

Analytical Assessment of Effects of Creating Grooves and Reinforced Polymer Sheets on Improving Seismic Performance of Thin Steel Shear Wall

Hamzeh Dehghani^{1*}, Mostafa Chatrazr²

1- Assistant Professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Higher education complex of Bam, Bam, Iran

2 -Master of Structural Engineering, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Bam Branch, Bam, Iran

ABSTRACT

In this study, hysteresis behavior and energy absorption rate of steel shear walls in reinforced sheets CFRP, GFRP and the effect of grooves with different patterns under cycling have analyzed using the finite element method. For this purpose, the accuracy of the responses obtained from the software is compared with the experimental model. Sensitivity analysis is then performed on the dimensions and types of elements used in the analysis. All models are subjected to cyclic loading according to with ATC-24 code. After simulating each of the models in the ABACUS, the results of the analysis include shear capacity, energy absorption and the maximum of these parameters were evaluated during the analysis of the models and compared with each other. The behavior seismic of the best model also in two parts of reinforcement and groove, under four different earthquakes, has been studied. The results show that the reinforced polymer sheets on the shear wall have a direct effect on the seismic performance and the pattern of stress distribution is directly related to how grooves. Also among the models, the use of CFRP with horizontal alignment has the best seismic performance.

ARTICLE INFO

Receive Date: 12 January 2020

Revise Date: 29 November 2020

Accept Date: 15 January 2021

Keywords:

*Steel shear wall
Reinforced polymer sheets
Energy absorption
Hysteresis curve
Performance improvement*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.215494.2046>

*Corresponding author: Hamzeh Dehghani

Email address: hdehghani@bam.ac.ir

مطالعه تحلیلی تاثیر ایجاد شیار و ورق‌های پلیمری تقویت شده در بهبود عملکرد لرزه ای دیواربرشی فولادی جدار نازک

حمزه دهقانی^{۱*}، مصطفی چترآذر^۲

۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، مجتمع آموزش عالی بم، بم، ایران

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بم، بم، ایران

چکیده

در این پژوهش رفتار هیستریزیس و میزان جذب انرژی دیوارهای برشی فولادی در حالت تقویت شده با ورقهای CFRP و GFRP و همچنین تاثیر ایجاد شیار با الگوهای مختلف، تحت بارچرخه ای توسط نرم افزار جامع اجزای محدود آباکوس مورد تحلیل قرار گرفته است. برای این منظور، ابتدا صحت پاسخهای بدست آمده از نرم افزار با مدل آزمایشگاهی مقایسه شده است. سپس آنالیز حساسیت بر روی ابعاد و نوع المان مورد استفاده در آنالیز انجام شده است. تمامی مدل‌ها تحت بار رفت و برگشتی مطابق با آیین نامه ATC-24 قرار گرفته است. پس از شبیه‌سازی تک‌تک مدل‌ها در نرم‌افزار، نتایج حاصل از تحلیل آنها شامل ظرفیت برشی، جذب انرژی و همچنین بیشینه این پارامترها در طول تحلیل مورد ارزیابی قرار گرفت و با یکدیگر مقایسه شدند. بهترین مدل‌ها در دو بخش تقویت و ایجاد شیار نیز تحت چهار زمین لرزه مختلف قرار گرفته و رفتار آنها مورد بررسی قرار داده شده است. نتایج نشان میدهد که استفاده از CFRP با چیدمان افقی بهترین مدل می باشد.

کلمات کلیدی: دیواربرشی فولادی، ورق‌های پلیمری تقویت شده، جذب انرژی، منحنی هیستریزیس، بهبود عملکرد

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.215494.2046	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.215494.2046	۱۴۰۰/۰۹/۳۰	۱۳۹۹/۱۰/۲۶	۱۳۹۹/۱۰/۲۶	۱۳۹۹/۰۹/۰۹	۱۳۹۸/۱۰/۲۲
			حمزه دهقانی		*نویسنده مسئول:	
			hdehghani@bam.ac.ir		پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

ایده استفاده از دیوار برشی فولادی، به عنوان یک سیستم مقاوم در برابر بار جانبی در طراحی و تقویت ساختمان ها، بیش از سه دهه است که مورد توجه پژوهشگران و طراحان قرار گرفته است. در مقایسه با سایر سیستمهایی باربر جانبی متداول این سیستم مزایای قابل توجهی از جمله شکل پذیری مناسب، سختی زیاد، میزان مقاومت برشی و جذب انرژی بالا دارد همچنین از این سیستم برای مقاوم سازی ساختمانهای موجود می توان استفاده نمود [۱]. استفاده از این سیستم در ابتدا به صورت تقویت شده و یا با استفاده از ورق ضخیم بوده است که مطالعه تحلیلی، آزمایشگاهی و استفاده از ایده در نظر گرفتن ظرفیت پس از کمانش ورق آن را به سمت استفاده از پانل دیواربرشی فولادی جدار نازک سوق داده است. پژوهشگران پیوسته در صدد بهبود رفتار دیوار برشی فولادی، افزایش کارایی و بهره وری آن بوده اند. یکی از روشهایی که برای بهبود عملکرد لرزه ای این سیستم میتوان استفاده نمود، الیاف پلیمری تقویت شده است. الیاف پلیمری تقویت شده دارای خصوصیات مکانیکی ویژه ای مانند سختی و مقاومت بالا، وزن کم، حمل آسان، مقاومت بالا در برابر خوردگی و شرایط محیطی است [۲]. ورق پرکننده فولادی جان در دیوارهای برشی فولادی می تواند با لایه های الیاف پلیمری در دو طرف تقویت شود. 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 میدان های کششی قطری در ورق کامپوزیتی جان تحمل می شود. همچنین اقدام دیگری که در جهت افزایش کارایی و بهره وری دیوار برشی فولادی میتوان انجام داد، ایجاد بازشو بر روی ورق درونی است. در سا لهای اخیر یک نمونه دیوار برشی فولادی با بازشوی منظم دایره ای شکل یا ماتریسی توسط محققان دانشگاه بوفالو آمریکا مطرح شده و مورد آزمایش قرار گرفت. از این نوع بازشو علاوه بر سیستمی جهت عبور تاسیسات میتوان به تاثیر آن در جلوگیری از اعوجاج درون صفحه ورق درونی اشاره نمود [۳، ۴]. محققانی تمرکز پژوهشهای خود را بر روی رفتار دیوار برشی فولادی قرار دادند و آنالیزهای عددی و آزمایشگاهی در این خصوص انجام داده اند [۵-۸]. صبوری قمی و همکاران در سال ۲۰۰۸ به بررسی کمانش دیوار برشی فولادی پرداختند. آنها میزان کمانش ایجاد شده در صفحه دیواربرشی را مورد ارزیابی قرار داده و چندین الگوی چیدمان سخت کننده قائم و افقی برای جلوگیری از کمانش صفحه ارائه کردند [۹]. جفری در سال ۲۰۱۱ رفتار لرزه ای دیوار برشی فولادی را در یک قاب ساختمانی پنج طبقه مورد بررسی قرار داد. او اندازه های مختلف برای عرض و ارتفاع و ضخامت صفحه دیوار برشی را در نظر گرفت و تحت بار رفت و برگشتی به بررسی رفتار هیستریزس هر کدام از مدل های ساخته شده پرداخت. نتیجه حاصل از پژوهش او افزایش چشمگیری در شکل پذیری قابها را نشان داده و همچنین ضریب اضافه مقاومت را برای قاب های مختلف ارائه نمودند [۱۰]. جیان-جو و همکاران در سال ۲۰۱۳ به بررسی عددی و آزمایشگاهی رفتار دیوارهای برشی فولادی به همراه سخت کننده با بازشوی مختلف در دیوار پرداختند. مقدار مقاومت سازه در برابر بارهای جانبی در حالات مختلف را بررسی نموده و ظرفیت باربری دیوارهای برشی را با استفاده از نمودارهای هیستریزس ارزیابی نمودند. در نهایت یک طرح کلی برای طراحی مقدماتی دیواربرشی فولادی به همراه سخت کننده پیشنهاد نمودند [۱۱]. کلایتون و همکاران در سال ۲۰۱۵ عملکرد لرزه ای دیوار برشی فولادی بدون اتصال به ستون و تنها با اتصال به تیر را بررسی کردند. ایشان با مشاهده کمانش های ایجاد شده در صفحه دیوار برشی الگوی حوزه کشش ایجاد شده در دیوار برشی را مدنظر قرار داده و ظرفیت باربری دیواربرشی را محاسبه نمودند. نتیجه حاصل نشان داد که این نحوه اجرا باعث کاهش ظرفیت باربری سازه در اکثر حالات خواهد شد ولی در برخی موارد میزان جذب انرژی سازه را افزایش داده است [۱۲]. ولادی و شیرشاهی در سال ۲۰۱۶ به تاثیر بازشو مستطیلی در رفتار لرزه ای دیوار برشی فولادی پرداختند. حالت های مختلف بازشو در دیوار برشی را بررسی نمودند. در پایان بهترین موقعیت بازشو در دیوار برشی فولادی را تعیین کردند [۱۳]. جلیل زاده و قلهکی در سال ۲۰۱۸ به مطالعه دیوار برشی فولادی به همراه بازشوی تکی با استفاده از روش اجزا محدود پرداختند. آنها پارامترهای هندسی از قبیل شکل، قطر، محل سوراخ و ضخامت را در مدلها در نظر گرفتند و به تعیین ظرفیت برشی دیوار در حالت های مختلف پرداختند. همچنین معادله ای جهت تعیین ظرفیت برشی دیوار ارائه دادند که نتایج نشان می دهد معادله از دقت خوبی جهت پیش بینی ظرفیت برشی دیوار برخوردار است [۱۴]. ژانگ یو و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار دیوار برشی فولادی مقاوم سازی شده با بتن

پیش ساخته بتنی و شبکه فلزی پرداختند. نتایج نشان می دهد که ظرفیت برشی دیوار در حالت مقاوم سازی شده با بتن پیش ساخته بتنی و شبکه فلزی به ترتیب ۲۳ و ۲۵ درصد افزایش یافتند. همچنین اتلاف انرژی در هر دو روش مقاوم سازی ۴۷ درصد نسبت به نمونه مقاوم سازی نشده افزایش دارد [۱۵]. بیپور و همکاران در سال ۲۰۲۰ به تعیین ماکزیمم ظرفیت برشی دیوار برشی فولادی به همراه سخت کننده با باز شوهای مستطیلی پرداختند. با استفاده از تحلیل غیرخطی اجزا محدود و روش سطح پاسخ اثر پارامترهای مختلف در تعیین ظرفیت برشی دیوار مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحلیل نشان میدهد روش سطح پاسخ از دقت خوبی برای پیش بینی ظرفیت برشی برخوردار است. همچنین با استفاده از آنالیز حساسیت مشخص شد که تنش تسلیم موثرترین پارامتر در تعیین ظرفیت برشی می باشد [۱۶]. احمد خان و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی رفتار غیر الاستیک دیوار برشی فولادی به همراه باز شوهای تکی با شکلهای مختلف پرداختند. نتایج تحقیق نشان می دهد، اندازه و محل سوراخ نقش مهمی در تعیین ظرفیت برشی دیوار دارد بطوریکه بهترین محل باز شو مرکز ضلع پایینی می باشد [۱۷]. پاسالار و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی عملکرد دیوار برشی فولادی به همراه باز شوهای تکی دایره ای با شرایط مرزی مختلف دیوار پرداختند. نتایج نشان می دهد با افزایش قطر سوراخ ظرفیت برشی، شکل پذیری، انرژی جذب شده و سختی موثر کاهش می یابد بطوریکه بیشترین کاهش مربوط به سختی موثر دیوار می باشد. همچنین با افزایش سختی تیر و ستون مربوط به دیوار عملکرد رفتار هیستریزس دیوار بهبود یافت [۱۸]. همانطور که در تحقیقات مشخص است مکان، شکل و نحوه توزیع باز شو در رفتار دیوار برشی فولادی نقش مهمی دارد بنابراین یکی از اهداف این مقاله تاثیر ایجاد شیار لوبیایی شکل و سوراخ دایره ای و ترکیب آنها می باشد که در تحقیقات پیشین انجام نشده است. همچنین تاثیر الیاف پلیمری بر رفتار دیوار برشی مورد توجه محققین بوده است که نوع و نحوه چیدمان آنها بسیار مهم است. در این پژوهش ابتدا به بررسی تاثیر ورقهای CFRP و GFRP در رفتار دیوار برشی فولادی با استفاده از روش المان محدود پرداخته شده است و چهار حالت مختلف از نحوه چیدمان ورقهای پلیمری با دو نوع جنس متفاوت مورد مطالعه قرار گرفته است. در ادامه تاثیر ایجاد شیار با الگوهای مختلف در دیوار برشی فولادی در چهار حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. برای آنالیز کلیه مدل ها از نرم افزار آباکوس استفاده شده است. به همین منظور صحت پاسخهای بدست آمده از نرم افزار با مدل آزمایشگاهی مقایسه شده است. در پایان بهترین مدل که عملکرد مناسبی دارد، تعیین گردیده است.

۲- مبانی تئوری رفتار دیوارهای برشی جدارنازک و روش اجزای محدود

۲-۱- آنالیز رفتار دیوار برشی جدار نازک

یکی از مسائل شناخته شده در تیورورقها میدان کششی قطری است. وقتی ورق کمانش می کند مقاومت سازه با تشکیل میدان کششی وارد مرحله جدیدی از رفتار خود می شود و ورق در جهت فشاری مقاومت نمی کند اما در جهت کششی قابهای مهاربندی شده همچنان از خود مقاومت نشان می دهند. در دیوارهای برشی فولادی نیز این رفتار به خوبی دیده می شود. بنابراین می توان از نتیجه تحقیقات گذشته بر روی رفتار پس کمانشی تیورورقها، برای دیوارهای برشی فولادی نیز بهره جست. ظرفیت برشی دیوارهای برشی فولادی را می توان از روابط زیر که برگرفته از روابط تیورورق در آیین نامه AISC می باشد به دست آورد. ظرفیت برشی در طراحی به روش LRFD از V_n و $Q_v = 0.9$ ، که V_n (مقاومت برشی اسمی) را با توجه به شرایط فشردگی می توان از روابط زیر به دست آورد [۱۹]:

الف-فشرده:

$$V_n = 0.6A_w \cdot F_{yw} \quad (1)$$

ب- غیر فشرده و لاغر :

$$V_n = 0.6A_w \cdot F_{yw} \frac{1 - C_v}{1.15 \sqrt{1 + \left(\frac{a}{h}\right)^2}} \quad (2)$$

$$V_n = 0.6A_w \cdot F_{yw} \frac{1 - C_v}{1.15 \sqrt{1 + \left(\frac{a}{h}\right)^2}} \quad (3)$$

$$K_v = 5 + \frac{5}{\left(\frac{a}{h}\right)^2} \text{ if } \frac{a}{h} > 3 \rightarrow K_v = 5 \quad (4)$$

C_v در حالت غیر فشرده:

$$C_v = \frac{1.10 \sqrt{\frac{K_v E}{F_{yw}}}}{\frac{h}{t_w}} \quad (5)$$

C_v در حالت لاغر:

$$C_v = \frac{1.15 K_v E}{\left(\frac{h}{t_w}\right)^2 F_{yw}} \quad (6)$$

$$A_w = d_w t_w \quad (7)$$

که در معادلات ۱ الی ۷، A_w : مساحت برشی دیوار، C_v : نسبت تنش برشی بحرانی ورق، d_w : عرض ورق فاصله بین بال دو ستون، t_w : ضخامت ورق و K_v : ضریب کمانش ورق می‌باشند.

تنش برشی به دست آمده از آنالیز باید رابطه زیر را ارضا کند:

$$V < \phi \cdot V_n \quad (8)$$

بعد از طراحی باید V_{ne} (ظرفیت برشی مورد انتظار) بر اساس مساحت واقعی ورق و مقاومت تسلیم مورد انتظار محاسبه شود. ظرفیت برشی مورد محاسبه سایر المان‌های پانل دیوار برشی فولادی مانند اتصالات، تیر و ستون به کار می‌رود.

$$V_{ne} = C_{pr} \cdot R_y \cdot V_v \quad (9)$$

$$C_{pr} = 1 + \frac{F_u}{2F_y} \quad (10)$$

C_{pr} : ضریب محاسبه مقاومت حداکثر اتصال، این ضریب جهت افزایش ظرفیت برش تسلیم ورق در اثر کرنش سختی می‌باشد. R_y : نسبت مقاومت تسلیم مورد انتظار به حداقل مقاومت مشخصه تسلیم. 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 [۲۰].

$$\bar{\epsilon}_{f,pl} = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)] \left[1 + D_4 \ln \left(\frac{\left(\frac{d\bar{\epsilon}}{dt}\right)_{pl}}{\left(\frac{d\bar{\epsilon}}{dt}\right)_0} \right) \right] (1 + D_5 \theta) \quad (11)$$

که در آن $\bar{\epsilon}$ کرنش معادل و D_1 تا D_5 ثوابت جانسون کوک و σ^* برابر با تنش تبدیل یافته می‌باشند. $\left(\frac{d\bar{\epsilon}}{dt}\right)_0$ و $\left(\frac{d\bar{\epsilon}}{dt}\right)$ به ترتیب برابر با نرخ کرنش معادل و نرخ کرنش مرجع می‌باشند. همچنین θ برابر با دمای بی بعد شده سیستم خواهد بود.

$$\bar{\sigma}_d = [A + B(\bar{\epsilon}_{pl})^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\left(\frac{d\bar{\epsilon}}{dt}\right)_{pl}}{\left(\frac{d\bar{\epsilon}}{dt}\right)_0} \right) \right] (1 - \theta) \quad (12)$$

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 σ و یا تنش موثر، توسط آنها محاسبه می‌گردد [۷].

$$U_{element} = \int_0^{\epsilon \leq \epsilon_f} \sigma(\epsilon, (d\bar{\epsilon}/dt), T) d\epsilon \quad (13)$$

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 ۱۱ و ۱۲ بدست آمدند محاسبه می گردد. برای بدست آوردن انرژی کل سیستم نیز، مقدار انرژی تک تک المان‌ها با یکدیگر جمع خواهد شد.

$$U_{plate} = \sum_1^n U_{element} \quad (14)$$

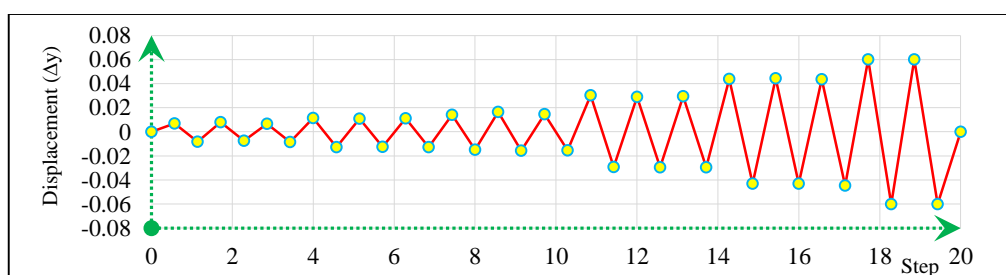
که در رابطه فوق $U_{element}$ برابر با انرژی هر کدام از المان‌ها بوده و U_{plate} مقدار انرژی کل جذب شده در دیوار برشی می‌باشد [۲۰].

۲-۲- روش اجزای محدود

روش اجزاء محدود روشی برای تحلیل سازه‌ها، حرکت سیالات، انتقال حرارت، مسائل موج و آکوستیک و... است. مفهوم اساسی روش مذکور این است که هر متغیر میدانی پیوسته مثل سرعت، تنش، فشار یا دما می‌تواند با یک مدل مجزا که از مجموعه‌ای از متغیرهای میدانی پیوسته قطعه قطعه تشکیل شده، تقریب زده شده و این متغیرها روی تعداد محدودی از زیر مجموعه‌ها تعریف می‌شوند. در روش اجزاء محدود سازه مورد نظر به اشکال گسسته که المان نامیده می‌شوند تقسیم‌بندی می‌شود. انواع المان‌ها شامل یک‌بعدی خطی، دوبعدی صفحه‌ای و سه‌بعدی حجمی می‌باشند که بسته به ابعاد و نوع مسئله مورد نظر استفاده می‌گردند. این المان‌ها در نقطه‌ای مشخص به نام گره به یکدیگر متصل می‌شوند. چون تغییر واقعی متغیر میدانی در داخل محیط پیوسته شناخته شده نیست، توابع تقریب زنده‌ای برای توصیف تغییرات این میدان مورد نیاز است. این توابع تقریب که به عنوان توابع میان‌یاب نیز شناخته می‌شوند، در گره‌ها بر حسب مقادیر متغیر میدانی تعریف می‌شوند. هنگامی که معادلات میدان مثل معادلات تعادل یا موازنه حرارتی برای کل جسم نوشته می‌شوند، مجهول‌های جدید مقادیر گره‌ای مربوط به متغیر میدان خواهند بود. با حل معادلات میدان که معمولاً به شکل ماتریس‌های نواری هستند، مقدار متغیر میدان در گره‌ها می‌تواند از طریق مونتاژ عناصر بدست آید. روش المان‌های محدود، از نظر مفهومی ساده بوده و برای کار با محدوده گسترده‌ای از اجسام پیوسته و ترک‌دار دو و سه‌بعدی بکار برده شده‌اند [۲۱]. انجام تعداد زیاد آزمایش‌ها برای ارزیابی پارامترهای موثر برای بررسی رفتار دیوارهای برشی پر هزینه و زمان بر خواهد بود. از این رو شبیه‌سازی با بهره‌گیری از روش اجزای محدود می‌تواند مدل‌سازی مناسبی برای این آزمایش در مقیاس واقعی فراهم آورد که بسیاری از محدودیت‌های آزمایشگاهی را نداشته و در صورت اجرای صحیح، نتایج مفیدی را نیز ارائه می‌دهد. روش اجزای محدود یک روش و دست‌ورعمل عددی است که می‌توان آنرا برای حل مسائل متعدد و متنوع مهندسی در حالات مختلف پایدار، گذرا، خطی و غیرخطی و امثال آن بکار برد. مسائل پایدار، گذرا، خطی و یا غیر خطی در زمینه تنش، انتقال حرارت، جریان سیال و الکترومغناطیس توسط روش‌های اجزاء محدود مورد تحلیل قرار می‌گیرند. نرم افزار آباکوس از توانمندترین و در عین حال پرکاربردترین نرم افزارهایی است که قابلیت مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی را دارا می‌باشد و از دقت بسیار بالایی برخوردار است. در این پژوهش از نرم افزار آباکوس نسخه ۱-۱۱-۶ استفاده شده است [۲۱].

۳- صحت سنجی پاسخ‌های بدست آمده از اجزای محدود

برای ارزیابی صحت مدل‌سازی، از کار آزمایشگاهی آقای محرمی و همکاران 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 آنرا تحت بار چرخه‌ای مطابق با شکل ۱ قرار دادند. در این طیف تغییر مکان بصورت رفت و برگشتی طی ۲۰ گام رفت و برگشتی (معادل با زمان ۲۰ ثانیه) بوده که در آن حداکثر تغییر مکان آن به ۶ سانتیمتر خواهد رسید [۲۲].



شکل ۱. طیف تغییر مکان اعمال شده به قاب در آزمایشگاه

مدل دیوار برشی جدار نازک، با مقیاس یک به یک ساخته شد و با استفاده از اتصالات جوشی به قاب پیرامونی متصل شد. دیوار برشی دقیقاً در وسط قاب قرار گرفت و کل سیستم سازه‌ای حاصل بصورت متقارن درآمد. مدل طراحی شده و ابعاد آن در شکل ۲ قابل مشاهده است.



شکل ۲. مدل ترکیبی قاب و دیوار برشی کمانش یافته در آزمایش محرمی [۲۲]

همچنین در جدول ۱ مشخصات نیمرخ تیرها و ستون‌ها و دیوار برشی مدل آزمایشگاهی مشخص شده است.

جدول ۱. مشخصات مدل آزمایشگاهی

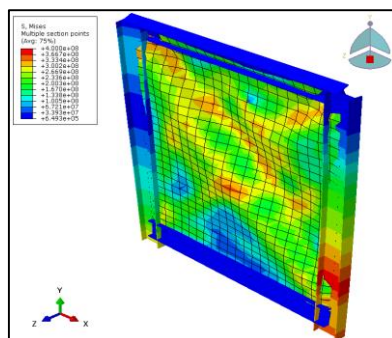
ارتفاع طبقه (cm)	عرض دهانه (cm)	پروفیل تیر	پروفیل ستون قاب	پروفیل ستون دیوار برشی	ضخامت (mm)	تعداد طبقات	تعداد دهانه
274	220	IPE240	2IPE160	2UNP160	2	1	1

جدول ۲. مشخصات ستون‌های دیوار برشی

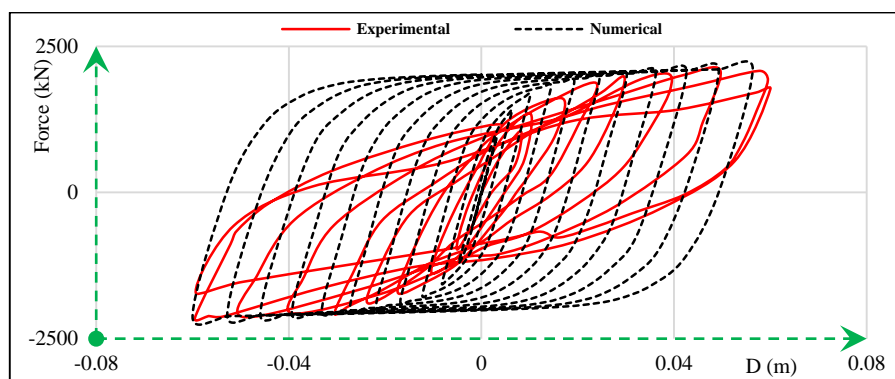
پروفیل ستون		2UNP160
مساحت (A)	(cm ²)	48
سختی خمشی محور ضعیف (EI) _{min}	(cm ⁴)	2547.17*106
سختی خمشی محور قوی (EI) _{max}	(cm ⁴)	3885*106

در ساخت مدل‌ها، اتصالات تیر به ستون دیوار برشی و اتصال ستون قاب پیرامونی به تکیه‌گاه بصورت گیردار و اتصال ستون قاب پیرامونی به تیر فوقانی با استفاده از نبشی‌های زیرسری و بالاسری و یک ورق تودلی بصورت مفصلی ساخته شدند. برای شبیه‌سازی دقیق رفتار اتصالات و جوش‌ها در سازه، اندرکنش بین تیرها و دیوار همچنین ستون‌ها و دیوار، بصورت اتصال گره به گره و کاملاً گیردار در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی نیز در انتهای پایین ستون بصورت گیردار بوده و همچنین مانند مدل آزمایشگاهی از تغییر مکان تیر فوقانی در جهت عمود بر صفحه دیوار برشی جلوگیری شده است. برای مش بندی از ۶۱۶ المان مربعی دوبرعی درجه اول در مدل استفاده شده است. طیف تغییر مکان نیز بصورت شرایط مرزی به ستون فوقانی اعمال شده و طی ۲۰ ثانیه تحلیل دینامیکی، خروجی‌های مورد نظر در سازه از نرم‌افزار استخراج شد. در این تحلیل به مقدار برش پایه تجمعی در انتهای ستون‌ها برای ترسیم نمودار هیستریزس سازه نیاز است. برای این منظور دو نقطه انتهای پایین ستون‌ها بصورت یک گروه نقاط تعریف شده و مقدار برش پایه برای این گروه از نقاط استخراج خواهند شد. تغییر شکل سازه و کانتور تنش میزس در شکل ۳ مشخص می‌باشد. نمودار تغییر مکان در برابر برش پایه پس از تحلیل از نرم‌افزار استخراج شد. این نمودار که بیانگر رفتار هیستریزس سازه می‌باشد بصورت شکل ۴ است که با خطوط مقطع نشان داده شده اند. با

مقایسه نمودار هیستریزس بدست آمده از مدل شبیه سازی شده با مدل آزمایشگاهی، مطابقت خوبی بین دو مدل مشاهده می شود. مقدار ظرفیت باربری برشی در مدل المان محدود در جهت مثبت نمودار ظرفیت باربری ۲۱۱۶/۲ کیلونیوتن می باشد که به میزان ۲۸/۴۶ کیلونیوتن معادل ۱/۳۶ درصد بیشتر از مقدار ظرفیت باربری نمونه آزمایشگاهی است. این مقدار در جهت منفی نمودار ظرفیت باربری ۲۱۲۴/۶۶ کیلونیوتن می باشد که به میزان ۲۰/۳ کیلونیوتن معادل ۰/۹۴ درصد کمتر از مقدار ظرفیت باربری نمونه آزمایشگاهی است.



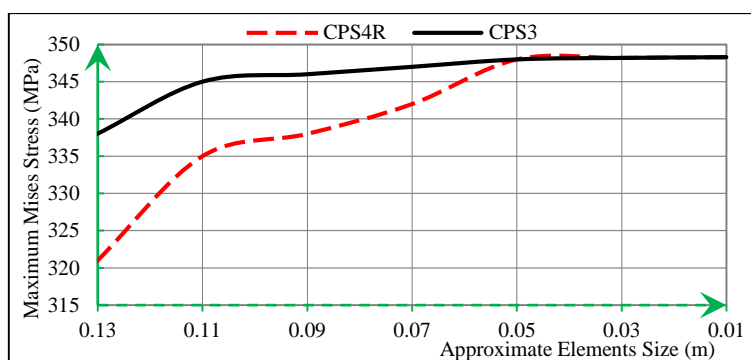
شکل ۳. مدل تغییر شکل یافته دیوار برشی فولادی در نرم افزار تحت بار سیکلی



شکل ۴. مقایسه نمودارهای هیستریزس مدل آزمایشگاهی و مدل عددی

همچنین اختلاف تغییر مکان قائم متناظر با بار حداکثر در جهت مثبت بین نمونه آزمایشگاهی و مدل المان محدود حدود ۰/۰۴۶ سانتیمتر معادل ۰/۷ درصد می باشد که اختلاف ناچیز بین نتایج، صحت مدل سازی را تأیید می کند. برای دست یافتن به تعداد مش های بهینه مورد استفاده در هر کدام از بخش های مدل و کاهش دادن درصد خطای حاصل از مش بندی بزرگ و جلوگیری از صرف زمان بسیار زیاد تحلیل حاصل از مش بندی بسیار ریز، تحلیل همگرایی مش بندی صورت گرفته است. برای این منظور ۷ مقدار مختلف برای تعداد مش ها در نظر گرفته شده و همچنین تاثیر نوع المان بر پاسخ سازه شامل تنش ماکزیمم مورد ارزیابی قرار می گیرد. تحت یک بارگذاری ساده رفت و برگشتی با کنترل تغییر مکان و با حداکثر تغییر مکان ۴ سانتیمتر در یک سیکل برای هر کدام از انواع مش بندی ها، نمودار تاریخچه زمانی تنش میزس استخراج شد و مقدار ماکزیمم تنش در این چرخه بعنوان شاخص مقایسه برای آنالیز همگرایی در نظر گرفته شد که در شکل ۵ مشاهده می شود. همانطور که از نمودار شکل ۵ مشخص است، میزان حساسیت سیستم در پاسخ ماکزیمم تنش میزس نسبت به ابعاد المان ها (نه تعداد آنها) رسم شده است. در نرم افزار آباکوس می توان ابعاد تقریبی برای المان ها تعریف کرد و نرم افزار با توجه به اندازه مشخص شده و هندسه مساله بطور اتوماتیک مش بندی بهینه سازه را ایجاد می کند. در نمودار فوق دو حالت مش بندی مختلف رسم شده که بعد افقی نمودار بیانگر طول تقریبی المان ها می باشد. در نمودار فوق دو حالت مش بندی مختلف رسم شده که بعد افقی نمودار بیانگر طول تقریبی المان ها می باشد. با توجه به نمودار در المان های مربعی با اندازه تقریبی ۱۳ سانتیمتر (۹۶۱ المان) حداکثر تنش به ۳۲۱ مگاپاسکال رسیده است که تفاوت قابل توجهی با مقدار بدست آمده از المان های هرمی دارد. دقت شود بعد افقی نمودار مربوط به اندازه المان ها از چپ به راست کاهش می یابد. دلیل این شیوه رسم، وضوح بیشتر و درک آسان تر نمودار می باشد. با کاهش اندازه المان ها

پاسخ سازه در هر دو شیوه مش بندی (مکعبی و هرمی) در حال رسیدن به یک مقدار ثابت است. تا جاییکه با کاهش اندازه المان‌ها به ۵ سانتیمتر، دو نمودار با یکدیگر برخورد کرده و به مقدار ۳۴۸ مگاپاسکال می‌رسند. پس از آن، افزایش تعداد المان تاثیر چندانی در پاسخ سازه ایفا نمی‌کند و همچنان در مقدار ۳۴۸ مگاپاسکال باقی خواهد ماند که به این حالت، همگرا شدن سیستم گفته می‌شود. قابل توجه است حساسیت سیستم نسبت به المان مکعبی بیشتر از المان هرمی بوده و تغییر در تعداد المان در روش مش بندی مکعبی می‌تواند تفاوت چشم گیری در پاسخ سازه ایجاد کند. از آنجاییکه سازه در اندازه المان ۵ سانتیمتر همگرا شد و از طرفی تعداد المان‌های هرمی در این اندازه برابر ۱۲۸۰۰ عدد و تعداد المان‌های مکعبی برابر ۶۴۰۰ عدد می‌باشد، انتخاب سیستم مش بندی مکعبی می‌تواند تاثیر بسزایی در کاهش زمان تحلیل توسط نرم افزار داشته باشد. لذا در این پژوهش از المان مربعی چهار وجهی چهار نقطه‌ای به ابعاد ۵ سانتیمتر استفاده خواهد شد.



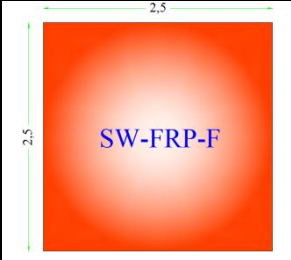
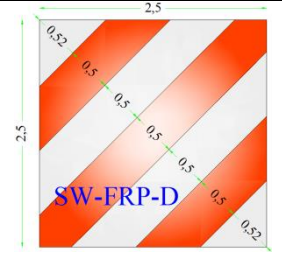
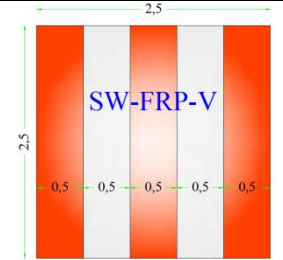
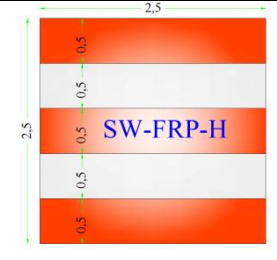
شکل ۵. نمودار پاسخ حساسیت سیستم نسبت به نوع و ابعاد المان‌ها

۴- نتایج حاصل از تحلیل شبه استاتیکی مدل‌ها

۴-۱- معرفی مدل‌ها

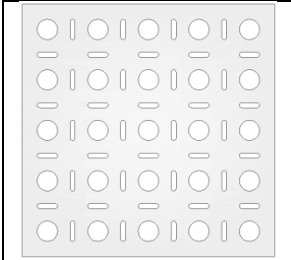
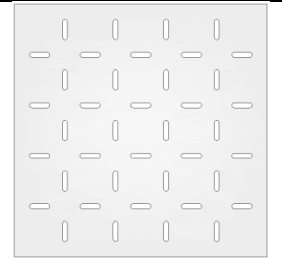
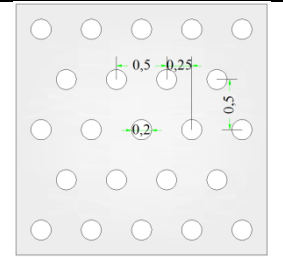
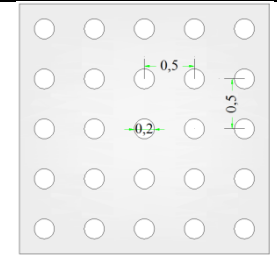
برای در دست داشتن پاسخ جامعی از رفتار دیوارهای برشی فولادی تقویت شده، چهار مدل مختلف نصب صفحات FRP بر روی صفحه دیواربرشی فولادی ارائه شده و مورد بحث قرار گرفته است. برای افزایش مقاومت سازه و بهبود عملکرد آن، از صفحات FRP با عرض ۵۰ سانتیمتر و ضخامت ۱/۴ میلیمتر استفاده خواهد شد. نامگذاری مدل‌ها نیز به این صورت بوده که برای مدل با نصب FRP بصورت افقی نام SW-FRP-H انتخاب شده است. حروف SW مخفف Shear Wall به معنی دیواربرشی و FRP بیانگر تقویت توسط این صفحات و حرف H مخفف Horizontal و به معنی افقی است. برای این بخش در تقویت عمودی از حرف V مخفف Vertical به معنی عمودی، از حرف D مخفف Diagonal به معنی قطری و از حرف F مخفف Full به معنی پوشش کامل استفاده شده است.

جدول ۳. مشخصات مدل های تقویت شده با FRP

			
SW-FRP-F (100%)	SW-FRP-D (50%)	SW-FRP-V (60%)	SW-FRP-H (60%)

عدد داخل پرانتز در کنار نام هر مدل در جدول ۳ بیانگر درصد پوشش صفحه دیواربرشی توسط FRP می باشد. لازم به ذکر است که در قسمت نتایج بجای "FRP" از "CFRP" و "GFRP" استفاده می شود که به ترتیب نشان دهنده الیاف پلیمری تقویت شده با کربن و شیشه می باشند.

جدول ۴. مشخصات مدل های دیواربرشی به همراه سوراخ و شیار

			
SW-Groove4 (18.64%)	SW-Groove3 (6.08%)	SW-Groove2 (11.56%)	SW-Groove1 (12.56%)

عدد داخل پرانتز در کنار نام هر مدل در جدول بیانگر درصد مساحت شیار و سوراخ ایجاد شده نسبت به مساحت کل صفحه دیواربرشی می باشد. در بحث سوراخ درون دیوار برشی، مهم ترین پارامتری که می بایست مدنظر قرار گرفته شود، جلوگیری از ایجاد تمرکز تنش در قسمت های مختلف صفحه فولادی می باشد. احتمال وقوع این تمرکز تنش در گوشه های تیز بسیار زیاد می باشد. لذا در پژوهش حاضر سعی شده تا از ایجاد لبه های تیز در سوراخ ها خودداری شود. برای این منظور دو نوع سوراخ دایره ای و شیار لوبیایی شکل در صفحه فولادی دیوار برشی ایجاد شده است. لازم به ذکر است برای رسم نمودار هیستریزس می بایست با اعمال جابجایی به تیر فوقانی سازه، میزان عکس العمل تکیه گاهی سازه را در مقابل این تغییر مکان بدست آورد. در نرم افزار آباکوس نمی توان بصورت مستقیم به نمودار هیستریزس سازه دست یافت. برای این منظور تمامی نقاط گرهی واقع بر روی قطعه تیر پایینی سازه که بصورت گیردار در نظر گرفته شده بصورت یک گروه تعریف می شوند و نمودار تاریخچه زمانی عکس العمل تکیه گاهی بصورت تجمعی برای این نقاط رسم خواهد شد. با حذف پارامتر زمان از نمودارهای تاریخچه زمانی طیف تغییر مکان اعمال شده و عکس العمل تکیه گاهی تیر فوقانی و رسم نمودار تغییر مکان در برابر عکس-العمل، می توان دیگرام هیستریزس را برای سازه رسم کرد.

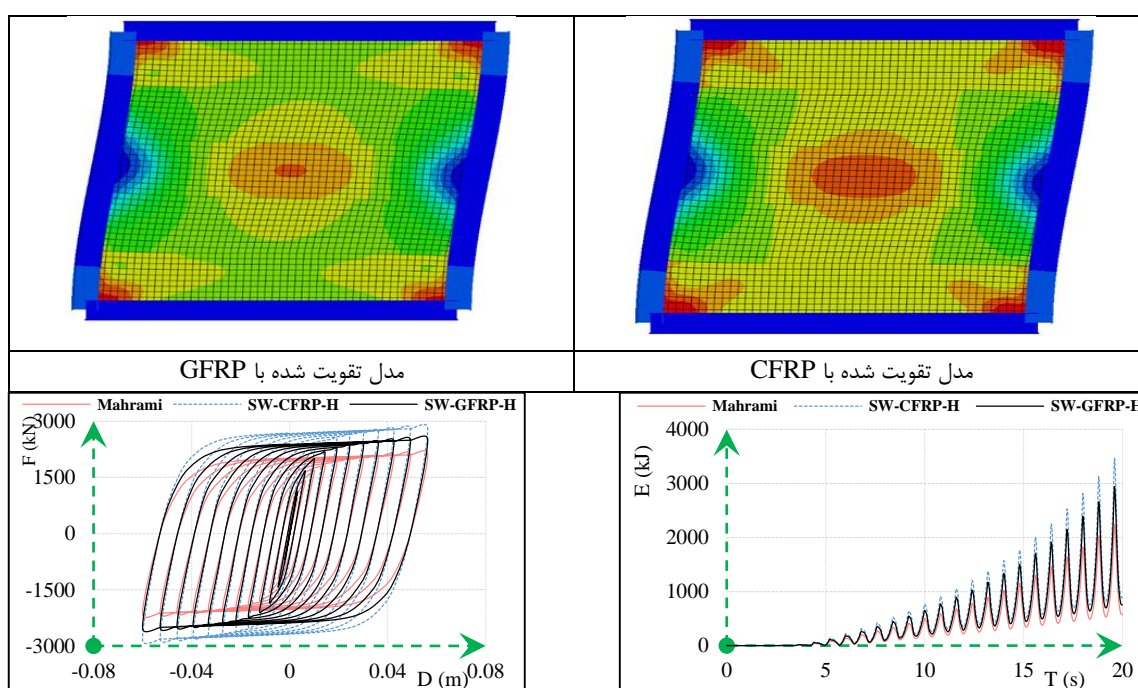
۲-۴- نتایج تحلیل مدل SW-FRP-H

چیدمان FRP بصورت لایه های ۵۰ سانتیمتری افقی در دو طرف با فاصله آکس به آکس ۱ متر بوده که نمودار هیستریزس آن در شکل ۶ ارائه شده است. نیروی عکس العمل تکیه گاهی مدل SW-CFRP-H حداکثر ۲۵۱۴/۵۵ کیلونیوتن بوده و باعث افزایش چشمگیر ۶۹۸/۳۴۶ کیلونیوتن معادل ۳۳ درصد در مقدار این پارامتر نسبت به حالت بدون استفاده از FRP در دیواربرشی شده است. همچنین این مقدار پس از استفاده از الیاف شیشه و در مدل SW-GFRP-H با ۱۸/۳۷ درصد رشد به ۲۵۰۴/۹۵ کیلونیوتن صعود کرده

است. پس از گذشت ۲۰ ثانیه و در سیکل آخر بارگذاری رفت و برگشتی، نمودار تاریخچه زمانی انرژی مدل SW-CFRP-H مقدار حداکثر ۳۴۵۹/۲ کیلوژول را نشان داده که تقریباً ۵۴/۲ درصد از نمونه آزمایشگاهی بیشتر است. مدل SW-GFRP-H تقویت شده با الیاف شیشه نیز با مقدار ۶۹۷ کیلوژول در جذب انرژی به ۲۹۴۰/۳۲ کیلوژول رسیده که معادل ۳۱/۰۷ درصد بوده است. میزان تنش‌های ایجاد شده در طرح با الگوی بسیار مناسبی در کل سطح دیواربرشی پخش شده‌اند و باعث کم‌انرژی‌تر شدن نقاط صفحه فولادی شده است. این امر باعث می‌شود تا حداکثر استفاده از تمامی فولاد مورد استفاده صورت پذیرد. کانتور پلاستیسیته نیز نشان می‌دهد بسیاری از قسمت‌های دیواربرشی به ناحیه غیرخطی شدن مصالح برسند (شکل ۶).

۳-۴ نتایج تحلیل مدل SW-FRP-V

مشابه با طرح قبل، در این طرح نیز چیدمان FRP بصورت لایه‌های ۵۰ سانتیمتری افقی در دو طرف با فاصله آکس به آکس ۱ متر نصب شده، با این تفاوت که بجای استفاده از ورق‌های تقویت در جهت افقی، از آنها در جهت قائم استفاده خواهد شد.



شکل ۶. کانتور تنش، رفتار هیستریزس و جذب انرژی مدل SW-(C&G)FRP-H

ظرفیت باربری حداکثر این مدل با الیاف کربن و با نام SW-CFRP-V به ۲۴۴۲/۰۹ کیلونیوتن رسیده که ۱۳/۲ درصد از مدل محرمی بیشتر بوده است. همچنین مدل تقویت شده با الیاف شیشه با نام SW-GFRP-V با ۶/۱۶۸ درصد رشد نسبت به مدل آزمایشگاهی، ظرفیت باربری حدود ۲۲۴۶/۷۳ کیلونیوتن را نشان داده است. انرژی جذب شده در این سیستم پس از اعمال سیکل‌های رفت و برگشت با استفاده از الیاف کربن و در مدل SW-CFRP-V به ۳۰۰۸/۲۹ کیلوژول رسید که این مقدار در حدود ۷۶۴/۹۷۲ کیلوژول با مقدار آزمایشگاهی فاصله داشته و ۳۴/۱ درصد از آن بیشتر بوده است. همچنین در مدل SW-GFRP-V با ۱۸ درصد اختلاف به بیشینه مقدار ۲۶۴۷/۳ کیلوژول رسیده است. تنش‌ها از الگوی پخش نسبتاً مناسبی برخوردار بوده‌اند اما هنوز از ظرفیت کامل دیواربرشی به نحو احسن استفاده نشده است. زیرا هیچ بخشی از قسمت‌های داخلی آن به ناحیه پلاستیک نرسیده است (شکل ۷).

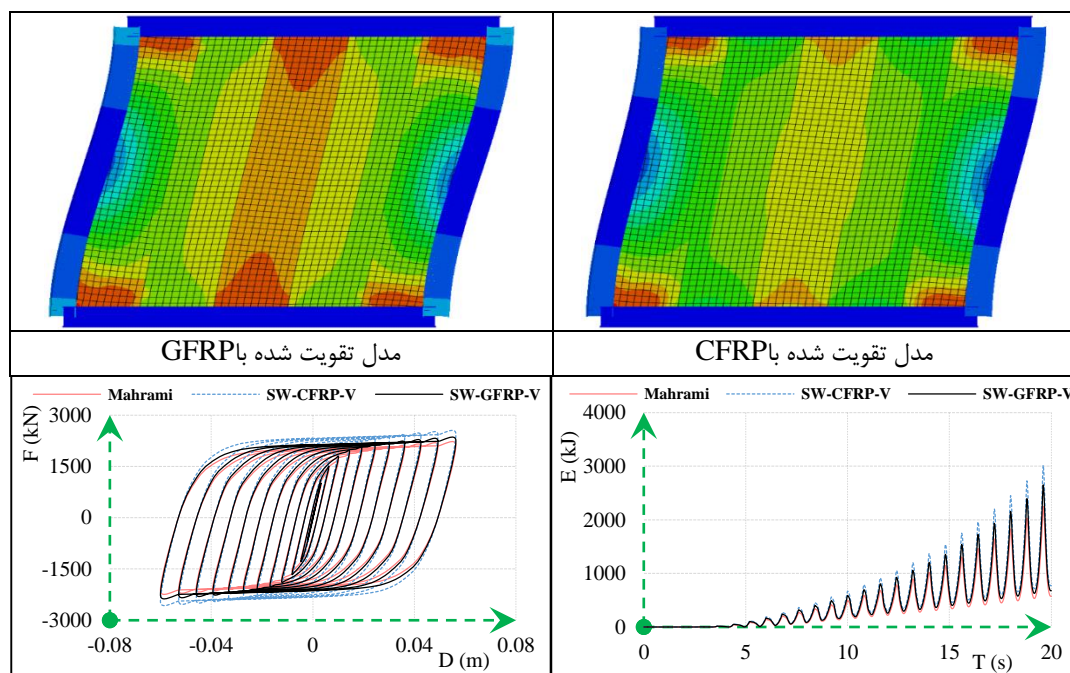
۴-۴ نتایج تحلیل مدل SW-FRP-D

ایجاد ورق‌های تقویت بصورت قطری باعث شد تا در مدل SW-CFRP-D که از الیاف کربن تشکیل شده‌اند، ظرفیت باربری ۲۳۹۵/۵۴ کیلونیوتن رخ دهد و در مدل SW-GFRP-D با الیاف شیشه ظرفیت باربری ۲۲۲۷/۸۵ کیلونیوتن پدیدار شد. در سیکل آخر

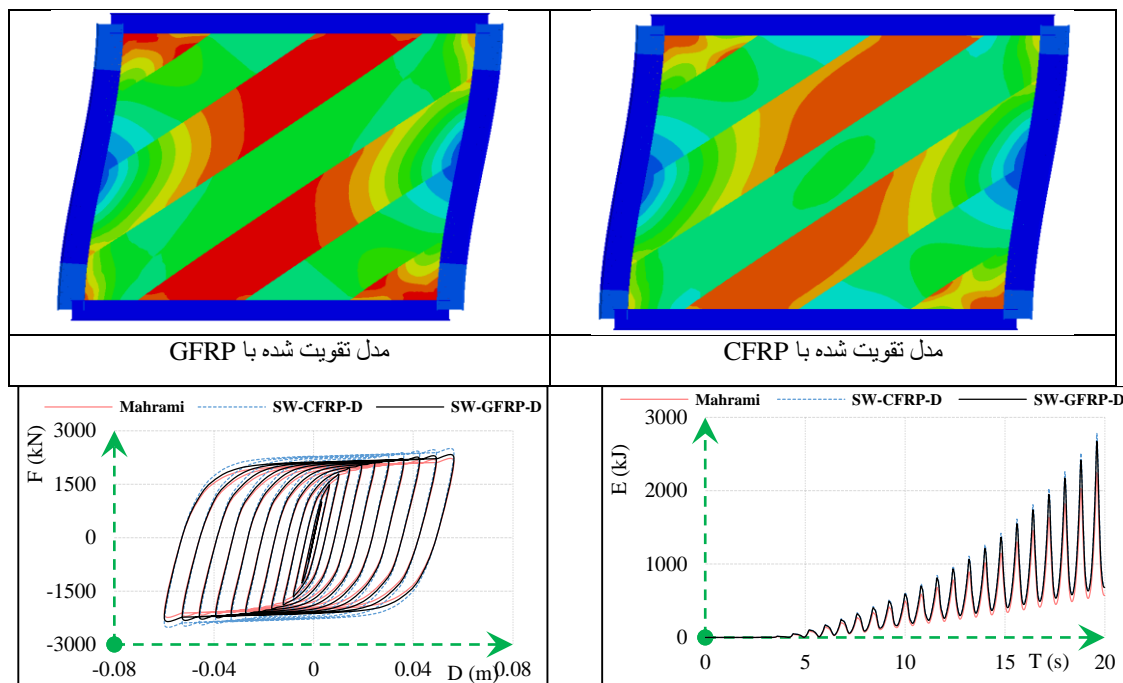
بارگذاری رفت و برگشتی در مدل تقویت قطری SW-CFRP-D، نمودار تاریخچه زمانی انرژی مقدار حداکثر ۲۷۷۹/۴۷ کیلوژول را نشان داده که تقریباً ۲۳/۹ درصد از نمونه شاهد بیشتر بوده است. همچنین در مدل تقویت قطری با الیاف شیشه SW-GFRP-D، در نمودار تاریخچه زمانی انرژی مقدار حداکثر ۲۶۶۸/۲۹ کیلوژول مشاهده شده است که نسبت به مدل آزمایشگاهی ۱۸/۹۴ درصد بیشتر بوده است. عدم وجود مقاومت فشاری در ورق های تقویت در این مدل در سیکل های برگشتی باعث شده تا برخی نواحی تنش بسیار زیادی را متحمل شوند. این امر بیانگر عملکرد ضعیف این طرح در پخش تنش می‌باشد (شکل ۸).

۴-۵- نتایج تحلیل مدل SW-FRP-F

پوشاندن تمامی سطح دیواربرشی در دو طرف توسط ورق های تقویت با الیاف کربن مدل SW-CFRP-F را سبب شده که در آن ظرفیت باربری سیستم نسبت به مدل محرمی ۶۲۸/۵۱۱ کیلونیوتن معادل ۲۹/۷ درصد افزایش داشته و به مقدار ۲۷۴۴/۷۱ کیلونیوتن رسیده است. همچنین در اثر استفاده از همین مدل و با الیاف شیشه ای ظرفیت باربری سیستم نسبت به مدل محرمی ۲۹۹/۱۴ کیلونیوتن معادل ۱۴/۱۳ درصد افزایش داشته و به مقدار ۲۲۲۷/۸۵ کیلونیوتن رسیده است. الگوی جذب انرژی در مدل‌ها مشابه به یکدیگر است. چراکه طیف یکسانی به تمامی مدل‌ها اعمال شده است. اما بیشینه مقدار این انرژی با استفاده از مدل‌های متفاوت با یکدیگر فرق خواهد داشت. در طرح SW-CFRP-F بیشینه مقدار نمودار انرژی به ۳۳۰۴/۴۱ کیلوژول رسیده است. این مقدار با میزان انرژی جذب شده در مدل محرمی به اندازه ۴۷/۳ درصد متفاوت و از آن بیشتر بوده است.

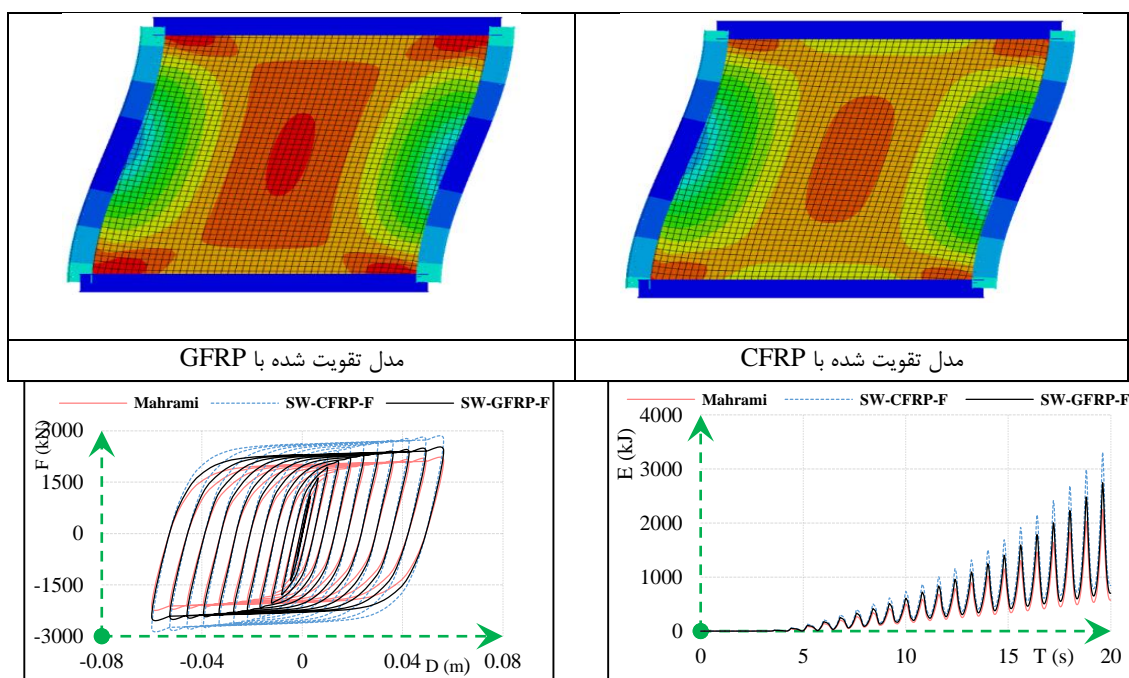


شکل ۷. کانتور تنش، رفتار هیستریزس و جذب انرژی مدل SW-(C&G)FRP-V



شکل ۸. کانتور تنش، رفتار هیستریزیس و جذب انرژی مدل SW-(C&G)FRP-D

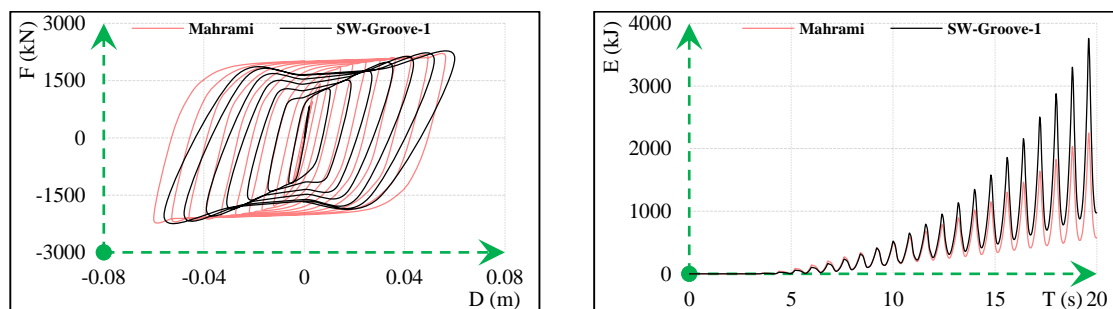
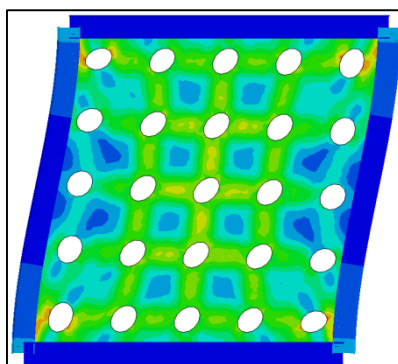
همچنین در مدل SW-GFRP-F بیشینه مقدار نمودار انرژی به ۲۷۴۲/۶۶ کیلوژول رسیده است. این مقدار با میزان انرژی جذب شده در مدل محرمی به اندازه ۲۲/۲۵ درصد معادل ۴۹۹/۳۴ کیلوژول بیشتر بوده است. می‌توان گفت تنش ایجاد شده تقریباً بطور یکنواخت و مناسبی مشابه با نمونه آزمایشگاهی در تمامی سطح صفحه دیوار برشی پخش شده است اما تمرکز تنش در نواحی اتصال تیر و ستون‌ها به یکدیگر و مرکز، از دیگر مشکلات این مدل بنظر می‌رسد (شکل ۹).



شکل ۹. کانتور تنش، رفتار هیستریزیس و جذب انرژی مدل SW-(C&G)FRP-F

۴-۶- نتایج تحلیل مدل SW-Groove-1

طرح شماره یک با استفاده از چیدمان دایره به این صورت که شبکه‌ای مربعی و منظم از دایره‌ها به فاصله آکس به آکس ۵۰ سانتیمتر قرار داده شده، ایجاد شده است. رفتار هیستریزیس این طرح بسیار نزدیک به مدل بدون سوراخ بوده است. در اولین سیکل از تغییر مکان، عملکرد دیواربرشی بصورت خطی بوده و با باربرداری، میزان برش پایه تقریباً به صفر رسیده و هیچ کرنش پسماندی در آن باقی نمانده. با ادامه چرخه رفت و برگشت و در سیکل دوم تا سوم جاری شدن فولاد مشاهده شده و از سیکل سوم تا هفتم، فولاد دیواربرشی در ناحیه سخت‌شدگی مجدد قرار خواهد گرفت. در دو سیکل آخر برش پایه ایجاد شده در مدل به مقدار ثابتی رسیده و نشان‌دهنده ظرفیت باربری سازه خواهد بود. میزان ظرفیت باربری حداکثر سیستم در این حالت، $2075/98$ کیلونیوتن بوده است. این مقدار ظرفیت باربری تنها به اندازه $40/2$ کیلونیوتن معادل $1/9$ درصد از ظرفیت باربری نمونه آزمایشگاهی کمتر بوده است. بدیهی است هرچه این اختلاف کمتر باشد، سیستم عملکرد بهتری از خود نشان داده است. بسیار مطلوبست که بتوان طرحی از سوراخ در صفحه فولادی دیواربرشی ارائه کرد بدون اینکه ظرفیت باربری مدل کاهش زیادی داشته باشد. این اتفاق در این مدل مشاهده شده است. در بحث جذب انرژی نیز مدل شیاری یک پاسخ بسیار مناسبی را ارائه داده است، چراکه انرژی مستهلک شده نیز در این سیستم تفاوت چشمگیری با سایر مدل‌ها داشته است. انرژی جذب شده در دیواربرشی به‌مراه سوراخ‌های دایروی منظم پس از 19 ثانیه به حداکثر مقدار چشمگیر خود یعنی $3755/31$ کیلوژول صعود پیدا کرده و $1511/99$ کیلوژول معادل $67/33$ درصد بیشتر از نمونه آزمایشگاهی بوده است که نتیجه بسیار مطلوبی در بخش جذب انرژی بوده است. بخش‌هایی که در نزدیکی اتصال تیرها به ستونها می‌باشد تحت تنش بیشتری قرار گرفته است. بخش‌های ذکر شده با رنگ تقریباً قرمز در شکل مشخص شده‌اند. همچنین ایجاد تنش زیاد، باعث می‌شود که این بخش‌ها به ناحیه عملکرد غیرخطی مصالح برسند. قسمت‌هایی که با رنگ نارنجی یا قرمز در نشان داده شده‌اند در ناحیه پلاستیک قرار دارند (شکل ۱۰).



شکل ۶. کانتور تنش، رفتار هیستریزیس و جذب انرژی مدل SW-Groove-1

۴-۷- نتایج تحلیل مدل SW-Groove-2

هندسه طرح شیاری شماره دو مشابه با طرح شماره یک می‌باشد با این تفاوت که دایره‌ها در سطرها یک در میان در طرح شماره دو به مقدار 25 سانتیمتر شیف‌ت داده شده‌اند. اعمال تغییر مکان به سیستم طی 20 ثانیه با گام زمانی $0/5$ ثانیه باعث شده تا طرح شماره دو رفتاری مشابه با نمونه آزمایشگاهی از خود نشان دهد. با این تفاوت که ظرفیت باربری این مدل به مقدار $419/01$ کیلونیوتن

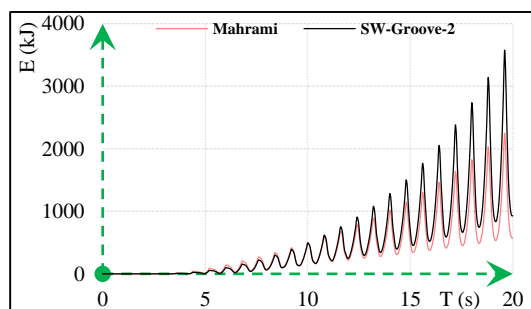
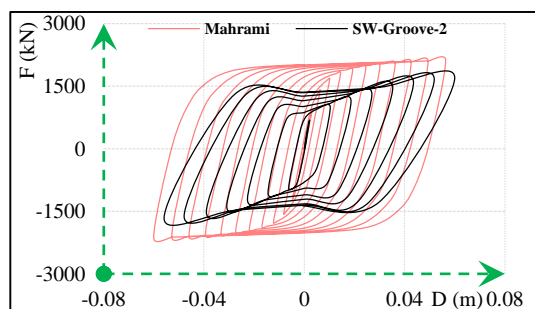
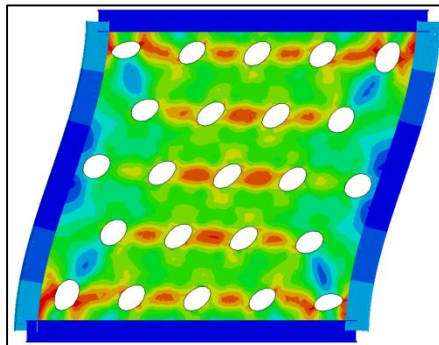
معادل ۱۹/۸ درصد از نمونه محرمی کمتر بوده و در حداکثر حالت خود به ۱۶۹۷/۱۹ کیلونیوتن رسیده است. انرژی جذب شده توسط دیوار برشی در این طرح به میزان ۳۵۷۱/۳۶ کیلوژول بوده که در حدود ۱۳۲۸/۰۴ معادل ۵۹/۱۹ درصد با انرژی جذب شده در نمونه شاهد اختلاف داشته و از آن بیشتر بوده است. با توجه به کانتورتنش این نمونه عملکرد مناسبی در پخش تنش از خود نشان داده است و باعث شده استفاده مفیدی از تمامی فولاد مصرفی در دیواربرشی صورت پذیرد (شکل ۱۱).

۸-۴ نتایج تحلیل مدل SW-Groove-3

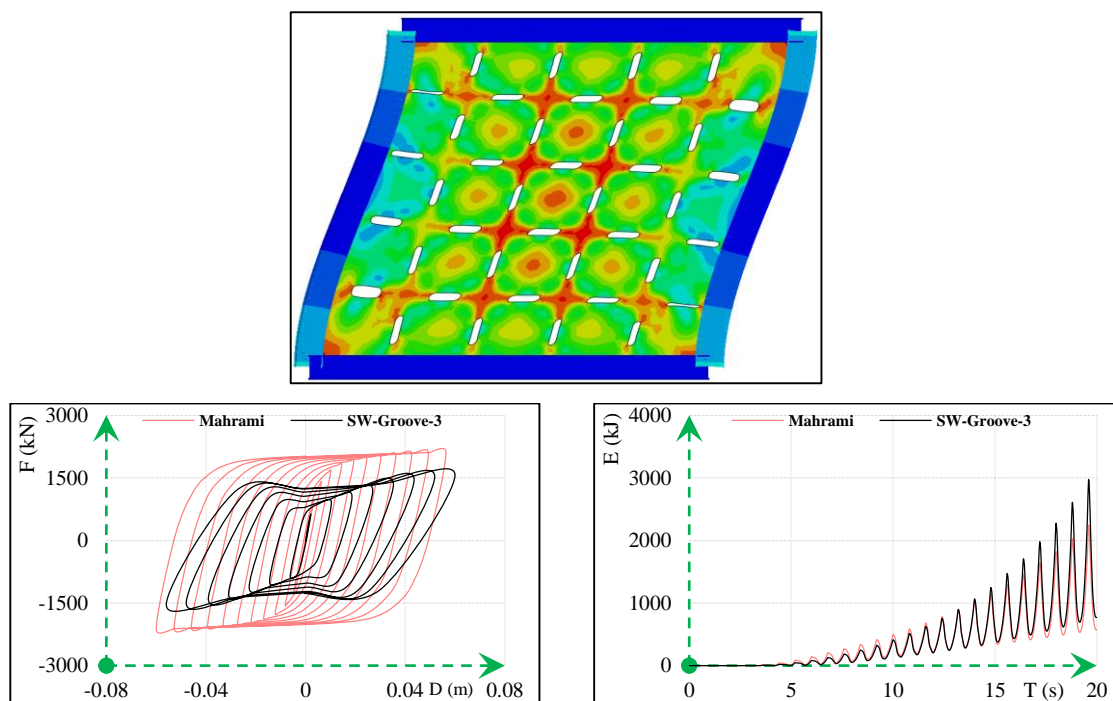
با قرار دادن شیار بر روی صفحه فولادی طرح شماره سه ایجاد شد. بیشینه مقدار برش پایه این مدل که بیانگر ظرفیت باربری است برابر ۱۵۶۸/۱ کیلونیوتن بوده و ۲۵/۹ درصد متفاوت با مدل آزمایشگاهی بوده است. انرژی جذب شده در این سیستم پس از اعمال سیکل های رفت و برگشت با ۳۲/۲۹ درصد اختلاف، حدود ۷۲۴/۵۹ کیلوژول نسبت به مدل محرمی بیشتر بوده و به بیشینه مقدار ۲۹۶۷/۹۱ کیلوژول رسیده است. با توجه به کانتورتنش در **Error! Reference source not found.** تنش های وارده تقریباً در تمامی سطح دیوار برشی پخش شده اند اما نقاط اتصال شیارها با رنگ قرمز نشان داده شده است که بیانگر تمرکز تنش در این نقاط خاص می باشد. همین تمرکز تنش باعث ضعف عملکرد سیستم خواهد بود و سبب می شود تا زودتر به ناحیه خرابی برسد.

۹-۴ نتایج تحلیل مدل SW-Groove-4

طرح چهارم با رویهم گذاری مدل های یک و سه بوجود آمده است. به این صورت که دایره ها و شیارهای طرح یک و سه بطور همزمان بر روی صفحه دیواربرشی ایجاد شده اند. میزان برش پایه ۱۸۴۹/۵۶ کیلونیوتن در آن ایجاد شده است. این مقدار ۱۲/۶ درصد معادل ۲۶۶/۶۴ کیلونیوتن از مدل آزمایشگاهی کمتر بوده است. این مدل پس از مدل شیارهای شماره یک بهترین عملکرد را در رفتار هیستریزیس از خود نشان داده است. در آخرین دوره تغییر مکان سازه، میزان انرژی جذب شده در دیواربرشی، افزایش بسیار زیادی داشته و به مقدار ۳۶۶۱/۱ کیلوژول

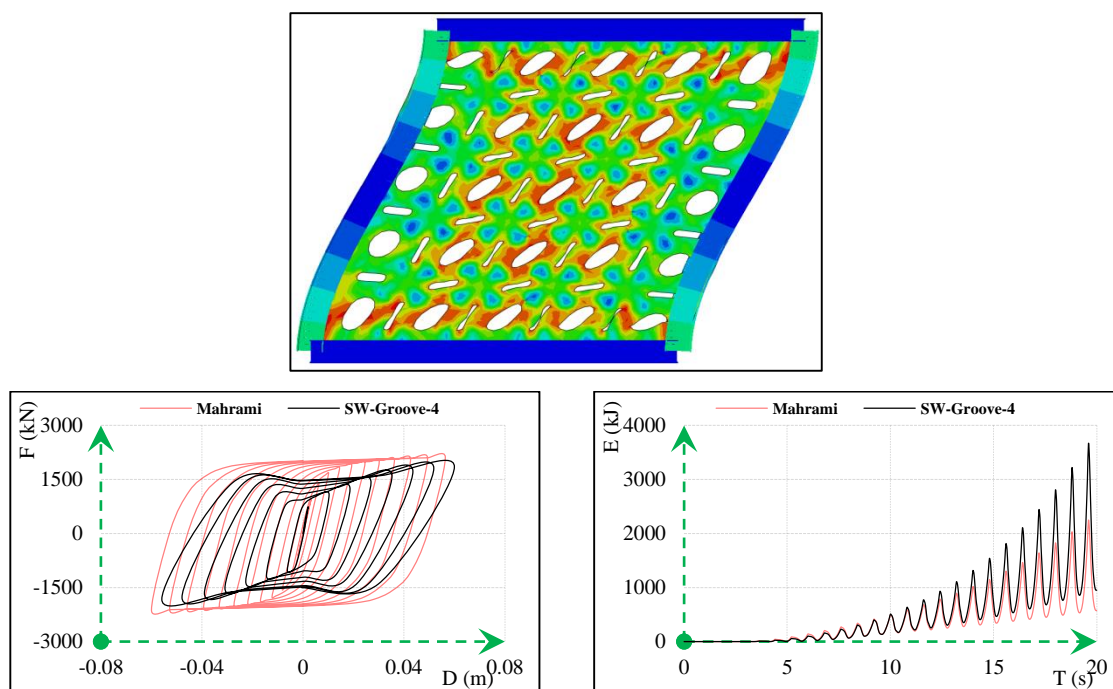


شکل ۷. کانتورتنش، رفتار هیستریزیس و جذب انرژی مدل SW-Groove-2



شکل ۸. کانتور تنش، رفتار هیستریزیس و جذب انرژی مدل SW-Groove-3

صعود پیدا کرده است. این عدد ۶۳/۱۹ درصد از انرژی جذب شده در سیستم بدون سوراخ بیشتر بوده است که مقدار بسیار مطلوبی می‌باشد. میزان تنش‌های ایجاد شده در طرح چهار با الگوی بسیار مناسبی در کل سطح دیواربرشی پخش شده‌اند و باعث کماتش اکثر نقاط صفحه فولادی شده است. این امر باعث می‌شود تا حداکثر استفاده از تمامی فولاد مورد استفاده صورت پذیرد. کانتور تنش در شکل ۱۳ نیز نشان می‌دهد بسیاری از قسمت‌های دیواربرشی به ناحیه غیرخطی شدن مصالح می‌رسند که حالت مطلوبی است. در ادامه تمامی ظرفیت باربری‌ها و انرژی‌های ذکر شده در کنار یکدیگر قرار داده شده و با هم مقایسه می‌شوند و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

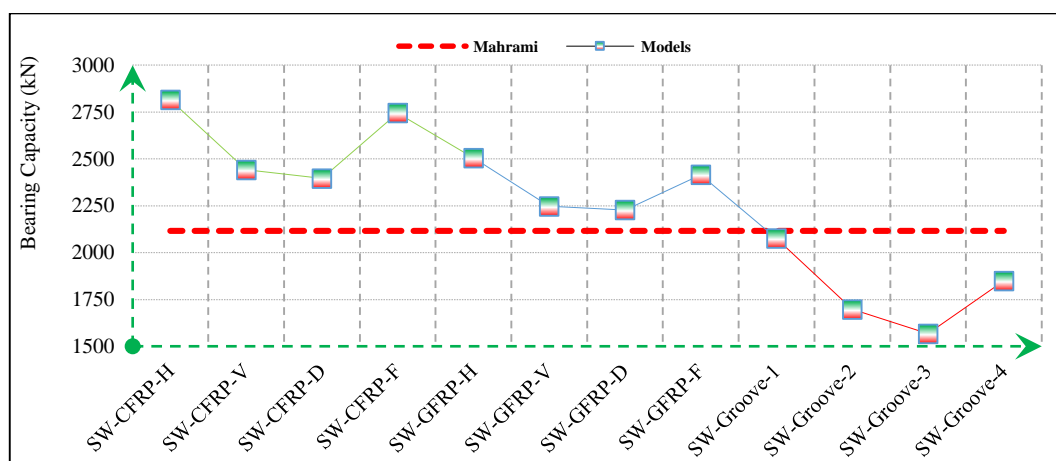


شکل ۹. کانتور تنش، رفتار هیستریزیس و جذب انرژی مدل SW-Groove-4

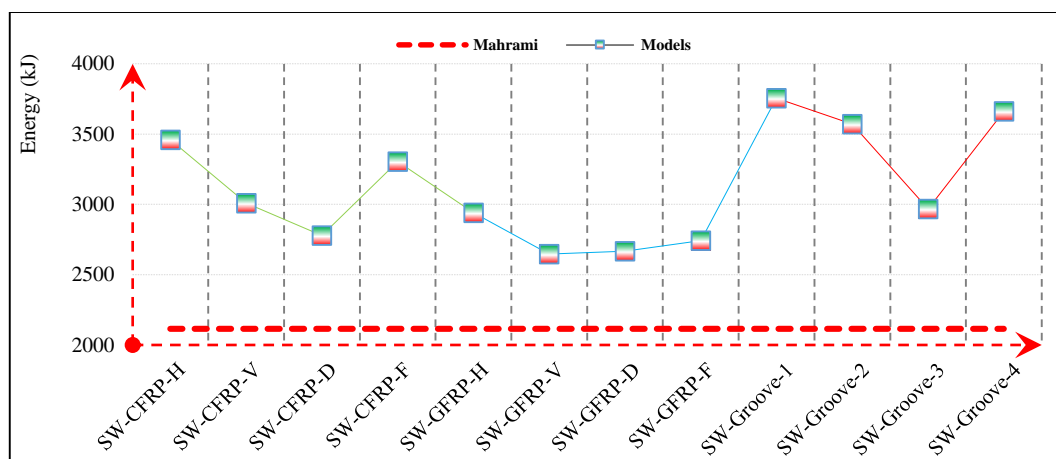
۵- آنالیز دینامیکی بهترین مدل تقویت شده با ورق پلیمری تقویت شده و شیاری

۵-۱- انتخاب بهترین مدل ها

در نمودار شکل ۱۴۱۰ میزان ظرفیت باربری هر مدل در برابر شماره طرح رسم شده است. مقادیر ارائه شده بیانگر ظرفیت باربری برشی سازه در مقایسه با طرح آزمایشگاهی محرمی می‌باشند. اولین نکته ای که در این نمودار به چشم می‌خورد، افزایش میزان ظرفیت باربری نسبت به مدل آزمایشگاهی، در تمامی مدل‌هایی است که در آنها از تقویت FRP استفاده شده است. نکته بسیار جالب و حائز اهمیت دیگر در مورد نمودار بیشینه ظرفیت باربری سازه این است که استفاده از طرح SW-CFRP-H بیشترین افزایش در میزان ظرفیت باربری را به همراه داشته است. این مدل مطلوب، حتی از حالتی که تمامی سطح دیواربرشی از ورق تقویت پوشانده شود نیز عملکرد بهتری داشته است. علاوه بر آن مشاهده می‌شود که در تمامی طرح‌های نصب FRP، استفاده از الیاف کربن تاثیر بهتری در افزایش ظرفیت باربری از خود نشان داده‌اند. باز هم مدل SW-CFRP-H مشابه با قبل پاسخ بهتری نسبت به دیگر طرح‌های الیاف شیشه از خود نشان داد. در مدل‌های شیاری، طرح شماره ۱ کمترین افت را نسبت به دیگر طرح‌ها از خود نشان داد. ضعیف‌ترین عملکرد نیز مختص به طرح شیاری شماره ۳ بوده که در آن فقط از شیارهای بیضوی استفاده شده و هیچگونه سوراخ دایروی ندارد. انتخاب سازه موردنظر در هر سیستم اجرایی، بستگی شدیدی به شکل پذیر بودن یا نبودن سازه و بدنیال آن میزان جذب انرژی دارد. استفاده از تقویت‌های FRP در افزایش مقاومت نقش اساسی داشته و بالطبع سطح جذب انرژی سازه را افزایش خواهند داد. شکل‌پذیری سازه پس از ایجاد سوراخ در صفحه دیواربرشی نیز به مقدار چشمگیری افزایش پیدا میکند و باعث می‌شود درصد بیشتری از فولاد مصرفی در سازه، در تحمل بار شرکت کند. اما انتخاب اینکه کدام طرح در چه سازه‌ای می‌تواند تاثیر بیشتری داشته باشد، مستلزم داشتن اطلاعات کافی از شرایط طراحی سازه، درخواست‌های کارفرما، شرایط محیطی و اجرایی می‌باشد. مطابق با بیشینه انرژی جذب شده در سازه مشاهده می‌شود که بیشترین میزان جذب انرژی مربوط به مدل SW-Groove-1 می‌باشد. پس از آن SW-Groove-4 قرار داشته SW-Groove-2 در رتبه سوم جای می‌گیرد. با توجه به نمودارها ارائه شده در شکل ۱۰ و شکل ۱۱، مشخص است که در بحث ظرفیت باربری، دیواربرشی تقویت شده با صفحات پلیمری تقویت شده با الیاف کربن با الگوی پوشش افقی و با فواصل ۵۰ سانتیمتر دیواربرشی که با نام SW-CFRP-H مشخص شد، بهترین پاسخ را در بر داشته‌اند. همچنین مدل شماره ۱ ایجاد سوراخ‌های دایروی بطور منظم و با فواصل ۵۰ سانتیمتر با نام SW-Groove-1 نیز بهترین پاسخ را در بخش جذب انرژی دارا بوده است.



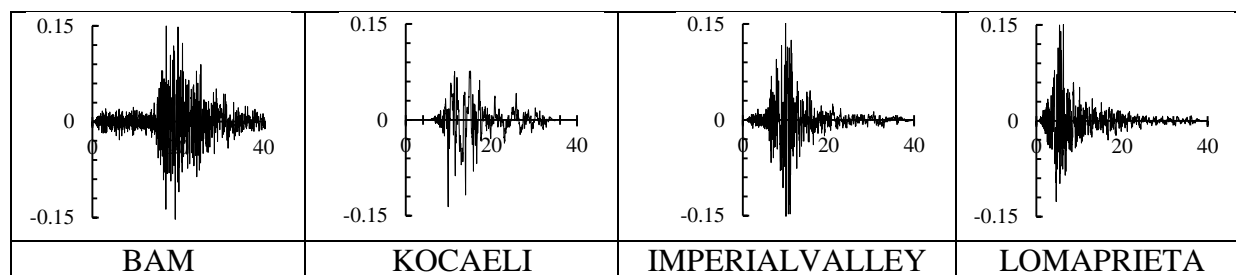
شکل ۱۰. ظرفیت برشی حداکثر سازه با استفاده از طرح‌های مختلف



شکل ۱۱. انرژی جذب شده در سازه با استفاده از طرح‌های مختلف

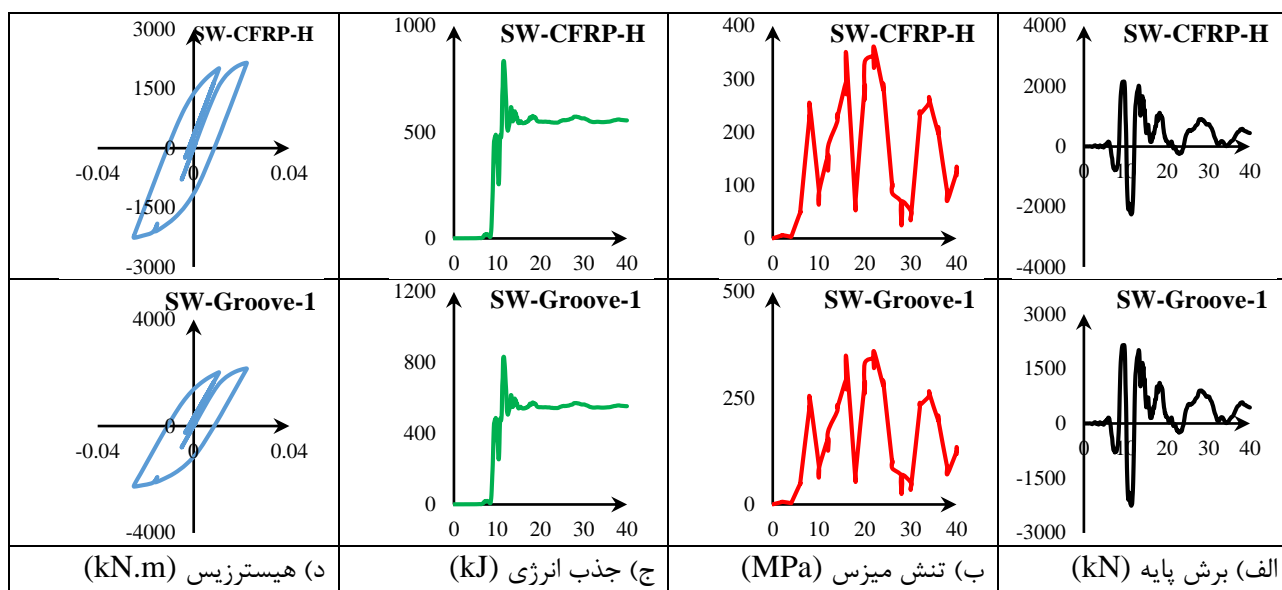
۶- تحلیل لرزه‌ای بهترین مدل‌ها

در این بخش مدل‌های SW-Groove-1 و SW-CFRP-H تحت چهار زمین لرزه مختلف با ماهیت‌های متفاوت قرار گرفته و پاسخ سیستم در برابر این زمین لرزه‌ها از جمله نمودار تاریخچه زمانی تغییرمکان، برش پایه، جذب انرژی و نمودار هیستریزس سازه مورد بحث قرار داده می‌شود. برای این منظور مشابه با قبل درجات آزادی تیر پایین دیواربرشی بسته شده و بصورت کاملاً گیردار در نظر گرفته می‌شود. برای ایجاد بار سیکلی در سازه با کنترل تغییر مکان، طیف تغییرمکان چهار زمین لرزه مختلف به تیر فوقانی طی ۴۰ ثانیه اعمال می‌شود. انتخاب و اعمال طیف زمین لرزه در مدل، از مهم‌ترین بخش‌های مدلسازی در تحلیل دینامیکی می‌باشد. طیف‌هایی که در ادامه بیان می‌شوند با استفاده از نرم‌افزار SEISMOSIGNAL بدست آمده و اصلاح شده‌اند. همچنین با استفاده از این نرم‌افزار، تمامی شتاب‌ها به مقدار حداکثر $0.15g$ مقیاس شده‌اند. طیف شتاب، سرعت و تغییرمکان این زلزله‌ها در ادامه بیان می‌شوند. پس از مدلسازی دیواربرشی فولادی به‌مراه تقویت CFRP با پوشش افقی نواری و با فواصل ۵۰ سانتیمتر با نام SW-CFRP-H و همچنین ایجاد طرح شیار با نام SW-Groove-1 در نرم‌افزار آباکوس، چهار طیف تغییرمکان زمین لرزه به آنها اعمال شد و مورد بحث و ارزیابی قرار گرفت که در مورد نتایج حاصل از آن شامل نمودار تاریخچه زمانی تغییرمکان، برش پایه، جذب انرژی و نمودار هیستریزس سازه مورد بحث می‌شود. لازم به ذکر است محور افق نمودارهای برش پایه، تنش میزس و جذب انرژی بیانگر زمان تحلیل (۴۰ ثانیه) هستند و بعد افقی نمودار هیستریزس بیانگر جابجایی بر حسب متر می‌باشد. عملگر بعد عمودی نمودارها در زیر هر نمودار ارائه شده است.



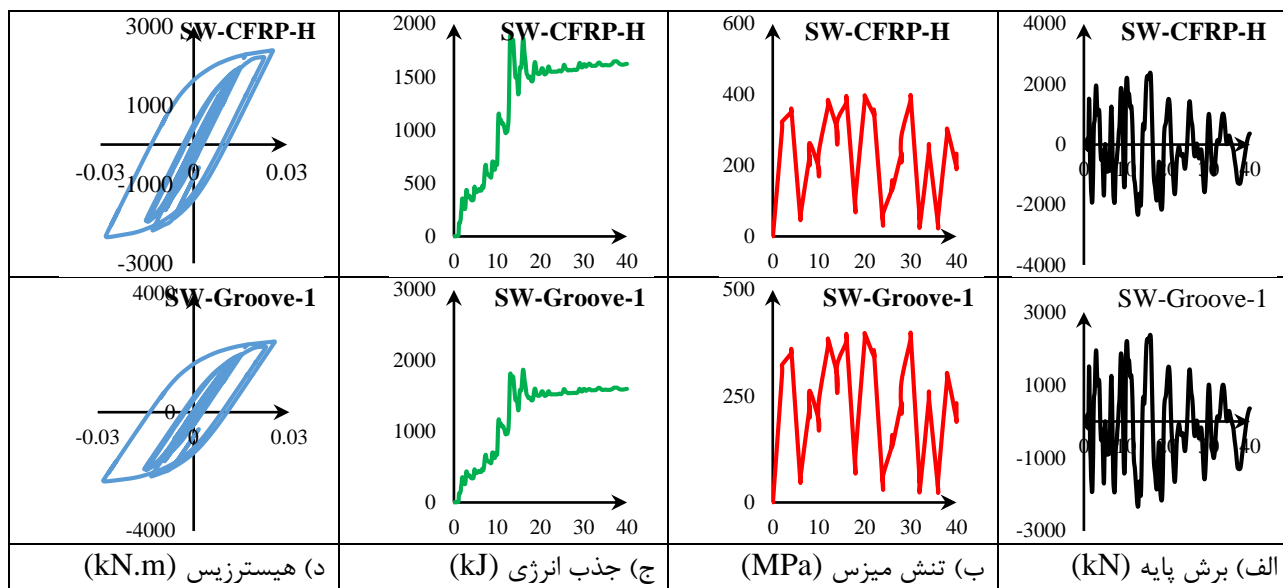
جدول ۵. طیف زمین لرزه‌های بکار گرفته شده در پژوهش حاضر

جدول ۶. نتایج تحلیل مدل‌های بهینه تحت زمین لرزه LomaPrieta

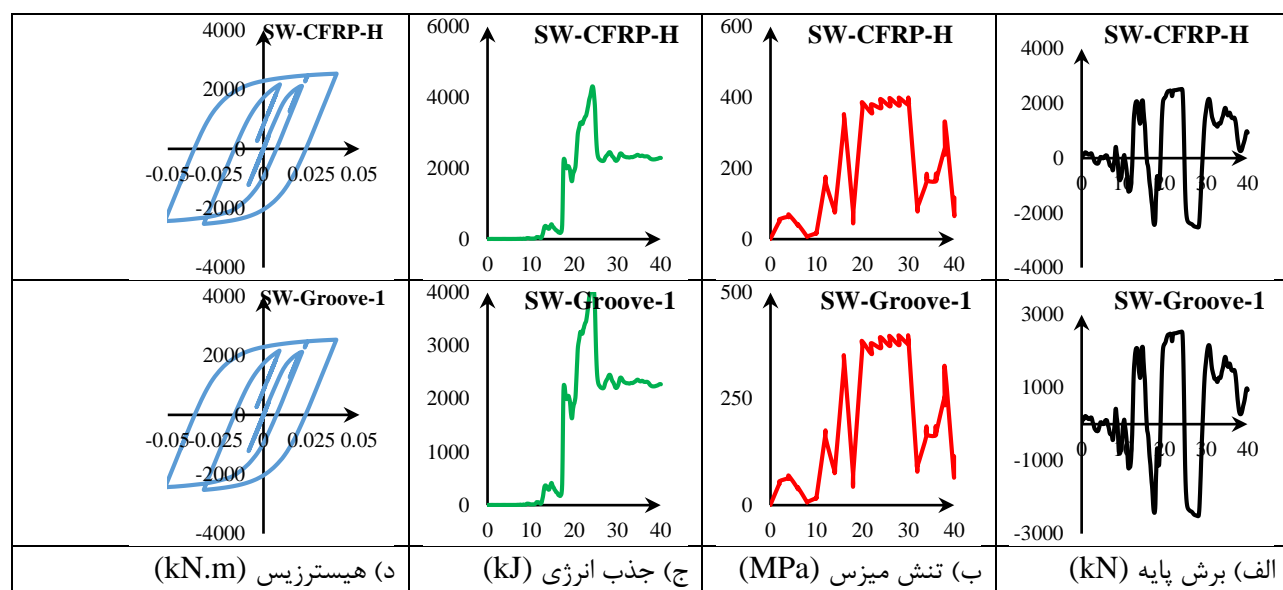


در جدول ۶ در مورد تقویت دیوار برشی توسط CFRP میزان برش پایه به حداکثر مقدار خود در ثانیه ۱۱ و به مقدار ۲۲۶۴ کیلونیوتن رسیده است. پس از آن تنش ماکزیمم سازه نیز با وجود چندین نوبت مقدار ۳۶۰ مگاپاسکال را تجربه نموده است. با رسیدن سازه به ناحیه غیرخطی، مقدار انرژی بصورت ناگهانی به سطح بالایی رسید و مقدار حداکثر جذب انرژی به ۸۳۵ کیلوژول رسیده است. ظرفیت باربری سازه نیز همانطور که از نمودار هیستریزیس مشخص است به ۲۲۶۴ کیلونیوتن رسید. همچنین با اعمال شیار طرح ۱ بر روی دیوار برشی میزان برش پایه به حداکثر مقدار خود در ثانیه ۱۱ و به مقدار ۲۱۵۱ کیلونیوتن رسیده است. پس از آن تنش ماکزیمم سازه نیز با وجود چندین نوبت مقدار ۳۶۰ مگاپاسکال را تجربه نموده است. با رسیدن سازه به ناحیه غیرخطی، مقدار انرژی بصورت ناگهانی به سطح بالایی رسید و مقدار حداکثر جذب انرژی به ۸۳۲ کیلوژول رسیده است. ظرفیت باربری سازه نیز همانطور که از نمودار هیستریزیس مشخص است به ۲۱۵۱ کیلونیوتن رسید. رفتار سیستم دیواربرشی فولادی در ترکیب با تقویت CFRP بصورت پوشش افقی نواری و با فواصل ۵۰ سانتیمتر در مواجهه با زلزله Imperial Valley در فوق بیان شده است. میزان برش پایه تقریباً در یک دامنه ثابت نوسان کرده و به اوج مقدار ۲۳۸۰ کیلونیوتن رسیده است. تنش میزس نیز مقدار حداکثر ۳۹۹ مگاپاسکال را نشان داده است. تاریخچه زمانی جذب انرژی نیز به ۱۸۹۳ کیلوژول رسیده است. پس از اعمال شیار تحت این زلزله، میزان برش پایه با نوسانات منظم همراه بوده است. این پارامتر به اوج مقدار ۲۳۷۹ کیلونیوتن رسیده است. تنش میزس نیز مقدار حداکثر ۳۹۹ مگاپاسکال را نشان داده است. تاریخچه زمانی جذب انرژی نیز به ۱۸۷۲ کیلوژول رسیده است. در جدول ۸ میزان برش پایه به حداکثر مقدار خود در ثانیه ۲۸ و به مقدار ۲۵۳۵ کیلونیوتن رسیده است.

جدول ۷. نتایج تحلیل مدل‌های بهینه تحت زمین لرزه ImperialValley



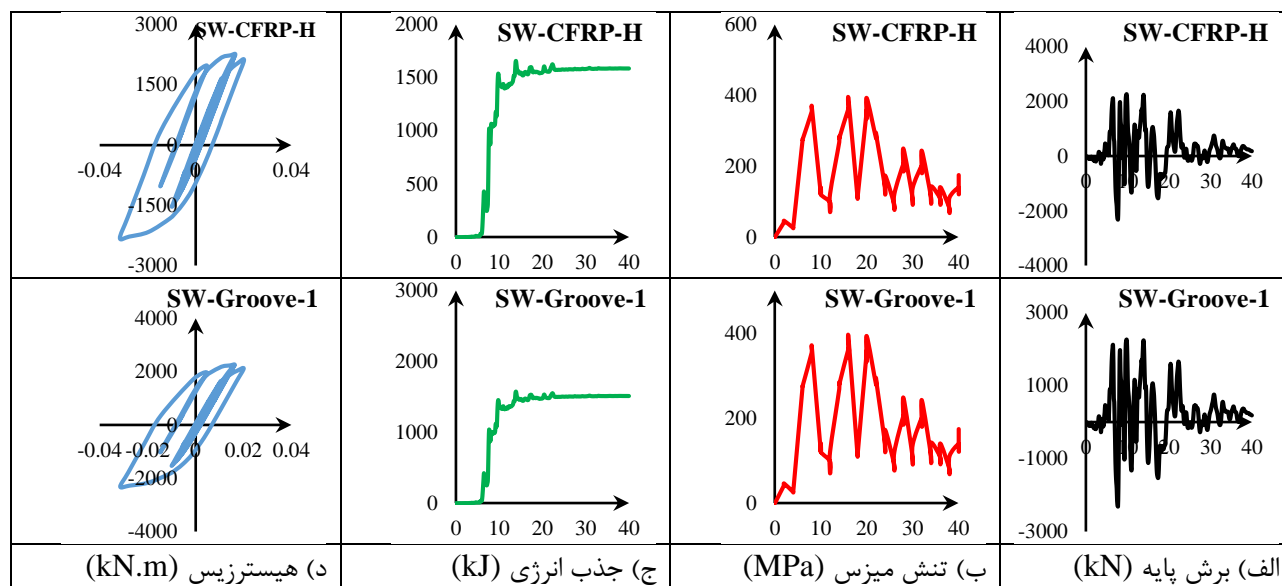
جدول ۸. نتایج تحلیل مدل‌های بهینه تحت زمین لرزه Kocaeli



پس از آن تنش ماکزیمم سازه نیز با وجود چندین نوبت مقدار ۴۰۰ مگاپاسکال را تجربه نموده است. با رسیدن سازه به ناحیه غیرخطی، مقدار انرژی بصورت ناگهانی به سطح بالایی رسید و مقدار حداکثر جذب انرژی به ۴۳۱۷ کیلوژول رسیده است. ظرفیت باربری سازه نیز همانطور که از نمودار هیستریزیس مشخص است به ۲۵۳۵ کیلونیوتن رسید. با اعمال شیار میزان برش پایه به مقدار ۲۵۳۳ کیلونیوتن رسیده است. پس از آن تنش ماکزیمم سازه نیز با وجود چندین نوبت مقدار ۳۹۸ مگاپاسکال را تجربه نموده است. با رسیدن سازه به ناحیه غیرخطی، مقدار انرژی بصورت ناگهانی به سطح بالایی رسید و مقدار حداکثر جذب انرژی به ۴۲۸۴ کیلوژول رسیده است. ظرفیت باربری سازه نیز همانطور که از نمودار هیستریزیس مشخص است به ۲۵۳۳ کیلونیوتن رسید. رفتار سیستم دیواربرشی فولادی در ترکیب با تقویت CFRP بصورت پوشش افقی نواری و با فواصل ۵۰ سانتیمتر در مواجهه با زلزله Bam در جدول ۹ بیان شده است. میزان برش پایه ابتدا با نوسانات بزرگ همراه بوده و با ادامه تحلیل این نوسانات کاهش می یابند. این پارامتر به اوج مقدار ۲۳۱۶ کیلونیوتن رسیده است. تنش میزس نیز مقدار حداکثر ۳۹۲ مگاپاسکال را نشان داده است. تاریخچه زمانی جذب انرژی نیز به ۱۶۵۷ کیلوژول رسیده است. علاوه بر

آن میزان برش پایه سیستم دیواربرشی فولادی در ترکیب با ایجاد شیار بصورت دایروی منظم در طرح ۱ به اوج مقدار ۲۳۱۵ کیلونیوتن رسیده است. تنش میزس نیز مقدار حداکثر ۳۸۹ مگاپاسکال را نشان داده است. تاریخچه زمانی جذب انرژی نیز به ۱۵۷۳ کیلوژول رسیده است.

جدول ۹. نتایج تحلیل مدل‌های بهینه تحت زمین لرزه Bam



۷- نتیجه‌گیری

بررسی تاثیر ایجاد شیار و ورق‌های پلیمری تقویت شده در عملکرد لرزه ای دیواربرشی فولادی جدار نازک هدف اصلی این مقاله بوده است که نتایج ذیل حاصل گردید.

- نحوه چیدمان ورق‌های پلیمری تقویت شده بر روی دیواربرشی تاثیر کاملا مستقیم بر نحوه عملکرد سازه خواهد داشت. استفاده از ورق‌های تقویت کربن در دو طرف دیواربرشی بصورت لایه‌های افقی و موازی (مدل SW-CFRP-H)، باعث ایجاد بهترین پاسخ در عملکرد سازه خواهد شد. بطوریکه در مورد میزان افزایش نیروی مقاوم سازه، بهترین گزینه برای نحوه تقویت بوده است.
- الگوی پخش تنش‌ها با نحوه ایجاد سوراخ ارتباط مستقیم داشته است و طرح‌هایی که در آنها فضاهای خالی بصورت ترکیبی از دواير و شیارهای افقی قرار داشتند، در پخش تنش موثرتر واقع شده‌اند. ایجاد سوراخ در صفحه دیواربرشی باعث افزایش شکل-پذیری سازه خواهد شد و با رفتاری مناسب، زمان ایجاد خرابی در سازه افزایش خواهد یافت. همچنین رعایت نمودن قرینگی قطری در ایجاد سوراخ کمک شایانی به میزان جذب انرژی در سیستم خواهد نمود (مطابق با طرح SW-Groove-1). همچنین عملکرد سازه در پخش تنش بسیار بهتر خواهد شد. طرح SW-Groove-1 بعلاوه پخش مناسب سوراخ‌ها و هدایت تنش‌های وارده به نحو احسن در سطح صفحه فولادی، از عملکرد مناسبی برخوردار بوده است. این مدل از تمامی فولاد مصرف شده در صفحه دیوار برشی با وجود فضای خالی در سازه و وزن کم، ظرفیت باربری را در حد مطلوبی حفظ نموده و جذب انرژی بسیار زیادی از خود نشان داده است.
- در بخش تحلیل لرزه ای، طیف تغییرمکان زمین‌لرزه‌ها عمدتا دارای محدوده‌ای هستند که جابجایی بطور ناگهانی و در گام زمانی کوچکی در جهت مثبت یا منفی در آن محدوده افزایش یافته و تاثیراتی همچون انفجار برر سازه وارد می‌آورد. بعلاوه زیاد بودن تغییرمکان‌های ایجاد شده تحت زمین‌لرزه Kocaeli، ظرفیت باربری بیشتری از سازه مشاهده شده است. در بخش پاسخ‌های

مربوط به ظرفیت باربری طرح SW-CFRP-H تقریباً طی تمامی زمین‌لرزه‌ها نتایج بهتری نسبت به طرح SW-Groove-1 داشته است. در نتیجه استفاده از ورق‌های تقویت کربن با چیدمان افقی بهترین پاسخ را در پژوهش حاضر به همراه داشته است.

مراجع

- [1] Farzampour, A., Laman, J.A. (2015). Behaviour prediction of corrugated steel plate shear walls with openings. *Journal of Constructional Steel Research*, 114, 258-268.
- [2] Sabouri-Ghomi, S., Roberts, T.M. (1992). Nonlinear dynamic analysis of steel plate shear walls including shear and bending deformations. *Journal of Structural Engineering*, 14(5), 309-317.
- [3] Dehghani, H., Fadaee, M.G. (2013). Reliability-based torsional design of reinforced concrete beams strengthened with CFRP laminate. *International Journal of Engineering*, 26(10), 1103-1110.
- [4] Machaly, E., Safar, S., Amer, M. (2014). Numerical investigation on ultimate shear strength of steel plate shear walls. *Thin-Walled Structure*, 84, 78-90.
- [5] Driver, R.G., Kulak, G.L., Elwi, A.E., Kennedy D.J.L. (1998). FE and simplified models of steel plate shear wall. *Journal of Structural Engineering*, 124(2), 121-130.
- [6] Elgaaly, M., Caccese, V., Du, C. (1993). Post buckling behaviour of steel plate shear walls under cyclic loads. *Journal of Structural Engineering*, 119(2), 588-605.
- [7] In-Rak, C., Hong-Gun, P. (2008). Ductility and energy dissipation capacity of shear dominated steel plate walls. *Journal of Structural Engineering*, 134(9), 1495-1507.
- [8] Topkaya, C., Atasoy, M. (2009). Lateral stiffness of steel plate shear walls systems. *Thin-Walled Structures*, 47(8), 827-835.
- [9] Sabouri-ghonmi, S., Kharrazi, M., Deenmam-azizi, S., Asadsajadi, R. (2008). Buckling behaviour improvement of steel plate shear wall systems. *The structural design of tall and special building*, 17, 823-837.
- [10] Jeffrey, W. B. (2011). Seismic behavior of code designed steel plate shear walls. *Engineering Structures*, 33(1), 230-244.
- [11] Jian-Guo, N., Zhu, L., Jian-Sheng, F., Yi-Lung, M. (2013). Lateral resistance capacity of stiffened steel plate shear walls. *Thin-Walled Structures*, 67, 155-167.
- [12] Clayton, P. M., Berman, J. W., Lowes, L. N. (2015). Seismic performance of self-centering steel plate shear walls with beam-only-connected web plates. *Journal of Constructional Steel Research*, 106, 198-208.
- [13] Veladi, H., Shirshahi, M. (2016). Influence of the rectangular opening properties on seismic behaviour of composite steel plate shear walls, *Asian journal of civil engineering*, 17(7), 869-885.
- [14] Jalilzadeh Afshari, M., Gholhaki, M. (2018). Shear strength degradation of steel plate shear walls with optional located opening. *Archives of civil and mechanical engineering*, 18, 1547-1561.
- [15] Guang Yu, J., Liu, L., Li, B., Hao, J., Gao, X., Feng, X. (2019). Comparative study of steel plate shear walls with different types of unbonded stiffeners. *Journal of Constructional Steel Research*, 159, 384-396.
- [16] Bypour, M., Kioumars, M., Yekrangnia, M. (2021). Shear capacity prediction of stiffened steel plate shear walls (SSPSW) with openings using response surface method. *Engineering Structures*, 226, 111340.
- [17] Ahmad Khan, N., Srivastava, G. (2020). Models for strength and stiffness of steel plate shear walls with openings. *Structures*, 27, 2096-2113.
- [18] Paslara, N., Farzampour, A., Hatami, F. (2020). Investigation of the infill plate boundary condition effects on the overall performance of the steel plate shear walls with circular openings. *Structures*, 27, 824-836.
- [19] AISC, ANSI/AISC341-10. (2010). Seismic provisions for structural steel buildings. Chicago (IL): American Institute of Steel Construction.
- [20] Nateghi-Alahi, F., Khazaei-Poul, M. (2013). Analytical study on the strengthened steel plate shear walls by FRP laminate. *Procedia engineering*, 54(), 377-386.
- [21] ABAQUS Verification Manual 6.9.1. (2010). USA.
- [22] Moharrami, H., Habibnejad, A., Alizadeh, H. (2005). Semi-supported steel shear walls. Report No. 1-4679, Road, Housing & Urban Development Research Center, Tehran, Iran.