رانندگان دچار آشفتگی می‌شوند. ساختمان‌های معمولی خسارت قابل ملاحظه و ساختمان‌های ضعیف به شدت آسیب می‌بینند. مبلمان سنگین واژگون می‌شوند. دیوارها از قاب ساختمان خارج می‌شوند و دودکش کارخانه‌ها فرو می‌ریزد. دمای آب چشمه‌ها کمی تغییر می‌کند و زمین‌های مرطوب و شیب‌دار می‌لغزند و شکاف بر می‌دارند.
IX	زمین ترک بر می‌دارد. ساختمان‌های محکم خسارت می‌بینند و ساختمان‌های سست فرو می‌ریزند. لوله‌های زیر زمینی شکسته می‌شوند و ساختمان‌ها از فونداسیون‌شان تغییر مکان به بیرون می‌دهند.
X	زمین به شدت ترک بر می‌دارد. ساختمان‌های با مصالح بنایی و چوبی منهدم می‌شوند. خطوط راه‌آهن خمیده می‌شوند. آب‌ها از داخل رودخانه‌ها به بیرون می‌ریزند و تعداد قابل ملاحظه‌ای زمین لغزش در لبه‌ی رودخانه‌ها و زمین‌های شیب‌دار به وقوع می‌پیوندد.
XI	پل‌ها فرو می‌ریزند و خطوط راه‌آهن به شدت خمیده می‌شوند. اندکی از ساختمان‌ها ایستاده باقی می‌مانند و ساختمان‌های بنایی غیر مسلح تقریباً منهدم می‌شوند. لوله‌های زیرزمینی به کلی می‌شکنند و از کار می‌افتند. در زمین‌های سست روان‌گرایی رخ می‌دهد و زمین شکافی عریض بر می‌دارد.
XII	وسعت خرابی بیش از اندازه است. تمامی اجزای به طور گسترده‌ای آسیب می‌بینند. در زمین به طور وسیعی ترک‌های برشی به‌شمار ایجاد می‌شود و سنگ‌های بزرگ جابجا می‌شوند. اشیاء به هوا پرتاب می‌شوند. مسیر رودخانه‌ها تغییر می‌کند. خطوط دید و سطح از شکل می‌افتد.

۱-۱۴-۳- رابطه تجربی بین شدت و بزرگی

رابطه بین شدت و بزرگی زمین‌لرزه، برای برآورد بزرگای زمین‌لرزه‌های تاریخی که در مورد آن‌ها داده‌های دستگاهی در دسترس نباشد مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. به عنوان نمونه امبرسیز و ملویل با استفاده از ۲۶۲ زمین‌لرزه که در سده کنونی در ایران روی داده‌اند و مقادیر بزرگا، شدت و شعاع دریافت‌پذیری لرزه‌ای برای آن‌ها معلوم است، رابطه زیر را ارائه داده‌اند:

$$M = -0.74 + 1.94 \log (r') + 0.28(I_0) \quad (۸-۱)$$

در این رابطه، M نشان‌دهنده بزرگا، r' شعاع دریافت‌پذیری و I_0 شدت زمین‌لرزه در مرکز است. شعاع دریافت‌پذیری لرزه‌ای به عنوان میانگین فاصله رومرکزی که در آن لرزه با شدت IV مرکالی یا بیشتر حس شود، تعیین می‌گردد.

۱-۱۵- ویژگی‌های حرکات لرزه‌ای زمین و عوامل مؤثر بر آن

مهمترین خصوصیات حرکات لرزه‌ای زمین از نظر کاربرد در مهندسی زلزله عبارتند از:

الف- حداکثر حرکات زمین (حداکثر شتاب، سرعت و تغییرمکان)

ب- زمان دوام حرکات لرزه‌ای شدید

پ- مشخصات ارتعاشی زلزله

هر یک از این پارامترها به نحو مؤثری عکس‌العمل سازه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. حداکثر حرکات زمین قبل از هر چیز بر روی بزرگی ارتعاشات وارد به سازه تأثیر می‌گذارند. زمان دوام حرکات لرزه‌ای قوی اثر بسیاری زیادی بر روی شدت خسارات ناشی از زلزله دارد. یک زلزله با شتاب متوسط و طول مدت زیاد عموماً به خسارت بیشتری نسبت به زلزله کوتاه‌تر با شتاب بیشتری می‌شود. مشخصات ارتعاشی زلزله بیشتر از این لحاظ اهمیت دارد که نزدیکی فرکانس زلزله و فرکانس ارتعاشی سازه منجر به ایجاد پدیده‌ی همگامی یا تشدید می‌شود.

۱-۱۵- الف- حداکثر حرکات زمین

اصولاً یکی از روش‌های مناسب جهت بررسی زلزله‌های مختلف و مقایسه آن‌ها، تعیین حداکثر مؤلفه‌های حرکت (تغییرمکان، سرعت و شتاب) برای هر زلزله می‌باشد. از بین این مؤلفه‌ها، **حداکثر شتاب** اهمیت بیشتری دارد. مهمترین نتیجه مطالعات لرزه‌خیزی یک منطقه از دید یک مهندس سازه عموماً حداکثر شتاب قابل انتظار برای یک زلزله در آن منطقه می‌باشد. با استفاده از این شتاب که به شتاب مبنای طرح موسوم است، طیف‌های طراحی زلزله و یا تاریخچه‌های شتاب زلزله‌های مختلف را می‌توان برای آن منطقه مقیاس کرده و از آن‌ها استفاده نمود.

۱-۱۵- ب- زمان دوام حرکات زمین‌لرزه

هر زلزله در مدت ارتعاش خود غالباً دارای سه مرحله می‌باشد. مرحله اول که شامل حرکات بسیار خفیف است، مرحله دوم حرکات متوسط و شدید ارتعاشی، و مرحله سوم که مجدداً حرکات زلزله، خفیف و ضعیف می‌شوند.

بدیهی است در بررسی چنین ارتعاشی ناگزیر هستیم به منظور کاربردی شدن طیف یا تاریخچه شتاب حاصله، از بعضی ارتعاشات خفیف صرفنظر کرده و تنها بخشی از ارتعاشاتی را که اهمیت بیشتری دارند در نظر گرفت. روش‌های متفاوتی در رابطه با تعیین مدت زمان دوام حرکات شدید با استفاده از خصوصیات و پارامترهای مؤثر شتاب‌نگاشت زمین‌لرزه وجود دارد. روش‌هایی که تعریف زمان دوام حرکات شدید با استفاده از خصوصیات شتاب-نگاشت‌های ثبت شده‌ی زمین‌لرزه‌ها مطرح می‌کنند را می‌توان به سه دسته تقسیم نمود.

الف - ساده‌ترین تعریف زمان دوام، زمان دوام برابر *(bracketed duration)* است که در این تعریف فاصله زمانی بین اولین و آخرین مرتبه‌ای که شتاب حرکات زمین از یک مقدار معین بیشتر می‌شود به عنوان مدت زمان زلزله تلقی می‌شود. در این رابطه پیچ و همکاران^۱ در سال ۱۹۷۲ مدت زمان زلزله را بر اساس شتاب آستانه $5\% g$ در نظر گرفتند. در این تعریف شکل رکورد در قسمت حرکات شدید به هیچ عنوان لحاظ نشده و ممکن است دو زلزله‌ی کاملاً متفاوت با یک شتاب آستانه یکسان، یک زمان دوام برابر را نتیجه دهند.

ب - گروه دوم تعاریف که خصوصیات کلی رکورد را در نظر می‌گیرد، مدت زمان یکنواخت نامیده می‌شود. این مدت زمان جمع فواصل زمانی است که شتاب از یک مقدار معین بیشتر می‌شود. بولت^۲ در سال ۱۹۷۳ این تعریف را با دو مقدر آستانه‌ی $5\% g$ و $10\% g$ مطرح نموده است.

پ - اساس دسته سوم از تعاریف‌ها، توزیع تجمعی انرژی زلزله که با استفاده از شتاب‌نگاشت تعیین می‌گردد، می‌باشد. این تعریف مدت زمان معنی‌دار *(Significant)* خوانده می‌شود. مدت زمان معنی‌دار بر اساس انتگرال مربع شتاب زمین محاسبه می‌شود. در اکثر این تعاریف‌ها از **شدت آریاس**^۳ استفاده شده که شدت آریاس به صورت زیر معرفی می‌شود:

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_0} a^2(t) dt \quad (9-1)$$

در این رابطه $a(t)$ شتاب در زمان t بوده که توسط رکورد شتاب‌نگار مشخص می‌شود، t_0 مدت زمان کل حرکت زمین و I_A نشان‌دهنده میزان انرژی وارد بر سازه می‌باشد. نمودار تغییرات شدت آریاس بر حسب زمان را **نمودار هیوسید**^۴ می‌نامند. زمان دوام معنی‌دار به صورت فاصله زمانی که درصد معینی از شدت آریاس را شامل می‌شود، تعریف می‌گردد. این درصد توسط محققین مختلف بصورت‌های متفاوتی در نظر گرفته شده است. متداول‌ترین آنها تعریفی است که تریفناک و برادی بر اساس فاصله‌ی زمانی بین 5% تا 95% شدت آریاس ارائه نموده‌اند.

۱-۱۵- پ- مشخصات ارتعاشی زلزله

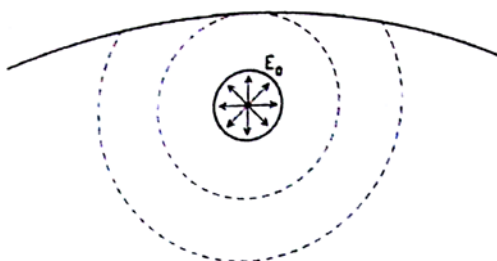
-
- 1 . Page et al
 - 2 . Bolt
 - 3 . Arias Intensity
 - 4 . Husid

مناسب‌ترین روش برای بررسی مشخصات ارتعاشی زلزله، تبدیل حرکات ارتعاش از حوزه زمانی به حوزه فرکانس به کمک تبدیلات فوریه می‌باشد

۱-۱۶- روابط میرایی^۱

امواج زلزله پس از انتشار از کانون در همه جهات پخش می‌شوند و شدت امواج ثبت شده بستگی به فاصله تا کانون دارد. هر قدر از کانون دور شویم از شدت کاسته می‌شود و به عبارت دیگر امواج میرا می‌شوند. میرایی امواج زلزله از دو عامل ناشی می‌شود: **توزیع هندسی انرژی** و **استهلاک محیط انتشار موج**. اگر حالت ایده‌آلی را که موج به شکل کروی کامل توزیع شود (مانند شکل ۱-۲۴)، در نظر بگیریم آنگاه مقدار انرژی بر واحد سطح در نقطه‌ای به فاصله R از کانون برابر است با:

$$E = \frac{E_0}{4\pi R^2} \quad (1-10)$$



شکل (۱-۲۴): توزیع هندسی انرژی زلزله

بنابراین شدت انرژی با R^{-2} متناسب است. در عمل بدلیل آنکه توزیع انرژی در فضای نیم‌کروی ناقص صورت می‌گیرد توان R کوچکتر از ۲ بوده و به طور تجربی تعیین می‌گردد. از سوی دیگر امواج با عبور از خاک بدلیل استهلاک محیط میرا می‌شوند. شدت این میرایی به جنس خاک منطقه و شدت زلزله بستگی دارد.

۱-۱۷- پیشگویی زلزله

در گذشته پیشگویی زلزله یکی از آرزوهای بزرگ بشر بوده است. توانایی حیوانات در درک امواج صوتی و سایر علائم زلزله که برای انسان نامحسوس است، و واکنش بموقع آنها در برابر زلزله فکر امکان پیشگویی زلزله را تقویت می‌کند. تحقیقات نشان می‌دهد که وقوع زلزله همراه با تغییراتی در پوسته زمین و تنش‌های داخلی آن و بعضی از ویژگی‌های فیزیکی همچون خواص مغناطیسی و مقاومت الکتریکی و نیز بهم خوردن روند (ریتم) فعالیت‌های لرزه‌ای منطقه می‌باشد. در نتیجه این امید وجود دارد که به کمک تبیین ارتباط دقیق زلزله با این تغییرات بتوان وقوع آن را پیش‌بینی کرد. پس از زلزله نیگاتا^۲ ۱۹۶۴ در ژاپن برنامه تحقیقاتی برای پیشگویی زلزله سرعت گرفت و بعداً فعالیت‌های

1 . Attenuation relations

2 . Nigata

مشترک ژاپنی-آمریکایی دامنه تحقیقات را وسیعتر نمود. چین، روسیه و هند از کشورهایی هستند که در این جهت گام‌هایی برداشته‌اند. مطالعات نقشه‌برداری در طول سواحل نزدیک به مرکز زلزله‌نیگاتای ژاپن نشان داد که زمین در طول زمان زیادی، به کندی برآمده است و قبل از وقوع زلزله این برآمدگی^۱ تسریع شده و پس از وقوع زلزله فرو نشسته است. در آمریکا خزش‌های غیرعادی قبل و بعد از زلزله استون کانیون ۱۹۷۲ با بزرگی ۴/۷ ثبت شده است. همچنین تغییراتی در حوزه مغناطیسی زمین در حین زلزله (برای زلزله‌های متوسط حدود ۱۰ گاما) ثبت شده است. کلاً پارامترهایی که می‌توانند در پیشگویی زلزله مفید باشند به قرار زیر است:

- ۱- بررسی تاریخچه زلزله‌های محل مورد نظر و کشف تأخیر احتمالی
- ۲- وقوع زلزله‌های خفیف (که ممکن است پیش‌لرزه باشند) و به طور کلی بروز تغییراتی در الگوی زلزله‌های کوچک محلی
- ۳- تغییرات و برآمدگی‌های پوسته زمین
- ۴- وجود گاز رادون در آب‌های زیرزمینی
- ۵- وجود گاز هلیوم در گازهای خروجی از گسل
- ۶- تغییر در خواص مغناطیسی و الکتریکی زمین
- ۷- تغییر تنش داخلی زمین
- ۸- افزایش سرعت امواج در خاک قبل از وقوع زلزله به علت افزایش تنش پوسته زمین
- ۹- بالا آمدن سطح آب چاه‌ها
- ۱۰- رفتار غیره منتظره حیوانات

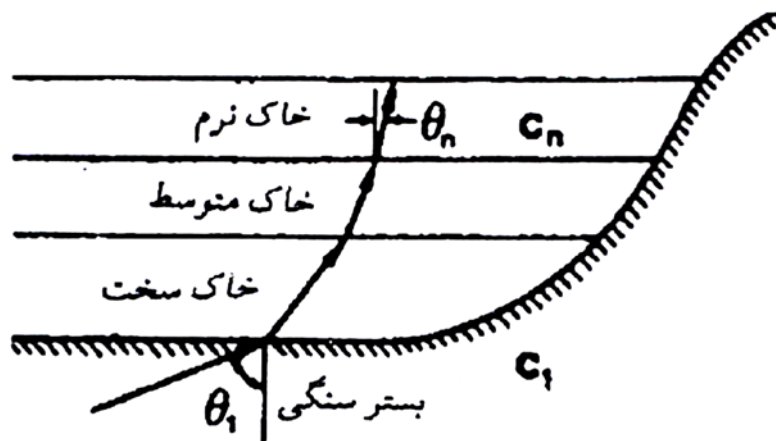
نه تنها ثبت دائمی این تغییرات در سطحی گسترده در مناطق مختلف یک کشور بسیار مشکل است (غالباً تغییرات بسیار جزئی و خارج از حدود دقت ابزار معمولی است)، بلکه هنوز رابطه مشخص و قطعی میان این تغییرات و وقوع زلزله بدست نیامده است. چه بسا مواردی که گمان می‌رود زلزله‌ای قریب‌الوقوع باشد ولی به وقوع نمی‌پیوندد و زلزله‌هایی که بدون همراهی با نشانه‌های فوق رخ می‌دهند. تنها یک مورد موفق در تاریخ پیشگویی زلزله وجود دارد. چینی‌ها در سال ۱۹۷۵ با زحمات مداوم و چندین ساله توانستند زلزله هایشانگ را پیشگویی کرده و مردم را به خارج شهر هدایت کنند.

پس از آن زلزله‌های مخرب فراوانی در چین، آمریکا و سایر نقاط جهان واقع شده است که علی‌رغم زحمات مستمر لرزه‌شناسان، متأسفانه امکان یک پیشگویی دقیق فراهم نگردیده است. البته منظور از پیشگویی تعیین زمان نسبتاً دقیق وقوع و حدود بزرگی زلزله است وگرنه با توجه به سوابق تاریخی و نیز وجود گسل‌ها و سایر منابع لرزه‌زا، محاسبه احتمال وقوع زلزله‌ای با بزرگی معین امکان‌پذیر است و بعداً مورد بحث قرار خواهد گرفت.

1 . Upheaval

۱-۱۸- تأثیر نوع خاک بر امواج زلزله

امواج زلزله در هنگام عبور از لایه‌های مختلف خاک منعکس و منکسر می‌شوند. امواج مزبور به هنگام عبور از لایه نرم‌تر، امتدادش به محور قائم نزدیک‌تر می‌شود. از سوی دیگر هنگامی که ارتعاش از لایه سنگی به لایه‌های نرم‌تر وارد می‌شود، دامنه ارتعاش افزایش می‌یابد و به همین جهت معمولاً ضریب زلزله برای خاک‌های نرم بیش از زمین سفت است. مطالعات نظری نشان می‌دهد که این افزایش بتدریج در مسیر عبور موج از بستر سنگ به سطح زمین صورت می‌گیرد. تجربه نشان می‌دهد که آسیب‌های سازه‌ای در زمین‌های نرم آبرفتی می‌تواند شدیدتر باشد و این مطلب در زلزله‌های متعدد به اثبات رسیده است. مثلاً در زلزله میاگی-کن^۱ ۱۹۷۸ ژاپن خسارت سازه‌ای در نقاط دور از مرکز که زمین نرم داشته بیش از مرکز زلزله بوده است. البته این اثر به نوع سازه، زمان تناوب آن و فاصله آن تا مرکز زلزله نیز بستگی دارد و مثلاً می‌توان انتظار داشت که ساختمان‌های آجری کم ارتفاع در زمین‌های نرم آسیب کمتری ببینند.



شکل (۱-۲۵): تغییر مسیر و افزایش دامنه امواج زلزله بهنگام عبور از بستر سنگی به لایه نرم فوقانی

۱-۱۹- دوره‌ی بازگشت زلزله

فرض کنید در یک بازه‌ی زمانی ۳۰۰۰ ساله، ۵ زلزله با بزرگای ۷/۵ ریشتر یا بیشتر در منطقه‌ای رخ داده باشد. در این حالت می‌توان گفت که دوره‌ی بازگشت زلزله‌های ۷/۵ ریشتری برای این منطقه برابر $\frac{3000}{5} = 600$ سال است. لازم به تذکر است که چنین جوابی به این معنی نیست که دقیقاً هر ۶۰۰ سال یکبار زلزله‌ای با این بزرگای در این منطقه رخ می‌دهد و احتمال وقوع چنین زلزله‌ای در این منطقه ۶۰۰ سال یکبار فرض می‌گردد. با توجه به این مفهوم می‌توان گفت که دوره‌ی بازگشت برای یک زلزله به بزرگای M که آن را با T_R نشان می‌دهند، عبارتست از مدت زمانی

1. Miyagi ken

که به طور متوسط در آن مدت یک زلزله به بزرگای M یا بیشتر اتفاق می‌افتد. حال که مفهوم دوره‌ی بازگشت زلزله بیان شد، چند اصطلاح دیگر مربوط به علم تحلیل خطر لرزه‌ای معرفی می‌شود:

۱- احتمال وقوع زلزله‌ای با بزرگای M یا بیشتر در یک سال برابر $\left(\frac{1}{T_R}\right)$ است که به آن احتمال فراگذشت از زلزله‌ی با بزرگای M در یک سال گفته می‌شود.

۲- احتمال عدم وقوع زلزله‌ای با بزرگای M یا بیشتر در یک سال برابر $\left(1 - \frac{1}{T_R}\right)$ است که به آن احتمال عدم فراگذشت از زلزله‌ی با بزرگای M در یک سال گفته می‌شود.

۳- احتمال عدم فراگذشت از زلزله‌ی با بزرگای M در t سال برابر $\left(1 - \frac{1}{T_R}\right)^t$ می‌باشد.

۴- احتمال فراگذشت از زلزله‌ی با بزرگای M در t سال برابر $\left(1 - \left(1 - \frac{1}{T_R}\right)^t\right)$ می‌باشد.

۲-۱- زلزله‌های مبانی طراحی

در آئین‌نامه‌های لرزه‌ای، معمولاً زلزله‌های مشخصی برای طراحی ملاک عمل قرار می‌گیرند که آثار ناشی از هر یک در مرحله‌ای از طراحی استفاده می‌شود. مهمترین این زلزله‌ها عبارتند از زلزله‌ی بهره‌برداری^۱، زلزله‌ی طرح^۲ و زلزله‌ی حداکثر^۳، به طوری که زلزله‌ی بهره‌برداری از همه خفیف‌تر و زلزله‌ی حداکثر از همه شدیدتر است. در ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰، زلزله‌های طرح و بهره‌برداری ملاک طراحی و کنترل ساختمان‌ها قرار می‌گیرند.

بند ۲-۱-۲۸۰۰- زلزله‌های مبانی طراحی در آیین‌نامه ۲۸۰۰ به شرح زیر می‌باشند (صفحه ۱ آیین‌نامه ۲۸۰۰):

الف- زلزله طرح زلزله‌ای است که احتمال فراگذشت آن در ۵۰ سال ده درصد باشد. دوره بازگشت این زلزله ۴۷۵ سال است.

ب- زلزله بهره‌برداری زلزله‌ای است که احتمال فرا گذشت آن در ۵۰ سال ۹۹/۵ درصد باشد. دوره بازگشت این زلزله حدود ۱۰ سال است.

جدول (۳-۱): بررسی زلزله‌های مبانی طراحی

دوره‌ی بازگشت (سال)	احتمال فراگذشت در طول عمر مفید ساختمان (۵۰ سال)	
۱۰	۹۹/۵ %	زلزله‌ی بهره‌برداری
۴۷۵	۱۰ %	زلزله‌ی طرح
۲۴۷۵	۲ %	زلزله‌ی حداکثر

1 . Serviceability Level Earthquake (SLE)

2 . Design Basis Earthquake (DBE)

3 . Maximum Considered Earthquake (MCE)

همانطور که در جدول فوق مشاهده می‌گردد، هر چه بزرگای زلزله‌ای بیشتر باشد، دوره‌ی بازگشت آن نیز بیشتر است و در عوض احتمال وقوع آن در طول عمر مفید ساختمان کمتر می‌باشد. از سوی دیگر احتمال فراگذشت زلزله-ها در طول عمر مفید ساختمان (۵۰ سال) از رابطه‌ی $(1 - (1 - \frac{1}{T_R})^{50})$ به دست می‌آید. به طول مثال اگر دوره‌ی بازگشت یک زلزله برابر ۴۷۵ سال فرض شود (برای زلزله‌ی طرح)، احتمال فراگذشت آن به توجه به رابطه ارائه شده برابر ۱۰ درصد محاسبه می‌شود که در جدول فوق نیز به همین صورت بیان شده است.

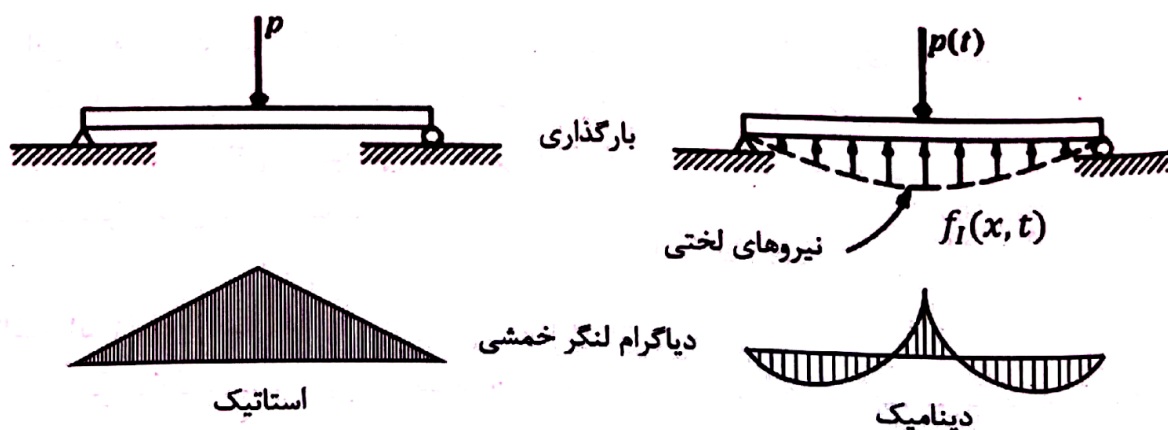
$$(1 - (1 - \frac{1}{475})^{50}) = 0.1 = 10 \%$$

فصل دوم: دیدگاهی کلی بر دینامیک سازه‌ها

۱-۲- مفاهیم اولیه

بارهای وارد بر سازه در بعضی موارد ممکن است از نظر مقدار، جهت و موقعیت، تغییراتی شدید نسبت به زمان داشته باشند. این نوع بارها را اصطلاحاً بارهای دینامیکی گویند. در چنین حالتی رفتار سازه (مقادیر تغییرشکل‌ها، نیروهای داخلی و تنش‌ها) نیز وابسته به زمان خواهد بود. بنابراین رفتار سازه در این حالت به عکس رفتار استاتیکی آن جواب منحصر بفردی نخواهد داشت، بلکه در هر لحظه از زمان، رفتار خاصی برای آن موجود خواهد بود که به آن رفتار دینامیکی می‌گویند. علمی که به بررسی رفتار دینامیکی سازه‌ها می‌پردازد، دینامیک سازه نامیده می‌شود.

در اثر اعمال بارهای دینامیکی، تغییرمکان حاصله همراه با سرعت و شتاب خواهد بود. جهت مقابله با شتاب وارده، نیرویی به نام نیروی لختی (نیروی اینرسی) در اثر جرم آن و جهت مقابله با سرعت، نیرویی به نام نیروی میرایی در اثر لقی انواع اتصالات و اصطکاک ناشی از آنها و غیره به وجود می‌آید، بنابراین نیروهای داخلی سازه نه تنها می‌باید با بارگذاری اعمال شده بر آن در تعادل باشند بلکه نیروهای اینرسی ناشی از شتاب و میرایی ناشی از سرعت نیز در تعادل مؤثر می‌باشند، شکل (۱-۲).



شکل (۱-۲): تفاوت اصلی بارهای استاتیکی و دینامیکی

در حالت کلی می‌توان چنین اظهار نمود که تفاوت اصلی بین رفتار استاتیکی و رفتار دینامیکی در مقدار نیروی اینرسی می‌باشد. چنانچه به علت ناچیز بودن تغییرات نیروی خارجی نسبت به زمانی نیروی اینرسی خیلی کوچک

می‌باشد، می‌توان سازه را به صورت استاتیکی تحلیل نموده، در غیر این صورت تحلیل دینامیکی ضروری خواهد بود. برای تعیین نیروی اینرسی در تحلیل دینامیکی می‌باید مقدار تغییرمکان مشخص باشد و از طرفی چون تغییرمکان خود تابع نیروی اینرسی است، برای شکستن این دور تسلسل مسأله را باید به صورت معادله دیفرانسیلی فرمول‌بندی نمود که در آن نیروی اینرسی بر حسب مشتق تغییرمکان‌ها بر حسب زمان وارد می‌شود. اصولاً تحلیل دینامیکی سازه‌ها بسیار پیچیده‌تر از تحلیل استاتیکی آنها می‌باشد و عمدتاً دو نوع برخورد جهت تحلیل این نوع مسائل وجود دارد:

الف - روش استاتیکی معادل: در این حالت با اعمال ضرایبی به نام ضریب بار یا ضریب ضربه، بارهای دینامیکی به بارهای استاتیکی تبدیل شده و رفتار سازه‌ها به صورت استاتیکی تعیین می‌گردند. اما بعضاً به علت در نظر نگرفتن برخی پارامترهای مؤثر نظیر تابع زمانی بارگذاری، انعطاف‌پذیری و میرایی اجزاء متشکله، نتایج حاصل چندان قابل اطمینان نخواهد بود.

ب - تحلیل دینامیکی با استفاده از کامپیوتر: با توجه به حجم عملیات و انجام عملیات تکراری بسیار، تنها روش عملی برای انجام تحلیل دینامیکی استفاده از ماشین‌های حسابگر (کامپیوتر) می‌باشد و عمدتاً یکی از دلایل رشد و توسعه تحلیل دینامیکی سازه‌ها، تکامل این ماشین‌ها بوده است.

گرچه عمدتاً بارگذاری‌هایی که عملاً در ساختمان‌ها به وجود می‌آیند، به صورت استاتیکی قابل تحلیل می‌باشند، اما حالتی به وجود می‌آید که در نظر گرفتن اثرات دینامیکی الزامی است. در زیر موارد چند به عنوان مثال ذکر می‌شود:

الف - اثر زلزله بر سازه‌ها

در اثر حرکت نامنظم زمین، در سازه احداث شده روی آن، نیروهای ایجاد می‌گردد که در بعضی موارد منجر به خرابی و تلفات جانی می‌شود. بشر در طول تاریخ تمدن خود، تلاش زیادی جهت مقاوم نمودن ساختمان‌ها در مقابل این پدیده که اصطلاحاً زلزله نامیده می‌شود، نموده است. اشکال زیر، نمونه‌ای از خرابی سازه‌ها در مقابل زلزله می‌باشد.



1985 Mexico City Earthquake

Pino Suarez Towers looking north -- one of the few steel frame buildings to collapse.



1988 Leninakan, Armenia, Earthquake

Damage to a stone bearing wall building. The floor planks were not tied to the supporting bearing walls.



1995 Kobe, Japan, Earthquake

Distorted train tracks.



1971 Earthquake in the San Fernando Valley of California

Earth dam located about 20 km from the epicenter. Part of the upstream face lost bearing strength and slipped beneath the water.



1971 San Fernando Valley Earthquake

“Soft story” failure of the Olive View Hospital. The column failure caused a collapse that pinned the ambulances under the rubble, rendering them useless.



1989 Earthquake in Loma Prieta, California

Oakland Bay Bridge failure.



1994 Earthquake in Northridge, California

Bull Creek Canyon Channel Bridge on the Simi Valley freeway near the epicenter to the north. Shear failure of a flared column.



1994 Northridge Earthquake

Gavin Canyon Undercrossing on I-5

شکل (۲-۲): خسارت‌های ناشی از زلزله در سازه‌ها

با توجه به دینامیکی بودن این پدیده، تنها روش دقیق برای تخمین رفتار سازه‌ها در حین وقوع زلزله، تحلیل دینامیکی می‌باشد که انجام آن، برای سازه‌های مهم نظیر سدها، نیروگاه‌های اتمی، ساختمان‌های مرتفع، پل‌های طولی، سیلوها و غیره الزامی است.

ب- نیروی باد

دیگر نیروی طبیعی مؤثر بر سازه‌ها که به شکل دینامیکی اثر می‌کند، نیروی ناشی از جریان باد می‌باشد که به صورت فشار متغیر در زمان روی سطح مورد نظر بیان می‌گردد. تغییرات این فشار از نقطه نظر شدت و جهت، باعث تولید نوسان کمابیش قابل توجهی در ساختمان‌ها می‌شود که میزان تأثیر آن بستگی به عوامل متعددی از قبیل فرم

و شکل سازه، شرایط محیطی از نظر تأسیسات موجود در اطراف و شرایط جوی دارد. مسأله فوق معمولاً در سازه ساختمان‌های بلند، برج‌های خنک‌کننده، پل‌های طولی و سکوهای دریایی (نفتی) قابل اهمیت بوده و در تحلیل این نوع سازه‌ها حتی‌الامکان می‌باید اثرات دینامیکی نیروی باد را به صورت‌های مناسب منظور نمود.



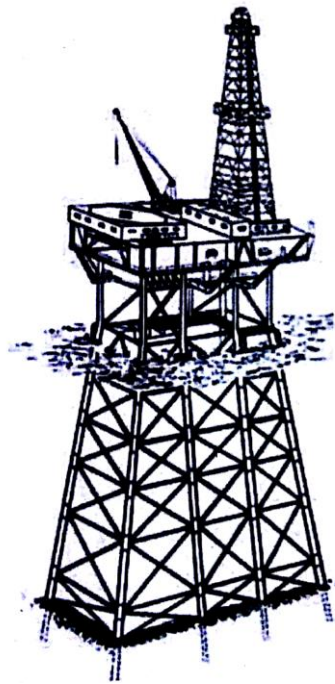
شکل (۲-۳): استفاده از نیروی باد در تولید برق

پ- نیروهای ناشی از امواج بر سازه‌های دریایی

در دریاها و اقیانوس‌ها با طبیعتی پیچیده‌تر از محیط خشکی، سازه‌هایی نظیر سکوهای نفتی و اسکله‌ها وجود دارند که تحت اثر نیروهای مختلف دینامیکی قرار می‌گیرند از جمله این بارها می‌توان به امواج، جریان‌های دریایی، باد و زلزله احتمالی اشاره نمود که البته در میان آنها نیروهای ناشی از امواج با توجه به طبیعت هیدرودینامیکی و شدت خود، دارای اثرات تعیین‌کننده‌ای بر روی سازه‌های مورد نظر می‌باشد. در شکل (۲-۳) شمای یک سکوی ثابت دریایی نشان داده شده است.

ت- اثر انفجار بر سازه‌ها

با رها شدن ناگهانی انرژی داخلی مواد منفجره، نیروی زیادی بر سازه‌های مجاور محل انفجار اعمال می‌شود. این نیروها به علت کمی زمان تأثیر (حدود چند میلی‌ثانیه)، عمدتاً به صورت ضربه در نظر گرفته می‌شوند و رفتار سازه‌ها در مقابل این نیروها به صورت دینامیکی است.



شکل (۲-۴): شمای کلی یک سکوی نفتی دریایی

ث- طراحی پل‌ها در مقابل بارهای متحرک

یکی از مسائل مورد علاقه مهندسان، تعیین رفتار دینامیکی سازه‌ها تحت اثر عبور یک نیرو یا جرم بر روی آن است که کاربرد آن در طرح تیرهای جراثقال و پل‌های راه و راه‌آهن می‌باشد.

ج- پی ماشین‌آلات

ماشین‌آلات مختلفی در صنعت وجود دارند که به علت دارا بودن موتور و مصارف خاص خود، نیروهای دینامیکی متفاوتی را به وجود می‌آورند. بدین لحاظ پی این نوع ماشین‌آلات علاوه بر تحلیل بارهای استاتیکی می‌باید برای بارهای دینامیکی نیز مقاوم باشند. به علت اثر نامناسب ارتعاش بر روی سلامتی انسان، می‌باید دامنه و پریود حرکت محدود به مقدار مجاز باشد و همچنین از به وجود آمدن حالت تشدید جلوگیری نمود. موارد فوق انجام تحلیل دینامیکی این نوع تأسیسات را الزامی می‌سازد.

۲-۲- انواع بارهای دینامیکی

در یک تقسیم‌بندی کلی، دو نوع بار دینامیکی و بالنتیجه دو روش برای ارزیابی رفتار دینامیکی در مقابل بارها وجود دارد:

الف- معین (قطعی)

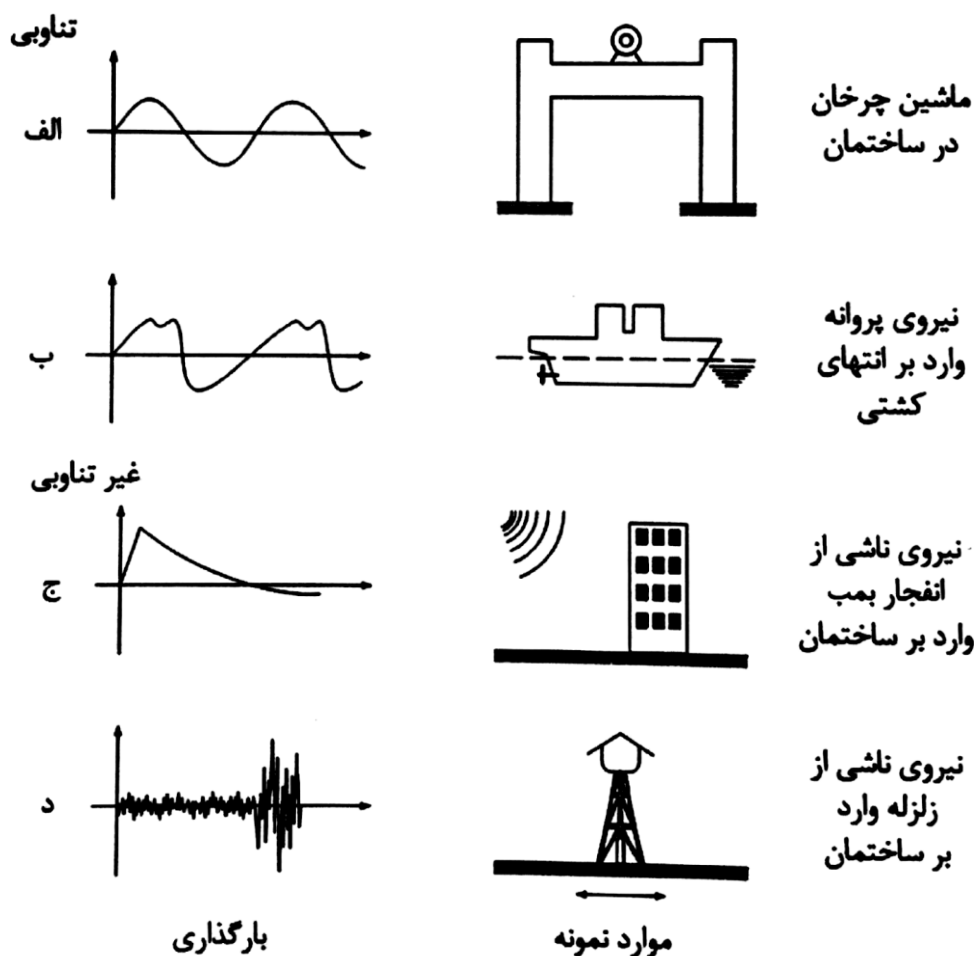
چنانچه تغییرات بار نسبت به زمان کاملاً مشخص باشد، آن را بارگذاری معین یا قطعی گویند.

ب- نامعین (تصادفی)

اگر تغییرات زمانی بار دقیقاً معین نبوده و به صورت آماری بیان شود، آن را بار دینامیکی نامعین یا تصادفی می‌نامند.

نکته: برای بارگذاری معین، رفتار سازه نیز مشخص شده می‌باشد، ولی برای بارگذاری تصادفی رفتار سازه به صورت احتمالی و با استفاده از مبانی ارتعاشات تصادفی تعیین می‌گردد.

همان‌طوری که در اشکال (۵-۲-الف) و (۵-۲-ب) ملاحظه می‌شود، بارهای تناوبی، بارهایی هستند که در فواصل مساوی تکرار می‌شوند. ساده‌ترین بارگذاری تناوبی، طبق شکل (۵-۲-الف) به صورت سینوسی است که به آن بار هارمونیک ساده گویند. دیگر بارهای تناوبی عمدتاً پیچیده بوده ولی به کمک سری فوریه می‌توان آنها را به صورت مجموعی از بارهای هارمونیک نوشت. بارهای غیرتناوبی یا به صورت ضربه‌ای خواهند بود یعنی در مدت کوتاهی اثر می‌نمایند (مانند بارگذاری ناشی از انفجار) و یا در مدت طولانی‌تری بر سازه تأثیر می‌گذارند (مانند زلزله).



شکل (۵-۲): اشکال مختلف بارگذاری

۲-۳-انواع ارتعاشات

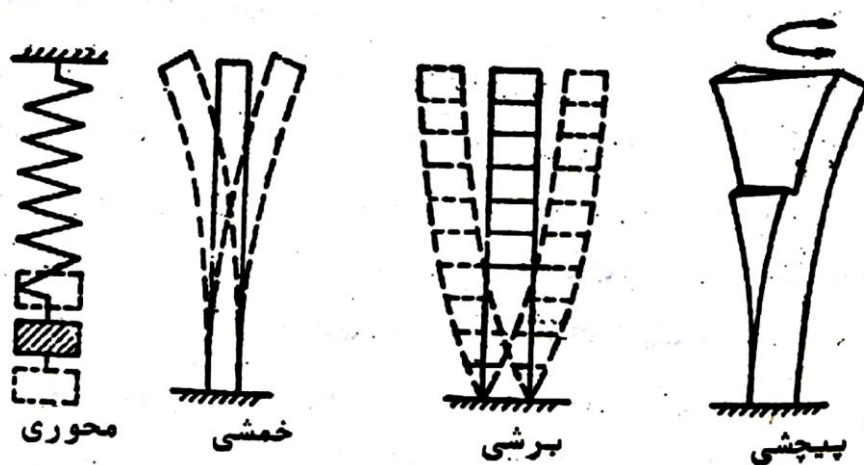
یک سازه به هر دلیلی که مرتعش شود، تغییرشکل آن به یکی از حالات ذیل یا ترکیبی از آنها خواهد بود:

الف- محوری

ب- خمشی

پ- برشی

موارد فوق در شکل (۶-۲) نشان داده شده است.



شکل (۶-۲): انواع حالت ارتعاشی

ارتعاش یک بلوک صلب بر روی خاک جهت بیان ارتعاش محوری، ارتعاشات یک دودکش بلند برای نشان دادن ارتعاش خمشی، ارتعاشات افقی یک ساختمان چند طبقه با ستونهایی که به وسیله تیرهای صلب کف در ترازهای مختلف به یکدیگر اتصال دارند جهت ارتعاش برشی و نهایتاً پیچش یک ساختمان با سختیهای متفاوت تکیه گاهها برای ارتعاش پیچشی قابل ذکر است. معمولاً یکی از حالات ارتعاشی تعیین کننده می باشد. هر چند بعضی اوقات ترکیبی از دو حالت ارتعاشی نظیر تغییر شکل خمشی و برشی و یا سایر موارد می تواند دارای اهمیت باشد.

۲-۴- درجات آزادی^۱

وقتی یک جرم مرتعش می شود، وضعیت آن در فضا، با توجه به حالت تعادل، می تواند بوسیله شش مؤلفه، سه عدد انتقالی در جهت های x ، y و z و سه عدد چرخشی حول همان محورها مشخص گردد. با این حالت جرم ممکن است در بعضی از جهات آزاد و در تعدادی از آنها گیردار باشد. تعداد مؤلفه ها (مختصات) مستقل مورد نیاز جهت نشان دادن تغییر شکل (تغییر موقعیت) یک جرم (سیستم) مرتعش در هر لحظه، درجات آزادی آن جرم (سیستم) به شمار می آید. در حالت کلی یک سیستم پیوسته دارای بی نهایت درجه آزادی است، ولی با ایده آل سازی یا انتخاب یک مدل ریاضی مناسب می توان تعداد درجات آزادی را کاهش داده و حتی به عدد یک رساند.

یکی از مهمترین مسائل موجود در روش های دینامیکی، مدل سازی سازه واقعی جهت اعمال نیروهای موجود بر آن می باشد. به طور کلی می توان سازه ها را به دو طریق مدل سازی نمود:

الف- مدل سازی با جرم های پیوسته

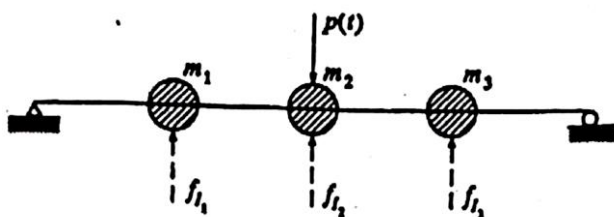
از آنجا که جرم سازه ها به طور پیوسته در سراسر آن گسترده است اگر تعیین کامل نیروهای اینرسی مورد نظر باشد باید تغییر مکان ها و شتاب ها برای هر نقطه در طول سازه تعریف گردند. در این حالت تحلیل باید در قالب معادلات

^۱ . Degree of Freedom

دیفرانسیل پاره‌ای صورت گیرد، زیرا موقعیت در طول دهانه، و نیز زمان، هر دو باید به عنوان متغیرهای مستقل منظور شوند.

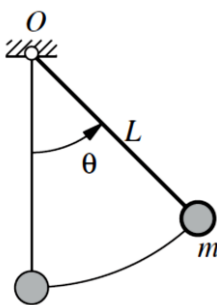
ب- مدلسازی با جرم‌های متمرکز

اگر فرض شود جرم سازه به عنوان مثال شکل (۷-۲) در یک سری نقاط مجزا متمرکز باشد تحلیل مسأله بسیار ساده می‌شود، زیرا نیروهای اینرسی فقط در این نقاط ایجاد می‌شوند. در این حالت، لازم است که تغییر مکان‌ها و شتاب‌ها فقط در این نقاط تعریف شوند.



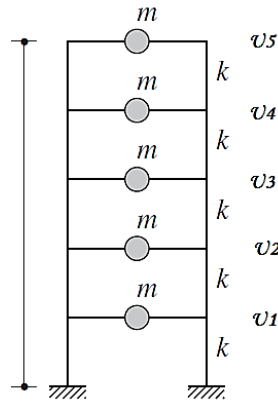
شکل (۷-۲): مدل جرم متمرکز یک تیر ساده

برای یک سیستم که از چند جرم مجزای متمرکز تشکیل شده است، تعداد کل درجات آزادی برابر مجموع درجات آزادی هر یک از جرم‌ها خواهد بود. اگر یک سیستم فقط دارای یک جرم متمرکز بوده و طوری گیردار باشد که حرکات آن تنها در یک مختصه (جهت) مجاز، امکان‌پذیر باشد در این صورت آن سیستم را یک درجه‌آزادی می‌نامند. شکل (۸-۲) یک چنین سیستمی را نشان می‌دهد که در آن θ مؤلفه‌ای است که در هر لحظه وضعیت جرم m را مشخص می‌سازد.



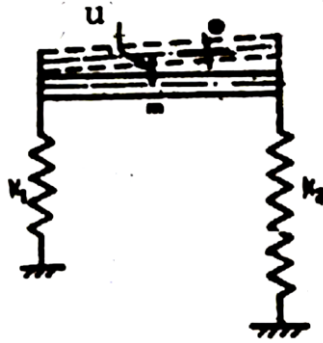
شکل (۸-۲): سازه یک درجه آزادی

اگر پنج جرم نظیر کف‌های یک ساختمان پنج طبقه (جرم‌ها در کف طبقات متمرکز فرض شده‌اند) در یک صفحه مرتعش شوند (شکل ۹-۲)، پنج تغییر مکان برای پنج جرم u_1 تا u_5 وضعیت ساختمان را در هر لحظه مشخص خواهند کرد. این سیستم دارای پنج درجه آزادی می‌باشد.



شکل (۲-۹): سازه پنج درجه آزادی

اگر یک جرم متصل به دو فنر بوده و به آزادی در صفحه خود مرتعش شود، چون دو مؤلفه مستقل جهت تعیین وضعیت آن لازم است، بنابراین سازه دارای دو درجه آزادی می‌باشد، (شکل ۲-۱۰). دو مؤلفه مستقل جهت تعیین وضعیت جرم عبارتند از u و θ .



شکل (۲-۱۰): سازه دو درجه آزادی

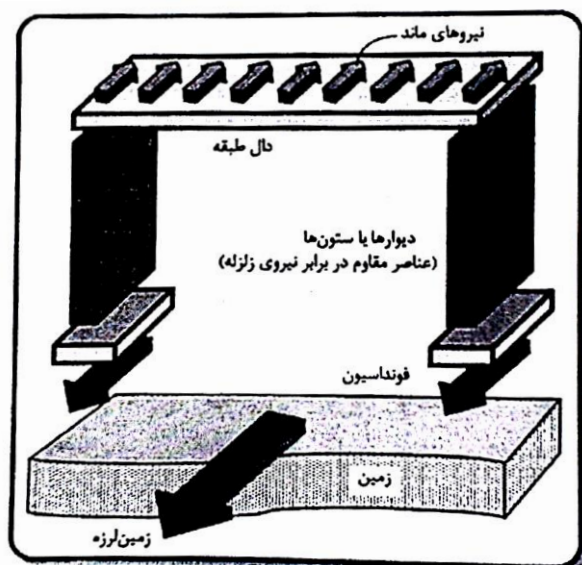
فصل چهارم:

سیستم‌های باربر جانبی

Lateral Bearing Systems

۱-۴- مقدمه

تحت اثر حرکت افقی زمین در هنگام زمین‌لرزه، نیروی جانبی اینرسی، در ترازهایی از ساختمان که بیشترین جرم سازه در آنجا متمرکز است ایجاد می‌گردند. معمولاً جرم سازه‌ها در تراز طبقات آنها متمرکز است. این نیروها توسط دال طبقات به دیوارها یا ستون‌ها انتقال یافته و توسط آنها به فونداسیون سازه منتقل می‌شوند. در نهایت نیز این نیروها به زمین وارد می‌گردند، شکل (۷-۱). بنابراین هر کدام از اجزای ساختمان (سقف، دیوار و یا ستون، فونداسیون) و یا اتصال آنها به یکدیگر، باید به نحو مناسبی طراحی گردند تا سازه در برابر نیروی جانبی ایمن بماند. در این میان ستون‌ها و دیوارها در انتقال نیروی جانبی دارای اهمیت به‌سزایی می‌باشند.



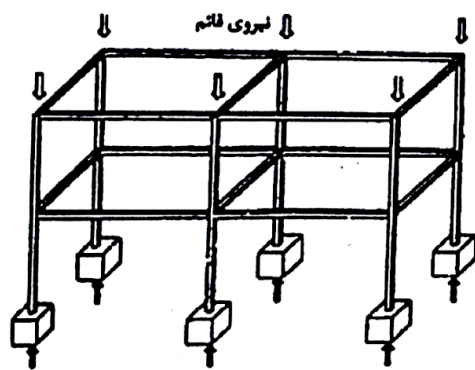
شکل (۱-۴): مسیر انتقال نیروی به‌وجود آمده در سازه در حین زلزله (نیروی ماند)

همان گونه که تشریح شد می باید عناصر مقاوم باربری در مقابل نیروی زلزله و در حالت کلی تر نیروهای جانبی، وجود داشته باشند که وظیفه‌ی انتقال ایمن این نیروها به فونداسیون را به عهده بگیرند. این عناصر عبارتند از:

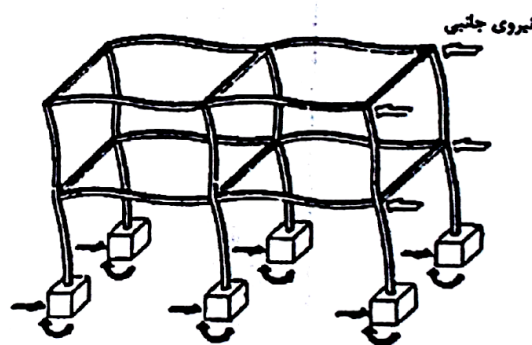
۴-۱- الف- قاب خمشی

قاب خمشی قابی است بتنی یا فولادی که در آن اتصالات تیر به ستون صلب بوده و رفتار اعضا و اتصالات عمدتاً خمشی می باشند، شکل (۴-۲). بر اساس رفتار لرزه‌ای، قاب‌های خمشی خود به سه دسته تقسیم بندی می شوند:

- **قاب خمشی ویژه:** قابی است بتنی یا فلزی که به ترتیب مطابق ضوابط شکل پذیری ویژه مبحث نهم مقررات ملی و یا مبحث دهم مقررات ملی ساختمان طراحی شده باشد.
- **قاب خمشی متوسط:** قابی است که دارای جزئیات خاص برای رفتار شکل پذیر متوسط باشد.
- **قاب خمشی معمولی:** قاب خمشی‌ای که دارای جزئیات خاص برای رفتار شکل پذیر متوسط و ویژه نیست.



(ب)



(الف)

شکل (۴-۲): عملکرد قاب خمشی در مقابل نیروهای قائم و جانبی، (الف) نیروی جانبی، (ب) نیروی قائم

نکته: سیستم‌های قاب خمشی به طور کلی نسبت به سایر سیستم‌های مهاربندی جانبی دارای سختی جانبی کمتری هستند. ولی شکل پذیری آنها نسبت به دیگر سیستم‌ها بیشتر است. از اینرو انتظار می رود که در سیستم‌های مزبور تغییر شکل‌های جانبی بزرگی رخ دهد.

بند ۱-۸-۳-۲۸۰۰- سیستم قاب خمشی

نوعی سیستم سازه‌ای است که در آن بارهای قائم توسط قاب‌های فضایی تحمل شده و مقاومت در برابر نیروهای جانبی توسط قاب‌های خمشی تأمین می‌گردد. سازه‌های با قاب‌های خمشی کامل، و سازه‌های با قاب‌های خمشی در پیرامون و یا در قسمتی از پلان و قاب‌های با اتصالات ساده در سایر قسمت‌های پلان نیز در این گروه جای دارند، صفحه ۱۱.

۴-۱-ب- قاب ساختمانی ساده مهاربندی شده

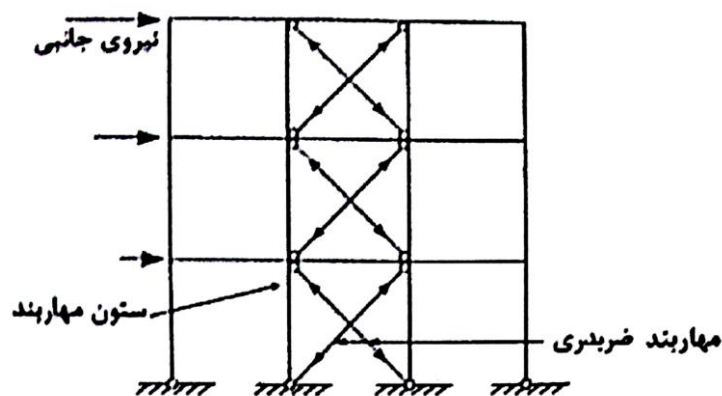
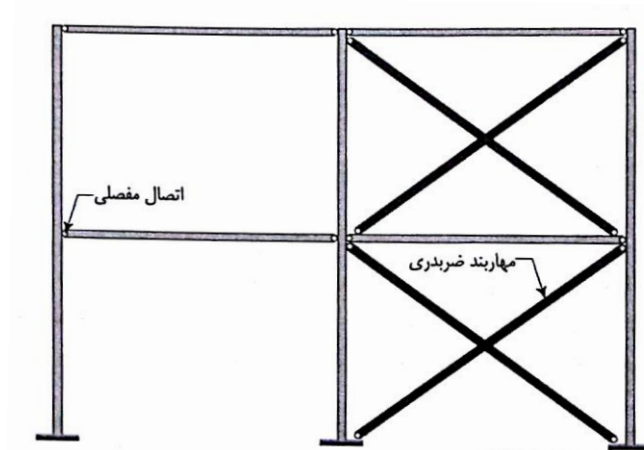
قاب‌های ساختمانی ساده یا به عبارتی قاب‌های مهاربندی شده به قاب‌هایی اطلاق می‌شود که در آن کلیه اتصالات تیر به ستون از نوع مفصلی اختیار می‌شوند. در این قاب فرض بر آن است که اتصالات تیر به ستون بدون صلیبیت است و اتصال تیرها و شاهی‌تیرها به ستون فقط برای انتقال برش ناشی از بار قائم طراحی شده، و می‌تواند تحت اثر آن، آزادانه دوران کند. دستگاه یا سیستم مقاوم در برابر باربر جانبی، دهانه‌های مهاربندی شده و یا دیوارهای برشی می‌باشند. در این حالت اتصالات تیر به ستون می‌باید ظرفیت کافی برای دوران ارتجاعی را دارا باشند.

نکته: این سیستم‌ها در کل از سختی بیشتری نسبت به دیگر سیستم‌ها برخوردار هستند و لذا انتظار تغییر شکل جانبی کمتری از سازه وجود دارد.

انواع سیستم‌های مهاربندی عبارتند از:

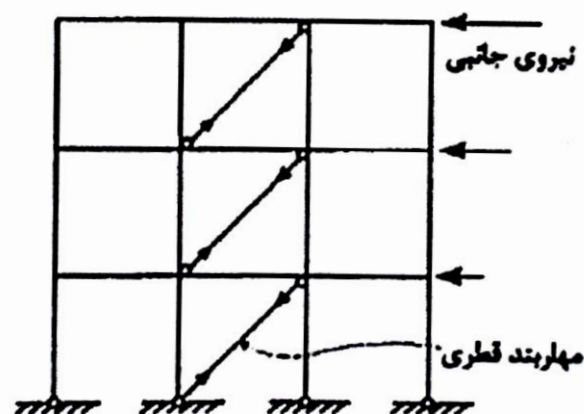
- **مهاربند ضربدری^۱:** ساده‌ترین و متداول‌ترین نوع مهاربند، مهاربند ضربدری است. استفاده از آن در صورتی قابل قبول است که معماری اجازه‌ی کور کردن یک چشمه را بدهد. لذا محل آن در مرحله‌ی اول باید مورد توافق قرار گیرد و بهتر است آرایش آن نسبت به مرکز جرم ساختمان متقارن اختیار شود تا مرکز سختی و مرکز جرم بر هم منطبق گردند و پیچش استاتیکی در سازه به وجود نیاید. مکانیزم عملکرد بادبند ضربدری طوری است که وقتی نیروی جانبی از یک طرف بر آن اعمال گردد، مهاربندهایی که شیب آنها هم جهت با نیروی جانبی است به صورت کششی و بادبندهایی که شیب مخالف دارند به صورت فشاری عمل می‌نمایند. با عوض شدن جهت نیروی جانبی، این فرض معکوس می‌شود، شکل (۴-۳).

^۱ . X- Bracing



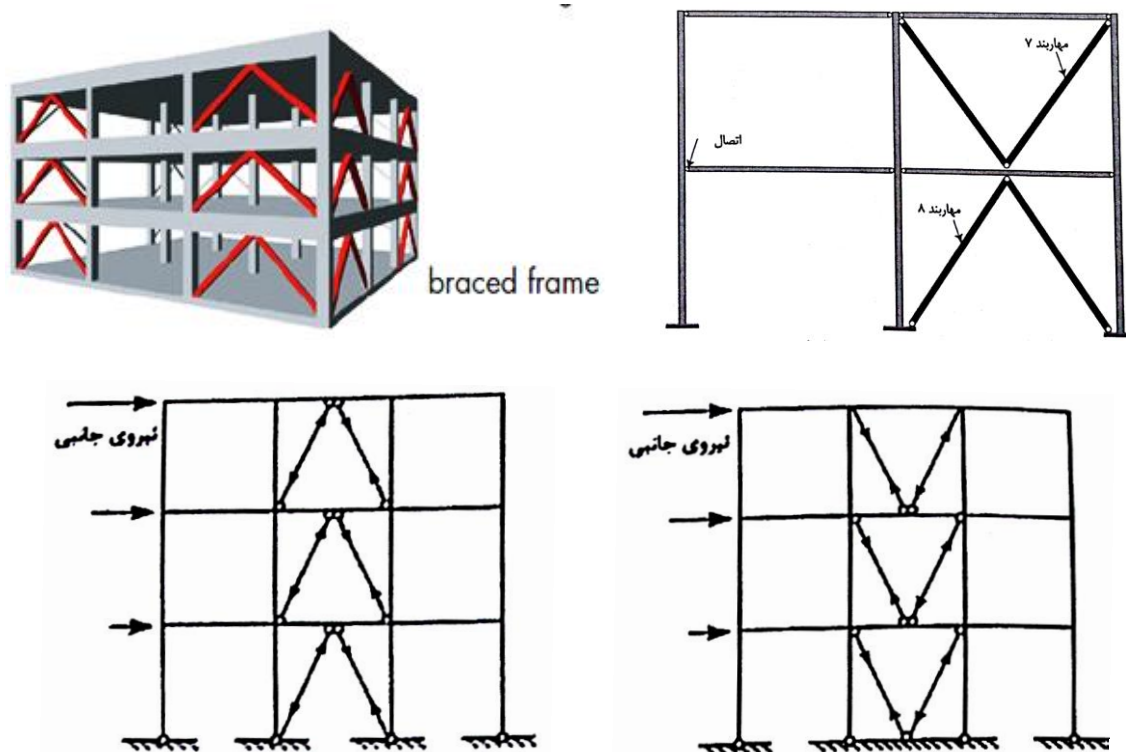
شکل (۳-۴): سیستم مهاربندی ضربدری

- **مهاربند قطری^۱:** مهاربند قطری کم و بیش مشابه مهاربند ضربدری است و عملکرد استاتیکی آنها به یکدیگر شبیه می‌باشد، با این تفاوت که عضو قطری در این حالت فقط در فشار یا کشش کار می‌کند. یعنی تمام برش طبقه را باید به صورت فشاری یا کششی تحمل نماید، شکل (۴-۴).



شکل (۴-۴): مهاربند قطری

- **مهاربند هفت یا هشت (۷ یا ۸) ۱:** این نوع مهاربند که در شکل (۴-۵) نمایش داده شده است، نسبت به مهاربند ضربدری دارای انعطاف پذیری بیشتری می باشد. در تحلیل در مقابل بار جانبی، یکی از اعضا در فشار و دیگری در کشش کار می کند. در واقع نیروی برشی طبقه به طور مساوی بین آنها تقسیم شده و در یکی ایجاد فشار و در دیگری ایجاد کشش می نماید.



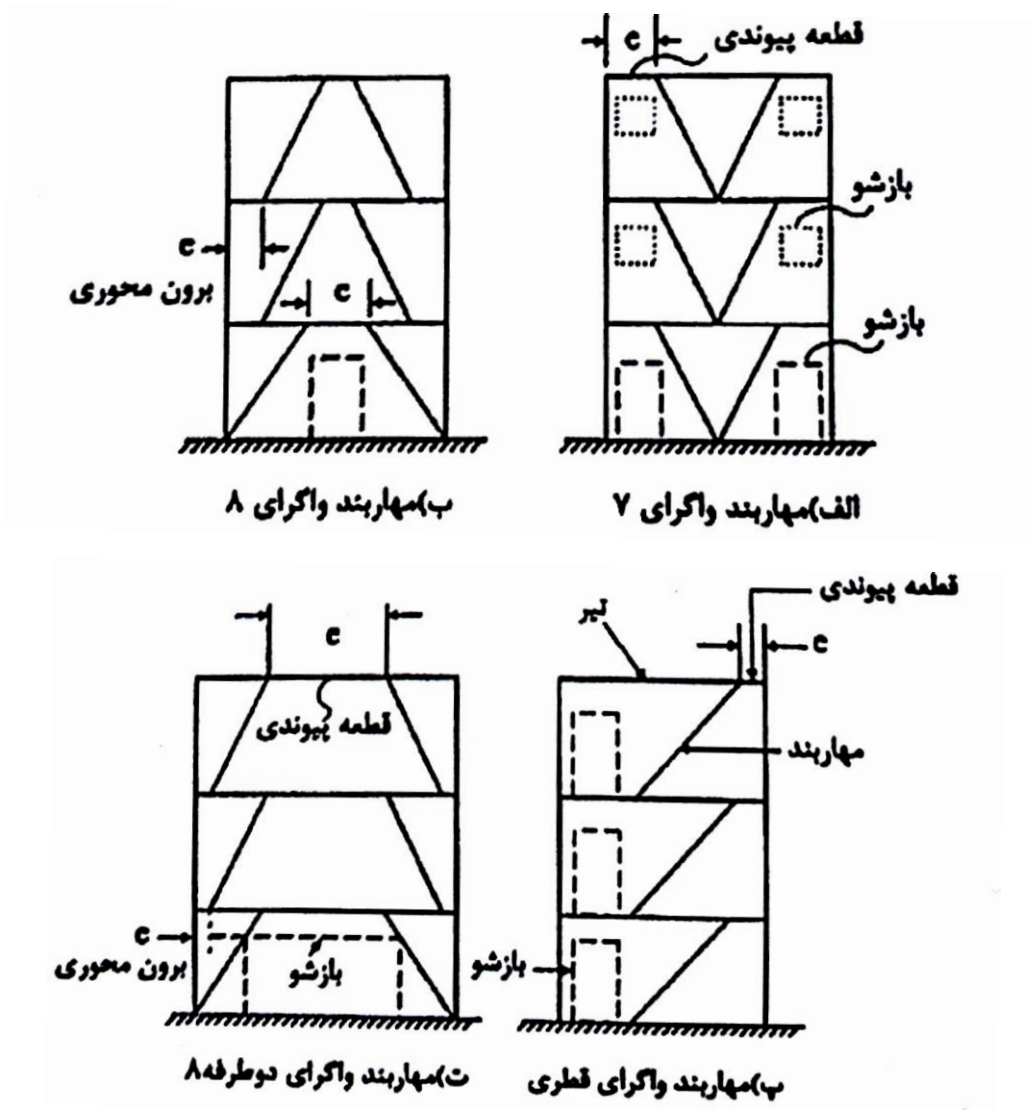
شکل (۴-۵): مهاربند ۷ یا ۸

- **مهاربندهای واگرا ۲:** در این نوع مهاربندها، عضو مهاربندی از محل تقاطع گره ها عبور داده نمی شود. این برون محوری نسبت به گره محل اتصال تیر و ستون، قطعه ای به نام قطعه ی پیوندی در تیر به وجود می آورد که نقش به سزایی در استهلاک انرژی در هنگام اعمال نیروی جانبی دارد، شکل (۴-۶).

۴-۱-پ- دیوار برشی ۳

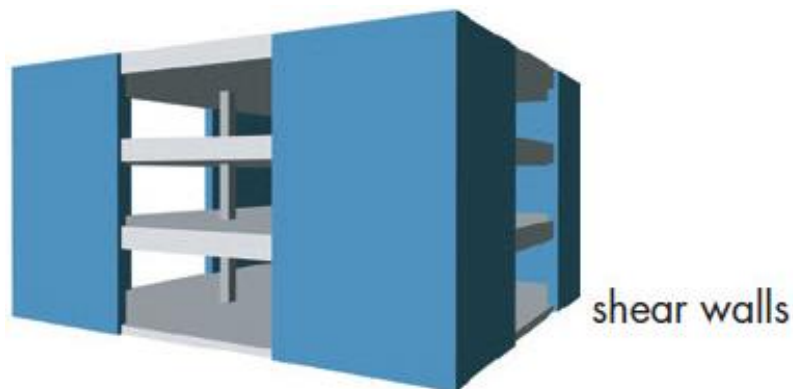
دیواری است فولادی یا بتنی که برای مقاومت در برابر نیروهای جانبی که در صفحه ی دیوار عمل می کنند طراحی می گردد و به آن **دیافراگم قائم** نیز گفته می شود. دیوار برشی همانند تیر طره ای قائم بوده و دارای دو محور قوی و ضعیف است، به طوری که محور ضعیف آن به عنوان عنصر مقاوم شناخته نمی شود، اما محور

1. Chevron Bracing, V or Inverted V
2. Eccentric Bracing
3. Shear wall



شکل (۴-۶): مهاربند واگرا

قوی آن می‌تواند نیروهای جانبی را به خوبی تحمل نماید. یک دیوار برشی از تراز فونداسیون شروع شده و در ارتفاع سازه ادامه می‌یابد. اتصال دیوار برشی به شالوده به صورت گیردار فرض می‌شود، شکل (۴-۷).



شکل (۴-۷): دیوار برشی بتنی

در زلزله‌های گذشته، ساختمان‌هایی با سیستم باربر جانبی دیوار برشی، عملکرد بسیار مطلوبی از خود نشان داده‌اند. حتی در مواردی که دیوار برشی با جزئیات دقیق اجرا نشده‌اند، اما در ساختمان به تعداد کافی دیوار برشی لحاظ شده، در برابر نیروی زلزله ساختمان فرو نریخته است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که دیوار برشی به عنوان یک عنصر کارآمد و مؤثر، هم از منظر اقتصادی و هم از نظر تأثیرگذاری در کاهش خسارت ناشی از زلزله، باید مورد توجه قرار گیرد.

از آنجا که در یک ساختمان سهم عمده‌ی نیروهای جانبی توسط دیوارهای برشی تحمل می‌شود، معمولاً خطر واژگونی در آنها زیاد است. از اینرو در طراحی فونداسیون دیوارهای برشی باید تمهیدات لازم در نظر گرفته شود. نکته‌ی بسیار مهم در به‌کارگیری دیوار برشی به عنوان عضو باربر جانبی، چگونگی آرایش آن در پلان سازه می‌باشد. چیدمان دیوارهای برشی در پلان حتی‌المقدور باید متقارن در نظر گرفته شود. این امر موجب جلوگیری از پیچش سازه در هنگام وقوع زلزله می‌گردد.

بند ۱-۸-۱-۲۸۰۰- سیستم دیوارهای باربر

نوعی سیستم سازه‌ای است که در آن بارهای قائم عمدتاً توسط دیوارهای باربر تحمل می‌شوند و مقاومت در برابر بارهای جانبی توسط دیوارهای باربر که به صورت دیوارهای برشی عمل می‌کنند، تأمین می‌گردد. دیوارهای متشکل از قاب‌های سبک فولادی سرد نورد که با تسمه‌های فولادی و یا صفحات پوششی فولادی مهار شده‌اند، جزء این سیستم محسوب می‌شوند، صفحه ۱۱.

بند ۱-۸-۱-۴-۲۸۰۰- سیستم دوگانه یا ترکیبی

نوعی سیستم سازه‌ای است که در آن:

الف- بارهای قائم عمدتاً توسط قاب‌های ساختمانی تحمل می‌شوند.

ب- مقاومت در برابر نیروهای جانبی توسط مجموعه‌ای از دیوارهای برشی یا قاب‌های مهاربندی شده همراه با مجموعه‌ای از قاب‌های خمشی تأمین می‌شود. سهم برشگیری هر یک از دو مجموعه با توجه به سختی جانبی و اندرکنش آن دو، در تمام طبقات، تعیین می‌گردد.

پ- قاب‌های خمشی باید مستقلاً قادر به تحمل حداقل ۲۵ درصد نیروهای جانبی در تراز پایه و دیوارهای برشی یا قاب‌های مهاربندی شده باید مستقلاً قادر به تحمل حداقل ۵۰ درصد نیروهای جانبی در تراز پایه باشند.

تبصره ۱: در ساختمان‌های کوتاه‌تر از هشت طبقه و یا با ارتفاع کمتر از ۳۰ متر به جای توزیع بار به نسبت سختی عناصر باربر جانبی، می‌توان دیوارهای برشی یا قاب‌های مهاربندی شده را برای ۱۰۰ درصد بار جانبی و مجموعه قاب‌های خمشی را برای ۳۰ درصد بار جانبی طراحی کرد.

تبصره ۲: در مواردی که قاب‌های خمشی الزام بند (پ) را اقلع نکنند، سیستم دوگانه جزء سیستم قاب ساختمانی محسوب می‌شود، و در مواردی که دیوارهای برشی یا قاب‌های مهاربندی شده الزام بند فوق را اقلع نکنند، ضریب رفتار R در آن باید برابر ضریب رفتار در سیستم قاب خمشی با شکل‌پذیری متناظر در نظر گرفته شود صفحه ۱۲.

بند ۱-۸-۵-۲۸۰۰- سیستم ستون کنسولی

نوعی سیستم سازه‌ای است که در آن نیروهای جانبی توسط ستون‌ها به صورت کنسولی تحمل می‌شوند، صفحه ۱۲.

بند ۱-۸-۶-۲۸۰۰- سایر سیستم‌های سازه‌ای

در این آئین‌نامه استفاده از سیستم‌های سازه‌ای، غیر از آنچه در بالا عنوان شده، به شرطی مجاز است که ویژگی‌های آنها در ارتباط با بارهای قائم و زلزله توسط یکی از آئین‌نامه‌های معتبر جهانی، به تأیید کمیته اجرایی این آئین‌نامه رسیده باشد، صفحه ۱۲.

فصل پنجم:

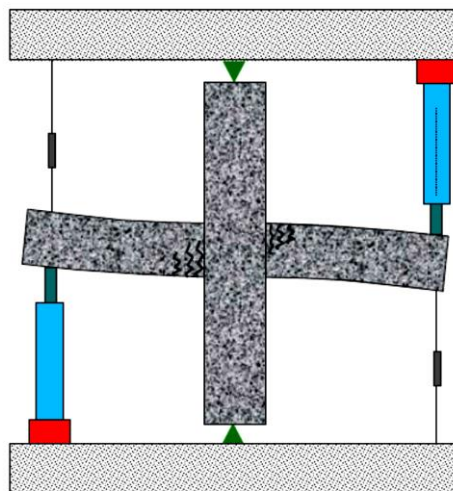
رفتار غیرارتجاعی مصالح و سازه‌ها به هنگام زلزله

Inelastic Behavior of Material and Structures During the Earthquake

۵-۱- مقدمه

در این فصل مفاهیم مربوط به رفتار غیرارتجاعی معرفی شده و علت لزوم در نظر گرفتن این رفتار در پاسخ لرزه‌ای شرح داده خواهد شد. بعلاوه نحوه‌ی انعکاس رفتار غیرارتجاعی در آئین‌نامه‌ها بیان می‌گردد.

INELASTIC BEHAVIOR OF MATERIALS AND STRUCTURES



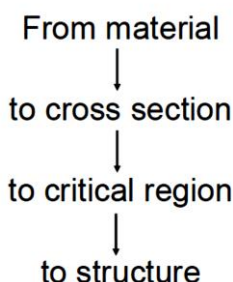
Instructional Material Complementing FEMA 451, Design Examples

Inelastic Behaviors 6 - 1

۵-۲- رفتار غیرارتجاعی سازه‌ها

در این شکل، سلسله مراتب رفتار غیرارتجاعی از مصالح به سطح مقطع، به ناحیه بحرانی و در نهایت به کل سازه نشان داده شده است. در مهندسی زلزله، انتظار می‌رود که پاسخ سازه وارد ناحیه غیرارتجاعی شود. علاوه بر بقای سازه-ها به قابلیت سازه برای ارائه چندین چرخه تغییر مکان غیرارتجاعی بدون کاهش چشمگیر در مقاومت و سختی، وابسته خواهد بود.

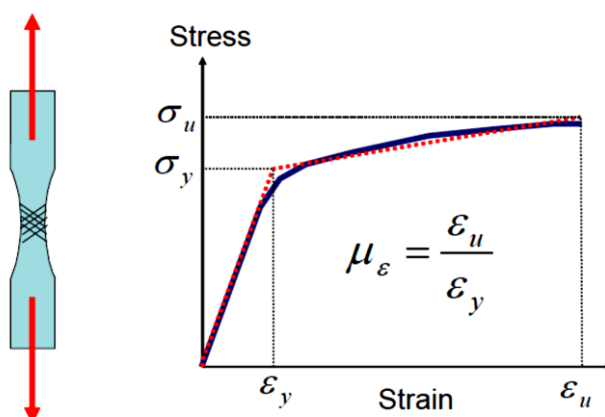
Inelastic Behavior of Structures



در شکل زیر یک قطعه فولادی مورد آزمایش قرار گرفته و نمودار تنش- کرنش آن ترسیم شده است. مقدار تنش و کرنش متناظر در نقطه‌ی تسلیم به راحتی برای فولادهای کم مقاومت قابل تعیین است. اما تعیین دقیق آنها برای فولادهای پرمقاومت بسیار مشکل می‌باشد. معمولاً حداکثر تنش قابل تعیین به عنوان تنش نهایی در نظر گرفته شده و حداکثر کرنش متناظر با تنش نهایی نیز به عنوان کرنش نهایی لحاظ می‌گردد. **ظرفیت (عرضه) شکل‌پذیری بر اساس کرنش** عبارتست از، **کرنش نهایی تقسیم بر کرنش تسلیم**. ظرفیت (عرضه) شکل‌پذیری محاسبه شده می‌باید بزرگتر از شکل‌پذیری تقاضا (شکل‌پذیری‌ای که زلزله تقاضا می‌کند) باشد.

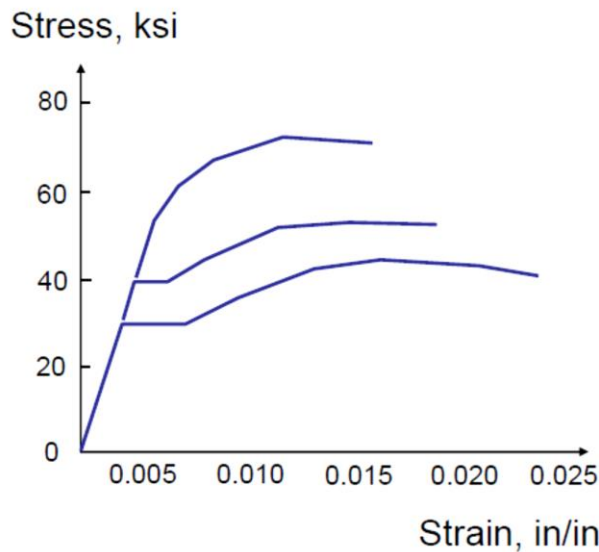
Idealized Inelastic Behavior

From Material.....



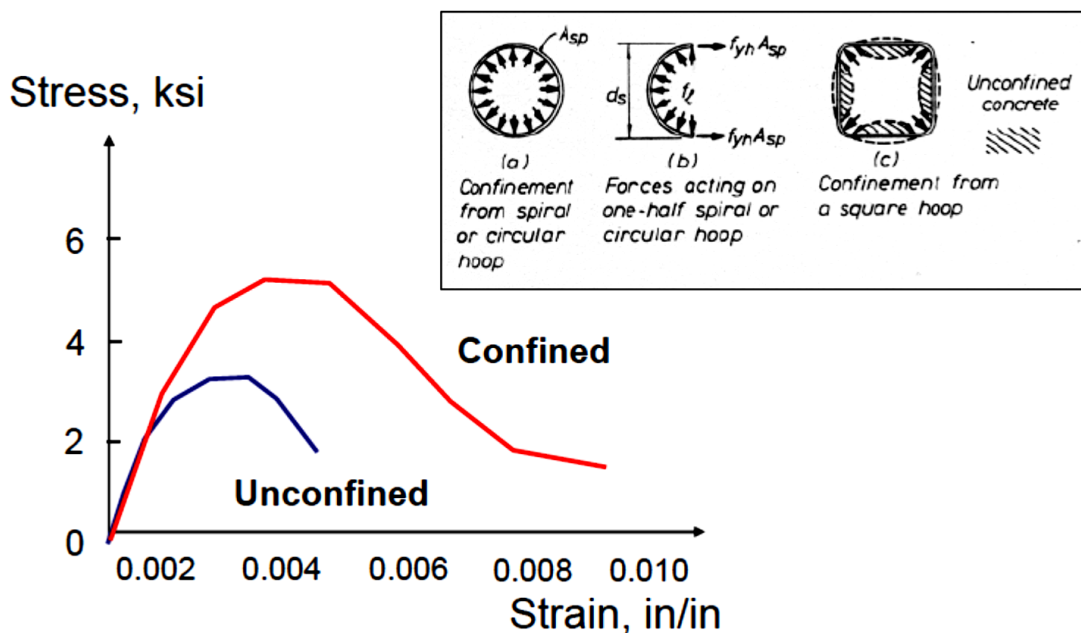
در شکل زیر چندین نمودار تنش-کرنش برای فولادهای متفاوت ترسیم شده است. همانطور که قبلاً بیان شد نحوه‌ی تعیین تنش تسلیم برای فولادهای با مقاومت پایین بسیار راحت‌تر است.

Stress-Strain Relationships for Steel



نمودار تنش-کرنش بتن شدیداً به محصورشدگی بتن وابسته می‌باشد. در صورت محصورشدگی مقطع (به عنوان مثال محصورشدگی حاصل از فشار هیدرواستاتیک)، ظرفیت مقاومت و تغییرشکل مقطع به طرز چشمگیری افزایش خواهد یافت. لازم به ذکر است که به هنگام وقوع زلزله، افزایش چشمگیر در ظرفیت تغییرشکل، بسیار مهم می‌باشد. در صورتی که کرنش بتن به ۰/۰۰۳ یا ۰/۰۰۴ محدود گردد، نمی‌توان از این بتن برای نواحی لرزه‌خیز استفاده نمود.

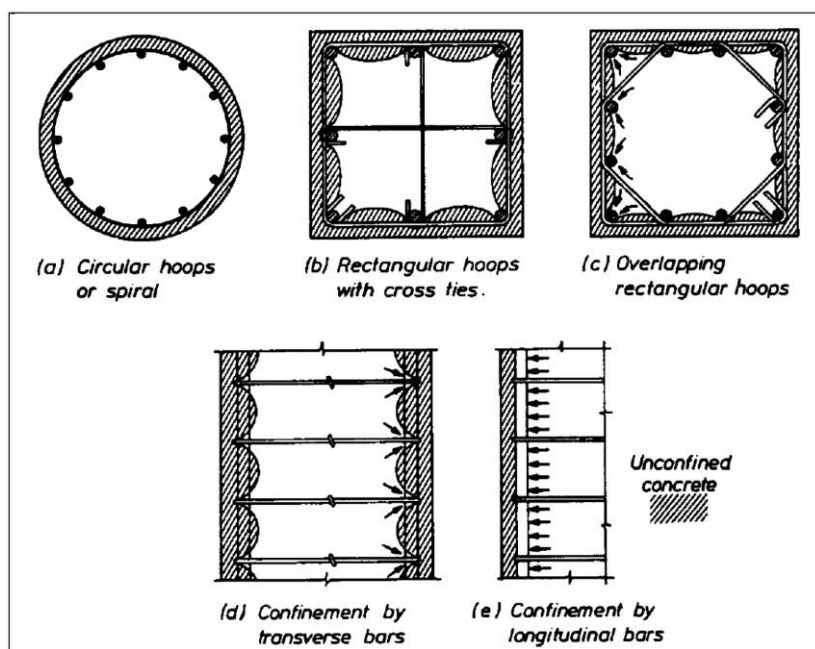
Stress-Strain Relationships for Concrete (Unconfined and Confined)



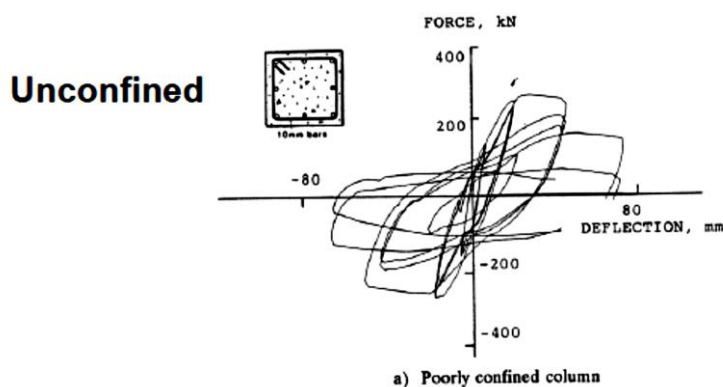
در سازه‌های بتن مسلح، محصورشدگی به صورت غیرفعال با استفاده از خاموت‌ها و تنگ‌ها که در فواصل نزدیک به یکدیگر تعبیه می‌شوند، فراهم می‌گردد. هنگامی که مقطع تحت اثر فشار قرار می‌گیرد، اثر پواسون سبب افزایش ابعاد جانبی می‌گردد، بنابراین مقطع تحت اثر محصورشدگی قرار می‌گیرد.

در این شکل، حالت‌های متفاوت محصورشدگی نشان داده شده است. مؤثرترین نوع محصورشدگی، استفاده از خاموت‌ها (تنگ‌های) دورانی یا دورپیچ می‌باشد. مقطع مستطیلی با خاموت‌های مستطیلی بدون قلاب‌های متقاطع داخلی عملاً محصورشدگی مناسبی را فراهم نمی‌کنند. بلکه حضور قلاب‌های متقاطع داخلی اثر چشمگیری دارد. هر اندازه فاصله بین خاموت‌ها (تنگ‌ها) کمتر باشد، عملکرد بهتری خواهند داشت. علاوه بر این استفاده از چندین میلگرد طولی می‌تواند فرآیند سبدي شدن بتن را میسر کرده و محصورشدگی بیشتری را فراهم نماید.

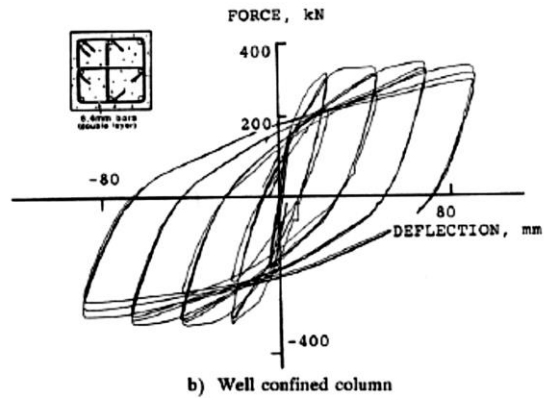
Concrete Confinement



در شکل فوق، رفتار دو سطح مقطع مشابه با یکدیگر مقایسه شده است.

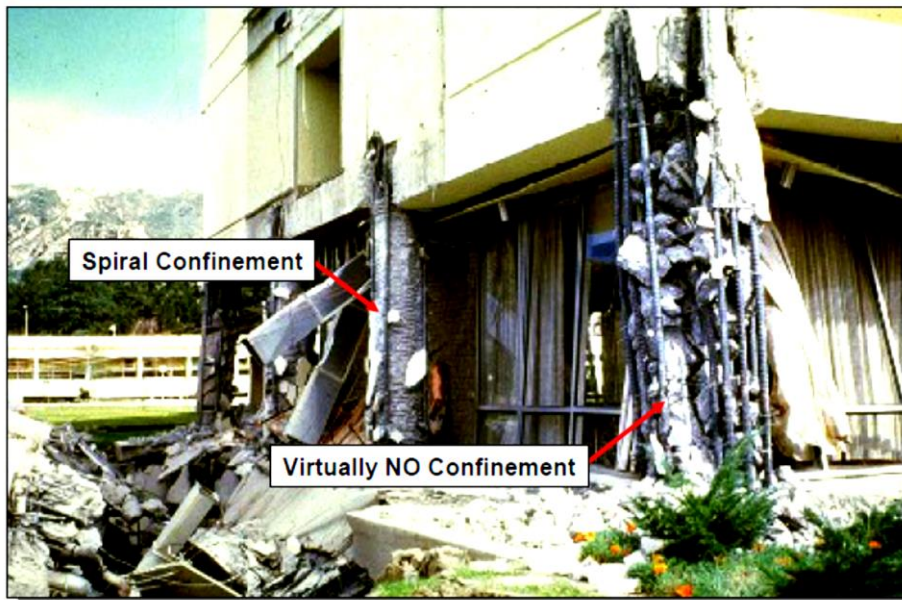


Confined



اهمیت حضور محصورشدگی به وضوح در این شکل نشان داده شده است.

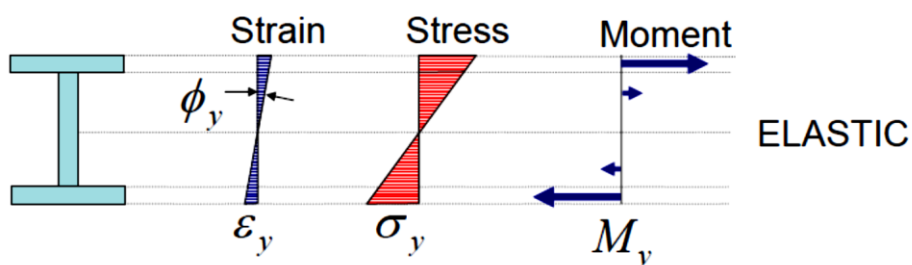
Benefits of Confinement

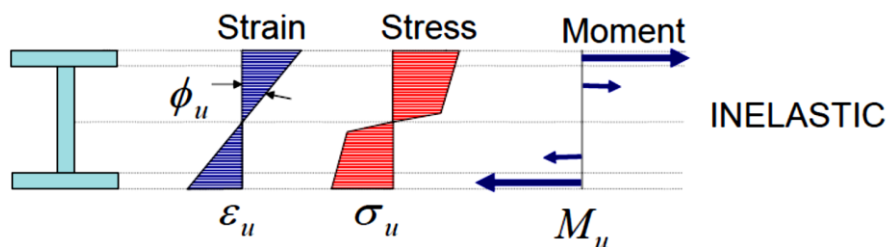


Olive View Hospital, 1971 San Fernando Valley earthquake

طبق سلسله مراتب گفته شده، پس از بررسی رفتار غیرارتجاعی مصالح، نوبت بررسی رفتار غیرارتجاعی سطح مقطع است.

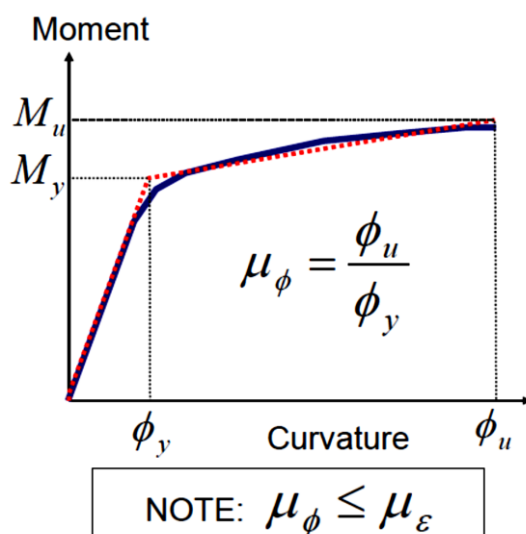
Idealized Inelastic Behavior To Section.....





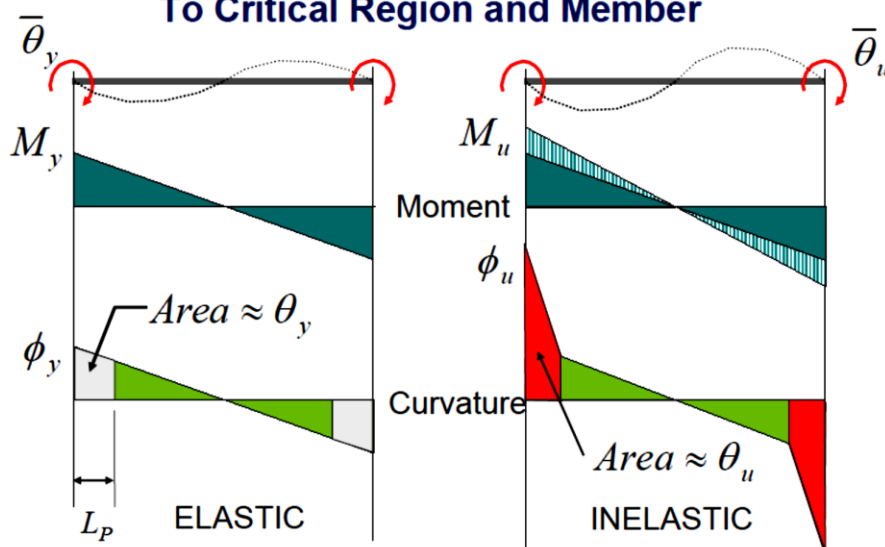
رابطه‌ی لنگر- انحنای مقطع در شکل زیر نشان داده شده است. لازم به ذکر است که رابطه‌ی شکل‌پذیری ارائه شده در واقع ظرفیت (عرضه) شکل‌پذیری می‌باشد و باید مقدار آن بزرگتر از تقاضای شکل‌پذیری مورد نیاز زلزله باشد.

Idealized Inelastic Behavior To Section.....



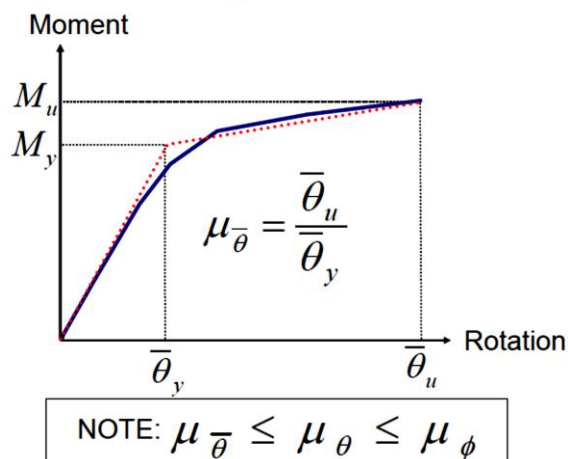
پس از گسترش رفتار غیرارتجاعی به سطح مقطع، این رفتار به ناحیه بحرانی اعضا انتقال می‌یابد. این ناحیه بخشی از عضو است که انتظار می‌رود اکثر رفتار غیرارتجاعی در آنجا رخ دهد. در این شکل، ملاحظه می‌گردد که ناحیه بحرانی منطبق بر محل تشکیل مفاصل پلاستیک در تیرها است. هنگامی که دوران‌های اعمالی انتهایی عضو به گونه‌ای باشد که در دو انتهای تیر لنگر تسلیم رخ دهد، دوران تسلیم مطابق شکل در ناحیه مفصل پلاستیک به وجود می‌آید. ناحیه مفصل پلاستیک دارای طولی است که به صورت تقریبی آن را معادل ارتفاع مقطع در نظر می‌گیرند. هنگامی که دوران‌های اعمالی انتهایی تیر افزوده گردد و لنگر نهایی در دو انتهای تیر تشکیل گردد، انحنای غیرارتجاعی در ناحیه مفصل رخ می‌دهد. با انتگرال‌گیری از انحنای به وقوع پیوسته در طول مفصل، می‌توان دوران غیرارتجاعی رخ داده در مفصل را بدست آورد.

Idealized Inelastic Behavior To Critical Region and Member



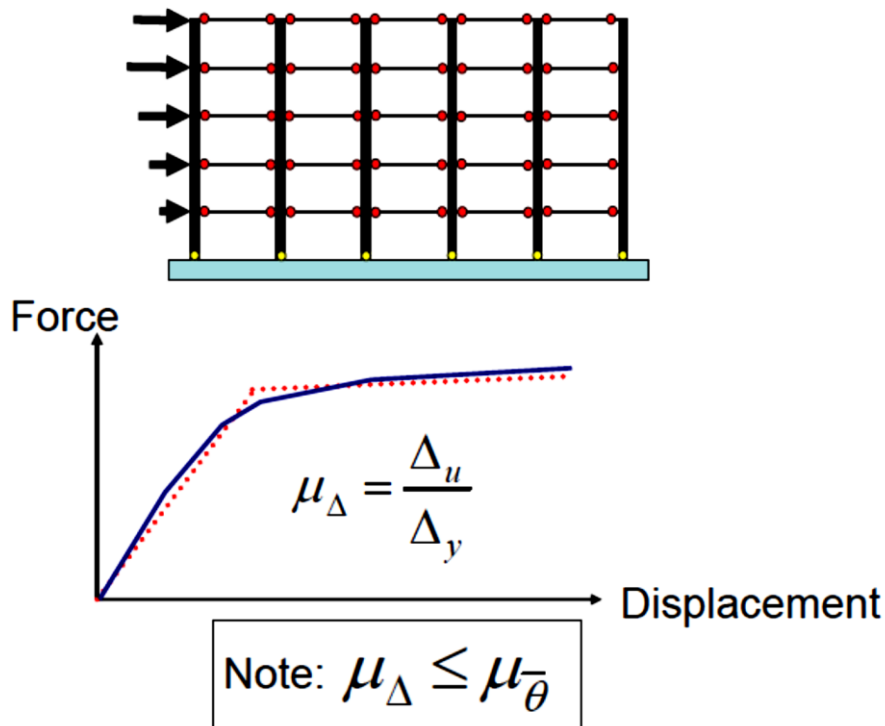
ظرفیت (عرضه‌ی) شکل‌پذیری دورانی با استفاده از نمودار فوق تعیین می‌گردد. تشکیل نمودار فوق دشوار بوده و مستلزم انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی است. لازم به تذکر است که $\bar{\theta}$ ها، بیانگر دوران‌های اعمالی در انتهای المان هستند، درحالی‌که θ بیانگر دوران تولید شده در مفصل پلاستیک است.

Idealized Inelastic Behavior To Critical Region and Member



مرحله پایانی سلسله مراتب عنوان شده مربوط به سازه است. در شکل زیر، پاسخ کلی بر اساس نمودار نیرو در مقابل تغییرمکان ارائه شده است. به نمودار زیر، نمودار ظرفیت یا نمودار پوش‌آور (بار افزون) گفته می‌شود. ظرفیت (عرضه) شکل‌پذیری تغییرمکان به صورت زیر معرفی می‌گردد. لازم به ذکر است که ظرفیت شکل‌پذیری بدست آمده به الگوی بارگذاری اعمالی وابسته است.

Idealized Inelastic Behavior To Structure.....



کاهش شکل پذیری بر اساس سلسله مراتب

همانطور که ملاحظه می‌گردد شکل‌پذیری در خلال سلسله مراتب انتقال رفتار غیرارتجاعی کاهش می‌یابد. بنابراین، حتی اگر یک نوع مصالح دارای شکل‌پذیری بالایی باشد (مانند فولاد نرمه)، شکل‌پذیری کل سیستم می‌تواند متوسط باشد. با این وجود سطح عرضه (ظرفیت) شکل‌پذیری سیستم از ۴ تا ۶ برای عملکرد لرزه‌ای خوب یک سیستم کافی است، زیرا که مقدار تقاضای شکل‌پذیری به ندرت از ۴ تا ۶ تجاوز می‌کند.

Loss of Ductility Through Hierarchy

Strain $\mu_{\epsilon} = 100$

Curvature $\mu_{\phi} = 12 \text{ to } 20$

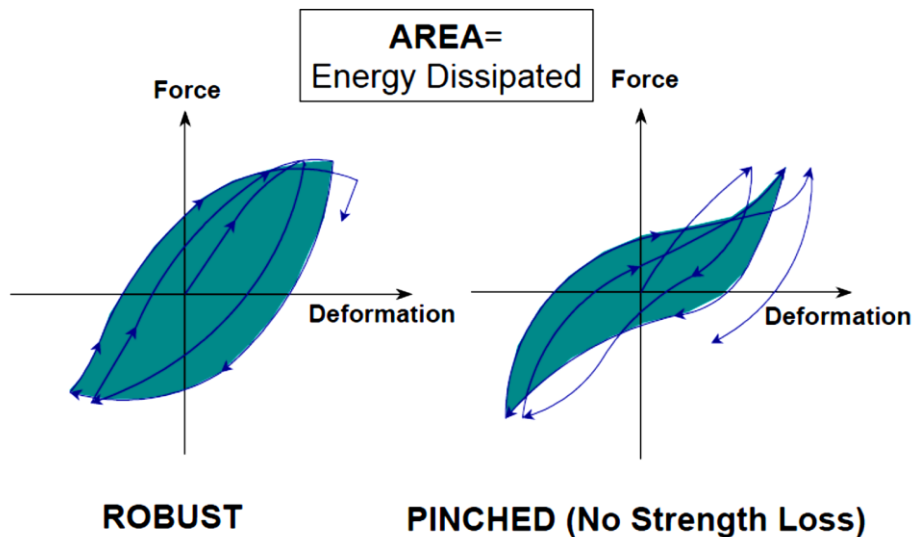
Rotation $\mu_{\theta} = 8 \text{ to } 14$

Displacement $\mu_{\Delta} = 4 \text{ to } 10$

۵-۳- ظرفیت اتلاف انرژی و شکل پذیری

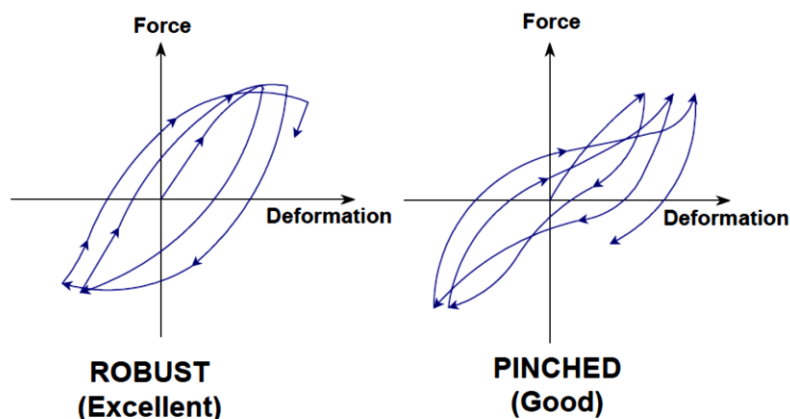
در این قسمت رفتار سازه تحت اثر بارهای چرخه‌ای (رفت و برگشتی) بررسی می‌گردد. مساحت محصورشده بین یک حلقه از نمودار هیستریزیس نیرو- تغییرمکان، نسبت به شکل‌پذیری، معیار مناسب‌تری برای عملکرد سیستم است. این مساحت نشان دهنده میزان انرژی مستهلک شده در هر سیکل بارگذاری است. به عنوان مثال نمودار هر دو سازه‌ی نشان داده شده در شکل زیر دارای شکل‌پذیری یکسان بوده و علاوه بر آن کاهش مقاومت چشمگیری در هیچ یک از آنها رخ نمی‌دهد. با این وجود، شکل سمت چپ به علت آنکه دارای مساحت بیشتری در یک حلقه هیستریزیس است، انرژی را بیشتر مستهلک نموده و لذا نسبت به شکل سمت راست ارجح‌تر خواهد بود.

Hysteretic Behavior



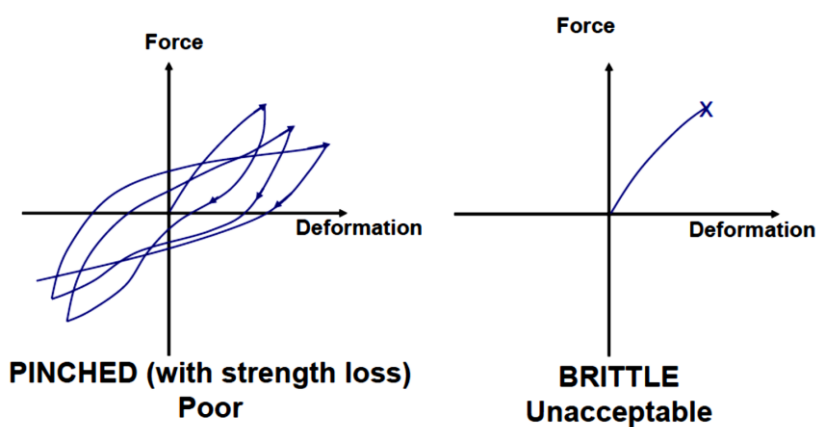
در شکل زیر می‌توان دو نوع متفاوت از رفتار هیستریزیس را تحت اثر بارهای چرخه‌ای مشاهده نمود. شکل سمت چپ دارای رفتار فوق‌العاده و ایده‌آلی است، زیرا که طی چندین چرخه بارگذاری کاهش مقاومتی در آن رخ نداده است. به علاوه، حلقه‌های هیستریزیس چاق می‌باشند، و این مسئله بیانگر آن است که مقدار ظرفیت اتلاف انرژی مناسب است. اما حلقه‌های شکل سمت راست تا حدی *pinched* شده‌اند. با وجود آنکه کاهش مقاومت چشمگیری رخ نداده است، اما فرآیند *pinched* شدن سبب کاهش مساحت حلقه‌های هیستریزیس گشته و نهایتاً منجر به کاهش انرژی اتلاف شده در هر سیکل می‌گردد. گاهی اوقات نمی‌توان از *pinched* شدن جلوگیری نمود (به عنوان مثال در تیرهای T شکل بتن مسلح).

Hysteretic Behavior



در شکل زیر فرآیند *pinching* با کاهش مقاومت همراه است. این رفتار کاملاً نامناسب بوده و نمی‌توان از آن در مناطق دارای خطر لرزه‌خیزی زیاد استفاده نمود. پاسخ نشان داده شده در شکل سمت راست ترد و شکننده بوده و استفاده از عضو با این خصوصیت در مناطق با خطر لرزه‌خیزی زیاد مجاز نیست.

Hysteretic Behavior



ظرفیت اتلاف انرژی و شکل‌پذیری

- به منظور داشتن رفتار لرزه‌ای قابل قبول، شکل‌پذیری کل سیستم می‌باید دارای مقداری از ۴ تا ۶ باشد.
- داشتن قابلیت رفتار هیستریزیس مناسب برای مصالح شکل‌پذیر ضروری است.
- با این وجود، شکل‌پذیری به خودی خود برای ارائه رفتار لرزه‌ای مناسب کافی نمی‌باشد.
- ظرفیت اتلاف انرژی چرخه‌ای معیار مناسب‌تری برای چگونگی عملکرد لرزه‌ای سیستم است.
- یک سازه می‌باید قادر باشد پس از طی چندین سیکل تغییر مکان غیرارتجاعی بدون کاهش چشمگیر مقاومت، پایدار و پا بر جا باقی بماند.

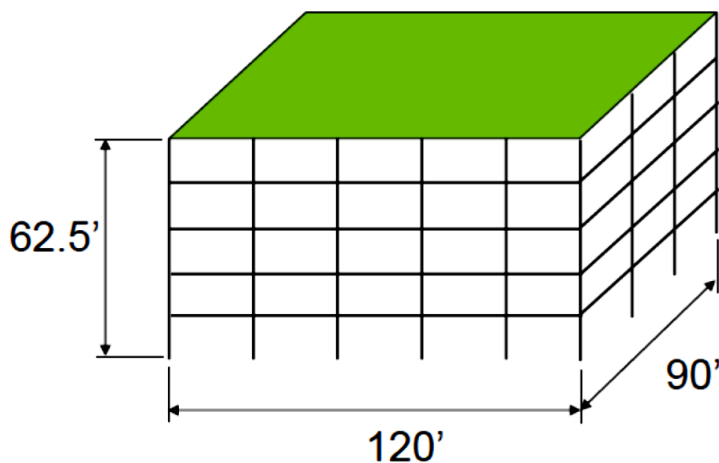
- اندکی کاهش در مقدار سختی اجتناب‌ناپذیر بوده، اما کاهش چشمگیر سختی نهایتاً منجر به فروپاشی سازه می‌گردد.
- هر اندازه میزان انرژی مستهلک شده در هر سیکل بدون تغییر مکان مازاد، بیشتر گردد، رفتار سازه مطلوب‌تر خواهد بود.

نکته: در صورتی که اعضای سازه‌ای به نحو مناسبی طراحی گردند تا بتوانند شکل‌پذیری و اتلاف انرژی مورد نیاز را تأمین نمایند، می‌توان سازه را برای نیرویی بسیار کمتر از نیروی مورد نیاز با فرض رفتار الاستیک سازه طراحی کرد.

در مثال شکل زیر می‌توان ملاحظه نمود که چگونه نیروی زلزله به طرز چشمگیری از نیروی باد بیشتر بدست می‌آید و بنابراین سبب لزوم طراحی لرزه‌ای یک سازه‌ی کاملاً غیر اقتصادی می‌شود. در این ساختمان فرض بر آن است که سیستم باربر جانبی در هر دو جهت، قاب خمشی است. به منظور تعیین نیروی باد از نسخه‌ی قدیمی *ASCE 7* استفاده شده است.

Why Is Inelastic Response Necessary?

Compare the Wind and Seismic Design of a Simple Building



Building properties:
 Moment resisting frames
 Density $\rho = 8 \text{ pcf}$
 Period $T = 1.0 \text{ sec}$
 Damping $\xi = 5\%$
 Soil Site Class "B"

Wind:
 100 mph Exposure C

Earthquake:
 Assume $S_{D1} = 0.48g$

Wind:

100 mph fastest

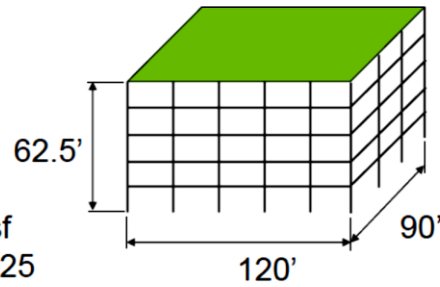
Exposure C

Velocity pressure $q_s = 25.6$ psf

Gust/exposure factor $C_e = 1.25$

Pressure coefficient $C_q = 1.3$

Load factor for wind = 1.3



Total wind force on 120-foot face:

$$V_{W120} = 62.5 \times 120 \times 25.6 \times 1.25 \times 1.3 \times 1.3 / 1000 = \mathbf{406 \text{ kips}}$$

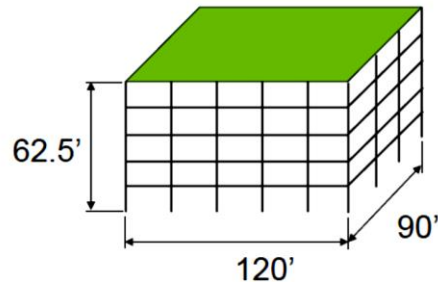
Total wind force on 90-foot face:

$$V_{W90} = 62.5 \times 90 \times 25.6 \times 1.25 \times 1.3 \times 1.3 / 1000 = \mathbf{304 \text{ kips}}$$

Earthquake:

Building weight, $W =$

$$120 \times 90 \times 62.5 \times 8 / 1000 = 5400 \text{ kips}$$



$$V_{EQ} = C_s W$$

$$C_s = \frac{S_{D1}}{T(R/I)} = \frac{0.48}{1.0(1.0/1.0)} = 0.480$$

Total **ELASTIC** earthquake force (in each direction):

$$V_{EQ} = 0.480 \times 5400 = \mathbf{2592 \text{ kips}}$$

در شکل فوق مقدار برش پایه با فرض رفتار الاستیک ($R=1$) بدست آمده است. ملاحظه می گردد که در صورت فرض رفتار الاستیک برای سازه، نیروی طراحی لرزه ای نسبت به نیروی باد، بسیار چشمگیر بوده و سبب غیر اقتصادی شدن طرح می گردد.

Comparison: Earthquake vs. Wind

$$\frac{V_{EQ}}{V_{W120}} = \frac{2592}{406} = 6.4$$

$$\frac{V_{EQ}}{V_{W90}} = \frac{2592}{304} = 8.5$$

با توجه به مقایسه صورت گرفته:

- نیروهای الاستیک زلزله حدوداً ۶ تا ۹ برابر باد است.
- بنابراین با وجود چنین نیروی زلزله‌ای، رسیدن به یک طرح اقتصادی عملاً غیرممکن است.

۴-۵- راه‌های مواجهه با نیروهای بزرگ زلزله

- جداسازی سازه از زمین (استفاده از جداسازهای لرزه‌ای)
- افزایش میرایی (بکارگیری سیستم‌های اتلاف‌کننده انرژی غیرفعال)
- فراهم نمودن زمینه‌ی پاسخ غیرارتجاعی کنترل شده

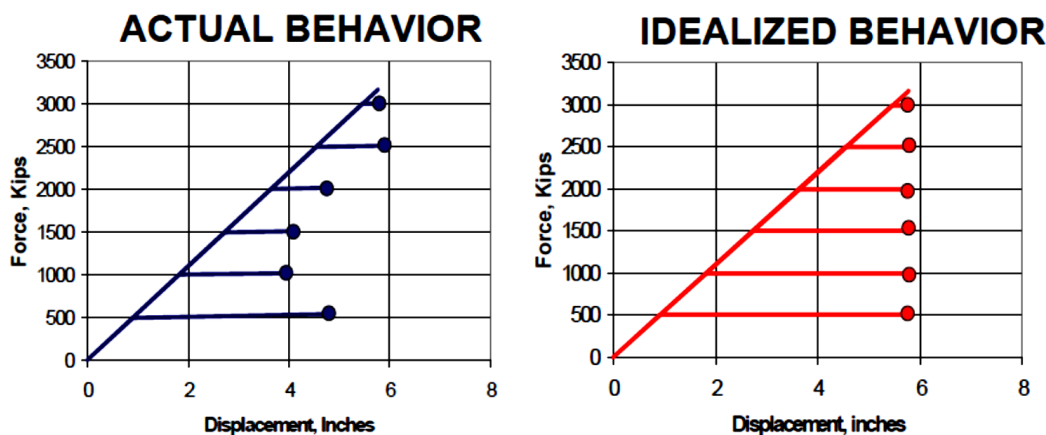
نکته: در صورتی که مقدار شکل‌پذیری تقاضا (مورد نیاز)، توسط سازه فراهم نگردد، سازه فرو خواهد ریخت. بنابراین، در نهایت می‌باید:

ظرفیت (عرضه) شکل‌پذیری < تقاضای شکل‌پذیری

۵-۵- مفهوم تغییرمکان معادل

تغییرمکان یک سیستم غیرارتجاعی با سختی K و مقاومت F_y که تحت اثر یک زلزله (حرکت زمین) خاص قرار می‌گیرد، تقریباً با تغییرمکان همان سیستم اما با رفتار ارتجاعی برابر است (در واقع تغییرمکان یک سیستم مستقل از مقاومت تسلیم آن سیستم است).

Constant Displacement Idealization of Inelastic Response



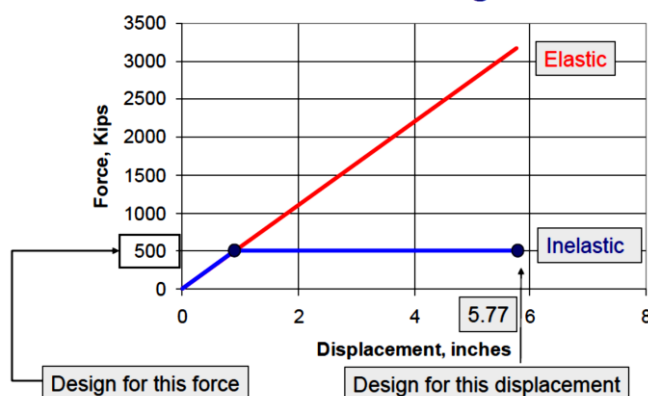
در شکل فوق پوش‌های نیرو- تغییرمکان برای تحلیل‌های مختلف نشان داده شده است. یک فرض محافظه‌کارانه (در مورد تغییرمکان‌ها) در شکل سمت راست نشان داده شده است. فرض اساسی آن است که تغییرمکان تقاضا تقریباً نسبت به مقاومت تسلیم غیرحساس می‌باشد. این موضوع به عنوان مفهوم تغییرمکان معادل طرح مقاوم سازی لرزه-ای شناخته می‌شود.

نکته: برای اهداف طراحی، می‌توان چنین فرض کرد که تغییرمکان‌های غیرارتجاعی با تغییرمکان‌های حاصل از پاسخ الاستیک سیستم برابر است.

نکته: سطوح نیرویی مورد نیاز در پاسخ غیرارتجاعی بسیار کمتر از سطوح نیرویی مورد نیاز در پاسخ الاستیک است.

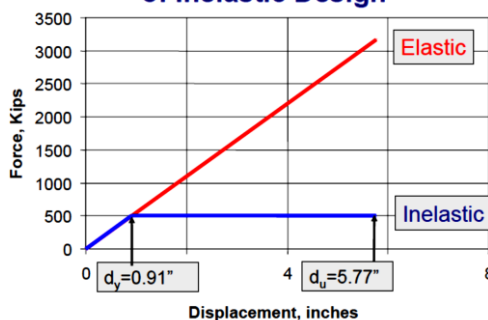
مفهوم تغییرمکان معادل، استفاده از تحلیل ارتجاعی را برای پیش‌بینی تغییرمکان‌های غیرارتجاعی مجاز می‌داند. به عنوان مثال، برای سیستم نشان داده شده، تغییرمکان الاستیک (خط قرمز رنگ) برابر 5.77 inch بوده و فرض بر آن است که پاسخ تغییرمکان غیرارتجاعی (خط آبی) نیز با این مقدار برابر است.

Equal Displacement Concept of Inelastic Design



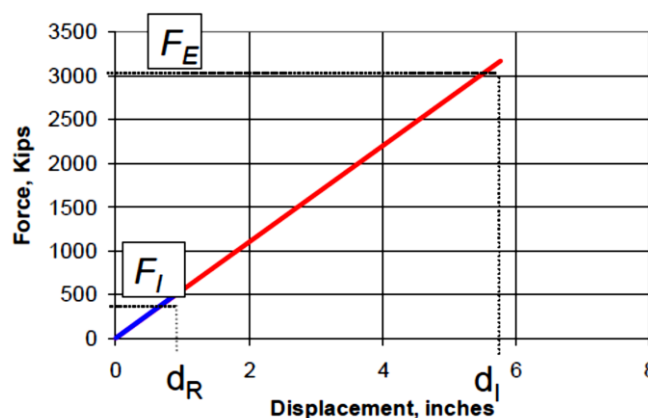
برای سیستم ساده دوطبقی شکل زیر، تقاضای شکل‌پذیری را می‌توان محاسبه نمود. سیستم مزبور برای آنکه بتواند این شکل‌پذیری را تأمین نماید، می‌باید به خوبی طراحی شده باشد. برای اهداف طراحی، معمولاً از یک پروسه معکوس استفاده می‌شود. بدین صورت که ابتدا تعدادی ظرفیت شکل‌پذیری (بر اساس سطح شکل‌پذیری و طراحی که می‌توان در سازه فراهم نمود) فرض شده و با استفاده از آنها، می‌توان الزامات مقاومتی را تخمین زد.

Equal Displacement Concept of Inelastic Design



$$\text{Ductility supply MUST BE} > \text{ductility demand} = \frac{5.77}{0.91} = 6.34$$

با استفاده از طیف پاسخ، تقاضای نیروی الاستیک F_E ، تخمین زده می‌شود. ظرفیت شکل‌پذیری μ تخمین زده شده و تقاضای نیروی غیرارتجاعی ($F_I = F_E/\mu$) تعیین می‌گردد. سپس سازه برای F_I طراحی می‌شود. تغییرمکان کاهش یافته d_R محاسبه شده و پس از ضرب در μ ، تغییرمکان غیرارتجاعی d_I بدست می‌آید، آنگاه دریفت‌ها با استفاده از d_I کنترل می‌شوند.



۵-۶- روش استاندارد ۲۸۰۰ در لحاظ نمودن رفتار غیرارتجاعی

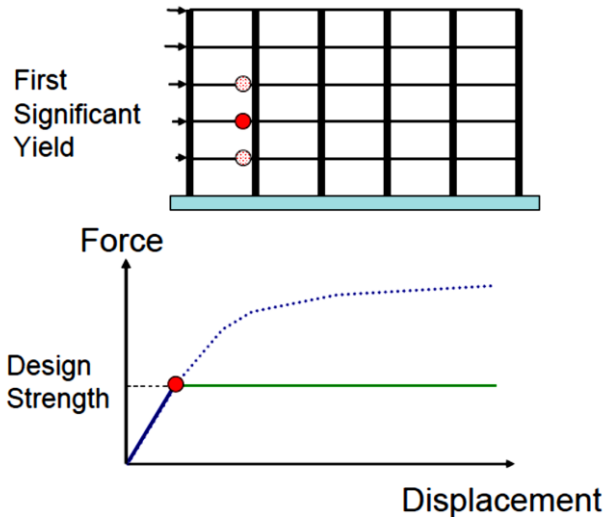
در استاندارد ۲۸۰۰ از طیف پاسخ ارتجاعی استفاده می‌شود، اما به منظور تعیین مقاومت، کلیه مقادیر شبه شتاب بر ضریب R (ضریب رفتار) تقسیم می‌شوند. این ضریب شامل آثار زیر است:

- ظرفیت شکل‌پذیری پیش‌بینی شده
- اضافه مقاومت
- میرایی (در صورت متفاوت بودن با مقدار ۰.۵)
- عملکرد پیشین سیستم‌های مشابه
- اضافه درجات نامعینی (قیود اضافی سازه)

لازم به ذکر است که سازه‌های واقعی، بسیار مقاوم‌تر از ملزومات مورد نیاز طراحی هستند. این مقاومت اضافه، در صورت شناخت و تشخیص صحیح، می‌تواند در کاهش تقاضای شکل‌پذیری بکار رود. در صورت ادامه بارگذاری جانبی، به سطح باری که سبب بروز اولین تسلیم شدگی گردد، **مقاومت طرح** گفته می‌شود. به مقاومت اضافی موجود در سازه پس از عبور از مقاومت طرح، اصطلاحاً **اضافه مقاومت** می‌گویند. اکثر سازه‌ها دارای اضافه مقاومت چشمگیری هستند.

Ductility/Overstrength

FIRST SIGNIFICANT YIELD



عللی اصلی به وجود آوردنده اضافه مقاومت عبارتند از:

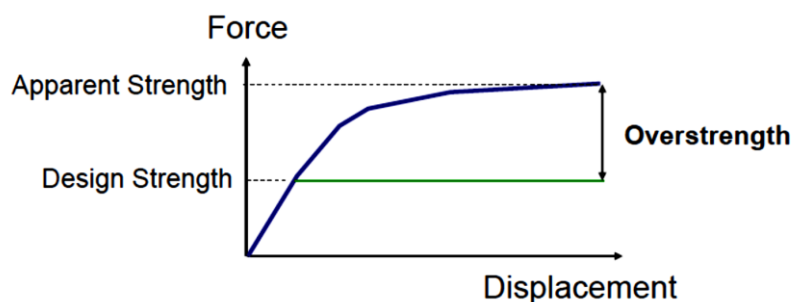
- اضافه مقاومت مصالح (مقاومت واقعی بیش از مقاومت تسلیم است)
- سخت‌شدگی کرنشی
- ضرایب کاهش ظرفیت مقاومت (ϕ)

نکته: لازم به ذکر است که مقاومت واقعی یک سازه با در نظر گرفتن اضافه مقاومت، حدود دو تا سه برابر مقاومت طرح است.

معمولاً به مقاومت کلی (نهایی) سیستم، **مقاومت ظاهری** گفته می‌شود. ضریب اضافه مقاومت از تقسیم مقاومت ظاهری بر مقاومت تسلیم بدست می‌آید.

Definition of Overstrength Factor Ω

$$\text{Overstrength Factor } \Omega = \frac{\text{Apparent Strength}}{\text{Design Strength}}$$

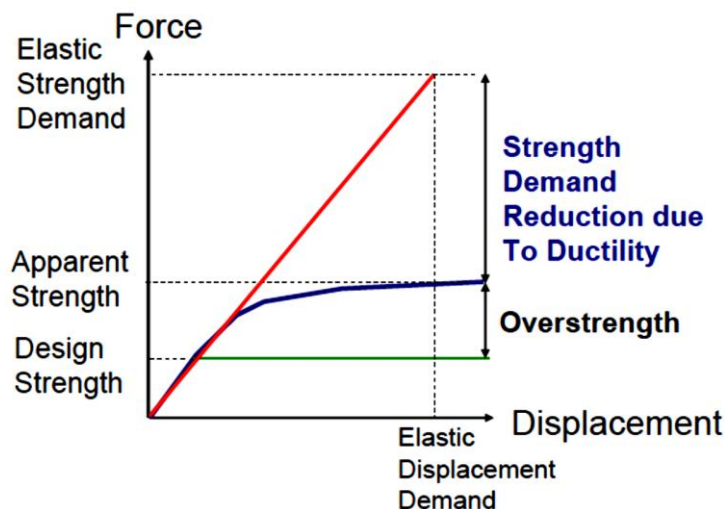


$$\Omega = \frac{\text{مقاومت ظاهری}}{\text{مقاومت طرح}} \quad \text{ضریب اضافه مقاومت}$$

بر اساس مطالب گفته شده مقاومت ظاهری، ظرفیت شکل پذیری $1/$ برابر تقاضای مقاومت ارتجاعی است. به ظرفیت شکل پذیری ضریب کاهش شکل پذیری گفته می شود و آن را با R_d نمایش می دهند.

Definition of Ductility Reduction Factor

$$\text{Ductility Reduction } R_d = \frac{\text{Elastic Strength Demand}}{\text{Apparent Strength}}$$



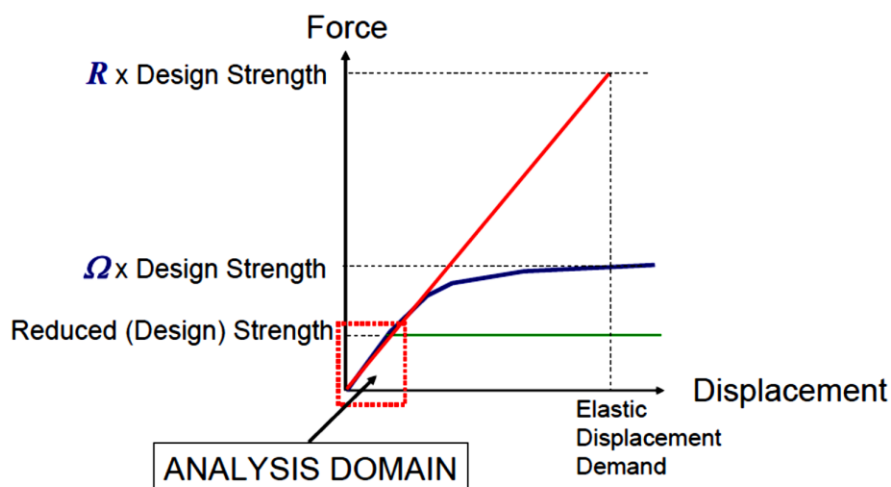
$$R_d = \frac{\text{تقاضای مقاومت ارتجاعی}}{\text{مقاومت ظاهری}} \quad \text{ضریب کاهش شکل پذیری}$$

در نهایت ضریب اصلاح پاسخ یا به عبارت دیگر ضریب رفتار عبارتست از:

$$R = \frac{\text{تقاضای مقاومت ارتجاعی}}{\text{مقاومت طرح}} = \underbrace{\frac{\text{تقاضای مقاومت ارتجاعی}}{\text{مقاومت ظاهری}}}_{R_d} * \underbrace{\frac{\text{مقاومت ظاهری}}{\text{مقاومت طرح}}}_{\Omega} = R_d * \Omega$$

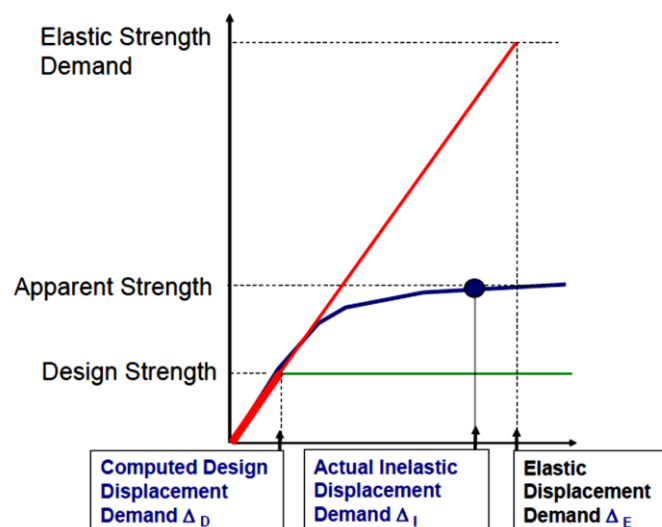
ضریب اصلاح پاسخ R (در آیین نامه $ASCE7$)، به منظور تبدیل و کاهش تقاضای مقاومت ارتجاعی مورد انتظار، به تقاضای مقاومت طرح استفاده می گردد. بر اساس تئوری تغییرمکان معادل، تقاضای تغییرمکان غیرارتجاعی، برابر تقاضای تغییرمکان ارتجاعی است. برای اهداف طراحی، روند تحلیل به صورتی است که با استفاده از نیروهای کاهش یافته، پاسخ ارتجاعی خطی سیستم بدست می آید. اما تغییرمکان بدست آمده با این روش قطعاً بسیار کوچکتر از مقدار واقعی خود خواهد بود. استاندارد ۲۸۰۰ این اختلاف را با استفاده از ضریب C_d جبران می نماید.

Definition of Response Modification Coefficient R



به منظور تصحیح تغییرمکان‌های بسیار کوچک که با استفاده از نیروهای کاهش یافته در تحلیل ارتجاعی بدست آمده‌اند، تغییرمکان محاسبه شده در ضریب C_d ضرب می‌گردد.

Definition of Deflection Amplification Factor Coefficient C_d



بند ۳-۳-۵-۲۸۰۰- ضریب رفتار ساختمان R_u

بند ۳-۳-۵-۱-۲۸۰۰- ضریب رفتار ساختمان در برگرنده خصوصیات مانند شکل‌پذیری، نامعینی و اضافه مقاومت موجود در سازه ساختمان است. این ضریب با توجه به نوع سیستم باربر ساختمان و تمهیداتی که برای شکل‌پذیر کردن آن به‌کاربرده شده است، با رعایت محدودیت‌های بندهای (۳-۵-۲۸۰۰) تا (۳-۵-۷-۲۸۰۰)، از جدول (۳-۴) صفحه ۳۴ و ۳۵ استاندارد ۲۸۰۰ تعیین می‌گردد.

H_m = حداکثر ارتفاع مجاز ساختمان است که با سیستم باربر عنوان شده ساخته می‌شود. این ارتفاع از تراز پایه تعیین می‌گردد.

C_d = ضریب بزرگنمایی تغییر مکان جانبی سازه به علت رفتار غیرخطی آن است. به بند (۳-۵-۲۸۰۰) مراجعه شود.

Ω_0 = ضریب اضافه مقاومت سازه است که برای تعیین زلزله تشدید یافته مورد استفاده قرار می‌گیرد. به بند (۳-۳-۲۸۰۰-۱۰) مراجعه شود.

وجود درجه‌ی نامعینی در یک سازه، باعث عملکرد مطمئن‌تر آن در هنگام زلزله شده و انتخاب ضریب رفتار بزرگ-تری را میسر می‌سازد. این موضوع سبب می‌شود که برش پایه‌ی کوچکتری در هنگام زلزله به سازه وارد شود. تحقیقات نشان می‌دهد که اگر برای تحمل نیروی زلزله در یک راستا از سازه، تعداد عناصر مقاوم جانبی کم باشد (درجه‌ی نامعینی کافی برای تحمل نیروهای جانبی وجود نداشته باشد)، توانایی سازه در هنگام زلزله برای رسیدن به عملکرد مطلوب در جذب انرژی و تأمین شکل‌پذیری کاهش می‌یابد. به همین منظور در آئین‌نامه‌های لرزه‌ای پارامتری به نام ضریب درجه‌ی نامعینی^۱ یا ضریب نامعینی سازه تعریف شده که با ρ نشان داده می‌شود. آئین‌نامه‌های لرزه‌ای با استفاده از این ضریب در برخی از ساختمان‌ها که درجه‌ی نامعینی کافی ندارند، نیروی زلزله‌ی طراحی را افزایش می‌دهند.

بند ۳-۳-۲۸۰۰-۲-۳-۳- ضریب نامعینی سازه، ρ

بند ۳-۳-۲۸۰۰-۱-۲-۳-۳- ساختمان‌هایی که سیستم مقاوم جانبی آنها در دو جهت عمود بر هم دارای نامعینی کافی نیستند، باید برای بار جانبی بیشتری طراحی شوند. در این ساختمان‌ها بار جانبی باید با ضریب $\rho = 1.2$ افزایش داده شود.

بند ۳-۳-۲۸۰۰-۲-۲-۳-۳- ساختمان‌هایی که سیستم مقاوم جانبی آنها دارای خصوصیات زیر هستند، دارای نامعینی کافی بوده و در آنها ضریب ρ برابر با ۱ منظور می‌شود.

الف- در ساختمان‌های منظم در پلان، در طبقاتی که برش در آنها از ۳۵ درصد برش پایه تجاوز می‌کند، حداقل دو دهانه سیستم مقاوم جانبی در هر سمت مرکز جرم، در هر دو امتداد عمود بر هم، موجود باشد. در سیستم‌های دارای دیوار برشی تعداد دهانه‌ها از تقسیم طول دیوار بر ارتفاع آن در طبقه به دست می‌آید.

ب- در سایر ساختمان‌ها، در طبقاتی که میزان برش در آنها از ۳۵ درصد برش پایه تجاوز می‌کند، چنانچه حذف جزئی از سیستم مقاوم جانبی، مطابق جدول (۳-۲-۲۸۰۰)، موجب کاهش مقاومت جانبی طبقه به میزان بیشتر از ۳۳٪ نشود و در طبقه نامنظمی شدید پیچشی، مطابق بند (۱-۱-۱-۲۸۰۰) ایجاد نگردد.

^۱ . Redundancy

جدول ۳-۲ محدودیت‌های مربوط به $\rho = 1.0$

نوع سیستم مقاوم جانبی	الزامات
سیستم مهاربندی‌شده	حذف یک مهاربند یا اتصال آن
سیستم با دیوار برشی عادی یا دیوارهای برشی هم‌پسته یا نسبت ارتفاع هر پایه به طول بزرگ‌تر از ۱/۰	حذف یک دیوار و یا یک پایه و یا اتصالات جمع‌کننده آنها
سیستم قاب خمشی	حذف مقاومت خمشی اتصالات دو انتهای یک تیر
سیستم کنسولی	حذف مقاومت خمشی در اتصال پایه یکی از ستون‌ها

بند ۳-۳-۲-۳-۲۸۰۰- ساختمان‌ها و یا اجزای زیر مشمول محدودیت‌های مربوط به ضریب نامعینی نمی‌شوند و ρ در آنها باید برابر با ۱ منظور شود:

الف- ساختمان‌های با تعداد طبقات کمتر از ۳ طبقه و یا کوتاه‌تر از ۱۰ متر از تراز پایه

ب- محاسبه تغییرمکان جانبی ساختمان

پ- محاسبه اثر $P - \Delta$

ت- تعیین نیروی جانبی در اجزای غیر سازه‌ای

ث- تعیین نیروی جانبی در سازه‌های غیرساختمانی غیر مشابه ساختمان

ج- تعیین نیروها در دیافراگم، رابطه (۳-۱۵-۲۸۰۰)

چ- در کلیه اعضایی که مشمول طراحی برای زلزله شدید یافته می‌شوند و نیروی زلزله در آنها در ضریب اضافه مقاومت Ω_0 ضرب می‌شود.

جدول ۳-۴ مقادیر ضریب رفتار ساختمان، R_u ، همراه با حداکثر ارتفاع مجاز ساختمان H_m

سیستم سازه	سیستم مقاوم در برابر نیروهای جانبی	R_u	Ω_0	C_d	H_m (متر)
الف- سیستم دیوارهای باربر	۱- دیوارهای برشی بتن‌آرمه ویژه	۵	۲/۵	۵	۵۰
	۲- دیوارهای برشی بتن‌آرمه متوسط	۴	۲/۵	۴	۵۰
	۳- دیوارهای برشی بتن‌آرمه معمولی [۱]	۳/۵	۲/۵	۳/۵	-
	۴- دیوارهای برشی با مصالح بنایی مسلح	۳	۲/۵	۳	۱۵
	۵- دیوارهای متشکل از قاب‌های سبک فولادی سردنورد و مهارهای تسمه‌ای فولادی	۴	۲	۳/۵	۱۵
	۶- دیوارهای متشکل از قاب‌های سبک فولادی سردنورد و صفحات پوشش فولادی	۵/۵	۳	۴	۱۵
	۷- دیوارهای بتن‌پاششی سبب‌بدی	۳	۲	۳	۱۰

جدول ۳-۴ مقادیر ضریب رفتار ساختمان، R_u ، همراه با حداکثر ارتفاع مجاز ساختمان H_m

سیستم سازه	سیستم مقاوم در برابر نیروهای جانبی	R_u	Ω_0	C_d	H_m (متر)
ب- سیستم قاب ساختمانی	۱- دیوارهای برشی بتن آرمه ویژه [۲]	۶	۲/۵	۵	۵۰
	۲- دیوارهای برشی بتن آرمه متوسط	۵	۲/۵	۴	۳۵
	۳- دیوارهای برشی بتن آرمه معمولی [۱]	۴	۲/۵	۳	-
	۴- دیوارهای برشی یا مصالح بنایی مسلح	۳	۲/۵	۲/۵	۱۵
	۵- مهاربندی واگرای ویژه فولادی [۲] و [۳]	۷	۲	۴	۵۰
	۶- مهاربندی کمانش تاب	۷	۲/۵	۵	۵۰
	۷- مهاربندی همگرای معمولی فولادی	۳/۵	۲	۳/۵	۱۵
	۸- مهاربندی همگرای ویژه فولادی [۲]	۵/۵	۲	۵	۵۰
پ- سیستم قاب خمشی	۱- قاب خمشی بتن آرمه ویژه [۴]	۷/۵	۳	۵/۵	۲۰۰
	۲- قاب خمشی بتن آرمه متوسط [۴]	۵	۳	۴/۵	۳۵
	۳- قاب خمشی بتن آرمه معمولی [۴] و [۱]	۳	۳	۲/۵	-
	۴- قاب خمشی فولادی ویژه	۷/۵	۳	۵/۵	۲۰۰
	۵- قاب خمشی فولادی متوسط	۵	۳	۴	۵۰
	۶- قاب خمشی فولادی معمولی [۱]	۳/۵	۳	۳	-
ت- سیستم دوگانه یا ترکیبی	۱- قاب خمشی ویژه (فولادی یا بتنی) + دیوارهای برشی بتن آرمه ویژه	۷/۵	۲/۵	۵/۵	۲۰۰
	۲- قاب خمشی بتن آرمه متوسط + دیوار برشی بتن آرمه ویژه	۶/۵	۲/۵	۵	۷۰
	۳- قاب خمشی بتن آرمه متوسط + دیوار برشی بتن آرمه متوسط	۶	۲/۵	۴/۵	۵۰
	۴- قاب خمشی فولادی متوسط + دیوار برشی بتن آرمه متوسط	۶	۲/۵	۴/۵	۵۰
	۵- قاب خمشی فولادی ویژه + مهاربندی واگرای ویژه فولادی	۷/۵	۲/۵	۴	۲۰۰
	۶- قاب خمشی فولادی متوسط + مهاربندی واگرای ویژه فولادی	۶	۲/۵	۵	۷۰
	۷- قاب خمشی فولادی ویژه + مهاربندی همگرای ویژه فولادی	۷	۲/۵	۵/۵	۲۰۰
	۸- قاب خمشی فولادی متوسط + مهاربندی همگرای ویژه فولادی	۶	۲/۵	۵	۷۰
ث- سیستم کنسولی	۱- سازه‌های فولادی یا بتن آرمه ویژه	۲	۱/۵	۲	۱۰