

## تعیین ضریب رفتار سازه‌های ساخته شده با پانلهای بزرگ پیش ساخته بتنی

سید کامیل هاشمی\*، مرتضی مدح خوان\*\* و عبدالرضا سروقد مقدم\*\*

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

(دریافت مقاله: ۱۳۸۷/۷/۶ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۸۹/۲/۲۲)

چکیده -

(R)

Perform 3D

(Push-over)

Perform 3D

واژگان کلیدی :

## Evaluation of Reduction Factor for Precast Concrete Large Panel Buildings

S. K. Hashemi, M. Madhkhan and A. Sarvghadmoghadam

Civil Engineering Department, Isfahan University of Technology (IUT)  
International Institute of Earthquake Engineering & Seismology (IIEES)

**Abstract:** The term "large panels" refers to structures that use large precast panels as their main horizontal load resistance system. Precast concrete large panels are most economical to use because of their higher quality and the reduced construction

\*\* - استادیار

\* - کارشناسی ارشد

time associated with them. The most important requirement for their construction is the structural analysis of their true behavior in the structure. Nowadays, the most important part of seismic design of structures is carried out based on equivalent static method and calculation of seismic forces based on the linear spectrum of an earthquake using a structural reduction factor. The determination of the reduction factor seems necessary in structural seismic design given its utmost significance. In this research, many kinds of precast structures with different stories and bays are considered. The seismic behaviour of such structures is strongly dependent upon the characteristics of both horizontal and vertical connections between panels. A variety of assumptions have been made in this study drawing upon experimental research in which the static pushover analysis has been used. The results show that the reduction factors based on existing codes are conservative.

**Keywords:** Reduction Factor, Large Panel, Precast, Perform 3D, Static Pushover Analysis.

## ۱- مقدمه

هستند. علاوه بر کنترل کیفی بالا، تنوع در شکل و رنگ پانلهای بزرگ پیش ساخته از دیگر مزایای این سیستم تلقی می‌شود. باید توجه داشت که این سیستم مستعد نوعی از خرابی است که به آن خرابی پیش رونده گفته می‌شود. خرابی پیش رونده زمانی اتفاق می‌افتد که یکی از اعضا از جای خود حرکت کند. در نتیجه سایر اعضای مرتبط، تکیه گاه خود را از دست داده و جابه‌جا می‌شوند. این روند تا خرابی کلی سازه ادامه پیدا خواهد کرد. با توجه به عملکرد قوطی مانند دیوارها، سازه‌های ساخته شده با پانلهای پیش ساخته از سختی زیادی برخوردارند و دارای پریود پایه کوچکی هستند. زلزله‌های گذشته مثل زلزله آلاسکا (۱۹۶۴)، زلزله آرمینیا (۱۹۸۹)، زلزله نورس ریج (۱۹۹۴)، زلزله کولکی (ترکیه ۱۹۹۹) و زلزله بی هوج (هند ۲۰۰۱) نشان داده‌اند که سازه‌های ساخته شده با پانلهای بزرگ پیش ساخته دیواری عملکرد مناسبی در محل اتصالات اعضا به یکدیگر نداشته‌اند. اگرچه اکثر این سازه‌ها در سطح عملکرد ایمنی جانی مناسب گزارش شده‌اند، اما خسارات وارده به دیوارهای تعداد زیادی از ساختمانها باعث اتلاف منابع مالی بسیاری شده است [۱].

امروزه بخش عمده‌ای از طراحی لرزه‌ای ساختمانها بر اساس روش استاتیکی معادل و محاسبه نیروی زلزله طراحی از طیف خطی زلزله با اعمال ضریب کاهش به نام ضریب رفتار سازه صورت می‌گیرد. ضریب رفتار سازه، ضریبی است که دربرگیرنده فلسفه طراحی است و عملکرد غیرالاستیک سازه را در بردارد و نشانگر مقاومت و شکل‌پذیری پنهان سازه در مرحله غیرالاستیکی است. ظرفیت تغییر شکل غیرالاستیکی

بشر همواره به مسکن نیاز داشته است. اما افزایش روز افزون جمعیت در دهه‌های اخیر لزوم ساخت سریع و کم هزینه مسکن را غیر قابل اجتناب کرده است. در این میان استفاده از سیستم پانلهای بزرگ پیش ساخته بتنی به دلیل کیفیت بهتر اجرا و کاهش زمان ساخت گزینه اقتصادی مناسبی برای ساختمانهای عمومی چند طبقه است. ترکیب این دیوارها به همراه دال سقف و کف سیستمی را ایجاد می‌کند که علاوه بر مقاومت در برابر نیروهای زلزله، برای مقاومت در برابر آتش سوزی و کاهش آلودگی صوتی نیز بسیار مناسب است. ارتفاع این دیوارها عموماً به ارتفاع طبقه محدود و توسط یک سری اتصالات افقی و اتصالات قائم به یکدیگر متصل می‌شوند. اتصالات افقی به اتصالاتی گفته می‌شود که ما بین پانلهای در راستای افق قرار می‌گیرند و عملاً قسمت فوقانی یک پانل را به قسمت تحتانی پانل دیگر متصل می‌کنند. اتصالات قائم نیز برای متصل کردن جانبی پانلهای به یکدیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به روش ساخت، اتصالات به دو گروه اتصالات تر و اتصالات خشک تقسیم بندی می‌شوند. اتصالات تر به اتصالاتی گفته می‌شود که با بتن ریزی در جا در محل اتصال پانلهای ایجاد شده‌اند. اتصالات خشک به اتصالاتی گفته می‌شود که با جوش دادن یا پیچ کردن قطعات فلزی که در دو انتهای پانل قرار داده شده است به یکدیگر ایجاد شده‌اند. با توجه به قرارگیری پانلهای در کنار یکدیگر، سه نوع متمایز از سازه‌های ساخته شده با پانل پیش ساخته به صورت سیستم دیوارهای متقاطع، سیستم دیوارهای طولی و سیستم دو طرفه قابل بیان

سازه‌ها به کمک ضریب شکل‌پذیری بیان می‌شود، که عبارت است از تغییرشکل نهایی سازه به تغییرشکل لحظه تسلیم آن. بدین ترتیب ضریب رفتار سازه مستقیماً به ضریب شکل‌پذیری آن بستگی پیدا می‌کند. هر چه ضریب شکل‌پذیری یک سازه بیشتر باشد، میزان جذب انرژی سازه بالاتر بوده و در نتیجه مقدار ضریب رفتار آن بزرگتر خواهد بود. هرچه این ضریب بیشتر باشد، قابلیت اطمینان به جذب انرژی توسط سازه بیشتر بوده و انرژی زیادی توسط المانهای سازه به دلیل تغییرشکلهای پلاستیک جذب می‌شود و هرچه این انرژی بیشتر باشد، اجازه تشکیل مفصلهای پلاستیک بیشتری به سازه داده می‌شود. این عمل باعث اقتصادی شدن طرح و افزایش شکل‌پذیری سیستم می‌شود. بنابراین دیده می‌شود که با مشخص شدن ضریب رفتار برای یک سیستم سازه‌ای تا چه حد رفتار سازه معلوم و شناخته شده‌تر می‌شود. از این رو تحقیقات زیادی توسط محققان مختلف در مورد رفتار لرزه‌ای پانلهای بزرگ پیش ساخته بتنی به صورت آزمایشات تجربی و مدل‌های تحلیلی صورت گرفته است.

در سال ۲۰۰۲ هان و همکاران [۲] بررسیهایی بر روی شکل‌پذیری، تغییر شکل و میزان مقاومت دیوارهای سازه‌ای انجام داده‌اند. به همین منظور سه تیپ دیوار در اندازه واقعی تحت آزمایش بارگذاری رفت و برگشتی قرار گرفتند. سپس پارامترهای لرزه‌ای این دیوارها با پارامترهای ارایه شده در آیین‌نامه‌های کشور کره، UBC و ATC مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقاومت نهایی به‌دست آمده از بارگذاری دیوارها با مقاومت محاسباتی از آیین‌نامه ACI 318 همخوانی مناسبی داشته است. هم‌چنین مقایسه برش پایه دیوارها با مقادیر محاسباتی آیین‌نامه‌ای نشان داده است ضریب رفتار ارایه شده در آیین‌نامه UBC همخوانی بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارد.

در سال ۲۰۰۴، چایا و اندرسون [۳] پانلهای پیش ساخته بتنی همراه با بازشو را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیقات یک نمونه دیوار پانلی که حفراتی برای تعبیه درب و پنجره در آن قرار داشته است تحت آزمایش بارگذاری رفت و برگشتی

قرار گرفت و مشخصات لرزه‌ای آن بررسی شد. نتایج نشان داد که این گونه دیوارها سختی و مقاومت زیادی از خود نشان می‌دهند، اما قابلیت شکل‌پذیری آنها پایین است. هم‌چنین روند ترک خوردگی دیوارهای پانلی با بازشو نیز مورد بررسی قرار گرفت و پیشنهاداتی برای کاهش این ترک خوردگیها با رعایت چیدمان مناسب آرماتورها ارایه شد.

البته تحقیقات زیادی در مورد پانلهای پیش ساخته بزرگ در نقاط مختلف جهان صورت پذیرفته است که موضوع بحث این مقاله نیست اما یکی از تحقیقات مهم در این زمینه توسط پکائو و یوشوسویی [۴] در سال ۲۰۰۶ انجام گرفته است و مولفین در این مقاله بررسیهایی بر روی خرابیهای پیش رونده در سازه‌های ساخته شده با پانلهای بزرگ پیش ساخته انجام داده‌اند. در این بررسی پانلهای پیش ساخته به روش المانهای مجزا مدل‌سازی شد. یک سازه دوازده طبقه سه دهانه برای حالت‌های مختلف خرابی ناشی از زلزله یا خرابی پیش رونده مورد بررسی قرار گرفت. هدف از این تحقیقات بررسی عملکرد و شکل‌پذیری مورد نیاز اتصالات قائم برای جلوگیری از ادامه روند تخریب بوده است. نتایج نشان داد که روشهای موجود برای طراحی اتصالات قائم ما بین پانلهای برای حالت خرابی پیش رونده، حاشیه ایمنی لازم برای نیاز مقاومت و شکل‌پذیری اتصال را ایجاد می‌کنند. هم‌چنین چنانچه پانل پیش ساخته نیز برای بارهای جانبی ناشی از زلزله به درستی طراحی شده باشد حاشیه ایمنی لازم در مورد نیاز شکل‌پذیری به نحو مطلوب رعایت می‌شود. در عین حال نتایج نشان دادند خرابی پیش رونده یک روند سریع است که باید تمهیدات لازم برای اجتناب از آن به درستی صورت پذیرد.

با توجه به اینکه در هیچکدام از تحقیقات پیشین به بررسی مبسوط پیرامون ضریب رفتار سازه‌های ساخته شده با پانلهای پیش ساخته بتنی پرداخته نشده است و از آنجا که در آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران نیز جایگاهی برای ضریب رفتار چنین سازه‌هایی در نظر گرفته نشده، لذا در این مقاله برآن شدیم با در نظر گرفتن مشخصات ارایه شده برای رفتار اتصالات قائم و افقی مابین

پانلهای پیش ساخته توسط دیگر محققان، به بررسی ضریب رفتار این نوع سازه‌ها پردازیم.

در این تحقیق به کمک نرم افزار 3D Perform انواع مختلفی از سازه‌های پیش ساخته متشکل از پانلهای بزرگ ۴، ۸ و ۱۲ طبقه با تعداد دهانه‌های ۱، ۳ و ۵ دهانه مورد بررسی قرار گرفتند. تاثیر دو نوع مختلف اتصالات افقی و قائم رایج در کشور، دو نوع بارگذاری جانبی یکنواخت و مثلثی شکل و همچنین مقاومت بتن مصرفی بر ضریب رفتار در نظر گرفته شده است. از آنجا که رفتار لرزه‌ای این نوع ساختمانها شدیداً به رفتار اتصالات افقی و قائم مابین پانلهای بستگی دارد، فرضیات مناسب برای مدلسازی این اتصالات بر مبنای نتایج تحقیقات آزمایشگاهی انجام گرفته است و انواع اتصالات رایج در مدل‌های جداگانه بررسی شد. برای تعیین ضریب رفتار، از تحلیل استاتیکی غیرخطی (Push-over) استفاده شده است.

## ۲- مشخصات نرم افزار

CSI Perform 3D V4.03 [۵] نرم افزاری خاص با تمرکز ویژه روی طراحی مقاوم لرزه‌ای است. با استفاده از آن می‌توان سازه‌های پیچیده شامل سازه‌های با دیوار باربر را به صورت غیرخطی و بر اساس حالت‌های حدی مختلف مقاومت و تغییرشکل تحلیل کرد.

در این نرم افزار از انواع مختلفی از المانها شامل: تیر، مهاربند، دیوار (با قابلیت مدلسازی بازشو)، دال کف، میراگر و جداساز می‌توان استفاده کرد. تحلیل‌های غیرخطی می‌توانند به صورت استاتیکی و یا دینامیکی روی یک مدل انجام شوند. بارها قابلیت اعمال بر سازه در مراحل متفاوت را دارا هستند. این برنامه قابلیت‌های قدرتمندی برای طراحی بر اساس عملکرد داشته و می‌تواند نسبت‌های ظرفیت نیاز را برای تمام اجزا و برای حالت‌های حدی محاسبه کند. ارزیابی عملکرد بر اساس FEMA-440 و FEMA-356، ATC-40 به صورت خودکار انجام می‌شود. خروجی‌های برنامه شامل نسبت ظرفیت به نیاز، نمودارهای غیرخطی استاتیکی، نمایش‌های بالانس انرژی،

اشکال مودی، هندسه تغییرشکل یافته و پاسخ‌های نیرو و تغییرمکان تاریخچه زمانی هستند.

## ۳- مفاهیم اولیه طراحی لرزه‌ای

تاکنون روابط متعددی برای تعیین ضریب رفتار در سیستم‌های یک درجه آزادی پیشنهاد شده که می‌توان براساس آنها با داشتن ظرفیت شکل‌پذیری سیستم، ضریب رفتار آن را محاسبه کرد. ضریب رفتار سیستم‌های چند درجه آزادی از رابطه (۱) محاسبه شده و از سه قسمت زیر تشکیل می‌شود.

$$R = R_{\mu} \times R_{\zeta} \times Y \quad (1)$$

قسمت اول آن مشابه سیستم‌های یک درجه آزادی است و معمولاً با  $R_{\mu}$  نشان داده می‌شود. قسمت دوم آن تأثیر عوامل مخصوص سیستم‌های چند درجه آزادی را دربرمی‌گیرد و با  $R_{\zeta}$  نشان داده می‌شود. این عامل که ضریب اضافه مقاومت نام دارد، عامل اصلی در جلوگیری از خرابی سازه‌ها با زمان تناوب کوتاه، در مقابل نیروهای حاصل از زمین‌لرزه است. در این‌گونه سازه‌ها، شکل‌پذیری تأثیر چندانی در مقابل نیروهای زمین‌لرزه ندارد. قسمت سوم مربوط به ضریب تنش مجاز  $Y$  است، که برای کاهش برش پایه به هنگام تشکیل اولین مفصل پلاستیک در سازه به نیروی طراحی، بر سیستم اعمال می‌شود [۶]. به وسیله تحلیل استاتیکی غیرخطی یک سازه می‌توان نمودار پاسخ کلی آن را به دست آورد. این نمودار بیانگر میزان جابه‌جایی بالاترین تراز سازه در مقابل افزایش تدریجی نیروی برشی پایه است. در شکل (۱) نمونه‌ای از منحنی پاسخ کل سازه در اثر تحلیل به روش نیروهای فراینده استاتیکی غیرخطی رسم شده است [۷]. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود رفتار واقعی غیرخطی یک سازه را می‌توان با یک رابطه دوخطی مدل کرد. در این مدل دوخطی، نیروی حد جاری شدن سازه با  $V_y$  و تغییر مکان حد جاری شدن با  $\Delta_y$  نشان داده شده است. در صورت فرض رفتار خطی سازه در هنگام زلزله، ماکزیمم برش پایه در آن برابر  $V_e$  خواهد بود. این نیرو به دلیل رفتار غیرخطی سازه به نیروی  $V_y$  کاهش می‌یابد. حداکثر جابه‌جایی سازه قبل از خرابی سازه برابر

رفتار خطی استفاده می‌شود [۷].

در انجام این تحقیق، برای محاسبه ضریب کاهش نیرو از رابطه پیشنهاد شده توسط میراندا و همکاران در سنگ استفاده شده است [۸]. ضریب کاهش نیرو، برای سیستم یک درجه آزادی با میرایی ۵٪ محاسبه شده است. علاوه بر در نظر گرفتن شرایط خاک محل، اثر پارامترهای دیگری مثل بزرگی زلزله و فاصله کانونی نیز در تعیین ضریب کاهش نیرو در نظر گرفته شده است. بر اساس متوسط ضریب کاهش نیرو، رابطه (۴) برای تقریب این ضریب پیشنهاد شده است.

$$R_{\mu} = \frac{\mu - 1}{\phi} + 1 \geq 1 \quad (4)$$

که در آن  $\phi$  تابعی از  $\mu$ ،  $T$  و شرایط خاک است و برای لایه‌های سنگ، به صورت رابطه (۴-۱) بیان می‌شود.

$$\phi = 1 + \frac{1}{10T - \mu T} - \frac{1}{2T} \exp[-1.5(\ln(T) - 0.6)^2] \quad (4-1)$$

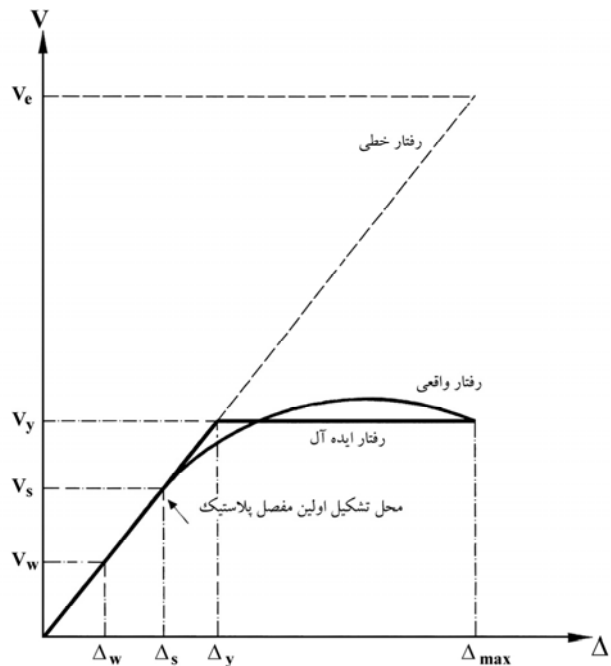
مقاومت ذخیره شده در سازه از حد اولین جاری شدن سازه  $V_s$  تا حد جاری شدن نهایی و ایجاد مکانیزم و خرابی واقعی سازه  $V_y$ ، اضافه مقاومت نامیده می‌شود. نسبت این دو نیرو ضریب اضافه مقاومت است که با  $R_S$  نشان داده می‌شود و طبق رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$R_S = \frac{V_y}{V_s} \quad (5)$$

اضافه مقاومت در سازه‌ها به دلایل زیادی از جمله باز توزیع داخلی نیروها، مقاومت بالاتر مصالح مورد استفاده از مقدار مشخص شده در طراحی، جاری شدن اعضا و ایجاد لولاهای پلاستیک متعدد تا حد تبدیل شدن سازه به یک مکانیزم، بزرگتر بودن مقطع اعضا نسبت به مقدار مورد نیاز و سایر عوامل است [۶].

برای طراحی در حد تنش مجاز، آئین‌نامه‌های طراحی نیروی  $V_s$  را به نیروی طراحی  $V_w$  کاهش می‌دهند. این کاهش توسط ضریب تنش مجاز که طبق رابطه (۶) تعریف می‌شود صورت می‌گیرد:

$$Y = \frac{V_s}{V_w} \quad (6)$$



شکل ۱- منحنی پاسخ کلی سازه

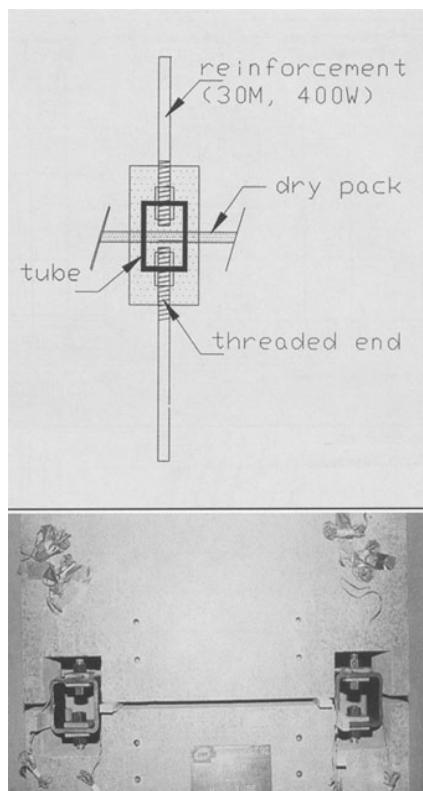
$\Delta_{max}$  است. با توجه به شکل (۱)، ضریب شکل‌پذیری  $\mu$  از رابطه (۲) به دست می‌آید [۷]:

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

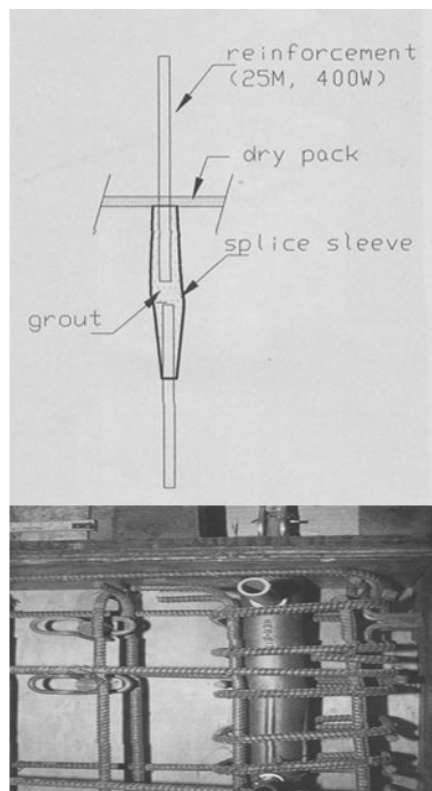
به دلیل شکل‌پذیری و رفتار غیرخطی سازه، نیروی خطی سازه  $V_e$  می‌تواند به نیروی  $V_y$  کاهش یابد. بنابراین می‌توان ضریب کاهش نیرو را مطابق رابطه (۳) تعریف کرد:

$$R_{\mu} = \frac{V_e}{V_y} \quad (3)$$

بدیهی است که مساحت زیر خط مستقیم تغییر مکان خطی سازه که مقدار آن در انتها  $V_e$  را مشخص می‌کند، با انرژی کلی سازه برابر است. لازم به یادآوری است که  $V_y$  متناظر با نیروی خرابی سازه است و به معنای شروع تسلیم شدن سازه نیست. در عمل به دلیل پیچیده بودن محاسبه  $V_e$  از روش انرژی، این پارامتر با توجه به زمان تناوب سازه مورد بررسی، به کمک روابط گوناگونی که از طرف محققان مختلف پیشنهاد شده، محاسبه می‌شود. در این حالت برای محاسبه زمان تناوب در سازه مورد مطالعه از یک میرایی ویسکوز معادل پنج درصد در



-RT-



-RS-

شکل ۲ - جزئیات اتصالات RS و RT [۹-۱۰]

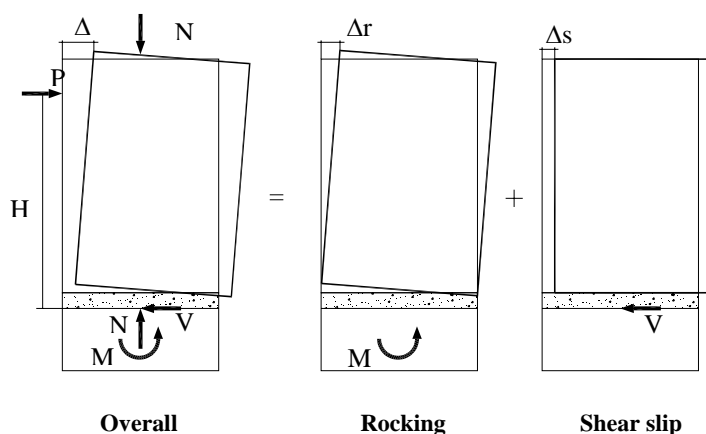
نرم افزار Perform 3D مدلسازی و با توجه به مشخصات منحنیهای رفتاری بتن و فولاد، پارامترهای لازم در نرم افزار تعریف شد. در مدلسازی اتصال مابین دو پانل باید به یک نکته توجه داشت. آرماتورهای انتظار طولی در نواحی دور از اتصال دارای عملکرد مشابه آرماتورهای داخل پانل می باشند. اما در نواحی اطراف اتصال بسته به نوع اتصال و میزان نیروی منتقل شده توسط بتن به آنها، عملکرد جداگانه‌ای از خود نشان خواهند داد. برای مدلسازی اتصال در نرم افزار از یک المان میله‌ای سرتاسری در راستای اتصال استفاده شده است که در نقاط گره‌ای مش بندی پانل، این المان نیز منقطع شده است. در المانهایی که دور از محل اتصال هستند منحنی رفتاری اختصاص داده شده به آنها منحنی رفتار فولاد است اما در محل اتصال، از منحنی رفتاری غیر از منحنی فولاد استفاده شده است. برای مشخص شدن رفتار اتصال، از مشخصات پانلهای

در حالت طراحی به روش تنش مجاز برای سازه‌های فولادی و بتن مسلح معمولاً مقداری در حدود  $1/4$  تا  $1/5$  در نظر گرفته می‌شود. این ضریب برای طراحی به روش مقاومت نهایی برابر یک است.

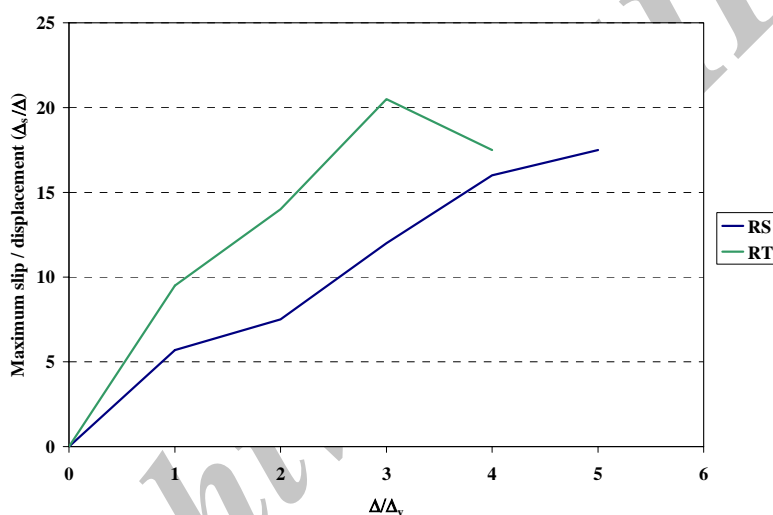
### مدلسازی اتصالات

برای اطمینان از صحت مدلسازی اتصال در نرم افزار، ابتدا مدل مجزایی از دو نوع اتصال، ایجاد شده و نتایج تحلیل آنها با نتایج آزمایشگاهی که توسط سودکی و همکاران انجام شد مورد مقایسه قرار گرفته است [۹-۱۰]. شکل (۲) جزئیات اجرایی اتصالاتی که مورد استفاده قرار گرفته‌اند را نشان می‌دهد. نام‌گذاری RS و RT توسط سودکی انتخاب شده است و در اینجا نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل (۳) مدل واقعی مورد آزمایش توسط سودکی قابل مشاهده است. این پانل در



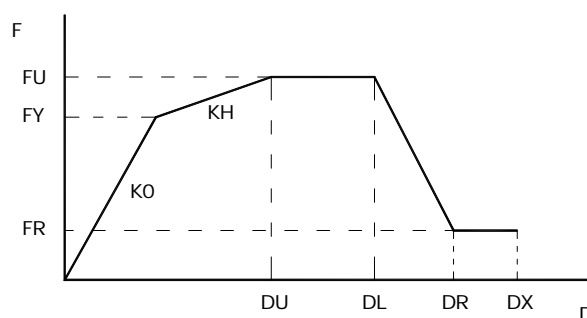


شکل ۴ - اجزای مختلف تغییر شکل دیوار بتنی



شکل ۵ - تغییر مکان برشی اندازه‌گیری شده اتصالات در حین آزمایش، [۹-۱۰]

پارامتر تغییر مکان ناشی از برش، شناخته شده‌اند. در منحنی شکل (۵) تغییر مکان برشی اتصالات که در هر لحظه از آزمایش اندازه‌گیری شده نشان داده شده است. در این منحنی با داشتن تغییر مکان کل اتصال می‌توان نسبت تغییر مکان برشی به تغییر مکان کل را به دست آورد. بدین ترتیب در هر لحظه می‌توان نمودار نیروی کل - تغییر مکان سازه را به نمودار نیرو - تغییر مکان اتصال مرتبط کرد. در نتیجه شکل (۶) با توجه به جدول (۱) برای منحنی رفتاری اتصالات حاصل شده است. باید توجه داشت که مقادیر نیروی ارائه شده در جدول (۱) برای مدلسازی اتصالات



شکل ۶ - منحنی نیرو- کرنش اتصال در محدوده غیر خطی

با اندکی تقریب می‌توان  $d$  را فاصله بین دو اتصال پانلها دانست. بدین ترتیب تمام پارامترها در این روابط به غیر از



جدول ۱ - مقادیر پارامترهای مختلف نمودار نیرو- کرنش برای اتصالات

	RS	RT	Vertical
$E (Kg/cm^2)$	130460	173020	750000
$A (cm^2)$	4.91	4.91	1.0
$K_H/K_0$	0.24	0.24	0.38
$F_y (Kg)$	22420	14000	4500
$F_U (Kg)$	28540	17000	19950
$F_R/F_U$	0.60	0.50	0.10
$D_U$	0.075	0.06	0.06
$D_L$	0.12	0.10	0.07
$D_R$	0.17	0.12	0.10
$D_X$	0.18	0.15	0.20

پانلهای پیش ساخته در ضریب ۱/۵ طبق توصیه FEMA356 ضرب شده‌اند. نتایج حاصل از بارگذاری استاتیکی فزاینده در نرم افزار به همراه مقایسه آن با منحنی آزمایشگاهی نیز در شکل (۷) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، همخوانی مناسبی بین نتایج تحلیل عددی و نتایج آزمایشگاهی در رفتار کلی اتصالات وجود دارد.

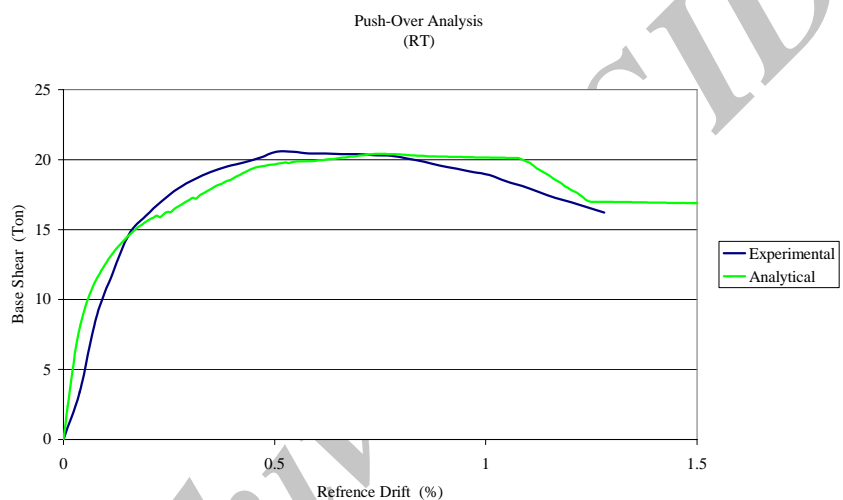
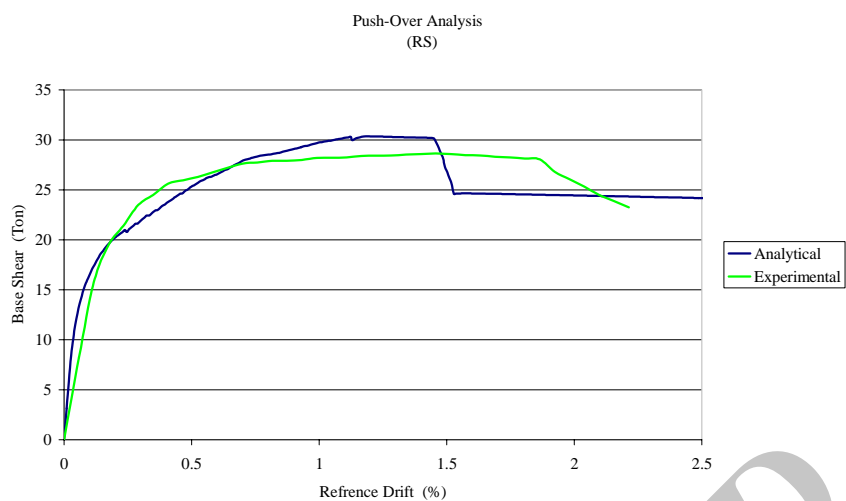
پانلهای پیش ساخته در ضریب ۱/۵ طبق توصیه FEMA356 ضرب شده‌اند. نتایج حاصل از بارگذاری استاتیکی فزاینده در نرم افزار به همراه مقایسه آن با منحنی آزمایشگاهی نیز در شکل (۷) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، همخوانی مناسبی بین نتایج تحلیل عددی و نتایج آزمایشگاهی در رفتار کلی اتصالات وجود دارد.

## ۵- مدل‌های مورد بررسی

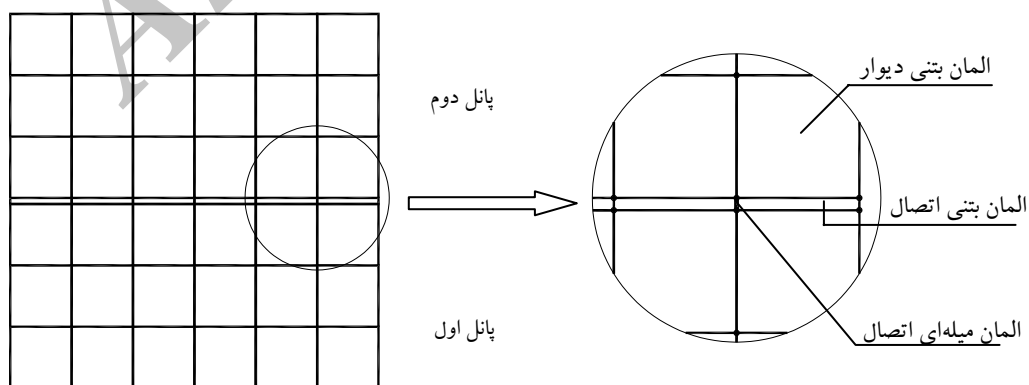
مدلهایی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته اند شامل پانلهای بتنی پیش ساخته بزرگ ۱، ۳ و ۵ دهانه در سه تیپ ۴، ۸ و ۱۲ طبقه‌اند. اتصالات قائم از نوع اتصال زبانه دار بتنی درجا به همراه آرماتور برشی در نظر گرفته شده است که در ایران رواج بسیاری دارد. برای سهولت و یکنواخت بودن دیوارها در ارتفاع، ضخامت آنها یکنواخت و ثابت فرض شده است. ضخامت دیوارهای پانلی برای مدل‌های چهار طبقه برابر ۱۵ سانتی متر، برای هشت طبقه برابر ۲۰ سانتی متر و برای ۱۲ طبقه برابر ۲۵ سانتی متر در نظر گرفته شده است. پس از تحلیل اولیه توسط نرم افزار Perform 3D به کمک نرم افزار

## ۶- نتایج تحلیل سازه‌ها

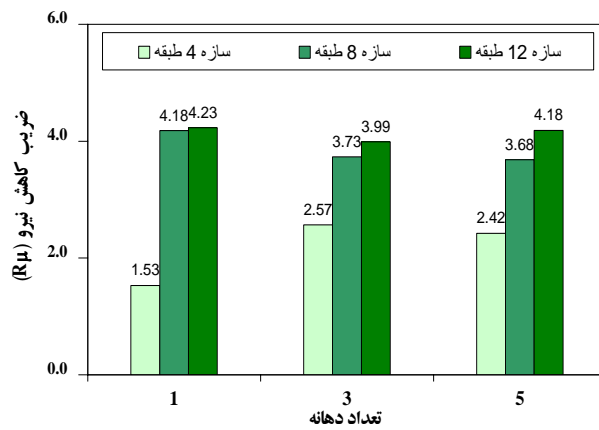
پس از بررسی نتایج حاصل از تحلیل سازه‌ها، مقادیر پارامترهای مختلف ضریب رفتار حاصل شد که در شکل‌های (۹) تا (۱۴) ارائه شده‌اند. با توجه به این نمودارها نتایج زیر حاصل شد:



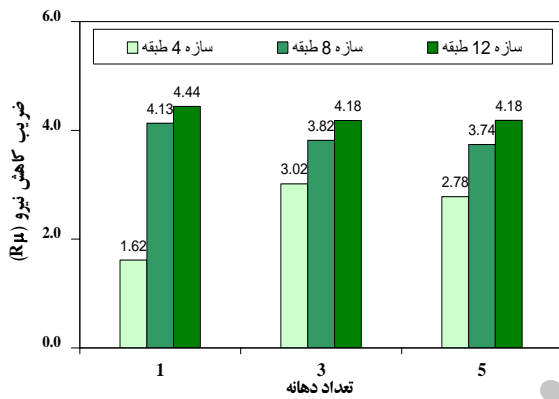
شکل ۷ - نتایج حاصل از بارگذاری استاتیکی فزاینده نرم افزار 3D Perform به همراه مقایسه آن با منحنی واقعی سودکی



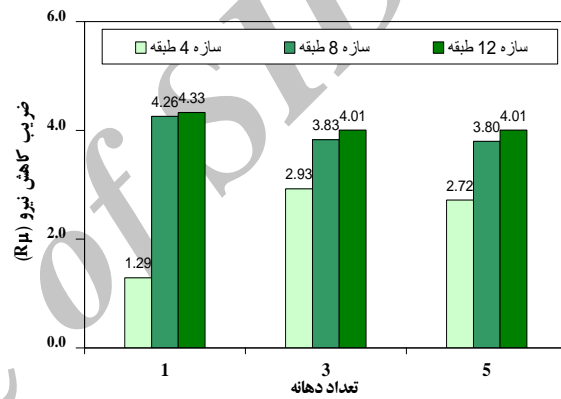
شکل ۸ - اجزای مختلف مدلسازی



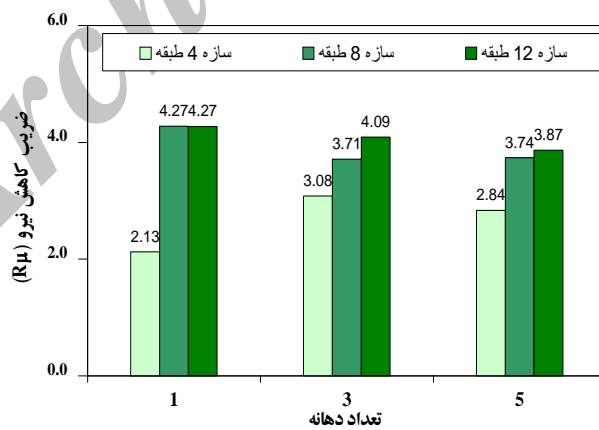
RS ,  $f'_c = 350 \text{ Kg/cm}^2$



RT ,  $f'_c = 350 \text{ Kg/cm}^2$

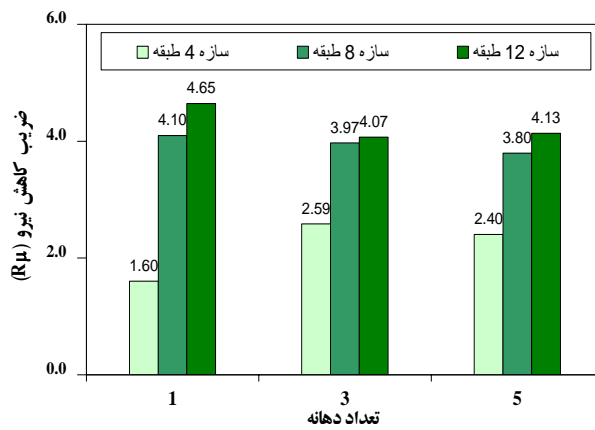


RS ,  $f'_c = 250 \text{ Kg/cm}^2$

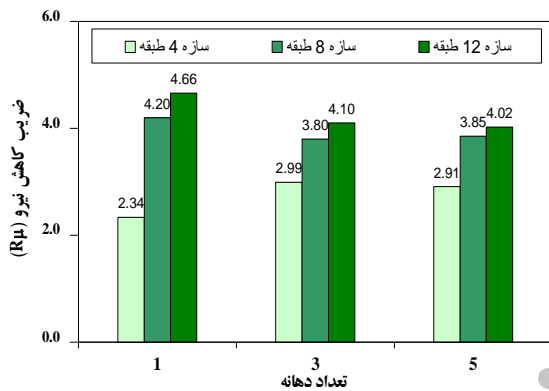


RT ,  $f'_c = 250 \text{ Kg/cm}^2$

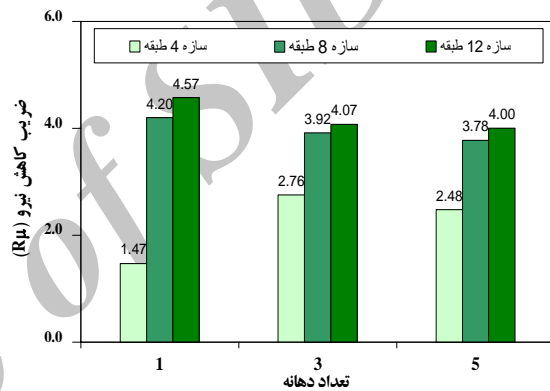
شکل ۹ - نمودارهای میله‌ای ضرایب کاهش نیرو ( $R_\mu$ )  
برای بارگذاری مثلثی



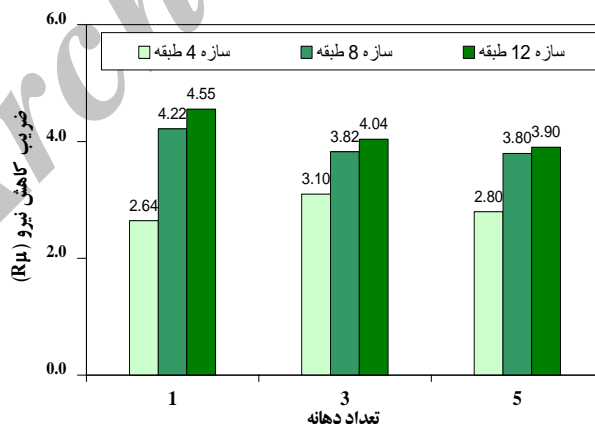
RS,  $f'_c = 350 \text{ Kg/cm}^2$



RT,  $f'_c = 350 \text{ Kg/cm}^2$

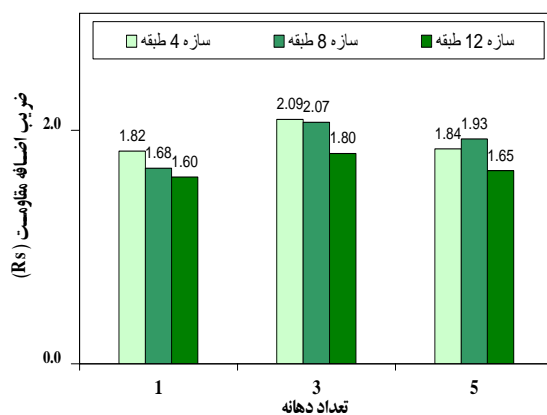


RS,  $f'_c = 250 \text{ Kg/cm}^2$

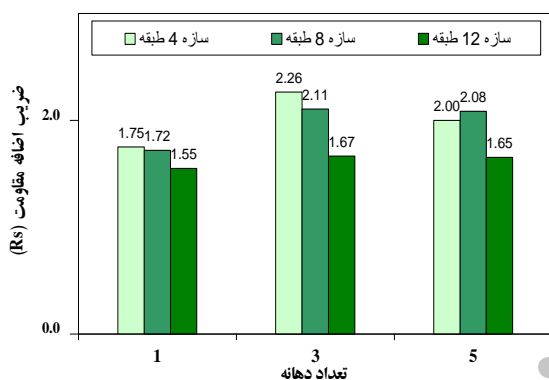


RT,  $f'_c = 250 \text{ Kg/cm}^2$

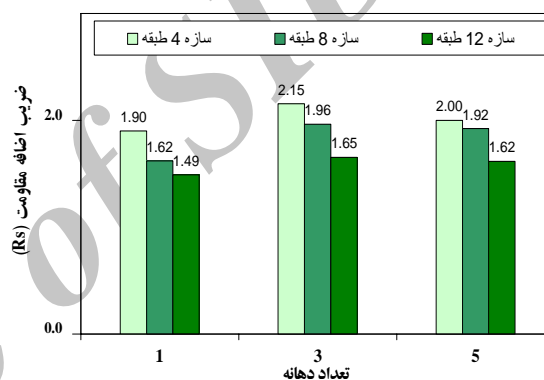
شکل ۱۰ - نمودارهای میله‌ای ضرایب کاهش نیرو ( $R_\mu$ )  
برای بارگذاری یکنواخت



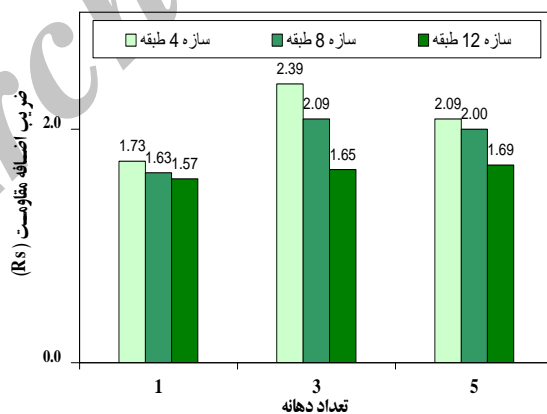
RS ,  $f'_c = 350 \text{ Kg/cm}^2$



RT ,  $f'_c = 350 \text{ Kg/cm}^2$

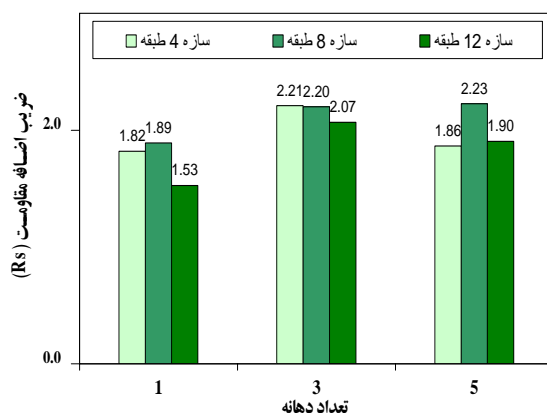


RS ,  $f'_c = 250 \text{ Kg/cm}^2$

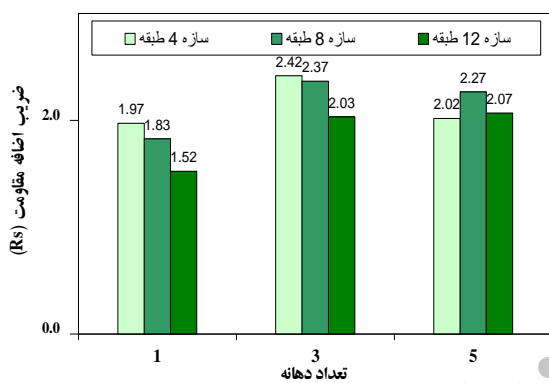


RT ,  $f'_c = 250 \text{ Kg/cm}^2$

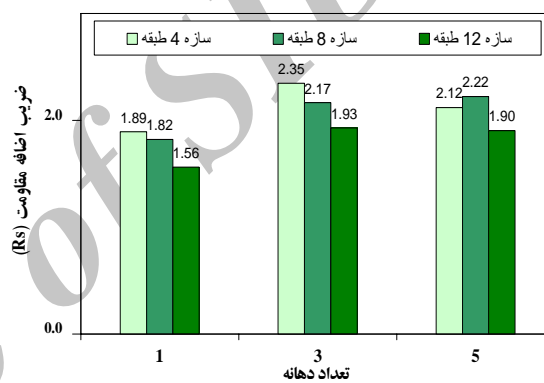
شکل ۱۱ - نمودارهای میله‌ای ضرایب اضافه مقاومت ( $R_S$ ) برای بارگذاری مثلثی



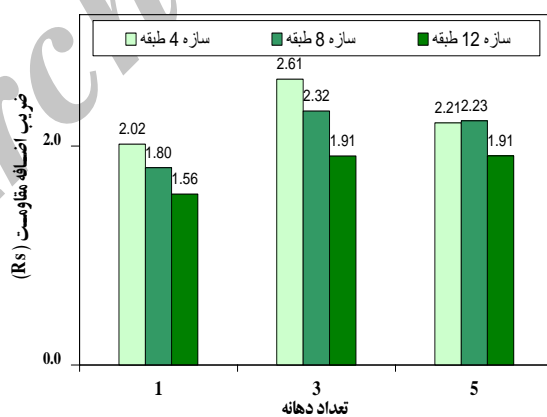
RS ,  $f'_c = 350 \text{ Kg/cm}^2$



RT ,  $f'_c = 350 \text{ Kg/cm}^2$

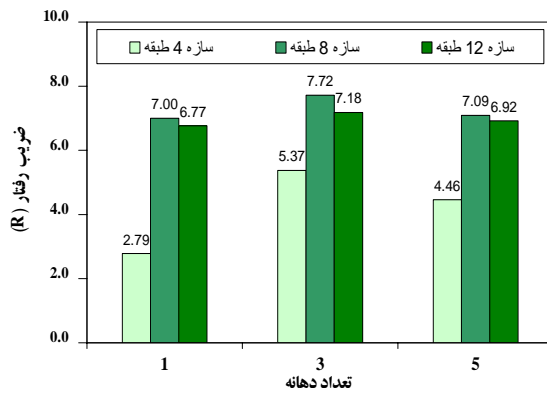


RS ,  $f'_c = 250 \text{ Kg/cm}^2$

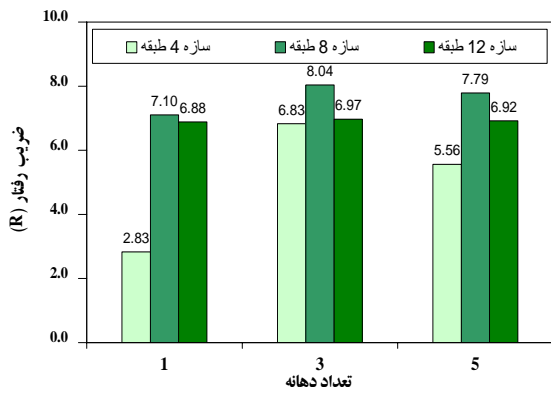


RT ,  $f'_c = 250 \text{ Kg/cm}^2$

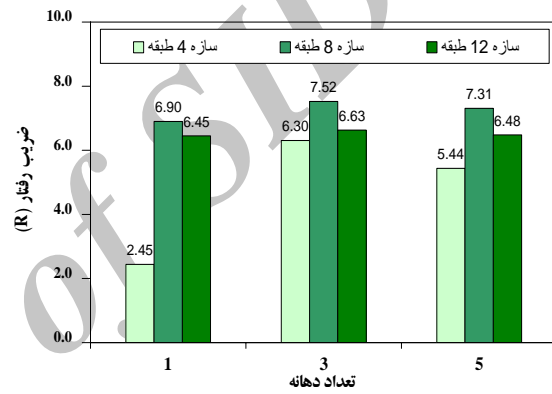
شکل ۱۲ - نمودارهای میله‌ای ضرایب اضافه مقاومت ( $R_S$ ) برای بارگذاری یکنواخت



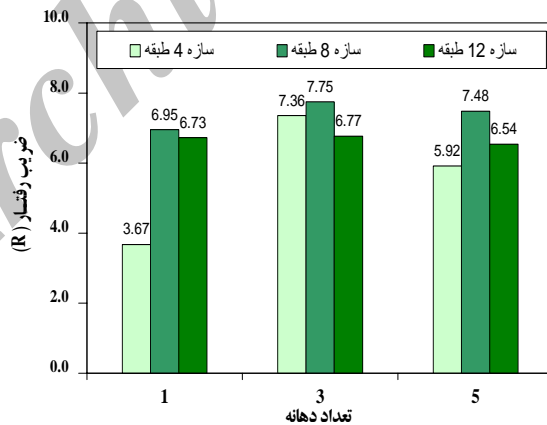
RS,  $f'_c = 350 \text{ Kg/cm}^2$



RT,  $f'_c = 350 \text{ Kg/cm}^2$

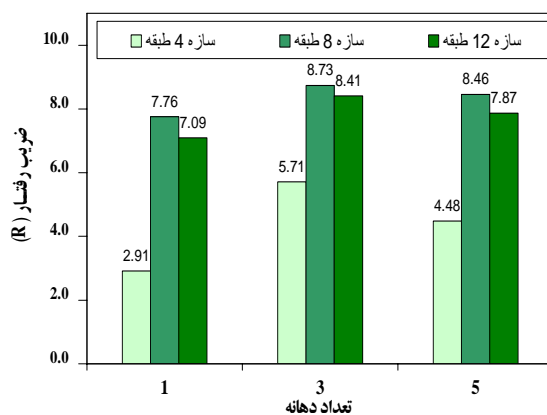


RS,  $f'_c = 250 \text{ Kg/cm}^2$

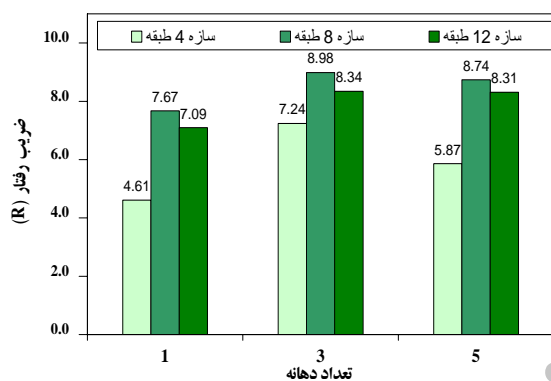


RT,  $f'_c = 250 \text{ Kg/cm}^2$

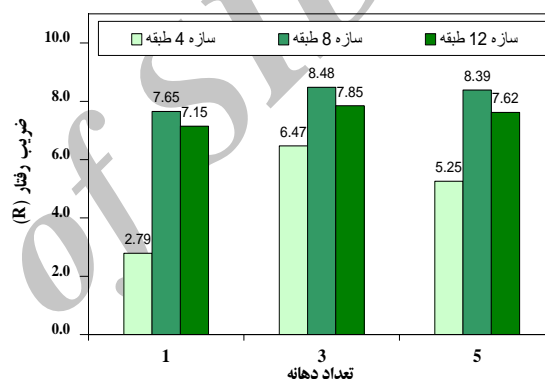
شکل ۱۳ - نمودارهای میله‌ای ضرایب رفتار (R) برای بارگذاری مثلی



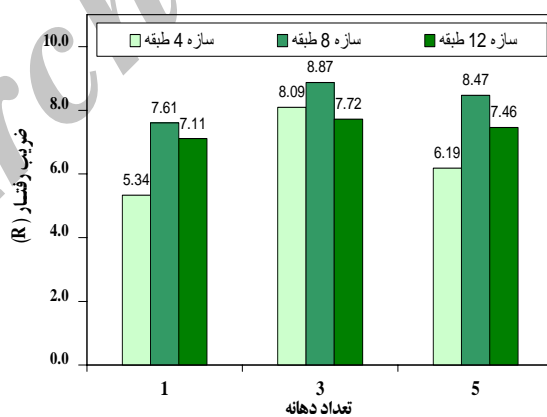
RS,  $f'_c = 350 \text{ Kg/cm}^2$



RT,  $f'_c = 350 \text{ Kg/cm}^2$



RS,  $f'_c = 250 \text{ Kg/cm}^2$



RT,  $f'_c = 250 \text{ Kg/cm}^2$

شکل ۱۴ - نمودارهای میله‌ای ضرایب رفتار (R) برای بارگذاری یکنواخت



۱- پریرود مؤثر سازه با افزایش تعداد دهانه‌ها در هر دو نوع اتصال افقی اندکی کاهش پیدا می‌یابد. ضریب شکل‌پذیری با افزایش تعداد دهانه کاهش یافته و به تبع آن ضریب کاهش نیرو ( $R_{II}$ ) نیز کاهش می‌یابد. در کنار آن ضریب اضافه مقاومت با افزایش دهانه‌ها افزایش می‌یابد. اگرچه با توجه به نتایج به‌دست آمده، روند تغییرات ضریب کاهش نیرو و ضریب اضافه مقاومت عکس هم است اما در نهایت ضریب رفتار از یک دهانه به سه دهانه افزایش چشمگیری داشته است. بر خلاف حالت قبل با افزایش دهانه از سه به پنج دهانه ضریب رفتار اندکی کاهش یافته است. ضریب رفتار از یک دهانه به سه دهانه در حدود ۹٪ افزایش و از سه دهانه به پنج دهانه در حدود ۲٪ کاهش نشان می‌دهد.

۲- با افزایش مقاومت فشاری بتن همان طور که انتظار می‌رفت اندکی پریرود سازه کاهش یافته است. ضریب شکل‌پذیری با افزایش مقاومت فشاری بتن کاهش یافته و به تبع آن ضریب کاهش نیرو ( $R_{II}$ ) نیز کاهش می‌یابد. بر خلاف ضریب کاهش نیرو، ضریب اضافه مقاومت سازه ( $R_s$ ) در حدود ۴٪ افزایش نشان می‌دهد. در نهایت ضریب رفتار در پانلهایی که مقاومت فشاری آنها ۳۵۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع است افزایش یافته است.

۳- برای حالتی که مقاومت فشاری بتن ۲۵۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع در نظر گرفته شده است پریرود مؤثر سازه در حالتی که بارگذاری مثلی است به میزان جزئی نسبت به حالتی که بارگذاری یکنواخت است تغییر نشان می‌دهد. ضریب کاهش نیرو با تغییر نوع بارگذاری، تفاوت بسیار کمی از خود نشان می‌دهد. بر خلاف ضریب اضافه مقاومت که چیزی در حدود ۱۰ الی ۱۵ درصد در حالت بارگذاری یکنواخت افزایش یافته است. این تغییر باعث افزایش ضریب رفتار پانلهای ساخته شده است. مشابه این روند برای پانلهای ساخته شده با بتن پر مقاومت تر نیز مشاهده می‌شود. علی‌رغم کاهش جزئی در

ضریب شکل‌پذیری و به تبع آن ضریب کاهش نیرو شاهد افزایش ۶ الی ۱۵ درصدی ضریب اضافه مقاومت هستیم که این خود باعث افزایش ضریب رفتار در این حالت می‌شود

۴- نوع اتصال افقی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است در مدل‌های هشت طبقه و دوازده طبقه تاثیر خاصی بر ضرایب رفتار محاسبه شده نداشته و در کاربردهای عملی می‌توان آن را ثابت فرض کرد. البته این یک قاعده کلی نیست و تاثیر سایر اتصالات رایج باید با انجام تحلیل‌های مناسب تعیین شود.

۵- مقایسه ضریب رفتار بین مدل‌های با دهانه‌های متفاوت نشان می‌دهد که در مدل سه دهانه بیشترین ضریب رفتار و در یک دهانه کمترین ضریب رفتار حاصل شده است.

۶- روند تغییرات ضریب رفتار برای پانلهای چهار طبقه نامنظمی زیادی نسبت به سایر تیپ طبقات از خود نشان می‌دهد. با بررسی نمودارهای تحلیل Pushover این سازه‌ها متوجه می‌شویم شکستگی‌هایی در نمودار ظرفیت پانلهای چهار طبقه وجود دارد که باعث افتادگی نمودار دوخطی ایدئال، روند صعودی کندتر نمودار ظرفیت و کاهش تغییر مکان متناظر نقطه تسلیم می‌شود. به همین علت مقادیر شکل‌پذیری آنها بزرگتر از نمونه‌های دیگر به‌دست آمده است. با نگاهی به روند تغییرات  $R_{II} - \mu$  مشاهده می‌شود در یک پریرود خاص تا شکل‌پذیری حدود ۷ این نمودار حالت صعودی داشته اما بعد از آن به سرعت رو به افول می‌رود. بدین ترتیب مقادیر  $R_{II}$  کوچکی حاصل می‌شود که به تبع آن ضریب رفتار کوچکی نیز به‌دست می‌آید.

## ۷- مقایسه ضرایب رفتار به‌دست آمده با آیین نامه‌های موجود

با گسترش مفهوم پیش ساختگی و استفاده روزافزون از آن، به مرور یا دستورالعمل‌هایی برای تحلیل، طراحی و ساخت قطعات پیش ساخته تدوین شد و یا آیین نامه‌های موجود با افزودن بخشی با عنوان پیش ساختگی به تعیین معیارهای

جدول ۲ - ضریب رفتار سازه‌های دیوار باربر در آیین نامه NEHRP2003

Basic Seismic-Force-Resisting System	R	$\Omega_0$
Bearing Wall Systems		
Special reinforced concrete shear walls	5	2.5
Ordinary reinforced concrete shear walls	4	2.5
Detailed plain concrete shear walls	2	2.5
Ordinary plain concrete shear walls	1.5	2.5
Intermediate precast shear walls	4	2.5
Ordinary precast shear walls	3	2.5
Special reinforced masonry shear walls	3.5	2.5
Intermediate reinforced masonry shear walls	2.5	2.5
Ordinary reinforced masonry shear walls	2	2.5
Detailed plain masonry shear walls	2	2.5
Ordinary plain masonry shear walls	1.5	2.5
Prestressed masonry shear walls	1.5	2.5
Light-frame walls with shear panels	6.5	3
Light-frame walls with diagonal braces	4	2

تحقیق مقایسه کرد. در این آیین نامه ضریب رفتار برای انواع مختلفی از سازه‌ها با سیستم دیوار باربر ارائه شده است که در نوع خود منحصر به فرد است. در جدول (۲) مقادیر ضرایب ارائه شده برای چند سازه مختلف نشان داده شده است.

نکته قابل توجه آن است که همان‌طور که از جدول (۲) برمی آید، ضریب اضافه مقاومت که در این آیین نامه با  $\Omega_0$  نشان داده شده است با مقادیر به دست آمده از نتایج تحلیل صورت گرفته در این تحقیق همخوانی دارد، اما ضرایب رفتار ارائه شده کوچکتر از مقادیر محاسبه شده در این تحقیق است. در نتیجه می‌توان گفت ضریب کاهش نیرو ناشی از شکل‌پذیری در این آیین نامه کوچکتر از ضریب به دست آمده در این تحقیق است. علت امر را می‌توان در چند نکته یافت: اول آنکه همان‌طور که قبلاً توضیح داده شده است، تخمین

مربوط به آن پرداختند. از آن جمله می‌توان به دستورالعمل PCI، کمیته ۵۳۳ آیین نامه ACI و آیین نامه NEHRP2003 اشاره کرد. برای دیوارهای باربر بتنی در تمام آیین نامه‌ها مقادیری به عنوان ضریب رفتار آمده است. اما بیشتر آیین نامه‌ها به ارائه ضریب رفتار مخصوص پانلهای پیش ساخته بتنی پرداخته‌اند. از جمله آیین نامه‌هایی که به صورت مفصل ضریب رفتار برای پانلهای پیش ساخته ارائه داده است آیین نامه NEHRP2003 است.

#### ۷-۱- آیین نامه NEHRP2003 [۱۱]

روش تحلیل و طراحی در این آیین نامه بر اساس مقاومت نهایی می‌باشد. بدین ترتیب می‌توان ضرایب ارائه شده در این آیین نامه را به صورت مستقیم با مقادیر به دست آمده در این

جدول ۳ - ضریب رفتار سازه‌های دیوار باربر در آیین نامه ۲۸۰۰ ایران

سیستم سازه	سیستم مقاومت در برابر نیروهای جانبی	R	Rm (متر)
سیستم دیوارهای باربر	۱- دیوارهای برشی بتن مسلح ویژه	۷	۵۰
	۲- دیوارهای برشی بتن مسلح متوسط	۶	۵۰
	۳- دیوارهای برشی بتن مسلح معمولی	۵	۳۰
	۴- دیوارهای برشی با مصالح بنایی مسلح	۴	۱۵

مقاومت را به صورت مستقیم و از روی مقادیر به دست آمده از نمودار ظرفیت سازه محاسبه می‌کنیم، مقادیر به دست آمده از دقت مناسبتری نسبت به ضریب کاهش نیرو ناشی از شکل‌پذیری برخوردارند و این مطلب را با مقایسه مقادیر محاسباتی از این تحقیق با مقادیر ارائه شده در آیین نامه NEHRP2003 می‌توان تأیید کرد.

از نکات دیگری که در مورد این آیین نامه می‌توان گفت آن است که ضرایب رفتار ارائه شده برای سازه‌های ساخته شده از دیوارهای بتنی پیش ساخته چیزی در حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد نسبت به مقادیر ارائه شده برای سازه‌های ساخته شده از دیوارهای بتنی درجاریز کاهش داشته است.

#### ۷-۲- آیین نامه ۲۸۰۰ ایران [۱۲]

این آیین نامه پیرامون سازه‌های پیش ساخته بتنی مطلبی ارائه نکرده، اما برای دیوارهای باربر برشی در سه نوع مختلف ضرایب رفتاری مطابق جدول (۳) ارائه کرده است. نکته‌ای را که نباید فراموش کرد آن است که مبنای تحلیل و طراحی در این آیین نامه، طراحی به روش تنش مجاز است. پس باید مقادیر ارائه شده را در حدود ۲۸ الی ۳۴ درصد (به طور متوسط ۳۱٪) کاهش داد. بدین ترتیب ضرایب رفتاری در حدود ۳/۴۵ الی ۴/۹ برای انواع مختلف از دیوار برشی درجا حاصل می‌شود.

با توجه به گسترش روز افزون سازه‌های پیش ساخته در نقاط مختلف جهان و لزوم گسترش این نوع سازه‌ها در ایران، اهمیت تدوین معیارهای مناسب برای تحلیل و طراحی این نوع سازه‌ها در آیین نامه ۲۸۰۰ ایران کاملاً مشهود است.

مقدار ضریب کاهش نیرو ناشی از شکل‌پذیری با تقریبهایی همراه است. محققان زیادی برای برآورد دقیقتر این ضریب تلاش کرده‌اند اما اختلاف بین مقادیر ارائه شده توسط هر یک از محققان مخصوصاً در محدوده مربوط به پریودهای کوتاه بسیار بزرگ است. در این تحقیق از روش میراندا استفاده شد که مقادیر میانگینی برای ضرایب کاهش نیرو به دست می‌دهد. حال باید دید آیا مبنای محاسبه ضریب شکل‌پذیری در آیین نامه‌ها نیز این روش است یا خیر. به نظر می‌رسد آیین نامه‌ها در جهت اطمینان از روشهایی استفاده نمایند که مقادیر پایبندی برای ضریب کاهش نیرو به دست دهد. به طور مثال برای مدل هشت طبقه سه دهانه با بارگذاری مثلثی ضریب کاهش نیرو ناشی از شکل‌پذیری از روش القادامسی و محرز چیزی در حدود ۳ به دست می‌آید. بدین ترتیب ضریب رفتار این سازه از مقدار ۷/۵۲ به ۵/۸۸ تقلیل می‌یابد که در حدود ۲۲ درصد کاهش از خود نشان می‌دهد. در نتیجه برای در نظر گرفتن این تقریبها و کاهش اثر آن بر ضرایب رفتار محاسبه شده، یا باید از ضرایب اطمینان مناسب بهره برد و یا تحلیلهای دقیق اما طولانی و وقتگیر با حجم بالایی از داده‌های ورودی و خروجی انجام داد.

دوم آنکه آیین نامه‌ها باید علاوه بر ایجاد سهولت در کاربرد، در بر گیرنده حالات مختلف سازه‌ای ممکن اعم از تعداد طبقات، تعداد دهانه و ... نیز باشد. در نتیجه این امر باعث می‌شود آیین نامه‌ها به صورت خودکار ضرایب اطمینان بزرگی برای مقادیر به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی و بررسیهای نظری در نظر گرفته و مقادیر ضریب رفتار کوچکی ارائه دهند. در کنار این مطلب باید توجه داشت که چون ضریب اضافه

این آیین نامه نیز به صورت خاص ضریب رفتاری برای سازه‌های ساخته شده با دیوار برشی پیش ساخته ارائه نداده است. اما برای سازه‌های ساخته شده با دیوار برشی درجاریز از ضریب رفتاری برابر ۶ استفاده می‌کند. البته مبنای طراحی در این آیین نامه روش تنش مجاز است. در نتیجه باید عدد فوق را ۳۱ درصد کاهش داد. بدین ترتیب عددی در حدود ۴/۱۵ به عنوان ضریب رفتار دیوار برشی درجاریز حاصل می‌شود.

### ۸- نتیجه گیری

برای سازه‌های ساخته شده از پانلهای پیش ساخته بتنی برابر، به صورت کلی ضریب رفتاری در حدود ۳ تا ۴/۵ توسط آیین نامه‌ها و دستورالعملهای موجود استفاده شده است. در اکثر آیین نامه‌های زلزله دنیا، ضریب رفتار فقط بر حسب نوع سیستم سازه‌ای معرفی شده، در صورتی که این ضریب به عوامل مختلفی از جمله پیوند سازه وابسته است. آیین نامه‌هایی که برای یک نوع سازه، ضریب رفتار واحدی را برای تمام محدوده پیوندها ارائه کرده‌اند، سطح مشخصی از ضریب اطمینان را برای تمام سازه‌ها نمی‌توانند فراهم کنند. با توجه به مقادیر به دست آمده در این تحقیق، ضریب رفتاری برابر ۵ تا ۸ برای سازه‌های ساخته شده از پانلهای بتنی بزرگ پیش ساخته به صورت خام به دست آمده است. به این ترتیب به نظر می‌رسد استفاده از ضریب رفتار آیین نامه‌های موجود، ضریب اطمینانی در حدود ۱/۵ الی ۲ را برای سازه‌های ساخته شده از پانلهای پیش ساخته بتنی برابر با خود به همراه دارد.

### ۷-۴- دستورالعمل سازه‌های Tilt-Up

این آیین نامه برای ضریب رفتار سازه‌های ساخته شده با دیوار برشی به روش Tilt-Up عدد ۴/۵ را پیشنهاد می‌دهد. البته باید توجه داشت نحوه ساخت این نوع سازه‌ها متفاوت با ساخت پانلهای پیش ساخته است. اتصالات افقی در این روش وجود ندارد و دیوارهای پیش ساخته به ارتفاع ماکزیم تا چهار طبقه به صورت یکپارچه و در نزدیکی محل سازه ساخته می‌شوند و توسط جرتیل در جای خود قرار می‌گیرند. تنها نکته قابل توجه اتصالات پانلها با پی سازه است. البته برای اتصال چند ردیف

### مراجع

1. Hamid H. A., and Mander, J. B., "Experimental Study on Bi-Lateral Seismic Performance of Precast Hollow Core Wall Using Shaking Table", *Proceeding on the Tenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-10)*, Intercontinental Hotel, Bangkok, Thailand, August, 2006.
2. Han, S. W., Oh, Y. H., and Lee, L. H., "Seismic Behaviour of Structural Walls with Specific Details", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 54, No. 5, pp. 333-345, October, 2002.
3. Chaia, Y. H., and Anderson, J. D., "Seismic Response of Perforated Lightweight Aggregate Concrete Wall Panels for Low-Rise Modular Classrooms," *Engineering Structures*, No. 27, pp. 593-604, 2005.
4. Pekau, O. A., and Yuzhu, Cui, "Progressive Collapse Simulation of Precast Panel Shear Walls During Earthquakes," *Computers and Structures*, Vol. 84, pp. 400-412, 2006.
5. CSI Perform 3D V4.03, *Computers and Structures Inc.*, Berkeley, California, Release 2006, Element Description & User Guide.
6. تسنیمی، ع.، و محمودی، م.، "دامنه تغییرات ضریب رفتار در سیستمهای یک درجه آزادی"، کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ۱۳۷۶.
7. Unag, C. M., "Establishing R (or R<sub>w</sub>) & C<sub>d</sub> Factor for Building Seismic Provisions," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 117, No. 1, pp. 19-28, 1991.
8. Miranda, E., Eeri, M., and Bertero, V., "Evaluation of Strength Reduction Factors for Earthquake-Resistant Design," *Earthquake Spectra*, Vol. 10, No. 2, pp. 357-379, 1994.
9. Soudki K. A., Rizkalla, S. H., and Leblanc, B., "Horizontal Connections for Precast Concrete Shear Walls Subjected to Cyclic Deformations, Part 1: Mild Steel Connections", *PCI Journal*, Vol. 40, No. 4, pp. 78-96, July-Aug, 1995.

10. Soudki, K. A., Rizkalla, S. H., and West, J. S., "Horizontal Connections for Precast Concrete Shear Walls Subjected to Cyclic Shear Loading," *PCI Journal*, Vol. 41, No. 3, pp. 56-70, May-June, 1996.
11. NEHRP, National Earthquake Hazards Reduction Program, Recommended Provisions for the Development of Seismic Regulations for New

Buildings and Other Structures, Building Seismic Safety Council, Washington, DC, 2003.

۱۲. کمیته دائمی بازنگری آئین‌نامه طرح ساختمانها در برابر زلزله، آئین‌نامه طرح ساختمانها در برابر زلزله، ویرایش سوم، انتشارات مرکز تحقیقات و مسکن، ۱۳۸۵.

Archive of SID