****

**تابع مقاومت استاتیک برای دیوارهای کامپوزیت صفحه فولادی (SC) در معرض بارگذاری غیرفعال**

**چکیده**

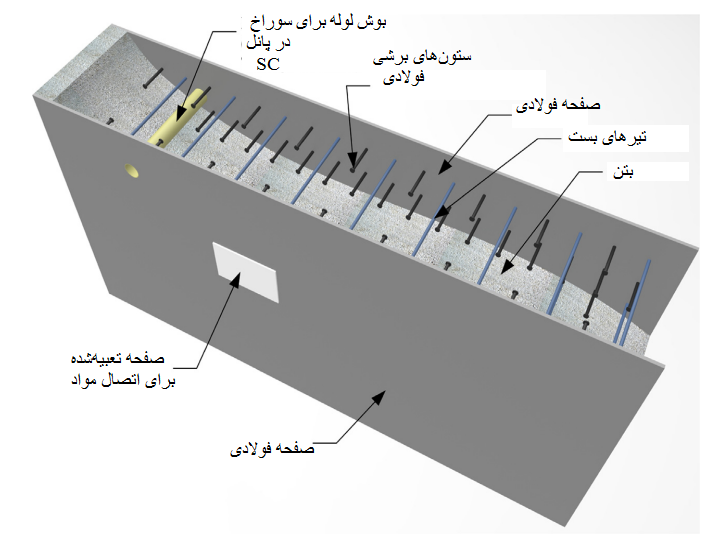
دیوارهای کامپوزیت صفحه فولادی (SC) شامل یک هسته بتنی ساده هستند که با دو ورق فولادی روی سطوح مستحکم شده­اند. مدول­ها (شامل ورق­های فولادی، اتصال دهنده­های برشی و میله­های اتصال) در محل فروشگاه ساخته و برای نصب و قالب­گیری بتنی به محل ارسال می­شوند، که این امر برنامه ساخت و بنابراین بهره اقتصادی را تسریع می­بخشد. سازه­های SC اخیرا در طراحی­های نیروگاه برق هسته­­ای بکار رفته­اند و به عنوان یک جزء مهم برای نسل آینده راکتورهای مدولار کوچک درنظر گرفته می­شوند. طراحی برای بارگذاری غیرفعال و تحریک­کننده یک ملاحظه مهم برای دیوارهای SC در تاسیسات هسته­ای مربوط به ایمنی است. نویسنده­ها پیش ازاین چندین روش طراحی به منظور جلوگیری از شکست محلی (سوراخ­شدن) دیوارهای SC ناشی از ضربه پرتابه ایجاد کرده­اند. مقاله حاضر توسعه توابع مقاومت استاتیک برای استفاده در تحلیل یک درجه آزادی (SDOF) را به منظور پیش­بینی حداکثر پاسخ جابجایی دیوارهای SC ارائه می­دهد که در معرض ضربه موشکی هستند و برای مقاومت در برابر شکست محلی طراحی شده­اند (سوراخ شدن). تابع مقاومت استاتیک برای دیوارهای SC با استفاده از نتایج تحلیل عددی و مطالعات پارامتری انجام­شده با استفاده از مدل­های المان محدود سه بعدی معیار ایجاد شده­است. تاثیر پارامترهای مختلف طراحی نیز بحث وبررسی شده­­است و نتایج آن برای توسعه توابع مقاومت دوخطی برای دیوارهای SC با لبه­های ثابت و لبه­های با تکیه­گاه ساده بکاررفته است. نهایتا، نتایج حاصل از تحلیل FE غیرخطی دینامیک پانل­های SC که در معرض ضربه موشکی صلب قرار دارند، با استفاده از تابع مقاومت دوخطی با حداکثر جابجایی­های پیش­بینی­شده حاصل از تحلیل SDOF مقایسه شده­اند.

**نکات برجسته مقاله**

* یک تابع مقاومت استاتیک ایده­آل برای دیوارهای SC پیشنهاد شده­است.
* تاثیر پارامترهای طراحی بر مقاومت استاتیک توصیف شده­ا­ست.
* مدل­های SDOF به طور دقیق پاسخ کلی دیوارهای SC به ضربه پرتابه را برآورد می­کنند.

1. **مقدمه**

دیوارهای کامپوزیت صفحه فولادی (SC) شامل دو ورق فولادی (سطحی) بیرونی و یک پرکننده بتنی ساده هستند که در شکل 1 نشان داده شده­است. ورق­های فولادی با استفاده از مهارهای ستونی با نوک فولادی مهارشده­اند که این مهارها به سطوح داخلی ورق­های فولادی جوش داده شده­اند و در بتن قالب­گیری می­شوند. ورق­های فولادی با استفاده از سیستم­های اتصال (بست) به یکدیگر متصل می­شوند که این سیستم­ها نیز در بتن قالب­گیری می­شوند. عمل­آوری کامپوزیت در بین ورق­های فولادی و هسته بتنی به وسیله مهارهای ستونی و سیستم­های اتصال فراهم می­شود. سیستم‌های اتصال مزیت­های زیر را فراهم می­کنند: 1- یکپارچگی ساختاری با دیوار SC با مقاومت در برابر شکاف از طریق هسته بتنی ساده، 2- آرماتور برشی خارج از صفحه، و 3- پایداری در برابر مدول­های فولادی خالی در طی حمل ونقل و نصب. مهارهای ستونی نیز شرایط زیر را فراهم می­کنند: 1- محدودیت برای کمانش محلی ورق­های فولادی، و 2- مقاومت برشی میان پهنه­ای.



شکل 1: ساخت دیوار SC معمول

همان­طور که در شکل 1 نشان داده شده­است، پرکننده بتنی بین ورق­های فولادی محصور می­شود. ساخت فروشگاهی مدول­های فولادی، شامل ورق­های فولادی، سیستم­های اتصال و مهارهای ستونی نیز امکان­پذیر است، زیرا هیچ گونه تقویت قفسه میله در دیوارهای SC موردنیاز نیست. ورق­های فولادی همانند یک آرماتور و چارچوب اولیه برای قالب­گیری بتن عمل می­کنند و هیچ گونه کار اضافی برای ساخت یا حذف چارچوب نیاز نیست. علاوه براین مزیت­ها، سازه­های SC در تقریبا نصف زمان موردنیاز برای ساخت سازه­های بتن آرمه رایج مشابه ساخته می­شوند (شلزمان، 2004). دیوارهای SC اخیرا به عنوان دیوارهای پوسته اولیه و ثانویه در نیروگاه­های برق هسته­ای (NPP) بکار رفته­اند (Mitsubishi Heavy Industries, 2011; Westinghouse Electric Company, 2008).

تحلیل و طراحی تاسیسات هسته­ای مربوط به ایمنی شامل دیوارهای SC توسط پیوست N9 of AISC N690s1-15 کنترل می­شود (موسسه آمریکایی ساخت فولاد، 2015). این مشخصه بر پایه تحقیقات تجربی و عددی انجام­شده توسط این محققان ایجاد شده است: Varma et al. (2014), Zhang et al. (2014), Sener et al. (2015), Sener and Varma (2014), Seo et al. (2015), Bhardwaj et al. (2015) and Bruhl et al. (2015a). برای مثال، طراحی مهارهای ستونی و تاثیر آن بر سطح عملکرد کامپوزیت و کمانش محلی ورق­های فولادی در منبع (Zhang et al., 2014) بحث وبررسی شده­است. رفتار برشی خارج از صفحه و طراحی دیواره­های SC در (Sener and Varma, 2014) و رفتار و طراحی برای خمش خارج از صفحه نیز در (Sener et al., 2015) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته­است. رفتار و طراحی دیوارهای SC برای برش رو به صفحه در (Seo et al., 2015) و رفتار و طراحی دیوارهای SC برای نیروی غشاء ترکیبی عمود بر صفحه و ممان­های خارج از صفحه نیز در (Varma et al., 2014) بررسی شده است. همچنین، این استاندارد حداقل الزامات و تدارکات جزئی بخش برای هر جزء (ورق فولادی، مهارهای ستونی، سیستم­های اتصال، و پرکننده بتنی) از دیوار SC را فراهم می­کند (Bhardwaj et al., 2015).

1. **پیش­زمینه**

دیوارهای SC در تاسیسات هسته­ای مربوط به ایمنی می­بایست برای بارگذاری غیرفعال و تحریک­کننده طراحی شوند (کمیسیون تنظیم مقررات هسته­ای آمریکا). تحقیقات پیشین اثربخشی دیوارهای SC در مقاومت در برابر آسیب محلی (زخمی­شدن، نفوذ، سوراخ شدن) ناشی از ضربه موشکی را مطرح کرده­اند. میزونو و همکاران (Mizuno et al., 2005) نتیجه گرفتند که یک دیوار SC سطح محافظت یکسانی (به منظور جلوگیری از سوراخ شدن دیوار) را همانند دیوار RC که تقریبا 30% ضخیم­تر است، فراهم می­کند. برخی از محققان نشان دادند که ورق فولادی را می­توان برای فراهم­کردن یک ضخامت معادل از بتن درنظر گرفت و کل ضخامت بتن معادل را نیز می­توان با معادلات دیوار برای ارزیابی عملکرد ضربه­ای بکار برد (Grisaro and Dancygier, 2014; Tsubota et al., 1993; Walter and Wolde-Tinsae, 1984).

نویسندگان اخیرا یک رویکرد سه مرحله ای برای طراحی دیواره های SC جهت جلوگیری از سوراخ­شدگی موضعی ناشی از ضربه موشکی ایجاد و تحقیق کرده اند (Bruhl et al. 2015a). این روش را می­توان برای محاسبه حداقل ضخامت مورد نیاز ورق فولادی برای جلوگیری از سوراخ موضعی بکاربرد. این روش با استفاده از یک پایگاه داده تجربی جامع از بیش از 100 آزمایش ضربه موشکی تأیید شد. همچنین، نویسنده­ها یک طرح توسعه و معیاری از مدل­های المان محدود 3 بعدی برای پیش­بینی رفتار و شکست محلی دیواره­های SC که در معرض ضربه موشکی هستند، ارائه کرده­اند (Bruhl et al., 2015a). این مدل­ها با استفاده از نتایج حاصل از پایگاه داده تجربی مورد سنجش قرار گرفت و نتایج آن برای تایید مکانیزم شکست دیوارهای SC که در معرض ضربه موشکی هستند، بکار گرفته شد. مدل­های سنجش­شده برای انجام مطالعات پارامتری تحلیلی جهت گسترش پایگاه داده و تایید بیشتر روش طراحی بکار رفتند. تحقیقات پیشین پاسخ ساختاری یا حداکثر انحراف دیوار SC که در معرض ضربه موشکی قرار دارد، لحاظ نکرده­اند. متعاقبا، دیوار SC طراحی­شده از سوراخ موضعی جلوگیری می­کند اما دیگر معیارهای طراحی مانند حداکثر حدود انحراف را ارضاء نمی­سازد.

دیوارهای SC باید طوری طراحی شوند که معیارهای کلی طراحی مانند خمش، برش، چرخش یا حدود انحراف را برآورده سازند. بااین­حال، تحقیقات محدودی درباره تاثیر کلی یا رفتار دو طرفه دیوارها یا تاوه­های SC وجود دارد. Sohel and Liew (2011, 2014) عملکرد ساختاری (رفتار کلی و محلی) یک پیکربندی خاص از تاوه­های SC شامل ورق­های فولادی مهارشده به هسته بتن با استفاده از قلاب­های J شکل که هم به عنوان مهارهای ستونی و هم سیستم­های اتصال عمل می­کنند، بررسی کرده­اند. این محققان به طور تجربی مقاومت استاتیک تاوه­های دو طرفه با تکیه­گاه ساده را که در معرض بارگذاری قطعه مرکزی است، ارزیابی کردند (Sohel and Liew, 2011). پارامترهای شامل­شده عبارتند از ضخامت هسته بتنی، ضخامت ورق­های فولادی، و نوع بتن (سبک وزن یا تقویت­شده با فیبر). نویسنده­ها نتیجه گرفتند که رفتار تاوه­های SC مشابه با رفتار تاوه­های RC است. مکانیزم خط تسلیم مشاهده­شده و منحنی­های بار – انحراف آن مشابه با عملکرد تاوه­های RC دو طرفه با تکیه­گاه ساده است. مدهای احتمالی شکست شامل شکست برشی پانچ (منگنه­ای)، شکست اتصال­دهنده برشی، کمانش و تسلیم ورق­های فولادی است. هنگامی که مدهای شکست برشی پانچ و شکست اتصال­دهنده برشی جلوگیری شد، پاسخ بار– انحراف، خمیری کاملا الاستیک بود، تا این­که انحرافات بزرگ و عمل­آوری غشاء افزایش لازم در مقاومت را ایجاد کرد. مقادیر شکل­پذیری انحراف برای تاوه­های SC با وزن معمول و هسته­های بتنی سبک­وزن، به ترتیب تقریبا برابر با 10 و 15 است.

نتایج حاصل از بررسی تجربی عملکرد ساختاری تاوه­های SC با قلاب­های J شکل که در معرض بارگذاری ضربه­ای هستند، در منبع (Sohel and Liew, 2014) ارائه شده­است. پارامترهای آن عبارتند از: ضخامت هسته بتنی، ضخامت ورق فولادی، و نوع بتن (سبک­وزن یا تقویت­شده با فیبر). تاوه­های SC با استفاده از جرم 2700 پوندی با پرتابه نیمه کره­ای (رهاشده) از ارتفاع 9.9 ft در معرض ضربه قرار گرفتند که منجر به سرعت­های ضربه 22-24 ft/s شد. نتایج تجربی شامل اثر محلی و پروفیل تغییرشکل تاوه­های SC در بالا و پایین ورق­های فولادی، همراه با اثر زمان – نیرو بود. Sohel and Liew یک روش تعادل انرژی به منظور برآورد حداکثر انحراف و نیروی ضربه توسعه دادند. شکل ایده­آل تابع مقاومت استاتیک (بار-انحراف) که در مطالعه قبلی آن­ها اندازه­گیری شده بود، به عنوان ورودی در محاسبه تعادل انرژی بکار رفت. نتایج تحلیلی حداکثر جابجایی وسط دهانه را تا 22% و نیروی ضربه را تا 25% کمتر برآورد می­کند.

1. **رویکرد**

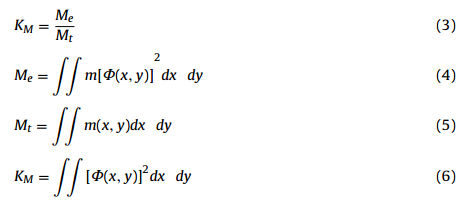
مقاله حاضر روش یک درجه آزادی (SDOF) را به منظور تشخیص و ارزیابی پاسخ جابجایی پانل­های SC پیاده­سازی می­کند. پانل­ها در معرض بارگذاری غیرفعال هستند که مشابه با روش مورداستفاده برای ارزیابی پاسخ جابجایی پانل­های RC است که در معرض ضربه موشکی هستند. روش SDOF به دلیل تشابهات بین رفتار برشی خارج از صفحه (Sener and Varma, 2014) و رفتار خمشی (Sener et al., 2015) دیوارهای SC و RC بکار می­رود. این روش به طور معمول برای ارزیابی پاسخ پانل­های RC به بارهای غیرفعال و تحریک­کننده بکار می­رود و در تحقیقات و همچنین جوامع عملی مهندسی مشهور است (Biggs, 1964; American Society of Civil Engineers, 1980; U.S. Department of Defense, 2008). روش SDOF جابجایی (کل) ساختاری پانل­های RC شامل توسعه مکانیزم فروریختگی و تغییرشکل ناشی از چرخش لولاهای خمیری مشخص می­کند و زمانی که پانل قادر به جلوگیری از مدهای شکست محلی (سوراخ شدن) ناشی از ضربه است، مورداستفاده قرار می­گیرد.

**3 – 1. روش SDOF برای پانل­های RC**

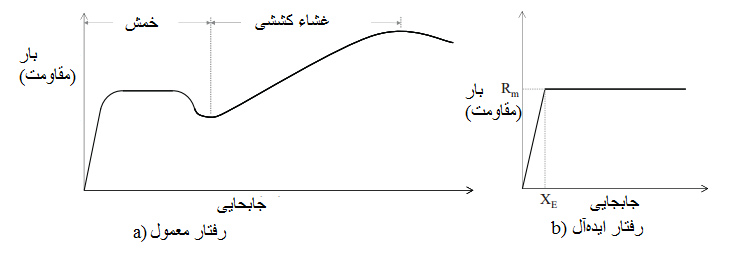
روش SDOF شامل حل معادله (1) است که معادله حرکت برای تعادل دینامیک است. در این معادله، جرم مؤثر سازه، C میرایی مؤثر سازه، R(y) مقاومت استاتیک و به عنوان تابعی از جابجایی y(t) است، F(t) تابع نیروی اعمال­شده، مشتق اول جابجایی نسبت به زمان (سرعت)، و مشتق دوم جابجایی نسبت به زمان (شتاب) است. پاسخ جابجایی اوج ناشی از بارگذاری غیرفعال یا تحریک­کننده در چرخه اول رخ می­دهد، و میرایی سازه، C، تاثیر چشمگیری بر این مقدار ندارد. در نتیجه، میرایی سازه معمولا شامل نمی­شود (U.S. Department of Defense, 2008) و معادله (2) رایج­ترین فرم مورداستفاده از معادله حرکت برای محاسبه جابجایی اوج ناشی از ضربه موشکی است.



همان­طور که در شکل 2 نشان داده­شده است، رفتار بار – جابجایی استاتیک پانل­های RC رفتار الاستوپلاستیک را نشان می­دهد که سخت­شدگی ناشی از عمل غشاء کششی را پیروی می­کند. بااین­حال، تاثیر عمل غشاء کششی معمولا نادیده گرفته می­شود و تابع مقاومت، R(y) خمیری کاملا الاستیک فرض می­شود که در شکل 2(b) نشان داده­شده است. پارامترهای مهم که این تابع مقاومت ایده­آل را تعریف می­کنند، حداکثر مقاومت، و انحراف الاستیک هستند. معادلات لازم برای محاسبه این پارامترها ( و ) در منابع متعددی دردسترس می­باشد (Biggs, 1964; American Society of Civil Engineers, 1980; U.S. Department of Defense, 2008). جرم مؤثر، ، برای مدل SDOF با ضرب جرم کل پانل () در ضریب تبدیل، ، محاسبه می­شود، که مبتنی هندسه غشاء، شرایط تکیه­گاه، و پاسخ موردانتظار (الاستیک، الاستوپلاستیک، یا پلاستیک) است. مقادیر ضریب تبدیل جرم، برای مورد بارگذاری یکنواخت که روی تاوه­های RC دو راهه عمل می­کند، در تحقیقات موجود هستند و معمولا در همان منابع معادلات لازم برای و نیز در دسترس است. بااین­حال، مقادیر برای مورد بار متمرکز مرکزی که بر روی تاوه­های دو مسیره با شرایط تکیه­گاه مختلف عمل می­کند، در متون موجود نیست. را می­توان با استفاده از معادلات (3) – (6) محاسبه کرد، که در آن معادله (4) برای جرم مؤثر () است و تابع شکل جابجایی را نیز شامل می­شود.



تابع نیرو، F(t)، در معادله (2) را می­توان با استفاده از روش Riera توسعه داد، که این روش ممنتوم (اندازه حرکت) شیء غیرفعال را به نیروی کنش برای سازه صلب تبدیل می­کند و (زاویه) میل ضربه (Riera, 1980) را شامل می­شود. دیگر روش­های قابل پذیرش برای توسعه تابع نیرو برای ضربه موشکی در منبع (American Society of Civil Engineers, 1980) فراهم شده­است. برای موارد خاص فراتر از پایه طراحی، کمیسیون مقررات هسته­ای آمریکا (NRC) تابع نیرویی را ارائه می­دهد، که جزء اطلاعات محرمانه محسوب می­شود و در دسترس عموم قرار نمی­گیرد (موسسه انرژی هسته­ای، 2011). برای توابع نیروی ساده­شده (مانند پالس­های مثلثی یا مستطیلی) و توابع مقاومت فرض­شده (الاستیک یا الاستوپلاستیک)، پاسخ­ها برای جابجایی اوج در متون (U.S. Department of Defense, 2008) موجود است. مقادیر جابجایی اوج را می­توان برای برآورد شکل­پذیری موردنیاز جابجایی و ظرفیت چرخش را برای سازه­های پانل که در معرض ضربه موشکی هستند، بکاربرد. برای پانل­های RC، شکل­پذیری موجود (و ظرفیت چرخش موردنیاز) در استاندارد ACI 349 App فراهم شده­اند (موسسه بتن آمریکا). مقاومت کل و عملکرد پانل­های RC در برابر بارگذاری غیرفعال را می­توان با مقایسه جابجایی­های موردنیاز و موجود ارزیابی کرد.

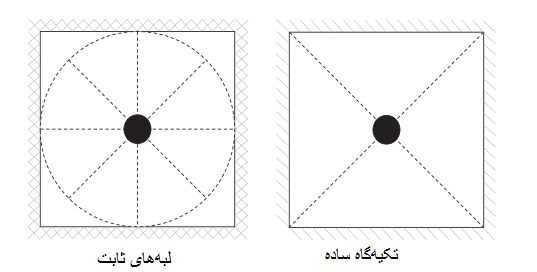


شکل 2: رابطه بار – جابجایی RC

**3 – 2. روش SDOF برای پانل­های SC**

پیاده­سازی روش SDOF برای پانل­های SC شامل حل معادله حرکت (2) جهت تعیین حداکثر جابجایی برای بارگذاری غیرفعال است. دو پارامتر موردنیاز برای تعریف کامل مدل جرم مؤثر، ، و تابع مقاومت، R(y) است. مقاله حاضر توسعه تابع مقاومت، R(y)، را براساس محاسبه جرم مؤثر، و ضریب تبادل جرم ارائه می­دهد.

جرم مؤثر، ، مدل SDOF با استفاده از تابع شکل جابجایی متناظر با مکانیزم فروریختگی ساختار پانل محاسبه شد. تحلیل اولیه توسط نویسندگان (Johnson et al., 2014) حاکی از آن بود که مکانیزم­های فروریختگی برای پانل­های SC با لبه­های ثابت مشابه با مکانیزم پانل­های RC است، برای مثال، الگوی ترک شعاعی و خطوط تسلیم که در شکل 3(a) نشان داده­شده است. تحقیقات پیشین توسط Sohel and Liew (2011) نشان داد که مکانیزم فروریختگی برای پانل­های SC با لبه­های با تکیه­گاه ساده شامل الگوی ترک شعاعی و خطوط تسلیم بود که در شکل 3(b) نشان داده­شده است. این مکانیزم­های فروریختگی برای شرایط مرزی مختلف به عنوان تابع شکل جابجایی جهت محاسبه ضریب تبدیل جرم، و جرم مؤثر برای مدل SDOF بکار گرفته شدند. این محاسبات بعدا در یک مقاله پس از تایید مکانیزم­های فروریختگی فرضی با استفاده از مدل­های عددی ارائه خواهند شد.

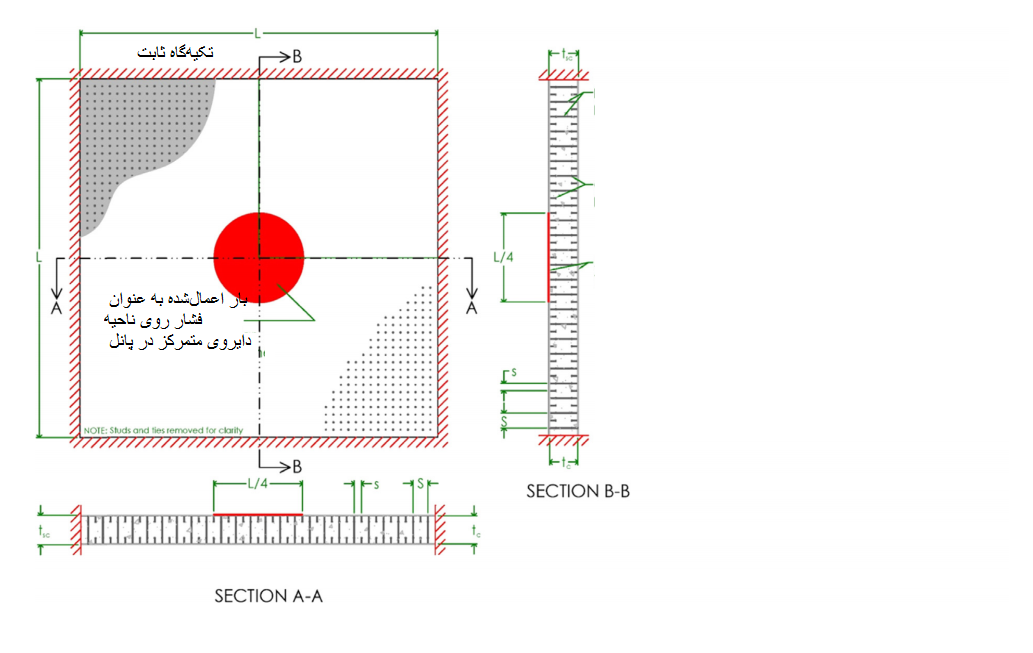


شکل 3: خطوط تسلیم برای پانل­های SC با بارهای متمرکز مرکزی: a) لبه­های ثابت، b) لبه­های با تکیه­گاه ساده

تابع مقاومت استاتیک با استفاده از مدل­های عددی (المان محدود 3 بعدی) پانل­های SC توسعه یافت. این مدل­های المان محدود 3 بعدی مشابه با مدل­های مورداستفاده قبلی برای مطالعات سوراخ­شدن موشکی محلی است و با استفاده از نتایج تجربی بزرگ مقیاس مورد سنجش قرار گرفته­اند. مطالعات پارامتری دقیق نیز با استفاده از مدل­های سنجش­شده به منظور بررسی تاثیر پارامترهای متعدد شامل ضخامت پانل SC، نسبت ضخامت دهانه به پانل، مقاومت تراکمی بتن، مقاومت تسلیم ورق فولادی، نسبت آرماتور، نسبت لاغری ورق، نسبت ضخامت فاصله بست به پانل و شرایط مرزی انجام شد. نتایج حاصل از مطالعات تجربی دقیق نشان داد که تابع مقاومت استاتیک برای پانل SC را می­توان به عنوان یک منحنی دوخطی با سخت­شدگی کرنش تسلیم تاخیری ایده­آل سازی کرد و دو نقطه مهار برای منحنی دو سویه را می­توان با استفاده از نتایج حاصل از مطالعات پارامتری دقیق تعریف نمود. این نقاط مهار به منظور لحاظ اثرات نسبت کرنش، و تابع مقاومت دوخطی حاصل با سخت­شدگی کرنش، R(y) جهت تعریف و حل معادله حرکت برای مدل SDOF پانل­های SC بکاربرده شد. ماهیت دوخطی تابع مقاومت استفاده از چارت­های پاسخ برای تعیین پاسخ جابجایی اوج و شکل­پذیری موردنیاز را نشان می­دهد. بااین­حال، معادله حرکت را می­توان با استفاده از یکی از روش­های عددی مانند نسبت بازگشت اختلاف محدود، شتاب ثابت، شتاب خطی، یا روش Newmark حل نمود (Biggs, 1964; Chopra, 2001).

1. **مقاومت استاتیک پانل­های SC: مدل­های عددی و معیار سنجش**

پانل­های SC موردنظر در این مقاله صفحات مربعی تخت هستند که در شکل 4 نشان داده­شده است. جزئیات ساختاری پانل­های SC مدنظر در این مقاله در الزامات پیوست N9 of AISC N690s1-15 (American Institute of Steel Construction, 2015) صدق می­کند. این پانل­های SC نماینده دیوارهای داخلی و بیرونی معمول از تاسیسات هسته­ای مربوط به ایمنی هستند. تحلیل­های المان محدود با استفاده از LS-DYNA نسخه 971، انتشار 5.1.1 (Hallquist, 2006) انجام شده­اند.

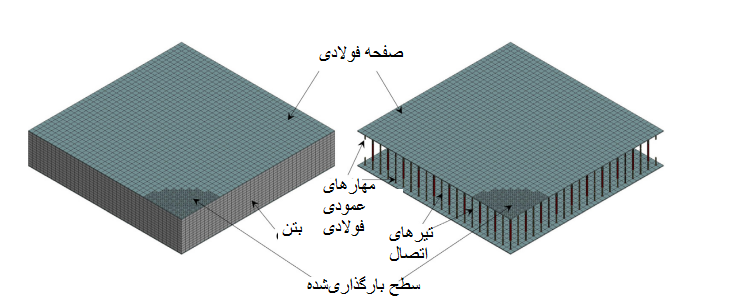


شکل 4: طراحی کلی پانل­های SC برای مطالعه پارامتریک (Johnson et al., 2014) (توجه: فشار بر ناحیه دایروی متمرکز در پانل به طور خطی افزایش می­یابد؛ میله­های اتصال و ستون­های عمودی به صفحات فولادی جوش داده می­شوند، مدل LS-DYNA محور متقارن هستند)

**4 – 1. مدل عددی: روش المان محدود سه بعدی (FEM)**

نویسندگان مدل­های عددی (3D FEM) را برای پیش­بینی شکست محلی (زخمی­شدن، سوراخ­شدن و نفوذ) پانل­های SC که در معرض ضربه موشکی هستند، توسعه و مورد سنجش قرار داده­اند (Bruhl et al., 2015a). در مقاله حاضر مدل­های 3D FEM مورد استفاده برای بررسی رفتار سازه پانل­های SC مبتنی بر مدل­های سنجش­شده پیشین برای شکست محلی با سه استثناء هستند. اول، شبکه المان محدود برای مدل اصلی جهت تمرکز بر رفتار سوراخ محلی کوچک (ریز) بود. اندازه شبکه المان محدود برای مطالعه حاضر جهت تمرکز بر رفتار جابجایی سازه پانل­های SC بزرگ (درشت) بود، که نسبت به شبکه­های مدل­سازی­شده برای ارزیابی رفتار سوراخ محلی بسیار بزرگتر بود (در طول دهانه). دوم، مدل المان محدود اصلی بر مدل­سازی آسیب موضعی (زخمی­شدن، نفوذ، سوراخ) متمرکز است و معیارهای فرسایش برای المان­های بتنی را شامل می­شود. مطالعه حاضر معیارهای فرسایش برای المان­های بتنی را شامل نمی­شود زیرا بر پاسخ ساختاری پانل­های SC تمرکز می­کند که به دلیل ضربه موشکی شکست محلی (سوراخ شدن) را متحمل نمی­شوند. سوم، مدل المان محدود اصلی برای تحلیل دینامیک همراه با ضربه موشکی صلب توسعه یافت، و شامل اثرات نرخ کرنش بر مقاومت ماده است. در این مقاله محور اصلی مقاومت استاتیک پانل­های SC است و بنابراین اثر نرخ کرنش بر مقاومت مواد شامل نشده است. این امر منجربه تغییر اندک در تعریف پارامترها برای رفتار تنش مدل ماده بتنی (MAT 084/085) در LS-DYNA می­شود. وقتی اثرات نرخ کرنش شامل نمی­شود، این مدل بتنی یک پاسخ جابجایی () دهانه تنش – ترک کششی با سفت­شدگی خطی را فرض می­کند. پارامترهای ورودی ظرفیت تنش کششی بتنی و بازشدگی ترک () هستند که متناظر با تنش کششی صفر است. انرژی شکستگی ماده حاصل (تعیین­شده) () برابر با مساحت زیر منحنی است و چنین محاسبه می­شود: .

شکل 5 مدل­های 3D FEM معمول برای پانل­های SC را نشان می­دهد. همان­طور که نشان داده­شده است، پرکننده بتن (هسته) با استفاده از لایه­های چندگانه المان­های آجری جامد با یکپارچگی کاهشی (SOLID ELFORM 1) مدل­سازی شده­اند. ورق­های فولادی نیز با استفاده از یک لایه از المان آجر جامد با یکپارچگی کامل برای نسبت­های ابعادی ضعیف (SOLID EFLORM-1) مدل­سازی شده­اند. تیرهای اتصال . مهارهای ستونی با استفاده از المان­های ستون Hughes-Liu با سطح مقطع یکپارچه مدل­سازی شده­اند (BEAM ELFORM 1). مقاومت لغزشی بین وجهی بین ورق­های فولادی و پرکننده بتنی با استفاده از المان­های اتصال­دهنده تیر مجزا مدل­سازی شدند (BEAM ELFORM 6). همان­طور که در (Zhang et al., 2014) و (Bruhl et al., 2015a) توصیف شد، این المان­های اتصال­دهنده مقاومت نیرو – لغزش برشی ظاهری فراهم­شده توسط مهارهای عمودی و تیرهای اتصال را مدل­سازی می­کنند.



شکل 5: مدل المان محدود دیوار SC معمول

جدول 1 تمامی ویژگی­های ماده که برای مدل­های 3D FEM مورد استفاده قرار می­گیرد، ارائه می­دهد. این ویژگی­ها شامل ویژگی­های ماده برای المان­ها (MAT 084/085) است، من جمله چگالی جرم، مدول­های الاستیک، نسبت پواسون، مقاومت تراکمی تک محوری، مقاومت کششی تک محوری، انرژی شکست، و عرض ترک در مقاومت کششی صفر. همچنین، جدول شامل تمامی ویژگی­های ماده برای المان­های فولادی (ورق­های فولادی، تیرهای اتصال، و مهارهای عمودی) است، از جمله چگالی جرم، مدول­های الاستیک، نسبت پواسون، و مرنش الاستیک در فرسایش. جدول 1 ویژگی­های ماده برای المان­های اتصال­دهنده شامل جابجایی در شکست و مرجع برای رابطه نیرو – لغزش معین را فراهم می­کند. علاوه برآن، جدول شامل ویژگی­های ماده برای تکیه­گاه­ها و صفحات بارگذاری و قیدهای اعمال­شده به درجات کلی آزادی همراه با تبدیل و چرخش است.

دو شرط تکیه­گاه (ثابت و تکیه­گاه ساده) برای مطالعات پارامتریک درنظر گرفته­شد. این شرط­های تکیه­گاه با محدودکردن تبدیل مناسب و درجات آزادی چرخش برای گره­ها در لبه­های متکی­شده پیاده­سازی شد. پانل­های SC در معرض بارگذاری متمرکز در مرکز بودند، که باعث رفتار خمشی با دو محور تقارن شد. این تقارن به منظور دستیابی به راندمان محاسباتی با مدل­سازی تنها یک چهارم بخش پانل SC با شرایط مرزی تقارن مناسب بکار گرفته شد.

بارگذاری متمرکز به عنوان افزایش فشار یکنواخت روی ناحیه دایره­ای در مرکز پانل SC اعمال شد. این فشار با استفاده از کلمات کلیدی LOAD SEGMENT SET اعمال شد. ناحیه­ای که در آن فشار پخش می­شود، قطر ناحیه دایره­ای باید به اندازه کافی کوچک باشد تا اثرات بارگذاری متمرکز یا ضربه موشکی را نشان دهد، اما آن­قدر کوچک نباشد که موجب شکست محلی (برش پانچ) شود. همان­طور که قبلا ذکرشد، مطالعه حاضر بر پاسخ ساختاری پانل­های SC که به دلیل ضربه موشکی شکست محلی (سوراخ شدن، ...) را متحمل نمی­شوند، متمرکز می­باشد. نویسنده­ها بررسی­های اولیه را به منظور ارزیابی تاثیر اندازه ناحیه بارگذاری­شده بر حداکثر ممان برای تیرهای با انتهای ثابت و تکیه­گاه ساده (Johnson et al., 2014) انجام دادند. براساس این بررسی­ها، قطر ناحیه (بارگذاری­شده) دایره­ای برابر با یک چهارم دهانه پانل SC انتخاب شد. در مقایسه با ممان­های ناشی از نیروهای متمرکز خالص، این توزیع حداکثر ممان دهانه وسط را برای تیرهای با تکیه­گاه ساده تا 12.5% و حداکثر ممان­های انتها و دهانه وسط برای تیرهای با انتهای ثابت را به ترتیب تا 23% و 2.1% کاهش می­دهد. همچنین این توزیع شانس شکست محلی (برش پانچ) پانل­های SC را کاهش می­دهد، که منطبق با هدف (پاسخ کلی پانل­های SC) مطالعه است.

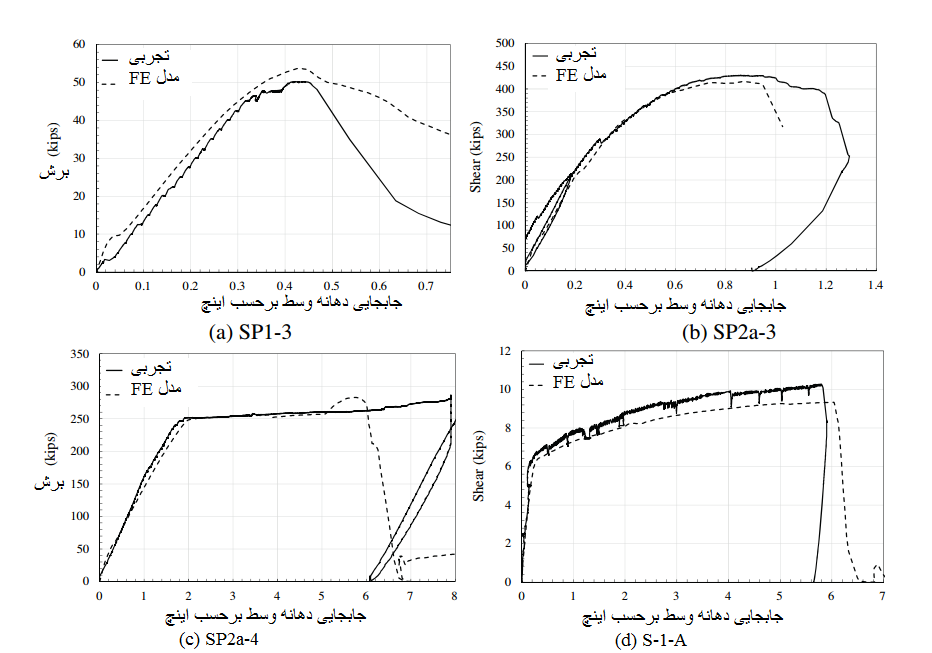
**4 – 2. تحقیق مدل 3D FEM**

نتایج تجربی حاصل از ده آزمون تیر استاتیک انجام­شده در آمریکا توسط Sener and Varma (2014) و نویسندگان برای تایید مدل­های 3D FEM بکار گرفته شد. جدول 2 جزئیات این آزمون­های تیر استاتیک را خلاصه می­کند. این جزئیات شامل پارامترهای مختلف هندسه، ماده و بارگذاری این نمونه­های تست­شده است، از جمله، عمق تیر یا ضخامت پانل ()،طول دهانه با تکیه­گاه ساده به عمق تیر ()، نسبت عرض تیر به عمق ()، ضخامت ورق فولادی ()، نسبت آرماتور ()، نسبت دهانه برش به عمق آن ()، نسبت قطر مهار عمودی به ضخامت ورق ()، نسبت فاصله مهار عمودی به ضخامت ورق ()، نسبت آرماتور تیر بست ()، نسبت فاصله تیربست به عمق تیر ()، مقاومت تراکمی بتن ()، مقاومت تسلیم ورق () و نوع بارگذاری (خمش سه یا چهار نقطه). همچنین جدول شامل مد شکست مشاهده­شده از آزمون است (شکست برشی SF، شکست برشی بین وجهی ISF یا شکست خمشی FF). نسبت آرماتور تیربست () به عنوان نسبت مساحت تیربست () به مجذور فاصله بست () محاسبه می­شود. علاوه برآن، جدول شامل نسبت است که برای نمونه­ها محاسبه شده­است، که در آن و ظرفیت خمشی و مقاومت برشی خارج از صفحه نمونه­ها است که با استفاده از معادلات طراحی AISC N690s1-15 و ویژگی­های ماده اندازه­گیری­شده محاسبه شده است. وقتی نسبت دهانه برش به عمق () بزرگتر از نسبت است، شکست خمشی (FF) انتظار می­رود. درغیراین صورت، شکست برشی (SF) مورد انتظار خواهد بود.

همان­طور که در جدول 2 نشان داده­شده است، چهار مورد از هفت نمونه تست­شده تیر توسط Sener and Varma (2014) در معرض خمش سه نقطه بودند و دیگر نمونه­ها در معرض خمش چهار نقطه قرار داشتند. پنج مورد از هفت نمونه تیر دارای مد شکست برشی (SP1-1, SP1-3, SP1- 4, SPa-1 و SP2a-3)، یک نمونه (SP1-2) دارای مد شکست برشی بین وجهی و یک نمونه (SP2a-4) دارای مد شکست برشی خمشی بودند. نمونه SP1-2 به دلیل مهارهای عمودی ناکافی در امتداد طول دارای شکست برشی بین وجهی بود که از نسبت بزرگتر آن (36) در جدول 2 آشکار است. Sener and Varma (2014) این نمونه (SP1-2) را نسبت بزرگتر از حد مجاز توسط استاندارد AISC N690s1-15 ایجاد کردند تا مد شکست برشی بین وجهی را نشان دهند. تمامی سه نمونه تست­شده توسط نویسنده­های لیست­شده در جدول 2 در مقیاس کوچک بودند ()، و با استفاده از روند تجربی توصیف­شده در منبع (Bruhl, 2015) در معرض خمش چهار نقطه­ای و دارای مد شکست خمشی بودند.

جزئیات مدل­های 3D FEM توسعه­یافته برای این نمونه­های تیر دقیقا مشابه با نمونه­های توصیف­شده قبلی در این بخش است. بخش­های جامد صلب در مدل­های FEM به منظور اعمال بارگذاری و پشتیبانی از نمونه­های تیر بکار رفتند. درجات آزادی مناسب این بخش­های صلب بسته به موقعیت آن­ها (صفحات بار یا تکیه­گاه) محدود شد. این بخش­های صلب جامد با استفاده از مدل ماده صلب (MAT 020) با مقادیر پارامتر ورودی لیست­شده در جدول 1 مدل­سازی شدند.

شکل 6 مقایسه منحنی­های نیروی برش – جابجایی دهانه وسط پیش­بینی­شده توسط مدل­های 3D FEM را با منحنی­های اندازه­گیری­شده تجربی برای نمونه­های SP1-3, SP2a-3, SP2a-4 و S-1-Aنشان می­دهد. مقایسه­های نشان داده­شده در شکل 6 مشابه هستند و نمایش مقایسه­ها برای دیگر نمونه­های باقیمانده در جدول 2 شامل شده است. نمونه­های SP1-3 و SP2a-3 دارای مد شکست برشی، و نمونه­های SP2a-4 و S-1-A دارای مد شکست خمشی هستند. مدل­های 3D FEM رفتار نیرو – جابجایی شامل سختی اولیه، نرم­شدگی، و حداکثر ظرفیت نمونه­های با مدل‌های شکست مختلف (شکست برشی، شکست برشی بین وجهی یا شکست خمشی) را با دقت خوبی پیش­بینی می­کنند. مقایسه عددی حداکثر ظرفیت نیروی نمونه­ها () با ظرفیت­های پیش­بینی­شده توسط مدل­های 3D FEM ()در جدول 2 شامل شده است. اضافه برآن، این جدول شامل مقایسه­های عددی سختی قاطع نمونه­ها () متناظر با با سختی قاطع () پیش­بینی­شده به وسیله مدل­های FEM در 0.67 است. مقدار میانگین برابر با 0.99 است، و ضریب تغییرات نیز برابر با 0.12 است. مقدار میانگین برابر با 0.89 و ضریب تغییرات نیز برابر با 0.19 است. مدل­های FEM عموما برای نمونه­های با شکست خمشی پایستار هستند. جابجایی­های نهایی در شکست پیش­بینی­شده توسط مدل­های FEM نسبت به نتایج تجربی محافظه کارانه هستند، زیرا مدل­ها کرنش (فرسایش) شکست فولاد 0.05 را مورد استفاده قرار می­دهند (که در جدول 1 نشان داده­شده است)، که نسبت به ویژگی­های ماده ورق فولادی برای آزمون­ها محافظه کارانه است.



شکل 6: تایید رویکرد مدل­سازی المان محدود (نمونه­های نماینده)

1. **تابع مقاومت استاتیک: مطالعات پارامتریک**

مدل­های 3D FEM تاییدشده به منظور اجرای مطالعات پارامتریک و ارزیابی اثر پارامترهای مختلف طراحی بر رفتار پانل­های SC بکار رفتند. جزئیات پانل SC و محدوده پارامترهای مورد استفاده برای این بررسی‌ها مطابق با الزامات استاندارد AISC N690s1-15 است. جدول 3 تمامی جزئیات هندسی و مواد طراحی­های پانل مورد استفاده برای اجرای مطالعات پارامتری تحلیلی را خلاصه می­کند. پارامترهای مورد نظر و محدوده مقادیر چنین می­باشند: 1- ضخامت دیوار، از 12 اینچ تا 48 اینچ، 2- نسبت ضخامت دهانه به دیوار، ، از 3 تا 15، 3- مقاومت تراکمی بتن، ، از 4 تا 6 ksi، 4- قدرت تسلیم ورق فولادی، ، از 50 تا 65 ksi، 5- نسبت آرماتور، ، از 2.0 تا 5.0%، 6- نسبت لاغری، ، از 10 تا 20، و 7- نسبت فاصله بست به ضخامت دیوار، ، از 0.5 تا 1.5. دو شرط مرزی مختلف (F ثابت، یا P متصل­شده) نیز در نظر گرفته شدند. طول چنین مهارهای عمودی برای تمامی پانل­های SC، 8 برابر بود، که از الزامات ارتفاع به قطر مشخص­شده توسط استاندارد AISC 360-10 تجاوز می­کند.

اصطلاحات مورد استفاده برای شناسایی پانل­های SC در جدول 3 و ادامه مقاله شامل تمامی 8 پارامتر می­باشد. برای مثال، نمونه F-36-8-4.2-12-0.5-5-50 دارای شرایط مرزی ثابت با برابر با 36 in است، نسبت برابر با 8 است، برابر با 4.2%، نسبت برابر با 12، نسبت برابر با 0.5، برابر با 5 ksi، و برابر با 50 ksi می­باشد. مدل­ها در چندین مجموعه در جدول 3 گروه­بندی شده­اند، و پارامترهای متغیر (دیگر پارامترها ثابت باقی می­مانند) با استفاده از حروف درشت برجسته شده­اند. علاوه برآن، جدول 3 شامل ظرفیت خمشی () و سختی خمشی مؤثر تبدیل­شده ترک ( برای تمامی مدل­ها با استفاده از اصلاحات AISC N690s1 محاسبه شده است) می­باشد. اگرچه، نسبت یک پارامتر سودمند برای تیرها است، اما این نسبت برای خمش دو سویه معنادار نیست و بنابراین در جدول 3 برای پانل­ها لیست نشده است.

تمامی پانل­های 27 SC برای افزایش یکنواخت بارگذاری متمرکز تحلیل شده­اند، که روی یک ناحیه مرکزی با قطر برابر با طول دهانه تقسیم بر چهار گسترش یافته است. نتایج تجربی شامل پاسخ­های نیروی متمرکز – جابجایی دهانه وسط ()، تنش­ها و کرنش­ها در المان­های محدود، و نیروها در المان­های اتصال­دهنده است. ابتدا رفتار خمشی پانل­های SC بحث وبررسی می­شود، سپس تابع مقاومت استاتیک ایده­آل مورد بررسی قرار می­گیرد، و نهایتا تاثیر پارامترهای ویژه ارزیابی می­شود.

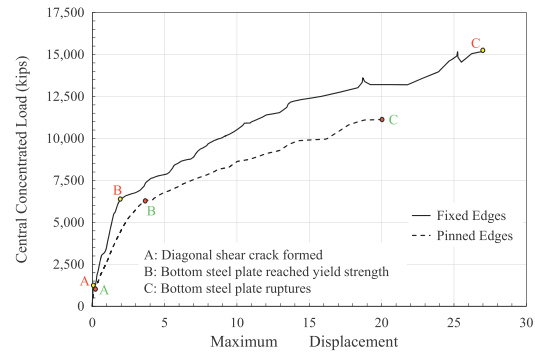
**5 – 1. رفتار خمشی پانل­های SC**

شکل 7 پاسخ­های برای پانل­های SC با شرایط تکیه­گاهی ثابت و ساده را نشان می­دهد. همچنین این شکل رخداد رویدادهای اصلی همراه با پاسخ­های را شناسایی می­کند، من جمله: a) ترک برشی قطری در بتن، b) تسلیم صفحه فولادی تنش، و c) گسیختگی صفحه فولادی تنش. پاسخ‌های  تا رویداد (A) از نظریه خمش الاستیک پیروی می‌کند و سختی اولیه را می‌توان با استفاده از معادلات جدول‌بندی شده برای خمش صفحات الاستیک با ضخامت یکپارچه، سختی خمشی برابر با EIeff، مرزهای صاف و شرایط مرزی مناسب در Young et al., 2012 پیش‌بینی کرد. نظریه رفتار الاستیک برای پاسخ‌های  بین رویدادهای (A) و (B) مناسب نبود زیرا ترک‌های برشی قطری که اطراف منطقه بارگذاری حلقوی ایجاد شده و در سراسر عمق پرشدگی بتن پخش شدند، مخروط ناقصی را زیر ناحیه بارگذاری شده تشکیل می‌دادند. این مخروط ناقص بتنی باعث تغییرشکل موضعی زیر ناحیه بارگذاری شده که نمی‌تواند به تنهایی با EIeff نظریه خمش الاستیک دربرگرفته شود. این تغییرشکل‌های موضعی باعث افزایش فشار در ورق فلزی تنش زیر ناحیه بارگذاری می‌شود و سختی پاسخ  را بعد از تسلیم بیشتر کاهش می‌دهد (رویداد B). تسلیم در ورق فلزی تنش آغاز شده، به صورت شعاعی در جهت لبه‌های پانل تا تکیه‌گاه‌های ثابت پخش شده و به صورت قطری تا گوشه‌های پانل‌های با تکیه‌گاه ساده منتشر می‌شود.

تسلیم ورق تراکم بعد از انتشار تسلیم ورق فلزی تنش به اندازه تقریبی مساحت بارگذاری شده آغاز گردید. تسلیم ورق فلزی تراکم حول محیط ناحیه بارگذاری شده آغاز گردید و به صورت شعاع با افزایش بارگذاری منتشر شد. شکستگی پانل SC وقتی روی داد که ورق فلزی تنش در کشش پلاستیک محتاطانه مفروض، یعنی 05/0، دچار گسیختگی شد؛ جدول 1 را ببینید. مکانیسم ازهم‌پاشیدگی پانل‌های با لبه‌های ثابت دارای خطوط تسلیم و الگوی ترک شعاعی است، همانطور که در تصویر 3(الف) نشان داده شده است. مکانیسم ازهم‌پاشیدگی برای پانل‌های با لبه‌های تکیه‌گاه ساده دارای خطوط تسلیم و الگوی ترک قطری است، همانطور که در تصویر 3(ب) نشان داده شده است. بارگذاری پلاستیک (Pb) که از خط تسلیم مکانیسم‌های ازهم‌پاشیدگی محاسبه شد برای پانل‌های با تکیه‌گاه‌های ثابت و تکیه‌گاه‌های ساده به ترتیب برابر  و 8Mn بود که در آن Mn ظرفیت انعطافی در واحد عرض است.

جدول 1: مشخصات مواد برای مدل‌های LS-DYNA

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | مقدار یا معادله مورد استفاده | منبع |
| ورودی برای MAT\_084/085 (بتن) | | |
| جرم مخصوص، RO (lbf s2/in) |  |  |
| قدرمطلق مماس اولیه، TM (psi) |  | موسسه بتن آمریکا، 2011 |
| نسبت پوآسن، PR | 15/0 |  |
| تاب فشردگی تک محوری، UCS (psi) |  |  |
| مقاومت کششی تک محوری، UTS (psi) |  |  |
| پهنای شکاف در مقاومت کششی صفر، FE (in) |  | ویتمن، 2002 |
| شعاع توده، ASIZE (in) |  |  |
| اثرات سرعت (0 = ON، 1 = OFF) | 1 |  |
| تبدیل واحد، CONM |  |  |
| ووردی برای MAT\_024 (صفحه فولادی، تیر بست و مهار عمودی) | | |
| جرم مخصوص، RO (lbf s2/in) |  |  |
| قدرمطلق یانگ، E (psi) |  |  |
| نسبت پوآسن، PR | 30/0 |  |
| کشش پلاستیکی در زمان شکستن، FAIL | 05/0 |  |
| منحنی بار، LCSS (فشار واقعی-کشش پلاستیک) | براساس ویژگی‌های مواد (جداول 2 و 3) |  |
| ورودی برای MAT\_074 (اجزای اتصال‌دهنده برای تیر بست و مهار عمودی) | | |
| جرم مخصوص، RO (lbf s2/in) |  |  |
| جابجایی در زمان شکست، TDF |  | Shim et al., 2004 |
| منحنی بار، FLCID (رابطه بار-لغزش) |  | Ollgaard et al., 1971  موسسه آمریکایی ساخت فولاد، 2010 |
| ورودی برای MAT\_020 (تکیه‌گاه‌ها و صفحات بار) | | |
| جرم مخصوص، RO (lbf s2/in) |  |  |
| قدرمطلق یانگ، E (psi) |  |  |
| نسبت پوآسن، PR | 30/0 |  |
| محدودیت‌ها، CMO | 1.0 = محدودیت‌های اعمال شده با مختصات جهانی |  |
| محدودیت‌های انتقال | 4 = x, y، محدودشده؛ 7 = x, y, z، محدودشده |  |
| محدودیت‌های چرخش | 7 = x, y, z، محدودشده |  |



**جابجایی**

**حداکثر**

**بار متمرکز مرکزی (kips)**

الف: تشکیل ترک برشی قطری

ب: صفحه فولادی کف به تاب ارتجاعی می‌رسد

ج: گسیختگی صفحه فولادی کف

لبه‌های ثابت

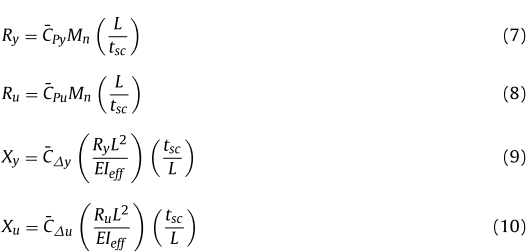
لبه‌های تحت فشار

تصویر 7: نیرو-جابجایی نماینده برای لبه‌های ثابت و لبه‌های با تکیه‌گاه ساده

**2.5. مقاومت استاتیک دوخطی ایده‌آل**

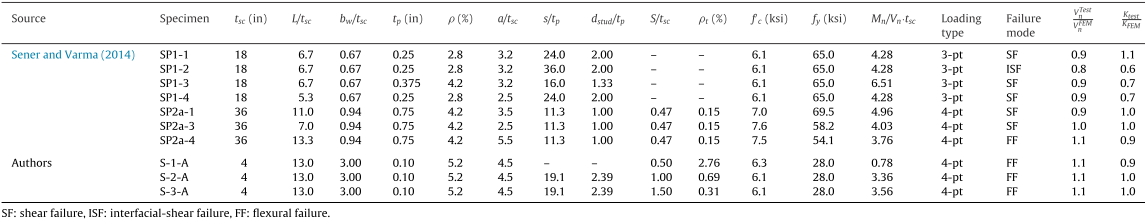
تصویر 8 تابع مقاومت دوخطی مورد استفاده برای ایده‌آل‌سازی  نماینده را نشان می‌دهد. تابع مقاومت دوخطی با دو نقطه مهار تعریف می‌شود: (1): نقطه تسلیم (Xy, Ry) و (2) نقطه نهایی (Ru, Xu). محاسبه نیروی تسلیم (Ry) و نیروی نهایی (Ru) و جابجایی متناظر (Xy و Xu) کاملا تابع مقاومت دوخطی ایده‌آل برای پانل‌های SC را تعریف می‌کند. سختی اولیه (k1) و سختی پس از تسلیم (k2) برای تعریف تابع مقاومت در راه حل عددی معادله حرکت مفید است. این مقادیر سختی مستقیما از مقادیر نقطه مهار با استفاده از معادلات (11) و (12) محاسبه می‌شود.

نیروی تسلیم (Ry) و نیروی نهایی (Ru) به عنوان فاکتورهای ( و ) ظرفیت انعطافی (Mn) و نسبت طول به ضخامت دهانه (L/tsc) بیان شدند، به صورتی که در معادلات (7) و (8) نشان داده شده است. جابجایی تسلیم متناظر (Xy) و جابجایی نهایی (Xu) به صورت فاکتورهای ( و ) جابجایی الاستیک اسمی (نیرو تقسیم بر ) ضرب در  بیان شدند، همانطور که در معادلات (9) و (10) آمده است. پارامتر طول به ضخامت دهانه (L/tsc) باید به دلیل تاثیر معنادار روی  برای پانل‌های با نسبت‌های L/tsc کمتر از 10 در نظر گرفته شود. این تاثیر برای پانل‌های با L/tsc بزرگ‌تر از 10 غیرقابل‌چشم‌پوشی است و می‌توان از 10 در این معادلات استفاده کرد.

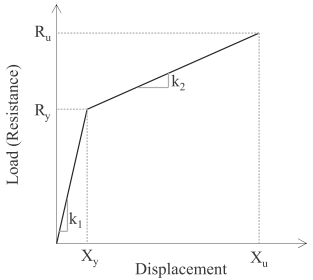




جدول 2: جزئیات تیرهای SC مورد استفاده برای اعتبارسنجی روش مدلسازی المان محدود



SF: شکست برشی؛ ISF: شکست برشی بین‌وجهی؛ FF: شکست خمشی



**بار (مقاومت)**

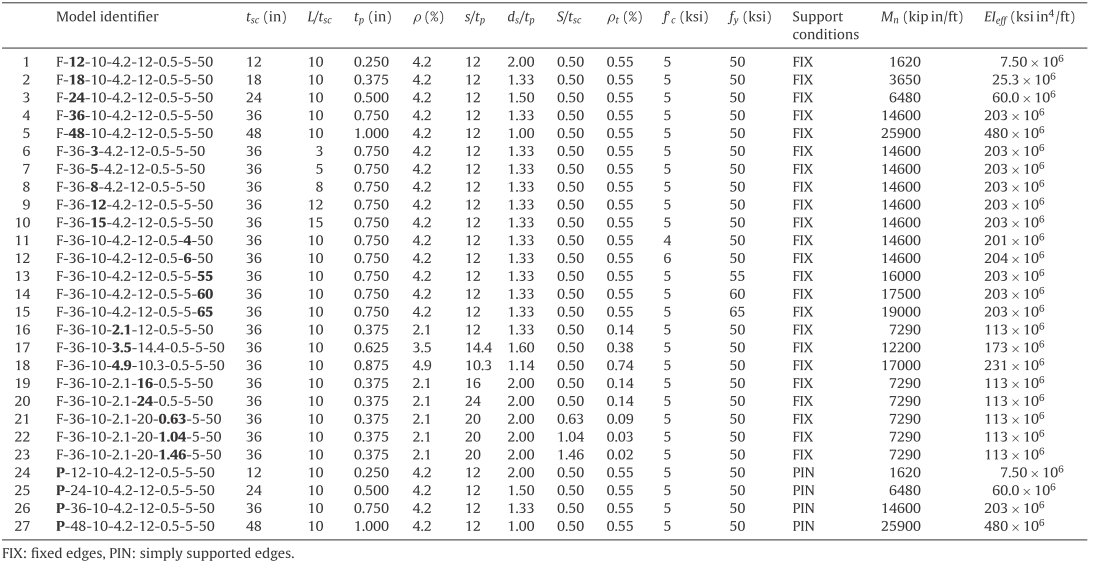
جابجایی

تصویر 8: تابع مقاومت ایده‌آل برای پانل‌های SC

پاسخ‌های  به منظور تعیین این ضرایب (یا فاکتورها) با استفاده از معادلات (13) و (14) نرمال‌سازی شد. همانطور که نشان داده شد، بار P با توجه به نسبت Mn ضرب در L/tsc نرمال‌سازی شد که معکوس عبارت معادلات (7) و (8) است. جابجایی  با توجه به نسبت PL2/EIeff ضرب در tsc/L نرمال‌سازی شد که نماینده معکوس عبارت معادلات (9) و (10) است.



جدول 3: جزئیات پانل‌های SC موجود در مطالعه پارامتری



پاسخ‌های  پانل‌های SC به دلیل تاثیر جنس و پارامترهای هندسی، شروط مرزی، طول دهانه و غیره روی سختی و قدرت پانل‌های SC، به صورت قابل توجهی از نظر اندازه تغییر می‌کند. هرچند، وقتی این  با استفاده از معادلات (13) و (14) نرمال سازی می‌شود، به پاسخ‌های  تقلیل می‌یابد که قابل مقایسه و شبیه یکدیگر بودند. پاسخ‌های  برای تعیین نقاط مهار و مقادیر میانگین ضرایب  معرف تابع مقاومت استاتیک دوخطی به کار رفتند.

جدول 4 شامل نیروها و جابجایی‌های متناظر با وقوع رویداد ترک A (Pcr و )، رویداد تسلیم B (Py و )، و رویداد C (Pu و ) است. مقادیر متناظر نیروها و جابجایی‌های نرمال‌شده CPcr و  برای رویداد A، CPy و  برای رویداد B و CPu و  برای رویداد C نیز در جدول 4 برای همه پانل‌های SC آمده است.

همانطور که در جدول 4 ذکر شد (ستون ملاحظات)، تحلیل شش مدل‌ پانل SC به دلیل ناپایداری‌های عددی که امکان غلبه بر آن نبود، پیش از شکستن خاتمه یافت. دلایل ناپایداری عددی مشخص نبود اما به صورت بالقوه به دلیل برهمکنش‌های پیچیده بین المان‌های فولادی و بتنی بود. چندین تکنیک برای غلبه بر ناپایداری‌های حاصل از این برهمکنش‌های پیچیده به کار رفت و این تکنیک‌ها برای برخی مدل‌ها، و نه برای همه، موفق بود. مدل‌های معدودی دچار گسیختگی برشی شد که پاسخ نیرو-جابجایی را محدود کرد. برای مثال، رفتار مدل شماره 6، F-35-3-4.2-12-0.5-5-50، با ترک‌های برشی قطری کنترل شد که در اوایل بارگذاری تشکیل می‌شدند. این مدل کوچک‌ترین نسبت ضخامت طول به دیواره دهانه (L/tsc) که برابر 3 بود را داشت و این مسئله باعث سلطه برشی آن شد. رفتار مدل‌های شماره 16، 17 و 19-23 با ترک برشی قطری از میان ضخامت دیوار کنترل می‌شد. این ترک‌های قطری در بالای مهار عمودی روی ورق تنش افقی می‌شود. این مدل‌ها نسبت‌های آرماتور تیر بست پایین‌تر ( کمتر از 14/0 درصد در بیشتر موارد) و فاصله تیر بست بزرگ‌تر (S/tsc بزرگ‌تر از 5/0) داشتند که امکان جلوگیری از کنترل پاسخ نیرو-جابجایی توسط حالت گسیختگی برشی را نداشت.

مقادیر CPy و  برای رویداد B و CPu و  برای رویداد C در جدول 4 گزارش شد و برای محاسبه مقادیر میانگین  و  در انواع مختلف مدل‌های پانل SC به کار رفت. تحلیل آماری مقادیر در جدول 5 آمده که شامل مقدار میانگین ، انحراف معیار  و ضریب تغییر (COV) است. مقادیر میانگین  و  برای پانل‌های SC با لبه‌های دارای تکیه‌گاه ساده به ترتیب برابر 55/0، 79/0، 98/0 و 50/2 بود. COV متناظر از 4 تا 11 درصد تغییر می‌کند.

مقادیر میانگین  و  برای پانل‌های SC با لبه‌های دارای تکیه‌گاه ثابت به ترتیب برابر با 53/0، 36/0، 02/1 و 74/1 بود. COV متناظر از 19 تا 44 درصد تغییر می‌کند که نسبتا بالا است. COV بالا از تحلیل‌هایی ناشی می‌شود که به دلیل ناپایداری‌های عددی، زودهنگام پایان می‌پذیرند و از مدل‌هایی که به دلیل نسبت‌های پایین آرماتور تیر بست ( کمتر از 14/0 درصد) و فضادهی بزرگ اتصال با گسیختگی برشی کنترل می‌شوند و می‌توان با طراحی و جزئیات مناسب از آن‌ها جلوگیری کرد. وقتی این‌ مدل‌ها از ارزشیابی‌های آماری حذف شد، مقادیر میانگین  و  به ترتیب برابر 55/0، 49/0، 25/1 و 42/2 بود. COV متناظر از 7 تا 17 درصد بود.

جدول 6 این مقادیر پیشنهادی نهایی برای نقاط مهار تابع مقاومت استاتیک دوخطی ایده‌آل  و  در پانل‌های SC با شرایط مختلف را گزارش می‌دهد. مقادیر  و  از مدل‌های FE محاسبه شد که شامل کشش گسیختگی 05/0 برای ورق‌های فولادی بود. قابلیت کشش دردسترس ممکن است بسته به تکنولوژی‌های تولید بکارگرفته شده، بالاتر باشد.

**3.5. تاثیر پارامترها**

تصاویر 9-116 پاسخ‌های بار-جابجایی مدل‌های 1-27 جدول 4 را مقایسه می‌کند تا تاثیر پارامترهای متنوع را ارزشیابی نماید. هر تصویر این موارد را مقایسه می‌کند: (الف) پاسخ‌های  و (ب) منحنی‌های  نرمال برای مدل‌ها در گروه‌های ویژه‌ای که تنها یک پارامتر در آن‌ها تغییر می‌کند در حالی که همه پارامترهای دیگر نسبتا ثابت باقی می‌مانند. شناسه‌های مدل در تصاویر آمده‌اند و پارامتر تغییرداده‌شده برای سادگی هایلایت شده است. به علاوه، تابع مقاومت دوخطی ایده‌آل که با استفاده از فاکتورهای  تهیه شد در جدول 6 گزارش شده و برای مقایسه با منحنی  در نظر گرفته شده است.

تصویر 9 پاسخ‌های  حاصل از تحلیل‌های مدل‌های 1-5 در جدول 4 را مقایسه می‌کند که در آن تنها ضخامت پانل از 12 به 48 اینچ تغییر کرده در حالی که پارامترهای باقیمانده طراحی یکسان هستند. همانطور که در تصویر 9 (الف) نشان داده شده، ظرفیت‌های بار و جابجایی پانل‌های SC با ضخامت tsc افزایش قابل‌توجهی دارد. منحنی‌های  و  بری این مدل‌ها تقریبا قابل مقایسه هستند. به علاوه، تابع مقاومت دوخطی به خوبی با منحنی‌های ، بویژه بعد از تسلیم، مقایسه می‌شود. سختی پیش از تسلیم تفاوت قابل‌توجهی با تابع مقاومت ایده‌آل دارد و به نظر می‌رسد این تفاوت برای دیوارهای با ضخامت کوچک‌تر (tsc) قابل توجه‌تر باشد. این روش، tsc برابر با 12 اینچ را به عنوان محدوده کاربردی تابع مقاومت شناسایی می‌کند.

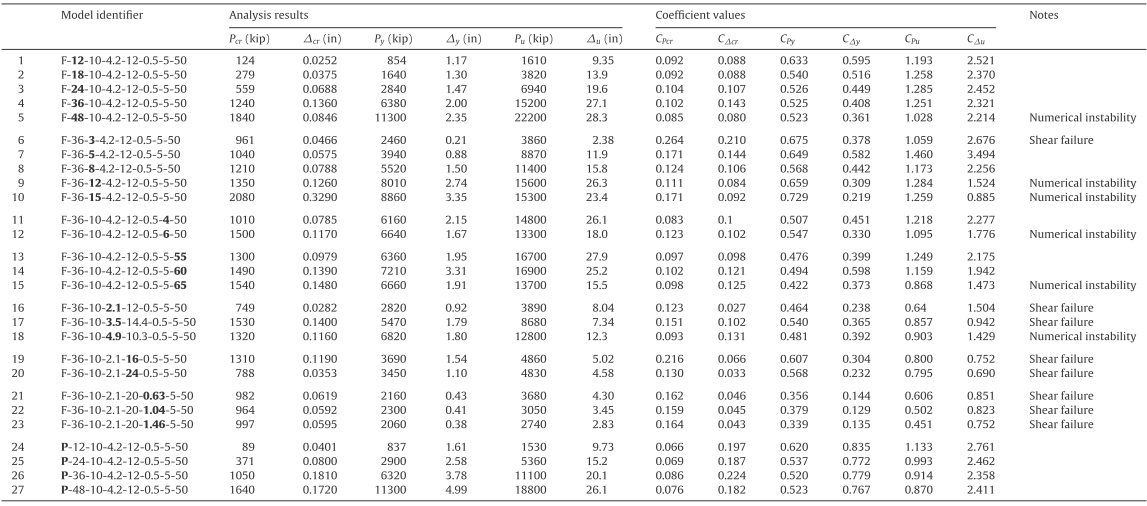
تصویر 10 پاسخ‌های  از تحلیل‌های مدل 4 و 6-10 جدول 4 را مقایسه می‌کند که تنها نسبتL/tsc از 3به 15 تغییر داده شده در حالی که همه پارامتر‌های باقیمانده ثابت نگه داشته شدند. همانطور که در تصویر 10(الف) آمده، ظرفیت‌های بار و جابجایی پانل‌های SC به دلیل افزایش انعطاف‌پذیری، با نسبت L/tsc افزایش می‌یابد. این تاثیر برای L/tsc کمتر از 10 بیشتر از همه قابل توجه بود. منحنی‌های  و  برای این مدل‌ها نسبتا قابل مقایسه هستند. تابع مقاومت دوخطی به خوبی با منحنی‌های  مقایسه می‌شود به جز مدلی که کوچک‌ترین نسبت L/tsc برابر 3 را دارد که به جای خمش، در برش دچار گسیختگی شد. این بخش نسبت L/tsc برابر با 5 را به عنوان حد عملی تابع مقاومت شناسایی می‌کند.

تصویر 11 پاسخ‌های  از تحلیل‌ مدل‌های 4 و 11-12 جدول 4را مقایسه می‌کند که تنها تاب فشردگی بتن (f'c) از 4 به 6 ksi تغییر داده شده در حالی که همه پارامترهای باقیمانده ثابت نگه داشته شده‌اند. تاب فشردگی بتن (f'c) تاثیر متوسطی روی ظرفیت‌های بار و جابجایی،، پانل‌های SC دارد. تابع مقاومت دوخطی به خوبی با منحنی‌های  مقایسه می‌شود.

تصویر 12 پاسخ‌های  از تحلیل مدل‌های 4 و 13-15 جدول 4 را مقایسه می‌کند که تنها تاب ارتجاعی (Fy) از 50 به 65 ksi تغییر می‌کند در حالی که همه پارامترهای دیگر ثابت باقی می‌مانند. تاب ارتجاعی ورق (Fy) ظرفیت بار را اندکی افزایش می‌دهد و ظرفیت جابجایی را به دلیل کاهش قابلیت کشش ماده، پایین می‌برد. تابع مقاومت دوخطی به خوبی با منحنی‌های  مقایسه می‌شود اما ظرفین جابجایی پانل‌های SC با ورق‌های دارای تاب ارتجاعی 65 ksi پایین‌تر است. این بخش مشخص کرد تاب ارتجاعی برابر با 65 ksi حد عملی برای تابع مقاومت است.

تصویر 13 پاسخ‌های  از تحلیل‌ مدل‌های 4 و 16-18 جدول 4 را نشان می‌دهد که تنها نسبت آرماتور ورق  از 1/2 به 9/4 درصد تغییر می‌کند. بیشتر پارامترهای دیگر ثابت بودند اما نسبت آرماتور تیر بست  نیز از 14/0 به 74/0 درصد و نسبت لاغری صفحه  از 3/10 به 4/14 تغییر یافت. نسبت لاغری صفحه  و نسبت آرماتور مهار  باید تغییر کند تا شروط دقیق مقطع حداقل AISC N690s 1-25 را برآورده کند، همانطور که قبلا ذکر شد. تصویر 13 (الف) نشان می‌دهد پاسخ بار-جابجایی پانل‌های SC با نسبت آرماتور ورق  افزایش می‌یابد اما پاسخ به دلیل کاهش نسبت آرماتور مهار در مدل‌های 16 و 17 و ناپایداری عددی در مدل 18 با گسیختگی برشی قطع شد. منحنی‌های  و  مشابه یکدیگر بودند و به خوبی با تابع مقاومت دوخطی پیش از خاتمه به دلیل گسیختگی برشی مقایسه شدند (به جای گسیختگی خمشی).

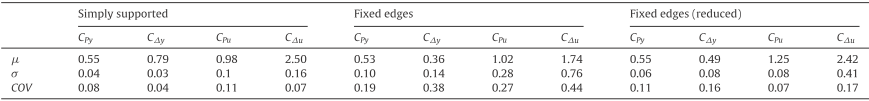
جدول 4: نتایج مطالعه پارامتری پانل‌های SC



جدول 5: ارزشیابی آماری ضرایب نقطه مهار برای تابع مقاومت استاتیک

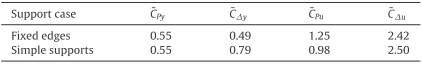
**لبه‌های ثابت (کوچک شده)**

**لبه‌های ثابت**



**تکیه‌گاه ساده**

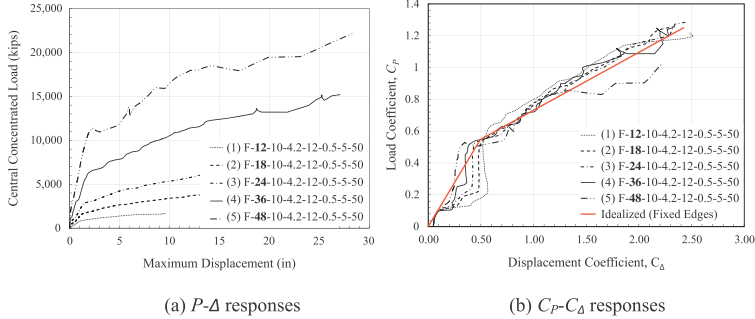
جدول 6: ضرایب میانگین نقاط مهار تابع مقاومت ایده‌آل



**حالت تکیه‌گاه**

**تکیه‌گاه‌های ساده**

**لبه‌های ثابت**



پاسخ‌های

پاسخ‌های

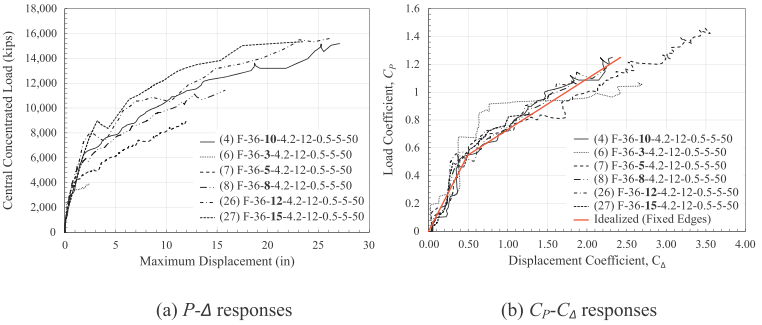
ضریب بار

بار متمرکز مرکزی

جابجایی حداکثر

ضریب جابجایی

تصویر 9: تاثیر tsc روی رفتار بار-جابجایی پانل‌های SC

تصویر 10: تاثیر L/tsc روی رفتار بار-جابجایی پانل‌های SC

ضریب بار

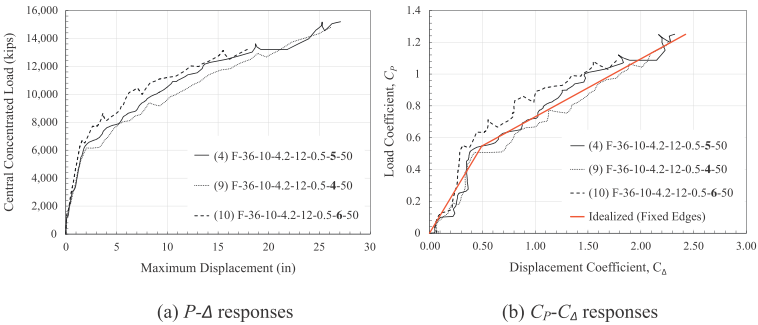
بار متمرکز مرکزی

جابجایی حداکثر

ضریب جابجایی

پاسخ‌های

پاسخ‌های



پاسخ‌های

پاسخ‌های

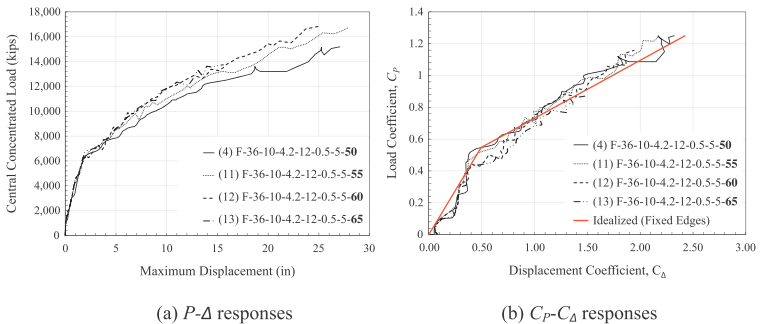
ضریب بار

ضریب جابجایی

جابجایی حداکثر

بار متمرکز مرکزی

تصویر 11: تاثیر f'c روی رفتار بار-جابجایی پانل‌های SC



پاسخ‌های

پاسخ‌های

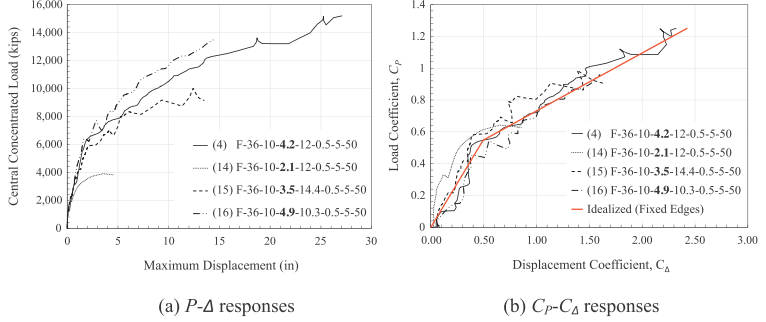
ضریب بار

ضریب جابجایی

جابجایی حداکثر

بار متمرکز مرکزی

تصویر 12: تاثیر Fy روی رفتار بار-جابجایی پانل‌های SC



پاسخ‌های

پاسخ‌های

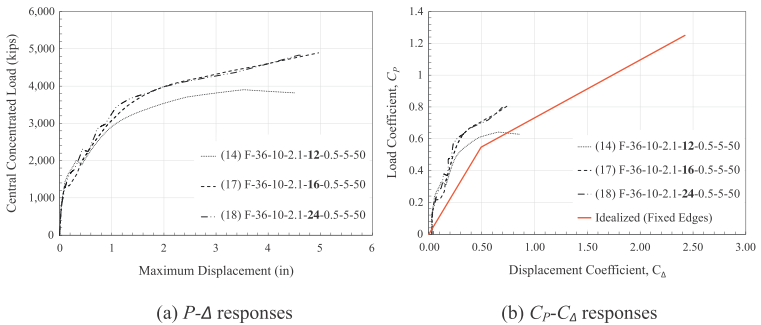
بار متمرکز مرکزی

جابجایی حداکثر

ضریب جابجایی

ضریب بار

تصویر 13: تاثیر ρ روی رفتار بار-جابجایی پانل‌های SC



ضریب جابجایی

جابجایی حداکثر

پاسخ‌های

پاسخ‌های

ضریب بار

بار متمرکز مرکزی

بار متمرکز مرکزی

ضریب جابجایی

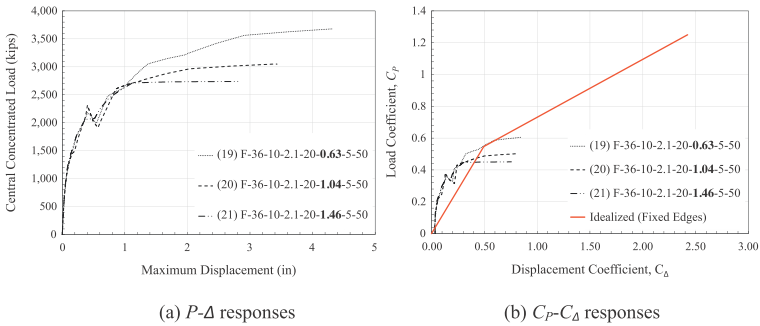
جابجایی حداکثر

پاسخ‌های

پاسخ‌های

ضریب بار

تصویر 14: تاثیر s/tp روی رفتار بار-جابجایی پانل‌های SC



پاسخ‌های

پاسخ‌های

جابجایی حداکثر

ضریب جابجایی

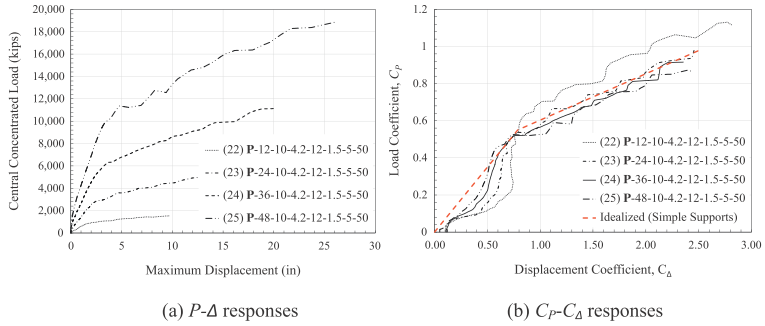
بار متمرکز مرکزی

ضریب بار

تصویر 15: تاثیر S/tsc روی رفتار بار-جابجایی پانل‌های SC

جدول 7: فاکتورهای جرم برای بار متمرکز مرکزی روی پانل‌های SC مربع

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| حالت تکیه‌گاه | KME | KMP |
| لبه‌های ثابت | 14/0 | 10/0 |
| تکیه‌گاه‌های ثابت | 20/0 | 10/0 |



پاسخ‌های

پاسخ‌های

جابجایی حداکثر

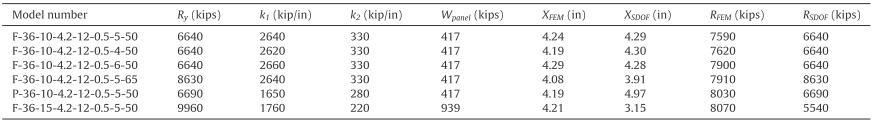
ضریب جابجایی

ضریب بار

بار متمرکز مرکزی

تصویر 16: تاثیر شرایط تکیه‌گاه روی رفتار بار-جابجایی پانل‌های SC

جدول 8: نتایج مطالعه اثر پانل SC



تصویر 14 پاسخ‌های  از تحلیل مدل‌های 4، 19 و 20 در جدول 4 را مقایسه می‌کند که تنها نسبت لاغری (s/tp) از 12 به 24 تغییر داده شد در حالی که بیشتر پارامترهای دیگر ثابت باقی ماند. نسبت آرماتور ورق (ρ) برابر با 1/2 درصد و نسبت آرماتور مهار (ρt) برابر با 14/0 درصد بود. همه مدل‌های پانل SC در حالت برش دچار گسیختگی شدند و منحنی‌های  و  به دلیل خاتمه زودهنگام در اثر گسیختگی برشی، به خوبی با تابع مقاومت دوخطی قابل مقایسه نبودند. تصویر 15پاسخ‌های  از تحلیل مدل‌های 4 و 21-23 جدول 4 را مقایسه می‌کند که تنها نسبت فاصله تیر بست (s/tsc) از 63/0 به 46/1 تغییر داده شد در حالی که بیشتر پارامترهای دیگر ثابت نگه داشته شدند. نسبت آرماتور ورق فولادی (ρ) برابر با 2/1 درصد و لاغری صفحه (s/tp) برابر با 20 بود اما نسبت آرماتور بست (ρt) از 09/0 به 02/0 کاهش یافت. همانطور که انتظار می‌رفت، این مدل‌ها نیز در حالت برش دچار گسیختگی شدند و منحنی‌های  به دلیل خاتمه زودهنگام در اثر گسیختگی برشی، به خوبی با تابع مقاومت دوخطی مقایسه نشدند.

تصویر 16 پاسخ‌های  از تحلیل مدل‌های 24-27 در جدول 4 را مقایسه می‌کند که سر آن تکیه‌گاه ساده داشت. ضخامت دیوار (tsc) از 12 به 48 اینچ تغییر می‌کرد در حالی که باقیمانده پارامترهای طراحی یکسان باقی ماندند. همانطور که در تصویر 16(الف) نشان داده شده، ظرفیت‌های بار و جابجایی پانل‌های SC افزایش قابل‌توجهی با tsc دارد. منحنی‌های  و  برای این مدل‌ها نسبتا قابل مقایسه بود. تابع مقایسه دوخطی که با استفاده از ضرایب شرایط انتهای با تکیه‌گاه ساده در جدول 6 تهیه شد، به خوبی با محنی‌های ، بویژه بعد از تسلیم، قابل مقایسه است. سختی پیش از تسلیم تا حد زیادی با تابع مقاومت ایده‌آل تفاوت دارد و به نظر می‌رسد این تفاوت برای دیوارهای با tsc کوچک‌تر، قابل توجه‌تر باشد.

**6. تحلیل SDOF دیوارهای SC**

**1.6. فاکتور انتقال جرم**

فاکتور انتقال جرم، KM، برای پانل RC با لبه‌های ثابت و بار متمرکز عمل‌کننده در مرکز برابر با 16/0 است (جامعه مهندسین عمران آمریکا، 1980). مقدار KM برای بار متمرکز فعال در مرکز پانل RC با لبه‌های تکیه‌گاه ساده در مقالات ذکر نشده است اما می‌توان آن را با استفاده از شکل منحرف‌شده ، به صورتی که در معادله (6) آمده، محاسبه کرد. شکل منحرف‌شده، الگوی ترک و خطوط تسلیم برای پانل‌های SC مشابه مواردی بود که برای پانل‌های RC حاصل شد اما تابع مقاومت استاتیک برای پانل‌های SC بعد از تسلیم دوخطی همراه با سخت‌شدگی است (تصویر 8) که با تابع مقاومت الاستوپلاستیک به کار رفته برای پانل‌های RC تفاوت داد (تصویر 2). بنابراین، فاکتورهای تبدیل جرم، KM، برای پانل‌های SC با استفاده از معادله (6) برای هر دو محاسبه گردید (1) پانل‌های SC با لبه‌های ثابت و (2) پانل‌های SC با لبه‌های دارای تکیه‌گاه ساده.

از آنجایی که پاسخ‌های نرمال شده  برای پانل‌های SC با پارامترهای جنس و هندسه مختلف، مشابه یکدیگر بود، KM با استفاده از یک مدل (مدل 4) برای پانل‌های با لبه‌های ثابت و با یک مدل دیگر (مدل 24) برای پانل‌های با لبه‌های دارای تکیه‌گاه ساده محاسبه گردید. KM به صورت عددی با ضریب مربع انحراف هر گره در صفحه مرکزی مدل در مساحت انشعابی گره محاسبه گردید. KM برای هر مدل دو بار محاسبه گردید: (1) در بازه الاستیک پاسخ (بعد از رویداد ترک‌برداری بتن الف اما پیش از رویداد تسلیم ب) و (2) در بازه غیرالاستیک پاسخ (بعد از رویداد تسلیم ب اما پیش از رویداد گسیختگی ج). مقادیر حاصل از KM (بازه الاستیک) و KMP (بازه غیرالاستیک) در جدول 7 برای هر دو پانل با لبه‌های ثابت و دارای تکیه‌گاه ساده نشان داده شده‌اند.

**2.6. محدودیت‌ها**

مدل SDOF برای محاسبه انحراف پانل‌های SC در معرض بارگذاری فشردنده یا تکانشی به کار می‌رود. پاسخ محاسبه‌شده به تابع مقاومت مفروض، R(y) بستگی دارد و انحراف حداکثر برای برآورد انعطاف موردنیاز جابجایی و ظرفیت چرخش در سازه‌های پانل به کار می‌رود. تابع مقاومت، R(y)، دربردارنده رفتار خمشی و حالت مرتبط حد تسلیم فولاد و حالت گسیختگی فولاد است. این تابع دربردارنده حالت‌های شکست برشی نیست زیرا آن‌ها همانطور که در تصاویر 14 و 15 آمده، غیرانعطاف پذیر هستند. همانطور که قبلا ذکر شد، مدل‌های با حالت‌های شکستگی برشی از محاسبه ضراب میانگین  و  مورد استفاده برای تعریف تابع مقاومت استاتیک حذف شدند.

مدل SDOF عملکرد ساختاری سازه پانل (رفتار خمشی یا برشی) را ارزشیابی نمی‌کند. معادله حرکت SDOF به صورت عددی حل می‌شود تا سوابق زمان جابجایی و مقاومت محاسبه گردد. می‌توان مقاومت حداکثر را برای برآورد نیروی برشی نزدیک لبه‌های پانل به کار برد. این پانل را می‌توان به صورتی طراحی و توصیف کرد که در برابر این نیروی برشی حداکثر یا نیروی برشی مرتبط با مقاومت نهایی، R­u، مقاومت کند (وزارت دفاع آمریکا، 2008). روش SDOF دربردارنده شکستگی برشی تورفتگی بتن در مجاور بار ضربه‌ای نیست و این ملاحظه طراحی باید جداگانه از طریق تحلیل SDOF چک شود.

**3.6. مقایسه نتایج تحلیل ضربه**

پاسخ پانل‌های SC در معرض ضربه موشک (دینامیک) با استفاده از مدل‌های المان محدود که قبلا توصیف گردید، محاسبه شد که در آن مدل‌ها اندکی اصلاح شدند تا شامل اثرات سرعت کشش روی مواد بتنی و فولادی باشند. اثرات سرعت کشش بتن با استفاده از اثرات سرعت داخلی در مدل بتن وینفریث در نظر گرفته شد. تنها ویژگی ماده که برای این کار تغییر داده شد انرژی شکست (Gf) بود که به جای پهنای دهانه شکاف (w)، مستقیما به عنوان ورودی تهیه شد. اثرات سرعت کشش برای فولاد با استفاده از منحنی که سرعت کشش را به فاکتور افزایش اعمال‌شده به تاب ارتجاعی ارتباط می‌داد، در نظر گرفته شد (وزارت دفاع آمریکا، 2008). مدل‌های المان محدود برای ضربه موشک، قطعه شکننده استوانه از 9500 پوندی با قطر 94 اینچ و سرعت اولیه 150 فوت/ثانیه تحلیل شد. جدول 8 شامل شناسه و شماره مد شش پانل SC است که برای ضربه پرتابه دینامیک تحلیل شدند. این پانل‌های SC از موارد موجود در مطالعات پارامتری پیشین با جزئیات کاملی که در جدول 3 آمده انتخاب شدند.

پاسخ این پانل‌های SC در معرض ضربه موشک دینامیک نیز با استفاده از مدل SDOF که قبلا توصیف شد محاسبه گردید. نیروی اعمال شده به مدل SDOF، یعنی F(t)، از نیروی تماس پرتابه مدل المان محدود به دست آمد که تقریبا برای همه مدل‌ها مشابه بود. F(t) مقدار اوج 120000 kips را دارا بوده و طی تقریبا 1 میلی ثانیه به صفر کاهش یافت. تابع مقاومت هر مدل براساس پرتابه‌های مقطع عرضی آن که در جدول 3 فهرست شده محاسبه گردید و شامل فاکتورهای افزایش دینامیک (DIF) برای f'c و Fy حاصل از آن بود (وزارت دفاع آمریکا، 2008). مقادیر محاسبه شده Ry، سختی اولیه k1، سختی پس از تسلیم k2 و وزن پانل Wpanel در جدول 8 آمده است.

نتایج تحلیل‌های المان محدود و تحلیل‌های SDOF برحسب جابجایی حداکثر (XFEM و XSDOF) و نیروی کال واکنش (RFEM و RSDOF) در جدول 8 به منظور مقایسه گزارش شده است. همانطور که نشان داده شده، پنج تا از شش مورد مطابقت نزدیکی با انحراف حداکثر داشتند. تحلیل SDOF برای مدل 27 (f-36-15-4.2-2-0.5-5-50) جابجایی کوچک‌تری را نسبت به مدل المان محدود محاسبه کرد زیرا شکل دارای انحراف به دلیل بار ضربه تفاوت زیادی با شکل منحرف‌شده مورد استفاده برای محاسبه KM داشت. دلیل آن مرتبط با نسبت قطر موشک به طول دهانه است. مدل 27 (F-36-15-4.2-12-0.5-5-50) بلندتر از پنج پانل دیگر بود بنابراین نسبت قطر به طول موشک پایین‌تر بوده که منجر به انحراف موضعیتر نسبت به پنج پانل دیگر می شود. به بیان دیگر، وزن بسیار کمتری نسبت به آنچه با فاکتور جرم از تحلیل‌های استاتیک برآوردشد، درگیر بود. تحلیل SDOF برای همه موارد واکنش‌های کل کوچک‌تری را نسبت به FEM محاسبه کرد که نتیجه مدل 27 بسیار پایین‌تر از پنج مورد دیگر بود.

**7. خلاصه و نتیجه‌گیری**

این مقاله تهیه مدل با یک درجه آزادی (SDOF) برای محاسبه پاسخ جابجایی حداکثر پانل‌های SC در معرض بارگذاری ضربه موشک را ارائه می‌دهد که برای جلوگیری از نقص سوراخ‌شدگی موضعی دیوار با استفاده از کار بروهل و همکاران (Bruhl et al., 2015a) طراحی گردید. مدل SDOF با استفاده از مدل‌های تحلیل المان محدود سه‌بعدی، نتایج و مطالعات پارامتری تهیه شد. مدل‌های المان محدود سه‌بعدی پانل‌های SC براساس مدل‌هایی بود که قبلا توسط نویسنده‌ها برای مطالعات سوراخ شدگی موضعی تهیه شده و الگوگیری از آن صورت گرفت. این مدل‌ها برای مطالعات جابجایی حداکثر ارائه شده در این مقاله اندکی تغییر داده شد و از نتایج آزمایشی بزرگ‌مقیاس برای رفتار خارج صفحه‌ای تیرهای SC الگوگیری کرد.

مدل‌های معیار برای اجرای مطالعات پارامتری با استفاده از 27 مدل مختلف پانل‌های SC با تغییرات ویژگی‌های هندسی (ضخامت دیوار tsc، نسبت طول به ضخامت دهانه L/tsc)، ویژگی‌های جنس (تاب ارتجاعی ورق Fy، مقاومت فشردگی بتن f'c)، پارامترهای جزئیات مقطع (نسبت آرماتور ورق ρ، لاغری صفحه s/tp، نسبت آرماتور تیر بست ρt و فاصله تیر بست S/tsc) و شرایط مرزی (ثبات چرخشی تکیه‌گاه‌ها) مورد استفاده قرار گرفتند. همه پانل‌های SC براساس AISC N690s1-15 طراحی و جزئیات‌دهی شدند (موسسه ساخت فولاد آمریکا، 2015) و بازه مقادیر پارامترها برای طراحی هسته‌ای کاربردی بود. همه مدل‌ها برای بارگذاری متمرکز افزایشی یکنواخت تحلیل شدند که در مرکز و با نسبت طول قطر به دهانه بارگذاری 25/0 عمل می‌کردند. پاسخ‌های  حاصله مقایسه شدند و سپس براساس پاسخ‌های  نرمال سازی صورت گرفت که تلویحا دربردارنده پارامترهای غالب بود. پاسخ‌های نرمال‌شده  برای مدل‌های با پاسخ غالب خمشی تقریبا مشابه بودند.

مطالعات پارامتری نشان داد پاسخ‌های  و  برای مدل‌های با پاسخ خمشی غالب شامل سه رویداد اصلی است: (1) رویداد الف ترک‌برداری برشی بتن، (2) رویداد ب تسلیم ورق فولادی، و (3) رویداد ج گسیختگی ورق فولادی. رویداد الف ترک‌برداری برشی بتن در اوایل پاسخ و واکنش روی می‌دهد و ایده‌آل‌سازی دوخطی که با رویداد تسلیم ب و رویداد گسیختگی ج تعریف می‌شود برای پانل‌های SC با لبه‌های تکیه گاه ثابت یا ساده کافی است. استحکام نهایی (Ru) پانل‌های SC (مرتبط با رویداد ج گسیختگی ورق) با نسبت طول به ضخامت دیواره دهانه (L/tsc)، تا L/tsc برابر با 10، افزایش می‌یابد که بعد از آن در بارگذاری پلاستیک (Pp) مرتبط با مکانیسم ازهم‌پاشیدگی پلاستیکی پانل ثابت باقی‌ می‌ماند و با استفاده از تحلیل خط تسلیم محاسبه می‌گردد. مکانیسم ازهم‌پاشیدگی پلاستیک برای پانل‌های SD با لبه‌های ثابت شامل خطوط تسلیم شعاعی و الگوی ترک‌برداری بتنی است در حالی که مکانیسم پانل‌های دارای لبه تکیه‌گاه ساده شامل خطوط تسلیم و ترک‌برداری قطری (گوشه به گوشه) است.

تاب فشردگی بتن تاثیر قابل‌توجهی روی پاسخ‌های بارگذاری-جابجایی ندارد. تاب ارتجاعی فولاد و نسبت آرماتور بر پاسخ‌های بارگذاری-جابجایی تاثیر می‌گذارد که به تاثیر مستقیم آن‌ها روی تسلیم و رویدادهای گسیختگی و ظرفیت اندازه حرکت در واحد عرض، Mn، بستگی دارد. پارامترهای جزئیات مقطع مثل نسبت لاغری صفحه s/tp، نسبت آرماتور تیر بست ρt و نسبت فاصله تیر بست S/tsc تاثیر قابل‌توجهی روی پاسخ‌های بارگذاری-جابجایی و کنترل حالت شکست دارد. گسیختگی برشی برای مدل‌های با نسبت آرماتور تیر بست ρt (کمتر از 14/0 درصد) و نسبت فاصله تیر بست بزرگ‌تر S/tsc) حالت گسیختگی غالب بود. این مدل‌های با گسیختگی برشی در تهیه تابع مقاومت دوخطی ایده‌آل برای مدل‌های SDOF وارد نشدند. در نتیجه، مدل‌ها و رویکرد SDOF محدود به پانل‌های SC با پاسخ خمشی غالب است که می‌توان آن را با جزئیات‌دهی کافی به دست آورد (نسبت‌های ρt بالاتر یا نسبت‌های S/tsc کوچک‌تر).

نقاط مهار تابع مقاومت دوخطی با نام نقطه تسلیم (Ry, Xy) و نقطه گسیختگی (Ru, Xu) با استفاده از پاسخ‌های نرمال  برای همه مدل‌ها با پاسخ خمشی غالب تعیین شدند. تابع مقاومت دوخطی با این نقاط مهار (و معادلات محاسبه آن‌ها) به منظور محاسبه پاسخ جابجایی پانل‌های SC با شرایط زیر پیشنهاد شده است: (1) باره معمول پارامترهای طراحی مورد استفاده در طراحی هسته‌ای، (2) طراحی براساس AISC N690s1-15 و (3) با پاسخ خمشی غالب.

اشکال جابجاشده از تحلیل المان محدود پانل‌های SC برای تعیین جرم موثر، Me، و فاکتورهای تبدیل جرم مرتبط، KM، برای مدل‌های SDOF پانل‌های SC به کار رفت. این مقادیر در مقالات برای پانل‌های SC با شرایط زیر گزارش شد: (1) شرایط مرزی متفاوت (لبه‌های ثابت و با تکیه‌گاه ساده)، (2) در معرض بارگذاری متمرکز مرکزی و (3) برای پاسخ‌های در بازه الاستیک (KME) و بازه غیرالاستیک (KMP).

مدل‌های SDOF و رویکرد تحلیل برای پیش‌بینی رفتار شش پانل SC در معرض بارگذاری ضربه موشک به کرا رفت. پاسخ‌ها با موارد حاصل از تحلیل المان محدود سه بعدی ضربه موشک دینامیک مقایسه گردید که تلویحا شامل اثرات سرعت کشش روی ویژگی‌های مواد بتنی و فولادی بود. مقایسه‌ها نشان می‌دهد مدل‌های SDOF جابجایی حداکثر (کل) را با صحت قابل‌قبول پیش‌بینی می‌کند. هرچند، اثرات موضعی قابل‌توجهی در مدل‌های المان محدود سه‌بعدی برای مدل‌های با نسبت قطر به دهانه موشک کمتر از 25/0 وجود داشت که در مدل‌های SDOF درنظرگرفته نشده بود.

**1.7. کار آینده**

چندین جنبه مهم در این کار وجود دارد که نیازمند بررسی بیشتر است. تحقیق تکمیلی انعطاف‌پذیری دردسترس پانل‌های SC با شرایط انتهایی مختلف مورد نیاز است تا محدوده‌های مناسبی برای این المان‌های سازه‌ای تعریف شود. تحقیق جاری نشان می‌دهد انعطاف‌پذیری پانل‌های SC با انعطاف‌پذیری پانل‌های RC قابل‌مقایسه است اما بررسی آزمایشی و تحلیلی بیشتر به منظور نهایی‌سازی محدوده‌های طراحی مورد نیاز است.

تحقیق پیشین عملکرد موضعی دیوارهای SC نسبت به ضربه موشک را ارزشیابی کرده و روش طراحی برای جلوگیری از سوراخ‌شدگی موضعی ارائه داد. تحقیق جاری بر پاسخ دیوارهای SC طراحی‌شده برای جلوگیری از سوراخ‌شدگی موضعی و تهیه مدل‌های SDOF برای محاسبه جابجایی حداکثر تمرکز کرد. هرچند، موارد با تغییرشکل‌های غیرالاستیک بسیار موضعی را در نظر نگرفته که با کوچک‌تر شدن نسبت ضخامت قطر به موشک به پانل احتمال آن افزایش می‌یابد. نتایج اولیه مورد بحث نویسنده‌ها در کار بروهل و همکاران (Bruhl et al., 2015b) نشان می‌دهد این تغییرشکل‌های بسیار موضعی را می‌توان با افزودن یک درجه آزادی دیگر به مدل SDOF توصیف‌شده در اینجا مدل‌سازی کرد که دربردارنده تغییرشکل موضعی است. تحقیق بیشتر باید بر شناسایی این متمرکز باشد که این تغییرشکل‌های بسیار موضعی در کجا مقتضی هستند و رویکرد مدل‌سازی دو درجه آزادی را برای این موارد کالیبره کند

این که کار آینده شامل برسی تقاطع دیوار SC یا اتصالات آن باشد نیز اهمیت دارد. اگر این موارد به درستی جزئیات‌دهی نشوند تا بار دینامیک حاصل از ضربه و بارهای انفجاری را منتقل کنند، مقاومت به سوراخ‌شدگی موضعی و رفتار کلی در درجه دوم قرار خواهد گرفت.

**تقدیر و تشکر**

نویسنده‌ها از دکتر بیل جانسون و دکتر دامون ریگلز برای پیشنهاد و مباحث مفیدی که تاثیر مثبتی روی محتوای این مقاله داشت تشکر می‌کند. تامین سرمایه جزئی توسط DOE (شماره وام DE-NE0008201)، NRC (شماره وارم NRC-HQ-60-14-G-0001)، AISC و دانشگاه پرودو صورت گرفت.

