



رفتار لرزه ای دیوارهای برشی مرکب

هاشم شریعتمدار^۱، مجید عباس زادگان^۲

(دریافت ۸۹/۷/۱۷، پذیرش ۹۱/۸/۱۲)

چکیده

سیستم دیوار برشی فولادی کامپوزیت ترکیبی از صفحات فولادی، تیرها و ستونهای I شکل و ستونهای کامپوزیت با بتن پر کننده، f'_c می باشد. شناخت و ارزیابی سیستم فوق و همچنین بهبود رفتار سازه، مستلزم بررسی اثر هر یک از پارامترهای فوق روی پاسخ لرزه ای تناوبی است. در این مقاله دیوار برشی فولادی کامپوزیتی که تحت بارهای چرخه ای تناوبی آزمایش شده بود، مدلسازی، تحلیل دینامیکی غیر خطی و صحت مدلسازی تایید شد. مدل های متفاوت با تغییر در پارامترهای مؤثر در رفتار این نوع سیستم ها، تحت بارهای دینامیکی چرخه ای آنالیز غیر خطی گردید. نتایج نشان می دهد که با تغییرات در پارامترهای فوق، شکل کلی منحنی های هیستریزس دوکی شکل باقیمانده و پاسخ برشی که مبین خوبی برای استهلاک زیاد انرژی می باشد ثابت می ماند. با تغییر پارامترهای اصلی مقدار استهلاک انرژی بین ۱۰ درصد تا ۳۱ درصد و مقاومت دینامیکی حدود ۲۰ درصد افزایش می یابد که بیشترین آن برای افزایش ضخامت ورق دیوار برشی می باشد. افزایش مقاومت بتن پر کننده به بیش از ۲۰MPa تاثیر زیادی روی ظرفیت شکل پذیری نداشته و استفاده از بتن های با مقاومت بالاتر از ۲۰MPa توصیه نمی شود. با توجه به نتایج و آنالیز آماری ضریب شکل پذیری معادل $\mu = 7$ محاسبه و توصیه می گردد.

کلمات کلیدی

دیوار برشی فولادی کامپوزیت، ستونهای کامپوزیت، رفتار لرزه ای، منحنی های هیستریزس، مقاومت دینامیکی، استهلاک انرژی، ضریب شکل پذیری

Seismic Response of Composite Steel Shear Walls

H. Shariatmadar, M. Abbaszadehgan

ABSTRACT:

Steel composite shear wall system is consisted of steel plates, I shape beams and columns, and composite columns with infill concrete, f'_c . In order to evaluate and improve the behavior of this innovated system, it is necessary to investigate the effect of these parameters on reversed cyclic response. In this paper, a tested steel composite shear wall subjected to cyclic load was modeled. The model was verified using nonlinear dynamic analysis. Several models, in which the effective parameters were varied, have been nonlinear analyzed under dynamic reversed cyclic loads. Results show that by varying these parameters, the general shape of hysteresis loops remained unchanged and the shear behavior with large capability of energy dissipation, were noted. The dissipated energy and dynamic strength increased 10 % to 31% and 20%, respectively, as these parameters changed, where the maximum increase was related to increase of steel plate thickness. Increase of concrete strength to more than 20MPa did not significant effect on ductility, thus using concrete with compressive strength more than 20MPa is not recommended. Based on the results, the ductility ratio of $\mu = 7$ is determined and recommended.

Keywords:

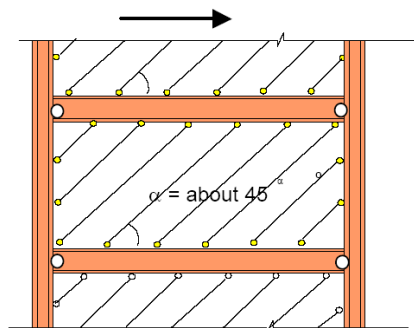
۱. استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، shariatmadar@um.ac.ir

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، mabbasszadegan@um.ac.ir



اساس ایده دیوارهای برشی فولادی، استفاده از میدان کشش قطری است که پس از کماتش ورق فولادی، در آن ایجاد می گردد. این ایده در ۱۵ سال اخیر بطور جدی مورد توجه قرار گرفته است [۱].

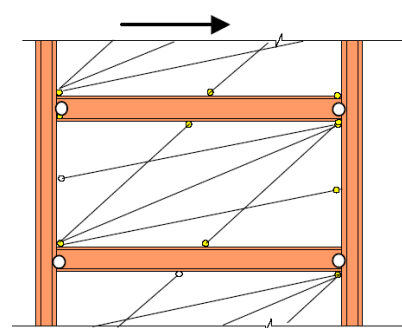
برای طراحی دیوارهای برشی فولادی می توان ورقهای فولادی را با یک سری المانهای خرپایی مدل نمود. دو نوع از مدل‌های پیشنهاد شده در دانشگاه های کانادا در شکل ۱ نشان داده شده است [۲].



Steel Plate Shear Wall Model
(see Driver et al, 1983)

دیوارهای برشی فولادی، شامل یک ورق فولادی، دو ستون مرزی و تیرهای افقی طبقات می باشد. این مجموعه همانند شاهتیرهای تیر ورق عمودی که به صورت گیردار به زمین متصل هستند، رفتار می کنند. ستونها همچون بالهای این شاهتیر عمودی و ورق دیوار فولادی همچون جان شاهتیر عمل می کند، عملکرد تیرهای افقی طبقات همچون سخت کننده ها در شاهتیرها است [۲و۱].

دیوارهای برشی فولادی بسیار ساده اجرا می شوند و در کارگاههای ساختمانی به راحتی قابل ساخت می باشند، به هیچ نوع فن آوری جدیدی احتیاج ندارد.



Steel Plate Shear Wall Model
(see Rezaei, 2000)

شکل (۱): دو مدل پیشنهاد شده برای جایگزینی دیوارهای برشی با المان خرپایی [۲]

تاثیر سوراخ بر رفتار دیوار برشی فولادی را مورد بحث قرار داد.

در آئین نامه کانادا دیوارهای برشی فولادی، به سه نوع با انعطاف پذیری زیاد، با انعطاف پذیری متوسط و معمولی تقسیم بندی شده اند. جدول ۱ خصوصیات اصلی این سه سیستم و R های مربوط به آنها را نشان می دهد. لازم به ذکر است، که ضریب R در آئین نامه کانادا، حدود نصف ضریب R آئین نامه های آمریکایی می باشد، که این به سبب تعاریف مختلف پارامترها و تفاوت ناچیز در مقادیر متغیرها می باشد. به همین دلیل در جدول ۱ ضریب R آئین نامه کانادا با RCAN و ضریب R آئین نام آمریکا با RUS نشان داده شده است.

آزمایشهای بسیار زیادی توسط پژوهشگران در نقاط مختلف دنیا صورت گرفته است که همگی توانائی بالای این سیستم را نشان می دهد، از جمله این آزمایش ها می توان به موارد زیر اشاره کرد.

- ۱- آزمایشات دیوار برشی فولادی در کانادا [۳].
- ۲- آزمایشات در ژاپن [۴].
- ۳- آزمایشات در انگلستان [۵].
- ۴- آزمایشات در آمریکا [۶].
- ۵- آزمایشات در دانشگاه برکلی بر روی دیوارهای برشی فولادی مرکب [۷].

نتایج این آزمایشات نشان می دهد که این سیستم می تواند به عنوان یک سیستم کاملاً شکل پذیر و مقاوم در برابر بارهای جانبی عمل کند. آزمایش انجام شده در انگلیس

جدول (۱): سیستم دیوار برشی فولادی در آئین نامه کانادا و ضریب R [۲]

Type of Steel Plate Shear Wall	Requirement	R _{CAN} (Canadian)	R _{US} (US Equivalent)
Ductile	The frame containing the wall should be ductile moment frame	4.0	8.0
Nominally Ductile	The frame containing the wall should be nominally ductile moment frame (Intermediate in the U.S. definition)....	3.0	6.0
Ordinary	No specific requirement for frame. It can be a frame with pin connections.	2.0	4.0

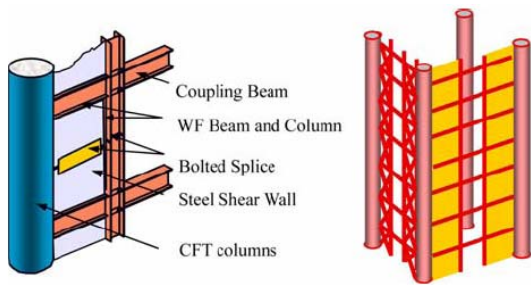
فولادی شکل که دیوار برشی فولادی به آنها متصل می‌شود، سیستم فوق را تشکیل می‌دهند. بارهای ثقلی عموماً توسط ستونهای مرکب به اعضاء افقی (تیرهای بالا و پایین) و تیر رابط که قابلیت استهلاک انرژی بالایی نیز دارد منتقل می‌شود و بدون اینکه باعث کاهش شکل پذیری صفحه فولادی شوند. کرنش های تولید شده را به پی منتقل می‌کنند.

۲- دیوار برشی فولادی مرکب

در این مقاله رفتار دیوار برشی فولادی با ستونهای مرکب بتنی، تحت بارهای تناوبی لرزه ای مورد بررسی قرار گرفته است. در سال ۲۰۰۷ میلادی، آزمایش هایی بر روی دیوار برشی فولادی با ستونهای مرکب بتنی توسط آستانه صورت گرفت [۹]. جهت بررسی صحت عمل مدلسازی و کالیبره کردن مدل های المانهای محدود در این مقاله از نتایج آزمایشهای فوق استفاده شده است. هدف از پژوهش بررسی پارامترهای مؤثر اجزاء تشکیل دهنده بر رفتار دیوارهای فولادی برشی کامپوزیت تحت اثر بارهای دینامیکی تناوبی و تأثیر هر یک از پارامترها روی ظرفیت شکل پذیری سازه و مقاومت نهایی سیستم می باشد. در این پژوهش، پس از بررسی و تأیید صحت مدلسازی، با تغییر پارامترهای اصلی مشتمل بر ضخامت دیوار برشی فولادی، ضخامت ورق دور ستون کامپوزیت، ضخامت بال تیر و ستون I شکل و مقاومت مشخصه بتن، f'_c ، ستون کامپوزیت به بررسی رفتار مدل های فوق و مقایسه آنها با یکدیگر پرداخته شده است. منحنی های هیستریزس با توجه به متغیرهای فوق برای حالت های مختلف بدست آمده

طبق دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمانهای موجود ایران [۸]، یک دیوار برشی فولادی سوراخ دار یا بدون سوراخ باید در چهار طرف خود دارای عناصر لبه ای (تیرها و ستون ها) بوده و به آن ها جوش شده باشد. دیوارهای برشی فولادی باید طوری طراحی شوند که بارهای لرزه ای را به تنهایی یا به همراه سایر اعضای سیستم مقاوم جانبی تحمل نمایند. عناصر لبه ای باید همانند تیرها و ستون ها مورد ارزیابی قرار گیرند. در این آئین نامه دستورالعمل محاسبه سختی به روش استاتیکی و دینامیکی خطی، روش استاتیکی غیر خطی و روش دینامیکی غیر خطی ارائه گردیده است و همچنین دستورالعمل محاسبه مقاومت روش استاتیکی و دینامیکی خطی، روش استاتیکی و دینامیکی غیر خطی ارائه گردیده است. معیارهای پذیرش در این آئین نامه روش استاتیکی و دینامیکی خطی، روش استاتیکی و دینامیکی خطی می باشد. دیوارهای برشی فولادی که معیارهای پذیرش مربوط به سطح عملکرد مورد نظر را برآورد نمی سازند، باید بهسازی شوند.

یکی از معایب دیوارهای برشی فولادی با سخت کننده روی ورق فولادی هزینه زیاد و کارگاهی قابل توجه می باشد. جهت بهبود رفتار دیوارهای برشی فولادی بدون سخت کننده و ایجاد میدان کشش بعد از تسلیم جهت استهلاک انرژی ایده هایی مطرح شده است. یکی از مهمترین روشها کاهش نیروهای محوری در ستونهای اطراف ورق فولادی در یک سیستم دیوار برشی فولادی می باشد. در روش فوق ستونهای مرکب یک مقطع فولادی جعبه ای یا لوله ای که از بتن پر شده است و ستونهای



شکل (۲): آزمایش دیوار مرکب برشی فولادی در سال ۲۰۰۷ توسط آستانه [۹]

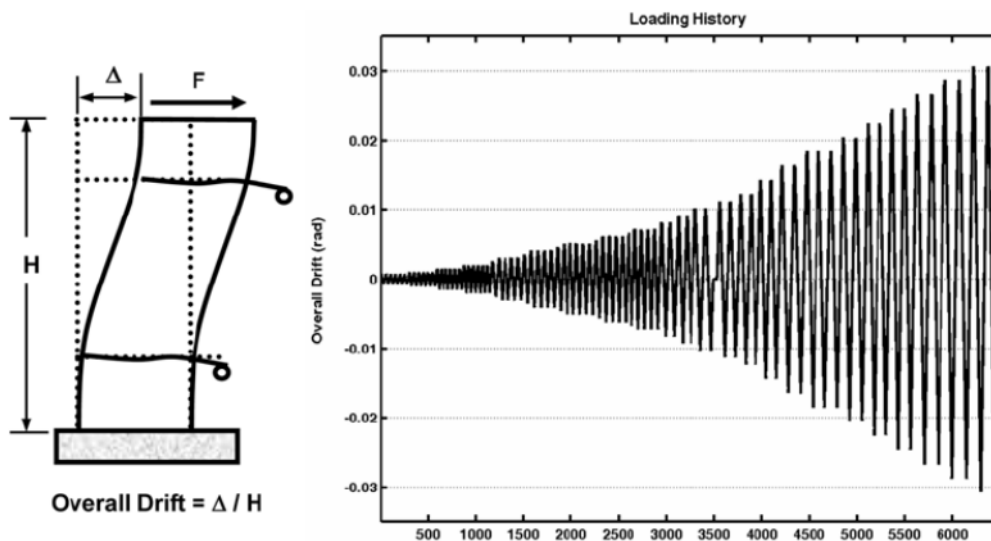
جدول (۲): مشخصات دیوار برشی فولادی مرکب [۹]

مقطع تیر و ستون I شکل	قطر ستون لوله ای	ضخامت ورق در ستون لوله ای	ضخامت دیوار برشی
۷۱۸ × ۵۶	۶۱۰ mm	۸ mm	۶ mm

است، مبتنی بر نتایج منحنی های هیستریزس پاسخ تناوبی- لرزه ای بدست آمده برای هر یک از مدل های فوق شکل پذیری سازه و مقاومت نهایی سیستم محاسبه، برآورد و ارزیابی گردیده است. تمامی مدل های سازه ای فوق تحت اثر بارهای تناوبی دینامیکی، آنالیز تاریخیچه زمانی غیر خطی شده اند.

۳- تحقیق آزمایشگاهی روی دیوارهای برشی فولادی مرکب

در سال ۲۰۰۷ میلادی آزمایشی بر روی دیوار برشی فولادی مرکب توسط پروفسور آستانه [۹] انجام گرفت. این سازه شامل یک ورق فولادی لوله ای می باشد که داخل آن از بتن پر شده است همچنین ستونها و تیرهای I شکل که داخل این ستونها دیوار برشی فولادی چسبانده شده است. مدل آزمایش مانند شکل ۲ می باشد. مشخصات مدل در جدول ۲ آورده شده است. این سازه تحت بار تاریخیچه زمانی شکل ۳ در بالای آن آزمایش شده است.



شکل (۳): تاریخیچه بارگذاری سیستم دیوار برشی فولادی مرکب [۹]

در سال ۲۰۰۷ میلادی توسط آستانه [۹] در دانشگاه برکلی آمریکا انجام شده، جهت بررسی صحت مدل سازی دیوارهای برشی فولادی کامپوزیت مورد استفاده قرار گرفت. مدل کامپیوتری ایجاد شده دقیقاً به مانند مدل آزمایشگاهی ساخته شده است. ترکیب اجزاء (تیر، ستون،

۴- نحوه مدل سازی

مدل سازی توسط برنامه ANSYS که دارای توانائی تحلیل دینامیکی غیر خطی (مصالح و هندسی) تاریخیچه زمانی می باشد، انجام گرفته است. کار پژوهشی آزمایشگاهی که



صفحه فولادی، ستون مرکب) و ابعاد این مدل در شکل ۲ و جدول ۲ نشان داده شده است. بار روی مدل کامپیوتری بصورت اعمال تغییر مکان شکل ۳ می باشد.

۴-۱- برنامه ANSYS

برنامه ANSYS، یک نرم افزار عددی پیشرفته است که با استفاده از المانهای متعدد و متنوعی که در آن موجود می باشد و با قابلیت های تحلیلی بسیار بالا قادر است انواع آنالیزهای مختلف در حالت های خطی و غیر خطی را انجام دهد، به طوری که می توان هم مصالح و هم هندسه سازه را به صورت خطی و یا غیر خطی مدل کرد [۱۰]. روش اساسی در این نرم افزار، روش المان محدود استاندارد است. با ایجاد تنظیمات و ماکرونویسی در این برنامه می توان تحلیل های دینامیکی غیرخطی را نیز انجام داده و منحنی های پاسخ هیستریزس را استخراج نمود.

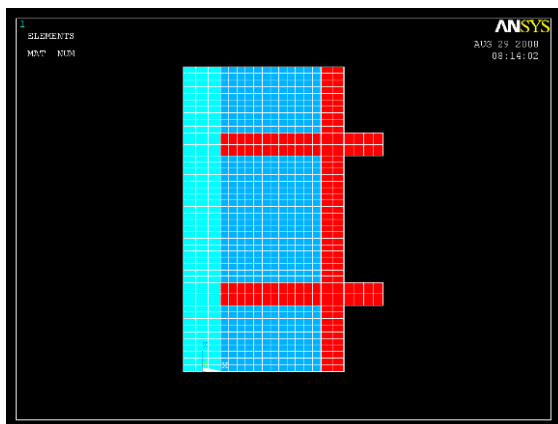
۴-۲- تعیین نوع المانها

برای مدل سازی تیر و ستونهای فلزی I شکل، دیوار برشی فولادی و ورق فلزی دور ستون کامپوزیت از shell 181 و برای بتن ستون کامپوزیت از المان solid45 استفاده شده است. جزء Solid45 برای مدلسازی جامدات استفاده می شود. جزء بوسیله هشت گره تعریف می شود و دارای سه درجه آزادی در هر گره می باشد که عبارتند از: انتقال در جهت های x, y, z و این جزء قابلیت مدلسازی خواص غیر خطی مواد، خزش، تورم، سخت شوندگی تنش، تغییر مکانها و کرنشهای بزرگ را دارا می باشد. المان Shell 181 مناسب برای آنالیز سازه ای صفحه با ضخامت متوسط می باشد، این المان چهار گره ای با شش درجه آزادی در هر گره می باشد. انتقال ها در جهات x, y, z و دورانها حول محورهای x, y, z می باشند. المان Shell 181 مناسب برای کاربردهای تحلیل خطی و غیر خطی، دورانهای بزرگ و یا کرنشهای غیرخطی بزرگ می باشد. تغییر در ضخامت صفحه در آنالیز غیرخطی لحاظ می شود. این المان امکان مدل سازی به وسیله پوسته کامپوزیت لایه لایه و یا سازه های فشرده را فراهم می کند. مقاومت مشخصه بتن، f'_c ،

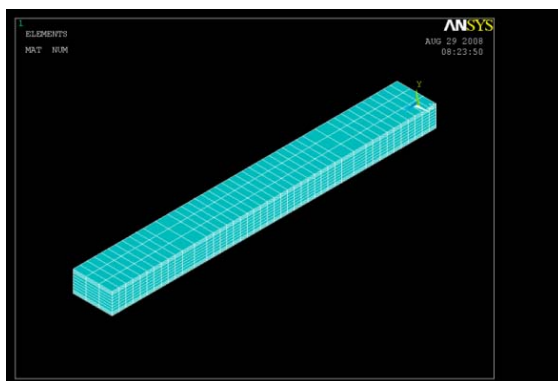
در قسمت بررسی صحت مدل اجزای محدود دیوار برشی فولادی مرکب $f'_c = 21 \text{ MPa}$ در نظر گرفته شده است. در مراحل بعد با تغییر f'_c از ۱۵MPa تا ۴۰MPa تاثیر مقاومت بتن بر رفتار سازه مورد بررسی قرار گرفت. در مورد المانهای فولادی در تمامی اجزاء سیستم فوق از خواص غیر خطی دینامیکی استفاده شده است. خواص مصالح دیوار برشی فولادی منطبق برخواص مصالح بکار رفته در تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده توسط آستانه می باشد [۹].

۴-۳- هندسه اجزاء سازه و مش بندی

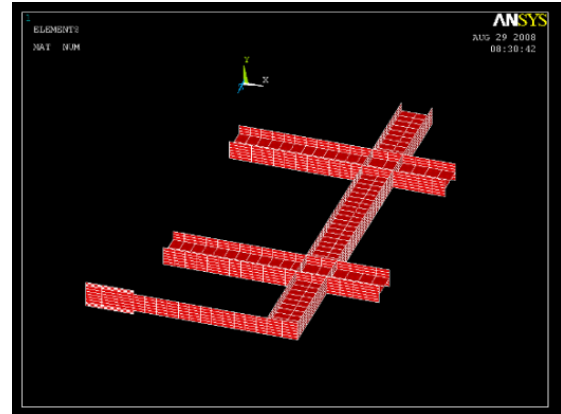
شکلهای ۴ تا ۸ نشان دهنده مش بندی مدل می باشد. با تنظیمات خاص در برنامه ANSYS تمام گره های بالای دیوار در تمام جهات ممکن با یکدیگر تغییر مکان برابر خواهند داشت و به صورت صلب عمل خواهند نمود بطوریکه مبین تیر صلب بارگذاری در نمونه آزمایشگاهی خواهد بود. شکل ۹ نشان دهنده شرایط مرزی در این مدل می باشد.



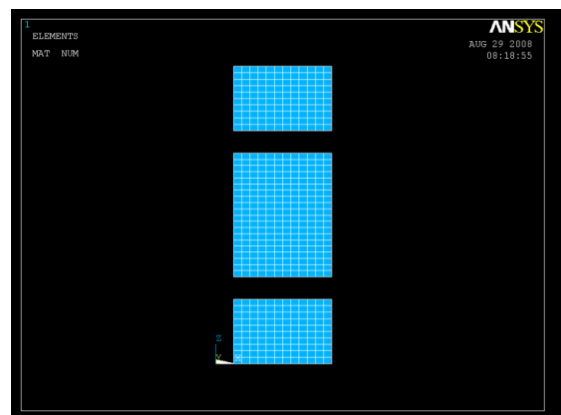
شکل (۴): مش بندی کلی دیوار برشی فولادی مرکب



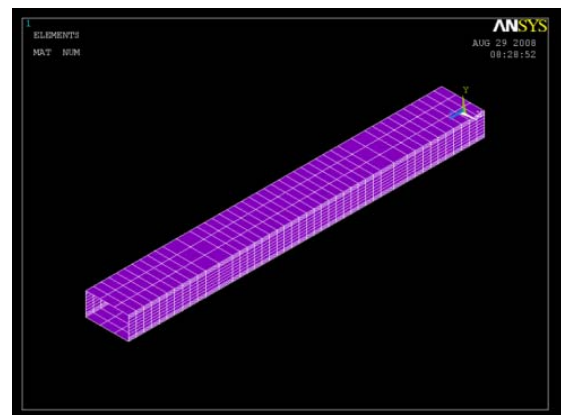
شکل (۵): مش بندی بتن در دیوار برشی کامپوزیت



شکل (۶): مش بندی تیر و ستون فلزی I شکل



شکل (۷): مش بندی دیوار برشی فولادی



شکل (۸): مش بندی ورق در ستون کامپوزیت

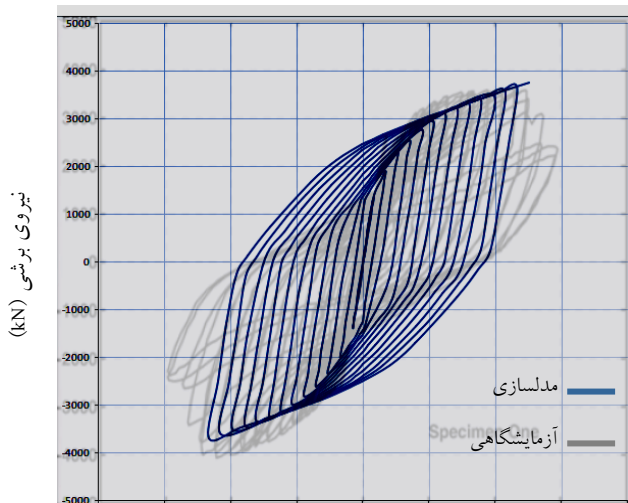
۵- صحت مدل سازی

صحت مدل سازی از مقایسه منحنی هیستریزس بدست آمده از مدل ANSYS با منحنی هیستریزس آزمایش دیوار برشی فولادی مرکب و همچنین تنش های وان میسر به دست آمده از مدل ANSYS و درک رفتاری از این مدل و مقایسه

آن با رفتار واقعی نمونه آزمایشگاهی که توسط آستانه [۹] انجام گردیده است مورد ارزیابی و اثبات شده است.

۵-۱- مقایسه منحنی های هیستریزس

شکل ۱۰ مقایسه منحنی هیستریزس نمونه آزمایشگاهی و مدل سازی شده را نشان می دهد. نیروی برش (kN)



تغییر مکان نسبی طبقه دوم

شکل (۱۰): مقایسه منحنی هیستریزس نمونه آزمایشگاهی و مدل سازی شده

همان گونه که در شکل ۱۰ مشاهده می شود حلقه های منحنی هیستریزس در دو حالت مدل سازی و آزمایشگاهی بسیار به هم شباهت داشته و از نوع رفتار برشی با حلقه های رفتاری کاملاً باز و با سطح زیر منحنی قابل توجه می باشد. با توجه به تطابق خوب منحنی های نمونه مدل سازی شده با نمونه آزمایشگاهی مقدار انرژی مستهلک شده مشابه نمونه آزمایشگاهی می باشد. از طرفی حداکثر ظرفیت برشی نمونه کامپیوتری تطابق خوبی را با نمونه آزمایشگاهی نشان می دهد. مقدار ضریب شکل پذیر محاسبه شده حدود $\mu_L = 7/35$ می باشد که با آنچه توسط آستانه ($R = 8$) ارائه شده است [۲]، تطابق خوبی را دارا می باشد. با توجه به مطالب فوق الذکر می توان به دقت بالای نمونه مدل سازی شده پی برد و صحت مدل را تأیید نمود.



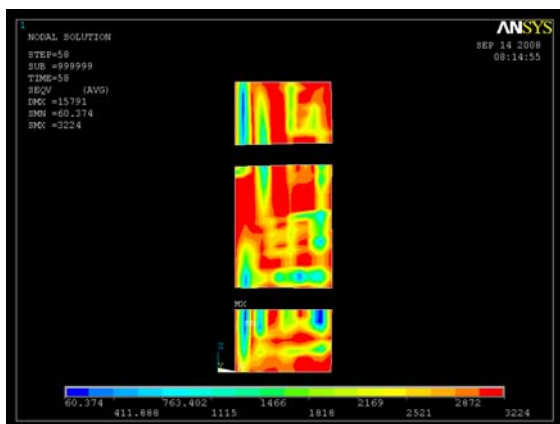
۲-۵- مکانیزم های تسلیم اجزاء

عکس نمونه های آزمایشگاهی و توزیع تنش های وان میسر در پانل دیوار برشی در لحظه شکل گیری میدان تنش قطری در شکل های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب ارائه شده اند. همانطور که مشاهده می شود تسلیم میدان کشش در جهت قطر پانل شکل گرفته است که مطابق با نمونه آزمایشگاهی (شکل ۱۱) می باشد. توزیع تنش های وان میسر بعد از کمانش و در لحظه گسیختگی در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود شکل توزیع تنش ها تطابق خوبی با عکس نمونه های آزمایشگاهی (شکل ۱۱) بعد از آزمایش دارد. توزیع تنش ها در اعضا تحمل کننده بارهای غیرثقلی از قبیل تیرها و ستونها در شکل های ۱۴ و

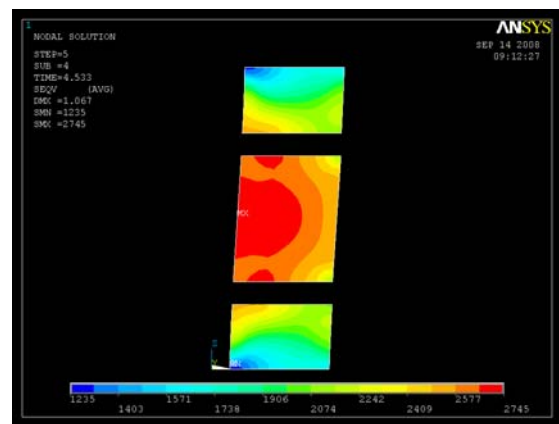
۱۵ در لحظه تسلیم و گسیختگی ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می شود، نواحی تسلیم قابل توجهی شبیه نمونه های آزمایشگاهی در این اعضا ایجاد شده است که مبین توانمندی سیستم در استهلاک انرژی در طول زلزله می باشد. تیرهای رابط مفاصل پلاستیکی قابل توجهی را در محل اتصالات به ستونها ایجاد نموده اند که منطبق بر نمونه های آزمایشگاهی می باشد. بنابراین با توجه به توضیح و تطابق های ارائه شده برای نمونه های آزمایشگاهی و تحلیلی دیده می شود که مدل کامپیوتری دارای دقت بالایی بوده و صحت مدلسازی با مقایسه با نتایج آزمایشگاهی تأیید می گردد.



شکل (۱۱): عکس نمونه آزمایشگاهی در لحظه تسلیم و شکل گیری میدان کشش و همچنین بعد از آزمایش

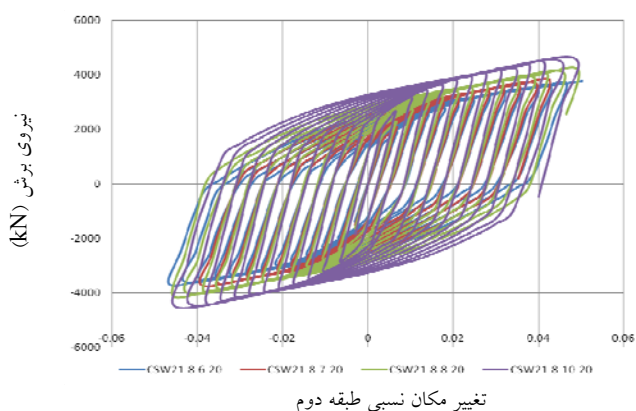


شکل (۱۳) توزیع تنش های وان میسر در پانل دیوار برشی بعد از کمانش و در لحظه گسیختگی

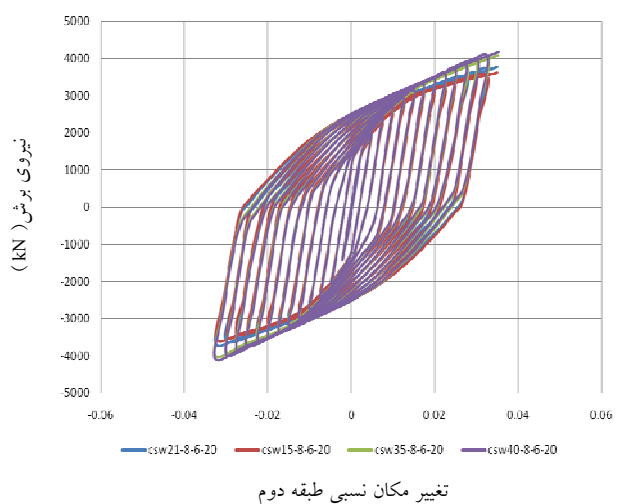


شکل (۱۲) توزیع تنش های وان میسر در پانل دیوار برشی در لحظه شکل گیری میدان تنش قطری

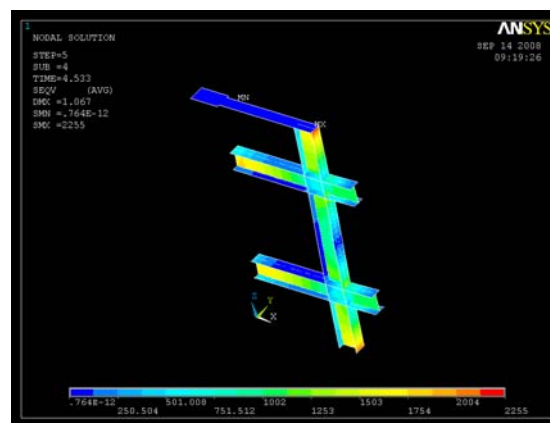
منحنی‌های پاسخ هیستریزس مدل‌های با ضخامت دیوار برشی فولادی برای ضخامت‌های ۶، ۷، ۸ و ۱۰ میلیمتر در شکل ۱۶ ارائه شده است. منحنی‌های پاسخ هیستریزس مدل‌های با مقاومت مشخصه بتن‌های ۱۵MPa تا ۴۰MPa در شکل ۱۷ با هم مقایسه شده‌اند. منحنی‌های پاسخ هیستریزس مدل‌های با ضخامت‌های ۶، ۸، ۱۰، ۱۲ میلیمتر ورق دور ستون کامپوزیت در شکل ۱۸ با هم مقایسه شده‌اند. منحنی‌های پاسخ هیستریزس مدل‌های با ضخامت‌های ۱۵ mm تا ۳۰ mm برای بال تیر و ستون I شکل در شکل ۱۹ دیده می‌شود.



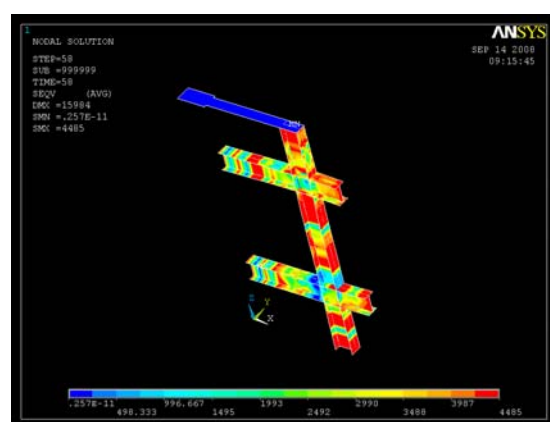
شکل (۱۶): مقایسه منحنی‌های پاسخ هیستریزس مدل‌های با ضخامت مختلف ورق دیوار برشی فولادی



شکل (۱۷): مقایسه منحنی‌های پاسخ هیستریزس مدل‌های با مقاومت مشخصه بتن متفاوت



شکل (۱۴): توزیع تنش‌های وان میسر در لحظه شکل‌گیری میدان تنش قطری در تیرها و ستونهای I شکل



شکل (۱۵): توزیع تنش‌های وان میسر بعد از کمانش و در لحظه گسیختگی در تیرها و ستونهای I شکل

۶- آنالیز مدلها و نتایج

مدلهای کامپیوتری به صورت $CSWM - T_c - T_w - T_{bc}$ نامگذاری شده‌اند که CSW بیانگر دیوار برشی مرکب، M بیانگر مقاومت بتن استفاده شده در مدل است (۱۵ معرف بتن با مقاومت مشخصه ۱۵ MPa، ۲۱ معرف بتن با مقاومت مشخصه ۲۱ MPa و بهمین ترتیب برای ۳۵، ۴۰) حرف T_c ضخامت ورق دور ستون کامپوزیت که برابر ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ میلیمتر می‌باشد را بیان می‌کند. T_w ضخامت ورق فولادی دیوار برشی که مقادیر ۶، ۷، ۸ و ۱۰ میلیمتر را دارا می‌باشد و T_{bc} ضخامت بال تیر و ستونهای I شکل می‌باشد که مقادیر ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ میلیمتر انتخاب گردیده است.



۷- مقایسه و تحلیل نتایج

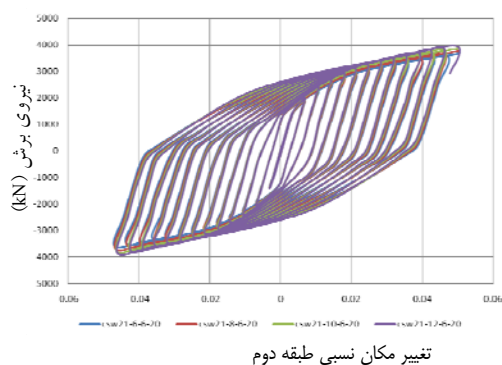
در این بخش با تغییر پارامترهای اصلی موثر بر دیوار برشی فولادی کامپوزیت به بررسی رفتار مدل‌های فوق و مقایسه آنها با یکدیگر پرداخته شده است

۷-۱- تغییرات در مقاومت مشخصه بتن f'_c

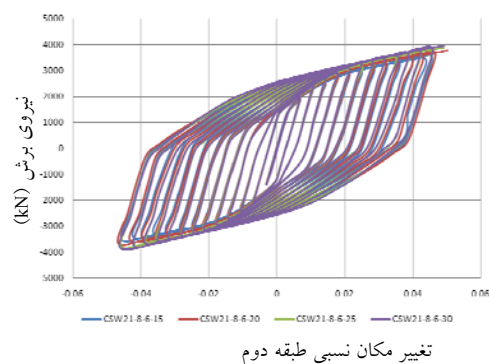
منحنی‌های پاسخ هیستریزس مدل‌های با مقاومت مشخصه بتن‌های ۱۵ MPa تا ۴۰ MPa در شکل ۱۷ با هم مقایسه شده‌اند. جذب و استهلاک انرژی سیستم با افزایش مقاومت مشخصه بتن افزایش می‌یابد. با افزایش مقاومت مشخصه بتن از ۱۵ MPa به ۲۱ MPa حد تسلیم نمونه افزایش یافته ولی بعدازآن ثابت باقی می‌ماند. افزایش مقاومت مشخصه بتن تاثیری چندانی بر تغییر مکان نسبی نهایی سازه ندارد. زیرا تغییر مکانهای نهائی، بیشتر وابسته به گسترش نواحی تسلیم در اعضاء فولادی سیستم فوق می‌باشد که در سیکل‌های آخر مستقل از بتن ستون مرکب عمل می‌کند

شکل ۲۰ منحنی‌های استهلاک انرژی تجمعی با شکل پذیری سازه برای مقاومت مشخصه بتن ۱۵، ۲۱، ۳۵ و ۴۰ MPa را نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان دریافت که دریک شکل پذیری ثابت با افزایش مقاومت مشخصه بتن انرژی مستهلک شده توسط سیستم افزایش می‌یابد. علت این امر را می‌توان اینگونه بیان نمود که با افزایش مقاومت بتن سختی ستون کامپوزیت زیاد شده و با توجه به شکل‌پذیری بالای سیستم فوق نواحی بیشتری در اعضاء دیوار برشی مرکب تسلیم می‌شود. افزایش نواحی تسلیم و همچنین افزایش گسترش ناحیه پلاستیک در ورق دیوار برشی و تیر رابط فولادی قابل توجه می‌باشد. افزایش مقاومت مشخصه بتن تاثیر قابل توجهی در مقدار انرژی مستهلک شده سیستم فوق دارد.

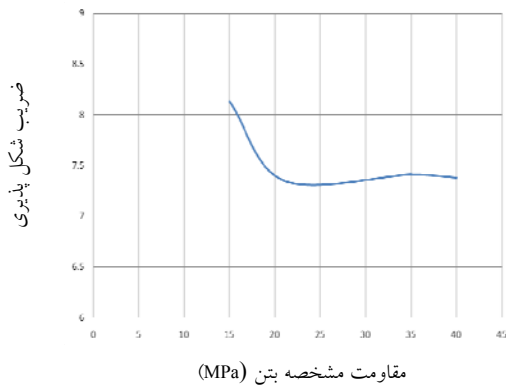
شکل عمومی حلقه‌های منحنی‌های هیستریزس دوکی شکل‌اند که نشان‌دهنده قابلیت استهلاک انرژی سیستم فوق می‌باشد. مشابه بودن شکل عمومی پاسخ هیستریزس برای تمامی ضخامت‌های دیوار برشی نشان می‌دهد که مکانیزم رفتاری سیستم فوق با تغییر در ضخامت ورق فولادی دیوار تغییر نمی‌کند. لذا مکانیزم‌های استهلاک انرژی بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی قابل تعمیم برای ضخامت‌های دیگر نیز می‌باشد. با افزایش ضخامت دیوار برشی فولادی سطح زیر منحنی هیستریزس افزایش یابد. در تمامی سیکل‌های پاسخ با افزایش ضخامت دیوار برشی فولادی مقاومت نهایی افزایش می‌یابد. در تمامی منحنی‌ها در سیکل‌های اول رفتار الاستیک دیده می‌شود.



شکل (۱۸): منحنی‌های پاسخ هیستریزس مدل‌های با ضخامت‌های مختلف ورق دور ستون کامپوزیت



شکل (۱۹): مقایسه منحنی‌های پاسخ هیستریزس مدل‌های با ضخامت‌های مختلف تیر و ستون I شکل

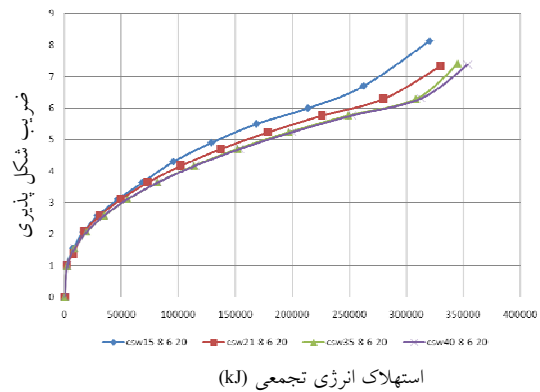


شکل (۲۱): منحنی تغییرات ضریب شکل پذیری دیواربرشی فولادی کامپوزیت در مقابل مقاومت مشخصه بتن

مقایسه شده‌اند. مشابه بودن منحنی‌های هیستریزس و افزایش جذب و استهلاک انرژی با افزایش ضخامت ورق دور ستون کامپوزیت برای این سیستم مشهود است. حد الاستیک تقریباً ثابت بوده و افزایش ضخامت ورق دورستون کامپوزیت تاثیری بر آن ندارد. همچنین تغییر مکان نسبی نهایی سازه در اثر افزایش ضخامت ورق دور ستون کامپوزیت تغییر چندانی نمی‌کند.

مقایسه منحنی‌های استهلاک انرژی تجمعی دیواربرشی فولادی کامپوزیت برای ضخامت‌های ورق دورستون کامپوزیت ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ میلیمتر در شکل ۲۲ ارائه شده است. با توجه به شکل می‌توان دریافت که در یک شکل پذیری ثابت با افزایش ضخامت ورق دور ستون کامپوزیت جذب انرژی مستهلک شده توسط سازه بیشتر می‌شود. می‌توان دلیل این امر را اینگونه توجیه کرد، با افزایش ضخامت ورق دور ستون کامپوزیت سختی اتصال تیر طبقات به ستون زیاد شده و لذا استهلاک انرژی در نقاط دیگر شکل خواهد گرفت. با افزایش ضخامت ورق دورستون کامپوزیت مقدار کل انرژی مستهلک شده افزایش می‌یابد.

منحنی تغییرات ضریب شکل پذیری دیواربرشی فولادی کامپوزیت در مقابل ضخامت ورق دورستون کامپوزیت در شکل ۲۳ ارائه شده است. با توجه به شکل می‌توان دریافت



شکل (۲۰): منحنی های استهلاک انرژی تجمعی دیواربرشی فولادی کامپوزیت با شکل پذیری سازه برای مقاومت ها مشخصه بتن

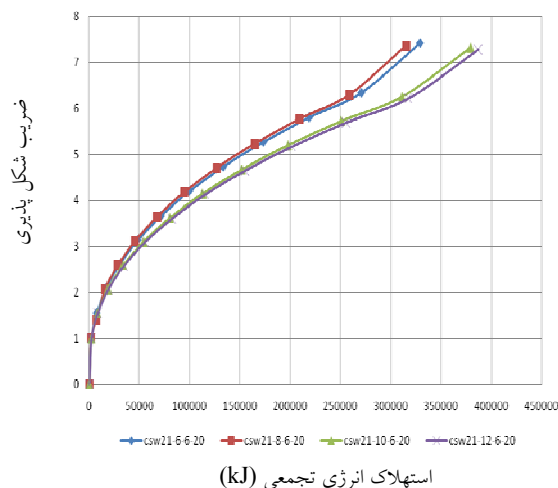
شکل ۲۱ منحنی تغییرات ضریب شکل پذیری دیواربرشی فولادی کامپوزیت در مقابل مقاومت مشخصه بتن MPa تا ۴۰ را نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان دریافت که با افزایش مقاومت مشخصه بتن از ۱۵MPa تا ۲۱MPa شکل پذیری سازه به طور ناگهانی از ۸/۱۳ به ۷/۳۵ کاهش می‌یابد. با افزایش مقاومت مشخصه بتن از ۲۱MPa تا ۴۰MPa شکل پذیری سازه تغییر چندانی ندارد. علت این است که، مقداری از شکل پذیری کل سیستم در ناحیه اتصال تیر به ستون کامپوزیت که اجازه تغییر شکل ستون کامپوزیت را دارد فراهم می‌شود، بطوریکه با افزایش مقاومت بتن سهم شکل پذیری ناشی از دوران اتصال تیر به ستون کامپوزیت کاهش داده می‌شود، این کاهش در ضریب شکل پذیری کل سیستم به حدود ۷/۴ رسیده و برای بتن‌های با مقاومت ۳۰ MPa به بالا ثابت می‌ماند. منحنی فوق نشان می‌دهد که تغییرات مقاومت بتن بطور کلی تاثیر قابل توجهی در شکل پذیری داشته بطوریکه افزایش مقاومت ضریب شکل پذیری را تا حدود ۱۱٪ کاهش می‌دهد.

۷-۲- تغییرات در ضخامت ورق دور ستون کامپوزیت

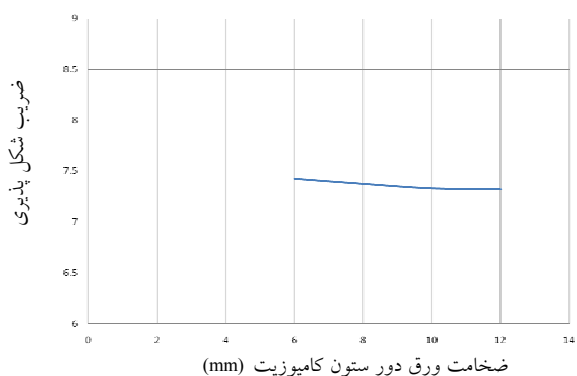
منحنی های پاسخ هیستریزس مدل های با ضخامت های متفاوت ورق دور ستون کامپوزیت در شکل ۱۸ با هم



که با افزایش ضخامت ورق دور ستون کامپوزیت از ۶ به ۱۲ میلیمتر تنها ۱/۴ درصد از شکل پذیری سازه کم می شود که این مقدار بسیار ناچیز می باشد. علت این امر این است که سهم شکل پذیری سازه بیشتر متأثر از تسلیم ورق فولادی دیوار برشی و تسلیم تیر رابط می باشد، بنابراین همین طور که انتظار می رود تغییرات در ضخامت ورق دور ستون کامپوزیت تاثیر زیادی بر شکل پذیری سازه ندارد. (فقط ۱/۴٪)



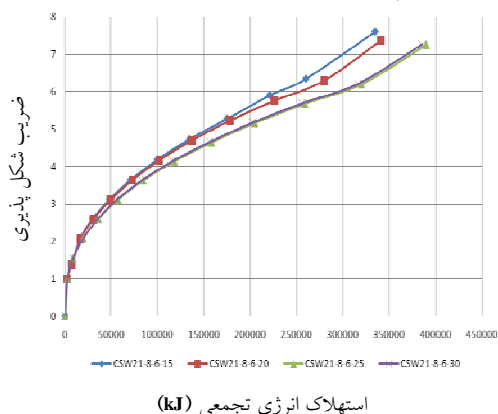
شکل (۲۲): منحنی های استهلاک انرژی دیوار برشی فولادی کامپوزیت برای ضخامت های مختلف ورق دور ستون کامپوزیت



شکل (۲۳): منحنی شکل پذیری برای ضخامت های متفاوت ورق دور ستون کامپوزیت

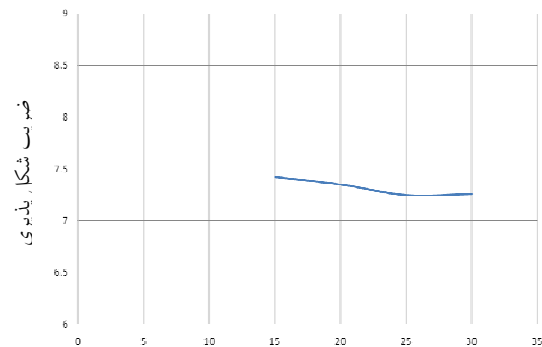
۷-۳- تغییرات در ضخامت بال تیر و ستون I شکل منحنی های پاسخ هیستریزس مدل های با ضخامت های ۱۵mm تا ۳۰mm برای بال تیر و ستون I شکل در شکل ۱۹ ارائه شده است. با افزایش ضخامت بال تیر و ستون I شکل می توان دریافت که سطح زیر منحنی هیستریزس که معرف مقدار استهلاک انرژی تجمعی توسط دیوار برشی فولادی کامپوزیت می باشد، افزایش می یابد. در تمامی سیکل های پاسخ سیستم فوق، با افزایش ضخامت بال تیر و ستون I شکل مقاومت نهایی افزایش می یابد. افزایش ضخامت بال تیر و ستون I شکل تاثیری چندانی بر حد الاستیک نمونه ندارد

شکل ۲۴ منحنی های استهلاک انرژی تجمعی با ضریب شکل پذیری نمونه ها برای ضخامت های بال تیر و ستون I شکل رانشان می دهد. با توجه به شکل می توان دریافت که در یک جذب و استهلاک انرژی مشخصه با افزایش ضخامت بال تیر و ستون فولادی از ۱۵mm به ۲۰mm ضریب شکل پذیری کاهش می یابد، ولی در ضخامت های بال تیر و ستون فولادی بیشتر از ۲۵mm این مقدار ثابت می ماند. افزایش ضخامت تیر باعث افزایش سختی نمونه شده، و افزایش سختی باعث میشود که نواحی بیشتری در اعضاء دیوار برشی فولادی مخصوصا در ورق فولادی تسلیم گردد.



شکل (۲۴): منحنی های استهلاک انرژی تجمعی با شکل پذیری نمونه ها برای ضخامت های مختلف بال تیر و ستون I شکل

منحنی شکل پذیری دیواربرشی فولادی کامپوزیت برای ضخامت های بال تیر و ستون I شکل متفاوت در شکل ۲۵ نشان داده شده است. با توجه به شکل ملاحظه می شود که با افزایش ضخامت بال تیر و ستون I شکل از ۱۵mm به ۳۰mm تنها ۲ درصد از شکل پذیری سازه کم می شود که این مقدار بسیار ناچیز می باشد. علت این امر این است که سهم شکل پذیری سازه بیشتر متأثر از تسلیم ورق فولادی دیوار برشی و تسلیم تیر رابط می باشد، بنابراین همین طور که انتظار می رود تغییرات در ضخامت بال تیر و ستون I شکل تاثیر زیادی بر شکل پذیری سازه ندارد. (فقط ۰.۲٪)



ضخامت بال تیر و ستون I شکل (mm)

شکل (۲۵): منحنی شکل پذیری دیواربرشی فولادی کامپوزیت برای ضخامت های مختلف تیر و ستون I شکل

۴-۷- تغییرات در ضخامت دیوار برشی فولادی

منحنی های پاسخ هیستریزس مدل های با ضخامت دیوار برشی فولادی برای ضخامت های ۶، ۷، ۸ و ۱۰ میلیمتر در شکل ۲۰ نمایش داده شده است. شکل عمومی حلقه های منحنی های هیستریزس دوکی شکل اند که نشان دهنده قابلیت استهلاک انرژی سیستم فوق می باشد. مشابه بودن شکل عمومی پاسخ هیستریزس برای تمامی ضخامت های دیوار برشی نشان می دهد که مکانیزم رفتاری سیستم فوق با تغییر در ضخامت ورق فولادی دیوار تغییر نمی کند. لذا مکانیزم های استهلاک انرژی بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی قابل تعمیم برای ضخامت های دیگر نیز می باشد. با توجه به شکل می توان دریافت با افزایش ضخامت دیوار برشی فولادی سطح زیر منحنی هیستریزس افزایش

می یابد. در تمامی سیکل های پاسخ با افزایش ضخامت دیوار برشی فولادی مقاومت نهایی افزایش می یابد.

در شکل ۲۶ منحنی های استهلاک انرژی تجمعی با شکل پذیری سازه برای مدل های با ضخامت های ورق فولادی دیوار برشی ۶mm تا ۱۰mm نشان داده شده است. با توجه به شکل می توان ملاحظه نمود که در یک سطح استهلاک انرژی ثابت با افزایش ضخامت دیواربرشی فولادی از ۶mm به ۷mm شکل پذیری کاهش می یابد. در ضخامت های ۷mm و ۸mm منحنی استهلاک انرژی در مقابل شکل پذیری دیوار برشی فولادی رفتاری یکسان دارد. در صورتیکه با افزایش ضخامت دیوار برشی فولادی از ۸mm به ۱۰mm شکل پذیری به مقدار قابل توجهی مخصوصا در بالای منحنی کاهش می یابد. بیشترین تاثیر در میان پارامترهای مورد مطالعه ضخامت دیوار برشی فولادی می باشد.

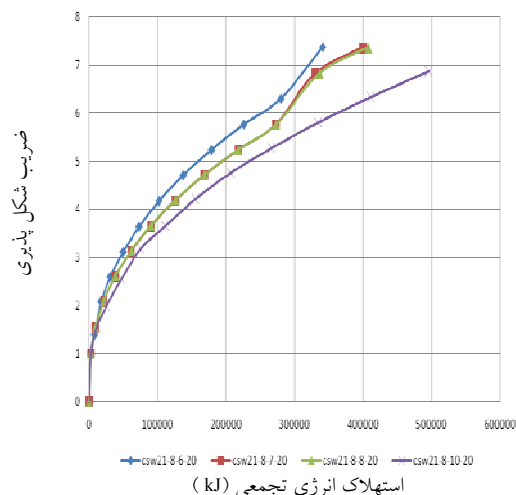
شکل ۲۷ منحنی تغییرات شکل پذیری سیستم فوق را برای ضخامت های ورق فولادی را نشان می دهد. با توجه به شکل می توان دریافت که با افزایش ضخامت دیوار برشی فولادی از ۶mm به ۸mm ضریب شکل پذیری تقریبا ثابت می ماند. در صورتی که با افزایش ضخامت از ۸mm به ۱۰mm ضریب شکل پذیری از ۷/۳۶ به ۷/۱ می رسد، که حدود ۳ درصد کاهش دارد. به دلیل افزایش ضخامت دیوار برشی فولادی سختی سازه بیشتر شده و این مساله باعث کاهش نواحی تسلیم و همچنین کاهش گسترش ناحیه پلاستیک شده که نتیجتا تغییر شکلهای سازه که بیشترین تاثیر را از کرنشهای پلاستیک صفحه فولادی می گیرند کاهش داده می شود و نتیجتا ضریب شکل پذیری سازه کاهش می یابد. این تاثیر در ضخامت بیش از ۸mm بیشتر نمایان است. با توجه به آنکه کاهش شکل پذیری با افزایش ضخامت ورق فولادی دیوار برشی قابل توجه نمی باشد. لذا در برآورد و تعیین ضخامت ورق معیارهای دیگر از قبیل استهلاک انرژی و افزایش مقاومت باید لحاظ گردد.



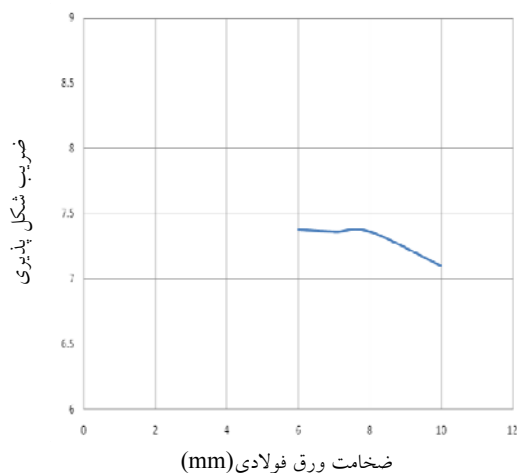
مقایسه شد. بر اساس مطالب ارائه شده خلاصه تاثیر پارامترهای اصلی در دیوار برشی فولادی کامپوزیت در جدول ۲ ارائه گردید.

به علت آنکه مقداری از شکل پذیری در ناحیه اتصال تیر به ستون کامپوزیت که اجازه تغییر شکل ستون کامپوزیت را دارد فراهم می شود بطوریکه با افزایش مقاومت بتن سهم شکل پذیری ناشی از دوران اتصال تیر به ستون کامپوزیت کاهش داده می شود، باعث کاهش ضریب شکل پذیری کل سیستم می گردد. به دلیل آنکه سهم شکل پذیری سازه بیشتر متأثر از تسلیم ورق فولادی دیوار برشی و تسلیم تیر رابط می باشد، بنابراین همین طور که انتظار می رود تغییرات در ضخامت بال تیر و ستون I شکل و ضخامت ورق دور ستون کامپوزیت تاثیر زیادی بر شکل پذیری سازه ندارد. به دلیل افزایش ضخامت دیوار برشی فولادی سختی سازه بیشتر شده و این مساله باعث کاهش نواحی تسلیم و همچنین کاهش گسترش ناحیه پلاستیک شده که نتیجتاً تغییر شکلهای سازه که بیشترین تاثیر را از کرنشهای پلاستیک صفحه فولادی می گیرند کاهش داده می شود و نتیجتاً ضریب شکل پذیری سازه کاهش می یابد. با توجه به اینکه بیشتر مکانیزم استهلاک انرژی در ورق فولادی دیوار برشی به علت شکل گرفتن مکانیزم میدان کشش و همچنین گسترش مفصل پلاستیک در تیرهای رابط رخ می دهد. افزایش مقاومت بتن تنها در ایجاد مفصل و گسترش آن در اتصال تیر به ستون مرکب نقش عمده ای دارد که این مقدار انرژی مستهلک شده به طور کلی در مقایسه با مکانیزمهای ذکر شده خیلی قابل توجه نیست. نتیجه اینکه افزایش مقاومت بتن جهت بهبود رفتار لرزه ای تاثیر مثبت چندانی نداشته است و فقط چنانچه نیاز مقاومتی جهت بارهای ثقلی باشد توصیه می شود.

میانگین، خطای استاندارد و پراکندگی ضریب شکل پذیری محاسبه شده برای تمامی نمونه ها به ترتیب برابر $\bar{\mu} = 7/39$ ، $S_{\mu} = 0/2$ ، $V_{\mu} = 0/3$ می باشد. با توجه به اینکه مقدار خطای استاندارد و پراکندگی نشانه ای از پراکندگی نمونه ها است و این مقادیر کوچک می باشد لذا



شکل (۲۶): منحنی های استهلاک انرژی تجمعی با شکل پذیری سازه برای مدل های با ضخامت های مختلف ورق دیوار برشی فولادی



شکل (۲۷): منحنی ضریب شکل پذیری دیوار برشی فولادی کامپوزیت مدل های با ضخامت های مختلف دیوار برشی فولادی

جمع بندی

با توجه به تغییر پارامترهای اصلی مشتمل بر ضخامت دیوار برشی فولادی، ضخامت ورق دور ستون کامپوزیت، ضخامت بال تیر و ستون I شکل و مقاومت مشخصه بتن پرکننده ستون کامپوزیت به بررسی و مقایسه رفتار مدلها با یکدیگر و همچنین تحلیل نتایج پرداخته شده است. منحنی های هیستریزس، استهلاک انرژی تجمعی و ضریب شکل پذیری در مورد هر یک از پارامترهای اصلی با هم

مقدار میانگین یک مبین خوب از متوسط نمونه ها برای توزیع تابع احتمال می باشد. با توجه به پارامترهای جامعه آماری فوق ضریب شکل پذیری با احتمال ۵٪ (اندیس

ایمنی ۳/۵) برای سیستم دیوار برشی فوق معادل $\mu_{8\%} = 7/1$ محاسبه می شود.

جدول (۲): تأثیر پارامترهای اصلی دیوار برشی فولادی مرکب بر عملکرد (مقاومت نهایی، ضریب شکل پذیری و استهلاک انرژی)

عملکرد	تغییرات پارامترها	مقاومت دینامیکی	ضریب شکل پذیری	استهلاک انرژی
	افزایش $f'c$ (۱۵MPa تا ۴۰MPa)	٪۱۳	٪-۹	٪۱۰
	افزایش ضخامت ورق ستون کامپوزیت (۶mm تا ۱۲mm)	٪۷	٪-۱/۴	٪۱۷
	افزایش ضخامت بال تیرها و ستونهای I (۱۵mm تا ۳۰ mm)	٪۱۸	٪-۳/۶	٪۱۸
	افزایش ضخامت دیوار برشی (۶ mm تا ۱۰mm)	٪۱۹	٪-۳	٪۳۱

نتیجه گیری

با توجه به آنالیزهای دینامیکی غیر خطی تاریخچه زمانی و منحنی های پاسخ و با اهمیت به ظرفیت شکل پذیری سیستم فوق نتایج زیر به همراه روشهای بهبود در طراحی ارائه شده است.

۱- سیستم لرزه ای فوق با تمامی جزئیات مدلسازی گردید، تطابق نتایج مدل کامپیوتری با نمونه آزمایشگاهی نشان می دهد که مدلسازی از صحت و دقت بالایی برخوردار می باشد.

۲- در تمامی منحنی های هیستریزس نتایج زیر حاصل شد؛ الف) با افزایش تعداد سیکلها سختی سازه کاهش می یابد که مبین گسترش نواحی تسلیم در ورق دیوار و تیرهای رابط است.

ب) منحنی ها از نوع پاسخ برشی با شیب باربرداری نسبت قائم بوده که توانمندی نمونه را در پاسخ به بارهای لرزه ای و استهلاک انرژی نشان می دهد.

ج) نمونه دارای خاصیت جذب و استهلاک بالا می باشد که سطح بالای زیر منحنی گویای ادعای فوق می باشد.

۳- اثر مقاومت مشخصه بتن داخل ستون کامپوزیت در مقاومت دینامیکی نمونه ها با مقاومت بتن بالاتر کم می باشد، به طوریکه مقاومت دینامیکی نمونه با مقاومت

مشخصه ۱۵MPa حدود ۱۱٪ کمتر از مقاومت نهائی نمونه با مقاومت مشخصه ۴۰MPa می باشد. و مقاومت نهائی نمونه با مقاومت مشخصه ۳۵ MPa تنها ۲٪ کمتر از مقاومت نهائی نمونه با مقاومت مشخصه ۴۰MPa می باشد، بنابراین بنظر می رسد که افزایش مقاومت بتن به مقادیر بیشتر از مقاومت مشخصه ۳۵ MPa تاثیری قابل توجهی در افزایش مقاومت لرزه ای نهائی نمونه ندارد.

۴- با افزایش مقاومت مشخصه بتن از ۱۵ MPa تا ۲۱MPa ضریب شکل پذیری سازه به طور ناگهانی از ۸/۱۳ به ۷/۳۵ کاهش می یابد. در صورتیکه با افزایش مقاومت مشخصه بتن از ۲۱ MPa تا ۴۰ MPa شکل پذیری سازه تغییر چندانی ندارد. بنابراین افزایش مقاومت بتن به بیش از ۲۰ MPa بهبودی در ظرفیت شکل پذیری سازه نخواهد داشت.

۵- مقاومت نهائی نمونه با ضخامت حداقل ورق دور ستون کامپوزیت (۶mm) حدود ۷٪ کمتر از مقاومت نهائی نمونه با ضخامت ورق دور ستون کامپوزیت ۱۲mm می باشد که ناچیز است. بنابراین اثر ضخامت ورق دور ستون کامپوزیت در مقاومت دینامیکی نهائی سیستم قابل توجه نمی باشد.



مقاومت نهائی نمونه با ضخامت دیوار برشی فولادی ۱۰mm می باشد. می توان گفت بیشترین تاثیر در مقاومت نهائی نمونه در اثر تغییر در ضخامت دیوار برشی فولادی می باشد که ۱۹٪ افزایش دارد.

۱- میانگین، خطای استاندارد و پراکندگی ضریب شکل پذیری برای تمامی نمونه ها به ترتیب $\bar{\mu} = 7/39$ ، $S_{\mu} = 0/2$ ، $V_{\mu} = 0/03$ بدست می آید، بطوریکه ضریب شکل پذیری با احتمال ۵درصد (اندیس ایمنی ۳/۵) که جهت طراحی استفاده می شود معادل $\mu = 7$ محاسبه و توصیه می گردد.

مراجع

۱. تالیف، صبور قمی، سعید «سیستم های مقاوم در برابر بارهای جانبی، مقدمه ای بر دیوارهای برشی فولادی» انتشارات انگیزه، سال ۱۳۸۰
2. Astaneh-Asl. A (2001). "Seismic Behavior and Design of Steel Shear Walls". Steel TIP~ Report. Structural Steel Educational Council, Moraga. California July.
3. Tinier, P. A. and Kulac, G.I., (1983) "Experimental Study of Steel Plate Shear Walls", Structural Engineering Report No. 114, University of Alberta, Canada,
4. Takanashi, Y., Takemoto, T., and Tagaki, M. (1973), "Experimental Study on Thin Steel Shear Walls and Particular Bracing under Alternative Horizontal Load" Preliminary Report, IABSE, Symp. On Resistance and Ultimate Deformability of structures Acted on by Well-defined Repeated Loads, Lisbon. Portugal.
5. Sabouri-Ghomi. S. and Roberts. T.M. (1992). "Nonlinear Dynamic Analysis of Steel Plate Shear Walls Including Shear and Bending Deformations", Engineering Structures, 14, no. 5. PP. 309-317.
6. Elgaaly, M. and Caccese, V., (1993) "Post-buckling Behavior of Steel-Plate Shear Walls under Cyclic Loads", 1. of Str. Engrg. ASCE. 119, n. 2. PP. 588-605.
7. Caccese. V. and Elgaaly. M., (1993) "Experimental Study of Thin Steel-Plate Shear Walls Under Cyclic Load", 1. of Str. Engrg., ASCE. 119. N. 2. PP. 573-587
۸. آئین نامه : دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمانهای موجود ایران
9. Qiuhong zhao and Abolhassan Astaneh-ASL. (2007) " seismic Behavior of steel shear wall systems and Application of smart structures Technology" steel structures 7 (2007)61-67

۶- افزایش ضخامت ورق دور ستون کامپوزیت (از ۶mm به ۱۲mm) تنها کاهش ۱/۴ درصدی در ضریب شکل پذیری ولی افزایش ۱۷ درصدی در انرژی مستهلک شده توسط سیستم دیوار برشی مرکب دارد. بنابراین افزایش ضخامت ورق ستون فوق منجر به بهبود رفتار لرزه ای می گردد.

۷- اثر ضخامت بال تیرها و ستونهای I شکل در مقاومت نهائی نمونه ها بدین صورت است که مقاومت نهائی نمونه با ضخامت بال تیرها و ستونهای I شکل ۱۵mm حدود ۱۵٪ کمتر از مقاومت نهائی نمونه با ضخامت بال تیرها و ستونهای I شکل ۲۰mm می باشد و مقاومت نهائی نمونه با ضخامت بال تیرها و ستونهای I شکل ۲۰mm تنها ۳٪ کمتر از مقاومت نهائی نمونه با ضخامت بال تیرها و ستونهای I شکل ۳۰mm می باشد، بنابراین، افزایش ضخامت بال تیرها و ستونهای I شکل به مقادیر بیشتر از ۲۰mm تاثیری قابل توجهی در افزایش مقاومت نهائی نمونه ندارد.

۸- با افزایش ضخامت بال تیر و ستون I شکل از ۱۵ mm به ۳۰ mm تنها ۳/۶ درصد از ضریب شکل پذیری سازه کم می شود که این مقدار بسیار ناچیز می باشد. در صورتیکه افزایش ضخامت فوق به ۲۵ mm، افزایش ۱۸ درصدی در استهلاک انرژی داشته و با افزایش بیش از ۲۵ mm مقدار استهلاک انرژی ثابت می ماند بنابراین افزایش ضخامت فوق به بیش از ۲۵ mm مزیتی نداشته و توصیه نمی گردد.

۹- با افزایش ضخامت دیوار برشی فولادی از ۶mm به ۸mm ضریب شکل پذیری ثابت می ماند. در صورتی که با افزایش ضخامت از ۸mm به ۱۰mm حدود ۳درصد کاهش دارد. در صورتیکه افزایش ضخامت منجر به افزایش ۳۱ درصدی استهلاک انرژی شده است بنابراین بهترین تاثیر در بهبود ظرفیت شکل پذیری با افزایش ضخامت ورق فولادی حاصل می گردد.

۱۰- اثر ضخامت دیوار برشی فولادی در مقاومت دینامیکی نمونه ها بدین صورت می باشد که مقاومت نهائی نمونه با ضخامت دیوار برشی فولادی ۶ mm حدود ۱۹٪ کمتر از

