

ضریب رفتار سازه‌ها از تعریف تا تعیین

موسی محمودی صاحبی*^۱ و مهدی زارع^۲

^۱ استادیار دانشکده عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران

^۲ کارشناس ارشد سازه، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران

چکیده

ضریب رفتار، یکی از پارامترهای مهم در محاسبه بارهای تأثیرگذار بر سازه، ناشی از زلزله‌های شدید است. این ضریب دارای پیچیدگی‌های خاصی بوده و به عوامل مختلفی بستگی دارد. هدف این مقاله ارائه اطلاعات مفید در مورد ضریب رفتار سازه‌ها از ابتدائی‌ترین مرحله آن یعنی تعریف تا چگونگی تعیین آن برای انواع مختلف سازه‌هاست. برای این منظور، جنبه‌های مختلف ضریب رفتار شناسایی گردیده و براساس موضوعات ساده تا پیچیده مرتب شده است. موضوعاتی که در این مقاله به آنها اشاره گردیده عبارتند از: تعریف ضریب رفتار، تاریخچه ضریب رفتار، کاربرد ضریب رفتار، عوامل مؤثر بر ضریب رفتار، روش محاسبه ضریب رفتار و مقادیر محاسبه شده ضریب رفتار برای سازه‌های قاب فولادی با مهاربند هم محور و قاب خمشی بتن آرمه. استفاده از اطلاعات ارائه شده در این مقاله به مهندسين کمک می‌کند تا با درک بهتر، این ضریب را در طراحی سازه‌ها استفاده کرده و با اطلاعات کامل‌تری نسبت به تعیین دقیق‌تر مقادیر ضریب رفتار سازه‌ها اقدام نمایند.

واژگان کلیدی: ضریب رفتار، ضریب رفتار ناشی از شکل پذیری، ضریب مقاومت افزون.

۱- مقدمه

دقیق نیازهای لرزه‌ای یک سازه جهت مقابله با نیروهای زلزله ضروری است. اصلی‌ترین نیاز هر سازه مقاومت است که برای جلوگیری از ناپایداری زود هنگام سازه مورد نیاز است. سختی دومین نیاز سازه در برابر اثرات زلزله است. سختی عامل کنترل کننده تخریب در اجزاء غیر سازه‌ای می‌باشد. هر چه سختی یک سازه بیشتر باشد احتمال آسیب و تخریب اجزاء غیرسازه‌ای آن مانند تیغه بندی‌ها، نازک کاری‌ها، تأسیسات برقی و مکانیکی کمتر خواهد بود. شکل‌پذیری سومین نیاز سازه‌ها در برابر زلزله‌های شدید است و وجود کافی آن مانع از تخریب سازه‌ای اجزاء و یا انهدام سازه‌ها خواهد شد. سه عامل مقاومت، سختی و شکل‌پذیری به عنوان نیازهای لرزه‌ای- غیرارتجاعی سازه‌ها در برابر زلزله‌های شدید شناخته می‌شوند. عامل سختی معمولاً مستقل از دو عامل دیگر تعریف می‌گردد ولی نیازهای مقاومت و شکل‌پذیری کاملاً به هم وابسته هستند و افزایش وجود هر کدام از آنها سبب کاهش نیاز به دیگری برای مقابله با یک زلزله خاص خواهد شد.

برای محاسبه و تعیین نیازهای لرزه‌ای سازه‌ها در برابر زلزله‌های شدید، انجام تحلیل غیرارتجاعی ضروری است. از آنجائی‌که تحلیل و طراحی غیرارتجاعی سازه‌ها موضوع پیچیده و وقت‌گیری است، اکثر آیین نامه‌ها، تحلیل و طراحی ارتجاعی را با اعمال شرایطی جایگزین تحلیل و طراحی غیرارتجاعی می‌کنند بدون این که دقت قابل ملاحظه‌ای را از دست بدهند. اصلی‌ترین

محاسبه ضریب رفتار بعنوان عاملی که در برگیرنده عملکرد غیرارتجاعی سازه‌ها در برابر زلزله‌های شدید است، کاربرد وسیعی در آیین‌نامه‌ها، برای تعیین مقاومت ارتجاعی مورد نیاز سازه‌ها دارد. هر چه مقدار این ضریب به واقعیت نزدیک‌تر باشد، تعیین مقاومت مورد نیاز سازه، دقیق‌تر خواهد بود. ضریب رفتار سازه‌ها به عوامل مختلفی بستگی دارد. هدف این مقاله ارائه اطلاعات مفید در مورد ضریب رفتار سازه‌ها از ابتدائی‌ترین مرحله آن یعنی تعریف تا چگونگی تعیین آن برای انواع مختلف سازه‌هاست. برای این منظور، جنبه‌های مختلف ضریب رفتار شناسایی گردیده و براساس موضوعات ساده تا پیچیده مرتب شده است. موضوعاتی که در این مقاله به آنها اشاره گردیده عبارتند از: تعریف ضریب رفتار، تاریخچه ضریب رفتار، کاربرد ضریب رفتار، عوامل مؤثر بر ضریب رفتار، روش محاسبه ضریب رفتار و مقادیر محاسبه شده ضریب رفتار برای سازه‌های قاب فولادی با مهاربند هم محور و قاب خمشی بتن آرمه.

۲- تعریف ضریب رفتار

از زمانی که محققین به خاصیت جذب انرژی زلزله در اثر تغییر شکل غیرارتجاعی سازه‌ها پی برده‌اند، همواره در فکر آن بودند تا روشی آسان و در عین حال دقیق برای در نظر گرفتن آن در تحلیل و طراحی سازه‌ها ارائه کنند. برای این منظور، شناخت

شرط اعمالی، استفاده از ضریب رفتار است که طراح را از انجام تحلیل غیرارتجاعی بی‌نیاز می‌کند. در حقیقت ضریب رفتار ضریبی است که در برگزیده عملکرد غیرارتجاعی سازه‌ها در برابر زلزله‌های شدید است و با اعمال آن در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها، نیاز به تحلیل غیرارتجاعی از بین می‌رود بدون این که دقت قابل ملاحظه‌ای از دست برود. اگر میزان جذب انرژی در سازه توسط مقاومت ارتجاعی و تغییر شکل غیرارتجاعی ثابت فرض شود، به کمک ضریب رفتار سهم مقاومت در جذب انرژی از کل انرژی جذب شده، تعیین می‌گردد [۱].

۳- تاریخچه ضریب رفتار

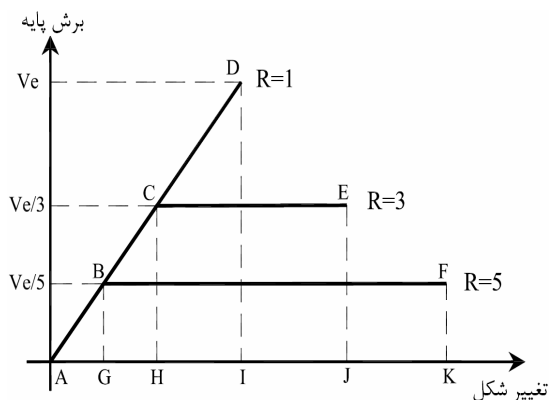
اولین بار در سال ۱۹۵۷، برای محاسبه نیروی زلزله، فلسفه استفاده از ضریب رفتار پیشنهاد شد و پس از آن از سال ۱۹۸۸ به بعد استفاده از این ضریب در محاسبه نیروی زلزله رواج یافت و اکثر آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای از ضریب رفتار برای محاسبه نیروی ناشی از زلزله استفاده نمودند.

در آیین‌نامه‌های مختلف طراحی لرزه‌ای، ضریب رفتار با اسامی مختلفی شامل ضریب اصلاح پاسخ (Response Modification Factor)، ضریب اصلاح نیرو (Force Reduction Factor)، ضریب عملکرد سیستم سازه، ضریب شکل‌پذیری تغییر مکانی و ضریب شکل‌پذیری شناخته می‌شود [۱]. در استاندارد ۲۸۰۰ ایران نیز از عبارت ضریب رفتار استفاده شده است [۲]. در آیین‌نامه‌ها، ضریب رفتار برای هر سیستم سازه‌ای، مقدار ثابتی است و در تعیین آن تقریب قابل ملاحظه‌ای منظور شده است.

۴- کاربرد ضریب رفتار

ضریب رفتار به طراح اجازه می‌دهد بدون استفاده از تحلیل غیرارتجاعی، عملکرد غیرارتجاعی سازه‌ها را در طراحی سازه‌ها، اعمال نماید. از ضریب رفتار در محاسبه نیروهای ناشی از زلزله استفاده می‌شود. در حقیقت ضریب رفتار با در نظر گرفتن سهم ظرفیت شکل‌پذیری، سهم مقاومت مورد نیاز سازه را تعیین می‌کند. با توجه به تعریف ضریب رفتار می‌توان ادعا کرد، اگر برای سازه‌ای، ضریب رفتار برابر یک در نظر گرفته شود، بدین معنی است که برای مقابله با زلزله، صرفاً از عملکرد ارتجاعی آن استفاده شده است و از سازه انتظار نمی‌رود در هنگام وقوع زلزله، وارد محدوده غیرارتجاعی شود. در این صورت مقاومت مورد نیاز سازه برابر V_e در شکل (۱) خواهد بود که برای محاسبه آن

ضریب رفتار معادل یک در نظر گرفته شده است. برای این سازه فقط رفتار ارتجاعی (خط A-D) مجاز است و تمامی انرژی ورودی ناشی از زلزله در مرحله ارتجاعی رفتار سازه جذب می‌گردد (مساحت زیر منحنی ADI). با توجه به رفتار کاملاً ارتجاعی سازه می‌توان ادعا کرد که سازه بعد از وقوع زلزله مجدداً به نقطه A بر می‌گردد و بهره‌برداری از سازه تداوم می‌یابد. ضریب رفتار بزرگتر از یک، بیانگر آن است که سازه در برابر زلزله خاص، مجاز به ورود به محدوده غیرارتجاعی است. هر چه ضریب رفتار بزرگتر باشد، بدین معنی است که ظرفیت تحمل تغییر شکل‌های غیرارتجاعی آن (ظرفیت شکل‌پذیری) بیشتر و در نتیجه مقاومت ارتجاعی مورد نیاز آن کمتر خواهد بود. اگر ضریب رفتار معادل سه فرض شود به این معنی است که سازه به مقاومتی معادل یک سوم مقاومت اولیه نیاز دارد و برای جبران بقیه آن باید از ظرفیت تغییر شکل غیرارتجاعی استفاده نماید (شکل (۱)). انرژی جذب شده در این حالت سطح زیر منحنی ACEJ است که از دو قسمت ارتجاعی (ACH) و غیر ارتجاعی (HCEJ) تشکیل می‌شود. ورود به مرحله CE و رسیدن به نقطه E بیانگر این مطلب است که سازه رفتار ارتجاعی خود را از دست داده و بعد از وقوع زلزله (باربرداری) دیگر به نقطه A بر نمی‌گردد و لذا ادامه قابلیت بهره‌برداری آن دچار تردید خواهد بود. اگر ضریب رفتار برابر ۵ فرض شود وضع به مراتب حادتر خواهد بود زیرا در این حالت مقاومت ارتجاعی مورد نیاز به یک پنجم کاهش می‌یابد و در عوض نیاز تغییر شکل‌های غیرارتجاعی بیشتر خواهد شد و در نتیجه قابلیت بهره‌برداری از سازه کاملاً منتفی خواهد بود. میزان جذب انرژی برابر سطح زیر منحنی ABFK است که قسمت اعظم آن مربوط به تغییر شکل‌های غیرارتجاعی (مساحت GBFK) است (شکل (۱)).



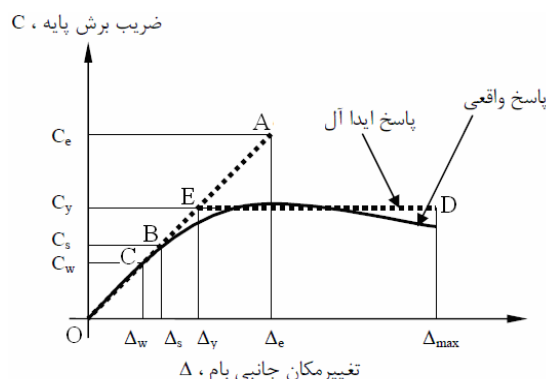
شکل ۱- منحنی بار- تغییر شکل ایده آل برای سازه‌ها

۵- عوامل موثر بر ضریب رفتار

ضریب رفتار ضریبی است که برای اعمال تغییر شکل‌های غیرارتجاعی استفاده می‌گردد و به طراح این امکان را می‌دهد که بجای استفاده از تحلیل غیرارتجاعی از تحلیل ارتجاعی استفاده نماید. لذا تمامی عواملی که در تحلیل غیرارتجاعی مؤثر هستند بر ضریب رفتار نیز مؤثر می‌باشند. ضریب شکل‌پذیری، ضریب مقاومت افزون، زمان تناوب، عملکرد مورد انتظار از سازه، روش طراحی سازه، نوع سیستم باربر جانبی، نوع مصالح، مشخصات زلزله، مشخصات خاک محل، زمان تناوب پیچشی، میرایی سازه و مدل‌های ساده شده بار- تغییر شکل مصالح از عوامل تأثیرگذار بر ضریب رفتار هستند [۳].

اصلی‌ترین عامل تأثیرگذار بر ضریب رفتار، ضریب شکل‌پذیری است. اگر سازه‌ای شکل‌پذیر نباشد، تعریف ضریب رفتار برای آن بی‌معنی است. ضریب شکل‌پذیری سازه شدیداً به ظرفیت شکل‌پذیری اعضاء نظیر تیر، ستون، بادبند و دیوار برشی وابسته است. هر چه شکل‌پذیری اعضاء بیشتر باشد، ضریب شکل‌پذیری سازه نیز بزرگتر خواهد بود. ضریب شکل‌پذیری سازه‌ها با استفاده از شکل (۲) قابل تعریف است.

در شکل (۲) محور افقی بیانگر تغییر مکان جانبی بام ساختمان و محور قائم نشانگر ضریب برش پایه است. اگر سازه دارای خاصیت شکل‌پذیری نباشد، تمامی انرژی زلزله را باید در حالت خطی تحمل نماید. در این صورت رفتار سازه منطبق بر منحنی خط چین OA خواهد بود. اگر سازه خاصیت شکل‌پذیری داشته باشد می‌تواند بخشی از انرژی خود را در حالت ارتجاعی (OE) و بخش دیگر را در حالت غیرارتجاعی (ED) تحمل نماید. در این مقاله برای آسانی کار، به جای منحنی واقعی OD از منحنی ایده‌آل شده OED استفاده شده است



شکل ۲- پاسخ کلی سازه‌ها

با توجه به شکل (۲)، C_e نسبت برش پایه نظیر رفتار ارتجاعی کامل، C_y نسبت برش پایه نظیر تسلیم، C_s نسبت برش پایه نظیر اولین تسلیم و C_w نسبت برش پایه طراحی می‌باشند. ضریب شکل‌پذیری سازه با استفاده از رابطه (۱) تعریف می‌گردد:

$$\mu = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y} \quad (1)$$

که Δ_{max} تغییر مکان سازه متناظر با عملکرد مورد قبول و Δ_y تغییر مکان نظیر تسلیم سازه می‌باشد.

زمان تناوب یکی از عوامل بسیار مهم و تأثیرگذار بر ضریب رفتار است. برای سازه‌های نرم که زمان تناوب بزرگتری دارند، تغییر مکان‌های ماکزیمم در دو حالت ارتجاعی و غیرارتجاعی تقریباً با هم برابرند ولی در سازه‌های سخت (زمان تناوب کوچک) تغییر مکان‌های ماکزیمم حالت غیرارتجاعی بزرگتر از تغییر مکان‌های ماکزیمم حالت ارتجاعی است و همین مسئله باعث می‌شود تا نیاز شکل‌پذیری در حالت دوم بسیار بزرگتر از حالت اول گردد و در نتیجه با فرض یکسان بودن ظرفیت شکل‌پذیری در دو حالت، ضرایب رفتار سیستم‌های سخت همواره کوچک‌تر از سیستم‌های نرم باشند.

سیستم‌های مختلف باربر جانبی مانند قاب خمشی، دیوار برشی، قاب‌های مهاربندی شده و همچنین سیستم ترکیبی دارای عملکرد مختلفی در برابر زلزله هستند. این مسئله موجب می‌گردد تا ضریب رفتار آنها با هم متفاوت باشد. معمولاً برای تعیین ضریب رفتار این سیستم‌ها، تحلیل‌های مستقل انجام می‌گیرد.

مقاومت افزون (Overstrength) یکی از مهمترین عوامل در تعیین ضریب رفتار سازه‌ها می‌باشد. مقاومت افزون، مقاومت اضافه‌ای است که سازه‌ها علاوه بر مقاومت طراحی در مرحله غیرارتجاعی از خود بروز می‌دهند. بر اساس آیین‌نامه‌های رایج طراحی لرزه‌ای، سازه‌ها برای مقاومت ارتجاعی طراحی می‌شوند در صورتی‌که تا چندین برابر این نیرو نیز مقاومت دارند که در رفتار غیرارتجاعی آنها حاصل می‌گردد. در مرحله غیرارتجاعی، اعضاء سازه وارد مرحله غیرارتجاعی شده و در آنها مفصل پلاستیک تشکیل می‌شود. با تشکیل پی در پی مفاصل پلاستیک، سختی کلی سازه کاهش پیدا می‌کند ولی سازه همچنان قادر به تحمل نیرو خواهد بود. این روند آنقدر ادامه پیدا می‌کند تا تشکیل مفاصل پلاستیک موجب ایجاد مکانیزم گردد.

۶- روش محاسبه ضریب رفتار

ضریب رفتار در برگیرنده عملکرد غیر ارتجاعی سازه بوده و در طراحی لرزه‌ای برای تبدیل طیف پاسخ ارتجاعی به طیف پاسخ غیرارتجاعی بکار می‌رود. با توجه به رفتار غیرارتجاعی سازه‌ها در برابر زلزله‌های شدید، از میان عواملی که در بخش‌های قبل بیان گردید بعضی عوامل از اهمیت بیشتری در تعیین ضریب رفتار برخوردار هستند. به همین دلیل در محاسبه ضریب رفتار، تأثیر تعداد خاصی از عوامل مدنظر قرار می‌گیرد. Maarouf, Uang رابطه (۲) را برای محاسبه ضریب رفتار پیشنهاد نمود.

$$R = R_{\mu} \cdot R_s \quad (2)$$

در این رابطه R_{μ} ضریب رفتار ناشی از شکل‌پذیری و R_s ضریب مقاومت افزون سازه می‌باشد.

ضریب رفتار ناشی از شکل‌پذیری سازه‌ها (R_{μ}) به ظرفیت شکل‌پذیری آنها بستگی دارد. در سیستم‌های سازه‌ای چند درجه آزادی می‌بایست از ظرفیت شکل‌پذیری کلی سازه‌ها برای محاسبه ضریب رفتار استفاده کرد [۳]. بر اساس شکل (۲) مقدار ضریب رفتار ناشی از شکل‌پذیری برابر تقسیم C_e بر C_y است و روابط مختلفی توسط نیومارک- هال [۴]، Nassar و همکاران [۵]، Miranda [۶] و Fajfar [۷] برای محاسبه آن ارائه شده است.

در روش Nassar و همکاران [۵] اثرات ناشی از شکل‌پذیری، زمان تناوب اصلی سازه و سخت‌شوندگی کرنش در مدل بار- تغییر شکل مصالح در محاسبه ضریب رفتار وارد شده‌اند.

$$R_{\mu} = [C(\mu_g - 1) + 1] \frac{1}{C} \quad (3)$$

$$C = \frac{T^a}{T^a + 1} + \frac{b}{T}$$

Fajfar [۷]، عوامل زیادی از جمله مشخصات زلزله، مشخصات خاک منطقه، میرایی سیستم، مدل بار- تغییر شکل مصالح، زمان تناوب سازه و ضریب شکل‌پذیری در محاسبه ضریب رفتار را در نظر گرفته است.

$$R_{\mu} = (\mu - 1) \frac{T}{T_c} + 1 \quad (T < T_c) \quad (4)$$

$$R_{\mu} = \mu \quad (T \geq T_c)$$

تفاضل حداکثر مقاومت و مقاومت طراحی، مقاومت افزون نامیده می‌شود.

در آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای، عملکرد سازه‌ها در برابر سطوح مختلف زلزله یکسان نیست. سازه‌ها طوری طراحی می‌شوند که در برابر سطوح خاصی از زلزله، رفتار متفاوتی داشته باشند. اگر سطوح مختلف زلزله را به ترتیب زلزله ضعیف، زلزله متوسط، زلزله شدید و زلزله ماکزیمم بنامیم آنگاه عملکرد مورد انتظار از سازه‌ها در برابر آنها متفاوت خواهد بود. سازه‌ها در برابر زلزله ضعیف طوری طراحی می‌شوند که بعد از وقوع آن بدون هیچگونه آسیب سازه‌ای و غیرسازه‌ای کاملاً قابل بهره‌برداری باقی بمانند. سازه‌ها در برابر زلزله متوسط باید بگونه‌ای طراحی شوند که با تعمیرات، قابلیت بهره‌برداری پیدا کنند. در برابر زلزله‌های شدید، ایمنی جانی باید حفظ شود هر چند سازه بعد از وقوع زلزله، قابل بهره‌برداری نباشد. همچنین برای طراحی سازه‌ها در برابر زلزله ماکزیمم فقط فروریزش ملاک عمل قرار می‌گیرد هر چند ممکن است تلفات حداقل اتفاق بیفتد. با توجه به عملکردی که برای سازه‌ها در برابر زلزله‌های مختلف در نظر گرفته می‌شود، مقدار خاصی از شکل‌پذیری استفاده می‌گردد (به گونه‌ای که در برابر زلزله ضعیف اصلاً شکل‌پذیری مورد استفاده قرار نمی‌گیرد). لذا متناسب با میزان استفاده از شکل‌پذیری در طراحی، مقدار ضریب رفتار متفاوت خواهد بود. یک سیستم سازه‌ای جانبی، با یک ظرفیت شکل‌پذیری معین ممکن است چهار ضریب رفتار داشته باشد. برای طراحی در برابر زلزله ضعیف، ضریب رفتار یک در نظر گرفته می‌شود که در آن از ضریب شکل‌پذیری استفاده نمی‌گردد. بیشترین مقدار ضریب رفتار برای طراحی در برابر زلزله ماکزیمم است که از حداکثر ظرفیت شکل‌پذیری سازه استفاده می‌شود.

در آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای برای افزایش اطمینان از مقاومت سازه، ضریب اطمینان در نظر گرفته می‌شود که به صورت افزایش بار (اعمال ضریب بار)، کاهش مقاومت (روش تنش مجاز) و یا هر دو مورد در طراحی سازه‌ها اعمال می‌شود. اما در طراحی سازه‌ها در برابر زلزله ضریب اطمینان اعمال نشده و سازه‌ها به گونه‌ای طراحی می‌شوند که تحت سطح بار تعریف شده به حداکثر مقاومت خود برسند. برای همسان سازی طراحی سازه‌ها، ضریب اطمینان برای طراحی بار زلزله اعمال می‌گردد ولی برای حذف آن، مقدار نیروی زلزله در مرحله اعمال به سازه بر ضریب اطمینان تقسیم می‌شود. در آیین‌نامه‌های بارگذاری اثر این ضریب در ضریب رفتار منظور می‌گردد. مقدار این ضریب در آیین‌نامه‌های مختلف بین ۱/۴ تا ۱/۵ متغیر است [۳].

استفاده از مبحث نهم مقررات ملی ساختمان (طرح و اجرا ساختمان‌های بتن آرمه) [۱۱] انجام گردید. برای تحلیل مدل‌ها از نرم افزار DRAIN-2D [۱۲] و آنالیز غیرخطی استاتیکی استفاده گردید. ضریب شکل‌پذیری دورانی اعضا با توجه به دوران نظیر گسیختگی مفاصل در سه حالت استفاده بی‌وقفه (IO)، ایمنی جانی (LS) و آستانه فروریزش (CP) تعریف شده در ضوابط دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای [۱۳] تعیین و براساس آن ضریب شکل‌پذیری کلی قاب و سپس با استفاده از رابطه (۳)، ضریب رفتار ناشی از شکل‌پذیری قاب‌ها محاسبه شد. ضریب رفتار قاب‌های خمشی برای سه حالت عملکرد در جدول (۱) ارائه شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که تغییر در ارتفاع و سطح عملکرد مورد انتظار از سازه، موجب تغییر ضریب رفتار می‌گردد.

جدول ۱- ضرایب رفتار ناشی از شکل‌پذیری، مقاومت افزون و ضریب رفتار قاب‌های خمشی بتن مسلح

سطح عملکرد	R_{μ}	R_s	R
IO	۱/۲۶	۱/۸۰	۲/۲۸
LS	۲/۲۹	۱/۹۳	۴/۴۳
CP	۲/۷۴	۱/۹۳	۵/۳۰

۸- ضریب رفتار قاب‌های فولادی مهاربندی شده هم محور Mahmoudi و Zaree [۱۴] تحقیقات وسیعی برای محاسبه ضریب رفتار انواع قاب‌های مهاربندی شده در سطح عملکرد ایمنی جانی انجام دادند. برای این منظور ۳۰ قاب ساده فولادی با مهاربند هم محور متداول (هفتی، هشتی و ضربدری) و ۲۰ قاب ساده با مهاربند کمانش تاب (هفتی و هشتی) با تعداد طبقات ۳، ۵، ۷، ۱۰ و ۱۲ و ارتفاع ۳/۲ متر برای هر طبقه انتخاب گردید. این قاب‌ها دارای سه دهانه ۵ متری بوده و مهاربندها یکبار در دهانه میانی و بار دیگر در دو دهانه کناری قرار داشتند. بارگذاری مدل‌ها براساس آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) [۲] و طراحی آنها با استفاده از مبحث دهم مقررات ملی ساختمان (طرح و اجرا ساختمان‌های فولادی) [۱۵] انجام شده است. طراحی بایندها برای ۱۰۰ درصد نیروی جانبی انجام گردید. در تحقیق فوق محاسبه ضریب رفتار برای قاب با مهاربندی کمانش تاب نیز انجام شد. مهاربندهای کمانش تاب نمونه جدیدی از مهاربندهای هم محور هستند که با استفاده از عضو احاطه کننده (غلاف فلزی پر شده با بتن یا ملات)، از کمانش مهاربند جلوگیری کرده

در روابط بالا، T زمان تناوب اصلی سازه، پارامترهای a و b ضرایب وابسته به سخت‌شوندگی کرنش در مدل بار- تغییر شکل، μ_g ظرفیت شکل‌پذیری کلی سازه و μ ضریب شکل‌پذیری است که از رابطه (۱) بدست می‌آید. مشاهدات در بسیاری از زلزله‌ها نشان داده است که سازه‌های ساختمانی بطور قابل ملاحظه‌ای قادر به پایداری بدون خسارت در برابر نیروی جانبی بالاتر از نیروی طراحی می‌باشند. این مورد به علت وجود مقاومت افزون قابل توجه در سازه می‌باشد که در طراحی محاسبه نمی‌گردد. با توجه به شکل (۲)، ضریب مقاومت افزون سازه‌ها (R_s) با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می‌گردد:

$$R_s = \frac{C_y}{C_s} \quad (۵)$$

برای سازه‌های فولادی، R_s بدست آمده از رابطه (۵)، مقاومت افزون واقعی سیستم نمی‌باشد. مقدار مقاومت افزون واقعی سازه‌های فولادی از حاصل ضرب مقدار تحلیلی در ضرایب دیگر بدست می‌آید. یکی از این ضرایب، برای اختلاف بین حد جاری شدن اسمی و حد جاری شدن واقعی مصالح بکار می‌رود. مطالعات آماری بر روی سازه‌های فولادی مقدار این ضریب را ۱/۰۵ تعیین کرده است [۸]. ضریب دیگر، برای در نظر گرفتن اثر افزایش تنش جاری شدن، در اثر افزایش نرخ تغییر کرنش در هنگام زلزله است. مقدار ۱/۱ که نشان دهنده ۱۰ درصد افزایش اثر نرخ کرنش است، برای این ضریب در نظر گرفته می‌شود [۹]. در آیین‌نامه‌هایی که در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها از ضریب اطمینان استفاده می‌نمایند، مقدار ضریب مقاومت افزون شامل مقدار ضریب اطمینان (Y) نیز خواهد شد که مقدار آن از رابطه (۶) بدست می‌آید.

$$Y = \frac{C_s}{C_w} \quad (۶)$$

۷- ضریب رفتار قاب‌های خمشی بتن آرمه

محمودی صاحبی [۱۰] ضریب رفتار قاب‌های خمشی بتن مسلح را مورد مطالعه قرار داد. به منظور محاسبه ضریب رفتار، نه قاب خمشی بتن مسلح با سه دهانه ۴ متری و تعداد طبقات ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۵ و با ارتفاع هر طبقه برابر ۳ متر در نظر گرفته شد. بارگذاری مدل‌ها براساس آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) [۲] و طراحی آنها با

۹- خلاصه

ضریب رفتار یکی از پارامترهای مهم در محاسبه بارهای وارد بر سازه‌ها ناشی از زلزله‌های شدید است. آشنایی همه جانبه با این پارامتر به مهندسین و دانشجویان کمک می‌کند تا در طراحی سازه‌ها دقت کافی داشته باشند. پیچیدگی‌های خاص این ضریب باعث شده است تا کمتر مورد توجه مهندسین قرارگیرد و صرفاً به کاربرد آن اکتفاء شود. در این مقاله سعی شد ضریب رفتار از جنبه‌های مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. به همین منظور تمامی جوانب ضریب رفتار شامل تعریف ضریب رفتار، تاریخچه ضریب رفتار، کاربرد ضریب رفتار، عوامل مؤثر بر ضریب رفتار، روش محاسبه ضریب رفتار و مقادیر محاسبه شده ضریب رفتار برای سازه‌های قاب فولادی با مهاربند هم محور و قاب خمشی بتن آرمه ارائه شد. نتایج نشان داد که ضریب رفتار برای سیستم‌های مختلف سازه‌ای متفاوت و برای یک سیستم خاص نیز با توجه به مشخصات سازه متغیر است. درک بهتر از ضریب رفتار باعث استفاده صحیح‌تر از آن و ساده‌تر شدن تحلیل و طراحی سازه‌ها می‌گردد.

۱۰- مراجع

- [۱] تسنیمی، ع. معصومی، ع.، "محاسبه ضریب رفتار قاب‌های خمشی بتن مسلح"، انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۵.
- [۲] مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، "آئین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)"، ویرایش سوم، ۱۳۸۴.
- [۳] محمودی صاحبی، م.، "اثر زمان تناوب و مقاومت افزون بر نیاز لرزه‌ای- غیرارتجاعی قاب‌های خمشی بتن مسلح"، رساله دوره دکتری مهندسی سازه، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۷۷.

- [4] Uang, C., Maarouf, A., "Deflection amplification factor for seismic design provision", Journal of Structural Engineering, 1994, 120, (8), 2423-2436.
- [5] Nassar, A., Osteraas, J., Krawinkler, H., "Seismic design based on strength and ductility demands", Proceeding of the Earthquake Engineering Tenth World Conference, Balkema, Rotterdam, 1992, pp.5861-5866.
- [6] Miranda, E., "Site-dependent strength-reduction factors", Structural Engineering, 1993, 119(12), 3503-3519.
- [7] Fajfar, P., "Structural Analysis in Earthquake Engineering – A Breakthrough of Simplified

و ظرفیت اتلاف انرژی مهاربند را افزایش می‌دهند. تحلیل مدل‌ها توسط نرم افزار SNAP-2DX [۱۶] انجام گردید و آنالیز استاتیکی غیرخطی (پوش‌آور) تا سطح عملکرد ایمنی جانی (LS) براساس دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای [۱۳]، انجام گرفت. برای برآورد ضریب رفتار ناشی از شکل‌پذیری از رابطه (۴) استفاده شد.

ضرایب طراحی لرزه‌ای بدست آمده برای قاب‌های فولادی با مهاربندهای هم محور در جداول (۲) و (۳) نشان داده شده است. براساس این جداول می‌توان نتیجه گرفت که مقدار ضریب رفتار با افزایش ارتفاع سازه، کاهش می‌یابد. همچنین افزایش تعداد دهانه‌های مهاربندی موجب افزایش ضریب رفتار می‌گردد.

ضریب رفتار برای قاب‌ها با مهاربندی هم محور کمانش تاب در دهانه میانی و در دو دهانه کناری متغیر می‌باشد. با توجه به توضیحات قبلی، شکل‌پذیری، مؤثرترین عامل در ضریب رفتار است. در نتیجه، قاب‌ها با مهاربند کمانش تاب با این‌که دارای مقاومت افزون پایین هستند، بدلیل دارا بودن شکل‌پذیری بالا، ضرایب رفتار بالاتری نسبت به قاب با مهاربند متداول دارند.

جدول ۲- ضرایب رفتار ناشی از شکل‌پذیری، مقاومت افزون و

ضریب رفتار قاب‌های فولادی با مهاربند هم محور متداول

قاب فولادی		R_s	R_{μ}	R
دهانه میانی	هفتی	۱/۳۵	۳/۰۳	۴/۱۰
	هشتی	۱/۳۶	۳/۷۵	۵/۱۰
	ضربدری	۱/۴۸	۳/۲۴	۴/۸۰
دهانه کناری	هفتی	۱/۲۵	۴/۰۰	۵/۰۰
	هشتی	۱/۲۸	۴/۸۸	۶/۲۵
	ضربدری	۱/۴۲	۴/۲۹	۶/۱۰

جدول ۳- ضرایب رفتار ناشی از شکل‌پذیری، مقاومت افزون و

ضریب رفتار قاب‌های فولادی با مهاربند کمانش تاب

قاب فولادی		R_s	R_{μ}	R
دهانه میانی	هفتی و هشتی	۱/۵۰	۴/۷۵	۷/۰۰
	هشتی	۲/۵۰	۸/۹۰	۱۶/۰۰
دهانه کناری	هفتی و هشتی	۱/۵۰	۵/۱۵	۸/۰۰
	هشتی	۳/۴۰	۷/۳۰	۲۲/۰۰

- [۱۳] پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، "دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود"، دفتر امور فنی و تدوین معیارهای سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۸۵.
- [14] Mahmoudi, M., Zaree, M., "Evaluating response modification factors of concentrically braced steel frames", Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66, (10), 1196-1204.
- [۱۵] وزارت مسکن و شهرسازی (دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان)، "مبحث دهم مقررات ملی ساختمان و مسکن: طرح و اجراء ساختمان‌های فولادی"، نشر توسعه ایران، چاپ اول، ۱۳۸۷.
- [16] Rai, D.C., Goel, S.C., Firmansjah, G., "User's Guide: Structural Nonlinear Analysis Program(SNAP-2DX)", Department of Civil and Environmental Engineerin, University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109-2125, 1996.
- Non-Linear Methods", 12th European Conference on Earthquake Engineering, 2005, Paper Reference 843.
- [8] Schmidt, B.J., Bartlett, F.M., "Review of resistance factor for steel: Resistance distributions and resistance factor calibration", Canadian Journal of Civil Engineering, 2002, Vol, 109-118.
- [9] Uang, C.M., "Establishing R (or R_w) and C_d factor for building seismic provision", Journal of Structural Engineering, 1991, 117(1), 19-28.
- [۱۰] محمودی صاحبی، م، "ارزیابی اولیه قاب‌های خمشی بتن مسلح با هدف‌های طراحی براساس عملکرد"، مجله فن آوری و آموزش، ۱۳۸۶، سال اول، جلد اول، شماره ۳.
- [۱۱] وزارت مسکن و شهرسازی (دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان)، "مبحث نهم مقررات ملی ساختمان و مسکن: طرح و اجراء ساختمان‌های بتن آرمه"، نشر توسعه ایران، چاپ دوم، ۱۳۸۵.
- [12] "DRAIN-2D: Software User Guide", Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley, CA, 1987.