

تأثیر مکان بازشو در عملکرد دیوار برشی فولادی مرکب

رسول پوربافرانی^۱، منصور قلعه نوی^۲

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه فردوسی مشهد

۲. دانشیار گروه عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

Rasoul.Pourbafrani@Gmail.com

Ghalehnovi@Um.ac.ir

چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از دیوار برشی فولادی از یک ایده به یک سیستم باربر جانبی مورد قبول آیین‌نامه‌های طراحی تبدیل شده است. سیستم دیوار برشی فولادی از سیستم‌های نوین لرزه‌ای محسوب می‌شود که از سال ۱۹۹۴ مورد تایید آیین‌نامه فولاد کانادا قرار گرفته و از سال ۲۰۰۵ نیز آیین‌نامه فولاد آمریکا آن را به رسمیت شناخته است. دیوار برشی فولادی مرکب یک سیستم نوین باربر جانبی و متشکل از یک پلیت فولادی به همراه دیوارهای بتن آرمه است که به یک سمت یا هر دو سمت آن توسط برش‌گیرهای مکانیکی متصل شده‌اند. ضخامت کم، وزن کم و سهولت نصب از مهمترین مزایای این سیستم در مقایسه با سایر سیستم‌های باربر جانبی هستند. نقش صفحات بتن مسلح، جلوگیری از کمانش ورق فولادی قبل از تسلیم و همچنین مشارکت در سختی و مقاومت لرزه‌ای می‌باشد. در موارد بسیاری به دلیل نیازهای ناشی از معماری، تأسیسات و یا حتی سازه‌ای در این دیوارها بازشوهایی تعبیه می‌شود. وجود بازشو می‌تواند رفتار دیوار را به طرز موثری تحت تأثیر قرار دهد. لذا در این پژوهش، تأثیر مکان بازشو در دیوارهای برشی فولادی مرکب مورد مطالعه قرار داده می‌شود. در این راستا ابتدا دقت و کفایت روش تحلیلی برای مدل نمودن اثر بازشو روی رفتار دیوارهای برشی فولادی مرکب با مقایسه نتایج این مدل‌ها با نتایج آزمایشگاهی موجود بررسی شده و سپس اثر مکان بازشو روی مقاومت و سختی آن به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این تحلیل‌ها از آنالیز استاتیکی غیرخطی (Push over) استفاده شده است. نتایج بدست آمده از آنالیز مدل‌های مختلف دیوار برشی در نرم افزار Abaqus نشان می‌دهد که هر چه خط میانی بازشو به خط میانی دیوار نزدیک‌تر شود، دیوار عملکرد مناسب‌تری خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: دیوار برشی فولادی مرکب، بازشو، شکل‌پذیری، عملکرد





تأثیر مکان بازشو در عملکرد دیوارهای برشی فولادی مرکب

رسول پوربافرانی^{۱*}، منصور قلعه نوی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه دانشگاه فردوسی مشهد، Rasoul.Pourbafrani@gmail.com

۲- دانشیار و عضو هیأت علمی دانشگاه فردوسی مشهد، Ghalehnovi@um.ac.ir

⋮

چکیده

در سال های اخیر استفاده از دیوار برشی فولادی از یک ایده به یک سیستم باربر جانبی مورد قبول آیین نامه های طراحی تبدیل شده است. سیستم دیوار برشی فولادی از سیستم های نوین لرزه ای محسوب می شود که از سال ۱۹۹۴ مورد تأیید آیین نامه فولاد کانادا قرار گرفته و از سال ۲۰۰۵ نیز آیین نامه فولاد آمریکا آن را به رسمیت شناخته است. دیوار برشی فولادی مرکب یک سیستم نوین باربر جانبی و متشکل از یک پلیت فولادی به همراه دیوارهای بتن آرمه است که به یک سمت یا هر دو سمت آن توسط برش گیرهای مکانیکی متصل شده اند. ضخامت کم، وزن کم و سهولت نصب از مهمترین مزایای این سیستم در مقایسه با سایر سیستم های باربر جانبی هستند. نقش صفحات بتن مسلح، جلوگیری از کمانش ورق فولادی قبل از تسلیم و همچنین مشارکت در سختی و مقاومت سیستم لرزه ای می باشد. در موارد بسیاری به دلیل نیازهای ناشی از معماری، تأسیسات و یا حتی سازه ای در این دیوارها بازشوهایی تعبیه می شود. وجود بازشو می تواند رفتار دیوار را به طرز مؤثری تحت تأثیر قرار دهد. لذا در این پژوهش، تأثیر مکان بازشو در دیوارهای برشی فولادی مرکب مورد مطالعه قرار داده می شود. در این راستا ابتدا دقت و کفایت روش تحلیلی برای مدل نمودن اثر بازشو روی رفتار دیوارهای برشی فولادی مرکب با مقایسه نتایج این مدل ها با نتایج آزمایشگاهی موجود بررسی شده و سپس اثر مکان بازشو روی مقاومت و سختی آن به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار می گیرد. در این تحلیل ها از آنالیز استاتیکی غیرخطی (Push over) استفاده شده است. نتایج به دست آمده از آنالیز مدل های مختلف دیوار برشی در نرم افزار Abaqus نشان می دهد که هر چه سنترلین بازشو به سنترلین دیوار نزدیک تر شود، دیوار عملکرد مناسب تری خواهد داشت.

واژه های کلیدی: دیوار برشی فولادی مرکب، بازشو، شکل پذیری، عملکرد.

۱- مقدمه

در سال های اخیر با افزایش تحقیقات روی عملکرد لرزه ای دیوارهای برشی فولادی و افزایش اطمینان از عملکرد آن ها استفاده از این دیوارها به خصوص در آمریکا و ژاپن به نحو محسوسه افزایش یافته است. با توجه به حصول شناخت نسبتاً جامعی از رفتار این دیوارها، اکنون آیین نامه های طراحی شروع به ارائه ضوابط طراحی برای این دیوارها نموده اند. اساس عملکرد این سیستم سازه ای مبتنی بر بهره گیری از عملکرد میدان کششی قطری پس از کمانش ورق فولادی می باشد. اجرای ساده صرفاً با تکیه بر دانش فنی موجود و بدون نیاز به کسب مهارت جدید، کاهش ابعاد فونداسیون، افزایش محسوس سختی جانبی سازه، کاهش بار مرده و در ضمن اقتصادی بودن این سیستم در مقایسه با سیستم قاب خمشی فولادی از مزایای عمده ای این سیستم محسوب می شود. در آیین نامه های معتبر دنیا، دو نوع دیوار برشی مرکب مطرح می باشد که عبارتند از:



۱- دیوار برشی فولادی دارای پوشش بتنی (C-SPW)

۲- دیوار برشی مسلح بتنی با عضوهای مرزی فولادی (S-RCW)

در این تحقیق از دیوار برشی نوع اول استفاده می‌گردد. کاربرد این دیوار در سازه‌هایی مطرح است که نیروی برشی بسیار بزرگ بوده و نیاز به ضخامت زیاد برای دیوار برشی بتن مسلح باشد. دیوار برشی مرکب، حالت توسعه یافته‌ای از دیوار برشی فولادی است که در آن از پوشش بتنی به عنوان سخت کننده جهت جلوگیری از کمانش ورق فولادی استفاده می‌شود. در واقع دیوار برشی فولادی بدون سخت کننده در بار جانبی کوچک، شروع به کمانش در جهت قطر فشاری می‌کند و عملکرد آن توسط عملکرد میدان کششی در جهت قطر دیگر تأمین می‌شود. این مسأله منجر به افزایش ظرفیت باربری دیوار برشی فولادی نسبت به آغاز کمانش می‌گردد که به آن پس کمانش گفته می‌شود.

از طرفی در موارد بسیاری به دلیل نیازهای معماری و تأسیساتی وجود بازشو در دیوار برشی اجتناب ناپذیر است. این در حالی است که راهنمایی‌های مناسبی در این موارد از نظر اینکه وجود بازشو چگونه رفتار دیوار (از نظر سختی، مقاومت و شکل پذیری) را تحت تأثیر قرار می‌دهد، وجود ندارد.

در این مقاله برای بررسی اثر بازشو روی مقاومت و سختی دیوارهای برشی فولادی، ابتدا توانایی مدل تحلیلی را در تخمین نتایج آزمایشگاهی موجود مورد بررسی قرار می‌دهیم. آنگاه تأثیر مکان بازشو روی مقاومت و سختی دیوارهای برشی فولادی مرکب با استفاده از مدل‌های تحلیلی مورد بررسی قرار می‌دهیم. بر همین اساس نمونه‌های کوچک (یک دهانه، یک طبقه) از این نوع دیوار در نرم‌افزار Abaqus 6.12 مدل و پس از تطابق نتایج با مدل آزمایشگاهی، حالت‌های مختلف مکان بازشو بررسی گردید که معیارهای اصلی رفتار در این تحقیق شامل سختی اولیه، مقاومت و شکل پذیری می‌باشد.

۲- مروری بر تحقیقات انجام گرفته

آستانه‌اصل و همکاری‌اش، آزمایشاتی را در دانشگاه برکلی کالیفرنیا بر روی دیوار برشی مرکب انجام دادند که در آن، رفتار نوع جدیدی از این دیوار تحت بارهای رفت و برگشتی بررسی شده و با رفتار دیوار برشی مرکب سنتی (معمولی) مقایسه شد. تنها تفاوت دیوار برشی نوع جدید با نمونه سنتی در وجود یک شکاف (gap) بین دیوار بتنی و قاب پیرامونی در نمونه جدید بود. هر دو سیستم رفتار شکل‌پذیر و مقاومت بالایی را در طول آزمایش از خود نشان دادند. آن‌ها با مشاهده نتایج این آزمایشات دریافتند که اگرچه استفاده از شکاف سبب کاهش مقاومت و سختی کلی می‌شود (به دلیل عدم مشارکت بتن در بارهای کم)، ولی این کاهش قابل قبول بوده و در مقایسه با افزایش شکل‌پذیری و کاهش خسارت به بتن ناشی از وجود این شکاف کم اهمیت‌تر است [۳].

رهایی و حاتمی تحقیقات خود را در زمینه دیوارهای برشی فولادی مرکب در حالت دارای شکاف (gap) تحت بارهای سیکلی انجام دادند، آن‌ها با مطالعات عددی و آزمایشگاهی به این نتیجه رسیدند که افزایش فاصله‌ی بین بولت‌ها تا حد معینی، باعث افزایش قدرت جذب انرژی و کاهش تغییر مکان خارج از صفحه و حداکثر تنش نرمال در برشگیرها می‌شود، ولی فواصل بیشتر از این حد تأثیر چندانی ندارند. همچنین رفتار دیوار برشی فولادی تقویت شده مستقل از صلبیت تیرهای میانی و نوع اتصال تیر به ستون است ولی در دیوارهای برشی بدون سخت کننده، افزایش صلبیت تیرهای میانی باعث یکنواختی بهتر توزیع تنش در ورق فولادی می‌شود و در نهایت مقاومت برشی دیوار برشی فولادی مرکب با ضخامت پوشش بتنی نسبت مستقیم و با فاصله‌ی بین برشگیرها نسبت عکس دارد [۴]. حاتمی و صهری، پژوهشی در مورد دیوارهای برشی فولادی مرکب تحت عنوان بررسی ضخامت ورق فولادی بر رفتار دیوار برشی فولادی مرکب انجام دادند و به این نتیجه دست یافتند که افزایش ضخامت ورق فولادی به لایه‌ی بتنی تا حد ضخامت بهینه منجر به کاهش میزان تغییر مکان خارج از صفحه ورق فولادی شده و بیش از آن تأثیری در عملکرد دیوار برشی نخواهد داشت، همچنین استفاده از دو لایه‌ی پوشش بتنی در دو سمت ورق فولادی اثرات خمشی ثانویه را تا حدودی کاهش می‌دهد [۵].

از دیگر تحقیقات انجام شده در این زمینه می‌توان به بررسی و مقایسه ظرفیت باربری و رفتار شکل‌پذیری دیوارهای برشی فولادی مرکب به روش اجزای محدود توسط هادی پور و رزاقی اشاره نمود. آنها به این نتیجه رسیدند که تغییر فاصله بین برشگیرها، باعث تغییر شکل‌پذیری سازه و میزان جذب انرژی می‌گردد [۶].

۳- ارزیابی دقت روش‌های تحلیلی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی موجود

در این تحقیق، شش نمونه دیوار برشی مرکب؛ یک‌دهانه و یک‌طبقه؛ در حالت با شکاف (gap) با استفاده از نرم افزار Abaqus ۶.۱۲ مدل گردیده است.

سطح مقطع بولت‌ها به گونه‌ای طراحی شده است تا تمام نمونه‌ها برش یکسانی را تحمل کنند. در مدل‌سازی، از المان Solid(C3D8R) برای تیر و ستون و پوشش بتنی، از Shell(S4R) برای ورق فولادی و Beam(B31) برای بولت‌ها استفاده شده است. علت استفاده از المان Solid برای پوشش بتنی، امکان مدل‌سازی دقیق تماس آن با قاب اطراف و مشاهده تغییر شکل واقعی آن در انتهای تحلیل می‌باشد. به منظور مدل نمودن گیرداری پایه، درجات آزادی انتهای تیر پایین در تمام جهات گرفته شده است. تمام پانل‌ها به صورت مربعی با ابعاد ۷,۵۷۱ cm (فاصله مرکز تا مرکز تیرها یا ستون‌ها) که به منظور جلوگیری از اندرکنش بین این دو دیوار، فاصله‌ای به اندازه ۱۱,۲۵ mm بین آن‌ها قرار داده شده است. مشخصات مصالح مورد استفاده در جدول ۱ و ۲ آمده است:

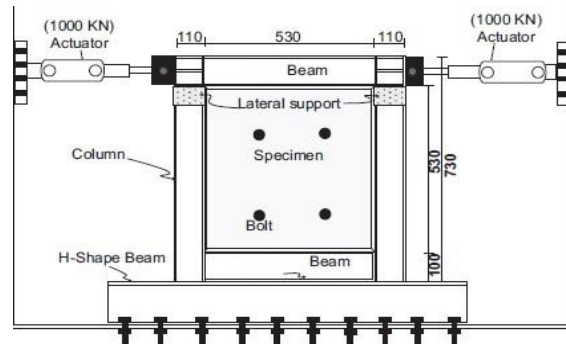
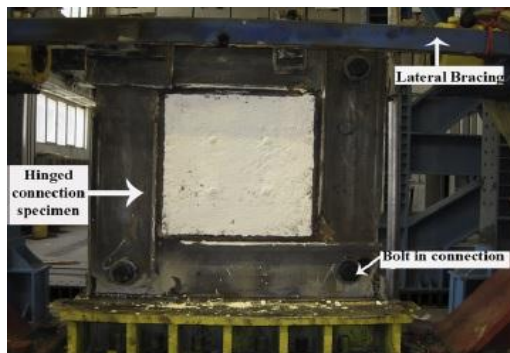
جدول ۱- مشخصات فولاد مصرفی [۷]

مورد استفاده	اندازه مقطع (mm)	مقاومت جاری شدن (MPa)	مقاومت نهایی (MPa)	مدول ارتجاعی (MPa)
ستون‌ها	۲PE ۱۰۰+۲PL ۱۰۰×۵	۳۶۱	۵۱۰	۲۰۳۰۰۰
تیرها	۲PE ۱۰۰	۳۶۱	۵۱۰	۲۰۳۰۰۰
ضخامت ورق فولادی	۲	۲۶۸	۴۱۵	۲۰۳۰۰۰
فیش پلیت	۴۰×۵	۲۹۷	۴۰۶	۲۰۳۰۰۰
بولت	۲۰	۳۳۶	۴۹۲	۲۰۳۰۰۰
میلگرد	۳	۳۶۱	۵۱۰	۲۰۳۰۰۰

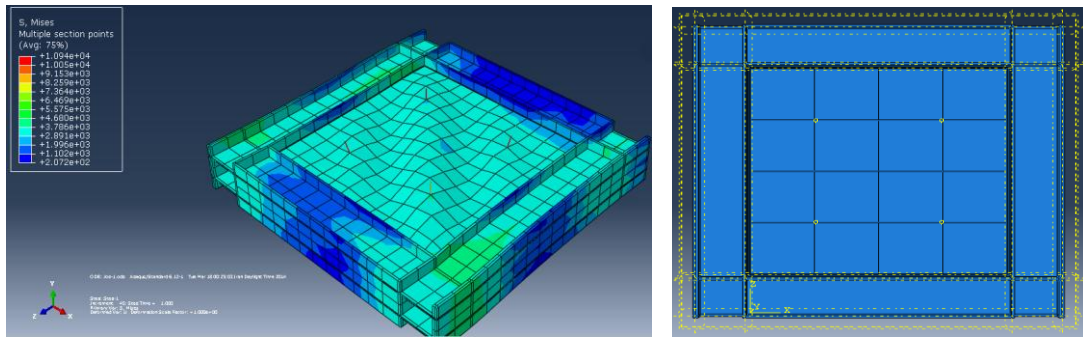
جدول ۲- مشخصات بتن مصرفی [۷]

مورد استفاده	اندازه (mm)	مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای (MPa)	مدول فشاری نمونه مکعبی (MPa)	مدول ارتجاعی (MPa)
ضخامت بتن	۳۰	۴۳	۴۷	۳۰۸۱۹

علت استفاده از بتن با مقاومت بالا، تمایل به ترک‌خوردگی کمتر در پوشش بتنی می‌باشد. آرماتور به میزان ۰/۰۱ درصد حجم بتن در داخل آن به صورت یک‌سفره قرار داده شده است و به صورت Rebar Layer به نرم‌افزار معرفی شده‌اند. بولت‌ها نیز با مقاومت بالا انتخاب شده‌اند تا در طی مراحل تحلیل، در ناحیه خطی باقی بمانند و صدمه‌ای را تحمل نکنند. بارگذاری به صورت استاتیکی غیرخطی (Push Over) بود که طی آن نمونه‌ها تحت اثر تغییر مکان افزایشی بر روی تیر فوقانی خود قرار گرفته‌اند. به منظور اعتبار سنجی صحت مدل‌سازی، رفتار نمونه دیوار مرکب بدون شکاف با نمونه آزمایشگاهی ساخته شده مشابه آن مقایسه گردیده است (شکل ۱ و ۲).

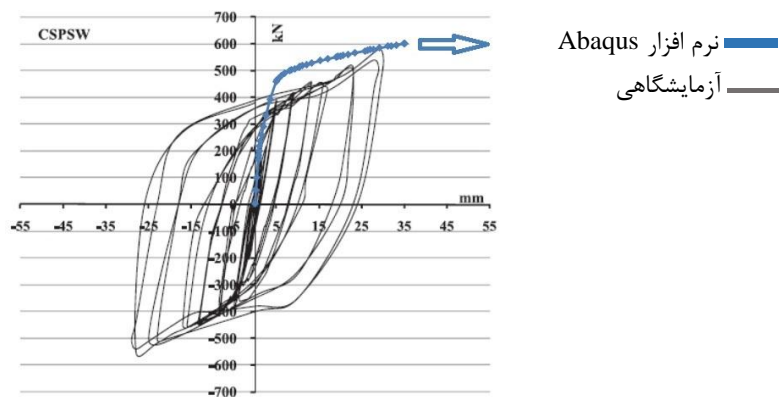


شکل ۱- نمونه آزمایشگاهی قبل و بعد از اجرا [۷]



شکل ۲- مدل عددی نرم افزار Abaqus قبل و بعد از آنالیز

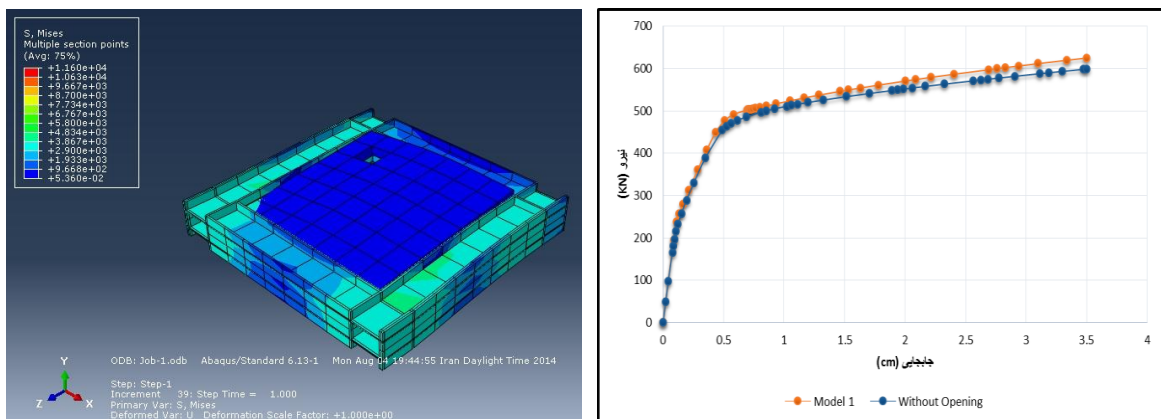
در شکل ۳ منحنی‌های بارافزون مدل‌های عددی و آزمایشگاهی نشان داده شده است که در آن نمونه‌ی عددی با توجه به ماهیت تحلیل اجزاء محدود کمی سخت‌تر است، ولی با این حال انطباق مناسبی بین منحنی‌ها وجود دارد که بیانگر تأیید مدل ساخته شده می‌باشد.



شکل ۳- مقایسه منحنی بار افزون مدل‌های عددی و آزمایشگاهی

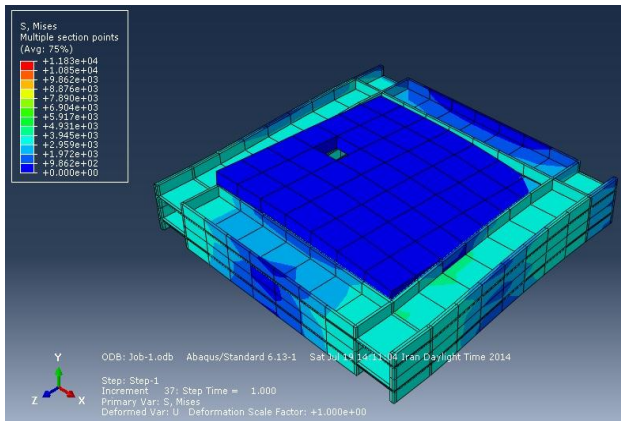
۴- بررسی تحلیلی اثر مکان بازشو بر رفتار دیوار برشی فولادی مرکب

پس از حصول اطمینان از دقت مناسب روش‌های تحلیلی در قیاس با نتایج آزمایشگاهی، در این قسمت به بررسی اثر بازشو بر رفتار دیوار برشی فولادی مرکب با بهره‌گیری از روش تحلیلی (استاتیکی غیرخطی) می‌پردازیم. برای این کار ۶ پانل (پانل‌های یک طبقه Model ۱ الی Model ۶) با نسبت‌های یکسان برای بررسی مکان بازشو انتخاب شده‌اند که موقعیت هر یک از پانل‌ها به همراه نمودار آن‌ها در شکل‌های ۴ الی ۱۵ مشاهده می‌شود.

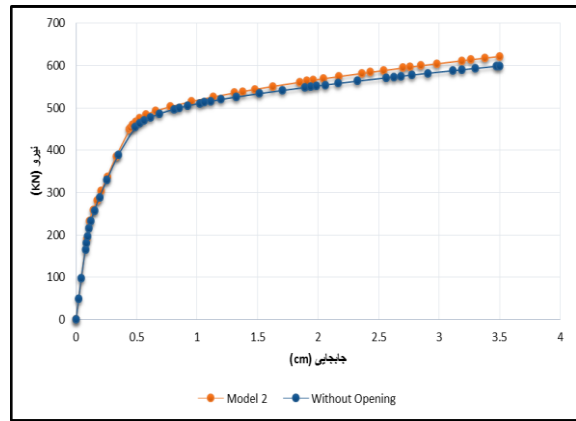


شکل ۵- تنش بازشو پس از تحلیل (Model ۱)

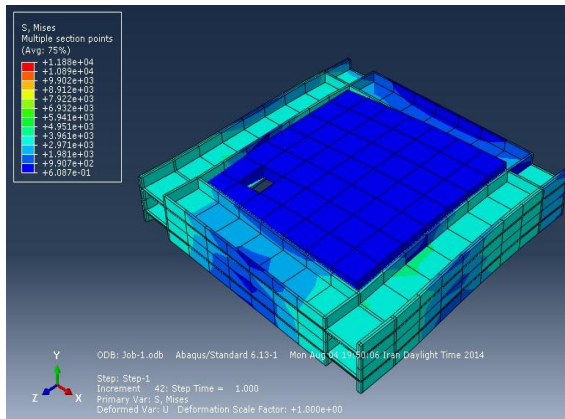
شکل ۴- منحنی بار تغییر مکان بدون بازشو و Model ۱



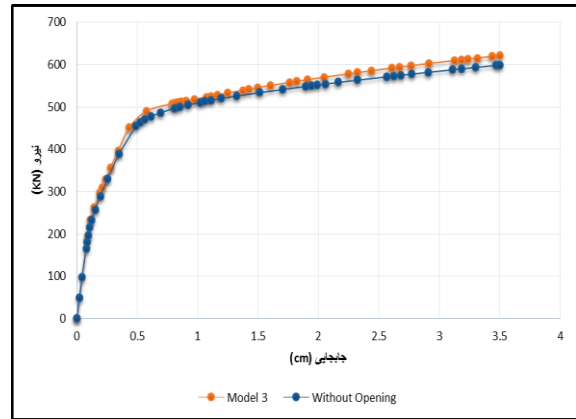
شکل ۷- تنش بازشو پس از تحلیل (Model ۲)



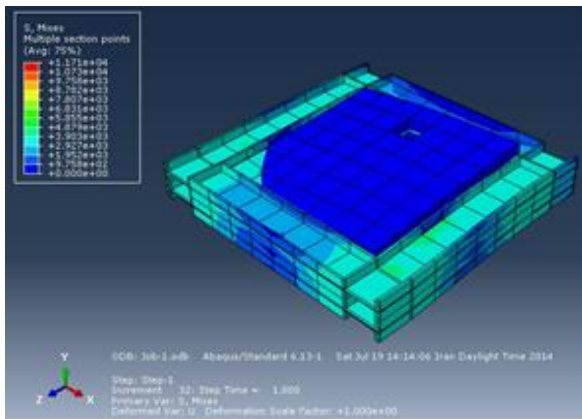
شکل ۶- منحنی بار تغییر-مکان بدون بازشو و Model ۲



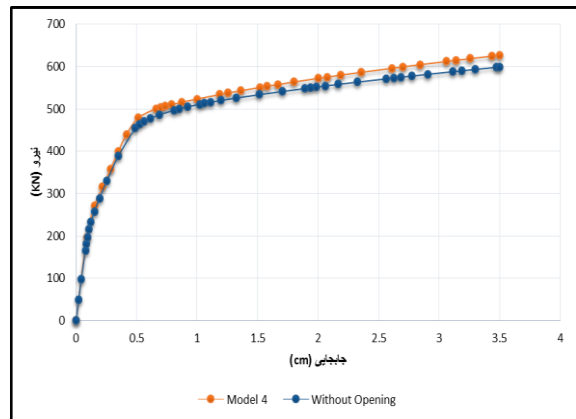
شکل ۹- تنش بازشو پس از تحلیل (Model ۳)



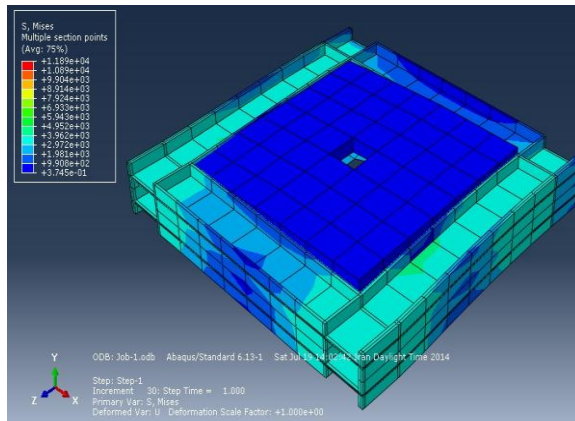
شکل ۸- منحنی بار تغییر-مکان بدون بازشو و Model ۳



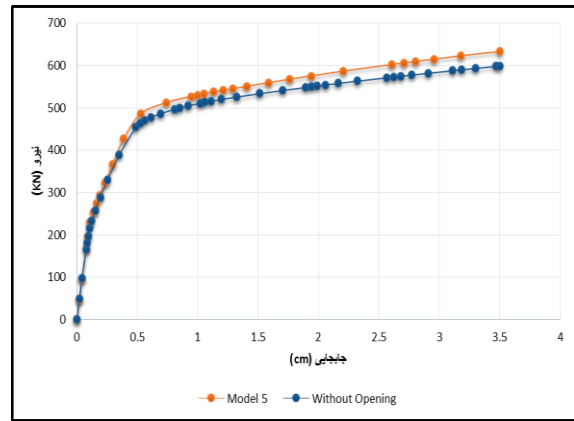
شکل ۱۱- تنش بازشو پس از تحلیل (Model ۴)



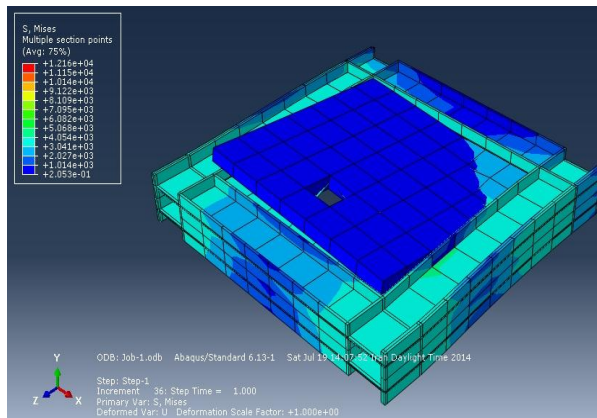
شکل ۱۰- منحنی بار تغییر-مکان بدون بازشو و Model ۴



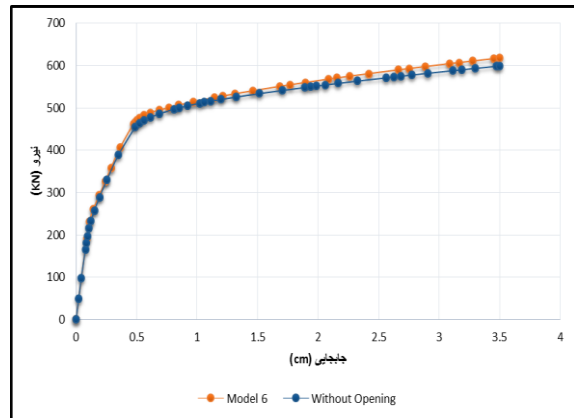
شکل ۱۳- تنش بازشو پس از تحلیل (Model ۵)



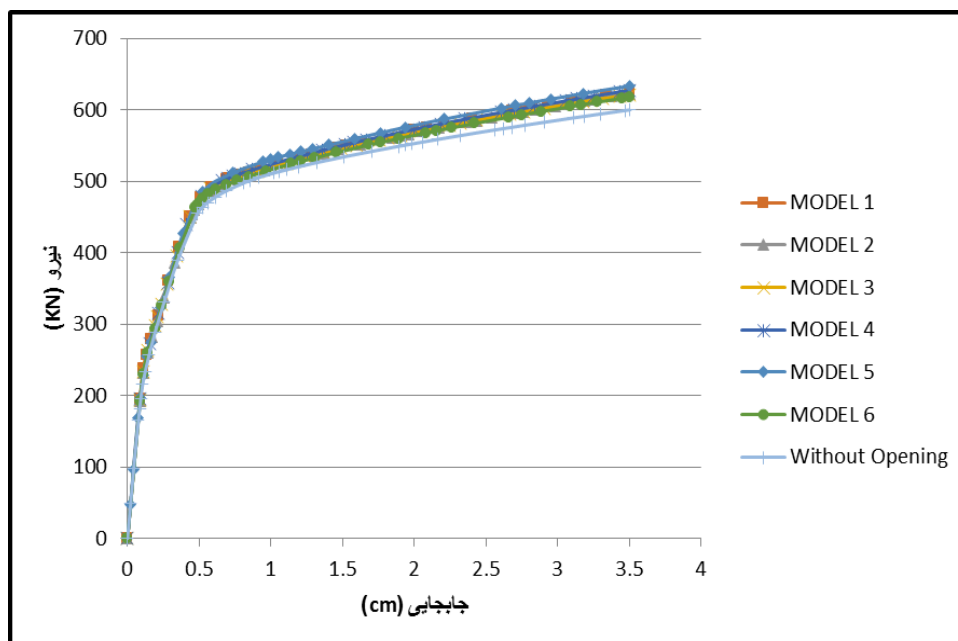
شکل ۱۲- منحنی بار تغییر-مکان بدون بازشو و Model ۵



شکل ۱۵- تنش بازشو پس از تحلیل (Model ۶)



شکل ۱۴- منحنی بار تغییر-مکان بدون بازشو و Model ۶



شکل ۱۶- منحنی بار-تغییر مکان، مکان‌های مختلف بازشو و بدون بازشو



بررسی شکل های ۴ الی ۱۶، نشان می دهند که تا هنگامی که بازشوها روی سنترلاین دیوار هستند با بالا و پایین کردن مکان بازشوها چندان تغییری در میزان تمرکز تنش های حول بازشوها صورت نمی پذیرد مگر آن که بازشوها دقیقاً روی سنترلاین دیوار قرار گیرد، این در صورتی است که وقتی بازشوها از این موقعیت خارج می شوند تمرکز تنش ها حول بازشوها افزایش می یابد. همان طور که از نمودارها نیز مشاهده می شود، Model ۱ الی Model ۶ به ترتیب نسبت به حالت بدون بازشو دارای ۳،۷۹٪، ۳،۵۸٪، ۴،۵۶٪، ۵،۵۸٪، ۲،۹۹٪ افزایش مقاومت را از خود نشان می دهند.

۵- نتیجه گیری

با توجه به مطالعه صورت گرفته بر روی مدل ها به طور خلاصه می توان نتایج زیر را بیان نمود:

هنگامی که بازشو به صورتی تعبیه می شود که دیوار تقارن خود را حفظ می کند رفتار دیوار، رفتار مناسب تری می باشد که این رفتار به شرح زیر است:

۱. تمرکز تنش حول بازشوها کمتر از حالت نامتقارن است.
۲. به طور کلی می توان گفت که در حالتی که دیوار تقارن دارد تنش حداکثر کمتری نسبت به حالت نامتقارن سازه تا میزان ۵۱٪/۲ دارد.
۳. با توجه به نتایج حاصل از تحقیق انجام گرفته در صورت نبودن مشکلات خاص سازه ای یا معماری پیشنهاد می شود که بازشوها در محلی احداث شوند که سنترلاین بازشو و دیوار یکی باشد.

۶- مراجع

۱. AISC, (۲۰۰۵), "Seismic Provisions for Structural Steel Buildings", American Institute of Steel Construction INC., Chicago.
۲. Astaneh-Asl A., (۲۰۰۲), "Seismic Behavior and Design of Composite Steel Plate Shear Walls", Steel TIPS Report, Structural Steel Educational Council, Moraga, California.
۳. Astaneh-Asl a., Zhao Q., (۲۰۰۲), "Cyclic Behavior of Traditional and an Innovative Composite Shear Wall", Report No. UCB-Steel-0۱/۲۰۰۲, Department of Civil and Env. Engineering, University of California, Berkeley.
۴. Rahai A., Hatami F., (۲۰۰۹) "Evaluation of Composite Shear Wall Behavior under Cyclic loadings", Journal of Constructional Steel Research. Article in Press.
۵. حاتمی، ف. و صهری، س.م.ر.، (۱۳۸۷)، "بررسی تغییرات ضخامت ورق فولادی بر رفتار دیوار برشی مرکب"، نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد، سال چهارم، پاییز ۱۳۸۷.
۶. هادی پور، س. و رزاقی، ج.، (۱۳۸۶)، "بررسی و مقایسه ظرفیت باربری و رفتار شکل پذیری دیوارهای برشی فولادی و مرکب (C-SPW) به روش اجزای محدود با استفاده از نرم افزار ANSYS"، پنجمین کنفرانس بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ۲۶-۲۳ اردیبهشت، تهران، ایران.
۷. Arabzadeh A., Soltani M., Ayazi A., (۲۰۱۱), "Experimental Investigation of Composite Shear Walls Under Shear loadings", Department of Civil and environmental Engineering, University of Tarbiat Modares, Tehran.