

به نام خدا

بررسی ارضای عملکرد آستانه فروریزش در استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش سوم

علیرضا فاروقی

کارشناس ارشد مهندسی زلزله

### چکیده

آنچنانکه می دانیم عملکرد ساختمان عبارت است از حد خرابی که استفاده یا پایداری سازه را در سطح مورد نظر ارضا کند. این سطوح برای اعضای سازه ای عبارتند از عملکرد استفاده بی وقفه ، ایمنی جانی و آستانه فروریزش. دید و هدف استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش سوم این است که سازه های با درجه اهمیت و شکل پذیری متوسط سطح عملکرد ایمنی جانی را برآورده کنند. هدف این آیین نامه بررسی مفهومی امکان ارضای سطوح عملکرد پایین تر در سطوح خطر بالاتر با بررسی فرضیات استاندارد ۲۸۰۰ است.

### کلمات کلیدی

سطح عملکرد، سطح خطر، شکل پذیری، مقاومت ، سختی ، ارتجاعی و غیر ارتجاعی

### مقدمه

همانطور که در چکیده آمده است عملکرد ساختمان عبارت است از حد خرابی که استفاده یا پایداری سازه را در سطح مورد نظر ارضا کند. محققین بر اساس مطالعاتی که بر روی اثرات زمین لرزه های اخیر همچون زمین لرزه **Northridge** آمریکا در سال ۱۹۹۴ و زمین لرزه **Kobe** در ژاپن در سال ۱۹۹۵ و موارد دیگر انجام داده اند ، مشاهده کردند سازه هایی که با آیین نامه های متداول طراحی شده اند از لحاظ تامین امنیت و سلامت جانی ساکنین عملکرد خوبی از خود نشان داده اند، ولی میزان خسارت و آسیب وارده بر سازه ها ، مخصوصاً برای سازه هایی که از لحاظ نوع کارایی آنها مهم بوده اند به طور قابل ملاحظه ای بالا بوده است.

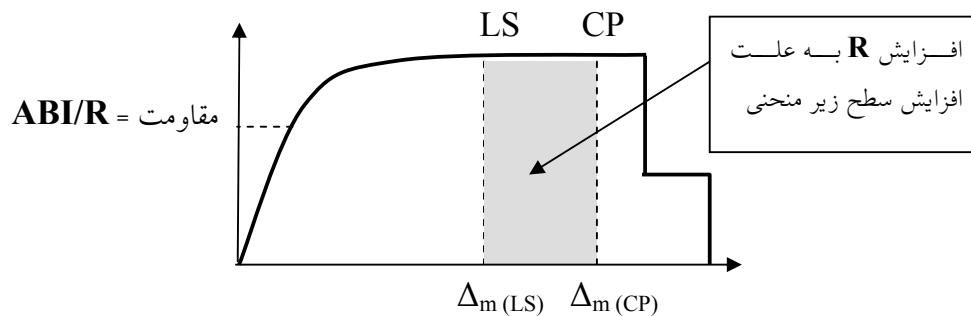
امروزه اعتقاد بر این است که تنها در نظر گرفتن سطح عملکرد مصونیت جانی و بررسی رفتار سازه در محدوده خطی برای طرح لرزه ای در نواحی فعال لرزه ای کافی نیست و برای سازه های خاص و سطوح خطر بالاتر می بایست سطح عملکرد آستانه فروریزش نیز کنترل گردد حال با معرفی سطوح عملکردی و بررسی شرایط و ضوابط آن به بررسی امکان ارضای سطوح عملکرد پایین تر در سطوح خطر بالاتر با مرور فرضیات استاندارد ۲۸۰۰ پرداخته می شود.

یک سطح عملکردی نشان دهنده حداکثر خرابی مورد انتظار سازه می‌باشد به طوری که اگر خرابی از این حد افزایش پیدا کند، سطح عملکرد سازه تغییر پیدا خواهد کرد. وضعیت کلیه اجزای سازه‌ای و غیر سازه‌ای در تعریف این سطوح عملکردی دخیل می‌باشند.

سطوح عملکرد تعریف شده توسط FEMA [۱]

- خدمت‌رسانی بی‌وقفه (Operational)
- قابلیت استفاده بی‌وقفه (Immediate Occupancy)
- ایمنی جانی (Life safety)
- آستانه فرو ریزش (Collapse Prevention)

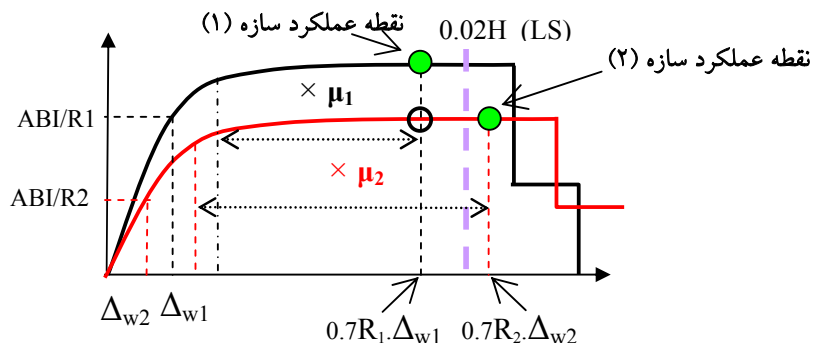
بررسی عملکرد پایین تر سازه نسبت به ایمنی جانی یا همان آستانه فروریزش (CP) در سطح خطر بالاتر یعنی اولاً اطمینان از عدم فروریزش سازه قبل از سطح عملکرد یاد شده (قابلیت استهلاک آن با افزایش شکل پذیری متناسب با سطح انرژی بیشتری که باید مصرف شود) و دوم شیب متناسب در محدوده ارتجاعی و غیر ارتجاعی (سختی و مقاومت مطلوب برای اعضا) برای اینکه سازه تغییر مکان بیش از اندازه و نافی عملکرد ندهد یعنی هیچ یک از قسمتهای اعضا عملکرد را نقض نکنند. پس باید اطمینان حاصل کرد که سازه ظرفیت بیشتری در محدوده غیر ارتجاعی (همرا با رعایت حداقل سختی و مقاومت) برای استهلاک انرژی زلزله را دارد. اکنون چنانچه سازه با افزایش شکل پذیری و نتیجتاً ضریب رفتار بتواند زلزله بزرگتر را به جای عملکرد ایمنی جانی در آستانه فروریزش مستهلک کند با فرض اینکه این افزایش  $R$  با افزایش  $\mu$  تامین می‌گردد، چنانچه نسبت  $\mu_{CP}$  را به  $\mu_{LS}$  (یعنی شکل پذیری در دو سطح عملکرد) بدست آوریم آنگاه ضریب رفتار حالت آستانه فروریزش را خواهیم داشت (شکل ۱).



شکل ۱- نمای نمودار رفتار سازه و اختلاف تغییر شکل سطوح عملکرد

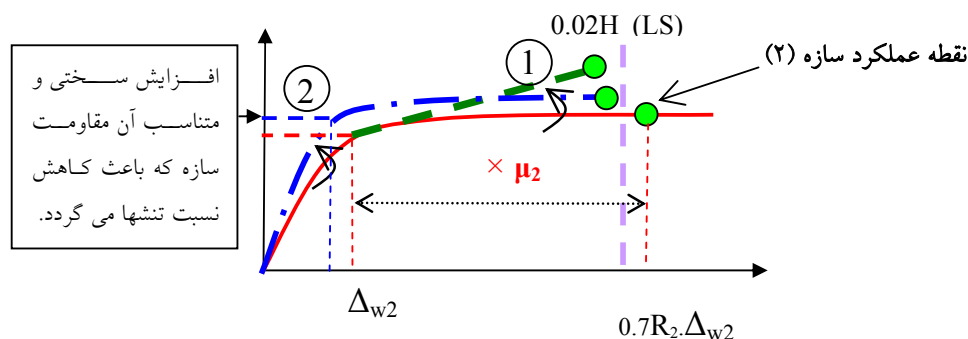
به این منظور آیین نامه ضریب رفتار بزرگتری را برای سیستم های با شکل پذیری زیاد که ناشی از افزایش  $\mu$  می‌باشد ارائه می‌کند اما همزمان با افزایش  $R$ ، مقاومت لازم نیز کاهش می‌یابد ( $ABI/R$ ) و متناسب آن زمان ورود به خرابی و در نتیجه خرابی سازه افزایش خواهد یافت (۲).

همچنین با کاهش سطح زیر نمودار نسبت به نقطه عملکرد قبلی به علت کاهش ارتفاع نمودار، سازه می بایست مسیر بیشتری را جهت استهلاک انرژی پیموده و در نتیجه تغییر مکان عملکرد سازه افزایش می یابد (شکل ۲).



شکل ۲- نمای نمودار رفتار سازه و اختلاف نقاط عملکرد سازه

حال با توجه به مطالب گفته شده و همانند شکل ۲، چنانچه انرژی زلزله اعضای سازه را تا نقطه ۲ حرکت دهد سطح عملکرد ایمنی جانی تامین نمی شود. حال ۲ راه وجود دارد: افزایش سختی قسمت غیر ارتجاعی یا افزایش سختی قسمت ارتجاعی (شکل ۳)

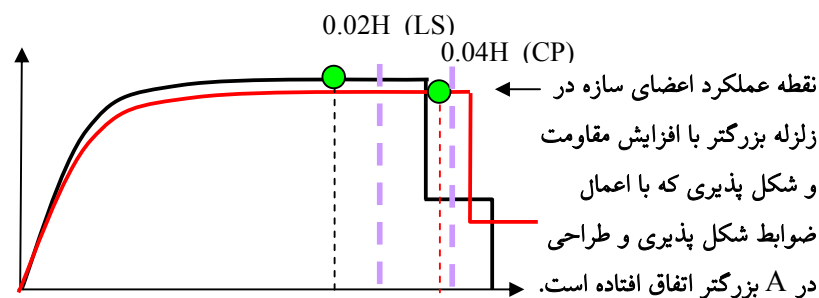


شکل ۳- روشهای کاهش تغییر مکان نهایی عضو

استاندارد ۲۸۰۰ از آنجا که سازه را تنها در قسمت ارتجاعی مورد بررسی قرار می دهد لذا راه حل دوم را پیشنهاد می کند (۲).

برای جلوگیری از کاهش سهم ارتجاعی یا ورود زودتر از قاعده به مرحله غیر ارتجاعی اعضا، استاندارد با افزودن ضریب اهمیت مقاومت سازه را افزایش می دهد لذا چنانچه توانان از ضریب اهمیت و ضریب رفتار بزرگتر استفاده شود همزمان با قابلیت جذب انرژی بیشتر به علت افزایش سطح زیر منحنی رفتار، مقاومت نیز چندان تغییری نمی کند. حال سوال اینجا است که آیین نامه چه میزان برای افزایش شکل پذیری در نظر گرفته است؟

با نگاهی به جدول ۶ استاندارد ۲۸۰۰ مشاهده می شود که با افزایش شکل پذیری سازه از متوسط به زیاد **R** نیز بین ۳۰ تا ۴۰ درصد افزایش می یابد (۲). حال چنانچه در زلزله های بزرگتر بازهم عملکرد ایمنی جانی مطرح باشد با فرض اینکه سازه تحمل چنین تغییرشکلی را خواهد داشت (با افزایش **R**) می بایست بازهم سختی و مقاومت قسمت ارتجاعی اعضا افزایش یابد که این کار تقریباً با بزرگتر شدن **A** در زلزله های بزرگ یا بزرگنمایی آن با ضریب اهمیت **I** و در نتیجه افزایش مقاومت و ازدیاد سطح زیر نمودار رفتار اعضا در مرحله و طرح ارتجاعی صورت می پذیرد و اگر بخواهیم سازه عملکرد آستانه فروریزش را ارضا کند شاید دیگر احتیاجی به افزایش سختی نباشد و تغییر مکان حداکثر اعضا سطح عملکرد آستانه فروریزش را نیز رد نکند (شکل ۴). پس بعد از اطمینان از رسیدن سازه به تغییر مکان لازم در نیروی زلزله بزرگتر و با عملکرد آستانه فروریزش، باید بررسی کنیم که این سطح انرژی در اعضا با افزوده شدن شکل پذیری و مقاومت (در سطح خطر و شکل پذیری **(R,A)**) قابل استهلاک بوده و عملکرد نیز در اعضا ارضا شده است یا افزایش مجدد مقاومت یا یکی از سختی های ارتجاعی یا غیر ارتجاعی نیز باید انجام شود؟ (با کنترل تغییر مکان نهایی در اعضا یا تغییر مکان نسبی نهایی با عدد فرضی ۰.۰۴ ارتفاع)



شکل ۴- بررسی افزایش مقاومت و شکل پذیری در ارضای عملکرد

از آنجا که در حضور نیروی بزرگتر می توان تغییر مکان هدف (نیاز) در آستانه فروریزش را برای سازه محاسبه کرد می توان تخمین زد که سازه چه میزان استهلاک بیشتری نسبت به سطح عملکرد ایمنی جانی نیاز دارد؟

حال به رابطه محاسبه  $\Delta m$  (یا همان  $\delta_t$  یا همان تغییر مکان نیاز سازه) در دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمانهای موجود مراجعه می کنیم (۳) :

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad \text{رابطه ۱ (۳)}$$

در بین این ضرایب تنها  $C_2$  و  $S_a$  به سطوح عملکرد و خطر اشاره می کنند (جدول ۱):

جدول ۱- مقادیر ضریب C2 (۳)

$T \geq T_s$		$T \leq 0.1$		سطح عملکرد مورد نظر
قاب نوع دو	قاب نوع یک	قاب نوع دو	قاب نوع یک	
۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	قابلیت استفاده‌ی بی‌وقفه
۱/۰	۱/۱	۱/۰	۱/۳	ایمنی جانی
۱/۰	۱/۲	۱/۰	۱/۵	آستانه‌ی فروریزش

در هردو حالت **T** (پریود اصلی ساختمان) برای قابهای نوع ۲ (سازه های شکل پذیر تر مانند مهاربندهای برون محور یا قابهای خمشی شکل پذیر) این ضریب برابر ۱ است. برای دیگر انواع قابها (قابهای مهاربندی با مهاربندهای هم محور) نسبت افزایش بین ۱.۱۵ تا ۱.۱ است. پس می توان تخمین زد با افزایش ۰ تا ۱۵ درصدی اختلاف نیروی زلزله در دو سطح خطر (**Sa**) ، میزان انرژی لازم برای استهلاک انرژی بزرگتر زلزله در سطح عملکرد آستانه فروریزش حاصل شود. مفهوم دیگر این نمودار این است که چنانچه سازه بخواهد همان سطح خطر را در سطح عملکرد آستانه فروریزش ارضا کند صرف از نظر از امکان کاهش سختی و مقاومت، اعضا باید ظرفیت افزایش تغییر مکان را داشته باشند به بیان دیگر برای ارضای سطح عملکرد بالاتر اولاً باید مطمئن شد که سازه قبل از نقطه هدف فرو نمی ریزد و ثانياً با کاهش تغییر شکل سازه قطعاً سختی و مقاومت بیشتری در محدوده ارتجاعی یا غیر ارتجاعی برای اعضا لازم است و این مفهوم کاهش تغییر مکان عملکرد است ، حال چنانچه بخواهیم سازه قابلیت شکل پذیرتر بودن تا رسیدن به آستانه فروریزش ( یعنی ظرفیت انرژی بیشتری) را داشته باشد باید از ضوابط شکل پذیری ویژه (زیاد) استفاده کنیم و می توانیم به جای سختی و مقاومت از ظرفیت استهلاک انرژی سازه در محدوده غیر ارتجاعی استفاده کنیم.

در استاندارد ۲۸۰۰ چون برای سازه های از درجه اهمیت متوسط همان سطح عملکرد ایمنی جانی متصور است همزمان با افزایش **R** کاهش **ABI/R** داریم پس انرژی قابل استهلاک چندان افزایش نیافته و با کنترل تغییر مکان حداکثر با معیار ایمنی جانی ۰.۰۲ تا ۰.۰۲۵ ارتفاع ساختمان، عملا کلیات آیین نامه براساس سطح عملکرد ایمنی جانی استوار است.

حال با توجه به اینکه معمولاً و با نگرشی به **ASCE7-2005**(۴) شتاب طیفی ۲۴۷۵ ساله (**Sa**) ۱.۵ برابر ۴۷۵ ساله فرض می شود در بدترین حالت میزان افزایش انرژی زلزله و نیاز استهلاک تا آستانه فروریزش با توجه به رابطه ۱ ، ۱.۷۲۵ برابر می گردد (۱.۵×۱.۵) و به طور مثال اگر همین انرژی باید در ایمنی جانی مستهلک شود باید سختی یا مقاومت اعضا ۱.۱۵ برابر افزایش یابند. پس چنانچه این عدد را با افزایش ۱.۳ تا ۱.۴ **R** از شکل پذیری متوسط به زیاد مقایسه کنیم می بینیم چنانچه سازه ۱.۲ تا ۱.۳ برابر افزایش مقاومت یا سختی داده باشد انرژی قابل استهلاک است . پس مثلاً اگر سازه با ضریب اهمیت ۱.۲ در سطح خطر زلزله ۴۷۵ ساله و شکل پذیری متوسط ، ایمنی

جانی را ارضا کرده باشد با افزایش شکل پذیری به زیاد و ارتقا ضریب اهمیت ۱.۲ به ۱.۵ برای سطح خطر II که باعث افزایش مقاومت و بعضا سختی می شود عملا ظرفیت افزایش ۱.۶۲۵ تا ۱.۷۵ انرژی قابل استهلاک فراهم شده است. برای مقایسه دقیق تر جداول زیر ارائه می گردد (جداول ۲ و ۳):

جدول ۲- مقایسه انرژی لازم و افزوده برای افزایش ۱.۵ برابری A و شکل پذیری متفاوت

افزایش انرژی ظرفیت	افزایش R	تغییر مقاومت ABI/R (I از ۱.۰ به ۱.۵)	افزایش انرژی نیاز (Sa.C2)	افزایش C2	افزایش Sa	تغییر شکل پذیری
۱.۵	۱.۴۳	۱.۰۵	۱.۵	۱	۱.۵	خمشی متوسط به زیاد
۱.۵	۱.۲۸۵	۱.۱۷	۱.۶۵	۱.۱	۱.۵	دوگانه هم محور و خمشی متوسط به زیاد

جدول ۳- مقایسه انرژی لازم و افزوده برای افزایش ۱.۲۵ برابری A و شکل پذیری متفاوت

افزایش انرژی ظرفیت	افزایش R	تغییر مقاومت ABI/R (I از ۱.۲ به ۱.۵)	افزایش انرژی نیاز (Sa.C2)	افزایش C2	افزایش Sa	تغییر شکل پذیری
۱.۲۵	۱.۴۳	۰.۸۷	۱.۲۵	۱	۱.۲۵	خمشی متوسط به زیاد
۱.۵	۱.۲۸۵	۱.۱۷	۱.۳۷۵	۱.۱	۱.۲۵	دوگانه هم محور و خمشی متوسط به زیاد

با توجه به جداول بالا مشاهده می شود در برخی حالات سازه های با ایمنی جانی و شکل پذیری متوسط چنانچه شکل پذیر ویژه شوند سطح عملکرد آستانه فروریزش را در زلزله ۱.۵ برابر از لحاظ استهلاک انرژی ارضا کرده و در برخی نمی کند (افزایش نیاز ۱.۶۵ و افزایش ظرفیت ۱.۵) ولی چنانچه با ضریب اهمیت ۱.۲ سطح عملکرد ایمنی جانی با شکل پذیری متوسط ارضا شده باشد با افزایش شکل پذیری زیاد (و کنترل تغییر مکان نهایی حداکثر با R جدید) عملکرد آستانه فروریزش در زلزله ای با افزایش ۱.۲۵ برابری (یا همان ضریب ۱.۵ برای افزایش A) ارضا خواهد شد.

بنابراین برای کنترل سطح عملکرد ایمنی جانی در زلزله ۱.۲ برابر و عملکرد آستانه فروریزش برای سازه ها در زلزله ۱.۵ برابر خواهیم داشت :

۱) طراحی سازه با ضریب اهمیت ۱.۲ و ضریب رفتار شکل پذیری متوسط و کنترل تغییر مکان نهایی با  $0.02H$  یا  $0.025H$  (ارضای عملکرد ایمنی جانی)

۲) ارضای ضوابط شکل پذیری زیاد (بدون کاهش مقاومت و اعمال ضریب R بزرگتر در این مرحله) و کنترل تغییر مکان نهایی ( $\Delta_M$ ) با  $0.04H$  تا  $0.08H$  از رابطه زیر (ارضای عملکرد آستانه فروریزش):

$$\Delta_M = 0.7R_{ss} \cdot \Delta_w (1.2)$$

$R_{SS}$ : ضریب رفتار شکل پذیر زیاد

$\Delta_w$  (1.2): تغییر مکان خطی در بار زلزله ۱.۲ برابر شده و شکل پذیری متوسط (همان تغییر مکان مدل قبلی)

### نتیجه گیری

با بررسی ضوابط فوق و با معیار قراردادن مراجع اشاره شده با همان میزان اطمینان و درجه دقتی که استاندارد ۲۸۰۰ در مورد ایمنی جانی سازه های بدون ضریب اهمیت طرح شده صحبت می کند می توان گفت چنانچه نیروی زلزله ۱.۲ برابر شده و بدون افزایش ضریب رفتار در محاسبه **ABI/R**، شکل پذیری زیاد ارضا شود و همچنین تغییر مکان نهایی افزایش داده شده با ضریب رفتار بزرگتر با معیار آستانه فروریزش کنترل شود، سطح عملکرد آستانه فروریزش در آن زلزله بزرگتر (تا ۱.۵ برابر نسبت به حالت بدون ضریب اهمیت) ارضا شده است.

### مراجع

- 1- FEMA 273, "NEHRP Guideline for the Seismic Rehabilitation of Buildings", Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington D.C., USA, 1996
- ۲- آیین نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله- استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش سوم-۱۳۸۴
- ۳- دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمانهای موجود- نشریه شماره ۳۶۰ سازمان مدیریت و برنامه ریزی - ۱۳۸۵
- 4-Minimum Design Load For Building and Other Structures, American Society of Civil Engineering (ASCE/SEI 7-05)