

بررسی اثر ضخامت و نوع فولاد بر رفتار دیواربرشی فولادی تحت اثر بار انفجار

حسین خورشیدی میانایی^۱، سید مسعود میرطاهری^{۲*}، حمیدرضا رضائی بارونقی^۳

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران- سازه، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۳- پژوهشگر مرکز سازه و مصالح امن، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

چکیده

یکی از اهداف پدافند غیرعامل، طراحی سازه‌های ایمن در برابر انفجار است. امروزه با گسترش حملات انفجاری وارد به ساختمان‌ها، بررسی رفتار ساختمان‌ها تحت بارهای انفجاری یک ضرورت محسوب می‌شود. در سال‌های اخیر به‌طور مکرر دیوارهای برشی فولادی به‌عنوان سامانه مقاوم در برابر بارهای جانبی در طراحی و مقاوم‌سازی سازه‌های فلزی به کار برده می‌شوند. هزینه ساخت کم، نصب سریع و پتانسیل جذب انرژی بالا، دیوار برشی فولادی را به یک سامانه بسیار مناسب جهت مقاوم‌سازی سازه‌های موجود تبدیل ساخته است. همچنین با توجه به ویژگی‌های برجسته دیوار برشی با فولاد نرم در برابر بارهای جانبی نظیر جذب انرژی بالا، شکل‌پذیری مناسب و افزایش سختی و کاهش تغییرمکان، مطالعه رفتار چنین سامانه‌هایی در برابر بارهای انفجاری ضروری به نظر می‌رسد. بدین منظور، در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدودی ABAQUS و مدل‌سازی یک نمونه آزمایشی، صحت مدل‌سازی و کارکرد نرم‌افزار در مقام قیاس با داده‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. پس از آن دیوار برشی فولادی با ورق فولاد معمولی و فولاد نرم، با استفاده از AISC 20 Design Guide طراحی شد و هر دو سامانه با ضخامت‌های ۱، ۱/۵ و ۲/۵ برابر ضخامت طراحی شده برای ورق، تحت انفجارهای حوزه دور و نزدیک مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج بیانگر کاهش تغییرمکان قاب فولادی در صورت استفاده از فولاد نرم است. همچنین با افزایش ضخامت در هر دو حالت فولاد نرم و فولاد معمولی، تحت انفجارهای حوزه دور و نزدیک، تغییرمکان کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: پدافند غیرعامل، انفجار، دیوار برشی فولادی، فولاد نرم، اجزا محدود

*نویسنده مسئول: سید مسعود میرطاهری
mmirtaheri@kntu.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰

۱- مقدمه

سرزمین ما ایران به دلیل موقعیت خاص جغرافیایی و سیاسی همواره در معرض انواع خطرات طبیعی و تهدیدات انسان‌ساز قرار داشته است و تلفات انسانی و خسارات مالی سنگینی متحمل شده است. امروزه با استفاده از برنامه‌های جامع مدیریت بحران می‌توان با به‌کارگیری اقدامات مؤثر با طرح‌های کاربردی و حتی‌الامکان کم‌هزینه و چندمنظوره در مرحله آمادگی قبل از بحران، به میزان زیادی از شدت و گستردگی خسارات و تلفات ناشی از خطرات کاست. از مهم‌ترین این تمهیدات، به‌کارگیری اصول پدافند غیرعامل به‌عنوان راهکاری جهت کاهش خطرپذیری در برابر خطرات مختلف و افزایش کارایی پس از وقوع خطر است که باید در سطوح مختلف طراحی معماری و سازه موردتوجه قرار گیرد. دیوارهای برشی فولادی (SPSWs) به‌طور فزاینده‌ای به سیستم‌های رایج مقاوم در برابر بارهای جانبی تبدیل شده‌اند. اگرچه این دیوارها در ابتدا برای تحمل نیروهای زلزله به‌کار برده شده‌اند، اما با توجه به پیشرفت‌های اخیر این پرسش به‌وجود می‌آید که آیا می‌توان از قابلیت SPSWs برای مقابله با بارهای انفجاری استفاده کرد؟ پس از حوادث ۱۱ سپتامبر گروهی از دانشمندان باتلفیق این سامانه و سامانه دیوارهای برشی بتنی درصدد ایجاد سازه‌های غیر قابل نفوذ و مقاوم در برابر بارهای لرزه‌ای و انفجاری به‌شکل کاملاً اقتصادی هستند. دیوارهای برشی فولادی بسیار راحت‌تر اجرا می‌شوند و در کارگاه‌های ساختمانی کاملاً قابل ساخت می‌باشند و به‌هیچ‌نوع فن‌آوری جدیدی نیاز ندارند. از سوی دیگر، از زمانی که انسان فولاد را در سازه‌های ساختمانی به‌کار گرفت، سعی نمود مقاومت آن را افزایش دهد تا با ظریف‌تر نمودن مقاطع اعضا، وزن سازه را کاهش داده و آن را اقتصادی‌تر نماید. غافل از اینکه افزایش مقاومت فولاد نه تنها برای همه اعضا یک سازه فولادی همیشه مفید نمی‌باشد بلکه در بعضی از اعضا در شرایطی لازم است از مقاومت آن تا حد امکان کاسته شود تا سازه بتواند از خود رفتار بهتری را نشان دهد. در واقع راز استفاده از فولاد نرم و انتظار رفتار مناسب از آن در مقایسه با فولاد معمولی ساختمانی، در مساوی بودن ضریب ارتجاعی (E) و شکل‌پذیری بالای فولاد نرم خلاصه می‌گردد. آزمایش‌های انجام شده بر روی دیوارهای برشی فولادی که ورق آن‌ها از جنس فولاد نرم بوده است، نشان دهنده شکل‌پذیری و توانایی جذب انرژی بالا در سیستم دیوار برشی فولادی می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد جذب انرژی در تغییر مکان‌های کوچک آغاز می‌شود.

۲- مروری بر تحقیقات گذشته

۲-۱- تحقیقات مربوط به اثر انفجار بر سازه

تحلیل‌های انفجاری سابقه‌ای در حدود چندین قرن دارد. تحلیل‌های ابتدایی که با روش‌های تقریبی انجام می‌گرفت به قرن‌های ۱۳ و ۱۴ میلادی بازمی‌گردد. در سال ۱۹۱۹ قانون مقیاس برای انفجارهای ساده توسط هاپکینسون^۱ ارائه شده که پایه ریاضی نداشت ولی از نظر کاربردی بسیار با اهمیت بود [۱]. وی ادعا نمود که اگر دو ساختمان با شکل و مصالح مشابه ولی در اندازه‌های مختلف ساخته شوند و سپس تحت اثر انفجار قرار گیرند، مقدار ماده منفجره موردنیاز برای ایجاد تأثیرات مشابه با توان سوم ابعاد ساختمان‌ها نسبت مستقیم دارد. این قانون به‌طور کامل و در سال ۱۹۲۶ توسط گرنز^۲ ارائه شد [۲].

هوراس لمب^۳ ریاضیدان دانشگاه منچستر تحقیقات بسیاری را در مورد هیدرودینامیک و پدیده انتشار امواج انجام داد [۳]. تیلور^۴ دانشمندی بود که مطالعاتش بر روی دینامیک امواج انفجار ناشی از مواد منفجره نقش بسیار زیادی در پیشرفت مرکز تحقیقات وزارت دفاع بریتانیا در سال‌های بین ۱۹۳۶ تا ۱۹۵۰ داشت. مقاله‌های نخست وی در مورد انتشار و استهلاک امواج انفجار ناشی از سلاح‌های متعارف بود ولی در مطالعات بعدی وی بر روی رفتار امواج انفجار ناشی از نخستین انفجار اتمی در نیومکزیکو متمرکز شد [۴].

پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که مصالح شکل‌پذیر حتی با مقاومت کمتر عملکرد بسیار بهتری در برابر بارهای انفجاری دارند. یکی از مطالعه‌هایی که در این زمینه انجام شده است بررسی عملکرد عرشه پل‌ها با مصالح مختلف در برابر بار ناشی از انفجار وسیله نقلیه

1 Hopkinson

2 Gernez

3 Lamb

4 Taylor

می‌باشد [۵]. جین سون^۱ و آستانه در این پژوهش عرشه‌ی پل‌ها را در دو حالت شامل قوطی‌های فولادی و نیز به صورت کامپوزیت تحت بررسی قرار دادند. در حالت قوطی فولادی رفتار سه نوع فولاد مختلف و در حالت کامپوزیت رفتار بتن معمولی و مقاومت بالا مورد بررسی قرار گرفت و جالب آنکه نتایج حاصله حاکی از این است که مصالح فولاد و یا بتن با مقاومت پایین‌تر و انعطاف‌پذیری بیشتر عملکرد به مراتب بهتری دارند. پژوهش دیگری که توسط آستانه در این زمینه انجام شده است، مربوط به بررسی تأثیر انفجار ناشی از وسیله نقلیه بر روی دیوار پیشنهادی ایشان که ترکیبی از دیوار برشی فولادی و بتنی بود، می‌باشد [۶]. این دیوار از صفحه‌ای فولادی که به اسکلت جوش داده می‌شود و سپس دالی از بتن مسلح به وسیله پیچ و مهره بر روی آن‌ها نصب می‌شود، تشکیل شده است. نقطه ضعف دیوارهای بتنی معمولی در این است که این دیوارها تحت اثر انفجار خرد شده و ذرات آن با سرعت بسیار بالایی در محیط حرکت می‌کنند که خود این ترکش‌ها می‌توانند باعث به وجود آمدن خسارات و تلفات شدیدی گردند اما در این نوع دیوار وجود صفحه فولادی در پشت دیوار مانع پرواز ذرات بتن شده و در واقع این خطر را از بین می‌برد.

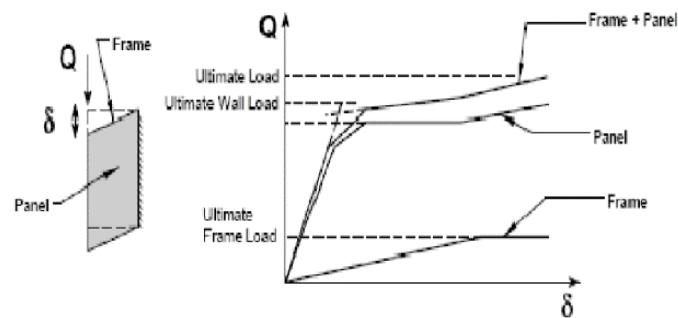
لوچیونی^۲ یکی دیگر از پژوهشگرانی است که در زمینه‌ی انفجار مطالعات بسیاری انجام داده است. در یکی از این پژوهش‌ها، رفتار دال بتنی تحت اثر بار انفجار بررسی شده است [۷]. وی ابتدا به صورت آزمایشگاهی دال بتنی را تحت اثر بار انفجاری قرار داده است و سپس نتایج به دست آمده را با مدل‌سازی توسط نرم‌افزارهای ANSYS و ABAQUS مقایسه نموده است و پس از نمایش صحت مدل‌سازی، کوشیده است رابطه‌ای بین قطر حفره ناشی از انفجار، وزن مواد منفجره و محل انفجار ارائه نماید و در پایان مقایسه‌ای بین مدل‌ها و نرم‌افزارهای استفاده شده انجام داده و در هر مورد نقاط ضعف و قوت آن‌ها را تشریح نماید.

۱-۲- تحقیقات مربوط به دیوار برشی فولادی

در سال ۱۹۷۳ تاکاهاشی^۳ و همکاران تعدادی آزمایش و تحلیل اجزاء محدود بر روی دیوار برشی با ورق نازک و دارای سخت‌کننده انجام دادند. آن‌ها از ۱۲ مدل یک و دوطبقه برای آزمایش استفاده کردند [۸]. در این تحقیق فاصله و ضخامت سخت‌کننده‌ها که در یک یا دو طرف پانل فولادی نصب شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفت. در این آزمایش‌ها مقیاس نمونه‌ها ۱/۴ فرض شده است؛ و تیر و ستون‌ها توسط پیچ به هم متصل شده‌اند. رفتار به دست آمده از نمونه‌ها بیانگر این مطلب بوده است که همگی قادر به تحمل تغییرشکل‌های زیاد بوده و دارای رفتار پایدار و شکل‌پذیر هستند. البته در بعضی از نمونه‌ها به علت ضعف سخت‌کننده‌های عرضی کمانش کلی رخ داده است. همچنین در انتهای بعضی از پانل‌ها کمانش موضعی روی داده که بیانگر مناسب بودن مقدار سخت‌کننده‌ها در این نقاط است.

در سال ۱۹۷۷ میمورا^۴ و آکیانا^۵ به منظور پیش‌بینی رفتار سامانه دیوار برشی فولادی تحت بارگذاری چرخه‌ای یک مدل تحلیلی پیشنهاد کرده‌اند [۹]. آن‌ها سعی کردند تا منحنی نیرو - تغییر مکان دیوار را با در نظر گرفتن رفتار پس کمانشی مورد مطالعه قرار دهند. در مدل پیشنهادی آن‌ها مقاومت کلی دیوار برشی فولادی از مجموع باری که باعث کمانش الاستیک ورق فولادی می‌شود، مقاومت پس کمانشی آن و مقاومت قاب محیطی آن به دست می‌آید. در این صورت منحنی نیرو-تغییر مکان ترکیبی از منحنی رفتاری ورق و قاب محیطی به دست می‌آید. شکل رفتار پیشنهادی نیرو-تغییر مکان مربوط به تحلیل پوش آور^۶ (بار افزون) یک دیوار برشی فولادی، زمانی که قاب فولادی محیطی رفتار الاستو-پلاستیک کامل دارد را نشان می‌دهد:

1 Jin Son
2 Luccioni
3 Takahashi
4 Mimura
5 Akiyana
6 Push Over

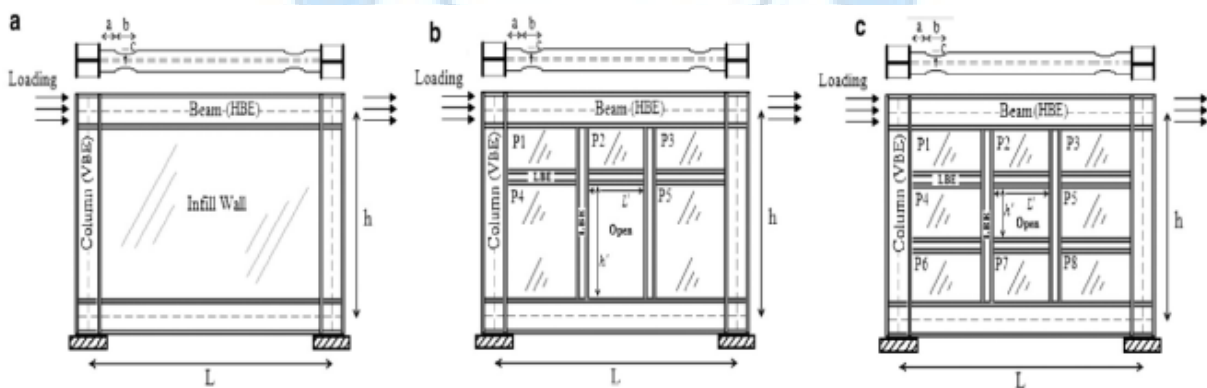


شکل ۱: بررسی اندرکنش رفتار ورق فولادی و قاب اطراف آن [۹]

برای محاسبه و تعیین بار کمانشی ورق فولادی از تئوری کمانش الاستیک ورقها با فرض شرایط تکیه‌گاهی ساده استفاده شده است. تا زمانی که بار اعمالی به ورق از بار کمانش بحرانی آن کمتر است میدان کشش به صورت قطری عمل می‌کند. زاویه تشکیل میدان کشش قطری در ورق فولادی در سال ۱۹۳۱ توسط واگنر^۱ محاسبه شده است.

در سال ۱۹۹۲ رابرتز^۲ و صبوری قمی با انجام آزمایش‌های متعددی بر روی دیوارهای برشی فولادی بدون سخت‌کننده با ضخامت‌های متفاوت و با وجود بازشدگی دایره‌ای و یا بدون آن رفتار این‌گونه دیوارها را تحت بارگذاری چرخه‌ای شبه استاتیکی مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. در تمامی این آزمایش‌ها شکل‌پذیری و لوب‌های چرخه‌ای پایدار S شکل مناسب به دست آمده است و انرژی جذب‌شده در هر چرخه با بیشینه دامنه از جابجایی برشی افزایش می‌یابد [۱۰]. با افزایش ابعاد بازشدگی سختی و مقاومت پانل‌ها به صورت خطی کاهش می‌یابد. نتایج آزمایش‌ها با نتایج تئوری توسعه‌یافته قبلی که اثر کمانش برشی و تسلیم پلاستیک ورق مقایسه شده است.

در سال ۲۰۱۲ حسین زاده و تهرانی زاده چند مدل اجزاء محدودی از دیوارهای برشی بدون بازشو و با بازشو بزرگ (به‌عنوان پنجره یا در) که دارای سخت‌کننده هم هستند را مورد تحلیل و بررسی قرار دادند [۱۱]. تعداد طبقات این مدل‌ها از ۱ تا ۸ متغیر می‌باشند. شکل ۲ مدل‌های یک طبقه‌ی مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل‌ها مشخص است تیرها دارای مقطع کاهش یافته هستند. برای طراحی این مدل‌ها از قوانین لرزه‌ای AISC و راهنمای طراحی AISC 20 استفاده شده است. مقاومت تسلیم ورق فولادی ۳۲۷/۶ مگا پاسکال و مقاومت تسلیم قاب اطراف آن ۳۸۵ مگا پاسکال انتخاب شده است.



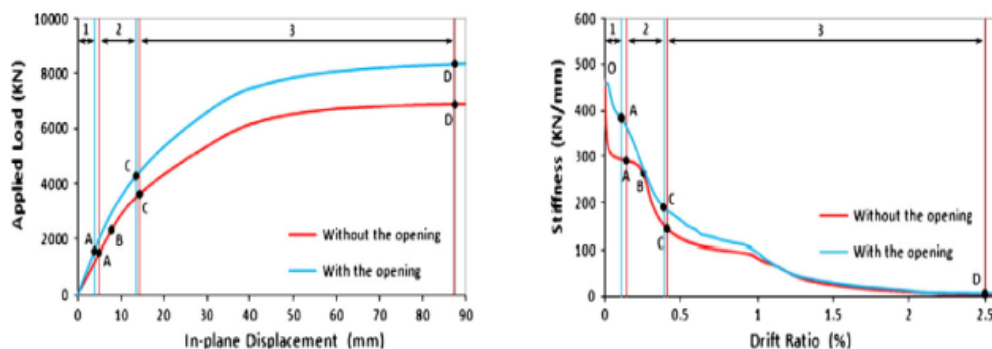
شکل ۲: سامانه‌های دیوار برشی یک طبقه استفاده شده توسط حسین زاده و تهرانی زاده [۱۱]

شکل ۳ رفتار کلی سازه‌های با و بدون بازشو را نشان می‌دهد. هرچند سختی اولیه هر دو مدل با و بدون بازشو بسیار به هم نزدیک است ولی بعد افزایش کم جابه‌جایی نسبی به علت وجود سخت‌کننده زیاد در اطراف بازشوها مدلی که بازشو دارد از خود سختی بیشتر نشان داده است. تا مرحله‌ی A از دو نمودار، قاب اطراف ورق دارای رفتار خطی بوده ولی ورق از نظر مشخصات ماده غیرخطی می‌شود. از نقطه A تا نقطه‌ی C ورق فولادی هم از نظر هندسی و هم از نظر مشخصات ماده غیر می‌شود در حالی که بازهم قاب اطراف ورق خطی است؛ و در نهایت

¹ Wagner

² Roberts

از نقطه C تا D کل سامانه از هر دو لحاظ غیرخطی است. در شکل ۳ سمت راست اثر تغییر سختی این دو مدل بر حسب تغییر جابه‌جایی نسبی و در شکل ۳ سمت چپ نمودار پوش آور میانگین این دسته از سازه‌ها باهم مقایسه شده است.



شکل ۳: بررسی رفتار کلی دو مدل با و بدون بازشو توسط حسین زاده و تهرانی زاده [۱۱]

در سال ۲۰۱۳ علوی و ناطقی با استفاده از چند مدل آزمایشگاهی و مدل اجزاء محدود، ترکیب جدیدی از سخت‌کننده‌های قطری و بازشوه‌های مرکزی را مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۲]. رفتار لرزه‌ای این سامانه جدید، بررسی شده و با مدل‌های بدون بازشو و سخت‌کننده مقایسه شده است. برای بررسی و مقایسه این حالت، از سه سامانه یک طبقه با مقیاس یک‌دوم تحت بارگذاری چرخه‌ای شبه استاتیکی استفاده کرده‌اند. یک از این سه مدل دارای یک بازشو دایره‌ای به قطر یک‌سوم ارتفاع پانل است که در اطراف این بازشو یک سخت‌کننده به صورت یک رینگ قرار دارد ((SPSW(s4)). مدل دوم فقط دارای دو سخت‌کننده قطری بوده ((SPSW(s1) و مدل سوم بدون سخت‌کننده و بازشو می‌باشد ((SPSW2). با توجه به نتایج حاصل محققان مشاهده کرده‌اند که این روش استفاده از سخت‌کننده‌ها موجب می‌شود تا مقاومت برشی سامانه دارای بازشو به مقاومت برشی سامانه دیوار بدون بازشو و سخت‌کننده نزدیک شود و رفتار لرزه‌ای سامانه بهبود یابد. همچنین نتایج نشان داده است که نسبت شکل‌پذیری سامانه با بازشو حدود ۱۴ درصد نسبت به سامانه بدون بازشو بیشتر است.

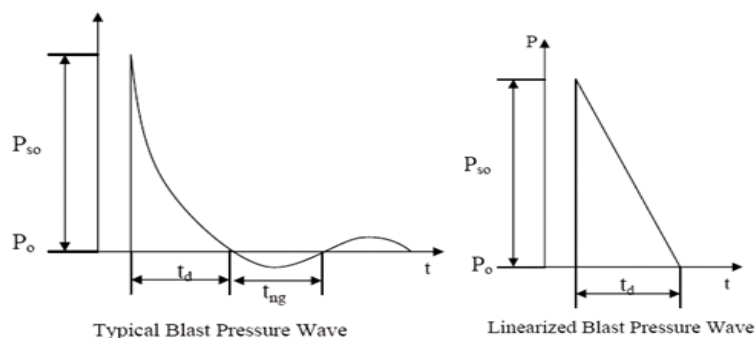
در این پژوهش برای صحت سنجی مدل اجزاء محدودی از مدل بدون سخت‌کننده ارائه شده توسط علوی و ناطقی استفاده شده است. برای این منظور در بخش چهارم به‌طور دقیق به بررسی مشخصات هندسی و مصالح این مدل پرداخته خواهد شد.

۳- پدیده انفجار و اثر آن بر ساختمان

انفجار حاصل آزاد شدن ناگهانی انرژی است که می‌تواند به صورت احتراق گازها، انفجار هسته‌ای یا در اثر انواع مختلف بمب باشد. واحد TNT معمولاً به عنوان مرجعی برای تعیین قدرت انفجار استفاده می‌شود. از مشخصه‌های اساسی یک انفجار که باعث وارد شدن نیرو بر سازه می‌شود، می‌توان به اتفاقی بودن موقعیت انفجار، دینامیکی و گذرا بودن نیروها و زمان اثر کم (بین چند میلی‌ثانیه تا چند ثانیه) اشاره کرد. هنگامی که یک انفجار صورت می‌گیرد، انرژی به صورت ناگهانی آزاد می‌شود. اثر این آزاد شدن انرژی را می‌توان به دو بخش تشعشعات حرارتی و انتشار امواج در زمین و هوا تقسیم کرد که در پژوهش‌های سازه‌ای، بیشتر بخش دوم مورد توجه قرار می‌گیرد. امواجی از انفجار که در هوا منتشر می‌شوند، عامل اصلی تخریب سازه هستند. این امواج با سرعتی بیش از سرعت صوت حرکت کرده و به سازه برخورد می‌کنند. در اثر بازتاب این امواج بر روی سطح سازه، فشار حاصل از آن‌ها افزایش می‌یابد. همچنین بخشی از امواج هوایی از طریق درها، پنجره و بازشوها به داخل سازه نفوذ کرده و اعضای داخلی سازه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در حین این جریان، انکسار امواج نیز در گوشه‌های سازه رخ می‌دهد که می‌تواند سبب کاهش یا افزایش فشار حاصل از موج گردد. این فرآیند تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که همه محیط قابل دسترسی سازه تحت اثر فشار موج قرار گیرد. از طرف دیگر، امواجی که با زمین برخورد می‌کنند، در مسیر حرکت خود، مولکول‌های هوا را فشرده کرده و یک فشار کلی محیطی (فشار اتفاقی) ایجاد می‌نمایند.

در اثر وقوع تمام انفجارها، موجی از هوا آزاد می‌شود که به نام موج ضربه‌ای شناخته می‌شود. این موج، هوای بسیار متراکمی است که به صورت کروی با سرعتی بسیار زیاد از منبع انفجار به سمت خارج حرکت می‌کند. در شکل ۴ منحنی تاریخچه زمانی بار انفجار نشان داده

شده است. در طول چند هزارم ثانیه، فشار ناشی از فشار اتمسفر (P_0) به فشار بیشینه (PSO) می‌رسد و در طول چند صدم ثانیه دوباره به فشار اتمسفر باز می‌گردد و در ادامه در طول چند دهم ثانیه فشار منفی ایجاد می‌شود.



شکل ۴: تصویر شماتیک فشار ناشی از انفجار

در واقع همه‌ی پارامترهای مربوط به انفجار وابسته به دو پارامتر مستقل هستند، یکی میزان انرژی آزاد شده در هنگام انفجار و دیگری فاصله بین مرکز انفجار تا محل اثر موج انفجار. قدرت تخریبی یک بمب نیز به واسطه همین دو فاکتور بسیار مهم مورد محاسبه قرار می‌گیرد که شامل وزن ماده منفجره که با معادل‌سازی برحسب وزن TNT معادل بیان می‌شود (W) و فاصله اثر مواد منفجره (R). حاصل این دو کمیت، به صورت فاصله مقیاس شده (Z)، به شرح زیر بیان می‌گردد.

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (1)$$

در رابطه بالا R برحسب متر و W برحسب کیلوگرم به کار می‌روند [۱۳].

پارامترهای انفجار و همچنین روابط مناسب جهت تخمین فشار ناشی از انفجار، هدف تعداد بسیاری از تحقیقات علمی در دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ بوده است. براد در سال ۱۹۵۵ بیشینه فشار انفجار (PSO) برای انفجارهای حوزه نزدیک که بیشینه فشار ناشی از انفجار بیش‌تر از ۱۰ bar (1 MPa) است و برای انفجارهای حوزه میانی و دور که بیشینه فشار انفجار بین ۰.۱ bar و ۱۰ bar (0.01MPa-1MPa) به صورت زیر بیان نموده است [۱۴]:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{SO} = \frac{0.975}{Z} + \frac{1.455}{Z^2} + \frac{5.85}{Z^3} - 0.019 \text{ bar}, \quad (0.1 \text{ bar} \leq P_{SO} \leq 10 \text{ bar}) \\ P_{SO} = \frac{6.7}{Z^3} + 1 \text{ bar}, \quad (P_{SO} > 10 \text{ bar}) \end{array} \right. \quad (2)$$

در رابطه بالا فاصله مقیاس شده (Z) برحسب $m/kg^{1/3}$ و فشار PSO برحسب bar می‌باشند. رابطه مشهور دیگری در سال ۱۹۶۱ توسط نیومارک ۲ و هسن ۳ به صورت زیر بیان گردید [۱۵]:

$$P_{SO} = 6784 \frac{W}{R^3} + 93 \left(\frac{W}{R^3} \right)^{1/2} \quad (3)$$

که در این رابطه W برحسب ton (1000 Kg) از ماده منفجره معادل TNT، R فاصله از مرکز انفجار برحسب m و PSO فشار بیشینه انفجار برحسب bar است.

از سوی دیگر رابطه‌ای که برای به دست آوردن t_d به کار می‌رود به صورت زیر است [۱۶]:

1. Brode
2. Newmark
3. Hansen

$$\log_{10}\left(\frac{t_d}{W^{1/3}}\right) \approx -2.75 + 0.27 \log_{10}\left(\frac{R}{W^{1/3}}\right), \quad \text{for } Z \geq 1.0$$

$$\log_{10}\left(\frac{t_d}{W^{1/3}}\right) \approx -2.75 + 1.95 \log_{10}\left(\frac{R}{W^{1/3}}\right), \quad \text{for } Z < 1.0 \quad (4)$$

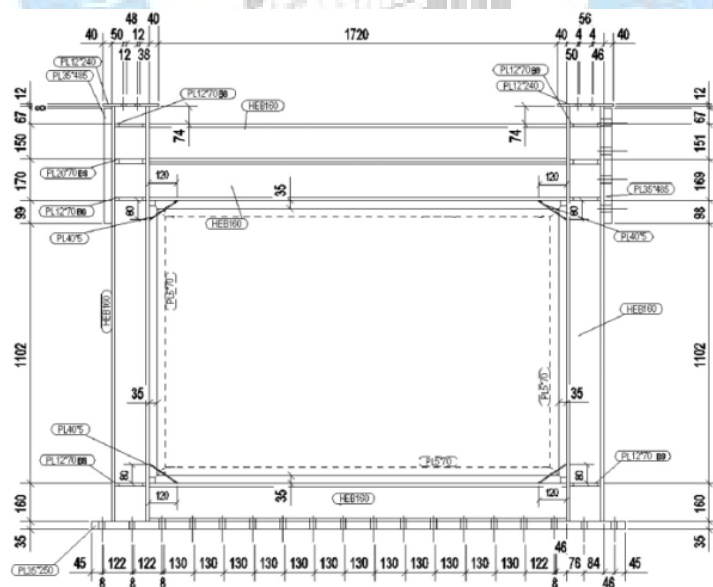
تاریخچه زمانی فشار ناشی از انفجار، غالباً توسط رابطه فریدلندر^۱ که یک تابع‌نمایی است بیان می‌شود.

$$P_S(t) = P_0 + P_{so} \left(1 - \frac{t}{t_d}\right) \exp\left(-b \frac{t}{t_d}\right) \quad (5)$$

این بار به صورت باری گسترده بر نمای خارجی ساختمان اعمال می‌گردد که به صورت یک منحنی است که مقدار آن با توان سوم فاصله تا مرکز انفجار، نسبت معکوس دارد. اما در بسیاری از موارد برای سهولت، نمودار PS(t) به صورت یک بار مثلثی فرض می‌شود (به عبارت دیگر تغییرات فشار با زمان خطی فرض می‌شود)، که در آن فشار اولیه PSO در مدت زمان td به صفر می‌رسد.

۴- نحوه مدل سازی و صحت سنجی

همانند سایر مسائل عددی، باید بر اساس یک مسئله حل شده موجود در یکی از تحقیقات قبلی، یک مدل اجزاء محدود مناسب که در یک نرم افزار اجزاء محدودی مشخص مدل شده است، انتخاب و نتایج تحلیل‌های مختلف باهم مقایسه گردد. برای انتخاب این مدل، از مدل SPSW2 تحقیق علوی و ناطقی [۱۲] در سال ۲۰۱۳ استفاده شده است. این سامانه سازه‌ای بدون بازشو و سخت‌کننده است. این سامانه یک سازه دیوار برشی فولادی یک طبقه با مقیاس ۰/۵ که دارای ۲ متر عرض و ۱/۵ متر ارتفاع است. مقدار نسبت عرض به ارتفاع ۲ در این سازه ۱/۳۳ است که این مقدار بیانگر یک سامانه دیوار برشی با ابعاد متوسط است. در این صورت می‌توان فرض کرد که این سامانه مشابه یک سامانه واقعی با ابعاد ۴ متر عرض و ۳ متر ارتفاع است. المان‌های مرزی در این سامانه از پروفیل HEB160 ساخته شده است. پروفیل HEB160 دارای ارتفاع و عرض بال ۱۶۰ میلی‌متر و ضخامت بال و جان به ترتیب ۱۳ و ۸ میلی‌متر است. ضخامت ورق فولادی پرکننده وسط دهانه ۰/۸ میلی‌متر است. المان‌های مرزی طوری طراحی شده‌اند که نیازهای مقدماتی دیوار برشی فولادی و provisions AISC 341-05 برآورده شود. اتصال تیر به ستون‌ها به صورت کاملاً گیردار در نظر گرفته شده است. شکل ۵ مشخصات هندسی دیوار برشی این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۵: مشخصات هندسی مدل استفاده شده بر اساس مدل علوی و ناطقی [۱۲]

¹ Friedlander

² Aspect Ratio

برای مهار کردن بهتر نیروهای داخلی پانل و سهیم کردن بار انتقالی از جک اعمال نیرو به قطعات، از یک تیر با پروفیل HEB160 اضافی در بالای تیر فوقانی که لبه‌های بال دو تیر به هم جوش شده، استفاده شده است [۱۵]. برای در نظر گرفتن وزن بقیه سازه با استفاده از یک جک قائم نیروی ۱۶۰ KN به دو ستون اعمال شده که در این صورت به هر ستون ۸۰ KN نیرو وارد می‌شود. جک‌ها افقی قادر به اعمال نیرو بیشینه ۱۰۰۰ KN هستند. در مرحله بارگذاری در آزمایشگاه با استفاده از این جک‌های افقی بار چرخه‌ای به سامانه اعمال شده است.

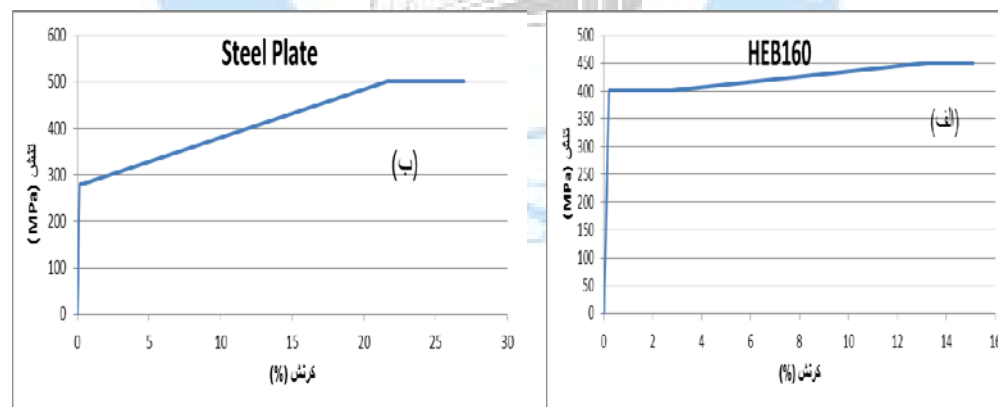
برای آنکه بتوان مدل عددی این سامانه را در نرم‌افزار اجزاء محدودی ایجاد کرد باید مشخصات مصالح استفاده شده تعیین شوند.

در جدول ۱، مشخصات مکانیکی پروفیل HEB160 و ورق فولادی پرکننده را که از یک آزمایش کشش مستقیم به دست آمده ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات مصالح استفاده شده بر اساس مدل مقاله علوی و ناطقی [۱۲]

مصلح فولادی	مدول الاستیسیته Mpa	تنش تسلیم Mpa	تنش نهایی Mpa	کرنش تسلیم (%)	کرنش سخت شدگی (%)	کرنش نهایی (%)	کرنش گسیختگی (%)
HEB 160	2.07E+5	400	450	0.19	2.7	13.2	15.1
Steel Plate	2.07E+5	280	500	0.14	0.3	21.6	27

برای مدل‌سازی ابتدا در محیط Part تیر و ستون HEB160، ورق فولادی و سخت‌کننده‌های مربوط به ستون‌ها مدل شده است. سپس در محیط Property مشخصات مصالح پروفیل HEB160 و ورق فولادی که در جدول ارائه شده، اختصاص داده می‌شود. در شکل ۶ نمودار تنش و کرنش مصالح نشان داده شده است.



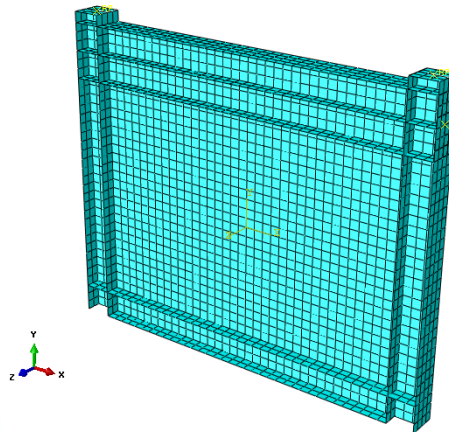
شکل ۶: نمودار مشخصات مصالح استفاده شده (الف) نمودار تنش کرنش پروفیل HEB160، (ب) نمودار تنش کرنش ورق فولادی.

در محیط Assembly المان‌هایی که به صورت جداگانه مدل شده‌اند بر روی هم سوار گردیده تا مدل به شکل نهایی تبدیل شود سپس برای آن که تمامی المان‌ها در بارگذاری رفتار یکپارچه داشته باشند با دستور merge کل سامانه یکپارچه می‌گردد. به منظور تعریف شرایط تکیه‌گاهی انتهای پایین ستون‌ها گیردار فرض شده و همچنین فرض گردید به علت حضور دال کف طبقه جان تیرها در راستای محور z در شکل حرکت نمی‌کند.

بعد از ایجاد شکل مدل باید با انتخاب نوع المان مناسب یک مش بندی مناسب هم انتخاب گردد. در این پژوهش از المان پوسته‌ای چهارضلعی با چهار گره بانام S4R استفاده شده است. تعیین اندازه مش بندی به صورت سعی و خطا صورت پذیرفته است. در این صورت

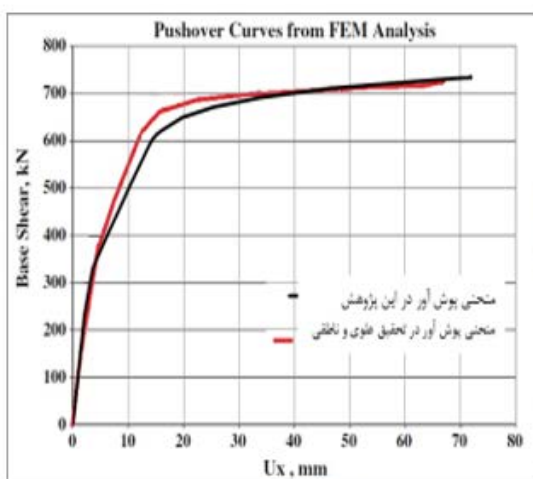
زمانی که اندازه‌ی مش به اندازه‌ی کوچک انتخاب شود که تغییر اندازه تأثیر بسیار اندک بر روی نتایج سامانه ایجاد کند، به عنوان مش بندی مناسب انتخاب می‌گردد. در این تحقیق از نوع مش بندی Structural استفاده شده است.

شکل ۷ نحوه‌ی مش بندی و ابعاد تقریبی مش را نشان می‌دهد. همچنین اثر غیرخطی هندسی در تحلیل لحاظ شده است.

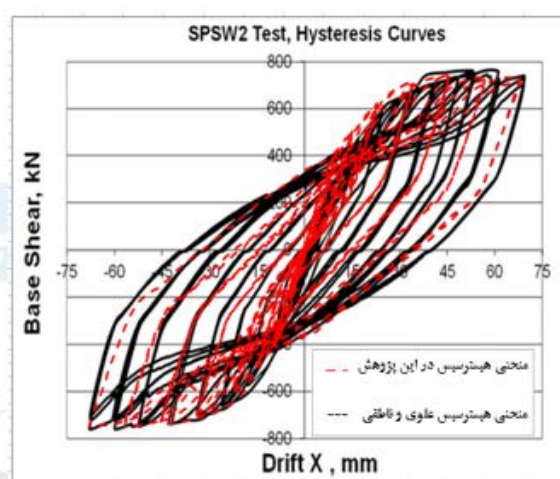


شکل ۷: نحوه مش بندی مدل اجزاء محدودی

به منظور بررسی صحت مدل سازی همانند تحقیق علوی و ناطقی سامانه مورد نظر تحت بار استاتیکی افزایشده در تراز بین دو تیر بالای مدل قرار داده شد. سامانه به میزان ۷۳ میلی‌متر پوش داده شد که معادل جابه‌جایی نسبی ۴/۷ است. پس از انجام تحلیل نمودار پوش آور سامانه، نمودار نیروی برشی در تراز تکیه‌گاه بر حسب جابه‌جایی بالای تیر رسم گردید. سپس این نمودار با نمودار پوش آور مدل ارائه شده در تحقیق علوی و ناطقی مقایسه شد. نتایج این مقایسه در شکل ۸ نشان داده شده است. در این شکل قسمت خطی اولیه دو نمودار انطباق بسیار مناسبی باهم دارد. هر چند در جابه‌جایی‌های بین ۴ تا ۳۴ میلی‌متر مقدار خطا تا حدود ۹ درصد (در جابه‌جایی ۱۳ میلی‌متر) افزایش یافته ولی در نهایت دو نمودار در جابه‌جایی نسبی‌های بالا برهم منطبق می‌شوند. همچنین همانند تحقیق علوی و ناطقی سامانه مورد نظر تحت پروتکل بارگذاری چرخه‌ای مطابق ATC-24 قرار گرفت و پس از آن نمودار هیسترسیس ترسیم گردید. مقایسه نمودارها انطباق مناسبی را نشان می‌دهد که حاکی از صحت مدل‌سازی می‌باشد.



(ب)

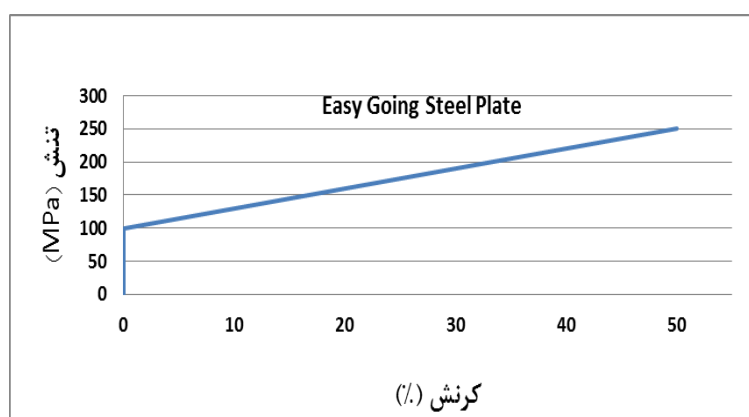


(الف)

شکل ۸: مقایسه‌ی نمودارهای هیسترسیس (الف) و پوش آور (ب) مدل اجزاء محدودی این پژوهش با مدل ارائه شده در مقاله علوی و ناطقی

۵- معرفی مدل های مورد مطالعه

یکی از آیین‌نامه‌های مهم برای طراحی دیوار برشی فولادی آیین‌نامه AISC 341 است. در این پژوهش به کمک AISC 20 Design Guide [۱۷]، دیوار برشی موردنیاز پژوهش، بر اساس روش LFRD طراحی گردیده است. برای این منظور ابتدا فرض می‌شود که مقدار نیروی برشی حاصل از بارهای ضریب دار برابر ۷۰ تن باشد. سپس دیوار برشی فولادی با ورق فولاد معمولی و فولاد نرم بر اساس این آیین‌نامه و با استفاده از نرم افزار SAP2000 طراحی گردید. مشخصات مصالح به کار رفته برای المان های مرزی دیوار در شکل ۶- الف، برای ورق فولاد معمولی در شکل ۶- ب و برای ورق فولاد نرم در شکل ۹ نشان داده شده است. همچنین مقاطع المان های مرزی در جدول ۲ آمده است که برای هر دو سامانه یکسان در نظر گرفته شده است. همچنین ضخامت ورق فولادی معمولی ۱/۶ میلی متر و ورق فولاد نرم ۴/۴ میلی متر به دست آمده است.



شکل ۹: نمودار تنش کرنش ورق فولادی نرم استفاده شده در این پژوهش

جدول ۲: مشخصات مقاطع دو عضو HBE و VBE

عضو VBE	عضو HBE	
30 cm	40 cm	H (ارتفاع خارجی)
25 cm	14 cm	B (عرض بال)
1.8 cm	1 cm	tf (ضخامت بال)
1.0 cm	0.5 cm	tw (ضخامت جان)

در این مقاله میزان اثرگذاری استفاده از ورق فولاد نرم در سامانه دیوار برشی، در کاهش تغییرمکان‌های ناشی از انفجار موردبررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور دو سامانه طراحی شده، تحت بارگذاری انفجاری حوزه دور و نزدیک قرار گرفته و نتایج مقایسه می‌گردد. همچنین به منظور بررسی افزایش ضخامت ورق فولادی در کاهش تغییرمکان‌ها، هر دو سامانه دیوار برشی فولاد نرم و معمولی را با ضخامت‌های ۱/۵، ۲ و ۲/۵ برابر ضخامت ورق طراحی شده در بخش قبل نیز تحت بارهای انفجاری مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. در نامگذاری سامانه‌هایی که در آنها از ورق فولادی معمولی (فولاد سازه ای^۱) استفاده شده است، از نماد SS و در سامانه‌هایی که در آن‌ها از فولاد نرم^۲ استفاده شده است از نماد EGS، بهره گرفته شده است. در جدول ۳ نام مدل‌ها و ضخامت ورق‌های به کار رفته آورده شده است.

1 Structural Steel
2 Easy Going Steel

جدول ۳: مشخصات دیوارهای انتخابی

دیوار برشی با فولاد معمولی		دیوار برشی با فولاد نرم	
نام مدل	ضخامت ورق فولادی (mm)	نام مدل	ضخامت ورق فولادی (mm)
SS1	1/6	EGS1	4/4
SS2	2/4	EGS2	6/6
SS3	3/2	EGS3	8/8
SS4	4/0	EGS4	11

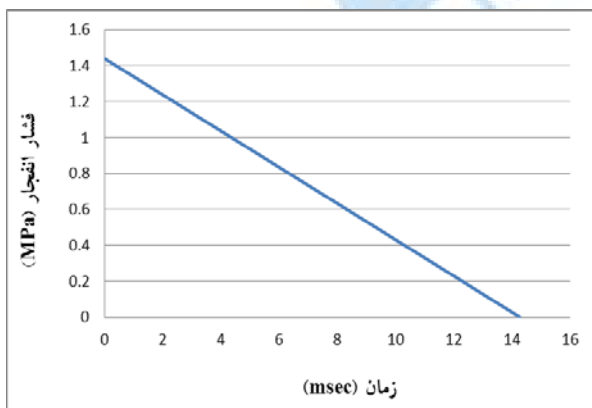
۶- بارگذاری انفجار

به منظور تحلیل سامانه دیوار برشی فولادی تحت اثر بار انفجار، دودسته پارامترهای مربوط به انفجار انتخاب گردیده است. مطابق تعریف براد^۱ [۱۴]، دسته اول بیانگر انفجار حوزه نزدیک^۲ و دسته دوم بیانگر انفجار حوزه متوسط و دور^۳ می باشد. فشار بیشینه ناشی از این انفجارها (PSO) بر اساس رابطه (۲) این پژوهش و زمان انفجار (td) نیز بر اساس رابطه (۴) این پژوهش محاسبه گردیده است. مقادیر پارامترها و همچنین فشار بیشینه و زمان انفجار در جدول ۴ آمده است.

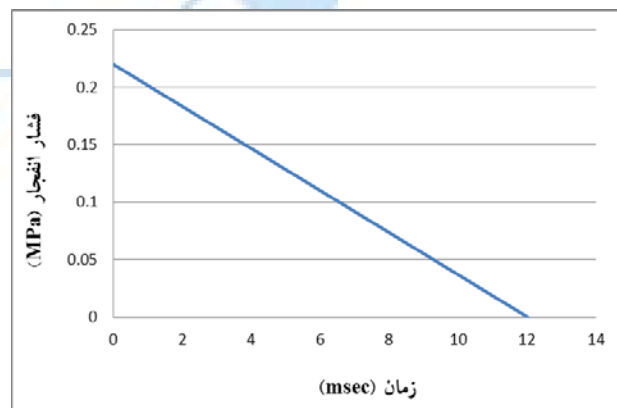
جدول ۴: مقادیر پارامترهای بارگذاری انفجاری

فاصله از منبع انفجار (R) (m)	وزن ماده منفجره (Kg)	فاصله مقیاس شده (Z) (m/Kg ^{1/3})	فشار بیشینه ناشی از انفجار (P _{SO}) (MPa)	مدت زمان انفجار (td) (msec)
۱۰	۲۰۰۰	۰/۷۹	۱/۴۴	۱۴/۳
۱۰	۲۰۰	۱/۷۱	۰/۲۲	۱۲

همچنین در شکل ۱۰ نمودارهای فشار انفجار در برابر زمان مربوط به حوزه های نزدیک و دور آورده شده است.



ب) نمودار فشار انفجار-زمان حوزه نزدیک



الف) نمودار فشار انفجار-زمان حوزه دور

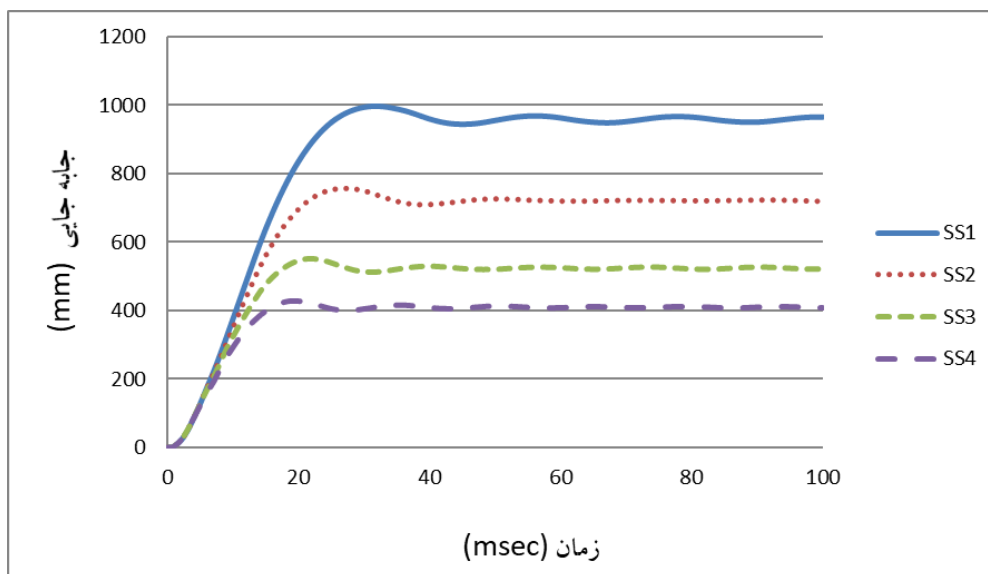
شکل ۱۰:

1 Brode
2 Near field explosions
3 Medium and far-field explosions

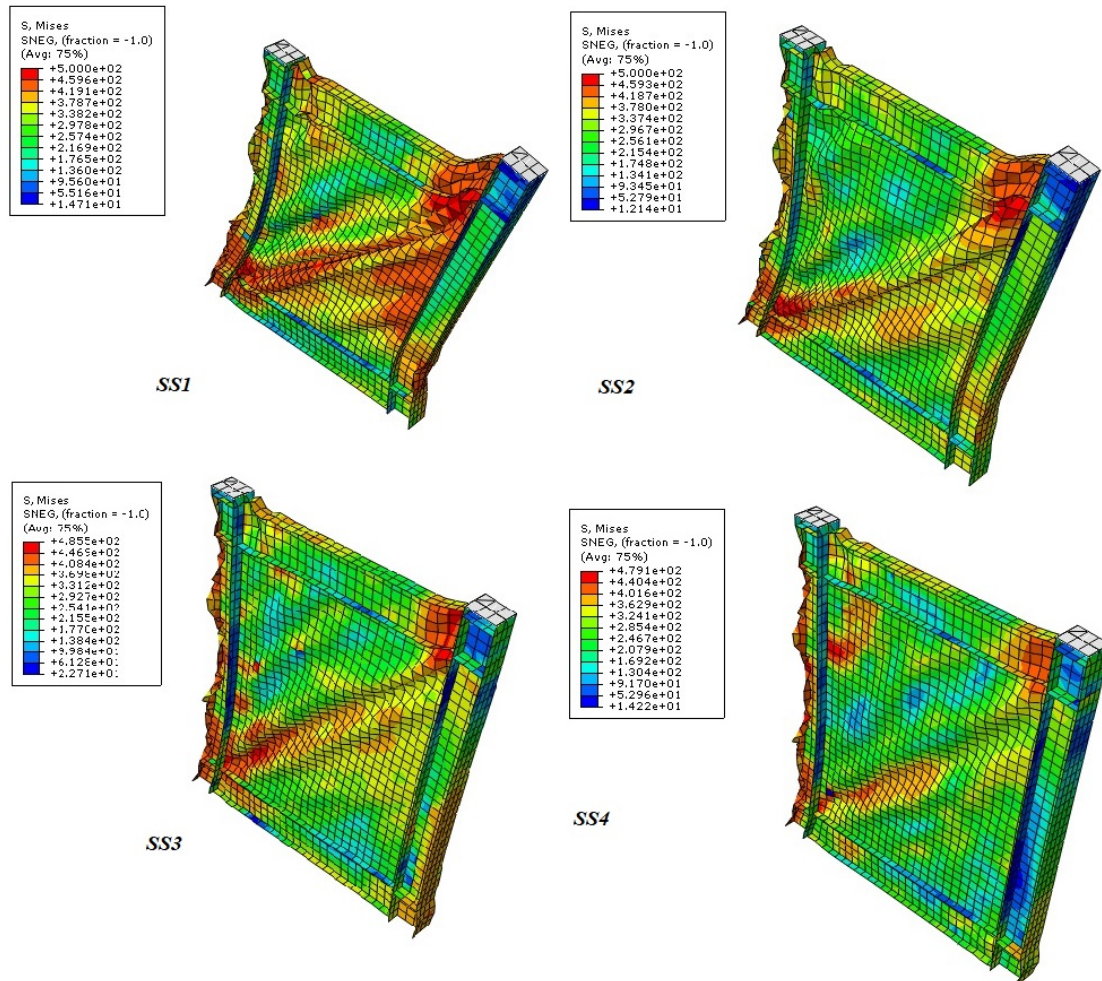
۷- نتایج حاصل از تحلیل مدل ها

نتایج حاصل از تحلیل مدل های معرفی شده تحت اثر بارهای انفجاری، در شکل ها، جداول و نمودار های ذیل ارائه شده اند.

در شکل ۱۱ نمودار تغییر مکان در راستا X تراز بالای قاب، نسبت به زمان، حاصل از تحلیل مدل های ساخته شده از ورق فولاد معمولی تحت بار انفجاری حوزه نزدیک، نشان داده شده است. همچنین کانتور تنش فون مایسز این مدل ها در لحظه بیشینه تغییر مکان، در شکل ۱۲ آمده است.



شکل ۱۱: نمودار تاریخچه زمانی تغییر مکان تراز بالای قاب در راستا X مدل های ساخته شده از ورق فولاد معمولی تحت اثر انفجار حوزه نزدیک

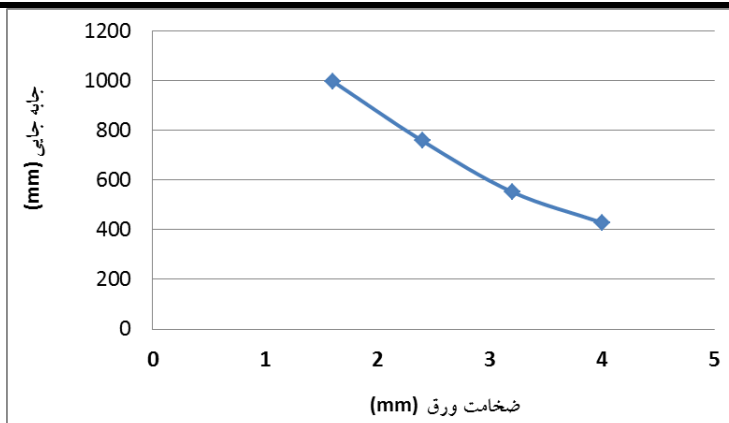


شکل ۱۲: کانتور تنش فون مایسز مدل های ساخته شده از ورق فولاد معمولی تحت انفجار حوزه نزدیک

تأثیر افزایش ضخامت بر جابه‌جایی دیوار برشی فولاد معمولی در راستای بار انفجار، در انفجار حوزه نزدیک در جدول ۵ و شکل ۱۳ آمده است.

جدول ۵: جابه‌جایی دیوار برشی فولاد معمولی با ضخامت‌های مختلف ورق تحت انفجار حوزه نزدیک

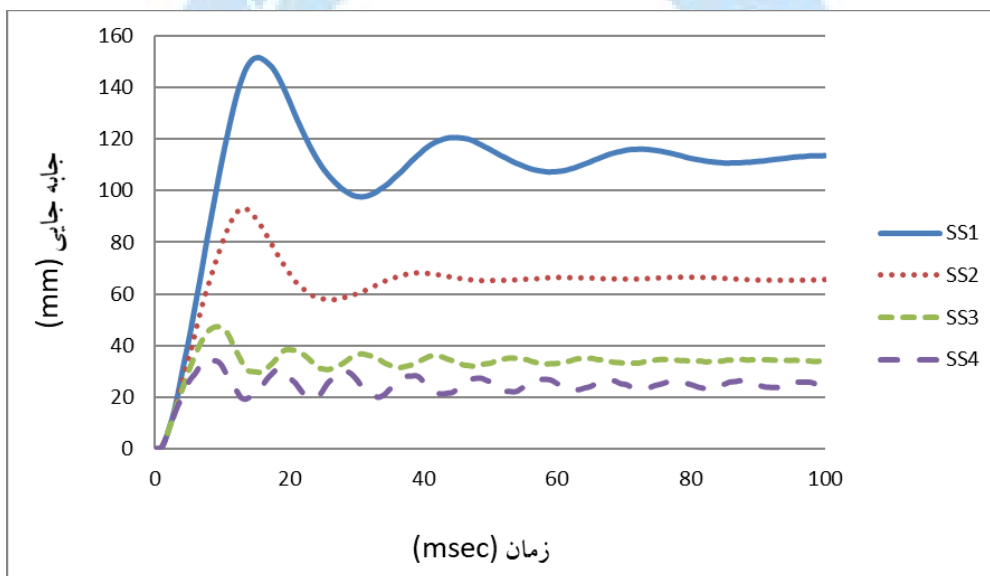
نام مدل	ضخامت ورق (mm)	زمان (msec)	جابه‌جایی (mm)
SS1	1.6	31.78	996.832
SS2	2.4	27.18	756.63
SS3	3.2	21.9	551.387
SS4	4	19.32	427.926



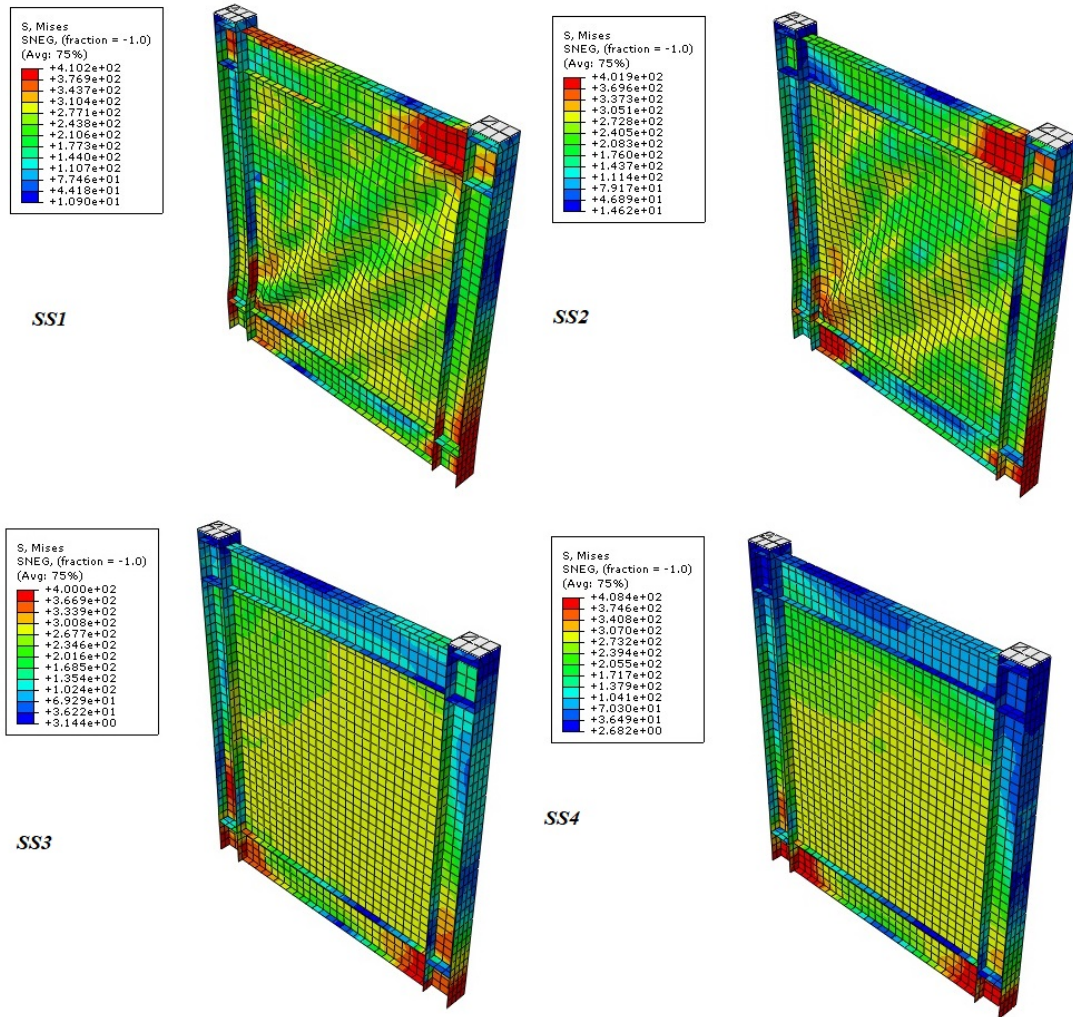
شکل ۱۳: تغییرات جابه‌جایی بالایی دیوار برشی فولاد معمولی با تغییر ضخامت ورق تحت انفجار حوزه نزدیک

با توجه به نمودار و جدول فوق در دیوارهای برشی فولادی با ورق فولاد معمولی تحت انفجار حوزه نزدیک، افزایش ضخامت به میزان ۵۰٪، ۱۰۰٪ و ۱۵۰٪ به ترتیب باعث کاهش تغییر مکان به میزان ۲۴٪، ۴۵٪ و ۵۷٪ شده است.

در شکل ۱۴ نمودار تغییر مکان در راستا X تراز بالایی قاب، نسبت به زمان، حاصل از تحلیل مدل های ساخته شده از ورق فولاد معمولی تحت بار انفجاری حوزه دور، نشان داده شده است. همچنین کانتور تنش فون مایسز این مدل ها در لحظه بیشینه تغییر مکان، در شکل ۱۵ آمده است.



شکل ۱۴: نمودار تاریخچه زمانی تغییر مکان تراز بالایی قاب در راستا X مدل های ساخته شده از ورق فولاد معمولی تحت اثر انفجار حوزه دور

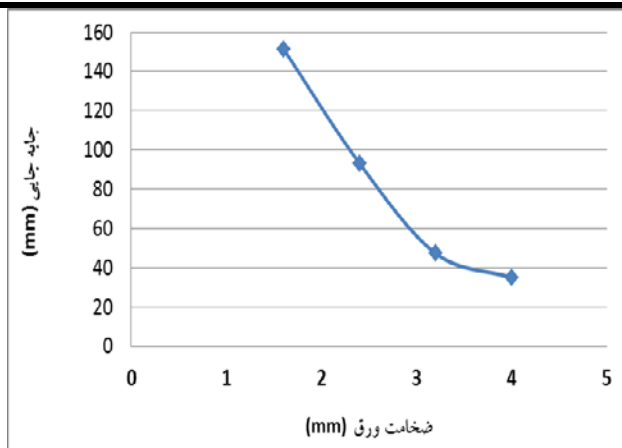


شکل ۱۵: کانتور تنش فون مایسز مدل های ساخته شده از ورق فولاد معمولی تحت انفجار حوزه دور

تأثیر افزایش ضخامت بر جابه‌جایی دیوار برشی فولاد معمولی در راستای بار انفجار، در انفجار حوزه دور در جدول ۶ و شکل ۱۶ آمده است.

جدول ۶: جابه‌جایی دیوار برشی فولاد معمولی با ضخامت‌های مختلف ورق تحت انفجار حوزه دور

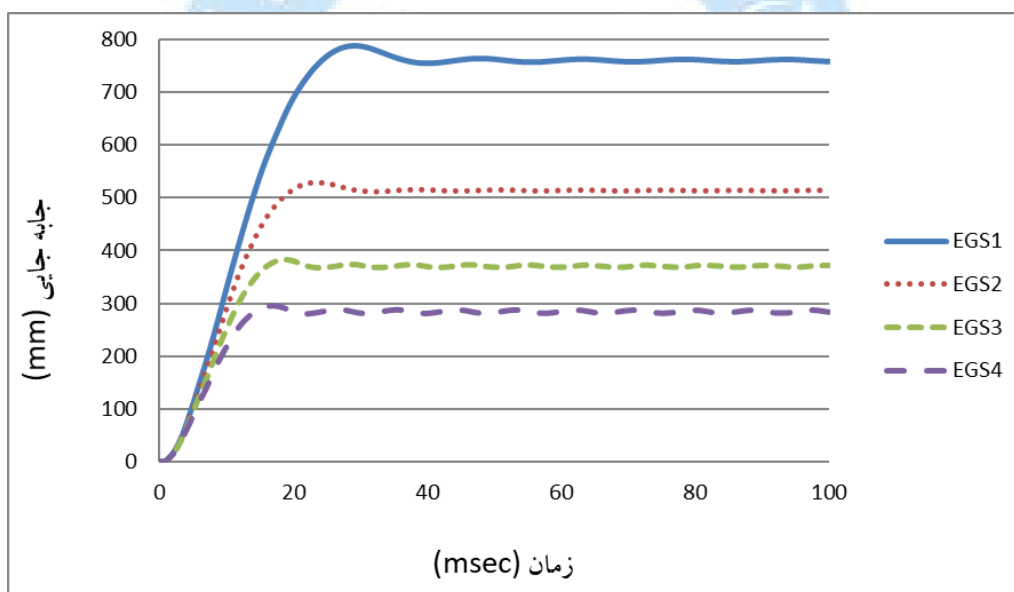
نام مدل	ضخامت ورق (mm)	زمان (msec)	جابه‌جایی (mm)
SS1	1.6	15.44	151.532
SS2	2.4	13.34	93.1866
SS3	3.2	9.3	47.3279
SS4	4	7.88	34.9603



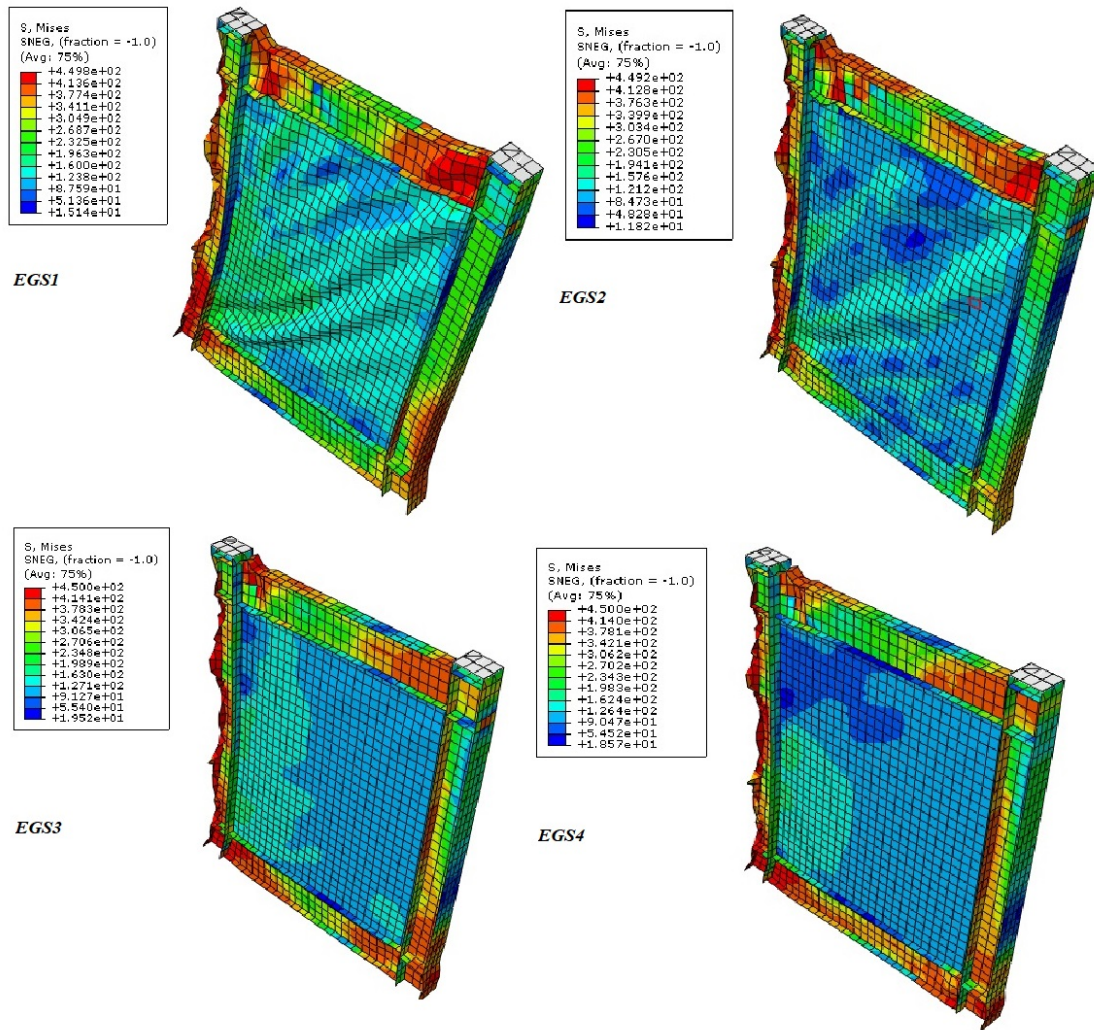
شکل ۱۶: تغییرات جابه‌جایی بالای دیوار برشی فولاد معمولی با تغییر ضخامت ورق تحت انفجار حوزه دور

با توجه به نمودار و جدول فوق در دیوارهای برشی فولادی با ورق فولاد معمولی تحت انفجار حوزه دور، افزایش ضخامت به میزان ۵۰٪، ۱۰۰٪ و ۱۵۰٪ به ترتیب باعث کاهش تغییر مکان به میزان ۳۹٪، ۶۹٪ و ۷۷٪ شده است.

در شکل ۱۷ نمودار تغییر مکان در راستا X تراز بالای قاب، نسبت به زمان، حاصل از تحلیل مدل های ساخته شده از ورق فولاد نرم تحت بار انفجاری حوزه نزدیک، نشان داده شده است. همچنین کانتور تنش فون مایسز این مدل ها در لحظه بیشینه تغییر مکان، در شکل ۱۸ آمده است.



شکل ۱۷: نمودار تاریخچه زمانی تغییر مکان تراز بالای قاب در راستا X مدل های ساخته شده از ورق فولاد نرم تحت اثر انفجار حوزه نزدیک

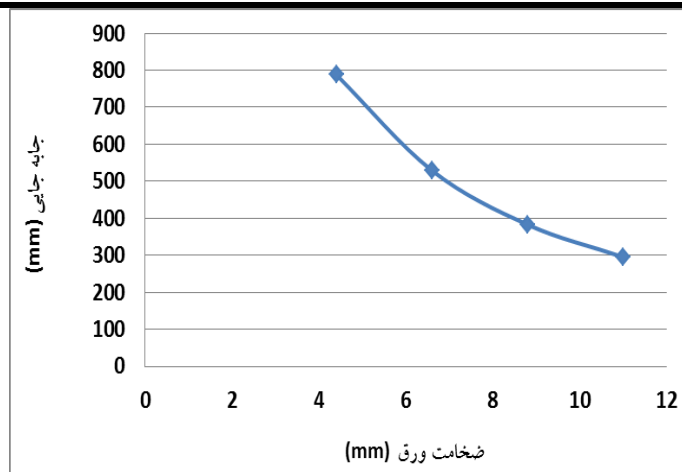


شکل ۱۸: کانتور تنش فون مایسز مدل های ساخته شده از ورق فولاد نرم تحت انفجار حوزه نزدیک

تأثیر افزایش ضخامت بر جابه‌جایی دیوار برشی فولاد نرم در راستای بار انفجار، در انفجار حوزه نزدیک در جدول ۷ و شکل ۱۹ آمده است.

جدول ۷: جابه‌جایی دیوار برشی فولاد نرم با ضخامت‌های مختلف ورق تحت انفجار حوزه نزدیک

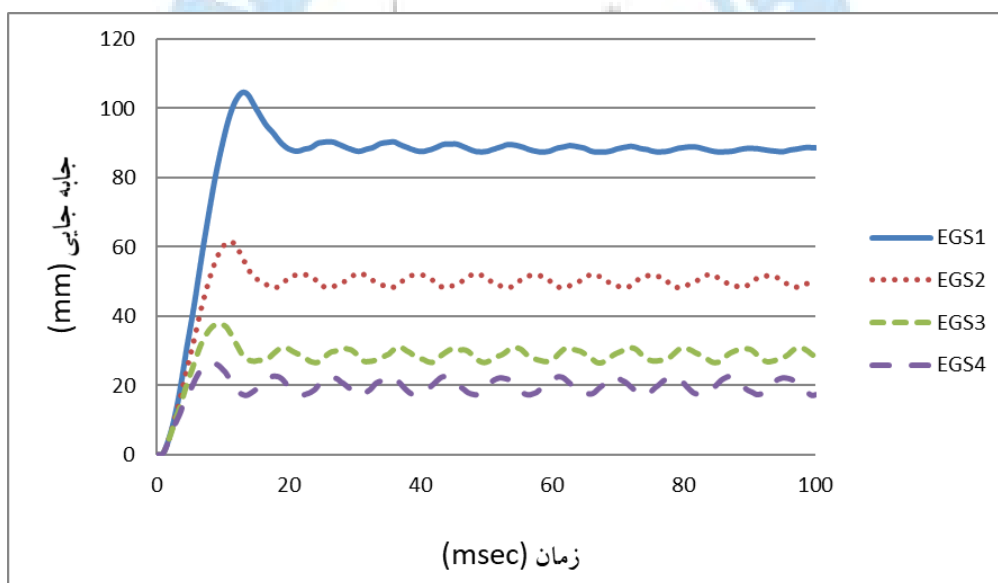
نام مدل	ضخامت ورق (mm)	زمان (msec)	جابه‌جایی (mm)
EGS1	4.4	29.16	787.878
EGS2	6.6	23.48	529.099
EGS3	8.8	18.7	382.905
EGS4	11	16.88	295.3



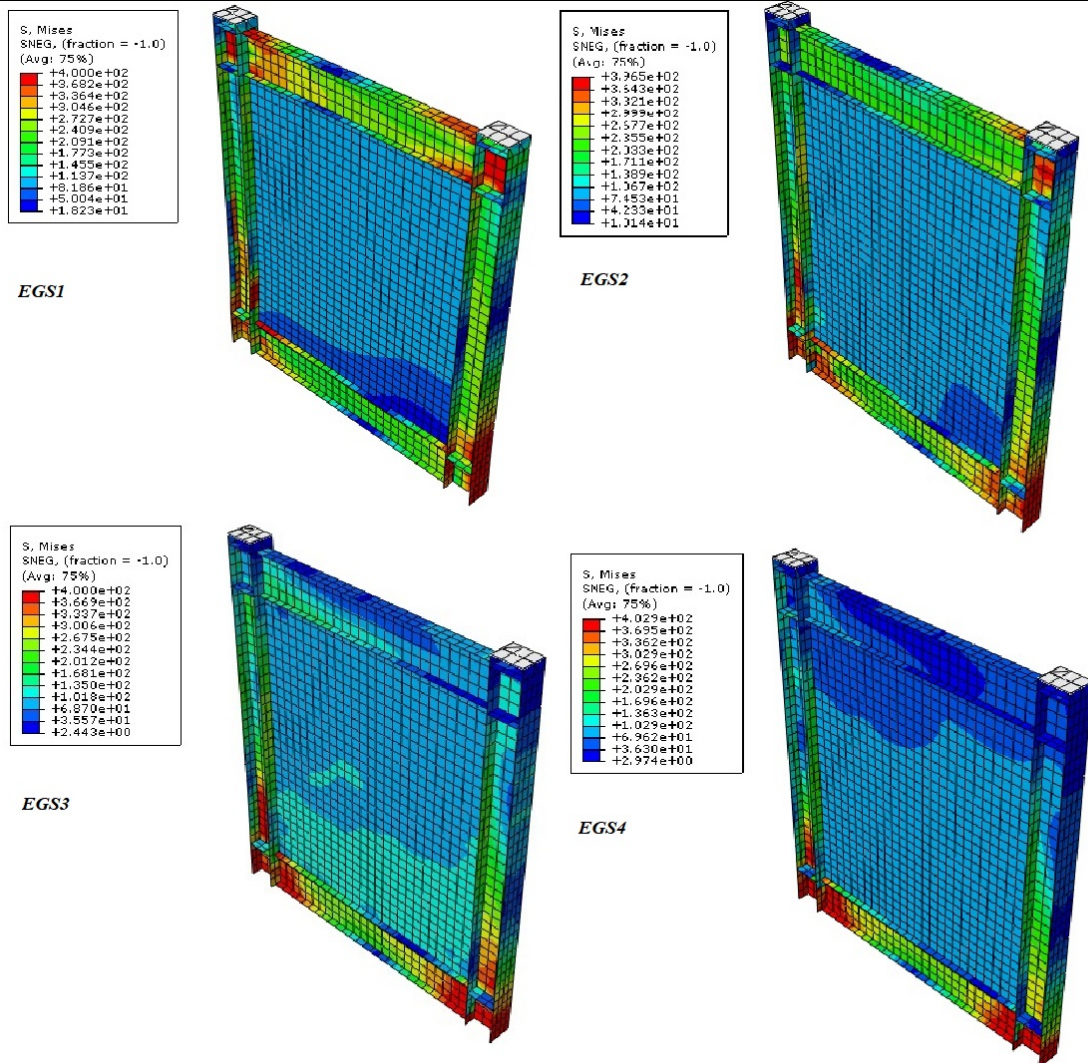
شکل ۱۹: تغییرات جابه‌جایی بالای دیوار برشی فولاد نرم با تغییر ضخامت ورق تحت انفجار حوزه نزدیک

با توجه به نمودار و جدول فوق، در دیوارهای برشی فولادی با ورق فولاد نرم تحت انفجار حوزه نزدیک، افزایش ضخامت به میزان ۵۰٪، ۱۰۰٪ و ۱۵۰٪ به ترتیب باعث کاهش تغییر مکان به میزان ۳۳٪، ۵۱٪ و ۶۳٪ شده است.

در شکل ۲۰ نمودار تغییر مکان در راستا X تراز بالای قاب، نسبت به زمان، حاصل از تحلیل مدل های ساخته شده از ورق فولاد نرم تحت بار انفجاری حوزه نزدیک، نشان داده شده است. همچنین کانتور تنش فون مایسز این مدل ها در لحظه بیشینه تغییر مکان، در شکل ۲۱ آمده است.



شکل ۲۰: نمودار تاریخچه زمانی تغییر مکان تراز بالای قاب در راستا X مدل های ساخته شده از ورق فولاد نرم تحت اثر انفجار حوزه دور

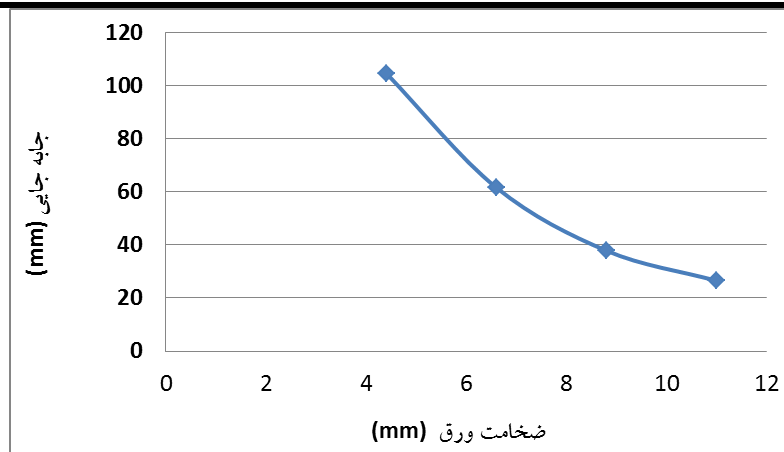


شکل ۲۱: کانتور تنش فون مایسز مدل های ساخته شده از ورق فولاد نرم تحت انفجار حوزه نزدیک

تأثیر افزایش ضخامت بر جابه‌جایی دیوار برشی فولاد نرم در راستای بار انفجار، در انفجار حوزه دور در جدول ۸ و شکل ۲۲ آمده است.

جدول ۸: جابه‌جایی دیوار برشی فولاد نرم با ضخامت‌های مختلف ورق تحت انفجار حوزه دور

نام مدل	ضخامت ورق (mm)	زمان (msec)	جابه‌جایی (mm)
EGS1	4.4	16.88	104.619
EGS2	6.6	11.1	61.5513
EGS3	8.8	9.34	37.8
EGS4	11	8.34	26.5



شکل ۲۲: نمودار تغییرات جابه‌جایی بالای دیوار برشی فولاد نرم با تغییر ضخامت ورق تحت انفجار حوزه دور

با توجه به نمودار و جدول فوق در دیوارهای برشی فولادی با ورق فولاد نرم تحت انفجار حوزه دور، افزایش ضخامت به میزان ۵۰٪، ۱۰۰٪ و ۱۵۰٪ به ترتیب باعث کاهش تغییرمکان به میزان ۴۱٪، ۶۴٪ و ۷۵٪ شده است.

۸- نتیجه گیری

با توجه به مطالعه صورت گرفته روی سامانه دیوار برشی فولادی با فولاد نرم و معمولی در این مقاله، برخی از دستاوردهای این مطالعه به شرح زیر می‌باشد:

۱- استفاده از فولاد نرم در ورق سامانه دیوار برشی فولادی، باعث کاهش تغییرمکان ناشی از انفجار می‌گردد. همچنین به دلیل تنش تسلیم پایین‌تر فولاد نرم نسبت به فولاد معمولی، سامانه دارای ورق فولادی نرم، زودتر جاری شده و می‌تواند انرژی ناشی از انفجار را جذب و مستهلک نماید.

۲- این پژوهش یک مقایسه بین سامانه دیوار برشی فولادی با ورق فولاد نرم و فولاد معمولی انجام داده است. قاب‌ها برای نیروی برشی یکسان طراحی شده‌اند و به دلیل تنش تسلیم پایین‌تر و در نتیجه ضخامت بیش‌تر ورق‌های فولادی نرم، در تمامی حالات، سامانه دیوار برشی فولادی نرم، تغییرمکان کمتری را نسبت به سامانه دیوار برشی با فولاد معمولی داشته است.

۳- استفاده از فولاد نرم به جای فولاد معمولی در تمامی ضخامت‌ها و تحت اثر هر دو انفجار دور و نزدیک باعث کاهش تغییرمکان شده است.

۴- افزایش ضخامت در ورق دیوارها در تمامی حالات باعث کاهش زمان رسیدن به تغییرمکان بیشینه سامانه تحت بارهای انفجاری شده است.

۹- مراجع

[1] Baker, J.F. Williams, E. Lax, P. (1948). The design of framed buildings against high explosive bombs. The Civil Engineer in War. London, UK. Institution of Civil Engineers, 80.

[2] Brode, H.L. (1959). Blast wave from a spherical charge. The Physics of Fluids. 2(2), March/April.

[3] Lamb, H. (1895). Hydrodynamics. London. Cambridge Press.

[4] Taylor, G.I. (1939). The Propagation and Decay of Blast Waves. UK Home Office, ARP Dept. RC 39.

[5] Son, J. Aastaneh-Asl, A. Rutner, M. (2005) Performance of Bridge Decks Subjected to Blast Load. The 6th - Japanese-German - Bridge - Symposium. Munich, Germany.

- [6] Astaneh, A. Heydari, C. Qiu, Zh. (2003) Analysis of Car-Bomb Effects on Buildings using MSC-Dytran Software and Protective Measures. Proceedings of The MSC Software Virtual Product Development Conference. Dearborn, Michigan.
- [7] Luccioni B.M. Rougier V.C. (2006). Concrete pavement slab under blast loads. International Journal of Impact Engineering, 1248-1266.
- [8] P. A. Timler, and Kulak, G.L. (1983). Experimental study of steel plate shear walls. Edmonton, AB.
- [9] Mimura, H. and Akiyana, H. (1977). Load-Deflection Relationship of Earthquake- Resistant Steel Shear Walls with a Developed Diagonal Tension Field. Transactions of the Architectural Institute of Japan, 260, 109-114.
- [10] T. M. a. S.G. Roberts, S. (1992). Hysteretic characteristics of unstiffened perforated steel plate shear panels. Thin Walled Structures, 14, 139-151.
- [11] Hosseinzadeh, S. A. A. Tehranizadeh, M. (2012). Introduction of tiffened large rectangular openings in steel plate shear walls. Journal of Constructional Steel Research, 77, 180-192.
- [12] Alavi, E. Nateghi, F. (2013). Experimental Study on Diagonally Stiffened Steel Plate Shear Walls With Central Perforation. Journal of Constructional Steel Research, 89, 9-20.
- [13] Ngo, T. Mendis, P. Gupta, A. Ramsay, J. Blast Loading and Blast Effects On Structure – An Overview. Electronic Journal of Strutural Engineering.
- [14] Brode H. L. (1995). Numerical solution of spherical blast waves. Journal of Applied Physics, American Institute of Physics.
- [15] Newmark N.M. Hansen R.J. (1961). Design of Blast Resistant Structures, Shock and Vibration Handbook. Vol.3. New York. Eds. Harris & Crede, McGraw-Hill.
- [16] Pedro F. Silva, Binggeng. Lu, Antonio Nanni. (2005). Prediction of Blast Loads on the Expected Damage Level by Using Displacement Based Method. SAFE 2005 WIT Conference Proceeding. Rome, Italy.
- [17] American Institute of Steel Construction, AISC. (2007). Steel design guide 20, steel plate shear walls. Chicago (IL).