

## بررسی اثر سختی ستون‌ها بر رفتار دیوارهای برشی فولادی جدار نازک

اصغر حبیب نژاد کورایم<sup>1</sup>، حمید محرمی<sup>2\*</sup> و علی مزروعی<sup>3</sup>

<sup>1</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه تربیت مدرس

<sup>2</sup> دانشیار دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه تربیت مدرس

<sup>3</sup> استادیار دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز

(تاریخ دریافت 88/4/2، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده 89/5/13، تاریخ تصویب 89/12/22)

### چکیده

دیوارهای برشی فولادی که به دو صورت جدار نازک و تقویت شده کاربرد دارند، یک سیستم ابتکاری برای مقاومت در برابر بارهای جانبی باد و زلزله می باشند و در دهه های اخیر نوع جدار نازک آن مورد توجه محققین قرار گرفته است. یکی از مشکلات پیش رو در طراحی دیوارهای برشی فولادی طراحی ستون‌های نگهدارنده این‌گونه دیوارها است. این مقاله نتایج آزمایشات انجام شده برای بررسی اثر سختی ستون‌های نگهدارنده دیوار برشی فولادی بر چگونگی رفتار و عملکرد دیوارهای برشی فولادی جدارنازک را ارائه می دهد. برای این کار چهار دیوار برشی فولادی یک دهانه و دو طبقه که تنها در ستون‌ها با یکدیگر تفاوت داشتند با مقیاس 1/2 ساخته شده و تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار داده شدند. آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهند که گرچه با افزایش سختی ستون‌ها بر میزان ظرفیت باربری، شکل پذیری و سختی دیوار برشی افزوده می شود، اما این افزایش متناسب با افزایش سختی ستون‌ها نمی باشد. همچنین مشاهده شد که این دیوارها دارای شکل پذیری بسیار خوبی بوده و از ظرفیت اتلاف انرژی بسیار بالایی برخوردار هستند.

**واژه های کلیدی:** دیوار برشی فولادی جدار نازک، سختی ستون‌ها، مقاومت پس کمانشی، میدان کششی قطری،

شکل پذیری، جذب انرژی

### مقدمه

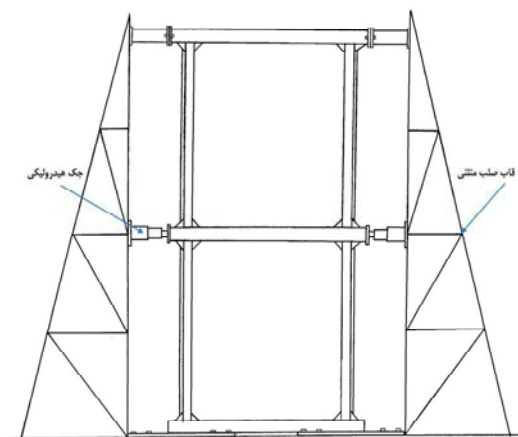
سازي نوع فولادی از دیوار برشی بتنی است. اما اساس ایده دیوارهای برشی فولادی نازک که در دو دهه اخیر بطور جدی مورد توجه قرار گرفته است بهره گیری از جذب انرژی قابل ملاحظه‌ای است که در این‌گونه دیوارها به هنگام ورود سازه به رفتار غیرخطی صورت می‌پذیرد. مقاومت این‌گونه دیوارها عمدتاً مقاومت فراکمانشی ورقهای نازک یا در واقع مقاومت ناشی از میدان کشش قطری است که پس از کمانش ورق فولادی در آن ایجاد می‌گردد [2]. محققین زیادی عملکرد دیوار برشی فولادی و اثر پارامترهای مختلف مؤثر بر رفتار آن را با استفاده از نرم افزارهای تحلیلی و یا نمونه‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داده اند که از آن جمله می توان به محاسبه سختی جانبی دیوار برشی فولادی [3]، محاسبه پیروید طبیعی دیوار برشی فولادی [4]، محاسبه ظرفیت برشی دیوار [5 و 6]، اثر جنس و خواص ورق [7-9]، زاویه تشکیل میدان کششی [10]، ضخامت ورق [11]، نسبت عرض به ارتفاع پانل برشی [12]، نحوه اتصال تیر به ستون [13-16] و وجود بازشو در ورق [17]، رفتار پس کمانشی دیوار [18 و 19]، ضریب رفتار دیوار برشی [20-22] اشاره کرد.

برای مقاومت در برابر بارهای جانبی ناشی از باد و زلزله، تاکنون سیستم‌های سازه ای مختلفی پیشنهاد شده و بکار رفته است که از آن جمله می توان به سیستم قاب خمشی، انواع سیستم‌های مهاربندی و دیوار برشی بتنی اشاره نمود. مهندسين و محققين همیشه در پی یافتن سیستم سازه‌ای ایده آل برای مقاومت در برابر بارهای جانبی باد و زلزله می‌باشند آنچنانکه در کنار مقاومت و سختی بالا، شکل پذیری زیادی نیز داشته باشند تا اثر تخریبی نیروهای وارده را با جذب انرژی تعدیل کرده و به حداقل برسانند. لذا دیوار برشی فولادی که دارای مزیت‌های نسبی در هر سه زمینه فوق می‌باشد برای مقابله با نیروهای جانبی زلزله و باد در ساختمان‌ها، به ویژه در ساختمان‌های بلند در سه دهه اخیر مطرح و مورد توجه قرار گرفته است [1].

دیوارهای برشی فولادی، هم به صورت سخت شده مورد استفاده سازه‌های بلند قرار گرفته اند و هم به صورت سخت نشده. در حالت سخت شده با استفاده از سخت کننده‌های طولی و عرضی از کمانش کلی ورق فولادی جلوگیری می‌شود. این مدل از دیوار برشی بیشتر مدل

## شرح مدل‌های آزمایشگاهی و آزمایش‌های انجام شده

به منظور تعیین نحوه اثر سختی ستون‌ها بر تشکیل میدان کششی و میزان جذب انرژی دیوارها چهار نمونه دیوار برشی یک دهانه و دو طبقه با مقیاس 1/2 ساخته شده و بر اساس دستورالعمل ATC 24 [28] تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند. با توجه به اینکه در این تحقیق بررسی رفتار دیوار تحت برش مورد نظر بود مدلی طراحی شد که طی آن بر دیوار برشی حتی‌المقدور برش ثابت اعمال گردد به این ترتیب که نمونه ساخته شده در قسمت فوقانی و تحتانی به تکیه گاه متصل شده و در قسمت میانی تحت بارگذاری قرار گرفت و در نتیجه بدون ورود تغییر شکل خمشی به تیرهای نگهدارنده، برش تقریباً یکسان و برابر در هر دو طبقه به دیوار وارد شد (شکل 1 مدل و محل اعمال بار در شکل 1) آورده شده است).



شکل 1: مدل طراحی شده و اعمال بار در تراز میانی.

نیروی جانبی طبق دستورالعمل ATC24 به صورت رفت و برگشتی با استفاده از دو جک هیدرولیکی که در طرفین دیوار قرار داده شده بود، در محل تیر میانی به نمونه اعمال و تغییر مکان نیز در همین محل اندازه گیری شد. بر اساس دستورالعمل، سه سیکل بارگذاری برای هر یک از تغییر مکان‌های کمتر از  $3\Delta y$  (شامل تغییر مکان بین  $0.25\Delta y$  و  $0.5\Delta y$  و نیز تغییر مکان بین  $0.6\Delta y$  و  $0.8\Delta y$  و تغییر مکان‌های  $\Delta y$ ،  $2\Delta y$  و  $3\Delta y$ ) و دو سیکل بارگذاری برای تغییر مکان‌های بیش از  $3\Delta y$  باید انجام شود. برای اندازه گیری میزان تنش و امتداد تشکیل میدان کششی یک سری کرنش سنج سه محوری که در

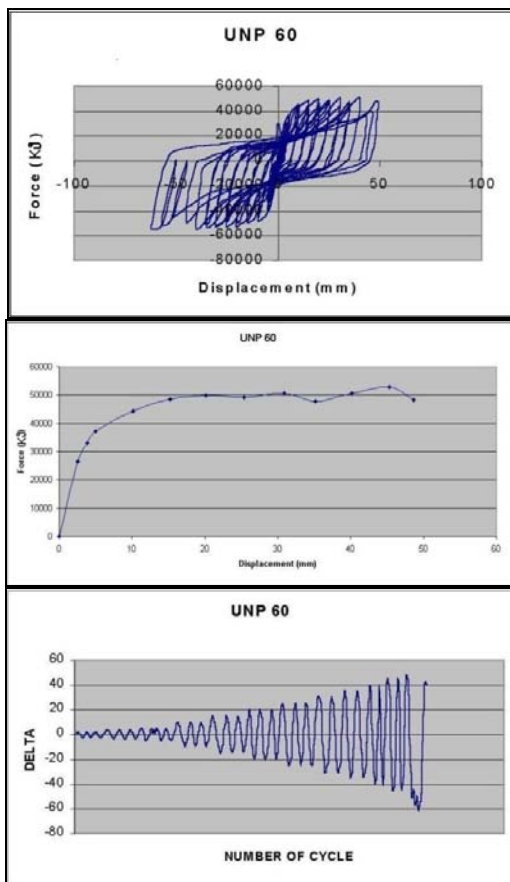
اما با وجود مزیت‌های دیوارهای برشی فولادی نسبت به سایر سیستم‌های باربر جانبی به دلیل کمبود اطلاعات راجع به جنبه‌های گوناگون عملکرد این دیوارها استفاده از این سیستم باربر جانبی هنوز جایگاه خود را پیدا نکرده است و تنها در آیین‌نامه‌های کانادا [23] و آمریکا [24] روابط طراحی این دیوارها بیان شده است. یکی از پارامترهای مهم در نحوه عملکرد دیوارهای برشی فولادی جدارنازک، ستون‌های نگهدارنده دیوار برشی می‌باشد که علیرغم اهمیت نقش کلیدی آن در طراحی دیوار برشی کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا Thorburn و همکارانش [25] با استفاده از تحلیل عددی یک مدل 25 طبقه ادعا کردند که با کاهش سختی ستون‌ها از شدت تنش‌های کششی میدان کششی کاسته شده و در حالت استفاده از ستون خیلی ضعیف نه تنها در گوشه‌های پانل، میدان کششی ایجاد نشده بلکه این تنش‌ها جای خود را به تنش‌های فشاری خواهند داد. در تحقیق دیگری علی‌نیا و دستفان [26] بیان کرده‌اند که بر خلاف تصور حال حاضر محققان سختی خمشی اعضای محیطی ورق دیوار برشی تأثیر قابل ملاحظه‌ای در کماتش برشی و رفتار پس از کماتش دیوار ندارد و این صلبیت پیچشی است که فاکتور تعیین کننده است، آن هم تنها بر نیروی کماتش الاستیک دیوار، نه بر ظرفیت پس از کماتش آن.

همچنین خاکی و اسفندیار [27] تأثیر سختی ستون‌های نگهدارنده دیوار را بر رفتار دیوار برشی یک طبقه به روش عددی بررسی و نتیجه گرفتند که با ازدیاد سختی ستون‌ها توزیع میدان کشش بیشتر و سختی دیوار زیادتر می‌شود. اما وقتی سختی ستون‌ها قابل ملاحظه است، تأثیر تغییرات سختی در سختی دیوار کم است و بالعکس.

در این مقاله با بهره‌گیری از نتایج آزمایش چهار مدل آزمایشگاهی که در سال 1383 در مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن انجام شده است، اثر سختی ستون‌ها بر جنبه‌های گوناگون رفتاری این دیوارها از جمله تشکیل میدان کششی، شکل‌پذیری، سختی، مقاومت و جذب انرژی دیوار بررسی شده است تا با بررسی عملی و دقیق‌تر سختی ستون‌های نگهدارنده دیوار زمینه بهبود و توسعه روابط طراحی این المان دیوار برشی فراهم گردد.

مدل set up شده و نمونه آزمایشگاهی در حین بارگذاری، به ترتیب در تصاویر (3) و (4) قابل مشاهده هستند.  
جدول 3: مشخصات ستون دیوارهای برشی.

نمونه اول	نمونه دوم	نمونه سوم	نمونه چهارم		
2UNP 60	2UNP 80	2UNP 100	2UNP 120		
13	22	27	34	cm <sup>2</sup>	A سطح مقطع ستون‌ها
$136/5 \times 10^6$	$510/3 \times 10^6$	$798 \times 10^6$	$1268/4 \times 10^6$	$(EI)_{min}$ Kg.cm <sup>2</sup>	سختی خمشی ستون‌ها
$132/3 \times 10^6$	$445/2 \times 10^6$	$865/2 \times 10^6$	$1528/8 \times 10^6$	$(EI)_{max}$ Kg.cm <sup>2</sup>	سختی خمشی ستون‌ها
35	40	44	45	V y Ton	نیروی برشی جاری شدگی
55	69	67	76	Vu Ton	نیروی برشی نهایی



شکل 2: منحنی‌های هیستریزیس، نمودار نیرو - تغییر مکان و چرخه‌های بارگذاری نمونه اول.

آن کرنش سنج‌ها با یکدیگر زاویه 45° داشتند بر روی ورق فولادی دیوار نصب گردید. میزان تنش تیرها و ستون‌ها نیز با استفاده از کرنش سنج‌های تک محوری اندازه‌گیری شد. ورق دیوار برشی از جنس فولاد کم‌مقاومت و شکل پذیر با تنش جاری‌شدگی  $1950 \text{ kg/cm}^2$  و تنش گسیختگی  $2987 \text{ kg/cm}^2$  انتخاب شد که این امر تاثیر به‌سزایی در افزایش شکل پذیری و استهلاک انرژی دیوار داشت. برای سایر اعضا از فولاد معمولی که مشخصات آن با استفاده از تست نمونه‌های کششی مشخص شد، استفاده گردید. مشخصات مدل‌های آزمایشگاهی و فولاد مصرفی در اجزاء مدل‌ها در جداول (1)، (2) و (3) قابل مشاهده است.

جدول 1: مشخصات مدل‌های آزمایشگاهی.

نمونه	تعداد طبقات	تعداد دهانه	ارتفاع طبقات (cm)	عرض دهانه (cm)	ستون	تیر	ضخامت ورق (mm)
اول	2	1	150	120	2UNP 60	IPE 240	2
دوم	2	1	150	120	2UNP 80	IPE 240	2
سوم	2	1	150	120	2UNP 100	IPE 240	2
چهارم	2	1	150	120	2UNP 120	IPE 240	2

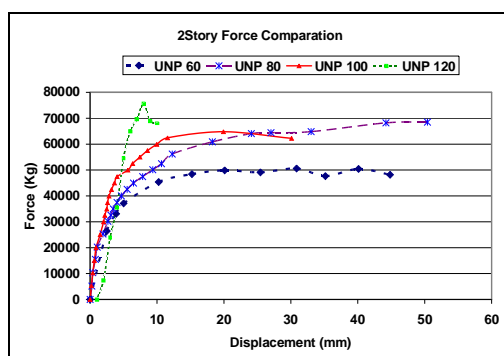
جدول 2: مشخصات فولاد مصرفی.

Plate	UNP 60	UNP 80	UNP 100	UNP 120	IPE 240	
تنش تسلیم $F_y$ (kg/cm <sup>2</sup> )	2989	3186	3307	2862	3583	1950
تنش نهایی $F_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	4297	4377	4621	4405	4780	2987

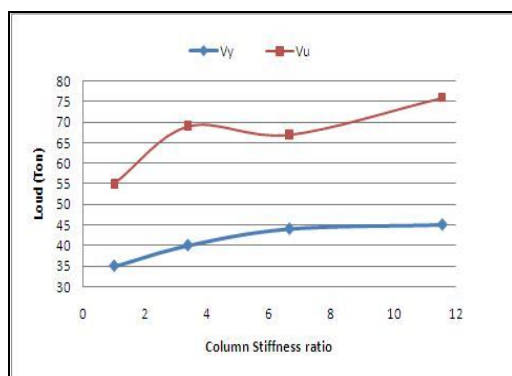
بعد از تکمیل ساخت نمونه‌ها هر یک از دیوارها تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند. نمونه‌های اول و دوم که ستونهای آنها از ناودانی‌های 60 و 80 ساخته شده بودند به خوبی نیروها را تحمل کرده و تا انتهای آزمایش پیش رفتند در این نمونه‌ها خرابی دیوار به دلیل پاره شدگی ورق دیوار برشی صورت گرفت. اما نمونه‌های سوم و چهارم که ستون‌های آنها از ناودانی‌های 100 و 120 ساخته شده بودند از ناحیه جوش اتصال تیر به ستون دچار شکست شدند و امکان باربری دیوار تا حد نهایی آزمایش میسر نشد. منحنی‌های هیستریزیس، نمودار نیرو - تغییر مکان و چرخه‌های بارگذاری در شکل (2) و تصویر

اول به دست می آید (که با توجه به ماهیت بارهای چرخه‌ای دینامیکی منطقی است) لذا برای یکنواخت بودن نتایج تمام سیکل‌ها مقدار نیرو و جابجایی چرخه اول هر سیکل در رسم نمودارها استفاده شد و از نیروی چرخه‌های دوم و سوم سیکل‌ها صرف نظر گردید. نمودارهای نیرو - تغییرمکان در شکل (5) قابل مشاهده است.

همان‌طور که در این شکل منعکس شده است، نمودارهای مربوط به نمونه‌های با ناودانی 100 و 120 به علت آنکه جوش اتصال تیر به ستون دچار شکست گردید و نمونه نتوانست رفتار واقعی خود را ادامه دهد به صورت ناقص و نیمه کاره به دست آمده است.



شکل 5: نمودار نیرو - تغییرمکان مدل‌های آزمایشی شده.



شکل 6: نمودار اثر سختی ستون بر ظرفیت باربری دیوار.

### اثر سختی ستون‌ها بر ظرفیت باربری دیوار برشی

نحوه اثر سختی ستون‌ها بر ظرفیت باربری دیوارها در نمودار شکل (6) قابل مشاهده است در این شکل  $V_y$  نیروی برشی نظیر ظرفیت تسلیم و  $V_u$  نیروی برشی نظیر ظرفیت نهایی دیوار است محور افقی این نمودار نسبت سختی ستون‌های سایر نمونه‌ها به سختی ستون نمونه اول را نشان می‌دهد و محور قائم مقدار نیروی برشی جاری شدگی و نیروی برشی نهایی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل 3: مدل آزمایشگاهی Set up شده.

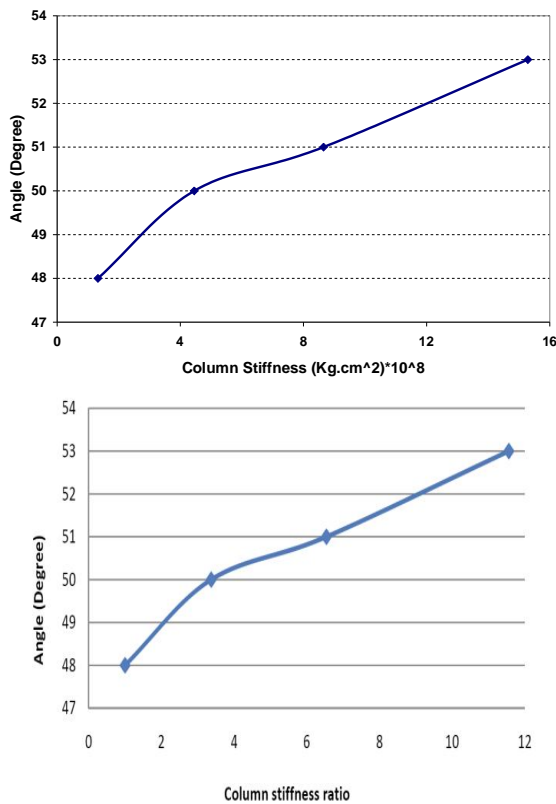


شکل 4: نمونه تحت بارگذاری.

### نمودارهای نیرو - تغییرمکان

برای رسم نمودار نیرو - تغییر مکان از نیروی برشی اعمالی به سیستم و تغییر مکان افقی تیر میانی نسبت به تیرهای انتهایی استفاده شده است. برای مقدار نیرو، با توجه به اینکه طبق دستورالعمل ATC-24 برای لحاظ کردن طبیعت چرخه‌ای بارهای دینامیکی و کاهش خطاهای اعمال نیرو و اندازه‌گیری پارامترهای مؤثر بر سیستم و موارد دیگر هر یک از سیکل‌های بارگذاری سه بار تکرار شده بود مشاهده شد که نیروهای به دست آمده در چرخه‌های دوم و سوم هر سیکل قدری کمتر از چرخه

قبیل عرض دهانه و ارتفاع دیوار، سختی ستون‌ها و ... می باشد. برای اندازه‌گیری زاویه میدان کششی یک سری کرنش‌سنج‌های سه محوری (ROSET) بر روی ورق دیوار برشی نصب شده و میزان کرنش در طول آزمایش ثبت شد. سپس با استفاده از روابط تنش - کرنش در المان‌های تنش مسطح میزان تنش‌های اصلی و امتداد شکل‌گیری آنها نسبت به محور قائم که همان زاویه تشکیل میدان کششی می باشد مشخص گردید. نتایج حاصله برای چهار نمونه با ورق یکسان و ستونهای متفاوت در نمودار شکل (8) آورده شده است.

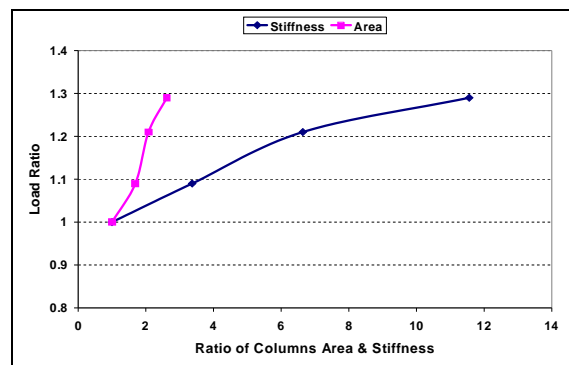


شکل 8: اثر سختی ستون بر زاویه تشکیل میدان کشش قطری.

همان‌طور که مشاهده می شود برای یک نسبت ثابت عرض دهانه به ارتفاع دیوار با افزایش سختی ستون‌ها زاویه تشکیل میدان کششی نسبت به تراز قائم افزایش می یابد البته این افزایش میزان قابل ملاحظه ای ندارد به طوری که برای نمونه چهارم علی‌رغم آنکه سختی ستون‌ها بیش از 11 برابر افزایش یافته است زاویه تشکیل میدان کششی تنها ده درصد اضافه شده است. نکته قابل ملاحظه در مورد زاویه میدان کششی اثر آن بر نیروی وارد به ستون‌ها است. از آنجا که نیروی برشی و مؤلفه قائم دیوار با تنازنت

همان‌طور که در نمودار مشخص است با افزایش سختی ستون‌ها ظرفیت باربری دیوارها افزایش می‌یابد اما افزایش مقاومت متناسب با افزایش سختی ستون‌ها نیست.

به عنوان مثال در نمونه دوم در حالی که سختی ستون نسبت به سختی ستون نمونه اول بیش از سه برابر شده، ظرفیت باربری نهایی تنها 25 درصد افزایش داشته است. همچنین علی‌رغم 11/5 برابر شدن سختی ستون‌های نمونه چهارم ظرفیت باربری حالت جاری شدگی 29 درصد و ظرفیت باربری نهایی تنها 38 درصد افزایش یافته است. لذا می توان اظهار داشت که پارامتر سختی ستون‌ها به تنهایی فاکتور کافی و مناسبی برای قضاوت در مورد چگونگی تغییرات ظرفیت باربری دیوار نیست برای درک بهتر این مطلب در شکل (7) نمودارهای تغییرات ظرفیت باربری دیوار ( $V_y$ ) بر اساس تغییرات سطح مقطع ستون‌ها و سختی خمشی ستون‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. با افزایش سطح مقطع ستون‌ها نیز ظرفیت باربری افزایش می یابد و نکته قابل توجه ملموس‌تر بودن نحوه تغییرات این دو پارامتر می باشد به نحوی که در مدل دوم با افزایش 69 درصدی سطح مقطع ستون‌ها ظرفیت باربری نهایی 25 درصد افزایش داشته است. این مقایسه نشان می دهد که تغییرات سطح مقطع ستون‌ها تغییرات باربری دیوارهای برشی را بهتر بیان می‌کند.



شکل 7: نمودارهای نحوه اثر سختی ستون و سطح مقطع ستون بر ظرفیت باربری.

### اثر سختی ستون‌ها بر زاویه میدان کششی

زاویه شکل‌گیری میدان کششی یکی از فاکتورهای مهم در رفتار دیوارهای برشی جدار نازک به حساب می آید و تأثیر زیادی در تحلیل ظرفیت باربری این دیوارها دارد. این زاویه خود متأثر از عوامل مختلفی از

پانل ادامه می یافت در تنش های بدست آمده از کرنش سنج‌ها نیز کاهش تنش مشاهده نشد.

لذا باتوجه به اینکه نسبت عرض دهانه به ارتفاع دیوار در دو تحقیق اشاره شده اختلاف زیادی با هم دارند اظهارنظر قطعی در مورد نحوه اثر سختی ستون‌ها بر میزان تشکیل میدان کششی و ارتباط آنها با نسبت عرض دهانه به ارتفاع دیوار ممکن نیست و نیاز به انجام مطالعات دیگری برای نسبت های عرض به ارتفاع متفاوت با مدل‌های بررسی شده احساس می شود.

در مورد اثر سختی ستون‌ها بر چگونگی خرابی دیوارها مشاهده شد زمانی که ورق دیوار با ستون‌های قوی احاطه می‌شود، تسلیم شدگی‌ها ابتدا در ورق شکل می‌گیرد و با توسعه این تسلیم شدگی‌ها تغییر شکل‌های پلاستیک در ورق دیوار ایجاد شده و به پارگی ورق منجر می‌گردد. در این نمونه‌ها مشاهده شد که ایجاد یک قاب قوی در کنار ورق دیوار منجر به وارد آمدن نیروهای قابل ملاحظه‌ای به قاب می‌شود و این نیروها اثر خود را در اتصالات تیر به ستون قاب نشان می‌دهند به طوری که در نمونه چهارم با ستون‌های ناودانی 120 با وجود تقویت اتصالات تیر به ستون باز هم خرابی دیوار به صورت ترد و ناگهانی و در اثر شکست اتصال تیر به ستون در تراز میانی صورت گرفت. در این نمونه‌ها با توجه به سختی بالای ستون‌ها، به هنگام تشکیل میدان کششی علی‌رغم وارد آمدن نیروهای بزرگ از جانب ورق به ستون‌های مجاور دیوار، کماتش و انحراف قابل توجهی در ستون‌ها ایجاد نگردید. اما هنگامی که از ستون‌های با سختی کم استفاده می‌شد تسلیم شدگی ورق دیوار و ستون‌ها تقریباً به صورت همزمان شروع شده و با افزایش نیروها این تسلیم شدگی‌ها توسعه می‌یافت. در این دیوارها شاهد آن بودیم که با افزایش نیروهای اعمالی تغییر شکل‌های پلاستیک ورق به پاره شدن ورق و توسعه آن می‌انجامید اما برخلاف ستون‌های با سختی زیاد، کماتش و تغییر شکل ستون‌های با سختی پایین در اثر نیروهای حاصل از تشکیل میدان کششی زیاد و قابل ملاحظه بود به نحوی که میزان انحراف وسط ستون‌های ساخته شده از ناودانی 60، تا 50 میلی‌متر اندازه‌گیری شد. اثر میدان کششی بر این ستون‌ها به حدی زیاد بود که در انتها ستون‌ها در خارج از صفحه دیوار هم کماتش کرده و باعث ایجاد کماتش کلی دیوار و پیچش آن شدند.

این زاویه به هم مرتبط می‌شوند  $(\frac{V}{P} = mg \alpha)$  [11] و با توجه به صعودی بودن تانژانت یک کمان در ربع اول هر قدر زاویه  $\alpha$  بزرگتر باشد به ازای یک نیروی برشی ثابت  $v$ ، مؤلفه قائم کمتری به دیوار تحمیل خواهد شد و چون نیروی قائم دیوار توسط ستونها تحمل می‌شود با کاهش این نیرو می‌توان از ستون‌های ظریفتری بهره جست. این بدان معنا است که با به دست آوردن یک مقطع مناسب و بهینه برای ستون بر اساس زاویه میدان کششی از مصالح ستون به صورت بهینه‌تری می‌توان استفاده کرد.

## اثر سختی ستون‌ها بر تشکیل میدان کششی و نحوه خرابی دیوار

با تشکیل میدان کششی در پانل، توزیع نیروهای داخل پانل تحت تأثیر عواملی از قبیل هندسه پانل، سختی تیرها و ستون‌های مجاور، ضخامت صفحه و زاویه میدان کششی و... می‌باشد. برای بررسی اثر سختی ستون‌ها Thorburn و همکارانش در یک تحلیل عددی یک ساختمان 25 طبقه در ادمونتون کانادا را مورد بررسی قرار دادند. در این مدل دهانه دیوار برشی 9 متر و ارتفاع آن 3/66 متر بود که نسبت عرض دهانه به ارتفاع آن 2/5 می‌شود. در این تحلیل ابعاد تیرها و ضخامت صفحه ثابت نگه داشته شده و ممان اینرسی ستون‌ها تا یکچهارم و یک چهاردهم ممان اینرسی به دست آمده از آئین نامه کانادا کاهش داده شد. نتایج تحلیل حاکی از آن بود که با کاهش سختی ستون‌ها از شدت تنش های کششی میدان کاسته شده و در حالت سختی یک چهاردهم، در گوشه‌های پانل، میدان کششی ایجاد نشده و تنش های کششی به تنش های فشاری تبدیل خواهد شد. و از این بررسی نتیجه گیری شده بود که جهت توسعه میدان کششی پانل، باید ستون‌های محیطی را قوی در نظر گرفت [25].

در تحقیق حاضر که عرض دهانه دیوار 1/2 متر و ارتفاع آن 1/5 متر و نسبت عرض دهانه به ارتفاع 0/8 بود این اثر بررسی شد. اما مشاهده شد که در سختی های پایین نیز میدان کششی تشکیل شده و ورق، کماتش می‌کند. و اساساً در تمام نمونه‌ها تشکیل میدان کششی در نیروهای پایین با کماتش ورق به صورت یک نیم موج سینوسی در وسط دهانه شروع شده و در نیروهای نهایی تا تشکیل 3 نیم موج سینوسی در طول قطر فشاری دهانه

شکل پذیری است که رابطه نزدیک با مقاومت سازه در مقابل نیروهای زلزله دارد. هر قدر ضریب شکل پذیری سازه بزرگتر و مقاومت آن کاهش کمتری داشته باشد، قدرت جذب انرژی آن در حالت غیرارتجاعی بیشتر بوده و رفتار مطلوبتری خواهد داشت. شکل پذیری هر سازه ارتجاعی - خمیری برابر نسبت جابجایی نهایی خمیری به جابجایی تسلیم آن است. در این تحقیق نیز شکل پذیری دیوارهای برشی و اثر سختی ستون‌ها بر شکل پذیری دیوارها بررسی شده است که در جدول (4) آورده شده است. البته متأسفانه در اثر شکست اتصال تیر به ستون در نمونه های سوم و چهارم ضریب شکل پذیری به دست آمده برای این دو دیوار کمتر از مقدار واقعی آن می‌باشد. مضافاً اینکه به دلیل محدودیت امکانات آزمایشگاهی و نیز رعایت ایمنی ابزار آزمایش، بارگذاری ها تا خرابی دیوار ادامه داده نشدند.

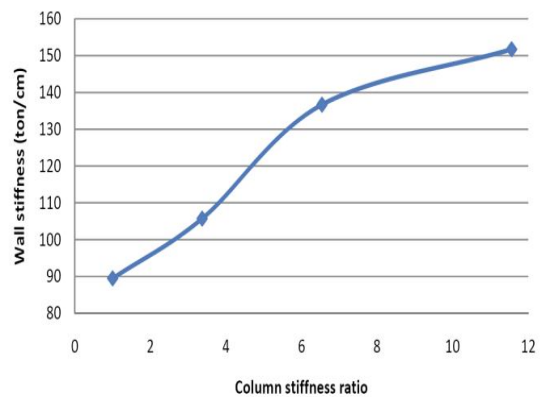
جدول 4: شکل پذیری دیوارهای برشی آزمایش شده.

نمونه	نمونه	نمونه	نمونه	
چهارم	سوم	دوم	اول	
2UNP120	2UNP100	2UNP80	2UNP60	نیمرخ ستون‌ها
2/9	3	3/5	3/8	جابجایی تسلیم $\Delta_y$ (mm)
26	29	52	49	جابجایی خمیری نهایی $\Delta_u$ (mm)
9	9/7	14/9	12/9	ضریب شکل پذیری

ستون‌های UNP80 با مقاومت در برابر کمانش، زمینه را برای جذب انرژی دیوارها فراهم نمودند و باعث شدند دیوارها تا مراحل بیشتری برای جذب انرژی حضور مؤثر داشته باشند. اما این امر در مورد ستون‌های با سختی بیشتر کمتر مشاهده شد. به طوری که در نمونه های با ستون UNP100 و UNP120 میزان باربری قاب به گونه ای بود که نیروی زیادی به اتصالات قاب وارد گردید و دیوار از این قسمت دچار شکست گردید و امکان جذب بیشتر انرژی و بهره برداری از شکل پذیری دیوارها میسر نشد. همان‌طور که مشاهده می شود دیوارهای برشی جدانازک از ضریب شکل پذیری بسیار خوبی برخوردار هستند و این مقدار با افزایش

## اثر سختی ستون‌ها بر سختی دیوار برشی

سختی یکی از عوامل تعیین کننده ای است که برای بررسی رفتار سازه ها و از جمله دیوار برشی مورد استناد و استفاده قرار می گیرد. برای بررسی اثر سختی ستون‌ها بر روی سختی دیوار برشی از نمودارهای نیرو - تغییرمکان به دست آمده برای هر یک از دیوارها استفاده گردید. شیب این نمودارها بیانگر سختی الاستیک هر یک از دیوارها می‌باشد. نمودار سختی دیوار بر اساس سختی خمشی ستون‌ها در شکل (9) آورده شده است.



شکل 9: اثر سختی ستون‌ها بر سختی دیوار.

همان‌طور که مشاهده می شود با افزایش سختی ستون‌ها، سختی دیوارها افزایش می یابد اما این نسبت افزایش قابل ملاحظه نیست به عنوان مثال در نمونه سوم در حالی که سختی ستون‌ها نسبت به نمونه اول 6/5 برابر شده سختی دیوار افزایش زیادی نداشته و 1/53 برابر شده یعنی تنها 53 درصد افزایش در سختی دیوار به وجود آمده است که قابل ملاحظه نیست. از این نمودار می توان نتیجه گرفت در مواردی که نیاز به سختی بالا در دیوار داریم (مواردی از قبیل کنترل اثرات P- $\Delta$ ، جلوگیری از آسیب دیدن اجزاء غیرسازه ای، حفظ تجهیزات و لوازم حساس در ساختمان‌های خاص و تأمین ایمنی و ...) افزایش سختی دیوار با استفاده از افزایش سختی ستون‌ها اقتصادی و معقول نمی باشد و باید با استفاده از پارامترهای دیگر از جمله ضخامت ورق به سختی مورد نظر رسید.

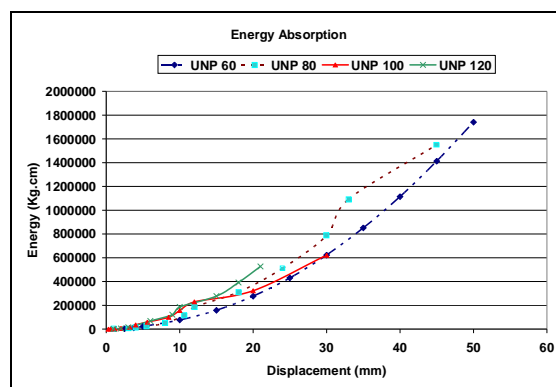
## اثر سختی ستون‌ها بر شکل پذیری دیوار برشی

از دیگر عوامل مهم در تحلیل رفتار دیوارهای برشی

سختی ستون‌ها تا حدی افزایش می‌یابد.

### اثر سختی ستون‌ها بر جذب و اتلاف انرژی

سطح زیر منحنی نیرو - تغییرمکان نمایشگر انرژی جذب شده توسط سیستم مورد آزمایش است. رفتار هیستریزس سازه‌ها مبین درصد جذب انرژی سیستم می‌باشد به گونه‌ای که اگر چرخه‌های هیستریزس به صورت له شده باشند، نشان دهنده استعداد کم مقاومت در برابر زلزله بوده و سازه توان اندکی از خود برای جذب و اتلاف انرژی بروز می‌دهد و اگر حلقه‌های هیستریزس به صورت پرحجم باشد، به نشانه استعداد خوب مقاومت در برابر زلزله بوده و سازه ظرفیت زیادی جهت اتلاف انرژی دارد. در این تحقیق نیز برای بررسی میزان جذب و استهلاک انرژی توسط دیوارها و همچنین نحوه اثر سختی ستون‌ها بر میزان جذب و استهلاک انرژی، منحنی‌های هیستریزس نیرو - تغییرمکان هر یک از دیوارها رسم گردید و مساحت محصور شده توسط نمودارها که بیانگر میزان جذب و اتلاف انرژی می‌باشد محاسبه گردید. انرژی تجمعی جذب شده توسط دیوارها بر اساس جابجایی تیر تراز میانی در نمودار شکل (10) آورده شده است.



شکل 10: نمودار انرژی تجمعی جذب شده بر اساس جابجایی تیر تراز میانی.

نتایج، نشانگر آن است که در هر چهار مدل، جذب انرژی و استهلاک آن در سیکل‌های متوالی افزایش می‌یابد و این نشان‌دهنده آن است که دیوارهای برشی فولادی جدار نازک دارای چرخه‌های پایدار هیستریزس و رفتار لرزه ای خوب می‌باشند از سوی دیگر عدم تنزل مقاومت و افت سختی در چرخه‌های هیستریزس در اینگونه دیوارها بیانگر شکل پذیری زیاد و ظرفیت بالای جذب انرژی در این سیستم می‌باشد. که این خصلت دیوارهای برشی

جدارنازک امکان استفاده از این دیوارها را در مقاوم سازی سازه‌های موجود فراهم می‌کند [29]. همچنین مشاهده شد در این دیوارها با افزایش سختی ستون‌ها بر میزان جذب انرژی افزوده می‌شود اما افزایش، چندان قابل ملاحظه نیست.

### نتیجه گیری

هدف اصلی این تحقیق بررسی اثر سختی ستون‌های نگهدارنده دیوار برشی بر جنبه‌های گوناگون عملکرد دیوارهای برشی فولادی جدار نازک بود. برای این امر چهار مدل با مقیاس 1/2 ساخته شده و تحت بارگذاری چرخه ای آزمایش شدند. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که:

دیوارهای برشی فولادی جدار نازک یک سیستم باربر جانبی مناسب، برای جذب انرژی ناشی از نیروهای جانبی می‌باشد. منحنی‌های هیستریزس این دیوارها پایدار و با سطح محصور شده زیاد می‌باشند.

با افزایش سختی ستون‌ها ظرفیت باربری این دیوارها افزایش می‌یابد. همچنین افزایش سختی ستون افزایش سختی دیوار و شکل پذیری و نیز افزایش میزان استهلاک انرژی دیوار را در پی خواهد داشت اما میزان این افزایش زیاد و قابل ملاحظه نمی‌باشد.

در آزمایش‌ها مشاهده شد که برای این نسبت عرض دهانه به ارتفاع دیوار برشی، ستون‌های ضعیف و نیمه قوی هم، توانایی ایجاد میدان کششی قطری در ورق را دارند و در این مدل‌ها نیز ورق دیوار برشی کم‌انرژی کرده و تا مرز گسیختگی پیش رفت. این امر بیانگر آن است که در طراحی دیوارهای برشی اگر به ستون‌های نگهدارنده دیوار بار محوری بزرگی اعمال نشود الزامی به استفاده از ستون‌های قوی و بسیار سخت نمی‌باشد و می‌توان با ستون‌های ضعیف هم از خواص تشکیل میدان کششی قطری در استهلاک انرژی نیروهای جانبی و دستیابی به یک سیستم باربر جانبی اقتصادی و ایمن بهره جست. میزان سختی بهینه با استفاده از مطالعه و آزمایشات بیشتر قابل دستیابی است.

یکی از مزایای مهم این دیوارهای برشی نحوه خرابی آنها می‌باشد. همان‌طور که در گزارش آزمایش ذکر شد در صورتیکه از اتصالات و ستون‌های مناسبی برای این سیستم استفاده شود بعد از بارگذاری و باربرداری های



دیوار برشی طوری صورت گیرد که از کمانش ستون‌های نگهدارنده در خارج از صفحه دیوار برشی جلوگیری شود، کمانش داخل صفحه ستون‌ها توسط ورق دیوار برشی مهار می‌شود و شکل پذیری خوبی در سیستم حاصل می‌شود. در حالی که ادبیات علمی و مطالعات انجام شده شکل‌پذیری کمتری را برای دیوارهای برشی فولادی با نگهدارنده‌های سخت و پرمقاومت، گزارش کرده‌اند

متوالی خرابی دیوار با تسلیم و گسیختگی ورق پرکننده دیوار شروع می‌شود که این نوع خرابی به صورت ترد و شکننده نمی‌باشد و این امر نقش به‌سزایی در بالا بردن ضریب ایمنی جانی ساکنین ساختمان دارد. شکل‌پذیری این دیوارها بسیار خوب بوده و در آزمایش‌های انجام شده شکل‌پذیری حدود 14 به دست آمده است. آزمایشات انجام شده نشان دادند که چنانچه طراحی

## مراجع

- 1 - Habibnejad Korayem, A. (2005). *The behavior of semi supported thin steel shear walls under lateral loads*, M.Sc. thesis, Tarbiat Modarres University (in Farsi).
- 2 - Sabouri, S. (2001). *Resisting systems to lateral loads, an introduction to steel shear walls*, Angiseh publisher (in Farsi).
- 3 - Topkaya, C. and Atasoy, M. (2009). "Lateral stiffness of steel plate shear wall systems." *Thin-Walled Structure*, Vol. 47, No. 8-9, PP. 827-835.
- 4 - Topkaya, C. and Kurban, C. O. (2009). "Natural period of steel plate shear wall system." *Journal of Constructional steel research*, Vol. 65, No. 3, PP. 542-551.
- 5 - Nateghi, F. and Alavi, E. (2008). "Theoretical seismic behavior of steel plate shear walls." *Proceeding, 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China*, No. 05-05-0120.
- 6 - Jahanpour A. Moharrami, H. and Aghakoochack, A. (2009). "Evaluation of ultimate load carrying capacity of semi supported thin steel shear walls." *The 8th International Congress of Civil Engineering, Shiraz, Iran*. (in Farsi).
- 7 - Caccese, V., Elgaaly, M. and Chen, R. (1993). "Experimental study of thin steel plate shear walls under cyclic load." *Journal of structural Eng.* Vol. 119. No. 2.
- 8 - Sabouri, S. and Sajjadi, R. (2007). "Comparison of hysteresis behaviour of steel shear walls with ordinary steel and low yield steel." *3rd National Congress of Civil Engineering, Tabriz, Iran*. (in Farsi).
- 9 - Sabouri, S. and Sajjadi, R. (2010). "Effect of low yield steel use on the stiffness and energy absorption of steel shear walls." *The 1st conference on structure and steel, Tehran, Iran*. (in Farsi).
- 10 - Driver, R. G., Kulak, G. L., Kennedy, D. J. L. and Elwi, A. E. (1998). "Cyclic test of four-story steel plate shear wall." *J. of Struct. Eng. ASCE*, Vol. 124, No. 2, PP. 112-120.
- 11 - Elgaaly, M., Caccese, V. and Du, C. (1993). "Post buckling behaviour of steel plate shear walls under cyclic loads." *Struct. Eng.* Vol. 119. No. 2.
- 12 - Maripudi, V. S. (1990). *Nonlinear analysis of thin steel plates with flexible boundaries under in-plane shear*, Ms. Thesis univ. of Main. Me. USA.
- 13 - Robert G., Kulak G. L., Elwi, A. E. and Kennedy, D. J. L. (1998). "FE and simplified models of steel plate shear wall." *J. of struct. Eng.* Vol. 124, No. 2.
- 14 - Xue, M. and Lu, L.W. (1994). "Interaction of in filled steel shear wall panels with surrounding frame members." *Proc. Struct. Stability Res. Council Annu. Tech. Session, Bethlehem, Pa.* PP. 339-354.
- 15 - Gholhaki, M. (2008). "The effect of connection type of beam to column on the strength and energy absorption of ductile steel shear walls." *4th National Congress of Civil Engineering, Tehran, Iran*. (in Farsi).

- 16 - Sabouri, S. and Hatami, F. (2004). "The effect of hinge connection of beams to columns on the behavior of steel shear walls." *The 1st National Congress of Civil Engineering, Tehran, Iran.* (in Farsi).
- 17 - Roberts, T. M. and Sabouri-Ghomi, S. (1992). "Hysteretic characters of unstiffened perforated steel plate shear panels." *Thin-walled Structures*.14.
- 18 - Gholhaki, M. and Shoghi Javan, M. (2010). "Investigation on the effect of stiffness of columns on the post buckling behaviour of steel shear walls." *5th National Congress of Civil Engineering, Mashad, Iran.* (in Farsi).
- 19 - Gholhaki, M. and Sorouryan, S. (2010). "Investigation on the effect of low yield steel and thickness variation of plates on the post buckling behaviour of thin steel shear walls." *5th National Congress of Civil Engineering, Mashad, Iran.* (in Farsi).
- 20 - Mahmoud zadeh, R. and Kabir, M. Z. (2009). "Determination of seismic reduction factor of un-stiffened steel shear walls" *8th International Congress of Civil Engineering, Shiraz, Iran.* (in Farsi).
- 21 - Ghalehnoei, M. et al. (2008). "Seismic reduction factor of dual system composed of ordinary moment resisting frames and thin steel shear walls." *3rd National Iran Congress of Retrofitting, Tabriz, Iran.* (in Farsi).
- 22 - Gholhaki, M. and Rezaeifar, A. (2009). "Effect of over-strength on the seismic reduction factor of thin steel shear walls." *8th International Congress of Civil Engineering, Shiraz, Iran.* (in Farsi).
- 23 - Appendix M, CSA, Standard- CAN/CSA S16.1.94 (S 16.1). (1994). *Canada's national standard for limit state design of steel structures*, December.
- 24 - AISC, ANSI/AISC 341-05. *Seismic provision for structural steel buildings*. Chicago (IL): American Institute of steel construction.
- 25 - Thorburn, I. J., Kulak, G. L. and Montgomery, C. J. (1983). "Analysis and design of steel shear wall systems." Struct. Eng. Rept. 107, Dept. Civil, Eng. Univ. Alberta.
- 26 - Alinia, M. M. and Dastfan, M., (2006). "Behavior of thin steel plate shear walls regarding frame." *Journal of constructional steel research* 62, PP.730-738.
- 27 - Khaki and Esfandyar, (2006). "Investigation on the effect of flexural stiffness of columns on the behavior of one storey thin steel shear walls (without stiffeners)." *7th International Congress on Civil Engineering, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran.* (in Farsi).
- 28 - ATC-24 Applied technology council. (1992). *Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures*.
- 29 - Moharrami, H. and Habibnejad Korayem, A., (2008). "Advantages of thin steel shear walls for retrofitting of steel structures." *Structure & Steel, the Proceeding of Iranian society of steel structures, No. 4* (in Farsi).
-