

روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌ها

امیر کیانی^۱، جلال فلاح اصغری^۲

دانشجوی دکتری مهندسی عمران - مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله IIIES

کارشناس ارشد رشته مهندسی عمران - مهندسی زلزله، دانشگاه تبریز

Email: A.kiani@iies.ac.ir, amirkianii@yahoo.com

info@afzir.com

خلاصه

آسیب‌های وارد به ساختمانها در زلزله‌های اخیر ضرورت ارزیابی احتمال خرابی و میزان خسارت به ساختمانهای موجود را در برابر زلزله‌های آینده مطرح ساخته است. ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای به صورت تابعی از خطر سایت و مشخصه‌های سازه‌ای تعریف می‌شود. آسیب‌پذیری به طور کلی به صورت تابعی از رسیدن به سطح خرابی در یک شدت حرکت مشخص تعریف می‌شود و می‌توان آن را به صورت منحنی شکنندگی ارائه کرد. منحنی‌های شکنندگی شدت آسیب‌پذیری ساختمان‌ها را در برابر زلزله نشان می‌دهند. در این منحنی‌ها میزان آسیب‌پذیری به صورت احتمالاتی و در قالب تابعی از پارامترها، نظیر شدت زلزله و احتمال وقوع آن بیان می‌شود. این منحنی‌ها برای انواع سازه‌ها قابل ارائه می‌باشد و برای تعیین آنها از داده‌های آماری استفاده می‌شود که بستگی به نحوه به حساب آوردن عدم قطعیتها دارند.

روش‌های متعددی برای توسعه منحنی‌های شکنندگی ارائه شده است. در این مقاله با توجه به اهمیت این منحنی‌ها در برآورد خسارات احتمالی زلزله برای مقاصد برنامه‌ریزی‌های شهری و واکنش اضطراری در مناطق زلزله خیز، روش‌های مختلف معرفی شده و مزایا و معایب هر کدام شرح داده می‌شود

۱- مقدمه

ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای به صورت تابعی از خطر سایت و مشخصه‌های سازه‌ای تعریف می‌شود. آسیب‌پذیری به طور کلی به صورت تابعی از رسیدن به سطح خرابی در یک شدت حرکت مشخص تعریف می‌شود و می‌توان آن را به صورت ماتریس خرابی احتمالی، گرافیک بین نسبت خرابی میانگین و شدت حرکت زمین و یا به صورت منحنی شکنندگی ارائه کرد. تعیین آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌ها در ادبیات فنی با استفاده از منحنی‌های شکنندگی متداول می‌باشد منحنی‌های شکنندگی شدت آسیب‌پذیری ساختمان‌ها را در برابر زلزله نشان می‌دهند. در این منحنی‌ها نیز میزان آسیب‌پذیری به صورت احتمالاتی و در قالب تابعی از پارامترها نظیر شدت زلزله و احتمال وقوع آن بیان می‌شود. این منحنی‌ها برای انواع سازه‌ها قابل ارائه می‌باشد و برای تعیین آنها از داده‌های آماری استفاده می‌شود. داده‌ها از روش‌های مختلفی به دست می‌آیند که بستگی به نحوه به حساب آوردن عدم قطعیتها دارند. عدم قطعیتها ممکن است از تجارب میدانی، مطالعات آزمایشگاهی، و یا شبیه‌سازی عددی به دست آید.

۲- تصمیم‌گیری ریسک زلزله

زمین لرزه موجب آسیب رساندن به ساختمان‌ها، پل‌ها و سایر تأسیسات از طریق تحمیل تغییر شکل‌های بیش از حد و تنش‌های منته‌جه در اجزای تشکیل دهنده سازه‌ای و غیر سازه‌ای آنها می‌شود.

تعمیر این آسیب‌ها می‌تواند پرخرج باشد و مدت زمان لازم برای تعمیر کردن آسیب، می‌تواند موجب ضررهای اضافی قابل توجه به علت ایجاد وقفه در تجارت و از دست رفتن عواید و منافع و سایر اختلالات در کارکرد ساختمان و تأسیسات شود. این آسیب‌ها و زیان‌های اقتصادی اغلب برای به خطر انداختن اقتصاد و تهدید زندگی افراد، به اندازه کافی قابل توجه می‌باشند. از این رو نیاز و ضروری است که برای برآورد (تخمین زدن) یا مدل کردن تلفات زمین لرزه‌های آتی، برنامه‌ریزی و مدیریت جامعی انجام گیرد. [۴]

در سالهای گذشته شرکت‌های بیمه تمایل داشتند تا خطرهای ریسک‌هایی را که از طریق فروش بیمه‌های زلزله و سایر بیمه‌ها متحمل می‌شوند را برآورد کنند. شرکت‌های بیمه بویژه در صورت فراهم کردن پوشش بیمه زلزله، با دو چالش اساسی روبرو می‌شدند:

- توانایی پرداخت تعهدات: لازم بود که بیمه‌گران اطمینان یابند که یک زلزله مخرب که باعث خسارت فراوان می‌شود، شرکت بیمه را ورشکسته نکند.
- قابلیت سودبخشی: بیمه‌گران به درآمد حق بیمه کافی و مناسب برای پوشش دادن مطالبات و مخارج آتی نیاز دارند.

زمین‌لرزه‌ها رخدادهایی هستند که احتمال وقوع کم، پی‌آمد زیاد دارند و با سایر بیمه‌ها تفاوت دارند (پی‌آمد زیاد و احتمال کم HCLP). در هر حال ممکن است زلزله‌ای رخ بدهد که در گذشته ثبت نشده است و سطح و اثرات تلفات و خسارات آن تخمین زده نشده باشد. این نکته برای چنین شرکت‌هایی بسیار مهم می‌باشد. [۴]

سایر مثال‌هایی از این مورد که می‌توان اشاره کرد عبارتند از:

۱. یک تیم امداد و نجات واکنش اضطراری باید اطمینان یابد زمانی که یک زمین‌لرزه در یک ناحیه با تراکم جمعیت بالا (شلوغ) رخ می‌دهد، داده‌های کافی و مناسب برای امداد و نجات در دسترس می‌باشد. برای این منظور نقشه‌های تلفات احتمالی که از توابع آسیب‌پذیری تلفات انسانی بدست می‌آید و یا نقشه‌های مسدود شدن راه‌ها که از توابع آسیب‌پذیری سازه‌ای (منحنی‌های شکست) بدست می‌آید، باید در دسترس تیم امداد و نجات واکنش اضطراری قرار گیرد.

۲. یک شرکت وام‌دهنده تجاری (بانک‌ها) بایستی خسارات مربوط به کوتاهی وام‌گیرنده‌ها در بازپرداخت وام‌ها، بعد از اینکه زلزله سرمایه و دارایی‌های آنان را از میان می‌برد را کنترل کند. این احتمال عدم پرداخت بدهی، به درجه خسارت اموال که با استفاده از توابع آسیب‌پذیری لرزه‌ای پیش‌بینی می‌شود وابسته است.

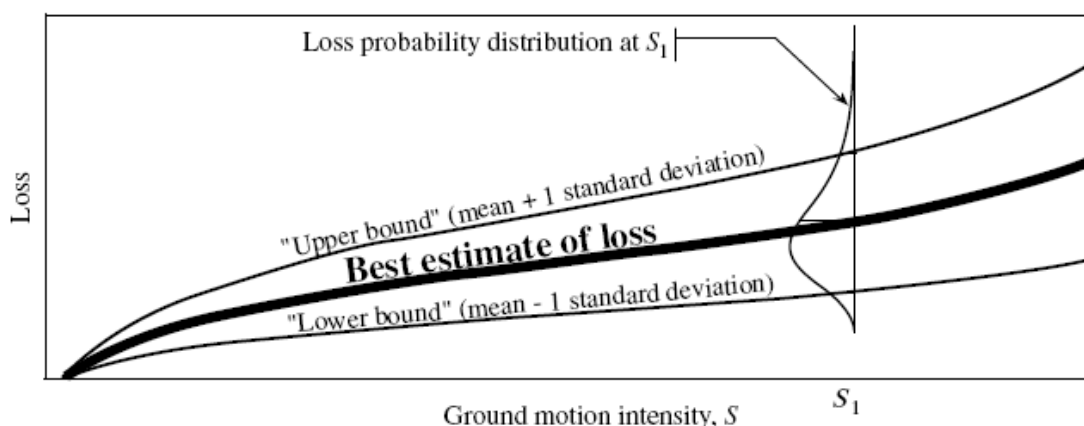
۳. یک شرکت تولیدکننده ممکن است تمایل داشته باشد تا احتمال وجود وقفه در تولید محصول کارخانه، که در اثر زلزله ایجاد می‌شود را کاهش دهد.

۴. نویسندگان آیین‌نامه‌های ساختمانی تمایل دارند هزینه تدارک یک آیین‌نامه جدید که باعث کاهش در خرابی آتی می‌شود را برآورد کنند.

در هر حالت، یک رویکرد آماری خالصانه مبتنی بر آزمایش و تجربیات گذشته برای برآورد معتبر پتانسیل خسارات آتی ناکافی است. ابزار لازم برای غلبه و چیره شدن بر این کمبودها و ناکارایی‌ها، آنالیز تحلیل ریسک احتمالی است. یک تحلیل خطر احتمالی^۲ (PRA)، احتمال وقوع زلزله‌های آینده را تعیین کرده (خطر لرزه‌ای) و آسیب یا خسارت مشروط بر عوامل و آثار زمین‌لرزه در محل را مشخص می‌کند.

۳- مفهوم و استفاده از توابع آسیب‌پذیری لرزه‌ای

تحلیل خطر احتمالی در حالت کلی، آسیب را به عنوان یک تابع نامعلوم شدت بیان می‌کند یک چنین تابع آسیب‌پذیری لرزه‌ای احتمالی بطور نمونه در شکل (۱) نمایش داده شده است. که در آن محور عمودی پیش‌بینی آسیب به عنوان یک تابع از شدت لرزه‌ای می‌باشد. آسیب را می‌توان بر حسب هزینه تعمیر خرابی، شمار مرگ و میر یا مصدودمان (آسیب‌دیدگان) و غیره، بدست آورد. شکل (۱-۱) سه سطح خسارات را نشان می‌دهد. [۴]



شکل (۱): تعریف منحنی خسارات [۴]

۱- High Consequence - Low Probability

۲- Probabilistic Risk Analysis

در شکل (۱)، همچنین چگالی احتمال خسارت در یک شدت ارتعاش ویژه به صورت شماتیک نمایش داده شده است. شدت به درجه‌ی تحریک لرزه‌ای یا سایر اثرات زلزله که در محل‌های ویژه‌ای تجربه شده است، اشاره دارد. این شدت می‌تواند شدت حرکت زمین باشد. (نقطه پیک شتاب زمین - پاسخ طیفی مختلف، شدت Arias و...)

خسارت (ضرر) نیز برای محاسبه کردن شدت یک پی‌آمد نامطلوب و ناخوشایند از قبیل هزینه تعمیر، مبلغ درخواست بیمه (حق بیمه)، شمار مرگ و میر و غیره بکار برده می‌شود که می‌تواند گسسته یا پیوسته باشد.

۴- انواع گونه‌های سازه‌ای

دستورالعمل‌های Hazus, ATC-13، ساختمان‌ها را به روش‌های مختلفی دسته‌بندی می‌کنند. کاربری ساختمان، عمر ساختمان، مصالح ساختمانی، سیستم مقاوم نیروی جانبی، ارتفاع، آیین‌نامه ساختمانی به کار گرفته شده و کیفیت، پارامترهایی هستند که در این دسته‌بندی تاثیرگذار می‌باشند. در ادامه به دو دسته‌بندی سازه‌ای اشاره می‌کنیم. [۴]

ATC-13: انجمن فناوری‌های کاربری [ACT013,1985] یک طبقه‌بندی جامع از سازه‌ها و توابع آسیب‌پذیری لرزه‌ای را توسعه داده است. (صنایع کالیفرنیا، تجارت (بازرگانی)، صنعت مسکن، صنایع همگانی (مانند آب و برق)، ساختمان‌های سیستم حمل و نقل (ترابری)، ساختمانهای مسکونی کالیفرنیا [e.g. FEMA, 273, 1997]).

در این گزارش سازه‌های ساختمانی توسط سه پارامتر اساسی دسته‌بندی شده‌اند که عبارتند از:

(۱) مصالح: شامل مصالح چوب، مصالح بنایی تقویت شده، مصالح بنایی تقویت نشده، فولاد، بتن مسلح درجا، بتن پیش ساخته، فلزات سبک

(۲) سیستم مقاوم نیروی جانبی: قاب مقاوم خمشی (توزیع شده یا پیرامونی)، قاب مهاربندی شده، قاب خمشی صلب، دیوار برشی (با قاب یا بدون قاب)

(۳) حدود ارتفاع: کوتاه مرتبه (۱ تا ۳ طبقه)، میان مرتبه (۴ تا ۶ طبقه) و بلند مرتبه (۷ یا بیشتر طبقه)

HAZUS 99: بیشتر دسته‌بندی ساختمان‌های (1999) HAZUS، مشتق گرفته از دستورالعمل ATC-13 و رده‌بندی ۳۶ کلاس (مرتبه) سازه‌ای است که انواع مدل ساختمان نامیده می‌شود. در بخش‌های بعدی به صورت مفصل به سازه‌ها و روش ارائه شده در HAZUS برای تولید منحنی‌های شکست پرداخته می‌شود.

۵- تفاوت شکنندگی با آسیب‌پذیری

این مهم است که تشخیص دهیم بین دو ضابطه مربوط به آسیب‌پذیری لرزه‌ای و شکنندگی چه تفاوتی وجود دارد. همانطور که در بخش قبلی بحث شد، یک تابع آسیب‌پذیری لرزه‌ای، خسارت (ضرر مالی) را به عنوان یک تابعی از تحریک تعریف می‌کند در مقابل یک تابع شکنندگی، احتمال وقوع چندین رخداد ناخوشایند (خسارت فیزیکی) را به عنوان یک تابع تحریک تعریف می‌کند. برای مثال، یک تابع شکنندگی می‌تواند احتمال اینکه در اثر زلزله یک ساختمان ویران خواهد شد (خسارت فیزیکی) را بدست آورد و یا احتمال اینکه یک کارخانه ممکن است مواد خطرناک در اتمسفر رها کند. [۴]

۶- انواع روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری

روش‌های مختلفی برای ارزیابی خرابی ایجاد شده در سازه بر اثر زلزله موجود می‌باشند. به طور کلی این روش‌ها را می‌توان در گروه‌های زیر طبقه‌بندی کرد:

(۱) روش‌های طبقه‌بندی، (۲) روش‌های اولویت‌بندی و امتیازدهی، (۳) روش‌های تحلیلی و (۴) روش‌های آزمایشگاهی

- روش‌های طبقه‌بندی: این روش‌ها به صورت کلی بر مبنای مشاهدات خرابی ناشی از زلزله‌های گذشته هستند. به صورت معمول برای انواع مختلف سازه‌ها، توابع آسیب‌پذیری حاصل از این روش‌ها، رابطه‌ای بین درصد خرابی و یک معیار شدت حرکت زمین مانند شدت مرکالی اصلاح شده، حداکثر شتاب زمین، حداکثر سرعت زمین، حداکثر جابجایی زمین و یا کمیت‌های طیفی را بیان می‌کند.

- روش‌های اولویت‌بندی و امتیازدهی: در این روش‌ها با توجه به شرایط لرزه‌خیزی و شرایط ساخت و ساز، بر اساس مشاهدات خرابی زلزله‌های گذشته فرم‌های امتیازدهی ویژه‌ای تهیه می‌شوند. بازرسان سازه‌ها با استفاده از این فرم‌ها به هر یک از عوامل موثر بر آسیب‌پذیری لرزه‌ای سازه

از قبیل وضعیت کاربری، اهمیت سازه، سیستم‌های باربر قائم و لرزه‌ای جانبی، کیفیت اتصالات، شکل‌پذیری اعضا، نحوه‌ی ساخت، شرایط محل ساخت، وضعیت پی و ... امتیازاتی را اختصاص می‌دهند. با جمع زدن امتیازات می‌توان تشخیص داد که سازه مورد نظر آسیب‌پذیر است یا خیر. در صورتی که توسط این روش سازه آسیب‌پذیر و نیازمند بهسازی شناخته شود. برای ارزیابی آسیب‌پذیری سازه‌ها با این روش، دستورالعمل‌هایی برای انواع مختلف سازه‌ها تهیه شده است که از آن جمله می‌توان به دستورالعمل ارائه شده توسط ATC-21 برای ارزیابی آسیب‌پذیری سازه‌های ساختمانی اشاره کرد.

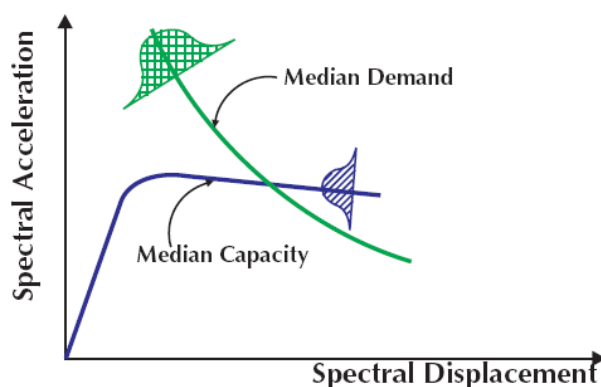
- روش‌های تحلیلی ارزیابی آسیب‌پذیری: روش‌های تحلیلی ارزیابی آسیب‌پذیری بر مبنای انجام تحلیل بر مدل‌های ریاضی سازه بنا شده‌اند. با اعمال زلزله‌های مختلف با شدت‌های مختلف به سازه و انجام تحلیل بر روی مدل ریاضی سازه، مقادیر مختلف آسیب (شاخص‌های آسیب) محاسبه می‌شوند. روش‌های تحلیلی نسبت به دو روش طبقه‌بندی و امتیازدهی دقیق‌تر و هزینه برتر می‌باشند.

- روش‌های آزمایشگاهی ارزیابی آسیب‌پذیری: در روش‌های آزمایشگاهی، پاسخ لرزه‌ای مدلی از سازه یا جزء سازه‌ای توسط انجام آزمایش‌های سیکلیک استاتیکی، دینامیکی و یا شبه دینامیکی تعیین می‌گردد.

۷- شکنندگی لرزه‌ای سازه‌ها

برای یک سازه مشخص سطحی از حرکت زمین که منجر به رسیدن به سطح خاصی از پاسخ یا حالت خرابی می‌شود، به صورت تعیینی بدست می‌آید. در این پروسه‌ی تعیینی علاوه بر فرض کردن مشخصات مصالح و سایر خواص سازه‌ای که روی ظرفیت کلی سازه تأثیر می‌گذراند، فرضیات قطعی در مورد حرکت زمین و شرایط محلی خاک صورت می‌پذیرد که این هر دو عامل بر تقاضای لرزه‌ای تأثیرگذار هستند. اما در حقیقت مقادیر این پارامترها به صورت دقیق و تعیینی در دست نمی‌باشند و دارای طبیعتی تصادفی و احتمالاتی می‌باشند و مقادیرشان با عدم قطعیت‌هایی همراه است.

یکی از روش‌های معمول رو به گسترش برای مشخصه‌سازی طبیعت احتمالاتی پدیده‌های مورد بحث استفاده از منحنی‌های شکنندگی می‌باشند. در واقع شکنندگی عدم قطعیت‌ها در ظرفیت و تقاضای سازه‌ای را برای تعیین عملکرد سازه‌ای منعکس می‌سازد. در یک تحلیل تعیینی نقطه‌ای برخورد دو منحنی ظرفیت و تقاضا سطح عملکرد مورد انتظار ساختمان را بدست خواهد داد و عملکرد سازه یک نقطه معین خواهد بود. اما با توجه به عدم قطعیت‌ها در ظرفیت و تقاضای سازه‌ای محدوده‌ی گسترده‌ای از عملکرد احتمالی وجود خواهد داشت و یک نقطه‌ی مشخص و پاسخ قطعی وجود نخواهد داشت. این مسأله در شکل (۱) نشان داده شده است. شکل (۲) طیف شتاب - تغییر مکان حرکت زمین و منحنی ظرفیت پوش اور یک سازه را نشان می‌دهد. توزیع‌های احتمالاتی ظرفیت و تقاضا بر روی منحنی‌های ظرفیت و تقاضا نشان داده شده‌اند و عدم قطعیت و طبیعت تصادفی عملکرد مشاهده می‌گردد. هم چنین شکل نشان می‌دهد چگونه عدم قطعیت ذاتی و طبیعت تصادفی ظرفیت در برابر تقاضای لرزه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد تا منحنی‌های شکنندگی تولید شوند.



شکل (۲): منحنی ظرفیت در مقابل طیف تقاضا

تئوری شکنندگی یکی از بخش‌های کلی قابلیت اطمینان سازه‌ای است. شکنندگی آسیب‌پذیری یک سازه را که به برخی پارامترهای ورودی وابسته (مشروط) است بیان می‌کند.

برای بارگذاری لرزه‌ای، شکنندگی لرزه‌ای به صورت ساده احتمال بزرگ‌تر بودن تقاضای لرزه‌ای سازه (D) از ظرفیت سازه (C) را نشان می‌دهد. این بیان

احتمالاتی که به یک مقیاس شدت حرکت زمین (IM) که سطح بارگذاری لرزه‌ای را نشان می‌دهد مشروط می‌باشد، به صورت رابطه زیر نمایش داده می‌شود:

$$P\langle D \geq C | (IM) \rangle \quad (1)$$

رابطه‌ی فوق را می‌توان با توسعه‌ی توزیع احتمالاتی تقاضای مشروط به مقیاس شدت IM که به عنوان مدل احتمالاتی تقاضای لرزه‌ای نامیده می‌شود، و توزیع احتمالاتی ظرفیت برآورد نمود.

اگر ظرفیت و تقاضای لرزه‌ای در رابطه‌ی فوق، متغیرهای تصادفی با توزیع احتمالاتی نرمال و یا لوگ نرمال در نظر گرفته شوند با استفاده از قضیه حد مرکزی می‌توان نشان داد که شکندگی و یا همان عملکرد حاصله دارای توزیع لوگ نرمال خواهد بود، بنابراین توزیع احتمالاتی منحنی‌های که منحنی‌هایی شکندگی نامیده می‌شوند به صورت تابع چگالی احتمالاتی تجمعی لوگ نرمال خواهد بود.

برای تعریف چنین منحنی‌هایی تنها دو پارامتر میانگین و انحراف از معیار لگاریتمی مورد نیاز است.

عبارت احتمال شرطی شکندگی را به صورت دیگری نیز می‌توان بیان کرد. با توجه به این که منحنی‌های شکندگی، احتمال تجاوز تقاضای سازه‌ای را از سطح خاصی از خرابی، نسبت به پارامتر شدت حرکت زمین می‌دهند. سطح خرابی (حالت خرابی) به ظرفیت سازه‌ای مرتبط می‌شود و شدت حرکت زمین به تقاضای سازه‌ای نسبت داده می‌شود. بنابراین مدل مناسبی برای ارزیابی شکندگی یک سیستم سازه‌ای که احتمال تجاوز تقاضای سازه‌ای از ظرفیت سازه‌ای را تعیین می‌کند، را می‌توان به صورت رابطه زیر نمایش داد:

$$P_f = P\left[\frac{S_d}{S_c} \geq 1\right] \quad (2)$$

که در آن: P_f احتمال رسیدن یا تجاوز از یک حالت خرابی خاص می‌باشد، S_c تقاضای سازه‌ای و S_d ظرفیت سازه‌ای می‌باشد. بنابراین حل بسته‌ی شکندگی به صورت رابطه زیر خواهد بود:

$$P_f = \Phi\left(\frac{\ln\left(\frac{S_d}{S_c}\right)}{\sqrt{\beta_d^2 + \beta_c^2}}\right) \quad (3)$$

که در آن: Φ توزیع استاندارد نرمال می‌باشد، S_c مقادیر میانگین ظرفیت سازه‌ای، β_c انحراف استاندارد لگاریتمی ظرفیت سازه‌ای، S_d میانگین تقاضای لرزه‌ای و β_d انحراف استاندارد لگاریتمی تقاضا می‌باشد.

عبارت $\sqrt{\beta_d^2 + \beta_c^2}$ در برخی مراجع فقط به شکل β_c و به عنوان ضریب تغییرات لوگ نرمال مرکب نرمالیز شده که هر دو جنبه‌ی تصادفی بودن و عدم اطمینان در ظرفیت و تقاضا را در خود دارد. این رابطه را می‌توان بر حسب شتاب طیفی و شتاب طیفی میانگین به صورت رابطه زیر نمایش داد:

$$F(S_a) = \Phi\left(\frac{\ln\left(\frac{S_a}{A_i}\right)}{\beta_c}\right) \quad (4)$$

در این رابطه: S_a دامنه‌ی شتاب طیفی برای پریود مشخص، A_i میانگین شتاب طیفی مورد نیاز (و یا مقدار مورد انتظار) برای رخ دادن حالت خرابی آام و β_c انحراف از معیار لوگ نرمال مرکب نرمالیز شده است که عدم قطعیت‌ها و تصادفی بودن ظرفیت و تقاضا را در بر دارد. که ضریب تغییرات و یا ضریب پراکندگی نیز نامیده می‌شود.

۸- روش‌های تولید منحنی‌های شکنندگی

روش‌های متعددی برای توسعه منحنی‌های شکنندگی ارائه شده است بنا بر آنچه در ادبیات فنی آمده است منحنی‌های شکنندگی بسته به اینکه اطلاعات لازم برای بدست آوردن آنها بر اساس مشاهده زلزله‌های گذشته، قضاوت‌های مهندسی، روشهای تحلیلی و یا ترکیب اینها باشد به ترتیب به چهار دسته تقسیم می‌شوند:

- منحنی‌های شکنندگی تولید شده بر مبنای قضاوت کارشناسان

- منحنی‌های شکنندگی تولید شده بر مبنای داده‌های تجربی از زلزله‌های گذشته

- منحنی‌های شکنندگی حاصل از نتایج مدل‌های تحلیلی.

- هیبرید

روش اول که مبنای دستورالعمل ATC-13 قرار داده شده است، مواقعی مورد استفاده قرار می‌گیرد که اطلاعات و مشاهدات کافی برای رسم منحنی‌های شکنندگی در دسترس نبوده و مبنای آن قضاوت کارشناسان باتجربه در مورد احتمال رسیدن به سطح خاصی از خرابی است. امروزه استفاده از این روش با توجه به قابل اعتماد نبودن نتایج آن چندان منطقی به نظر نمی‌رسد.

روش دوم که از ثبت و بررسی خسارات وارد به سازه‌ها از زلزله‌های گذشته حاصل می‌شود واقع بینانه‌ترین نوع این منحنی‌ها به شمار می‌رود چرا که تمامی شرایط و جزئیات از قبیل اندر کنش خاک و سازه، توپوگرافی و مشخصات منطقه را در درون خود دارند. هم‌چنین با تکمیل اطلاعات مربوط به خرابی سازه‌ها در طول زمان نتایج آن قابل اعتمادتر می‌شود. با این وجود نتایج این روش به خصوصیات لرزه‌ای و ژئوتکنیک منطقه‌ای که اطلاعات از آن جمع‌آوری شده است، بستگی دارد. هم‌چنین ممکن است خسارات مربوط به زلزله‌های متوالی را نتوانیم از هم تفکیک کنیم. از طرفی این منابع به صورت خیلی اختصاصی به موقعیت‌ها و شرایط بناهای خاص که معمولاً نیز در مناطق پرجمعیت هستند تعلق دارند، همین موضوع نیز کاربرد و استفاده از این منحنی‌ها را خیلی محدود می‌کند.

منحنی‌های شکنندگی تولید شده بر مبنای قضاوت کارشناسی ابزار ساده‌ای برای در نظر گرفتن تمام فاکتورهایی که بر خرابی روی سازه تأثیر می‌گذارند را فراهم می‌آورد. با این حال منحنی‌های بر مبنای قضاوت کارشناسی بسیار مبتنی بر نظر شخصی و وابسته به مهارت در تصمیم‌گیری کارشناسانه می‌باشند.

موسسه تکنولوژی‌های کاربردی ATC در پروژه‌ی ATC-13 فعالیت و تلاش زیادی برای جمع‌آوری داده‌های خرابی زلزله در کالیفرنیا صورت داد.

منحنی‌های شکنندگی تجربی مشکلات متعددی شامل کمبود داده برای تمام حالت‌های خرابی، تعریف بدون تصدیق حالت‌های خرابی، کمبود همبستگی نتایج با هندسه‌ی سازه و مشخصه‌های سازه‌ای دیگر دارند. از طرف دیگر داده‌های موجود محدودیت دارند، زیرا داده‌های جمع‌آوری شده مختص به یک سازه‌ی خاص، شرایط محلی خاک و حرکت زمین خاص خود هستند و برای مقاصد عمومی قابل کاربرد نیستند. هم‌چنین منحنی‌های شکنندگی تولید شده از داده‌های خرابی پس از زلزله نتایج منطقی‌تری نسبت به منحنی‌های شکنندگی تحلیلی می‌دهند زیرا بر مبنای داده‌های خرابی سازه‌ی واقعی ناشی از یک حرکات واقعی زمین می‌باشند.

تولید منحنی‌های شکنندگی سازه‌ها در طول زمان از صورت روش‌های تجربی به روش‌های تحلیلی تبدیل شده است. مقایسه‌ی منحنی‌های شکنندگی تجربی و تحلیلی توافق خوبی بین تئوری و مشاهدات میدانی برای زلزله‌ها نشان داده‌اند.

۹- منحنی‌های شکنندگی تحلیلی

منحنی‌های شکنندگی تحلیلی با استفاده از داده‌های پاسخ لرزه‌ای تحلیلی بر روی سازه‌ها تولید می‌شوند. با انجام تحلیل بر روی مدل‌های فیزیکی و تحلیل‌های همبستگی روی نتایج حاصله، پارامترهای منحنی شکنندگی تعیین می‌گردند و برای هر حالت خرابی منحنی‌های شکنندگی با استفاده از توزیع لوگ نرمال رسم می‌شوند. داده‌های پاسخ لرزه‌ای را می‌توان از تحلیل‌های الاستیک طیفی، استاتیکی غیرخطی و یا تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی بدست آورد.

منحنی‌های شکنندگی تحلیلی با استفاده از روش‌های تحلیل الاستیک طیفی، استاتیکی غیرخطی (شینوزوکا در سال ۲۰۰۰) و یا تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی (شینوزوکا در سال ۲۰۰۰) در سال‌های اخیر توسعه داده شدند.

روش‌های استاتیکی غیرخطی روش میانه‌ای بین آنالیزهای تاریخچه زمانی غیرخطی با تلاش کامپیوتری زیاد و روش ساده شده‌ی الاستیک طیفی می‌باشند.

روش‌های استاتیکی غیرخطی نسبت به روش الاستیک طیفی با توجه به در نظر گرفتن رفتار غیرخطی سازه تحت بار استاتیکی دارای مزیت‌های بیشتری هستند. شینوزوکا و همکاران در سال ۲۰۰۰ از روش طیف ظرفیت برای آنالیزهای شکنندگی پل‌های ممفیس استفاده کردند. این روش از تقاطع منحنی‌پوش اور با طیف پاسخ کاهش یافته استفاده می‌کند. نیلسون و باورز در سال ۲۰۰۷ با مقایسه‌ی نتایج روش استاتیکی غیرخطی با روش‌های دینامیکی غیرخطی مشاهده کردند توافق بین منحنی‌های شکنندگی تولید شده با روش استاتیکی غیرخطی و روش‌های تاریخچه زمانی غیرخطی با افزایش اثرات غیرخطی کاهش می‌یابد. روش طیف ظرفیت پایه‌ای برای این منحنی‌ها می‌باشد و روش بکار گرفته شده در Hazus نیز این روش می‌باشد.

روش‌های تحلیلی تاریخچه زمانی دینامیکی غیرخطی از قابل اعتمادترین روش‌های تحلیلی برای تولید منحنی‌های شکنندگی می‌باشند. در این روش پاسخ لرزه‌ای سازه با اعمال حرکات زمین لرزه‌های مختلف به صورت تاریخچه زمانی غیرخطی، شبیه‌سازی می‌شود. در این روش‌ها با توجه به در نظر گرفتن بارگذاری دینامیکی واقعی، رفتار غیرخطی سازه‌ها به صورت دقیق‌تر و با فرضیات ساده کننده‌ی کمتری بدست خواهد آمد.

منحنی‌های شکنندگی تولید شده توسط آنالیزهای دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی

مهم‌ترین روش‌ها در توسعه منحنی‌های شکنندگی تحلیلی سازه‌ها استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی می‌باشد. این روش زمان برترین و در عین حال قابل اعتمادترین روش تحلیلی می‌باشد.

گزارش PEER502 پروسه‌ی تولید منحنی‌های شکنندگی با استفاده از تحلیل‌های تاریخچه زمانی را به صورت زیر بیان می‌کند:

- تولید مدل فیزیکی مناسبی از سازه مورد مطالعه
- تهیه مجموعه‌ای از تاریخچه زمانی‌های شتاب زلزله به نحوی که سطوح مختلفی از شدت حرکت زمین را در خود داشته باشند.
- انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی برای مدل و شبیه‌سازی مجموعه‌ای از داده‌های پاسخ سازه
- انجام آنالیز رگرسیون روی داده‌های پاسخ شبیه‌سازی شده و بدست آوردن مشخصه‌های احتمالی تقاضای سازه‌ای به صورت تابعی از پارامتر حرکت زمین
- تعریف حالت‌های خرابی سازه و بدست آوردن مشخصه‌های احتمالی متناظر با هر حالت خرابی
- محاسبه‌ی احتمال شرطی تجاوز تقاضای سازه‌ای از ظرفیت سازه‌ای برای سطوح مختلف از حرکت زمین.
- رسم منحنی‌های شکنندگی به صورت تابعی از پارامتر حرکت زمین انتخاب شده.

روش تاریخچه زمانی غیرخطی به صورت‌های مختلفی توسط شینوزوکا و همکاران در سال ۲۰۰۰، النشای و همکاران در سال ۲۰۰۴، توسعه داده شد. با وجود برخی تفاوت‌ها در روش‌ها، پروسه‌ی کلی برای توسعه‌ی منحنی‌های شکنندگی تحلیلی با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی صورت گرفته شده می‌باشد. گام اولیه انتخاب مجموعه‌ای از حرکات زمین لرزه برای ناحیه مورد بررسی می‌باشد. هر چه مجموعه حرکات زمین عدم قطعیت‌های ذاتی در منبع زلزله، انتشار امواج، و شرایط محلی خاک را بیشتر در بر بگیرد باعث انتشار این عدم قطعیت‌ها در منحنی‌های شکنندگی خواهد شد. در نواحی با زمین لرزه‌های ثبت شده مانند ژاپن و کالیفرنیا رکوردهای زمین لرزه‌های گذشته مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نواحی با شدت لرزه‌خیزی متوسط، مانند مرکز و جنوب شرق آمریکا و همچنین در مناطقی که رکوردهای حرکت شدید زمین کم می‌باشند (همانند کشور خودمان)، معمولاً حرکات زمین مصنوعی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۱۰- نتیجه‌گیری:

در این مقاله روش‌های مختلف توسعه منحنی شکست برای ساختمان‌ها مورد بحث قرار گرفته شد و مشاهده شد که منحنی‌های تولید شده بر مبنای قضاوت کارشناسان با توجه به قابل اعتماد نبودن نتایج آن چندان منطقی به نظر نمی‌رسد و منحنی‌های تجربی بدست آمده از داده‌های خرابی پس از زلزله نتایج منطقی‌تری نسبت به منحنی‌های شکنندگی تحلیلی می‌دهند، زیرا بر مبنای داده‌های خرابی سازه‌ی واقعی ناشی از یک حرکات واقعی زمین می‌باشند. روش‌های تحلیلی تاریخچه زمانی دینامیکی غیرخطی نیز از قابل اعتمادترین روش‌های تحلیلی برای تولید منحنی‌های شکنندگی می‌باشند.

1. ATC (1985). "Earthquake damage evaluation data for California. " Tech. Rep. ATC-13, Applied Technology Council.
2. ATC (1991). "Seismic vulnerability and impact of disruption in the conterminous united states." Tech. Rep. ATC-25, Applied Technology Council.
3. Basoz, N. and Kiremidjian, A.S. (1998). "Evaluation of Bridge Damage Data from the Lama Prieta and Northridge, CA Earthquakes." Technical Report MCEER-98-0004, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York.
4. Chen Wai-Fah, Charles Scawthorn, "Earthquake Engineering Handbook", Boca Raton London New York Washington, D.C. 2003.
5. Dutta, A. and Mander, J. B. (1998). "Seismic fragility analysis of highway bridges." INCEDEMCEER Center-to-Center Workshop on Earthquake Engineering Frontiers in Transportation Systems, Tokyo, Japan.
6. Dutta, A. (1999). "On Energy-based seismic analysis and design of highway bridges." Ph.D. Dissertation. Science and Engineering Library, University at Buffalo, state University of New York, Buffalo, New York.
7. Elnashai, A., Borzi, B., and Vlachos, S. (2004). "Deformation-based vulnerability functions for RC bridges." Structural Engineering and Mechanics, 17(2): 215-244.
8. Nailem F, "Earthquake Engineering Handbook".
9. Kircil MS, Polat 7. fragility analysis of mid-rise RIC frame buildings. Journal of Engineering Structures 2006; 28, 1335-45.
10. HAZUS99 User's Manual (1999). Federal Emergency Management Agency, Washington, D. C.
11. Peckan, G., (1998). "Design of seismic energy dissipation systems for concrete and steel structures." Ph.D. Dissertation. University at Buffalo, State University of New York, Buffalo, New York.
12. Rarnamoorthy SK, Gardoni P, Bracci JM. Probabilistic demand models and fragility curves for reinforced concrete frames .Eng Structure 2006; 132(1 0).
13. Reinhorn AM, Barron-Corvera R, Ayala AG. Spectral evaluation of seismic fragility of structures structural safety and reliability .In:ICOSSAR 2001.
14. Rossetto T, Elnashai A. Derivation of vulnerability functions European-type RC structures based on observational data. Eng Structure 2003 ;25(10): 1241-63.
15. Shinozuka, M., Feng, M. Q., Kim, H., and Kim, S. (2000). "Nonlinear static procedure for fragility curve development." Journal of Engineering Mechanics, ASCE 2000, 126(12): 1287-95.
16. Shinozuka, M., Feng, M. Q., Lee, 1., Naganuma, T. (2000). "Statistical analysis of fragility curves." Journal of Engineering Mechanics, ASCE 2000, 126(12): 1224-3 1.
17. Shinozuka, M. and Kim, S,H. (2004). "Development of fragility curves of bridges Retrofitted by Column Jacketing." Journal of Probabilistic Eng. Mechanics, 19, 105-1 12.
18. Shinozuka, M., Feng, M. Q., Kim, H., Uzawa, T., and Ueda, T. (2003). "Statistical analysis of fragility curves." Tech. Rep. MCEER-03-0002, MCEER.
19. Wen YK, Ellingwood BR, Bracci JM. Vulnerability function. Mid-America Earthquake Center, Univ. of Illinois, Technical Rep. No. DS-4, Champaign, III, 2004.