بررسی تأثیر FRP بر میزان جذب انرژی دیوار برشی فولادی بهمراه بازشو

مجتبی قاسم زاده*[۱]، منصور قلعه نوی[۲]، عبدالحمید بحرپیما[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زاهدان

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان

چکیده

بیشتر از سه دهه است که دیوار برشی فولادی به عنوان سیستم اصلی مقاوم در برابر بار جانبی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بطور قطع با استفاده از نتایج آزمایشگاهی می‌توان رفتار واقعی دیوارهای برشی فولادی را مورد ارزیابی قرار داد. اما با توجه به ویژگی‌های خاص از جمله هزینه زیاد، کمبود امکانات آزمایشگاهی و محدودیت زمانی می‌بایست حل بسیاری از پدیده‌های موجود توسط روش‌های ریاضی یا تجربی انجام شوند. در این پژوهش رفتار دیوارهای برشی فولادی بهمراه بازشو در یک قاب یک دهانه یک طبقه، در شرایط مختلف ارزیابی و با یکدیگر مقایسه شدند. برای این منظور با استفاده از نرم‌افزار جامع اجزای محدود آباکوس مقادیر متفاوت اجرایی برای بازشوی ایجاد شده درون دیواربرشی مدلسازی شده و تحت تغییرمکان جانبی قرار داده شدند. پس از آن، تاثیر چیدمان‌های مختلف ورق‌های FRP بر روی سازه مورد ارزیابی قرار گرفت و حالات متفاوت چیدمان FRP در نظر گرفته شد تا بیانگر پاسخ جامعی از رفتار سازه تحت شرایط مختلف تقویت بوده باشد. نتایج بیانگر این بود که استفاده از ورق‌های FRP بصورت لایه‌های موازی در دو طرف دیوار برشی دارای بهترین پاسخ در جذب انرژی بوده، به نحوی که عملکرد این مدل در مقایسه با پوشاندن دوطرف دیوار بطور کامل نیز بهتر بوده است.

کلمات کلیدی: دیوار برشی فولادی، ورق تقویت FRP، بازشو، جذب انرژی

Effect of FRP on the Energy Absorbed by Steel Shear Walls with Openings

Mojtaba Ghasemzadeh*[1], Mansour Ghalehnovi[2], Abdolhamid Bahrpeyma[3]

1- MSc student in structural Engineering, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University of Zahedan

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

3- Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan

Abstract

It's for more than three decades that Steel Shear Walls are being used as lateral load resisting system. Definitely, the actual behavior of steel shear walls can be assessed using experimental results. However, solve

* مؤلف مسئول: مجتبی قاسم زاده، m. group1390@gmail.com

تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۳/۱۸ – تاریخ پذیرش مقاله: ۹٤/۱/۲٦

many of phenomenon like this one should be done using mathematical and theoretical methods due to their special characteristics such as high expenses, lack of laboratory facilities and time limitations. In this study, the behavior of steel plate shear walls with openings in a one-story frame were evaluated and compared in various conditions. For this purpose, different values for the opening in shear wall was considered and exposed to lateral displacement in ABAQUS as a comprehensive finite element software. Then, the impact of FRP arrangement on shear wall was evaluated to represent the structural behavior under various conditions. Result shows that, use of FRP sheets as parallel layers on both sides of shear wall has the best response on energy absorption, so that performance of the model was better than shear wall fully covered with FRP.

Keywords: Steel plate shear wall, FRP reinforce, Opening in shear wall, Energy absorption.

۱- مقدمه

سیستم دیوار برشی فولادی نسبت به سایر سیستم‌های مقاوم جانبی دارای مزیت‌هایی از لحاظ عملکرد لرزه‌ای مناسب، شکل پذیری بالا، جذب انرژی مناسب، سختی اولیه بالا، هزینه ساخت پایین و سرعت اجرای بالا است. از طرفی الیاف پلیمری تقویت شده (FRP) دارای خصوصیات مکانیکی ویژه‌ای مانند سختی و مقاومت بالا، وزن کم، حمل آسان، مقاومت بالا در برابر خوردگی و شرایط محیطی است. ورق پرکننده فولادی جان در دیوارهای برشی فولادی می‌تواند با لایه‌های FRP در دو طرف تقویت شود [۷]. در این نوع دیوار برشی فولادی کامپوزیتی، مانند دیوار برشی فولادی تقویت نشده، ورق جان، دارای مقاومت کمانشی پایین است و ظرفیت برشی سیستم توسط ایجاد میدان‌های کششی قطری در ورق کامپوزیتی جان تحمل می‌شود [۷]. در این نوع خاص دیوار برشی فولادی، نقش الیاف پلیمری تقویت شده در افزایش مقاومت برشی پس از کمانش و سختی ثانویه سیستم قابل توجه است. این سیستم هم دارای خصوصیات مثبت دیوار برشی فولادی تقویت نشده مانند هزینه پایین و سرعت اجرای ساخت بالا و همچنین دارای ویژگی مثبت دیواربرشی فولادی کامپوزیتی مانند سختی و مقاومت بالا در کنترل تغییرمکان‌ها است [۷]. در این زمینه، محرمی و حبیب نژادکورایم در سال ۱۳۸۷ با توصیف آزمایش‌هایی که در آن یک قاب یک دهانه یک طبقه که با استفاده از یک دیوار برشی فولادی مقاوم سازی شده، مزایا و امکان تقویت سازه‌های فولادی موجود را بررسی کردند و نحوه اندرکنش سازه اولیه و دیواربرشی در مراحل مختلف باربری جانبی مورد بررسی قرار گرفت. [۸] همچنین کاکسیز و همکاران در سال ۱۹۹۳ در ایالات متحده‌ی آمریکا، یامادا در دانشگاه کانسای ژاپن، تیملر و کولاک در دانشگاه آلبرتای کانادا و دیگر محققین درباره پارامترهای مختلف این سیستم تحقیقاتی انجام داده‌اند که از آن جمله می‌توان به بررسی تاثیر جنس و خواص ورق، زاویه تشکیل میدان کششی، ضخامت ورق، نسبت عرض به ارتفاع پانل برشی، نحوه اتصال تیر به ستون [۲] و وجود بازشو در ورق به تحقیقات آقایان رابرت و صبوری قمی [٤] اشاره کرد. حال در این پژوهش پس از تحلیل دیوار برشی فولادی بهمراه بازشو و مقایسه آن با تحقیقات صورت گرفته و تایید مدلسازی، به بررسی روشهای مقاوم‌سازی آن با FRP پرداخته می‌شود و میزان جذب انرژی در آن بررسی می‌گردد. در این تحقیق که با نرم افزار ABAQUS انجام خواهد شد ابتدا مدلسازی یک دیوار برشی فولادی طبق منبع مورد نظر [۸] صورت می‌پذیرد، سپس صحت مدلسازی با استفاده آن مورد تائید قرار گرفته و در آخر به بررسی اثر FRP بر روی دیوار برشی فولادی تقویت شده با آن پرداخته خواهد شد.

۲- رفتار دیوارهای برشی در جذب انرژی

در نرم افزار آباکوس برای محاسبه میزان انرژی سازه از روابط کار و انرژی توسط تنش و کرنش و نرخ تغییرات آنها استفاده می‌شود که بصورت زیر می‌باشد.

$$\bar{\varepsilon}_{f,pl} = [D_1 + D_2 \exp(D_3\sigma^*)]\left[1 + D_4 ln\left(\frac{\left(\frac{d\bar{\varepsilon}}{dt}\right)_{pl}}{\left(\frac{d\bar{\varepsilon}}{dt}\right)_0}\right)\right](1 + D_5\theta) \qquad [۱۲] \qquad (۱)$$

که در آن $\bar{\varepsilon}$ کرنش معادل و D1 تا D5 ثوابت جانسون کوک و σ^* برابر با تنش تبدیل یافته می‌باشند. $\left(\frac{d\bar{\varepsilon}}{dt}\right)$ و $\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)_0$ به ترتیب برابر با نرخ کرنش معادل و نرخ کرنش مرجع می‌باشند. همچنین θ برابر با دمای بی بعد شده سیستم خواهد بود [۱۲].

$$\bar{\sigma}_d = [A + B(\bar{\varepsilon}_{pl})^n]\left[1 + C\ ln\left(\frac{\left(\frac{d\bar{\varepsilon}}{dt}\right)_{pl}}{\left(\frac{d\bar{\varepsilon}}{dt}\right)_0}\right)\right](1 - \theta) \qquad [۱۲] \qquad (۲)$$

که در آن A و B بر حسب پاسکال و C پارامتر بدون بعد مربوط به مشخصات مصالح که توسط جانسون کوک پیشنهاد شده‌اند می‌باشند و در نهایت $\bar{\sigma}$ و یا تنش موثر، توسط آنها محاسبه می‌گردد [۱۲] .

$$U_{element} = \int_0^{\varepsilon \le \varepsilon f} \sigma(\varepsilon, (d\bar{\varepsilon}/dt), T)d\varepsilon \qquad [۱۲] \qquad (۳)$$

در نهایت با استفاده از رابطه فوق مقدار $U_{element}$ برابر با انرژی هر المان بر حسب ژول بر مبنای دیگر مجهولات که توسط روابط ۱ و ۲ بدست آمدند محاسبه می‌گردد. برای بدست آوردن انرژی کل سیستم نیز، مقدار انرژی تک تک المان‌ها با یکدیگر جمع خواهد شد.

$$U_{plate} = \sum_1^n U_{element} \qquad [۱۲] \qquad (٤)$$

که در رابطه فوق $U_{element}$ برابر با انرژی هر کدام از المان‌ها بوده و U_{plate} مقدار انرژی کل جذب شده در دیوار برشی می‌باشد [۱۲].

۳- مدلسازی به روش اجزای محدود

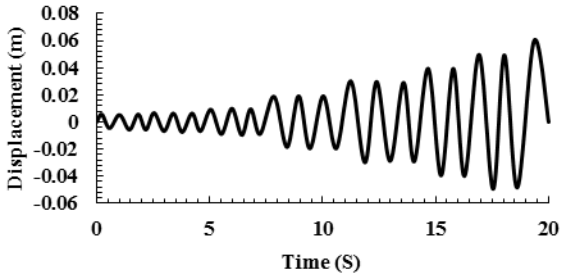
روش اجزای محدود یک روش و دستورالعمل عددی است که می‌توان آنرا برای حل مسائل متعدد و متنوع مهندسی در حالات مختلف پایدار، گذرا، خطی و غیر خطی بکار برد. این روش دارای دو ویژگی است که آن را از سایر روش‌های موجود متمایز می‌سازد که عبارتند از: الف) دراین روش از یک فرمول‌بندی انتگرالی جهت ایجاد یک دستگاه معادلات جبری استفاده می‌شود؛ ب) از توابعی هموار برای معرفی قطعه‌ای پیوسته جهت تقریب مجهولات استفاده می‌شود [۱]؛

کل روش اجزاء محدود را می‌توان به پنج مرحله اصلی تقسیم کرد: الف) تقسیم ناحیه مورد نظر به تعدادی زیر ناحیه موسوم به المان؛ ب) تعیین تقریب اولیه برای حل بصورت یک تابع با ضرایب ثابت مجهول که همواره یا بصورت خطی است و یا مرتبه دوم؛ ج) استخراج دستگاه معادلات جبری؛ د) حل دستگاه معادلات ایجاد شده؛ ه) محاسبه سایر کمیات از روی مقادیر گرهی [۱]؛ در مرحله اول همانگونه که اشاره گردید، هندسه مساله به نواحی کوچکی به نام المان تقسیم می‌شود. برای انتگرال‌گیری بر روی المان‌ها نیز از تکنیک‌های مختلفی از جمله انتگرال کاهش یافته برای صرفه‌جویی در زمان انتگرال‌گیری استفاده می‌شود. همچنین لازم به ذکر است روش انتگرال‌گیری صریح

یکی از پرکاربردترین روش‌های حل مسائل پیچیده می‌باشد. این روش برای مدل کردن مسائل دینامیکی در حوزه زمان و فرکانس از قبیل تحلیل ضربه و تاثیرات لرزه‌ای و همچنین بطور گسترده برای مسائل غیرخطی شامل تغییر شرایط تماس بسیار مفید و موثر می‌باشد. بنابراین در این مطالعه از روش انتگرال‌گیری صریح کاهش‌یافته برای حل مسائل استفاده خواهد شد [۱]. مبانی نظری مربوط به دو روش ذکر شده در منابع معتبر بسیاری ذکر شده است.

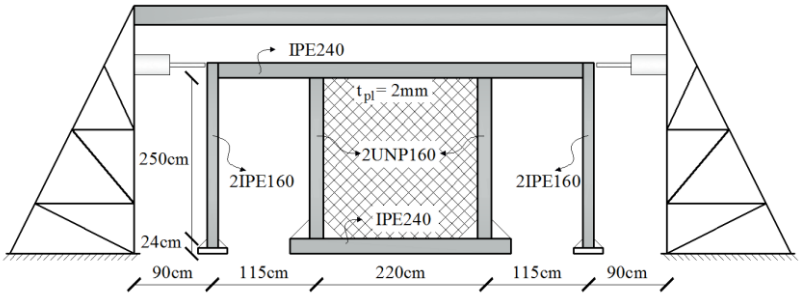
٤- صحت سنجی مدل اجزای محدود

برای ارزیابی صحت مدل‌سازی، از کار آزمایشگاهی آقای محرمی و دیگران (۱۳۸۷) استفاده شده است. ایشان یک قاب یک طبقه و یک دهانه که توسط دیوار برشی جدار نازک مقاوم سازی شده را در آزمایشگاه تولید کرده و تیر فوقانی آنرا تحت بار چرخه‌ای مطابق با شکل ۱ قرار دادند [۸].



شکل ۱: طیف تغییر مکان اعمال شده به قاب در آزمایشگاه [۸]

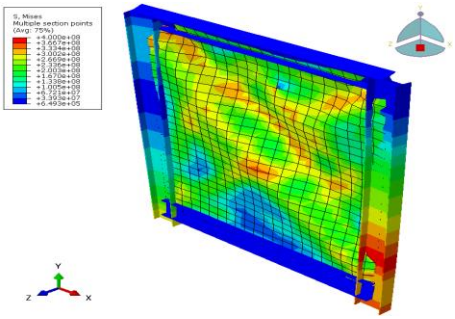
ورق دیوار برشی از جنس فولاد نرم با تنش تسلیم ۱۹۵۰ Kg/Cm^2 و تنش گسیختگی ۲۹۸۷ Kg/Cm^2 با کرنش نهایی ۰,۳ انتخاب شد تا شکل‌پذیری مناسبی از خود نشان دهد. لازم به ذکر است ورق‌های FRP با مدول الاستیسیته ١٦٥ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰,۱۲ و مقاومت کششی نهایی ٢٤٠٠ مگاپاسکال درنظر گرفته شده‌اند. ابعاد هندسی و مقاطع مورد استفاده در این آزمایش طبق شکل زیر است [۸].



شکل ۲: مدل ترکیبی قاب و دیوار برشی در آزمایش محرمی [۸]

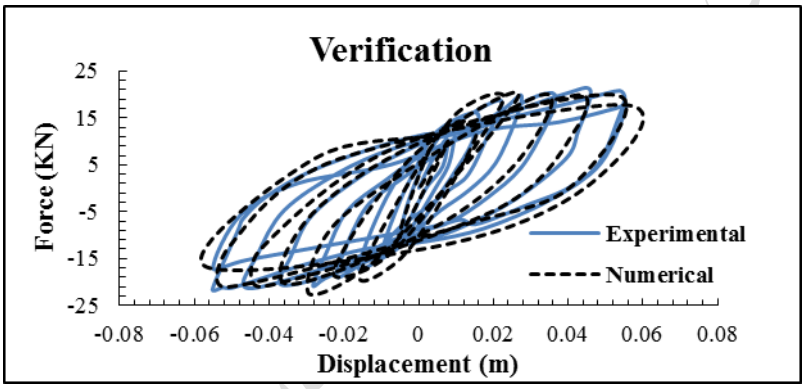
تغییر شکل سازه در آزمایشگاه و نرم‌افزار بصورت زیر بوده و کانتور تنش میزس نیز بر روی آن مشخص می‌باشد.

شکل ۳: کمانش ورق در سیکل هجدهم در تست آزمایشگاهی



شکل ٤: مدل تغییرشکل یافته دیواربرشی‌فولادی در نرم‌افزار

با مقایسه نمودار هیسترزیس بدستآمده از مدل شبیه‌سازی شده با مدل آزمایشگاهی، که در شکل ۵ نشان داده شده است، مطابقت خوبی بین پاسخ‌های بدست آمده از دو مدل مشاهده می‌شود.



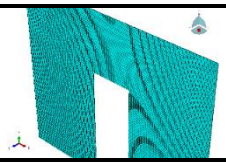
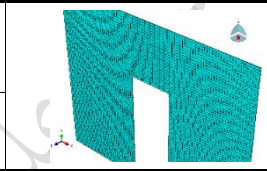
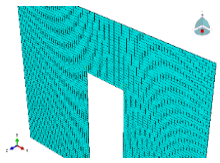
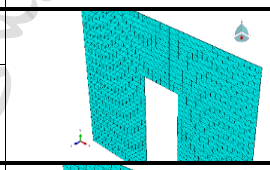
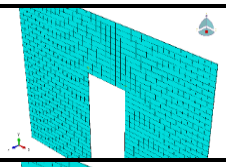
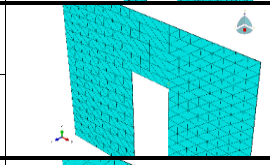
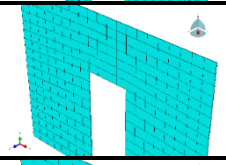
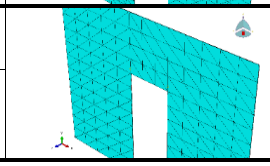
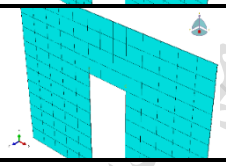
شکل ۵: مقایسه نمودارهای هیسترزیس مدل آزمایشگاهی و مدل عددی

مقدار ظرفیت باربری در مدل المان محدود ۲۰۱۳,۲ KN می‌باشد که به میزان ۳۱,٤ KN معادل ۱,٥٦ درصد بیشتر از مقدار ظرفیت باربری نمونه آزمایشگاهی است، همچنین اختلاف تغییرمکان قائم متناظر با بار حداکثر بین نمونه آزمایشگاهی و مدل المان محدود ۰,۱٤mm معادل ۲,۳ درصد می‌باشد که اختلاف ناچیز بین نتایج، صحت مدل‌سازی را تأیید می‌کند.

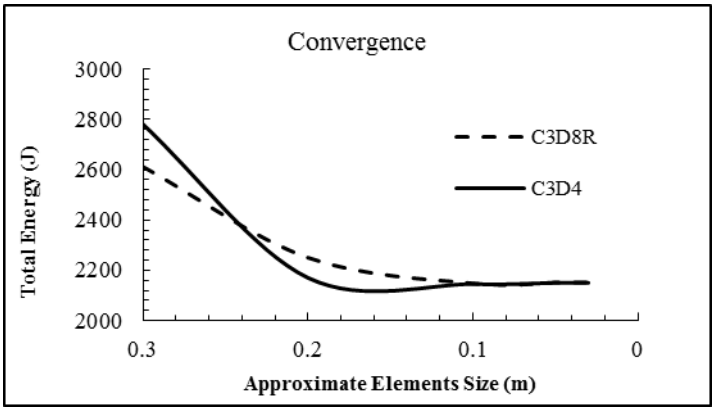
۵- آنالیز حساسیت مش بندی مدل

برای دست یافتن به تعداد مش‌های بهینه مورد استفاده در هرکدام از بخش‌های مدل و کاهش دادن درصد خطای حاصل از مش‌بندی بزرگ و جلوگیری از صرف زمان بسیار زیاد تحلیل حاصل از مش‌بندی بسیار ریز، تحلیل همگرایی مش‌بندی صورت گرفته است. برای این منظور ۵ مقدار مختلف برای تعداد مش‌ها در نظر گرفته شده و همچنین تاثیر نوع المان بر پاسخ سازه شامل انرژی کل مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. ابعاد تقریبی و تعداد المان‌ها در دو نوع مختلف در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

جدول ۱: ابعاد، تعداد و نوع المان‌های بررسی شده در آنالیز حساسیت

المان سه بعدی چهار وجهی چهار نقطه‌ای C3D4			المان سه بعدی شش وجهی هشت نقطه‌ای C3D8R		
اندازه تقریبی (m)	۰,۰۳		اندازه تقریبی (m)	۰,۰۳	
تعداد المان	۸۱۶۱۷		تعداد المان	۱۳٤۸۲	
اندازه تقریبی (m)	۰,۰۵		اندازه تقریبی (m)	۰,۰۵	
تعداد المان	۳۰۰۰۸		تعداد المان	٤۸٦٤	
اندازه تقریبی (m)	۰,۱		اندازه تقریبی (m)	۰,۱	
تعداد المان	۷۳۷۱		تعداد المان	۱۲۱٦	
اندازه تقریبی (m)	۰,۲		اندازه تقریبی (m)	۰,۲	
تعداد المان	۱۹۵۳		تعداد المان	۳۱٦	
اندازه تقریبی (m)	۰,۳		اندازه تقریبی (m)	۰,۳	
تعداد المان	۸۳٤		تعداد المان	۱۳۲	

تحت یک بارگذاری ساده رفت و برگشتی با کنترل تغییر مکان و با حداکثر تغییر مکان ٤ سانتیمتر در یک سیکل برای هرکدام از انواع مش‌بندی‌ها، نمودار تاریخچه زمانی انرژی سازه استخراج شد و مقدار ماکزیمم انرژی در این چرخه بعنوان شاخص مقایسه برای آنالیز همگرایی در نظر گرفته شد که در نمودار زیر مشاهده می‌شود.

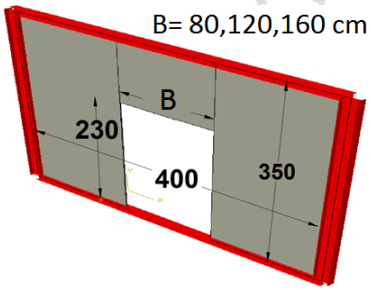


شکل ٦: نمودار پاسخ حساسیت سیستم نسبت به نوع و ابعاد المان‌ها

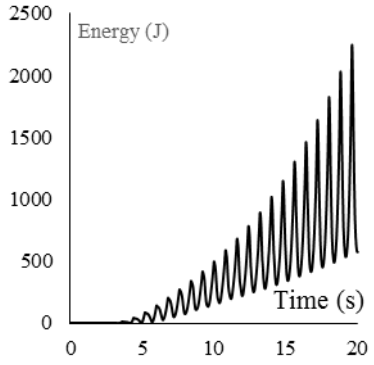
با توجه به نمودار شکل ٦ در المان‌های مربعی با اندازه تقریبی ۳۰ سانتیمتر (۱۳۲ المان) انرژی کل به ۲۷۹۸ ژول رسیده است. با کاهش اندازه المان‌ها به ۱۰ سانتیمتر، دو نمودار با یکدیگر برخورد کرده و به مقدار ۲۱۵۰ ژول می‌رسند. پس از آن، افزایش تعداد المان تاثیر چندانی در پاسخ سازه ایفا نمی‌کند و همچنان در مقدار ۲۱۵۰ ژول باقی خواهد ماند و سیستم همگرا خواهد شد. از آنجاییکه سازه در اندازه المان ۱۰ سانتیمتر همگرا شد و از طرفی تعداد المان‌های هرمی در این اندازه برابر ۷۳۷۱ عدد و تعداد المان‌های مکعبی برابر ۱۲۱٦ عدد می‌باشد، انتخاب سیستم مش‌بندی مکعبی می‌تواند تاثیر بسزایی در کاهش زمان تحلیل توسط نرم‌افزار داشته باشد. لذا در این پژوهش از المان مکعبی شش وجهی هشت نقطه‌ای استفاده خواهد شد.

٦- مدل‌ها، نتایج و بحث

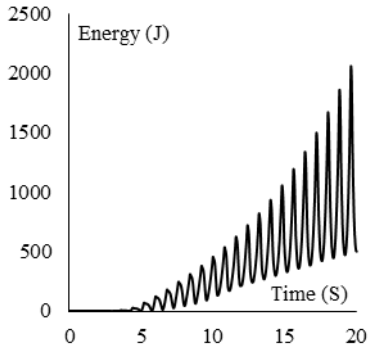
در ابتدا سه مدل دیواربرشی فولادی به عرض ٤ متر و ارتفاع ۳,۵ متر بهمراه تیرها و ستون‌های اطراف آن شبیه‌سازی شد که در آن بازشو به ارتفاع ۲,۳ متر و عرض‌های ۸۰ ، ۱۲۰ و ۱٦۰ سانتیمتر تعبیه شد. دلیل انتخاب این مقادیر بازشو در صفحه دیواربرشی، درنظر گرفتن محدودیت‌های معماری در طراحی و جانمایی آسانسور می‌باشد تا پاسخ جامعی از رفتار سازه در موقعیت‌های متفاوت در دست باشد. در ادامه نمودارهای تاریخچه زمانی انرژی جذب شده در مدل‌ها ارائه شده که توسط نرم‌افزار بطور مستقیم بدست خواهد آمد.



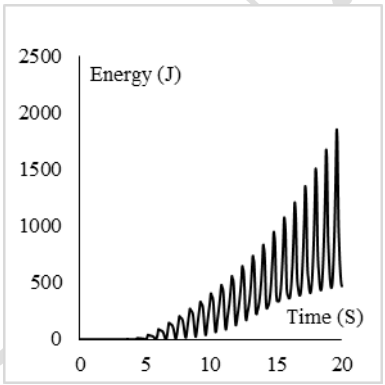
شکل ۷: قاب مورد تحلیل بدون FRP



شکل ۸: نمودار تاریخچه زمانی انرژی کل دیواربرشی با عرض بازشو ۸۰ بدون FRP



شکل ۹: نمودار تاریخچه زمانی انرژی کل دیواربرشی با عرض بازشو ۱۲۰ بدون FRP

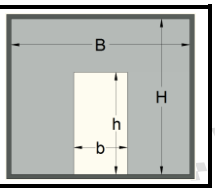


شکل ۱۰: نمودار تاریخچه زمانی انرژی کل دیواربرشی با عرض بازشو ۱٦۰ بدون FRP

توضیح اینکه در تمامی نمودارهای فوق محور افقی بیانگر زمان بر حسب ثانیه و محور قائم نشان دهنده انرژی کل تحت تغییرمکان اعمال

شده بر سازه برحسب ژول می‌باشد. در جدول زیر نتایج حاصل از نمودارهای فوق بصورت عددی برای مقایسه و تحلیل بیان خواهند شد.

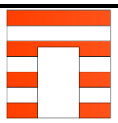
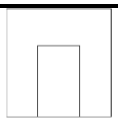
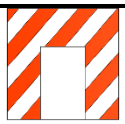
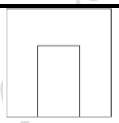
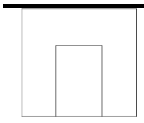
جدول ۲: مقایسه عملکرد سازه با بازشوهای مختلف

نام قطعه	B (m)	H (m)	**b (m)**	h (m)	درصد سطح بازشو به سطح کل	انرژی بیشینه (ژول)	
80	4.00	3.50	**0.80**	2.30	1.84 %	2243	
120	4.00	3.50	**1.20**	2.30	2.76 %	2053	
160	4.00	3.50	**1.60**	2.30	3.68 %	1853	

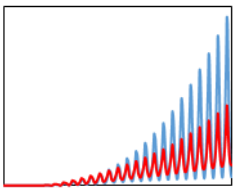
با توجه به جدول ۲، بیشینه میزان انرژی جذب شده در قطعه عرض بازشو ۸۰ و با سطح بازشو ۱٫۸٤ درصد به مقدار ۲۲٤۳ ژول رسیده است و با افزایش سطح بازشو به ۲/۷٦ درصد، کاهش ۸٫٤ درصدی در میزان انرژی مشاهده شده و مقدار آن به ۲۰۵۳ ژول خواهد رسید. همچنین افزایش سطح بازشو به ۳/٦۸ درصد مساحت کل باعث می‌شود تا تنها ۱۸۵۳ ژول انرژی توسط دیواربرشی جذب شود. دلیل این امر نیز کاهش میزان فولاد دیوار برشی در اثر افزایش سطح بازشو بوده است.

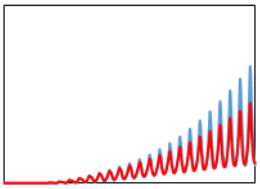
برای افزایش مقاومت سازه و بهبود عملکرد آن، از صفحات FRP با عرض ۵۰ سانتیمتر و ضخامت ۱٫٤ میلیمتر استفاده خواهد شد. برای در دست داشتن طرح جامعی از رفتار FRP بر روی دیواربرشی، از ۸ مدل مختلف چیدمان ورق بر روی دیوار استفاده شده که در جدول بیان شده است.

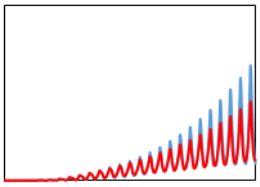
جدول ۳: نحوه چیدمان FRP بر روی دیواربرشی

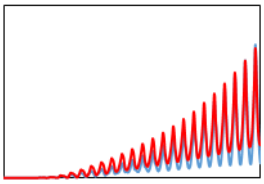
شماره مدل	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸
نمای پشت								
نمای جلو								

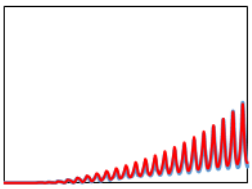
نام‌گذاری مدل‌ها بر اساس عرض بازشو و نحوه چیدمان FRP طبق جدول فوق خواهد بود. بعنوان مثال دیوار برشی با عرض بازشو ۱۲۰ سانتیمتر و نصب FRP بر روی آن بطوریکه دو طرف آن بطور کامل توسط FRP پوشانده شود (شماره ۷ در جدول فوق) با نام ۷-۱۲۰ نام‌گذاری می‌شود. درنتیجه ۸ چیدمان مختلف FRP بر روی هرکدام از سه مدل دیوار برشی با عرض بازشو مختلف، مدلسازی شده و نتایج عملکرد آنها مورد بحث قرار خواهد گرفت که در نهایت ۲٤ مدل متفاوت در این پژوهش بررسی خواهند شد.

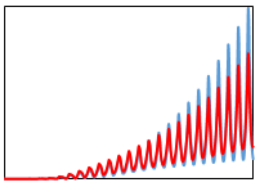

شکل۱۱: نمودار انرژی مدل ۱-۸۰

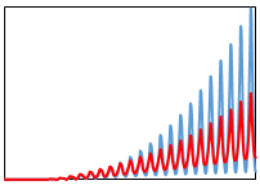

شکل۱۲: نمودار انرژی مدل ۲-۸۰

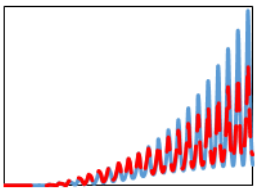

شکل۱۳: نمودار انرژی مدل ۳-۸۰


شکل۱٤: نمودار انرژی مدل ٤-۸۰

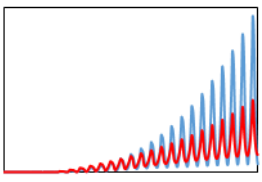

شکل۱۵: نمودار انرژی مدل ۵-۸۰

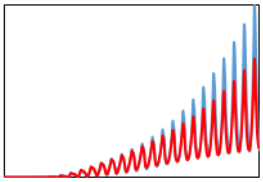

شکل۱٦: نمودار انرژی مدل ٦-۸۰

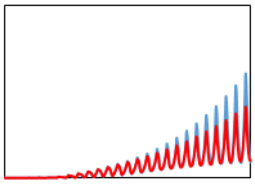

شکل۱۷: نمودار انرژی مدل ۷-۸۰

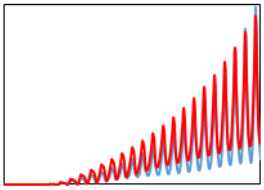

شکل۱۸: نمودار انرژی مدل ۸-۸۰

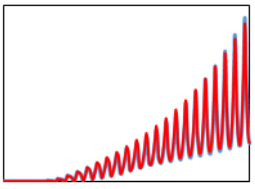
مانند قبل در نمودارهای ارائه شده در اشکال ۱۱ تا ۱۸، محور افقی مربوط به زمان بر حسب ثانیه و محور عمودی بیانگر انرژی بر حسب ژول می‌باشد. همچنین نمودارهایی که با رنگ قرمز بیان شده‌اند در تمامی شکل‌ها ثابت بوده و مربوط به مدل بدون FRP می‌باشند. نمودارهای آبی مربوط به هر مدل بهمراه FRP می‌باشد. در مدل ۱-۸۰ انرژی نهایی دیوار به رسیده که نسبت به حالت بدون استفاده از FRP به میزان ۲۰۰ درصد و یا ۲ برابر افزایش داشته است. عدد ۲ را بعنوان میزان افزایش انرژی درنظر گرفته و این ضریب برای تمامی مدل‌ها با توجه به حالت بدون استفاده از FRP محاسبه می‌شود. در ادامه نمودارهای تاریخچه زمانی انرژی دیواهای برشی با عرض دهانه‌های ۱۲۰ و ۱٦۰ سانتیمتر ارائه خواهد شد و نرخ افزایش آنها نسبت به مدل بدون FRP در نمودار شکل شماره ۳۵ بصورت گرافیکی رسم می‌شود.

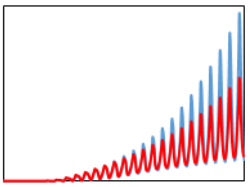

شکل۱۹: نمودار انرژی مدل ۱-۱۲۰

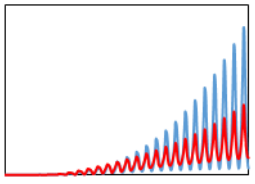

شکل۲۰: نمودار انرژی مدل ۲-۱۲۰

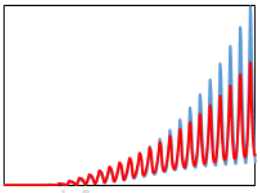

شکل۲۱: نمودار انرژی مدل ۳-۱۲۰

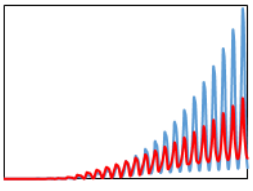

شکل۲۲: نمودار انرژی مدل ٤-۱۲۰

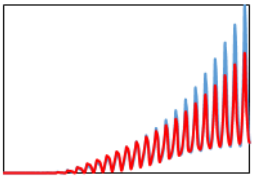

شکل۲۳: نمودار انرژی مدل ۵-۱۲۰

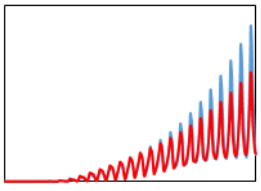

شکل۲٤: نمودار انرژی مدل ٦-۱۲۰

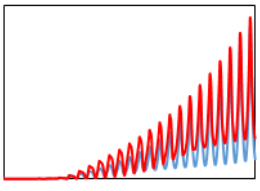

شکل۲۵: نمودار انرژی مدل ۷-۱۲۰

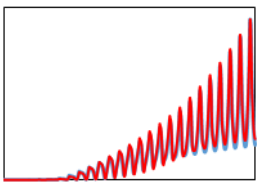

شکل۲٦: نمودار انرژی مدل ۸-۱۲۰


شکل۲۷: نمودار انرژی مدل ۱-۱٦۰

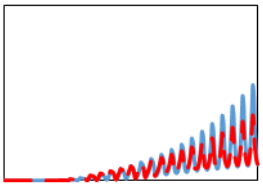

شکل۲۸: نمودار انرژی مدل ۲-۱٦۰


شکل۲۹: نمودار انرژی مدل ۳-۱٦۰

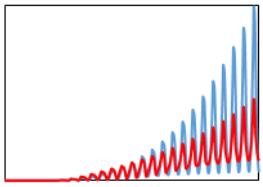

شکل۳۰: نمودار انرژی مدل ٤-۱٦۰



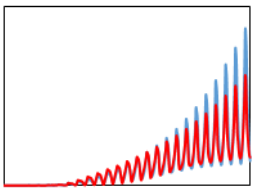
شکل ۳۱: نمودار انرژی مدل ۵-۱۶۰



شکل ۳۲: نمودار انرژی مدل ۶-۱۶۰

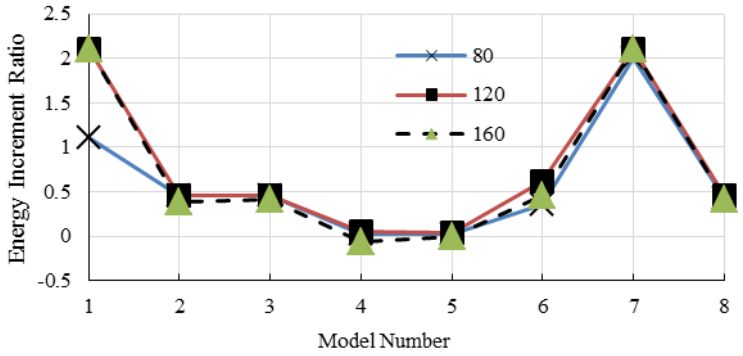


شکل ۳۳: نمودار انرژی مدل ۷-۱۶۰



شکل ۳۴: نمودار انرژی مدل ۸-۱۶۰

با توجه به نمودارهای ارائه شده در اشکال ۱۹ تا ۳٤ همانطور که برای مدل ۱-۸۰ توضیح داده شد، میزان افزایش انرژی جذب شده در هر مدل پس از استفاده از FRP نسبت به حالت بدون استفاده از FRP محاسبه و در نمودار شکل ۳۵ بیان شده است:



شکل ۳۵: نرخ رشد ظرفیت باربری

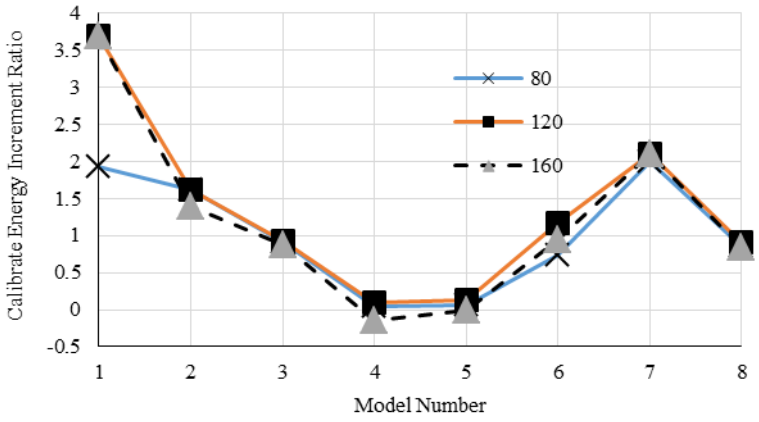
استفاده از نحوه چیدمان مدل شماره ۱ و ۷ بیشترین نرخ افزایش در میزان انرژی را دارا بوده و کمترین مقدار برای این پارامتر در چیدمان شکل شماره ٤ و ۵ مشاهده شده است. از آنجاییکه تحمل نیروهای وارده به دیواربرشی توسط قطاع پوسته دیوار در جهت مایل صورت می‌پذیرد و همچنین در مدل ٤ و ۵ نیمی از این قطاع که تحت کشش قرار می‌گیرند، خالی از ورق تقویت است، لذا در این دو مدل ضعیف‌ترین پاسخ‌ها مشاهده شده‌اند.

در نمودار شکل ۳۵، تنها میزان نسبت ظرفیت نهایی سازه تحت تاثیر آرایش‌های مختلف FRP بر مدل بدون تقویت، مورد بحث قرار گرفت. اما میزان مساحت FRP نادیده گرفته شده بود. نسبت درصد مساحت FRP به سطح مقطع کل سازه، معیار مناسبی برای ارزیابی میزان کارآیی نحوه تقویت سازه خواهد بود تا بتوان نحوه بهینه چیدمان FRP را بررسی نمود. در جدول زیر نسبت مساحت FRP هر مدل به سطح مقطع کل دیوار ارائه شده است.

جدول٤: نسبت مساحت FRP به سطح مقطع کل دیواربرشی

Model.No	۱	۲	۳	٤	۵	٦	۷	۸
۸۰	۰,۵۷	۰,۲۸	۰,۵	۰,۵	۰,۲۵	۰,٤۹	۱	۰,۵
۱۲۰	۰,۵۷	۰,۲۸	۰,۵	۰,۵۷	۰,۲۸	۰,۵۳	۱	۰,۵
۱۶۰	۰,۵۷	۰,۲۸	۰,٤۸	۰,٤۹	۰,۲٤	۰,٤۹	۱	۰,۵

حال با تقسیم میزان نرخ افزایش انرژی بیشینه در هر مدل به نسبت مساحت FRP و رسم نمودار کالیبره شده در برابر شماره هر مدل، عملکرد چیدمان‌های مختلف ورق‌های تقویت با یکدیگر مقایسه و ارزیابی خواهد شد.



شکل ۳۶: نرخ رشد ظرفیت نهایی کالیبره شده

مدل شماره ۱ در تمامی عرض بازشوها پاسخ بهینه را در بر داشته به طوریکه نسبت نرخ افزایش انرژی سازه پس از استفاده از عرض بازشو ۱۲۰ و ۱۶۰ سانتیمتر بیشترین کارآیی مدل را ارائه کرده است. پس از آن مدل شماره ۷ نیز در تمامی عرض بازشوها کارآیی مناسبی را از خود نشان داده است. قابل توجه است استفاده از مدل‌های ۱ و ۷ در بازشو با عرض ۸۰ سانتیمتر نتایج تقریبا یکسانی به دست داده است. اما مدل‌های ٤ و ٥ حداقل مقدار در پاسخ مدل‌ها را داراست و نامناسب‌ترین وضعیت در نحوه‌ی استفاده از FRP بوده است.

۷- نتیجه‌گیری

استفاده از ورق‌های تقویت در دو طرف دیواربرشی بصورت لایه‌های افقی و موازی (مدل شماره ۱)، باعث ایجاد بهترین پاسخ در عملکرد سازه خواهد شد. بطوریکه با ترکیب تاثیر مساحت FRP و میزان افزایش نیروی مقاوم سازه، بهترین گزینه برای نحوه‌ی تقویت بوده است. میزان FRP مصرف شده در مدل شماره ٤ تقریبا برابر با مدل ۱ بوده است. اما به دلیل خالی بودن بودن بخشی از سازه که کاملا تحت تنش کششی قرار می‌گیرد، باعث ایجاد تمرکز تنش و پخش نامتناسب تنش در سطح دیوار شده، لذا این مدل با توجه به مقدار FRP بکار گرفته شده برای تقویت، نامناسب‌ترین پاسخ را در بر داشته است. در صورتیکه از لحاظ اقتصادی بتوان تمامی سطح دیواربرشی در دوطرف را توسط لایه‌های FRP پوشاند، بدیهی است که بهترین عملکرد از دیوار، در این حالت تقویت انتظار می‌رود. ولی با در نظر گرفتن تاثیر مقدار ورق تقویت استفاده شده در مدل، پاسخ نسبتا مناسبی از جذب انرژی سازه در این حالت مشاهده نشده است.

۸- مراجع

[1] ABAQUS 6.11 PR3 user manual.

[2] Alphose zingoni – "Advances in damage detection, repair and rehabilitation of engineering structures" – *Engineering structures - 24 (2010) 841 – 842.*

[3] Caccese V., ElgaalyM., Chen R., " Exprimental study of thin steel plate shear walls under cyclic load " *Journal of structural Eng. Vol. 119 No. 2 Feb. 2009.*

[4] Driver R. G., Kulak G. L., Kennedy D. J. L., and Elwi A. E., "Cyclic test of four-story steel plate shear wall" *J. of Struct. Eng. ASCE 124(2), 112-120 2012.*

[5] ElgaalyM., Caccese V., Du C., "Postbuckling behaviour of steel plate shear walls under cyclic loads" *Struct. Eng. Vol. 119 No. 2 Feb. 2011.*

[6] Maripudi V. S., "Nonlinear analysis of thin steel plates with flexible boundaries under in-plane shear" *Ms Thesies univ. ofMain. Me. USA 2010.*

[۷] مسعود خزایی پول. ۱۳۸۷. "رفتار مرکب دیوار برشی فولادی تقویت شده با صفحات پلیمری". *پایان نامه کارشناسی ارشد پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله.*

[۸] حمید محرمی، اصغر حبیب نژاد کورایم. ۱۳۸۷. "مزایای استفاده از دیوار برشی فولادی جدارنازک برای مقاوم سازی سازه‌های فولادی". *نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد، شماره ٤،ص ۸۳-۷۰.*

[۹] مالک – شاهرخ. ۱۳۷۸. "شناسنامه فنی ساختمانهای فولادی". *انتشارات کمیته فرعی تخصصی مقابله با خطرات – ناشی از زلزله و لغزش لایه‌های زمین. ص۳۱۲.*

[۱۰] شهابیان فرزاد,مجری سازان طوسی امیر . ۱۳۸۷. "بررسی عوامل موثر بر مقاومت کمانشی صفحات چند لایه مرکب FRP با و بدون سوراخ". *نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، نشریه بین المللی علوم مهندسی، ویژه نامه مهندسی عمران، ص. ۸۹-۹۶.*

[۱۱] قاسمیه مهدی, قبادی محمدسهیل. ۱۳۸٤. "بررسی رفتار دیوار برشی فولادی به روش اجزا محدود". *دانشکده فنی دانشگاه تهران شهریور; ۳۹(۳ (پیاپی ۹۱)) : ص۳۵۳-۳٦٤.*

[۱۲] حاتمی برق فرزاد, راغبی مهدی . ۱۳۸۵. "شکل پذیری دیوار برشی فولادی نازک و مقایسه رفتاری دیوار برشی فولادی تقویت شده و بدون تقویت". *دانشکده فنی دانشگاه تبریز زمستان ۱۳۸۵; ۳۳(۳ (پیاپی ٤٥) ویژه عمران):ص٤۳-٤۸.*

[۱۳] حاتمی برق فرزاد,صهری سیدمجیدرضا . ۱۳۸۷. "بررسی تغییرات ضخامت ورق فولادی بر رفتار دیوار برشی مرکب". *سازه و فولاد پاییز; ٤(٤):ص۲٦-۳٦.*

[۱٤] علی زاده حسین,چناقلو محمدرضا,عابدی کریم . ۱۳۸۷. "بررسی رفتار خرابی سیستم دیوار برشی فولادی". *دانشکده فنی دانشگاه تبریز بهار; ۳۵(۳ (پیاپی ۵۱) ویژه مهندسی عمران):ص٤۹-٦۰.*

[۱۵] زهرایی سیدمهدی, صولت بابک . ۱۳۸۷. "بررسی عددی تأثیر بازشوها بر رفتار لرزه ای دیوار برشی فولادی سخت نشده". *مجله بین المللی علوم مهندسی (انگلیسی ; (۱۹)۱۰ الف (ویژه نامه مهندسی برق، صنایع و عمران)):۱٤۷-۱۵٦*