



مقایسه‌ی روش YPS و دستورالعمل‌های دیگر در ارزیابی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی بتن آرمه منظم طراحی شده بر اساس استاندارد ۲۸۰۰

فرهاد بهنام‌فر^{۱*}، شهاب اسلامی^۲، هادی صیادپور^۳

^۱ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

^۲ گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد آشتیان، آشتیان، ایران.

^۳ گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۲

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۵/۰۷

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۱۷

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۸/۲۸

کلمات کلیدی:

قاب خمشی بتنی

ارزیابی لرزه‌ای

طیف حد ارتجاعی (YPS)

تحلیل استاتیکی غیرخطی

روش ATC-۴۰

خلاصه: آیین‌نامه‌های مختلف، روش‌های متفاوتی برای طراحی و ارزیابی عملکرد سازه‌ها ارائه کرده‌اند. هدف از این تحقیق ارزیابی کیفیت ضوابط بارگذاری و طراحی لرزه‌ای آیین‌نامه‌های مورد استفاده در ایران در تأمین اهداف عملکردی مورد توجه در این آیین‌نامه‌ها است. بدین منظور ابتدا سه ساختمان ۱، ۵ و ۱۰ طبقه دارای سیستم باربر جانبی قاب خمشی بتنی متوسط بر اساس ضوابط آیین‌نامه‌های ایران طراحی می‌شود. سپس عملکرد لرزه‌ای این سازه‌ها با انجام تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی و استفاده از روش‌های طیف حد ارتجاعی (YPS)، نشریه‌ی ATC-۴۰ و دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ایران مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در روش YPS، ارزیابی به دو صورت انجام می‌گیرد که عبارتند از ارزیابی موقعیت نقطه‌ی عملکرد سازه نسبت به مرز عملکرد و محاسبه‌ی ضریب رفتار مورد نیاز سازه و مقایسه با ضریب رفتار استفاده شده در طراحی. در مقابل، نشریه‌ی ATC-۴۰ و دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای تنها با مقایسه‌ی پاسخ‌ها در نقطه‌ی عملکرد و تغییر مکان هدف به ارزیابی سازه‌ها می‌پردازند. نتایج نشان می‌دهد که تمام قاب‌های مورد مطالعه بر اساس روش YPS و دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای در سطح عملکرد ایمنی جانی قرار دارند؛ در حالی که بر اساس ATC-۴۰ سازه‌های ۱ و ۵ طبقه در سطح عملکرد ایمنی جانی و ساختمان ۱۰ طبقه در سطح عملکرد استفاده بی وقفه قرار می‌گیرد. همچنین در رابطه با سازه‌های مورد بررسی، ضوابط ارزیابی دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای سخت‌گیرانه‌تر از سایر روش‌ها بوده و دو روش نشریه‌ی ATC-۴۰ و YPS نسبت به دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای، ایمنی قاب‌های طراحی شده بر اساس ضوابط آیین‌نامه‌های ایران را در سطح بالاتری برآورد کرده‌اند.

۱- مقدمه

تعیین تقاضای لرزه‌ای در تحلیل استاتیکی غیر خطی از روش ضرایب تغییر مکان استفاده می‌شود. روش ضرایب تغییر مکان روشی است که تغییر مکان ارتجاعی حاصل از طیف طرح را با استفاده از یک سری ضرائب به تغییر مکان نهایی در حالت غیر الاستیک تبدیل می‌کند. جزئیات این روش‌ها در بندهای بعدی تشریح شده است.

در زمینه طراحی بر اساس عملکرد، طاحونی و احمدی در سال ۱۳۸۵ ساختمان‌های بتنی طراحی شده بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ را با استفاده از ضوابط FEMA ۳۵۶ در دو سطح خطر، بزرگترین زلزله ممکن و زلزله خفیف با دوره بازگشت ۷۵ سال، برای سطوح

فلسفه طراحی بر اساس عملکرد در سال‌های اخیر برای ارزیابی لرزه‌ای و بهسازی ساختمان‌های موجود مطرح شده است که می‌توان در این زمینه به مدارک ATC-۴۰ [۱] و ASCE ۴۱-۱۷ [۲] و در ایران به دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای [۳] اشاره کرد. روش مطرح شده در ATC-۴۰ مبتنی بر طیف ظرفیت است که به صورت گرافیکی امکان ارزیابی عملکرد سازه را تحت یک زلزله مشخص، ممکن می‌سازد. اما در دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای و ASCE ۴۱-۱۷ برای

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: farhad@cc.iut.ac.ir



R : ضریب رفتار، m : ضریب شکل پذیری و T : زمان تناوب سازه) یا حل دقیق با استفاده از شتابنگاشت زلزله خاص بجای میرایی ویسکوز معادل استفاده شده است [۸]. در این روش پاسخ غیرخطی در یک سیستم یک درجه آزاد معادل (SDOF) محاسبه می‌شود.

روش YPS در سال ۲۰۰۰ توسط آشیم ابداع شد. در این روش با بکارگیری طیف نقطه تسلیم سازه‌ها، شکل جدیدی از طیف پاسخ غیر ارتجاعی برای طراحی لرزه‌ای و یا ارزیابی ساختمان‌های موجود ارائه شد [۹]. در ادامه آشیم و بلک روش YPS را برای استفاده در تخمین تغییرمکان هدف در تحلیل لرزه‌ای سازه‌های جدید و ارزیابی و مقاوم سازی سازه‌های موجود بر پایه روش‌های استاتیکی غیر خطی ارائه شده در آیین‌نامه‌های FEMA-۲۷۳ [۱۰] و ATC-۴۰ بکار بردند [۱۱]. همچنین آشیم و مونتر اثرات $\Delta-P$ را در تخمین تغییر مکان تسلیم ساختمان‌های بلند با بکارگیری طیف YPS مطالعه کرده و نشان دادند که این روش دقت طراحی بر اساس عملکرد این گونه ساختمان‌ها را افزایش می‌دهد. اثر $\Delta-P$ باعث می‌شود تغییرمکان‌های حداکثر افزایش یابد، زیرا که یک کاهش در سختی اولیه با افزایش در تغییرمکان طیفی یک سیستم الاستیک انجام می‌شود. طیف حد تسلیمی که مورد استفاده قرار گرفته بود نشان داد که مقاومت‌های مورد نیاز با محدود کردن نیازهای شکل‌پذیری حداکثر با در نظر گرفتن اثر $\Delta-P$ است که پارامترهای جدیدی نیز برای در نظر گرفتن اثر ارتفاع در محاسبات وارد کردند و مثال‌هایی نیز آوردند. [۱۲]. در ادامه ناجی و ایرانی در سال ۲۰۱۱ با بکارگیری طیف حد ارتجاعی مقاومت جانبی سازه‌ها، اثرات $\Delta-P$ را در سازه‌های فولادی با نیازهای شکل‌پذیری ثابت مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که با افزایش میزان اثرات $\Delta-P$ ، میزان جابه‌جایی تسلیم سازه‌ها افزایش می‌یابد [۱۳]. تجین و آشیم در سال ۲۰۰۷ روش طیف حد تسلیم را در طراحی ساختمان‌ها با دیوارهای بتنی بکار بردند. این روش طراحی مبتنی بر تخمین تغییرمکان بام در نقطه‌ی تسلیم بود. ایشان به منظور برآورد مقدار برش پایه نهایی از یک سیستم یکدرجه آزاد معادل استفاده کرده و سطح عملکرد را بر اساس مقدار جابه‌جایی جانبی بام و میزان چرخش مفصل پلاستیک در پایه‌ی سازه، مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آنالیزهای استاتیکی و دینامیکی غیرخطی انجام شده حاکی از ارضای سطوح عملکردی مورد نظر توسط این روش طراحی بود [۱۴]. آشیم و وامواتسیکوس در سال ۲۰۱۶ روش طراحی

عملکرد ایمنی جانی (LS) و استفاده بی‌وقفه (IO) ارزیابی کردند که نشان‌دهنده کفایت سیستم باربر جانبی ساختمان‌های مورد مطالعه برای ارضای سطوح عملکرد هدف تعیین شده بود [۴]. همچنین دانش آشتیانی و دروش در سال ۱۳۸۵ عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های قاب خمشی با دیوار برشی بتن آرمه‌ی طراحی شده طبق ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش دوم)، را از دیدگاه دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای مورد بررسی قرار دادند [۵]. در تحقیقی دیگر در سال ۱۳۸۵، تهرانی زاده و پهلوان یلی سازه‌های فولادی ۱۰ و ۲۰ طبقه‌ی دارای سیستم دوگانه‌ی قاب - دیوار در حوزه‌ی نزدیک به گسل لرزه‌زا را با استفاده از دستورالعمل‌های ATC-۴۰ و بهسازی لرزه‌ای ایران مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که سیستم سازه‌ای مورد نظر علی‌رغم عملکرد مناسب در حوزه‌ی دور از گسل، در حوزه‌ی نزدیک به گسل نمی‌تواند سطوح عملکردی مورد نظر را ارضا کند. به علاوه، نشان دادن ضعف استاندارد ۲۸۰۰ در تعیین ترکیب بار بحرانی ستون‌ها و ناتوانی روش تحلیل استاتیکی غیرخطی در ارزیابی صحیح عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بلند مرتبه از دیگر نتایج بدست آمده در این مطالعه بود [۶]. همچنین خیرالدین و فامیلی در سال ۱۳۸۹ چند مدل سازه‌ای را با استفاده از تحلیل بار افزون و با استفاده از روش طیف ظرفیت و روش ضرایب تغییرمکان برای چند سطح خطر لرزه‌ای مختلف مورد ارزیابی آسیب‌پذیری قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که تنها ساختمان‌های یک و دوطبقه‌ی طراحی شده بر اساس ویرایش دوم استاندارد ۲۸۰۰، ایمنی لازم در برابر زلزله‌ی طرح ارائه شده در ویرایش سوم این استاندارد را داشته و ساختمان‌های با ارتفاع بیش‌تر نیازمند بهسازی هستند [۷].

طیف نقطه تسلیم^۱ (YPS) روشی دیگر برای ارزیابی نیاز لرزه‌ای برای طراحی ساختمان‌های جدید و یا ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان‌های موجود است. روش YPS برخلاف روش‌های موجود بجای اینکه بر تغییرمکان نهایی یا به اصطلاح تغییرمکان هدف تکیه کند، بر تغییرمکان حد تسلیم متکی است. تغییرمکان حد تسلیم به نسبت ساده‌تر از تغییر مکان نهایی سازه قابل محاسبه بوده و این موضوع مهم‌ترین مزیت روش YPS است. روش YPS یک برداشت متفاوت از روش طیف ظرفیت است که در آن از تغییرمکان حد جاری شدن (Δ_y) بجای تغییرمکان طیفی (S_d) و روابط ($R-m-T$)

1 YPS: Yield Point Spectrum

بررسی، ضوابط ارزیابی دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای سخت‌گیرانه‌تر از سایر روش‌ها بوده و دو روش نشریه‌ی ATC-40 و YPS نسبت به دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای، ایمنی قاب‌های طراحی شده بر اساس ضوابط آیین‌نامه‌های ایران را در سطح بالاتری برآورد کرده‌اند. جزئیات مربوط به این ارزیابی‌ها در ادامه ارائه می‌شود.

۲- طیف حد ارتجاعی (YPS)

ضریب مقاومت به صورت نسبت نیروی جانبی به وزن سیستم تعریف شده و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$C = \frac{F}{W} \quad (1)$$

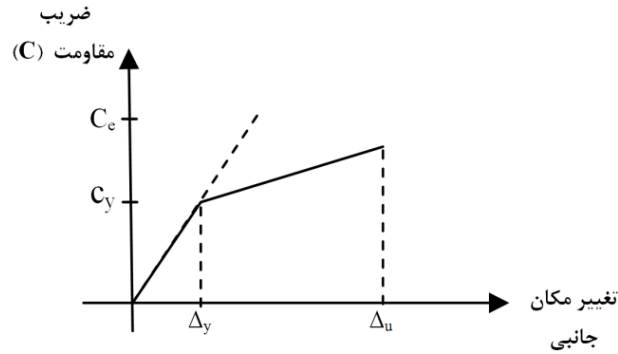
که در آن C ضریب مقاومت، F نیروی جانبی و W وزن سیستم است. شکل ۱ نمایانگر منحنی نیرو-تغییر مکان یک سیستم یک درجه آزاد است. در این شکل محور قائم ضریب مقاومت (C) و محور افقی تغییر مکان جانبی (Δ) را نشان می‌دهد. همچنین C_e و C_y به ترتیب ضریب مقاومت ارتجاعی و ضریب مقاومت جاری شدن هستند. همان‌گونه که در این شکل قابل مشاهده است، در صورتی که رفتار سیستم ارتجاعی فرض شود، منحنی نیرو-تغییر مکان بر مسیر خط چین منطبق شده و بنابراین حداکثر ضریب مقاومت متناظر با حداکثر نیروی جانبی و برابر با C_e خواهد بود. این در حالی است که طراحی سیستم‌های سازه‌ای معمولاً به گونه‌ای صورت می‌گیرد که در برابر بار جانبی رفتار غیر خطی و غیر ارتجاعی داشته باشند. این رفتار در شکل ۱ به صورت یک منحنی دوخطی ایده‌آل‌سازی شده و دارای یک حد ارتجاعی است. در این شکل ضریب مقاومت نظیر حد ارتجاعی، یا نقطه حد تسلیم، با C_y ، تغییر مکان نظیر حد جاری شدن با Δ_y و تغییر مکان حداکثر با Δ_u نشان داده شده است. به این ترتیب می‌توان شکل پذیری (μ) و زمان تناوب T را از روابط (۲) و (۳) محاسبه نمود [۹]:

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (2)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}} \quad (3)$$

مبتنی بر طیف فرکانس تسلیم را ارائه نمودند. ایشان با ارائه‌ی روش و روابطی، اثرات مربوط به عدم قطعیت‌های مربوط به سازه و ساختگاه را به روند طراحی عملکردی وارد کردند. این مسأله سبب می‌شود تا دقت طراحی مقدماتی سازه در برآورد سطح عملکرد مورد انتظار، تا حد زیادی افزایش یافته و با طی گام‌های کمتری بتوان به طرح نهایی سازه دست یافت [۱۵]. جورجوسیس در سال ۲۰۱۸ روشی را برای تخمین مقدار جابه‌جایی تسلیم منحنی ظرفیت سازه‌های بتنی دوگانه پیشنهاد داد که در آن از طیف نقطه‌ی تسلیم به صورت معکوس برای محاسبه‌ی سختی مورد نیاز در یک سطح عملکردی مشخص استفاده شد [۱۶]. همچنین مونتیز و آشیم با بکارگیری طیف نقطه‌ی تسلیم و برآورد سختی جانبی مورد نیاز سازه، روشی را برای طراحی لرزه‌ای قاب‌های خمشی ارائه دادند [۱۷]. ژانگ و همکاران در سال ۲۰۲۰ طیف نقطه تسلیم مبتنی بر خسارت را ارائه و اثرات زلزله‌های متوالی بر این طیف را بررسی کردند. ایشان دریافتند که پس‌لرزه‌های قوی می‌تواند به میزان قابل ملاحظه‌ای ویژگی‌های طیف نقطه تسلیم را تغییر دهد [۱۸].

ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ که به منظور طراحی ساختمان‌ها در برابر بارگذاری زلزله مورد استفاده قرار می‌گیرد، در طول سال‌های اخیر دچار تغییراتی شده است. در حال حاضر ویرایش چهارم این استاندارد مورد استفاده قرار می‌گیرد که اعمال ضوابط آن از شهریور سال ۱۳۹۴ الزامی شده است. بنابراین ارزیابی کفایت ضوابط و معیارهای آیین‌نامه به منظور تأمین سطح عملکرد مورد نظر آن، لازم به نظر می‌رسد. بر این اساس مقاله‌ی حاضر بر ارزیابی گروهی از سازه‌های بتنی طراحی شده مطابق ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ [۱۹] تمرکز دارد. سازه‌های بتنی نمونه‌ی مورد نظر در مطالعه‌ی حاضر با استفاده از سه روش مختلف ذکر شده، شامل روش‌های YPS، ATC-40 و دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود مورد ارزیابی قرار می‌گیرند و سطح عملکرد آن‌ها در هر مورد تعیین شده و با خواسته‌ی آیین‌نامه مقایسه می‌شود. این ارزیابی می‌تواند میزان تفاوت در نتایج حاصل از کاربرد روش‌های مختلف را نشان دهد. نتایج نشان می‌دهد که تمام قاب‌های مورد مطالعه بر اساس روش YPS و دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای در سطح عملکرد ایمنی جانی قرار دارند؛ در حالی که بر اساس ATC-40، قاب ۱۰ طبقه در سطح عملکرد استفاده بی وقفه قرار می‌گیرد. همچنین در رابطه با سازه‌های مورد



شکل ۱. رفتار نیرو-تغییر مکان یک سیستم یک درجه آزاد.

Fig. 1. Force-Displacement behavior of a single degree of freedom system

که در آن M و K به ترتیب جرم و سختی جانبی سیستم هستند. K در واقع شیب منحنی رفتاری سیستم در ناحیه ارتجاعی بوده و با توجه به شکل (۱)، از رابطه‌ی (۴) بدست می‌آید:

$$K = \frac{C_y W}{\Delta_y} \quad (۴)$$

اساس روش YPS بر برقراری رابطه‌ای بین C_y و Δ_y بر حسب (μ) و T است. برای این کار، کافی است رابطه (۴) در رابطه‌ی (۳) جایگذاری شود که از آن C_y طبق رابطه (۵) بدست خواهد آمد:

$$C_y = \frac{1}{g} \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 \Delta_y \quad (۵)$$

به این ترتیب رابطه C_y و Δ_y به ازای هر T به صورت یک خط مورب است که از مبدا می‌گذرد و با تغییر T ، یک رشته خطوط شعاعی در صفحه (Δ_y, C_y) بدست خواهد آمد [۹].

برای تعیین C_y و Δ_y علاوه بر رابطه (۵) رابطه‌ی دیگری مورد نیاز است. به این منظور، نسبت مقاومت جاری شدن سیستم یک درجه آزاد (R_y) به صورت رابطه‌ی (۶) تعریف می‌شود.

$$R_y = \frac{C_e}{C_y} \quad (۶)$$

این نسبت، تابعی از زمان تناوب، ضریب شکل پذیری و شیب ناحیه پس از جاری شدن سیستم است. در این تحقیق، برای تعیین R_y از رابطه پیشنهاد شده در مرجع [۲۰] استفاده شده که به شرح معادلات (۷) و (۸) است:

$$R_y = [c(\mu - 1) + 1]^{\frac{1}{c}} \quad (۷)$$

$$c = \frac{T^a}{1 + T^a} + \frac{b}{T} \quad (۸)$$

که در آن a و b ضرایب عددی وابسته به شیب ناحیه بعد از تسلیم هستند و مقادیر آنها بر اساس مرجع [۲۰] و از جدول ۱ بدست می‌آید.

در این تحقیق، رفتار سیستم یک درجه آزاد به صورت الاستوپلاستیک کامل در نظر گرفته شده و در نتیجه: $a=1$ و $b=0.42$ خواهد بود.

حال با محاسبه‌ی R_y ، به منظور بدست آوردن مقدار C_y از رابطه‌ی (۶) بایستی ابتدا مقدار ضریب مقاومت ارتجاعی C_e را محاسبه نمود. این مقدار را می‌توان با استفاده از طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ [۱۹] تعیین کرد. در واقع، C_e ضریب برش پایه در روش استاتیکی معادل بوده و از رابطه‌ی (۹) بدست می‌آید:

$$C_e = ABI \quad (۹)$$

در این رابطه، A شتاب مبنای طرح، B ضریب بازتاب (وابسته به نوع خاک، شدت لرزه خیزی محل و زمان تناوب سیستم) و I ضریب اهمیت ساختمان است.

به این ترتیب برای یک سیستم یک درجه آزاد در ناحیه‌ای با طیف طرح مشخص می‌توان با استفاده از روابط (۵) تا (۹) مقادیر Δ_y و C_y را به ازای زمان‌های تناوب و ضرایب شکل‌پذیری معین

شده است. همچنین منحنی‌های YPS با استفاده از مقادیر جدول ۲، در شکل ۲ ترسیم شده‌اند.

۳- معرفی مدل‌های سازه‌ای

در این تحقیق سه ساختمان بتنی منظم با سیستم قاب خمشی متوسط (ضریب رفتار: $R=5$) بر اساس ویرایش چهارم استاندارد (۲۸۰۰)

بدست آورد. منحنی‌های بدست آمده از این فرآیند، به منحنی‌های YPS موسوم‌اند. در ادامه بر اساس تعاریف استاندارد [۱۹] ۲۸۰۰ فرض می‌شود که سازه‌ی مورد مطالعه بر خاک نوع I و در ناحیه‌ای با لرزه‌خیزی بسیار شدید واقع باشد. مقادیر Δ_y و C_y به ازای بازه‌ی زمان تناوب $0 < T \leq 4.0 \text{sec}$ و مقادیر شکل‌پذیری $\mu=2,4,8$ طبق طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ محاسبه شده و در جدول ۲ گردآوری

جدول ۱. مقادیر a و b در رابطه (۸).

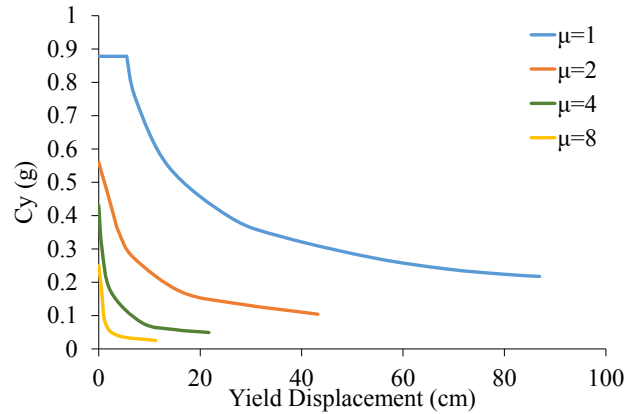
Table 1. Values of a and b in Eq. (8).

b	a	شیب ناحیه‌ی پس از تسلیم (درصد)
0.42	1.0	0
0.37	1.0	2
0.29	0.8	10

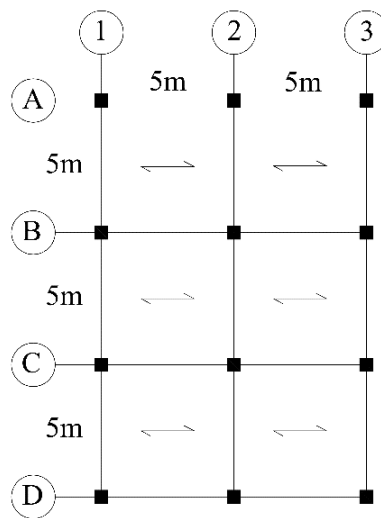
جدول ۲. مقادیر منحنی YPS طبق استاندارد ۲۸۰۰.

Table 2. YPS curves values based on Standard 2800.

T (sec)	$C_e=ABI$	R_y ($\mu=2$)	R_y ($\mu=4$)	R_y ($\mu=8$)	C_y ($\mu=2$)	Δ_y ($\mu=2$)	C_y ($\mu=4$)	Δ_y ($\mu=4$)	C_y ($\mu=8$)	Δ_y ($\mu=8$)
0.2	0.88	1.685	2.474	3.478	0.522	0.440	0.355	0.220	0.253	0.110
0.3	0.88	1.809	2.967	4.686	0.486	0.985	0.296	0.492	0.187	0.246
0.4	0.88	1.887	3.340	5.752	0.466	1.750	0.263	0.875	0.152	0.437
0.5	0.76	1.937	3.617	6.636	0.392	2.360	0.210	1.180	0.114	0.590
0.6	0.67	1.971	3.820	7.341	0.339	3.000	0.175	1.500	0.091	0.750
0.7	0.61	1.995	3.970	7.888	0.305	3.175	0.153	1.857	0.077	0.928
0.8	0.55	2.011	4.079	8.306	0.273	4.375	0.134	2.187	0.066	1.093
0.9	0.51	2.023	4.160	8.622	0.252	5.130	0.122	2.565	0.059	1.282
1.0	0.48	2.032	4.218	8.858	0.236	5.965	0.113	2.982	0.054	1.491
1.1	0.45	2.038	4.261	9.033	0.220	6.765	0.105	3.382	0.049	1.691
1.2	0.42	2.042	4.292	9.162	0.205	7.525	0.097	3.762	0.045	1.881
1.4	0.38	2.047	4.330	9.320	0.185	9.235	0.087	4.617	0.040	2.308
1.6	0.35	2.049	4.347	9.393	0.170	11.105	0.080	5.552	0.037	2.776
1.8	0.33	2.050	4.353	9.416	0.160	13.275	0.075	6.637	0.035	3.318
2.0	0.3	2.050	4.351	9.409	0.140	14.910	0.068	7.455	0.031	3.727
2.2	0.28	2.049	4.346	9.386	0.136	16.890	0.064	8.445	0.029	4.222
2.4	0.27	2.048	4.338	9.352	0.131	19.275	0.062	9.637	0.028	4.818
2.6	0.26	2.047	4.329	9.314	0.126	21.755	0.060	10.877	0.027	5.438
2.8	0.24	2.046	4.319	9.273	0.117	23.440	0.055	11.720	0.025	5.860
3.0	0.23	2.044	4.309	9.232	0.112	25.800	0.053	12.900	0.024	6.450
3.5	0.21	2.041	4.285	9.132	0.102	32.115	0.049	16.057	0.022	8.028
4.0	0.19	2.038	4.263	9.041	0.093	37.770	0.044	18.885	0.021	9.442



شکل ۲. منحنی‌های YPS طبق استاندارد ۲۸۰۰.
Fig. 2. YPS curves based on Standard 2800.



شکل ۳. پلان ساختمان‌های مورد بررسی.

Table 2. YPS curves values based on Standard 2800.

کیلوگرم بر مترمربع می‌باشد. بار دیوارهای کناری ۶۰۰ کیلوگرم بر متر در نظر گرفته شده است. مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن بر اساس نمونه استوانه‌ای، ۳۰ مگاپاسکال و آرماتور مصرفی از نوع AIII با مقاومت مشخصه ۴۰۰ مگاپاسکال است. مشخصات اعضای ساختمان‌های مورد مطالعه، در جداول ۳ تا ۵ ذکر شده است. همچنین به منظور شبیه‌سازی رفتار غیرخطی از مفاصل پلاستیک متمرکز در دو انتهای المان‌ها استفاده شد. مفاصل پلاستیک خمشی برای المان‌های تیر و مفاصل پلاستیک برشی و خمشی با در نظر گرفتن اندرکنش نیروی محوری و خمش دومحوره (P-M-M) برای ستون‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

و تعداد طبقات ۱، ۵ و ۱۰ مورد مطالعه قرار گرفته است تا دامنه نتایج حتی‌الامکان به ساختمان‌های با ارتفاع رایج قابل تعمیم باشد. این ساختمان‌ها بر اساس ضوابط مبحث ششم مقررات ملی ساختمان [۲۱] و استاندارد ۲۸۰۰ [۱۹] بارگذاری و تحلیل و طبق مبحث نهم مقررات ملی ساختمان [۲۲] و با استفاده از نرم‌افزار ETABS ۲۰۰۰ آنالیز و طراحی شده‌اند.

پلان طبقات برای کلیه سازه‌ها به ابعاد ۱۵×۱۰ متر با دهانه‌های ۵ متری برای قاب‌ها بوده (شکل ۳) و ارتفاع هر طبقه ۳ متر است. سیستم سقف کلیه طبقات تیرچه بلوک بوده و کاربری آن‌ها مسکونی است. بار مرده طبقات ۵۰۰ و بار زنده در طبقات ۲۰۰ و در بام ۱۵۰

جدول ۳. مشخصات اعضای ساختمان ۱ طبقه.

Table 3. Specifications of the 1-story building members.

شماره طبقه	مشخصات ستون‌ها	مشخصات تیرها
۱	۳۰×۳۰ ۸Φ۲۰	۳۰×۳۰ درصد آرماتور کششی = ۱/۸

جدول ۴. مشخصات اعضای ساختمان ۵ طبقه.

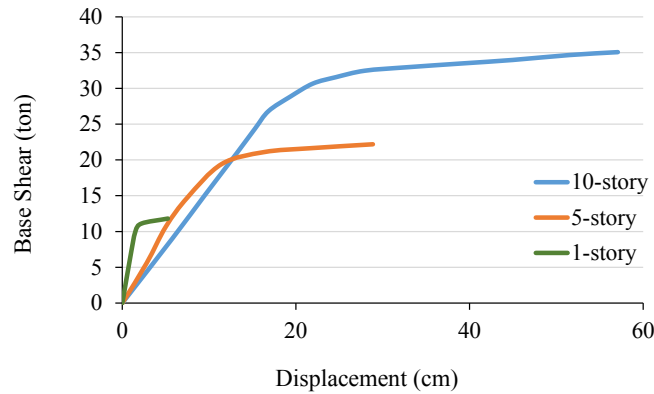
Table 4. Specifications of the 5-story building members.

شماره طبقه	مشخصات ستون‌ها	مشخصات تیرها
۱	۴۵×۴۵ ۱۶Φ۲۰	۴۵×۴۵ درصد آرماتور کششی = ۱/۸
۲	۴۵×۴۵ ۱۶Φ۲۰	۴۵×۴۵ درصد آرماتور کششی = ۱/۸
۳	۴۰×۴۰ ۱۲Φ۲۰	۴۰×۴۰ درصد آرماتور کششی = ۱/۴
۴	۴۰×۴۰ ۱۲Φ۲۰	۴۰×۴۰ درصد آرماتور کششی = ۱/۲
۵	۴۰×۴۰ ۸Φ۲۰	۴۰×۴۰ درصد آرماتور کششی = ۱/۱

جدول ۵. مشخصات اعضای ساختمان ۱۰ طبقه.

Table 5. Specifications of the 10-story building members.

شماره طبقه	مشخصات ستون‌ها	مشخصات تیرها
۱	۶۵×۶۵ ۳۲Φ۲۰	۶۰×۶۰ درصد آرماتور کششی = ۱/۶
۲	۶۵×۶۵ ۳۲Φ۲۰	۶۰×۶۰ درصد آرماتور کششی = ۱/۶
۳	۶۰×۶۰ ۲۸Φ۲۰	۵۵×۵۵ درصد آرماتور کششی = ۱/۵
۴	۶۰×۶۰ ۲۸Φ۲۰	۵۵×۵۵ درصد آرماتور کششی = ۱/۳
۵	۵۵×۵۵ ۲۴Φ۲۰	۵۰×۵۰ درصد آرماتور کششی = ۱/۲
۶	۵۵×۵۵ ۲۴Φ۲۰	۵۰×۵۰ درصد آرماتور کششی = ۱/۱
۷	۵۰×۵۰ ۲۰Φ۲۰	۴۵×۴۵ درصد آرماتور کششی = ۱/۰
۸	۵۰×۵۰ ۲۰Φ۲۰	۴۵×۴۵ درصد آرماتور کششی = ۰/۹
۹	۴۵×۴۵ ۱۶Φ۲۰	۴۰×۴۰ درصد آرماتور کششی = ۰/۸
۱۰	۴۵×۴۵ ۱۶Φ۲۰	۴۰×۴۰ درصد آرماتور کششی = ۰/۶



شکل ۴. منحنی بار افزون ساختمان‌های مورد مطالعه
Fig. 4. Push-over curves of the buildings under study.

بار افزون (برش پایه- تغییرمکان جانبی بام) با توجه به سطح عملکرد انتخابی و تغییرمکان هدف متناظر با آن. منحنی‌های بار افزون ساختمان‌های مورد مطالعه در شکل ۴ نشان داده شده است.

گام دوم: تبدیل منحنی بار افزون به منحنی شتاب طیفی بر حسب تغییر مکان طیفی یک سیستم یک درجه آزاد معادل، موسوم به طیف ظرفیت (CSM). معادلات این تبدیل طبق نشریه ۴۰-ATC به شرح زیر است:

$$S_a = \frac{V/W}{\alpha_1} \quad (10)$$

$$S_d = \frac{\Delta_{roof}}{PF_1} \quad (11)$$

$$\alpha_1 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (w_i \phi_{i1}) / g \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^N (w_i / g) \right] \left[\sum_{i=1}^N (w_i \phi_{i1}^2) / g \right]} \quad (12)$$

$$PF_1 = \frac{\sum_{i=1}^N (w_i \phi_{i1}) / g}{\sum_{i=1}^N (w_i \phi_{i1}^2) / g} \quad (13)$$

در این روابط S_a شتاب طیفی بر حسب g ، V برش پایه در هر نقطه از منحنی بار افزون، W بار مرده به همراه درصدی از بار زنده،

۴- ارزیابی لرزه‌ای سازه‌های مورد نظر به روش YPS

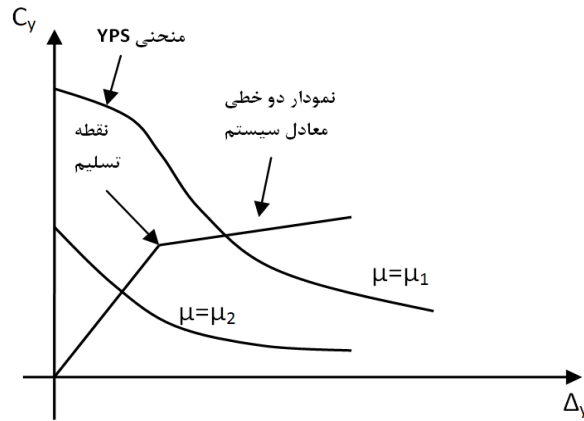
قاب‌های مورد مطالعه در راستای شرقی-غربی ارزیابی شده‌اند. ارزیابی ساختمان‌ها در روش YPS به دو صورت انجام شده است:

- ۱- استفاده مستقیم از منحنی‌های YPS
 - ۲- محاسبه ضریب رفتار و مقایسه آن با مقدار آیین‌نامه‌ای.
- جزئیات مربوط به این دو روش و نتایج حاصل از آن‌ها در بندهای بعدی ارائه شده‌اند.

۴-۱- استفاده مستقیم از منحنی‌های YPS

در این حالت، برای بررسی رفتار سازه‌های مورد مطالعه از تحلیل استاتیکی غیرخطی (بار افزون) استفاده شده است. در این روش تحلیل، سازه با الگوی بار جانبی مشخصی تحت بارهای فزاینده قرار گرفته تا تغییرمکان جانبی بام به مقدار معینی موسوم به تغییرمکان هدف برسد. الگوی بار جانبی مورد استفاده معمولاً متناسب با شکل مود اول سازه بوده که در این تحقیق هم از همین الگو استفاده شده است. در روش YPS توصیه می‌شود که برای سطوح عملکرد استفاده بی وقفه (IO) و ایمنی جانی (LS) تغییرمکان هدف به ترتیب معادل با ۱ و ۲ درصد ارتفاع ساختمان در نظر گرفته شود [۹]. برای مقایسه و ارزیابی به دلیل اینکه منحنی‌های YPS معرفی شده در بند ۲ برای سیستم‌های یک درجه آزاد محاسبه شده‌اند، منحنی‌های بار افزون هم باید به نحوی برای یک سیستم یک درجه آزاد معادل ترسیم گردند. به این ترتیب گام‌های زیر برای ارزیابی لرزه‌ای سازه‌های مورد بررسی به روش YPS دنبال شده است:

گام اول: تحلیل استاتیکی غیرخطی ساختمان و محاسبه منحنی



شکل ۵. نمودار شماتیک ترسیم منحنی‌های YPS و نمودار دوخطی
Fig. 5. Schematic representation of the YPS and bi-linear curves.

گام ششم: در نهایت عملکرد ساختمان مورد نظر بدین صورت ارزیابی می‌شود که اگر نقطه تسلیم معادل سازه که در بند ۳ تعیین شد در بالای مرز عملکرد یا روی آن قرار گیرد، سازه برای سطح عملکرد مورد نظر قابل قبول بوده و در غیراین صورت غیرقابل قبول است. لازم به ذکر است که طبق استاندارد ۲۸۰۰، سازه برای سطح عملکرد ایمنی جانی طراحی می‌شود. در واقع نقاط بالای مرز نسبت به نقاط زیر آن با Δ_y یکسان دارای ظرفیت جانبی بیشتر و با C_y یکسان دارای تغییرمکان جانبی و انعطاف‌پذیری کمتری هستند. گام‌های اول تا ششم برای ساختمان‌های مورد بررسی انجام شده و نتایج نهایی آن در شکل‌های ۶ تا ۸ و جدول ۶ ارائه شده است.

۴-۲- محاسبه و مقایسه ضریب رفتار

ضریب رفتار یا ضریب اصلاح واکنش که برای کاهش نیروهای زلزله وارد بر ساختمان از حد ارتجاعی به مقدار طراحی به کار می‌رود، از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$R = YR_s R_\mu \quad (14)$$

در رابطه فوق R ضریب رفتار بوده و Y ، R_s و R_μ به ترتیب عبارتند از ضریب روش طراحی (برای تنش مجاز $1/4$ و برای حالات حدی برابر ۱)، ضریب اضافه مقاومت و ضریب رفتار ناشی از شکل‌پذیری. ضریب R_s از تقسیم مقاومت جاری شدن معادل سازه در منحنی دوخطی معادل (شکل ۵) بر مقاومت نظیر تشکیل اولین

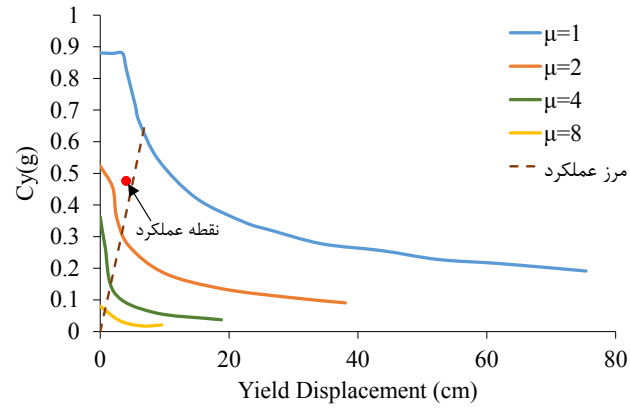
α_1 ضریب جرم معادل، Δ_{roof} تغییرمکان بام در هر نقطه از منحنی بار افزون، PF_1 ضریب مشارکت مودی و φ_{i1} مقدارمود شکل اول در تراز آم است.

گام سوم: هموارسازی منحنی طیف ظرفیت و تبدیل آن به یک نمودار دو خطی، به نحوی که سطح زیر آن برابر با سطح زیر منحنی طیف ظرفیت باشد. اطلاعات بیشتر در خصوص معادل‌سازی منحنی غیرخطی با منحنی دوخطی در مرجع [۳] قابل دسترسی است. محل تقاطع دو شاخه‌ی نمودار همان نقطه تسلیم معادل سیستم است. این نمودار دو خطی همراه با منحنی‌های YPS در یک سیستم مختصات ترسیم می‌شود. چگونگی ترسیم نمودار دوخطی معادل در کنار منحنی‌های YPS به صورت شماتیک در شکل ۵ نشان داده شده است.

گام چهارم: قرائت Δ_y و C_y در نقطه تسلیم معادل سیستم (شکل ۵).

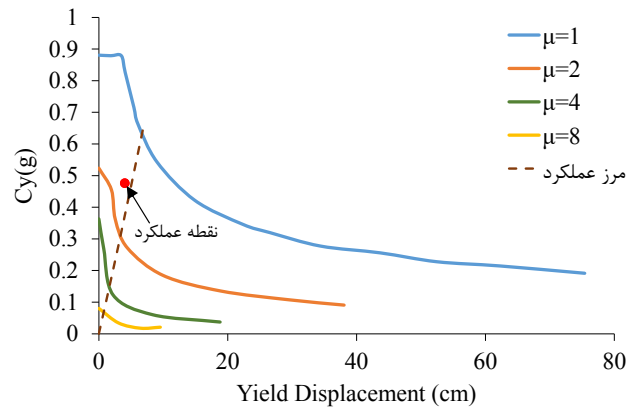
گام پنجم: تعیین Δ_y متناظر با هر یک از ضرایب شکل‌پذیری مشخص با استفاده از رابطه (۲). بدین منظور در رابطه (۲) مقدار Δ_{ii} مساوی S_{ii} حاصل از رابطه (۱۱) قرار داده شده و ضریب شکل‌پذیری μ برابر با مقادیر شکل‌پذیری مربوط به هر یک از منحنی‌های YPS (شکل ۲) در نظر گرفته می‌شود.

نقاط ب (μ و Δ_y) محاسبه شده به صورت فوق، روی منحنی‌های YPS علامت زده شده و با یک منحنی به یکدیگر متصل می‌شوند که به آن مرز عملکرد گفته می‌شود. مرز عملکرد برای ساختمان‌های مورد بررسی در شکل‌های ۶ تا ۸ نمایش داده شده است.



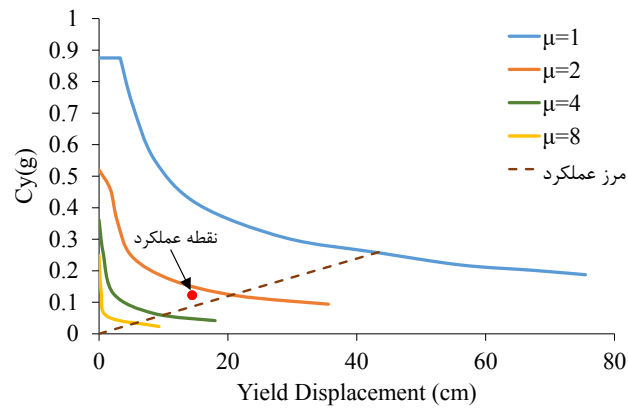
شکل ۶. طیف‌های YPS و تعیین مرز و نقطه‌ی عملکرد برای ساختمان یک طبقه

Fig. 6. YPS spectra, performance limit and performance point of the 1-story building.



شکل ۷. طیف‌های YPS و تعیین مرز و نقطه‌ی عملکرد برای ساختمان پنج طبقه

Fig. 7. YPS spectra, performance limit and performance point of the 5-story building.



شکل ۸. طیف‌های YPS و تعیین مرز و نقطه‌ی عملکرد برای ساختمان ده طبقه

Fig. 8. YPS spectra, performance limit and performance point of the 10-story building.

جدول ۶. ارزیابی ساختمان‌ها به روش YPS در حالت استفاده مستقیم از منحنی‌های YPS.
Table 6. Buildings evaluation by YPS method through using YPS curves.

تعداد طبقات	Δ_y (cm)	C_y (g)	نتیجه ارزیابی
1	3.20	0.490	قابل قبول
5	8.14	0.147	قابل قبول
10	15.85	0.112	قابل قبول

جدول ۷. محاسبه و مقایسه ضریب رفتار ساختمان‌های مورد نظر.

Table 7. Calculating and comparing the response modification factors of the buildings.

تعداد طبقات	C_y (g)	Δ_y (cm)	Δ_u (cm)	$\mu = \Delta_u / \Delta_y$	R_μ	R_S	Y	$R = R_S R_\mu Y$	سطح عملکرد
1	0.490	3.20	6.08	1.9	1.5	2.6	1.0	3.9	LS
5	0.147	8.14	24.80	2.8	2.8	1.8	1.0	4.9	LS
10	0.112	15.85	41.66	2.6	2.6	1.8	1.0	4.7	LS

و (۱۶) محاسبه شده و در جدول ۵ ارائه شده است. در جدول ۷، Δ_u تغییر مکان نهایی و Δ_y تغییر مکان تسلیم هر سازه بر اساس شکل‌های ۶ تا ۸ است.

در ارزیابی به روش محاسبه و مقایسه‌ی ضریب رفتار بایستی مقدار ضریب رفتار بدست آمده برای سازه با مقدار آیین‌نامه‌ای که برای طراحی مورد استفاده قرار گرفته، مقایسه شود. در صورتی که ضریب رفتار بدست آمده از مقدار آیین‌نامه‌ای کمتر باشد، سازه عملکرد قابل قبولی دارد و در غیراین‌صورت سازه آسیب‌پذیر بوده و باید مقاومت جانبی ساختمان افزایش داده شود. در تحقیق حاضر، بر اساس ضوابط استاندارد ۲۸۰۰، از ضریب رفتار ۵ برای طراحی سازه‌ها استفاده شده که در تمام موارد در مقایسه با مقادیر بدست آمده از تحلیل بزرگتر است. بنابراین طبق روش YPS هر سه سازه‌ی طراحی شده بر اساس آیین‌نامه‌ی زلزله‌ی ایران، ضابطه‌ی سطح عملکرد ایمنی جانی را برآورده کرده و هدف آیین‌نامه را تأمین می‌نمایند. این موضوع با نتیجه‌ی بدست آمده در بند ۴-۱ نیز مطابقت دارد.

۵- ارزیابی لرزه‌ای سازه‌های مورد مطالعه با استفاده از ATC-۴۰ بر اساس نسبت تغییر مکان نسبی طبقه

در دستورالعمل ATC-۴۰ نیز تحلیل استاتیکی غیرخطی نقشه‌ی اساسی در ارزیابی لرزه‌ای ساختمان‌ها ایفا می‌کند. بر اساس روش ارائه شده در این دستورالعمل، ابتدا بایستی طیف ظرفیت به روش گفته

مفصل خمیری در سازه بدست می‌آید. مقدار اخیر از منحنی بار افزون هر سازه (شکل ۴) قرائت می‌شود. جهت محاسبه R_μ از روابط ارائه شده در مرجع [۲۳] استفاده می‌شود:

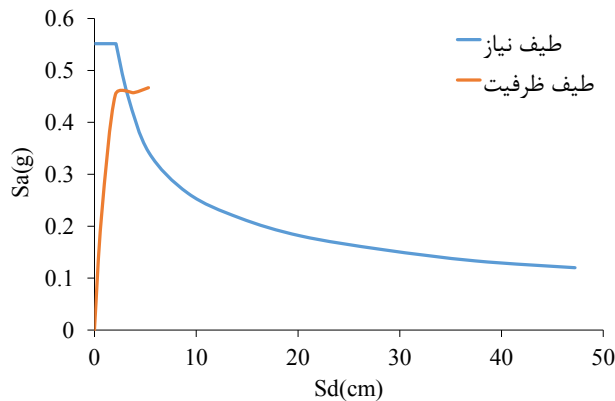
$$R_\mu = (\mu - 1) \frac{T}{T_0} + 1 \quad T \leq T_0 \quad (15)$$

$$R_\mu = \mu \quad T \geq T_0 \quad (16)$$

$$T_0 = 0.65 T_S \mu^{0.3} \leq T_S \quad (17)$$

در روابط بالا، T_S پیوند مشخصه زمین ساختگاه است که مربوط به نقطه تلاقی بخش شتاب ثابت طیف طرح محل با بخش سرعت ثابت آن طبق استاندارد ۲۸۰۰ [۱۹] است.

زمان تناوب سازه‌های ۱، ۵ و ۱۰ طبقه‌ی مورد مطالعه به ترتیب برابر ۰/۱۶، ۰/۵۳ و ۰/۹۰ ثانیه است. با فرض این‌که سازه‌ها بر زمین نوع I ساخته شده‌اند، مقدار T_S برابر ۰/۴ ثانیه خواهد بود. بنابراین با توجه به مقادیر شکل‌پذیری ارائه شده در جدول ۷ و با استفاده از رابطه‌ی (۱۷)، مقدار T_0 برای ساختمان‌های ۱، ۵ و ۱۰ طبقه به ترتیب برابر ۰/۳۲، ۰/۳۵۴ و ۰/۳۴۶ ثانیه بدست می‌آید. بر این اساس در سازه ۱ طبقه $T < T_0$ و در سازه‌های ۵ و ۱۰ طبقه $T > T_0$ است. مقادیر R برای سازه‌های مورد نظر با استفاده از روابط (۱۵)



شکل ۹. تعیین نقطه عملکرد ساختمان یک طبقه به روش ATC-40.

Fig. 9. Determining the performance point of the 1-story building based on ATC-40 method.

و ۰/۰۵ مقدار مفروض برای میرایی ذاتی سازه است. β_0 با استفاده از روابط ارائه شده در فصل هشتم از نشریه ی ATC-40 و به صورت تابعی از شکل پذیری سازه و ضریب سختی پس از تسلیم در منحنی بار- تغییرمکان بدست می آید. مقدار مقادیر β_{eq} برای ساختمان های ۱، ۵ و ۱۰ طبقه، مساوی ۰/۲۰۸، ۰/۳۴۳ و ۰/۳۵۴ بدست آمده است که با مقادیر نمونه ی ارائه شده در نشریه ATC-40 مطابقت دارد. با محاسبه ی طیف های ظرفیت و نیاز و ترسیم آن ها در کنار هم، مشاهده می شود که این دو طیف در نقطه ای یکدیگر را قطع می کنند. این نقطه که بیانگر شتاب غیرالاستیک (مقاومت) و تغییرمکان نیاز است، به عنوان نقطه ی عملکرد شناخته می شود. منحنی های بدست آمده از این روش برای ساختمان های مورد مطالعه در شکل های ۹ تا ۱۱ ارائه شده است.

نشریه ATC-40 مقادیری را به عنوان حدود مجاز تغییرمکان نسبی برای قاب های بتنی در هر یک از سه سطح عملکرد مختلف ارائه کرده است. این مقادیر که در جدول ۸ آورده شده اند در سطوح عملکرد IO و LS مشابه روش YPS هستند.

بر اساس روش ارائه شده توسط نشریه ATC-40، ابتدا باید مختصات نقطه ی عملکرد با استفاده از شکل های ۹ تا ۱۱ بدست آید. سپس مقادیر تغییرمکان طیفی در نقطه ی عملکرد با مقادیر مجاز در سطوح عملکرد مختلف مقایسه شده و سطح عملکرد سازه مشخص

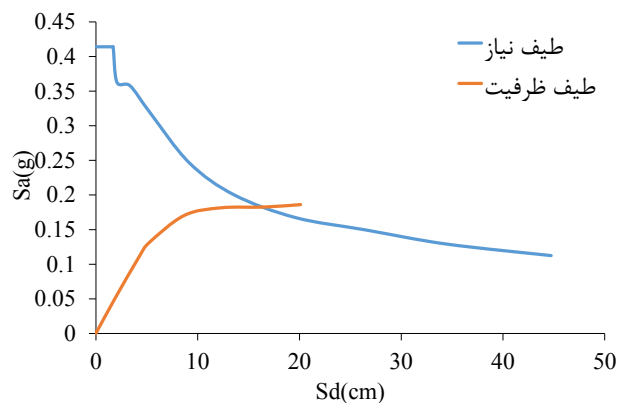
شده در بند ۴-۱ بدست آمده و سپس طیف نیاز لرزه ای محاسبه شود. برای تهیه طیف نیاز لرزه ای و مقایسه ی آن با طیف ظرفیت، از طیف پاسخ (شتاب طیفی در برابر زمان تناوب) استفاده می شود که باید به قالب شتاب طیفی در برابر تغییرمکان طیفی (ADRS) برده شود. بدین منظور از رابطه ی (۱۸) استفاده می شود:

$$S_a = \omega^2 S_d \rightarrow S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} S_a \quad (18)$$

طیف نیاز بایستی به واسطه میرایی کاهش یابد. میرایی کل یک سازه در هنگام زلزله از دو بخش تشکیل می شود که قسمت اول میرایی ذاتی سازه یا میرایی ویسکوز بوده و قسمت دوم به علت اتلاف انرژی در هنگام رفتار غیرخطی ساختمان ایجاد می شود. میرایی اخیر با محاسبه ی مساحت سطح زیر منحنی برش پایه- تغییرمکان سازه بدست می آید که به آن میرایی هیستریزیس گفته می شود. در عمل، میرایی هیستریزیس نیز به صورت میرایی ویسکوز معادل محاسبه شده و میرایی کل ساختمان از جمع این دو مقدار به صورت زیر به دست می آید [۱]:

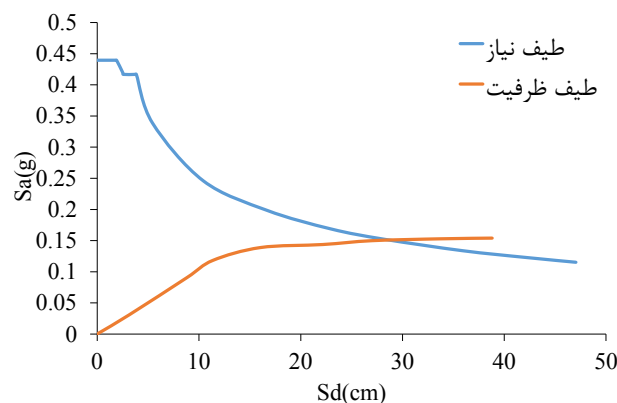
$$\beta_{eq} = \beta_0 + 0.05 \quad (19)$$

β_{eq} میرایی کل، β_0 میرایی ویسکوز معادل با میرایی هیستریزیس



شکل ۱۰. تعیین نقطه عملکرد ساختمان پنج طبقه به روش ATC-40.

Fig. 10. Determining the performance point of the 1-story building based on ATC-40 method.



شکل ۱۱. تعیین نقطه عملکرد ساختمان ده طبقه به روش ATC-40.

Fig. 11. Determining the performance point of the 1-story building based on ATC-40 method.

جدول ۸. حدود مجاز نسبت تغییر مکان نسبی در ATC-40.

Table 8. Allowable relative displacement ratios in ATC-40.

سطوح عملکرد سازه‌ای			قاب‌های بتنی
CP	LS	IO	
۴٪ ارتفاع	۲٪ ارتفاع	۱٪ ارتفاع	نسبت تغییر مکان نسبی حدی

جدول ۹. نتایج ارزیابی لرزه‌ای ساختمان‌ها به روش ATC-40.

Table 9. Seismic evaluation results of the buildings based on ATC-40

تعداد طبقات	نقطه عملکرد	نسبت تغییر مکان نسبی	سطح عملکرد حاصله (طبق جدول ۶)
1	$S_a = 0.4359g$ $S_d = 3.27cm$	1.09%	LS
5	$S_a = 0.177g$ $S_d = 17.6cm$	1.17%	LS
10	$S_a = 0.148g$ $S_d = 29.06cm$	0.97%	IO

ارتباط دادن تغییرمکان طیفی یک سیستم یک درجه آزاد به سیستم چند درجه آزاد، C_1 ضریب تصحیح برای اعمال تغییرمکان‌های غیر ارتجاعی سیستم، C_2 ضریب اصلاح جهت لحاظ کردن شکل حلقه‌های هیستریزیس، C_3 ضریب اصلاح برای اعمال اثرات $P-\Delta$ در هنگام رفتار غیر خطی مصالح، S_a شتاب طیفی و T_e پریود مؤثر سازه است. این مقادیر بر اساس جداول و روابط فصل ۳ دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای تعیین می‌شوند که برای جزئیات آن می‌توان به مرجع [۳] مراجعه نمود.

به منظور ارزیابی عملکرد سازه‌های مورد بحث، ابتدا مقدار تغییرمکان هدف برای هر یک از ساختمان‌ها محاسبه شده و سپس با مقادیر مجاز ارائه شده برای هر یک از سطوح عملکردی مقایسه می‌شود. برای تعیین تغییرمکان‌های مجاز در سطوح عملکرد مختلف از جدول ۱۰ استفاده می‌شود. در این جدول مقادیر تغییرمکان‌های مجاز دائمی (پس از زمین لرزه) و گذرا (در طول زمین لرزه) متناظر با هر یک از سطوح آسیب لرزه‌ای ذکر شده است. نتایج ارزیابی لرزه‌ای ساختمان‌های مورد بررسی به روش دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای در جدول ۱۱ خلاصه شده است. مقایسه‌ی مقادیر تغییرمکان هدف با

می‌شود. نتایج ارزیابی سازه‌های مورد مطالعه به روش نشریه‌ی-ATC 40 در جدول ۹ آورده شده است. در بخش ۷ ارزیابی ساختمان‌ها با استفاده از ضوابط 40-ATC و بر اساس میزان چرخش مفاصل خمیری نیز انجام شده است.

۶- ارزیابی لرزه‌ای با استفاده از دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای

۶-۱- ارزیابی لرزه‌ای بر اساس نسبت تغییر مکان نسبی طبقه

در دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای [۳]، تغییرمکان هدف با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی سازه به روش ضرایب تغییرمکان به دست می‌آید. روش ضرایب تغییرمکان روشی است که تغییرمکان ارتجاعی حاصل از طیف طرح را با استفاده از یک سری ضرایب به تغییرمکان نهایی در حالت غیرالاستیک تبدیل می‌کند. تغییرمکان هدف از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} \quad (20)$$

در این رابطه δ_t تغییرمکان هدف، C_0 ضریب اصلاحی برای

جدول ۱۰. آسیب‌های اعضای ساختمان در سطوح عملکرد مختلف [۳]

Table 10. The damage of building members in different performance levels.

سطوح عملکرد سازه‌ای					
آستانه فرو ریزش (CP)	ایمنی جانی (LS)	استفاده بی‌وقفه (IO)			
ترک‌های زیاد و ایجاد مفصل خمیری در اعضای شکل‌پذیر، خرابی شدید در ستون‌های کوتاه	خرابی زیاد در تیرها، خرد شدن پوشش مقاطع، خردشدگی جزئی در ستون‌های ترد	ایجاد ترک‌های مویی، تسلیم شدن تعداد کمی از نقاط سازه، عدم وجود خرد شدگی	توصیف آسیب	نسبت تغییرمکان نسبی متناظر در طبقه	قاب‌های بتنی
۴٪	۲٪ ارتفاع طبقه	۱٪ ارتفاع طبقه	گذرا		
	۱٪ ارتفاع طبقه	ناچیز	دائمی		

جدول ۱۱. نتایج ارزیابی لرزه‌ای ساختمان‌ها به روش دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای.

Table 11. Seismic evaluation results of the buildings based on the Iranian Seismic Rehabilitation Manual.

تعداد طبقات	C_0	C_1	C_2	C_3	T_e	S_a	δ_t (cm)	سطح عملکرد
1	1	1	1.1	1	0.36	0.88	3.1	LS
5	1.4	1	1.1	1	1.25	0.41	24.5	LS
10	1.5	1	1.1	1	2.00	0.30	49.1	LS

آیین‌نامه بدست می‌آید. در این جا نقطه‌ی عملکرد سازه‌ها در دو حالت زیر تعیین می‌شود:

- ۱- بر اساس نشریه‌ی ۴۰-ATC و با استفاده از جدول ۹.
- ۲- بر اساس دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای و با استفاده از جدول ۱۱. در مرحله‌ی بعد، حداکثر چرخش ایجاد شده در مفاصل خمیری اعضای تیر و ستون هر طبقه به عنوان معیار کنترل برای تیرها و ستون‌های آن طبقه در نظر گرفته می‌شود. در نهایت با مقایسه‌ی این مقادیر با مقادیر مجاز ارائه شده در جدول ۱۲، سطح عملکرد هر یک اعضا در هر طبقه بدست می‌آید. نتایج ارزیابی عملکرد ساختمان‌های مورد مطالعه بر اساس چرخش مفاصل خمیری تیرها و ستون‌ها در جداول ۱۳ تا ۱۸ برای قاب ۱ ارائه شده است. مقایسه‌ی نتایج ارائه شده در این جداول با جداول ۹ و ۱۱ نشان‌دهنده‌ی تطابق نتایج ارزیابی حاصل از هر دو روش مبتنی بر کنترل تغییرمکان نسبی طبقات و روش مبتنی بر کنترل چرخش مفاصل خمیری اعضاء است. با توجه به نتایج مطالعات بالا دیده می‌شود که روش‌های ارزیابی لرزه‌ای مورد بحث دو تفاوت عمده با هم دارند: (۱) جزئی‌نگری یا کلی‌نگری در ارزیابی؛ (۲) چگونگی محاسبه نیاز

مقادیر مجاز ارائه شده توسط دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای نشان می‌دهد که هر سه ساختمان ۱، ۵ و ۱۰ طبقه در سطح عملکرد ایمنی جانی قرار دارند. در بخش ۷، ارزیابی با استفاده از دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای و بر اساس میزان چرخش مفاصل خمیری نیز انجام شده است.

۷- ارزیابی لرزه‌ای بر اساس میزان چرخش مفاصل خمیری

تعیین سطوح عملکرد بجز بر اساس نسبت تغییرمکان نسبی می‌تواند با محاسبه‌ی میزان چرخش مفاصل خمیری ایجاد شده در اعضای سازه‌ی تحت بار جانبی نیز صورت پذیرد. مرجع [۳] میزان چرخش مجاز در مفاصل خمیری تیرها و ستون‌های دارای آرماتور طولی و عرضی آیین‌نامه‌ای را وقتی تنش برشی زیاد نبوده و تنش فشاری در ستون‌ها نیز بزرگ نباشد (مشابه شرایط ساختمان‌های مورد بررسی)، مطابق جدول ۱۲ ارائه می‌نماید.

به منظور ارزیابی سطح عملکرد اعضای سازه‌های مورد بررسی، ابتدا قاب‌ها در نرم‌افزار غیرخطی DRAIN-۲DX [۲۴] مدل‌سازی می‌شود و سپس مقادیر چرخش مفاصل خمیری هر یک از اعضای سازه در تغییرمکانی متناظر با نقطه‌ی عملکرد تعیین شده توسط

جدول ۱۲. حدود مجاز چرخش مفاصل خمیری بر حسب رادیان

Table 12. Allowable plastic hinge rotation in radians.

نوع عضو	سطح عملکرد عضو		
	IO	LS	CP
تیر	0.01	0.02	0.025
ستون	0.005	0.015	0.02

جدول ۱۳. حداکثر چرخش مفاصل و سطح عملکرد تیرهای ساختمان یک طبقه.

Table 13. Maximum plastic hinge rotations and performance level of the beams of the 1-story building.

	در نقطه عملکرد ATC-40	در نقطه عملکرد دستورالعمل بهسازی
چرخش مفاصل	0.016	0.016
سطح عملکرد	LS	LS

جدول ۱۴. حداکثر چرخش مفاصل و سطح عملکرد ستون‌های ساختمان یک طبقه.

Table 14. Maximum plastic hinge rotations and performance level of the columns of the 1-story building.

	در نقطه عملکرد ATC-40	در نقطه عملکرد دستورالعمل بهسازی
چرخش مفاصل	0.0039	0.0032
سطح عملکرد	IO	IO

جدول ۱۵. حداکثر چرخش مفاصل و سطح عملکرد تیرهای ساختمان پنج طبقه.

Table 15. Maximum plastic hinge rotations and performance level of the beams of the 5-story building.

شماره طبقه	در نقطه عملکرد ATC-40	در نقطه عملکرد دستورالعمل بهسازی
1	چرخش مفاصل	0.011
	سطح عملکرد	LS
2	چرخش مفاصل	0.012
	سطح عملکرد	LS
3	چرخش مفاصل	0.0098
	سطح عملکرد	IO
4	چرخش مفاصل	0.0009
	سطح عملکرد	IO
5	چرخش مفاصل	0
	سطح عملکرد	IO

جدول ۱۶. حداکثر چرخش مفاصل و سطح عملکرد ستون‌های ساختمان پنج طبقه.

Table 16. Maximum plastic hinge rotations and performance level of the columns of the 5-story building.

شماره طبقه	در نقطه عملکرد ATC-40	در نقطه عملکرد دستورالعمل بهسازی
1	چرخش مفاصل	0.0072
	سطح عملکرد	LS
2	چرخش مفاصل	0
	سطح عملکرد	IO
3	چرخش مفاصل	0.0016
	سطح عملکرد	IO
4	چرخش مفاصل	0.0045
	سطح عملکرد	IO
5	چرخش مفاصل	0
	سطح عملکرد	IO

تناوب سازه با احتساب میرایی‌های ویسکوز و هیستریزیس محاسبه می‌شود که در این بین اثر میرایی هیستریزیس بسیار تعیین کننده است. در ATC40 و نشریه ۳۶۰ رویکردهای کاملاً متفاوتی برای لحاظ کردن اثر اخیر دنبال می‌شود. تفاوت مواجهه با دو بحث بالا،

لرزه‌ای. جزئی‌نگری به مفهوم ارزیابی عضو به عضو است، درحالی‌که کلی‌نگری به معنی ارزیابی برآیند رفتار یک طبقه یا حتی کل سازه به صورت یک‌جا می‌باشد. از این منظر، روش YPS در دسته دوم قرار می‌گیرد؛ درحالی‌که دو روش دیگر در دسته اول قرار دارند. از سوی دیگر، نیاز لرزه‌ای براساس تغییرات شتاب طیفی با زمان

جدول ۱۷. حداکثر چرخش مفاصل و سطح عملکرد تیرهای ساختمان ده طبقه.

Table 17. Maximum plastic hinge rotations and performance level of the beams of the 10-story building.

شماره طبقه		در نقطه عملکرد ATC-40	در نقطه عملکرد دستورالعمل بهسازی
1	چرخش مفاصل	0.006	0.015
	سطح عملکرد	IO	LS
2	چرخش مفاصل	0.0095	0.019
	سطح عملکرد	IO	LS
3	چرخش مفاصل	0.0089	0.019
	سطح عملکرد	IO	LS
4	چرخش مفاصل	0.0087	0.019
	سطح عملکرد	IO	LS
5	چرخش مفاصل	0.0058	0.015
	سطح عملکرد	IO	LS
6	چرخش مفاصل	0.0041	0.011
	سطح عملکرد	IO	LS
7	چرخش مفاصل	0	0
	سطح عملکرد	IO	IO
8	چرخش مفاصل	0	0
	سطح عملکرد	IO	IO
9	چرخش مفاصل	0	0
	سطح عملکرد	IO	IO
10	چرخش مفاصل	0	0
	سطح عملکرد	IO	IO

جدول ۱۸. حداکثر چرخش مفاصل و سطح عملکرد ستون‌های ساختمان ده طبقه.

Table 18. Maximum plastic hinge rotations and performance level of the columns of the 10-story building.

شماره طبقه		در نقطه عملکرد ATC-40	در نقطه عملکرد دستورالعمل بهسازی
1	چرخش مفاصل	0.0026	0.011
	سطح عملکرد	IO	LS
2	چرخش مفاصل	0	0
	سطح عملکرد	IO	IO
3	چرخش مفاصل	0	0
	سطح عملکرد	IO	IO
4	چرخش مفاصل	0	0
	سطح عملکرد	IO	IO
5	چرخش مفاصل	0	0.0012
	سطح عملکرد	IO	IO
6	چرخش مفاصل	0.00038	0.0034
	سطح عملکرد	IO	IO
7	چرخش مفاصل	0	0.003
	سطح عملکرد	IO	IO
8	چرخش مفاصل	0	0.0003
	سطح عملکرد	IO	IO
9	چرخش مفاصل	0	0
	سطح عملکرد	IO	IO
10	چرخش مفاصل	0	0
	سطح عملکرد	IO	IO

علت مبنایی تفاوت نتایج این روش‌ها با یکدیگر است.

پیشنهاد می‌شود در آینده تحقیقات بیش‌تری روی طیف YPS خصوصاً در زمینه‌ی ضرائب اضافه مقاومت، اثرات زلزله‌های حوزه نزدیک، سازه‌های با تعداد طبقات بیشتر و استفاده از تحلیل بار افزون تطبیقی در این روش انجام گیرد.

۸- نتیجه‌گیری

هدف این تحقیق ارزیابی کیفیت ضوابط بارگذاری لرزه‌ای، تحلیل و طراحی تجویز شده توسط آیین‌نامه‌های ایران و مقایسه‌ی روش‌های ارزیابی لرزه‌ای YPS، نشریه ۴۰-ATC و دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای بود. بدین منظور ابتدا سه ساختمان بتنی قاب خمشی متوسط با استفاده از آیین‌نامه‌های ایران، تحلیل و طراحی شدند و در ادامه سطح ایمنی تأمین شده در طراحی لرزه‌ای این ساختمان‌ها با استفاده از روش YPS، نشریه ۴۰-ATC و دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه‌ی مقادیر ضریب رفتار مشخص کرد که بر اساس روش YPS، هر سه سازه‌ی طراحی شده بر اساس آیین‌نامه‌ی زلزله‌ی ایران، ضابطه‌ی سطح عملکرد ایمنی جانی را برآورده کرده و هدف آیین‌نامه را تأمین می‌نمایند. همچنین نتایج حاصل از تحلیل غیرخطی سازه‌های مورد بررسی نشان داد که تمام سازه‌های مورد مطالعه بر اساس روش YPS و دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای در سطح عملکرد ایمنی جانی قرار دارند؛ درحالی‌که بر اساس ۴۰-ATC، قاب ۱۰ طبقه در سطح عملکرد استفاده بی‌وقفه قرار می‌گیرد.

تغییرمکان نیاز (هدف) به دست آمده از ضوابط دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای، به جز در مورد سازه‌ی یک طبقه، بیشتر از تغییرمکان نیاز ۴۰-ATC بوده و بدین سبب چرخش ایجاد شده در مفاصل خمیری این قاب‌ها طبق دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای بیشتر از ۴۰-ATC به دست آمده است. در مجموع می‌توان گفت که در رابطه با سازه‌های مورد بررسی، ضوابط ارزیابی لرزه‌ای دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای سخت‌گیرانه‌تر از سایر روش‌های مورد بررسی بوده است. همچنین ارزیابی عملکرد ساختمان‌های مورد بررسی نشان داد که دو روش نشریه‌ی ۴۰-ATC و YPS نسبت به دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای، ایمنی قاب‌های طراحی شده بر اساس ضوابط آیین‌نامه‌های ایران را در سطح بالاتری برآورد کرده‌اند.

به عنوان یک محدودیت، در روش YPS تنها کنترلی کلی از نیاز تغییرمکان و ظرفیت جانبی سازه در حد تسلیم انجام گرفته و کنترل جداگانه‌ای روی عملکرد تک‌تک اعضای سازه اعمال نمی‌شود. بنابراین استفاده از روش YPS تنها برای انجام یک ارزیابی کلی از وضعیت ایمنی لرزه‌ای سازه مناسب است.

فهرست علائم

A	شتاب مبنا (رابطه (۹))
B	ضریب بازتاب (رابطه (۹))
C	ضریب مقاومت (رابطه (۱))
C_e	ضریب مقاومت ارتجاعی (رابطه (۶))
C_y	ضریب مقاومت تسلیم (رابطه (۴))
F	نیروی جانبی (رابطه (۱))
I	ضریب اهمیت (رابطه (۹))
M	جرم سیستم (رابطه (۳))
K	سختی جانبی سیستم (رابطه (۳))
PF_1	ضریب مشارکت مودی (رابطه (۱۱))
R	ضریب رفتار (رابطه (۱۴))
R_S	ضریب اضافه مقاومت (رابطه (۱۴))
R_y	نسبت مقاومت تسلیم (رابطه (۶))
R_{μ}	ضریب رفتار ناشی از شکل پذیری (رابطه (۱۵))
S_a	شتاب طیفی (رابطه (۱۰))
S_d	تغییرمکان طیفی (رابطه (۱۱))
T	زمان تناوب سازه (رابطه (۳))
T_s	پریود مشخصه زمین محل (رابطه (۱۷))
T_e	پریود مؤثر سازه (رابطه (۲۰))
V	برش پایه (رابطه (۱۰))
W	وزن ساختمان (رابطه (۱))
Y	ضریب روش تحلیل (رابطه (۱۴))
α_1	ضریب جرم معادل (رابطه (۱۰))
β_{eq}	میرایی کل (رابطه (۱۹))
β_o	میرایی ویسکوز معادل (رابطه (۱۹))
δ_t	تغییرمکان هدف (رابطه (۲۰))

- Auckland, New Zealand, 2000.
- [9] Aschheim, M., "Yield Point Spectra: A simple alternative to the capacity spectrum method", Advanced Technology in Structural Engineering, Proceedings of Structures Congress, ASCE, 2000.
- [10] FEMA273-; NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., October, 1997.
- [11] Aschheim, M., Black, P. "Yield point spectra for seismic design and rehabilitation"; The 12th WCEE Proceedings, Auckland, New Zealand, 2000.
- [12] Aschheim, M., Montez, E., "The representation of P- Δ effects using Yield Point Spectra" ; Engineering Structures, Vol. 2003 ,25, pp. 1396-1387.
- [13] Naji, A; Irani, F. "P- Δ effects in steel structures using Yield Point Spectra"; Advanced Materials Research Vol 260-255, May 2011.
- [14] Tjhin, T., Aschheim, M., "Yield displacement-based seismic design of RC wall buildings"; Engineering Structures, Vol. 2007 ,29, pp. 2959-2946.
- [15] Vamvatsikos, M., Aschheim, M., "Performance-based seismic design via yield frequency spectra"; Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1778-1759 ,(11)45 2016.
- [16] Georgoussis GK., "Yield Displacements of Wall-Frame Concrete Structures and Seismic Design Based on Code Performance Objectives", Journal of Earthquake Engineering, Oct 2018 ,13-13:1.
- [17] Hernández-Montes, E., and Aschheim, M.A., "A seismic design procedure for moment-frame structures." Journal of Earthquake Engineering, 2019 ,1603-1584 ,(9)23.
- [18] Zhang, Y., Shen, J. & Chen, J. Damage-based yield point spectra for sequence-type ground motions. Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 2020 ,4724-4705 ,18. <https://doi.org/10.1007/s4-00874-020-10518>
- [19] Iranian Building Codes and Standards, Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, Standard No.4 ,2800th Edition, 2014. (In Persian)
- [20] Nassar, A., Krawinkler, H., "Seismic design based on strength and ductility demand", The 10th WCEE
- Δ_{roof} تغییر مکان بام (رابطه (۱۱))
- Δ_u تغییر مکان نهایی (رابطه (۲))
- Δ_y تغییر مکان تسلیم (رابطه (۲))
- m ضریب شکل پذیری (رابطه (۲))
- φ_{il} مقدار شکل مود اول در تراز آام (رابطه (۱۲))

مراجع

- [1] ATC40-; Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings; Applied Technology Council, Report No. SSC 1996 ,01-96.
- [2] ASCE17-41-. "ASCE Standard, ASCE/SEI, 17-41: Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings." Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2017.
- [3] National Technical and Executive System, "Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings", No. 360, First Revision, Plan and Budget Organization, 2014. (In Persian)
- [4] Tahouni, Sh. and Ahmadi, F., "Seismic evaluation of the reinforced concrete buildings of the Standard 2800 based on performance-based design", Nama, 2006. (In Persian)
- [5] Danesh Ashtiyani, F. and Dorvash, S., "Comparing Standard 2800 and Instruction for Seismic Rehabilitation criteria for moment frame and shear wall buildings." 1st International Congress on Seismic Retrofitting, Tehran, Iran, 2006. (In Persian)
- [6] Tehranizadeh, M. and Pahlavani Yali, A., "Evaluation of Tall Steel Structures with Dual System (SMRF&RC Shear Wall) in Near-Field Ground Motions by Performance Based Design Method.", Amirkabir Journal of Civil Engineering, 2010 ,94-85 ,(2)42. (In Persian)
- [7] Kheirodin, A. and Family, S., " Seismic Evaluation of Concrete Moment Frames with Low Height Beams." Modares Civil Engineering journal, 2010 ,(1)10. (In Persian)
- [8] Fajfar, P., "Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra"; The 12th WCEE Proceedings,

- design spectra: strength and displacement”, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 21-507:(5)23, May 1994.
- [24] Parkash, V., Powell, GH. “DRAIN2-DX User Guide (Version 1.02)”; A Computer Program Distributed By NISEE; Department of Civil Engineering; University of California; Berkeley.
- Proceedings, Madrid, Spain, 1992.
- [21] Iranian National Building Code, Part 6th, Design Loads for Buildings, 2013. (In Persian)
- [22] Iranian National Building Code, Part 9th, Design and Construction of Reinforced Concrete Buildings, 2013. (In Persian)
- [23] Vidic T, Fajfar P, Fischinger M., “Consistent inelastic

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Behnamfar, Sh. Eslami, H. Sayyadpour, Evaluation of the YPS method for Regular RC Buildings Designed Based on the Iranian Standard 2800, Amirkabir J. Civil Eng., 53(8) (2021) 3535-3554.

DOI: [10.22060/ceej.2020.18031.6741](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18031.6741)

