



## The Effect of Trapezoidal Corrugated Steel Plates and Coupling Beam Action on the Seismic Behavior of Coupled Steel Shear Wall Systems

F. Ajori, F. Emami\*

Department of Civil Engineering, Science and research branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

**ABSTRACT:** Steel shear walls are one of the lateral load-resisting systems that have been considered by researchers and designers in the last four decades. Though steel shear walls have proven effective, they are limited due to the opening on their bay. To address this, coupled shear walls can be used. As a result, there has recently been widespread use of corrugated sheets in the steel shear walls for low- and mid-rise buildings. However, there are limited studies on the coupled shear wall. Hence, as a symbol of low- and mid-rise buildings, Abaqus software was utilized in this study to model and analyze samples of coupled steel shear wall 3-, 6-, and 12-story buildings under pushover analysis up to 4% roof drift. The effect of the trapezoidal corrugated steel plate with vertical and horizontal waves was investigated on the five key factors: bearing capacity, energy dissipation, degree of coupling, coefficient of behavior and ductility ratio of the coupled steel shear wall. Furthermore, the effect of increasing both the cross-sectional area of the coupling beam and the length of the coupling beam was assessed in this study. The results demonstrate that vertical and horizontal corrugated sheets cause a reduction of three factors: the base shear, degree of coupling, and energy dissipation. In addition, the behavior coefficient and ductility ratio decrease in the vertical corrugated sample and increase in the horizontal corrugated sample. Furthermore, increasing the beam's length or cross-sectional area causes a decrease in four factors: the bearing capacity, coefficient of behavior, ductility, and energy dissipation ratio. The degree of coupling decreases in the vertical corrugated samples and increases in the horizontal corrugated samples. Moreover, the degree of coupling increases in both cases of flat and corrugated steel sheets with increasing the number of stories.

### Review History:

Received: Jun. 06, 2021

Revised: Jan. 02, 2022

Accepted: Jan. 03, 2022

Available Online: Jan. 28, 2022

### Keywords:

Steel plate shear wall

Trapezoidal corrugated steel plate

Degree of coupling

Coupled shear wall

Coupling beam

### 1- Introduction

Using the non-elastic zone capacity of structural members allows the seismic lateral-force-resisting systems to be designed for more minor requirements than those predicted by the dynamic elastic analysis. Steel Plate shear walls (SPSW) are new seismic lateral force-resisting systems. The SPSW system consists of a steel frame with web plates connected to the beams and columns of each story, referred to as Horizontal Boundary Elements (HBEs) and Vertical Boundary Elements (VBEs), respectively. Due to the current design limitations in the regulations, it is sometimes impossible to create large openings, in which case steel plate shear walls with coupling can be used as a solution to address this problem [1]. The steel plate shear wall with coupling consists of two separate shear walls connected by a coupling beam [1]. One way to stiffen these walls is to improve their buckling behavior by using stiffeners. However, due to the high cost of making stiffened panels and increasing the structure's weight, corrugated steel plates have been suggested as a suitable alternative with a

high out-of-plane resistance, high shear strength, and high ductility (Emami et al. 2013) [2]. In 2017, Hosseinzadeh et al. discovered that in corrugated shear walls, the development of the tension field, wall yield and damage depends on the plate geometry corrugated, which with increasing corrugation angle, wall damage to tear off the sheet expands [3]. In 2016, Gholhaki and Qadaksaz found that raising the coupling beam length increases the period and drift of the structure and reduces the base shear [4]. In 2017, Borello and Fahnstock tested two specimens of three-story steel plate shear walls under the cyclic lateral-displacement protocol [5]. One of the specimens had flexural yielding another had intermediate flexural yielding. The results indicated that both specimens got a lateral drift of 4% and excellent performance with high internal stiffness, suitable ductility and high energy absorption. With attention to the previous studies, further evaluation of using Trapezoidal Corrugated Steel Plates in the steel plate shear wall and coupling beam effect is required. Consequently, in this research, examples of coupling steel

\*Corresponding author's email: f-emami@srbiau.ac.ir



**Table 1. Sample properties**

SAMPLE	EXT. COLOUMN	INT. COLOUMN	BEAM	COUPLING BEAM	PLATE TICKNESS	STEEL PLATE
3-P	W8×58	W8×48	W6×12	W6×12	1.16	PLANAR
3-TC-V	W8×58	W8×48	W6×12	W6×12	1.16	CORRUGATED
3-TC-H	W8×58	W8×48	W6×12	W6×12	1.16	CORRUGATED
6-P	W24×279	W24×229	W18×50	W18×50	3.175	PLANAR
6-TC-V	W24×279	W24×229	W18×50	W18×50	3.175	CORRUGATED
6-TC-H	W24×279	W24×229	W18×50	W18×50	3.175	CORRUGATED
12-P	W36×800	W36×652	W18×86	W18×86	5.56	PLANAR
12-TC-V	W36×800	W36×652	W18×86	W18×86	5.56	CORRUGATED
12-TC-H	W36×800	W36×652	W18×86	W18×86	5.56	CORRUGATED
3-CL10	W8×58	W8×48	W6×12	W6×12	1.16	PLANAR
3-CL20	W8×58	W8×48	W6×12	W6×12	1.16	PLANAR
6-CL10	W24×279	W24×229	W18×50	W18×50	3.175	PLANAR
6-CL20	W24×279	W24×229	W18×50	W18×50	3.175	PLANAR
12-CL10	W36×800	W36×652	W18×86	W18×86	5.56	PLANAR
12-CL20	W36×800	W36×652	W18×86	W18×86	5.56	PLANAR
3-CB25	W8×58	W8×48	W6×12	W6×15	1.16	PLANAR
3-CB65	W8×58	W8×48	W6×12	W6×20	1.16	PLANAR
6-CB25	W24×279	W24×229	W18×50	W18×50	3.175	PLANAR
6-CB65	W24×279	W24×229	W18×50	W18×50	3.175	PLANAR
12-CB25	W36×800	W36×652	W18×86	W18×86	5.56	PLANAR
12-CB65	W36×800	W36×652	W18×86	W18×86	5.56	PLANAR

shear walls 3, 6 and 12-story symbol of low and mid-rise buildings were modeled in Abacus software. Then, the effect of using a trapezoidal corrugated steel plate with vertical and horizontal orientations in them was investigated on bearing capacity, energy absorption rate, degree of coupling (DC), coefficient of behavior and ductility ratio, under nonlinear static analysis up to 4% drift roof. In addition, the effect of coupling beam performance was assessed at all three heights.

**2- Methodology**

In this research, the specifications of the 3-story sample of Borello experiments and the 6 and 12-story samples designed in Borello’s doctoral dissertation have been used to model the samples. 9 samples were modeled to analyze the effect of using trapezoidal corrugated sheets with vertical and horizontal orientation, 6 samples were modeled to study the effect of increasing the beam length, and 6 samples were studied to investigate the effect of increasing the cross-sectional area of the coupling beam. The models’ behavior was studied up to 4% drift, which is considered the minimum drift of special moment frames according to AISC 341-16 [6].

**Table 2. Results**

SAMPLE	BASE SHEAR (KN)	ENERGY ABSORPTION (KJ)	DC	BEHAVIO FACTOR	DUCTILITY RATIO
3-P	914	164	0.534	6.24	5.51
3-TC-V	842	140	0.317	4.95	4.94
3-TC-H	869	152	0.523	7.01	6.82
6-P	818	262	0.609	6.30	5.42
6-TC-V	761	244	0.340	4.42	4.61
6-TC-H	783	250	0.563	6.38	6.64
12-P	131	917	0.741	5.79	3.97
12-TC-V	1656	896	0.393	5.39	3.48
12-TC-H	1689	843	0.673	5.42	4.58
3-CL10	893	157	0.460	5.14	5.12
3-CL20	856	154	0.428	5.88	5.31
6-CL10	804	255	0.563	6.18	4.91
6-CL20	775	251	0.548	6.25	5.01
12-CL10	1695	887	0.689	5.61	3.66
12-CL20	1629	868	0.671	5.68	3.86
3-CB25	879	157	0.560	5.89	5.43
3-CB65	903	160	0.590	5.38	5.39
6-CB25	791	253	0.649	6.13	3.85
6-CB65	804	258	0.672	6.03	5.13
12-CB25	1667	879	0.751	5.73	4.88
12-CB65	1712	912	0.767	5.55	3.53

Since the 3-story sample is built in Borello’s experiment has a scale of 0.43. 6 and 12-story samples were modeled with a scale of 0.43 to have the same scale. A36 steel is used for steel sheets in all samples, and A992 steel is used for other members. Besides, the roof level coupling beam, which was removed in the laboratory model because of limitations caused by the hydraulic jack, has been modeled in all Abacus models based on the initial design specifications. In naming the models in Table 1, the initial numbers show the number of story; the terms P and TC indicate the Planner Steel Plate and Trapezoidal Corrugated steel sheet, respectively. The letters V and H also indicate the Vertical and Horizontal waveforms of the steel sheets, respectively. The terms CL and CB also express the Coupling beam Length and the Cross-section of the Beam, and the numbers after it indicate the increase percentage. Other specifications such as beam and column connection, coupling beam stiffener and boundary conditions are like the Borello test model [1].

### 3- Results and Discussion

The values of the maximum base shear, Energy absorption, DC, behavior factor and ductility ratio of the samples are given in Table 2.

The results demonstrate that the maximum amount of base shear is reduced by changing the steel sheet from planar to vertical and horizontal orientation. Furthermore, the maximum amount of base shear decreases with increasing the coupling beam's length. As can be seen, increasing the cross-sectional area of the coupling beam in the 3rd, 6th and 12th story samples, a decreasing trend is observed in the amount of reduction of the maximum base shear. In other words, the maximum amount of base shear in the sample with a 25% increase in the cross-sectional area of the coupling beam has a more significant reduction than the sample with a 65% increase in the cross-sectional area of the coupling beam.

### 4- Conclusion

In this paper, the effect of using vertical and horizontal trapezoidal corrugated steel sheet, the effect of increasing the length and cross-sectional area of the coupling beam on the steel shear wall of 3, 6 and 12 story was researched, and the subsequent results were obtained:

In all samples, base shear, degree of coupling and energy absorption are decreased by changing the steel plate from planar to vertical and horizontal corrugated, which is more in the panel with vertical corrugation

In all samples, rising the coupling beam's length, the base shear, degree of coupling, behavior factor, ductility ratio, and energy absorption decrease.

In all samples with expanding the cross-sectional area of

the coupling beam, the base shear, behavior factor, ductility ratio and energy absorption decrease and the degree of coupling increases.

With increasing height in all three models, including steel plate wall, vertical and horizontal corrugated sheet, the degree of coupling increases.

### References

- [1] D.J. Borello, Behavior and large-scale experimental testing of steel plate shear walls with coupling, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2014.
- [2] F. Emami, M. Mofid, A. Vafai, Experimental study on cyclic behavior of trapezoidally corrugated steel shear walls, *Engineering Structures*, 48 (2013) 750-762.
- [3] L. Hosseinzadeh, F. Emami, M. Mofid, Experimental investigation on the behavior of corrugated steel shear wall subjected to the different angle of trapezoidal plate, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 26(17) (2017) e1390.
- [4] M. Gholhaki, M. Ghadaksaz, Investigation of the link beam length of a coupled steel plate shear wall, *Steel and Composite Structures*, 20(1) (2016) 107-125.
- [5] D.J. Borello, L.A. Fahnestock, Large-scale cyclic testing of steel-plate shear walls with coupling, *Journal of Structural Engineering*, 143(10) (2017) 04017133.
- [6] AISC, AISC 341-16: Seismic provisions for structural steel buildings, American Institute of Steel Construction Inc, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, (2016).

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

F. Ajori, F. Emami, *The Effect of Trapezoidal Corrugated Steel Plates and Coupling Beam Action on the Seismic Behavior of Coupled Steel Shear Wall Systems*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(8) (2022) 593-596.

DOI: 10.22060/ceej.2022.20137.7354







## تأثیر پانل‌های فولادی موجدار دوزنقه‌ای و نوع عملکرد تیر همبندی بر رفتار لرزه‌ای سیستم‌های دیوار برشی فولادی همبند

فرید آجری، فرشته امامی\*

دانشکده مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۱۹  
بازنگری: ۱۴۰۰/۱۰/۱۲  
پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۳  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۱/۰۸

### کلمات کلیدی:

دیوار برشی فولادی  
ورق موجدار دوزنقه‌ای  
درجه همبندی  
دیوار برشی همبند  
تیر همبندی

**خلاصه:** دیوارهای برشی فولادی یکی از سیستم‌های باربر جانبی است که در چهار دهه اخیر مورد توجه محققین و طراحان قرار گرفته است که یکی از معایب آن محدودیت در ایجاد بازشو در دهانه خود است که می‌توان از دیوار برشی فولادی همبند، به عنوان راه حلی برای رفع این مشکل استفاده کرد. در سال‌های اخیر استفاده از ورق فولادی موجدار در دیوار برشی فولادی مورد توجه قرار گرفته است اما مطالعات محدودی در این زمینه در دیوار برشی همبند وجود دارد. بنابراین در این پژوهش، نمونه‌هایی از دیوار برشی فولادی همبند ۳، ۶ و ۱۲ طبقه که نمادی از ساختمان‌های کوتاه و میان مرتبه هستند در نرم‌افزار آباکوس مدل شدند و تأثیر استفاده از ورق فولادی موجدار دوزنقه‌ای با جهت‌گیری قائم و افقی، بر ظرفیت باربری، میزان جذب انرژی، درجه همبندی، ضریب رفتار و نسبت شکل‌پذیری، تحت تحلیل بارافزون تا دریافت بام ۴ درصد، بررسی شد؛ همچنین تأثیر افزایش مساحت مقطع و افزایش طول تیر همبندی، در هر سه ارتفاع، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از ورق موجدار قائم و افقی موجب کاهش حداکثر برش پایه، درجه همبندی و جذب انرژی می‌شود. ضریب رفتار و نسبت شکل‌پذیری در نمونه موجدار قائم کاهش و در نمونه موجدار افقی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش طول یا مساحت مقطع تیر همبندی، ظرفیت باربری، ضریب رفتار، نسبت شکل‌پذیری و جذب انرژی کاهش و درجه همبندی در نمونه موجدار قائم کاهش و در نمونه موجدار افقی افزایش می‌یابد. در ضمن درجه همبندی با افزایش تعداد طبقات، هم در حالت ورق صاف و هم موجدار افزایش می‌یابد.

### ۱- مقدمه

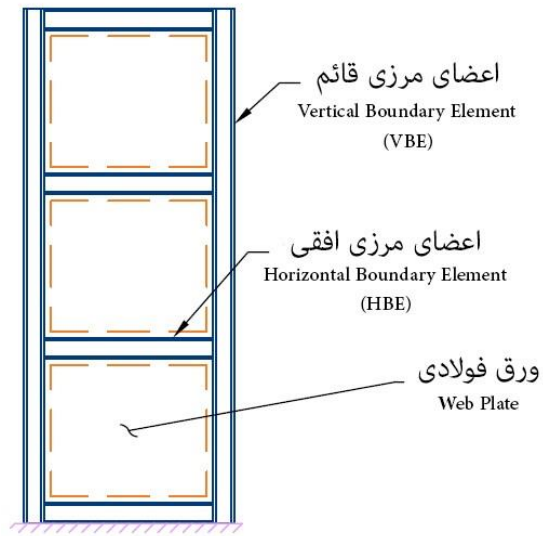
کششی قطری ناشی از جاری شدن ورق‌های فولادی و تشکیل مفاصل پلاستیک در انتهای تیرها است، همچنین این نوع سیستم نقش اساسی در مقاومت و پایداری سازه در برابر بارهای ثقلی ندارد [۱].

یکی از معایب دیوارهای برشی فولادی محدودیت در ایجاد بازشو در دهانه خود است؛ بنابراین معمولاً این سیستم در اطراف هسته مرکزی ساختمان، که عموماً شامل آسانسور و راه پله است، جایگذاری می‌شود تا از لحاظ معماری ایجاد محدودیت نکند. به دلیل محدودیت‌های طراحی موجود در آیین‌نامه‌ها گاهی امکان ایجاد دهانه‌های بزرگ مقدور نیست، که در این حالت می‌توان از دیوار برشی فولادی همبند، به عنوان راه حلی برای رفع این مشکل، استفاده کرد. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود دیوار برشی فولادی همبند شامل دو دیوار برشی مجزا است که توسط تیر همبندی به یکدیگر متصل می‌شوند. این سیستم شامل دو نوع اعضای مرزی قائم است؛ اعضای مرزی قائم خارجی (ستون‌های خارجی) که متصل به تیرها و ورق‌های فولادی هستند و اعضای مرزی قائم داخلی (ستون‌های

از سال ۱۹۰۸ و همزمان با زلزله مسینا در ایتالیا که منجر به مرگ ۸۳۰۰۰ نفر شد، جامعه مهندسی سازه به استفاده از ظرفیت ناحیه غیرالاستیک اعضای سازه‌ای برای استهلاک هر چه بیشتر انرژی روی آوردند؛ از آن زمان این مفهوم به یک پایه و اساس برای طراحی لرزه‌ای تبدیل شد و همچنان آیین‌نامه‌های ساختمانی امروزی از آن استفاده می‌کنند. این امر اجازه می‌دهد تا سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی لرزه‌ای برای نیاز کمتری در مقایسه با آنچه که از آنالیز الاستیکی دینامیکی به دست می‌آید، طراحی شوند. دیوارهای برشی فولادی سیستم‌های باربر جانبی نسبتاً جدیدی هستند، شامل یک قاب فولادی که یک ورق فولادی در هر طبقه بین اعضای مرزی افقی (تیرها) و اعضای مرزی قائم (ستون‌ها) متصل شده است؛ نمای کلی دیوار برشی در شکل ۱ قابل مشاهده است. در این نوع سیستم، فرایند جذب انرژی به صورت ترکیبی از گسیختگی در میدان

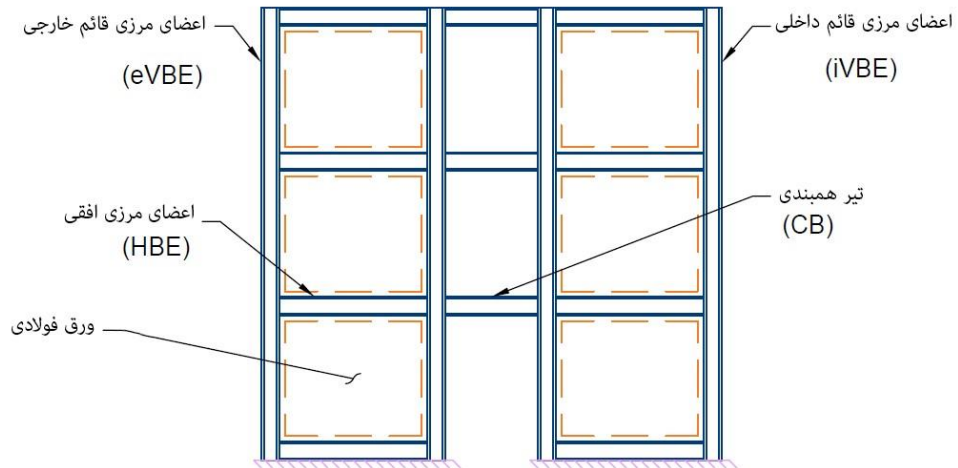
\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: f-emami@srbiau.ac.ir





شکل ۱. اعضای تشکیل دهنده دیوار برشی فولادی [۱]

Fig. 1. Diagram of Steel Plate Shear Wall



شکل ۲. دیوار برشی فولادی همبند [۱]

Fig. 2. PDiagram of Coupled Steel Plate Shear Wall

پرداختند. آن‌ها با ایده استفاده از مقاومت پسا-کمانش ورق‌های فولادی نازک، یک سازه تک دهانه سه طبقه فولادی با دیوارهای برشی فولادی نازک سخت نشده، که با استفاده از جوش به اعضای پیرامونی متصل شده بود را تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد آزمایش قرار دادند. نتایج آزمایش نشان داد که استفاده از دیوار برشی فولادی با صفحات فولادی نازک برای مقاومت در برابر بارهای لرزه‌ای امکان‌پذیر است. همچنین استفاده از یک دیوار برشی فولادی نازک سخت نشده در قاب‌های فولادی باعث افزایش سختی سیستم، ظرفیت باربری و جذب انرژی می‌شود [۸].

در سال ۲۰۰۴ اولین بررسی آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی همبند توسط آستانه و ژائو<sup>۶</sup> صورت گرفت. سیستم مقاوم نمونه مورد مطالعه در یک جهت دیوار برشی فولادی همبند و در جهت دیگر سیستم قاب مهاربندی شده فولادی بود. در این پروژه نمونه‌ها به اندازه نصف نمونه واقعی ساخته شده بودند و برای آزمایش تحت بارگذاری چرخه‌ای یک نمونه دو طبقه و یک نمونه سه طبقه با نسبت دهانه به ارتفاع متفاوت در نظر گرفته شده بود. نتایج نشان دادند هر دو نمونه دارای رفتار کاملاً شکل‌پذیری بودند و توانستند تعداد چرخه‌های زیادی را در حالت پلاستیک تحمل کنند. همچنین رفتار کلی دیوار برشی فولادی خیلی نزدیک به رفتار تیر ورق‌ها تحت برش می‌باشد. در هر دو مورد شکست در سیستم تقریباً در قسمت تیر همبند بالایی اتفاق افتاد؛ همچنین اعضای که بارهای ثقیلی را تحمل می‌کردند تقریباً در حالت الاستیک باقی ماندند و اعضای تحمل‌کننده بارهای جانبی، تسلیم شده و در جذب انرژی مشارکت داشتند [۹].

صبوری و قلهکی در سال ۲۰۰۸ دو نمونه دیوار برشی فولادی سه طبقه با ورق‌های جان نازک را، تحت بارگذاری چرخه‌ای، مورد بررسی آزمایشگاهی قرار دادند و دریافتند که نوع اتصال اعضای پیرامونی دیوار برشی فولادی، بر میزان مقاومت، ضریب شکل‌پذیری و جذب انرژی موثر است [۱۰].

بورلو<sup>۷</sup> و فاهنستوک در سال ۲۰۱۱ طی بررسی چند سازه ۶ طبقه یک روش طراحی اولیه بر اساس ظرفیت برای دیوارهای برشی فولادی همبند معرفی کردند. در این روش فرض می‌شود صفحه فولادی پیش از ورود سایر اعضا به ناحیه تغییر شکل‌های پلاستیک کاملاً تسلیم شده باشد که در این حالت المان‌های قاب اطراف صفحه فولادی بر اساس ظرفیت نهایی این صفحه طراحی می‌شوند. در این حالت مقطع تیر و ستون‌های قاب پیرامونی در برابر بارهای جانبی مقاومت بالایی داشته و در محدوده الاستیک باقی می‌مانند. پس از محاسبه سهم قاب پیرامونی از برش طبقه با یک تحلیل

داخلی که علاوه بر تیرها و ورق‌های فولادی به تیرهای همبندی نیز متصل هستند، که با توجه به ظرفیت طراحی متفاوت این دو المان، عموماً از مقاطع یکسان در طراحی استفاده نمی‌شود. دیوار برشی فولادی همبند مزایای دیوار برشی معمولی نظیر رفتار چرخه‌ای پایدار، شکل‌پذیری مناسب و قابلیت جذب انرژی بالا را دارا است [۱].

در کشور ژاپن کمانش المان‌های سیستم مقاوم جانبی مجاز نیست، بنابراین دیوارهای برشی فولادی عموماً به همراه سخت‌کننده‌هایی در جان ورق فولادی ساخته می‌شوند. دیوارهای برشی سخت شده، سختی و مقاومت تقریباً برابری با دیوارهای برشی سخت نشده دارند و در عین حال باعث افزایش هزینه ساخت و ضخامت دیوارها می‌شوند [۲]. به همین علت و با توجه به نتایج مطالعات پیشین پیرامون دیوار برشی فولادی با ورق‌های نازک، مانند پژوهش واگنر<sup>۱</sup> در سال ۱۹۳۱ [۳] و باسلر<sup>۲</sup> در سال ۱۹۶۱، [۴] در آمریکا دیوارهای برشی سخت نشده به عنوان پایه سیستم‌های دیوار برشی ویژه در نظر گرفته شده است [۵ و ۶]. یکی از راه‌های مقاوم‌سازی این دیوارها بهبود رفتار کمانشی آن‌ها با استفاده از سخت‌کننده‌ها می‌باشد اما از آنجا که هزینه ساخت پانل‌های سخت شده زیاد است و افزایش وزن سازه را به دنبال دارد، ورق‌های برشی موجدار به عنوان جایگزینی مناسب پیشنهاد شده‌اند. این نوع ورق‌ها با بهره‌گیری از سختی برون صفحه‌ای ناشی از هندسه موج‌های ورق دارای مقاومت کمانشی بیشتری نسبت به ورق سخت نشده یا ورق صاف هستند و عملکردی مشابه ورق‌های فولادی با سخت‌کننده دارند. اولین مطالعه پیرامون رفتار چرخه‌ای غیرالاستیک دیوار برشی فولادی سخت نشده توسط ترومپوش<sup>۳</sup> و کولاک<sup>۴</sup> در سال ۱۹۸۷ صورت گرفت. یک نمونه یک طبقه و تک دهانه تحت ۲۸ چرخه بارگذاری قرار گرفت. آن‌ها یک مدل تحلیلی رفتاری برای توضیح رفتار چرخه‌ای دیوار برشی فولادی ارائه دادند که کاملاً با آزمایش چرخه‌ای همخوانی داشت. مدل پیشنهادی رفتار چرخه‌ای ترکیب با مدل نواری، به خوبی رفتار چرخه‌ای را پیش‌بینی می‌کرد. آن‌ها همچنین دریافتند که اتصال گیردار تیر و ستون به صورت موثری میزان جذب انرژی کلی سیستم را افزایش می‌دهد [۷].

تا سال ۱۹۹۳ استفاده از صفحات فولادی ضخیم در ساخت دیوارهای برشی فولادی رواج داشت. کیسیس<sup>۵</sup> و همکاران در سال ۱۹۹۳ به بررسی آزمایشگاهی استفاده از صفحات نازک فولادی در دیوارهای برشی فولادی

- 1 Wagner
- 2 Basler
- 3 Tromposch
- 4 Kulak
- 5 Caccese

6 Zhao

7 Borello

زاویه موج، خرابی دیوار تا پاره شدن ورق گسترش می‌یابد. همچنین در مراحل اولیه بارگذاری نمونه با زاویه موج بزرگ‌تر مقاومت بیشتری نشان داد اما بعد از ایجاد شکست در ورق فولادی، افت مقاومت شدیدی مشاهده شد. با افزایش زاویه موج تا ۶۰ درجه، مقاومت نهایی حدود ۳۷٪ افت کرد. همچنین با افزایش زاویه موج‌ها از ۳۰ به ۶۰ درجه، مقاومت الاستیک ۲۰ درصد و جذب انرژی ۲۲/۳ درصد کاهش یافت [۱۴].

بورلو و فاهنستوک<sup>۱</sup> در سال ۲۰۱۷ دو نمونه دیوار برشی فولادی همبند ۳ طبقه را، تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد آزمایش قرار دادند. یکی از نمونه‌ها دارای تسلیم خمشی و دیگری نیمه خمشی - برشی بود. نتایج نشان داد که هر دو نمونه به دررفت جانبی ۴٪ رسیدند و کارایی بسیار مناسبی را از خود نشان دادند. در هر دو نمونه سختی داخلی زیاد، شکل‌پذیری مناسب و جذب انرژی بالا مشاهده شد. همچنین دریافتند که در نمونه با تیر همبندی قوی‌تر می‌توان از اعضای سبک‌تری استفاده کرد که به بهبود جزئی در مقاومت، سختی و جذب انرژی منجر می‌شود. همچنین خرابی هر دو نمونه زمانی رخ داد که ستون‌ها در محل اتصال به کف دچار شکست شدند. همچنین تیرها با تسلیم خمشی در انتهای خود تشکیل مفصل پلاستیک دادند و در جذب انرژی شرکت داشتند [۱۵].

شایانفر و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بررسی تاثیر استفاده از مهاربازویی در دیوار برشی فولادی همبند برای کنترل جابجایی‌ها در سازه‌های بلند پرداختند. نتایج نشان داد که محل مهاربازویی نسبت به صلبیت آن از اهمیت بیشتری برخوردار است به نحوی که ماکزیمم عملکرد زمانی است که در ارتفاع میانه سازه قرار بگیرد [۱۶]. با بررسی مطالعات انجام شده پیشین، نیاز به ارزیابی بیشتر در زمینه تاثیر استفاده از ورق‌های فولادی موجدار دوزنقه‌ای در دیوار برشی فولادی همبند و تاثیر عملکرد تیر پیوند احساس می‌گردد، بنابراین در این پژوهش، نمونه‌هایی از دیوار برشی فولادی همبند ۳، ۶ و ۱۲ طبقه که نمادی از ساختمان‌های کوتاه و میان مرتبه هستند در نرم‌افزار آباکوس<sup>۲</sup> مدل شده‌اند و تاثیر استفاده از ورق فولادی موجدار دوزنقه‌ای با موج قائم و افقی در آن‌ها، بر ظرفیت باربری، میزان جذب انرژی، درجه همبندی، ضریب رفتار و نسبت شکل‌پذیری، تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی تا دررفت بام ۴ درصد، بررسی شد؛ همچنین تاثیر عملکرد تیر همبند، در هر سه ارتفاع، مورد ارزیابی قرار گرفت.

خطی، مابقی برش سهم صفحه فولادی است. در دیوارهای برشی همبند، سهم بیشتری توسط قاب پیرامونی تحمل می‌شود؛ در نتیجه صفحات طراحی شده ضخامت کمتری خواهند داشت و به دنبال آن تیرهای طبقات، که باید تحمل کافی برای تحمل میدان کششی صفحات فولادی را داشته باشند، نیز مقاطع سبک‌تری خواهند داشت. با در نظر گرفتن مقاطعی برای تیر طبقات و تیر همبند و با فرض تشکیل مفاصل پلاستیک در سطح مقاومت پلاستیک سیستم و لنگرهای پلاستیک تیرها، برش و لنگر وارده به ستون مشخص شده و مقاطع ستون‌ها نیز مشخص خواهند شد [۱۱].

امامی و همکاران در سال ۲۰۱۳ به بررسی آزمایشگاهی سختی، مقاومت و نسبت شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی در دیوارهای برشی فولادی پرداختند. آن‌ها در این آزمایش ۳ نوع دیوار برشی شامل نمونه دارای ورق صاف، موجدار دوزنقه‌ای عمودی و افقی را تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای بررسی کردند. نتایج آزمایش نشان از سختی خارج از صفحه بالا، مقاومت برشی زیاد و شکل‌پذیری بالا در نمونه‌های موجدار داشت. دیوار برشی فولادی موجدار تا زاویه دررفت ۵ الی ۷٪ توانست باربری خود را ادامه دهد که این میزان برای دیوار صاف ۳ تا ۵٪ بود؛ همچنین میزان جذب انرژی در دیوار برشی فولادی موجدار ۱/۵۲ برابر نمونه سخت نشده بود. مورد مهم دیگر دست یافتن به این اصل بود که می‌توان از روش اندرکنش قاب و صفحه برای طراحی دیوار برشی فولادی موجدار استفاده کرد [۱۲].

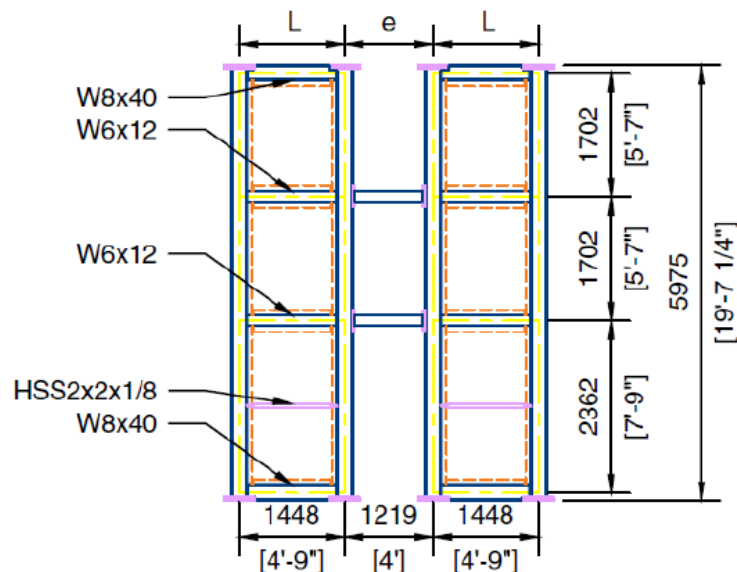
قلهکی و قدکساز در سال ۲۰۱۶ به بررسی عملکرد طول تیر همبند در سیستم دیوار برشی فولادی همبند پرداختند. آن‌ها ۳ دیوار برشی ۳، ۱۰ و ۱۵ طبقه را تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی مورد بررسی قرار دادند و سه طول ۱/۲۵، ۲/۵ و ۳/۷۵ متر را برای طول تیر همبند در نظر گرفتند. نمونه‌ها تحت ۳ زلزله نورتریج، لوما پریتا و طیس آنالیز شدند. نتایج حاکی از آن بود که افزایش طول تیر همبند باعث افزایش پیوند و دررفت سازه و کاهش برش پایه می‌شود. همچنین مشاهده شد که افزایش طول تیر همبند اثرات کاهشی و افزایشی بر درجه همبندی دارد به طوری که با افزایش ارتفاع در سازه‌ها با طول پیوند ۱/۲۵، ۲/۵ و ۳/۷۵ متر درجه همبندی به ترتیب کاهش، افزایش و افزایش می‌یابد. با افزایش طول تیر همبند، در یک سوم میانی ارتفاع سازه‌ها از سازه میان مرتبه به بلندمرتبه، برش افزایش می‌یابد [۱۳].

حسین زاده و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی آزمایشگاهی ۳ نمونه دیوار برشی فولادی موجدار با زاویه‌های موج ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه پرداختند. آن‌ها در این آزمایش دریافتند که در دیوارهای برشی موجدار توسعه میدان کششی، تسلیم دیوار و خرابی‌ها وابسته به هندسه موج می‌باشد که با افزایش

1 Fahnestock

2 Abaqus





شکل ۳. مشخصات کلی دیوار برشی فولادی در آزمایش بورلو [۱۵]

Fig. 3. The General Specifications of Steel Plate Shear Wall in Borrelo's Experiment

## ۲- صحت‌سنجی مدل‌سازی در نرم‌افزار

به منظور صحت‌سنجی مدل‌سازی انجام شده در نرم‌افزار آباکوس، یک نمونه دیوار برشی فولادی همبند ۳ طبقه که توسط بورلو و فاهنستوک در سال ۲۰۱۷ و با مقیاس ۰/۴۳، تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد آزمایش قرار گرفته است [۱۵]، انتخاب و در نرم‌افزار آباکوس مدل شدند. ابعاد و اندازه‌های المان‌های دیوار در شکل ۳ و همچنین مشخصات سخت کننده جان تیر همبندی و اتصال تیر به ستون که از نوع RBS<sup>۱</sup> است، در شکل ۴ قابل مشاهده است. اتصال ستون‌ها به تراز کف از نوع گیردار است و همچنین بارگذاری چرخه‌ای وارده در تراز بام، در شکل ۵ آورده است که با توجه به محدودیت‌های ناشی از جک‌های هیدرولیکی و به منظور جلوگیری از ایجاد ارتباط بین آن‌ها، تیر همبندی تراز بام حذف شده است.

مشخصات مصالح در جدول ۲ آورده شده است. همچنین مدول الاستیسیته برابر با ۲۰۰ گیگاپاسکال و ضریب پواسون برابر ۰/۳ است. مشخصات پلاستیک ورق‌ها مطابق با فولاد A36 و اعضای پیرامونی مطابق با فولاد A992 در نرم‌افزار آباکوس و در بخش مشخصات پلاستیسه تعریف شد [۱۷ و ۱۸].

با وجود اینکه می‌توان برای مدل‌سازی اعضای مرزی از المان Beam استفاده کرد اما برای جلوگیری از وقوع کماتش موضعی در آن‌ها، برای مدل‌سازی ورق و المان‌های مرزی از المان Shell S4R که یک المان ۴ گره‌ای دو انحنایی با انتگرال کاهش یافته است، در مدل‌سازی استفاده گردید. به منظور ساده‌سازی از مدل پلاستیسیته دو خطی با سخت شوندگی کینماتیکی<sup>۲</sup> و تابع فون میسر استفاده شد. نمای کلی مدل در شکل ۵ قابل مشاهده است. شکل ۶ مقایسه نتایج رفتاری نمونه آزمایشگاهی و نمونه مدل‌سازی شده را نشان می‌دهد که میزان خطا در مقدار ماکزیمم آن ۳/۲٪ است. کانتورهای مربوط به تنش فون میسر و کرنش پلاستیک معادل مربوط به انتهای بارگذاری نیز در شکل ۷ آورده شده است.

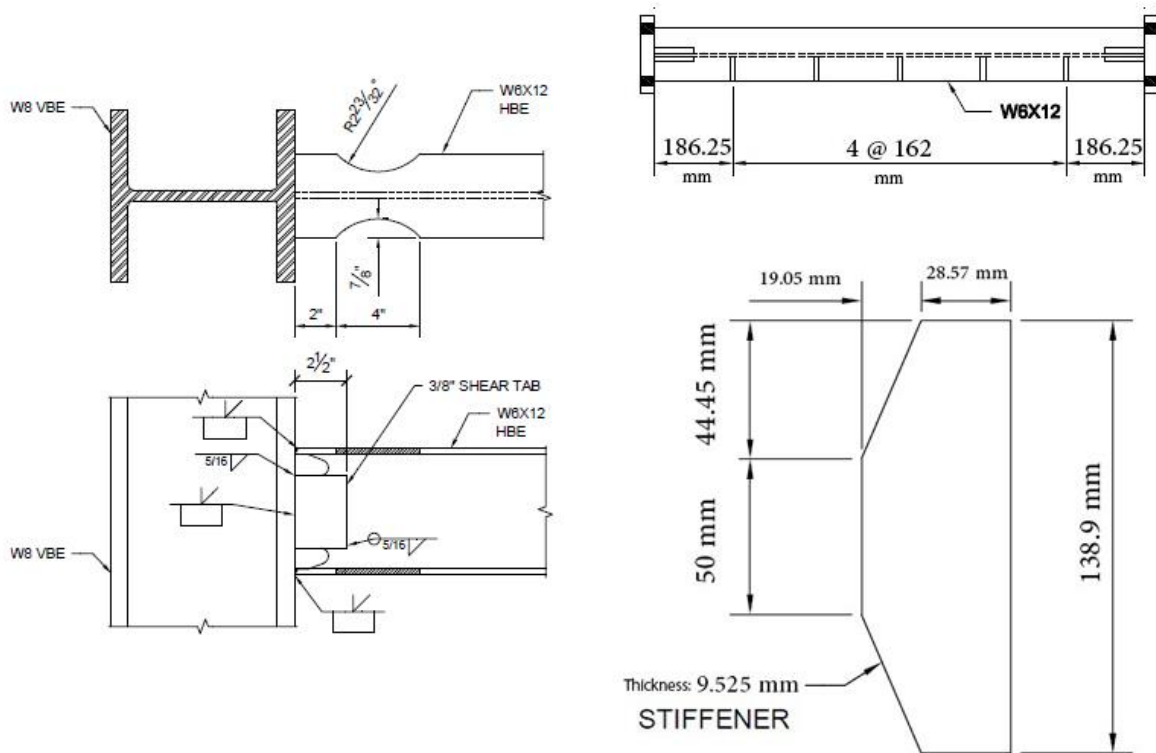
درجه همبندی<sup>۳</sup> مقیاسی ساده برای بیان میزان هماهنگی رفتار بین دو دیوار برشی همبند شده می‌باشد که با استفاده از پژوهش بورلو و فاهنستوک مقدار درجه همبندی طبق رابطه (۱) تعریف می‌شود [۱۱]:

$$DC = \frac{M_{coup}}{M_{coup} + \sum M_{pier}} \quad (1)$$

2 Kinematic

3 DC: Degree of Coupling

1 Reduced Beam Section



شکل ۴. مشخصات سخت کننده جان تیر همبندی و اتصال RBS [۱۵]

Fig. 4. The Specifications of Coupling Beam Stiffener and RBS Details

جدول ۱. بارگذاری چرخه‌ای مورد استفاده در آزمایش بورلو [۱۵]

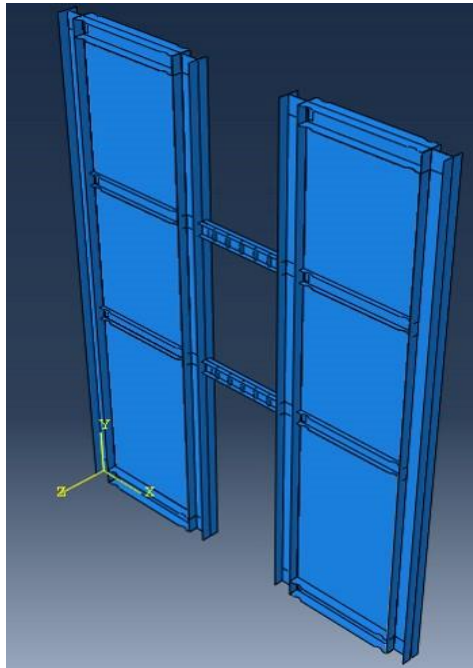
Table 1. Cyclic Load From Borrelo's Experiment

Drift Level	# of Cycles
0.1%	2
0.25%	2
0.5%	2
1.0%	2
1.5%	2
2.0%	2
2.5%	2
3.0%	2
3.5%	2
4.0%	2

جدول ۲. مشخصات مصالح مدل صحت‌سنجی ۳ طبقه [۱۵]

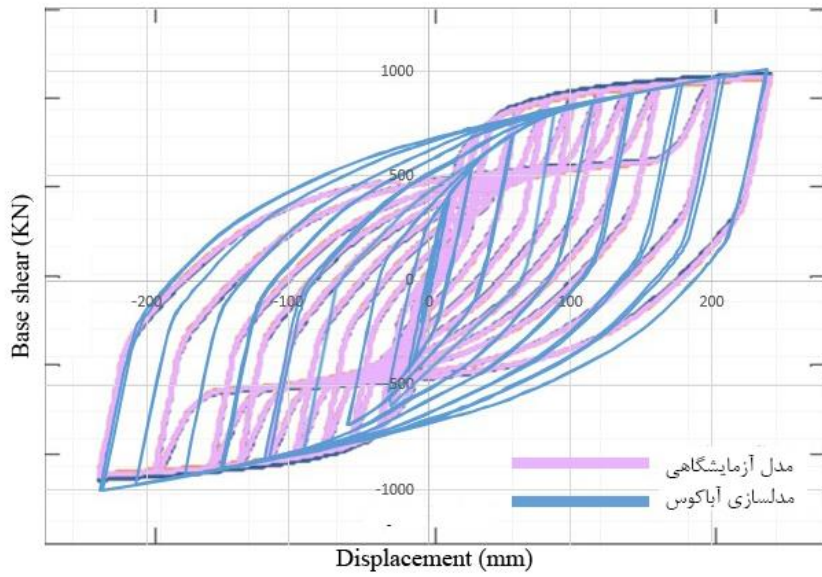
Table 2. The Specifications of the 3-Story Validation Model Materials

المان	تنش تسلیم (مگاپاسکال)		تنش نهایی (مگاپاسکال)	
	جان	بال	جان	بال
W6×12	۳۷۴	۳۵۶	۴۷۸	۴۶۷
W8×40	۴۲۵	۳۶۲	۵۱۶	۵۰۱
W8×48	۳۸۲	۳۴۶	۴۹۱	۴۷۷
W8×58	۳۷۱	۳۳۰	۴۹۹	۴۸۵
ورق فولادی	۱۸۹		۳۳۰	



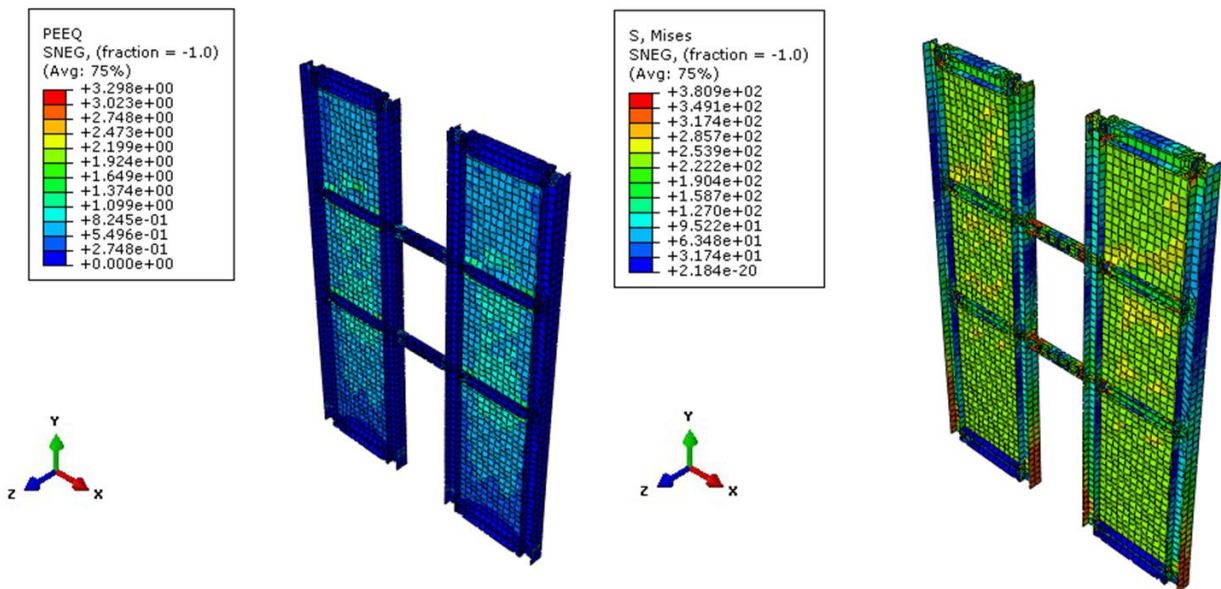
شکل ۵. نمای کلی مدل صحت‌سنجی ۳ طبقه

Fig. 5. Overview of the 3-Story Validation Model



شکل ۶. مقایسه نتایج عددی حاصل از مدل‌سازی در آباکوس با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده توسط بورلو

Fig. 6. The Comparison Numerical Results from the Modeling in ABAQUS and Experimental Results Provided by Borrelo



شکل ۷. الف) کانتور تنش فون میسز ب) کرنش پلاستیک معادل

Fig. 7. a) Von Mises b) PEEQ

جدول ۳. درجه همبندی حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی [۱۵]

Table 3. Degree of Coupling Resulting from Numerical and Experimental Analysis

نمونه	درجه همبندی
آزمایشگاهی	۰/۵
عددی	۰/۵۰۳

با توجه به اینکه مدل ۳ طبقه ساخته شده در آزمایش بورلو با مقیاس ۰/۴۳ است، مدل‌های ۶ و ۱۲ طبقه نیز، به منظور یکسان بودن مقیاس مدل‌ها، با مقیاس ۰/۴۳ نسبت به طراحی، مدل‌سازی شدند. در تمامی مدل‌ها برای ورق‌های فولادی از فولاد A36 و برای سایر اعضا از فولاد A992 استفاده شده است. همچنین تیر همبند تراز بام که در مدل آزمایشگاهی، به علت محدودیت‌های ناشی از جک هیدرولیکی، حذف شده بود در همه مدل‌های آباکوس، مطابق با مشخصات طراحی اولیه، مدل شده است. در مورد عملکرد تیر همبند به مانند تیر پیوند در مهاربندهای واگرا، طبق آیین نامه AISC اگر طول تیر همبند کمتر از ۱/۶ برابر  $M_p/V_p$  باشد، تیر همبند رفتار برشی خواهد داشت و چنانچه طول تیر همبند بزرگ‌تر از ۲/۶ برابر  $M_p/V_p$  باشد رفتار تیر همبند خمشی خواهد بود و برای حالتی که طول تیر همبند بین این دو مقدار باشد، رفتار تیر همبند خمشی - برشی خواهد بود [۵] که در آن  $M_p$  بیانگر لنگر خمشی پلاستیک تیر همبند و  $V_p$  نیروی برشی پلاستیک می‌باشد. بر این اساس مدل اولیه دارای عملکرد خمشی - برشی است و برای بررسی عملکرد خمشی تیر همبند، ۲ مدل با طول پیوند افزایش یافته مدل‌سازی و بررسی شدند. همچنین برای بررسی عملکرد برشی دو نمونه با مقطع تیر همبند متفاوت و با طول پیوند یکسان نسبت به مدل اولیه، در نظر گرفته شد.

در نامگذاری مدل‌ها در جدول ۴، اعداد ابتدایی بیانگر تعداد طبقات، عبارات P و TC به ترتیب بیانگر ورق فولادی صاف<sup>۱</sup> و موجدار دوزنقه‌ای<sup>۲</sup> می‌باشد. همچنین حروف V و H به ترتیب بیانگر عمودی و افقی بودن موج ورق‌های فولادی است. عبارات CL و CB نیز بیانگر طول تیر همبندی و مقطع تیر همبندی است و اعداد بعد از آن بیانگر میزان درصد افزایش آن است.

که در آن  $M_{coup}$  لنگر ناشی از همبندی دو دیوار است که از رابطه (۲) به دست می‌آید و  $M_{pier}$  مجموع لنگر پایه‌های شرقی و غربی می‌باشد [۱۹].

$$M_{coup} = \frac{1}{2}(L + e)[P_{west} - P_{east}] \quad (2)$$

که در آن  $L$  عرض دهانه دیوار،  $e$  طول تیر همبندی می‌باشد.  $P_{east}$  و  $P_{west}$  نیز به ترتیب نیروی محوری عمودی دیوار شرقی و غربی می‌باشد. در جدول ۳ درجه همبندی حاصل از مدل‌سازی در آباکوس و آزمایش بورلو و فاهنستوک آورده شده است. درجه همبندی در طول بارگذاری محاسبه شده و میانگین آن در طول بارگذاری به عنوان درجه همبندی نمونه در نظر گرفته می‌شود [۱۹].

### ۳- فرضیات و مدل‌های مورد مطالعه

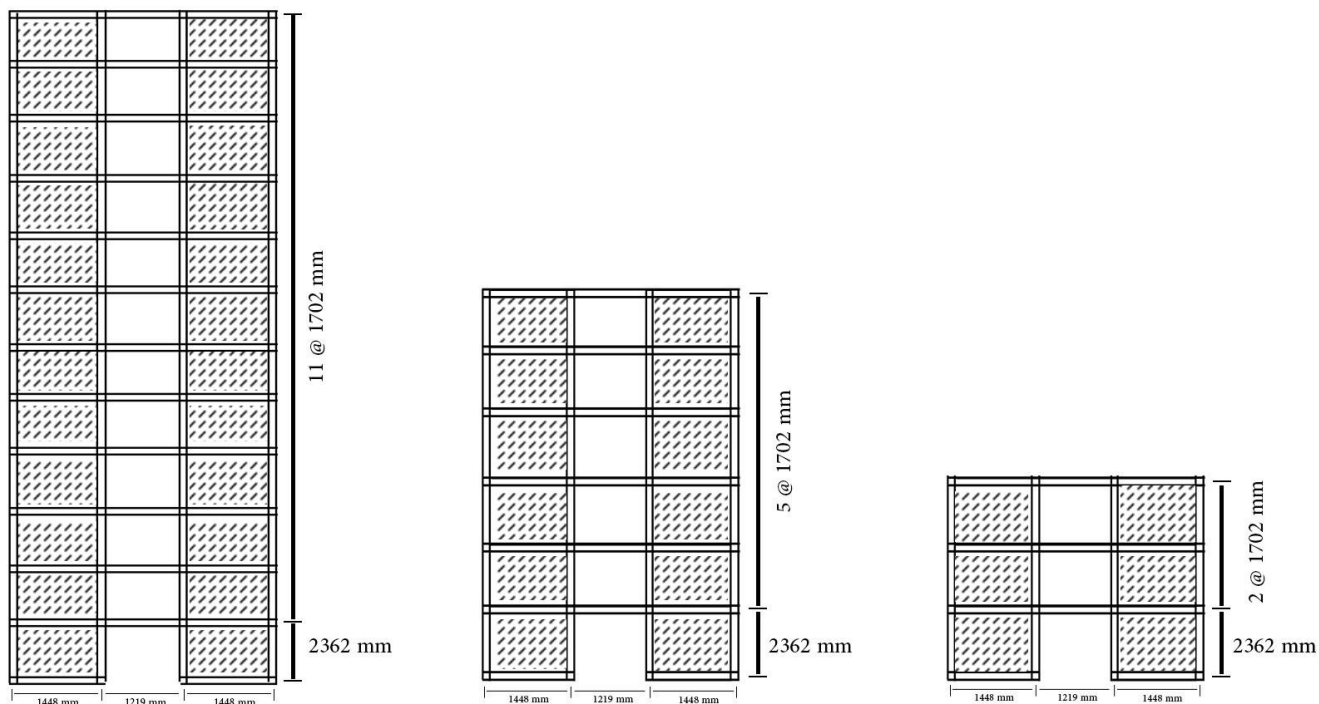
در این پژوهش از مشخصات نمونه ۳ طبقه آزمایش بورلو و همچنین نمونه‌های ۶ و ۱۲ طبقه طراحی شده در تز دکتری بورلو، برای مدل‌سازی نمونه‌ها استفاده شده است. ۹ مدل برای بررسی تاثیر استفاده از ورق‌های موجدار دوزنقه‌ای با موج قائم و افقی، ۶ مدل برای بررسی اثر افزایش طول تیر همبندی و ۶ مدل نیز برای بررسی اثر افزایش مساحت مقطع تیر همبندی مدل‌سازی شدند که مشخصات مدل‌ها در جدول ۴ و شکل ۸ آورده شده است. رفتار مدل‌ها تا دررفت ۴٪ مورد بررسی قرار گرفت که این دررفت هم از نظر AISC 341-16 به عنوان حداقل دررفت قاب‌های خمشی ویژه مطرح شده است [۲۰]. همچنین در پژوهش‌های دیگری حتی تا دررفت ۵٪ رفتار دیوارهای برشی فولادی مورد توجه قرار گرفته است [۲۱ و ۲۲].

1 Planar  
2 Trapezoidally Corrugated

جدول ۴. مشخصات نمونه‌های مدل‌سازی شده در آباکوس مطابق مرجع [۱]

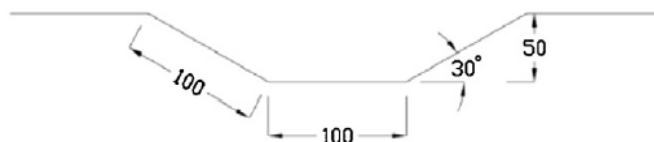
Table 4. The Specifications of the Modelled Samples in ABAQUS

المان مدل	تعداد طبقه	ستون خارجی	ستون داخلی	تیر طبقات	تیر همبندی	عملکرد تیر همبند	ضخامت ورق فولادی (میلی متر)	نوع ورق فولادی
3-P	۳	W8×58	W8×48	W6×12	W6×12	خمشی - برشی	۱/۱۶	صاف
3-TC-V	۳	W8×58	W8×48	W6×12	W6×12	خمشی - برشی	۱/۱۶	موجدار قائم
3-TC-H	۳	W8×58	W8×48	W6×12	W6×12	خمشی - برشی	۱/۱۶	موجدار افقی
6-P	۶	W24×279	W24×229	W18×50	W18×50	خمشی - برشی	۳/۱۷۵	صاف
6-TC-V	۶	W24×279	W24×229	W18×50	W18×50	خمشی - برشی	۳/۱۷۵	موجدار قائم
6-TC-H	۶	W24×279	W24×229	W18×50	W18×50	خمشی - برشی	۳/۱۷۵	موجدار افقی
12-P	۱۲	W36×800	W36×652	W18×86	W18×86	خمشی - برشی	۵/۵۶	صاف
12-TC-V	۱۲	W36×800	W36×652	W18×86	W18×86	خمشی - برشی	۵/۵۶	موجدار قائم
12-TC-H	۱۲	W36×800	W36×652	W18×86	W18×86	خمشی - برشی	۵/۵۶	موجدار افقی
3-CL10	۳	W8×58	W8×48	W6×12	W6×12	خمشی	۱/۱۶	صاف
3-CL20	۳	W8×58	W8×48	W6×12	W6×12	خمشی	۱/۱۶	صاف
6-CL10	۶	W24×279	W24×229	W18×50	W18×50	خمشی	۳/۱۷۵	صاف
6-CL20	۶	W24×279	W24×229	W18×50	W18×50	خمشی	۳/۱۷۵	صاف
12-CL10	۱۲	W36×800	W36×652	W18×86	W18×86	خمشی	۵/۵۶	صاف
12-CL20	۱۲	W36×800	W36×652	W18×86	W18×86	خمشی	۵/۵۶	صاف
3-CB25	۳	W8×58	W8×48	W6×12	W6×15	خمشی - برشی	۱/۱۶	صاف
3-CB65	۳	W8×58	W8×48	W6×12	W6×20	برشی	۱/۱۶	صاف
6-CB25	۶	W24×279	W24×229	W18×50	W18×50	خمشی - برشی	۳/۱۷۵	صاف
6-CB65	۶	W24×279	W24×229	W18×50	W18×50	برشی	۳/۱۷۵	صاف
12-CB25	۱۲	W36×800	W36×652	W18×86	W18×86	خمشی - برشی	۵/۵۶	صاف
12-CB65	۱۲	W36×800	W36×652	W18×86	W18×86	برشی	۵/۵۶	صاف



شکل ۸. ابعاد نمونه‌های ۳، ۶ و ۱۲ طبقه [۱۵]

Fig. 8. Dimensions of the 3, 6 and 12 Story Samples



شکل ۹. مشخصات موج دوزنقه‌ای ورق فولادی [۱۲]

Fig. 9. Geometric properties of trapezoidally corrugated plate

ارزیابی و مقایسه عملکرد نمونه‌های مورد مطالعه پرداخته می‌شود.

#### ۴-۱- برش پایه

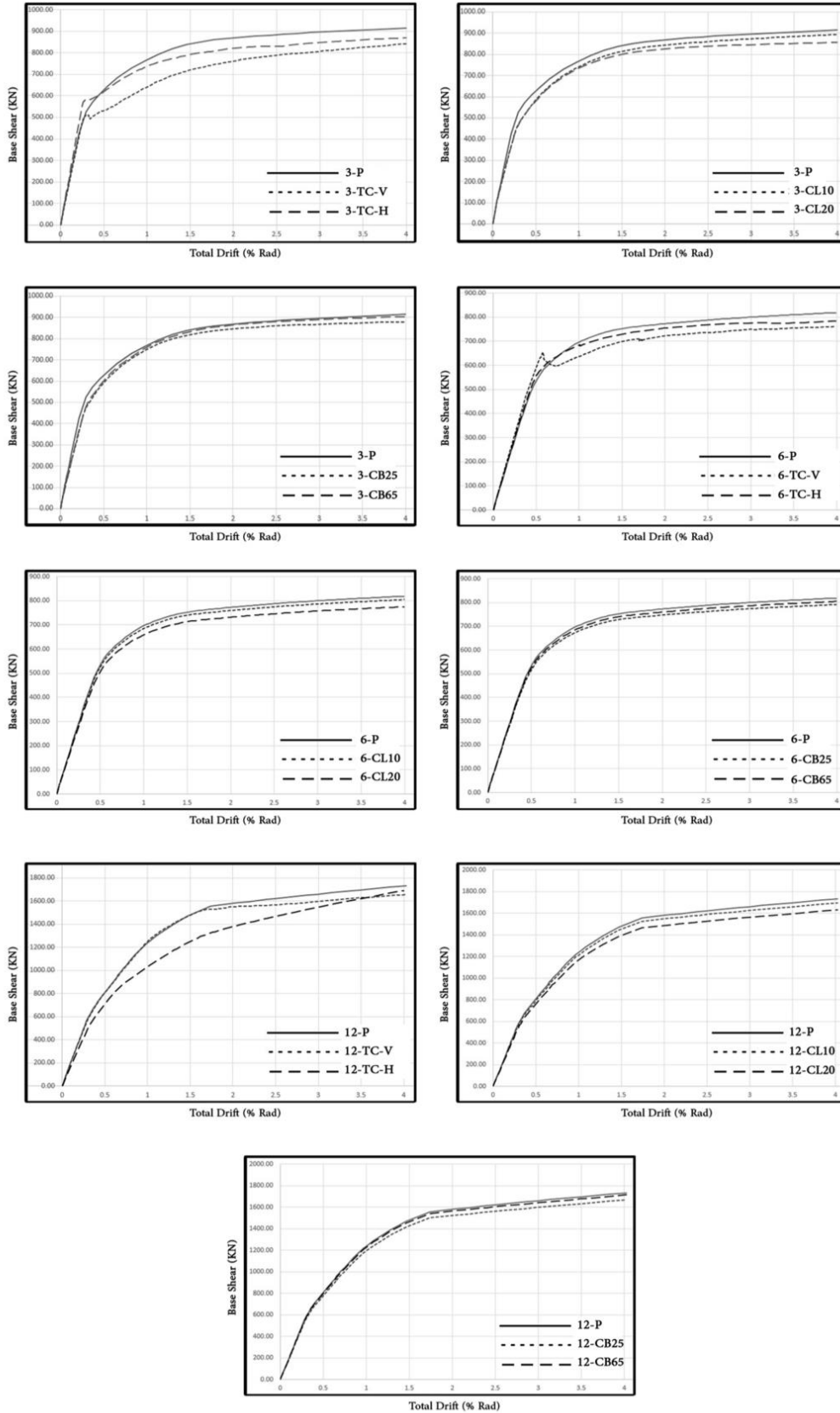
شکل ۱۰ نمودار برش پایه نمونه‌ها تحت تحلیل بارافزون تا دریفت ۴ درصد را نشان می‌دهد. همچنین جدول ۵ شامل مقدار حداکثر برش پایه نمونه‌ها است.

همانطور که مشاهده می‌شود، در مدل ۳ طبقه با تغییر ورق فولادی از ساده به موجدار قائم و موجدار افقی، مقدار حداکثر برش پایه به ترتیب ۷/۹٪ و ۴/۹٪ کاهش می‌یابد. با افزایش طول تیر همبندی به مقدار ۱۰٪ و ۲۰٪

سایر مشخصات مانند اتصال تیر و ستون، سخت کننده تیر همبندی و شرایط مرزی مانند مدل صحت‌سنجی می‌باشد. همچنین برای هندسه موج ورق فولادی از هندسه دوزنقه‌ای استفاده شده در مدل آزمایشگاهی امامی و همکاران استفاده شده است که مشخصات آن در شکل ۹ آورده شده است. [۱۲]

#### ۴- نتایج و بحث

در این بخش با استفاده از نتایج حاصل از تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی که تحت اثر جابجایی‌های افزایشی کنترل شده صورت گرفته است، به



شکل ۱۰. منحنی برش پایه به دریفت نمونه‌ها تحت تحلیل بارافزون

Fig. 10. Base Shear Curve to Total Drift of the Samples from Pushover Analysis



جدول ۵. مقدار حداکثر برش پایه نمونه‌ها حاصل از تحلیل بارافزون

Table 5. The Maximum Base Shear Value of the Samples Resulting from Pushover Analysis

نمونه	3-P	3-TC-V	3-TC-H	3-CL10	3-CL20	3-CB25	3-CB65
حداکثر برش پایه (KN)	۹۱۴	۸۴۲	۸۶۹	۸۹۳	۸۵۶	۸۷۹	۹۰۳
نمونه	6-P	6-TC-V	6-TC-H	6-CL10	6-CL20	6-CB25	6-CB65
حداکثر برش پایه (KN)	۸۱۸	۷۶۱	۷۸۳	۸۰۴	۷۷۵	۷۹۱	۸۰۴
نمونه	12-P	12-TC-V	12-TC-H	12-CL10	12-CL20	12-CB25	12-CB65
حداکثر برش پایه (KN)	۱۷۳۱	۱۶۵۶	۱۶۸۹	۱۶۹۵	۱۶۳۹	۱۶۶۷	۱۷۱۲

عبارت دیگر مقدار حداکثر برش پایه در نمونه با ۲۵٪ افزایش مساحت مقطع تیر همبند، کاهش بیشتری نسبت به نمونه با ۶۵٪ افزایش مساحت مقطع تیر همبند دارد.

۴-۲- جذب انرژی

جذب انرژی در سیستم‌های باربر جانبی از اهمیت بالایی برخوردار است. همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، در مدل ۳ طبقه با تغییر ورق فولادی از ساده به موجدار قائم و موجدار افقی، مقدار جذب انرژی به ترتیب ۱۴/۶٪ و ۷/۲٪ کاهش می‌یابد. با افزایش طول تیر همبندی به میزان ۱۰٪ و ۲۰٪ میزان جذب انرژی به ترتیب ۴/۲٪ و ۶٪ کاهش یافت و همچنین با افزایش مساحت مقطع تیر همبندی به مقدار ۲۵٪ و ۶۵٪ مقدار جذب انرژی به ترتیب ۴/۲٪ و ۲/۴٪ کاهش می‌یابد.

در مدل ۶ طبقه با تغییر ورق فولادی از ساده به موجدار قائم و موجدار افقی، مقدار جذب انرژی به ترتیب ۶/۸٪ و ۴/۵٪ کاهش می‌یابد. با افزایش طول تیر همبندی به مقدار ۱۰٪ و ۲۰٪ مقدار جذب انرژی به ترتیب ۲/۶٪ و ۴/۱٪ کاهش یافت و همچنین با افزایش مساحت مقطع تیر همبندی به مقدار ۲۵٪ و ۶۵٪ مقدار جذب انرژی به ترتیب ۳/۴٪ و ۱/۵٪ کاهش می‌یابد.

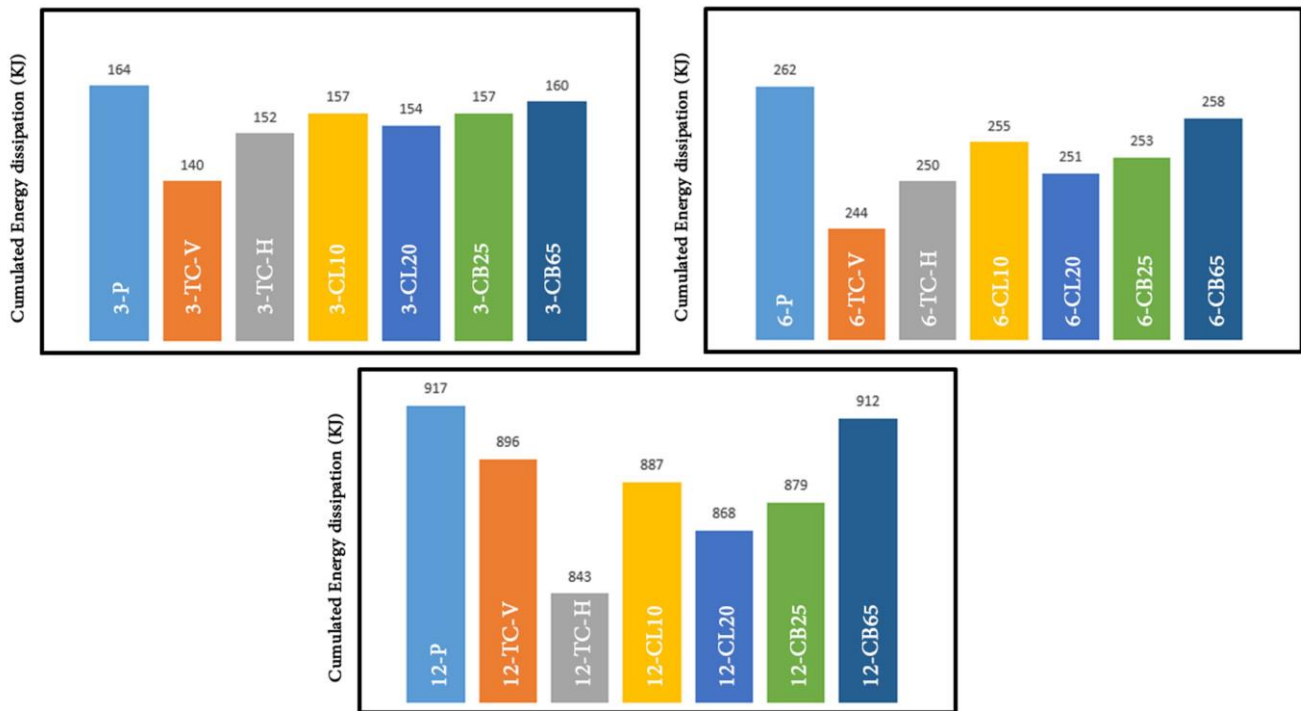
در مدل ۱۲ طبقه با تغییر ورق فولادی از ساده به موجدار قائم و موجدار افقی، مقدار جذب انرژی به ترتیب ۲/۲٪ و ۰/۸٪ کاهش می‌یابد. با افزایش

مقدار حداکثر برش پایه به ترتیب ۲/۲٪ و ۶/۳٪ کاهش یافت و همچنین با افزایش مساحت مقطع تیر همبندی به میزان ۲۵٪ و ۶۵٪ مقدار حداکثر برش پایه به ترتیب ۳/۸٪ و ۱/۲٪ کاهش می‌یابد.

در مدل ۶ طبقه با تغییر ورق فولادی از ساده به موجدار قائم و موجدار افقی، مقدار حداکثر برش پایه به ترتیب ۶/۹٪ و ۴/۲٪ کاهش می‌یابد. با افزایش طول تیر همبندی به مقدار ۱۰٪ و ۲۰٪ مقدار حداکثر برش پایه به ترتیب ۱/۷٪ و ۵/۲٪ کاهش یافت و همچنین با افزایش مساحت مقطع تیر همبندی به مقدار ۲۵٪ و ۶۵٪ مقدار حداکثر برش پایه به ترتیب ۳/۳٪ و ۱/۷٪ کاهش می‌یابد.

در مدل ۱۲ طبقه با تغییر ورق فولادی از ساده به موجدار قائم و موجدار افقی، مقدار حداکثر برش پایه به ترتیب ۴/۳٪ و ۲/۵٪ کاهش می‌یابد. با افزایش طول تیر همبندی به مقدار ۱۰٪ و ۲۰٪ مقدار حداکثر برش پایه به ترتیب ۲٪ و ۵/۸٪ کاهش یافت و همچنین با افزایش مساحت مقطع تیر همبندی به مقدار ۲۵٪ و ۶۵٪ مقدار حداکثر برش پایه به ترتیب ۳/۶٪ و ۱٪ کاهش می‌یابد.

نتایج فوق نشان می‌دهد با تغییر ورق فولادی از ساده به موجدار قائم و موجدار افقی، مقدار حداکثر برش پایه کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش طول تیر همبندی نیز مقدار حداکثر برش پایه، کاهش می‌یابد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش مساحت مقطع تیر همبند در نمونه ۳، ۶ و ۱۲ طبقه، در مقدار کاهش حداکثر برش پایه، روند کاهشی مشاهده می‌شود؛ به



شکل ۱۱. نمودار جذب انرژی نمونه‌ها تحت آنالیز بارافزون

Fig. 11. The Diagram of Energy Absorption of the Samples Resulting from Pushover Analysis

طول تیر همبندی به مقدار ۱۰٪ و ۲۰٪ درجه همبندی به ترتیب ۷/۵٪ و ۱۰٪ کاهش یافت و همچنین با افزایش مساحت مقطع تیر همبندی به مقدار ۲۵٪ و ۶۵٪ درجه همبندی به ترتیب ۶/۱٪ و ۱۰/۳٪ افزایش می‌یابد. در مدل ۱۲ طبقه با تغییر ورق فولادی از ساده به موجدار قائم و موجدار افقی، درجه همبندی به ترتیب ۴۶/۹٪ و ۹/۱٪ کاهش می‌یابد. با افزایش طول تیر همبندی به مقدار ۱۰٪ و ۲۰٪ درجه همبندی به ترتیب ۷٪ و ۹/۴٪ کاهش یافت و همچنین با افزایش مساحت مقطع تیر همبندی به مقدار ۲۵٪ و ۶۵٪ درجه همبندی به ترتیب ۱/۳٪ و ۳/۳٪ افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شود در دیوار برشی فولادی با ورق جان ساده، با افزایش تعداد طبقات از ۳ به ۶ و ۱۲، درجه همبندی به ترتیب ۱۴٪ و ۳۸/۷٪ افزایش می‌یابد. همچنین در نمونه با ورق جان موجدار قائم، با افزایش تعداد طبقات از ۳ به ۶ و ۱۲، درجه همبندی به ترتیب ۷/۲٪ و ۲۳/۹٪ افزایش می‌یابد. در نمونه با ورق جان موجدار افقی نیز، با افزایش تعداد طبقات از ۳ به ۶ و ۱۲، درجه همبندی به ترتیب ۷/۶٪ و ۲۸/۶٪ افزایش می‌یابد.

طول تیر همبندی به مقدار ۱۰٪ و ۲۰٪ مقدار جذب انرژی به ترتیب ۳/۲٪ و ۵/۳٪ کاهش یافت و همچنین با افزایش مساحت مقطع تیر همبندی به مقدار ۲۵٪ و ۶۵٪ مقدار جذب انرژی به ترتیب ۴/۱٪ و ۰/۵٪ کاهش می‌یابد.

#### ۳-۴- درجه همبندی

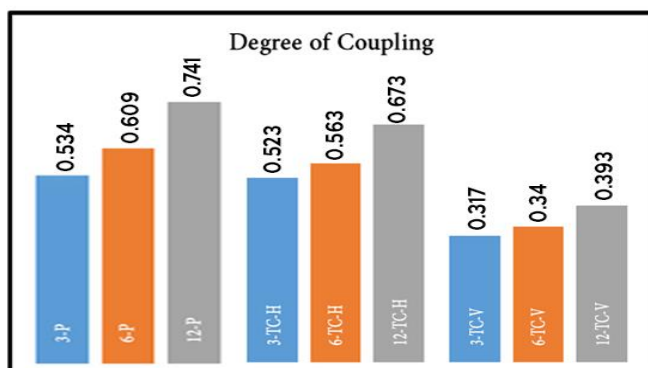
مقادیر درجه همبندی نمونه‌ها بر اساس رابطه (۱)، در جدول ۶ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در مدل ۳ طبقه با تغییر ورق فولادی از ساده به موجدار قائم و موجدار افقی، درجه همبندی به ترتیب ۴۰/۶٪ و ۲٪ کاهش می‌یابد. با افزایش طول تیر همبندی به مقدار ۱۰٪ و ۲۰٪ درجه همبندی به ترتیب ۱۳/۸٪ و ۱۹/۸٪ کاهش یافت و همچنین با افزایش مساحت مقطع تیر همبندی به مقدار ۲۵٪ و ۶۵٪ درجه همبندی به ترتیب ۴/۸٪ و ۱۰/۴٪ افزایش می‌یابد.

در مدل ۶ طبقه با تغییر ورق فولادی از ساده به موجدار قائم و موجدار افقی، درجه همبندی به ترتیب ۴۴/۱٪ و ۷/۵٪ کاهش می‌یابد. با افزایش

جدول ۶. درجه همبندی نمونه‌ها حاصل از تحلیل بارافزون

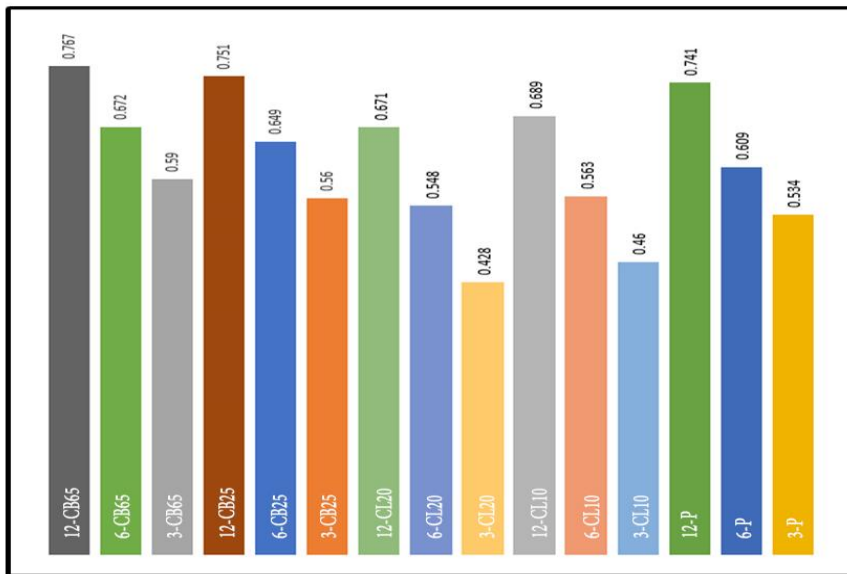
Table 6. Degree of Coupling of the Samples Resulting from Pushover Analysis

نمونه	3-P	3-TC-V	3-TC-H	3-CL10	3-CL20	3-CB25	3-CB65
درجه همبندی	۰/۵۳۴	۰/۳۱۷	۰/۵۲۳	۰/۴۶۰	۰/۴۲۸	۰/۵۶۰	۰/۵۹۰
نمونه	6-P	6-TC-V	6-TC-H	6-CL10	6-CL20	6-CB25	6-CB65
درجه همبندی	۰/۶۰۹	۰/۳۴۰	۰/۵۶۳	۰/۵۶۳	۰/۵۴۸	۰/۶۴۹	۰/۶۷۲
نمونه	12-P	12-TC-V	12-TC-H	12-CL10	12-CL20	12-CB25	12-CB65
درجه همبندی	۰/۷۴۱	۰/۳۹۳	۰/۶۷۳	۰/۶۸۹	۰/۶۷۱	۰/۷۵۱	۰/۷۶۷



شکل ۱۲. نمودار استخراج شده از جدول ۶ شامل مقایسه درجه همبندی نمونه‌ها از لحاظ

Fig. 12. The Chart Extracted from Table 6 Which Includes the Comparison of Degree of Coupling of the Samples in term of Height



شکل ۱۳. نمودار استخراج شده از جدول ۶ شامل مقایسه تاثیر ارتفاع بر درجه همبندی نمونه‌ها

Fig. 13. The Chart Extracted from Table 6 Which Includes the Comparison of the Effect of the Height on the Degree of Coupling of the Samples

افزایش طول تیر همبندی به مقدار ۱۰٪ و ۲۰٪ ضریب رفتار به ترتیب ۳/۱٪ و ۱/۸٪ کاهش یافت و همچنین با افزایش مساحت مقطع تیر همبندی به مقدار ۲۵٪ و ۶۵٪ ضریب رفتار به ترتیب ۱٪ و ۴/۱٪ کاهش می‌یابد.

#### ۴-۵- نسبت شکل‌پذیری

مقادیر نسبت شکل‌پذیری در جدول ۸ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در مدل ۳ طبقه با تغییر ورق فولادی از ساده به موجدار قائم و موجدار افقی، نسبت شکل‌پذیری به ترتیب ۱۰/۳٪ کاهش و ۲۳/۷٪ افزایش می‌یابد. با افزایش طول تیر همبندی به مقدار ۱۰٪ و ۲۰٪ نسبت شکل‌پذیری به ترتیب ۷٪ و ۳/۶٪ کاهش یافت و همچنین با افزایش مساحت مقطع تیر همبندی به مقدار ۲۵٪ و ۶۵٪ نسبت شکل‌پذیری به ترتیب ۱/۴٪ و ۶/۸٪ کاهش می‌یابد.

در مدل ۶ طبقه با تغییر ورق فولادی از ساده به موجدار قائم و موجدار افقی، نسبت شکل‌پذیری به ترتیب ۱۴/۹٪ کاهش و ۲۲/۵٪ افزایش می‌یابد. با افزایش طول تیر همبندی به مقدار ۱۰٪ و ۲۰٪ نسبت شکل‌پذیری به ترتیب ۹/۴٪ و ۷/۵٪ کاهش یافت و همچنین با افزایش مساحت مقطع تیر همبندی به مقدار ۲۵٪ و ۶۵٪ نسبت شکل‌پذیری به ترتیب ۰/۶٪ و ۹/۹٪ کاهش می‌یابد.

#### ۴-۴- ضریب رفتار

پس از دو خطی کردن نمودار برش پایه به روش یانگ مقدار ضریب رفتار و نسبت شکل‌پذیری محاسبه می‌شود [۲۴ و ۲۳]. به عنوان نمونه، نمودار دو خطی شده نمونه ۳ طبقه با ورق جان صاف در شکل ۱۴ قابل مشاهده است. مقادیر ضریب رفتار نمونه‌ها در جدول ۷ آورده شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود، در مدل ۳ طبقه با تغییر ورق فولادی از ساده به موجدار قائم و موجدار افقی، ضریب رفتار به ترتیب ۲۰/۶٪ کاهش و ۱۲/۳٪ افزایش می‌یابد. با افزایش طول تیر همبندی به مقدار ۱۰٪ و ۲۰٪ ضریب رفتار به ترتیب ۱۷/۶٪ و ۵/۷٪ کاهش یافت و همچنین با افزایش مساحت مقطع تیر همبندی به مقدار ۲۵٪ و ۶۵٪ ضریب رفتار به ترتیب ۵/۶٪ و ۱۳/۷٪ کاهش می‌یابد.

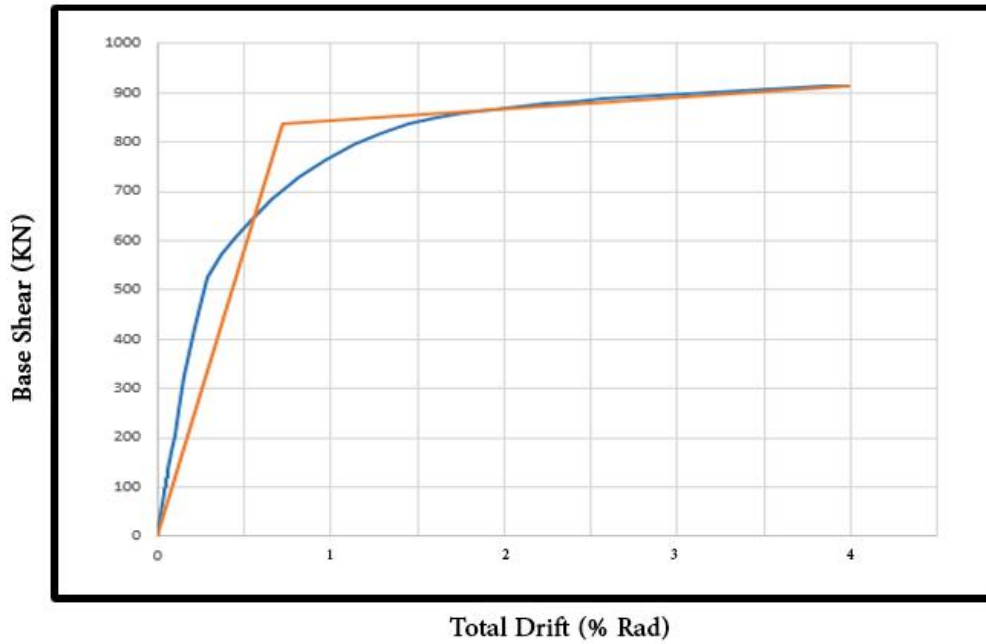
در مدل ۶ طبقه با تغییر ورق فولادی از ساده به موجدار قائم و موجدار افقی، ضریب رفتار به ترتیب ۲۹/۸٪ کاهش و ۱/۲٪ افزایش می‌یابد. با افزایش طول تیر همبندی به مقدار ۱۰٪ و ۲۰٪ ضریب رفتار به ترتیب ۱/۹٪ و ۰/۸٪ کاهش یافت و همچنین با افزایش مساحت مقطع تیر همبندی به مقدار ۲۵٪ و ۶۵٪ ضریب رفتار به ترتیب ۲/۶٪ و ۴/۲٪ کاهش می‌یابد.

در مدل ۱۲ طبقه با تغییر ورق فولادی از ساده به موجدار قائم و موجدار افقی، ضریب رفتار به ترتیب ۶/۸٪ کاهش و ۱۰/۸٪ افزایش می‌یابد. با

جدول ۷. ضریب رفتار نمونه‌ها حاصل از تحلیل بارافزون

Table 7. The Value of the Behavior Factor of the Samples Resulting from Pushover Analysis

نمونه	3-P	3-TC-V	3-TC-H	3-CL10	3-CL20	3-CB25	3-CB65
ضریب رفتار	۶/۲۴	۴/۹۵	۷/۰۱	۵/۱۴	۵/۸۸	۵/۸۹	۵/۳۸
نمونه	6-P	6-TC-V	6-TC-H	6-CL10	6-CL20	6-CB25	6-CB65
ضریب رفتار	۶/۳۰	۴/۴۲	۶/۳۸	۶/۱۸	۶/۲۵	۶/۱۳	۶/۰۳
نمونه	12-P	12-TC-V	12-TC-H	12-CL10	12-CL20	12-CB25	12-CB65
ضریب رفتار	۵/۷۹	۵/۳۹	۶/۴۲	۵/۶۱	۵/۶۸	۵/۷۳	۵/۵۵



شکل ۱۴. نمودار دو خطی شده برش پایه نمونه سه طبقه با پانل فولادی صاف

Fig. 14. Idealized Base Shear Curve of the 3-Story Model with Plannar steel panels

جدول ۸. نسبت شکل پذیری نمونه‌ها حاصل از تحلیل بارافزون

Table 7. The Ductility Ratio of the Samples Resulting from Pushover Analysis

نمونه	3-P	3-TC-V	3-TC-H	3-CL10	3-CL20	3-CB25	3-CB65
نسبت شکل پذیری	۵/۵۱	۴/۹۴	۶/۸۲	۵/۱۲	۵/۳۱	۵/۴۳	۵/۱۳
نمونه	6-P	6-TC-V	6-TC-H	6-CL10	6-CL20	6-CB25	6-CB65
نسبت شکل پذیری	۵/۴۲	۴/۶۱	۶/۶۴	۴/۹۱	۵/۰۱	۵/۳۹	۴/۸۸
نمونه	12-P	12-TC-V	12-TC-H	12-CL10	12-CL20	12-CB25	12-CB65
نسبت شکل پذیری	۳/۹۷	۳/۴۸	۴/۵۸	۳/۶۶	۳/۸۶	۳/۸۵	۳/۵۳

۵- در هر سه ارتفاع ۳، ۶ و ۱۲ طبقه، ضریب رفتار با تغییر ورق جان از ساده به موجدار قائم کاهش و موجدار افقی افزایش می‌یابد.

۶- در تمامی مدل‌های ۳ و ۶ طبقه، نسبت شکل‌پذیری با تغییر ورق جان از ساده به موجدار قائم کاهش و موجدار افقی افزایش می‌یابد. همچنین در مدل ۱۲ طبقه با تغییر ورق جان از ساده به موجدار قائم و موجدار افقی نسبت شکل‌پذیری کاهش می‌یابد.

با توجه به نتایج حاصل از مدل‌سازی مشاهده می‌شود که با افزایش طول تیر همبند و یا به عبارتی با ورود به ناحیه عملکرد خمشی ظرفیت باربری، درجه همبندی، جذب انرژی، ضریب رفتار و نسبت شکل‌پذیری نسبت به عملکرد خمشی-برشی کاهش می‌یابد این در حالیکه در مدل‌ها با عملکرد برشی شاهد افزایش در پارامترهای ذکر شده می‌باشیم. بنابراین با توجه به بهبود رفتار سیستم در عملکرد برشی یا خمشی-برشی نسبت به عملکرد خمشی، استفاده از تیر همبند با رفتار برشی و سپس خمشی-برشی توصیه می‌گردد.

همچنین نتایج حاکی از آن است که استفاده از ورق‌های موجدار دوزنقه‌ای افقی؛ باعث بهبود ضریب رفتار و نسبت شکل‌پذیری می‌شود و با توجه به عدم خرابی سیستم در انتهای بارگذاری و امکان تحمل دررفت‌های بالاتر در این مدل‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که ورق موجدار دوزنقه‌ای افقی باعث بهبود رفتار سیستم می‌شود؛ اما این موضوع در مورد ورق‌ها با موج قائم صدق نمی‌کند.

همانطور که مشاهده شد در تمامی مدل‌ها، افزایش ارتفاع منجر به افزایش درجه همبندی می‌شود که نشان دهنده رابطه مستقیم بین میزان درجه همبندی و ارتفاع دیوار برشی همبند است.

در مدل ۱۲ طبقه با تغییر ورق فولادی از ساده به موجدار قائم و موجدار افقی، نسبت شکل‌پذیری به ترتیب ۱۲/۳٪ کاهش و ۱۵/۳٪ افزایش می‌یابد. با افزایش طول تیر همبندی به مقدار ۱۰٪ و ۲۰٪ نسبت شکل‌پذیری به ترتیب ۷/۸٪ و ۲/۷٪ کاهش یافت و همچنین با افزایش مساحت مقطع تیر همبندی به مقدار ۲۵٪ و ۶۵٪ نسبت شکل‌پذیری به ترتیب ۳٪ و ۱۱٪ کاهش می‌یابد.

### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی تاثیر استفاده از ورق فولادی موجدار قائم و افقی دوزنقه‌ای، تاثیر افزایش طول و مساحت مقطع تیر همبندی بر دیوار برشی فولادی ۳، ۶ و ۱۲ طبقه پرداخته شد و نتایج زیر حاصل شده است:

۱- در هر سه ارتفاع ۳، ۶ و ۱۲ طبقه، ظرفیت باربری، درجه همبندی و جذب انرژی با تغییر ورق جان از ساده به موجدار قائم و موجدار افقی کاهش می‌یابد که این میزان کاهش، در پانل با موج قائم بیشتر است.

۲- در هر سه ارتفاع ۳، ۶ و ۱۲ طبقه، با افزایش طول تیر همبندی، ظرفیت باربری، درجه همبندی، ضریب رفتار، نسبت شکل‌پذیری و جذب انرژی کاهش می‌یابد.

۳- در هر سه ارتفاع ۳، ۶ و ۱۲ طبقه، با افزایش مساحت مقطع تیر همبندی، ظرفیت باربری، ضریب رفتار، نسبت شکل‌پذیری و جذب انرژی کاهش و درجه همبندی افزایش می‌یابد.

۴- با افزایش ارتفاع در هر سه نوع مدل شامل دیوار فولادی با ورق جان ساده، موجدار قائم و موجدار افقی، درجه همبندی افزایش می‌یابد.

thin steel-plate shear walls under cyclic load, journal of Structural Engineering, 119(2) (1993) 573-587.

## ۶- فهرست علائم

### علائم انگلیسی

طول همبندی، $m$	$e$
مدول الاستیسیته، $N/m^2$	$E$
طول دهانه، $m$	$L$
درجه همبندی	$DC$
لنگر ناشی از همبندی، $N.m$	$M_{Coup}$
لنگر دیوار (شرقی یا غربی)، $N/m^2$	$M_{Pier}$
نیروی محوری عمودی	$P$
لنگر خمشی پلاستیک	$M_P$
نیروی برشی پلاستیک	$V_P$

### منابع

- [9] Q. Zhao, A. Astaneh-Asl, Cyclic behavior of traditional and innovative composite shear walls, Journal of Structural Engineering, 130(2) (2004) 271-284.
- [10] S. Sabouri-Ghomi, C.E. Ventura, M.H. Kharrazi, Shear analysis and design of ductile steel plate walls, Journal of Structural Engineering, 131(6) (2005) 878-889.
- [11] D.J. Borello, L.A. Fahnestock, Design and testing of coupled steel plate shear walls, in: Structures Congress 2011, 2011, pp. 736-747.
- [12] F. Emami, M. Mofid, A. Vafai, Experimental study on cyclic behavior of trapezoidally corrugated steel shear walls, Engineering Structures, 48 (2013) 750-762.
- [13] M. Gholhaki, M. Ghadaksaz, Investigation of the link beam length of a coupled steel plate shear wall, Steel and Composite Structures, 20(1) (2016) 107-125.
- [14] L. Hosseinzadeh, F. Emami, M. Mofid, Experimental investigation on the behavior of corrugated steel shear wall subjected to the different angle of trapezoidal plate, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 26(17) (2017) e1390.
- [15] D.J. Borello, L.A. Fahnestock, Large-scale cyclic testing of steel-plate shear walls with coupling, Journal of Structural Engineering, 143(10) (2017) 04017133.
- [16] M. Shayanfar, V. Broujerdian, A. Ghamari, Analysis of coupled steel plate shear walls with outrigger system for tall buildings, Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 44(1) (2020) 151-163.
- [17] Standard specification for carbon structural steel, A36, ASTM international, West Conshohocken, PA, 2008.
- [18] Standard specification for carbon structural steel, A992, ASTM international, West Conshohocken, PA, 2011.
- [19] D.J. Borello, L.A. Fahnestock, Behavior and mechanisms of steel plate shear walls with coupling, Journal of Constructional Steel Research, 74 (2012) 8-16.
- [20] AISC, AISC 341-16: Seismic provisions for structural steel buildings, American Institute of Steel Construction
- [1] D.J. Borello, Behavior and large-scale experimental testing of steel plate shear walls with coupling, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2014.
- [2] Y. Takahashi, Y. Takemoto, T. Takeda, M. Takagi, Experimental study on thin steel shear walls and particular bracings under alternative horizontal load, in: Preliminary Report, IABSE, Symp. On Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well-defined Repeated Loads, Lisbon, Portugal, 1973.
- [3] H. Wagner, Flat sheet metal girders with very thin webs, Part I-General theories and assumptions, National Advisory Committee for Aeronautics, Technical Memo, 604 (1931).
- [4] K. Basler, Strength of plate girders under combined bending and shear, Journal of the Structural Division, 87(7) (1961) 181-198.
- [5] AISC, Seismic provisions for structural steel buildings, in, AISC Chicago, 2010.
- [6] Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE, 2010.
- [7] E.W. Tromposch, G.L. Kulak, Cyclic and static behaviour of thin panel steel plate shear walls, Department of civil engineering university of alberta, 1987.
- [8] V. Caccese, M. Elgaaly, R. Chen, Experimental study of

- Research, 122 (2016) 584-594.
- [23] C.-M. Uang, Establishing  $R$  (or  $R_w$ ) and  $C_d$  factors for building seismic provisions, *Journal of structural Engineering*, 117(1) (1991) 19-28.
- [24] A.J. VASEGHI, N.P. ESMAEILTABAR, Response modification factor of chevron braced frame with pall friction damper, *International Journal of Engineering*, 26 (2013) 127-135.
- Inc, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, (2016).
- [21] T. Zirakian, J. Zhang, Structural performance of unstiffened low yield point steel plate shear walls, *Journal of Constructional steel research*, 112 (2015) 40-53.
- [22] M. Bahrebar, M.Z. Kabir, T. Zirakian, M. Hajsadeghi, J.B. Lim, Structural performance assessment of trapezoidally-corrugated and centrally-perforated steel plate shear walls, *Journal of Constructional Steel*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*F. Ajori, F. Emami, The Effect of Trapezoidal Corrugated Steel Plates and Coupling Beam Action on the Seismic Behavior of Coupled Steel Shear Wall Systems, Amirkabir J. Civil Eng., 54(8) (2022) 2915-2934.*

DOI: 10.22060/ceej.2022.20137.7354

