

بررسی عددی رفتار دیوارهای پانلی سبک سه بعدی تحت بارگذاری جانبی افزایشنده

مهران زینلیان* (استادیار)

امید خواجه خباز (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده فنی و مهندسی، دانشکده عمران، دانشگاه اصفهان

علیرضا خواجه خباز (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده فنی و مهندسی، دانشکده عمران، دانشگاه پیام نور، تهران

مریم داعی (استادیار)
دانشکده فنی و مهندسی، دانشکده عمران، دانشگاه اصفهان

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۷ (دوره ۲ - شماره ۳، ص. ۸۳-۹۳، دریافت نشی)

در پژوهش حاضر، اثر پارامترهای مختلف، از جمله: نسبت ارتفاع به طول پانل، فاصله ی مفتول های تار و پود از یکدیگر، شکل هندسی بتن پاششی، زاویه ی برش گیرها در سیستم سازی پانل پیش ساخته ی سبک سه بعدی بررسی شده است. به همین منظور از تحلیل المان محدود غیرخطی با استفاده از نرم افزار آباکوس استفاده شده است. بیشینه ی ظرفیت باربری جانبی و بیشینه ی جابه جایی جانبی در راستای صفحه ی دیوارهای پانلی و همچنین مدهای گسیختگی آن ها، پارامترهای اصلی مورد استفاده جهت مقایسه ی دیوارها هستند. در مطالعه ی حاضر، به منظور تعیین منحنی تنش - کرنش و سایر مشخصات بتن پاششی، تعدادی آزمایش بر روی مغزه های بتن پاششی و همچنین آزمایش کشش ساده بر روی مفتول های فولادی انجام شده است. نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان می دهد که کاهش فاصله ی مفتول های تار و کاهش نسبت ارتفاع به طول پانل ها، باعث بالارفتن ظرفیت باربری جانبی می شود ولی کاهش فاصله ی مفتول های پود، افزایش ضخامت لایه ی بتن پاششی، تغییر شکل هندسی لایه ی بتن پاششی و تغییر زاویه ی برش گیرها تأثیر چشمگیری در افزایش ظرفیت باربری جانبی دیوارها ندارد.

m.zeynalian@eng.ui.ac.ir
omid_iau@yahoo.com
ali.mars68@yahoo.com
m.daei@eng.ui.ac.ir

واژگان کلیدی: سیستم پانل سبک سه بعدی، تحلیل استاتیکی غیرخطی، مطالعات المان محدود.

۱. مقدمه

پانل پیش ساخته ی سبک سه بعدی است. سیستم سازی مذکور با توجه به ضرورت کاهش وزن ساختمان ها و تأثیر آن در میزان نیروهای زلزله و همچنین اهمیت کاهش مصرف انرژی، یکی از سیستم های کارآمد در میان سیستم های سازی محسوب می شود. در این راستا، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی اقدام به تدوین نشریه ی ۳۸۵^[۱]، دستورالعمل طراحی، ساخت و اجرای سامانه های پانلی سه بعدی کرده است.

علی رغم ارائه ی مطالب ارزنده و ضوابط طرح و ساخت سیستم مذکور، این نشریه نیاز به توسعه و تکمیل در برخی زمینه ها به ویژه در زمینه ی ارائه ی ضوابط لازم برای طرح لرزه یی دارد. خاطرنشان می سازد امروزه در صنعت، دیوارهای پانلی پیش ساخته ی سبک سه بعدی هم به عنوان دیوارهای سازی باربر و هم به عنوان دیوار غیر باربر به عنوان دیوار جداکننده ی فضاها استفاده می شوند. در پژوهش حاضر، نقش دیوارهای پانلی پیش ساخته ی سبک سه بعدی، به عنوان دیوار باربر سازی مطالعه و بررسی شده است.

با توجه به رشد چشمگیر صنعت ساختمان در سال های اخیر و روش ساختمان سازی صنعتی با روش سنتی، تحول زیادی در صنعت ساختمان، از جمله: سبکی، مقاومت، یکپارچگی، عایق بودن، سرعت نصب و سهولت در اجرای آن ایجاد شده است. رشد سریع جمعیت و افزایش تقاضای مسکن، نیاز به کاهش زمان تحویل پروژه های عمرانی و کاهش زمان برگشت سرمایه و عواملی از این قبیل باعث شده اند تا ضرورت ایجاد تحول در شیوه های سنتی صنعت ساختمان روزه روز بیشتر شود. کشور ایران با توجه به داشتن شرایط اقلیمی خاص، قرار گرفتن بر روی کمربند لرزه یی و نیاز به تهیه ی مسکن زیاد، نیازمند این تحول است تا از مصالح بهینه و از سیستم ساختمانی صنعتی شده به منظور ساخت و ساز استفاده کند. یکی از سیستم های سازی که بسیاری از ویژگی های ساختمان های صنعتی را دارد، سیستم

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۷/۲۶، اصلاحیه ۱۳۹۵/۱۲/۱۴، پذیرش ۱۳۹۵/۱۲/۲۲

DOI:10.24200/J30.2019.1452

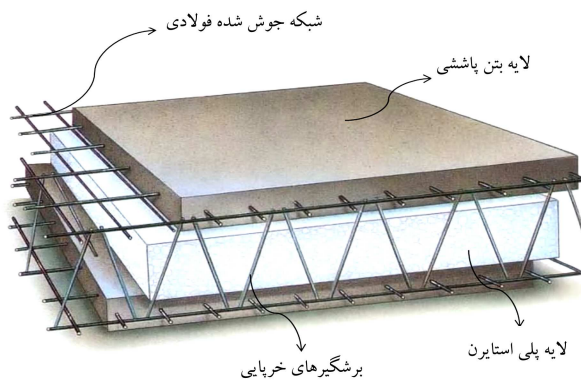
۲. معرفی پانل پیش ساخته‌ی سبک سه بعدی

سیستم پانل پیش ساخته‌ی سبک سه بعدی از هسته‌ی عایق پلی استایرن منبسط شده (EPS) با ضخامت ۴۰ تا ۱۰۰ میلی متر به همراه دو شبکه‌ی فلزی در طرفین هسته‌ی عایق که به وسیله‌ی مفتول‌های فولادی مورب به یکدیگر متصل شده‌اند، تشکیل شده است و یک شبکه‌ی فلزی سه بعدی را تشکیل می‌دهند. این قطعات پس از انتقال به محل احداث ساختمان، به یکدیگر متصل و از دو طرف به آن‌ها بتن پاشیده می‌شود. از تلفیق پانل و بتن، سازه‌ی ساختمان حاصل می‌شود. شکل ۱، نمونه‌ی از پانل سه بعدی را نشان می‌دهد.

شبکه‌ی جوش شده از اتصال مفتول‌های فولادی سرد کشیده شده تشکیل شده است که به صورت عمود بر هم و با جوش مقاومتی به یکدیگر متصل شده‌اند. در سیستم مذکور از برش‌گیرهایی استفاده می‌شود که مانند یک عضو خرپایی فولادی عمل می‌کنند. اعضای خرپایی توسط جوش مقاومتی به دو لایه‌ی شبکه‌ی جوش شده متصل می‌شوند. مطابق با نشریه‌ی ۳۸۵، شبکه‌ی جوش از مفتول‌هایی به نام تارو بود ساخته شده است که تار، مفتول‌های طولی و در راستای ارتفاع دیوار و بود، مفتول‌های عمود بر تار در شبکه‌ی جوش هستند که در راستای طول دیوار است. سطح حاصل از تقاطع دو مفتول تارو بود در شبکه‌ی جوش شده را چشمه‌ی شبکه می‌نامند. هسته‌ی عایق در سیستم مذکور، مابین شبکه‌ی جوش شده است، که به صورت صفحات یک پارچه با ضخامت معین در پانل قرار می‌گیرد و برش‌گیرها از میان آن عبور داده می‌شوند. صفحه‌ی که به صورت فرضی بر صفحه‌ی هسته‌ی عایق عمود است و برش‌گیرها در آن قرار گرفته‌اند و مفتول‌های تار نیز در آن صفحه واقع هستند، را صفحه‌ی برش‌گیر می‌نامند. پس از ایجاد شبکه‌ی مذکور، بتنی که با طرح اختلاط مخصوصی تهیه می‌شود، بدون نیاز به قالب بندی به وسیله‌ی روش بتن پاششی به سطح ایجاد شده پاشیده می‌شود و یک سطح صلب و یک پارچه را ایجاد می‌کند.

در مورد سیستم پانلی، مطالعات فراوانی انجام شده است که در اینجا به برخی از آن‌ها اشاره شده است: در سال ۲۰۱۲، رفتار دیوارهای پانلی با اتصالات برشی غیرخرپایی تحت بارگذاری فشاری در مرکز پانل و همچنین بارگذاری خارج از مرکز، بررسی و آزمایش‌های فشاری بر روی دیوارهای پانلی با ابعاد واقعی و با ضریب لاغری‌های مختلف انجام شد و این نتایج به دست آمد که در هر دو مورد، یعنی پانل تحت بار محوری و بار خارج از مرکز، بار نهایی با افزایش ضریب لاغری کاهش می‌یابد.^[۲]

در یک مطالعه‌ی عددی (۲۰۱۳)،^[۳] نیز در بررسی رفتار کششی تک محوری،



شکل ۱. جزئیات پانل پیش ساخته‌ی سبک سه بعدی.

رفتار برشی و رفتار خمشی پانل‌های پیش ساخته‌ی سبک سه بعدی به روش المان محدود، ۶ نمونه پانل بدون برش‌گیر و ۶ نمونه پانل با برش‌گیر و با زاویه‌های متفاوت به صورت عددی مدل سازی شدند و سپس کشش تک محوری، خمش، سختی و مقاومت برشی آن‌ها ارزیابی شد و نتایج به دست آمده نشان داد که برش‌گیرها، کشش و سختی برشی را بهبود می‌بخشند ولی افزایش سختی خمشی با وجود برش‌گیرهای مذکور، آن‌چنان زیاد نبوده است. علاوه بر این، سختی برشی و کششی به طور قابل توجهی وابسته به زاویه‌ی برش‌گیرها هستند و بهترین زاویه، ۴۵° پیشنهاد شد. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش زاویه‌ی برش‌گیرها، سختی کششی پانل‌های پیش ساخته به طور قابل ملاحظه‌ی افزایش می‌یابد و با زاویه‌ی ۹۰° به مقدار بیشینه‌ی خود می‌رسد.

همچنین در پژوهش دیگری (۲۰۱۲)،^[۴] سه برنامه‌ی آزمایشی متفاوت برای تعیین تأثیر تکیه‌گاه‌ها و شرایط بارگذاری مختلف در رفتار خمشی پانل‌های پیش ساخته‌ی سه بعدی با اتصالات برشی قائم (اتصالات غیرخرپایی) در نظر گرفته شد و بررسی‌های انجام شده بر روی عملکرد خمشی پانل‌های سه بعدی با اتصالات خرپایی نشان می‌دهد که عملکرد آن‌ها بیشتر به تعداد، فاصله و مشخصات مکانیکی اتصالات مذکور وابسته است؛ و آن‌ها در مقاومت برشی پانل نقش به سزایی دارند. برای انجام آزمایش‌ها، دال‌هایی با مقیاس کامل با شرایط تکیه‌گاهی مختلف در دوانتها، تحت بار متمرکز و گسترده قرار گرفتند و نتیجه‌گیری شد که با رسیدن زاویه‌ی بین اتصالات و لایه‌ها به ۹۰° درجه، ظرفیت خمشی و سختی پانل‌ها کاهش می‌یابد. همچنین گسیختگی دال‌ها مربوط به تغییر شکل‌های بیش از حد اتصالات است که ظرفیت برشی آن‌ها را کاهش می‌دهد.

در مطالعات دیگری (۲۰۱۱)،^[۵] نیز رفتار ۱۰ دیوار پانلی منفرد با بازشو و بدون بازشو در مقیاس کامل و تحت بارهای افقی و قائم به صورت آزمایشگاهی ارزیابی شد، تا رفتار دیوارهای طره‌ی و دیوارهای با دو انتهای گیردار مقاوم در برابر بار جانبی بررسی شود، و نتیجه‌گیری شد که در میان پانل‌های مورد آزمایش در کل ۵۰٪، ۳۵٪ و ۱۵٪ تغییر شکل کل در گسیختگی به ترتیب به تغییر شکل‌های خمشی، برشی، و چرخش انتهای گیردار در محل تقاطع دیوار و سقف اختصاص دارد که این مقادیر برای دیوارهای بازشودار اندکی تغییر می‌کند. با مقایسه‌ی نمودار سختی در برابر نسبت تغییر شکل مشخص شد که حضور بازشو در دیوارها باعث کاهش سختی اولیه می‌شود. سختی دیوارهای تحت آزمایش با دو انتهای گیردار نسبت به دیوارهای طره‌ی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. افزایش سختی اولیه به ترتیب ۴۰٪ و ۶۲٪ برای بار محوری به ترتیب ۱۵° و ۳۰° کیلونیوتن است. افزایش دهانه‌ی پانل از ۳ به ۴ متر، باعث افزایش مقاومت پانل در حدود ۵۰٪ می‌شود و افزایش بار محوری قائم از ۱۵° به ۳۰° کیلونیوتن، باعث افزایش مقاومت در حدود ۲۰٪ برای بیشتر پانل‌ها می‌شود.

با توجه به اینکه مقاومت پانل‌های سه بعدی بیشتر بستگی به اتصالات برشی بین دو لایه‌ی بتن دارد و لایه‌ی پلی استایرن در برش بسیار ضعیف است و هیچ گونه سهمی در مقاومت برشی اتصالات برشی ندارد؛ بنابراین برخی پژوهشگران (۲۰۱۴)،^[۶] از بتن سبک هوادار^۲ به عنوان هسته‌ی عایق به جای لایه‌ی پلی استایرن در ساخت پانل‌های سه بعدی استفاده کرده‌اند تا تأثیر آن در انتقال برش بین لایه‌های پانلی را بررسی کنند. لذا پانل با مقیاس کامل با ابعاد $1000\text{ mm} \times 3000\text{ mm}$ با استفاده از هسته‌ی پلی استایرن و همچنین بتن هوادار سبک تهیه شدند و با اتصال‌های برشی مختلف تحت بارگذاری خمشی ۴ نقطه‌ی قرار گرفتند. نتایج به دست آمده نشان داد که استفاده از هسته‌ی داخلی بتن سبک هوادار، عملکرد پانل را از لحاظ سختی و گسیختگی بهبود می‌بخشد. پانل‌های ساخته شده با بتن سبک هوادار تا لحظه‌ی

۳. مشخصات مصالح و نحوه معرفی به نرم افزار

۱.۳. بتن معمولی

برای ایجاد امکان توزیع بار به صورت یکنواخت به دیوار و جلوگیری از تمرکز تنش در محل اعمال بار از یک تیر بتن آرمه‌یی در بالای دیوار استفاده شده است. این تذکر لازم است که در مطالعه‌ی حاضر، منحنی رفتار بتن به صورت غیرخطی به نرم افزار آباکوس معرفی شده است؛ که ابتدا به صورت خطی، و سپس به صورت غیرخطی بوده است. در بخش خطی دو پارامتر مدول کشسانی و ضریب پواسون به نرم افزار معرفی شده است. ضریب پواسون و مدول کشسانی برای بتن را می‌توان از روابط تجربی موجود در آیین‌نامه‌های مختلف و یا از منحنی تنش - کرنش حاصل از آزمایش فشاری تک محوره بر روی نمونه‌ی ۲۸ روزه با محاسبه‌ی شیب در قسمت خطی به دست آورد. مهم‌ترین بخش در تعریف رفتار بتن به نرم افزار، معرفی رفتار غیرخطی آن است، که در پژوهش حاضر از مدل کشسانی آسیب‌دیده‌ی بتن^۶ استفاده شده است که در پژوهشی در سال ۱۹۹۸،^[۱۲] پیشنهاد شده است. مکانیزم خرابی در مدل مذکور بر مبنای ترک خوردگی ناشی از کشش و خردشدگی ناشی از فشار در نظر گرفته شده است. مدل آسیب‌دیده‌ی خمیری بتن، پیچیده‌ترین و پرکاربردترین مدل ساختاری در نرم افزار آباکوس است و برای حالت‌هایی که بتن تحت بارگذاری دلخواه باشد، استفاده می‌شود. مدل ساختاری مذکور در هر دو روش صریح^۷ و ضمنی^۸ قابل استفاده است و قابلیت شبیه‌سازی رفتار چرخه‌یی بتن را نیز به خوبی دارد و همچنین اثر کاهش سختی کشسان را در نتیجه‌ی کرنش‌های خمیری و همچنین اثر بازیابی سختی^۹ در مدل‌سازی‌های با بارهای چرخه‌یی لحاظ می‌کند. با توجه به اینکه در مدل آسیب‌دیده‌ی خمیری بتن، خصوصیات بتن در کشش و فشار به صورت مجزا برای برنامه قابل تعریف است و اثر کاهش سختی و بازیابی سختی در بارگذاری‌های چرخه‌یی را دارد؛ بنابراین مطابق بیشتر نوشتارهای معتبر، که برای شبیه‌سازی بتن از نرم افزار آباکوس استفاده کرده‌اند، از مدل آسیب‌دیده‌ی خمیری بتن استفاده شده است.^[۱۳]

بنابراین در پژوهش حاضر نیز برای مدل‌سازی بتن معمولی تیر بالای دیوارهای پانلی سه بعدی نیز از مدل آسیب‌دیده‌ی خمیری بتن استفاده شده است. برای تعیین رفتار فشاری بتن در نرم افزار آباکوس باید یک منحنی تنش - کرنش به آن معرفی کرد، که این نمودار معمولاً براساس نتایج حاصل از آزمایش فشاری تک‌محوره تعیین می‌شود. در صورتی که اطلاعات این نمودار در دسترس نباشد، می‌توان از روابطی که توسط برخی پژوهشگران تعیین شده است، استفاده کرد. یکی از پرکاربردترین روابط مذکور، رابطه‌ی ارائه‌شده‌ی هاگنستاد^{۱۰} است (رابطه‌ی ۱)،^[۱۴] که در پژوهش حاضر نیز استفاده شده است.^[۱۴]

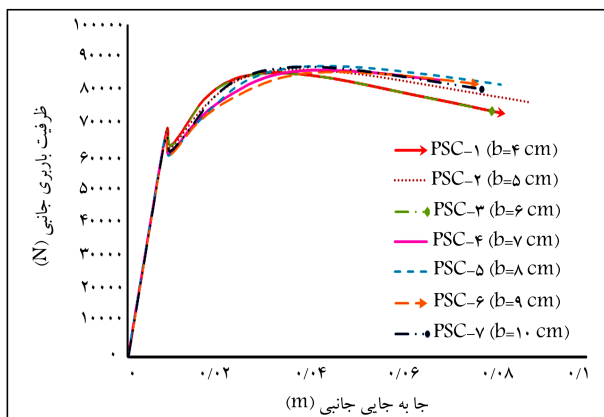
$$f_c = f_c'' \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_c} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c} \right)^2 \right] \quad (1)$$

که در آن، f_c' از رابطه‌ی $f_c' = k_s \times f_c''$ به دست می‌آید و بیان‌کننده‌ی بیشینه‌ی تنش فشاری است که در اعضاء بتنی می‌تواند ایجاد شود. ضریب k_s در قطعات خمشی برای بتن‌هایی که مقاومت فشاری استوانه‌یی آن‌ها برابر ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و مساوی و یا بزرگ‌تر از ۳۵ مگاپاسکال است، به ترتیب برابر ۱، ۰/۹۷، ۰/۹۵، ۰/۹۳ و ۰/۹۲ در نظر گرفته می‌شود. در رابطه‌ی ۱، مقدار ε_c از رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید که در آن E_C مدول کشسانی بتن است که آیین‌نامه‌ی بتن آمریکا،^[۱۵] مقدار آن با وزن مخصوص $\frac{k_g}{m^3}$ ۲۴۰۰ را بر حسب مگاپاسکال مطابق رابطه‌ی ۳ پیشنهاد می‌کند. مقدار ε_c معمولاً ۰/۰۰۲ در نظر گرفته می‌شود. همچنین در رابطه‌ی ۳، ε_c

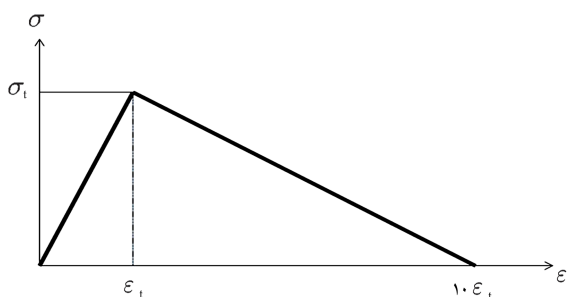
گسیختگی رفتار کامپوزیتی کامل از خود نشان دادند. برخلاف پانل‌ها با هسته‌ی پلی‌استایرن که یک گسیختگی ناگهانی به محض گسیختگی اتصالات برشی در آن‌ها ایجاد می‌شود، پانل‌ها با هسته‌ی بتن سبک هوادار قادر به تحمل بار مربوط به گسیختگی ناگهانی پانل‌ها با هسته‌ی پلی‌استایرن پیش از گسیختگی نهایی هستند. در کل لایه‌ی بتن سبک هوادار نسبت به پلی‌استایرن، دوام بیشتری برای پانل‌های سه بعدی ایجاد می‌کند، ولی وزن آن‌ها را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. همچنین در مطالعه‌ی دیگری بر روی پانل‌های سه بعدی (۲۰۱۵)،^[۷] رفتار کامپوزیتی و غیرکامپوزیتی پانل‌های مذکور تحت بارگذاری خمشی گسترده بررسی شد و با توجه به اینکه اتصال‌های برشی، تأثیر به‌سزایی در مقاومت خمشی پانل‌های سه بعدی دارند و عملکرد آن‌ها از لحاظ میزان رفتار کامپوزیتی و غیرکامپوزیتی وابسته به اتصال‌هاست، لذا از روش برش مستقیم برای ارزیابی مقاومت برشی اتصال‌ها با روش المان محدود در نرم افزار آباکوس^{۱۱} استفاده شد و برای مدل کردن پانل و ارزیابی مقاومت برشی اتصال‌ها در نرم افزار آباکوس، سه لایه‌ی بتن، دو اتصال برشی، و دو لایه‌ی پلی‌استایرن در نظر گرفته شد و همچنین برای هر اتصال از قیود چندنقطه‌یی^{۱۲} استفاده شد. نتایج به دست آمده ثابت کرد که مدل‌سازی اتصال‌ها به روش مذکور می‌تواند روش مناسبی برای شبیه‌سازی رفتار واقعی اتصال‌های برشی و تعیین مقاومت برشی اتصال‌ها در پانل‌های سه بعدی باشد. اتصال‌های مذکور در دو حالت عملکرد کامپوزیتی و غیرکامپوزیتی مدل شدند و نتایج آن‌ها نشان داد که مقاومت برشی بسیار کمی در نتیجه‌ی استفاده از اتصال‌های غیرکامپوزیتی ایجاد می‌شود. پس از آن پانل‌های سه بعدی افقی هم با عملکرد کامپوزیتی و هم با عملکرد غیرکامپوزیتی به صورت عددی در نرم افزار المان محدود مدل‌سازی شدند، که اتصال‌های آن با روش مذکور مدل شد و تحت بار خمشی به صورت بار گسترده‌ی یکنواخت قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که رفتار پانل‌ها با اتصال‌های کامپوزیتی بسیار متفاوت با پانل‌ها با اتصال‌های غیرکامپوزیتی است، به طوری که توزیع تنش در پانل‌ها با اتصال‌های کامپوزیتی به صورت یکنواخت بود، ولی در پانل‌ها با اتصال‌های غیرکامپوزیتی، هر لایه به صورت مجزا عمل می‌کند.

در پژوهش دیگری (۲۰۱۲)،^[۸] نیز به بررسی رفتار دینامیکی یک قاب خمشی بتنی ترکیب‌شده با سیستم پانل سه بعدی پرداخته شده است. به همین منظور یک ساختمان سه طبقه با مقیاس ۱ به ۲/۳۵ ساخته و بر روی میز لرزان آزمایش شد. اولین طبقه در ساختمان سه طبقه‌ی مذکور، سیستم قاب خمشی است، ولی دو طبقه‌ی بالای آن با سیستم پانل سه بعدی ساخته شده است. برای بررسی بیشتر، یک مدل المان محدود با استفاده از نرم افزار آباکوس،^[۹] تهیه شد و مشخصات لرزه‌یی مدل، نظیر: بسامد طبیعی، برش طبقات، و رفتار هیستریزس تحت زلزله‌های ال‌سنتر^{۱۳} و ناغان مطالعه شد و نتایج نشان داد که سیستم پانل سه بعدی، مقاومت قابل توجهی در برابر زلزله‌های اعمال شده دارد و سازه تحت تحریک‌های لرزه‌یی با شدت متوسط در ناحیه‌ی کشسان می‌ماند، ولی در زمین‌لرزه‌های با شدت زیاد، تعدادی ترک در انتهای ستون‌ها و اتصال‌های تیر به ستون در طبقه‌ی اول ایجاد می‌شود.

در مطالعات دیگری^[۱۴] نیز بر روی سیستم سازه‌یی پانل سه بعدی در سال ۱۹۸۹، مقادیر پارامترهای عملکرد لرزه‌یی، شامل: ضریب رفتار، ضریب کاهش شکل‌پذیری، و ضریب مقاومت افزون برای ساختمان‌های یک و دو طبقه‌ی ساخته شده با سیستم سازه‌یی مذکور مطابق با روند آیین‌نامه‌ی FEMA P۶۹۵،^[۱۱] به دست آورده شد. مقادیر ضریب رفتار، ضریب کاهش شکل‌پذیری، و ضریب مقاومت افزون مطابق با آیین‌نامه‌ی FEMA P۶۹۵ به ترتیب برابر ۳/۵، ۱/۴ و ۲/۵ به دست آمده است.



شکل ۴. منحنی تنش - کرنش بتن تحت کشش [۹]



شکل ۵. مدل پیشنهادی برای منحنی تنش - کرنش کششی بتن توسط نرم افزار آباکوس [۹]

نمی شود، بلکه در اثر درگیری داخلی دانه ها و قفل شدن در هم آن ها و همچنین اصطکاک بین دانه های، قابلیت انتقال بار را پیدا می کند که به این خاصیت بتن، سختی پس از ترک خوردگی و یا سخت شدگی کرنش ϵ_1 گویند.

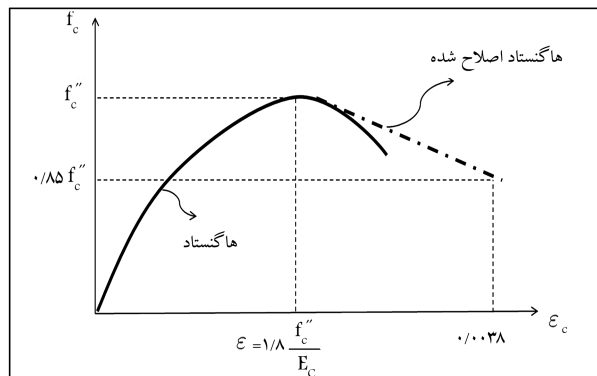
$$\sigma_{t_0} = 0.7\sqrt{f'_c} \quad (4)$$

نرم افزار آباکوس برای معرفی منحنی تنش - کرنش بتن تحت کشش، ناحیه ی قبل از ترک خوردگی را به صورت خطی در نظر می گیرد و کاربر باید ناحیه ی پس از ترک خوردگی که معرف آثار سخت شدگی کششی است، را بر حسب کرنش ترک خوردگی معرفی کند. روش های مختلفی برای معرفی سختی پس از ترک خوردگی توسط پژوهشگران مختلف ارائه شده است، که در مطالعه ی حاضر، مطابق با شکل ۵ از روش پیشنهادی نرم افزار آباکوس استفاده شده است.

در مدل مذکور، رفتار بعد از ترک خوردگی بتن به صورت خطی فرض شده است و کرنش کششی نهایی تا $10\epsilon_1$ برابر کرنش ترک خوردگی (ϵ_{t_0}) ادامه پیدا می کند که براساس رابطه ی ۵ تعیین می شود:

$$\epsilon = 10 \times \frac{\sigma_{t_0}}{E_c} = 10 \times \frac{0.7\sqrt{f'_c}}{4700\sqrt{f'_c}} = 0.0015 \quad (5)$$

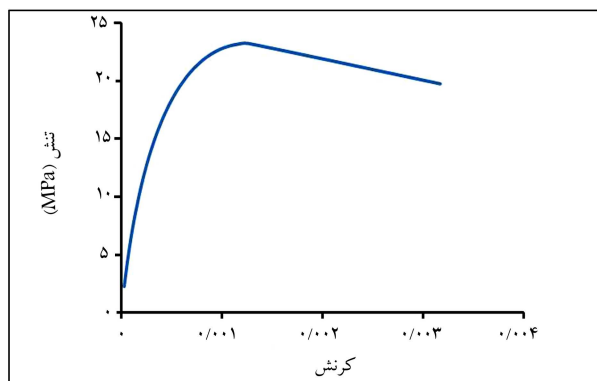
هر چه اندازه ی کرنش مذکور بیشتر باشد، به منزله ی آن است که از ظرفیت بتن بعد از ترک خوردگی بیشتر استفاده می شود. در مطالعه ی حاضر، برای مدل صحت سنجی، مقدار مقاومت کششی و مدول کشسانی بتن مقالات موجود [۱۶] انتخاب شده است و با استفاده از رابطه ی ۵، مقدار کرنش نهایی کششی بتن برابر 0.0005692 حاصل شده است. با توجه به کوچک بودن عدد مذکور، امان های بتن در کرنش های کوچک دچار ترک خوردگی می شوند.



شکل ۶. نمودار تنش - کرنش بتن با رابطه ی ارائه شده ی هاگنستاد [۱۴]

جدول ۱. مشخصات مکانیکی بتن معمولی.

ضریب پواسون	وزن حجمی	مدول کشسانی	مقاومت (MPa)
۰٫۲	۲۴۰۰ (kg/m ^۳)	۲۳٫۵ (Gpa)	۲۵
		کششی	فشاری



شکل ۳. منحنی تنش - کرنش بتن معمولی در قسمت خمیری.

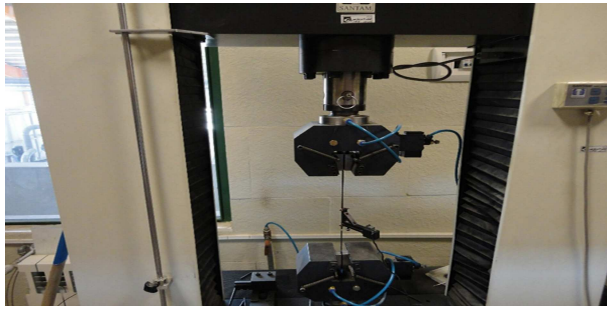
کرنش بتن است، که برای بتن های معمولی، تا 0.0038 در نظر گرفته می شود [۱۴].

$$\epsilon_0 = 1.8 \frac{f'_c}{E_c} \quad (2)$$

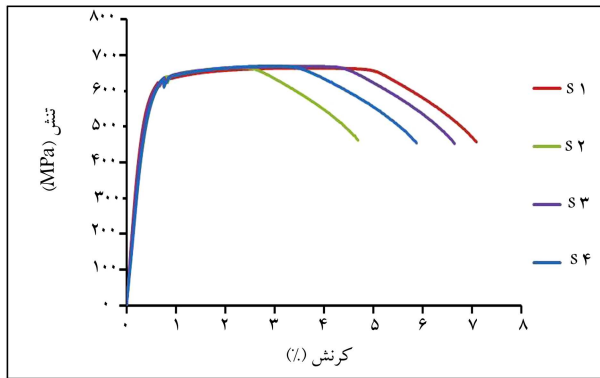
$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \quad (3)$$

رابطه ی ۱، یک سهمی ایجاد می کند که به منحنی هاگنستاد معمولی معروف است. مطابق شکل ۲، در صورتی که شاخه ی نزولی سهمی هاگنستاد با یک خط از نقطه ی (ϵ_0, f'_c) به نقطه ی $(\epsilon_u, 0.85 f'_c)$ جایگزین شود، منجر به ایجاد نتایج بهتر در محاسبات می شود که به این حالت، منحنی هاگنستاد اصلاح شده گفته می شود. مشخصات مکانیکی بتن تیر بالای دیوار پانلی مطابق جدول ۱ و منحنی هاگنستاد اصلاح شده ی آن در قسمت خمیری مطابق شکل ۳ است.

بر خلاف منحنی تنش - کرنش فشاری بتن، منحنی تنش - کرنش کششی آن به راحتی قابل دسترس نیست. بنابراین فقط می توان مقاومت کششی آن را از طریق آزمایش تعیین کرد. در صورت عدم دسترسی به نتایج آزمایش می توان از رابطه ی ۴ استفاده کرد که مقاومت کششی بتن معمولی در جدول ۱ نیز از آن به دست آمده است. شکل ۴، منحنی تنش - کرنش ایده آل سازی شده ی بتن را تحت کشش نشان می دهد. منحنی در ابتدا به صورت خطی و با شیبی برابر با همان مدول کشسانی بتن تحت فشار ادامه می یابد؛ ولی بعد از ترک خوردگی، سختی به صورت ناگهانی صفر



شکل ۸. آزمایش کشش تک محوره بر روی مفتول فولادی.



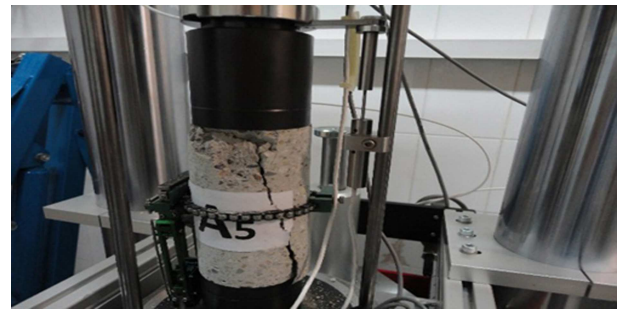
شکل ۹. منحنی های تنش - کرنش کشش تک محوره ی مفتول های فولادی.

که در آن، S_2 تنش متناظر با ϵ_2 ۴۰٪ تنش نهایی، S_1 تنش متناظر با کرنش محوری برابر 0.00050 و 0.00050 کرنش متناظر با تنش S_2 است. برای به دست آوردن ضریب پواسون مغزه های بتن پاششی از کرنش سنج های محیطی و محوری استفاده شده است که نسبت کرنش جانبی به کرنش فشاری محوری به عنوان ضریب پواسون شناخته می شود. به منظور تعیین مقاومت کششی بتن پاششی، از آزمایش برزیلی بر روی ۳ نمونه ی استوانه یی استاندارد استفاده شده است. میانگین مقاومت کششی نمونه های مورد آزمایش در حدود ۹٪ مقاومت فشاری آن ها به دست آمد. مقاومت کششی ارائه شده در جدول ۲ بر همین اساس است. این تذکر لازم است که می توان برای تعیین مقاومت کششی مغزه های بتن پاششی از رابطه ی ۴ نیز استفاده کرد.

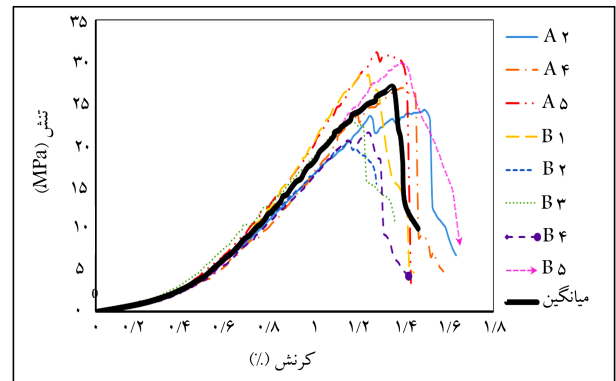
۳.۳. مفتول های فولادی

به منظور به دست آوردن منحنی تنش - کرنش و سایر خصوصیات مکانیکی مفتول های مورد استفاده در پانل های پیش ساخته ی سبک سه بعدی، بر روی ۴ مفتول فولادی با قطر ۳/۵ میلی متر، آزمایش کشش تک محوره مطابق شکل ۸ انجام شده است. نتایج آزمایش کشش تک محوره به صورت منحنی های تنش - کرنش مطابق شکل ۹ به دست آمده است.

خاطرنشان می سازد که مفتول های مورد استفاده و آزمایش شده از نوع سرد کشیده هستند که معمولاً نسبت به آرماتورهای فولادی معمولی مقاومت بالاتری دارند. رفتار مفتول های مذکور با توجه به نوع ساخت آن ها نسبت به سایر آرماتورها متفاوت است و تفاوت در شکل ظاهری نمودار تنش - کرنش آن ها با منحنی های استاندارد فولاد نیز بیانگر همین موضوع است. به منظور معرفی رفتار کششی مفتول ها به نرم افزار آبا کوس، برای آنالیزهای عددی دیوارهای پانلی از منحنی تنش - کرنش S_2 که به میانگین ۴ منحنی نزدیک است، استفاده شده است.



شکل ۶. آزمایش مقاومت فشاری تک محوره بر روی مغزه های بتن پاششی.



شکل ۷. منحنی های تنش - کرنش مغزه های بتن پاششی.

جدول ۲. مشخصات مکانیکی بتن پاششی.

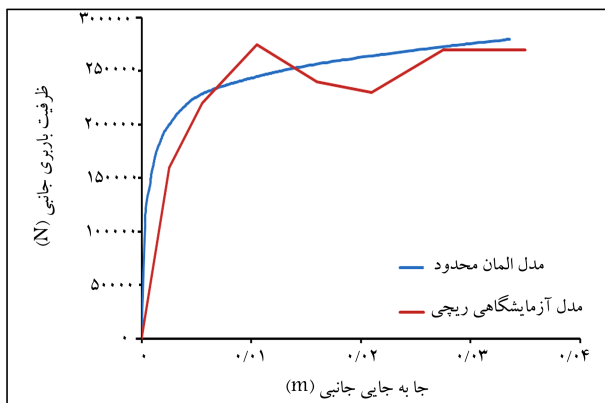
کرنش کششی نهایی	ضریب پواسون	مدول کشسانی (Gpa)	مقاومت فشاری (MPa)
۰/۰۱۷	۰/۱۷	۱/۴	۲۶/۵

۲.۳. بتن پاششی

با توجه به تفاوت های موجود در بتن پاششی و بتن معمولی، از جمله: استفاده از ریزدانه ها به عنوان سنگ دانه و عدم استفاده از درشت دانه ها و همچنین ضخامت کم بتن پاششی، ضروری است که مطالعه و پژوهش بیشتری بر روی خواص این نوع بتن انجام پذیرد. بنابراین در پژوهش حاضر، با انجام آزمایش بر روی مغزه های بتن پاششی مطابق شکل ۶، منحنی های تنش - کرنش آن ها مطابق شکل ۷ و با مشخصات مکانیکی جدول ۲ به دست آمد و به نرم افزار معرفی شد. این تذکر لازم است که برای آزمایش مقاومت فشاری مغزه ها از دو جعبه ی فلزی $150 \times 600 \times 600$ میلی متر برای پاشش بتن درون آن ها، یک بار در حالت افقی و یک بار در حالت قائم برای تعیین تأثیر جهت پاشش بتن استفاده شده است، که تعداد ۸ مغزه از جعبه های مذکور گرفته شده است، و مغزه های گرفته شده از جعبه ی افقی و ایستاده به ترتیب با A و B نشانه گذاری شده اند.

خاطرنشان می سازد که کرنش کششی نهایی بتن پاششی براساس رابطه ی ۵ به دست آمده است. مدول ارتجاعی مغزه های بتن پاششی با توجه به شکل منحنی تنش - کرنش آن ها به روش مدول ارتجاعی سکانتی یا وتری و طبق روش آیین نامه ی ASTM C ۴۶۹^[۱۷] از رابطه ی ۶ به دست آمده است.

$$E = \frac{(S_2 - S_1)}{(\epsilon_2 - 0.00050)} \quad (6)$$



شکل ۱۱. صحت‌سنجی مدل المان محدود و مدل آزمایشگاهی دیوار پانلی.

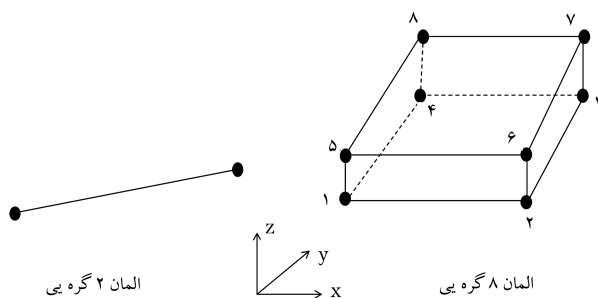
۶. مطالعات پارامتری المان محدود بر روی دیوارهای پانلی

در بخش حاضر با استفاده از اطلاعات به‌دست‌آمده از مطالعات آزمایشگاهی بر روی مغزه‌های بتن پاششی و آزمایش کششی مفتول‌های فولادی و همچنین تئوری حالت خمیری و پارامترهای لازم برای تعریف دیوار پانلی در نرم‌افزار آباکوس، به مدل‌سازی آن پرداخته شده است تا تأثیر پارامترهای مختلف در رفتار دیوارهای پانلی بررسی شود.

۱.۶. پارامتر A: اثر نسبت ارتفاع به طول دیوار پانلی ($\frac{H}{L}$)

برای بررسی پارامتر A و اثر آن در ظرفیت باربری و تغییرمکان جانبی دیوارهای پانلی، ۹ عدد دیوار پانلی در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شدند و در تمام آن‌ها، قطر مفتول‌های تار، پود، و برش‌گیرها $3/5mm$ ، فواصل مفتول‌های تار و پود $7/5cm$ ، ضخامت لایه‌ی بتن پاششی $4cm$ ، فاصله‌ی دو شبکه‌ی جوش‌شده $1/4cm$ ، ضخامت کل پانل‌ها $18cm$ و از برش‌گیرهای عمود بر شبکه‌ی جوش استفاده شده است. ارتفاع دیوار پانلی متناسب با ارتفاع سازه‌های مسکونی متعارف و برابر $3m$ و طول آن‌ها از $1m$ (دیوار پانلی ۱-PSA) تا $3m$ (دیوار پانلی ۹-PSA) و با فواصل $25cm$ در نظر گرفته شده است. در تمام نمونه‌های مذکور از مدل‌کردن لایه‌ی پلی‌استیرین به دلیل طولانی کردن زمان حل و همچنین ظرفیت باربری جانبی ناچیز آن صرف‌نظر شده است. در بالای دیوار، یک تیر بتن‌آرمه با طول متناسب با طول دیوار پانلی و به ارتفاع $25cm$ و عرض متناسب با عرض دیوار و با مشخصات مکانیکی بتن معمولی با مشخصات جدول ۲ برای جلوگیری از تمرکز تنش و شبیه‌سازی دیافراگم صلب سقف در سازه تعبیه شده است. بتن معمولی مطابق با روش هاگنستاد اصلاح‌شده برای دیوار پانلی مدل‌سازی و منحنی تنش - کرنش آن در شکل ۳ ارائه شده است. تکیه‌گاه در پایین پانل‌های سه بعدی به صورت گیردار و در بالای پانل طوری تعبیه شده است که حرکت در جهت اعمال بار جانبی آزاد باشد. نوع آنالیز، استاتیکی غیرخطی^{۱۵} و بارگذاری بر روی دیوارها به صورت تغییرمکان کنترل و در راستای صفحه‌ی پانل بود، به طوری که تغییرمکان جانبی به صورت افزایشی به بالای پانل اعمال شود. شکل ۱۲، نمونه‌هایی از دیوارهای پانلی مدل‌سازی شده در نرم‌افزار مذکور را با نسبت ارتفاع به طول‌های مختلف نشان می‌دهد.

پس از آنالیز دیوارهای پانلی تحت بارگذاری جانبی، نتایج آن به صورت نمودارهای ظرفیت باربری جانبی در برابر تغییرمکان جانبی به دست آمد که در شکل ۱۳ ارائه



شکل ۱۰. المان‌های مورد استفاده در نرم‌افزار آباکوس.^[۹]

جدول ۳. مقایسه‌ی نتایج مدل المان محدود با مدل آزمایشگاهی.

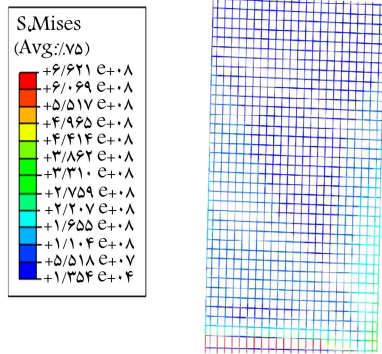
بیشینه‌ی	مقاومت (کیلو نیوتن)	جابجایی (میلی متر)	نمونه‌ی آزمایشگاهی
	۲۷۵	۳۵	مدل اجزاء محدود
	۲۷۸	۳۲	اختلاف
	٪۱	-٪۸٫۵	

۴. نوع حل‌گر^{۱۲} و المان‌های مورد استفاده در نرم‌افزار

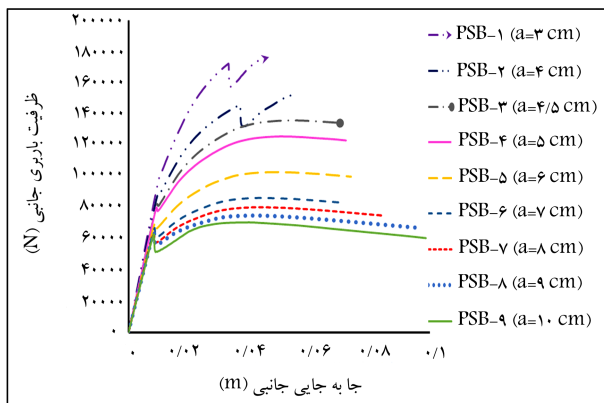
روش حل عددی مورد استفاده در مطالعه‌ی حاضر، روش نیوتن - رافسون^{۱۳} با تحلیل استاتیکی است که تحت گزینه‌ی Static General در نرم‌افزار آباکوس معرفی می‌شود. نرم‌افزار مذکور در روش حل عددی نیوتن - رافسون، زمان بارگذاری را به تعداد زیادی بازه تقسیم‌بندی می‌کند که در هر بازه یک یا چند نمونه صورت می‌گیرد و در صورتی که به وضعیت تعادل در آن بازه برسد، تکرار را قطع می‌کند و به بازه‌ی بعدی می‌رود. نرم‌افزار مذکور این روش را آن قدر تکرار می‌کند تا زمان کل بارگذاری به اتمام برسد. علت انتخاب روش حل عددی نیوتن - رافسون، هم‌گرایی زودرس حل نسبت به سایر روش‌هاست، که بیشتر پژوهشگران برای مدل‌سازی‌های عددی از آن استفاده می‌کنند. المان مورد استفاده برای بتن در نرم‌افزار آباکوس، المان ۸ گره‌ی مکعبی ۳D Stress و یا به اختصار C3D8R است. انتگرال‌گیری این المان به روش گوس^{۱۴} انجام می‌شود. برای میلگردهای مفتولی مطابق شکل ۱۰ از المان خرپایی T3D2 استفاده شده است که یک المان دو گره‌ی با تغییرشکل خطی است.

۵. صحت‌سنجی

برای صحت‌سنجی مدل المان محدود از یک مدل آزمایشگاهی (۲۰۱۳)،^[۱۶] استفاده شده است که برای بررسی رفتار لرزه‌ی دیوارهای پانلی پیش‌ساخته‌ی سبک سه بعدی تحت بارهای جانبی و با ثابت نگه داشتن بار قائم بوده است. به همین منظور، تعدادی دیوارهای پانلی به ابعاد $3 \times 3m^2$ ساخته و تحت بار افقی چرخه‌ی و بار قائم ثابت 50 کیلو نیوتن قرار داده شدند. دیوار پانلی با همان مشخصات مدل آزمایشگاهی، در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شد و تحت بارگذاری جانبی قرار گرفت. در شکل ۱۱، منحنی ظرفیت باربری جانبی در برابر تغییرمکان مدل آزمایشگاهی با منحنی مدل المان محدود مقایسه شده است که نشان می‌دهد نتایج حاصل از آنالیز المان محدود، تطابق نسبتاً خوبی با مدل آزمایشگاهی دارد. در جدول ۳، نتایج حاصل از آنالیز مدل المان محدود و مدل آزمایشگاهی دیوار پانلی ارائه شده است.



شکل ۱۵. نحوه ترک خوردگی المان‌های بتن پاششی و تنش‌های فون میزز در مفتول‌های فولادی در لحظه‌ی گسیختگی دیوار پانلی PSA-۶.

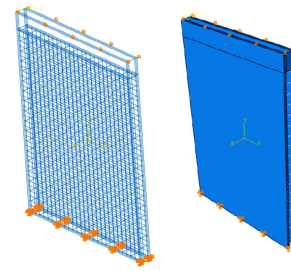


شکل ۱۶. نمودارهای بار-جاب‌جایی دیوارهای پانلی پارامتر B.

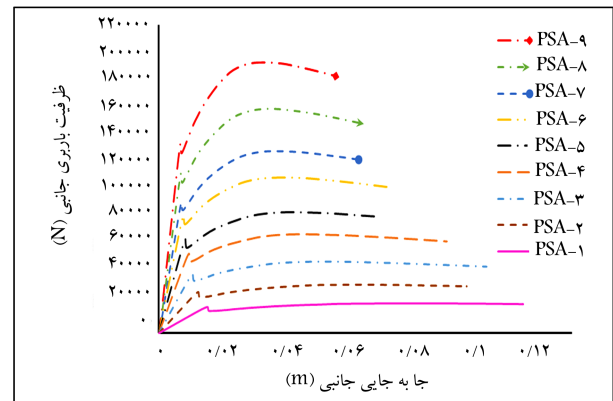
با افزایش طول پانل از ۲٫۷۵ به ۳ متر، ظرفیت باربری جانبی حدود ۳۳ کیلو نیوتن افزایش می‌یابد. این بدان معناست که ظرفیت دیوارهای پانلی با $(\frac{H}{L})$ کمتر از ۱٫۵ به صورت برشی است و دیوارهای مذکور در برابر خمش وارده مقاوم هستند، ولی برای دیوارها با $(\frac{H}{L})$ بزرگ‌تر از ۱٫۵ به جای برش، خمش عامل اصلی در تعیین ظرفیت دیوار است و باعث می‌شود که افزایش ظرفیت کمتری نسبت به دیوارهای پانلی با $(\frac{H}{L})$ کمتر از ۱٫۵ داشته باشند. تعیین نسبت $(\frac{H}{L})$ برای تغییر رفتار دیوار پانلی از لحاظ عملکرد خمشی و برشی، نیازمند آنالیزها و مطالعات المان محدود بیشتری است. شکل ۱۵، نحوه ترک خوردگی المان‌های بتن پاششی و تنش‌های فون میزز در مفتول‌های فولادی را در نمونه‌ی PSA-۶ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شروع گسیختگی از المان‌های بتن پاششی تحت کشش در پای دیوار آغاز شده است. المان‌هایی که به رنگ قرمز درآمده‌اند، بیانگر المان‌های ترک خورده در مدل المان محدود هستند که سختی خود را از دست داده و از حل خارج شده‌اند.

۲.۶. پارامتر B: بررسی اثر فاصله‌ی مفتول‌های تار (a)

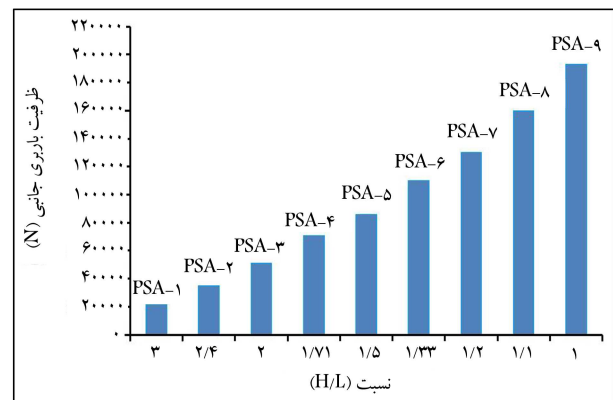
برای بررسی اثر پارامتر B در رفتار جانبی دیوارهای پانلی، ۹ عدد پانل در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شدند. ارتفاع و طول پانل‌ها در بررسی پارامتر B، به ترتیب ۳ و ۲ متر، و با سایر مشخصات پانل‌های پارامتر A در نظر گرفته شده‌اند و فقط فاصله‌ی مفتول‌های تار (مفتول‌های قائم) از ۳ تا ۱۰ سانتی‌متر و با ثابت قرار دادن فاصله‌ی مفتول‌های پود تغییر کرده است. منحنی‌های نیرو-جاب‌جایی برای بررسی پارامتر B در شکل ۱۶ نشان داده شده است و نحوه تأثیر فاصله‌ی مفتول‌های تار



شکل ۱۲. مدل‌سازی دیوارهای پانلی - تغییر نسبت ارتفاع به طول $(\frac{H}{L})$.



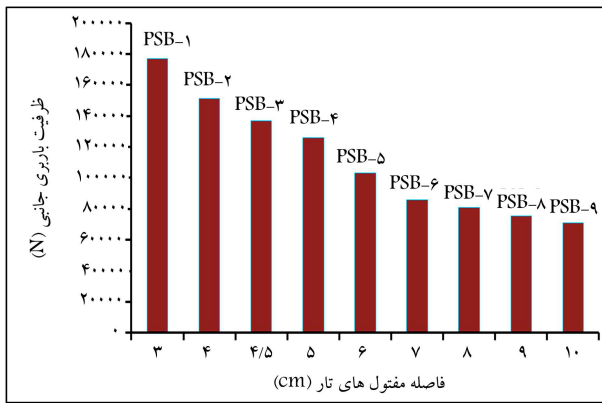
شکل ۱۳. نمودارهای بار-جاب‌جایی دیوارهای پانلی پارامتر A.



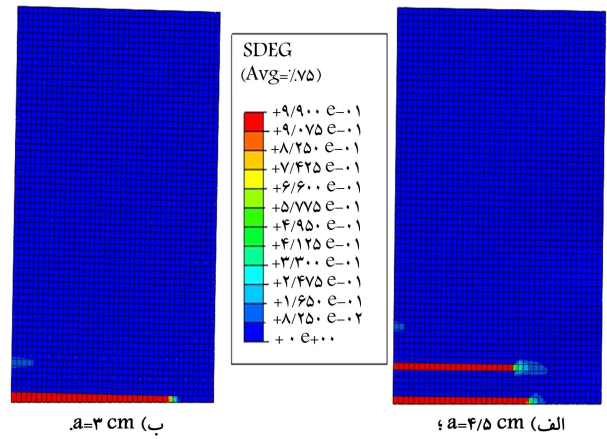
شکل ۱۴. تأثیر طول پانل در ظرفیت باربری جانبی.

شده است. همچنین تأثیر تغییرات طول دیوار پانلی در ظرفیت باربری جانبی در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود.

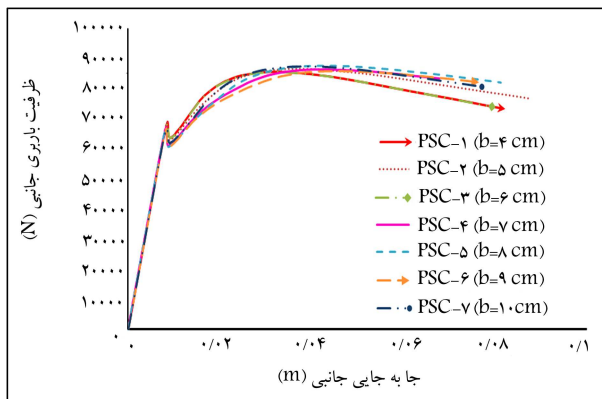
با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش طول پانل، سختی و ظرفیت باربری جانبی افزایش و تغییر مکان‌های جانبی آن کاهش می‌یابد؛ به طوری که با افزایش طول پانل از ۱٫۵ متر به ۳ متر، ظرفیت باربری جانبی بیش از ۳٫۵ برابر افزایش می‌یابد. بنابراین تغییرات پارامتر A می‌تواند تأثیرات قابل توجهی در ظرفیت باربری دیوار پانلی داشته باشد. با توجه به مقادیر ظرفیت باربری جانبی به‌دست آمده برای دیوارهای پانلی در شکل ۱۴ می‌توان استنباط کرد که برای مقادیر $(\frac{H}{L})$ بزرگ‌تر از ۱٫۵، با زیاد کردن طول پانل به مقدار فقط ۲۵ سانتی‌متر، افزایش ظرفیت باربری جانبی کمتر از مقادیر $(\frac{H}{L})$ ، کوچک‌تر از ۱٫۵ است؛ به طوری که با افزایش طول پانل از ۱ متر به ۱٫۲۵ متر در پانل‌های با $(\frac{H}{L})$ بیشتر از ۱٫۵، فقط ۱۳ کیلو نیوتن به ظرفیت باربری جانبی افزوده شده است و این در حالی است که



شکل ۱۸. تأثیر فاصله‌ی مفتول‌های تار در ظرفیت باربری جانبی.



شکل ۱۷. ترک‌خوردگی المان‌های بتن پاششی در لحظه‌ی گسیختگی دیوار.



شکل ۱۹. منحنی‌های نیرو-جابجایی دیوارهای پانلی پارامتر C.

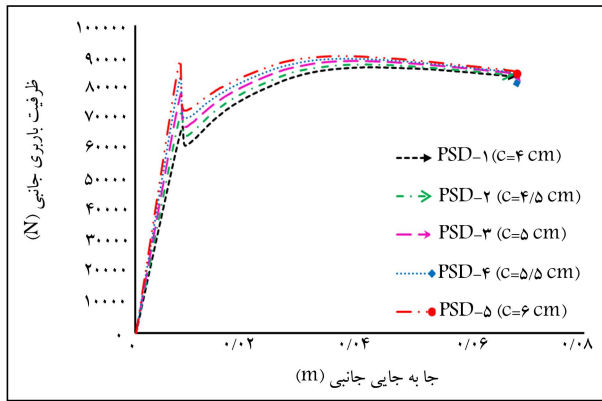
در ظرفیت جانبی دیوار قابل مشاهده است. نشریه‌ی ۳۸۵ در بند ۲-۱-۲-۲، ابعاد چشمه (فاصله‌ی دو تار متوالی) در شبکه‌ی جوش‌شده را در محدوده‌ی ۴۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر بیان می‌کند و بهترین حالت آن را ۵۰ یا ۸۰ میلی‌متر توصیه می‌کند. با توجه به نتایج به دست آمده در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود که با کمتر شدن فواصل مفتول‌های تار، ظرفیت باربری جانبی افزایش پیدا می‌کند؛ ولی در حالتی که فاصله‌ی بین مفتول‌های تار از ۴ سانتی‌متر کمتر می‌شود، رفتار جانبی دیوار پانلی تغییر می‌کند. شکل ۱۷، خروجی تغییر شکل یافته‌ی دیوار پانلی برای حالت $a = 3\text{ cm}$ و $a = 4.5\text{ cm}$ را نشان می‌دهد.

شکل ۱۷ نشان می‌دهد که با کاهش فاصله‌ی مفتول‌های تار به $a = 3\text{ cm}$ ، مدهای گسیختگی در بتن پاششی و مفتول‌های تار نسبت به دیوار پانلی با فاصله‌ی مفتول‌های تار $a = 4.5\text{ cm}$ تغییر می‌کند. علت این امر را می‌توان این‌گونه بیان کرد که با افزایش تعداد مفتول‌های تار، دیوار پانلی به یک مقطع پر فولاد تبدیل شده است و مطابق با شکل ۱۷، هنگامی که المان‌های بتن پاششی در ناحیه‌ی بالاتر از تکیه‌گاه ترک خورده و سختی خود را از دست داده‌اند، آرماتورهای فولادی در ناحیه‌ی مذکور، هنوز تسلیم نشده و باعث ایجاد شکست ترد در مقطع شده‌اند. این در حالی است که با بررسی کانتورهای تنش فون - میرز در مفتول‌های فولادی در سایر مدل‌ها نتیجه گرفته شد که مفتول‌های تار در لحظه‌ی ترک خوردن اولین المان‌های بتن پاششی تسلیم شده‌اند و شکست نرم برای آن‌ها رخ داده است. لذا با توجه به شکل ۱۶، برای فواصل کمتر از $a = 4\text{ cm}$ مقطع به صورت پرفولاد در می‌آید و یک افت ناگهانی در ظرفیت باربری جانبی ایجاد می‌شود و به دلیل وجود مقاومت کششی در مفتول‌های تار، این ظرفیت دوباره افزایش می‌یابد. لذا توصیه‌ی نشریه‌ی ۳۸۵ مبنی بر آنکه کمیته‌ی فاصله‌ی مفتول‌های تار ۴ سانتی‌متر باشد، منطقی و صحیح است. شکل ۱۸، مقایسه‌ی نتایج آنالیز دیوارهای پارامتر B را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که به دلیل اینکه مفتول‌های تار نقش تحمل خمش را در بارگذاری جانبی دارند، بنابراین هر چقدر در یک طول مشخصی از دیوار پانلی، فاصله‌ی بین مفتول‌ها کاهش یابد و به تبع آن تعداد آن‌ها افزایش یابد، ظرفیت باربری جانبی افزایش و جابه‌جایی جانبی دیوار کاهش می‌یابد؛ به طوری که با کاهش فاصله‌ی مفتول‌های تار از $a = 10\text{ cm}$ به $a = 5\text{ cm}$ ، ظرفیت باربری جانبی در حدود ۸۰٪ افزایش خواهد یافت. ولی با در نظر گرفتن نتایج به دست آمده و توضیحات داده شده و همچنین توصیه‌ی نشریه‌ی ۳۸۵، بهتر است که کمیته‌ی فاصله‌ی بین مفتول‌ها ۴ سانتی‌متر در نظر گرفته شود تا در مقطع دیوار، پدیده‌ی شکست ترد رخ ندهد.

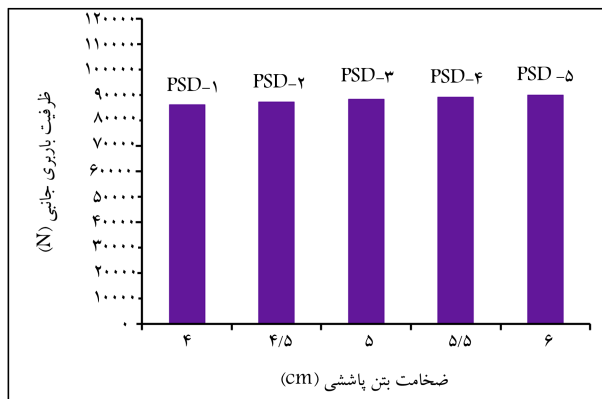
۳.۶. پارامتر C: بررسی اثر فاصله‌ی مفتول‌های پود (b)

در ساخت دیوارهای پانلی متعارف معمولاً فاصله‌ی بین مفتول‌های پود، ۸ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود. در بخش حاضر، ۷ دیوار پانلی با فواصل مفتول‌های پود مختلف در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده است، تا اثر کم کردن فاصله‌ی بین مفتول‌های مذکور در ظرفیت باربری جانبی بررسی شود. کلیه‌ی مشخصات پانل‌ها مطابق با دیوار پانل PSA-5 است و فقط فاصله‌ی بین مفتول‌های پود از $b = 4\text{ cm}$ (پانل PSC-1) تا $b = 10\text{ cm}$ (پانل PSC-7) متغیر است. منحنی‌های نیرو-جابجایی برای ۷ پانل آنالیز شده در شکل ۱۹ نشان داده شده است. با بررسی مدهای گسیختگی سایر نمونه‌های تحلیل شده مشاهده شد که با کم و زیاد شدن فاصله‌ی بین مفتول‌های پود در نحوه‌ی ترک خوردگی و تنش‌های ایجاد شده در آرماتورها تغییرات قابل توجهی رخ نداده است و نسبتاً تمام نمونه‌ها شبیه یکدیگر گسیخته شده‌اند. در شکل ۲۰، به مقایسه‌ی نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی دیوارهای پانلی برای بررسی پارامتر C پرداخته شده است.

با بررسی نتایج به دست آمده از آنالیز دیوارهای پانلی پارامتر C می‌توان نتیجه گرفت که کم کردن فاصله‌ی بین مفتول‌های پود، تأثیر چشمگیری در ظرفیت باربری جانبی ندارد. علت این امر را می‌توان به عملکرد برشی مفتول‌های پود نسبت داد که در برابر بارگذاری وارد شده نقش تحمل برش را دارند و هنگامی که کمیته‌ی مفتول برشی در مقطع قرار داده شود و جواب‌گوی نیروی برشی ایجاد شده در دیوار باشد، کم کردن فاصله‌ی بین مفتول‌های پود، تأثیر زیادی در ظرفیت باربری ندارد و همان مقدار مفتول کفایت برش ایجاد شده را می‌کند. مطابق با بند ۲-۱-۲-۲ نشریه‌ی



شکل ۲۱. منحنی های بار - جابه جایی دیوارهای پانلی پارامتر D.



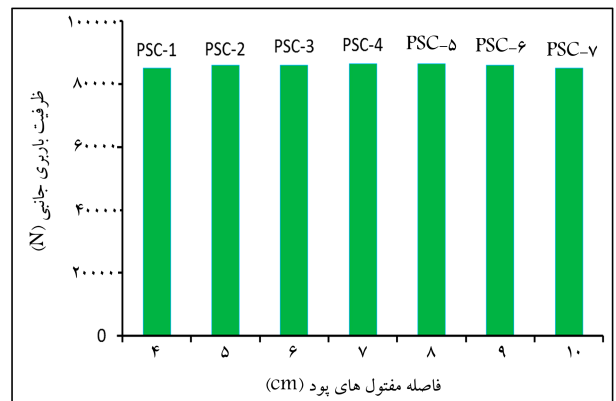
شکل ۲۲. تأثیر ضخامت لایه ی بتن پاششی در ظرفیت باربری جانبی.

به ظرفیت باربری دیوار اضافه شده است، که این مقدار فقط ۳٪ است. بنابراین با در نظر گرفتن افزایش ناچیز ظرفیت باربری و همچنین کاهش ضایعات بتن پاششی، بهتر است که از ضخامت ۴ سانتی متر برای لایه ی بتن پاششی استفاده شود، که باعث پوشش کامل شبکه ی جوش شده می شود. علت اینکه افزایش ضخامت تا ۲ سانتی متر، تأثیر خاصی در ظرفیت باربری نداشته است، ناشی از ضخامت کم لایه ی بتن پاششی است، که با توجه به رابطه ی ممان اینرسی مقطع مستطیلی، مقدار آن با افزایش ضخامت تغییر خاصی نمی کند و بیشترین تحمل خمش را مفتول های نار تحمل می کنند و لایه ی بتن پاششی، سهم کمی را در تحمل تنش های خمشی وارد بر دیوار بر عهده دارد و با افزایش ضخامت لایه ی مذکور، تنش های ناشی از خمش ایجاد شده در دیوار، کاهش چشمگیری نخواهد داشت.

۵.۶. پارامتر E: بررسی اثر شکل هندسی لایه ی بتن پاششی با سطح

مقطع غیرمستوی

کارخانه های سازنده ی اعضاء پانلی معمولاً از پلی استایرن با سطح مقطع های مخصوص به خود، به صورت مستوی یا غیرمستوی، در ساخت دیوارهای مذکور استفاده می کنند که در این صورت سطح مقطع بتن پاشیده به همان شکل در می آید. مطابق با شکل ۲۳ و بند ۵-۴-۵، نشریه ی ۳۸۵، لایه ی عایقی می تواند با حفظ ساختار صفحه ای و ضخامت تعیین شده، سطح بیرونی غیرمستوی داشته باشد، تا از مقدار مصالح بازگشتی در حین عملیات بتن پاشی کاسته شود. در بخش کنونی، با توجه به هزینه بر بودن تولید پلی استایرن غیرمستوی، به مدل سازی دیوارهای پانلی مطابق با شکل ۲۳ که یکی از شکل های رایج در ساخت آن هاست، پرداخته شده است. بدیهی است



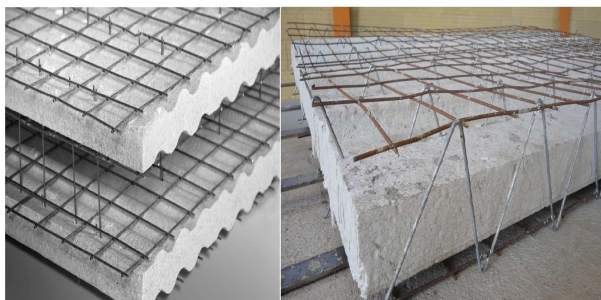
شکل ۲۰. تأثیر فاصله ی مفتول های پود در ظرفیت باربری جانبی دیوارهای پانلی پارامتر C.

۳۸۵، بیشینه ی فاصله ی بین مفتول های پود ۱۰۰ میلی متر بیان شده است. البته مقادیر بزرگ تر از ۱۰۰ میلی متر ممکن است برای برش ایجاد شده در دیوار کفایت کند، ولی از لحاظ اجرایی سبب می شود که قسمت عمده یی از بتن پاششی به سرعت به سمت پایین سرازیر شود و پرت مصالح بسیار زیاد باشد. بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده می توان نتیجه گرفت که کم کردن فاصله ی بین مفتول های پود برای بالابردن ظرفیت باربری جانبی منطقی نیست و از لحاظ اقتصادی نیز بهتر است که برای دیوارهای پانلی غیرباربر، بیشینه ی فاصله ی مجاز برای مفتول های مذکور در نظر گرفته شود.

۴.۶. پارامتر D: بررسی اثر ضخامت لایه ی بتن پاششی (c)

یکی از پارامترهایی که می تواند در ظرفیت باربری جانبی دیوارهای پانلی تأثیر داشته باشد، ضخامت لایه ی بتن پاششی است. این ضخامت بهتر است طوری تعیین شود که شبکه ی جوش شده در وسط لایه ی بتنی قرار گیرد. ضخامت بتن پاششی باید به گونه یی تعیین شود که پس از پاشش آن، سطح شبکه ی جوش شده را کاملاً پوشش بدهد. در اجرای بتن پاششی بر روی دیوارهای پانلی، معمولاً ضخامت لایه ی مذکور ۴ سانتی متر در نظر گرفته می شود و برای ضخامت های بیشتر لایه ی بتن بهتر است که پوشش آن بر روی شبکه ی جوش شده متناسب با پوشش بتن در سمت لایه ی عایقی افزایش یابد. در بخش حاضر، اثر ضخامت لایه ی بتن پاششی در ظرفیت باربری جانبی بررسی و ۵ عدد دیوار پانلی با ضخامت های لایه ی بتن پاششی مختلف مدل سازی شده اند. کمینه ی ضخامت لایه ی بتن پاششی ۴ cm (PSD-۱) و بیشینه ی آن ۶ cm (PSD-۵) در نظر گرفته شده است. ضخامت های بالاتر از ۶ سانتی متر، باعث ریزش بیش از حد مصالح در حین پاشش بتن می شود. شکل ۲۱، منحنی های نیرو - جابه جایی را برای دیوارهای پانلی تحلیل شده ی پارامتر D نشان می دهد. نحوه ی ترک خوردگی براساس بررسی های انجام شده بر روی دیوارهای آنالیز شده در المان های بتن پاششی و تنش های ایجاد شده در مفتول های فولادی مانند دیوارهای پانلی پارامتر C است و با زیاد شدن ضخامت لایه ی بتن پاششی، تغییر خاصی در مدهای گسیختگی دیوارهای پانلی ایجاد نمی شود. شکل ۲۲، مقایسه ی نتایج به دست آمده از آنالیز دیوارهای پانلی پارامتر D را نشان می دهد.

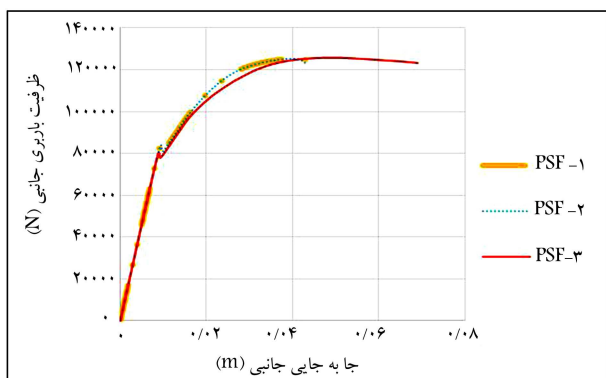
با توجه به شکل ۲۲ می توان نتیجه گرفت که افزایش ضخامت لایه ی بتن پاششی باعث افزایش ظرفیت باربری جانبی دیوارهای پانلی می شود، ولی مقدار آن قابل توجه نیست؛ به طوری که با افزایش ضخامت از ۴ به ۶ سانتی متر، فقط ۳ کیلونیوتن



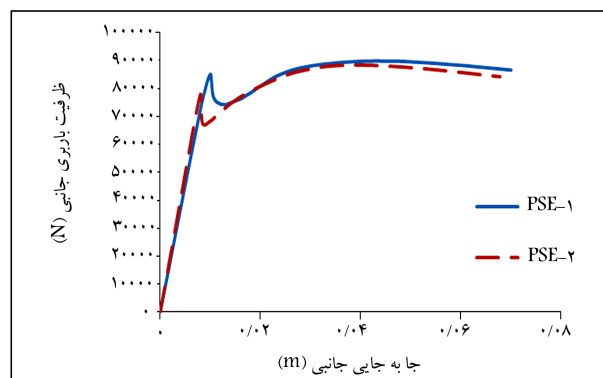
شکل ۲۵. چیدمان برش‌گیرها برای اتصال دو شبکه‌ی جوش‌شده.



شکل ۲۳. دیوار پانلی با لایه‌ی پلی‌استایرن غیرمستوی.



شکل ۲۶. نمودارهای بار - جا به جایی دیوارهای پانلی پارامتر F.



شکل ۲۴. منحنی‌های بار - جا به جایی دیوار پانلی با پلی‌استایرن مستوی و غیرمستوی.

متصل می‌شوند. زاویه‌ی برش‌گیر زاویه‌ی است که مافتول برش‌گیر با محور مافتول تار می‌سازد. زاویه‌ی ذکر شده مطابق با شکل ۲۵ می‌تواند به صورت عمود بر شبکه‌ی جوش‌شده (زاویه‌ی قائم) و یا به شکل خرپایی (زاویه‌ی حاده) باشد. نشریه‌ی ۳۸۵ در بند ۲-۲-۱، زاویه‌ی برش‌گیرها نسبت به خط تارهای شبکه‌ی جوش‌شده را به منظور عملکرد خرپایی پانل بین ۴۵ درجه تا ۶۵ درجه توصیه می‌کند و استفاده از برش‌گیرهای عمود بر سطح شبکه‌ی جوش‌شده‌ی پانل را حتی‌الامکان مجاز نمی‌داند.

کارخانه‌های سازنده‌ی اعضاء پانلی عموماً به دلیل راحتی تولید و کاهش میزان مصرف مافتول‌های فولادی از برش‌گیرهای عمود بر سطح شبکه‌ی جوش به جای برش‌گیرهای خرپایی شکل استفاده می‌کنند. در بخش حاضر، به بررسی اثر زاویه‌ی برش‌گیرها در ظرفیت باربری جانبی دیوارهای پانلی پرداخته شده است. به همین منظور ۳ دیوار پانلی با زاویه‌های ۴۵ (PSF-۱)، ۶۰ (PSF-۲) و ۹۰ درجه (PSF-۳) و با سایر مشخصات یکسان در نرم‌افزار مدل‌سازی شده است. در ۳ مدل مذکور، برش‌گیرهای خرپایی شکل در جهت طول پانل قرار گرفته و برش‌گیرها در جهت ارتفاع دیوار به صورت یک در میان در محل اتصال دو مافتول تار یا بود به دو شبکه‌ی جوش‌شده متصل شده‌اند. سایر مشخصات پانل‌های ذکر شده، یکسان در نظر گرفته شده‌اند. نمودارهای بار - جا به جایی برای ۳ دیوار پانلی مذکور در شکل ۲۶ مشاهده می‌شود. براساس خروجی‌های تغییرشکل یافته برای ۳ پانل مورد آنالیز، نحوه‌ی ترک‌خوردگی در المان‌های بتن پاششی با تغییر زاویه‌ی برش‌گیرها تغییری نمی‌کند و مانند سایر دیوارهای پانلی، مدگسیختگی از المان‌های بتن پاششی در کشش آغاز می‌شود. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، زاویه‌ی حاده‌ی برش‌گیرها به منظور بهبود عملکرد خرپایی پانل‌هاست، ولی با توجه به بند ۷-۲ نشریه‌ی ۳۸۵، عملکرد خرپایی اعضاء پانلی در اثر انتقال بارهای عمود بر صفحه است، ولی این اعضا در برابر بارهای در راستای صفحه همانند دیوارهای باربر عمل می‌کنند. بنابراین

هنگامی که بتن پاششی به پلی‌استایرن غیرمستوی پاشیده شود، سطح مقطع لایه‌ی بتنی نیز غیرمستوی می‌شود. بنابراین در بخش حاضر، تأثیر شکل هندسی لایه‌ی بتن پاششی با سطح مقطع غیرمستوی در ظرفیت باربری جانبی بررسی شده و مدل المان محدود در نرم‌افزار مطابق با سطح مقطع پلی‌استایرن غیرمستوی (شکل ۲۳) مدل‌سازی شده است.

بنابراین دیوار پانلی با ضخامت بتن پاششی ۵ سانتی‌متر، یک بار با سطح مقطع غیرمستوی (PSE-۱) و یک بار با سطح مقطع مستوی (PSE-۲) و با سایر مشخصات یکسان آنالیز شد، که نتایج آن در شکل ۲۴ مشاهده می‌شود. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که تغییرات ممان اینرسی مقطع لایه‌ی بتن پاششی، تأثیر خاصی در ظرفیت باربری جانبی دیوار پانلی ندارد. نحوه‌ی ترک‌خوردگی المان‌های بتن پاششی و تنش‌های ایجاد شده در مافتول‌های فولادی، در هر دو مدل نسبتاً یکسان است و تغییرات قابل توجهی مشاهده نمی‌شود. از لحاظ اجرایی استفاده از لایه‌ی پلی‌استایرن با سطح مقطع غیرمستوی براساس مشاهده‌های انجام شده در زمان پاشش بتن باعث کاهش مصالح بازگشتی به مقدار ناچیزی نسبت به حالت استفاده از پلی‌استایرن مستوی می‌شود، ولی استفاده از این نوع پلی‌استایرن باعث می‌شود که بتن پاششی به راحتی بین شبکه‌ی جوش‌شده و لایه‌ی عایق جا نگیرد و در برخی از قسمت‌های بتن، حفره‌هایی ایجاد شود و سبب متخلخل شدن لایه‌ی بتنی شود. از لحاظ میزان مصرف بتن پاششی، هر دو نمونه‌ی پلی‌استایرن مستوی و غیرمستوی با یکدیگر یکسان هستند و هیچ تفاوتی با هم ندارند، ولی میزان پرت و دورریز پلی‌استایرن‌های غیرمستوی بیشتر از پلی‌استایرن‌های مستوی است.

۶.۶. پارامتر F: بررسی اثر زاویه‌ی برش‌گیرها

همان‌طور که پیش از این بیان شد، دو شبکه‌ی جوش‌شده در دیوار پانلی توسط یک سری مافتول فولادی به نام برش‌گیر با آرایش خاصی توسط جوش مقاومتی به یکدیگر

براین، بر روی مفتول‌های مورد استفاده در دیوارهای پانلی، آزمایش کشش ساده برای به‌دست‌آوردن منحنی تنش - کرنش و سایر مشخصات آن نظیر مدول کشسانی و تنش تسلیم و گسیختگی انجام شد، که از نتایج آن در مدل‌سازی دیوارهای پانلی در نرم‌افزار استفاده شد. با توجه به آنالیزهای انجام‌گرفته بر روی دیوارهای پانلی می‌توان نتیجه گرفت که افزایش طول پانل‌ها بیشترین تأثیر را در بالا بردن ظرفیت باربری دیوارهای مذکور دارد، به طوری که با افزایش طول پانل از ۱/۵ به ۳ متر، ظرفیت باربری جانبی بیش از ۳/۵ برابر افزایش می‌یابد. بررسی‌های انجام‌گرفته نشان داد که با کاهش فاصله‌ی مفتول‌های تار از $a = 1\text{ cm}$ به $a = 5\text{ cm}$ ، ظرفیت باربری جانبی در حدود ۸۰٪ افزایش خواهد یافت. نتایج تحلیل‌های المان محدود حاکی از آن است که کاهش فاصله‌ی مفتول‌های پود، افزایش ضخامت لایه‌ی بتن پاششی و زاویه‌دار کردن برش‌گیرها نمی‌توانند در افزایش ظرفیت دیوارها نقشی داشته باشند. استفاده از پلی‌استایرن غیرمستوی فقط میزان مصالح بازگشتی در هنگام پاشش بتن به دیوار را کاهش می‌دهد و تغییر شکل هندسی مقطع لایه‌ی بتن پاششی نیز تأثیری در افزایش ظرفیت باربری جانبی دیوارهای پانلی ندارد.

تقدیر و تشکر

مؤلفان نوشتار حاضر بر خود لازم می‌دانند از مدیر محترم شرکت تبیان راهبرد پارسی (TRP) که با حمایت‌های خود امکان انجام پژوهش حاضر را فراهم کرد، تشکر و قدردانی کنند.

پانویسها

1. expanded poly styrene
2. autoclaved aerated concrete
3. Abaqus
4. multi-point constraint
5. elcentro
6. concrete damaged plasticity
7. abaqus implicit
8. abaqus explicit
9. stiffness recovery effects
10. hognestad
11. tention stiffening
12. solver
13. Newton-Raphson
14. Gauss method
15. push over

منابع (References)

1. Code 385, "Design and construction of 3D shotcrete panels", (2014).
2. Gara, F., Ragni, L., Roia, D. and et al. "Experimental tests and numerical modelling of wall sandwich panels", *Engineering Structures*, **37**, pp. 193-204 (Apr., 2012).

برش‌گیرهای خرپایی شکل در برابر بار جانبی درون صفحه‌ی اعمال شده به دیوار پانلی نقش زیادی را در انتقال نیرو از یک لایه به لایه‌ی دیگر ندارند. با در نظر گرفتن نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت که برای دیوارهای پانلی تحت بار در راستای صفحه، به دلیل راحتی تولید پانل و کاهش میزان مصرف مفتول‌های فولادی بهتر است که از برش‌گیرهای عمود بر شبکه‌ی جوش شده استفاده شود، ولی برای اعضای پانلی تحت بارگذاری عمود بر صفحه، استفاده از برش‌گیرهای خرپایی شکل می‌تواند نقش به‌سزایی در عملکرد خرپایی سه بعدی آن و انتقال نیرو از یک لایه به لایه‌ی دیگر داشته باشد، که بررسی آن نیازمند آنالیزهای تکمیلی بر روی اعضای پانلی مذکور است.

۷. نتیجه‌گیری

هدف از پژوهش حاضر، بررسی پارامترهای مختلف، از جمله: نسبت ارتفاع به طول پانل، فاصله‌ی مفتول‌های تار و پود از یکدیگر، شکل هندسی بتن پاششی و زاویه‌ی برش‌گیرها بر ظرفیت باربری جانبی دیوارهای پانلی است. با توجه به دسترسی نداشتن به منحنی تنش - کرنش بتن پاششی و سایر مشخصات مکانیکی آن برای معرفی به نرم‌افزار المان محدود، تعدادی آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره بر روی مغزه‌های بتن پاششی صورت گرفت، که نتایج آن نشان داد که خواص مکانیکی بتن پاششی با بتن معمولی بسیار متفاوت است و برای مدل‌سازی دیوارهای پانلی در نرم‌افزار نمی‌توان از خواص مکانیکی و منحنی تنش - کرنش بتن معمولی استفاده کرد. علاوه

3. Shigang, A., Yiqi, M., Yongmao, P. and et al. "Effect of stitching angle on mechanical properties of stitched sandwich panels", *Materials & Design*, **50**, pp. 817-824 (Sep., 2013).
4. Carbonari, G., Cavalaro, S.H.P., Cansario, M.M. and et al. "Flexural behaviour of light-weight sandwich panels composed by concrete and EPS", *Construction and Building Materials*, **35**, pp. 792-799 (2012).
5. Pavese, A. and Bournas, D. "Experimental assessment of the seismic performance of a prefabricated concrete structural wall system", *Engineering Structures*, **33**(6), pp. 2049-2062 (june, 2011).
6. Elkashef, M. and Mooty, M.A. "Investigating the use of autoclaved aerated concretes an infill in reinforced concrete sandwich panels", *Materials and Structures*, **48**(7), pp. 2133-2146 (July, 2015).
7. Kang, J. "Composite and Non-composite Behaviors of Foam-insulated concrete sandwich panels", *Composites*, **68**, pp. 153-161 (Jan., 2015).
8. Kabir, M.Z. and Shadan, P. "Seismic performance of 3D-panel wall on piloti RC frame using shaking table equipment", *Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics, EURO DYN 2011*, At Leuven, Belgium (July, 2011).
9. ABAQUS, "Standard user's manual volume I and II, version 6.13", Hibbit, Karlsson and Sorensen Inc. (1995).

10. Mashal, M. "Quantification of seismic performance factors for buildings incorporating three-dimensional construction system", In Proceeding NZSEE, New Zealand (2012).
11. FEMA. P-695, "Quantification of building seismic performance factors", ed. prepared by Applied Technology Council for the Federal Emergency Management Agency, Washington D.C (2010).
12. Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S. and et al. "A plastic damage model for concrete", *International Journal of Solids and Structures*, **25**(3), pp. 299-326 (1989).
13. Mostofinejad, D. and Mohammadi Anaei, M. "Effect of confining of boundary elements of slender RC shear wall by FRP composites and stirrups", *Engineering Structures*, **41**, pp. 1-13 (Apr., 2012).
14. Mostofinejad, D. "Reinforced concrete structures", ed. 24th, I, Arkan Danesh Publications, Iran, 716 p. In Persian (2011).
15. ACI Committee 318, "Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08)", American Concrete Institute, USA (2008).
16. Ricci, I., Palermo, M., Gasparini, G. and et al. "Results of pseudo-static tests with cyclic horizontal load on cast in situ sandwich squat concrete walls", *Engineering Structures*, **54**, pp. 131-149 (Sept., 2013).
17. ASTM C469, "Standard test method for static modulus of elasticity and poissons ratio of concrete in comprssion USA (1987).