

مطالعه آزمایشگاهی دیوار برشی کوتاه بتنی مسلح شده با میلگردهای ترکیبی فولادی و کامپوزیتی الیاف شیشه (GFRP) تحت بارگذاری سیکلی جانبی

سیدمحمد حسینی

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران، تهران، ایران.

اصغر وطنی اسکویی*

دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران، تهران، ایران.

چکیده

در این مقاله آزمایشگاهی تأثیر استفاده از میلگردهای طولی ترکیبی فولادی و کامپوزیتی الیاف شیشه (GFRP) در دیوار برشی بتنی کوتاه بررسی شده است. هدف اصلی از این مطالعه بررسی تأثیر استفاده از سیستم ترکیبی بر روی مکانیسم شکست و عملکرد لرزه ایی نمونه ها است. برای این منظور سه دیوار برشی طره ایی در مقیاس واقعی تحت بارگذاری سیکلی جانبی و ثقلی با نسبت ابعادی (aspect ratio) ۱ تست شده اند. نمونه S-SSW با میلگردهای طولی و عرضی فولادی به عنوان نمونه مرجع، نمونه G-SSW مسلح شده با میلگردهای طولی و عرضی GFRP و نمونه SG-SSW با میلگردهای طولی ترکیبی فولادی و GFRP و عرضی GFRP بررسی شده اند. نتایج نشان می دهد که استفاده از سیستم ترکیبی باعث تغییر مد شکست از تخریب بتن ناحیه فشاری به شکست میلگرد شده است. همچنین پارامترهای تغییرشکل پسماند، سختی سکانتی، انرژی تلف شده و شکل پذیری در نمونه SG-SSW در مقایسه با نمونه G-SSW افزایش یافته اند.

واژه های کلیدی: دیوار برشی بتنی کوتاه، میلگرد کامپوزیتی الیاف شیشه (GFRP)، بارگذاری سیکلی جانبی، سختی سکانتی و انرژی تلف شده.

* نویسنده مسئول: vatani@sru.ac.ir

۱- مقدمه

میلگردهای کامپوزیتی شیشه و بتن بوسیله مهارهای الیاف کربنی پرداختند. بررسی ها نشان داد که نمونه‌هایی ساخته شده با بتن با مقاومت بالا دارای رفتار شکلپذیرتر و در نهایت عملکرد بهتر در پیوستگی بین میلگرد و بتن هستند [۸]. ژئو یانگ و همکارانش ۴ نمونه ستون بتنی با تیپ های مختلف میلگردگذاری را تحت بارهای سیکلی تست کردند. نمونه‌هایی با میلگرد فولادی، کامپوزیتی الیاف بازالت، ترکیبی میلگرد فولادی و کامپوزیتی الیاف بازالت و SFRC (میلگرد ترکیبی با هسته فولادی و لایه کامپوزیتی) را مورد تست قرار دادند [۹]. نتایج نشان داد که ستون های مسلح شده با SFRC و ترکیبی میلگرد فولادی و کامپوزیتی عملکرد منحنی هیستریزس مشابهی را نشان میدهند. بنابراین سیستم‌های ترکیبی مسلح شده برای سازه‌های نرمال تحت شرایط محیطی توصیه می‌شوند. همچنین سیستم ترکیبی میلگرد فولادی و کامپوزیتی با افزایش بار، مقادیر سختی پیش تسلیمی بیشتری را در مقطع داشته است. در سال ۲۰۱۸، عرفا و همکارانش ۶ دیوار برشی بتنی full-scale کوتاه شکل مسلح شده با میلگردهای کامپوزیتی الیاف شیشه را تحت بارگذاری رفت و برگشتی شبه استاتیکی مورد تست قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که درصد میلگرد افقی در جان دیوارهای برشی تأثیر به‌سزایی در افزایش مقاومت برشی نهایی (در حدود ۷۰ درصد) و درصد دررفت نهایی (۱۶ درصد) دارد [۱۰]. همچنین مقایسه دو نمونه دارای میلگرد افقی در جان و فاقد میلگرد افقی نشان می‌دهد که سهم بتن پس از ایجاد اولین ترک برشی حداقل ۴۰ درصد افزایش می‌یابد. در سال ۲۰۱۹، ژانگ و همکارانش به بررسی آزمایشگاهی رفتار لرزه‌ای دیوار برشی ساخته شده با بتن دارای ماسه دریایی و آب دریا^۱ مسلح شده با میلگرد کامپوزیتی الیاف شیشه، پرداختند. در این پژوهش سه دیوار برشی به صورت آزمایشگاهی با مقیاس full-scale با نسبت‌های ابعادی یکسان مورد بررسی قرار گرفتند [۱۱]. از خروجی این منحنی این نتیجه به دست می‌آید که هر دو نمونه GSW و GNW در دررفت جانبی حدود ۱٫۵ درصد، به ۸۵ درصد ظرفیت باربری نمونه SNW (نمونه با میلگرد فولادی و بتن معمولی) رسیده‌اند. همچنین استفاده از میلگردهای کامپوزیتی الیاف شیشه به جای میلگردهای فولادی باعث کاهش

در سیستم‌های سازه‌ای بتنی با نیروهای جانبی مؤثر (مانند باد یا زلزله) به طرق مختلف مقابله می‌شود. یکی از مطمئن‌ترین روش‌ها برای مقابله با نیروهای جانبی استفاده از دیوار برشی بتن مسلح است. دیوار برشی به‌عنوان یک ستون طره بزرگ و مقاوم در برابر نیروهای لرزه‌ای عمل می‌کند و یک عضو ضروری برای سازه های بتن مسلح بلند و یک عضو مناسب برای سازه‌های متوسط و کوتاه می‌باشد [۱]. در این میان استفاده از دیوارهای برشی کوتاه در سیستم های سازه‌ای کاملاً مصطلح است. در سازه‌های صنعتی و هسته‌ای دیوارهای برشی کوتاه به‌عنوان اولین مولفه مقابله کننده با نیروی جانبی به حساب می‌آیند. روند شکست این دیوارهای برشی معمولاً با اولین تسلیم خمشی، تغییر شکل برشی و در نهایت تخریب برشی - لغزشی و خمشی همراه است [۲ و ۳].

میلگردهای کامپوزیتی به تازگی جایگزین میلگردهای فولادی در سازه‌های بتنی شده و به‌طور قابل ملاحظه‌ای از زیانهای ناشی از خوردگی میلگرد در محیط‌های خورنده و اسیدی جلوگیری می‌کنند. همچنین استفاده از میلگرد کامپوزیتی، در مکان‌هایی که نیاز به عدم وجود مشکلات مجاورت با میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی وجود دارد، بهترین گزینه برای مسلح کردن دیوارهای برشی به حساب می‌آیند. استفاد از میلگردهای کامپوزیتی الیاف شیشه (GFRP) در دیوارهای برشی بتنی کوتاه در سازه‌هایی با سطح لرزه‌ای پایین مانند پارکینگ‌ها، پل‌های هوایی و... که در معرض شرایط محیطی خورنده هستند نسبت به میلگردهای فولادی دارای ارجحیت می‌باشد. از مهمترین تفاوت های این میلگردها در مقایسه با میلگردهای مشابه فولادی رفتار مکانیکی آن‌ها می‌باشد [۴، ۵ و ۶]. از جمله تحقیقاتی که در زمینه سازه‌های دارای میلگرد کامپوزیتی انجام شده می‌توان به پژوهش جواهری زاده و نانی که به شبیه سازی تئوری اعضای بتنی مسلح شده با میلگردهای کامپوزیتی با الیاف شیشه تحت بارگذاری محوری و خمشی پرداختند، اشاره نمود. آن‌ها ضرایب کاهش مقاومت برای ستون های با میلگردهای GFRP و روش‌هایی جهت محاسبات مقاومت برشی نمونه‌ها ارائه کردند [۷]. در سال ۲۰۱۷، وطنی اسکویی و همکارانش به بررسی پارامترهای مؤثر بر افزایش پیوستگی

¹ seawater sea-sand concrete

جدول ۱ می‌باشد. مقاومت فشاری میانگین بتن با توجه به نتایج تست مقاومت مشخصه نمونه استوانه‌ای به دست آمده است. برای هر دیوار برشی ساخته شده سه نمونه استوانه‌ای با سن ۲۸ روزه با ابعاد ۱۰۰*۲۰۰ میلی متری جهت محاسبه مقاومت فشاری تست شده است. جدول ۱ مقدار میانگین مقاومت مشخصه فشاری نمونه استوانه‌ای استاندارد را نشان می‌دهد. مشخصات میلگردهای فولادی و GFRP استفاده شده در جدول ۲ معرفی شده‌اند.

در شکل ۱ میلگردهای طولی و خاموت‌های GFRP استفاده شده در دیوارهای برشی نشان داده شده است. میلگردهای GFRP دارای درصد حجم الیاف ۷۰ و رزین ۳۰ درصد، از نوع رزین ونیل استر می‌باشند. همچنین به منظور محاسبه مقاومت کششی میلگردهای فولادی و GFRP در این پژوهش، تست کششی مستقیم مطابق ضوابط آیین نامه بحث ۹ مقررات ملی ساختمان ایران [۱۲]، ACI 318 سال ۲۰۱۹ [۱۳] و ACI440.1R-15 سال ۲۰۱۵ [۴] انجام شده است. شکل ۲ منحنی تنش - کرنش میلگردهای فولادی و GFRP استفاده شده را نشان می‌دهد. همچنین ظرفیت پیوستگی یا چسبندگی میلگرد GFRP با بتن بوسیله مهارهای انتهایی تامین شده است. مهارهای استفاده شده مشابه مهارهای استفاده در پژوهش شکینیا و همکارانش در سال ۲۰۲۱ در نظر گرفته شده است [۱۴].

انرژی جذب شده دیوارهای برشی شده است که به علت خاصیت ترد بودن میلگردهای کامپوزیتی می‌باشد.

با توجه به انجام تحقیقاتی در زمینه دیوارهای بتنی مسلح شده با میلگردهای کامپوزیتی، لیکن تاکنون پژوهشی در زمینه دیوارهای برشی کوتاه مسلح شده با میلگردهای ترکیبی فولادی و کامپوزیتی الیاف شیشه (GFRP) انجام نشده است. از این رو دو هدف اصلی در این تحقیق دنبال می‌شود:

- ۱- بررسی آزمایشگاهی و تفسیر مکانیسم شکست لرزه‌ای دیوارهای برشی کوتاه مسلح شده با میلگردهای ترکیبی فولادی و GFRP (SG-SSW) تحت بارگذاری ثقلی و جانبی
- ۲- بررسی تأثیر تواما میلگردهای فولادی و GFRP بر عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی SG-SSW به وسیله پارامترهای مانند منحنی هیستریزس، کرنش میلگردها، سختی سکانتی، اتلاف انرژی، شکل پذیری و مقدار ضریب R_d .

۲- تست آزمایشگاهی

۲-۱- ویژگی مصالح استفاده شده

بتن استفاده شده در همه نمونه‌های ساخته شده از بتن مرسوم با وزن نرمال است. طرح اختلاط وزنی بتن مصرفی برای شن، ماسه، سیمان، آب و روان کننده (به منظور افزایش کارایی بتن) طبق

جدول ۱- طرح اختلاط و ویژگی بتن مصرفی در نمونه های تست شده

| بتن | نسبت آب به سیمان | آب (kg/m^3) | سیمان (kg/m^3) | شن ۴-۲۰ میلی متر (kg/m^3) | ماسه ۰-۴ میلی متر (kg/m^3) | روان کننده (kg/m^3) | اسلامپ (mm) | میانگین مقاومت مشخصه فشاری نمونه استوانه‌ای استاندارد (MPa) |
|-----|------------------|-----------------|--------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------|-------------|---|
| C30 | 0.5 | 175 | 350 | 753 | 1150 | 2.1 | 75 | 30.4 |

جدول ۲- ویژگی های میلگردهای مصرفی در نمونه های تست شده

| سایز میلگرد | سطح مقطع محاسباتی (mm^2) | مقاومت کششی تسلیم (f_y (Mpa) | مقاومت کششی نهایی (f_{fu}^* (MPa) | مدول الاستیسیته (E (GPa) | ضریب پواسون (ν) |
|-------------|------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Ø8(GFRP) | 50.26 | - | 800 | 50 | 0.02 |
| Ø16(GFRP) | 201.06 | - | 800 | 50 | 0.02 |
| Ø10(STEEL) | 78.54 | 400 | 650 | 200 | 0.002 |
| Ø14 (STEEL) | 153.93 | 400 | 650 | 200 | 0.002 |

۲-۲- ویژگی نمونه‌های تست شده

طراحی شده‌اند. همچنین بررسی لزوم استفاده از المان مرزی برای دیوارهای برشی براساس معیار تنش از فصل ۱۸ آیین نامه ACI 318 سال ۲۰۱۹ استفاده شده است (بخش ۳، ۶، ۱۰، ۱۸). به علت نسبت ابعادی استفاده شده در این تحقیق معیار کنترل تنش مناسب‌تر از معیار کنترل تغییر مکان می‌باشد. در دیوارهای برشی با بیشترین تنش عمودی بیش از $0.2 f'_c$ ($0.2 \times 30 = 6 \text{ Mpa}$) الزام به استفاده از المان مرزی می‌باشد که در این کنترل نیازی به استفاده از المان مرزی در این نمونه‌ها نبوده است شکل ۳ ابعاد نمونه‌ها و جزییات میلگردگذاری نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

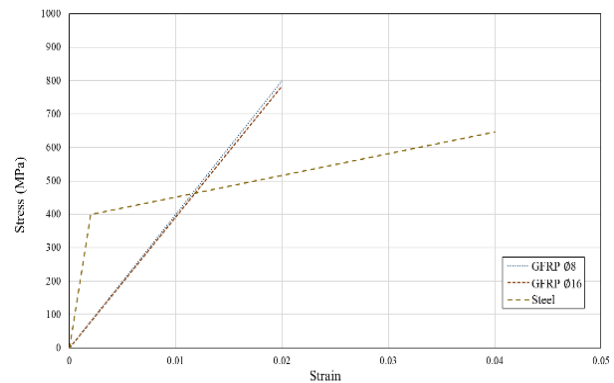
۳-۲- تست ست آپ و روند تست

هر نمونه به وسیله مهارهای لازم به کف صلب محل تست ست آپ متصل شده است. در واقع تمامی نمونه‌ها مانند یک تیر طره عمودی هستند که بار به یک تیر صلب فولادی در بالای آن‌ها وارد می‌شود. محل اعمال جک‌های فشاری به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که دقیقاً در مرکز نقطه اثر ورق‌های فولادی که در دیوار تعبیه شده اند قرار گیرند تا از هر گونه شکست موضعی در محل اعمال بار اجتناب شود. با توجه به محل اعمال بار که در وسط ورق‌های فولادی متصل به دیوار می‌باشد (وسط ورق فولادی ۲۰۰ میلی متری)، بررسی نتایج برای نمونه‌ها براساس ارتفاع ۱۲۰۰ میلی متر انجام شده است. برای هر یک از جک‌های فشاری افقی به منظور اندازه‌گیری مقدار نیروی فشاری وارده از طرف هر جک در هر سیکل و تغییر مکان جانبی در بالای نمونه‌های مورد بررسی از یک LOAD CELL و LVDT^۱ استفاده شده است. همچنین جهت اعمال بار ثقلی به دیوارهای برشی از یک جک روغنی که به وسیله دو المان عمودی که به کف صلب متصل شده به منظور حرکت هم‌زمان بار ثقلی با بار جانبی استفاده شده است. مقدار بار ثقلی برابر ۵٪ ظرفیت فشاری ($0.05 b_w \cdot l_w \cdot f'_c$) در نظر گرفته شده است و در طول تست ثابت باقی می‌ماند. همچنین به کمک ایجاد مهارهای لازم، از رفتار برون صفحه دیوارهای برشی جلوگیری شده است. شکل ۴ نمایی از نمونه، ست آپ تست، جک‌های فشاری و وسایل اندازه‌گذاری را نشان می‌دهد. کرنش میلگردها به وسیله کرنش سنج‌هایی که در نقاط مختلف نمونه‌ها تعبیه شده اندازه‌گیری می‌شوند. در این

در این تحقیق سه دیوار برشی کوتاه مسلح شده با میلگردهای فولادی و یا GFRP ساخته و تست شده‌اند. در این پژوهش نمونه‌ها شامل ویژگی‌های ذیل می‌باشد که پاسخ هیستریزس آن‌ها بررسی شده است. ۱- استفاده از میلگردهای فولادی طولی و عرضی در نمونه مرجع (S-SSW) ۲- نمونه با میلگردهای طولی و عرضی GFRP (G-SSW) ۳- نمونه با میلگردهای طولی ترکیبی (فولادی و GFRP) و میلگرد عرضی GFRP (GS-SSW).



شکل ۱- میلگردهای طولی و عرضی GFRP



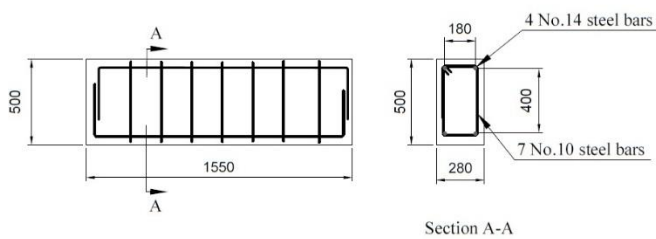
شکل ۲- منحنی تنش - کرنش میلگردهای فولادی و GFRP

ابعاد نمونه‌های آزمایشگاهی برابر طول ۱۲۰۰، ارتفاع ۱۳۰۰ و ضخامت ۱۵۰ میلی متر است. ضخامت دیوارهای برشی براساس ویژگی‌های مطرح شده در آیین نامه ACI 318 تامین شده است. هر نمونه به وسیله یک فونداسیون بتنی با طول ۱۵۵۰، ارتفاع ۵۰۰ و عرض ۲۸۰ میلی متری به کف صلب متصل شده است. بالا و پایین هر نمونه آزمایشگاهی (تیر بالایی و فونداسیون) به منظور باقی ماندن در ناحیه الاستیک خطی در طول تست طراحی شده‌اند. فونداسیون همه نمونه‌ها براساس ظرفیت نهایی و ضوابط فصل ۱۳ آیین نامه ACI 318 طراحی شده‌اند. دیوارهای برشی طراحی شده در این تحقیق با ضوابط موجود در فصل ۱۱ آیین نامه بتن آمریکا (2019) ACI 318 [۱۳] و ACI 440. IR-15 [۴]

¹ Linear Variable Displacement Transducers

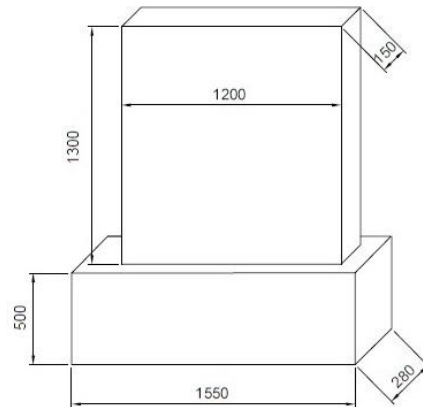
پروتکل بارگذاری جانبی، تغییر مکان جانبی متناظر در هر سیکل در شکل ۵ نشان داده شده است. در نهایت پس از کاهش مقاومت نمونه ها به ۸۰ درصد ظرفیت نهایی رخ داده شده در طول تست، بارگذاری به انتها می رسد و نمونه ها تخریب شده در نظر گرفته می شوند.

پژوهش هر سیکل تغییر مکان به منظور ارزیابی هرگونه کاهش در سختی و مقاومت نمونه ها دو مرتبه اعمال شده است. پروتکل بارگذاری استفاده شده در این پژوهش مشابه کار انجام شده توسط محمد و همکارانش و عرفا و همکارانش [۱۰، ۱۵، ۱۶] به علت تشابه نمونه ها و ویژگی های یکسان در نظر گرفته شده است. طبق

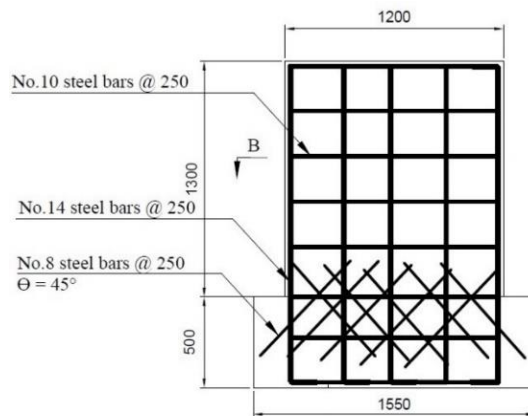


All dimensions in millimeters

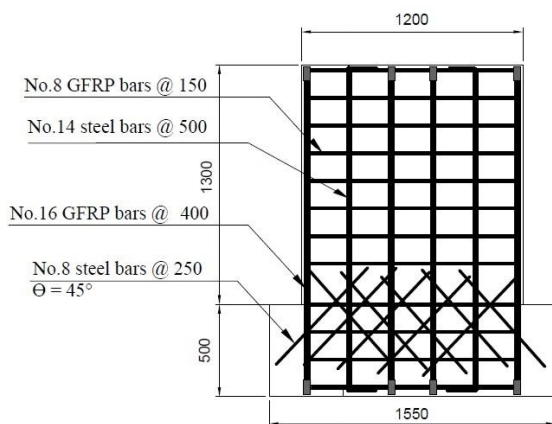
(ب) میلگردهای فونداسیون



(الف) ابعاد نمونه

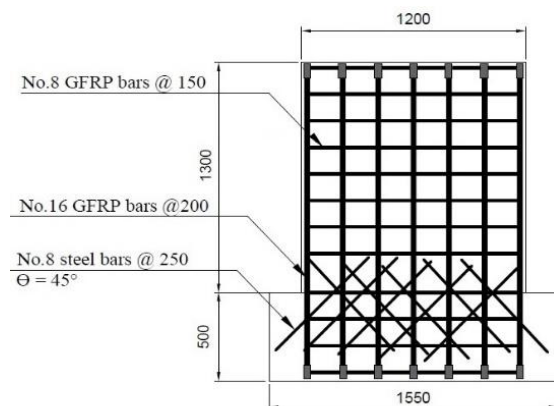


(ج) دیوار برشی S-SSW



All dimensions in millimeters

(ه) دیوار برشی SG-SSW

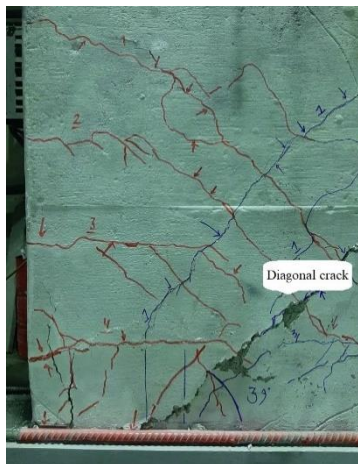


(د) دیوار برشی G-SSW

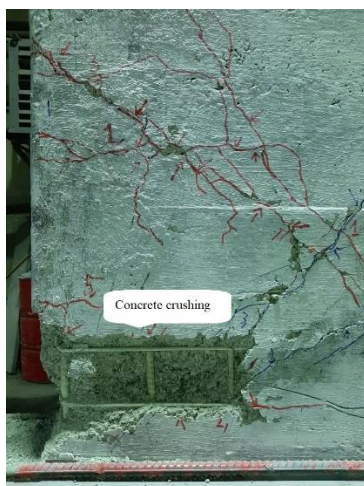
شکل ۳- ابعاد و جزییات نمونه های تست شده

SSW در تغییر شکل نهایی ۲۵ میلی متر (دریفت ۰,۲٪) را نشان

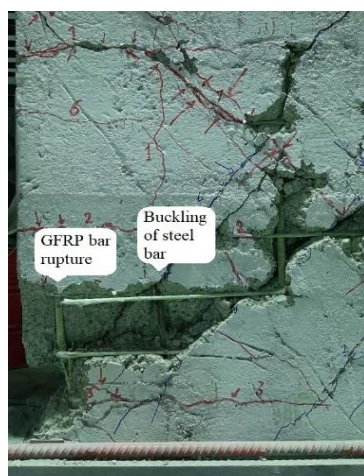
می دهد.



الف) دیوار برشی S-SSW



ب) دیوار برشی G-SSW



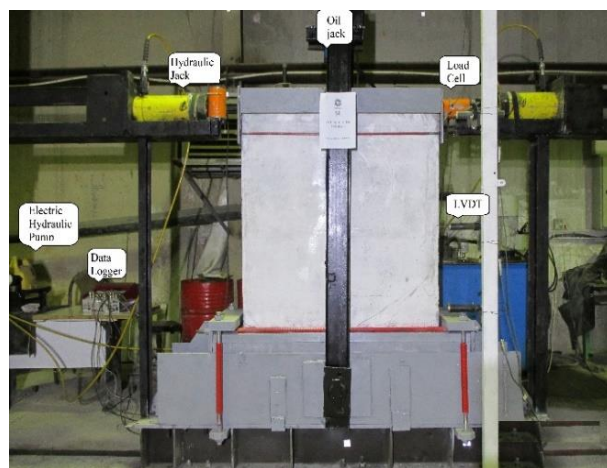
ج) دیوار برشی SG-SSW

شکل ۶ - روند تخریب

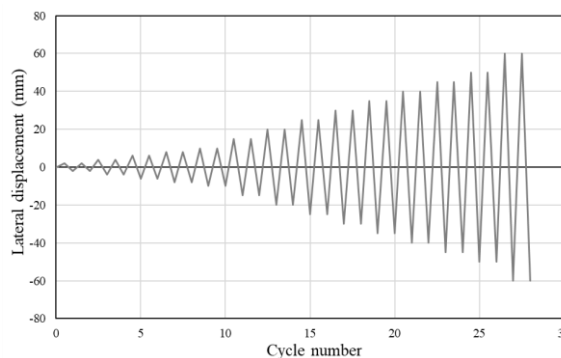
۳- خروجی های آزمایشگاهی و تفسیر نتایج

۳-۱- روند شکست و منحنی هیستریزس

روند شکست در دیوارهای برشی بررسی شده شامل، ترک های خمشی، برشی، شکست یا تکه شدن در کاور بتن^۱، تسلیم یا گسیختگی میلگردها و شکست نهایی می باشد. در طول تست ترک های خمشی و برشی جزئی در همه نمونه ها در پایان هر سیکل در تغییر مکان ۲-۴ میلی متر (دریفت ۰,۱-۰,۳۴٪) مشاهده شده است.



شکل ۴- نمونه نهایی، تست ست آب، جک های فشاری، دیتا لاگر و وسایل اندازه گذاری جهت تست



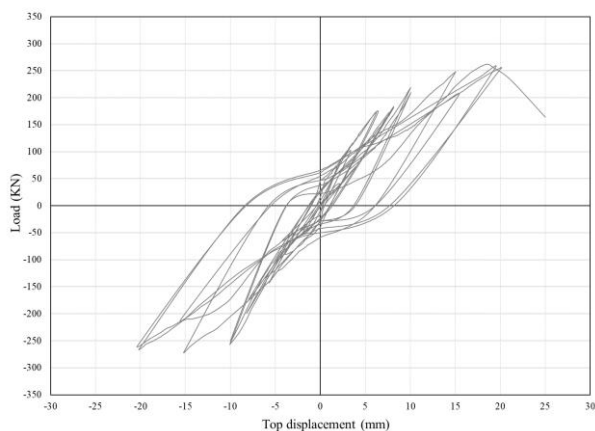
شکل ۵- پروتکل بارگذاری: تغییر مکان جانبی متناظر با سیکل بارگذاری

در نمونه S-SSW شکست شامل ترک های اصلی قطری در هر جهت همراه با ترک های خمشی مویی است. با پیشرفت تست، ترک های قطری موجود گسترش پیدا کرده و در تغییر مکان ۱۰ میلی متر (دریفت ۰,۸۴٪) عریض تر (مقدار تقریبی ۰,۷ میلی متر) شده اند. در آخرین سیکل بارگذاری شکست در پایین ترین قسمت دیوار با ترک های قطری با عرض ۳-۳,۵ میلی متر ایجاد شده است. شکل ۶ الف) وضعیت تخریب کششی قطری^۲ برای نمونه S-

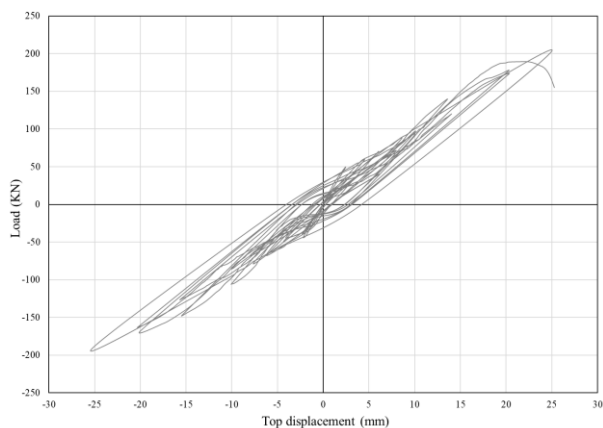
² diagonal tension

¹ cover splitting and spalling

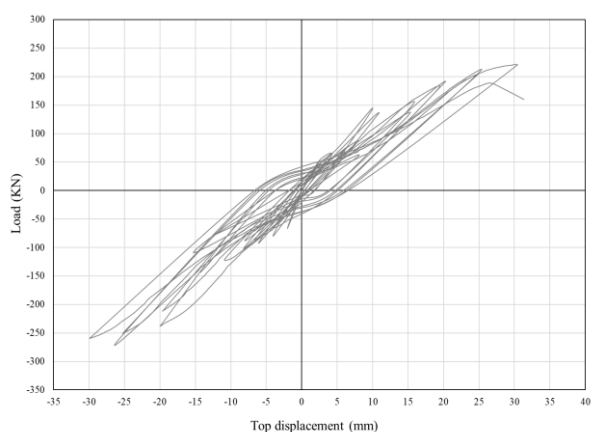
این دررفت مقادیر نیرو در مقایسه با نمونه مشابه S-SSW کمتر بوده است (به علت سختی کمتر میلگردهای GFRP).



الف) دیوار برشی S-SSW



ب) دیوار برشی G-SSW



ج) دیوار برشی SG-SSW

شکل ۷ - منحنی هیستریزس نیرو- تغییر مکان جانبی

همچنین شکل ترک‌های ابتدایی قطری و خمشی در نمونه G-SSW در سیکل با تغییر مکان ۴ میلی‌متر (دررفت ۰,۳۴٪) ایجاد شده است. در این نمونه در تغییر مکان ۲۰ میلی‌متر (دررفت ۱,۶۷٪) چند ترک جدید عمودی در ناحیه فشاری دیوار و فونداسیون ایجاد شده است. با اعمال تغییر مکان بیشتر تا تغییر مکان ۲۵ میلی‌متر (دررفت ۲,۱٪) تست به پایان رسیده است. شکل ۶ (ب) گسترش تخریب و ایجاد شکست فشار خمشی^۱ در پایان تست را نشان می‌دهد. در دیوار برشی SG-SSW ترک‌های قطری و افقی در قسمت نزدیک به بالای دیوار به همراه مقداری ترک‌های خمشی در دیوار برشی در تغییر مکان ۸ میلی‌متر (دررفت ۰,۶۷٪) شروع می‌شوند و ترک‌هایی با عرض ۱ میلی‌متر ایجاد نموده‌اند. در این نمونه در دررفت ۲,۱٪ عرض ترک به ۳,۲ میلی‌متر رسیده است. در شکل ۶ (ج) تسلیم کشش خمشی^۲ در تغییر مکان تقریبی ۳۰ میلی‌متر (دررفت ۲,۵٪) در این نمونه نشان داده شده است.

منحنی نیرو جانبی - تغییر مکان (منحنی هیستریزس) برای نمونه‌های تست شده در شکل ۷ نشان داده شده است. مطابق خروجی منحنی‌ها در نمونه S-SSW تا سطح دررفت حدود ۰,۳۴٪ رفتار الاستیک در نمونه دیده می‌شود، تسلیم میلگردهای طولی در سیکل دوم دررفت ۰,۶۷٪ در جهت منفی ایجاد شده است. نمونه S-SSW بیشترین نیروی اعمال شده (نیروی ۲۷۰,۸ KN) را در جهت مثبت بارگذاری در دررفت ۱,۶۷٪ تحمل کرده است. آخرین سیکل بارگذاری در سیکل اول دررفت ۲,۱٪ رخ داده است که مقدار نیرو در این سیکل به ۸۰ درصد بیشترین نیروی اعمال شده به نمونه (۱۶۴ KN) رسیده است. در این نمونه تسلیم برشی با ترک قطری اصلی در فاصله ۸۰ میلی‌متری از لبه فونداسیون شروع شده که با افق زاویه ۳۹ درجه را تشکیل می‌دهد. نمونه G-SSW در سیکل‌های ابتدایی منحنی هیستریزس در تغییر مکان‌های مشابه با نمونه S-SSW رفتار الاستیک با روند شکست یکسانی را دارد. در واقع برخلاف نمونه S-SSW رفتار الاستیک تا سیکل‌های بیشتری ادامه یافته و شیب منحنی هیستریزس مقادیر ثابتی را دارد. ایجاد ترک‌های برشی از دررفت ۰,۸۴٪ (نیروی ۹۷ KN) ناشی از تنش‌های برشی شروع شده است. دیوار برشی G-SSW بیشترین نیرو را در جهت مثبت در سیکل اول دررفت ۲,۱٪ تحمل کرده است. در

² flexural tension

¹ flexural compression

مد شکست در این نمونه ناشی از رسیدن بتن به کرنش فشاری نهایی است، درحالیکه میلگردهای GFRP به ظرفیت نهایی کششی خود نرسیده‌اند. در نهایت در سیکل دوم مثبت دررفت ۲,۱٪ مقدار نیرو به ۸۰٪ بیشترین مقدار نیرو رسیده که به منزله اتمام تست می‌باشد. نمونه SG-SSW در سیکل‌های ابتدایی منحنی هیستریزس در تغییر مکان‌های مشابه با نمونه‌های دیگر رفتار الاستیک با روند شکست تقریباً یکسانی را دارد. تسلیم میلگردهای طولی در سیکل دوم دررفت ۰,۸۴٪ در جهت منفی بارگذاری ایجاد شده است که در مقایسه با نمونه S-SSW در تغییر مکان بالاتری تسلیم رخ داده است. دیوار

برشی SG-SSW بیشترین نیروی اعمال شده (نیروی ۲۶۶,۷ KN) را در جهت منفی بارگذاری در دررفت ۲,۱٪ تحمل کرده است (۹۸٪ بیشترین ظرفیت دیوار برشی S-SSW). آخرین سیکل بارگذاری در سیکل دوم مثبت دررفت ۲,۵٪ رخ داده است که مقدار نیرو در این سیکل به ۸۰ درصد بیشترین نیروی اعمال شده به دیوار (۱۶۰,۳ KN) رسیده است. نتایج تست‌های دیوارهای برشی تست شده بصورت خلاصه در جدول ۳ نشان داده شده است. همچنین مقدار تغییرشکل پسماند در نمونه‌های S-SSW، G-SSW و SG-SSW به ترتیب برابر ۸,۵، ۴,۱ و ۶,۷ میلی متر شده است.

جدول ۳- خلاصه نتایج نمونه‌های دیوار برشی تست شده

| دیوار برشی | | اولین ترک | | ترک برشی - خمشی (ترک قطری) | | شکست بتن در لبه اتصال به فونداسیون (ترک عمودی) | | بیشترین ظرفیت | | تخریب دیوار برشی | |
|------------|--------|-----------|--------|-------------------------------|--------|--|--------|---------------|--------|------------------|--------|
| δ (%) | P (KN) | δ (%) | P (KN) | δ (%) | P (KN) | δ (%) | P (KN) | δ (%) | P (KN) | δ (%) | P (KN) |
| 0.50 | 170.0 | 0.84 | 256.6 | 1.25 | 241.1 | 1.67 | 270.8 | 2.1 | 164.4 | 2.1 | 164.4 |
| 0.34 | 26.4 | 0.67 | 70.25 | 1.67 | 177.2 | 2.1 | 203.2 | 2.1 | 155.0 | 2.1 | 155.0 |
| 0.34 | 78.0 | 0.67 | 142.8 | 2.5 | 220.3 | 2.1 | 266.7 | 2.5 | 169.3 | 2.5 | 169.3 |

۳-۲- آنالیز کرنش

مقادیر کرنش‌های اندازه‌گیری شده در میلگردهای طولی و عرضی به وسیله کرنش سنج‌های خطی در شکل ۸ نشان داده شده است. مقادیر کرنش میلگردهای طولی نمونه S-SSW نشان می‌دهد که اولین تسلیم میلگردهای فولادی در سیکل دوم بارگذاری منفی در دررفت ۰,۶۷٪ در تراز ۱۲۵ میلی متر رخ داد است. در این نمونه تسلیم میلگردهای عرضی فولادی در سیکل اول بارگذاری مثبت دررفت ۲,۱٪ رخ داد است کرنش‌های ناشی از برش در ناحیه مفصل پلاستیک متمرکز شده‌اند که منجر به شکست برشی در نمونه شده است. همچنین مقادیر کرنش میلگردهای طولی GFRP در نمونه G-SSW نشان می‌دهند که گسیختگی ناشی از کشش در میلگردهای طولی GFRP در این نمونه رخ نداده است. مقادیر کرنش در میلگردهای عرضی تا رسیدن به نقطه ماکزیمم بصورت ثابت افزایش یافته است. بیشترین مقدار کرنش در دررفت ۲,۱٪ رخ داده است. مقادیر کرنش میلگردهای طولی در نمونه SG-SSW نشان می‌دهد که اولین تسلیم میلگردهای فولادی در سیکل دوم بارگذاری منفی در دررفت ۰,۸۴٪ رخ داد است. به دلیل سختی بیشتر میلگردهای فولادی در مقایسه با میلگردهای GFRP

، تسلیم این میلگردها در دررفت‌های ابتدایی رخ داده است. مقادیر کرنش میلگردهای طولی GFRP پس از دررفت ۱,۲۵٪ (تسلیم میلگردهای فولادی) نرخ رشد بیشتری را نشان می‌دهد. در نهایت میلگردهای دیوار برشی SG-SSW در دررفت ۲,۵٪ دچار گسیختگی کششی شده‌اند. مقادیر کرنش در میلگردهای عرضی در این نمونه با افزایش مقادیر تغییر مکان افزایش یافته است. بیشترین مقدار کرنش در دررفت مثبت ۲,۵٪ رخ داده است در این مقدار دررفت میلگردهای عرضی GFRP دچار گسیختگی شده‌اند.

۳-۳- منحنی پوش نیرو - تغییر مکان (دررفت)

منحنی پاسخ پوش نیرو - تغییر مکان برای همه دیوارهای برشی تست شده در شکل ۹ ترسیم شده است. در نمونه S-SSW پس از تسلیم میلگرد فولادی رفتار پلاستیک کاملاً مشهود است تا در نهایت به مرحله شکست نهایی می‌رسد. مقادیر نیرو دیوار برشی G-SSW به دلیل رفتار الاستیک خطی میلگردها با یک شیب مشخص تا ایجاد ترک‌ها افزایش پیدا کرده است. پس از رخداد ترک در این نمونه مقادیر سختی کاهش پیدا کرده است. دیوار برشی SG-SSW رفتار مشابه با سایر نمونه‌ها از خود نشان داده است.

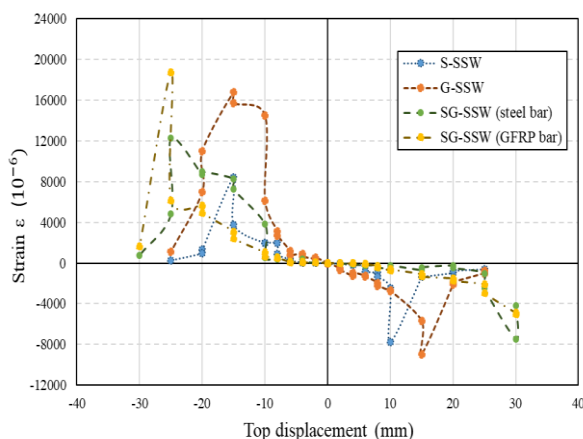
گسیختگی میلگردهای GFRP نمونه دچار شکست (افتادگی نمودار پوش) شده است. در واقع یکی از امتیازات نمونه‌های دارای میلگردهای GFRP می‌تواند رفتار آن‌ها در تغییر مکان‌های متناظر بعد از تسلیم میلگرد فولادی باشد.

۳-۴- سختی سکانتی

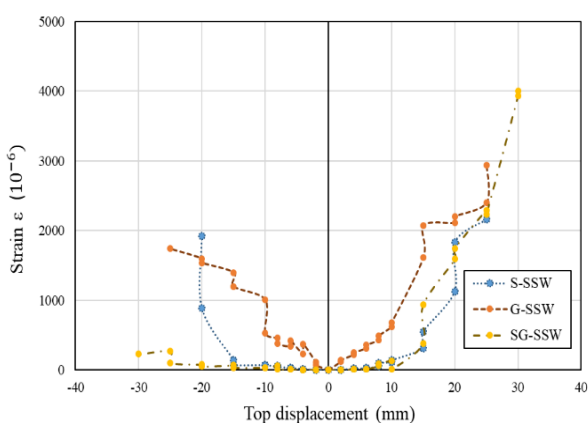
سختی سکانتی^۱ به منظور بررسی مقادیر بیشترین نیرو به تغییر مکان متناظر در هر سیکل بارگذاری تعریف شده است. مقادیر سختی مطابق رابطه ۱ به دست می‌آید.

$$K_i = \frac{|+F_i| + |-F_i|}{|+\Delta i| + |-\Delta i|} \quad (1)$$

$|+F_i|$ و $|-F_i|$ مقادیر مثبت و منفی بیشترین مقدار نیرو در سیکل i و مقادیر $+\Delta i$ و $-\Delta i$ تغییر مکان‌های جانبی متناظر با بیشترین نیرو در سیکل i هستند. مقادیر سختی نمونه‌های تست شده در طول بارگذاری کاهش یافته که معیاری مناسب جهت مقایسه رفتار آن‌ها می‌باشد [۱۷]. مقادیر سختی سکانتی در برابر دریافت در شکل ۱۰ نشان داده شده است. کاهش سختی در همه دیوارهای برشی با افزایش مقادیر دریافت ایجاد شده است. پس از ایجاد ترک‌های عمودی عمیق در پایین نمونه‌ها کاهش مقادیر سختی تمایل به صاف شدن دارد. دیوار برشی S-SSW از دریافت جانبی تقریبی ۰٫۵٪ در مقایسه با سایر دیوارهای برشی مقادیر سختی بیشتری را داشته است. دیوار برشی G-SSW مقادیر سختی تقریباً یکسانی را در دریافت‌های مختلف داشته‌اند. این مساله به این صورت قابل بیان است که میلگردهای GFRP به دلیل مقادیر سختی کششی بالا می‌توانند باعث ظرفیت بار جانبی مناسب و سختی پس از تسلیم خوبی در مقایسه با دیوار برشی فولادی شوند. دیوار برشی SG-SSW تا قبل از تسلیم میلگردهای فولادی رفتاری مشابه نمونه S-SSW را داشته است. پس از تسلیم میلگردهای فولادی کاهش مقادیر سختی بیشتری را با افزایش مقادیر دریافت داشته است. این نمونه در مقایسه با G-SSW کاهش سختی را در دریافت بالاتری تجربه کرده است که مزیت استفاده از سیستم ترکیبی فولاد و GFRP را نشان می‌دهد. تفاوت مقادیر سختی در همه دیوارهای برشی تست شده در لحظه شکست نهایی به حداقل رسیده است.

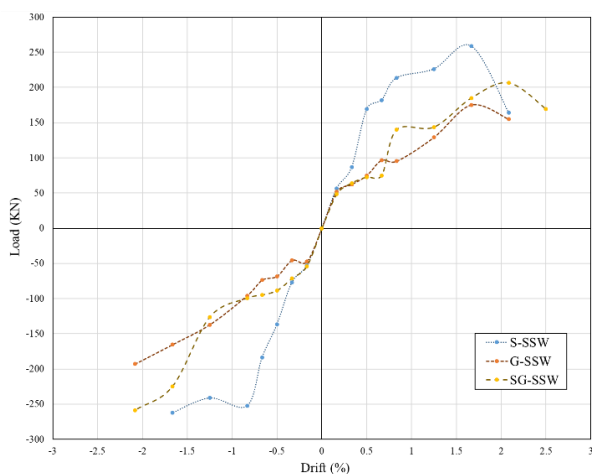


الف) میلگرد طولی



ب) میلگرد عرضی

شکل ۸- منحنی کرنش-تغییر مکان جانبی

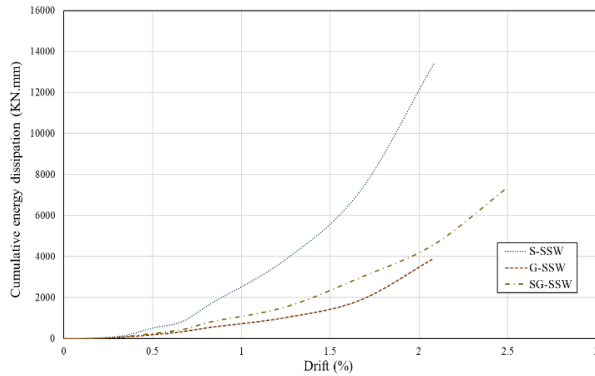


شکل ۹- منحنی پوش نیرو- دریافت

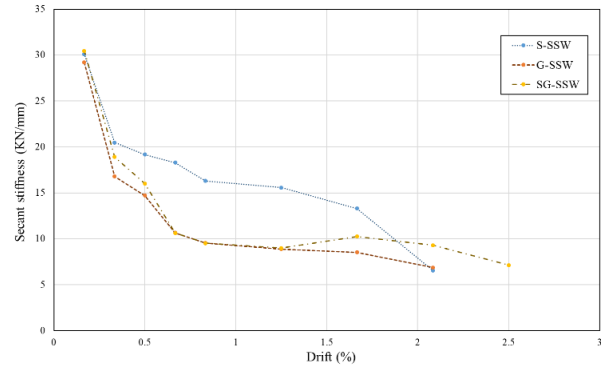
تسلیم زود هنگام میلگردهای فولادی در این نمونه به دلیل سختی بیشتر این میلگردها در مقایسه با میلگردهای GFRP است. پس از تسلیم میلگردهای فولادی، مقادیر نیرو با شیب کمتر در مقایسه با دیوار برشی G-SSW افزایش پیدا کرده است. در نهایت با

¹ Secant stiffness

درحالی که در دیوار برشی G-SSW میلگردهای GFRP در ناحیه الاستیک تا شکست نمونه باقی مانده‌اند.



شکل ۱۱ - منحنی انرژی تجمعی - دریافت



شکل ۱۰ - منحنی سختی سکانتی - دریافت

۳-۵- اتلاف انرژی (استهلاک) انرژی

یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های طراحی شده با پیوند کوتاه که در معرض زلزله‌هایی با زمان زیاد هستند اتلاف انرژی^۱ است. [۱۸ و ۲۰]. همچنین مقادیر انرژی اتلاف شده تجمعی وقتی که دیوارهای برشی تخریب می‌شوند به عنوان یک پارامتر مهم در نظر گرفته می‌شوند که از جمع نواحی محصور شده در سیکل‌های قبلی هیستریزس محاسبه می‌شود. شکل ۱۱ مقادیر انرژی تلف شده تجمعی در هر سیکل دیوارهای برشی تست شده را نشان می‌دهد. بررسی شکل ۱۱ نشان می‌دهد که تا دریافت ۰٫۶۷٪ مقادیر انرژی تلف شده تجمعی در همه نمونه‌ها تغییر زیادی نداشته و با هم برابر است. در واقع به دلیل تغییر شکل پسماند کم دیوارهای برشی تا این سطح دریافت انرژی زیادی در دیوارهای برشی آزاد نشده است. مجموع مقادیر انرژی تلف شده در دیوار برشی S-SSW برابر ۷۱۷۷٫۳ KN.mm در دریافت ۱٫۶۷٪ است. همچنین این مقدار در دیوارهای برشی G-SSW و SG-SSW به ترتیب برابر ۱۸۷۱٫۳ و ۲۹۶۵٫۴ KN.mm در درصد دریافت تقریباً مشابه می‌باشد. مقادیر انرژی تلف شده تجمعی برای آخرین دریافت دیوارهای برشی S-SSW، G-SSW و SG-SSW به ترتیب برابر ۱۳۴۱۱٫۷ KN.mm، ۳۹۱۵٫۱ و ۷۳۸۱٫۴ محاسبه شده است. دیوار برشی SG-SSW در حدود ۸۸ درصد افزایش انرژی تلف شده را در مقایسه با نمونه G-SSW نشان می‌دهد. این مساله ناشی از رفتار پلاستیک مناسب میلگردهای فولادی در این نمونه است. در واقع به دلیل تغییر شکل - های پلاستیک انرژی بیشتری در دیوار برشی اتلاف شده است

۳-۶- شاخص شکل پذیری

شاخص شکل‌پذیری^۲ به عنوان پارامتر مناسب جهت اندازه‌گیری ظرفیت تغییر شکل سازه‌های مسلح شده بتنی تحت بارهای رفت و برگشتی، با قابلیت توانایی تحمل تغییر شکل‌های بزرگ و جذب انرژی به وسیله رفتار هیستریزس است. شاخص شکل‌پذیری تغییر مکان (μ_{Δ}) برابر نسبت تغییر مکان در حالت حد نهایی (Δ_u) به تغییر مکان در حالت تسلیم (Δ_y) مطابق رابطه ۲ است

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (2)$$

برای دیوارهای برشی مسلح شده با میلگردهای GFRP، شاخص شکل‌پذیری تغییر مکان (μ_{Δ}) مطابق رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

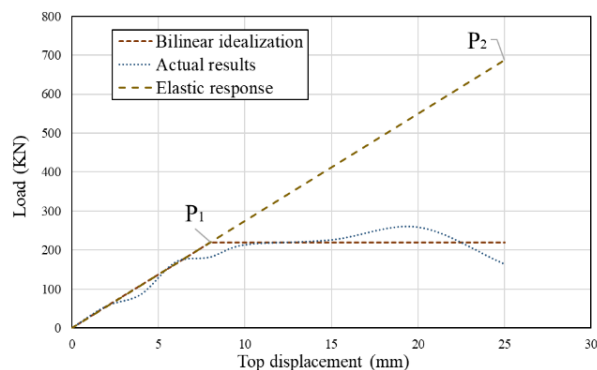
$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_e} \quad (3)$$

Δ_e برابر تغییر مکان الاستیک است. این تغییر مکان متناظر با نقطه‌ای است که بتن وارد مرحله پلاستیک شده و شروع تخریب ناشی از تنش‌های فشاری در آن ایجاد می‌شود. به دلیل آن که میلگردهای GFRP لحظه تسلیم را ندارند، تعریف تغییر مکان تسلیم در دیوارهای برشی مسلح شده با میلگردهای GFRP به تغییر مکان الاستیک (Δ_e) اصلاح شده است. این تعریف برای کرنش بتن (ϵ_c) برابر ۰٫۰۳۵ در نظر گرفته شده است، به صورت محافظه کارانه تخمینی متناظر با اولین شکست در بتن^۳ [۲۱ و ۲۲]. مقادیر شاخص شکل‌پذیری تغییر مکان (μ_{Δ}) برای دیوارهای برشی

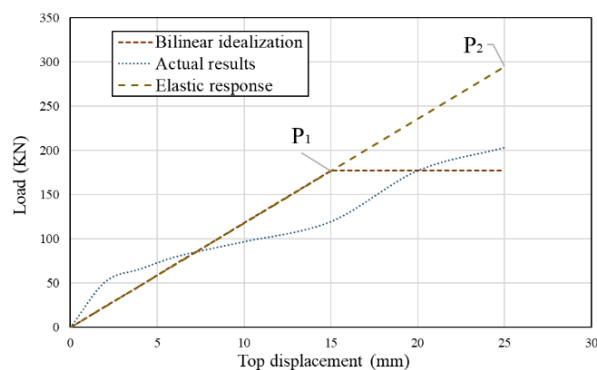
³ concrete spalling

¹ Energy dissipation

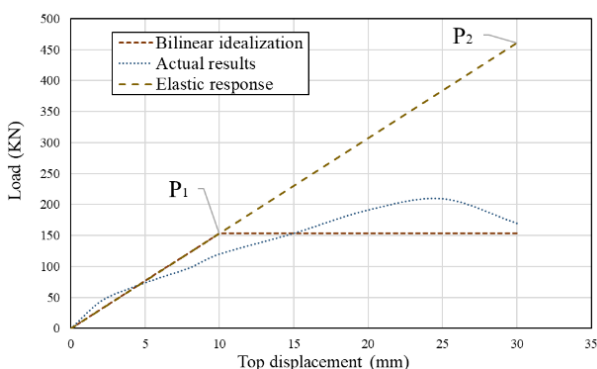
² Ductility index



الف) دیوار برشی S-SSW



ب) دیوار برشی G-SSW



ج) دیوار برشی SG-SSW

شکل ۱۲ - محاسبه ضریب اصلاح نیرو براساس شکل پذیری (R_d)
 براساس محاسبات به دست آمده مقدار R_d برای دیوار برشی S-SSW برابر ۳٫۱۳ و برای دیوار برشی G-SSW که براساس اصل انرژی به دست آمده برابر ۱٫۶۷ است. همچنین مقدار R_d برای دیوار برشی SG-SSW به دلیل دارا بودن تواما میلگردهای فولادی و GFRP براساس اصل تغییر مکان برابر ۳ به دست آمده که در مقایسه با دیوار برشی S-SSW نتیجه قابل قبولی را نشان می‌دهد.

S-SSW، G-SSW و SG-SSW به ترتیب برابر ۳٫۲، ۳٫۷ و ۳ است. مقدار شاخص شکل پذیری تغییر مکان در دیوار برشی SG-SSW به دلیل دارا بودن تواما میلگردهای فولادی و GFRP با توجه به تغییر مکان در حالت تسلیم اولین میلگرد فولادی (Δ_y) محاسبه شده است. مقدار شکل پذیری تغییر مکان در نمونه SG-SSW ۷۶ درصد در مقایسه با نمونه G-SSW افزایش یافته است. بنابراین شاخص شکل پذیری تغییر مکان (μ_{Δ}) می‌تواند یک معیار مناسب در ارزیابی شکل پذیری نمونه های بررسی شده در نظر گرفته شود.

۳-۷- ضریب اصلاح نیرو براساس شکل پذیری (R_d)

ضریب R_d نشان دهنده پاسخ شکل پذیری سازه است که بیانگر قابلیت انرژی تلف شده آن از طریق رفتار غیرخطی است. براساس آیین نامه CSA S806 سال ۲۰۱۲ [۶] پاراگراف ۱۲٫۴٫۲٫۳ به دلیل کمبود تحقیقات روی رفتار هیستریزس و انرژی تلف شده اعضای مسلح شده با میلگردهای GFRP، بار جانبی طراحی براساس ضرایب رفتار شکل پذیری و مقاومت افزون یکی در نظر گرفته شده است. منحنی نیرو - تغییر مکان ایده آل شده برای دیوارهای برشی تست شده برای محاسبه ضریب اصلاح نیرو براساس شکل پذیری (R_d) استفاده شده است. ایده آل سازی پاسخ های نیرو-تغییر مکان دیوارهای برشی تست شده در شکل ۱۲ نشان داده شده است [۲۹-۲۳]. در آیین نامه های طراحی موجود، مرحله الاستیک تا Δ_y یا Δ_e ظرفیت طراحی (ظرفیت مقاومت) را نشان می‌دهد که برابر یا بیشتر از نیروهای لرزه ای مشخص شده آیین نامه ای لازم (P_1) است که بیشترین نیرو منحنی ایده آل شده نیرو-تغییر مکان است که در شکل ۱۲ مشخص شده است. P_2 نیروی لرزه ای طراحی ناشی از زلزله ای با شدت مشخص متناسب با پهنه لرزه خیزی منطقه است که به پاسخ الاستیک سازه مرتبط است [۳۰]. P_2 برای دیوار برشی با میلگرد فولادی با اصل تغییر مکان برابر^۱، و برای دیوار برشی با میلگرد GFRP براساس اصل انرژی^۲ برابر به دست می‌آید.

R_d براساس رابطه ۴ به دست می‌آید.

$$R_d = \frac{P_2}{P_1} \quad (4)$$

² The equal-energy principle

¹ The equal-displacement principle

۴- نتیجه گیری

- مقایسه شاخص شکل پذیری برای نمونه‌ها نشان می‌دهد که مقادیر شکل‌پذیری تغییر مکان (μ_{Δ}) برای نمونه G-SSW در مقایسه با نمونه مرجع S-SSW، ۴۶ درصد کاهش یافته است. در دیوار برشی SG-SSW استفاده از میلگردهای تواما فولادی و GFRP مقدار شاخص μ_{Δ} را در مقایسه با نمونه G-SSW افزایش داده است. این مساله نشان دهنده تأثیر به سزای استفاده از میلگردهای فولادی در افزایش شکل‌پذیری نمونه SG-SSW است. این مسأله به دلیل تأثیر افزایش رفتار شکل‌پذیر دیوار برشی و تسلیم میلگردهای فولادی دیوار برشی کوتاه و تغییر مد شکست است.

۵- مراجع

- [1] Wallace, J. W., and Moehle, J. P. (1992). "Ductility and detailing requirements of bearing wall buildings." J. Struct. Eng., 10.1061/ (ASCE) 0733- 9445(1992)118:6(1625), 1625-1644.
- [2] Paulay T, Priestley MJN, Syngé AJ. Ductility in earthquake resisting squat shear walls. ACI J 1982;79(4):257-69.
- [3] Sittipunt C, Wood SL, Lukkunaprasit P, Pattararattanukul P. Cyclic behavior of reinforced concrete structural walls with diagonal web reinforcement. ACI Struct J 2001;98(4):554-62.
- [4] ACI440.1R-15. Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars. ACI Committee 2015; 440.
- [5] Bazli, M., Ashrafi, H., & Oskouei, A. V. (2016). Effect of harsh environments on mechanical properties of GFRP pultruded profiles. Composites Part B: Engineering, 99, 203-215.
- [6] Canadian Standards Association. (2012). "Design and Construction of Building Structures with Fibre-Reinforced Polymers," (CAN/CSA S806-12). Canadian Standards Association Mississauga, Ont.
- [7] Zadeh, H. J., & Nanni, A. (2012). "Design of RC columns using glass FRP reinforcement." Journal of Composites for Construction, 17(3), 294-304.
- [8] Ashrafi, H., Bazli, M., & Oskouei, A. V. (2017). "Enhancement of bond characteristics of ribbed-surface GFRP bars with concrete by using carbon fiber mat anchorage." Construction and Building Materials, 134, 507-519.
- [9] Sun, Z., Wu, G., Zhang, J., Zeng, Y., & Xiao, W. (2017). "Experimental study on concrete columns reinforced by hybrid steel-fiber reinforced polymer (FRP) bars under horizontal cyclic loading." Construction and Building Materials, 130,

در این مطالعه تست‌های بارگذاری سیکلی جانبی بر روی دیوارهای برشی مسلح شده با میلگرد فولادی و GFRP بررسی شده است. مد شکست و روند تخریب در نمونه‌ها تشریح شده است. همچنین تأثیر میلگرد فولادی و GFRP بر روی عملکرد لرزه‌ای دیوار برشی با میلگرد طولی ترکیبی بررسی شده است. براساس خروجی‌های به دست آمده نتایج زیر قابل استنتاج است. - دیوار برشی S-SSW دچار شکست قطری و تسلیم میلگردهای فولادی، دیوار برشی G-SSW دچار تخریب و شکست ناحیه بتن فشاری شده و مد شکست خمش فشاری را دارد. دیوار برشی SG-SSW به دلیل تسلیم میلگردهای فولادی موجب افزایش شکل‌پذیری و افزایش عرض ترک و تغییر مد شکست (خمش کششی) در مقایسه با دیوار برشی G-SSW شده است.

- در نمونه‌های بررسی شده قبل از رخداد ترک‌ها، منحنی‌ها با حلقه‌های لاغر و باریک شکل نواحی کوچکی را ایجاد کرده‌اند. علت این مساله رفتار الاستیک نمونه‌ها در این مرحله است. پس از رخداد ترک، دیوارهای برشی شروع به رفتار غیر خطی می‌کنند. با افزایش تغییر مکان اعمال شده، سطح زیر سطح منحنی هیستریزس در نمونه SG-SSW در مقایسه با G-SSW بزرگتر شده است که نشان‌دهنده تأثیر استفاده از سیستم ترکیبی در افزایش رفتار غیرخطی دیوار برشی است.

- در نمونه SG-SSW پس از تسلیم میلگرد طولی فولادی مقادیر تغییر شکل پسماند بیشتری در مقایسه با نمونه G-SSW ایجاد شده است که تأثیر استفاده از میلگردهای فولادی را نشان می‌دهد. با وجود این دیوار برشی SG-SSW در دریافت بیشتر از دیوار برشی S-SSW (۲,۵٪) تغییر شکل پسماند کمتری را داشته است. - نمونه SG-SSW در مقایسه با G-SSW کاهش سختی را در دریافت بالاتری تجربه کرده است که مزیت استفاده از سیستم ترکیبی فولاد و GFRP را نشان می‌دهد. تفاوت مقادیر سختی در همه دیوارهای برشی تست شده در لحظه شکست نهایی به حداقل رسیده است.

- انرژی اتلاف شده تجمعی در دیوار برشی S-SSW تقریباً ۳,۴ و ۱,۸ برابر دیوار برشی G-SSW و SG-SSW است. این مسأله نشان دهنده تأثیر به‌سزای وجود میلگردهای فولادی طولی در افزایش مقدار انرژی تلف شده دیوارهای برشی است.

- rectangular structural walls.” Bull. N. Z. Nat. Soc. Earthquake Eng., 31, 73–85.
- [22] Mohamed, N., Farghaly, A. S., and Benmokrane, B. (2013). “Strength reduction factor of GFRPRC shear walls.” 4th Asia-Pacific Conf. on FRP in Structures (APFIS2013), Melbourne, Australia.
- [23] Paulay, T., and Priestley, M. J. N., 1995, *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 735 pp.
- [24] Munoz, W.; Salenikovich, A.; Mohammad, M.; and Quenneville, P., 2008, “Determination of Yield Point and Ductility of Timber Assemblies: in Search for a Harmonised Approach,” Proceedings of Meeting 41 of CIB-W18, St. Andrews, NB, Canada.
- [25] Branston, A. E.; Boudreault, F. A.; and Rogers, C. A., 2005, “Method for the Design of Light Gauge Steel Frame/Wood Panel Shear Walls,” *Advances in Steel Structures*, Elsevier, V. II, pp. 1347-1352.
- [26] Rogers, C. A.; Balh, N.; Ong-Tone, C.; Shamim, I.; and DaBreo, J., 2011, “Development of Seismic Design Provisions for Steel Sheet Sheathed Shear Walls,” Proceedings of the Structures Congress, ASCE, Las Vegas, NV, pp. 676-687.
- [27] Shedid, M. T.; El-Dakhkhni, W. W.; and Drysdale, R. G., 2009, “Behavior of Fully Grouted Reinforced Concrete Masonry Shear Walls Failing in Flexure: Analysis,” *Engineering Structures*, V. 31, No. 9, pp. 2032-2044. doi: 10.1016/j.engstruct.2009.03.006
- [28] Kessler, S., 2010, “A Study of the Seismic Response Modification Factor for Log Shear Walls,” MSc thesis, Kansas State University, Manhattan, KS, 113 pp.
- [29] National Building Code of Canada (NBCC), 2010, *Canadian Commission on Building and Fire Codes*, National Research Council of Canada, Montreal, QC, Canada.
- [30] Pauley T., Priestley M. J. N., Syngé A. J., “Ductility in Earthquake Resisting Squat Shearwalls. 202-211.
- [10] Arafa, A., Farghaly, A. S., & Benmokrane, B. (2018). “Effect of web reinforcement on the seismic response of concrete squat walls reinforced with glass-FRP bars.” *Engineering Structures*, 174, 712-723.
- [11] Zhang, Q., Xiao, J., Liao, Q., & Duan, Z. (2019). “Structural behavior of seawater sea-sand concrete shear wall reinforced with GFRP bars.” *Engineering Structures*, 189, 458-470.
- [۱۲] مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، بارهای وارده بر ساختمان، دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، ۱۳۹۹
- [13] ACI Committee 318., American Concrete Institute. (2019). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19): an ACI standard; commentary on building code requirements for structural concrete (ACI 318R-19)*. Second printing: January 2020, Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- [14] Shakiba, M., Oskouei, A. V., Karamloo, M., & Doostmohamadi, A. (2021). Effect of mat anchorage on flexural bonding strength between concrete and sand coated GFRP bars. *Composite Structures*, 273, 114339.
- [15] Mohamed, N., Farghaly, A. S., Benmokrane, B., and Neale, K.W. (2014a). “Experimental investigation of concrete shear walls reinforced with glass fiber-reinforced bars under lateral cyclic loading.” *J. Compos. Constr.*, 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000393, A4014001.
- [16] Mohamed, N., Farghaly, A. S., Benmokrane, B., & Neale, K. W. (2014). “Drift Capacity Design of Shear Walls Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer Bars.” *ACI Structural Journal*, 111(6), 1397.
- [17] JGJ/T101, Specification for seismic test of buildings, Beijing. 2015. (In Chinese).
- [18] Mohamed, N., Farghaly, A. S., Benmokrane, B., and Neale, K.W. (2014b). “Flexure and shear deformation of GFRPRC shear walls.” *J. Compos. Constr.*, 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000444, 04013044.
- [19] Mohamed N, Farghaly AS, Benmokrane B, Neale KW. Evaluation of GFRP-reinforced shear walls. Canadian society for civil engineering 2013 general conference, Montréal, Québec, Canada. 2013. p. 1–10.
- [20] Mohamed N, Ahmed SF, Benmokrane B. Evaluation of a shear wall reinforced with glass FRP bars subjected to lateral cyclic loading. 3rd Asia-pacific conference on FRP in structures, Sapporo, Japan. 2012. p. 1–10.
- [21] Priestley, M. J. N., and Kowalsky, M. J. (1998). “Aspects of drift and ductility capacity of

Experimental study of squat shear wall reinforced with both steel and GFRP bars under cyclic lateral loading

Seyed Mohammad Hosseini

PhD. Student, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.

Asghar Vatani Oskouei *

Assoc. Prof, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.

Abstract

In this experimental paper, the influence of using both longitudinal steel and GFRP bars on squat concrete shear wall has been investigated. The main purpose of this research is to study the effect of applying a hybrid system on the failure mechanism and seismic performance of specimens. For this purpose, three cantilever shear walls in full scale under cycle lateral loading with aspect ratio 1.0 have been tested. The S-SSW specimens with longitudinal and transverse steel bars, used as reference, and the G-SSW specimens reinforced with longitudinal and transverse GFRP bars as well as the SG-SSW specimens reinforced with both longitudinal steel and GFRP bars and GFRP transverse bars were examined. The results indicated the use of the hybrid system has changed the failure mode from concrete crushing in the compression zone to bar rupture. Also, the parameters such as residual deformation, secant stiffness, energy dissipation and ductility increased in the SG-SSW compared to the G-SSW specimen.

Keywords: Squat concrete shear wall, Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) bar, cyclic lateral loading, secant stiffness, dissipation energy.

* Corresponding Author: vatani@sru.ac.ir