



بررسی تأثیر الیاف پلیمری کربن بر رفتار دیوار برشی فولادی PRF

آسیه سلیمی قراجه^۱، مجتبی حسینی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ملایر، گروه عمران، ملایر، ایران. Salami.asieh@gmail.com

۲- عضو هیئت علمی دانشگاه لرستان، دکترای سازه، گروه عمران، دانشگاه لرستان. Mo_hosseini78@yahoo.com

چکیده

دیوار برشی فولادی یک سیستم کارا در برابر بارهای جانبی است که از سختی و شکل پذیری بالایی برخوردار است. پس از کمناش برشی ورق فولادی، رفتار پس کمناشی این سیستم شروع شده و قادر است بارهای بسیار بزرگی را پس از کمناش تحمل کند. این کمناش هرچند، رفتار پس کمناشی را بهبود می بخشد اما موجب افت انرژی هیسترتیک می گردد. در این مقاله تقویت دیوار با استفاده از الیاف پلیمری به عنوان یک تحقیق نو مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که الیاف پلیمری علاوه بر جلوگیری از کمناش در ناحیه الاستیک، باعث بهبود پارامترهای لرزه ای نیز می گردد. بررسی ها نشان می دهد که تأثیر الیاف پلیمری بر دیوار لاغرتر بسیار مطلوب تر است. همچنین با افزایش طول دیوار اثر الیاف مشهودتر می گردد.

کلمات کلیدی: دیوار برشی فولادی، الیاف پلیمری کربن، تحلیل غیر خطی، اجزا محدود

۱. مقدمه

با توجه به قرارگرفتن کشور ایران در کمربند زلزله خیز آلپ- هیمالیا گاهی شاهد وقوع زلزله های شدید در سطح کشور و متعاقب آن بروز خسارتهایی خواهیم بود، لذا اهمیت طراحی مقاوم سازه ها در برابر نیروهای جانبی امری حیاتی برای آینده و توسعه ایران پایدار است. مشاهده عملکرد ساختمانها در زلزله اهمیت بنیادی در تکوین علم مهندسی زلزله داشته است، اولین ضوابط طراحی لرزه ای به دنبال بازدید هیئت مهندسان ایتالیایی از ساختمانهای آسیب دیده در زلزله مخرب مسینا رچیو در سال ۱۹۰۸ شکل گرفت [۱]. با تلاش محققان و مهندسان و نیز پیشرفت علم و آمدن نرم افزارهای پیشرفته در این زمینه باعث بدست آوردن اطلاعات فراوانی در رابطه با رفتار انواع سازه ها در برابر زلزله و نیروهای جانبی شده است، و این خودبخود باعث اصلاحاتی در ضوابط لرزه ای شده است اما برای بدست آوردن نتایج واقعی بایستی نتایج علمی مورد تأیید نتایج تجربی شود تقریب فراوان در روشهای ریاضی، مدلها و نیز خواص مصالح، اتصالات و سازه ها می تواند به نتایج بی ربط و عکس منجر شود به همین دلیل برای تأیید و کالیبره کردن روابط و ضرایب باید در عمل مورد آزمایش قرار گیرند، دیوار برشی فولادی یک سیستم کارا در برابر بارهای جانبی است که از سختی و شکل پذیری بالایی برخوردار است. پس از کمناش برشی ورق فولادی، رفتار پس کمناشی این سیستم شروع شده و قادر است بارهای بسیار بزرگی را پس از کمناش تحمل کند. این کمناش هرچند، رفتار پس کمناشی را بهبود می بخشد اما موجب افت انرژی هیسترتیک می گردد. چندین روش برای جلوگیری از کمناش در ناحیه الاستیک صفحه فولادی از جمله استفاده از سخت کننده ها، پوشش بتنی و نیز پوشش الیاف پلیمری کربن استفاده می شود.



۲. رفتار مکانیکی کامپوزیتها

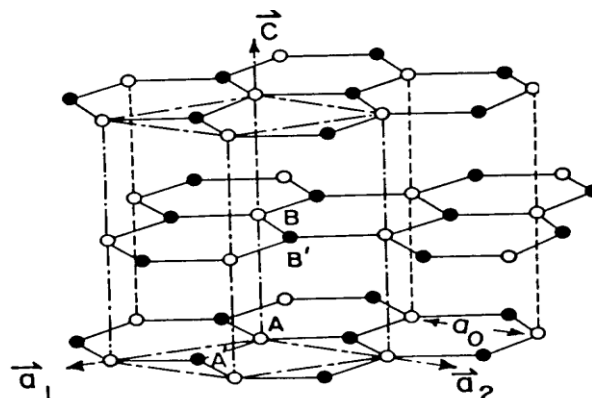
در دهه هشتاد میلادی، پژوهشگرانی برای اولین بار در اروپا و آمریکا چسبانیدن کامپوزیت ها به بتن و سقف را آزمایش کردند. نتایج مثبت آزمایشها، جامعه علمی را راغب کرد تا سایر قسمت های سازه را نیز با کامپوزیتها پوشش داده و مورد مطالعه قرار دهند. پس از آن در ژاپن دریافتند که این روش میتواند، پاسخی مناسب برای زلزله های شدیدی که آن کشور را تهدید می کند، باشد. ژاپنی ها برای اولین بار کامپوزیتها را بصورت تجاری برای تعمیر و بهسازی سازه ها در جهان مورد استفاده قرار دادند [۲]. سال ۲۰۰۳ در دانشگاه صنعتی امیر کبیر، مطالعات عددی و آزمایشگاهی بر روی دیوار برشی فولادی، نسل سوم این نوع دیوار را بصورت تقویت دیوار برشی فولادی با الیاف پلیمری معرفی نمود. [۳]

رهایبی و علیپور [۳] مطالعاتی را بر روی سیستم دیوار تقویت شده با FRP انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که که ظرفیت برشی سیستم را می توان از ۷/۵٪ تا ۲۰٪ در مقایسه با فولاد لخت افزایش داد. لایه FRP توزیع تنش در ورق فولادی را به طور قابل توجهی تغییر نداد. آسیب به الیافها در گوشه های صفحه و در جهت میدان تنش به علت تمرکز تنش و گسترش تنش کششی به قطر صفحه انتظار می رود. همچنین ناطقی و خرازی [۲] رفتار غیر خطی دیوار برشی فولادی مرکب با استفاده از الیاف شیشه پلیمر تقویت شده (GFRP)، لایه بندی به طور تحلیلی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که ظرفیت برشی نهایی و سختی برشی، دیوار برشی تقویت شده بوسیله لایه GFRP نسبت به SPSWs تقویت نشده افزایش می یابد. اگر جهت اصلی لایه بندی GFRP در جهت خط میدان تنش باشد ظرفیت برشی و سختی سیستم افزایش خواهد یافت. جهتهای اصلی لایه بندی GFRP روی صفحه پرکننده اثر ناچیز در میدان انرژی تلف شده تجمعی دارد. جدیدترین تحقیق بر روی سیستم مرکب در سال ۲۰۱۴ در دانشگاه صنعتی امیرکبیر انجام گرفت [۴]. در این تحقیق برای بررسی اثر زاویه الیاف در LYP خواص دیوار برشی فولادی به صورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. مطالعات در سه مرحله انجام شده است؛ نخست LYP جایگزین دیوار برشی فولادی معمولی شد، نتایج نشان می دهد که فولاد LYP سختی و مقاومت و شکل پذیری و جذب انرژی و ضریب اضافه مقاومت افزایش می یابد. در مرحله دوم LYP دیوار برشی فولادی LS با CFRP. CLS تقویت شده است، نتایج نشان می دهد سختی و مقاومت و جذب انرژی و ضریب اضافه مقاومت افزایش می یابد با این حال شکل پذیری کاهش می یابد. CLS تنش کمتری را به قاب مرز SS و LS انتقال می دهد. در نهایت اثر زاویه الیاف CFRP مورد مطالعه قرار گرفته است.

رفتار مکانیکی لایه های مرکب، به خصوصیات و درصد جمعی الیاف و رزین و نیز جهت الیاف بستگی دارد، بخش های مختلف یک سازه مرکب می تواند از چند لایه با جهات مختلف الیاف حاصل گردد. از نقطه نظر سازه ای رفتار تک لایه در مقیاس ماکرو مکانیک حائز اهمیت بوده و بررسی روابط سازه ای در این مقیاس کاربرد زیادی دارد. پس از انتخاب نسبت مواد تشکیل دهنده کامپوزیت در سطح میکرو مکانیک می توان به بررسی رفتار ماده در سطح ماکرو مکانیک پرداخت. در مقیاس ماکرو مکانیک شناسایی اجزا مورد بحث قرار نمی گیرد و ارتباط تنش - کرنش بوسیله ماتریس سختی مشخص می شود که اجزا تشکیل دهنده آن بوسیله آزمایش کشش مشخص شده اند.

۳. الیاف کربن

الیاف کربن از مهم ترین تقویت های مورد استفاده در مواد مرکب پیشرفته بوده و با تولید آن تحولی در فناوری مواد مرکب ایجاد شده است. از لحاظ صنعت، الیاف گرافیت مهم ترین شکل ساختار کربن است. اما بطور کلی کربن دو ساختار بلورین کاملا شناخته شده داشته (الماس و گرافیت) و به حالت های نیمه بلورین و شیشه ای نیز یافت می شود. ساختار گرافیت شامل لایه های شش ضلعی با پیوند محکم اشتراکی است. این لایه ها با ترتیب چیدمان شکل (۱) روی هم قرار گرفته که اتصال بین لایه ها از نوع ضعیف و اندروال است.



شکل (۱): پیوند صفحات کربن [۵,۶]

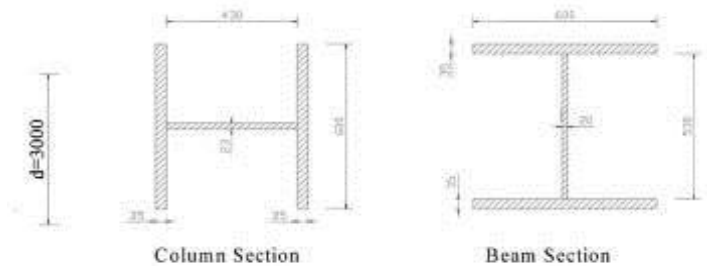
به دلیل تفاوت فاحش پیوندهای درون صفحه ای و بین صفحه ای خواص گرافیت بسیار ناهمسانگرد است به نحوی که جهت مدول کشسانی در صفحه ای بنیادین به صورت نظری 1000 Gpa و در امتداد عمود بر این صفحه فقط 30 Gpa است. با توجه به دانسیته کم این مواد در نهایت الیافی با مدول بالا حاصل می شود.

۴. مدلسازی عددی

برای مقایسه رفتار دیوار برشی فولادی و مرکب با پوشش الیاف پلیمری کربن، چهار نمونه دیوار برشی فولادی و چهار نمونه دیوار برشی مرکب با الیاف پلیمری کربن مدلسازی و بصورت غیر خطی هندسی و مصالح تحلیل شده اند. در مدل‌های دیوار برشی مرکب، نمونه های با الیاف پلیمری کربن به صورت دوطرفه (مدلهای CS-۳x۲.۵, CS-۳x۳, CS-۳x۵, CS-۳x۶) با دیوار برشی فولادی مقایسه شده، ضخامت الیاف 2 mm به روش اجزا محدود مدلسازی و تحلیل غیر خطی هندسی و مصالح صورت گرفت. ضخامت صفحه فولادی برای تمام نمونه ها 7 mm و ابعاد قاب بصورت 3 m ارتفاع و عرض دهانه به صورت متغیر (آکس به آکس) می باشد. مشخصات هندسی تیر و ستون قاب محیطی در شکل (۲) نشان داده شده است.

جدول (۱) معرفی نمونه ها

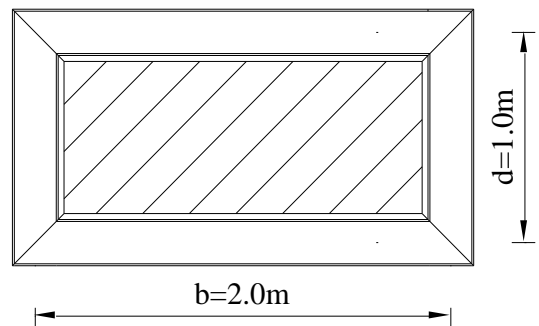
نمونه	ارتفاع	عرض دهانه	
Ssw-۳x۲.۵	۳	۲.۵	---
Ssw-۳x۳	۳	۳	---
Ssw-۳x۵	۳	۵	---
Ssw-۳x۶	۳	۶	---
CS-۳x۲.۵	۳	۲.۵	دوطرفه
CS-۳x۳	۳	۳	دوطرفه
CS-۳x۵	۳	۵	دوطرفه
CS-۳x۶	۳	۶	دوطرفه



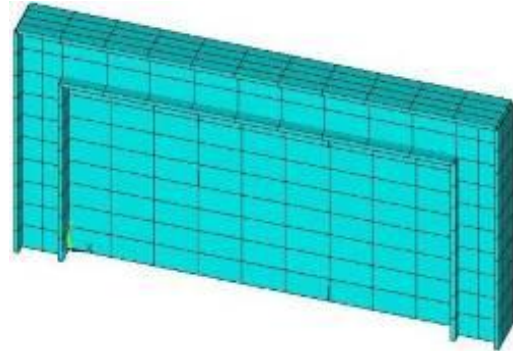
شکل (۲): مقطع تیر و ستون قاب محیطی

۵. بررسی صحت مدلسازی

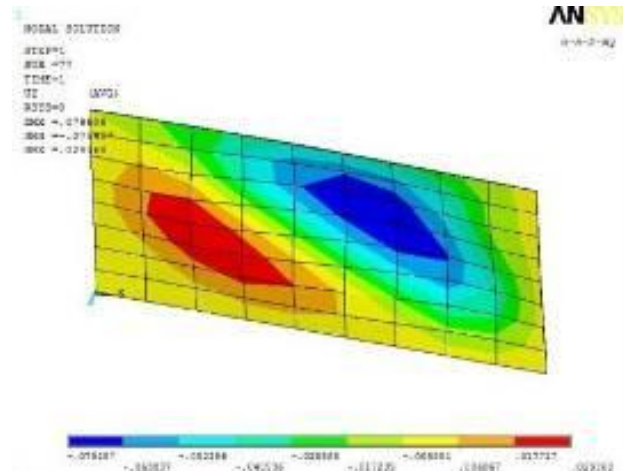
برای اطمینان از صحت مدلسازی المان محدود دیوار برشی مرکب با الیاف پلیمری، مدل آزمایشگاهی مرجع [۳،۴] مورد استفاده قرار گرفته است. در این مدل آزمایشگاهی در شکل (۳) نشان داده شده بصورت المان محدود مدلسازی شکل (۴) و آنالیز شده است. قاب محیطی از $IPE200$ با پلیت $12mm$ بر روی بال آنها، تشکیل شده است. در مدل سازی و شبکه بندی (مش بندی) اجزاء تعداد مش ها به نحوی انتخاب گردید تا گره های تیر، ستون و ورق فولادی و همچنین الیاف پلیمری کربن در یک نقطه به هم برسند. سپس این نقاط با هم ممزوج گردید تا تشکیل یک سیستم یکپارچه بدهد. با این تکنیک، اتصال تیر به ستون نیز خمشی در نظر گرفته می شود. در شکل (۶) نمای مدل پس از تحلیل نمایش داده شده است.



شکل (۳): هندسه مدل آزمایشگاهی [۳،۴]

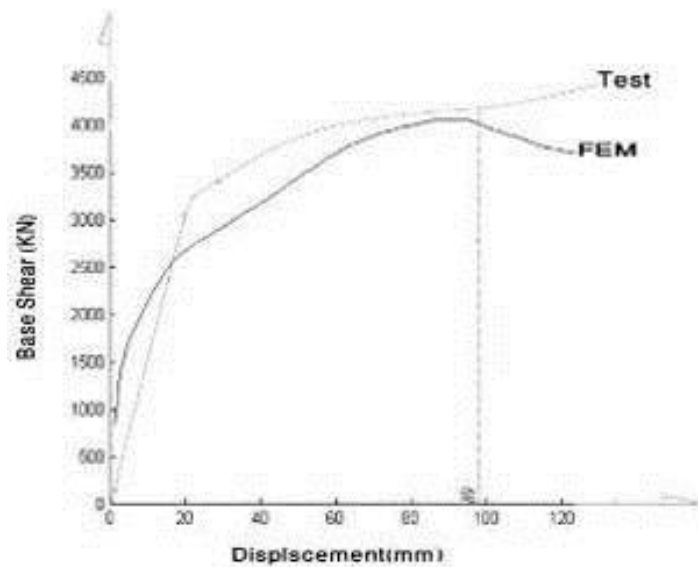


شکل (۴): مدل‌سازی اجزا محدود



شکل (۵): تغییر مکان خارج صفحه

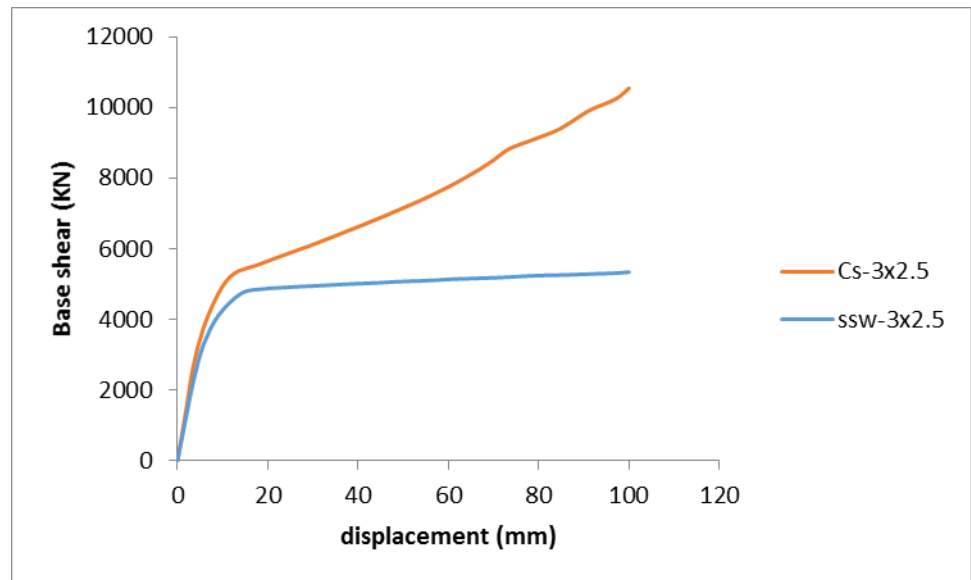
در مدل‌سازی المان محدود از نرم افزار قدرتمند **ANSYS** استفاده گردید که قابلیت رفتار الاستیک و پلاستیک را داراست. برای مدل‌سازی المان محدودی اجزای فولادی از المان **shell** با قابلیت مدل کردن تغییر شکلهای بزرگ، کرنش محدود، پلاستیسیته، رفتار غیر خطی، کمانش خارج صفحه، و برای مدل‌سازی **FRP** از المان **Solid** با ۶ درجه آزادی در هر گره استفاده شده است. استفاده از این المان ها، در مرجع [۴] نیز پیشنهاد شده است. در شکل (۶) نتایج تحلیل المان محدود و آزمایشگاهی با هم مقایسه شده است که همگرایی بالای نتایج را نشان می دهد. بنابراین می توان با اطمینان از نتایج **ANSYS** سایر مدلها را با ابعاد واقعی تحلیل نمود که در بخش های بعد آورده خواهد شد.



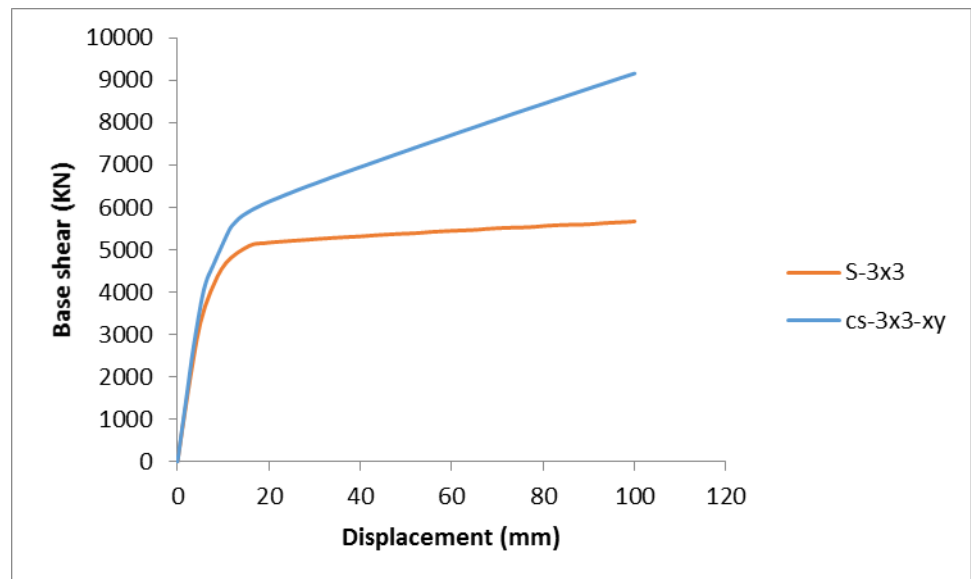
شکل (۶): مقایسه نتایج اجزا محدود و آزمایشگاهی

۶. مقایسه دیوار برشی فولادی و مرکب

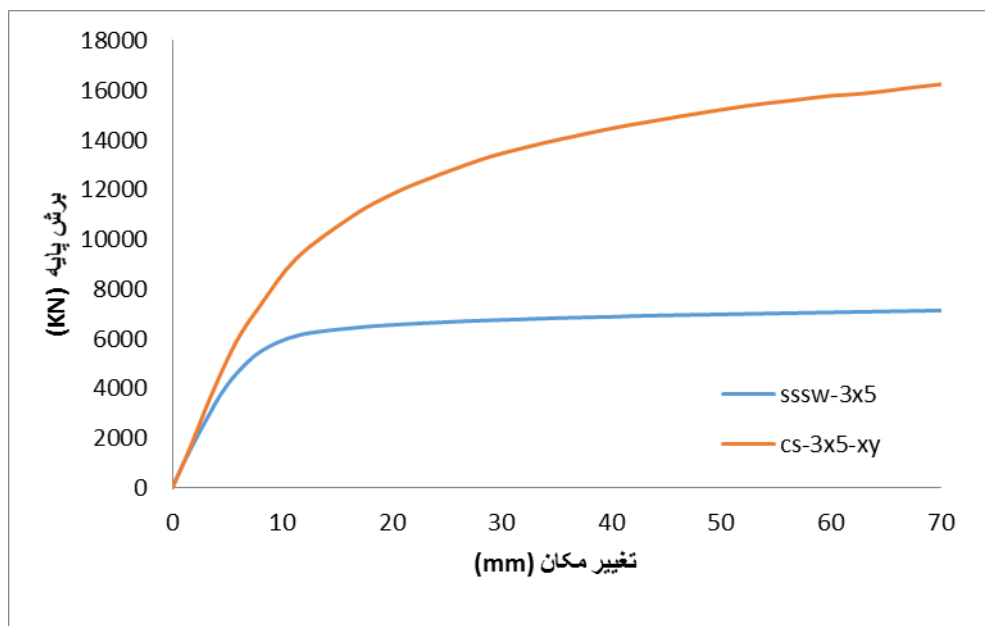
برای مقایسه رفتار دیوار برشی فولادی با نظیر مرکب، دیوار برشی فولادی مدلسازی و آنالیز شده است سپس پوشش الیاف پلیمری دو طرفه به سطح ورق فولادی چسبانده شده و آنالیز شده اند. در شکل های (۱۰ و ۸، ۹، ۷) نمودار نیرو - تغییر مکان دیوار برشی فولادی با نظیر مرکب با پوشش الیاف پلیمری کربن دو طرفه به ضخامت ۲ میلیمتر مقیاس شده است. از این نمودار اطلاعات ارزشمندی قابل استنتاج است .



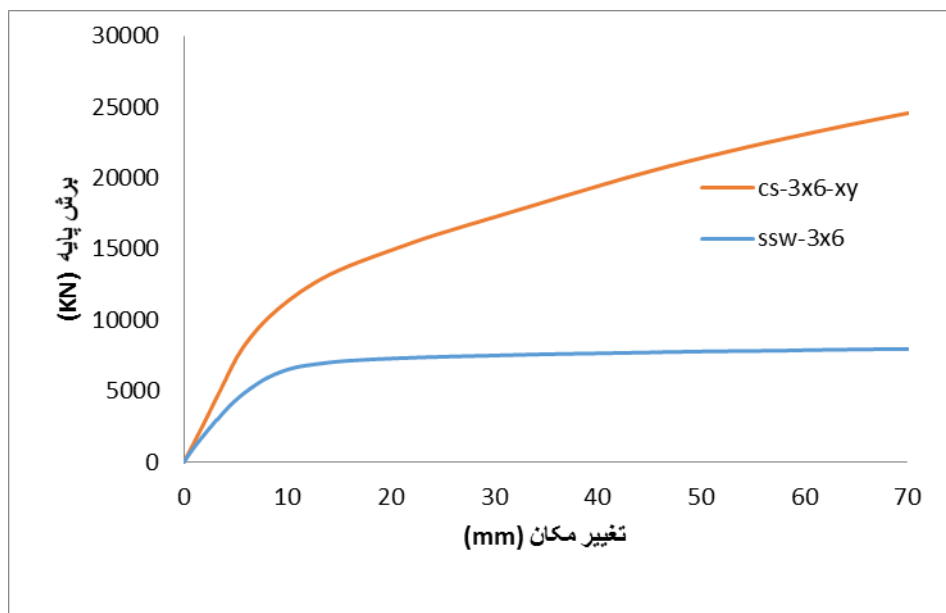
شکل (۷): نمودار بار-تغییر مکان



شکل (۸): نمودار بار-تغییر مکان



شکل (۹) : شکل بار - تغییر مکان





شکل (۱۰): نمودار بار - تغییر مکان

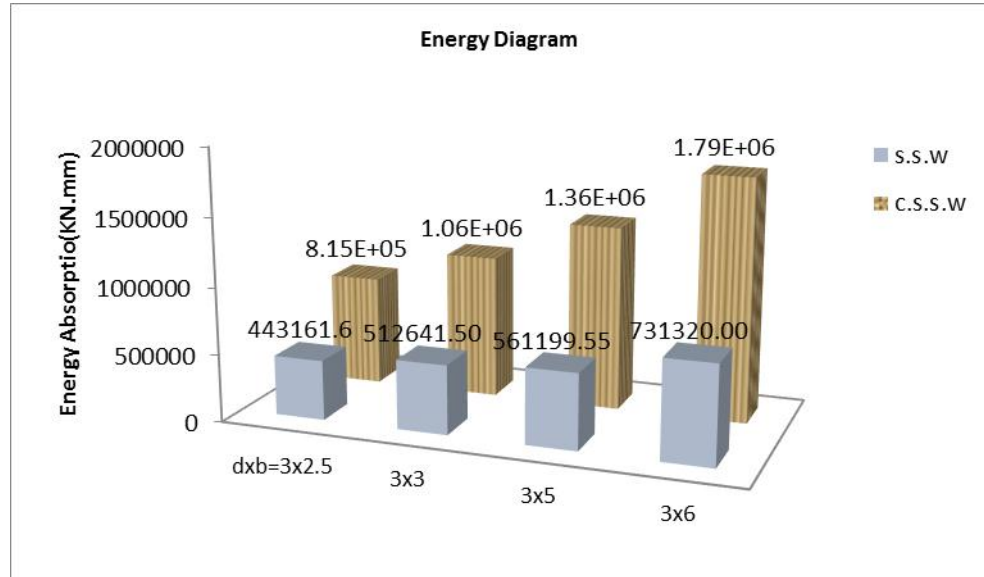
با بررسی این نمودارها مشاهده می شود در صورتیکه محدودیت تغییر مکان جانبی وجود نداشته باشد ظرفیت دیوار برشی مرکب سیر صعودی خواهد داشت اما دیوار برشی فولادی بصورت الاستیک کامل رفتار می کند. همچنین به وضوح آشکار است که الیاف پلیمری کربن باعث افزایش مقاومت و جذب انرژی می گردد. با افزایش دهانه پانل لاغری پانل افزایش می یابد. رفتار دیوار برشی فولادی و مرکب نیز متأثر این نسبت لاغری است. با استفاده از روشهای توصیف شده در بخش های قبل پارامترهای لرزه ای دیوار برشی فولادی و مرکب محاسبه شده که به بررسی آنها خواهیم پرداخت.

۷. بررسی جذب انرژی

بدلیل سختی و مقاومت بالای صفحه فولادی باید اطمینان حاصل شود که صفحه فولادی قبل از قاب محیطی تسلیم شود. قسمت اعظم انرژی ورودی به سازه بدلیل تغییر شکل غیر الاستیک صفحه فولادی مستهلک می شود. در جدول (۲) و شکل (۱۱) جذب انرژی دیوار برشی فولادی و مرکب محاسبه شده است. نتایج این جدول نشان می دهد با افزایش طول دهانه جذب انرژی در هر دو سیستم دیوار برشی فولادی و مرکب افزایش می یابد اما نرخ افزایش آنها متفاوت است. همچنین مشاهده می شود با لاغرتر شدن ورق، الیاف پلیمری تاثیر بیشتری در جذب انرژی سیستم دارد. علاوه بر آن مشاهده می شود که الیاف پلیمری باعث افزایش قابلیت جذب انرژی سیستم می شود که این افزایش جذب انرژی بین ۱.۸۴ تا ۲.۴۵ متغییر است. بنابراین با این اعداد می توان کارایی و بهبود رفتار سیستم را در اثر افزودن الیاف پلیمری کربن مشاهده نمود.

جدول (۲): جذب انرژی نمونه ها

عرض دیوار (mm)	۲۵۰۰	۳۰۰۰	۵۰۰۰	۶۰۰۰
S.S.W	۴۴۳۱۶۱.۶	۵۱۲۶۴۱.۵۰	۵۶۱۱۹۹.۵۵	۷۳۱۳۲۰.۰۰
C.S.S.W	۸۱۴۷۸۰.۰۰	۱۰۵۷۶۷۷.۰۰	۱۳۶۰۵۳۵.۰۰	۱۷۹۱۳۵۱.۰۰
C.S.S.W/S.S.W	۱.۸۴	۲.۰۶	۲.۴۲	۲.۴۵



شکل (۱۱): دیاگرام میله ای جذب انرژی

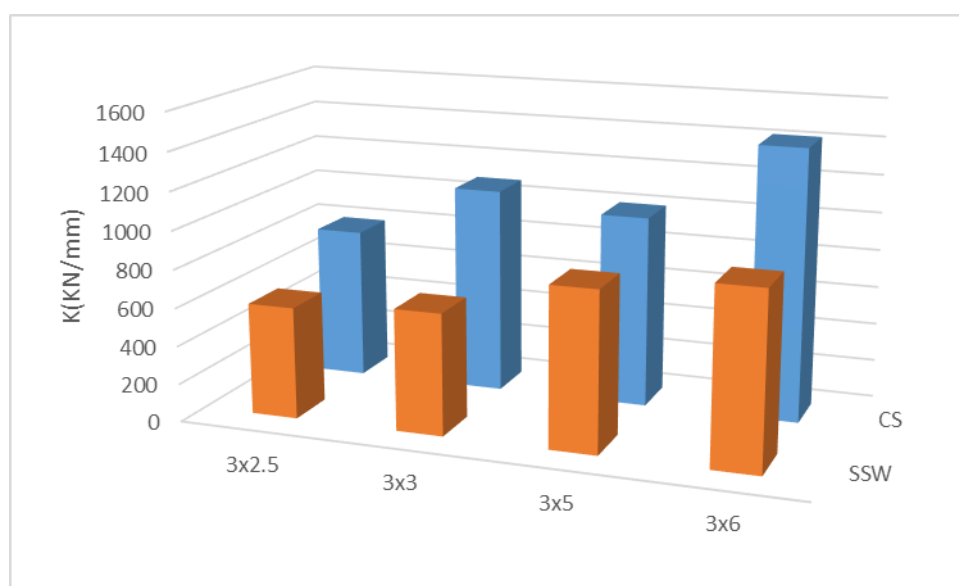
۸. بررسی سختی و مقاومت

سختی و مقاومت دو پارامتر لرزه ای بسیار مهم در خصوص سیستم های مقاوم در برابر بارهای جانبی هستند. که کنترل تغییر مکان جانبی و نیروهای لرزه ای با استفاده از این دو پارامتر انجام می شود. لذا هر سیستمی که دارای سختی و مقاومت بالاتری باشد، بالطبع سیستم اقتصادی تری خواهد بود. در شکل (۱۲) و (۱۳) نمودار میله ای این دو پارامترها برای سیستم نمایش داده شده است. با رجوع به این دو شکل و مقایسه مقدار آنها در جدول (۳) براحتی می توان دریافت که پوشش الیاف پلیمری باعث افزایش سختی الاستیک و مقاومت نهایی می شود. اما تاثیر آن بر سختی الاستیک بیشتر از افزایش مقاومت است. افزایش طول دهانه باعث افزایش سختی و مقاومت می گردد که در دیوار برشی مرکب این نرخ شدیدتر است یعنی هر چه دیوار لاغرتر باشد افزایش سختی و مقاومت آن ناشی از الیاف پلیمری کربن بیشتر خواهد بود.

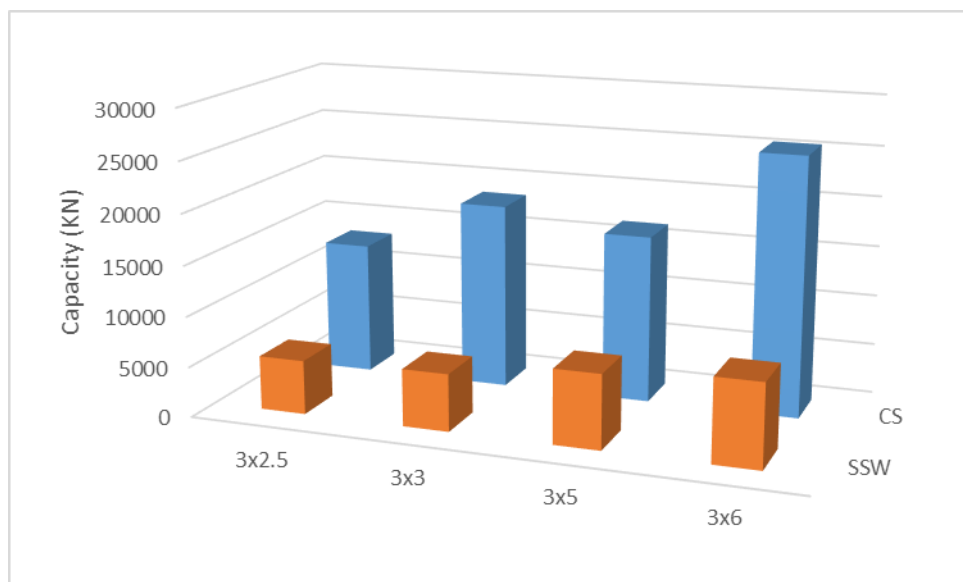


جدول (۳): سختی و مقاومت

	(CS/S)-۲۲.۵	(CS/S)-۳۳	(CS/S)-۳۵	(CS/S)-۳۶
Capacity	۱.۳۶	۱.۷	۱.۲	۱.۵۵
$K_{elastic}$	۲.۴۷	۳.۲۵	۲.۲۵	۳.۱



شکل (۱۲): سختی الاستیک سیستم‌ها



شکل (۱۳): ظرفیت برشی سیستم ها

۹. نتیجه گیری

نتایج نشان می دهد که الیاف پلیمری علاوه بر جلوگیری از کمانش در ناحیه الاستیک، باعث بهبود پارامترهای لرزه ای نیز می گردد. بررسی ها نشان می دهد که تاثیر الیاف پلیمری بر دیوار لاغرتر بسیار مطلوب تر است. همچنین با افزایش طول دیوار اثر الیاف مشهودتر می گردد. در صورتیکه محدودیت تغییر مکان جانبی وجود نداشته باشد ظرفیت دیوار برشی مرکب سیر صعودی خواهد داشت اما دیوار برشی فولادی بصورت الاستو پلاستیک کامل رفتار می کند. همچنین با توجه به نتایج بررسی جذب انرژی با افزایش طول دهانه جذب انرژی در هر دو سیستم دیوار برشی فولادی و مرکب افزایش می یابد اما نرخ افزایش آنها متفاوت است. همچنین مشاهده می شود با لاغرتر شدن ورق، الیاف پلیمری تاثیر بیشتری در جذب انرژی سیستم دارد. علاوه بر آن مشاهده می شود که الیاف پلیمری باعث افزایش قابلیت جذب انرژی سیستم می شود که این افزایش جذب انرژی بین ۱.۸۴ تا ۲.۴۵ متغیر است. بنابراین با این اعداد می توان کارایی و بهبود رفتار سیستم را در اثر افزودن الیاف پلیمری کربن مشاهده نمود. پوشش الیاف پلیمری کربن باعث افزایش سختی الاستیک و مقاومت نهایی می شود. اما تاثیر آن بر سختی الاستیک بیشتر از افزایش مقاومت است. با افزایش دهانه پانل لاغری پانل افزایش می یابد. رفتار دیوار برشی فولادی و مرکب نیز متاثر این نسبت لاغری است. افزایش طول دهانه باعث افزایش سختی و مقاومت می گردد که در دیوار برشی مرکب این نرخ شدیدتر است یعنی هر چه دیوار لاغرتر باشد افزایش سختی و مقاومت آن ناشی از الیاف پلیمری کربن بیشتر خواهد بود.



۱۱. مراجع

۱. مقدم، ح؛ مهندسی زلزله، تهران، نشر فرهنگ، ۱۳۸۴.
۲. ناطقی الهی، ف؛ ملکی، ش؛ مقاوم سازی سازه های بتنی با استفاده از *FRP*، تهران نور پردازان، ۱۳۸۵.
۳. A.R.Rahai, M.Alipour " AN INVESTIGATION OF FRP COMPOSITE STEEL HEAR WALLS (CSSW) UNDER CYCLIC LOADING ON LABORATORY " The ۱۴th World Conference on Earthquake Engineering October ۱۲-۱۷, ۲۰۰۸, Beijing, China, ۲۰۰۸
۴. F, Hatami. A. Ghamari "Effect of fiber angle on LYP steel shear walls behavior" Journal of Cent. South Univ. ۲۱: ۷۶۸-۷۷۴ (۲۰۱۴)
۵. N. Bantia "Fiber Reinforced Polymers in Concrete Construction and Advanced Repair Technologies". Report to CHBDC Committee ۱۶, The University of British Columbia, Vancouver, ۲۰۰۲
۶. D, Burchell, "Carbon Materials for Advanced Technologies" Oak Ridge, National Laboratory Oak Ridge, TN ۳۷۸۳۱ -۶۰۸۸ U.S.A. ۱۹۹۹.