



Evaluation Cyclic Behavior of Concrete Shear Wall with Opening Retrofitting with Composite

F. Zahiri, A. Kheyroddin, M. Gholhaki*

Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

ABSTRACT: In recent years, reinforced concrete (RC) shear walls have been welcomed by structural designers with regard to their desirable seismic performance in terms of ductility. Most of the time, creating an opening in the RC shear wall due to architectural issues, which is inevitable, results in reducing the strength, ductility and stiffness of the wall. For this reason, the issue of retrofitting the RC shear walls is developed to solve these weaknesses. In this paper, first, a laboratory sample of the reinforced concrete shear wall without opening was validated in ABAQUS software. After verification of the sample, the cyclic shear wall behavior of reinforced concrete with retractable openings with eight different designs horizontally, vertically, diagonally and combined by carbon fiber reinforced sheets (CFRP) in ABAQUS finite element software has been evaluated. For nonlinear static analysis, the specimens were subjected to lateral loading, cycling, and various parameters such as stiffness, displacement, and ductility were examined and compared. The results were presented in the form of capacity (force-displacement) curves, ductility, compressive and tensile failure contours. As the results show, reinforcement of shear walls of reinforced concrete with opening increases flexural strength, shear and ductility. The results showed that the RCSW8 sample increased by 12% compared to the reference sample bearing capacity. The hardness of the RCSW8 sample is increased by 15% and the ductility is improved.

Review History:

Received: Sep. 19, 2021

Revised: Mar. 12, 2022

Accepted: Jun. 07, 2022

Available Online: Jun. 29, 2022

Keywords:

RC shear wall

Cyclic behavior

Retrofitting

Composite

Finite element

1- Introduction

The reinforced concrete shears walls (RCSWs) suffer from inadequate in-plane stiffness, flexural and shear strength as well as insufficient ductility [1]. In some cases, due to architectural issues, openings such as doors and windows have to be placed in the wall. Accordingly, the load transfer mechanism varies due to the presence of these openings which in turn, reduce the strength, stiffness and ductility [2]. Although the stated retrofit solutions are effective in increasing the strength of the structure, many of these techniques cause significant increase in the weight of the structure that changes the dynamic properties and distribution of seismic forces, which contradicts the original design of the structure. Accordingly, the use of the CFRP sheets has been introduced in recent years as a practical approach to strengthening the RCSWs. Among the advantages of the CFRP that researchers use in different shapes and arrangements, quick and easy implementation, low cost, high hardness-to-resistance ratio, increase and great corrosion resistance could be mentioned [3]. In 2018, Aslani and Kohnehpooshi evaluated the effect of openings on the behavior of the RCSWs and reinforcing the walls with opening using the CFRP sheets with varying thicknesses of 0.09, 0.18 and 0.27mm and tested three different patterns for wrapping the CFRP sheets. To this end,

the specimens were numerically analyzed using ABAQUS software. Based on the results, creating an opening and enlarging it, reduces the lateral load-carrying and energy absorption capacities as well as stiffness but in turn, increases the wall displacements. Moreover, it was observed that the closer the opening becomes to the base of the wall, the energy absorption capacity is reduced [4]. In 2019, Lima et al. strengthened eighteen RCSWs with opening making use of the CFRP sheets. Then, the cracking patterns, damage states, ultimate strength and strain values were discussed. The test results indicated that the CFRP sheets could enhance the ultimate strength of the wall by 14 to 59.7% [5].

2- Verification of the Numerical Model with Experimental Results

In order to verify the finite element model, the experimental studies conducted by Hosseini et al. [6] were considered. In 2019, Hosseini et al. evaluated various failure modes by subjecting the RCSW specimens to cyclic loading. For this purpose, they built four RCSW specimens among which, one specimen was a control specimen and the others, included openings. In this section, first, the geometric details and material properties used in the experimental tests are presented [6] and then, details and information about simulating the RCSWs in ABAQUS are discussed.

*Corresponding author's email: mgholhaki@semnan.ac.ir



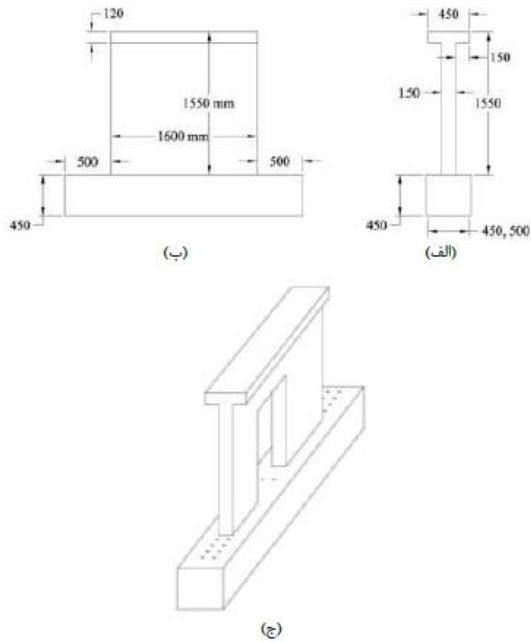


Fig. 1. Side view of the wall with the opening [6]

Table 1. Properties of the Rebars as Reinforcement

Type	Section area (mm ²)	Density (kg/m ³)	Element type	Mesh dimension (mm)
D6.5	33.2	7850	T3D2	60
D8	50.3	7850	T3D2	60
D12	113.1	7850	T3D2	50
D20	314.2	7850	T3D2	50

3- Characteristics of the Experimental Specimens

All experimental specimens [6] were built with the same dimensions in length, height and thickness of 1600, 1550 and 150mm, respectively (Figure 1).

4- Numerical Modeling of RCSWs in ABAQUS Software

Numerical modeling of the RCSW is integrated using 3D homogeneous components and its dimensions are proportional to the dimensions of the experimental model. The compressive strength, density and elastic modulus of concrete are 31 MPa, kg/m³ and 26 GPa, respectively. For generating the meshes, 8-noded 3D elements with the size of 50 mm have been used. To define the rebars, homogenous 3D solid elements have been used and 2-noded truss elements were utilized to mesh the rebars. The other data of the rebars are given in Table 1.

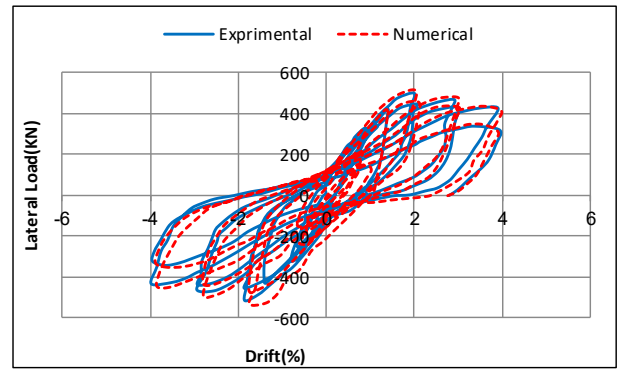


Fig. 2. Comparison of Hysteretic Curves of Numerical and Experimental Models RCSW without opening

Table 2. Naming and specification of finite element models

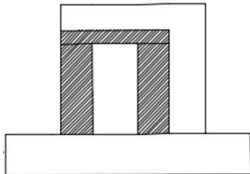
Sample reinforcement pattern	Sample name
	RCSW1

Figure 2 demonstrates a comparison between the hysteresis curve of the wall without opening with the experimental model.

As can be seen in Figure 2, there is an acceptable agreement between the yield strength, yield displacement and ultimate strength values.

5- Numerical Modeling

Names of the finite element models are presented in Table 2

6- Results and Discussion

The force-displacement curves for the RCSWs with opening and retrofitted using different patterns and arrangements of CFRP have been illustrated in Figures 3 and Figure 4 shows the tension failure contours when the walls are cracked.

Strain values at the base of the wall are greater. As the right side and top of the opening have not been completely retrofitted in this model, the diagonal cracks at top of the opening inside the coupling beam and in the final step of loading, the crack between the pier and foundation leads to the collapse of the wall. As can be seen, the dominant failure mode is sliding shear.

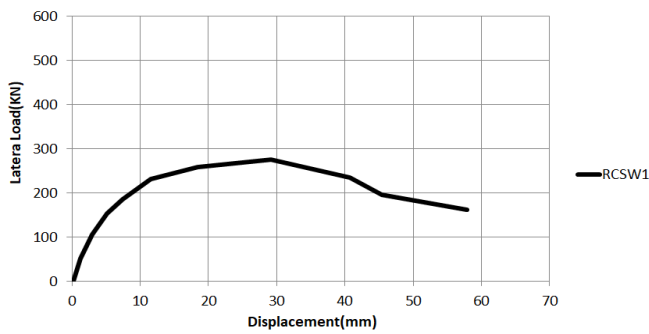


Fig. 3. A Force –displacement curve of the RCSWs with opening

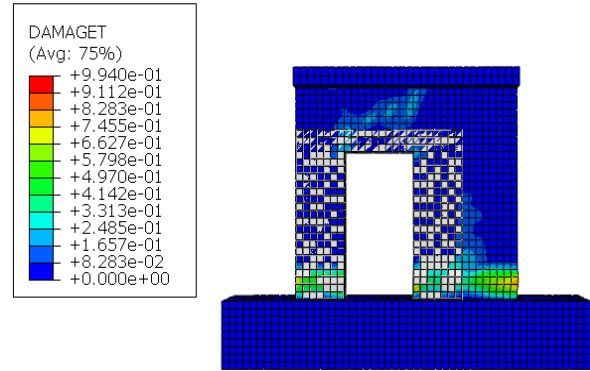


Fig. 4. Tension Damage Contours at the Final Stage of Cracking

7- Conclusions

The type of retrofit technique for the RCSWs with opening was effective on the failure mechanism in a way that although, the load-carrying capacity was enhanced, sliding shear failure mode was observed in all specimens.

References

- [1] G. Pachideh, M. Gholhaki, Evaluation of Concrete Filled Steel Tube Column Confined with FRP, *J. Test. Eval*, 48 (2020) 4343-4354.
- [2] A. Kheyroddin, *Shear Wall*, Semnan University, Semnan, 1395. (in persian).
- [3] A. Kheyroddin, M.K. Sharbatdar, Reinforcement of reinforced concrete structures with the help of steel and composite sheets FRP and profils, Semnan University, Semnan, 1395. (in persian).
- [4] K. Aslani, O. Kohnepooshi, Structural behavior of FRP-strengthened reinforced concrete shear walls with openings using finite element method, *Advances in Structural Engineering*, 21(7) (2018) 1072-1087.
- [5] M.M. Lima, J.-H. Doh, M.N. Hadi, Experimental study on RC walls with opening strengthened by externally bonded CFRP, *Journal of Composites for Construction*, 23(2) (2019) 04019008.
- [6] S.A. Hosseini, A. Kheyroddin, M. Mastali, An experimental investigation into the impacts of eccentric openings on the in-plane behavior of squat RC shear walls, *Engineering Structures*, 197 (2019) 109410.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

F. Zahiri, A. Kheyroddin, M. Gholhaki, Evaluation Cyclic Behavior of Concrete Shear Wall with Opening Retrofitting with Composite , *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(10) (2023) 783-786.

DOI: 10.22060/ceej.2022.20578.7470





ارزیابی عددی رفتار چرخه‌ای دیوار برشی بتن‌آرمه دارای بازشو مقاوم‌سازی شده با کامپوزیت CFRP

فاطمه ظهیری، علی خیرالدین، مجید قلهکی*

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۲۸
بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۲۱
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۱۷
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۴/۰۸

کلمات کلیدی:

دیوار برشی بتن‌آرمه
رفتار چرخه‌ای
مقاوم‌سازی
کامپوزیت CFRP
اجزا محدود

خلاصه: امروزه استفاده از دیوارهای برشی بتن‌آرمه به عنوان سیستم سازه‌ای برابر جانبی به علت عملکرد مطلوب در شکل‌پذیری، مورد استقبال طراحان قرار گرفته است. با این حال ایجاد بازشو در دیوار برشی بتن‌آرمه به دلیل مسائل معماری که امری اجتناب‌ناپذیر است، سبب کاهش مقاومت، سختی و شکل‌پذیری دیوار برشی می‌شود که جهت جبران این ضعف‌ها موضوع مقاوم‌سازی دیوار برشی بتن‌آرمه مطرح می‌گردد. در مقاله حاضر ابتدا یک نمونه آزمایشگاهی دیوار برشی بتن‌آرمه بدون بازشو در نرم‌افزار ABAQUS مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. پس از صحت‌سنجی نمونه مورد نظر به ارزیابی رفتار چرخه‌ای دیوار برشی بتن‌آرمه دارای بازشو مقاوم‌سازی شده با هشت طرح مختلف به صورت افقی، عمودی، مورب و ترکیبی توسط ورق‌های مسلح شده با الیاف کربن (CFRP) در نرم‌افزار اجزا محدود ABAQUS پرداخته شده است. جهت تحلیل استاتیکی غیرخطی، نمونه‌ها تحت بارگذاری جانبی چرخه‌ای قرار گرفته و پارامترهای مختلفی از قبیل سختی، تغییر مکان و شکل‌پذیری مورد بررسی و مقایسه واقع شده‌اند. نتایج به صورت منحنی‌های ظرفیت (نیرو-تغییر مکان)، شکل‌پذیری، کانتور خرابی فشاری و کششی ارائه گردید. همانطور که نتایج نشان می‌دهد مقاوم‌سازی دیوارهای برشی بتن‌آرمه دارای بازشو باعث افزایش مقاومت خمشی، برشی و شکل‌پذیری می‌گردد. نتایج نشان داد که نمونه RCSW8 به مقدار ۱۲٪ نسبت به نمونه مرجع ظرفیت باربری افزایش پیدا کرده است. سختی نمونه RCSW8 به میزان ۱۵٪ افزایش یافته و شکل‌پذیری بهبود یافته است.

۱- مقدمه

مسیر انتقال نیرو را پیش‌بینی نمود [۴ و ۳] روش‌های مختلفی برای برطرف کردن این ضعف‌ها در برابر بارهای جانبی، ناشی از زلزله‌های شدید وجود دارد. کاربرد ژاکت بتن‌آرمه، ژاکت فولادی، اضافه کردن دیوارهای برشی جدید به سیستم سازه‌ای موجود و یا کاربرد سیستم‌های مهاربندی فولادی از جمله تکنیک‌های مقاوم‌سازی مرسوم است [۵]. با وجود اینکه روش‌های مقاوم‌سازی بیان شده در افزایش مقاومت سازه مؤثر می‌باشند ولی بسیاری از این تکنیک‌ها باعث افزایش وزن قابل توجهی می‌شود که باعث تغییر خواص دینامیکی و توزیع نیروهای زلزله می‌گردد که در تناقض با طراحی اصلی و اولیه سازه است. به همین دلیل از روش‌های مرسوم چون CFRP به منظور تقویت دیوار برشی بتن‌آرمه استفاده شده است. مزایای کامپوزیت CFRP می‌توان به اجرای سریع و آسان آن‌ها، هزینه پایین، نسبت سختی به مقاومت بالا، افزایش حداقل بار مرده دائمی، مقاومت در برابر خوردگی اشاره کرد [۶ و ۷].

دیوارهای برشی قدیمی بتن‌آرمه دارای ضعف‌هایی در سختی داخل صفحه، مقاومت خمشی، مقاومت برشی است [۱]. حال در اغلب موارد ایجاد بازشو به دلیل مسائل معماری چون درها و پنجره‌ها امری اجتناب‌ناپذیر است. مکانیزم انتقال بار از طریق ایجاد این بازشوها تغییر پیدا می‌کند و باعث کاهش مقاومت، سختی و شکل‌پذیری می‌شود [۲]. در دیوار برشی علت وجود بازشو رفتار آن دگرگون می‌شود. حال برای این که دیوار برشی در تحمل نیروی جانبی زلزله کارایی مناسبی داشته باشد، باید بازشوها در محل مناسبی تعبیه شوند. موقعیت قرارگیری بازشوها را باید به گونه‌ای در نظر گرفته شود تا از حداکثر ظرفیت باربری، شکل‌پذیری و جذب انرژی دیوار برشی بتن‌آرمه بتوان استفاده کرد. الگوی قرارگیری بازشوها، می‌تواند به صورت منظم یا نامنظم باشد. بهتر است موقعیت بازشوها به گونه‌ای تعیین شود، که به سادگی با روش‌های محاسباتی متداول بتوان رفتار و

تحقیقات متعددی در زمینه مقاوم‌سازی دیوارهای برشی بتن‌آرمه بدون

بازشو با CFRP صورت گرفته است [۱۳-۸]. با توجه به این که هدف

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mgholhaki@semnan.ac.ir



بازشو، سختی و شکل‌پذیری افزایش چشمگیری دارد. در دیوارهای دارای بازشو کوچک شکست برشی زود هنگامی در تیرهای رابط معمولاً به دلیل کوتاه بودن دهانه این تیرها رخ داده و منجر به افت ناگهانی در ظرفیت برشی این دیوارها می‌گردد. همچنین مقاومت برشی در جهت‌های رفت و برگشتی در این دیوارها متفاوت بوده و دلیل آن، وجود بازشو دارای خروج از مرکزیت و همچنین مکانیزم انتقال برشی است [۱۷]. ماریوس^۵ در سال ۲۰۱۳، به ارزیابی رفتار لرزهای دیوارهای برشی بتن‌آرمه با بازشوهای منظم و نامنظم بعد از زلزله‌های بزرگ بین ۲۰۰۹ و ۲۰۱۱ پرداخت. زلزله‌های رخ داده در این بازه زمانی نشان داد که آسیب‌ها و مکانیزم شکست در دیوارهای سازه‌ای به مجموعه‌ای از عوامل شامل هندسه در پلان و ارتفاع، ابعاد دیوار و بازشوها و الگوی بازشو بستگی دارد [۱۸]. موزارکا در سال ۲۰۱۴، مطالعاتی بر روی شکست دیوارهای برشی با بازشو نامنظم (زیگزاگی) تحت بار لرزهای انجام داد. در این تحقیقات مشاهده شد که در دیوارهای با بازشو نامنظم پیش‌بینی مکانیزم تشکیل مفاصل پلاستیک پیچیده‌تر است؛ به گونه‌ای که ملاحظه گردید، دیوارهای با بازشو نامنظم به شکل کاملاً متفاوتی نسبت به سایر حالت بازشوها به انهدام رسیدند. به عبارت دیگر، دیوارهای با بازشو منظم با شکست تیر رابط تحت نیروهای برشی و به دنبال آن تسلیم آرماتورهای افقی در این تیر همراه بود. اما دیوارهای دارای بازشوهای نامنظم با تسلیم آرماتورهای قائم در پایه و به دنبال آن خرد شدگی بتن همراه بودند [۱۹]. لیما^۶ و همکاران در سال ۲۰۱۶، به مطالعه آزمایشگاهی تأثیر بازشو بر روی دیوارهای برشی بتن‌آرمه تقویت شده با ورق‌های CFRP پرداختند و نتایج نشان داد که استفاده از ورق‌های CFRP در گوشه‌های بازشو با زاویه ۴۵ درجه عملکرد مطلوبی دارد [۲۰]. پاپسکو^۷ و همکاران در سال ۲۰۱۶ به ارزیابی اثر بازشو در ظرفیت بار محوری دیوارهای بتن‌آرمه پرداختند. برای این منظور یک دیوار تحت بار یکنواخت ثقلی با حداقل برون‌محوری را در سه مرحله مورد آزمایش قرار دادند. در مرحله اول دیوار بدون بازشو، مرحله دوم دیوار با بازشو کوچک و مرحله سوم دیوار با بازشو بزرگ بود. نتایج نشان داد که با کاهش مساحت ۲۵٪ و ۵۰٪ ظرفیت باربری به ترتیب به ۳۶٪ و ۵۰٪ حداکثر ظرفیت باربری دیوار بدون بازشو رسید و نمونه‌ای که بازشو آن کوچک‌تر بود از سختی، شکل‌پذیری و قابلیت جذب انرژی بیشتری نسبت به بازشوی بزرگ برخوردار بود [۲۱]. بهفرنیا و شیرنشان در سال ۲۰۱۷، به ارزیابی نتایج تحلیل المان محدود غیرخطی دیوار برشی بتن‌آرمه دارای بازشو

این مقاله بررسی تأثیر مقاوم‌سازی دیوارهای برشی بتن‌آرمه دارای بازشو با CFRP است لذا به ذکر تحقیقات آزمایشگاهی و عددی صورت گرفته بر روی دیوارهای برشی بتن‌آرمه دارای بازشو پرداخته می‌شود. وانگ^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۰ به ارزیابی رفتار دیوارهای سازه‌ای بتن‌آرمه با بازشو در مکان‌های مختلف پرداختند. آن‌ها در مطالعه خود به بررسی دو دیوار با مقیاس ۴۰٪ به صورت سه طبقه با نمونه‌های دارای بازشو در گوشه یا وسط دیوار پرداختند. این آزمایش‌ها نشان داد که دیوارهای سازه‌ای با بازشو برون‌محور در نهایت به شکست لغزش برشی در طبقه اول منجر می‌شود؛ که این موضوع نشان دهنده ضعف آیین‌نامه‌های طراحی لرزهای موجود در این بخش‌ها است [۱۴]. وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۲، به مطالعه بر روی تأثیر محل قرارگیری بازشوها در یک دیوار سه طبقه با نسبت ابعادی ثابت بازشوها، در رفتار برشی دیوارهای بتن‌آرمه پرداختند. در این آزمایش نسبت ابعادی بازشوها به ۰/۴ محدود شد. نتایج حاصل بدین صورت بود که، رفتار دیوارها در جهت‌های مختلف بارگذاری بسیار متفاوت است و محل قرارگیری دیوارها نیز بسیار بر رفتار دیوارها تأثیرگذار است. دیوارهای برشی دارای بازشو بدون خروج از مرکزیت دارای نمودار هیستریزس متقارن‌تر و دارای سیکل پایدار بیشتری است که این توانایی دیوار را در افزایش جذب انرژی نسبت به نمونه دارای بازشو دارای خروج از مرکزیت نشان می‌دهد [۱۵]. موزارکا^۲ و استوین^۳ در سال ۲۰۱۲، هم به صورت آزمایشگاهی و هم به صورت عددی پنج نمونه دیوار برشی را مورد بررسی قرار دادند. نمونه‌ها شامل یک دیوار کنترل بدون بازشو، یک دیوار با بازشو منظم در ارتفاع و سه دیوار با بازشوی نامنظم بودند. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار جذب انرژی مربوط به دیوار بدون بازشو و کمترین مقدار جذب انرژی مربوط به دیوار با بازشو منظم در ارتفاع بود. همچنین ملاحظه گردید که دیوارهای دارای بازشوی نامنظم در مقایسه با دیوار کوبلی که در ناحیه مفصل پلاستیک در برابر نیروهای برشی به میزان کافی مسلح نشده است، انرژی بیشتری را جذب می‌کند [۱۶]. ژیانگ^۴ و همکاران در سال ۲۰۱۳، سه نمونه دیوار برشی بتن‌آرمه بازشودار سه طبقه تحت بار چرخه‌ای را با نسبت بازشوهای ۰/۳ و ۰/۳۴ و ۰/۴۶ مورد ارزیابی قرار دادند. در این مطالعه مشخص گردید که هر چه ابعاد بازشوها بزرگ‌تر باشد شکست لغزشی-برشی دیرتر اتفاق می‌افتد اما از طرف دیگر، با کوچک‌تر شدن ابعاد

- 1 Wang
- 2 Mosoarca
- 3 Stoian
- 4 Jiang

- 5 Marius
- 6 Lima
- 7 Popescu

مرکزیت، سیستم جدیدی به حساب می‌آید و مطالعات محدودی در زمینه مقاوم‌سازی لرزه‌ای دیوارهای برشی بتن‌آرمه دارای بازشو انجام شده است، تحلیل‌های انجام شده در جهت صحت‌سنجی و مطالعه پارامتریک و نتایج حاصل از آن، در نوع خود جدید و نوین است.

۲- صحت‌سنجی مدل اجزای محدود با مدل آزمایشگاهی

برای صحت‌سنجی مدل اجزاء محدود، از مطالعات آزمایشگاهی انجام شده توسط حسینی و همکاران [۲۴] استفاده شده است. حسینی و همکاران در سال ۲۰۱۹ به ارزیابی انواع مدهای شکست و ارزیابی مقاومت برشی دیوارهای برشی بتن‌آرمه دارای بازشو با خروج از مرکزیت تحت بار چرخه‌ای در چهار نمونه دیوار برشی بتن‌آرمه که یکی از دیوارها کنترلی و سه دیوار دیگر دارای بازشو بودند پرداختند. لذا در این بخش ابتدا به معرفی مشخصات هندسی و مصالح مصرفی نمونه‌های آزمایشگاهی مرجع [۲۴] پرداخته و سپس به بررسی جزئیات مربوط به مدل‌سازی دیوار برشی بتن‌آرمه در نرم‌افزار ABAQUS پرداخته می‌شود. در نهایت خروجی‌های حاصل از تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌گردد.

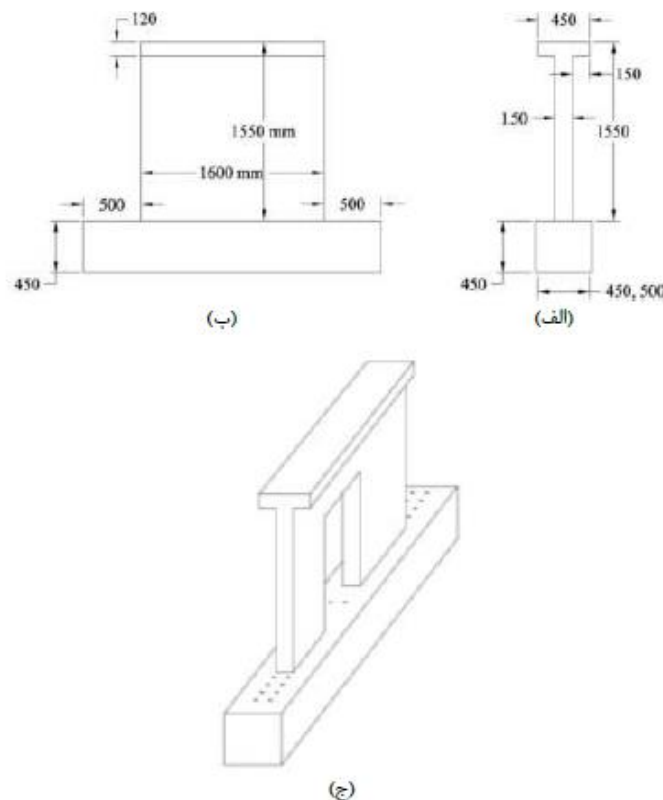
۲-۱- مشخصات اولیه‌ی نمونه‌های آزمایشگاهی

همه‌ی نمونه‌های آزمایشگاهی موجود در مرجع [۲۴] در ابعادی مشابه به طول ۱۶۰۰ میلی‌متر، ارتفاع ۱۵۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۵۰ میلی‌متر مطابق شکل ۱ ساخته شده‌اند.

برای اتصال نمونه به کف صلب در همه نمونه‌ها شالوده‌های تیرمانندی به صورت پیوسته و گیردار با دیوارهای برشی اجرا شده‌اند. ابعاد شالوده‌ها به گونه‌ای انتخاب شدند که رفتاری کاملاً صلب نسبت به دیوار متصل به آن، از خود نشان دهند. مقطع شالوده‌ها برای دیوارهای دارای بازشو، ۴۵۰×۴۵۰ میلی‌متر مربع و برای نمونه بدون بازشو، ۴۵۰×۵۰۰ میلی‌متر مربع است، همچنین طول شالوده ۲۶۰۰ میلی‌متر است [۲۴]. دال بالای دیوارهای برشی نیز برای عملکرد بهتر و نزدیک به واقعیت و کنترل عدم تغییر شکل‌های خارج از صفحه ایجاد گردید. مشخصات ابعادی این دال شامل ضخامت، طول و عرض به ترتیب برابر با ۱۲۰، ۱۶۰۰ و ۴۵۰ میلی‌متر است. ارتفاع و عرض بازشو به ترتیب، ۱۰۰۰ و ۵۰۰ میلی‌متر است. موقعیت بازشوها در امتداد افق جابه‌جا شده و این ابعاد در تمام نمونه‌ها ثابت است. نام نمونه بدون بازشو مطابق مرجع [۲۴] RCSW است.

تقویت شده با ورق‌های CFRP پرداختند. شش نمونه دیوار برشی بتن‌آرمه را مورد مطالعه قرار دادند. دو نمونه از دیوارهای برشی بدون تقویت بوده و چهار نمونه دیگر با جایگذاری‌های متفاوت ورق CFRP مقاوم‌سازی شدند. همه دیوارهای برشی تحت بارگذاری جانبی چرخه‌ای مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داد که ایجاد بازشو به ابعاد ۵۰ درصد طول و ارتفاع دیوار، ظرفیت باربری و جابه‌جایی نهایی آن را به میزان ۴۲/۱٪ و ۳۲٪ کاهش می‌دهد. همچنین استفاده از نوارهای CFRP در اطراف پایه‌های دیوار ظرفیت باربری جانبی، جابه‌جایی نهایی جانبی و شکل‌پذیری دیوار را به طور قابل‌توجهی افزایش داد. بیشترین بهبود در ظرفیت جابه‌جایی نهایی و مقاومت جانبی دیوارهای برشی بتن‌آرمه با بازشو با پیچیدن نوارهای CFRP در اطراف پایه دیوارها حاصل گردید [۲۲]. اصلانی و کهنه پویشی در سال ۲۰۱۸، به ارزیابی تأثیر بازشوها بر دیوار برشی بتن‌آرمه و تقویت نمونه‌های دارای بازشو با استفاده از ورق‌های CFRP با سه نوع ضخامت ۰/۰۹، ۰/۱۸ و ۰/۲۷ میلی‌متر و سه نوع الگو مختلف مقاوم‌سازی پرداختند. برای این منظور دیوارهای برشی بتن‌آرمه در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. نتایج به دست آمده نشان داد که ایجاد بازشو و همچنین افزایش ابعاد بازشوها در دیوار برشی بتن‌آرمه باعث کاهش ظرفیت باربری جانبی، ظرفیت جذب انرژی و سختی می‌شود، اما جابه‌جایی دیوار افزایش پیدا می‌کند. همچنین ملاحظه گردید که هر چه موقعیت بازشو به سمت پایه دیوار رود، ظرفیت جذب انرژی دیوار کاهش می‌یابد [۴] لیما و همکاران در سال ۲۰۱۹، ۱۸ نمونه دیوار برشی بتن‌آرمه دارای بازشو را با استفاده از هفت طرح مختلف توسط ورق‌های CFRP مقاوم‌سازی کردند و تحت شرایط مختلف تا لحظه خرابی بارگذاری کردند. سپس الگوهای ترک، حالت‌های خرابی، مقاومت نهایی و مقدار کرنش در بتن تقویت شده مورد بحث قرار گرفت. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که ورق‌های CFRP مقاومت نهایی دیوار برشی بتن‌آرمه را به مقدار ۱۴٪ تا ۵۹/۷٪ بهبود می‌بخشند [۲۳].

با مطالعه تحقیقات پیشین در خصوص دیوارهای برشی دارای بازشو، ملاحظه می‌شود که اطلاعات در زمینه دیوارهای برشی با بازشو غیرمجاز و از پیش تعیین نشده بسیار کم و محدود است. برای این منظور در مقاله حاضر ابتدا به صحت‌سنجی عددی یک دیوار برشی بتن‌آرمه پرداخته می‌شود. سپس عملکرد ورق‌های CFRP بر روی دیوار برشی دارای بازشو با خروج از مرکزیت در طرح‌های مختلف مقاوم‌سازی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. لذا با توجه به این که سیستم دیوار برشی بتن‌آرمه دارای بازشو با خروج از



شکل ۱. (الف) نمای مقطع دیوار، (ب) نمای جانبی دیوار بدون بازشو، (ج) نمای سه بعدی دیوار دارای بازشو (کلیه ابعاد شکل برحسب میلی‌متر) [۲۴]

Fig. 1. (a) cross-sectional view of the wall, (b) side view of the wall without opening, (c) three-dimensional view of the wall with opening (all dimensions of the shape in millimeters) [24]

آزمایشگاهی مربوط به دیوار برشی دارای بازشو جهت انجام مقاوم‌سازی و مدل‌سازی عددی است.

۲-۳- مصالح مصرفی

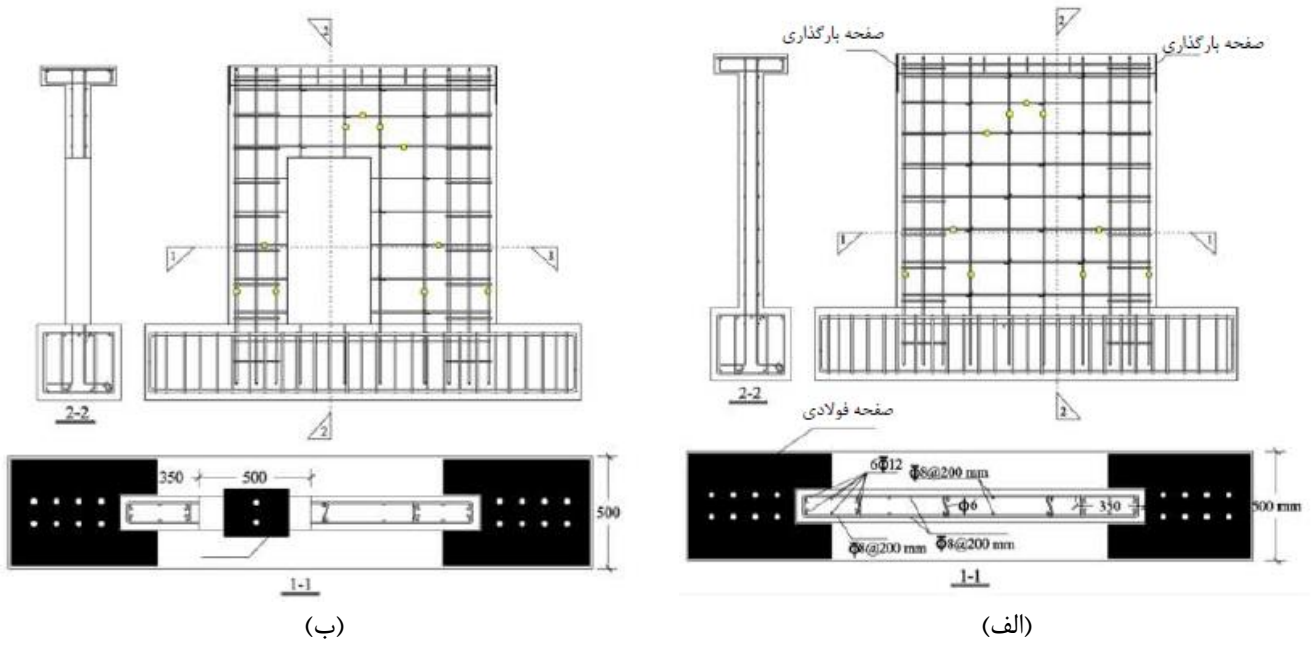
در تمام نمونه‌ها مصالح مصرفی شامل بتن و میلگردهای فولادی است. مطابق مرجع [۲۴] مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های مکعبی بتنی به ترتیب برابر با ۳۰ MPa و ۳۸ MPa به دست آمدند.

۲-۴- مدل‌سازی دیوار برشی بتن‌آرمه بدون بازشو در نرم‌افزار ABAQUS

مدل‌سازی هندسه دیوار برشی بتن‌آرمه به صورت یکپارچه و با استفاده از اجزاء همگن سه بعدی است و ابعاد آن متناسب با ابعاد مدل آزمایشگاهی است. مقاومت بتن به کاربرده شده ۳۱ مگاپاسکال است. جهت مش‌بندی دیوار برشی بتن‌آرمه از المان‌های سه بعدی هشت‌گره‌ای با ابعاد مش ۵۰ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۳ مدل مش‌بندی شده دیوار برشی بتن‌آرمه را نشان می‌دهد.

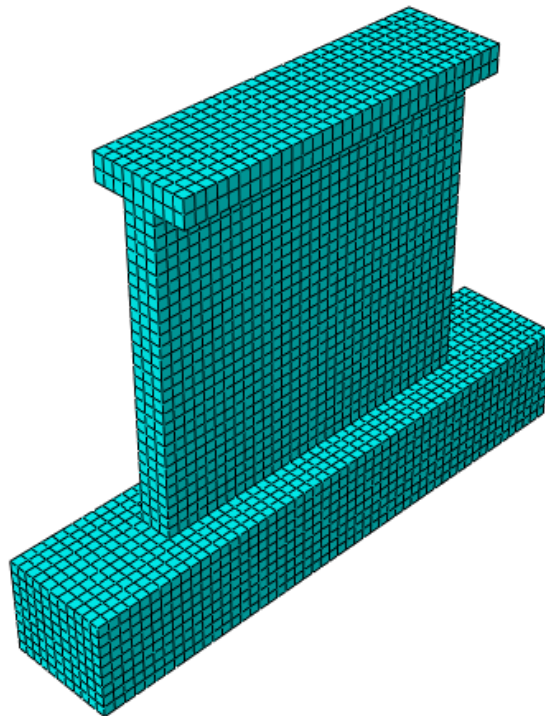
۲-۲- جزئیات آرماتور دیوارها

در اجزای مرزی همه دیوارها از شش عدد میلگرد ۱۲ به عنوان آرماتورهای طولی و میلگردهای عرضی ۸ در فواصل ۲۰۰ میلی‌متر از هم، به عنوان آرماتورهای برشی مورد استفاده قرار گرفتند. ابعاد اجزای مرزی برابر با ۳۵۰×۱۵۰ میلی‌متر مربع است. در جان دیوارها از میلگردهای آجدار ۸ و ساده ۶/۵ مورد استفاده قرار گرفته است؛ میلگرد ۸ به عنوان آرماتورهای طولی افقی و عمودی، در فواصل ۲۰۰ میلی‌متر قرار دارند؛ میلگرد ۶/۵ به عنوان قالب جهت محصور کردن آرماتورهای جان به صورت یکی در میان، توزیع شده‌اند. در پی نیز از میلگردهای آجدار ۲۰ و ۱۲ استفاده شده است؛ به طوری که به ترتیب از پنج و چهار میلگرد طولی به قطر ۲۰ در بالا و پایین مقطع پی و از میلگردهای به قطر ۱۲ به عنوان میلگردهای عرضی به صورت تنگ‌های بسته و سنجاقی با قالب‌های استاندارد لزه‌ای در فواصل ۱۶۰ میلی‌متر، به عنوان آرماتور برشی مورد استفاده قرار گرفته است [۲۴]. شکل ۲-الف جزئیات آرماتوربندی نمونه آزمایشگاهی مربوط به دیوار برشی بدون بازشو جهت انجام صحت‌سنجی است. شکل ۲-ب نیز جزئیات آرماتوربندی نمونه



شکل ۲. (الف) نمای کلی آرماتورها و مقاطع نمونه دیوار برشی بدون بازشو، (ب) نمای کلی آرماتورها و مقاطع دیوار برشی با بازشو [۲۴]

Fig. 2. View of the reinforcement and section of the wall (a) without opening (b) with opening [24]



شکل ۳. مدل دیوار برشی بتن آرمه مش بندی شده

Fig. 3. Mesh Generation for the RCSW without opening

جدول ۱. مشخصات میلگردهای دیوار برشی بتن آرمه بدون بازشو

Table 1. Specifications of reinforced concrete shear wall rebars without opening

نام عضو	مساحت مقطع (mm ²)	ابعاد مش (mm)	درصد کشیدگی	نسبت پواسون	جرم واحد حجم (kg/m ³)	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی نهایی (MPa)	مقاومت کششی تسلیم (MPa)
میلگرد (D6.5)	۳۳/۲	۶۰	۲۱/۳۰	۰/۳	۷۸۵۰	۲۰۱	۳۵۳	۲۳۵
میلگرد (D8)	۵۰/۳	۶۰	۱۹/۲۵	۰/۳	۷۸۵۰	۱۸۲	۶۱۶	۴۹۷
میلگرد (D12)	۱۱۳/۱	۵۰	۲۲/۳	۰/۳	۷۸۵۰	۱۹۰	۶۳۳	۴۱۰
میلگرد (D20)	۳۱۴/۲	۵۰	۲۲/۷	۰/۳	۷۸۵۰	۱۹۵	۵۹۸	۴۴۶

برای مدل‌سازی میلگردها از عناصر جامد همگن سه بعدی استفاده شده است. برای مش‌بندی میلگردها المان‌های خریابی دوگره‌ای (T3D2) به کار گرفته شده است. سایر مشخصات مربوط به میلگردها در جدول ۱ ذکر شده است.

یکی از مهم‌ترین قسمت‌های مدل‌سازی در نرم‌افزار اجزاء محدود، تعریف شرایط تکیه‌گاهی، بارگذاری و اندرکنش میان اجزاء است. این موارد باید به گونه‌ای تنظیم شود که بیش‌ترین تطبیق را با مدل آزمایشگاهی داشته باشند. در این مدل‌سازی شرایط مرزی به گونه‌ای انتخاب شده است که باعث گیردار شدن کامل مدل در قسمت پایین دیوار برشی بتن آرمه شود، برای این منظور درجات آزادی انتقالی و چرخشی در راستای هر سه محور مطابق شکل ۴ مقید شده‌اند.

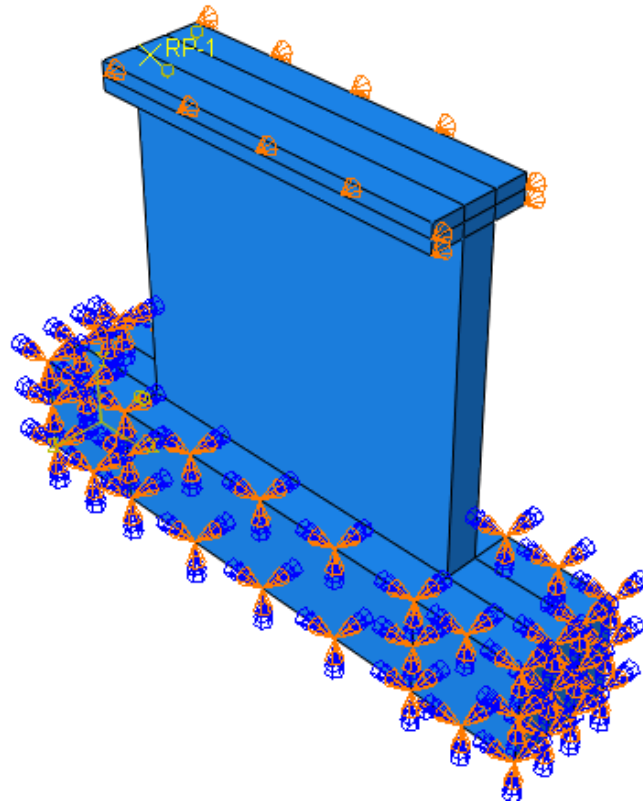
در مدل حاضر بارگذاری از نوع جانبی و به صورت رفت و برگشتی مطابق الگوی شکل ۵ است.

در قسمت تعریف اندرکنش، تنها اندرکنش موجود در دیوار برشی بتن آرمه، اندرکنش میان میلگردها و بتن است که از نوع ناحیه مدفون شده مورد استفاده قرار گرفته است و با استفاده از قید Embedded در نرم‌افزار ABAQUS، در نظر گرفته می‌شود. که در آن میلگردها به عنوان بخش مدفون شونده و بتن به عنوان بخش مدفون کننده تعریف می‌گردد. با در نظر گرفتن این قید، به صورت پیوسته المان‌های آرماتورهای طولی و عرضی

با المان‌های بتن در ارتباط هستند؛ به گونه‌ای که درجات آزادی میلگرد و بتن اطراف آن، با یکدیگر سازگار بوده و هیچ لغزشی بین فولاد و بتن وجود ندارد [۲۵].

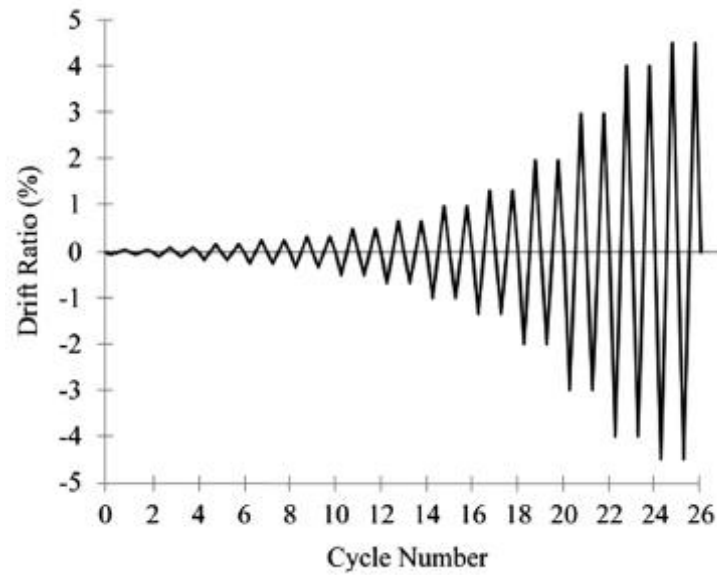
جهت کالیبره کردن نتایج مدل اجزاء محدود دیوار برشی بتن آرمه بدون بازشو با نتایج آزمایشگاهی یک سری تحلیل‌های حساسیت بر روی پارامترهای موجود در نرم‌افزار ABAQUS برای بتن و همچنین ابعاد مش‌بندی انجام شد. برای این منظور جهت تعریف مدل پلاستیسیته آسیب دیده بتن در نرم‌افزار ABAQUS پارامترهای مورد نیاز شامل پنج متغیر بود که مقدار آن‌ها به صورت زیر به دست آمد [۲۶].

- زاویه انبساط برشی (ψ)، برابر ۳۶ درجه
 - خروج از مرکزیت جریان (ϵ)، برابر با ۰/۱
 - نسبت مقاومت فشاری دو محوری به تک محوری (f_{c0}/f_{b0})، برابر ۱/۱۶
 - نسبت ثابت دوم تانسور تنش روی نصف‌النهار کششی به ثابت دوم تانسور تنش روی نصف‌النهار فشاری (k)، برابر ۰/۶۷
 - ویسکوزیته (μ)، برابر ۰/۰۰۱
 - ابعاد مش بندی مدل، ۵۰×۵۰ میلی‌متر مربع.
- شکل ۶ منحنی هیستریزس مدل اجزاء محدود دیوار برشی بتن آرمه بدون بازشو را تحت بارگذاری چرخه‌ای نشان می‌دهد.



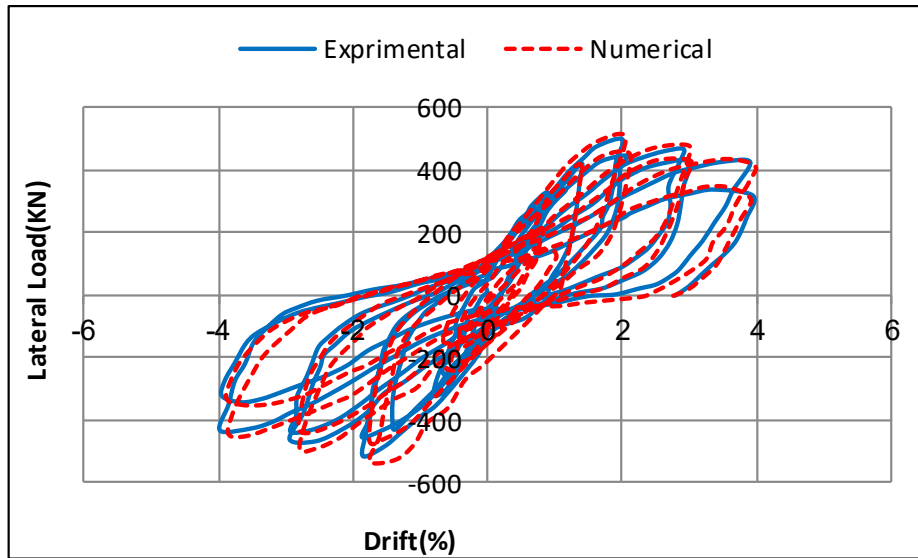
شکل ۴. نمونه دیوار برشی مقید شده

Fig. 4. Sample of bound shear wall



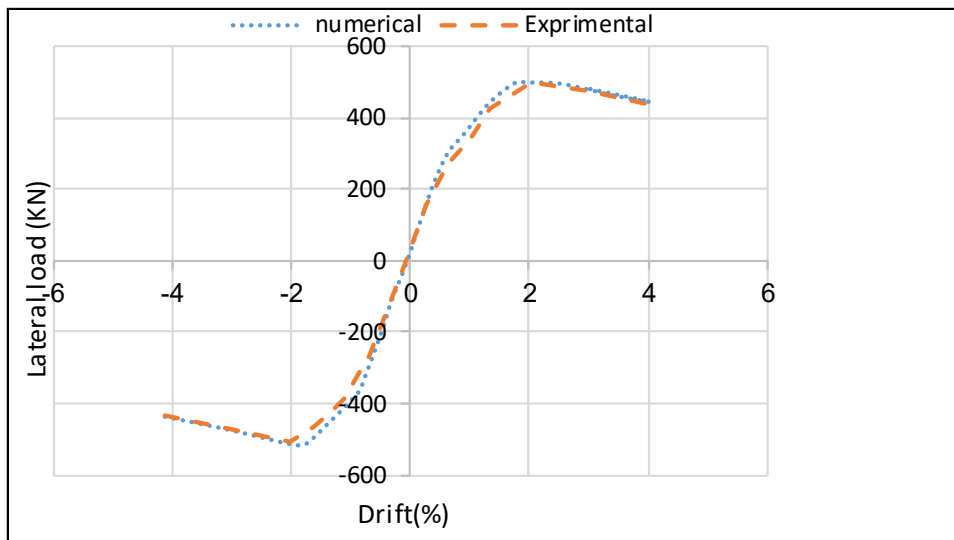
شکل ۵. بارگذاری رفت و برگشتی [۲۴]

Fig. 5. Loading Protocol



شکل ۶. منحنی هیستریزیس مدل اجزاء محدود دیوار برشی بتن آرمه بدون بازشو

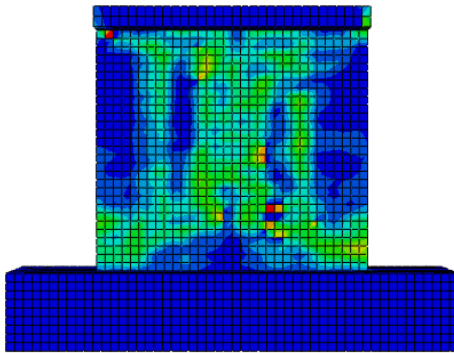
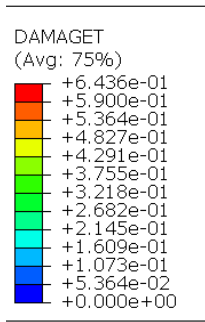
Fig. 6. Comparion of Hysteretic Curves of Numerical and Experimental Models RCSW without opening



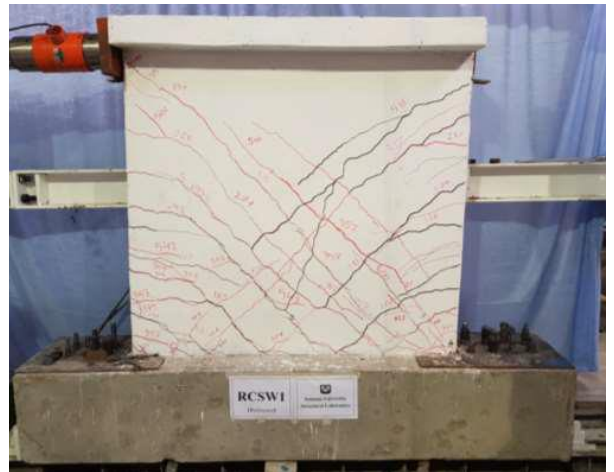
شکل ۷. پوش منحنی‌های هیستریزیس مدل‌های آزمایشگاهی و اجزاء محدود دیوار برشی بتن آرمه بدون بازشو

Fig. 7. Comparion of Backbone Curves of Numerical and Experimental Models RCSW without opening

تغییر مکان تسلیم و مقاومت ماکزیمم در نمونه آزمایشگاهی و نمونه عددی مطابق هم می‌باشند. همچنین شکل ۷ پوش منحنی‌های هیستریزیس در دو حالت آزمایشگاهی و اجزاء محدود را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج اجزاء در حد قابل‌قبولی منطبق بر نتایج آزمایشگاهی می‌باشند. شکل ۸ الگوی خرد شدگی فشاری در نمونه آزمایشگاهی و عددی را نشان می‌دهد.



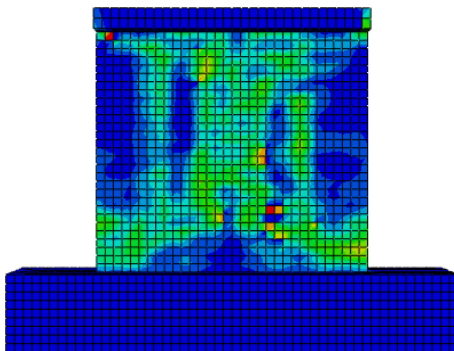
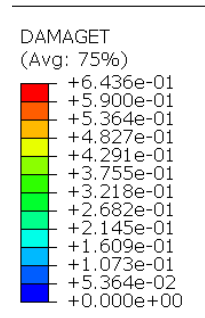
(ب)



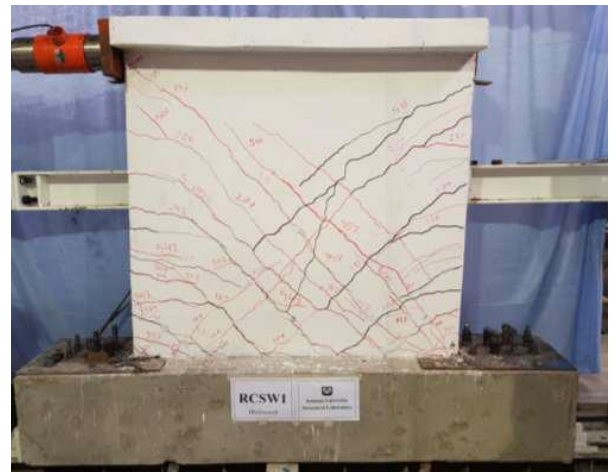
(الف)

شکل ۸. الگوی خرد شدگی فشاری در نمونه آزمایشگاهی (الف) و عددی (ب)

Fig. 8. Compression fracture pattern in Experimenta sample (a) and numerical (b)



(ب)



(الف)

شکل ۹. الگوی ترک خوردگی کششی در نمونه آزمایشگاهی (الف) و عددی (ب)

Fig. 9. Pattern of tensile cracking in Experimenta sample (a) and numerical (b)

ترک خوردگی کششی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج اجزاء در حد قابل قبولی منطبق بر نتایج آزمایشگاهی می‌باشند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در سطح نمونه ترک‌های نسبتاً عمیق برشی رخ داده است و با ادامه بارگذاری عمق ترک‌ها بیشتر شده و در نزدیک پی نمونه به مرحله انهدام می‌رسد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج اجزاء در حد قابل قبولی منطبق بر نتایج آزمایشگاهی می‌باشند. شکل ۹ الگوی

۳- ارزیابی عددی دیوار برشی بتن‌آرمه دارای بازشو مقاوم‌سازی شده با CFRP

۳-۱- مدل‌سازی عددی

در این بخش، به منظور بررسی اثرات طرح‌های مختلف مقاوم‌سازی CFRP بر رفتار چرخه‌ای دیوار برشی بتن آرمه دارای بازشو، مدل‌های مختلف اجزاء محدود، مدل‌سازی و نتایج به دست آمده از آن‌ها ارائه می‌گردد.

برای این منظور مدل دیوار برشی شکل ۲-ب جهت انجام مقاوم‌سازی و مدل‌سازی عددی مورد استفاده قرار می‌گیرد. پارامترهای مورد بررسی عبارتند از: شکل‌پذیری، سختی، جذب انرژی و ظرفیت باربری نهایی.

نام‌گذاری مدل‌های اجزاء محدود مقاوم‌سازی شده در جدول ۲ آورده شده است.

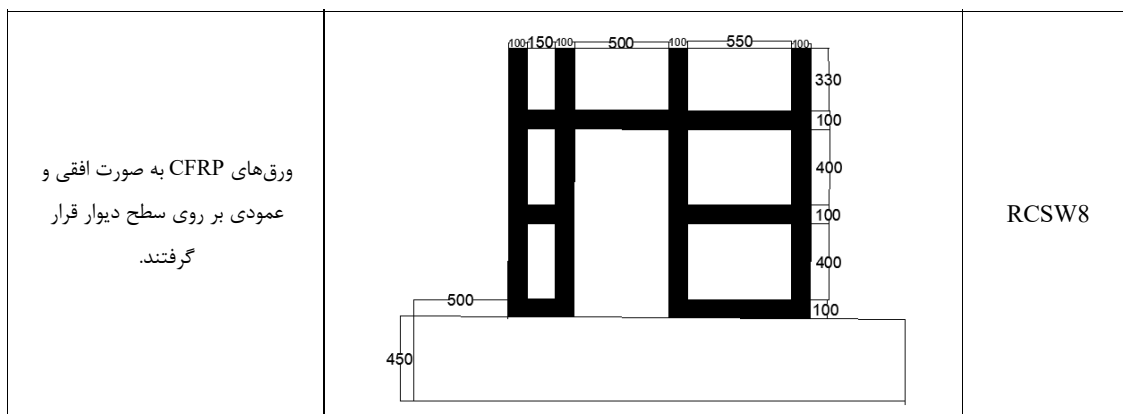
همچنین جدول ۳ پارامترهای مورد استفاده در این بخش را معرفی می‌نماید.

جدول ۲. نام‌گذاری و مشخصات مدل‌های اجزاء محدود

Table 2. Naming and specification of finite element models

توضیحات	الگوی مقاوم‌سازی نمونه	نام نمونه
ورق‌های CFRP به صورت افقی و عمودی در اطراف بازشو قرار گرفتند.		RCSIW1
ورق‌های CFRP به صورت افقی در بالای بازشو و محل اتصال پی و دیوار قرار گرفتند.		RCSIW2
ورق‌های CFRP به صورت قائم و افقی و مورب با زاویه ۴۵ درجه اطراف بازشو قرار گرفتند.		RCSIW3

<p>ورق‌های CFRP به صورت افقی و عمودی در گوشه بازشو قرار گرفتند.</p>		<p>RCSW4</p>
<p>ورق‌های CFRP به صورت افقی و مورب با زاویه ۴۵ درجه در اطراف بازشو قرار گرفتند.</p>		<p>RCSW5</p>
<p>ورق‌های CFRP به صورت قائم در اطراف بازشو قرار گرفتند.</p>		<p>RCSW6</p>
<p>ورق‌های CFRP به صورت مورب و افقی و قائم در گوشه‌های بازشو قرار گرفتند.</p>		<p>RCSW7</p>



ورق‌های CFRP به صورت افقی و عمودی بر روی سطح دیوار قرار گرفتند.

RCSW8

جدول ۳. پارامترهای مورد استفاده در تحلیل عددی

Table 3. Parameters used in the Numerical Analysis

توضیحات	پارامتر
مقاومت سازه در لحظه آغاز ترک خوردگی	P_{cr} (kN)
جابه‌جایی سازه در لحظه آغاز ترک خوردگی	δ_{cr} (mm)
مقاومت نهایی سازه	P_u (kN)
جابه‌جایی نهایی سازه	δ_u (mm)
انرژی جذب شده توسط سازه در لحظه انهدام	E (kN.mm)
شکل‌پذیری سازه	μ

جدول ۴. مشخصات ورق‌های CFRP مورد استفاده [۲۷]

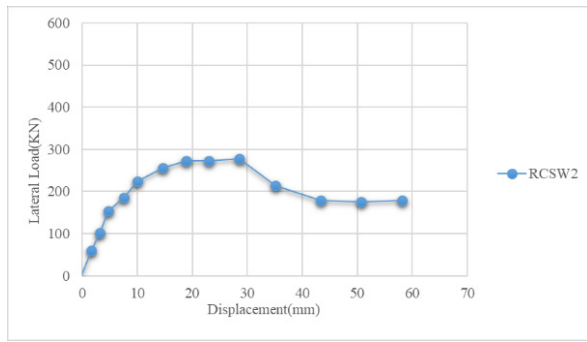
Table 4. CFRP sheet specification

مدول الاستیسیته (Mpa)	نسبت پواسون	مقاومت کششی (MPa)	مدول برشی (MPa)	ضخامت لایه (mm)	نوع کامپوزیت
$E_x=62000$	$\nu_{xy}=0.22$	۹۵۸	$G_{xy}=3270$	یک	CFRP
$E_y=4800$	$\nu_{xz}=0.22$		$G_{xz}=3270$		
$E_z=4800$	$\nu_{yz}=0.30$		$G_{yz}=1860$		

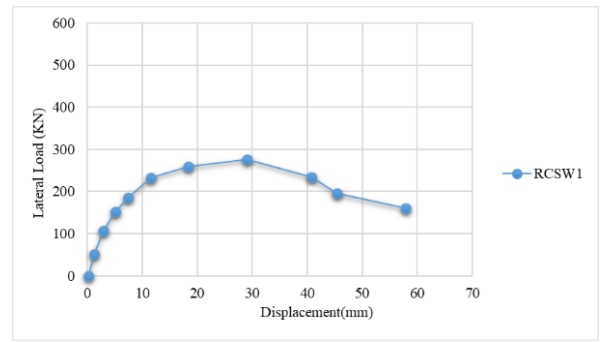
۳-۲- بحث و ارزیابی نتایج عددی

شکل ۱۰ منحنی نیرو-تغییر مکان دیوارهای برشی بتن‌آرمه دارای بازشو و با طرح‌های مختلف مقاوم‌سازی را از ابتدای بارگذاری تا مرحله شکست نشان می‌دهد. در این مرحله رفتار غیرخطی دیوار برشی بتن‌آرمه که تحت بار چرخه‌ای واقع شده مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که مشاهده می‌گردد، با اعمال بارگذاری مورد نظر، در ابتدا رفتار دیوار برشی بتن‌آرمه

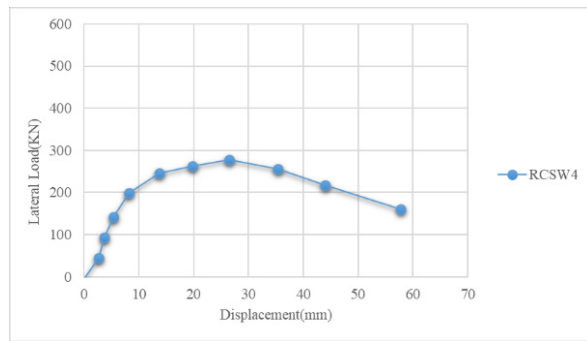
همچنین مشخصات ورق‌های CFRP استفاده در مدل‌سازی عددی جهت مقاوم‌سازی دیوارهای برشی دارای بازشو در جدول ۴ ارائه شده است. پس از انجام مدل‌سازی مدل‌های RCSW1 تا RCSW8 در ABAQUS، تحلیل استاتیکی غیرخطی و تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار می‌گیرند. الگوی بارگذاری چرخه‌ای مورد استفاده مطابق الگوی شکل ۵ است.



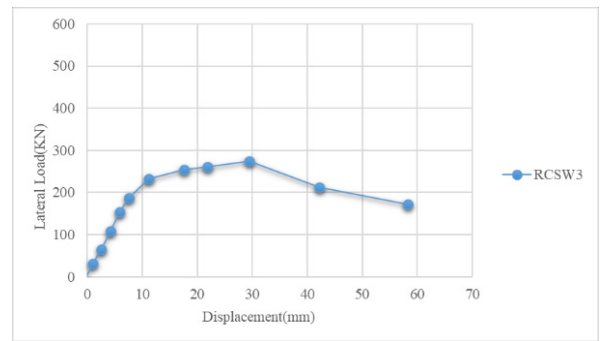
(ب)



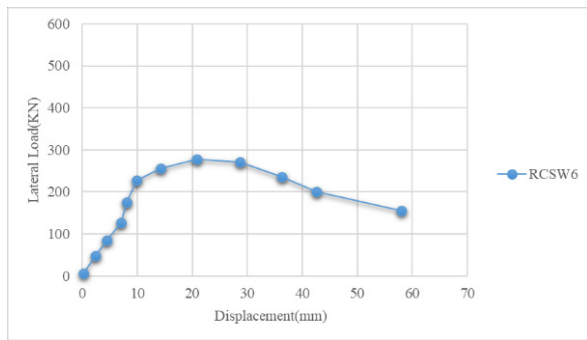
(الف)



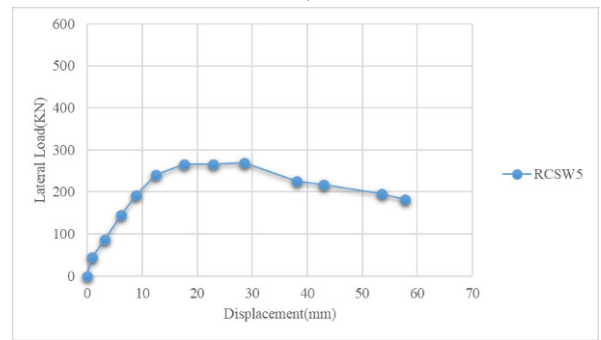
(ت)



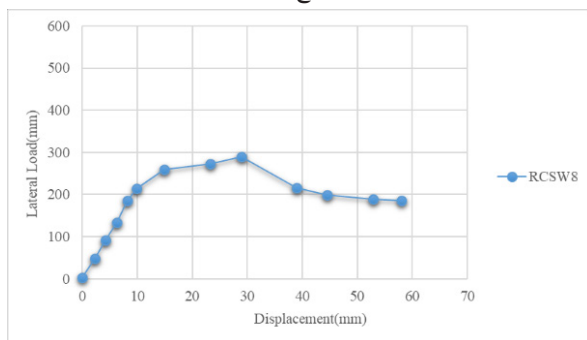
(پ)



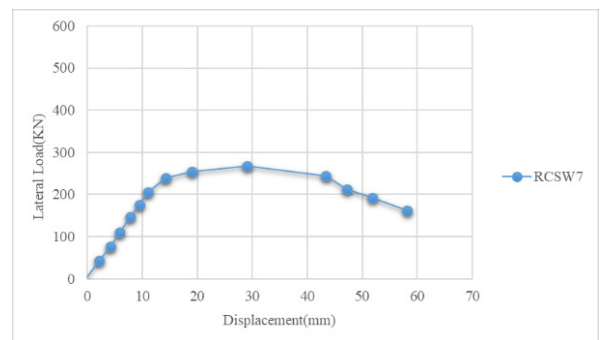
(ج)



(ث)



(ح)



(چ)

شکل ۱۰. منحنی نیرو-تغییر مکان دیوار برشی بتن‌آرمه دارای بازشو (الف) مدل RCSW1، (ب) مدل RCSW2، (پ) مدل RCSW3، (ت) مدل RCSW4، (ث) مدل RCSW5، (ج) مدل RCSW6، (ح) مدل RCSW8، (چ) مدل RCSW7

Fig. 10. Force –displacement curves of the RCSWs with opening (a) RCSW1 (b) RCSW2 (c) RCSW3 (d) RCSW4 (e) RCSW5 (f) RCSW6 (g) RCSW7 (h) RCSW8

تقریباً به صورت خطی است. بعد از مرحله شکست رفتار دیوار برشی بتن‌آرمه دارای بازشو به صورت غیرخطی شده است. سطح زیر نمودار نیرو-تغییر مکان انرژی جذب شده را نشان می‌دهد. رفتار بار تغییر مکان دیوارهای تقویت شده نشان می‌دهد که در محل وصله به کمک نمودار پوش‌آور که مقدار زیادی خمش غیرالاستیک در پای دیوار ایجاد می‌گردد که سبب جذب مقدار قابل توجهی انرژی می‌شود. رفتار دیوارهای برشی در منحنی‌های نیرو-تغییر مکان نشان می‌دهد که تقویت با CFRP روشی موثر برای افزایش محصور شدگی المان‌های مرزی و مهار شدگی آرماتورهای عرضی دیوار می‌باشد. استفاده از ورق CFRP برخلاف ورق فولادی وزن سازه کاهش یافته و از لحاظ هزینه اقتصادی‌تر و حمل و نقل آن‌ها راحت‌تر است. به طور کلی کامپوزیت‌های CFRP دارای خصوصیات بالاتری نسبت به انواع کامپوزیت‌های دیگر می‌باشد.

شکل ۱۱ منحنی سختی دیوارهای برشی بتن‌آرمه دارای بازشو و با طرح‌های مختلف مقاوم‌سازی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با غیرخطی شدن رفتار دیوار برشی بتن‌آرمه سختی دیوار کاهش می‌یابد.

شکل ۱۲ و شکل ۱۳ به ترتیب کانتور آسیب کششی در لحظه آغاز و نهایی ترک خوردگی دیوارهای برشی بتن‌آرمه دارای بازشو و با طرح‌های مختلف مقاوم‌سازی را نشان می‌دهند. برای جبران ضعف برشی دیوار، صفحات FRP در راستای طول دیوار موازی با آرماتورهای عرضی به صورت افقی در دو وجه دیوار نصب می‌گردد. نحوه عملکرد FRP به این گونه است که پس از ایجاد ترک برشی در بتن، کرنش در FRP در آن منطقه افزایش یافته و نیروها به FRP منتقل می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که تقویت برشی دیوار با صفحات FRP سبب افزایش مقاومت تسلیم، مقاومت نهایی و شکل‌پذیری دیوار می‌شود. برای جبران ضعف خمشی دیوار صفحات FRP در راستای ارتفاع دیوار موازی با آرماتورهای طولی بر روی آن به طور قائم نصب می‌شود. نیروها توسط این ورق‌ها به تکیه‌گاه پای دیوار منتقل می‌گردد. حالت شکست دیواری که دارای ضعف خمشی می‌باشد. با شروع ترک‌های کششی به صورت افقی در لبه‌های دیوار نزدیک پای دیوار ایجاد می‌گردد پس از آن خارجی‌ترین آرماتورهای کششی تسلیم می‌گردند. نتایج نشان می‌دهد که تقویت خمشی دیوار با صفحات FRP سبب افزایش مقاومت ترک خوردگی، مقاومت تسلیم، سختی ثانویه در هنگام تسلیم و افزایش مقاومت نهایی می‌گردد. در نواحی مستعد تشکیل مفصل پلاستیک لازم است المان‌های مرزی به نحو مناسبی به صورت دورپیچ کامل محصور شوند که باعث افزایش شکل‌پذیری می‌شود. از این شکل‌ها نتایج زیر به دست آمد:

(۱) در مدل RCSW1، کرنش در پاشنه دیوار بیشتر بوده و اولین ترک در تغییر مکان ۱۲/۶۲ میلی‌متر در قسمت بالای بازشو ایجاد می‌گردد. ترک‌های برشی در جان تیر رخ می‌دهد و در این مدل به علت این که سمت راست بازشو و بالای بازشو به صورت کامل مقاوم‌سازی نشده است، ترک‌های قطری بالای بازشو در تیر رابط ایجاد شده و در مرحله نهایی بارگذاری ترک بین دیوار پایه و فونداسیون باعث شکست دیوار شده و در بتن لغزش و خرد شدگی رخ می‌دهد. مد گسیختگی غالب در برش به صورت لغزشی است.

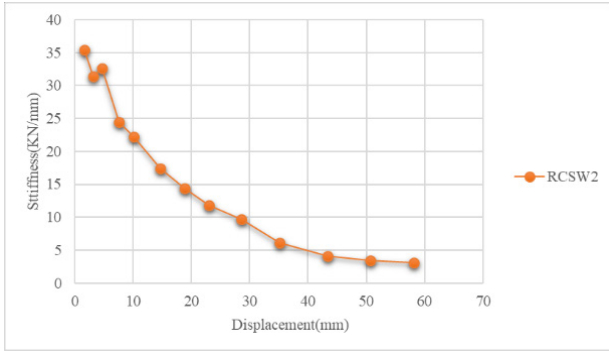
(۲) در مدل RCSW2، با به کارگیری لایه‌های افقی CFRP در اطراف بازشو، باعث شده تا در مرکز دیوار کرنش‌ها، محل تنش‌های برش اصلی، کمتر شده و آرماتورهای افقی در لحظه‌ی نهایی تسلیم نمی‌شوند. اولین ترک در تغییر مکان ۱۰/۰۶ میلی‌متر رخ می‌دهد. در محل اتصال دیوار و فونداسیون ترک‌های زیادی ایجاد گشته و این کرنش‌ها نسبت به دیوار کنترل بیشتر است و همچنین گسیختگی غالب به صورت لغزشی در برش است.

(۳) در مدل RCSW3، با به کارگیری لایه‌های افقی، قائم و مورب CFRP در اطراف بازشو، باعث شده تا مد کششی قطری حذف شده و اولین ترک در تغییر مکان ۷/۵۱ میلی‌متر رخ داده و همچنین باعث جلوگیری از ترک‌های کششی قطری می‌گردد. در این نمونه نسبت به نمونه‌های دیگر تنش در وسعت بیشتری توزیع می‌گردد.

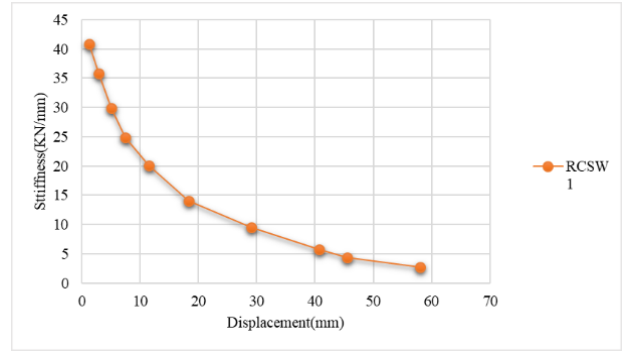
(۴) در مدل RCSW4، با به کارگیری لایه‌های افقی و قائم CFRP در اطراف بازشو، باعث شده تا در نواحی قطری دیوار با کاهش کرنش‌ها مواجه هستیم. اولین ترک در تغییر مکان ۸/۱۹ میلی‌متر رخ می‌دهد. همچنین در پاشنه دیوار کرنش کمتر شده و مقاومت برشی افزایش پیدا می‌کند و همچنین باعث کاهش ترک‌های قطری در بالای بازشو می‌شود.

(۵) در مدل RCSW5، با به کارگیری لایه‌های افقی و مورب CFRP در اطراف بازشو، باعث شده تا از گسترش ترک‌های قطری بالای بازشو جلوگیری کند و همچنین کرنش در پاشنه‌ی دیوار را کاهش دهد. در نهایت با ترک قطری در گوشه بازشو و محل اتصال پی به دیوار منهدم می‌شود. اولین ترک در این نمونه در تغییر مکان ۱۲/۴۸ رخ می‌دهد.

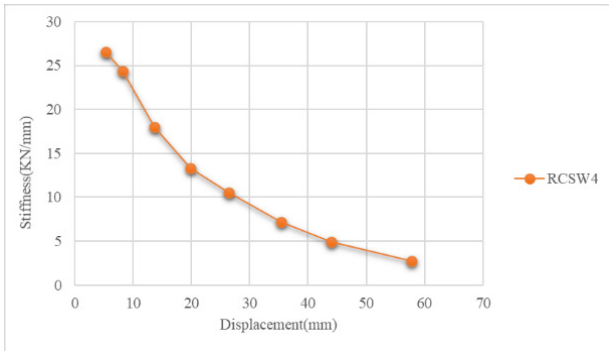
(۶) در مدل RCSW6، با به کارگیری لایه‌های قائم CFRP در اطراف بازشو، باعث شده تا ظرفیت خمشی دیوار به طور قابل توجهی افزایش پیدا کند و در پاشنه دیوار کرنش‌ها کمتر شده، مانع لغزش دیوار می‌گردد. اما نسبت به نمونه‌های دیگر ترک‌های قطری در بالای بازشو تشکیل شده است و اولین ترک در تغییر مکان ۹/۹ میلی‌متر رخ می‌دهد.



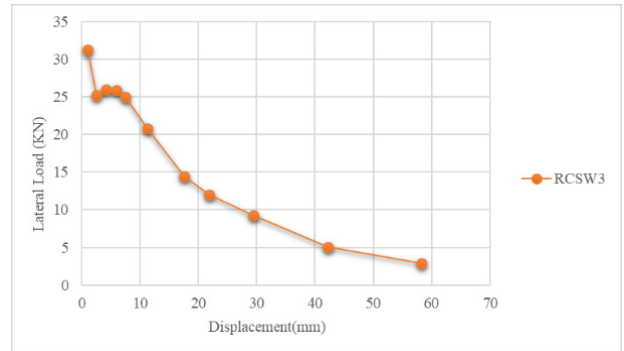
(ب)



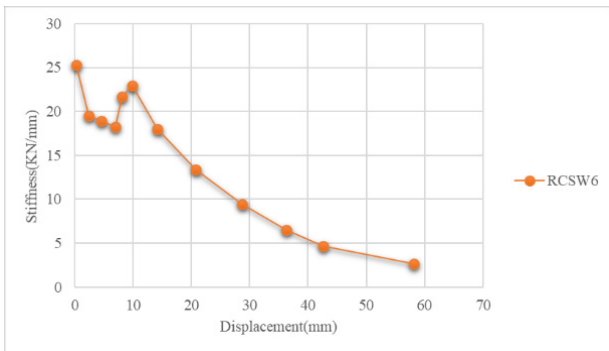
(الف)



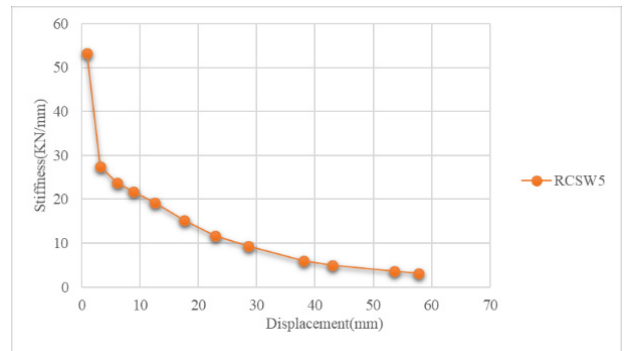
(ت)



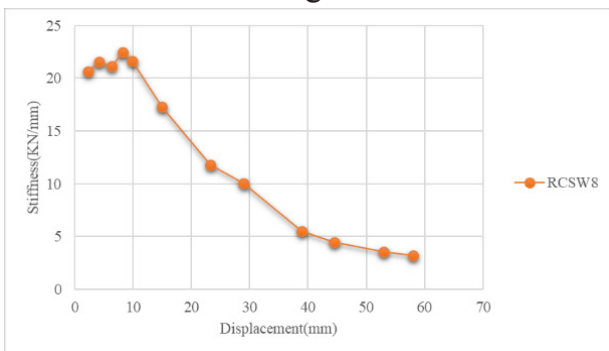
(پ)



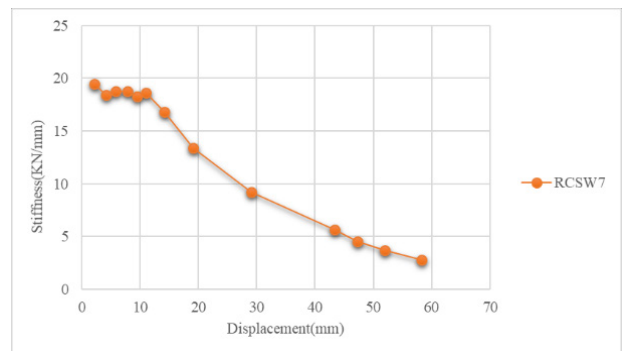
(ج)



(ش)



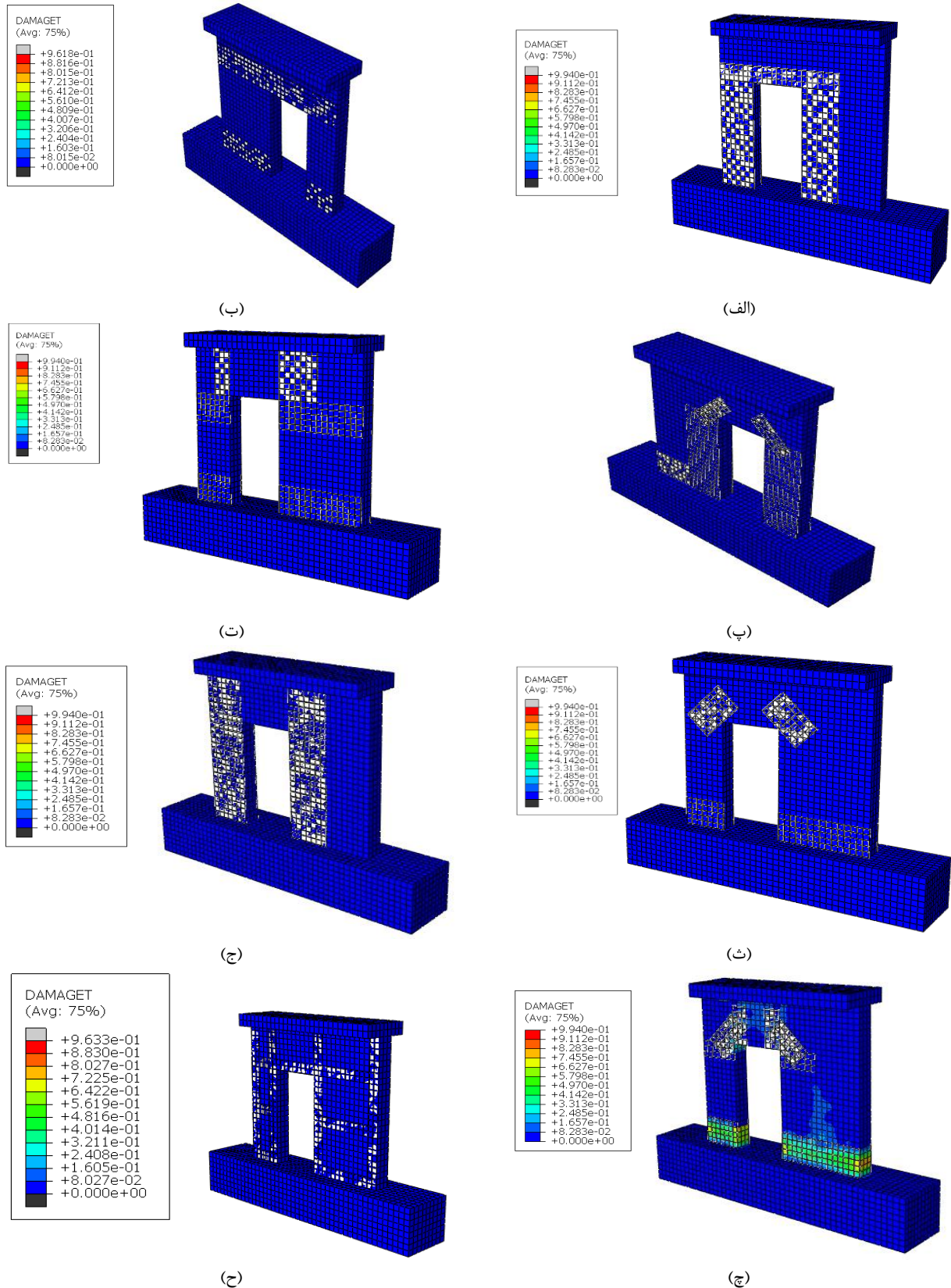
(ح)



(چ)

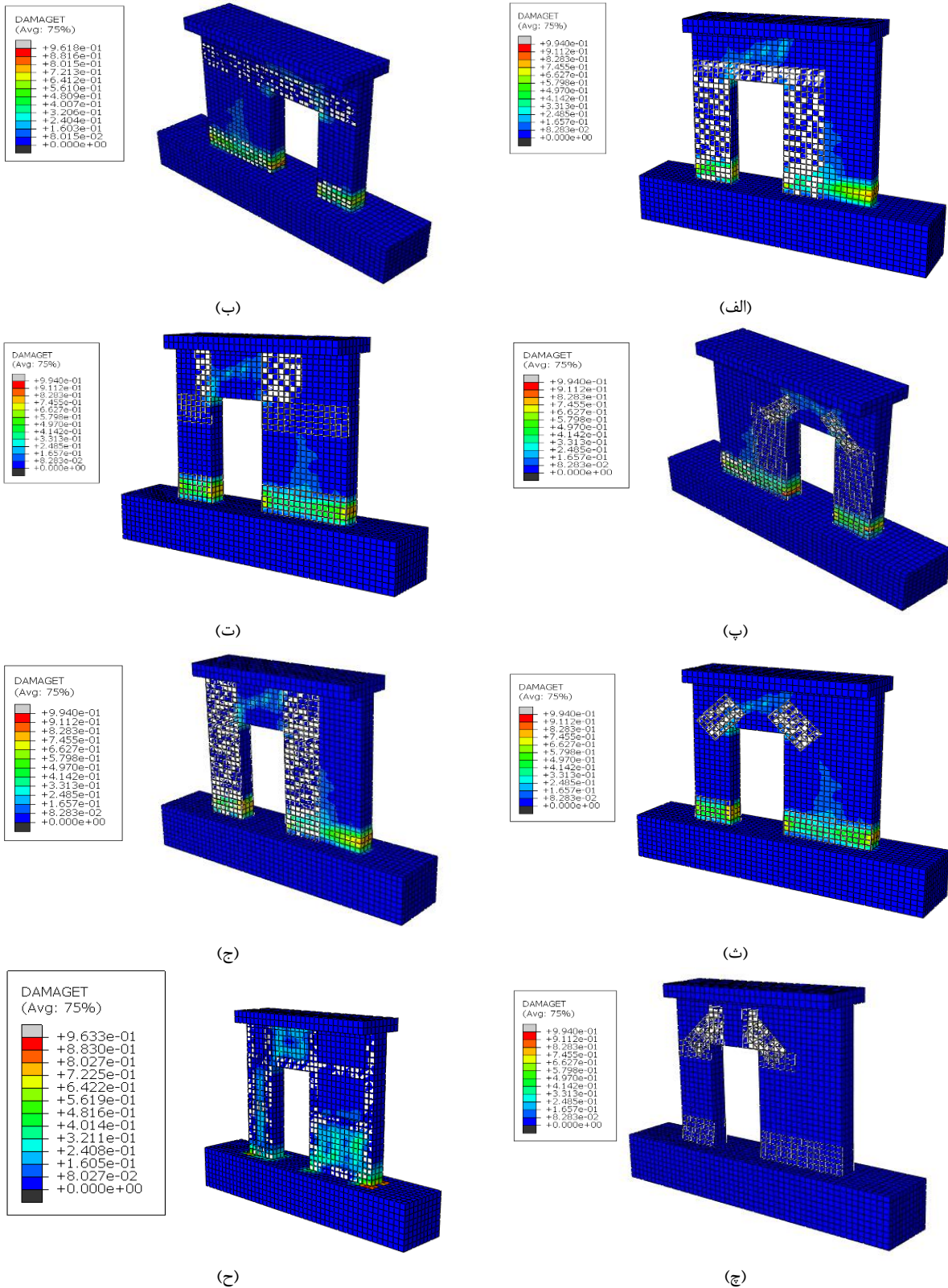
شکل ۱۱. منحنی سختی دیوار برشی بتن‌آرمه دارای بازشو (الف) مدل RCSW1، (ب) مدل RCSW2، (پ) مدل RCSW3، (ت) مدل RCSW4، (ث) مدل RCSW5، (ج) مدل RCSW6، (چ) مدل RCSW7، (ح) مدل RCSW8

11. Stiffness curve of the RCSWs with opening (a) RCSW1 (b) RCSW2 (c) RCSW3 (d) RCSW4 (e) RCSW5 (f) RCSW6 (g) RCSW7 (h) RCSW8



شکل ۱۲. کانتور آسیب کششی در لحظه آغاز ترک خوردگی (الف) مدل RCSW1، (ب) مدل RCSW2، (پ) مدل RCSW3، (ت) مدل RCSW4، (ث) مدل RCSW5، (ج) مدل RCSW6، (چ) مدل RCSW7، (ح) مدل RCSW8

Fig. 12. Tension Damage Contours at the First Stage of Cracking (a) RCSW1 (b) RCSW2 (c) RCSW3 (d) RCSW4 (e) RCSW5 (f) RCSW6 (g) RCSW7 (h) RCSW8



شکل ۱۳. کانتور آسیب کششی در لحظه نهایی ترک خوردگی (الف) مدل RCSW1، (ب) مدل RCSW2، (پ) مدل RCSW3، (ت) مدل RCSW4، (ث) مدل RCSW5، (ج) مدل RCSW6، (چ) مدل RCSW7، (ح) مدل RCSW8

Fig. 13. Tension Damage Contours at the Final Stage of Cracking (a) RCSW1 (b) RCSW2 (c) RCSW3 (d) RCSW4 (e) RCSW5 (f) RCSW6 (g) RCSW7 (h) RCSW8

جدول ۵. نتایج عددی تحلیل مدل‌های دیوار برشی بتن‌آرمه دارای بازشو تقویت شده با هشت طرح CFRP

Table 5. Results of Numerical Analysis of the RCSW with opening retrofitted with eighth different arrangements

مدل عددی	μ	E(kN.mm)	δ_u (mm)	P_u (kN)	$\frac{\delta_{cr}}{\delta_{cr}(mm)}$	P_{cr} (kN)
RCSW1	۳/۵۳	۴۲۹۷۷/۷۳	۵۷/۹۴	۱۶۰/۹۰	۱۲/۶۲	۲۱۲/۳۲
RCSW2	۳/۴۹	۴۳۲۰۴/۰۲	۵۸/۱۰۹	۱۷۸/۳۹	۱۰/۰۶	۲۲۴/۰۹
RCSW3	۳/۴	۴۳۲۳۹/۳۷	۵۸/۲۲	۱۷۱/۵۴	۷/۵۱	۱۸۷/۷۰
RCSW4	۲/۹۴	۴۲۸۳۸/۳۳	۵۷/۷۶	۱۵۹/۸۲۹	۸/۱۹	۱۹۹/۳۹
RCSW5	۳/۰۵	۴۲۹۲۳/۶۹	۵۷/۷۸	۱۸۱/۵۴	۱۲/۴۸	۲۴۰/۶۵
RCSW6	۵/۸	۴۲۷۵۶/۷۳	۵۷/۰۶	۱۵۵/۹۲	۹/۹	۲۲۷/۳۸
RCSW7	۳/۳۲	۴۲۲۰۶/۳۶	۵۸/۱۹۵	۱۶۱/۶۶	۱۱/۰۲	۲۰۵/۵۷
RCSW8	۶/۲	۴۲۹۸۴/۴۱	۵۷/۹۸	۱۸۶/۶۲	۹/۸۷	۲۱۳/۸۹

۴- نتیجه‌گیری

اهمیت سیستم‌های باربر لرزه‌ای با توجه به گسترش روزافزون سازه‌های بلند مرتبه و نیاز بشر افزایش پیدا می‌کند. یکی از المان‌های باربر دیوارهای برشی بتن‌آرمه می‌باشد. با توجه به اهمیت نقش این سیستم در رفتار سازه، طراحی این المان‌ها باید مطابق آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰ زلزله ایران) باشد. که عدم توجه به این موضوع می‌تواند بر روی ظرفیت باربری و شکل‌پذیری دیوار تاثیر گذارد. علاوه بر این مشخص نبودن بازشو در دیوارهای برشی بتن‌آرمه به شدت بر روی رفتار دیوار تاثیرگذار می‌باشد. دلیل ایجاد بازشو می‌تواند تغییر کاربری ساختمان و بحث‌های تاسیساتی در دیوار باشد. در این مقاله دیوار برشی بتن‌آرمه دارای بازشو با هشت طرح مختلف توسط ورق‌های CFRP مقاوم‌سازی شدند. در این نمونه‌ها، پارامترهای مختلفی شامل ظرفیت باربری نهایی، بار حداکثر، شکل‌پذیری، استهلاک انرژی و سختی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج زیر حاصل گردید:

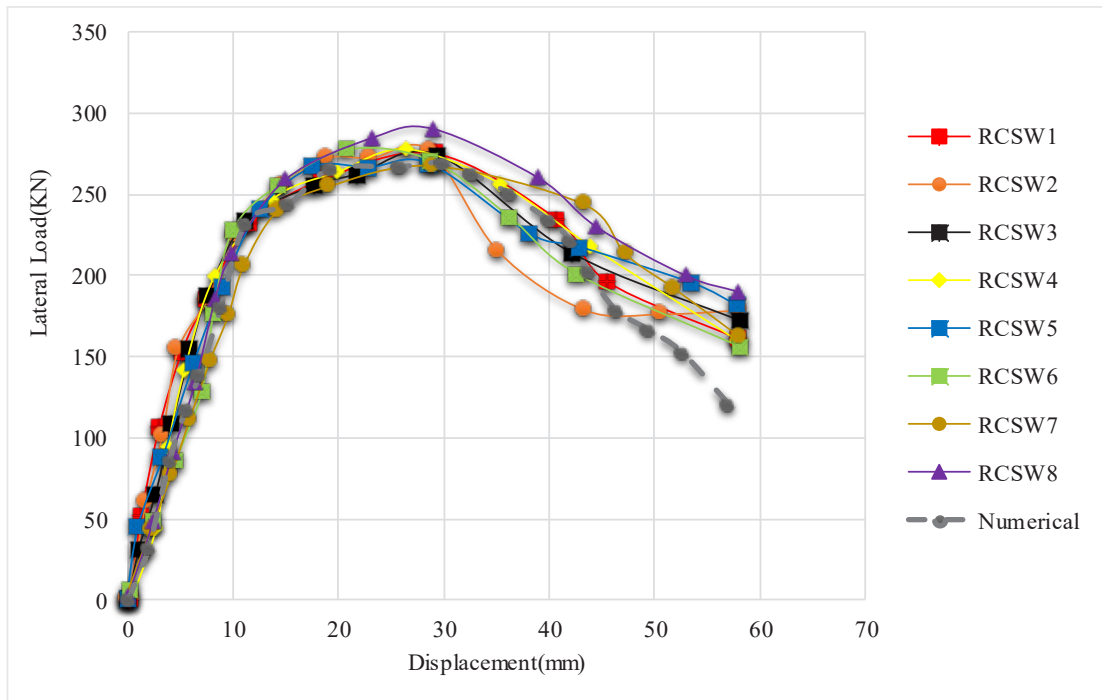
- در میان تمامی نمونه‌ها، نمونه RCSW8 بیشترین ظرفیت باربری را در فشار و کشش دارا می‌باشد. این افزایش باربری به میزان ۱۲٪ نسبت به نمونه مرجع است.
- نوع مقاوم‌سازی دیوارهای برشی دارای بازشو بر روی مکانیزم شکست موثر بوده، به گونه‌ای که با افزایش میزان مقاوم‌سازی اگر چه

(۷) در مدل RCSW7، با به کارگیری لایه‌های قائم، افقی و مورب CFRP در اطراف بازشو، باعث شده تا ترک‌های کششی قطری حذف شود و کرنش در پاشنه‌ی دیوار کاهش پیدا کند. اولین ترک در این نمونه در تغییر مکان ۱۱/۰۲ میلی‌متر رخ می‌دهد.

(۸) در مدل RCSW8، با به کارگیری لایه‌های قائم، افقی CFRP در تمام دیوار، باعث شده کرنش در محل اتصال فونداسیون و دیوار کمتر شده و شکل‌پذیری بهبود یابد. اولین ترک در این نمونه در تغییر مکان ۹/۸۷ میلی‌متر رخ داده و مقاومت برشی و خمشی در دیوار افزایش پیدا می‌کند. مانع ایجاد ترک‌های قطری در نواحی وسط دیوار می‌شود. ظرفیت باربری نهایی نسبت به مدل‌های دیگر بهبود یافته است.

در جدول ۵ نتایج تحلیل دیوارهای برشی بتن‌آرمه دارای بازشو و با طرح‌های مختلف مقاوم‌سازی ارائه شده است. سطح زیر نمودار نیرو-تغییر مکان انرژی جذب شده است. همچنین پارامتر شکل‌پذیری برابر با نسبت تغییر مکان نهایی به تغییر مکان تسلیم تعریف می‌شود.

حال از مقایسه هشت طرح مختلف مقاوم‌سازی در شکل ۱۴ ملاحظه می‌گردد که در مدل RCSW8 به علت این که به صورت افقی و قائم مقاوم‌سازی شده، ظرفیت باربری نهایی به طور میانگین به مقدار ۱۲٪ افزایش پیدا کرده و به علت عرض کمتر ورق‌ها اقتصادی‌تر است. همچنین این مدل شکل‌پذیری بهبود یافته و افزایش میزان جذب انرژی را داراست.



شکل ۱۴. منحنی مقایسه ظرفیت باربری نهایی در هشت مدل مقاوم‌سازی

Fig. 14. Comparison of Load-Carrying Capacity Curves

- [1] G. Pachideh, M. Gholhaki, Evaluation of Concrete Filled Steel Tube Column Confined with FRP, *J. Test. Eval*, 48 (2020) 4343-4354.
- [2] A. Kheyroddin, *Shear Wall*, Semnan University, Semnan, 1395. (in persian).
- [3] G. Pachideh, M. Gholhaki, M. Kafi, Experimental and numerical evaluation of an innovative diamond-scheme bracing system equipped with a yielding damper, *Steel and Composite Structures*, 36(2) (2020) 197-211.
- [4] G. Pachideh, M. Kafi, M. Gholhaki, Evaluation of cyclic performance of a novel bracing system equipped with a circular energy dissipater, in: *Structures*, Elsevier, 2020, pp. 467-481.
- [5] C. Seminar, *NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 273)*, Building Seismic Safety Council: Washington, DC, USA, (1997).
- [6] A. Kheyroddin, M.K. Sharbatdar, Reinforcement of reinforced concrete structures with the help of steel and

افزایش ظرفیت باربری داشت اما در تمامی نمونه‌ها شکست لغزشی-برشی مشاهده شد که بر شکل‌پذیری دیوارها موثر است.

- در بالای بازشو با تشکیل عضو افقی به عنوان یک فیوز برشی عمل کرده که باعث افزایش شکل‌پذیری دیوارها می‌شود. ولی به علت کمبود میلگردهای افقی و عمودی به کار گرفته شده در این عضو ترک‌های قطری زیادی تشکیل شده و عرض زیاد این ترک‌ها مانع این اتفاق می‌شود.
- سختی نمونه‌های مقاوم‌سازی شده دیوار برشی بتن‌آرمه با ورق‌های CFRP تا مقدار ۱۵٪ افزایش پیدا کرد.
- با توجه به این که با افزایش میزان مقاوم‌سازی در دیوارها باعث بهبود مقاومت و سختی شد؛ ولی به علت به وجود آمدن شکست لغزشی-برشی شکل‌پذیری کاهش پیدا می‌کند.
- در نمونه RCSW8 به علت این که شیب نمودار قبل از تسلیم شدن نسبت به نمونه‌های دیگر بیشتر است دارای سختی بیشتری می‌باشد. مقاوم‌سازی با CFRP باعث افزایش سختی اولیه و ظرفیت باربری نهایی می‌گردد.

منابع

- [17] H. Jiang, B. Wang, X. Lu, Experimental study on damage behavior of reinforced concrete shear walls subjected to cyclic loads, *Journal of earthquake engineering*, 17(7) (2013) 958-971.
- [18] M. Marius, Seismic behaviour of reinforced concrete shear walls with regular and staggered openings after the strong earthquakes between 2009 and 2011, *Engineering Failure Analysis*, 34 (2013) 537-565.
- [19] M. Mosoarca, Failure analysis of RC shear walls with staggered openings under seismic loads, *Engineering Failure Analysis*, 41 (2014) 48-64.
- [20] M.M. Lima, J.H. Doh, M.N. Hadi, D. Miller, The effects of CFRP orientation on the strengthening of reinforced concrete structures, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 25(15) (2016) 759-784.
- [21] C. Popescu, G. Sas, C. Sabau, T. Blanksvärd, Effect of cut-out openings on the axial strength of concrete walls, *Journal of Structural Engineering*, 142(11) (2016).
- [22] K. Behfarnia, A. Shirneshan, A numerical study on behavior of CFRP strengthened shear wall with opening, *Comput Concrete*, 19(2) (2017) 179-189.
- [23] M.M. Lima, J.-H. Doh, M.N. Hadi, Experimental study on RC walls with opening strengthened by externally bonded CFRP, *Journal of Composites for Construction*, 23(2) (2019) 04019008.
- [24] S.A. Hosseini, A. Kheyroddin, M. Mastali, An experimental investigation into the impacts of eccentric openings on the in-plane behavior of squat RC shear walls, *Engineering Structures*, 197 (2019) 109410.
- [25] A. Manual, ABAQUS 6.14 Analysis User's Manual, in, *Online Documentation Help: Dassault Systemes*, 2014.
- [26] W. Zhang, E.E. Seylabi, E. Taciroglu, An ABAQUS toolbox for soil-structure interaction analysis, *Computers and Geotechnics*, 114 (2019) 103143.
- [27] M. Yekrangnia, *Abaqus Practical Guide with Structural Civil Engineering and Geotechnical Problems Civil Engineering Publications*, 1393. (in persian).
- composite sheets FRP and profils, Semnan University, Semnan, 1395. (in persian).
- [7] M. Fintel, Performance of buildings with shear walls in earthquakes of the last thirty years, *PCI journal*, 40(3) (1995) 62-80.
- [8] B. Li, C.L. Lim, Tests on seismically damaged reinforced concrete structural walls repaired using fiber reinforced polymers, (2012).
- [9] G. Pachideh, M. Gholhaki, An experimental investigation into effect of temperature rise on mechanical and visual characteristics of concrete containing recycled metal spring, *Structural Concrete*, 22(1) (2021) 550-565.
- [10] G. Pachideh, M. Gholhaki, Assessment of post-heat behavior of cement mortar incorporating silica fume and granulated blast-furnace slag, *Journal of Structural Fire Engineering*, (2020).
- [11] A.A. KHEYR, H. Naderpour, Nonlinear finite element analysis of composite RC shear walls, (2008).
- [12] D. Mostofinejad, M.M. Anaei, Effect of confining of boundary elements of slender RC shear wall by FRP composites and stirrups, *Engineering Structures*, 41 (2012) 1-13.
- [13] K.F.O. El-Kashif, A.K. Adly, H.A. Abdalla, Finite element modeling of RC shear walls strengthened with CFRP subjected to cyclic loading, *Alexandria Engineering Journal*, 58(1) (2019) 189-205.
- [14] J.-y. Wang, M. Sakashita, S. Kono, H. Tanaka, W.-j. Lou, Behavior of reinforced concrete structural walls with various opening locations: experiments and macro model, *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 11(3) (2010) 202-211.
- [15] J. Wang, M. Sakashita, S. Kono, H. Tanaka, Shear behaviour of reinforced concrete structural walls with eccentric openings under cyclic loading: experimental study, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 21(9) (2012) 669-681.
- [16] M. Mosoarca, V. Stoian, Seismic energy dissipation in structural reinforced concrete walls with staggered openings, *J Appl Eng Sci JAES*, 2(15) (2012) 71-78.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Zahiri, A. Kheyroddin, M. Gholhaki, Evaluation Cyclic Behavior of Concrete Shear Wall with Opening Retrofitting with Composite , Amirkabir J. Civil Eng., 54(10) (2023) 3857-3878.

DOI: 10.22060/ceej.2022.20578.7470



