

## شکل پذیری دیوار برشی فولادی نازک و مقایسه رفتاری دیوار برشی فولادی تقویت شده و بدون تقویت

فرزاد حاتمی برق      دانشجوی دکتری تخصصی سازه، گروه عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
مهدی راغب      کارشناس ارشد سازه، هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند

### چکیده

مقاله حاضر، ابتدا به خلاصه‌ای از رفتار دیوارهای برشی فولادی پرداخته، آنگاه به بررسی موردی رفتار، آنالیز و طراحی یک پانل یک و چهار طبقه در مراحل الاستیک و پلاستیک، در دو حالت با وجود سخت کننده و بدون آن، با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ANSYS می‌پردازد. به این نتیجه می‌رسیم که جذب انرژی این سیستم و جابجایی جانبی آن در محیط پلاستیک بیشتر شده، صفحه فولادی وارد محیط غیرخطی گشته ولی قاب فولادی در محدوده خطی باقی می‌ماند. همچنین جابجایی جانبی سیستم دیوار برشی فولادی تقویت شده نسبت به سیستم صفحه‌ای نازک، به دلیل عدم امکان کمانش آن، کمتر بوده و جابجایی جانبی در تراز تیرهای طبقات، در سیستم دیوار برشی فولادی چهار طبقه در حالت پلاستیک بیشتر گشته و سطح بیشتری از پانل صفحه‌ای فولادی در این مرحله وارد فاز غیرخطی گشته، در حالی که پانل هنوز به باربری خود می‌تواند ادامه دهد. کلمات کلیدی: دیوار برشی فولادی، آنالیز الاستیک، آنالیز پلاستیک، سخت کننده، جابجایی جانبی، مقایسه رفتار، کمانش، ورق فولادی تقویت شده، ضریب شکل‌پذیری تغییرمکانی، منحنی هیستریزیس.

## Ductility of thin Steel Plate Shear Wall and Compare Behavior of Steel Shear Wall with and without Stiffener

F. Hatami      Department of Civil Engineering; Amirkabir University  
of Technology  
M. Ragheb      Azad Islamic University Parand unit

### Abstract

This Paper is prepared to provide the state of the art of the seismic behavior as well as seismic design of steel shear walls. This Paper contains a summary of the behavior of steel shear walls under cyclic load as well as during post earthquakes. Later, one and four stories panel with and without stiffeners is studied. For this purpose, various models of such walls are analyzed and modeled. The Result shows that ductility of the system at Nonlinear Zone is increasing and the steel plate –against the steel frame- has nonlinear behavior. Also, lateral drift at the steel shear wall with stiffener is decreasing but lateral drift of the four stories panel at middle beams level is increasing at compared with the non stiffener wall.

**Key words:** Steel shear wall, Linear and nonlinear analyze, Stiffener, Lateral drift, Buckling, Plate with stiffening, Ductility, Hysteresis curve.

## ۱- مقدمه

گرفته می‌شود. این روش با توجه به تحقیقات به عمل آمده نتایج نسبتاً خوبی را ارائه می‌دهد. باید توجه داشت که اصل حاکم بر تمامی روش‌ها این است که ورق جان دیوار برشی فولادی قبل از ستون‌های مجاور تسلیم گردد.

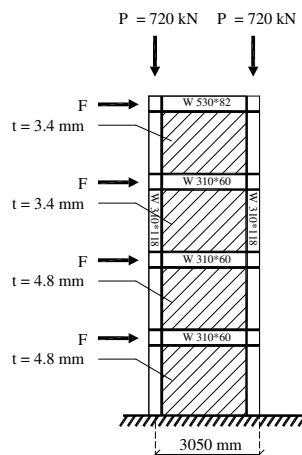
## ج) روش تحلیل و طراحی براساس نرم‌افزارهای المان محدود

در این روش با استفاده از نرم‌افزارهایی مانند ANSYS و SAP، مدل‌سازی پانل دیوار برشی فولادی به کمک قابلیت‌های هر برنامه انجام شده، سپس مدل با توجه به نوع تحلیل آن آنالیز می‌گردد. در زیر با استفاده از روش‌های تئوریک و اجزای محدود، یک پانل دیوار برشی فولادی یک و چهار طبقه در حالات ورق فولادی نازک و سخت شده تحلیل و نتایج مقایسه می‌گردند.

## د) کالیبراسیون مدل المان محدود

قبل از اینکه به بحث در مورد مدل مربوط به بخش قبل بپردازیم، لازم است از صحت نتایج و عملکرد روش المان محدود و به خصوص نرم‌افزار ANSYS مطمئن گردیم. به همین لحاظ، یکی از آزمایشات واقعی را مورد بررسی قرار داده و با نتایج مدل‌سازی انجام یافته تطبیق می‌دهیم.

آزمایش مورد نظر روی یک دیوار برشی چهار طبقه مطابق شکل (۱-۲) در دانشگاه آبرتا انجام یافته و نتایج آن در دسترس می‌باشد.



شکل ۱-۲- نمونه آزمایش دانشگاه آبرتا

(صبوری قمی، دیوارهای برشی فولادی، ۱۳۸۰)

رفتار اصلی دیوار برشی صفحه‌های فولادی<sup>(۱)</sup> مقاومت در برابر برش افقی طبقه و مقابله با لنگر ناشی از بارهای جانبی است. پانل دیوار برشی صفحه‌ای فولادی شامل یک ورق نازک فولادی، دو ستون مرزی و تیرهای افقی کف می‌باشد. صفحه فولادی دیوار برشی فولادی همراه با دو ستون مجاور، مانند یک تیر ورق قائم رفتار می‌نماید. در این تیر ورق قائم، ستون‌ها به عنوان بال‌های تیر ورق و صفحه فولادی دیوار مانند جان آن، رفتار می‌کنند. تیرهای افقی کف، اصولاً به عنوان سخت کننده‌های عرضی<sup>(۲)</sup> در این تیرورق قائم تلقی می‌شود.

## ۲- روش‌های تحلیل دیوار برشی فولادی نازک

دیوار برشی فولادی نازک را میتوان با استفاده از بکارگیری یکی از روش‌های زیر مورد آنالیز و تحلیل قرار داد.

## الف) روش تحلیل و طراحی براساس مطالعات کولاک در دانشگاه آبرتای کانادا

در این روش که در آیین نامه ملی کانادا نیز به آن اشاره شده است، ورق نازک جان دیوار برشی فولادی با تعدادی میله‌های کششی معادل، جایگزین و سپس تحلیل می‌گردد. زاویه شیب عناصر خرابایی با درنظر گرفتن خمش تیر و ستون پیرامونی توسط سوربن به صورت زیر اصلاح شده است.

$$\tan^4 \alpha = \frac{\frac{2}{WL} + \frac{1}{A_c}}{\frac{2}{WL} + \frac{2h}{A_b L} + \frac{h^4}{180I_c L^2}} \quad (1-2)$$

در رابطه فوق W، ضخامت صفحه فولادی، L دهانه پانل،  $A_b$  و  $A_c$  سطح مقطع تیر و ستون‌ها و h ارتفاع پانل و  $I_c$  ممان اینرسی ستون می‌باشد.

## ب) روش تحلیل و طراحی براساس مطالعات تئوریک توسط صبوری-روبرتس (روابط سختی و مقاومت) [۶]

در این روش رفتار دیوار برشی فولادی به صورت جمع رفتاری مجزای دو سیستم ورق و قاب فولادی پیرامونی درنظر

- 1- Steel plate shear wall
- 2- Transverse

مقاطع تیر و ستون‌ها با توجه به اصول طراحی تیروورق‌ها انتخاب می‌گردند [۶].

### ۳-۱- تحلیل پانل توسط روابط سختی و مقاومت

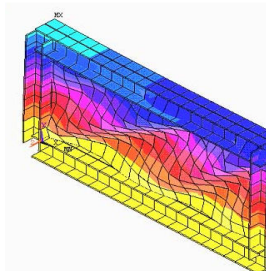
در این روش به کمک برهم نهی منحنی‌های نیرو- تغییر مکان برشی ورق فولادی و قاب پیرامونی، به ازای نیروی جانبی اعمال شده بر پانل، جابجایی برشی پانل به دست می‌آید. برای دیوار برشی فولادی با ورق نازک، مقادیر جابجایی‌های برشی، خمشی و کل در انتهای تیر فوقانی به ترتیب  $۴/۹۸۹$ ،  $۰/۲۹۸۹$  و  $۵/۲۸۸$  میلی‌متر به دست می‌آید.

### ۳-۲- تحلیل پانل به روش اجزاء محدود

با استفاده از تحلیل نرم‌افزار ANSYS مقادیر جابجایی تیر فوقانی در مراحل الاستیک و پلاستیک به دست می‌آید.

### ۳-۲- الف- مرحله الاستیک

در این حالت مقدار جابجایی جانبی تیر فوقانی برابر  $۶/۸۵$  میلی‌متر به دست می‌آید.



شکل ۳-۲- تغییر شکل جانبی پانل یک طبقه با ورق فولادی نازک- الاستیک

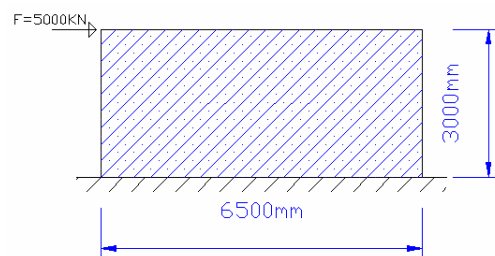
### ۳-۲- ب- بررسی پایداری (کمانش) پانل

برای در نظر گرفتن مسئله کمانش صفحه فولادی در پانل دیوار برشی فولادی ناگزیر به اعمال بار واحد در صفحه فولادی می‌باشیم. در آنالیز کمانشی، مودی که به تشکیل خطوط قطری نزدیکتر است انتخاب گشته، آنگاه آنالیزهای الاستیک یا پلاستیک انجام می‌گیرد. در صورت انجام آنالیز پلاستیک بایستی مشخصات و شکل منحنی تسلیم قبلا معرفی گردد.

نتایج تحلیل‌های انجام یافته به روش سختی-مقاومت، مقدار جابجایی را در بالاترین طبقه در تراز تیر بالائی مقدار  $۲۹/۶۰$  میلی‌متر نشان می‌دهد، در حالیکه نتیجه آزمایش عدد  $۳۰$  میلی‌متر را گزارش کرد. مدل المان محدود ساخته شده توسط مؤلف نیز عدد  $۲۸/۸۰۲$  میلی‌متر را در تراز مربوطه به دست داد، که مطابق آزمایش امکان کمانش صفحه وجود داشت. این نتایج خود حکایت از دقت بالای تحلیل کلاسیک و مدل المان محدود دارد و نشانگر کالیبراسیون بالای این مدل می‌باشد. همانطور که اشاره شد، در روش اجزاء محدود، تغییر مکان‌های کوچکتری حاصل می‌شود که این مطلب در گزارش سال  $۱۹۹۷$  دانشگاه آلبرتا نیز آورده شده است.

### ۳- پانل دیوار برشی فولادی یک طبقه با ورق نازک

یک دیوار برشی فولادی تحت اثر نیروی جانبی که با توجه به ظرفیت برشی پانل فولادی، به دست آمده است، در نظر گرفته می‌شود (شکل ۳-۱). با فرض اینکه اتصال بین تیر و ستون‌ها گیردار بوده و تیر فوقانی و ستون‌ها با توجه به ضوابط تیروورق‌ها طراحی گردند، نیروی برشی طبقه را در ضریب اطمینان  $۱/۷$  ضرب کرده، تا بار نهایی پانل برشی به دست آید. مشخصات فولاد مصرفی عبارتند از: تنش حد جاری شدن فولاد  $E=206 \text{ KN/mm}^2$ ، ضریب ارتجاعی فولاد  $\sigma_0=235 \text{ N/mm}^2$ ، ضریب پواسون فولاد  $\mu=0.3$ .



شکل ۳-۱- دیوار برشی فولادی یک طبقه تحت اثر نیروی جانبی

با توجه به فوق‌العاده بودن بارگذاری، لازم است بار نهایی فوق در ضریب  $۱/۷۵$  ضرب گردد، تا بار طراحی پانل به دست آید.

$$F_u = 5000 \times 1.7 = 8500 \text{ KN}, \quad (۱-۳)$$

$$F = 8500 \times 0.75 = 6375 \text{ KN}$$

#### ۵- پانل دیوار برشی فولادی چهار طبقه با ورق فولادی نازک

سازه مورد بحث یک پانل دیوار برشی فولادی چهار طبقه دارای اتصالات تیر به ستون گیردار می‌باشد. عرض دهانه و ارتفاع طبقه در قاب به ترتیب برابر ۶۵۰۰ و ۳۰۰۰ میلی‌متر است. ضخامت پانل فولادی نیز مطابق همان بار جانبی ۵۰۰۰ کیلو نیوتن با توجه به محاسبات، برابر ۵ میلی‌متر اختیار می‌گردد. تیر فوقانی و ستون‌ها مطابق همان مقطع معرفی شده در بخش ۳ در نظر گرفته می‌شود. بار جانبی ۵۰۰۰ KN نیز مطابق اصول توزیع استاتیکی بارهای جانبی به نسبت ارتفاع طبقات از تراز پایه در تراز تیرها به پانل اعمال می‌گردد.

$$F_1=500 \text{ KN}; F_2=1000 \text{ KN}; F_3=1500 \text{ KN}; \\ F_4=2000 \text{ KN} \quad (1-5)$$

#### ۱-۵- تحلیل با استفاده از روابط سختی و مقاومت (مطالعات تئوریک)

در این مرحله امکان وقوع کمانش را به صفحه فولادی خواهیم داد. مقادیر جابجایی تیرهای طبقات مطابق محاسبات انجام یافته با استفاده از مطالعات در شکل (۱-۸) نشان داده شده است [۶].

#### ۲-۵- تحلیل به روش اجزاء محدود

نتایج در شکل (۱-۸) نمایش داده شده است.

#### ۶- پانل دیوار برشی فولادی چهار طبقه با ورق فولادی تقویت شده

#### ۱-۶- تحلیل با استفاده از روابط سختی و مقاومت (مطالعات تئوریک)

نتایج به روش کلاسیک در شکل (۱-۸) نشان داده شده است [۶].

#### ۲-۶- تحلیل به روش اجزاء محدود

نتایج با استفاده از نرم‌افزار ANSYS در مرحله الاستیک انجام یافته و محاسبات انجام یافته به روش فوق و نیز روش کلاسیک در شکل (۱-۸) نمایش داده شده است [۶].

در این آنالیز امکان کمانش برای صفحه فولادی وجود دارد و بار کمانشی برابر ۱۰ درصد بار نهایی وارده، یعنی مقدار ۵۰۰ کیلو نیوتن می‌باشد.

#### ۳-۲- ج- مرحله پلاستیک

در این مرحله پس از انجام آنالیز مقدار جابجایی تیر فوقانی برابر با ۸/۰۵ میلی‌متر به دست می‌آید.

#### ۴- پانل دیوار برشی فولادی یک طبقه با ورق فولادی تقویت شده

#### ۱-۴- تحلیل پانل توسط روابط سختی و مقاومت

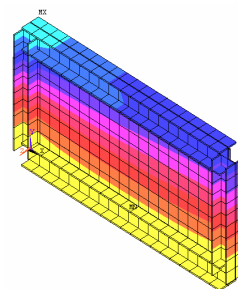
با استفاده از روش ارائه شده در بخش ۳ مقادیر جابجایی‌های خمشی، برشی و کل برای دیوار برشی با ورق فولادی تقویت شده که امکان کمانش خارج از صفحه و تشکیل میدان کششی قطری برای آن وجود ندارد، در انتهای تیر فوقانی به ترتیب ۴/۰۹۶، ۰/۲۹۸۹ و ۴/۳۹۵ میلی‌متر به دست می‌آید. در واقع فرض بر این است که ورق فولادی کمانه نکرده و تغییر مکان جانبی آن در حد صفر باشد.

#### ۲-۴- تحلیل به روش اجزاء محدود

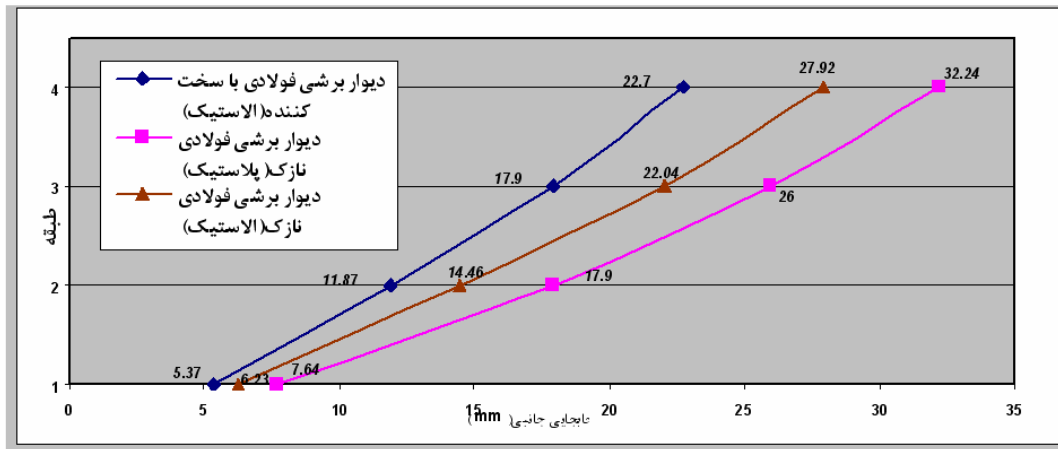
با استفاده از نرم‌افزار ANSYS مقادیر به دست آمده توسط آنالیز در مرحله الاستیک مطابق با شرح زیر می‌باشد.

#### ۲-۴- الف- مرحله الاستیک

مقدار جابجایی تیر فوقانی برابر با ۴/۱۷۰ میلی‌متر به دست می‌آید. قابل توجه است که در این مرحله به دلیل وجود سخت‌کننده، امکان کمانش برای صفحه وجود ندارد.



شکل ۴-۱- تغییر شکل جانبی پانل یک طبقه تقویت شده-الاستیک



شکل ۸-۱- نمودار جابجایی جانبی انتهای تراز تیرهای طبقات در سیستم دیوار برشی فولادی چهار طبقه

۷- رابطه بین سختی‌های دیوار برشی فولادی در حالات با سخت کننده و بدون سخت کننده

نتایج محاسبات در جدول (۷-۱) نشان داده شده است.

جدول ۷-۱- مقایسه سختی‌ها و وزن سیستم‌های با و بدون سخت کننده [۸]

	وزن (kg)	سختی (kN/mm)
دیوار برشی فلزی بدون سخت کننده	۱۰۶۰	۷۷۳/۲۱
دیوار برشی فلزی با سخت کننده‌های افقی و قائم ۱۰×۶۰ در دو سمت ورق فلزی	۱۲۰۶/۵	۱۰۷۵/۶

۸- محاسبه ضرایب شکل پذیری تغییرمکانی و رفتار دیوار برشی فولادی نازک

ضریب شکل پذیری تغییرمکانی واقعی طبقه طبق نظریه پوپوف در سال ۱۹۸۰ به صورت نسبت تغییرمکان جانبی ماکزیمم به تغییرمکانی که جاری شدن قابل توجهی در آن روی میدهد، تعریف میشود. بنابراین برای ضریب شکل پذیری تغییرمکانی واقعی مقدار ۱۰/۵ حاصل میگردد. همچنین طبق آیین نامه ملی ساختمان کانادا (NBCC) ضریب رفتار از رابطه

به دست می‌آید. در این رابطه  $U_{max}$  تغییرمکان ماکزیمم پلاستیک سیستم،  $U_y$  تغییرمکان حد جاری شدن و  $S$  ضریب کالیبراسیون و برابر ۰/۶ میباشد. در نتیجه خواهیم داشت.

$$R_{SPSW} = \frac{1}{.6} \times \frac{4.3e-3}{0.72e-3} = 9.95 \approx 10 \quad (1-8)$$

در نتیجه نسبت ضریب رفتار قاب های دارای دیوار برشی فولادی نازک به ضریب رفتار قاب‌های فولادی مقدار  $\frac{R_{(SPSW)}}{R_{(MF)}} = \frac{10}{4} = 2.5$  به دست می‌آید.

۹- نتیجه گیری

با توجه به نمودارهای فوق و استفاده از بخش‌های قبل نتایج زیر حاصل می‌گردد.

۱- در سیستم دیوار برشی صفحه‌ای فولادی یک طبقه و در مرحله پلاستیک، صفحه فولادی وارد بخش پلاستیک شده و جذب انرژی و جابجایی آن بیشتر گشته، اما قاب فولادی وارد بخش پلاستیک نمی‌گردد.

۲- جابجایی جانبی تراز تیرهای طبقات در سیستم چهار طبقه در حالت پلاستیک بیشتر گردیده، و سطح زیادی از پانل فولادی در بخش پلاستیک وارد فاز غیر خطی گشته، و هنوز به باربری خود ادامه می‌دهد.

- Editors, Elsevier Applied Science Publications, London, pp. 237- 276.
- [4] Sabouri- Ghomi, S., and Roberts, T. M., (1992) "Nonlinear Dynamic Analysis of Thin Steel Plate Shear Walls", Computer and Structures, Vol 39-No 1 / 2.
- [5] Sabouri- Ghomi, S., and Roberts, T. M., (1992) "Nonlinear Dynamic Analysis of Steel Plate Shear Walls Including Shear and Bending Deformations", Engineering Structures, 14, no. 5, pp.309-317.
- [۶] صبوری-سعید، حاتمی-فرزاد؛ (۱۳۸۱)؛ "تأثیر تقویت تیر بر روی دیوارهای برشی فولادی"؛ پایان نامه کارشناسی ارشد سازه؛ دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.
- [۷] وتر-ابوالقاسم، راغب-مهدی؛ (۱۳۸۲)؛ "کاربرد دیوارهای برشی فولادی در مقاوم سازی لرزه‌ای سازه"؛ پایان نامه کارشناسی ارشد سازه؛ پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
- [۸] رهایی-علیرضا، حاتمی-فرزاد، راغب-مهدی؛ (۱۳۸۵)؛ "بررسی دیوار برشی فولادی با دیوار برشی بتن آرمه"؛ همایش بین‌المللی مقاوم سازی لرزه‌ای؛ اردیبهشت ۸۵؛ تهران.
- ۳- جابجایی جانبی سیستم تقویت شده نسبت به سیستم دیوار برشی با صفحه نازک که امکان کمانش آن وجود ندارد، کمتر است.
- ۴- با توجه به جدول (۷-۱) در دیوار برشی فلزی با سخت کننده بدلیل داشتن سختی بیشتر در مقایسه با دیوار برشی بدون سخت کننده، با وجود تغییر مکان کمتر، شکل‌پذیری پایین‌تری داشته و امکان پخش تنش و نهایتاً توزیع مناسب تر تنش در المان‌های کناری را نخواهد داشت.
- ### مراجع
- [1] Astaneh- Asl, A., (2000-2001), "Seismic Behavior and Design of Steel Shear Walls", Steel TIPS Report, Structural Steel Educational Council, Moraga,
- [2] Astaneh- Asl, A., (2001), "Seismic Behavior and Design of Composite Shear Walls", Steel TIPS, Report, Structural Steel Educational Council, Moraga, CA. Driver, R. G., Kulak, Elwi, A. E. and G. L., Kennedy, D. J. L., (1998) "FE and Simplified Models of Steel Plate Shear Wall", Journal of Structural Engrg., ASCE Vol. 124, No. 2, Feb., pp.121-130.
- [3] Kulak, G. L. (1991). "Unstiffened Steel Plate Shear Walls", Chapter 9 of Structures Subjected to Repeated Loading- Stability and Strength", Narayanan R. and Roberts, T. M.,

$$R_{SPSW} = \frac{1}{.6} \times \frac{4.3e-3}{0.72e-3} = 9.95 \approx 10 \text{ - } \lambda$$