

بررسی عددی رفتار غیرخطی دیوارهای برشی پیش ساخته بتنی

مرتضی مدح خوان* (دانشیار)

مریم عباسیان طائب (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۴ (۱۳۹۴)
دوری ۲ - ۳۱، شماره ۲/۲، ص. ۷۷-۶۹، (پادداشت فنی)

استفاده از سیستم دیوار برشی بتنی پیش ساخته در ساختمان های بتنی پیش ساخته با وجود داشتن مزیت های پیش ساختگی، به دلیل کمبود ضوابط آیین نامه‌ی پیرامون طراحی لرزه‌ی اتصالات در آن‌ها با محدودیت‌هایی همراه است. بنابراین برای توسعه‌ی استفاده از دیوارهای برشی بتنی پیش ساخته، بررسی‌های بیشتری در مورد رفتار لرزه‌ی اتصالات آن‌ها مورد نیاز است. در این مطالعه، چند دیوار برشی بتنی پیش ساخته با ارتفاعات مختلف مدل سازی و تأثیر دو نوع اتصال افقی به‌کاررفته مابین پانل‌های دیوار برشی پیش ساخته (اتصال اسلیو و اتصال ورق) بررسی شده است. در ادامه، مقایسه‌ی از نظر میزان مقاومت، شکل پذیری، جذب انرژی و الگوی ترک خوردگی بین دیوارهای مشابه در دو حالت یک پارچه و پیش ساخته تحت بارگذاری لرزه‌ی صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که با تقویت اتصالات دیوارهای پیش ساخته می‌توان رفتار دیوارهای پیش ساخته را به دیوارهای یک پارچه نزدیک‌تر کرد. در این میان اتصال اسلیو در مقایسه با اتصال ورق، رفتار بهتری نشان داده است.

واژگان کلیدی: دیوار برشی پیش ساخته بتنی، اتصالات پیش ساخته، رفتار غیرخطی، مقاومت، شکل پذیری.

madhkhan@cc.iut.ac.ir
m.abbasiyan@cv.iut.ac.ir

۱. مقدمه

چند اتصال قائم جوشی و پیچی در پانل‌های پیش ساخته بتنی دیوار برشی پرداخته شده است. در میان اتصالات مورد آزمایش در مطالعه‌ی مذکور، اتصال UFP^۱ بیشترین جذب انرژی را به خود اختصاص داده است. لذا استفاده از آن به عنوان میراگری مناسب بین پانل‌ها توصیه شده است.^[۲] پژوهشگرانی نیز در سال ۱۹۹۸، مطالعاتی بر روی تعدادی اتصال قائم‌تر مابین پانل‌های پیش ساخته بتنی، ظرفیت برش‌گیری و سختی برشی آن‌ها انجام داده‌اند. در مطالعه‌ی مذکور تأثیر عواملی چون شکل و سطح مقطع اتصال، مقاومت بتن و مقدار میلگردهای عبوری از ناحیه‌ی اتصال بررسی و در پایان روابطی برای محاسبه‌ی میزان مقاومت برشی اتصالات قائم براساس تئوری موهر - کلمب ارائه شده است.^[۱] همچنین در مطالعه‌ی دیگری در سال ۲۰۰۷، اتصال جدید پیچی - شیاری^۲ برای اتصال پانل‌های پیش ساخته بتنی پیش تنیده به پی طراحی و امکان استفاده از پانل‌های پیش تنیده با مقاطع بتنی به عنوان دیوار برشی مقاوم لرزه‌ی فراهم شده است. رفتار کشسان خمیری این اتصال در حین زلزله سبب شد که نیروی منتقل شده از اتصال تا حدی که از گسیختگی دیوار جلوگیری شود، کاهش یابد.^[۳] در پژوهشی در سال ۲۰۱۰ نیز به کمک روش اجزاء محدود، رفتار چند نوع اتصالات شامل ورق‌های سوراخ‌دار و شیاردار، اتصال J و O شکل را تحت بارگذاری چرخه‌ی بررسی کرده‌اند. آن‌ها در پایان استفاده از اتصال O شکل را با توجه به داشتن جذب انرژی و ظرفیت جابجایی مناسب برای استفاده در سیستم دیوارهای پس کشیده در مناطق لرزه‌خیز شدید توصیه کرده‌اند.^[۴]

امروزه با توجه به رشد روزافزون جمعیت، لزوم ساخت سریع و کم هزینه مسکن غیرقابل اجتناب است. لذا در دهه‌های اخیر توجه روزافزونی به صنعت پیش ساختگی شده است. اعضای پیش ساخته بتنی به دلیل تولید صنعتی، و اعمال کنترل‌های بالا در مراحل اختلاط و نگهداری نسبت به سازه‌های بتنی درجا کیفیت و مقاومت بالاتری دارند. در این میان استفاده از پانل‌های دیوار برشی پیش ساخته به دلیل کیفیت بهتر اجرا و کاهش زمان ساخت، گزینه‌ی مناسبی برای ساختمان‌های عمومی محسوب می‌شوند. از طرفی با توجه به کمبود اطلاعات در مورد نحوه‌ی رفتار این نوع سازه‌ها در مناطق لرزه‌خیز شدید، استفاده از آنها در این مناطق محدودتر است.^[۱] پژوهش‌های زیادی در زمینه‌ی مطالعه‌ی رفتار اتصالات دیوارهای برشی انجام شده است. در پژوهشی در سال ۱۹۹۵ به بررسی رفتار چند نوع اتصال افقی تحت ترکیب بارگذاری خمشی، برشی و محوری پرداخته شده است. در فاز اول پژوهش مذکور، چند اتصال فولادی نرم و در فاز دوم، چند اتصال پس کشیده مورد بررسی قرار گرفته و نتایج مربوط به آزمایش‌ها نشان داده است که در کل اتصالات پس کشیده در مقایسه با اتصالات فولادی نرم، شکل پذیری مناسب اما با جذب انرژی کمتر داشته‌اند.^[۵] در مطالعه‌ی در سال ۱۹۹۴، با هدف توسعه‌ی مدل دقیق رفتاری و ضوابط طراحی اتصالات دیوار برشی پیش ساخته، از طریق آزمایش‌های دقیق به بررسی رفتار لرزه‌ی

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۲/۲۲، اصلاحیه ۱۳۹۲/۹/۱۱، پذیرش ۱۳۹۲/۹/۲۶

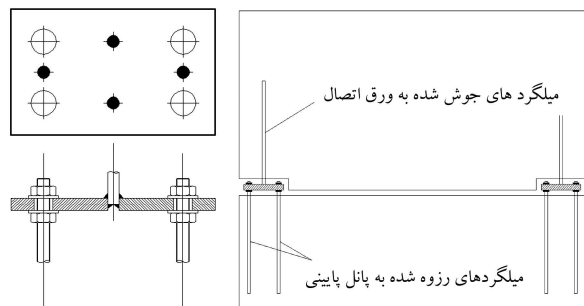
همان‌طور که ملاحظه شد، بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده در مورد رفتار دیوارهای برشی بتنی پیش‌ساخته، به صورت آزمایشگاهی و مستلزم صرف وقت و هزینه‌ی زیاد بوده است. استفاده از روش اجزاء محدود به عنوان یکی از روش‌های دقیق تحلیل عددی برای بررسی رفتار این سازه‌ها می‌تواند مفید باشد. لذا در این مطالعه سعی بر آن است با مدل‌سازی این سازه‌ها توسط نرم‌افزار آباکوس، که به عنوان نرم‌افزاری قدرتمند در زمینه‌ی تحلیل به روش اجزاء محدود شناخته شده است، رفتار لرزه‌یی آن‌ها به طور دقیق مورد بررسی قرار گیرد.

۲. روش‌های اتصال میلگردها

یکی از مسائل مهم در سازه‌های بتن‌ارمه، نحوه‌ی اتصال میلگردها به هم است. این موضوع در مورد سازه‌های بتنی پیش‌ساخته، که قطعات سازه حالت مجزا از هم دارند، بیشتر نمود دارد. برای اتصال میلگردها روش‌های مختلفی چون هم‌پوشانی میلگردها، جوشکاری و استفاده از بست‌های مکانیکی وجود دارد. در نمونه‌های دیوار پیش‌ساخته در این مطالعه، از دو روش اتصال رایج در صنعت پیش‌ساختگی استفاده شده است. در روش اول برای اتصال میلگردهای طولی دیوار از نوعی بست مکانیکی موسوم به اسلیو^{۱۹} استفاده شده است (شکل ۱ الف). استفاده از این بست اولین بار در مطالعه‌یی در سال ۱۹۷۰ در آمریکا معرفی شده است.^[۷] اسلیوها به شکل غلاف‌های فلزی و با دو دهانه برای ورود و خروج میلگرد است. داخل این غلاف با ملات پر مقاومت و بسیار روانی موسوم به گروت پر شده و جهت گروت‌ریزی سوراخ‌هایی در بدنه‌ی غلاف تعبیه شده است. برای افزایش مقاومت لغزشی، معمولاً



الف) اسلیو^{۱۹}



ب) پلیت.^[۱۰]

شکل ۱. روش‌های اتصال میلگرد.

جداری داخلی این غلاف به صورت شیاردار است. غلاف و گروت در اسلیو به ترتیب وظیفه‌ی انتقال نیروی محوری بین میلگردها و انتقال برش بین غلاف و میلگرد را به عهده دارند. علاوه بر این غلاف با ایجاد تنش محصورشدگی سبب افزایش تنش چسبندگی بین گروت و میلگرد می‌شود.^[۸] در روش دوم که نوعی اتصال پیچی - جوشی محسوب می‌شود، برای اتصال میلگردهای مابین پانل‌ها از یک ورق فولادی استفاده می‌شود (شکل ۱ ب). اتصال میلگردهای پانل بالایی و پایینی به این ورق فولادی به ترتیب با جوش‌دادن و پیچ‌کردن آن‌ها به ورق فراهم می‌شود. برای پیچ‌کردن میلگردها به ورق، انتهای آن‌ها رزوه و به کمک مهره به ورق پیچ می‌شوند. این میلگردها که بت نامیده می‌شوند، مقاومت بالاتری نسبت به میلگردهای دیگر دارند. ضخامت ورق فولادی در این اتصال براساس ظرفیت خمشی و برشی ورق، ناشی از نیروی کششی ایجادشده در میلگردهای بت تعیین می‌شود.^[۹]

۳. مدل‌سازی به روش اجزاء محدود

۱.۳. نحوه‌ی مدل‌سازی دیوار

برای معرفی ماده‌ی بتن در نرم‌افزار ABAQUS از مدل آسیب خمیری بتن موجود در کتابخانه‌ی نرم‌افزار استفاده شده است.^[۱۰] استفاده از این مدل نیازمند تعریف نمودار تنش - کرنش خمیری تک محوره‌ی بتن در کشش و فشار است. برای این منظور منحنی تنش - کرنش هاگستاد بتن استفاده شده است. برای معرفی ماده‌ی فولاد در نرم‌افزار، مقدار مدول کشسانی ۲۰۰ گیگا پاسکال و ضریب پواسون ۰٫۳ و منحنی تنش - کرنش دو خطی فولاد در نظر گرفته شده است. برای مقیدکردن درجات آزادی میلگردهای درون بتن به بتن اطراف از قید محاط‌کننده^۴ استفاده شده است. جهت کاهش حجم محاسبات به علت سختی بالای فونداسیون و تیر بالاسری در نمونه‌های دیوار و ترک‌نخوردن بتن در این نواحی، برای مدل‌سازی این اعضا از ماده‌ی کشسان با سختی بالا استفاده شده است.

از المان مکعبی خطی ۸ نقطه‌یی (C3D8) موجود در کتابخانه‌ی نرم‌افزار برای بتن و المان خطی دو نقطه‌یی (T3D2) برای میلگردهای فولادی استفاده شده است. برای مدل‌سازی میلگردهای اتصال‌یافته به کمک اسلیو نیز از المان خطی دو نقطه‌یی (T3D2) و منحنی تنش - کرنش به دست‌آمده از تحلیل اتصال اسلیو، که متعاقباً توضیح داده شده است، به کار رفته است.

برای انتگرال‌گیری عددی از کلیه‌ی المان‌ها از روش گوس و برای حل عددی مسئله، روش نیوتن - رافسون استفاده شده است. برای جلوگیری از ایجاد تمرکز تنش در محل تکیه‌گاه‌ها و محل اعمال بارها از صفحات فولادی به ضخامت مناسب استفاده شده است. در مدل‌سازی دیوارها با توجه به تقارن، نیمی از سازه مدل‌شده و در صفحات تقارن، شرایط مرزی مناسب تعریف شده است. بارگذاری ثقلی دیوارها به روش کنترل نیرو و بارگذاری جانبی آن‌ها به روش کنترل جابجایی اعمال شده است.

۲.۳. نحوه‌ی مدل‌سازی اتصال اسلیو

اتصال میلگرد به کمک اسلیو از سه جزء اصلی اسلیو، گروت و میلگرد تشکیل می‌شود. برای مدل‌سازی گروت در نرم‌افزار، از مدل آسیب - خمیری بتن و المان‌های مکعبی خطی ۸ نقطه‌یی (C3D8) استفاده شده است. اما از آنجا که مدل آسیب - خمیری به تنهایی قادر به در نظر گرفتن لغزش بین بتن و میلگرد نیست، نیاز به المان یا نوعی تماس بین سطح بتن و میلگرد است، که متناسب لغزش ایجادشده بین

۳.۳. نحوه‌ی مدل‌سازی اتصال ورق

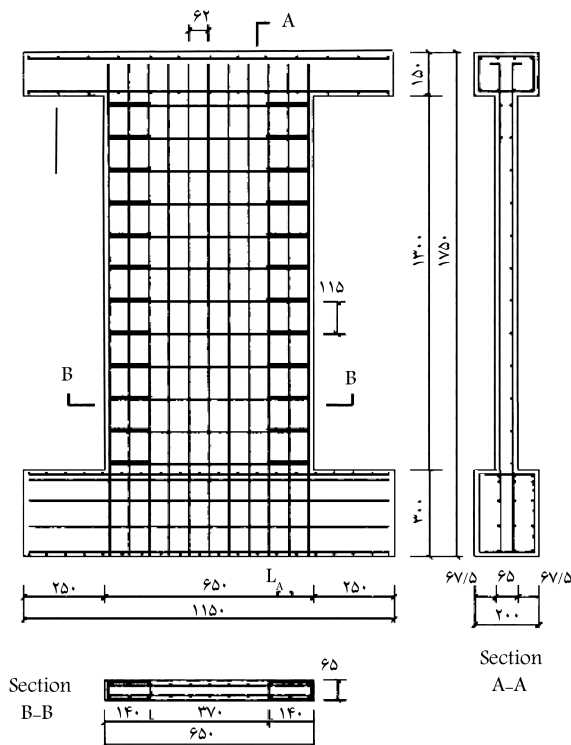
برای مدل‌سازی اتصال ورق، به منظور ساده‌سازی، مجموعه‌ی ورق، میلگردهای جوش و بت به صورت یک‌جا مدل‌سازی شده و از مدل‌سازی جوش و پیچ و مهره صرف‌نظر شده است. در این اتصال برای مدل‌سازی میلگردهای جوش و بت از المان خرابایی ۲ گره‌یی با ۳ درجه‌ی آزادی در هر گره و برای ورق از المان پلیت ۴ گره‌یی با ۵ درجه‌ی آزادی در هر گره استفاده شده است.

این تذکر لازم است که هنگام مونتاژ قطعات دیوارهای پیش‌ساخته‌ی بتنی، به منظور ترازبندی فضای مابین پانل‌ها یا سایر قطعات پیش‌ساخته با لایه‌یی نازک از گروت پر شده است. با توجه به زبری سطوح بتنی و برای مدل‌سازی رفتار تماسی بین این سطوح از مدل اصطکاکی موجود در کتابخانه‌ی نرم‌افزار با ضریب اصطکاکی معادل ۰/۷ استفاده شده است.

۴. کنترل صحت مدل‌سازی

۱.۴. مدل‌سازی دیوار یک‌پارچه

برای بررسی عملکرد دیوارهای پیش‌ساخته‌ی بتنی لازم است رفتار این دیوارها با دیوارهای مشابه بتنی یک‌پارچه مقایسه شود. به منظور کالیبره‌کردن نرم‌افزار و بررسی درستی مدل‌سازی از نمونه‌ی آزمایش شده توسط کوان و هی استفاده شده است.^[۱۲] ابعاد و جزئیات میلگردگذاری این دیوار در شکل ۴ و جدول ۱ ارائه شده است. در شکل‌های ۵ و ۶ نحوه‌ی مش‌بندی و نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل دیوار نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، نمودار بار - جابجایی مربوط به نمونه‌ی آزمایشگاهی و تحلیلی دیوار در حالت یک‌پارچه تطابق خوبی

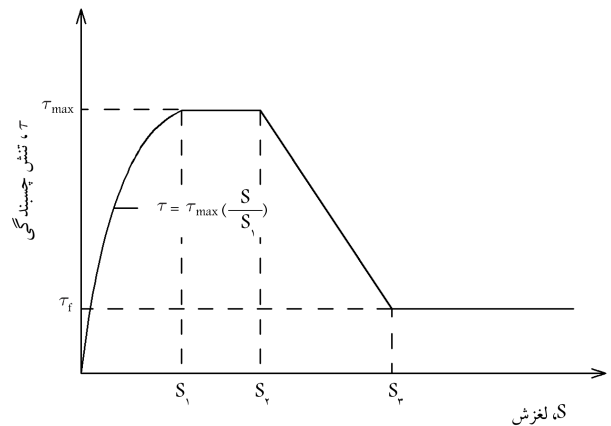


شکل ۴. جزئیات میلگردگذاری و ابعاد هندسی دیوار کوان و هی.^[۱۲]

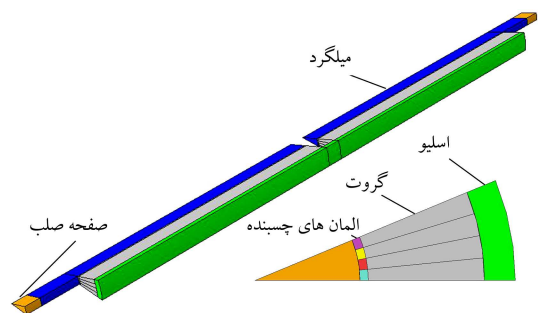
این دو سطح بتواند نیروهای برشی را منتقل کند. در بین المان‌ها و مواد موجود در کتابخانه‌ی نرم‌افزار، ماده‌ی چسب ۵ و المان چسبیده ۶ قادر به مدل‌سازی رفتار موردنظر هستند.^[۱۰] برای بیان رابطه‌ی بین لغزش و نیروهای برشی در المان چسبیده از مدل رفتاری تنش چسبندگی - لغزش بین بتن و میلگرد ارائه شده توسط آیین‌نامه‌ی CEB-FIB ۹۰ استفاده شده است (شکل ۲).^[۱۱] با توجه به اینکه خصوصیات مربوط به تنش‌های چسبندگی بین گروت و اسلیو و میلگرد در المان‌های چسبیده لحاظ می‌شود، بنابراین از مدل‌سازی آج‌های روی میلگرد و داخل غلاف اسلیو صرف‌نظر شده و این اعضا به صورت مقاطع استوانه‌یی مدل‌سازی شده‌اند. المان‌های مکعبی خطی هشت نقطه‌یی (C3DA)، برای مدل‌سازی جسم اسلیو و میلگرد به‌کار رفته است. با توجه به تقارن موجود و به منظور کاهش حجم محاسبات فقط ۱/۱۶ کل مقطع اسلیو مدل‌سازی شده و شرایط مرزی مناسب با این تقارن اعمال شده است. نحوه‌ی مدل‌سازی اتصال اسلیو و اختصاص المان‌های چسبیده در شکل ۳ نشان داده شده است.

پس از مدل‌سازی اسلیو در نرم‌افزار، این اتصال تحت بارگذاری محوری توسط روش کنترل تغییرمکان انجام شده است. در این روش، درجات آزادی المان‌های انتهایی یکی از میلگردها در یک طرف بسته و جابجایی محوری به انتهای دیگر اعمال شده است. برای جلوگیری از تمرکز تنش در نواحی انتهایی میلگردها از صفحات صلب استفاده شده است.

پس از مدل‌سازی اتصال اسلیو نمودار تنش - کرنش مربوط به میلگردهای اتصال‌یافته توسط این بست مکانیکی استخراج و از این نمودار جهت معرفی رابطه‌ی تنش - کرنش میلگردهای ناحیه‌ی اتصال در مدل‌سازی دیوارهای پیش‌ساخته به کمک اتصال اسلیو استفاده شده است.



شکل ۲. مدل عددی تنش چسبندگی - لغزش ارائه شده در آیین‌نامه‌ی CEB-FIP.^[۱۱]



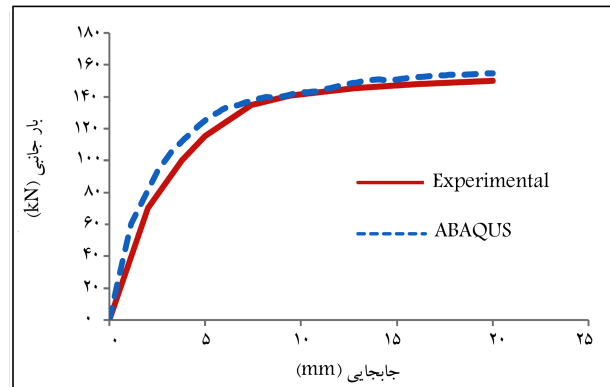
شکل ۳. نحوه‌ی اختصاص المان‌های چسبیده و مقطع عرضی اتصال اسلیو.

جدول ۱. مشخصات میلگردهای به‌کار رفته در دیوار کوان و هی.

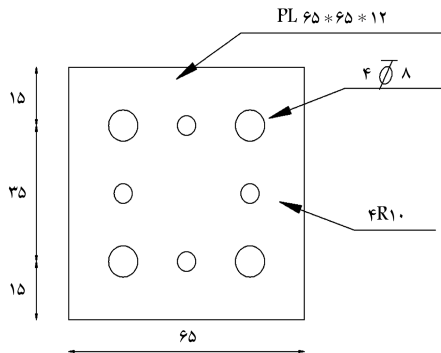
| نوع میلگرد | قطر میلگرد (mm) | تنش تسلیم (MPa) | تنش نهایی (MPa) |
|------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| قائم | ۸ | ۴۷۰ | ۵۶۵ |
| افقی | ۶٫۲۵ | ۵۲۰ | ۶۱۰ |
| اجزای لبه | ۴ | ۴۲۰ | ۴۹۰ |

پی قطع شده و اتصال بین دیوار و پی از طریق گروت‌ریزی بین این دو قسمت و استفاده از میلگرد ممتد، که توسط دو اتصال اسلیوو ورق به هم بست داده شده‌اند، فراهم شده است. میلگردهای ممتد برای برش - اصطکاک و براساس ظرفیت برشی نهایی دیوار در آزمایش، طبق بند ۴-۶-۱۱ آیین‌نامه‌ی ۵-ACI۳۱۸ طراحی شده است. در دیوار پیش‌ساخته با اتصال اسلیوو از دو میلگرد ممتد بین دیوار و پی به قطر ۲۰ میلی‌متر و فاصله‌ی ۶۵ میلی‌متر از هم، که با بست اسلیوو ۶U-X ساخت شرکت NMB^[۱۳] به یکدیگر اتصال یافته‌اند، استفاده شده است. برای دیوار پیش‌ساخته با اتصال ورق هم از ۴ اتصال به فاصله‌ی مرکز تا مرکز ۱۶۵ میلی‌متر از هم استفاده شده است. نحوه‌ی مدل‌سازی میلگردها و جزئیات مربوط به اتصال پلیت در شکل‌های ۷ الی ۹ و جدول ۲ ارائه شده است.

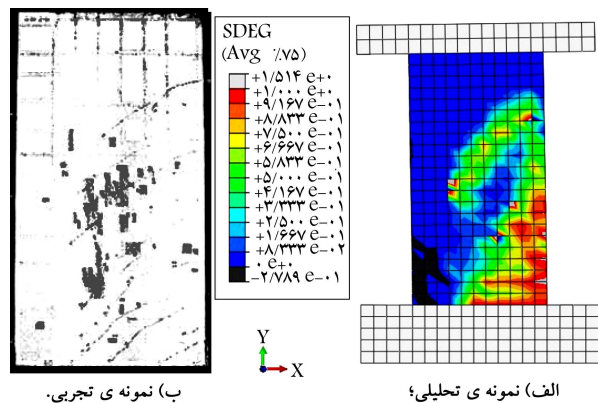
یکی از شاخص‌های مهم برای مقایسه‌ی رفتار دیوار پیش‌ساخته، مقایسه‌ی نمودار بار - جابجایی جانبی آنهاست. نمودار بار - جابجایی جانبی به‌دست‌آمده از تحلیل عددی با نرم‌افزار برای این دیوار در دو حالت پیش‌ساخته و یک‌پارچه در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دیوارهای پیش‌ساخته از نظر



شکل ۵. مقایسه‌ی نمودار بار - جابجایی جانبی آزمایشگاهی^[۱۳] و تحلیلی دیوار کوان و هی.

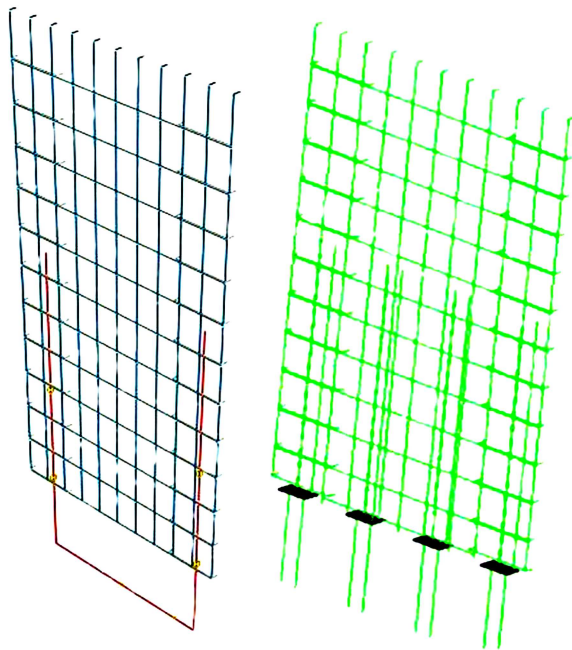


شکل ۷. جزئیات اتصال ورق دیوار کوان و هی.



شکل ۶. الگوی ترک‌خوردگی دیوار کوان و هی.

با هم دارند، که این تأییدی بر صحت روند مدل‌سازی در نرم‌افزار است. الگوی ترک‌خوردگی دیوارها یکی از شاخص‌های مفید برای کنترل و مقایسه‌ی آسیب‌های وارد شده به آنهاست. نرم‌افزار آباکوس میزان ترک‌خوردگی المان به‌صورت ضریبی بین صفر و ۱ در نظر می‌گیرد. ضریب صفر به معنی عدم آسیب در المان و ضریب ۱ به معنی ترک خوردن کل المان است.^[۱۴] الگوی ترک‌خوردگی به‌دست‌آمده از تحلیل عددی و آزمایشگاهی برای دیوار کوان در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل ساخته‌شده در نرم‌افزار به خوبی توانسته است الگوی ترک را دنبال کند.

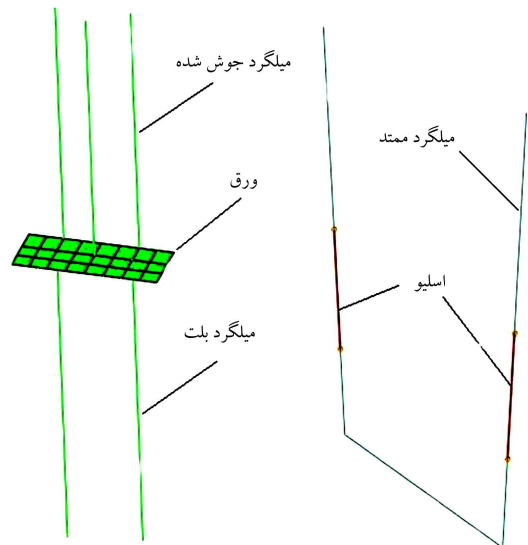


شکل ۸. نحوه‌ی مدل‌سازی میلگردها و اتصالات دیوار کوان و هی.

۲.۴. مدل‌سازی دیوار پیش‌ساخته با اتصال اسلیوو ورق

به منظور مقایسه‌ی رفتار دیوار پیش‌ساخته و یک‌پارچه، دیوار مورد بررسی کوان و هی، که در قسمت‌های قبلی به‌صورت یک‌پارچه مدل‌سازی شده بود، این بار به دو صورت پیش‌ساخته با اتصال اسلیوو و با اتصال ورق مدل‌سازی شده است. برای مدل‌سازی پیش‌ساخته‌ی این دیوار، میلگردهای قائم برشی در محل اتصال دیوار به

اتصال میلگردهای ممتد بین پانل‌ها (اتصالات افقی) از دو اتصال اسلیو و ورق استفاده شده است. اتصالات موردنظر به فواصل مساوی و به صورت متقارن مابین پانل‌ها توزیع شده‌اند. تمام اسلیوهای مصرفی در نمونه‌ها از نوع ۹U-X ساخت شرکت NMB [۱۳] است. ضخامت گروت مابین پانل‌ها ۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. مشخصات مربوط به مواد و مصالح به‌کاررفته و مشخصات مربوط به مقاطع دیوارها در جدول‌های ۲ الی ۵ و شکل‌های ۱۱ و ۱۲ ارائه شده است. شیوه‌ی بارگذاری دیوارها به صورت اعمال بار جانبی همراه با اعمال بار ثقلی



شکل ۹. جزئیات مدل‌سازی میلگردها و اتصالات دیوار کوان و هی.

جدول ۲. مشخصات مکانیکی مواد و مصالح مورد استفاده - برحسب مگاپاسکال.

| ماده | مدول کشسانی | تنش تسلیم | تنش نهایی | کرنش نهایی |
|------------------------------|---------------------|-----------|-----------|------------|
| بتن | ۲۴۸۲۵ | - | ۳۰* | ۰٫۰۰۳۸** |
| گروت مابین پانل‌ها | ۳۱۸۸۰ | - | ۵۰* | ۰٫۰۰۳۸** |
| میلگردهای طولی (افقی و قائم) | ۲ × ۱۰ ^۵ | ۴۰۰ | ۶۵۰ | ۰٫۱۴ |
| میلگردهای عرضی | ۲ × ۱۰ ^۵ | ۳۰۰ | ۵۰۰ | ۰٫۱۹ |
| میلگردهای بت | ۲ × ۱۰ ^۵ | ۴۶۰ | ۷۰۰ | ۰٫۱۴ |
| میلگردهای جوش‌پذیر | ۲ × ۱۰ ^۵ | ۲۵۰ | ۳۵۰ | ۰٫۱ |
| ورق فولادی | ۲ × ۱۰ ^۵ | ۲۷۵ | ۵۰۰ | ۰٫۲۵ |

* مقاومت فشاری بیشینه‌ی بتن یا گروت. ** کرنش نظیر شکست فشاری بتن.

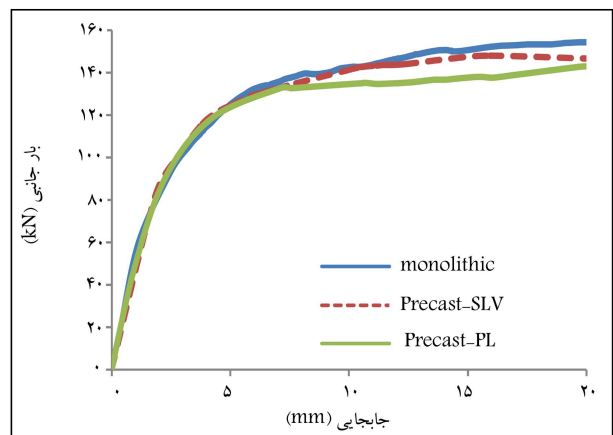
جدول ۳. مشخصات مواد به‌کار رفته در مدل‌سازی اتصال اسلیو ۹U-X [۱۳].

| ماده | تنش تسلیم | تنش نهایی | کرنش نهایی |
|-----------------|-----------|-----------|------------|
| گروت داخل اسلیو | - | ۹۵* | - |
| غلاف اسلیو | ۳۶۰ | ۶۰۵ | ۰٫۱۴ |

* مقاومت فشاری بیشینه‌ی بتن یا گروت.

جدول ۴. جزئیات اتصالات دیوارهای پیش‌ساخته.

| دیوار | طبقه | اتصال اسلیو | | اتصال ورق | |
|--------|-------|-------------|-------|-----------|-----|
| | | تعداد | تعداد | تعداد | نوع |
| ۴ طبقه | ۱ | ۹ | ۹ | ۹ | A |
| | ۲ - ۴ | ۵ | ۵ | ۵ | A |
| ۶ طبقه | ۱ - ۲ | ۹ | ۹ | ۹ | A |
| | ۳ - ۶ | ۵ | ۵ | ۵ | A |
| ۸ طبقه | ۱ | ۱۶ | ۱۶ | ۱۶ | B |
| | ۲ - ۳ | ۱۴ | ۱۴ | ۱۴ | B |
| | ۴ | ۸ | ۸ | ۸ | B |
| | ۵ - ۸ | ۶ | ۶ | ۶ | B |



شکل ۱۰. نمودارهای بار-جابجایی جانبی دیوار کوان و هی در دو حالت یک پارچه و پیش‌ساخته.

بار نهایی و سختی اولیه در حد قابل قبولی با دیوار یک پارچه تطابق داشته است، که نشان‌دهنده‌ی تشابه رفتار آنهاست. با این حال عملکرد دیوار پیش‌ساخته با اتصال اسلیو به حالت یک پارچه نزدیک‌تر بوده و مقاومت بیشتری در مقایسه با اتصال ورق کسب کرده است.

۵. مدل‌های توسعه داده شده

مدل‌هایی که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته‌اند، شامل دیوارهای برشی از ساختمان‌هایی با سیستم ساده‌ی بتنی با ۳ دهانه در ۴ و ۶ و ۸ طبقه است. طراحی دیوارها براساس آیین‌نامه‌ی ACI 318-05، با رعایت تمامی ضوابط ویژه‌ی لرزه‌ی و به صورت یکنواخت انجام شده است.

طراحی میلگردهای اتصال مابین پانل‌ها (اتصال افقی) براساس بند ۴-۶-۱۱ آیین‌نامه‌ی ACI 318-05 مربوط به طراحی در برابر برش - اصطکاک صورت می‌گیرد. این تذکر لازم است که در طراحی این میلگردها نیروهای برش نهایی که براساس آیین‌نامه‌ی ACI 318-05 محاسبه شده‌اند، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای

جدول ۵. ابعاد و جزئیات میلگردگذاری دیوارهای یک پارچه.

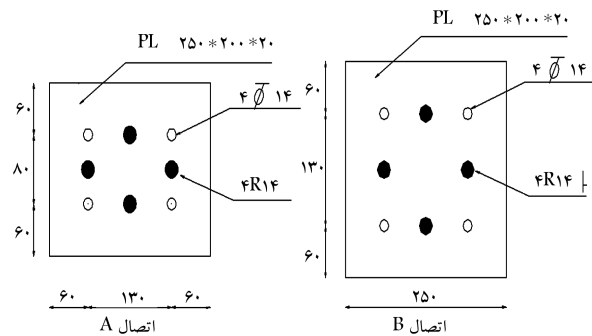
| دیوار | طبقه | ابعاد (cm) | میلگرد برشی (افقی و قائم) | میلگرد خاموت | اجزاء |
|--------|------|------------|---------------------------|--------------|-------|
| طبقه ۴ | ۱ | ۶۳۵ × ۲۰ | ۲Φ۱۰@۳۰ | ۹Φ۲۰ | لبه |
| | ۴-۲ | ۶۳۵ × ۲۰ | ۲Φ۱۰@۳۰ | ۵Φ۲۰ | |
| طبقه ۶ | ۲-۱ | ۶۳۵ × ۲۰ | ۲Φ۱۰@۳۰ | ۹Φ۲۰ | |
| | ۶-۳ | ۶۳۵ × ۲۰ | ۲Φ۱۰@۳۰ | ۵Φ۲۰ | |
| طبقه ۸ | ۱ | ۶۳۵ × ۲۵ | ۲Φ۱۲@۳۵ | ۱۶Φ۳۰ | |
| | ۳-۲ | ۶۳۵ × ۲۵ | ۲Φ۱۲@۳۵ | ۱۴Φ۳۰ | |
| | ۴ | ۶۳۵ × ۲۵ | ۲Φ۱۲@۳۵ | ۸Φ۳۰ | |
| | ۸-۵ | ۶۳۵ × ۲۵ | ۲Φ۱۲@۳۵ | ۶Φ۳۰ | |
| | | | | | |

۱.۶. نمودار بار - جابجایی

همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، استفاده از اتصال اسلیو برای دیوار پیش‌ساخته در مقایسه با اتصال ورق منجر به کسب مقاومت نهایی بیشتر و در نتیجه عملکرد نزدیک‌تر دیوار پیش‌ساخته به دیوار درجا شده است. درصد اختلاف مقاومت نهایی دیوارهای پیش‌ساخته با اتصال اسلیو در مقایسه با دیوارهای یک‌پارچه‌ی مشابه برای نمونه‌های ۴، ۶ و ۸ طبقه به ترتیب ۱۳/۳۹، ۱۲/۲۴ و ۸/۱۹ است. درصد اختلاف مقاومت نهایی دیوارهای پیش‌ساخته با اتصال ورق در مقایسه با دیوارهای یک‌پارچه‌ی مشابه برای نمونه‌های ۴، ۶ و ۸ طبقه به ترتیب ۱۲/۳، ۹/۴۶ و ۱۶/۳۶ است.

نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن است که دیوارهای پیش‌ساخته در مقایسه با دیوارهای یک‌پارچه‌ی مشابه، سختی اولیه و مقاومت کمتری نشان داده‌اند. در نمونه‌های مورد مطالعه سختی اولیه‌ی دیوارهای پیش‌ساخته با اتصال اسلیو بین ۵۸/۳ تا ۸۵/۴۱ و با اتصال ورق بین ۷۷/۵ تا ۸۶/۱۵ درصد سختی اولیه‌ی دیوارهای مشابه یک‌پارچه است. از آنجا که تفاوت اصلی بین سیستم‌های یک‌پارچه و پیش‌ساخته‌ی بتنی در اتصالات آن‌هاست، لذا علت این اختلاف در سختی و مقاومت نهایی را می‌توان به اتصالات دیوارهای پیش‌ساخته‌ی بتنی نسبت داد. بنابراین باید توجه بیشتری در طراحی اتصالات دیوارهای برشی پیش‌ساخته داشت و با تقویت این قسمت‌ها بتوان مقاومت و سختی این دیوارها را بهبود بخشید.

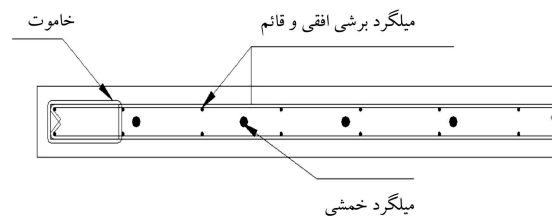
مقایسه‌ی نمودارهای بار - جابجایی دیوارهای پیش‌ساخته نشان می‌دهد که در تمام نمونه‌های مورد بررسی جابجایی نهایی دیوار با اتصال ورق، کمتر از اتصال اسلیو است؛ و این اختلاف با افزایش ارتفاع دیوار و بزرگ‌تر شدن بازوی لنگر در نمونه‌های مورد بررسی فزونی می‌یابد.



شکل ۱۱. جزئیات اتصالات ورق = ابعاد بر حسب میلی‌متر.

۲.۶. شکل‌پذیری

پارامتر شکل‌پذیری به‌صورت نسبت جابجایی نهایی به جابجایی نظیر نقطه‌ی تسلیم تعریف می‌شود. در این مطالعه جابجایی نظیر محل تلاقی دو خط مماس بر منحنی بار - جابجایی در ناحیه‌ی کشسان و خط افقی گذرنده از نقطه‌ی اوج منحنی بار جانبی به‌عنوان جابجایی نظیر تسلیم در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، دیوارهای پیش‌ساخته با اتصال ورق نسبت به اتصال با اسلیو شکل‌پذیری کمتری نشان داده است (البته به‌جز نمونه‌ی ۴ طبقه). این امر می‌تواند به علت زودتر گسیخته شدن دیوار پیش‌ساخته با اتصال ورق در مقایسه با اتصال اسلیو و کاهش تغییرمکان نهایی دیوارهای پیش‌ساخته با اتصال ورق باشد.



شکل ۱۲. جزئیات میلگردگذاری دیوارها.

۳.۶. جذب انرژی

یکی از شاخص‌های با اهمیت در زمینه‌ی مطالعه‌ی رفتار لرزه‌ی سازه‌ها، میزان جذب انرژی آن‌هاست. هرچه میزان جذب انرژی سازه بیشتر باشد، عملکرد لرزه‌ی بهتری خواهد داشت. در شکل ۱۳ نمودارهای جذب انرژی دیوارها در حالات مختلف در طی مراحل بارگذاری جانبی نشان داده شده است. برای ترسیم این نمودارها از متغیر خروجی ALLPD نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. این متغیر بیان‌گر میزان استهلاک انرژی ناشی از تغییرشکل‌های خمیری در المان‌هاست.^[۱۰]

با افزایش بار جانبی، میزان جذب انرژی در دیوارهای پیش‌ساخته با اتصال ورق در مقایسه با دیوارهای پیش‌ساخته با اتصال اسلیو رو به افزایش بوده است؛ اما به علت گسیخته‌گی سریع‌تر (به‌ازاء بار جانبی کمتر)، دیوار پیش‌ساخته با اتصال ورق نهایتاً به جذب انرژی کمتری دست یافته است.

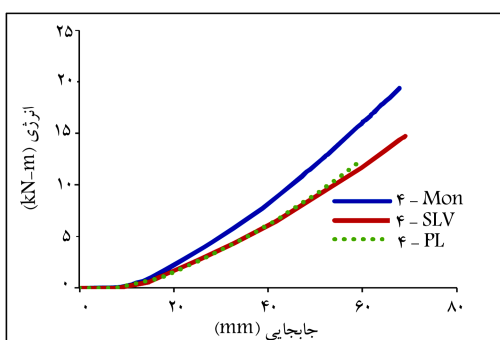
۶. نتایج به‌دست‌آمده

معادل ۱۰٪ ظرفیت محوری مقطع در تراز بام است. ابتدا بار ثقلی به‌صورت کنترل بار و سپس بار جانبی به‌صورت کنترل تغییرمکان تا حد گسیخته‌گی دیوارها اعمال شده است. پی دیوارها با ماده‌ی کشسان و به‌صورت گیردار مدل‌سازی شده است.

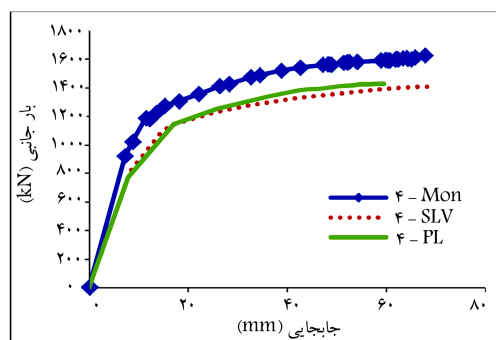
نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل اجزاء محدود مدل‌های توسعه داده شده، شامل منحنی بار - تغییرمکان جانبی، میزان جذب انرژی و پارامتر شکل‌پذیری دیوارها در جدول ۶ و شکل ۱۳ ارائه شده‌اند.

جدول ۶. نتایج به دست آمده از تحلیل مدل‌های توسعه یافته.

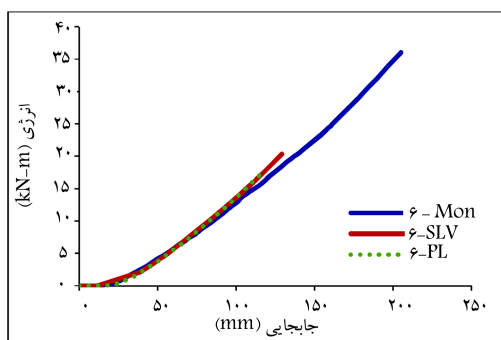
| نوع دیوار | نوع اتصال | تغییر مکان تسلیم (mm) | تغییر مکان نهایی (mm) | بار نهایی (KN) | شکل پذیری | مود گسیختگی |
|-----------|-----------|-----------------------|-----------------------|----------------|-----------|-------------|
| یک پارچه | یک پارچه | ۱۲,۶۸ | ۶۷,۷۷ | ۱۶۲۶,۵۱ | ۵,۳۴ | A |
| ۴ طبقه | اسلیو | ۱۸,۸۵ | ۶۸,۹۹ | ۱۴۰۸,۶۹ | ۳,۶۶ | A |
| ورق | ورق | ۱۴,۳۵ | ۵۹,۴۸ | ۱۴۲۶,۴۷ | ۴,۱۴ | A+B |
| یک پارچه | یک پارچه | ۲۲,۸۲ | ۲۰۶,۱۸ | ۱۰۲۴,۸۹ | ۹,۰۳ | A |
| ۶ طبقه | اسلیو | ۲۶,۴۰ | ۱۴۰,۲۳ | ۱۰۱۲,۱۶ | ۵,۳۱ | A |
| ورق | ورق | ۲۶,۲۸ | ۱۳۷,۰۵ | ۹۲۷,۹ | ۵,۲۱ | A |
| یک پارچه | یک پارچه | ۴۸,۶۶ | ۳۰۹,۴۱ | ۱۲۰۴,۷۶ | ۶,۳۶ | A |
| ۸ طبقه | اسلیو | ۵۵,۲۴ | ۳۱۴,۴۳ | ۱۱۰۶,۰۸ | ۵,۶۹ | A |
| ورق | ورق | ۴۷,۲۵ | ۲۴۸,۲۰ | ۱۰۰۷,۶۷ | ۵,۲۵ | A+C |



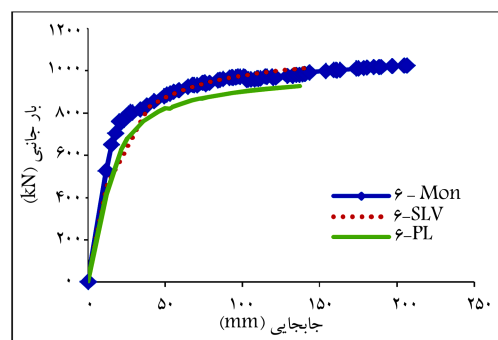
ب) نمودارهای انرژی - جابجایی دیوارهای چهار طبقه؛



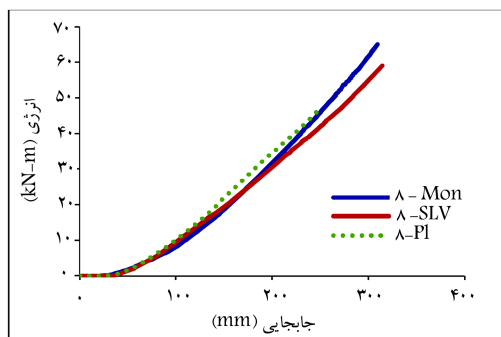
الف) نمودارهای بار - جابجایی دیوارهای چهار طبقه؛



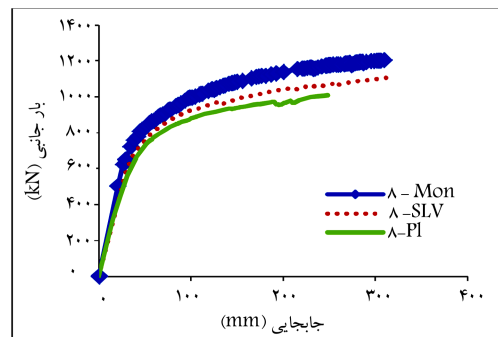
د) نمودارهای انرژی - جابجایی دیوارهای شش طبقه؛



ج) نمودارهای بار - جابجایی دیوارهای شش طبقه؛

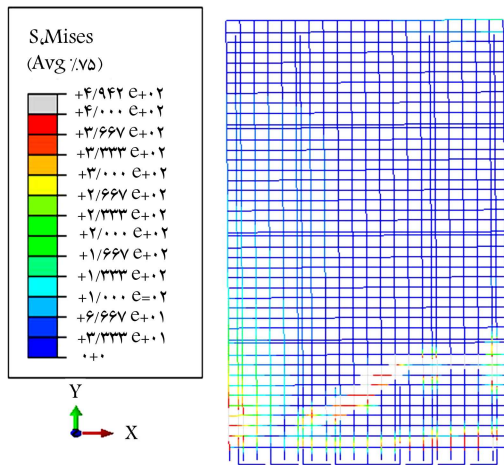


و) نمودارهای انرژی - جابجایی دیوارهای هشت طبقه.

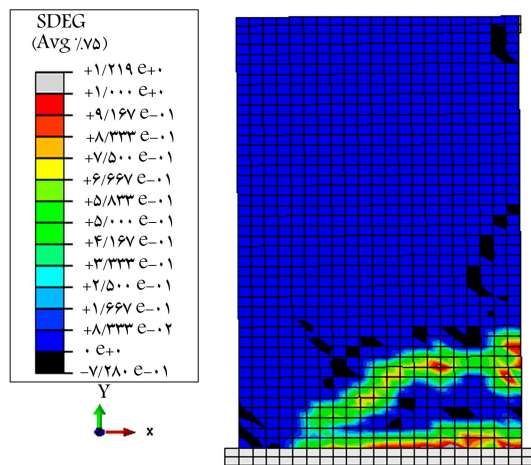


ه) نمودارهای بار - جابجایی دیوارهای هشت طبقه؛

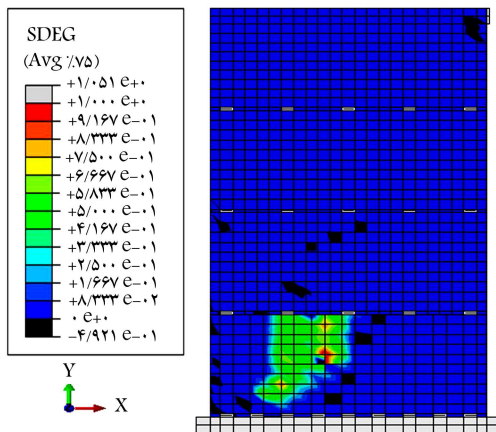
شکل ۱۳. نمودارهای بار - جابجایی و انرژی - جابجایی در دیوارهای ۴، ۶ و ۸ طبقه.



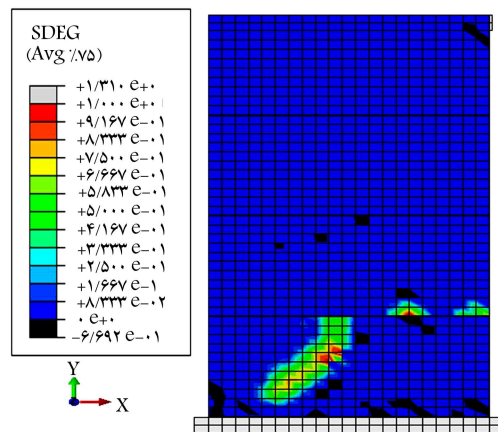
(ب) روند توزیع تنش در دیوار یکپارچه؛



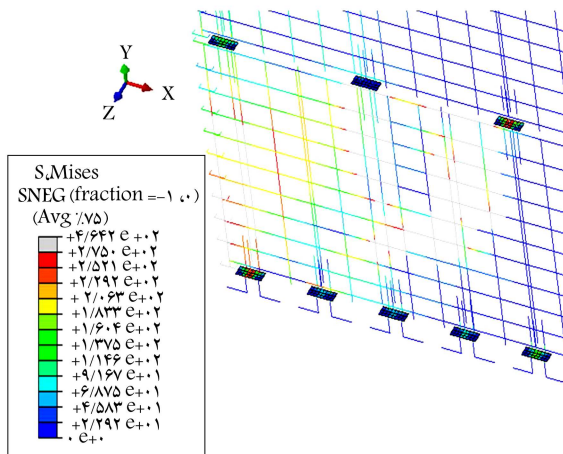
(الف) الگوی ترک خوردگی دیوار یکپارچه؛



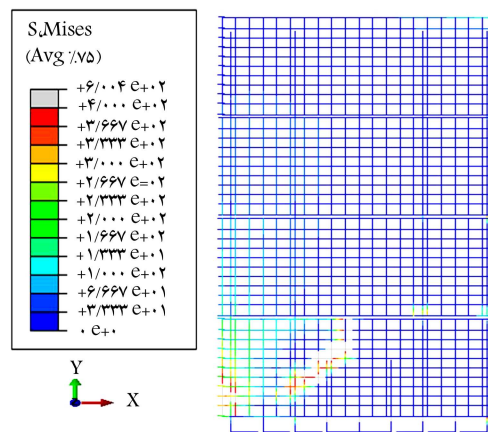
(د) الگوی ترک خوردگی در دیوار پیش ساخته با اتصال ورق؛



(ج) الگوی ترک خوردگی دیوار پیش ساخته با اتصال اسلیو؛



(و) روند توزیع تنش در دیوار پیش ساخته با اتصال ورق.



(د) روند توزیع تنش در دیوار پیش ساخته با اتصال اسلیو؛

شکل ۱۴. الگوی ترک خوردگی و روند توزیع تنش در دیوارهای: یک پارچه، پیش ساخته با اتصال اسلیو و پیش ساخته با اتصال ورق.

۴.۶. الگوی ترک خوردگی و مود گسیختگی

همان طور که مشاهده می شود، در تمام نمونه ها، الگوی ترک خوردگی دقیقاً مشابه روند تسلیم میلاگردهای دیوار است. در دیوارهای یک پارچه ترک های خمشی از ناحیه ی لبه ی تحت کشش دیوار شروع و به تدریج با افزایش بارگذاری جانبی، این ترک ها وارد قسمت های مرکزی مقطع دیوار شده اند، حالت مورب (قطری) پیدا کرده و به ترک های خمشی - برشی تبدیل شده اند. در دیوارهای پیش ساخته عموماً ترک های

نحوه ی مش بندی، الگوی ترک خوردگی و روند توزیع تنش در میلاگردها به عنوان نمونه برای دیوار ۴ طبقه در شکل ۱۴ نشان داده شده است. به علت یکسان بودن الگوی ترک خوردگی در نمونه های مشابه، فقط نمونه ی ۴ طبقه نشان داده شده است.

مقاومت کمتری نشان داده‌اند. در نمونه‌های مورد مطالعه، سختی اولیه‌ی دیوارهای پیش‌ساخته با اتصال اسلیو بین ۵۸/۳ تا ۸۵/۴۱ و با اتصال ورق بین ۷۷/۵ تا ۸۶/۱۵ درصد سختی اولیه‌ی دیوارهای مشابه یک‌پارچه است. از آنجا که تفاوت اصلی بین سیستم‌های یک‌پارچه و پیش‌ساخته‌ی بتنی در اتصالات آن‌هاست، لذا علت این اختلاف در سختی و مقاومت نهایی را می‌توان به اتصالات دیوارهای پیش‌ساخته‌ی بتنی نسبت داد. بنابراین باید توجه بیشتری در طراحی اتصالات دیوارهای برشی پیش‌ساخته داشت و با تقویت این قسمت‌ها بتوان مقاومت و سختی این دیوارها را بهبود بخشید.

- بست اسلیو در مقایسه با اتصال ورق، مقاومت بیشتری را برای دیوارهای پیش‌ساخته فراهم می‌کند. در نمونه‌های مورد مطالعه دیوارهای پیش‌ساخته با اتصال اسلیو بین ۸۶/۶ تا ۹۸/۷ و با اتصال ورق بین ۸۳/۶ تا ۹۴/۵ درصد مقاومت نهایی دیوارهای مشابه یک‌پارچه را کسب کرده‌اند.
- استفاده از اتصال ورق در دیوارهای پیش‌ساخته به علت تغییرشکل‌های بیشتر ورق نسبت به اسلیو باعث افزایش دوران پانل‌ها و در نتیجه تسریع در خردشدن بتن و کاهش تغییرشکل نهایی این دیوارها می‌شود.
- در دیوارهای پیش‌ساخته، ترک‌های خمشی به‌وجود نیامده است و ترک‌ها از نوع ترک‌های برشی هستند.

خمشی مشاهده نشده است و ترک‌ها از نوع ترک‌های برشی هستند. مود گسیختگی دیوارها در جدول ۶ ارائه شده است. منظور از حروف A، B و C به ترتیب خردشدن بتن و رسیدن کرنش فشاری قائم در بتن به حد ۰/۰۰۳۸، گسیخته‌شدن میلگردهای جوش در اتصال ورق به ازاا تنش مایسز ۳۵۰ مگاپاسکال، گسیخته‌شدن میلگردهای بت در اتصال ورق به ازاا تنش مایسز ۷۰۰ مگاپاسکال است.

۷. نتیجه‌گیری

- در این مطالعه، به بررسی و مقایسه‌ی رفتار چندین دیوار پیش‌ساخته با اتصالات مختلف و دیوارهای مشابه یک‌پارچه به کمک نرم‌افزار اجزاء محدود پرداخته شده است. بدین منظور چند نمونه دیوار ۴، ۶ و ۸ طبقه به صورت یکنواخت براساس اصول آیین‌نامه‌ی طراحی شده و در ادامه، عملکرد این دیوارها با توجه به نحوه‌ی اجرای آن‌ها (درجا و پیش‌ساخته) مورد بررسی قرار گرفته است. نتیجه‌ی مقایسه‌ها نشان داده است:
- دیوارهای پیش‌ساخته در مقایسه با دیوارهای یکپارچه‌ی مشابه، سختی اولیه و

پانویس‌ها

1. U-shaped flexure plate
2. slotted-bolted
3. Sleeve
4. embedded
5. adhesive
6. cohesive element

منابع (References)

1. 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*, **40**(4), pp. 78-96 (1995).
2. Soudki, K.A., Rizkalla, S.H. and Diakivv, R. "Horizontal connections for precast concrete shear walls subjected to cyclic deformations part 2: Prestressed connections", *PCI Journal*, **40**(5), pp. S2-96 (1995).
3. Schultz, A.E., Tadros, M., Huo, X. and Manga, R. "Horizontal resistance of vertical joints in precast shear walls", *Federation International de la Precontrainte (FIP), Proceeding of the 12th Congress*, **1**, pp. E23-E27 (1994).
4. Chakrabarti, S., Nayak, G. and Paul, D. "Shear characteristics of cast-in-place vertical joints in story-high precast wall assembly", *ACI structural Journal*, **85**(1), pp. 30-44 (1988).
5. Bora, C., Oliva, M.G., Nakaki, S. and Becker, R. "Development of a precast concrete shear-wall system requiring special code acceptance", *PCI Journal*, **52**(1), p. 122 (2007).
6. Henry, R.S., Aaleti, S., Sritharan, S. and Ingham, J.M. "Concept and finite-element modeling of new steel shear connectors for self-centering wall systems", *Journal of Engineering Mechanics*, **136**(2), pp. 220-229 (2009).
7. Yee, A.A., "Splice sleeve for reinforcing bars to another entity", *United States Patent*, No. 3540763 17 Nov. (1970).
8. Jansson, P.O. and Peter, O., *Evaluation of Grout-Filled Mechanical Splices for Precast Concrete Construction*, Michigan Department of Transportation Construction and Technology Division, Report No. R-1512 (May 2008).
9. Elliott, K.S., Jolly, C., "Multi-storey precast concrete framed structures", Wiley-Blackwell (2014).
10. ABAQUS Inc., *ABAQUS/ Theory and Standard User's Manual*, Version 6.8 (2009).
11. CEB-FIP Model Code 1990, *Comite Euro-International du Beton*, Thomas Telford, London (1998).
12. Kwan, A. and He, X. "Finite element analysis of effect of concrete confinement on behavior of shear walls", *Computers & Structures*, **79**(17), pp. 1799-1810 (2001).
13. NMB Splice Sleeve System User's Manual, *Splice Sleeve North America Inc.*, Irvine (2007).