

بررسی عددی دیوار برشی فولادی حلقه‌شکل با استفاده از ستون‌های قوطی‌شکل پرشده با بتن به‌عنوان المان مرزی قائم

مرتضی جمشیدی*^۱، علی قاسم‌پور^۲

^۱ استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد چالوس

^۲ کارشناس ارشد دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد چالوس

(دریافت: ۹۷/۱/۲۳، پذیرش: ۹۹/۲/۳۱، نشر آنلاین: ۹۹/۲/۳۱)

چکیده

دیوار برشی فولادی یکی از انواع سیستم‌های باربر جانبی می‌باشد که استفاده از آن در صنعت ساختمان رو به گسترش است. عملکرد مناسب دیوار برشی فولادی که بر اساس گسترش میدان کششی می‌باشد، تا حد زیادی وابسته به المان‌های مرزی شامل تیرها و ستون‌ها است. به‌عبارت‌دیگر در فرایند استهلاک انرژی طی تسلیم ورق نازک جان نیروهای قابل‌ملاحظه‌ای به المان‌های مرزی وارد می‌گردد. از این‌رو برای آن که سازه مجهز به سیستم دیوار برشی فولادی از عملکرد مناسبی برخوردار باشد می‌بایست المان‌های مرزی علی‌الخصوص ستون‌ها دارای رفتار الاستیک باشند. در این مقاله برای کنترل مقاومت، تضمین رفتار الاستیک ستون‌ها با استفاده از مقاطع قوطی‌شکل فولادی پرشده با بتن به‌عنوان المان مرزی قائم و نیز پانل‌های حلقه‌ای به‌عنوان ورق جان پیشنهاد شده است. جهت انجام کنترل پایداری موضعی، بیرون‌کشیدگی بال ستون مجاور ورق جان مورد بررسی قرار گرفته است. مدل‌های پیشنهادی با نرم‌افزار المان محدود آباکوس (ABAQUS) شبیه‌سازی شده و تحت بارگذاری مونوتونیک (Monotonic) قرار گرفتند. نتایج حاصل از مدل‌های پیشنهادی با نتایج دیوارهای برشی با ورق جان یکپارچه مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که استفاده از ورق حلقه‌ای اثر قابل‌ملاحظه‌ای در کاهش بیرون‌کشیدگی بال ستون داشته و می‌تواند از تسلیم المان‌های مرزی قائم جلوگیری کند.

کلیدواژه‌ها: ورق جان حلقه‌شکل، ستون فولادی پرشده با بتن، نسبت لنگر خمشی اعمالی به لنگر ظرفیت، کمانش موضعی بال ستون.

۱- مقدمه

به‌گونه‌ای ارائه می‌نمایند که این المان‌ها، تحت نیروهای ناشی از گسترش میدان کششی در ورق، رفتار الاستیک از خود نشان دهند (AISC341-10، ۲۰۰۵).

تضمین رفتار الاستیک المان‌های مرزی قائم مستلزم به‌کارگیری مقاطع با ابعاد بزرگ‌تر جهت ساخت المان‌های مذکور می‌باشد (Koppal، ۲۰۱۲) که این امر علی‌الخصوص در مقاوم‌سازی سازه‌های موجود چالش‌برانگیز است. در راستای رفع این مشکل دو استراتژی زیر در روند مطالعات محققین دنبال شده است:

(۱) کنترل نیروهای ناشی از گسترش میدان کششی در ورق جان؛ در سال‌های اخیر Maurya (۲۰۱۲)، Egorova (۲۰۱۳) و Phillips (۲۰۱۶) الگویی از ورق‌های فولادی ارائه داده‌اند که با بهبود رفتار کمانشی آن از نیروی اعمالی به المان‌های مرزی می‌کاهد. در شکل (۱) یکی از نمونه‌های ساخته‌شده با این الگو نشان داده شده است. در ورق جان حلقه‌ای که توسط این محققین مورد آزمایش و بررسی قرار گرفته است، با استفاده از تغییرات

در سال‌های اخیر استفاده از ورق‌های نازک فولادی به‌عنوان سیستم یا عضوی از یک سیستم باربر جانبی در ساختمان Tsai و Li، (۲۰۰۹) و پل (Jamshidi و همکاران، ۲۰۱۵) مورد توجه قرار گرفته است. این صفحات عموماً توسط یک قاب پیرامونی شامل المان‌های مرزی قائم و افقی محاط می‌شوند. در حین اعمال بار جانبی؛ در مقادیر اندک بار، ورق نازک فولادی تحت تنش‌های فشاری ناشی از برش، کمانش خواهد کرد و با توسعه میدان کششی به مقاومت خود در مقابل نیروهای برشی ادامه خواهد داد (Bruneau و Sabelli، ۲۰۰۶). این ایستادگی تا تسلیم کامل ورق ادامه خواهد داشت (Bruneau و Purba، ۲۰۰۷) و بخش عمده‌ای از انرژی لرزه‌ای به‌واسطه تسلیم چرخه‌ای ورق پرنکننده مستهلک می‌گردد (Bruneau و Sabelli، ۲۰۰۶). برای گسترش میدان کششی و تسلیم کامل ورق پرنکننده، المان‌های مرزی می‌بایست ظرفیت لازم جهت مهار کردن ورق جان را داشته باشند. در این راستا برخی از آیین‌نامه‌ها، ضوابط طراحی المان‌های مرزی قائم را

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۱۱-۵۲۲۴۱۴۳۳

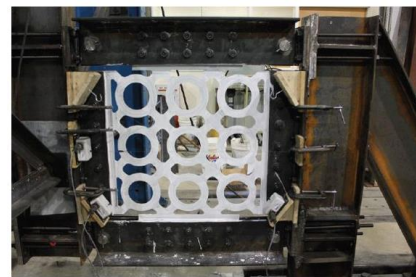
(۲) نمایان است، تسلیم از قطر کششی ورق جان آغاز می‌شود. این حالت حدی، معمولاً بسته به تنش تسلیم ورق در دریافت^۲ طبقه ۳/۰ تا ۵/۰٪ رخ می‌دهد.

(۲) حالت حدی تسلیم یکپارچه یا وضعیت UY^۳، این حالت حدی مربوط به زمانی است که دیوار برشی فولادی دچار مکانیسم تسلیم یکپارچه می‌شود. در این حالت، تمام ورق‌های جان در کل ارتفاع سیستم دیوار برشی کاملاً تسلیم می‌شوند، به‌علاوه در دو سر تمام المان‌های مرزی افقی و پای المان‌های مرزی قائم، مفصل پلاستیک تشکیل می‌شود. این حالت معمولاً در دریافت طبقه نزدیک به ۱٪ تا ۱/۵٪ رادیان رخ می‌دهد. انتظار می‌رود که دیوار برشی فولادی حین زمین‌لرزه مبنای طرح به این حد برسد. این زمین‌لرزه، زمین‌لرزه‌ای با احتمال وقوع ۱۰٪ در طول پنجاه سال می‌باشد. لازم به‌ذکر است که مکانیسم تسلیم یکپارچه دارای مفصل پلاستیک در پایین المان مرزی قائم پایینی می‌باشد. در واقع، برای المان مرزی قائم پایینی، که به‌وسیله عمل واژگونی تحت فشار است، ناحیه پلاستیک می‌تواند تا نیمه پایینی این المان گسترش یابد. این ناحیه پلاستیک در طول دهانه برای المان مرزی قائم پایینی که تحت فشار می‌باشد، در حالت حدی تسلیم یکپارچه مجاز است.

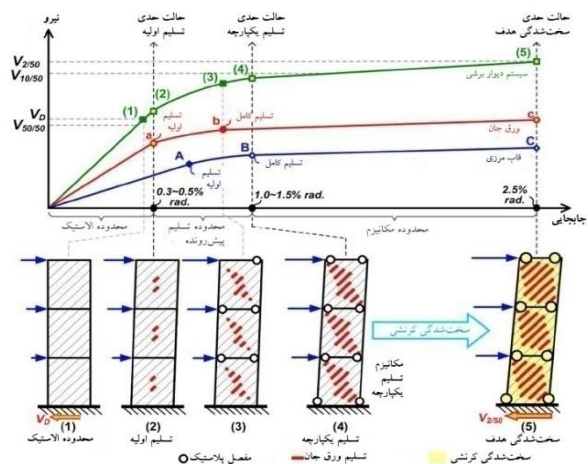
(۳) حالت حدی سخت‌شدگی هدف یا وضعیت HD^۴، حالتی است که دیوارهای برشی فولادی تا حد نهایی دریافت طبقه هدف، تحت زمین‌لرزه پیش‌بینی‌شده بیشینه، تغییر شکل می‌دهند. احتمال وقوع این زمین‌لرزه در طول پنجاه سال، ۲٪ می‌باشد. دیوارهای برشی فولادی جهت رسیدن به دریافت طبقه هدف باید دارای شکل‌پذیری کافی باشند. در این حالت حدی، نواحی پلاستیک تشکیل شده در وضعیت تسلیم یکپارچه، سخت‌شدگی کرنشی قابل توجهی را تجربه می‌کنند که تحت عنوان سخت‌شدگی کرنشی هدف شناخته می‌شود. به‌جز این نواحی پلاستیک، دیوارهای برشی فولادی در این حالت حدی، باید الاستیک باقی بمانند تا از وقوع مکانیسم‌های پلاستیک نامطلوب جلوگیری شود. مطالعات آزمایشگاهی شبه‌دینامیکی نشان داده است که تحت حرکت زمین ناشی از زمین‌لرزه بیشینه، دریافت درون طبقه حداکثر برای نمونه دیوار برشی دوطبقه در مقیاس کامل نزدیک به ۲/۵٪ رادیان بوده است (Qu و همکاران، ۲۰۰۸) و (Lin و همکاران، ۲۰۱۰). کنترل تسلیم در المان مرزی قائم بیشتر در دیوارهای برشی فولادی با المان مرزی که از مقاطع I شکل ساخته شده‌اند متمرکز است (Li و Tsai، ۲۰۰۸؛ Qu و همکاران، ۲۰۰۸). این در حالی است که در کشور ما استفاده از ستون‌ها با مقاطع قوطی شکل از رواج بیشتری برخوردار است. برای ارتقاء ظرفیت

هندسی عملکرد آن در کماتش بهبود می‌یابد. در ورق‌های جان با هندسه یکپارچه، کاهش قطر فشاری بسیار کم‌تر از افزایش قطر کششی می‌باشد که این امر موجب جمع‌شدن فولاد و ضعف عملکرد کمانشی آن می‌شود (Maurya، ۲۰۱۲). عملکرد کمانشی مناسب ورق جان حلقه‌ای نیروی اعمالی از طرف آن به قاب مرزی را کاهش می‌دهد به‌طوری‌که می‌توان از اتصالات مفصلی ساده در قاب مرزی استفاده کرد (Maurya، ۲۰۱۲).

(۲) پاسخ پوش‌آور قابل‌انتظار را می‌توان به صورت حاصل جمع جبری پاسخ ورق جان و قاب مرزی تعریف کرد. پاسخ پوش‌آور قابل‌انتظار را می‌توان به صورت سه محدوده و سه حالت حدی ترسیم کرد. شکل (۲) منحنی پوش‌آور دیوار برشی فولادی ترسیم‌شده به این صورت را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمونه آزمایشی ورق جان حلقه‌ای - Egorova (۲۰۱۳)



شکل ۲- عملکرد دیوار برشی فولادی در حالات حدی مختلف (Tsai و همکاران، ۲۰۱۴)

حالات حدی مشخص شده روی منحنی پوش‌آور به شرح زیر است:
(۱) حالت حدی تسلیم اولیه یا وضعیت IY^۱، این حد، تسلیم اولین عضو در آنالیز پوش‌آور را مشخص می‌کند. در دیوارهای برشی فولادی، ورق جان به‌عنوان عضوی که باید زودتر از همه اعضا تسلیم شود در نظر گرفته می‌شود. همان‌طور که در شکل

4. Target Hardening

1. Initial Yielding
2. Drift
3. Uniform Yielding

۲-۱- صحت‌سنجی مدل‌سازی المان مرزی قائم فولادی قوطی‌شکل پرشده با بتن

مشخصات هندسی و مقاطع به‌کار رفته در دیوار برشی آزمایش‌شده توسط Li و همکارانش (۲۰۱۴) در شکل (۶) ارائه شده است. المان‌های مرزی از جنس فولاد A572Gr50 و ورق جان، از جنس فولاد با تنش تسلیم پایین یعنی $F_y = 2100 \text{ kgf/cm}^2$ بود. هسته بتنی از نوع بتن خودتراکم با حداقل مقاومت فشاری مورد انتظار 280 kgf/cm^2 بوده است. تیرها و ستون‌ها نیز به‌وسیله جوش نفوذی به‌هم متصل شدند.

کلیه اعضای فولادی به‌وسیله المان‌های پوسته‌ای چهارگره‌ای و چهارضلعی با انتگرال‌گیری کاهش یافته و فرمول‌بندی کرنش‌های بزرگ ساخته شدند. ویژگی مصالح تعریف‌شده برای این المان‌های پوسته‌ای از نوع منحنی تنش-کرنش دوخطی با سختی پساتسلیم $0.01E$ می‌باشد که E ، مدول الاستیسیته فولاد است. در مطالعه فعلی E برابر 210000 Mpa و ضریب پواسون برابر با 0.3 انتخاب شده است. بتن پرکننده، به‌وسیله المان‌های مکعبی مدل شد. در تراز کف دوم، و سقف، از جابه‌جایی بیرون از صفحه اتصالات تیر و ستون جلوگیری شده است. برای شبیه‌سازی دقیق کمانش ورق جان، به آن نقص اولیه اعمال شد. در فرایند تحلیل اجزاء محدود منظور نمودن نقص اولیه، موجب برجسته نمودن کمانش کلی پانل خواهد شد؛ که می‌بایست در تحلیل عددی اعمال گردد. در این راستا قبل از انجام مطالعات پوش‌آور، تحلیل کمانش برای هر نمونه انجام شد. در تمامی نمونه‌ها، مجموع آثار کمانش پانل در مدهای اول و دوم با ضریب تشدید جابه‌جایی کوچک ۱ میلی‌متر به‌عنوان شرایط ابتدایی اعمال شده است (Li و همکاران، ۲۰۱۴). برای آنالیز استاتیکی غیرخطی مدل عددی، دو مرحله در آباکوس تعریف شد:

۱) اعمال بارهای عمودی به بالای ستون‌های طبقه دوم

۲) انجام آنالیز پوش‌آور با تغییر مکان هدف.

مصالح بتنی و فولادی در هر دو حالت الاستیک و پلاستیک تعریف شده‌اند. برای مصالح فولادی از مدل Plastic با سخت‌شدگی ترکیبی استفاده شده است. این مدل، ترکیب غیرخطی مدل‌های سخت‌شدگی ایزوتروپیک^۷ و سینماتیک^۸ است (Dassault، ۲۰۱۳).

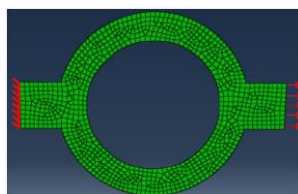
برای بتن محصورشده از مدل Concrete Damaged Plasticity که در کتابخانه آباکوس موجود است، استفاده شده است. برای تعریف اندرکنش بین فولاد و بتن با استفاده از مدل سطوح تماسی موجود در کتابخانه آباکوس استفاده شده است و اندرکنش در جهات مماس و عمود را تعریف کردیم. در جهت عمود یا نرمال از ویژگی Hard Contact استفاده کرده، و در جهت مماسی ضریب اصطکاک 0.25 بین بتن و فولاد تعریف شده است. همان‌طور که Wu (۲۰۰۰) نشان داده است، ابعاد مش تأثیر

باربری این ستون‌ها می‌توان آن‌ها را با استفاده از بتن‌های سازه‌ای پر کرد. در این نوع ستون‌ها، بال داخلی مقطع فولادی قوطی‌شکل که به ورق جان متصل می‌گردد تحت کشش قابل‌توجه ناشی از گسترش میدان کششی در ورق جان می‌باشد (Berman و Bruneau، ۲۰۰۳). به‌عبارت‌دیگر کنترل رفتار غیرارتجاعی در المان‌های قائم با مقطع قوطی‌شکل (علی‌الخصوص مقاطع پرشده با بتن)، تا حد زیادی به تسلیم بال داخلی متصل به ورق جان محدود می‌گردد. عدم توجه به بیرون‌کشیدگی بال داخلی ستون می‌تواند منجر به رفتار غیرارتجاعی در منطقه میانه یا بالایی المان مرزی قائم گردد که در نهایت تشکیل مکانیسم خرابی یکپارچه را مختل می‌کند (Berman و Bruneau، ۲۰۰۳). از نگاه نویسندگان این مقاله تاکنون ناپایداری موضعی مقاطع قوطی‌شکل به‌عنوان المان‌های مرزی قائم در دیوار برشی فولادی حلقه‌ای بررسی نشده است. لذا در این مقاله سعی شده است تا با استفاده از حدود مشخص‌شده توسط Maurya (۲۰۱۲) و Egorova (۲۰۱۳) برای عملکرد بهینه دیوار برشی حلقه‌ای، ابتدا هندسه ورق جان مشخص شود و سپس بیرون‌کشیدگی بال داخلی ستون در جابه‌جایی‌های نسبی زیاد (به‌عنوان پارامتر کلیدی در ایجاد ناپایداری موضعی) کنترل گردد. با توجه به محدودیت دسترسی به صفحات پرکننده فولادی با ضخامت کم، این مطالعه می‌تواند در طراحی بهینه و نیز مقاوم‌سازی ساختمان‌های با مقاطع قوطی‌شکل بسیار کارآمد باشد. در این راستا نمونه‌هایی از دیوار برشی فولادی با ورق‌های جان حلقه‌ای در چهار ضخامت مختلف مدل‌سازی شده و تأثیر هندسه انتخابی این صفحات در بیرون‌کشیدگی بال داخلی ستون‌های قوطی‌شکل مطالعه شده است.

۲-۲- شیوه و حوزه پژوهش و بیان انتظارات

بر اساس مطالعات نویسندگان این مقاله تا کنون رفتار آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی با ورق پرکننده حلقه‌ای دارای ستون‌های فولادی قوطی‌شکل پرشده با بتن به‌عنوان المان مرزی قائم بررسی نشده است. از این‌رو، روند صحت‌سنجی به دو بخش بررسی اعتبار مدل‌سازی المان مرزی قائم با مشخصات ارائه‌شده و نیز بررسی صحت شبیه‌سازی ورق جان حلقه‌ای تقسیم می‌گردد. در قسمت اول اعتبارسنجی یعنی بررسی درستی روند شبیه‌سازی المان مرزی قائم با مشخصات ارائه‌شده از مدل آزمایشگاهی Li و همکارانش (۲۰۱۴) استفاده شده است. در قسمت دوم اعتبارسنجی، از پانل‌های حلقه‌ای مطالعات Eatherton، Maurya، Egorova و Phillips در دانشگاه ویرجینیاتک (Maurya، ۲۰۱۲؛ Egorova، ۲۰۱۳؛ Egorova و همکاران، ۲۰۱۴؛ Phillips، ۲۰۱۶ و Phillips و Eatherton، ۲۰۱۸) استفاده شده است.

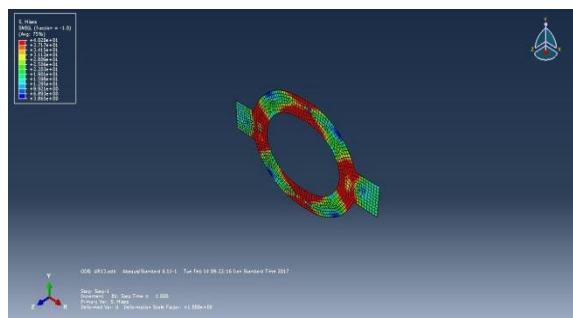
۲-۲- صحت‌سنجی مدل‌سازی حلقه پیشنهادی Maurya در ادامه حلقه‌ای که توسط Maurya (۲۰۱۲) برای شناخت و تأیید عملکرد منحصربه‌فرد آن تحت بار جانبی تحلیل شد، شبیه‌سازی می‌شود. در شکل (۶) مدل Maurya، شرایط مرزی، و محل اعمال جابه‌جایی جانبی به آن نشان داده شده است.



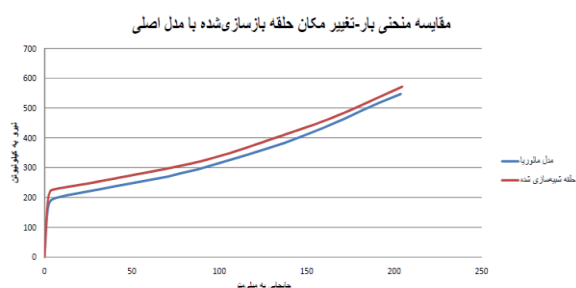
شکل ۶- حلقه مدل‌سازی شده توسط Maurya (۲۰۱۲)

برای استخراج منحنی پوش‌آور، به مدل ۱۰ اینچ (معادل ۲۵/۴ سانتی‌متر) جابه‌جایی اعمال شد اما، برای نشان دادن عملکرد هندسی حلقه و برابر بودن تقریبی افزایش طول حلقه در جهت جابه‌جایی اعمال‌شده با کاهش طول در جهت عمود بر آن، در همان محل، ۲ اینچ (معادل ۵/۰۸ سانتی‌متر) جابه‌جایی به آن داده شد. از فولاد A36 برای این حلقه استفاده شده است.

در شکل (۷)، این مدل بعد از اعمال ۵/۰۸ سانتی‌متر جابه‌جایی نشان داده شده است. در شکل (۸) نیز منحنی پوش‌آور به‌دست‌آمده توسط نویسندگان این مقاله و مدل Maurya مقایسه شده‌اند.

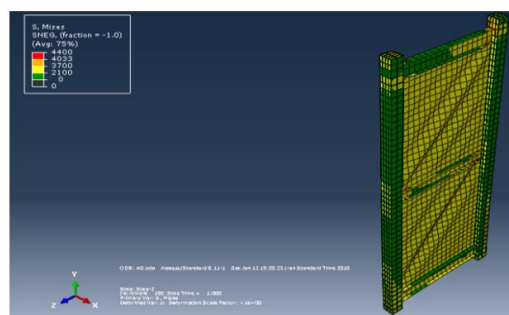


شکل ۷- مدل شبیه‌سازی شده بعد از اعمال ۵/۰۸ سانتی‌متر جابه‌جایی



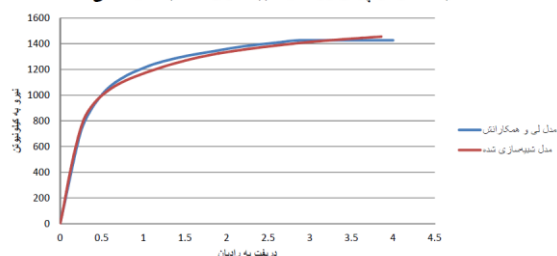
شکل ۸- منحنی بار- تغییر مکان حلقه بازسازی شده در مقایسه با منحنی مدل Maurya

چندانی روی نتایج حاصل از تحلیل ستون‌های فولادی پر شده با بتن ندارد و بنابراین می‌توان از تعداد المان کم‌تر، یعنی مش‌بندی درشت‌تر، برای تقسیم اعضای فولادی پر شده با بتن به المان‌های محدود در ماژول Mesh استفاده کرد. مطابق کار Li و همکارانش (۲۰۱۴) مدل در دو مرحله تحلیل می‌شود. تحلیل سازه به‌روش استاتیکی انجام شده است که در آن تغییر شکل‌های هندسی بزرگ نیز لحاظ شده است. شکل (۳) نمای مدل شبیه‌سازی شده از دیوار برشی فولادی Li و همکارانش (۲۰۱۴) توسط نویسندگان این مقاله در نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد. نمودار نشان داده شده در شکل (۴) نیز مطابقت خوب دیوار برشی فولادی مدل-سازی شده در نرم‌افزار آباکوس با نمونه آزمایش‌شده Li و همکارانش نشان داده شده است.



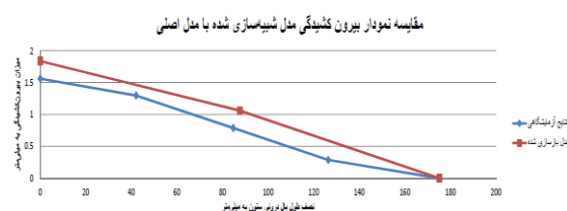
شکل ۳- نمای دوبعدی مدل بازسازی شده

مقایسه نمودار پوش‌آور مدل شبیه‌سازی شده با مدل اصلی

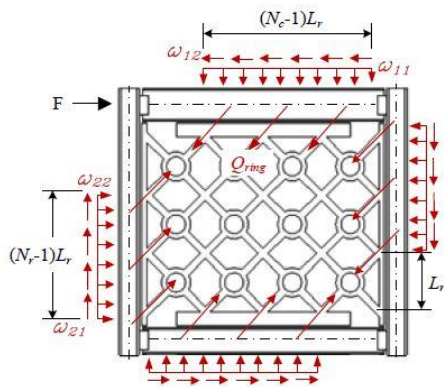


شکل ۴- مقایسه منحنی پوش‌آور مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس با نمونه آزمایش‌شده توسط Li و همکارانش

در شکل (۵) نمودار بیرون‌کشیدگی حاصل از مدل شبیه‌سازی شده در این تحقیق و مدل Li و همکارانش با یکدیگر مقایسه شده است.



شکل ۵- مقایسه نمودار بیرون‌کشیدگی مدل بازسازی شده با مدل Li و همکارانش



شکل ۹- نیروهای اعمالی از ورق جان حلقه‌ای به المان‌های مرزی (Phillips, ۲۰۱۵)

به این دلیل، مؤلفه‌های نیرویی المان‌های مرزی قائم باید به-
وسیله ضریب $N_r / (N_r - 1)$ افزایش یابند:

$$\omega_{22} = \frac{N_r}{N_r-1} C_{pr} R_y \frac{Q_{ring}}{L_r} \cos \alpha = \frac{N_r}{N_r-1} \omega_{11} \quad (3)$$

$$\omega_{21} = \frac{N_r}{N_r-1} C_{pr} R_y \frac{Q_{ring}}{L_r} \sin \alpha = \frac{N_r}{N_r-1} \omega_{12} \quad (4)$$

متغیر C_{pr} ، در چهار معادله بالا جهت در نظر گرفتن مقاومت حداکثر مصالح شامل سخت‌شدگی کرنشی اعمال شده است. این متغیر را می‌توان به عنوان تابعی از تنش تسلیم مصالح، F_y و تنش نهایی آن، F_u ، محاسبه کرد. این رابطه توسط مقررات لرزه‌ای AISC341 ارائه شده است. ضریب R_y ، نسبت تنش تسلیم قابل-انتظار به تنش تسلیم حداقل تعیین شده می‌باشد. این نسبت نیز توسط AISC341 تعریف شده است.

$$C_{pr} = \frac{F_y + F_u}{2F_y} \leq 1.2 \quad (5)$$

۳- ارائه مدل اصلی و روابط مربوط به آن

با توجه به مطالب اشاره شده در خصوص ورق‌های حلقه‌ای، ورق جان نمونه‌ها طراحی می‌شود. مطالعات انجام شده در این تحقیق در دو حوزه اصلی زیر متمرکز می‌شود:
(۱) وضعیت تسلیم المان مرزی قائم در جابه‌جایی معادل ۲/۵٪ دریافت قاب.

(۲) میزان بیرون کشیدگی در میانه بال درونی ستون مرزی طبقه دوم در جابه‌جایی معادل ۲/۵٪ دریافت قاب.
از این‌رو، ابتدا روابط DCR در دیوار برشی حلقه‌ای ارائه می‌شود، سپس مطالعات هدف در دو حوزه اشاره شده دنبال خواهد شد.

۳-۱- روابط DCR در دیوار برشی حلقه‌ای

پارامتر مهم در طراحی ظرفیت المان‌های مرزی قائم، نسبت لنگر خمشی تقاضا به ظرفیت خمشی، DCR می‌باشد. این نسبت‌ها

۳-۲- مقدمات طرح ورق جان حلقه‌ای

مسئله مهم در طراحی ورق جان دیوارهای برشی حلقه‌ای، انتخاب ابعاد و پارامترهای هندسی شامل ضخامت ورق (t_w)، شعاع بیرونی حلقه (R_o)، عرض حلقه (w_c)، عرض پیوند (w_l)، نسبت شعاع بیرونی به عرض حلقه‌ها (R_o/w_c)، نسبت شعاع بیرونی به عرض پیوندها (R_o/w_l) می‌باشد. رفتار دیوار برشی حلقه‌ای بستگی بسیار زیادی به این پارامترهای دارد.
نسبت R_o/w_c ضریب تناسب حلقه نامیده می‌شود. روی رفتار چرخه‌ای دیوار برشی اثر می‌گذارد. Maurya نشان داده است که اگر این نسبت بین ۲/۵ و ۳/۳۳ محدود شود، رفتار چرخه‌ای کامل‌تر و نسبت استهلاک انرژی بیشتر خواهد شد. نسبت R_o/w_l تأثیر روی رفتار سیستم، چندان چشمگیر نیست و محدود کردن آن به عدد ۳ مناسب می‌باشد.

۳-۲-۴- محاسبه نیروی وارد بر المان‌های مرزی از طرف ورق جان حلقه‌ای

وقتی ورق جان یک دیوار برشی حلقه‌ای در برش تسلیم می‌شود، در سرتاسر پیوندهای بین حلقه‌ها نیروهای کششی قطری تشکیل می‌شود که مشابه عمل میدان کششی در ورق جان یکپارچه است. نیروی قطری اعمالی به المان‌های مرزی توسط ورق جان را می‌توان به دو مؤلفه افقی و قائم تفکیک کرد که در شکل (۹) نشان داده شده است. کشش درونی گسترده که به‌وسیله w_{HBE} و w_{VBE} نشان داده می‌شود، باعث ایجاد نیروی محوری، نیروی برشی، و لنگر خمشی در اعضای مرزی می‌گردد. اگر این نیروهای گسترده و طولی که آن‌ها بر آن اثر می‌کنند معلوم باشد، دیگرام نیروی برشی، نیروی محوری، و لنگر خمشی المان‌های مرزی قائم و افقی قابل محاسبه است. توزیع نیروی المان‌های مرزی با استفاده از متغیرهای هندسی دیوار برشی فولادی حلقه‌ای تعریف می‌گردند. نیروی فروریزش یک حلقه منفرد در قطر کششی، Q_{ring} ، به‌وسیله رابطه (۱) قابل محاسبه است (Eatherton, ۲۰۱۸):

$$Q_{ring} = \frac{4M_p}{R_c - C_{PH}} \quad (1)$$

M_p ، لنگر پلاستیک مقطع حلقه در محل هر حلقه است که از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$M_p = F_y \left(\frac{w_c t}{4} \right) \quad (2)$$

t ، ضخامت ورق، و F_y ، تنش تسلیم مصالح است.

مؤلفه‌های نیروی توزیع شده روی المان مرزی قائم، با استفاده از روابط (۳) و (۴) به‌دست می‌آیند. تعداد حلقه‌هایی که به المان مرزی قائم نیرو اعمال می‌کنند برابر تعداد سطرهای حلقه‌ها، N_r ، است. اما نیروها در فاصله‌ای به‌اندازه $(N_r - 1)$ اعمال می‌شوند.

$$M_{d-UY}^{ring} = \frac{\omega_{22}B}{8} \quad (۸)$$

لنگر تقاضای بال درونی در ارتفاع واحد ستون در حالت حدی سخت‌شدگی هدف برای ورق جان حلقه‌ای از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$M_{d-HD}^{ring} = \frac{\Omega_p \omega_{22} B}{8} \quad (۹)$$

بعلاوه، می‌توان بیرون‌کشیدگی بال درونی ستون را در هر دو حالت محاسبه کرد که همان خیز تیر دوسرگردار می‌باشد. بیرون‌کشیدگی بال در حالت حدی UY در اثر نیروی حاصل از میدان کششی ورق جان حلقه‌ای برابر با:

$$\Delta_{UY}^{ring} = \frac{\omega_{22}}{48EI} [-4X^3 + 3BX^2] \quad (۱۰)$$

می‌باشد. و این میزان در حالت حدی HD برابر است با:

$$\Delta_{HD}^{ring} = \Omega_p \frac{\omega_{22}}{48EI} [-4X^3 + 3BX^2] \quad (۱۱)$$

B ، دهانه تیر است که از مرکز به مرکز مقطع دو جان ستون محاسبه می‌شود و X ، فاصله از مرکز مقطع جان می‌باشد.

ذکر شد که DCR نسبت لنگر تقاضا به ظرفیت خمشی می‌باشد. این نسبت‌ها برای هر دو وضعیت UY و HD تعریف و محاسبه می‌شوند. از طریق روابط (۸) و (۹) صورت کسر یعنی لنگرهای تقاضای ناشی از میدان کششی ورق جان تسلیم‌شده به دست می‌آید. مخرج کسر یا ظرفیت خمشی بر اساس حالات حدی زیر به دست می‌آید:

تسلیم حداقل یا تسلیم سطح بال درونی ستون که لنگر متناظر با آن لنگر حداقل، M_Y ، و تسلیم حداکثر یا تسلیم کامل در کل ضخامت بال درونی ستون که لنگر متناظر با آن لنگر حداکثر یا لنگر پلاستیک، M_P ، است. لنگر حداقل یا لنگر در شروع تسلیم از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$M_Y = \frac{l}{c} \sigma_y \quad (۱۲)$$

l ، ممان اینرسی مقطع، و C ، فاصله تار بالایی با تار خنثی می‌باشد. برای مقطع مستطیلی داریم:

$$\frac{l}{c} = \frac{b(2c)^3}{12C} = \frac{2}{3} bC^2 \quad (۱۳)$$

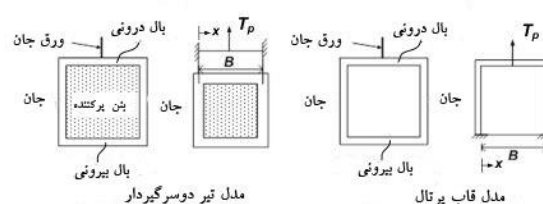
لذا M_Y برابر است با:

$$M_Y = \frac{2}{3} bC^2 \sigma_y \quad (۱۴)$$

لنگر حداکثر یا لنگر پلاستیک مقطع مستطیلی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$M_P = \frac{3}{2} M_Y \quad (۱۵)$$

برای حالات حدی تسلیم یکپارچه، UY و سخت‌شدگی هدف، HD ، طراحی و محاسبه می‌شوند. حضور بتن در ستون‌های پرشده با آن، تغییر شکل دورانی در دو کنج بین بال درونی و جان‌ها را مقید می‌کند. بر این اساس، از مدل تیر دوسرگردار برای بیان آن استفاده شد. اما در ستون‌های قوطی‌شکل خالی، تحت عمل بیرون‌کشیدگی این کنج‌ها تا حدی دارای انعطاف‌پذیری خمشی می‌باشند؛ از این‌سو، برای مدل‌سازی آن، قاب پرتال الگو قرار گرفت. در شکل (۱۰) این مدل‌ها نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۰- مدل‌های محاسباتی برای تعیین میزان بیرون‌کشیدگی بال درونی ستون و اثر آن روی این مقطع (Li و همکاران، ۲۰۱۳)

در مطالعه فعلی، از ستون قوطی‌شکل فولادی پرشده با بتن با ضخامت معمولی استفاده شده است. برای به دست آوردن DCR ، باید بر اساس مدل تحلیلی تیر دوسرگردار، لنگر تقاضا به طول واحد بال درونی ستون، ناشی از نیروی عمل میدان کششی برای حالات حدی UY و HD محاسبه شود. برای این منظور، مقطعی از ستون به طول واحد مطابق شکل (۱۰) در نظر گرفته می‌شود. همان‌طور که گفته شد بال درونی این مقطع را می‌توان همچون یک تیر دوسرگردار با سطح مقطع مستطیلی در نظر گرفت که تحت بار متمرکز عرضی ناشی از نیروی میدان کششی ورق جان در وسط دهانه‌اش قرار دارد. این نیرو را در حالت حدی تسلیم یکپارچه می‌توان به صورت زیر تعیین کرد:

$$T_P^{ring} = \omega_{ch} * (\text{ارتفاع واحد}) \quad (۶)$$

در حالت حدی سخت‌شدگی هدف، این نیرو از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$T_P^{ring} = \Omega_p \omega_{ch} * (\text{ارتفاع واحد}) \quad (۷)$$

Ω_p ضریبی است که اثر سخت‌شدگی کرنشی ورق جان را در وضعیت HD مشخص می‌کند. حال با توجه به روابط تیر دوسرگردار می‌توان لنگرهای تقاضا را محاسبه کرد. لنگر تقاضای بال درونی در ارتفاع واحد ستون در حالت حدی تسلیم یکپارچه برابر است با:

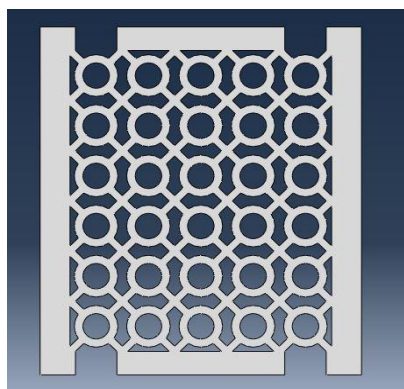
برای بررسی کامل‌تر، از هرکدام از ضخامت‌های انتخابی پانل‌های حلقه‌ای، یک پانل یکپارچه نیز مدل‌سازی گردید. شمای کلی پانل حلقه‌ای در شکل (۱۱) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که پانل مورد استفاده در کار تحقیقاتی Maurya با فولاد A36 ساخته و مدل‌سازی شده بود. در این مطالعه از فولاد LYS210 برای مدل‌سازی پانل استفاده شد. منحنی رفتاری فولاد ورق جان، فولاد المان‌های مرزی و بتن محصور شده استفاده شده در این مطالعه به ترتیب در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده است. همان‌طور که در قسمت (۱-۲) گفته شد قبل از اعمال جابه‌جایی جانبی، به ستون‌های طبقه دوم بارهای ثقلی اعمال می‌شود. این بار، معادل 0.3 ظرفیت محوری المان‌های مرزی قائم در نظر گرفته شده است. ظرفیت محوری ستون‌های قوطی‌شکل فولادی پر شده با بتن از طریق یوروکد (Eurocode4، ۱۹۹۴) با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P_u = A_c f_c + A_s f_s \quad (20)$$

در رابطه فوق، A_c و A_s ، به ترتیب سطح مقطع بتن و فولاد می‌باشند. f_c ، مقاومت فشاری بتن، و f_s ، تنش تسلیم فولاد می‌باشد. در روند مدل‌سازی و تحلیل از تکنیک‌هایی که اعتبار آن‌ها در قسمت صحت‌سنجی بررسی شده، استفاده می‌گردد.

جدول ۲- ضخامت نمونه‌ها

نام مدل	نوع پانل	ضخامت (cm)
A0	یکپارچه	۰/۲۶
A1	حلقه‌ای	۱/۵۸۷۵
AS1	یکپارچه	۱/۵۸۷۵
A2	حلقه‌ای	۱/۲۷
AS2	یکپارچه	۱/۲۷
A3	حلقه‌ای	۰/۷۹۳۷۵
AS3	یکپارچه	۰/۷۹۳۷۵
A4	حلقه‌ای	۰/۶۳۵
AS4	یکپارچه	۰/۶۳۵



شکل ۱۱- شمای کلی ورق جان نمونه‌ها

بدین ترتیب، برای مقصود کنترل طراحی، چهار نسبت تقاضا به ظرفیت یا همان DCR به صورت زیر تعریف می‌گردد:

در حالت حدی UY و برای تسلیم‌شدگی حداقل، داریم:

$$DCR_{y-UY}^{ring} = \frac{M_{d-UY}^{ring}}{M_y} \quad (16)$$

در حالت حدی UY و برای تسلیم‌شدگی حداکثر، نسبت تقاضا به ظرفیت برابر است با:

$$DCR_{p-UY}^{ring} = \frac{M_{d-UY}^{ring}}{M_p} \quad (17)$$

از روابط (۱۸) و (۱۹) برای محاسبه DCR در حالت حدی سخت‌شدگی هدف و به ترتیب برای تسلیم‌شدگی حداقل و حداکثر استفاده می‌شود:

$$DCR_{y-HD}^{ring} = \frac{M_{d-HD}^{ring}}{M_y} \quad (18)$$

$$DCR_{p-HD}^{ring} = \frac{M_{d-HD}^{ring}}{M_p} \quad (19)$$

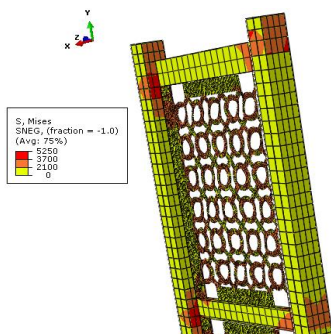
این نسبت‌ها به این طریق مورد استفاده قرار می‌گیرند که اگر در یک حالت حدی، این نسبت از مقدار واحد بیشتر گردد، تسلیم متناظر با آن رخ خواهد و بالعکس؛ اگر این نسبت از عدد ۱، کم‌تر باشد، تسلیم متناظر با آن رخ نمی‌دهد. برای مثال اگر $DCR_{y-HD} > 1$ باشد، در تراز دریافت متناظر با حالت حدی سخت‌شدگی کرنشی، تسلیم حداقل رخ خواهد داد.

۲-۳- مدل‌سازی

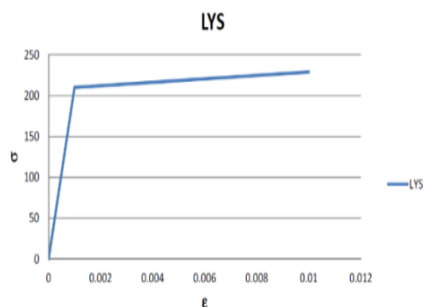
در بخش (۲-۳) محدوده‌های مجاز برای طرح بهینه دیوار برشی فولادی حلقه‌ای ارائه شده است. بر اساس این محدوده‌ها، اندازه‌های نشان‌داده شده در جدول (۱) برای مدل‌سازی دیوار برشی پیشنهادی در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که ابعاد کلی پانل، مشابه پانل مورد استفاده در آزمایش و آنالیز Li و همکارانش می‌باشد. در این مطالعه از چهار ورق جان استفاده شده است و تنها پارامتر متغیر، ضخامت ورق جان می‌باشد؛ چراکه با توجه به تعاریف صورت گرفته در بخش (۲-۳) برای طرح بهینه ورق‌های حلقه‌ای، سایر پارامترها در محدوده‌های تعریف شده در راستای طراحی بهینه می‌باشند. ضخامت نمونه‌های مورد مطالعه در جدول (۲) آمده است.

جدول ۱- ابعاد هندسی ثابت نمونه‌ها

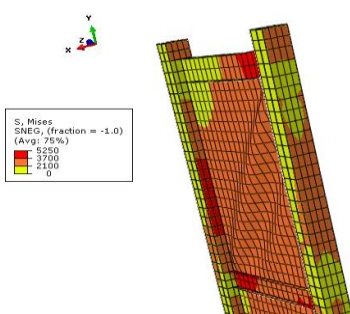
عرض پانل (cm)	ضخامت پانل (cm)	شعاع بیرونی حلقه‌ها (cm)	عرض حلقه‌ها (cm)	عرض پیوندهای بین حلقه‌ها (cm)	فاصله مرکز به مرکز بین حلقه‌ها (cm)
۳۰۷	۳۴۷	۲۰/۸	۸	۷/۳۵	۵۰



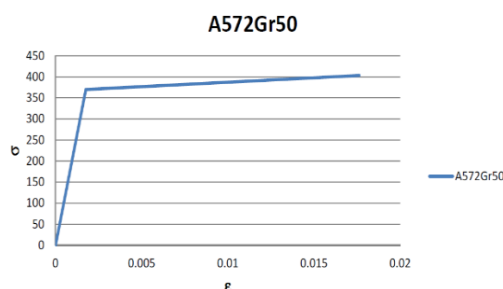
شکل ۱۵- وضعیت تنش در المان مرزی عمودی سمت چپ طبقه دوم برای نمونه A4



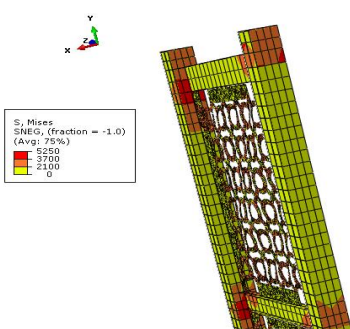
شکل ۱۲- منحنی رفتاری فولاد با تنش تسلیم پایین استفاده شده برای ورق جان (مگاپاسکال)



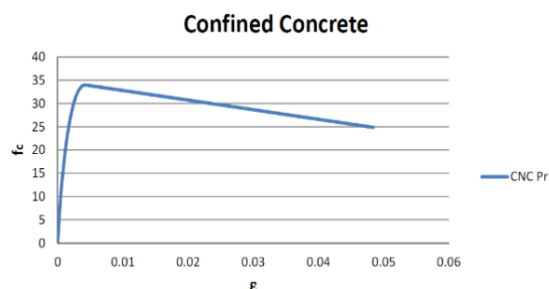
شکل ۱۶- وضعیت تنش در المان مرزی عمودی سمت چپ طبقه دوم برای نمونه AS4



شکل ۱۳- منحنی رفتاری فولاد استفاده شده برای قاب مرزی (مگاپاسکال)



شکل ۱۷- وضعیت تنش در المان مرزی عمودی سمت چپ طبقه دوم برای نمونه A3

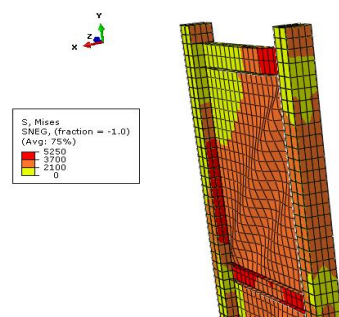


شکل ۱۴- منحنی رفتاری بتن محصور شده (مگاپاسکال)

۴- نتایج و بحث

۴-۱- عملکرد المان‌های مرزی

پس از تحلیل پوش‌آور نمونه‌ها توسط نرم‌افزار آباکوس (Dassault, ۲۰۱۳) تسلیم المان‌های مرزی مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور معیار تسلیم فون‌مایزس^۹ استخراج گردید (شکل‌های (۱۵) تا (۲۲)). براساس کانتور تنش ارائه شده در این شکل‌ها که براساس تنش تسلیم فولاد ورق جان، و فولاد قاب مرزی تنظیم شده است؛ رنگ نارنجی نشان‌دهنده نواحی تسلیم شده در ورق جان، و رنگ قرمز نشان‌دهنده نواحی تسلیم شده در المان‌های مرزی می‌باشد. این شکل‌ها وضعیت مدل پیشنهادی را پس از اعمال جابه‌جایی معادل ۲/۵٪ دریفت قاب نشان می‌دهد.



شکل ۱۸- وضعیت تنش در المان مرزی عمودی سمت چپ طبقه دوم برای نمونه AS3

ملاحظه می‌شود که استفاده از ورق جان حلقه‌ای تسلیم ناحیه میانی المان مرزی قائم سمت چپ طبقه دوم را برای تمام قاب‌ها از بین برده است. اما این ناحیه در نمونه‌های پر شده با ورق جان یکپارچه به جز نمونه AS1 که ضخیم‌ترین نمونه بود، تسلیم شده است. با توجه به شکل (۲۲) این امر به علت مساحت قابل توجه تسلیم نشده در ورق جان این نمونه می‌باشد. در نمونه AS2 نیز که سطح کم‌تری از نمونه‌های نازک‌تر تسلیم شده است، ناحیه تسلیم در المان مرزی قائم سمت چپ کوچک شده است.

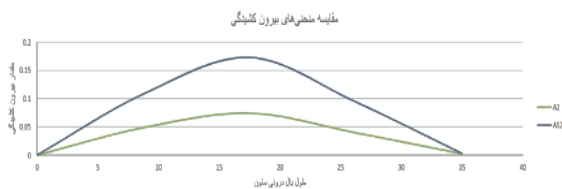
۴-۲- میزان بیرون کشیدگی بال درونی ستون

میزان بیرون کشیدگی بال درونی در وسط المان مرزی سمت چپ طبقه دوم محاسبه شده است. بعد از اعمال جابه‌جایی معادل دریفیت ۲/۵٪ رادیان، این مقادیر از طریق محاسبه جابه‌جایی گرہ‌ها در مدل المان محدود تغییر شکل یافته به دست آمده است. میزان بیرون کشیدگی نمونه‌های یکپارچه نازک‌تر بیش از این میزان برای نمونه‌های ضخیم‌تر بوده است که این امر با توجه به عدم تسلیم کامل نمونه‌های ضخیم قابل توجیه می‌باشد. مقایسه نتایج بیرون کشیدگی نمونه‌های حلقه شکل با نمونه‌های یکپارچه با ضخامت‌های مشابه در شکل‌های (۲۳-۲۴) ارائه شده است.



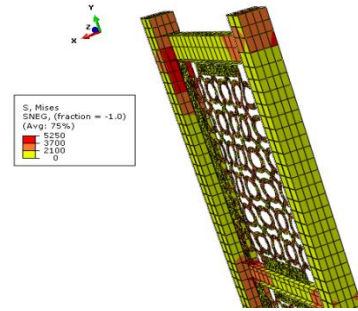
شکل ۲۳- مقایسه منحنی بیرون کشیدگی مدل A1 با مدل AS1 (سانتی‌متر)

ملاحظه می‌شود که استفاده از ورق جان حلقه‌ای میزان بیرون کشیدگی را برای نمونه با ضخامت ۱۲/۷ میلی‌متر، از ۳/۱ میلی‌متر به ۰/۷ میلی‌متر کاهش داده است.

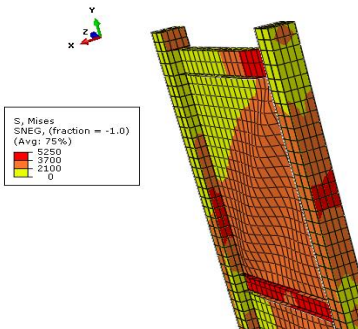


شکل ۲۴- مقایسه منحنی بیرون کشیدگی مدل A2 با مدل AS2 (سانتی‌متر)

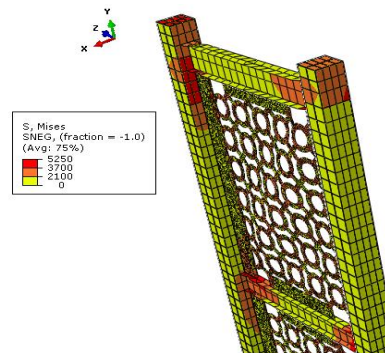
با توجه به شکل (۲۴) استفاده از ورق جان حلقه‌ای میزان بیرون کشیدگی را برای نمونه با ضخامت ۱۵/۸۷۵ میلی‌متر، از ۱/۷ میلی‌متر به ۰/۷۴ میلی‌متر کاهش داده است.



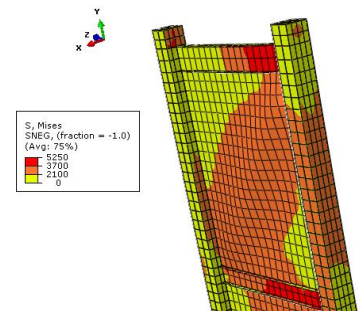
شکل ۱۹- وضعیت تنش در المان مرزی عمودی سمت چپ طبقه دوم برای نمونه A2



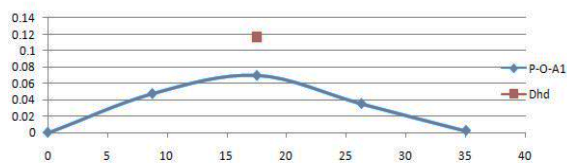
شکل ۲۰- وضعیت تنش در المان مرزی عمودی سمت چپ طبقه دوم برای نمونه AS2



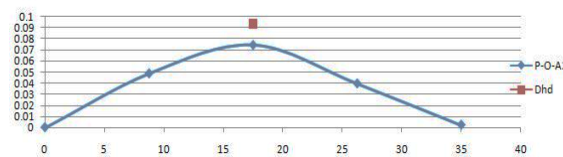
شکل ۲۱- وضعیت تنش در المان مرزی عمودی سمت چپ طبقه دوم برای نمونه A1



شکل ۲۲- وضعیت تنش در المان مرزی عمودی سمت چپ طبقه دوم برای نمونه AS1

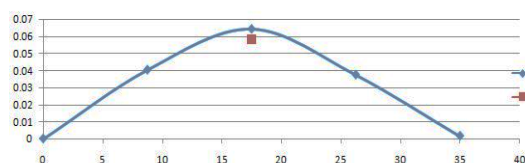


شکل ۲۷- مقایسه محاسبات عددی با مدل‌سازی المان محدود از حیث بیرون کشیدگی برای نمونه A1 (اعداد به سانتی‌متر)

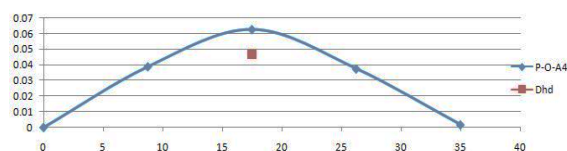


شکل ۲۸- مقایسه محاسبات عددی با مدل‌سازی المان محدود از حیث بیرون کشیدگی برای نمونه A2 (اعداد به سانتی‌متر)

اختلاف این مقادیر برای نمونه A1، ۶۶ درصد، و برای نمونه A2، ۲۶ درصد می‌باشد. با توجه به شکل‌های (۲۷) و (۲۸) ملاحظه می‌شود که محاسبات تحلیلی پاسخ محافظه‌کارانه‌ای به‌دست داده است. چالش برانگیزترین نتیجه به‌دست آمده مربوط به این زمینه می‌باشد. با توجه به شکل‌های (۲۹) و (۳۰) اختلاف مقادیر به‌دست آمده از روابط تحلیلی با مقادیر به‌دست آمده از نرم‌افزار برای نمونه A3، ۹ درصد، و برای نمونه A4، ۲۴ درصد می‌باشد.

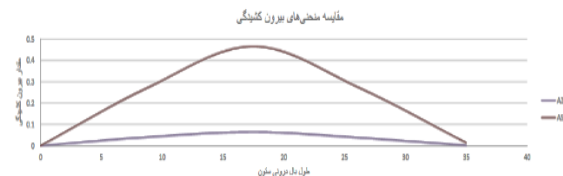


شکل ۲۹- مقایسه محاسبات عددی با مدل‌سازی المان محدود از حیث بیرون کشیدگی برای نمونه A3 (اعداد به سانتی‌متر)



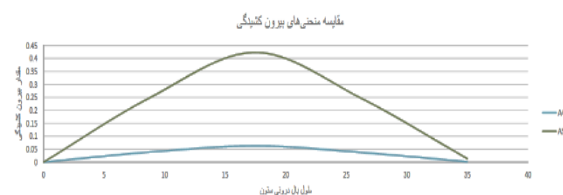
شکل ۳۰- مقایسه محاسبات عددی با مدل‌سازی المان محدود از حیث بیرون کشیدگی برای نمونه A4 (اعداد به سانتی‌متر)

ملاحظه می‌شود که استفاده از رابطه تیر دوسر گیردار در محاسبات عددی برای مدل‌های ضخیم، محافظه‌کارانه و برای



شکل ۲۵- مقایسه منحنی بیرون کشیدگی مدل A3 با مدل A33 (سانتی‌متر)

ملاحظه می‌شود که استفاده از ورق جان حلقه‌ای میزان بیرون کشیدگی را برای نمونه با ضخامت ۷/۹۳۷۵ میلی‌متر، از ۴/۷ میلی‌متر به ۰/۶۵ میلی‌متر کاهش داده است.



شکل ۲۶- مقایسه منحنی بیرون کشیدگی مدل A4 با مدل A44 (سانتی‌متر)

با توجه به شکل (۲۶) ملاحظه می‌شود که استفاده از ورق جان حلقه‌ای میزان بیرون کشیدگی را برای نمونه با ضخامت ۶/۳۵ میلی‌متر، از ۴/۲ میلی‌متر به ۰/۶۳ میلی‌متر کاهش داده است. میزان بیرون کشیدگی تمام نمونه‌ها به‌وسیله مدل‌سازی المان محدود به‌دست آمد. همان‌طور که انتظار می‌رفت، رفتار کمانشی بسیار مناسب پانل‌های حلقه‌ای میزان بیرون کشیدگی در المان مرزی قائم در دیوارهای برشی پر شده با این نوع پانل‌ها را بسیار کاهش داده است. جهت مقایسه نقش هندسه انتخابی در کاهش میزان بیرون کشیدگی بال درونی ستون، می‌توان به این نکته اشاره کرد که میزان خیز حداکثر بال درونی ستون در دیوار برشی پر شده با پانل یکپارچه یک‌دهم اینچی (نمونه A0)، ۲/۵ برابر میزان محاسبه‌شده برای دیوار برشی پر شده با پانل حلقه‌ای نیم اینچی (نمونه A2 با ضخامت ۵ برابر) بوده است.

۳-۴- مقایسه میزان بیرون کشیدگی به‌دست آمده توسط مدل‌سازی المان محدود با میزان به‌دست آمده از محاسبات تحلیلی

با استفاده از مدل تیر دوسرگیردار که برای محاسبه DCR و بیرون کشیدگی بال درونی ستون ارائه شده است، میزان خیز حداکثر این تیر دوسرگیردار که همان بال درونی ستون می‌باشد محاسبه و با نمودار به‌دست آمده از نرم‌افزار آباکوس مقایسه شده است. تصاویر (۲۷-۳۰)، نتایج این مقایسه‌ها را به‌ترتیب برای نمونه‌های A1 تا A4 نشان می‌دهند. این مقادیر در جدول (۳) نیز نشان داده شده است.

در اثر نیروی حاصل از میدان کششی ورق جان، از جمله مشکلات طرح مناسب دیوارهای برشی مرسوم است. در این مقاله، برای حل مشکلات یادشده از ورق جان حلقه‌ای با چهار ضخامت متفاوت به جای ورق یکپارچه برای پرکردن قاب مرزی استفاده شده است. ورق جان حلقه‌ای با بهره‌گیری از ویژگی هندسی حلقه دارای عملکرد کمانشی مناسبی می‌باشد. با توجه به مطالعات نویسندگان این مقاله، استفاده از این نوع ورق جان نیروی پیش‌کشیدگی اعمالی به المان مرزی قائم را کاهش می‌دهد. المان مرزی قائم در دیوار برشی فولادی پیشنهادی از نوع قوطی فولادی پر شده با بتن می‌باشد. این نوع المان ویژگی‌های مناسبی برای کاربرد در نواحی با لرزه‌خیزی بالا داشته و استفاده از آن به‌عنوان المان مرزی قائم از دید نویسندگان مناسب می‌باشد.

در این مقاله پیش‌کشیدگی بال درونی المان مرزی قائم طبقه دوم، و تسلیم ضخامت آن؛ مطالعه شده است. پس از مدل‌سازی نمونه‌ها در نرم‌افزار آباکوس و آنالیز آن‌ها، میزان بیرون‌کشیدگی بال درونی المان مرزی قائم سمت چپ محاسبه شده است. جهت مشاهده و مطالعه نواحی تسلیم‌شده، از کانتور تنش بر اساس معیار تنش فون‌مایزس استفاده شده است. روابط محاسباتی جهت محاسبه حداکثر میزان بیرون‌کشیدگی بال درونی ستون ارائه شده و نتایج به‌دست‌آمده از این روابط با نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز آباکوس مقایسه شده است. روابطی نیز برای محاسبه ضرایب لنگر تقاضا به لنگر ظرفیت برای المان مرزی قائم به‌عنوان پارامتری مهم در طراحی ظرفیت آن ارائه شده است. در این راستا پیش‌کشیدگی بال درونی ستون طبقه دوم و تسلیم ضخامت آن، مطالعه شد که نتایج آن به صورت زیر می‌باشد:

- ۱- استفاده از ورق جان حلقه‌ای تسلیم ناحیه میانی المان مرزی قائم سمت چپ طبقه دوم را به‌طور کامل از بین برد.
- ۲- میزان بیرون‌کشیدگی در نمونه‌های پر شده با ورق جان حلقه‌ای به طور محسوسی کاهش داشته است.
- ۳- ضرایب بار به ظرفیت تعریف شده برای دیوارهای برشی فولادی پر شده با ورق جان حلقه‌ای در هیچ‌کدام از حالات حدی از عدد ۱ فراتر نرفته است. این واقعیت نشان‌دهنده عدم وقوع تسلیم در کل ضخامت بال درونی ستون و سطح آن می‌باشد.

۶- مراجع

- AISC341-10, "Seismic provisions for structural steel buildings", American Institute of Steel Construction, 2005.
- Berman J, Bruneau M, "Plastic analysis and design of steel plate shear walls", Journal of Structural Engineering, 2003, 129 (11), 1448-1456.
- Berman JW, Bruneau M, "Experimental Investigation of Light-Gauge Shear Walls for Seismic Retrofit of Buildings", Technical Report MCEER-03-00001, University of Buffalo, 2003.
- Dassault, Abaqus version 6.13 Documentation, 2013.
- Egorova N, "Experimental study of ring-shaped steel

مدل‌های نازک، سهل‌انگارانه می‌باشد؛ چراکه در دو نمونه ضخیم A1 و A2، مقدار خیز حداکثر بال درونی ستون، بیشتر از مقدار به‌دست‌آمده از نرم‌افزار آباکوس بوده است و بالعکس، این مقدار در دو نمونه نازک A3 و A4، کم‌تر از مقدار به‌دست‌آمده از نرم‌افزار آباکوس بوده است. این رابطه برای نمونه A3 نتیجه قابل‌اعتمادی به‌دست داده است و این امر نشان‌دهنده لزوم تعیین یک محدوده معتبر برای این نمودار می‌باشد.

جدول ۳- مقایسه میزان بیرون‌کشیدگی به‌دست‌آمده از آنالیز

نمونه	میزان بیرون‌کشیدگی	
	تحلیلی (cm)	آنالیز المان محدود (cm)
A1	۰/۱۱۶۸	۰/۰۷۰۰
A2	۰/۰۹۳۴	۰/۰۷۴۱
A3	۰/۰۵۸۴	۰/۰۶۴۵
A4	۰/۰۴۶۷	۰/۰۶۲۷

۴-۴- بیان و مقایسه ضرایب بار به ظرفیت

جدول (۴) ضرایب بار خمشی به ظرفیت خمشی را برای تمام نمونه‌ها نشان می‌دهد. نمونه A0 مقادیر ارائه‌شده توسط Li و همکارانش را نشان می‌دهد.

جدول ۴- ضرایب بار به ظرفیت نمونه‌ها

مدل	DCR_{p-HD}	DCR_{y-HD}	DCR_{p-U7}	DCR_{y-U7}
A0	۰/۷۹	۱/۱۸	۰/۷۲	۱/۰۸
A1	۰/۶۵	۰/۹۷	۰/۵۹	۰/۸۸
A2	۰/۵۲	۰/۷۷	۰/۴۷	۰/۷۰
A3	۰/۳۲	۰/۴۸	۰/۲۹	۰/۴۴
A4	۰/۲۵	۰/۳۸	۰/۲۳	۰/۳۵
AS1	۵/۲۵	۷/۸۸	۴/۷۸	۷/۱۷
AS2	۴/۲۰	۶/۳۱	۳/۸۲	۵/۷۳
AS3	۲/۶۳	۳/۹۴	۲/۳۹	۳/۵۸
AS4	۲/۱۰	۳/۱۵	۱/۹۱	۲/۸۷

همان‌طور که ملاحظه می‌شود در هیچ‌یک از نمونه‌های ایجادشده با پانل حلقه‌شکل و در هیچ‌کدام از حالات حدی، ضرایب لنگر خمشی به ظرفیت خمشی از عدد ۱ تجاوز نمی‌کند و این، نشان‌دهنده این حقیقت است که نه در عمق ضخامت بال درونی ستون مرزی، و نه حتی بر روی سطح آن تسلیم رخ نمی‌دهد. اما در نمونه‌های یکپارچه، با ضخامت مشابه، تسلیم حداقل و حداکثر در تمام حالات حدی و رخ می‌دهد.

۵- خلاصه و تحلیل نتایج

کمانش زود هنگام ورق جان و پیش‌کشیدگی المان مرزی قائم

- bottom vertical boundary elements in steel plate shear walls", Part 1: Design methodology, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2014, 43 2237-2259.
- Wu MH, "Numerical analysis of concrete filled steel tubes subjected to axial force", M.S. thesis, Dept. of Civil Engineering, National Cheng Keng University, Tainan, Taiwan. R.O.C., 2000.
- plate shear walls", M.S. Thesis, Virginia Tech, Blacksburg, VA, 2013.
- Egorova N, Eatherton MR, Maurya A, "Experimental study of ring-shaped steel plate shear walls", *Journal of Constructional Steel Research*, 2014, 103, 179-189.
- Eurocode 4, "Design of composite steel and concrete structures", Part 1.1, General Rules and Rules for Building, DD ENV, 1994.
- Jamshidi M, Majid TA, Bunnori NM, "Seismic behavior of slab-on-girder steel bridge equipped with ductile steel infill plate end diaphragms", *International Journal of Steel Structures*, 2015, 15 (2) 459-472.
- Koppal M, "Computational investigation of tunable steel plate shear walls for improved seismic resistance", M.S. Thesis, Virginia Tech, Blacksburg, VA, 2012.
- Li CH, Tsai KC, Huang HY, Tsai CY, Lin CH, "Experimental investigations on steel plate shear walls using box columns with or without infill concrete", *Proceeding of the 10th National Conference in Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Institute, Anchorage, AK*, 2014.
- Li CH, Tsai KC, "Experiment response of four 2-story narrow steel plate shear walls", *Structures Congress 2008, ASCE 2008*.
- Lin CH, Tsai KC, Qu B, Bruneau M, "Sub-structural pseudo-dynamic performance of two full-scale two-story steel plate shear walls", *Journal of Constructional Steel Research*, 2010, 66 (12), 1467-1482.
- Maurya A, "Computational simulation and analytical development of buckling resistant steel plate shear wall (BR-SPSW)", M.S. thesis, Virginia Tech, Blacksburg, VA, 2012.
- Phillips A, "Large-scale cyclic testing and development of ring shaped steel plate shear walls for improved seismic performance of buildings", Ph.D. Dissertation, Virginia Tech, Blacksburg, VA, 2016.
- Phillips AR, Eatherton MR, "Computational study of elastic and inelastic ring shaped steel plate shear wall behavior", *Engineering Structures*, 2018, 177, 655-677.
- Phillips AR, Eatherton MR, "Large-scale experimental study of ring shaped steel plate shear walls", *Journal of Structural Engineering ASCE*, 2018, 144 (8), 04018106.
- Purba R, Bruneau M, "Design recommendation for perforated steel plate shear walls", *Technical Report MCEER-07-0011, University of Buffalo*, 2007.
- Qu B, Bruneau M, Lin CH, Tsai KC, "Testing of full scale two-story steel plate shear wall with reduced beam sections connections and composite floors", *Journal of Structural Engineering, ASCE*; 2008, 134 (3), 364-373.
- Que B, Bruneau M, Lin C, Tsai K, "Experimental investigation of full-scale two-story steel plate shear walls with reduced beam section connections", *Technical Report MCEER-08-0010, University of Buffalo*, 2008.
- Sabelli R, Bruneau M, "Design Guide 20: Steel plate shear walls", *American Institute of Steel Construction*, 2006.
- Tsai KC, Li CH, "Cyclic tests of four two-story narrow steel plate shear walls", Part 1: analytical studies and specimen design, *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2009, 39, 775-799.
- Tsai K, Li C, Lee H, "Seismic design and testing of the

EXTENDED ABSTRACT

Numerical Investigation of Ring Shaped Steel Plate Shear Walls with Concrete Filled Steel Box Column as a Vertical Boundary Element

Morteza Jamshidi^{*}, Ali Ghasempour

Faculty of Engineering Department, Islamic Azad University- Chalous Branch, Chalous, Iran

Received: 13 April 2018; Accepted: 21 May 2020

Keywords:

Steel Plate Shear Wall (SPSW), Vertical Boundary Element (VBE), Ring Shaped Web Plate, Concrete Filled Tube (CFT) Column, Pull Out Deformation.

1. Introduction

SPSW consists of a thin steel plate as a web plate surrounded by vertical and horizontal boundary elements. Due to transverse loading, the web plate resists lateral forces by developing a tension field action. The development of tension field action applies heavy forces to VBEs. Thus, the authors of this paper considered two strategies: (1) Control of tension field action development by use of the geometric property of the ring. (2) Control of yielding and local buckling in VBE by use of CFT steel sections.

2. General Background, Concept, and Validation

Tension field action of a buckled web plate, despite a great energy dissipation capacity, makes two major challenges in the design of steel plate shear walls: (1) Heavy load applying to a VBE. (2) Slack of a web plate material causes cyclic strength reduction.

2.1. Ring-Shaped Steel Plate Shear Wall Concept

The concept of ring-shaped SPSW is based on the intrinsic property of a geometry of a ring that when deforms in an ellipse, the contraction of one direction is nearly equal to the expansion of normal direction. In the same way, in a ring-shaped web plate, the roof displacement causes in lengthening of rings in a tension diagonal direction that is almost equal to shortening of them in diagonal compression direction. In solid web plate, shortening in diagonal compression direction is nearly equal to steel poisson ratio cross to lengthening in tension diagonal direction which results in the slack of material of web plate (Phillips and Eatherton, 2018).

2.2. Boundary Frame Selection

CFT steel columns provide synergetic advantages of steel and concrete, and have a high strength to weight ratio, provide excellent monotonic and dynamic resistance under biaxial bending plus axial force, and improve damping behavior. Thus, the authors of this paper think they can be used in the SPSW system as vertical boundary elements (Hu, 2008)

2.3. Ranges and Limit States of Pushover Response

According to Tsai et al. (2014), the pushover response of a SPSW could be divided into three ranges, and three limit states: The elastic range that continues from the start of loading to first limit state named initial

* Corresponding Author

E-mail addresses: m.jamshidi@iauc.ac.ir (Morteza Jamshidi), ghasempourali1990@gmail.com (Ali Ghasempour).

yielding (IY) state, the progressive yielding range that is beyond of first limit state and ends in second one named uniform yielding (UY) state, and the mechanism range which continues from second limit state to the third one named target hardening (HD) state.

2.4. Local Pullout deformation of the Interior Flange of the Box Column

Calculation of the interior flange of a box column which is connected with the web plate in UY and HD states leads us to develop a design check for the pullout action.

3. Methodology, Scope, and Objectives

Based on the studies of the authors, ring shaped panel with its special buckling behavior is an appropriate element for the web plate of SPSW systems. Also, the application of a CFT steel column, which is a good element in high seismic regions as a VBE, is useful. As regards, experimental behavior of a ring-shaped SPSW with CFT steel column as a VBE isn't investigated yet; the authors put the modeling calibration of mentioned elements in their list and then created their proposed model by using ABAQUS (Dassault, 2013).

Design of ring-shaped web plate requires identifying different geometric properties such as radius and width of the rings, the width of the links, and the outer radius to the width of the ratio of the ring, and choice proper ranges for calculation of VBE applied force due to web plate goes to the author's to-do list.

4. Proposed Model and Related Equations

The proposed model is a 2-story and 1-bay SPSW with ring-shaped web plate and CFT steel VBE. This section focuses on two general scopes: (1) Yielding of VBE at a story drift of 2.5% rad. And (2) the magnitude of pullout deformation at the middle of the height of interior flange of left VBE in 2nd story at a drift of 2.5% rad.

4.1. Equations of Demand to Capacity Ratios in Ring Shaped SPSW

An important parameter in the capacity design of VBEs is a bending moment demand to bending moment capacity ratio or DCR. This ratio is calculated in UY and HD states. Equations for calculating these ratios are presented in this section.

4.2. Local Pullout deformation of the Interior Flange of the Box Column

By determination of limited zones for the design of ring-shaped SPSW, four specimens in different thicknesses were modeled. For each selected thickness, a solid panel is modeled too.

In this section, after modeling the geometry of frames and material properties, initial imperfection was specified on the panels. The imperfection distribution was determined from the superposition of the first two buckle mode shapes for each panel obtained from an ABAQUS buckle analysis. Two steps of nonlinear static analyses were performed for each model: (1) Applying vertical loads equal to 0.3 of axial column capacity on the top of each 2nd-floor column. And (2) conducting the displacement control pushover analysis by a displacement equals to a story drift of 2.5% rad.

5. Results and Discussion

In this section, results in ABAQUS analyses and answers to proposed computational equations are presented.

After conducting displacement to models, the yielding condition of them is presented by using of Von Mises criterion. For investigation of pull-in force of web plate on the VBE, the magnitude of pullout deformation of an interior flange in mid-height of it at the 2nd-floor id computed by using of nodal displacement of finite element model.

Through proposed equations for computing pullout deformation of the interior flange, these magnitudes are computed for different models and results are compared to ABAQUS analyzed results. The DCR ratios of models are computed by proposed equations and presented here.

6. Summary and Conclusion

Early buckling of web plate and pull out of VBE due to tension field action of web plate are some of the problems in convenient SPSW design. In this paper, the application of ring-shaped web plate was studied to

wipe out these problems. For this reason, the pull out deformation of the interior flange of VBE and yielding of it are studied:

- Application of ring-shaped web plate diminishes yielding of mid-height of 2nd-floor VBE.
- Pull-out deformation of the interior flange of VBE in ring-shaped SPSW is reduced significantly.
- Bending moment demand to bending moment capacity ratio in UY and HD states computed for each model. For ring-shaped SPSW, these ratios are below one, and this fact shows that yielding is not occurred in the VBE of these models.

7. References

Dassault, Abaqus version 6.13 Documentation, 2013.

Hu J, "Seismic performance evaluations and analyses for composite moment frames with smart SMA PR-CFT connections", Dissertation Presented to the Academic Faculty in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree Doctor of Philosophy in the School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, 2008.

Phillips AR, Eatherton MR, "Computational study of elastic and inelastic ring shaped steel plate shear wall behavior", *Engineering Structures*, 177, 2018, 655-677.

Tsai K, Li C, Lee H, "Seismic design and testing of the bottom vertical boundary elements in steel plate shear walls", Part 1: Design methodology, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2014, 43 2237-2259.