بهسازی و مقاوم‌سازی لرزه‌ای ساختمان های بتنی

Seismic Rehabilitation and Strengthening of RC Buildings

دکتر عباسعلی تسنیمی - دانشیار دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: برای دستیابی به بهترین طرح بهسازی و مقاوم‌سازی ساختمان‌های بتن مسلح باید به نحوی اقدام کرد که سطح عملکرد مناسب (که در هدف طرح تعیین شده است) تامین گردد. از این رو باید زیر بنای تمام گام‌های مربوط به فرآیند بهسازی و مقاوم‌سازی لرزه‌ای به‌خوبی درک و شناخته شود.

۱- هدف بهسازی و مقاوم سازی لرزه ای

از مهمترین اهداف بهسازی و مقاوم سازی لرزه ای تحقق موارد زیر است؛

أ- تامین مقاومت در برابر زلزله های خفیف بدون هیچگونه آسیب

ب- تامین مقاومت در برابر زلزله های متوسط بدون هیچگونه آسیب سازه ای، ولی احتمال برخی خسارت های غیر سازه ای وجود دارد

ج- تامین مقاومت در برابر زلزله های شدیدی که در محل سازه قبلا رخ داده یا قابلیت وقوع دارد، بدون فروریزی، ولی احتمال برخی خسارت های سازه ای و غیر سازه ای وجود دارد.

۲- گام‌های کلی و ویژه در فرآیند بهسازی و مقاوم‌سازی

۲-۱- گام‌های کلی

این گام‌ها برای کلیه ساختمان‌ها اعم از فولادی، بتنی و مصالح بنایی قابل اعمال است و بیشتر جنبه عمومی یا کلی داشته و به‌هیچ نوع از انواع ساختمان‌ها اختصاص ندارد. تقسیم‌بندی کلی این گام‌ها به‌شرح زیر است:

أ- مبانی بهسازی و مقاوم‌سازی و تعیین سطوح عملکرد

ب- مبانی و روش‌های تحلیل

ج- روش‌های مقاوم سازی

در این قسمت با این فرض که خواننده گرامی با گام‌های کلی آشنایی کامل و وسیع دارد، ضرورتی برای طرح مجدد و مشروح آنها وجود ندارد، لیکن مختصراً به برخی از اجزای آنها به عنوان یادآوری اشاره می‌شود.

۲-۱- ۱- مبانی بهسازی و تعیین سطوح عملکرد

اجزای این قسمت عبارتند از:

۲-۱-۱-۱- تعیین مشخصات ساختمان

مشخصات هرساختمان می تواند شامل اطلاعات مربوط به پیکربندی از نظر معماری و ازنظر سازه‌ای و هم‌چنین اطلاعات مربوط به اعضای سازه‌ای و غیرسازه‌ای که احتمالاً در هنگام رخداد زلزله بر روی نیروها و تغییر مکان‌های اعضای سازه‌ای اثرگذارند، باشد. در این قسمت باید اطلاعات مربوط به خواص مهندسی مصالح به‌کار رفته و نحوهٔ استقرار اعضای سازه‌ای و اتصال آنها به یکدیگر نیز تعیین شود.

۲-۱-۱-۲-تعیین مشخصات ساختگاه

یکی دیگر از اجزای مربوط به گام‌های عمومی در فرآیند مقاوم‌سازی و بهسازی لرزه‌ای مشخص کردن وضعیت ساختگاه از نظر شرایط زیرسطحی و سطحی است که مشتمل بر نوع خاک و طبقه‌بندی آن است. در این مرحله وضعیت شالوده نیز باید در پی بررسی‌های میدانی و انجام آزمایش‌های لازم مشخص گردد.

۲-۱-۱-۳-بررسی وضعیت ساختمان‌های مجاور

در این قسمت اثر برخورد ساختمان‌های مجاور به "ساختمان هدف "و احتمال بروز آسیب یا خسارت در هنگام رخداد زلزله باید مورد بررسی قرارگیرد. در چنین شرایطی لازم است تا آسیب یا خسارت محتمل در هنگام رخداد زلزله پیش‌بینی و تخمین زده شود. به‌عنوان مثال، سقوط اجزای سست مانند قطعات نما و یا احتمال انفجار، آتش‌سوزی، نشت مواد آلاینده، ازجمله اطلاعاتی است که باید برای اتخاذ تصمیم نهایی گردآوری شود.

۲-۱-۱-۴- تعیین سطوح عملکرد مورد انتظار

برای تعیین سطح عملکرد مورد انتظار برای ساختمان هدف، لازم است، مهندس مسئول طرح بهسازی با همکاری کارفرما، به دلایلی که در قسمت‌های قبلی مشخص کرده است، یکی از سطوح عملکرد را، تحت خطر زلزله معین انتخاب نماید. لازم به ذکر است که سطوح عملکرد، شامل چهار سطح اصلی و دو سطح میانی است.

سطوح عملکرد اصلی عبارتند از :

- قابلیت استفاده بی‌وقفه — Fully operational \ Immediate occupancy
- ایمنی جانی — Life Safety \ Operational
- آستانهٔ فروریزش — Near Collapse
- لحاظ نشده (تعیین نشده)

سطوح عملکرد میانی عبارتند از :

- خرابی محدود — Limited Collapse
- ایمنی جانی محدود — Limited Life Safety

۲-۱-۲- اهداف سطح عملکرد (Performance Objectives)

هر سطح عملکرد به دو قسمت اصلی وابسته است، یکی سطح آسیب و دیگری سطح خطر لرزه‌ای. به‌عبارت دیگر برای عملکرد هر ساختمان در هنگام رخداد زمین‌لرزه، باید سطح خطر را دانست و متناسب با آن آسیب قابل قبول یا مورد انتظار را تعریف کرد. فلذا سطح هر آسیب باید متناظر با سطح خطر بوده باشد. از این‌رو عملکرد لرزه‌ای

عبارت است از تعیین حداقل خسارت مجاز (سطح عملکرد) برای پذیرش خطر لرزه‌ای معین (حرکت زمین ناشی از زلزله).

هدف از یک سطح عملکرد می‌تواند مشتمل بر سطوح مختلفی از آسیب برای سطوح مختلفی از حرکت زمین باشد. که در این‌صورت به‌نام هدف دوگانه یا چند گانه تعبیر می‌شود. سطح عملکرد بیانگر شرایط حدی مربوط به میزان و نحوه خسارت وارده بر سازه است که برای یک ساختمان معین و تحت اثر یک زلزله معین قابل قبولی تلقی می شود این شرایط حدی بوسیله خرابی های فیریکی در خود سازه، خطر جانی برای ساکنین ساختمان و میزان قابلیت سرویس دهی سازه پس از وقوع زلزله توصیف می گردد. سطوح عملکردی برای سیستم سازه ای و غیرسازه ای به طور جداگانه تقسیم می شود.

سطح عملکرد هدف به دو دسته تقسیم می‌گردد.

أ- سطح عملکرد سازه‌ای SP-n (Structural Performance Level)

ب-سطح عملکرد غیر سازه‌ای NP-n (Non-structural Performance Level)

هر یک از این دو سطح می‌تواند مستقل از یکدیگر و یا با ترکیب هر دو سطح، عملکرد کلی ساختمان را به‌دست دهد. سطوح و محدوده های عملکرد سازه ای با یک عنوان و یک عدد معرفی می شوند. عدد مذکور را " عدد عملکرد سازه ای " می نامند و به طور مخفف به Sp–n نمایش می دهند. سطوح عملکردی سازه ای که عبارتند از "قابلیت استفاده بی وقفه" ، "ایمنی جانی" و "آستانه فرو ریزش" وضعیتهای خرابی مجزایی هستند که می توانند مستقیما در ارزیابی و بهسازی برای معرفی معیارهای فنی به کار روند. سایر عملکردهای سازه ای تعیین شده که عبارتند از "خرابی محدود" و "ایمنی جانی محدود" و "غیرقابل قبول" در حقیقت موقعیت هایی در سیستم طبقه بندی و شماره گذاری هستند که به صاحب ساختمان اجازه می دهد که بتواند به دلخواه عملکرد ساختمان را در این محدوده انتخاب کند. ذیلا تعریف و توضیح وضعیت خرابی در سطوح مختلف عملکرد ارائه می شود.

۲-۱-۲-۱-سطوح عملکرد سازه‌ای عبارتند از:

أ- استفاده بی وقفه یا اشغال فوری، Sp–۱ (Immediate Occupancy)

در این سطح از عملکرد، ساختمان دارای عناصر اساسی افقی و قائم که در برابر زلزله مقاوم باشند (سیستم‌های لرزه‌بر)، بوده و کلیه خواص و شاخصه‌های قبل از زلزله و ظرفیت لرزه‌ای خود را حفظ می نمایند. این سطح عملکرد بر روی منحنی ظرفیت در شکل ٦ با محدوده A تا B مشخص شده است.

ب- کنترل خسارت یا خرابی محدود، Sp–۲ (Damage Control)

این سطح از عملکرد، بیان عملکردی است که بین دو سطح عملکردی استفاده بی وقفه و ایمنی جانی قرار می‌گیرد. این سطح عملکرد بر روی منحنی ظرفیت در شکل ٦ با محدوده B تا G مشخص شده است.

در این حالت در اثر وقوع زلزله خرابی های محدودی ایجاد می گردد، به گونه ای که با انجام مرمت بخشهای آسیب دیده، ادامه بهره برداری میسرمی باشد. این حالت در حقیقت یک سطح عملکردی نیست بلکه یک محدوده ای از خرابی پس از زلزله است که بین سطح Sp–۱ (قابلیت استفاده بی وقفه) و Sp–۳

(ایمنی جانی) متغییراست. این وضعیت می تواند معرف بسیاری از حالاتی باشد که در آن بخواهیم خرابی سازه را به یک سطح بالاتر از ایمنی جانی محدود کنیم ولی مسأله سکونت مورد توجه است. مثالی از این حالت "خرابی محدود"، حفظ جنبه معماری آثار برجسته مثل ساختمانهای تاریخی و یا سازه های محتوی وسایل ارزشمند می باشد. لازم به توضیح است که این محدوده غالبا برای مشخص کردن حالات بین سطوح عملکرد "استفاده بی وقفه" و " ایمنی جانی" بکار می رود و عملکرد قابل انتظار از اکثر ساختمانهای جدید برای زلزله ای با ۱۵ درصد احتمال در ۵۰ سال را در بر می گیرد.

ج- ایمنی جانی، Sp–۳ (Life Safety)

در این حالت براثر وقوع زلزله در سازه خرابی ایجاد می شود ولی میزان خرابی در حدی که منجر به خسارت جانی شود، نیست. این سطح عملکرد معرف وضعیتی از خرابی پس از زلزله است که در آن خسارت قابل توجهی به سازه اعمال شده ولی هنوز حاشیه اطمینان تا سقوط کل یا بخشی از سازه وجود دارد. سطح خرابی از آنچه که برای سطح عملکرد "آستانه فروریزش" در نظر گرفته می شود، کمتر است. اعضای اصلی و بزرگ سازه ای از جای خود بیرون نزده و نیفتاده اند وخطر جانی در داخل یا خارج ساختمان وجود ندارد. گرچه در خلال زلزله صدمه دیدگی و جراحت ممکن است اتفاق بیفتد ولی احتمال صدمه جدی منجر به مرگ ناشی از خرابی سازه ای بسیار کم است. این سطح از عملکرد، فاصلهٔ قابل توجهی با فروریزش کامل یا جزئی دارد و بر روی منحنی ظرفیت در شکل ٦ در اطراف نقطهٔ G مشخص شده است.

د- ایمنی جانی محدود، Sp–٤ (Limited Life Safety)

در این سطح از عملکرد، خسارت‌ها یا آسیب‌ها به میزانی است که مابین دو حد ایمنی جانی و پایداری سازه‌ای واقع می‌شود. در این حالت براثر وقوع زلزله در سازه خرابی ایجاد می شود ولی میزان خرابی در حدی است که خسارت جانی حداقل شود. این حالت نیز در واقع یک سطح عملکرد نیست بلکه یک محدوده ای از وضعیت خرابی پس از زلزله است که شرایطی بدتر از سطح عملکرد "ایمنی جانی" و بهتر از سطح عملکرد "آستانه فروریزش" دارد و معرف موقعیتی در طبقه بندی سطوح عملکرد است که شرایطی بهتر از سطح آستانه فروریزش دارد. این شرایط، حالتهایی را شامل می شود که تأمین سطح ایمنی جانی به طور کامل، مقرون به صرفه نیست. سطح عملکرد غیرسازه ای که در این محدوده به کار می رود متغییر است و به هدف کنترل خرابی بستگی دارد و محدودهٔ G تا I را بر روی منحنی ظرفیت که در شکل ٦ آمده مشخص می کند.

ه- آستانه فروریزش با پایداری سازه‌ای، Sp–٥ (Structural Stability or Near Collapse)

در این حالت براثر وقوع زلزله خرابی گسترده ای در سازه ایجاد می شود ولی ساختمان فرو نمی ریزد و تلفات جانی حداقل می باشد . این سطح عملکرد، حد نهایی وضعیت خرابی پس از زلزله است که در آن کل یا بخشی از سیستم سازه ای ساختمان در شرف فروریختن می باشد. خسارتهای اساسی به سازه وارد

شده و شامل کاهش شدید سختی و مقاومت در سیستم باربر جانبی است. ولی در عین حال تمام اجزای اصلی سیستم باربرقائم همچنان قادر به ادامه باربری هستند. اگرچه ساختمان پایداری کل خود را حفظ می کند ولی احتمال صدمه دیدگی ناشی از سقوط اعضای سازه ای هم در داخل ساختمان و هم در خارج آن به شدت وجود دارد و احتمال سقوط ساختمان در صورت وقوع پس لرزه، زیاد است. باید توجه شود که قبل از اسکان مجدد در ساختمان حتما تعمیرات سازه ای اساسی انجام شود. در این وضعیت برای ساختمانهای بتنی قدیمی بسیار محتمل است که خسارات ایجاد شده به هیچ وجه از نظر اقتصادی و فنی قابل جبران و تعمیر نباشد. در این سطح عملکرد خطر سقوط اجزا وجود دارد و به همین دلیل سطح عملکرد غیرسازه ای Np–E (غیرقابل قبول) معمولا با این سطح عملکرد سازه ای ترکیب می شود.

و- سطح عملکرد لحاظ نشده، Sp–٦ (Not Considered)

این حالت یک سطح عملکرد نیست بلکه موقعیتی را در طبقه بندی سطوح عملکرد نشان می دهد که تنها ارزیابی سیستم غیرسازه ای را در بر می گیرد. لازم به توضیح است که بهسازی لرزه ای برای اجزای غیرسازه ای بدون در نظرگرفتن سازه معمول نیست، ولی در مواردی که آسیب پذیری زیادی محتمل است، مثل اتاق کامپیوتر و یا دستگاههای مهم و حساس، می توان وجود سطح عملکرد سازه ای "غیرقابل قبول" را در طبقه بندی سطوح عملکرد ساختمان ابزار مناسبی برای ارتباط طراح و مالک ساختمان تلقی نمود. به طور خلاصه در این سطح از عملکرد فقط عناصر غیر سازه‌ای برای تقویت یا بهسازی در نظر گرفته می‌شوند.

۲-۱-۲-۲- سطوح عملکرد غیر سازه‌ای

سطوح عملکرد غیر سازه ای به طور مخخف به شکل Np–n نمایش داده می شود. سطوح عملکرد غیر سازه ای که عبارتند از "خدمات رسانی بی وقفه" ، "قابلیت استفاده بی وقفه" ، "ایمنی جانی" و "ایمنی جانی محدود" وضعیتهای خرابی مستقلی هستند که می توانند مستقیما در امر ارزیابی و بهسازی به منظور تعیین معیارهای فنی به کاربرده شوند. دیگر عملکرد غیرسازه ای یعنی "غیرقابل قبول" صرفا برای تکمیل طبقه بندی در نظر گرفته شده و به کارفرما امکان انتخاب بیشتری برای تعریف عملکرد مورد نیاز می دهد.

ز- قابلیت خدمات رسانی، Np-A (Operational)

دراین حالت اجزای غیرسازه ای براثر زلزله دچار خرابی بسیار جزئی می شوند، به گونه ای که خدمت رسانی ساختمان به طور پیوسته فراهم است. این سطح بیانگر وضعیتی از خرابی پس از زلزله است که در آن اجزا و سیستم های غیرسازه ای عموما در جای خود هستند و بدون خرابی قادر به انجام وظایفشان می باشند. گرچه مقدار کمی به هم ریختگی و نیاز به تعمیر کردن قابل انتظار است ولی تمام وسایل و ماشین آلات باید در حال کار پابرجا بمانند. وسایل کمکی که ممکن است به علت خرابی های قابل توجه در خارج از ساختمان در دسترس نباشد، باید تامین شود و تمهیدات لازم برای مواجه با مشکلات احتمالی در زمینه حمل و نقل، ارتباط با خارج ساختمان و در دسترس بودن مایحتاج باید در نظرگرفته شود.

ح- بهره‌برداری بی‌وقفه، Np-B (Immediate Occupancy Level)

وضعیتی از خرابی پس از زلزله است که در آن عموما اجزا و سیستم های غیرسازه ای در جای خود باقی می مانند. مقدار کمی به هم ریختگی و نیاز به تعمیرکردن به خصوص به علت خرابی یا جا به جا شدن محتویات آنها، محتمل است. با وجود اینکه ماشن آلات و وسایل عموما بسته شده و مهار شده هستند ولی قابلیت کارایی آنها پس از زلزله های شدید چندان مورد اطمینان نیست و ممکن است در استفاده از آنها محدودیتهایی ایجاد شود. راههای دسترسی و فرار مانند درها، راهروها، پله ها و آسانسورها مختل نشده و استفاده از ساختمان، بی وقفه میسر می باشد.

ط- ایمنی جانی، NP-C (Life Safety)

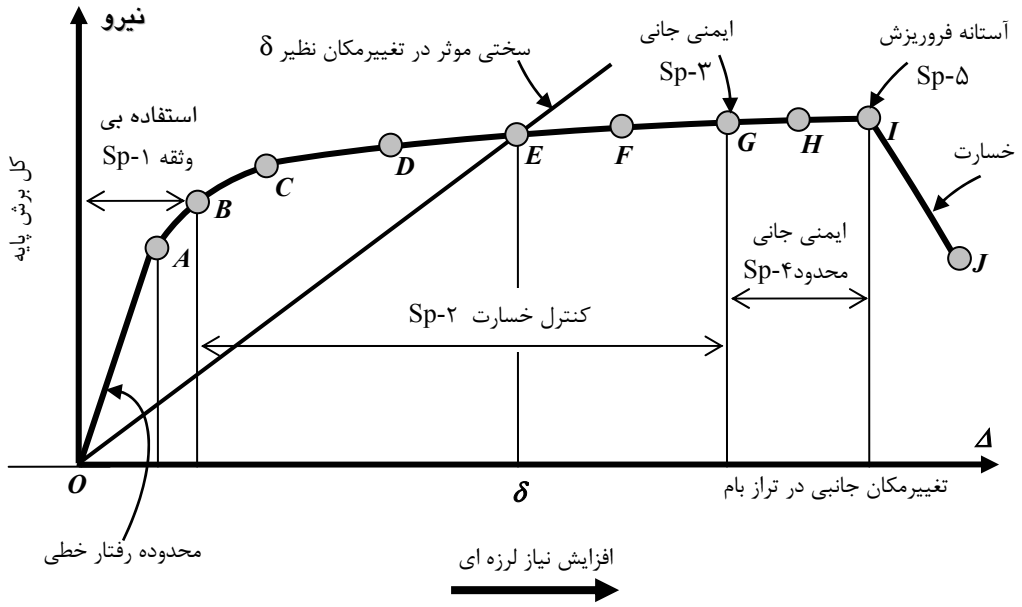
در این وضعیت پس از وقوع زلزله ممکن است خرابی های اساسی در سیستمها و اجزای غیرسازه ای اتفاق بیفتد ولی نباید شامل سقوط و فروریختن وسایل سنگین که باعث بروز مصدومیت های شدید چه در داخل ساختمان و چه در خارج آن می شود، باشد. خطرات ناشی از شکستن لوله ها و نگهدارنه های مواد سمی و یا لوله های مربوط به سیستم جلوگیری از آتش سوزی نباید وجود داشته باشد. سیستمهای غیرسازه ای ممکن است در وضعیتی باشند که بدون تعمیر و یا جا به جا کردن قابل استفاده نباشد. با وجود اینکه بروز صدمه دیدگی در خلال زلزله ممکن است اتفاق بیفتد ولی خطر صدمه دیدگی شدید و خطر جانی به علت خرابی اجزای غیرسازه ای بسیار کم است .

ی- کاهش خطر، NP-D (Reduced Hazard)

در این وضعیت، آسیب‌های جدی به عناصر غیر سازه‌ای، وارد می‌شود، ولی نباید عناصر سنگین و بزرگ دچار آسیب شده باشند که در اثر آن ساکنین صدمه ببینند.

ک- لحاظ نشده (منظور نشده)، NP-E (Not Considered)

این حالت یک سطح عملکرد نیست بلکه معرف حالت عامی است که اجزای غیرسازه ای مورد ارزیابی و بررسی قرار نمی گیرد مگر آنکه اثر مستقیمی بر رفتار سازه داشته باشند، مثل دیوارهای پرکننده با مصالح بنایی و سایر جداگرهای سنگین. این موقعیت در طبقه بندی برای توصیف دقیق سطح عملکرد ساختمان در حالت "آستانه فرو ریزش" که در آن اجزای غیرسازه ای در نظرگرفته نمی شود، باید در نطر گرفته شود. این سطح برای اینکه با سطح عملکرد سازه ای Sp-٤ ترکیب شود، در طبقه بندی درنظرگرفته شده است. به علاوه انتخاب اجزای غیرسازه ای در سطح "نامشخص" در بعضی موارد یک راه حل مدیریتی ریسک است که در ترکیب با سایر سطوح عملکرد بالا مورد استفاده قرار می گیرد. در نظرگرفتن سطح عملکرد Np–E در طبقه بندی وسیله مناسبی برای ارتباط طراح و مالک ساختمان می باشد.



شکل ٦- منحنی ظرفیت در حالت کلی

۲-۱-۲-۳- سطوح عملکرد ساختمان

برای به‌دست آوردن سطح عملکرد ساختمان لازم است، ترکیبی بین سطح عملکرد عناصر سازه‌ای و غیر سازه‌ای به‌وجود آید. در جدول ٥ این ترکیب برای سطوح عملکرد مختلف آورده شده است. به‌طور خلاصه سطوح عملکرد ساختمان را می‌توان به صورت زیر دسته بندی کرد.

أ- سطح عملکرد بهره‌برداری (خدمت‌رسانی) (Operational) (۱-A) یا (SPNP-A-1)

از ترکیب دو سطح عملکرد بهره‌برداری بی‌وقفه اعضای سازه‌ای و عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه اعضای غیر سازه‌ای سطح عملکرد بهره‌برداری بی‌وقفه برای ساختمان به‌دست می‌آید. در این سطح از عملکرد، آسیب وارده به ساختمان چندان اندک است که زندگی عادی در آن ادامه خواهد داشت و برای تعمیر قسمت‌های آسیب‌دیده هیچگونه مزاحمتی برای ساکنین به‌وجود نخواهد آمد. همچنین خسارت‌های وارده به عناصر غیر سازه‌ای نیز اندک است به نحوی که مشکلی برای ساکنین به‌وجود نمی‌آورد. و از همه مهمتر سرویس‌های موقت و با اهمیت که از بیرون ساختمان تأمین می گردند (مانند خطوط تلفن و حمل و نقل، ورود، پارکینگ‌ها و ...) امکان پذیر می باشد.

ب- سطح عملکرد بهره‌برداری بی‌وقفه (Immediate Occupancy) (۱-B) یا (SPNP-B-1)

این سطح عملکرد مرادف با حالتی است که فضاهای داخلی ساختمان و آمد و شد در آن عادی خواهد بود و اغلب سرویس‌ها پابرجا می‌باشد ولی تداوم این سرویس‌ها به‌صورت عادی مقدور نیست و ممکن است برخی از آنها خسارت دیده باشند.

ج- سطح عملکرد ایمنی جانی (Life Safety) (SPNPC-3) یا (C-3)

سطح عملکرد ایمنی جانی به شرایطی اطلاق می‌شود که پیش‌بینی خرابی اعضای سازه‌ای و غیر سازه‌ای، مانند افتادن بخش‌هایی از قسمتهای غیرسازه‌ای ساختمان، به صورت خطر جدی ساکنین را تهدید نکند. معمولاً این سطح از عملکرد پایین‌تر از سطح عملکرد آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای جدید است

.

د- سطح عملکرد در آستانه فروریزش (Structural Salability) (E-٥) یا (SPNPE-٥)

در این سطح عملکرد، عناصر سازه‌ای در حالی تحمل بارهای قائم (ثقلی) را دارند که بارهای جانبی ناشی از زلزله تحمل نمی شود. در این حالت برای پس‌لرزه‌های احتمالی، ازنظر مقاومت محدودهٔ رزرو وجود ندارد و عناصر غیر سازه‌ای ممکن است فرو ریزند و حتی خسارت‌ها و آسیب‌های سازه‌ای نیر محتمل است.

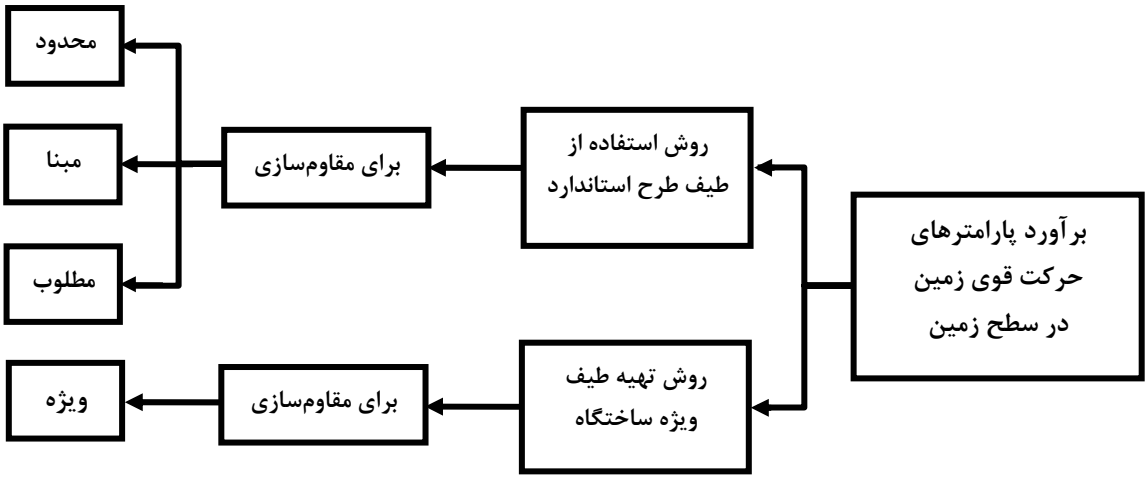
جدول ۱- ترکیب سطوح عملکرد اعضای سازه‌ای و غیرسازه‌ای برای تعیین سطوح عملکرد ساختمان

سطوح عملکرد اعضای غیر سازه‌ای	سطوح عملکرد ساختمان					
	Sp–۱ قابلیت استفاده بی وقفه	Sp–۲ کنترل خسارت (خرابی محدود)	Sp–۳ ایمنی جانی	Sp–٤ ایمنی جانی محدود	Sp–٥ آستانه فروریزش	Sp–٦ لحاظ نشده
NP-A قابلیت خدمت رسانی بی وقفه	خدمت رسانی بی وقفه **A-۱**	**A-۲**	**NR A-۳**	**NR A-۴**	**NR A-۵**	**NR A-۶**
NP-B قابلیت استفاده بی وقفه	**B-۱**	**B-۲**	**B-۳**	**NR B-۴**	**NR B-۵**	**NR B-۶**
NP-C ایمنی جانی	**C-۱**	**C-۲**	ایمنی جانی **C-۳**	**C-۴**	**C-۵**	**C-۶**
NP-D ایمنی جانی محدود	**NR D-۱**	**D-۲**	**D-۳**	**D-۴**	**D-۵**	**D-۶**
NP-E لحاظ نشده	**NR E-۱**	**NR E-۲**	**E-۳**	**E-۴**	**NR E-۵**	**NR E-۶**

سطوح عملکرد ساختمان، قابل ارجاع
سایر سطوح عملکرد ساختمان، محتمل
عدم توصیه در ترکیب عملکردهای SP-NP

۲-۱-۲-۴- تحلیل خطر زلزله و تهیه طیف طراحی

برای هرگونه طرح بهسازی و مقاوم‌سازی لرزه‌ای لازم است عوامل مربوط به حرکت قوی زمین را در سطح زمین برای سطوح خطر مختلف برآورد کرد. روشهای این برآورد به‌صورت شماتیکی بدین صورت است:



سطوح مختلف خطر زلزله که ناشی از نوع حرکت زمین است به صورتهای زیر تعریف می شود:

- **سطح خطر-۱ مرادف با زلزله سطح طراحی** DE یاDBE (Design Earthquake یا Design Base Earthquake)

این سطح خطر بر مبنای سطحی از لرزشهای زمین است که احتمال وقوع زلزله ای بزرگتر از آن در۵۰ سال برابر ۱۰ درصد می باشد ، دوره بازگشت زلزله سطح طراحی ٤٧٥ سال می باشد. این سطح خطر مرادف با سطح زلزله استاندارد ۲۸۰۰ است.

- **سطح خطر-۲ مرادف با بیشینه زلزله محتمل** MPE (Maximum Probable Earthquake)

این سطح خطر براساس ۲ درصد احتمال رویداد در ۵۰ سال تعریف می شود که دوره بازگشت متوسط آن ۲٤۷۵ سال است.

- **سطح خطرانتخابی**

این سطح خطر برای موارد خاص و با ملاحظات ویژه مناسب می باشد و در واقع می تواند معرف زلزله ای با هر احتمال رویداد در۵۰ سال باشد.

- **زلزله سطح بهره برداری** SE (Serviceability Earthquake)

زلزله سطح بهره برداری، زلزله خفیف یا متوسطی است متناظر با سطحی از لرزشهای زمین که بر مبنای تئوری احتمالات، احتمال وقوع زلزله ای بزگتر از آن در۵۰ سال برابر۵۰ درصد است. دوره بازگشت متوسط زلزله سطح بهره برداری حدود ۷۲ سال می باشد که تقریبا آنرا ۷۵ سال معرفی می کنند. این سطح زلزله عموما درحدود نصف زلزله سطح طراحی است. زلزله سطح بهره برداری که در مدت ۵۰ سال احتمال وقوع آن بیش از ۹۹/۵ درصد می باشد. به عبارت دیگر این زلزله در طول عمر ساختمان اتفاق می افتد.

- **زلزله سطح بیشینه** ME (Maximum Earthquake)

زلزله سطح حداکثربه عنوان حداکثر سطح زلزله ای که از یک منطقه با شرایط زمین شناسی معین انتظار می رود تعریف می شود . به صورت احتمالاتی زلزله سطح حداکثر بیانگر سطحی لز لرزشهای زمین است که احتمال وقوع زلزله بزرگتر از آن در۵۰ سال برابر ۵۰ درصد می باشد.

- **طیف طرح**

پس از آنکه زلزله مورد نظر به منظور تعیین هدف عملکردی انتخاب شد، باید مشخصات آن به نحو مناسبی بیان گردد. نحوه بیان و استفاده از مشخصات زلزله مورد نظر به روشی که برای طراحی براساس عملکرد به کارگرفته می شود بستگی دارد. معمولا بیان مشخصات زلزله به دو صورت انجام می گیرد، یکی با استفاده از طیف پاسخ زلزله مورد نظر و دیگری با استفاده از شتاب نگاشت و به شکل تاریخچه زمانی. برای بیان مشخصات زلزله مورد نظر با استفاده از طیف پاسخ، می توان از طیف پاسخ استاندارد ذکرشده در آئین نامه ها استفاده کرد و یا اینکه طیف ویژه ساختگاه را تهیه و استفاده کرد.

- **طیف طرح استاندارد**

طیف طرح استاندارد به دو عامل مهم بستگی دارد. یکی شتاب مبنای طرح(A) و دیگری ضریب باز تاب ساختمان(B). شتاب مبنای طرح را با استفاده از نقشه های پهنه بندی لرزه ای، که در آنها میزان بیشینه شتاب زمین برای دوره های مختلف بازگشت آورده شده است به دست می آورند. میزان شتاب مرادف با سطح خطر-۱ در نقشه پهنه بندی شتاب با دوره بازگشت ٤٧٥ سال (۱۰٪ احتمال وقوع در ۵۰ سال) تعیین می گردد. طیف طرح مرادف با سطح خطر-۱ با میرایی ۵٪ در استاندارد ۲۸۰۰ ایران برای ٤ نوع زمین به عنوان طیف طرح استاندارد ارائه شده است.

- **طیف طرح ویژه ساختگاه**

طیف طرح ویژه ساختگاه که بر مبنای تحلیل خطر ویژه و برای بهسازه ویژه مورد استفاده قرار میگیرد به چند عامل مهم بستگی دارد. این چند عامل عبارتند از شرایط ساختگاه، بزرگای زلزله، فاصله گسل تا ساختگاه، نوع خاک و رابطه کاهندگی مربوط و روش برآورد سطح خطر.

برای تحلیل خطر ویژه ساختگاه باید گسل های فعال در اطراف ساختگاه و تا شعاع ۱۰۰ کیلومتری تعیین گردد. پارامترهای لرزه خیزی را باید بر اساس بانکهای اطلاعاتی زلزله و پیشینه لرزه خیزی منطقه تعیین کرد. با توجه به شرایط ساختگاه از نظر ژئوتکنیکی، لرزه زمین ساختی و زلزله شناختی، باید رابطه کاهندگی مناسبی را به دست آورد

- **سطوح مقاوم سازی**

با توجه به سطوح عملکرد مورد انتظار، روش و سطح مقاوم سازی متفاوت خواهد شد. سطوح مقاوم سازی بـه ٤ دسته زیر تفکیک می شوند.

- **بهسازی و مقاوم سازی محدود**

در این سطح از بهسازی و مقاوم سازی پایین ترین سطح عملکرد در نظر گزفته می شود، به نحوی که ساختمان مقاوم شده تخت اثر زلزله ای که خفیف تر از زلزله سطح خطر-۱ باشد ایمنی جانی ساکنین تامین گردد.

- **بهسازی و مقاوم سازی مبنا**

در این حالت انتظار می رود که ساختمان مقاوم سازی شده تحت اثر زلزله سطح خطر-۱ ایمنی جانی ساکنین را تامین کند.

- **بهسازی و مقاوم سازی مطلوب**

در این سطح از بهسازی و مقاوم سازی، انتظار می رود که اولا هدف بهسازی مبنا تامین گردد و ثانیا ساختمان مقاوم شده تخت اثر زلزله سطح خطر-۲ فرو نریزد.

- **بهسازی و مقاوم سازی ویژه**

در این سطح باید ساختمان مقاوم شده از عملکرد بهتری نسبت به سطح بهسازی مطلوب داشته باشد. به عبارت دیگر ساختمان مقاوم شده باید عملکرد بالاتری نسبت به سطح مطلوب در مقابل اثرات زلزله سطح خطر-۲ داشته باشد.

۲-۱- ۳- مبانی و روش‌های تحلیلی

روش‌های تحلیلی که برای تعیین نیروهای داخلی و تغییر شکل‌های اعضای سازه در اثر نیروهای ناشی از زلزله سطح خطر، به‌کار می‌روند عبارتند از:

أ- روش استاتیکی خطی

ب- روش دینامیکی خطی

ج- روش استاتیکی غیر خطی

د- روش دینامیکی غیر خطی

همانطورکه ملاحظه می‌شود این چهار روش درواقع در دو گروه روش‌های خطی و غیرخطی قرار می‌گیرند که کاربرد هریک از این گروه‌ها دارای محدودهٔ معینی است.که در این قسمت های بع به صورت محتصر به انها اشاره می شود.

۲-۲- گام‌های ویژه

منظور از گام‌های ویژه، اقداماتی است که باید برای سازه‌های مختلف از نظر نوع یا مصالح آنها به‌کار برده شود. در این قسمت گام‌های ویژه مربوط به ساختمان‌های دارای اسکلت بتنی تشریح می‌شود.

۲-۲- ۱- مشخصات مصالح و اجزای موجود

لازم است ظرفیت اعضای سازه ای و اتصالات آنها برای استفاده در تحلیل مشص شود. برای اینکار باید اطلاعات زیر از ساختمان موجود یا از طریق اسناد و مدارک فنی (درصورت موجود بودن)، به‌دست آید، ویا با انجام آزمایش های ضروری تعیین گردد. این اطلاعات در دو دسته زیر طبقه بندی می شود:

أ- مشخصات مصالح به‌کاررفته

ب- مشخصات اعضای سازه‌ای

الف- مشخصات مصالح به‌کاررفته

برای مصالح به‌کار رفته و هرنوع میلگرد مصرفی یا قطعه فولادی که در اعضای سازه‌ای و اتصالات تعبیه شده، باید مقدار تنش تسلیم و مقاومت نهایی تعیین شود. چنانچه لازم باشد از طریق آزمایش این کمیت‌ها تعیین گردند، در آن‌صورت با به‌دست آوردن منحنی‌های تنش ـ کرنش، می‌توان اطلاعات دیگری از رفتار مصالح به‌دست آورد. اطلاعات به‌دست آمده از اسناد و مدارک فنی از قبیل دفترچه محاسبات یا نقشه‌های اجرایی را مشخصات کرانه پایین تلقی کرده و برای اینکه آنها به سطح مورد انتظار تبدیل گردند، باید به نحو صحیحی افزایش داده شوند. برای این کار از ضریب تبدیل استفاده می‌شود که در جدول ۲ آورده شده است.

جدول۲- ضرایب تبدیل مشخصات مصالح از کرانه پایین به سطح مورد انتظار

مشخصات مصالح	ضریب تبدیل
مقاومت فشاری بتن	۱/۵
تنش کششی و تسلیم میلگرد	۱/۲۵
تنش تسلیم سایر مصالح فولادی (مثل میل مهارها و غیره)	۱/۵۰

ب- مشخصات اعضای سازه‌ای

برای کلیه اعضای سازه‌ای باید اطلاعات زیر بررسی و مشخص شود. لازم به یادآوری است که تطبیق این اطلاعات با شرایط واقعی که در عمل اجرا شده است در تعیین مشخصات اصلی ساختمان بسیار مؤثر است.

أ- ابعاد مقطع اعضاء و پیکربندی کلی ساختمان

ب- مشخصات اتصالات (میل‌مهارها، مهاربندها، سخت کننده‌ها...)

ج- برآورد آسیب و شدت آن در شرایط موجود

د- بررسی شرایط محیطی آسیب‌رسان

۲-۲-۲- روش‌های آزمایش برای تعیین مشخصات مکانیکی مصالح

برای مدل سازی رفتار غیر خطی اعضای سازه ای و سنجش معیار پذیرش پاسخ‌ها، باید کرانه پایین مشخصات مصالح و هم‌چنین مشخصات مورد انتظار مصالح معلوم باشند. کرانه پایین برای عناصر و پارامترهایی که پاسخ

آن توسط نیرو کنترل می‌شوند و مشخصات مورد انتظار برای پاسخ‌هایی که توسط تغییر مکان کنترل می‌شوند به‌کار می‌روند. برای تعیین مشخصات مکانیکی مصالح به دو روش می‌توان آزمایش‌ها را انجام داد که این روش‌ها به شرایط ساختمان هدف بهسازی و سطح عملکرد بستگی دارد.

۱- **روش آزمایش‌های مخرب**
۲- **روش آزمایش‌های غیر مخرب**

آزمایش‌های مخرب

برای نمونه برداری باید مقاطعی انتخاب شود که به لحاظ شرایط بارهای ثقلی و تخمین شرایط بارهای ناشی از زلزله، تحت کمترین تنش‌ها قرار می‌گیرند. این نمونه‌ها بعداً در آزمایشگاه تحت آزمایش های استاندارد تعیین مشخصات می شوند. تعداد نمونه‌ها باید به نحوی باشد که بتوان با میانگین گیری نتایج آنها کرانهٔ پایین را به‌عنوان، مشخصات مصالح تعیین کرد.

{کرانه پایین مشخصات مصالح} = (میانگین مشخصات نمونه‌ها) – (انحراف معیار)

آزمایش‌های مخرب که منطبق بر استانداردهای شناخته شده هستند عبارتند از :

مغزه‌گیری (Core test)

آزمایش مغزه‌گیری باید بعد از تعیین و تخمین محل استقرار میلگردها به نحوی انجام شود که در عملیات مغزه‌گیری آسیبی به میلگردها وارد شود. برای تخمین محل میلگردها از دستگاه میلگرد یاب (Scanning) استفاده می‌شود. پس از مغزه‌گیری باید محل مغزه توسط بتن یا ملاتی که خواص مکانیکی آنها حداقل در حد مشخصات بتن موجود باشد، پر و ترمیم گردد. در آزمایش کندن که آسیب جدی به سازه وارد نمی کند، ترمیم سطحی آن کافی است. این آزمایش‌ها برای تکمیل کردن اطلاعات انجام می‌شود. مقاومت به‌دست آمده از مغزه‌گیری باید کالیبره شده و به روش قابل قبولی به مقاومت فشاری بتن تبدیل گردد.

از جمله استانداردهای مغزه‌گیری می‌توان به استاندارد ASTM C42M-99 مراجعه نمود. روش انجام آزمایش نیز بر طبق استانداردهای زیرقابل انجام است:

- ASTM C391C39M-99
- ASTM C41/C42M-99
- ASTM C496-96

آزمایش‌های غیر مخرب

از جمله آزمایش‌های غیرمخرب که می‌تواند در تعیین مشخصات مکانیکی بتن به‌کار رود می‌توان به آزمایش‌های فرا صوت (اولتراسونیک) بر طبق استاندارد ASTM C597 و روش مقاومت نفوذ ASTM C803 و روش سختی سطحی یا برگشت ASTM C805 اشاره نمود. آزمایش‌های غیر مخرب نباید به‌طور کامل جایگزین آزمایش‌های مخرب شوند ولی می‌توانند به‌صورت مستدل جایگزین برخی از آزمایش‌های مخرب شوند که عملاً انجام آنها غیر ممکن است. لازم به ذکر است که نتایج آزمایش‌های غیر مخرب چندان با مقاومت واقعی بتن همخوانی ندارد و از این رو باید به نحو مناسبی آنها را کالیبره کرد. برای تعیین مشخصات مکانیکی میلگردهای مصرفی باید به دفترچه محاسبات و نقشه‌های اجرایی مراجعه کرد که درصورت در اختیار بودن آنها می‌توان به‌عنوان کرانه پایین تلقی کرد و با استفاده از جدول ۱ مشخصات مصالح مورد انتظار را به‌دست آورد.

روش آزمایش برای تعیین نقش جاری شدن کششی و مقاومت نهایی میلگردها را می‌توان دراستانداردهای معتبر و از آن جمله ASTM A370-97a استفاده کرد. چنانچه از میلگردهای موجود در سازه ساختمان برای آزمایش استفاده شود لازم است برای مرمت از میلگردهای جایگزین وصله‌هایی که موجب پیوستگی میلگردهای مقطع مورد نظر شود، استفاده کرد تا خللی در مقاومت مقطع سازه ایجاد نگردد. اگر در ساختمان از میلگردهای بدون آج استفاده شده باشد، باید مقدار آنها را در برآورد مقاومت نصف در نظر گرفت. برای تعیین تعداد نمونه‌های مورد نیاز آزمایش‌ها می‌توان به جدول ۳ مراجعه نمود.

تعیین حداقل نمونه‌های مورد نیاز، بستگی به نوع برنامه‌ای که در آن برنامه قرار است مشخصات مکانیکی مصالح تعیین گردد، دارد مثلاً اگر قرار است در یک برنامه متعارف و معمول، این مشخصات تعیین شود، تعداد نمونه‌ها با نمونه‌هایی که در یک برنامه جامع و کامل لازم است متفاوت خواهد بود. پس اگر برنامه گردآوری اطلاعات در حد متعارف باشد تعداد کمتر است ولی برای یک برنامه جامع تعداد بیشتر خواهد بود که جدول ۳ آنرا مشخص کرده است.

حداقل تعداد آزمایش در حالت کلی به عواملی مانند موارد زیر بستگی دارد:

- سن ساختمان
- ابعاد ساختمان
- امکان دسترسی به اعضای سازه‌ای
- وجود فرسایش و گستردگی آن در اعضا
- دقت مورد نیاز
- هزینه انجام آزمایش‌ها
- میزان اطلاعات معتبر

جدول ۳- تعداد نمونه‌های لازم برای تعیین مشخصات مکانیکی مصالح

شرایط مورد بررسی		نتایج آزمایش	حداقل تعداد نمونه
مقاومت طراحی	مشخص است	مشخص است	۳نمونه برای هرطبقه، هر ۲۰۰ متر مکعب بتن یا هر ۷۰۰متر نربع سطح سازه هرکدام تعداد بیشتری ایجاب کند. درصورت تطبیق نتایج سه آزمایش اول با نتایج قبلی تعداد به تقلیل یابد، ولی برای کل ساختمان حداقل ٦ نمونه لازم است.
	مشخص است	موجود نیست	۳نمونه برای هرطبقه، هر ۲۰۰ مترمکعب بتن یا هر ۷۰۰مترمربع سطح سازه هرکدام تعداد بیشتری ایجاب کند درصورت تطبیق نتایج سه آزمایش اول با قبلی تطبیق داشت تعداد به تقلیل یابد ولی در کل برای ساختمان حداقل ٦ نمونه
	مشخص نیست	موجود نیست	٦ نمونه برای هرطبقه، و در هر ۲۰۰ متر مکعب بتن یا هر ۷۰۰متر مربع سطح سازه هرکدام تعداد بیشتری ایجاب کند. درصورت تطبیق نتایج سه آزمایش اول با قبلی تعداد به تقلیل یابد. در هر حال برای رده‌های مختلف بتن هر رده ٦ نمونه لازم است.
درصورت استفاده از آزمایش‌های غیر مخرب برای تیرها- دال‌ها		موجود نیست	به ازای هر کاهش در تعداد مغزه‌گیری، ٥ آزمایش غیر مخرب ضروری است. در صورت پراکندگی نتایج با نظر مهندس مسئول تعداد غیر مخرب یا مخرب افزایش یابد
مشخصات میلگردها در دفترچه محاسبات و نقشه‌هاس اجرایی موجود است		موجود نیست	حداقل ۳ نمونه به‌صورت تصادفی از هر نوع عضو سازه ای
نبود مشخصات میلگردها در دفترچه محاسبات و نقشه‌های اجرایی، ولی میلگردها در تمام ساختمان یکسان است		موجود نیست	حداقل ۳ نمونه به‌صورت تصادفی برای هر عضو سازه‌ای به ازای هر سه طبقه از ساختمان
اگر مشخصات میلگردها در تمام ساختمان یکسان نباشد		موجود نیست	حداقل ٦ نمونه به‌صورت تصادفی برای هر عضو سازه‌ای به ازای هر سه طبقه از ساختمان

۲-۳- ارزیابی وضعیت موجود

وضعیت موجود ساختمانی که قرار است بهسازی و مقاوم سازی شود باید قبل از هرگونه تحلیل و تعیین شرایط لازم برای تأمین سطح عملکرد مورد انتظار به‌خوبی بررسی و شناخته شود. بدین منظور لازم است کلیه اعضا و قطعاتی که در مقاومت در برابر بارهای جانبی مشارکت دارند ارزیابی گردند. این ارزیابی شامل ٤ قسمت است که عبارتند از :

۱- ارزیابی وضعیت قطعات و اتصالات برای مواردی مانند نقاطی کـه دارای ضـعف‌هـایی از قبیـل وارفتگـی، خزش، ترک خوردگی، افتادگی‌ها، خوردگی‌ها، کاستی‌های اجرایی می‌باشند.
۲- بررسی و ارزیابی پیکربندی،شکل هندسی قطعات، اتصالات، وجود یا عدم وجود پیوسـتگی در مسـیرهای انتقال بارهای ثقلی و جانبی، تراز بودن و نحو، استقرار اعضای سازه‌ای
۳- وجود هرگونه شرایط دیگری که بر عملکرد ساختمان موجود مانند دیوارهای مشترک بـا سـاختمان‌هـای مجاور، تغییرات انجام شده در اعضای غیر سازه‌ای، تغییر کاربری و وجود برخی موانع در تحقق عملیات مقاوم سازی
٤- فراهم آوردن شرایط لازم برای استفاده از ضریب آگاهی، که هرچه ارزیابی وضعیت موجود کاملتر انجام شود، بیشتر خواهد بود و به‌طور کلی متناسب با هدف انتخاب شده برای بهسازی و مقاوم سـازی تعیـین می‌گردد.

اگر هدف بهسازی دستیابی به سطح مطلوب یا سطح پایین باشد و اطلاعات در حداقل ممکـن یـا در حـد متعـارف باشد، ضریب آگاهی به ترتیب برابر با ۰/۷۵ یا ۱/۰ خواهد بود. هم‌چنین اگر هدف بهسازی دستیابی به سطح ویژه عملکردی باشد، و اطلاعات ساختمان در حد متعارف باشد، ضریب آگاهی ۰/۷۵ و اگر در حد جامع باشد برابر بـا ۱/۰ خواهد بود.
در صورتی‌که برای عضوهایی نتوان مشخصات مصالح را معلوم کرد، یـا ضـریب تغییـرات مشخصـات مکـانیکی بیش از ۲۵٪ باشد یا در خلال ارزیابی خسارت و زوال یافتگی بـه نحـوی باشـد کـه انجـام آزمـایش‌هـای اضـافی ضروری تشخیص داده شود، باید ضریب آگاهی را ۰/۷۵ اختیار کرد.

۳- مدل سازی

برای مدل سازی ساختمان‌های بتنی لازم است ارزیابی نیاز و ظرفیت لرزه‌ای اعضـای بـتن مسـلح در مقـاطعی از آنها انجام گیرد که ویژگی‌های زیر را دارا باشند.

أ- رفتار عضو (پاسخ آن) در مقابل بارهای ثقلی و جانبی بیشترباشد
ب- شکل مقطع تغییر می‌کند (به نحوی که سختی تغییر می‌کند)
ج- تعداد میلگردها تغییر می‌کند به نحوی که مقاومت کاهش می‌یابد
د- تغییرات ناگهانی در مقدار میلگردها که موجب تمرکز تنش یا گسیختگی زودرس شود

در مدل‌سازی باید ویژگی‌های سازه‌ای اعضا مورد بررسی و ارزیابی قرار گیـرد. از مهمتـرین آنهـا مـی‌تـوان بـه موارد زیر اشاره کرد.

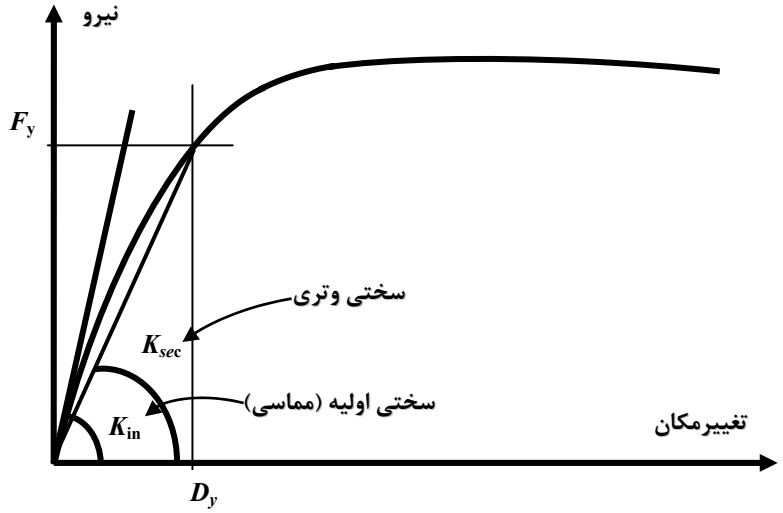
- سختی
- مقاومت
- برش و پیچش
- طول گیرایی و وصله‌های میلگردها
- اتصال‌ها

۳-۱- سختی

سختی اعضای سازه‌ای را باید به یکی از دو روش خطی و غیر خطی تعیین کرد. سختی را باید با توجه به اثرات سختی محوری، برشی و خمشی اعضا درنظر گرفت. میزان تغییر شکل ناشی از بارهای ثقلی و جانبی در سختی اعضا اثر مستقیم دارد که لازم است در برآورد سختی مورد توجه قرار گیرد.

۳-۱-۱- روش خطی

در روش خطی، سختی مؤثر عضو در منحنی نیرو ـتغییر مکان، عبارت است از خطی که مبدأ را به نقطهٔ تسلیم وصل می‌کند. اگر نتوان مقدار سختی را تعیین کرد، می‌توان از مقادیر داده شده در جدول٤ استفاده نمود.



شکل ۱- منحنی رفتاری و سختی اولیه و سختی وتری

جدول ۴- مقادیر تقریبی سختی مؤثر در روش خطی

عضو سازه ای	سختی محوری	سختی برشی	سختی خمشی
تیر بتن مسلح	–	$E_c A_w$	$E_c I_g$
تیر پیش تنیده	–	$E_c A_w$	$E_c I_g$
ستون با بار محوری فشاری ناشی از بارثقلی طراحی بزرگتر از $A_g f_c$	$E_c A_g$	$E_c A_w$	$E_c I_g$
ستون با بار محوری کششی یا بار محوری فشاری کمتر از $A_g f_c$	$E_s A_s$	$E_c A_w$	$E_c I_g$
دیوار بدون ترک	$E_c A_g$	$E_c A_w$	$E_c I_g$
دیوار با ترک	$E_c A_g$	$E_c A_w$	$E_c I_g$
دال تخت بتن مسلح	–	$E_c A_g$	$E_c I_g$
دال تخت پیش تنیده	–	$E_c A_g$	$E_c I_g$

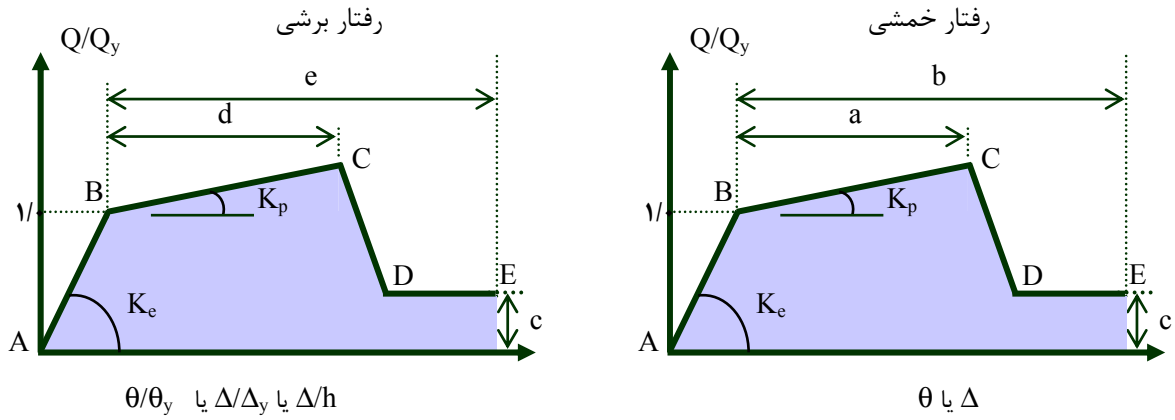
چنانچه بار محوری ستون ها بین دو مقدار ارائه شده باشد باید از درون یابی خطی استفاده کرد

۳-۱-۲- روش غیر خطی

در روش غیر خطی منحنی نیرو ـ تغییر مکان به صورت غیر خطی و بر پایه نتایج آزمایش تعیین می‌شود. برای سرعت بخشیدن به تحلیل، منحنی نیرو ـ تغییر مکان را ایده‌آل سازی می‌کنند. درهرصورت می‌توان با توجه به روش تحلیل از منحنی‌های ایده‌آل شده پیشنهادی استفاده نمود.

۳-۱-۲-۱- سختی برای روش تحلیل استاتیکی غیر خطی

سختی مورد نیاز را می‌توان بر طبق شکل ۲ که رابطه کلی نیرو ـ تغییر مکان را نشان می‌دهد، استفاده کرد. یا اینکه منحنی‌های دیگری که رفتار عضو را تحت افزایش یکنوای تغییر شکل به‌دست می‌دهد، به‌کار برد.



K_e=طبق روش خطی

K_p=حداکثر $۰/۱۰K_e$

الف- تغییر شکل

ب- نسبت تغییر شکل

شکل ۲ – رابطه بار – تغییر شکل کلی برای اعضای بتن مسلح

مقادیر عددی d,c,b,a متناسب با شرایط عملکردی و نوع رفتار عضو تعیین می‌گردد که در دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای داده شده است.

۳-۱-۲-۲- محدوده کاربرد روش‌های خطی

برای کاربرد روش‌های خطی لازم است شرایطی متناظر با رفتار خطی برای کل ساختمان حاکم باشد. از این رو دو حالت روش استاتیکی خطی و روش دینامیکی خطی را به طور جداگانه در نظر می‌گیریم. اگر شرایط هفت‌گانه زیر برقرار باشد می‌توان از روش استاتیکی خطی استفاده کرد.

۱- زمان تناوب اصلی ساختمان کوچکتر از T_o ۲/۵باشد.

(T_o = زمان تناوب مشترک بین دو ناحیه شتاب ثابت و سرعت ثابت در طیف بازتاب طرح و مقدار آن براساس بند۲-٤-۳ استاندارد ۲۸۰۰ به‌دست می‌آید)

۲- تغییر در ابعاد پلان در طبقات متوالی به استثناء خرپشته کمتر از ٤۰ درصد باشد.

۳- حداکثر تغییر مکان جانبی در هر طبقه و در هر راستا کمتر از ۱/۵ برابر تغییر مکان متوسط آن طبقه باشد.

٤- اختلاف بین تغییر مکان متوسط جانبی در هر طبقه، به استثنای خرپشته، کمتر از ۵۰ درصد با طبقه بالا یا پایین باشد.

۵- سازه دارای سیستم باربر جانبی متعامد باشد.

٦- نسبت نیرو به ظرفیت (DCR) در تمام اعضای باربر جانبی کوچکتر از ۲ باشد.

۷- نسبت نیرو به ظرفیت در تعدادی از اعضای اصلی باربر جانبی بیش از ۲ باشد، اما هر سه شرط اضافی زیر برقرار باشد.

أ. انقطاع در سیستم باربر جانبی چه در ارتفاع، چه در پلان وجود نداشته باشد.

ب. متوسط نسبت نیروی برشی به ظرفیت برشی اعضا در هر طبقه بیش از ۲۵ درصد با متوسط نیروی برشی به ظرفیت برشی یک طبقه بالاتر یا پایین‌تر اختلاف نداشته باشد.

ج. نسبت نیروی برشی به ظرفیت برشی ناشی از پیچش سازه، و یک عضو از طبقه بیش از ۵۰ درصد با عضو دیگر در نقطهٔ مقابل آن نسبت به مرکز پیچش اختلاف نداشته باشد.

چنانچه یکی از دو شرط بندهای ٦ یا ۷ فوق محقق شود، می‌توان از روش ***دینامیکی خطی*** استفاده کرد.
لازم به ذکر است که برای تعیین DCR، ابتدا باید نیرو اعمالی در اعضا را که برابر با حاصل جمع نیروهای ناشی از بارهای ثقلی و زلزله است، به‌دست آورد، سپس ظرفیت اعضا را براساس مقاومت نهایی اجزای آنها محاسبه می‌شود. نسبت این دو مقدار برابر با DCR خواهد بود.

$$\text{DCR} = \frac{\text{نیرو در عضو}}{\text{ظرفیت عضو}}$$

هم‌چنین برای به‌دست آوردن متوسط نسبت نیروی برشی به ظرفیت برشی می‌توان از نسبت وزنی مطابق رابطه زیر استفاده کرد:

$$\overline{DCR} = \frac{\sum_{i=1}^{n} DCR_i V_i}{\sum_{i=1}^{n} V_i}$$

که در این رابطه V_i نیروی برشی در عضو i از طبقهٔ مورد نظر و DCR_i نسبت نیروی برشی به ظرفیت برشی عضو i بوده و n تعداد کل طبقات را مشخص می‌کند.

۳-۱-۲-۳- محدوده کاربرد روش‌های غیرخطی

چنانچه لازم باشد که از روش‌های غیر خطی استفاده شود، باید نیروهای داخلی اعضا را بر مبنای رفتار غیر خطی آنها به‌دست آورد. برای این‌کار باید توجه داشت که اگر برش حاصل از تحلیل دینامیکی خطی در طبقه‌ای (با درنظرگرفتن ۹۰ درصد جرم مؤثر) ۳۰ درصد بیشتر از برش حاصل از مود اول باشد، باید از روش استاتیکی

غیر خطی، به‌همراه روش دینامیکی خطی استفاده کرد. در این حالت لازم است معیار پذیرش برای هر دو روش کنترل شود، با این تفاوت که برای پذیرش اعضایی که به روش تغییر مکان کنترل می‌شوند، در تحلیل دینامیکی خطی می‌توان ۳۰ درصد تخفیف قایل شد. لازم به ذکر است که نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیر خطی باید توسط یک گروه متخصص و با تجربه در این زمینه کنترل شود.
برای آشنایی با معیارهای پذیرش لازم است به دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای مراجعه شود.

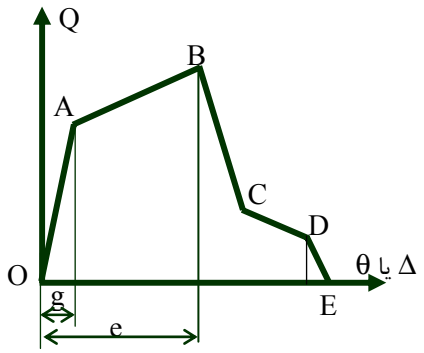
۳-۱-۳- کنترل رفتار اعضای سازه‌ای

رفتار اعضای سازه‌ای که متناسب با نوع تلاش آنها و منحنی رفتاری (نیرو ـ تغییرشکل) بیان می‌شود به دو صورت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد که عبارتند از :

أ- کنترل رفتار با تغییر شکل

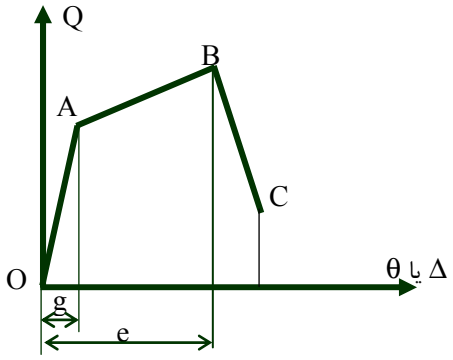
ب-کنترل رفتار با نیرو

چنانچه منحنی رفتاری عضو سازه‌ای مانند شکل ۳ باشد، رفتار آنرا شکل‌پذیر می‌گویند. در این شکل ناحیه ارتجاعی از OA، و از AB ناحیه غیر ارتجاعی با سخت کرنشی است. از B تا C رفتار عضو دارای کاهش شدید مقاومت است و از C تا D ضمن کاهش در مقاومت رفتاری نرم و شکل‌پذیر در قلمرو غیر ارتجاعی دارد و در نهایت از D تا E مرحله فروریزی خواهد بود.

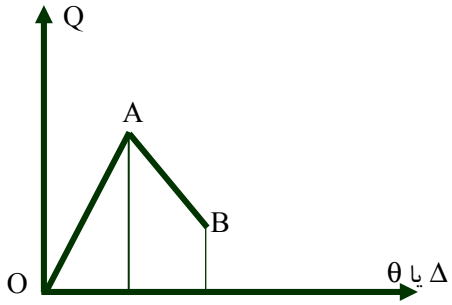


شکل ۳– منحنی رفتار عضوهای شکل‌پذیر

برای عضوهای اصلی چنانچه نسبت $\frac{e}{g}<$ باشد می‌گویندرفتار این عضو توسط تغییر شکل قابل کنترل است یا اصطلاحاً کنترل شونده توسط تغییر شکل می‌گویند. ولی برای اعضای غیر اصلی هر نسبتی که برای $\frac{e}{g}$ درنظر گرفته شود، رفتارش توسط تغییر شکل قابل کنترل است.
در شکل٤ منحنی رفتاری عضوهای شکل‌پذیر نشان داده شده است. این منحنی چنانکه مشخص است دارای سه قسمت است. قسمت OA که رفتار ارتجاعی خطی و قسمت AB رفتار غیر ارتجاعی یا خمیری با سخت کرنشی است و در نهایت قسمت BC ناحیه رفتار زوال مقاومت یا تغییر شکل بسیار اندک است.



شکل ٤– منحنی رفتار عضوهای نیمه شکل‌پذیر



شکل ٥– منحنی رفتار عضوهای ترد و شکننده

برای اینکه رفتار اعضای اصلی یا غیر اصلی را بتوان توسط تغییر شکل کنترل کرد لازم است نسبت $\frac{e}{g} \geq$ باشد. در غیر این‌صورت رفتار توسط نیرو کنترل می‌شود. اما اگر منحنی رفتاری مطابق شکل ٥ دارای دو قسمت OA و AB باشد بدان مفهوم است که این رفتار ترد و شکننده خواهد بود. در این حالت رفتار عضوهای اصلی و غیر اصلی را می‌توان با نیرو کنترل نمود که اصطلاحاً کنترل شونده توسط نیرو می‌گویند.

۳-۲- مقاومت

مقاومت اعضا بر مبنای اینکه رفتار آنها تحت چه کمیتی قابل کنترل است، تعیین می‌شود. درهر صورت مقاوت و تغییر شکل اعضای بتن مسلح باید برمبنای مقادیر به‌دست آمده از بارگذاری زلزله شامل حداقل سه چرخه کامل رفت و برگشتی تا سطح تغییر مکان طراحی باشد.

۳-۲-۱- مقاومت اعضا در شرایطی که رفتار توسط تغییر شکل کنترل می‌شود

در این حالت مقاومت اعضاء همان مقاومت مورد انتظار است که برابر مقاومت‌های آزمایشگاهی یا مقاومت‌های به‌دست آمده از روش‌های محاسباتی براساس اصول متداول مقاومت مصالح می‌باشد. ارزیابی مقاومت بر مبنای تنش تسلیم محتمل خواهد بود و همان روش‌های مندرج در آیین‌نامه بتن ایران (آبا) برای محاسبه مقاومت‌های نهایی طراحی استفاده می گردد. تنها تفاوت در این است که ضرایب جزئی ایمنی برای بتن و فولاد برابر یک فرض می‌شود. علاوه بر این برای مقاومت مشخصه فولاد به دلیل مقاومت افزون و سخت کرنشی به میزان ۲۵درصد نسبت به مقاومت تسلیم، اضافه مقاومت درنظر گرفته می‌شود.

۳-۲-۲- مقاومت اعضا در شرایطی که رفتار توسط نیرو کنترل می‌شود

در این حالت برای تعیین ظرفیت مقاومت و تغییر شکل اعضا باید شرایط کرانه پایین را برای مقاومت درنظر گرفت زیرا رفتار یا به‌صورت نیمه شکل پذیر است و یا به‌صورت ترد و شکننده، لذا لازم است به‌صورت محافظه

کارانه، از کرانهٔ پایین مقاومت مصالح استفاده کرد که شرح آن در قسمت مصالح گذشت. در این وضعیت نیز ضرائب جزیی ایمنی بتن و فولاد برابر یک درنظر گرفته می‌شود.

۳-۳- طبقه بندی نیاز شکل پذیری بذای اعضای سازه ای

میزان نیاز شکل پذیری هر عضو سازه ای برای رفتار خطی و رفتاب غیر خطی باید به نحو قابل قبولی محدود و طبقه بندی شود. این طبقه بندی بر اساس نوع رفتار شکل پذیر عضوهای سازه ای که عبارتند از شکل پذیری کم، متوسط و زیاد مشخص می شود. بنابراین نیاز شکل پذیری می تواند در سه دسته کم، متوسط و زیاد طبقه بندی گردد. چنانچه از روش تحلیل (استاتیکی یا دینامیکی) استفاده شود، طبقه بندی نیاز شکل پذیری بر پایه بیشترین مقدار نسبت نیاز به ظرفیت (DCR) که قبلا بدان اشاره شد، صورت می گیرد. و اگر از دوشهای غیر خطی (استاتیکی یا دینامیکی) استفاده شود، طبقه بندی نیاز شکل پذیری بر طبق جدول ٥ خواهد بود.

جدول ٥- طبقه بندی نیاز شکل پذیری اعضای سازه ای

نیاز شکل پذیری	حداکثر مقدار (DCR) یا شکل پذیری تغییرمکانی
کم	کوچکتر از ۲
متوسط	بین ۲ تا ٤
زیاد	بزرگتر از ٤

۴- سیستم های سازه ای

سیستم های سازه ای مورد بحث بهسازی و مقاوم سازی لرزه ای تفاوتی با سیستم های مورد استفاده در طراحی لرزه ای ندارد. این سیستم ها به ٤ دسته کلی تقسیم می شوند که عبارتند از:

۴-۱ قابهای خمشی بتن مسلح

أ- قابهای خمشی تیر-ستونی

ب-قابهای خمشی تیر-ستونی پیش تنیده

ج- قابهای خمشی دال-ستونی

۴-۲- قاابهای بتنی پیش ساخته

أ- قابهای بتنی پیش ساخته معادل قابهای خمشی درجا

ب-قابهای بتنی پیش ساخته با گره های خشک

ج- قابهای بتنی پیش ساخته ای که مستقیما در برابر بار جانبی مقاوم نیستند

۴-۳- قاابهای بتنی با میانقاب

أ- میانقابهای متصل به قاب

ب- میانقابهای منفصل از قاب

ج- میانقابهای مصالح بنایی

د- میانقابهای بتنی

۴-۴- قابهای بتنی مهار بندی شده

۴-۵- دیوارهای برشی بتنی

۴-۶- دیوارهای برشی بتنی پیش ساخته

۴-۷- دیافراگم های بتنی درجا

۴-۸- دیافراگم های بتنی پیش ساخته

۴-۹- شالوده های بتنی

أ- شالوده های سطحی

ب-شالوده منفرد

ج- شالوده های نواری

د- شالوده های مرکب

ه- شالوده های گسترده مرکب

قابهای خمشی بتن مسلح تیر-ستونی

د- قابهای خمشی تیر-ستونی پیش تنیده

ه- قابهای خمشی دال-ستونی