

# ارزیابی رفتار چرخهای دیوار برشی بتی دارای بازشوی مقاومسازی شده با ورق فولادی

فاطمه عبدالوس<sup>۱</sup>، مجیدقلهکی<sup>۲\*</sup>، علی خیرالدین<sup>۳</sup>

۱. کارشناس ارشد مهندسی عمران گرایش سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان،

۲. استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۳. استاد ممتاز، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

mgholhaki@semnan.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۷/۱۸

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۴/۲

## چکیده

امروزه در سازه‌های ساختمانی، دیوارهای برشی بتی به علت شکل پذیری مطلوب و استهلاک انژی بالا کاربرد فراوانی دارند. از سویی دیگر دیوارهای برشی بتی می‌توانند موجب کاهش ابعاد مقطع سازه‌ای مانند تیرها و ستون‌ها شده و همچنین تغییر مکان جانبی را کاهش دهند. وجود بازشو در دیوار برشی بتی منجر به تغییر رفتار دیوار شده و همچنین اعضای جدیدی را در دیوار پدید می‌آورد، به همین سبب وجود بازشو و همچنین شرایط ابعادی و مکانی آن در رفتار دیوار بسیار تأثیرگذار است. از جمله اجزاء دیوار برشی پایه دیوارها و تیرهای رابط هستند. تیر رابط یا تیر همبند تیری است که دو دیوار برشی را که توسط بازشو ایجاد شده‌اند به یکدیگر متصل می‌کند. پایه دیوار نیز بخش عمودی دیوار است که بین بازشو و لبه محدود شده است. بدین لحاظ در این تحقیق رفتار دیوار برشی بتی دارای بازشو خارج از مرکز که توسط ورق‌های فولادی مقاومسازی شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق یک نمونه دیوار برشی بتی دارای بازشوی خارج از مرکز مورد درستی آزمایی در نرمافزار ABAQUS قرار گرفته است. در این نمونه که نمونه مرتع نامیده شده‌است مطابق با تعريف ACI318-14 یک پایه دیوار، در محدوده ابعادی دیوار و دیگری در محدوده ابعادی پایه دیوار قرار گرفته است. نمونه‌ها RCSW نام گرفته‌اند که برگرفته از Reinforced Concrete WallShear است. نمونه‌ها با استفاده از ورق‌های فولادی عمودی و افقی و مورب به شکل هم‌مان (در نمونه‌های RCSW15 تا RCSW20) مقاومسازی شده و در آن‌ها پارامترهای متفاوتی مانند افزایش ظرفیت باربری، مقاومت، سختی، شکل پذیری و استهلاک انژی مطالعه شد. در نمونه RCSW15 و RCSW16 فقط مقاومسازی در اطراف بازشو توسط ورق‌های فولادی عمودی و افقی صورت گرفته است. در نمونه RCSW17 از ورق‌های افقی و قائم و مورب به طور همزمان استفاده شده است. در نمونه RCSW18 از ورق‌های افقی و عمودی در گوش بازشو استفاده شده است. در نمونه RCSW19 از ورق‌های افقی و مورب به منظور کاهش کرنش در پاشنه دیوار استفاده شده است. در نمونه RCSW20 مقاومسازی توسط ورق‌های افقی و قائم به منظور افزایش ظرفیت خمشی و برشی انجام شده‌است، چراکه در دیوارهای برشی دارای بازشو اغلب اطراف بازشو دچار آسیب می‌شود پس در بالای بازشو از یک نوار افقی سرتاسری استفاده شده است. در آسیب‌دیدگی در اطراف بازشو از ورق‌های فولادی قائم در دو سمت بازشو نیز استفاده شده است. به منظور جلوگیری از ترک‌های قطری ناشی از گسینختگی برشی از نوارهای فولادی افقی در جان دیوار استفاده می‌گردد که ظرفیت برشی دیوار را افزایش می‌دهد. از طرفی با افزایش مقدار بار واردۀ ممان واردشده بر المان‌های مرزی افزایش یافته و موجب کمانش می‌گردد. همچنین به منظور کاهش آسیب‌دیدگی برشی از نوارهای فولادی افقی در جان دیوار استفاده می‌گردد که ظرفیت برشی دیوار را افزایش می‌دهد. از طرفی با افزایش مقدار بار واردۀ ممان واردشده بر المان‌های مرزی افزایش یافته و موجب کمانش می‌گردد.

می شود پس در نواحی المان مرزی نیز از دو ورق فولادی قائم استفاده شده است. بارگذاری نمونه‌ها به صورت جانبی و از نوع چرخهای است. در بین طرح‌های مقاوم سازی شده نمونه RCSW20 طرح برتر انتخاب شد زیرا این طرح موجب افزایش مقاومت نهایی سازه به مقدار  $127/3\%$  و افزایش مقاومت ماقریم به مقدار  $13/42\%$  و افزایش مقاومت ترک خوردگی به مقدار  $53/22\%$  شد و همچنین مقدار انرژی مستهلك شده را  $8/16\%$  افزایش داد.

**واژه‌های کلیدی:** دیوار برشی بتنی، پایه دیوار، بازشو، مقاوم سازی، ورق فولادی.

سبب ماقریم برش پایه توسط خمش کنترل می‌گردد و ورق‌های فولادی به نحوی مانع گسترش ترک‌های برشی می‌شوند و به همین دلیل تغییر مکان جانبی افزایش می‌یابد.<sup>[7]</sup> در سال  $2014$  موسوکارا انهدام دیوارهای برشی با بازشوهای نامنظم را تحت بار لرزه‌ای مورد بررسی قرارداد. در این تحقیق مشخص شد که تشکیل مفصل پلاستیک در دیوارهایی که دارای بازشوهای نامنظم هستند متفاوت‌تر و پیچیده‌تر از دیوارهای با بازشوهای منظم است. همچنین شکل انهدام دیوارهای برشی با بازشوهای نامنظم متفاوت از دیوارهای برشی با بازشوهای منظم است. دیوارهای برشی با بازشوهای نامنظم دارای سختی بیشتری هستند و ظرفیت باربری بیشتری در مقایسه با دیوارهای برشی منظم دارند.<sup>[8]</sup> در سال  $2016$  لیما و همکاران بر روی تأثیر جهت‌گیری الیاف CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) در مقاوم سازی سازه‌های بتن‌آرمé پرداختند. هدف اصلی در این آزمایش بار انهدام نهایی CFRP است که بر روی اعضاء با جهت‌گیری متفاوت الیاف آنجام شده است. نتیجه نهایی مطابقت خوبی با داده‌های آزمایشگاهی به جز در دیوارهای برشی بتن‌آرمé داشت. در واقع دیوارهای برشی بتن‌آرمé نشان دادند که جهت قرارگیری الیاف مطابق با جهت بارگذاری است و تأثیر ناچیزی بر بار انهدام نهایی دارد.<sup>[9]</sup> در سال  $2018$  اصلاحی و همکاران با استفاده از روش اجزاء محدود به تأثیر محل قرارگیری و اندازه بازشوها در دیوار بتن‌آرمé پرداختند. همچنین نمونه‌هایی را با استفاده از ورق‌های FRP (Fiber Reinforced Polymer) مقاوم سازی نمودند. بر طبق مطالعات نتیجه گرفتند که بازشوها موجب کاهش ظرفیت باربری دیوار، کاهش انرژی مستهلك شده توسط دیوار و کاهش سختی می‌شود اما تغییر مکان دیوار را افزایش می‌دهد.<sup>[10]</sup> در سال  $2019$  حجازی و همکاران به بررسی رفتار غیرخطی یک سازه سه‌بعدی با استفاده از روش

## ۱- مقدمه

دیوارهای برشی از جمله سیستم‌های رایج مقاوم در برابر زلزله هستند که با داشتن مزایای زیاد مورد توجه قرار گرفته‌اند و به تازگی علاوه بر سازه‌های بتن‌آرمé در سازه‌های فولادی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. دیوارهای برشی یا دیوارهای سازه‌ای دیوارهای قائم بتنی و یا فولادی هستند که هم از نظر معماری به عنوان جداگانه و هم از نظر سازه‌ای به عنوان تحمل کننده بارهای جانبی و قائم در سازه به کار می‌روند.<sup>[1-3]</sup> وجود بازشو در دیوار برشی منجر به ایجاد اجزاء افقی و عمودی می‌شود. قسمت عمودی دیوار که بین بازشو و لبه قرار می‌گیرد و یا در امتداد افقی بین دو بازشو قرار می‌گیرد پایه دیوار نام دارد که می‌تواند عملکردی همانند ستون و یا دیوار داشته باشد. المان‌های افقی که بین دو بازشو قرار می‌گیرند تیرهای رابط یا همبند نام دارند.<sup>[4]</sup> بررسی زلزله‌های گذشته کشور ایران نشان می‌دهد که بسیاری از ساختمان‌های بتن‌آرمé ایران در برابر زلزله مقاوم نیستند. خطاهای طراحی و اجرایی، تغییر ضوابط آینین‌نامه‌ای، آسیب دیدن ساختمان‌ها در برابر زلزله، حوادث غیرمتربقه، تغییر کاربری و توسعه بنا از جمله دلایلی می‌باشند که مقاوم سازی و بهسازی لرزه‌ای را الزامی می‌سازند.<sup>[5]</sup> فولاد یکی از مصالح متداولی است که برای مقاوم سازی سازه بتنی استفاده می‌شود. روکش‌های فولادی به منظور افزایش مقاومت برشی، بھبود مقاومت وصله‌های پوششی و افزایش شکل‌پذیری در عضو بتن‌آرمé به کار می‌روند.<sup>[6]</sup> در سال  $2013$  در ترکیه آزمایش‌هایی بر روی مقاوم سازی دیوارهای برشی بتن‌آرمé با استفاده از ورق‌های فولادی انجام شد. هدف از انجام این آزمایش بررسی رفتار هیسترزیس دیوارهای برشی بتن‌آرمé تقویت شده با ورق فولادی بود. آن‌ها نتیجه گرفتند که با مقاوم سازی، مقاومت خمشی نمونه‌ها افزایش یافته و به همین

## ۲- اعتبار سنجی مدل سازی

در این قسمت برای درستی آزمایش از مطالعات آزمایشگاهی آقای حسینی استفاده شده است. یک نمونه دیوار برشی دارای بازشو از مطالعه آزمایشگاهی انتخاب شده و درستی آزمایش شد. نمونه مرجع بدون مقاوم سازی RCSW نام دارد که مخفف Reinforced Concrete Shear Wall (دیوار برشی بتون آرم) است.

### ۲-۱- مشخصات نمونه های آزمایشگاهی

در شکل (۱) نمای دیوار دارای بازشو نشان داده شده است. در شکل (۲) و (۳) الگوی بارگذاری رفت و برگشتی در تحقیق حاضر نشان داده شده است.

شکل ۱. نمونه آزمایشگاهی [۲]

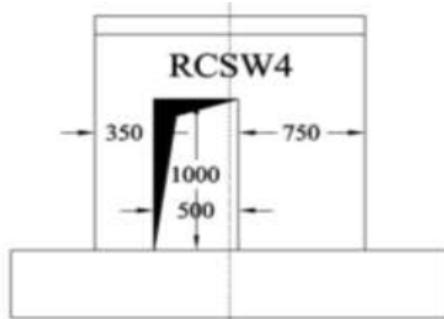


Fig.1. Laboratory sample

شکل ۲. تاریخچه پیشنهادی ACI374.2R جهت اعمال بار شبیه استاتیکی بر اساس جابجایی تسیلیم [۲]

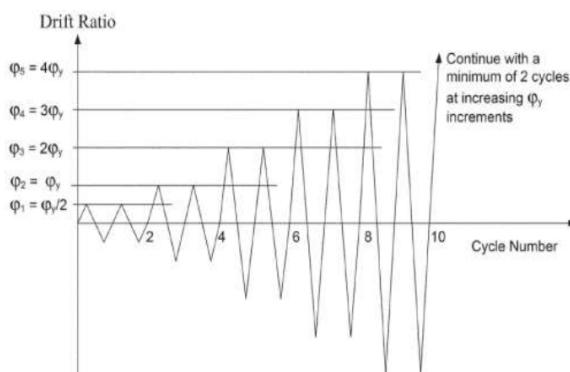


Fig. 2. Proposed history of ACI374.2R for quasi-static load based on yield displacement

اجزاء محدود در نرم افزار آباکوس پرداختند. هدف از این تحقیق مطالعه رفتار لرزه ای دیوارهای برشی دارای بازشو بود که به وسیله ورق های FRP مقاوم سازی شده بودند و تحت بار چرخه ای قرار گرفته بودند. نتایج اجزاء محدود نشان داد که ورق های CFRP مقاومت جانبی دیوار را افزایش می دهند و همچنین موجب افزایش ظرفیت تغییر شکل دیوارهای برشی دارای بازشو می شوند. همچنین شکل پذیری و انرژی استهلاک شده توسط دیوار را افزایش می دهند [۱۱]. در سال ۲۰۲۰ لی و همکاران به بررسی رفتار چرخه ای دیوارهای برشی بتونی با مقاومت بالا به همراه فولاد با مقاومت بالا پرداختند. افزودن ورق های فولادی در پایین دیوار موجب بهبود رفتار چرخه ای و ویژگی های خود محوری دیوار شد [۱۲]. در سال ۲۰۲۱ چانگ و همکاران تحقیقاتی بر روی بهبود رفتار خمی سازه های قدیمی که با استفاده از دیوارهای برشی بتون آرم مقاوم سازی شدن، انجام دادند. در این تحقیق مشخص شد که می توان مقاومت خمی دیوار برشی و اتصال ورق فولادی بدون تغییر در اندازه دیوار برشی افزایش داد. همچنین نتیجه گرفتند که استفاده از فولاد در بهسازی دیوار برشی می تواند مقاومت خمی آن را بین ۱۶ تا ۲۹٪ افزایش دهد و شکل پذیری نیز می تواند از ۲۰۰ تا ۴۰۰٪ رشد داشته باشد [۱۳]. با توجه به پیشینه تحقیقات انجام شده، مطالعه عددی رفتار دیوار برشی مقاوم سازی شده توسط ورق های فولادی با طرح های متفاوت، ناچیز بوده و همچنین مقاوم سازی سازه های قدیمی نیز موضوع مطرحی است که کمتر به آن پرداخته شده است. بنابر این در این تحقیق سعی بر این است که این موضوعات به طور کامل بررسی شوند. فلوچارتی از روند انجام تحقیق در ادامه آمده است.

### Evaluation of the Cyclic Behavior of the RCSW with Opening retrofitted with Steel Plate

An overview of research concepts and background

Validation of modeling

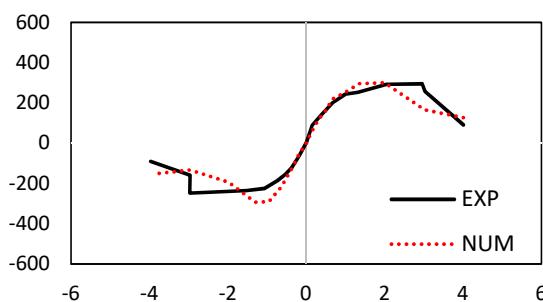
Reinforcement of the sample

Review and interpretation of results

Conclusion

شکل ۴. مقایسه منحنی بار افزون نمونه آزمایشگاهی و نمونه اجزاء

محدود

**Fig. 4.** Comparison of extra load curve of laboratory sample and sample of finite element shear wall with opening

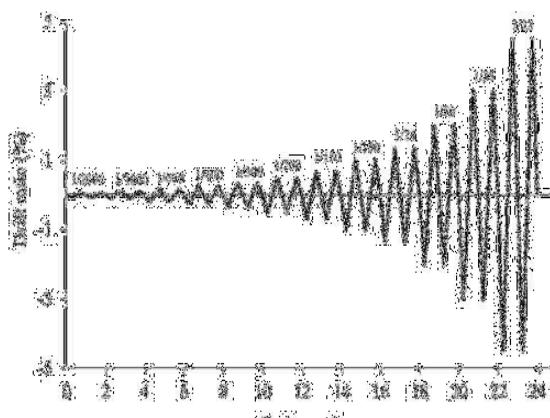
باتوجه به مقایسه صورت گرفته بین دو نمودار دیده می‌شود که مقادیر مقاومت تسليم، مقاومت ماقریم، مقاومت نهایی و انرژی مستهلك شده به یکدیگر نزدیک هستند و مشابهت زیادی بین نتایج نمونه آزمایشگاهی و نمونه عددی وجود دارد.

### ۳- مدل سازی و تفسیر نتایج

در این بخش ابتدا دیوار برشی در ابعاد آزمایشگاهی که در پخش قبل درستی آزمایش شد مقاوم سازی شده است. دیوارها توسط ورق های فولادی افقی و عمودی و مورب با طرح های مختلف مقاوم سازی شدند. در هریک از دیوارها اثر ضخامت ورق فولادی با استفاده از اعمال سه ضخامت مختلف ورق بررسی شد و با یکدیگر مقایسه شدند. همچنین با ثابت نگهداشت ضخامت ورق نوع ورق فولادی تغییر پیدا کرد و دو نوع ورق ST-37 و ST-52 با یکدیگر مقایسه شد. الگوهای متفاوت مقاوم سازی در جدول زیر آمده است. در هریک از نمونه ها T نشان دهنده ضخامت ورق فولادی است، در T1 ضخامت ورق فولادی ۳ میلی متر، در T2 ضخامت ورق فولادی ۵ میلی متر، در T3 ضخامت ورق فولادی ۷ میلی متر، در نمونه های ST-52 ST-37 ضخامت ورق فولادی ۳ میلی متر و ورق فولادی از نوع ST-52 است.

شکل ۳. تاریخچه اعمال بار شبیه استاتیکی رفت و برگشتی در تحقیق حاضر

[۲]

**Figure 3.** History of quasi-static reciprocating load in the present research

در جدول ۱ پارامترهای پلاستیسیته آسیب دیده بتن تعریف شده است. پارامترهایی همچون زاویه اتساع، خروج از مرکزیت، ویسکوزیته و سایر موارد هریک با آزمون و خطاب سنجدیده شده و مناسب ترین مقدار برای هر کدام انتخاب شده است.

جدول ۱: پارامترهای کالیبره شده برای مدل پلاستیسیته آسیب دیده بتن

Dilation Angle	Eccentricity	Fb0/fco	K	Viscosity Parameter
25	0.1	1.16	0.67	0.0002

**Table 1.** Calibrated Parameters for the damaged Plasticity model of concrete

### ۲-۲- مدل سازی نمونه آزمایشگاهی

برای مدل سازی فولاد از المان سه بعدی دوگرهی خرپایی T3D2 و برای مدل سازی بتن از المان سه بعدی هشت گرهی C3D8R استفاده شد. در این تحقیق از مدل پلاستیسیته آسیب دیده بتن برای مدل سازی دیوار برشی استفاده شده است. مدل سازی در نرم افزار آباکوس انجام شد و نمونه تحت بار هیسترزیس قرار گرفت و نمودار پوش اور حاصله با نمونه آزمایشگاهی مقایسه شد که نتیجه آن در شکل (۴) آمده است.

جدول ۲. الگوهای مقاوم‌سازی در تحقیق حاضر

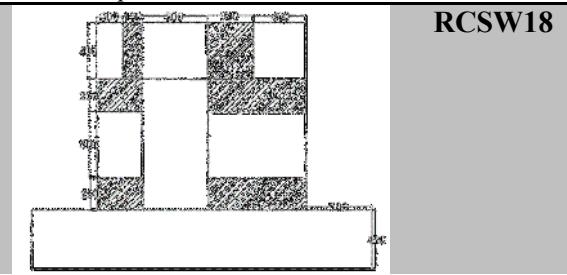
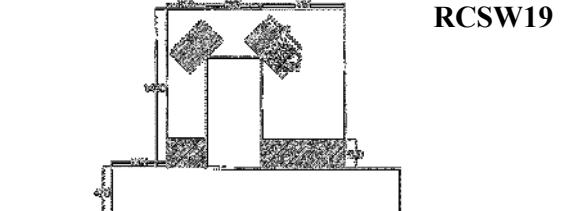
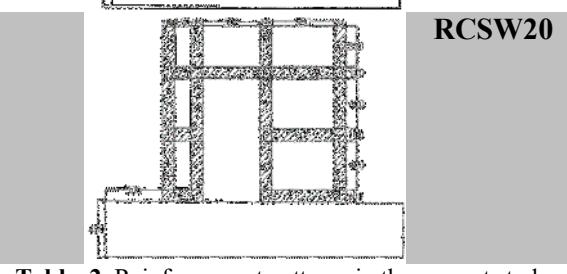
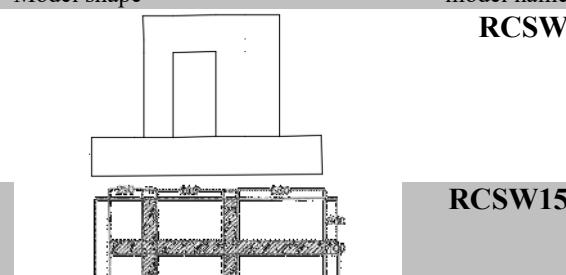
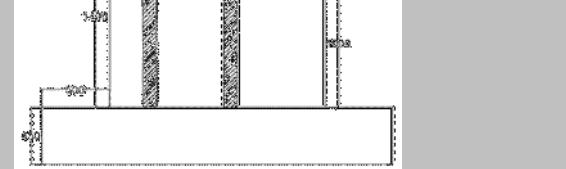
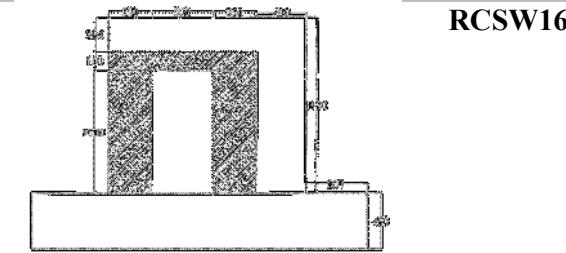
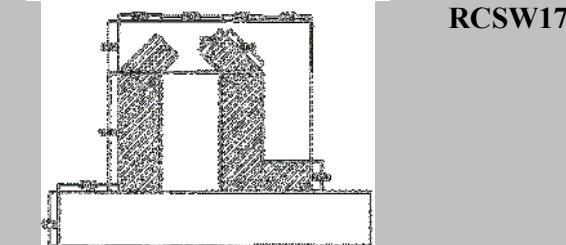
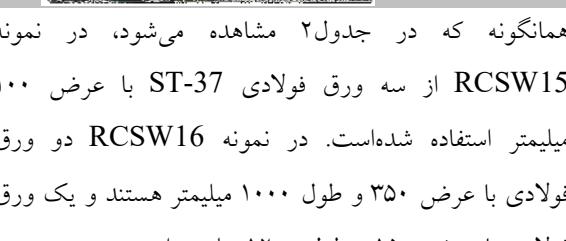
Model shape	model name
	RCSW18
	RCSW19
	RCSW20
	RCSW
	RCSW15
	RCSW16
	RCSW17
	RCSW19

Table 2. Reinforcement patterns in the present study

همانگونه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، در نمونه RCSW15 از سه ورق فولادی ST-37 با عرض ۱۰۰ میلیمتر استفاده شده‌است. در نمونه RCSW16 دو ورق فولادی با عرض ۳۵۰ و طول ۱۰۰ میلیمتر هستند و یک ورق فولادی با عرض ۱۵۰ و طول ۱۲۰۰ میلیمتر است.

در شکل (۵)، نمودار نیرو تغییر مکان ۶ طرح مختلف مقاوم‌سازی شده با ثابت نگهداشتن ضخامت ۳ میلی‌متر و نوع ورق فولادی بررسی شده است. هدف از این قسمت یافتن بهترین طرح مقاوم‌سازی است. در نمودار اول ورق‌های فولادی ST-37 با یکدیگر مقایسه شده و سپس در شکل (۶) به بررسی ورق‌های فولادی ST-52 پرداخته شده‌است.

در نمونه RCSW17 از دو ورق فولادی با عرض ۳۵۰ و طول ۱۰۰۰ میلیمتر و سه ورق با عرض ۲۵۰ و طول ۴۰۰ میلیمتر استفاده شده‌است. در نمونه RCSW18 از دو ورق فولادی با عرض ۲۵۰ و طول ۳۵۰ میلیمتر و دو ورق فولادی با عرض ۲۵۰ و طول ۷۵۰ میلیمتر و یک ورق به عرض ۳۵۰ و طول ۴۳۰ میلیمتر استفاده شده‌است. در نمونه RCSW19 هر ۴ ورق دارای عرض

۴۱

مقاومت مکزیمم در نمونه‌های مقاوم سازی شده با ورق فولادی ST-37 و ضخامت ثابت ۳ میلی‌متر انجام گرفته است.

مقایسه مقادیر مقاومت نهایی و مقاومت مکزیمم و مقاومت ترک خورده‌گی این ۷ نمونه به ترتیب از بیشترین مقدار به صورت زیر است:

شکل ۷. نمودار مقایسه مقدار مقاومت نهایی نمونه‌های مقاوم سازی شده با ورق فولادی ST-37 و ضخامت ۳ میلی‌متر

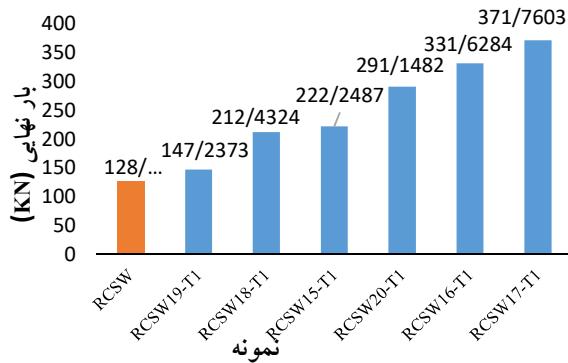


Figure 7. Comparison diagram of the final strength of the reinforced specimens with ST-37 steel sheet and thickness of 3 mm

شکل ۸ نمودار مقایسه مقدار مقاومت مکزیمم نمونه‌های مقاوم سازی شده با ورق فولادی ST-37 و ضخامت ۳ میلی‌متر

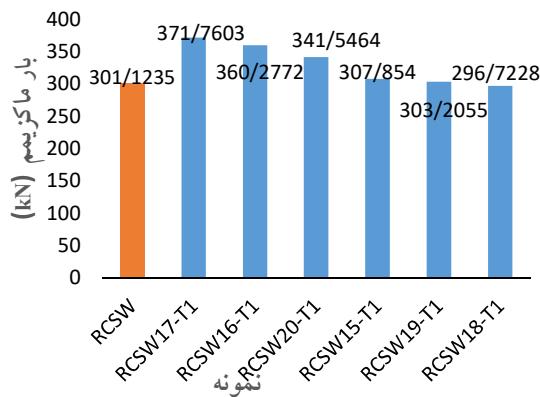


Figure 8. Comparison diagram of the maximum strength of the samples reinforced with ST-37 steel sheet and thickness of 3 mm

شکل ۵ نمودار بار افزون نیرو-تغییر مکان سازه‌های مقاوم سازی شده با ورق فولادی ST-37 و ضخامت ۳ میلی‌متر

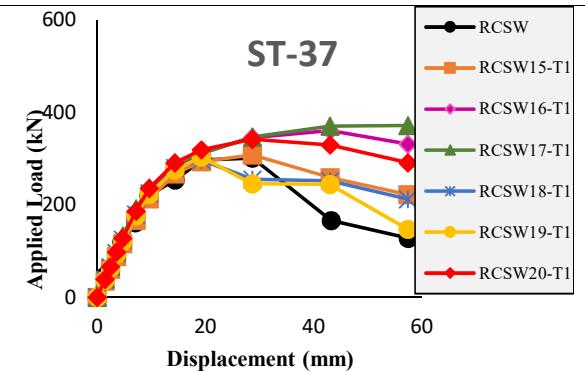


Figure 5. Stress load-displacement diagram of structures reinforced with ST-37 steel sheet and thickness of 3 mm

شکل ۶ نمودار بار افزون نیرو-تغییر مکان سازه‌های مقاوم سازی شده با ورق فولادی ST-52 و ضخامت ۳ میلی‌متر

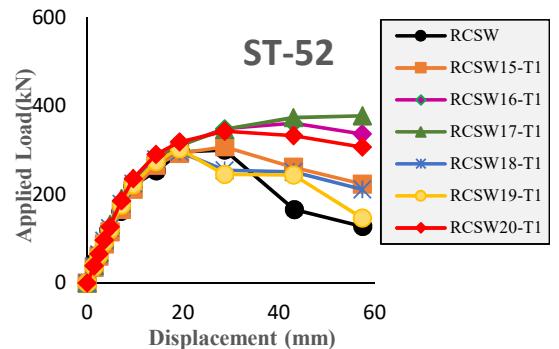
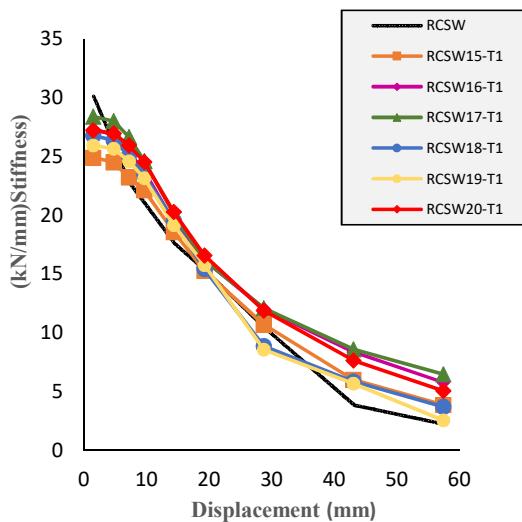


Figure 6. Stress load-displacement diagram of structures reinforced with ST-52 steel sheet and thickness of 3 mm

با توجه به شکل بالا استفاده از ورق فولادی ST-52 در نمونه‌های مقاوم سازی شده تاثیری بر میزان مقاومت مکزیمم نمونه ندارد ولی مقاومت نهایی نمونه‌ها را به مقدار اندکی افزایش داده است. ورق فولادی ST-52 به دلیل دارا بودن مقدار کربن بیشتر و آلیاژهایی نظیر کروم، مس، منگنز، نیکل ... دارای سختی بیشتری بوده ولی از طرفی دارای شکل پذیری کمتری است. به همین دلیل ورق فولادی ST-37 به دلیل شکل پذیری مناسب، خواص مکانیکی مطلوب و جوش پذیری خوب بیشتر مورد کاربرد است. بدین جهت سایر بررسی‌ها از جمله مقاومت نهایی، مقاومت ترک خورده‌گی،

در شکل (۱۰) منحنی کاهش سختی برای ۶ طرح مقاوم‌سازی با نظر گرفتن ضخامت ثابت ۳ میلی‌متر و ورق فولادی ST-37 آورده شده است.

شکل ۱۰. نمودار کاهش سختی طرح‌های متفاوت مقاوم‌سازی با ضخامت ۳ میلی‌متر و ورق‌های فولادی ۷

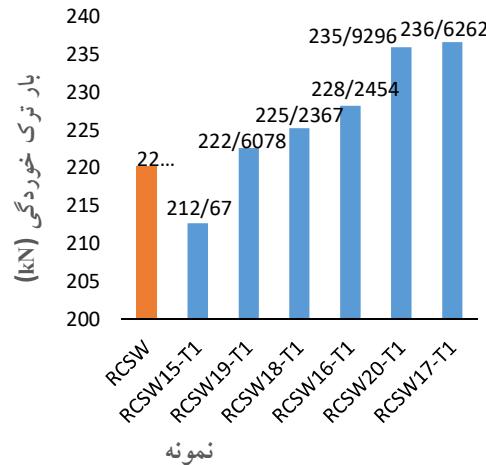


**Fig. 10.** Hardness reduction diagram of different reinforcement designs with a thickness of 3 mm and ST-37 steel sheets

با توجه به شکل قبل نمونه RCSW17 دارای بیشترین مقدار سختی اولیه است.

باتوجه به بررسی‌های انجام‌شده در نمونه RCSW15، تغییر ضخامت تاثیری بر میزان افزایش ظرفیت باربری نداشته است و لی با افزایش ضخامت ورق فولادی، مقاومت ترکخوردگی و مقدار سختی نمونه افزایش یافته است. در نمونه RCSW16 با افزایش ضخامت ورق‌های فولادی ظرفیت باربری افزایش پیدا کرده است. در این نمونه با مقاوم‌سازی کامل پایه دیوار، مقاومت نمونه به مقدار زیادی نسبت به نمونه مرجع افزایش یافته است. در نمونه RCSW17 با افزایش ضخامت ورق‌های فولادی ظرفیت باربری افزایش پیدا کرده است. از ظرفی در این نمونه افزایش ضخامت تاثیری بر میزان مقاومت نهایی نداشته است. در این نمونه به علت اینکه اطراف بازشو با ورق‌های فولادی مورب مقاوم‌سازی شده‌اند مقاومت نهایی و مقاومت ماکزیمم آن بیشتر از سایر نمونه‌ها است. در نمونه RCSW18 افزایش ضخامت

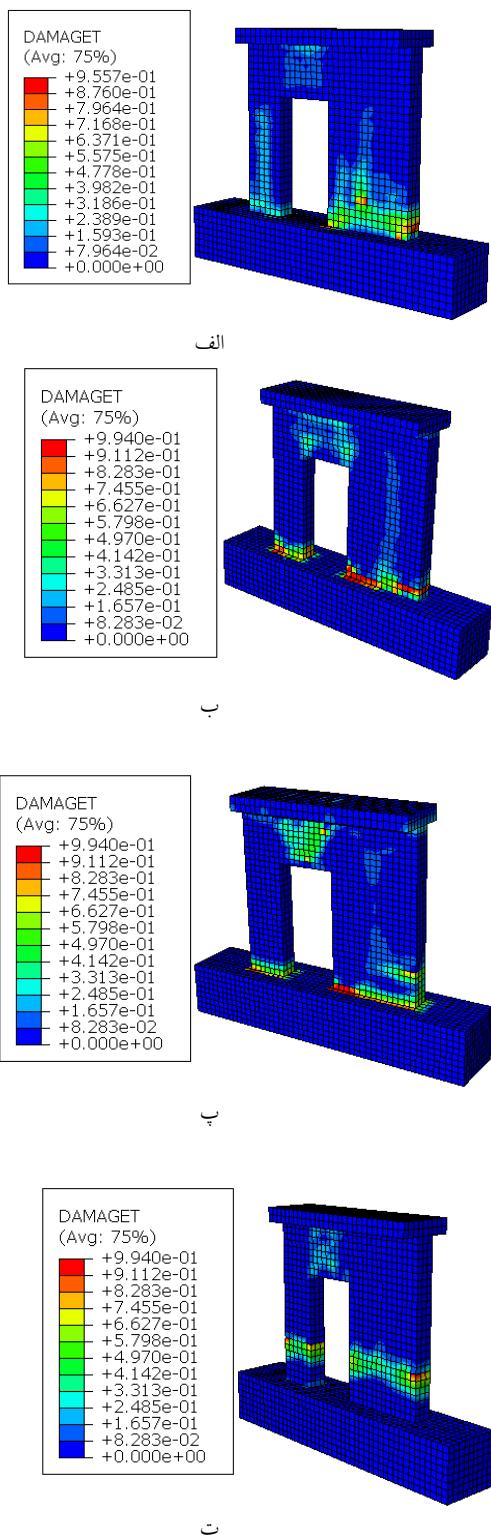
شکل ۹. نمودار مقایسه مقدار مقاومت ترکخوردگی نمونه‌های مقاوم‌سازی شده با ورق فولادی ST-37 و ضخامت ۳ میلی‌متر



**Fig. 9.** Comparison diagram of cracking resistance of ST-37 steel sheet reinforced specimens with a thickness of 3 mm

با توجه به نتایج بالا، در نمونه‌های مقاوم‌سازی شده با ورق فولادی ST-37 مقدار مقاومت نهایی در نمونه RCSW16 در نمونه RCSW15، در نمونه RCSW17 در نمونه RCSW18، در نمونه RCSW19 در نمونه RCSW20 افزایش یافته است. مقدار مقاومت ماکزیمم در نمونه RCSW15 در نمونه RCSW16، در نمونه RCSW17 در نمونه RCSW18، در نمونه RCSW19 در نمونه RCSW20 افزایش یافته و در نمونه RCSW15 در نمونه RCSW16، در نمونه RCSW17 در نمونه RCSW18، در نمونه RCSW19 در نمونه RCSW20 کاهش یافته است. مقدار مقاومت ترکخوردگی در نمونه RCSW20 در نمونه RCSW15 نگردد است. در نمونه RCSW16 در نمونه RCSW17 در نمونه RCSW18 در نمونه RCSW19 در نمونه RCSW20 نسبت به نمونه مرجع افزایش یافته است. در نمونه RCSW15 و RCSW20 مقدار شکل پذیری تغییری نگردد است. در نمونه RCSW16 در نمونه RCSW17 نسبت به نمونه مرجع کاهش پیدا کرده است. در نمونه RCSW18 در نمونه RCSW19 به مقدار ۰/۲۱/۸۳ نسبت به نمونه مرجع افزایش یافته است.

شکل ۱۱. کانتور آسیب کششی نمونه‌های مقاوم‌سازی شده (الف) نمونه RCSW15 (ب) نمونه RCSW16 (پ) نمونه RCSW17 (ت) نمونه RCSW20 (ج) نمونه RCSW19



در این طرح تأثیر ناچیزی بر میزان افزایش ظرفیت باربری داشته است. در نمونه RCSW19 با افزایش ضخامت ورق‌های فولادی ظرفیت باربری افزایش پیدا کرده است.

در جدول زیر مقدار تغییرات شکل‌پذیری و انرژی مستهلك شده توسط هر نمونه نسبت به نمونه مرجع نشان داده شده است.

جدول ۳. تغییرات شکل‌پذیری و انرژی جذب شده نسبت به نمونه مرجع

Model name	Percentage of energy absorption change	Percentage of ductility change
RCSW15-T1	0.31	0
RCSW15-T2	0.87	0
RCSW15-T3	-0.09	12.23
RCSW16-T1	17.69	-26.42
RCSW16-T2	22.58	-15.07
RCSW16-T3	26.47	-21.4
RCSW17-T1	21.23	-34.5
RCSW17-T2	24.80	-34.5
RCSW17-T3	31.05	-34.93
RCSW18-T1	4.48	21.83
RCSW18-T2	6.14	12.23
RCSW18-T3	8.56	-1.53
RCSW19-T1	6.39	21.83
RCSW19-T2	5.3	12.23
RCSW19-T3	7.09	-1.75
RCSW20-T1	16.8	0
RCSW20-T2	20.4	-12.66
RCSW20-T3	21.54	-15.07

Table 3. Changes in ductility and absorbed energy compared to the reference sample

در شکل (۱۱) کانتور آسیب کششی طرح‌های مختلف مقاوم سازی شده آمده است. در تمامی نمونه‌ها ضخامت ورق فولادی ۳ میلی‌متر است.

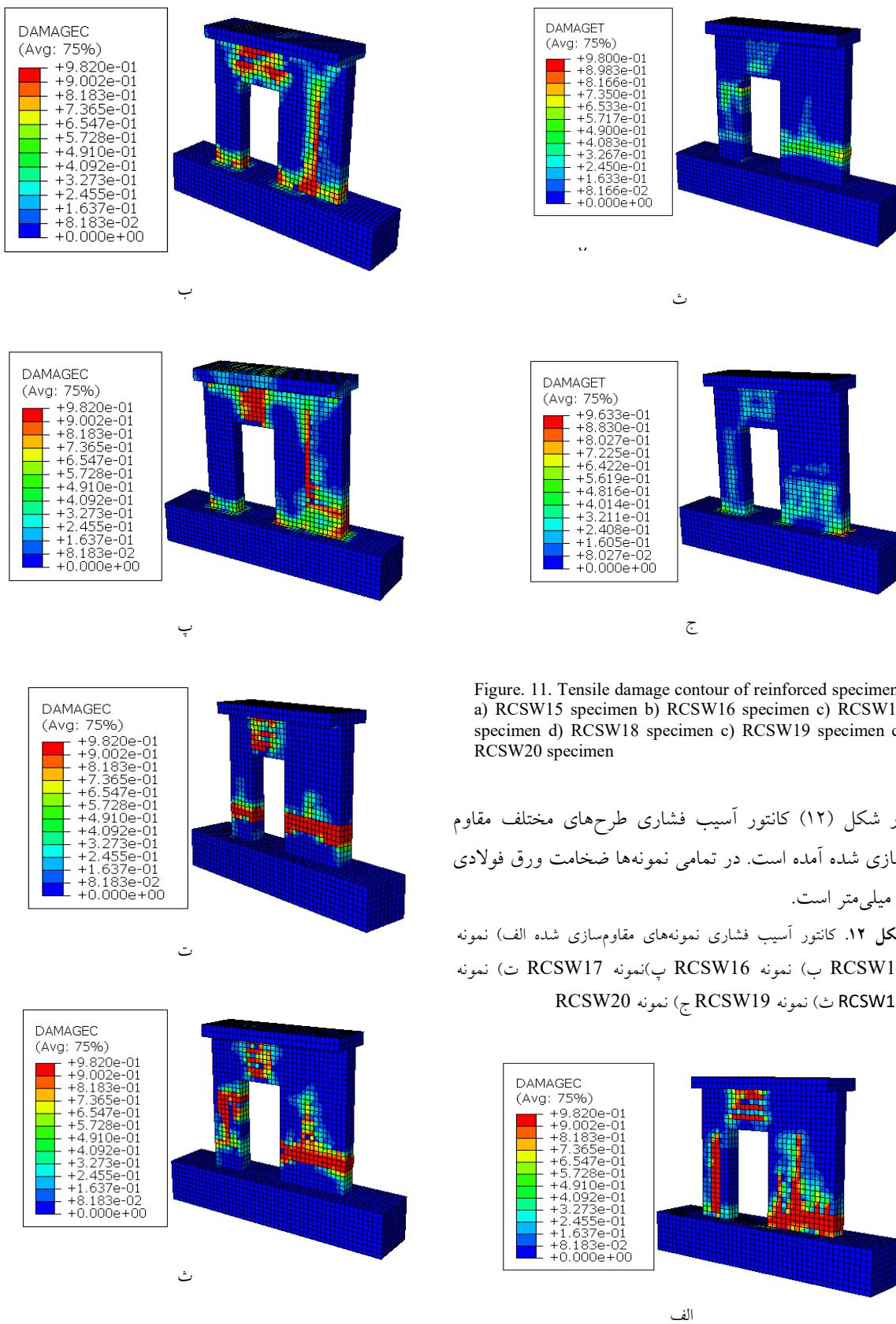
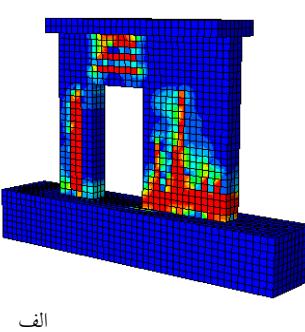


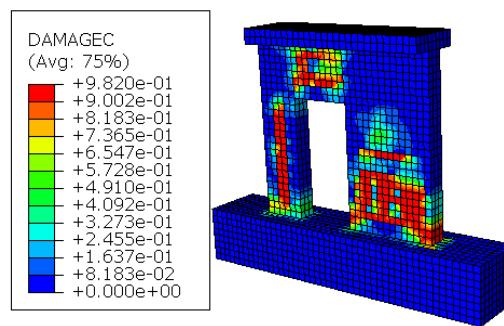
Figure. 11. Tensile damage contour of reinforced specimens  
a) RCSW15 specimen b) RCSW16 specimen c) RCSW17  
specimen d) RCSW18 specimen e) RCSW19 specimen f)  
RCSW20 specimen

در شکل (۱۲) کانتور آسیب فشاری طرح‌های مختلف مقاوم  
سازی شده آمده است. در تمامی نمونه‌ها ضخامت ورق فولادی  
۳ میلی‌متر است.

شکل (۱۲). کانتور آسیب فشاری نمونه‌های مقاوم‌سازی شده (الف) نمونه  
ب) نمونه RCSW16 پ) نمونه RCSW17 ت) نمونه RCSW15  
RCSW19 (ج) نمونه RCSW20 (الف)



مقدار بار واردہ در بخش‌های مختلف دیوار ترک‌های قطربندی که ناشی از گسیختگی برشی هستند دیده می‌شود که به منظور جلوگیری از این ترک‌ها از نوارهای فولادی افقی در جان دیوار استفاده می‌گردد که ظرفیت برشی دیوار را افزایش می‌دهد. از طرفی دیگر برای کاهش ترک‌ها در گوشه بازشوها در نواحی المان مرزی نیز از دو ورق فولادی قائم استفاده شده است. بدین ترتیب طرح مقاوم‌سازی منتخب نمونه RCSW20 است که از نظر اقتصادی و میزان حجم ورق فولادی به کاررفته نیز معمولی‌به‌صرفه بوده و از لحاظ راحتی اجرا و نصب نیز کاملاً توجیه‌پذیر است. از طرفی دیگر نتایج نشان می‌دهد که استفاده از فولاد ST-52 به میزان بسیار ناچیزی در افزایش ظرفیت پاره‌بری مؤثر بوده است.



ج

**Fig. 12.** Compressive damage contour of reinforced specimens  
a) RCSW15 specimen b) RCSW16 specimen c) RCSW17  
specimen d) RCSW18 specimen e) RCSW19 specimen f)  
RCSW20 specimen

با توجه به شکل‌های بالا مشاهده می‌شود که در نمونه‌های RCSW16 و RCSW15 صورت گرفته است، با توجه به اینکه تیر رابط به طور کامل مقاوم‌سازی نشده، ترک‌های قطربندی در تیر رابط رخ داده است. در نمونه RCSW17 در سمت چپ بازشو ترک‌های قطربندی به طور کامل از بین رفته‌اند. در نمونه RCSW18 ترک‌های قطربندی در بالای بازشو کاهش پیدا کرده‌اند. در نمونه RCSW19 بیشترین ترک‌ها در گوشه بازشو و محل اتصال دیوار به فونداسیون قرار گرفته‌اند. در نمونه RCSW20 مقاومت خمی و برشی افزایش پیدا کرده است و ترک‌ها در وسط دیوار کاهش پیدا کرده‌اند.

#### ۴-نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که با افزایش حجم ورق فولادی مصرفی مقاومت دیوارهای برشی نیز افزایش می‌یابد که این یک امر بدبختی است ولی استفاده از ورق‌های فولادی افقی و قائم به طور هم‌زمان مانند نمونه RCSW20 دارای شرایط مطلوب‌تری هستند. چراکه در دیوارهای برشی دارای بازشو غالب اطراف بازشو دچار آسیب می‌شود پس بهتر است تا در بالای بازشو از یک نوار افقی سرتاسری استفاده گردد. همچنین به منظور کاهش آسیب‌دیدگی در اطراف بازشو از ورق‌های فولادی قائم در دو سمت بازشو نیز استفاده شده است. با افزایش

- Miller, "The effects of CFRP orientation on the strengthening of reinforced concrete structures," *Struct. Des. Tall Spec. Build.*, vol. 25, no. 15, pp. 759–784, 2016.
- [10] K. Aslani and O. Kohnehpooshi, "Structural behavior of FRP-strengthened reinforced concrete shear walls with openings using finite element method," *Adv. Struct. Eng.*, vol. 21, no. 7, pp. 1072–1087, 2018.
- [11] M. Husain, A. S. Eisa, and M. M. Hegazy, "Strengthening of reinforced concrete shear walls with openings using carbon fiber-reinforced polymers," *Int. J. Adv. Struct. Eng.*, vol. 11, no. 2, pp. 129–150, 2019.
- [12] X. Li, J. Zhang, and W. Cao, "Hysteretic behavior of high-strength concrete shear walls with high-strength steel bars: Experimental study and modelling," *Eng. Struct.*, vol. 214, p. 110600, 2020.
- [13] S.-Y. Kim, U. Cho, J.-H. Chung, B.-I. Bae, and C.-S. Choi, "Seismic Performance of Existing RC Structural Walls Retrofitted in Flexure by Wall End Plate," *Sustainability*, vol. 13, no. 2, p. 509, 2021.

# Evaluation of cyclic behavior of reinforced concrete shear wall having opening by steel plate

Fatemeh Abdoos<sup>1</sup>, Majid Gholhaki<sup>2\*</sup>, Ali Kheyroddin

1. M.Sc Civil Engineering, Semnan University

2. Professor, Semnan University

3. Distinguished Professor, Semnan University

## Abstract

owadays, concrete shear walls are widely used in construction structures due to their favorable ductility and high energy consumption. On the other hand, concrete shear walls can reduce the cross-sectional dimensions of structures such as beams and columns and also reduce lateral displacement. The presence of an opening in a concrete shear wall leads to a change in the behavior of the wall and also creates new members in the wall, therefore the presence of the opening as well as its dimensional and spatial conditions are very influential in the behavior of the wall. Among the components of the shear wall are the base walls and connecting beams. A connecting beam or connecting beam is a beam that connects two shear walls created by an opening. The base of the wall is also the vertical part of the wall that is limited between the opening and the edge. Therefore, in this research, the behavior of concrete shear wall with off-center opening reinforced by steel sheets has been investigated. In this research, a sample of concrete shear wall with off-center opening has been checked in ABAQUS software. In this sample, which is called the reference sample, according to the definition of ACI 318-14, one wall base is placed in the dimensional range of the wall and the other is placed in the dimensional range of the wall base. The samples are called RCSW, which is derived from Reinforced Concrete Shear Wall. The samples are reinforced using vertical, horizontal and diagonal steel sheets simultaneously (in samples RCSW15 to RCSW20) and different parameters such as increasing load capacity, strength, hardness, ductility and energy consumption are studied. became. In the sample RCSW15 and RCSW16, only reinforcement around the opening has been done by vertical and horizontal steel sheets. In the RCSW17 sample, horizontal, vertical and diagonal sheets are used simultaneously. In the sample RCSW18, horizontal and vertical sheets are used in the opening corner. In the RCSW19 sample, horizontal and diagonal sheets have been used to reduce the strain in the heel of the wall. In the RCSW20 sample, strengthening by horizontal and vertical sheets has been done in order to increase the bending and shear capacity, because in shear walls with openings, the area around the opening is often damaged, so a horizontal strip was used above the opening. . Also, in order to reduce injuries around the opening, vertical steel sheets have been used on both sides of the opening. In order to prevent diagonal cracks caused by shearing, horizontal steel strips are used in the wall, which increases the shear capacity of the wall. On the other hand, with the increase of the load, the moment on the boundary elements increases and causes the buckling of the rebars in this section and the bending capacity of the wall decreases, so two vertical steel sheets are used in the boundary element areas. Samples are loaded laterally and cyclically. Among the retrofitted designs, RCSW20 sample was selected as the best design because this design increased the final strength of the structure by 127.3%, the maximum strength by 13.42%, and the cracking resistance by 22.53%. and also increased the amount of consumed energy by 16.8%.

**Keywords:** Concrete shear wall, wall base, opening, reinforcement, steel sheet.