نگاهی اجمالی بر فلسفه های طراحی مقاوم

گردآوری و تنظیم: هاله ملکی، دانشجوی دکترای مهندسی زلزله پژوهشگاه

۱- چکیده

در این مقاله مفاهیمی که می‌تواند در کنار مفهوم مقاومت، در طراحی سازه‌ها مبنای عمل قرار گیرند به اجمال بررسی شده است. ابتدا مفاهیم اساسی در طراحی ساختمانها و اهداف کلی در طراحی لرزه‌ای مرور- گردیده است. سپس، در هر مورد به چگونگی شکل گیری ایدهٔ استفاده از این مفاهیم، تلاشهای صورت گرفته برای بیان کمّی مسائل، دامنهٔ کاربرد و نمونه های عملی در استفاده از آنها اشاره شده است. این مفاهیم عبارتند از: عملکرد، قابلیت اعتماد، انرژی، جا به جایی و ظرفیت سازه.

۲- مقدمه

رخداد زمین لرزه های شدید طی دههٔ گذشته و مشاهدهٔ آثار زیانبار آنها، نقایص و کاستیهای موجود در روشهای طراحی و اجرای سازه ها را بار دیگر نمایان ساخت. روش کنونی طراحی سازه ها، بر مبنای طراحی به روش مقاومت است که شامل تخمین برش پایه در سازه و توزیع آن در ارتفاع و تعیین مقاومت مورد نیاز اجزای سازه‌ای در برابر این بار می‌باشد. صرفنظر از کاستیهایی که در این روش وجود دارد، بیان رفتار اجزای سازه ای از طریق تک پارامتر مقاومت (مقاومت تسلیم یا مقاومت نهایی بسته به روش طراحی) در بسیاری موارد منطقی به نظر نمی‌رسد. تعیین ظرفیتها بر این اساس، رفتار واقعی سازه را مشخص نمی کند؛ زیرا، رفتار سازه، ترکیب به هم آمیخته و درهم تنیدهٔ اجزای آن است و اجزای سازه هر کدام بسته به کارایی موردنظر وجنس خود دارای ویژگیهای رفتاری متفاوتی هستند (رفتار هیسترتیک، مقاومت، شکل پذیری، خستگی کم چرخه و ...). بدین ترتیب، یافتن روشی هماهنگ با این ویژگیها ضروری به نظر می‌رسد؛ همان گونه که مدّنظر قرار دادن پارامترهای بیان کننده عملکرد و قابلیت اعتماد سازه نیز اهمیت بسزایی دارد.

در این مقاله، تلاشهای صورت پذیرفته در جهت ارائهٔ دیدگاههای جدید در طراحی مقاوم سازه ها، به صورت خلاصه بررسی می‌شود. هر چند این مفاهیم و فلسفه ها به صورت مجزا و منفرد، ناقص و مبهم و ناکارا به نظر می‌رسند، اما مجزاسازی آنها به منظور تمرکز بر مفاهیم پایهٔ مستتر در آنها صورت پذیرفته است.

۳- مفاهیم پایه

هدف اصلی طرح، پیشنهاد یک سیستم مؤثر فنی و اقتصادی است که بارها و یا جا به جاییهای ناشی از تحریکات محیطی را بخوبی انتقال دهد و یا در برابر آنها مقاومت کند؛ بنابراین هدف، ساخت سازهٔ بهینه است [۱]. بر این اساس ضوابط طرح، قوانین کلی هستند که رعایت آنها اهداف طرح را تأمین می کند [۲]. این اهداف عبارتند از: ایمنی، عملکرد و اقتصاد.

٤- فلسفه کلی طرح مقاوم در برابر زمین لرزه

فلسفه طرح مقاوم در برابر زمین لرزه عبارت است از:

۱- جلوگیری از خسارتهای سازه ای و غیرسازه ای در زمین لرزه‌های کوچک با فراوانی بالا؛

۲- جلوگیری از خسارتهای سازه ای و حداقل نمودن آسیبهای غیرسازه ای در زمین لرزه های متوسط گهگاهی؛

۳- جلوگیری از فروریزش یا آسیب جدی در زمین لرزه های شدید و نادر.

طرح ایده آل مقاوم در برابر زمین لرزه باید بتواند اهداف عمومی طراحی را با تأمین سختی، مقاومت و اتلاف انرژی موردنیاز، با صرف کمترین هزینه اضافی در ساخت، تعمیر و نگهداری و کمترین تغییر در طرح معماری ایجاد شده برای بارهای ثقلی، در بر گیرد [۳].

٥- طرح بر پایه عملکرد (Performance Based Design)

رفتار و عملکرد سازه‌ها در طول زمین لرزه و پس از آن مبیّن

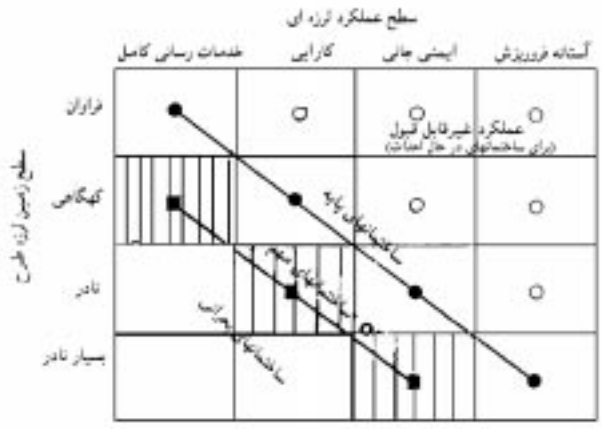
مقاومت سازه ها در برابر زمین لرزه است؛ بنابراین، عملکرد سازه را می‌توان به عنوان معیاری در طراحی ساختمانها در نظر گرفت.

۵-۱- ماهیت طراحی بر پایهٔ عملکرد

طراحی مقاوم لرزه ای بر پایه عملکرد، روندی است که از مراحل ابتدایی طراحی آغاز می‌شود و در طول عمر سازه ادامه می‌یابد. این روند شامل تعیین خطر لرزه ای، انتخاب سطوح مختلف عملکرد و عملکرد هدف در هر سطح، بررسی مناسب بودن ساختگاه، طراحی مفهومی، طرح محاسباتی مقدماتی و نهایی، کنترل طرح محاسباتی، کنترل کیفیت اجرا، ترمیم و بازسازی در طول عمر ساختمان می‌باشد [٤].

اساس این روش، فلسفهٔ طرح جامع است که در سال ١٩٦٤ توسط سویر بیان شد [٥]. در این روش مقاومت سازه در حالات حدی مختلف شکست، به احتمال اینکه خسارت ایجاد شده به حدی برسد که این حالت حدی قابل تعریف باشد، مربوط می‌شود، به گونه ای که هزینه کل (هزینه اولیه به اضافه خسارت مورد انتظار در هر مرحله) حداقل شود. یک سازه در زمین لرزه های مختلف، پاسخهای متفاوتی نشان می دهد که میزان خسارات گوناگونی دارند. بدین ترتیب حالات حدی سازه شامل گسترهٔ وسیعی از حالات از "عدم خسارت" تا "فروریزش" خواهد بود [٤].

سطوح عملکرد پیشنهادی *SEAOC* (حالات حدی رفتار سازه) شامل خدمات رسانی و کارایی کامل، کارایی، ایمنی جانی و آستانه فروریزش می‌باشد[٦]. این سطوح از خطر لرزه ای مستقلند؛ اما، هرگاه برای هر سطح از زمین لرزه (فراوان، کم، نادر، بسیار نادر) عملکرد خاصی در نظر گرفته شود، ماتریس عملکرد هدف حاصل می‌شود (شکل ١). در تعیین عملکرد هدف، دورهٔ بازگشت زمین لرزه های سطوح مختلف و هزینه کل ساخت و ترمیم، در نظر گرفته می‌شود و سپس با توافق کارفرما و طراح این اهداف مشخص می‌شوند [٧].



شکل (١): اهداف عملکرد توصیه شده برای طرح لرزه ای ساختمانها [٦]

۵-۲- اطلاعات مورد نیاز در طراحی بر پایه عملکرد

اطلاعات مورد نیاز در طراحی بر پایه عملکرد عبارتند از:

١- منابع بار (تحریکات محیطی) به منظور مقاومت سازه در برابر آنها در طول عمر مفید خود؛

٢- تعریف سطوح عملکرد مورد نظر؛

٣- تغییرات در شدت تحریکات وارده بر سازه و بررسی احتمال رسیدن ترکیب این تحریکات به حد ایجاد یکی از مراحل گسیختگی (حالات حدی) در سازه؛

٤- تعیین مراحل گسیختگی برای اجزای سازه ای، غیرسازه ای و کل سیستم؛

٥- محاسبه هزینه خسارات (فیزیکی یا عملکردی) و هزینه بازسازی در هر حالت حدی [٧].

۵-۳- تحلیل و طراحی

طراحی باید لااقل برای دو سطح عملکرد (خدمات رسانی و ایمنی جانی) انجام پذیرد و شامل مراحل زیر است [٨]:

١- **بررسی ساختگاه:** تحلیل خطر لرزه ای با توجه به اهداف کلی طرح انجام می‌شود تا مشخص شود آیا احداث بنا در محل از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است یا خیر؛

٢- **طراحی مفهومی:** استفاده از مفهوم تعادل انرژی که در بخش هفتم بررسی می‌شود؛

٣- **طراحی محاسباتی:** طرح جامع مقاوم شامل یک روند سعی و خطاست که با یک طرح مقدماتی مناسب آغاز می‌شود و در آن از ایده طراحی بر پایه ضوابط چندگانه استفاده می‌شود و شامل دو بخش کلی زیر است:

* **تعیین زمین لرزه طرح:** برای هر سطح عملکرد، زمین لرزه طرح انتخاب می‌شود و طیفهای پاسخ ارتجاعی مقاومت، شتاب، سرعت، جابه‌جایی، انرژی ورودی و انرژی تلف‌شده برای نسبتهای میرایی و شکل‌پذیری مختلف در هر سطح محاسبه می‌گردد.

* **طراحی عددی:** طراحی عددی شامل سه گام عمده است:

۱- **تحلیل اولیه:** تحلیل اولیه با تحلیل سیستم معادل یک درجه آزاد انجام می‌پذیرد. هدف آن تعیین ضوابط طراحی (سطح خسارت قابل قبول در هر سطح از زمین لرزه)، سختی حداقل (دوره تناوب بیشینه)، حداقل مقاومت موردنیاز، نیروهای لرزه ای طرح و ترکیب بحرانی بارهاست.

۲- **تعیین ابعاد:** هدف آن تعیین جزئیات اجرایی اجزای سازه ای (تیرها و ستونها) و اجزای غیرسازه ای مهم است.

۳- **کنترل طرح:** در این مرحله کلیه پارامترهای کنترل کننده پاسخ سازه، مورد بررسی قرار می‌گیرند تا از حدود مجاز خود در هر سطح عملکرد تخطی نکنند. این پارامترها عبارتند از: نسبت تنش، جابه‌جایی نسبی بین طبقه ای، شتاب، نسبت شکل پذیری، شاخص خسارت و ظرفیت اتلاف انرژی. هدف این امر محدود کردن پاسخ سازه به عملکرد مطلوب است.

۵-۴- کاربرد طرح جامع بر پایه عملکرد

در سال ۱۹۹۳ رائول. دی. برترو و ویتلمو. وی. برترو طرح جامع را فرموله کردند و در طراحی دو ساختمان ۱۰ و ۳۰ طبقه بتنی مسلح مورد استفاده قرار دادند [۹]؛ اما، استفاده از این روش طراحی مستلزم درک کافی از مفاهیمی چون انرژی، جابه‌جایی، تغییرشکل، شکل پذیری، قابلیت اعتماد عملکرد و رابطهٔ آنها با سطوح خسارت است. در قسمت بعد این مفاهیم به صورت پایه ای در طراحی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۶- طراحی بر پایه قابلیت اعتماد (Reliability Based Design)

یک روش از تقسیم بندی ساختمانها از نظر مقاومت لرزه ای، بر اساس میزان اطمینانی است که نسبت به عملکرد آنها در یک زلزله وجود دارد. اگر بتوان میزان اعتماد به عملکرد صحیح سازه ها را در زمین لرزه محاسبه نمود، می‌توان در طراحی ساختمانها نیز از این مفهوم استفاده کرد. بدین ترتیب ساختمانی طراحی می شود که در حد مناسبی مورد اعتماد طراح است.

۶-۱- قابلیت اعتماد چیست؟

تحلیل قابلیت اعتماد سازه ای به معنای تخمین ایمنی سازه است، یعنی بررسی احتمال اینکه سازه، تحت بارگذاری و سایر عوامل محیطی عملکرد موردنظر را بدون تحمل شکست دارا باشد. به عبارت دیگر، مفهوم قابلیت اعتماد، به معنای آن است که سازه به سطح خاصی از خسارت نرسد و مقدار عددی آن، مکمل احتمال شکست است [۱۰]. زمان وقوع زمین لرزه، شدت و تاریخچه زمانی آن، فرآیندهایی پیشا هستند؛ بنابراین، در طراحی سازه ها باید روشی به کار رود که با در نظر گرفتن این عدم قطعیتها، تضمین کنندهٔ عملکرد رضایت بخش سازه در طول عمر آن و در برابر بارهای وارده باشد. نتیجهٔ این امر، ایجاد تعادل بین هزینه ها و رفتار مطلوب سازه‌است. برای رسیدن به حاشیه ایمنی مطلوب، شناخت عدم قطعیتها در تعیین خواسته (بارگذاری) و ظرفیت (مقاومت سازه ای) ضروری است. از طریق بیان احتمالاتی و آماری پارامترهای سازه ای (که منظور کنندهٔ عدم قطعیتهاست)، می‌توان احتمال شکست سازه و یا قابلیت اعتماد آن را محاسبه نمود. کاربرد قابلیت اعتماد، تلاشی برای منظور نمودن عدم قطعیتها در طراحی است.

۶-۲- مسائل قابلیت اعتماد

مسائل قابلیت اعتماد به دو دسته مستقل از زمان و متغیر با زمان تقسیم می‌شود. در مسائل مستقل از زمان که عمدهٔ مسائل سازه ای را شامل می‌شود، عدم قطعیتها به صورت مجموعه‌ای از متغیرهای پیشا تعریف می‌شود و قابلیت اعتماد سازه در هر حالت حدی به صورت تابع عملکرد این متغیرهای پیشا بیان می‌گردد:

$$P_f = P[g(x) < o] \qquad (۱)$$

در رابطهٔ (۱)، g تابع عملکرد، x بردار متغیرهای پیشای پایه (بیانگر بارگذاری و مقاومت) و $g(x)=o$ تابع حالت حدی است که فضای متغیرهای پایه را به دو بخش ایمن $(g>o)$ و غیرایمن $(g<o)$ تقسیم‌بندی می‌کند [۱۰]. در حل مسائل متغیر با زمان، بارهای با نوسان بزرگ مقیاس به صورت فرآیند ضربانی و بارهای با نوسان کوچک مقیاس، به شکل فرآیند پیشای متناوب مدل می‌شوند. در حل این مسائل از روشهای LCM و PCM [۱۱ و ۱۲] استفاده می‌شود.

۶-۳- قابلیت اعتماد هدف

هدف طراحی مهندسی، تعیین خصوصیات سازه ای است که در عمر مفیدش عملکرد مناسبی داشته باشد. به عبارت دیگر، ضمن اینکه هزینه ساخت آن اقتصادی است، قابلیت اعتماد آن در برابر

بارهای مختلف قابل قبول باشد. بدین ترتیب، برای هر طرح قابلیت اعتماد هدفی معرفی می‌شود که ضمن تضمین عملکرد مناسب سازه، به ایجاد توازن بین سود و هزینه منجر گردد. تعیین "قابلیت اعتماد هدف" یعنی پاسخ به این پرسش که چه میزان از ایمنی کافی است.

بر این اساس عملکرد سازه از طریق مجموعه ای از "قابلیتهای اعتماد هدف" برای حالات حدی مختلف، تعریف می شود و این عملکرد زمانی مطلوب فرض می‌شود که قابلیت اعتماد آن به "قابلیت اعتماد هدف" نزدیک باشد. اگر پارامترهای کنترل کننده طرح (مانند مقاومت اعضا، بارگذاریها، ابعاد و ...) از طریق بردار ضرایب طرح، X، بیان شود، دستیابی به بردار $X=x$ که تابع هدف زیر را مینیمم کند، موردنظر است:

$$\Omega = \sum_i \sum_j w_{ij} \left\{ \frac{LnP_{ij}(x) - LnP_j^*}{LnP_j^*} \right\}^2 \qquad (۲)$$

در رابطهٔ (۲)، w_{ij} ضریب وزنی هر ترکیب، $P_{ij}(x)$ احتمال اینکه i امین حالت حدی در سازهٔ نوع j ایجاد شود به شرطی که بردار متغیر طرح $X=x$ باشد و P_j^* احتمال هدف برای حالت حدی j ام است [۱۳]. بدین ترتیب، متغیرهای طرح به نحوی تعیین می‌شوند که قابلیت اعتماد سازه به "قابلیت اعتماد هدف" نزدیکتر شود.

٦-٤- قابلیت اعتماد سیستم سازه ای

تئوری قابلیت اعتماد سیستم سازه ای به تعیین عددی عدم قطعیتها، به شکلی منطقی و محاسبه عددی احتمال شکست سیستم های سازه ای می‌پردازد. پس از تعیین احتمال شکست سیستم (یا عبور از حالت حدی) تحت ترکیبهای مختلف بارگذاری، می‌توان تابع هدف را حداقل کرد. گامهای لازم به منظور حداقل کردن تابع هدف و دستیابی به متغیرهای طرح بهینه عبارتند از:

۱- انتخاب بردار متغیرهای طرح؛

۲- طراحی سیستم سازه ای برای متغیرهای انتخاب شده؛

۳- تحلیل قابلیت اعتماد و محاسبه احتمال شکست؛

٤- تشکیل تابع هدف و مقایسه با نتایج قبلی؛

٥- تکرار مراحل مذکور.

در این تئوری، ابتدا بارگذاری و تحریکات محیطی تعیین و سپس حالات حدی موردنظر، تعریف می شود. به منظور تعریف این موارد، پاسخ به دو سؤال ضروری است.

۱- خواستهٔ ما از سیستم و رفتار آن چیست؟

۲- ضوابط لازم برای تأمین این خواسته کدام است؟ [١٤].

پس از معرفی ترکیبهای بحرانی بارگذاری و حالات حدی موردنظر، سیستم، مورد تحلیل قابلیت اعتماد قرار می‌گیرد، تا احتمال شکست محاسبه شود. روشهای به کار رفته در تحلیل قابلیت اعتماد سیستم به دو بخش عمده تقسیم می‌شود [١٥].

٦-٤-١- روشهای مستقیم *(General Purpose)*

روشهای مستقیم شامل روشهای نمونه برداری و شبیه سازی است و در یک جامعهٔ آماری بزرگ (به دلیل مقادیر عددی کوچک احتمال شکست سازه ای) صورت می‌پذیرد. مانند: شبیه سازی مونت کارلو، نمونه برداری استراتی فاید، نمونه برداری ایمپورتنس، تخمین روش پاسخ بر اساس نقاط داده و ... .

٦-٤-٢- روشهای تحلیل مد شکست یا مسیر شکست *(Failure Path)*

در این روش، شکست سیستم به صورت شکست اجزای آن تعریف- می‌شود و بدین منظور زنجیره های مختلف شکست اعضا که به شکست سیستم منجر می‌شود، تعیین می گردد. در سازه های بزرگ و پیچیده، احتمال شکست سیستم به کمک مجموعه‌ای از زنجیره‌های شکست غالب (مدهایی که احتمال رخداد آنها بیشتر است) تخمین زده- می‌شود. مانند الگوریتم باند و شاخه، [١٦] که مدلی احتمالاتی است و روش جایگزینی اعضا [١٧].

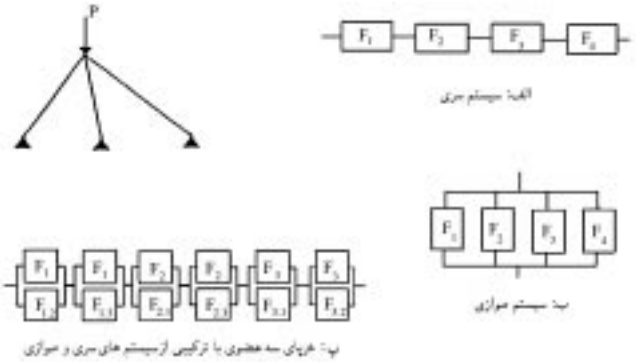
٦-٥- تحلیل قابلیت اعتماد در سیستم های بزرگ مقیاس واقعی

در این سیستم ها تحلیل به دو بخش تقسیم می‌شود:

الف) مدل سازی مهندسی: شامل تعریف، توصیف و محاسبه مدهای شکست یا فروریزش استاتیکی؛

ب) محاسبات احتمالاتی: به منظور ارزیابی احتمال شکست هر مد، معرفی شاخص ایمنی برای آن و ترکیب آنها در ارزیابی یک سیستم منفرد.

به منظور تحلیل، روشی مورد نیاز است که قادر به بیان هندسه سازه به صورت واقعی باشد (شکل ۲)، گستره ای از رفتارهای ممکن



شکل (۲): ترکیب سیستم های سری و پایه در تعریف خرپای سه عضوی

(ترد، شکل پذیر و نیمه شکل پذیر) را در برگیرد (شکل ۳) و با متغیرهای اساسی که اثرهای همبستگی را بیان می کند، برخورد صحیح داشته باشد. بدین منظور موسس و گورمان، روش بارگذاری جزئی را ابداع کردند [۱۸] که بعدها توسط موسس و اشتال [۱۹] تکمیل شد. این روش همراه با الگوریتم باند و شاخه و روش جایگزینی اعضا محتمل ترین مسیرهای شکست سازه ای را بیان می کند.

۶-۶- تحلیل لرزه ای سازه ها

یکی از کاربردهای عمده تحلیل قابلیت اعتماد، بررسی صحت طراحی

شکل (۳): سه نوع رفتار غیرخطی پایه [۲۰]

انجام شده است؛ بنابراین، برای ارزیابی عملکرد سازه ها هنگام وقوع زمین لرزه می‌توان از تحلیل قابلیت اعتماد سیستم استفاده کرد. گامهای لازم برای مدل کردن سیستم لرزه ای عبارتند از [۲۰]:

۱- مدلسازی و تحلیل سازه تحت عوامل محیطی (برای مدل کردن بارگذاری لرزه ای از منحنی خطر منطقه و طیف بزرگنمایی دینامیکی محل، استفاده می‌شود)؛

۲- تعریف تابع g برای هر المان، به صورت تابعی از متغیرهای پیشای مستقل با توزیع احتمالاتی (اعضا با دو حالت سالم و گسیخته، تعریف می‌شوند و مدلهای رفتاری آنها ترد، شکل پذیر یا نیمه شکل پذیر فرض می‌شود)؛

۳- شکست سازه به صورت ترکیبی از شکست اجزای سازه بیان می‌شود (شکل ۲). سپس در یک روند تکراری احتمال شکست سیستم محاسبه شده، قابلیت اعتماد آن به دست می آید. اگر پاسخ به قابلیت اعتماد هدف نزدیک باشد طرح، مطلوب فرض می شود و عملکرد آن به هنگام زمین لرزه مورد تأیید قرار می گیرد.

۷- طراحی بر پایه مفهوم انرژی (Energy Based Design)

زلزله، در حقیقت آزادسازی ناگهانی مقدار زیادی انرژی است. اگر بتوان اثر این میزان از انرژی را در سازه ها بررسی و تعیین نمود، کاربرد انرژی به‌عنوان مبنایی در طراحی امکان پذیر خواهد بود.

۷-۱- چرا انرژی؟

بخش عمده‌ای از خسارات ناشی از زمین لرزه، بویژه در زمین لرزه‌های بزرگ در نتیجهٔ چرخه های غیرارتجاعی رفت و برگشتی است و پارامتری که بیشترین بستگی را با رفتار چرخه ای سازه ها و در نتیجه توان تخریب زمین لرزه دارد، انرژی سازه است. طرح مقاوم سازه ها در برابر زمین لرزه بر اساس مفهوم انرژی یا طرح حدی بر این پیش فرض استوار است که تخمین خواسته انرژی در طول یک زمین لرزه و ظرفیت انرژی یک عضو (یا سیستم سازه ای) امکان پذیر است. به منظور دستیابی به سیستم مقاوم و قابل قبول، ظرفیت انرژی سازه باید بیش از انرژی خواسته باشد. این مفهوم اولین بار توسط هاوسنر *(Housner)* تحت عنوان طرح حدی، بیان شد [۲۱]. زهرا، برترو، یانگ و آکی یاما [۲۲ و ۲۳ و ۲۴] بعدها بر روی این مسأله بیشتر تحقیق کردند.

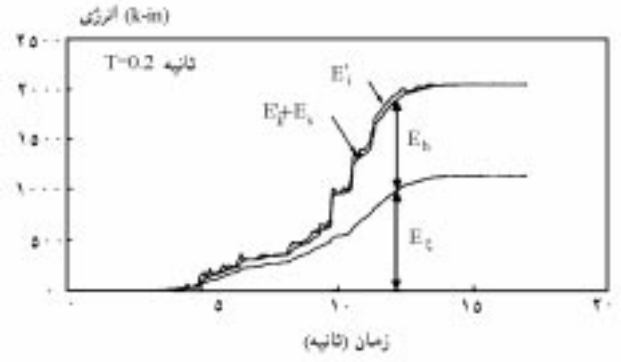
۷-۲- رابطهٔ بنیادین انرژی

رابطهٔ (۳) رابطهٔ بنیادین انرژی می‌باشد:

(۳)

$$E_I = E_K + E_D + E_H + E_S$$

این رابطه بیان می کند که انرژی ورودی به سازه (E_I) از طریق جنبش سازه (E_K)، میرایی لزج (E_D)، رفتار خمیری (E_H) ورفتار ارتجاعی (E_S) متعادل می‌شود (شکل ٤). ظرفیت اتلاف انرژی سازه باید به گونه ای باشد که بتواند کلیهٔ انرژی وارده به سازه را به شکل مطلوبی جذب یا تلف کند، به نحوی که توزیع خسارات در سازه به فروریزش آن منجر نگردد.



شکل (٤): تاریخچه زمانی اجزای مختلف معادله انرژی در سیستم یک درجه آزاد [٢٤]

۷-۳- تخمین خواسته

اولین گام در طرح مقاوم بر مبنای انرژی، تعیین میزان انرژی ورودی به سازه است. در سازه های طرح شده، محاسبهٔ E_I از طریق تحلیل غیرخطی ممکن است که رابطهٔ یک درجه آزاد آن عبارت است از:

$$E_I = \int_0^{t_D} m\ddot{v}_g dV \qquad (٤)$$

در این رابطه، m جرم، $\ddot{v}_g$ شتاب زمین، V جابه‌جایی سیستم و t_D مدت زمان جنبش شدید است [٢٤]. این رابطه برای سازه های چند درجه آزاد نیز قابل بیان است [۲۵]؛ اما، ساده سازیهایی که به منظور کاربردی کردن این مفهوم صورت گرفته، به دو روش (انرژی مطلق و انرژی نسبی) برای محاسبه انرژی ورودی به سازه ها منجر شده است. این روشها مقداربیشینه انرژی ورودی را می‌دهند.

۷-۳-۱- طیف انرژی ورودی

این طیف بر اساس سیستم یک درجه آزاد ارتجاعی محاسبه- می‌شود. تحقیقات نشان داده که انرژی ورودی در سیستم های یک درجه آزاد تخمین مناسبی از انرژی در سیستم های چند درجه آزاد است [٢٤]. استخراج طیف غیرارتجاعی نیز از این طیف ممکن است [٢٤ و ٢٦] ضمن اینکه امکان ساختن طیف انرژی غیرارتجاعی تقریبی از روی مقادیر اوج جا به جایی، سرعت، شتاب و ضرایب طیفی آنها وجود دارد [27]. این طیفها سازگاری مطلوبی با نتایج واقعی دارند. عوامل موثر بر طیف انرژی عبارتند از: دوره تناوب اصلی، شکل پذیری، درصد میرایی لزج، مقاومت و مدل رفتاری.

۷-۳-۲- انرژی ورودی به سازه

روابط ساده‌ای برای انرژی ورودی به سازه ها بیان شده است [۲۸ و ۲۹]. این روابط بر اساس مطالعهٔ تعداد زیادی مدلهای سیستم های واقعی به دست آمده اند و عمدتاً از ویژگیهای سازه ای مستقلند و تحت اثر عواملی همچون دوره تناوب غالب زمین، مدت زمان جنبش و شدت آن هستند.

آن بخش از انرژی سیستم که موجب ایجاد خسارت می‌شود، انرژی هیسترتیک است. پژوهشهای انجام پذیرفته مبیّن آن است که در ساختمانهای معمولی نسبت E_I به E_H تقریباً ثابت و قابل تخمین است و تنها پارامتر موثر بر آن درصد میرایی لزج سازه است [۳۰]. بدین ترتیب با تخمین E_I، محاسبه میزان انرژی که از طریق رفتار سیستم باید تلف شود ممکن است.

۷-٤- تخمین ظرفیت

با تحلیل غیرخطی سیستم سازه ای و استفاده از روابط محاسبهٔ انرژی [۲۵] ظرفیت سیستم قابل محاسبه است. هرچند مسائلی همچون در نظر گرفتن رفتار یکسویه اجزا به جای رفتار چرخه ای، تأثیر دامنه تغییرشکلها یا مسیر آنها بر میزان اتلاف انرژی و تعریف مدلهای رفتاری مناسب برای اجزای سازه ای، تخمین ظرفیت را مشکل می‌کند، تنها از این طریق است که می‌توان رابطهٔ "خواسته < ظرفیت" را بررسی- نمود؛ اما، آنچه در اتلاف انرژی اهمیت دارد، این است که انرژی به نحوی تلف شود که سازه فرو نریزد. این امر مستلزم پخش قابلیت اتلاف انرژی در کل سازه است که به معنای توزیع خسارت بهینه است؛ چراکه اگر کل رفتار غیرارتجاعی سیستم و در نتیجه اتلاف انرژی آن در بخش خاصی از سازه متمرکز شود، آنگاه سازوکار شکست نامطلوب تشکیل شده و سازه پیش از بکارگیری تمام ظرفیت خود فرو می‌ریزد. اینجاست که مدلهای توزیع خسارت بهینه و روشهای طراحی بر پایهٔ آنها [۳۱]، در طراحی حدی کاربرد می‌یابند.

۷-۵- طراحی مقاوم سازه ها به روش انرژی

بکارگیری مفهوم انرژی در طراحی، به ابداع روش طرح حدی منجر شد [۲۱ و ٢٤]. طراحی بر اساس این ایده شکل می‌گیرد که سازه توانایی اتلاف انرژی را در زمین لرزهٔ حد ارتجاعی، از طریق دو مؤلفهٔ میرایی و تغییرشکل ارتجاعی و در زمین لرزه آستانه فروریزش، از طریق میرایی و تغییرشکلهای خمیری داشته باشد؛ اما، آنچه در برقراری این توازن حائز اهمیت است، چگونگی توزیع اتلاف انرژی در سازه است. مهمترین مشکل ساختمانها در زمین لرزه، تمرکز خسارت در بخشی از آنهاست که به تشکیل سازوکار شکست نامطلوب منجر می شود. توزیع خسارت در یک ساختمان بلندمرتبه با توزیع مقاومت در ارتفاع آن متناسب است. وجود یک طبقه ضعیف، به تمرکز خسارات در آن و

فروریزش سازه منجر می‌شود؛ بنابراین، اصل اساسی در این روش، توزیع بهینهٔ اتلاف انرژی در ساختمان است که متناظر با توزیع بهینهٔ خسارت و توزیع مناسب مقاومت است. با مقایسهٔ توزیع واقعی خسارت در ساختمان که ناشی از توزیع مقاومت در ارتفاع است، با توزیع بهینه طی یک روند تکراری می‌توان این دو را به هم نزدیک کرد. نوع جنبش زمین و دورهٔ تناوب غالب ساختگاه نیز می‌تواند در تغییر الگوی توزیع خسارت مؤثر باشد و این مسائل باید در انتخاب زلزله طرح مورد توجه قرار گیرد.

آکی یاما در روش طراحی خود پیشنهاد نمود با محاسبه میزان انرژی ایجاد کنندهٔ خسارت، توزیع بهینه آن در طبقات ساختمان به دست آید. سپس توزیع واقعی خسارت بر اساس طرح موجود محاسبه و تغییرشکلهای جانبی طبقات بر پایهٔ آن استخراج گردد. به کمک جابه‌جایی جانبی ضریب برش پایهٔ طبقات محاسبه شده، میزان انحراف آنها از ضرایب توزیع بهینه به دست آید. در این روند الگوی توزیعی برای برش پایه به دست می آید که به طرحی با توزیع خسارت بهینه منجر می‌شود.

۸- طراحی بر پایه مفهوم تغییرمکان

در یک زمین لرزه، اگر میزان جابه‌جایی بام یا طبقات از حد معینی فراتر رود، سازه فرو ریخته تلقی می‌شود؛ زیرا در موارد بسیاری، جابه‌جایی بزرگ معادل با خسارات وسیع در طبقات سازه است؛ بنابراین، جابه‌جایی ساختمان معیار مناسبی برای طراحی سازه ها بویژه در ساختمانهای بلند به نظر می رسد.

۸-۱- چرا جا به جایی؟

معیار اساسی طراحی ساختمانها، مقاومت است؛ در حالی که، واکنش ساختمان در زمین لرزه های بزرگ همراه با عبور از حدتسلیم و تحمل کرنشهای بزرگ است و مطابق با نمودار نیرو- تغییرمکان سازه، در این ناحیه، تغییرات مقاومت ناچیز و کنترل کنندهٔ رفتار ساختمان، تغییرشکل یا جابه‌جایی است. هرچند ضریب رفتار برای منظور نمودن و کنترل تغییرشکلها، معرفی شده است، اما تعریف آن همیشه یکسان و مورد توافق همگانی نیست. ضمن اینکه به طراح، دید روشنی از جابه‌جایی ساختمان نمی‌دهد؛ بنابراین، به دلایل زیر استفاده از مفهوم جابه‌جایی در طراحی یا کنترل آن توصیه می‌شود:

- طراحی مقاوم لرزه ای، متضمن پذیرش حدودی از خسارت سازه ای و غیرسازه ای است؛
- خسارت بر اثر تغییرشکلهای خمیری و غیرقابل بازگشت رخ- می‌دهد؛
- تغییرشکلهای خمیری در اتلاف انرژی وارد به سازه نقش مؤثری دارند.

مفهوم جابه‌جایی ابتدا توسط نیومارک و ولستوس [۳۲] و موتو [۳۳] مورد توجه قرار گرفت. برای محدود نمودن جابه‌جایی یکی از دو انتخاب زیر ممکن است:

- طراح، سیستم سازه‌ای را انتخاب کند که جابه‌جاییهای کمتری داشته باشد. این کار مستلزم دانستن ارتباط بین دامنه جابه‌جایی و جابه‌جایی نسبی، با خسارات سازه‌ای و غیرسازه‌ای است [۳٤]؛
- طراح جزئیاتی را انتخاب کند که جابه‌جایی سیستم را به مقادیر مجاز (جابه‌جایی هدف) محدود کند [۳۵ و ۳٦]. این شیوه مبنای روشهای طراحی بر پایه جابه‌جایی است [۳۷].

۸-۲- روند طراحی

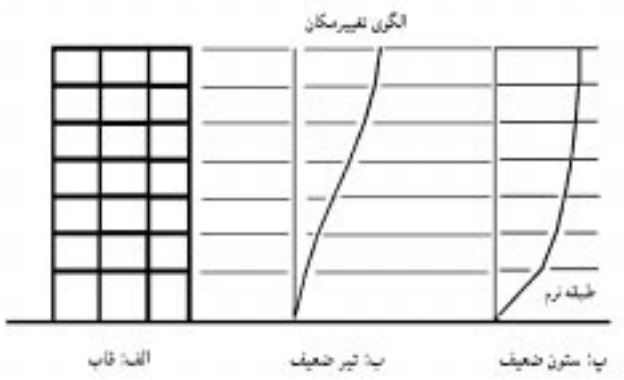
طراحی بر پایه جابه‌جایی نیز، بر پایه تخمین خواسته و ظرفیت و مقایسهٔ آنهاست. پس از تعیین زمین لرزه طرح، جابه‌جایی مورد نیاز قابل تخمین است.

۸-۲-۱- تخمین خواسته جا به جایی

جابه‌جایی کل در سیستم های چند درجه آزاد، عموماً با ضرایبی به جا به جایی مد اول آنها مربوط می‌شود. بدین ترتیب با استفاده از طیف تغییرمکان ارتجاعی، می‌توان مقادیر جابه‌جایی سیستم غیرارتجاعی را محاسبه کرد (غیر از سازه های کوتاه دوره که تغییرمکان آنها از روشهای دیگر محاسبه می‌شود). به این منظور می‌توان از طیفهای تقریبی نیز استفاده نمود [۳۸].

۸-۲-۲- توزیع جا به جایی در طبقات

ابتدا تغییرمکان جانبی بام بر اساس مقادیر طیفی، مطابق روابط موجود محاسبه می‌شود [۳۹]. سپس نیمرخ جابه‌جایی طبقات با توجه به عملکرد سازه [۳۵]به دست می آید (شکل ۵).



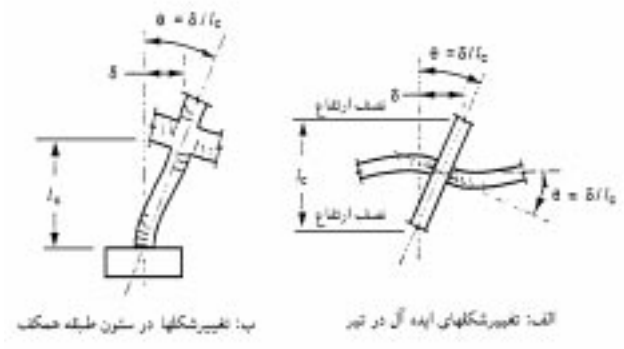
شکل (۵): الگوهای مختلف تغییرمکان در یک قاب [۳۵]

۸-۲-۳- تخمین ظرفیت تغییرشکل اجزای باربر جانبی

ظرفیت انحنای تیرها و ستونها، بر اساس ترکیبی از انحنای الاستیک عضو و انحنای غیرالاستیک مفاصل خمیری محاسبه می شود [۳۵].

۸-۲-٤- تغییرشکل تیرها و ستونها

با توجه به ظرفیت تغییرشکل تیرها و ستونها، میزان جابه‌جایی طبقه محاسبه می‌شود [۳۵]. شکل (٦) یک مدل ایده آل تغییرشکل تیر و ستون را نشان می دهد.



شکل (٦): تغییرشکلهای تیر و ستون در قاب چند طبقه [۳۵]

۸-۲-۵- مقایسه خواسته و ظرفیت

اگر ظرفیت تغییرمکان با حاشیهٔ ایمنی مناسب بیش از خواسته باشد، طرح مورد پذیرش است.

۸-۲-٦- کنترل سایر موارد

رفتار اجزای غیرسازه ای و همچنین اجزای باربر ثقلی تحت تغییرمکانهای ممکن باید بررسی شود. پاسخ کل سیستم، ضربه ساختمانهای مجاور و پدیدهٔ $P-\Delta$ نیز باید کنترل شود.

۸-۳- شکل پذیری

یکی از مفاهیمی که در نمودار بار-تغییرمکان وجود دارد، شکل پذیری و نسبت آن است. به همین دلیل ایدهٔ مبنا قرار دادن شکل پذیری در طراحی، در کنار مفهوم جابه‌جایی مطرح شده است. ایجاد شکل پذیری دارای دو مزیت است:

- استفاده از بیشینه توان مقاومت؛
- تشکیل مکانیزم و اتلاف انرژی.

استفاده از شکل پذیری همانند جابه‌جایی بر پایه تخمین خواسته، محاسبهٔ ظرفیت و ایجاد تعادل بین آن دو می‌باشد؛ اما، اطلاعاتی که در آن پردازش می‌شود متفاوت است. در این روش، تعیین مقاومت اولین گام محسوب می‌شود؛ زیرا، شکل پذیری در سطوح مختلف مقاومت، متفاوت است. گامهای این روش عبارتند از [۳۵]:

۱- تعیین مقاومت تسلیم و دوره تناوب اصلی سازه؛

۲- تعیین شکل پذیری تغییرمکانی بر پایه نسبت خواسته-ظرفیت که برابر است با نسبت خواستهٔ نیروی ارتجاعی به مقاومت سازه (این رابطه در سازه های بلند دوره صدق می‌کند)؛

۳- محاسبهٔ خواستهٔ شکل پذیری انحنایی برحسب خواستهٔ شکل پذیری تغییرمکانی؛

٤- تحلیل مقطع و مقایسهٔ ظرفیت شکل پذیری موجود با مقادیر مورد نیاز.

شکل (۷) گامهای دو روش جابه‌جایی و شکل پذیری را نشان می دهد.

۹- طرح ظرفیت (Capacity Design)

هدف مطلوب در مهندسی، استفاده از ظرفیت کامل یک سیستم است؛ در حالی که، در سازه ها عمدتاً به دلیل تفاوت مقاومت مصالح مختلف، این امر میسر نمی‌گردد. طرح ظرفیت تلاشی برای هماهنگ کردن شکست مصالح مختلف و دستیابی به طرح بهینه می باشد.

۹-۱- طرح ظرفیت چگونه به وجود آمد؟

در سالهای آغازین علم مهندسی زلزله، طراحی لرزه ای به تأمین مقاومت کافی در سازه ها برای مقابله با نیروهای زمین‌لرزه معطوف بود؛ اما، با پیشرفت دانش فنی، طراحان به سوی گریز از نیروهای زمین‌لرزه از طریق رفتار خمیری سازه، متمایل شدند؛ لیکن، تمامی مدهای تغییرشکل خمیری سازه ها مطلوب نیست. مد مطلوب، مدی است که موجب کاهش مقاومت سازه درتغییرشکلهای رفت و برگشتی و ایجاد مکانیزم شکست زودهنگام نگردد. بدین ترتیب، طراحی سازهٔ شکل پذیری که رفتار آن از طریق تأمین جزئیات اجرایی، کنترل شده و از ایجاد مدهای نامطلوب تغییرشکل

در آن ممانعت می‌شود، مورد توجه قرار گرفت و این امر اساس طرح ظرفیت است.

طرح ظرفیت ابتدا توسط پائولی پیشنهاد شد [٤٠] و سپس توسط محققان دیگر گسترش‌یافت [٤١ و ٣٦]. هم‌اکنون آیین‌نامه‌های برخی از کشورها مانند نیوزیلند و کانادا آن را مبنای طراحی قرار داده اند که عموماً در سازه های بتنی به کار می‌رود.

٩-٢- مبانی طرح ظرفیت

طرح ظرفیت بر مبنای سه گام زیر شکل می‌گیرد [٤٢ و٤٣]:

١- انتخاب مد پاسخ غیرارتجاعی مناسب برای سازه؛

٢- انتخاب مکان مناسب تشکیل مفاصل خمیری به منظور دستیابی به مد پاسخ مطلوب؛

٣- تأمین مقاومت کافی در سایر اعضا و نواحی، به منظور جلوگیری از تغییرشکلهای خمیری نامطلوب.

مشاهده می‌شود که گامهای ٢ و ٣ نیازمند جزئیات اجرایی ویژه است. بر این اساس، عمده ترین بخش طرح ظرفیت، تعیین و اجرای این جزئیات است. در طرح ظرفیت، سازه ها بر اساس پاسخ مطلوبشان (حالت حدی) دسته بندی می‌شوند.

٩-٢-١- پاسخ ارتجاعی

در سازه های مهم یا بسیار مهم پاسخ عموماً در ناحیهٔ ارتجاعی است. در طراحی این سازه ها از روشهای معمول (مقاومت نهایی) استفاده می‌شود. در این سازه ها نیازی به جزئیات اجرایی ویژه نخواهد بود.

٩-٢-٢- پاسخ شکل پذیر

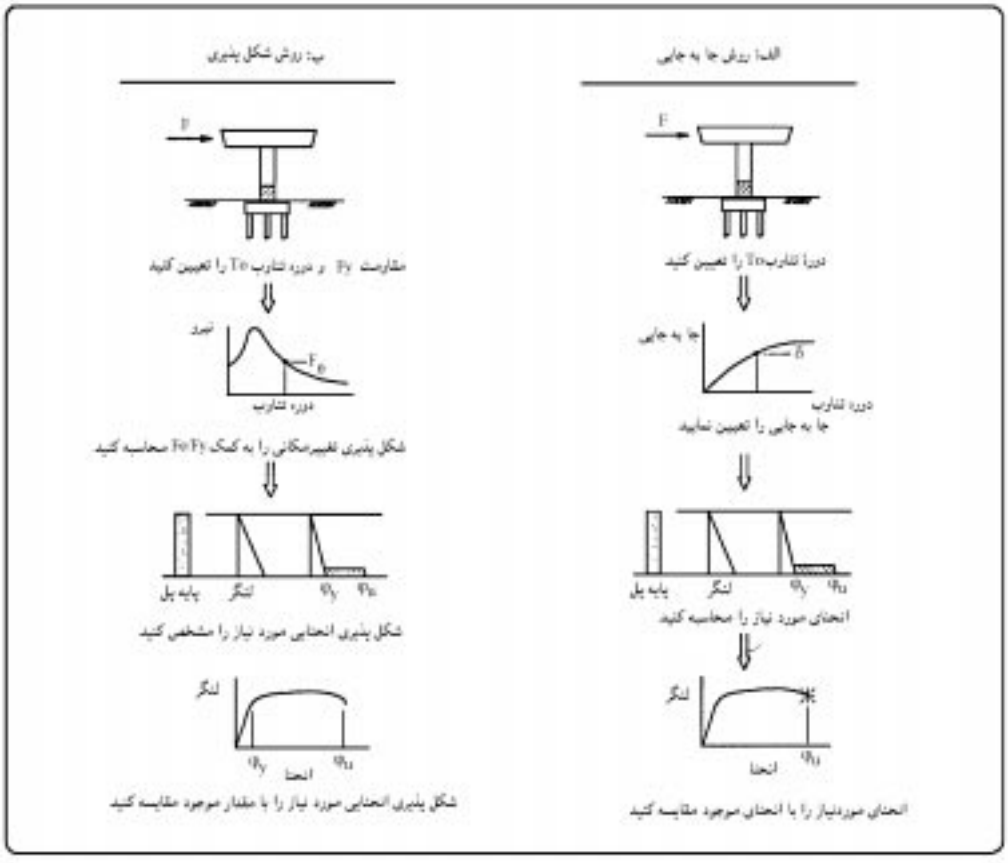
پاسخ شکل پذیر شامل دو زیر مجموعه است.

٩-٢-٢-١- سازه با شکل پذیری محدود

در سازه هایی که مقاومت کنترل کنندهٔ طرح است، میزان شکل پذیری محدود به مقداری است که مقاومت مورد نیاز تعیین‌می‌کند. تفاصیل اجرایی در این دسته ساده تر است.

٩-٢-٢-٢- سازه کاملاً شکل پذیر

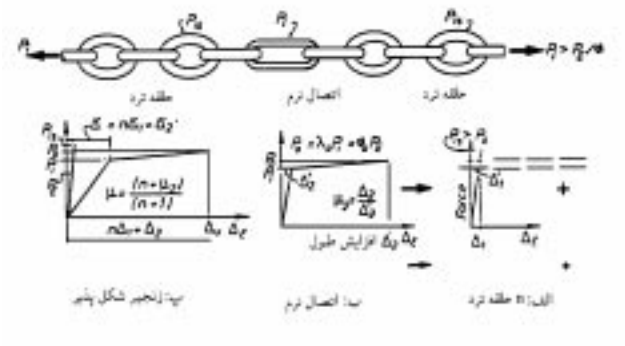
این سازه ها کاملاً شکل پذیر طراحی می‌شوند و نیاز به جزئیات ویژهٔ اجرایی دارند.



شکل (٧): کاربرد جا به جایی و شکل پذیری در طراحی [٣٥]

۹-۳- طراحی به روش طرح ظرفیت

اساس طرح ظرفیت بر مبنای زنجیر شکل پذیر قابل بیان است (شکل ۸). این زنجیر از حلقه های مقاوم ترد که با حلقه ای نرم و کم مقاومت به‌هم متصل شده اند، تشکیل شده‌است. اگر مقاومت حلقه‌های ترد بیش از مقاومت تسلیم حلقه نرم باشد، با اعمال نیروی بزرگ، حلقهٔ نرم وارد عمل می‌شود و از ظرفیت شکل پذیری خود استفاده می‌کند. بدین ترتیب از شکست ترد زنجیر جلوگیری می‌شود [٤٣]. با کاربرد این مفهوم در ساختمانهای واقعی طراحی در مراحل زیر صورت می‌پذیرد [٤٣].



شکل (۸): حدود مقاومت در یک زنجیر شکل پذیر [٤٣]

۹-۳-۱- انتخاب سازوکار تسلیم مناسب در قابها

سازوکار مناسب، سیستمی است که باعث بیشترین اتلاف انرژی شود، ضمن اینکه چرخش ستونها در آن حداقل باشد و مفاصل خمیری در کل سازه پراکنده شود.

۹-۳-۲- طراحی تیرها

تیرها حلقه های ضعیف و نرم سیستم فرض می‌شوند. نیروی تیرها از تحلیل ارتجاعی به دست می‌آید و به کمک باز توزیع لنگرها (ناشی از تشکیل مفاصل خمیری) نیروهای طراحی محاسبه می‌گردد.

۹-۳-۳- طراحی ستونها

مقاومت ستونها باید به حدی باشد که در زمان رسیدن تیرها به اضافه مقاومت خود، ارتجاعی باقی بمانند. نتایج به دست آمده از تحلیل ارتجاعی با ضرایبی بزرگ می‌شود تا رفتار ستونها را در حالت شکل پذیر پوشش دهد.

۹-۳-٤- تأمین شکل پذیری مورد نیاز

این امر از طریق تفاصیل و جزئیات اجرایی آرماتورگذاری امکان پذیر است.

۹-٤- مزایای طرح ظرفیت

مزایای طرح ظرفیت عبارتند از:

۱- رفتار از پیش تعیین شده در زمین لرزه؛

۲- جلوگیری از تمرکز تغییرشکلهای غیرارتجاعی؛

۳- تفاصیل اجرایی کمتر در ستونها؛

٤- کاهش تراکم آرماتور برشی در منطقه گره به دلیل افزایش جزئی ابعاد ستونها [٤٢].

۱۰- نتیجه گیری

رفتار سازه در زمین لرزه، توسط مجموعه ای از عوامل و پارامترهای مختلف بیان می‌شود. به نظر می‌رسد که محدود نمودن رفتار سازه به یک پارامتر بخصوص، چشم پوشیدن از قابلیتهای گسترده سیستم های سازه ای است. بدین ترتیب، توجه به مفاهیم جدید در طراحی ساختمانها و کوشش برای بسط این مفاهیم به صورت کمّی و الگوپذیر، می‌تواند نگرش جدیدی به سازه ها و قابلیتهایشان را در برگیرد. هرچند روش طراحی سنتی بر پایه مقاومت به دلیل سادگی و کاربرد بسیار، در رویارویی با سایر ایده ها از جایگاه محکمتری برخوردار است، اما آنچه باید مدّنظر قرار گیرد، وارد نمودن این مفاهیم در روند طراحی و اصلاح آن، بویژه در سازه های خاص است. بدین ترتیب شاید اولین گام در این راستا، تقسیم بندی ساختمانها به نحوی است که در هر دسته مهمترین پارامترها را بتوان مبنای طراحی قرار داد.

نکته دیگر اینکه برخی از مفاهیم مورد بحث در این مقاله، ممکن است قابلیت بدل شدن به یک الگوی طراحی مستقل را نداشته باشند؛ اما، بدون شک همهٔ آنها در تحلیل طرح مقدماتی و اصلاح آن، مؤثرند به شرطی که روشهای کاربردی و کمّی منظور نمودن آنها، در دسترس باشد.

۱۱- مراجع

1-Rosenblueth E., 1974, Safety Structural Design, Chap. 7 in Reinforced Concrete Engineering, D. Bresler, B. John Willey & Sons, New York, YN, U.S.

2-Biggs J.M., 1986, Introduction to Structural Engineering, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, U.S.

3-Housner G.W., Jenning P.C., 1982, "Earthquake Design Criteria", Eq. Eng. Research Institue, Dakland CA, U.S.

4-Bertero V.V., 1996, "State- of the- Art- Report On: Design Criteria", Proc. 11WCEE, UCB/EERC-96/01, PP:9-24.

5-Bertero V.V., 1992, “Major Issues and Future Directions in Earthquake Resistant Design” , Proc. 10 WCEE (1992) Vol. XI, PP: 6407-6444.

6-SEAOC Vision 2000 Committee, 1995, Performance-Based Seismic Engineering Report, Prepared By Structural Engineering Association of California, Sacramento, California, U.S.A.

7-Bertero V.V., 1996, “The Need for Multi-Level Seismic Design Criteria”, Proc. 11 WCEE (1996), UCB/EERC-96/01, PP:25-32.

8-Bertero R.D., Bertero V.V., Teran-Gilmore A., 1996, “Performance EQ-RD based on Comprehensive Design Philosophy and Energy Concepts", Proc. 11WCEE, Vol. XIII, No. 611.

9-Bertero R.D, Bertero V.V., 1994, “Formulation and Application of a Conceptual Code Procedure for EQ-RD of Buildings”, 5th USNCEE (1994) Vol. II, PP:391-400.

10-Wen Y.K., Hwang H., Shinozuka M., 1994, “Development of Reliability-Based Design Criteria for Buildings Under Seismic Load”, NCEER-94-0023.

11-Wen Y.K., 1990, Structural Load Modelling and Combination for Performance and Safety Evaluation, Elsevier, Amsterdam.

20-Tung A. T. Y., Kiremidjian A. S., 1992, “Application of System Reliability Theory in the Seismic Analysis of Structures”, Structural Safety.

21-Housner G. W., 1956, “Limit Design of Structures to Resist Earthquake”, Proc. 1WCEE.

22-Zahrah T. F., Hall W-J., 1984, “Earthquake Energy Absorption in SDOF Structures”, Journal of Structural Engineering, ASCE, 110 (8), PP: 1757-1772.

23-Akiyama H., 1985, Earthquake Resistant Himit-State Design for Buildings, University of Tokyo Press.

24-Uang C.M., Bertero V.V., 1988, “Use of Energy As Design Criterion in Earthquake Resistant Design”, UCB/EERC-88 (18).

۲۵-ملکی، هاله؛ غفوری آشتیانی، محسن. "انرژی زمین لرزه در سازه های قاب خمشی بتن مسلح"، پایان نامه کارشناسی ارشد، تهران: پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۷۸.

26-Iwan W.D., 1980, “Estimating Inelastic Response from Elastic Spectra”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 8, PP: 375-388.

27-Fajfar P., Vidic T., 1994, “Consistent Inelastic Design Spectra: Hysteretic and Inputyenergy”, Earthquake Engineering and Structural Dynamic, Vol. 23 (1994) PP:

12-Warrabee R.D., Cornel C.A., 1979, “Upcrossing Rate Solution for Load Combinations”, Journal of Structural Division, ASCE 105, January 79, PP: 125-132.

13-Shinozuka M., Furuta H., Emi S., Kubo M., 1989, “Reliability-Based LRFD for Bridges: Theoretical Basis”, Proc. 5th International Conference on Structural Safety and Reliability, San Francisco, ASCE, 1981-1986, 1989.

14-Reed D.A., Brown C.B., 1992, “Reliability in the Context of Design”, Structural Safety, 11 (1992) 109-119, Elsevier.

15-Moses F., 1990, “New Directions and Research Needs in System Reliability Research”, Structural Safety, (1990) PP: 93-100, Elsevier.

16-Genuard Y., 1984, “Application of System Reliability Analysis to Offshore Structures”, J.A. Blume Earthquake Engineering Center Report 71, Stanford University.

17-Thoft-Christiensen, Murotso O.Y., 1986, Structural Reliability and Its Applications, Springer, Berlin.

18-Gorman M. R., 1985, Resistance Modelling in: ASCE Short Course Structural Reliability Analysis of Offshore Platforms.

19-Moses F., Stahl B., 1978, “Reliability Analysis Formal for Offshore Stractural”, Offshore Technology Conference, OTC 3046, May 1978.

504-521.

28-Kuwamura H., Galambos T.V., 1989, “Earthquake Load for Structural Reliability”, Journal of Structural Engineering, ASCE, 115 (1989) PP: 1446-1462.

29-Fajfar P., Vidic T., Fischinger M., 1991, “On the Energy Input Into Structures”, Proc. Pacific Conference On Earthquake Engineering, New Zealand.

30-Fajfar P., Vidic T., Fischinger M, 1989, “Seismic Demand in Medium and Long Period Structures”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 18 (1989) PP: 1133-1144.

31-Park Y. J., Ang A. H-S, Wen Y. K., 1987, “Damage-Limiting Aseismic Design of Buildings”, EQ. Spectra, Vol. 3, No. 1, Feb. 1987.

32-Velestos A., Newmark N. M., 1960, “Effect of Inelastic Behaviour of Response of Simple System to EQ Motions”, Proc. 2nd WCEE, Vol. II, PP: 895-912.

33-Muto K. etal, 1960, “Nonlinear Response Analyzers and Application to Earthquake Resistant Design”, Proc. 2nd WCEE, Japan, Vol. 2, PP: 649-668.

34-Saiidi M, Sozen N.A., 1981, “Simple Nonlinear Seismic Analysis of RC Structures”, Journal of Structural Div., ASCE, 107 (81) PP: 937-952.

35-Moehle J. P., 1992, “Displacement-Based Design of RC Structures Subjected to Earthquakes”, EQ. Spectra (92) Vol. 8 (3), PP: 403-427.

36-Priestly M. J. N., 1993, “Myths and Fallacies in Earthquake Engineering Conflicts Between Design and Reality”, AIC Sp 157, PP: 231-254.

37-Moehle J. P., Wallace J. N., 1992, “Ductility and Detailing Requirements of Bearing Wall Buildings”, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 118, No., PP: 1625-1644.

38-Vidic T., Fajfar P., Fischinger M., 1994, “Consistent Inelastic Design Spectra: Strength & Displacement”, E. Q. Eng. & Stract. Dyn., Vol. 23, PP: 507-521.

39-Moehle J. P., Qi X., 1991, “Displacement Design Approach for RC Structures Subjected to Earthquake”, UCB/EERC 91/02, University of California of Berkeley, January 91.

40-Paulay T., 1979, “Capacity Design of Earthquake Resistant Multistorey RC Frames”, Proc. 3rd Canadian CEE, Montreal, Vol. 2, PP: 917-948.

41-Park R., 1986, “Ductile Design Approach for RC Frames”, EQ. Spectra, Vol. 2 (3), PP:565-570.

۴۲- عرب زاده، فرهاد؛ غفوری آشتیانی، محسن. "بررسی فلسفه طرح لرزه ای در ساختمانهای بتن مسلح و مقایسه اقتصادی آن با آیین نامه *ACI*"، پایان نامه کارشناسی ارشد، تهران: پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله. ۱۳۷۶.

43-Paulay T., 1995,“ A Short Course On Seismic Design of RC Structures”, IIEES, Tehran, Iran.