

# بررسی منحنی های پوش دیوارهای برشی فولادی تقویت شده

سعید صبوری<sup>i</sup>؛ صلاح الدین مام عزیز<sup>ii</sup>

## چکیده

دیوارهای برشی فولادی به عنوان یک سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی در ساختمان ها مورد استفاده قرار می گیرند. از مهم ترین خصوصیات این سیستم می توان به ظرفیت جذب انرژی بالا و هم چنین سختی، مقاومت و شکل پذیری قابل توجه آن اشاره کرد. شناخت کارآیی و رفتار کلی سیستم دیوارهای برشی فولادی نیازمند انجام آزمایش های مختلف می باشد. با توجه به داده های آزمایشگاهی می توان به نتایج تئوریک به دست آمده اطمینان کرد و این نتایج را در مقاصد طراحی و عملی به کار برد.

این تحقیق، مبتنی بر آزمایش های انجام شده بر روی دیوارهای برشی فولادی تقویت شده می باشد. نمونه های تست شده در آزمایشگاه با نرم افزار ANSYS مدل شده و نتایج به دست آمده شامل منحنی های پوش با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. هم چنین منحنی های پوش نتایج آزمایشگاهی با منحنی های پوش به دست آمده از روش اندرکنش قاب و ورق (PFI<sup>iii</sup>) صبوری-رابرتز مقایسه شده که تطابق بسیار خوبی را نشان می دهند. علاوه بر آن در این تحقیق، ایده استفاده از فولاد جاذب انرژی در سیستم دیوارهای برشی فولادی مورد استفاده قرار گرفت و با استفاده از فولاد نرم، با حد جاری شدن  $100N/mm^2$  حدوداً ۲.۵ برابر کمتر از حد جاری شدن فولاد ساختمانی به کار رفته در آزمایش ها مشاهده شد که به همین نسبت، تغییر مکان حد جاری شدن سیستم، کاهش می یابد.

## کلمات کلیدی

دیوار برشی فولادی تقویت شده، سخت کننده، منحنی پوش، تحلیل کمانشی غیر خطی، فولاد نرم

## *The Study of Stiffened Steel Shear Walls Pushover Curves*

S. Sabouri; S. Mamazizi

### ABSTRACT

Steel shear walls are used as a lateral load resisting system in structures. One of the most important characteristics of this system known as high energy absorption capacity, remarkable stiffness, strength, and ductility. For practical design purposes, the knowledge of the general behavior of steel shear walls is needed. This empirical data could be obtained by conducting experimental and theoretical works.

In this study the tests conducted on stiffened steel shear walls were considered. Samples tested in the laboratory were modeled using ANSYS program and obtained results including pushover were compared with empirical data. In addition pushover curves for laboratory data were compared with those obtained by Plate Frame Interaction (PFI) method of Sabouri-Roberts. A good correspondence is observed. Furthermore, in this study the idea of using EGS in steel shear walls was tested. It was seen that using EGS system with yielding point  $100N/mm^2$  that is about 2.5 times less than yielding point of steel which was used in the tests, corresponding displacement with yielding point decreases in the same ratio.

<sup>i</sup> استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران : Email: sabouri@kntu.ac.ir

<sup>ii</sup> کارشناس ارشد مهندسی سازه دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران : Email: arman831@yahoo.com

<sup>iii</sup> Plate-Frame Interaction

## KEY WORDS

Stiffened steel shear wall, stiffener, pushover curves, nonlinear buckling analysis, EGS system

۲) روش اندرکنش قاب و ورق (PFI) (روش صبوری- روبرتز)

در روش نواری که توسط کولاک و همکارانش ارائه شد، پانل‌ها ی برشی به صورت مجموعه‌ای از اعضای نواری مورب مدل شده‌اند که فقط قادر به تحمل نیروهای کششی می‌باشند و در همان جهت تنشهای کششی اصلی در پانل قرار می‌گیرند و استفاده از آن فقط محدود به دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک است [۱۰].

در روش دوم، صبوری و همکار، یک روش کلی برای تحلیل دیوارهای برشی فولادی در حالت‌های مختلف با سخت‌کننده، بدون سخت‌کننده، با بازشو و بدون بازشو، با ورق نازک و با ورق ضخیم ارائه داده‌اند که رفتار ورق و قاب را به صورت مجزا بررسی کرده و اندرکنش این دو المان را باهم در نظر می‌گیرند [۵].

با توجه به عدم کارآیی روش اول برای دیوارهای برشی فولادی تقویت شده، تنه‌اروش دوم مورد توجه قرار می‌گیرد و دقت آن در پیش‌بینی رفتار این دیوارها بررسی می‌شود.

## ۲- مروری بر آزمایش‌های انجام شده

در سال ۱۹۷۰، دو سری آزمایش بر روی دیوارهای برشی فولادی انجام شد. در سری اول دوازده پانل یک طبقه یک دهانه با ضخامت‌های ورق  $2/3$ ،  $3/2$  و  $4/5$  میلی متر و آرایشهای مختلف سخت‌کننده‌ها و در سری دوم آزمایش‌ها، دو نمونه از دیوار برشی فولادی دو طبقه یک دهانه، یکی بدون بازشو و دیگری با یک بازشو در هر طبقه، تحت بارگذاری دوره ای مورد آزمایش قرار گرفتند [۸]، که در تحقیق حاضر، آزمایش‌های سری اول مورد بررسی قرار گرفته اند.

آرایش مختلف سخت‌کننده‌ها در آزمایش در شکل (۱) آورده شده است. سخت‌کننده‌ها به صورت یک طرفه و دوطرفه در پانل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. مشخصات کلی نمونه‌ها و ترتیب قرارگیری سخت‌کننده‌ها و خصوصیات مصالح مورد استفاده در آزمایش‌ها در جدول (۱) داده شده است.

همان گونه که در جدول (۱) مشاهده می‌شود، به غیر از نمونه اول که یک پانل با ضخامت ورق  $2/3$  میلی متر و بدون سخت‌کننده است، بقیه نمونه‌ها دارای یک عنوان چهار قسمتی اند که قسمت اول نشان‌دهنده ورق فولادی تقویت شده، قسمت دوم نشان‌دهنده ضخامت ورق فولادی بر حسب میلی متر، قسمت سوم نشان‌دهنده نوع آرایش سخت‌کننده‌ها و قسمت

## ۱- مقدمه

دیوار برشی فولادی یک سیستم باربر جانبی است که در سه دهه اخیر بیشتر در ساختمانهای بلند مرتبه مورد استفاده قرار گرفته است. در سازه‌ها به دو صورت تقویت شده و تقویت نشده کاربرد دارد. نوع تقویت شده آن بیشتر در ژاپن و نوع تقویت نشده آن در امریکا و کانادا به کار رفته است [۶].

سیستم دیوار برشی فولادی شامل ورق‌های پرکننده فولادی است که پیرامون آن را سیستم تیرها و ستون‌ها در بر گرفته است. تقویت آن علاوه بر افزایش ضخامت ورق که در اکثر موارد غیر اقتصادی است از طریق اضافه کردن سخت‌کننده‌هایی به صورت افقی و عمودی در یک طرف یا دو طرف ورق پرکننده ممکن است [۵].

استفاده از این سیستم با تکیه بر مطالعات تجربی انجام شده محققان در این زمینه، هم از نظر بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه و هم از نظر اقتصادی قابل توجه است [۹].

تقویت ورق فولادی با استفاده از سخت‌کننده‌ها به منظور جلوگیری از کماتش کلی ورق فولادی به خصوص در ناحیه الاستیک انجام می‌شود. با توجه به مقاومت بالای ورق فولادی، با بهره‌گیری از مقاومت پس کماتش آن، ضخامت ورق حتی در دیوارهای برشی فولادی سازه‌های بلند و برای نیروهای برشی بزرگ، کم و یا به عبارت دیگر ورق فولادی نازک است. بدین لحاظ می‌توان برای جلوگیری از کماتش آن تحت تاثیر بارهای سرویس و به جای افزایش ضخامت ورق از سخت‌کننده‌ها برای تقویت آن استفاده نمود. تقویت ورق، نه تنها از کماتش آن تحت تاثیر بارهای سرویس جلوگیری می‌کند، بلکه باعث بهبود رفتار آن به‌ویژه در ناحیه پلاستیک می‌شود [۱].

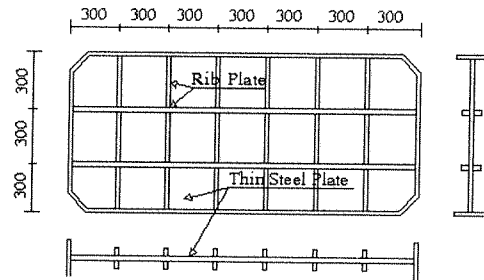
در این تحقیق، عملکرد دیوارهای برشی فولادی تقویت شده بر مبنای کارهای آزمایشگاهی تاکاهاشی و همکاران [۸] مورد بررسی قرار می‌گیرد. علاوه بر آن با استفاده از همان نمونه‌های آزمایشگاهی، ایده استفاده از فولاد نرم که حدود ۱۸ سال قبل و برای اولین بار توسط صبوری و روبرتز مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت [۴] و اخیراً نیز توسط صبوری در مرجع [۲] مطرح گردیده است، به کارگرفته شده و با بررسی نتایج حاصل، به مزایای استفاده از فولاد نرم در دیوارهای برشی فولادی پرداخته می‌شود.

دیوارهای برشی فولادی با استفاده از دو روش کلی تحلیل و طراحی می‌شوند:

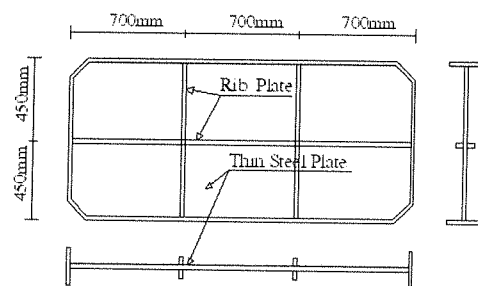
۱) روش نواری

چهارم عرض ورق های سخت کننده را بر حسب میلی متر نشان می دهد.

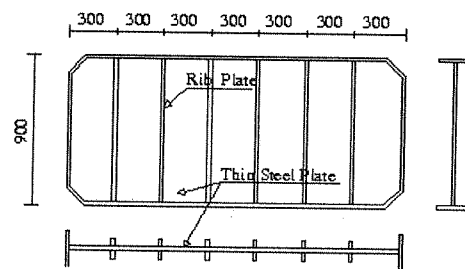
یک قاب مستطیلی کاملاً سخت که اتصالات تیر و ستون های آن به صورت مفصلی است، پیرامون ورق فولادی قرار گرفته و ورق فولادی با پیچهایی با مقاومت کششی بالا به قاب متصل شده است. برای اعمال نیروی برشی به نمونه، نیروی فشاری در یک جهت قطری قاب ایجاد می شود. وقتی تغییر مکان سیستم به مقادیر مورد نظر می رسد، نمونه در جهت دیگر قطری بارگذاری می شود.



الف) آرایش M2



ب) آرایش M1



ج) آرایش G

شکل (۱): آرایش مختلف سخت کننده ها در آزمایش ها

دست آمده که در حالت های (۱)، (۲) و (۳) از تحلیل استاتیکی غیرخطی استفاده شده است:

حالت (۱) مشخصات فولاد به کار رفته در مدل ها دقیقاً مشابه نمونه های آزمایشگاهی متناظر است، (حالت PFEM).

حالت (۲) فولاد به کار رفته در مدل های تحلیل شده از نوع فولاد نرم با تنش جاری شدن  $100 N/mm^2$  است. در این مدل ها برای دستیابی به مقاومت یکسان در هر دو حالت، ضخامت ورق فولادی به نسبت حد جاری شدن فولاد به کار رفته در آزمایش به فولاد نرم، افزایش داده شده است، (حالت PEGS).

علت استفاده از فولاد نرم در این حالت، کنترل خاصیت به کارگیری EGS (Easy-Going Steel) بوده همان گونه که در مرجع شماره [۲] مطرح گردیده است. در این مرجع، EGS یک مفهوم عام دارد و با کاربرد نوع خاصی از فولاد در سازه معنی اصلی خود را پیدا می کند. در حقیقت وقتی در یک سازه مشخص، در قسمت جاذب انرژی از فولادی با تنش تسلیم پائین تری نسبت به فولاد سایر اعضای سازه استفاده می شود، مفهوم EGS به کار برده شده است. وقتی در عضوی از سازه که وظیفه جذب انرژی و استهلاک آن را برعهده دارد، از فولاد با تنش تسلیم پائین تری نسبت به سایر اعضا استفاده می شود، این عضو در تغییر مکان کمتری وارد قسمت غیرخطی شده و شروع به جذب انرژی می نماید، بدین ترتیب سایر اعضای اصلی و باربر سازه از گزند آسیب های جدی در امان می مانند و در واقع راز استفاده از مفهوم EGS در همین نهفته است.

به این ترتیب، مفهوم EGS انواع گوناگونی از فولادها از قبیل فولاد نرم ساختمانی (Mild Steel)، فولاد با تنش تسلیم پایین (LYP) و فولادهای مابین این دو را در برمی گیرد. کاربرد آن در دیوارهای برشی فولادی بدین گونه است که ورق این نوع دیوارها که عضو اصلی جاذب انرژی می باشند، از فولاد با تنش تسلیم پائین تری نسبت به ستون ها و تیرهای قاب پیرامون، استفاده می شود.

حالت (۳) فولاد به کار رفته در مدل های تحلیل شده از نوع فولاد مصرفی در نمونه های آزمایشگاهی است، اما سطح مقطع ورق فولادی (ضخامت ورق فولادی) دو برابر شده است، (حالت P2TW).

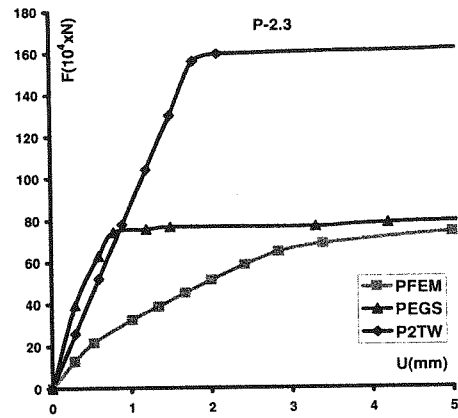
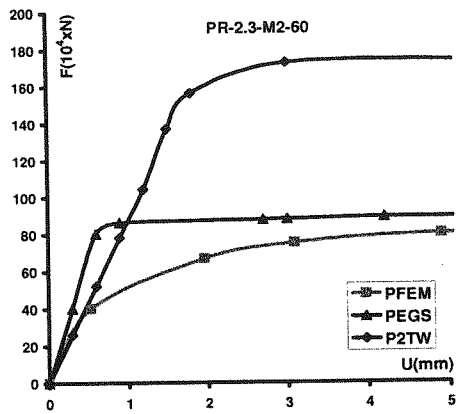
نتایج حالت های (۱)، (۲) و (۳) برای هر مدل در شکل های (۲) تا (۱۴) با هم مقایسه شده اند.

حالت (۴) با استفاده از منحنی های هیستریزیس به دست آمده از آزمایش ها بهترین منحنی دو خطی پوش برای هر نمونه رسم شده است، (حالت PTST).

حالت (۵) با استفاده از روش PFI برای هر کدام از نمونه ها نقاط لازم برای رسم منحنی پوش محاسبه شده است، (حالت

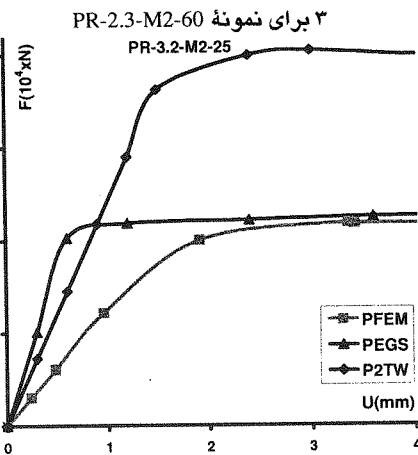
### ۳- منحنی های پوش

برای به دست آوردن منحنی های پوش، تحلیل استاتیکی غیرخطی انجام شده است. این تحلیل با کنترل تغییر مکان صورت گرفته است. تغییر مکان اعمال شده به نمونه ها در مدل های اجزای محدود بر اساس حداکثر تغییر مکان اعمال شده در آزمایش ها انتخاب شده اند. منحنی های پوش در پنج حالت به

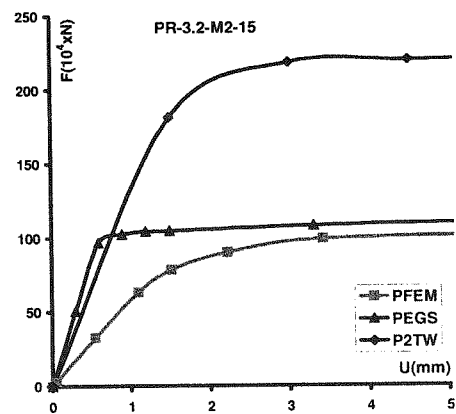


شکل (۳): مقایسه منحنی‌های پوش در حالت های ۱، ۲ و ۳

شکل (۲): مقایسه منحنی‌های پوش در حالت های ۱، ۲ و ۳



شکل (۴): مقایسه منحنی‌های پوش در حالت های ۱، ۲ و ۳

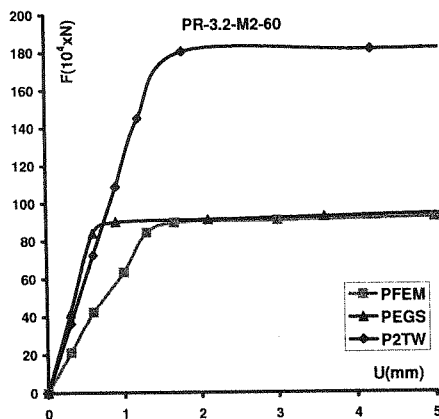


شکل (۵): مقایسه منحنی‌های پوش در حالت های ۱، ۲ و ۳

شکل (۴): مقایسه منحنی‌های پوش در حالت های ۱، ۲ و ۳

برای نمونه PR-3.2-M2-25

برای نمونه PR-3.2-M2-15

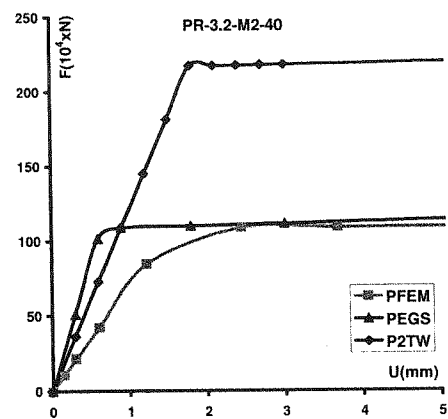


شکل (۷): مقایسه منحنی‌های پوش در حالت های ۱، ۲ و ۳

شکل (۶): مقایسه منحنی‌های پوش در حالت های ۱، ۲ و ۳

برای نمونه PR-3.2-M2-60

برای نمونه PR-3.2-M2-40

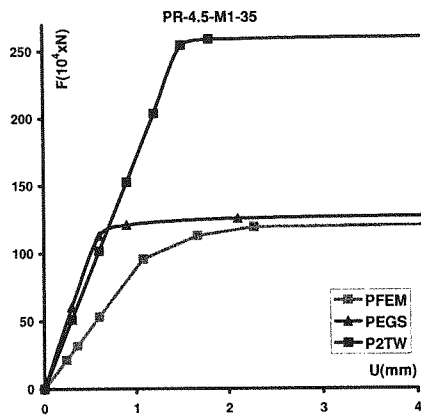


جدول (1): نتایج به دست آمده از تست مدل های آزمایشگاهی

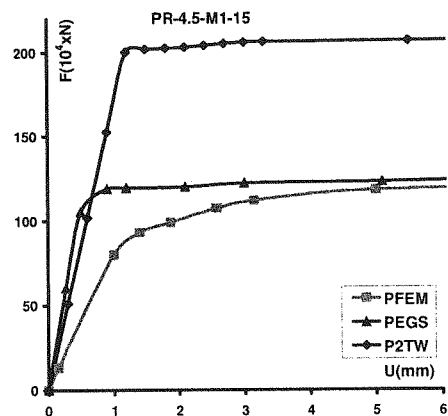
نویسه ها	t (mm)	سخت کننده ها				خصومیات مصالح		نتایج محاسباتی					حداکثر تنش انداز مگری شده (N/mm <sup>2</sup> )
		مساحت مقطع (mm <sup>2</sup> )	نوع آرایش	ممان اینرسی سخت کننده ها (I) (mm <sup>4</sup> )	تنش جاری شدن (N/mm <sup>2</sup> )	تنش حداکثر (N/mm <sup>2</sup> )	تنش کشایی (N/mm <sup>2</sup> )	تنش کششی جاری شدن (N/mm <sup>2</sup> )	تنش برشی جاری شدن (N/mm <sup>2</sup> )	تنش کسب چنگی (N/mm <sup>2</sup> )			
P-2.3	2.3	..	....	.....	310	504	6	155	178	252	166		
PR-2.3-M2-60	2.3	4.5 x 60	دو طرف M2	8.1e4	310	504	105	155	178	252	214		
PR-3.2-M2-15	3.2	3.2 x 15	یک طرف M2	0.36e4	280	451	50	140	162	226	172		
PR-3.2-M2-25	3.2	3.2 x 25	یک طرف M2	1.67e4	280	451	130	140	162	226	175		
PR-3.2-M2-40	3.2	3.2 x 40	دو طرف M2	1.71e4	280	451	130	140	162	226	173		
PR-3.2-M2-60	3.2	4.5 x 60	دو طرف M2	8.1e4	232	380	130	116	134	190	171		
PR-4.5-M1-15	4.5	4.5 x 15	یک طرف M1	0.51e4	237	354	41	119	137	177	142		
PR-4.5-M1-35	4.5	4.5 x 35	یک طرف M1	6.43e4	237	354	105	119	137	177	142		
PR-4.5-M1-55	4.5	4.5 x 55	دو طرف M1	6.24e4	237	354	104	119	137	177	148		
PR-4.5-G-10	4.5	4.5 x 10	یک طرف G	0.15e4	237	354	37	119	137	177	139		
PR-4.5-G-30	4.5	4.5 x 30	یک طرف G	4.05e4	237	354	130	119	137	177	147		
PR-4.5-G-50	4.5	4.5 x 50	دو طرف G	4.67e4	237	354	130	119	137	177	151		

\*  $8/1e4 = 8/1 \times 10^4$

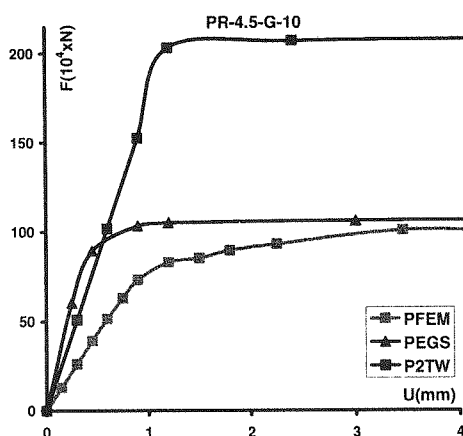




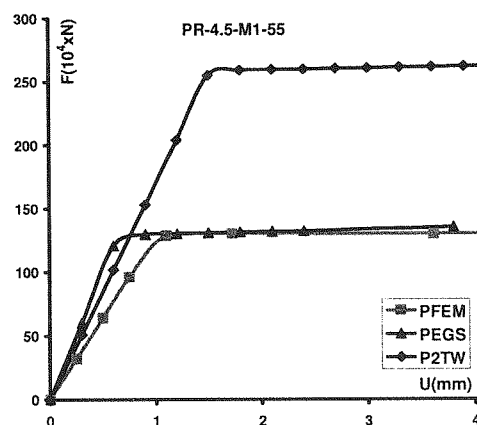
شکل (۹): مقایسه منحنی‌های پوش در حالت های ۱، ۲ و ۳ برای نمونه PR-4.5-M1-35



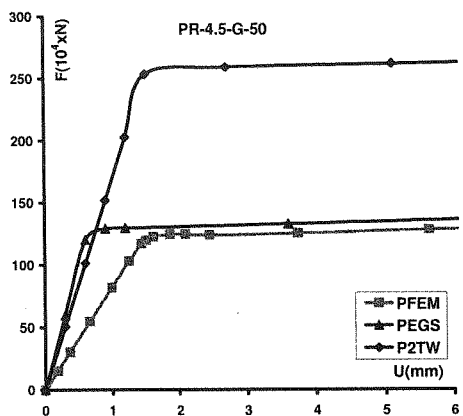
شکل (۸): مقایسه منحنی‌های پوش در حالت های ۱، ۲ و ۳ برای نمونه PR-4.5-M1-15



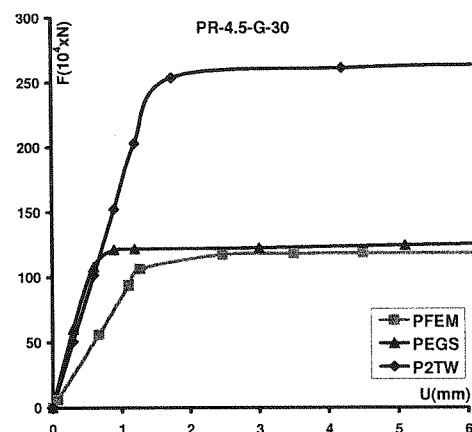
شکل (۱۱): مقایسه منحنی‌های پوش در حالت های ۱، ۲ و ۳ برای نمونه PR-4.5-G-10



شکل (۱۰): مقایسه منحنی‌های پوش در حالت های ۱، ۲ و ۳ برای نمونه PR-4.5-M1-55



شکل (۱۳): مقایسه منحنی‌های پوش در حالت های ۱، ۲ و ۳ برای نمونه PR-4.5-G-50



شکل (۱۲): مقایسه منحنی‌های پوش در حالت های ۱، ۲ و ۳ برای نمونه PR-4.5-G-30

همان طور که انتظار می‌رود با مقایسه منحنی پوش در حالت های فولاد عادی (حالت PFEM) و فولاد نرم (حالت PEGS) مشاهده می‌شود که سختی سیستم در حالت استفاده از فولاد نرم بیشتر است و مهم تر این که سازه در تغییر مکان

شکل (۱۲): مقایسه منحنی‌های پوش در حالت های ۱، ۲ و ۳ برای نمونه PR-4.5-G-30

است که در این محاسبات،  $\sigma_{xy}$  (تنش حد جاری شدن میدان کششی به وجود آمده در ورق فولادی) با توجه به رابطه (۱) با فرض  $\theta = 45^\circ$ ،  $U_{we}$  (تغییر مکان برشی حد الاستیک ورق فولادی) در رابطه (۲) و  $F_{vw}$  (بار برشی نهایی ورق فولادی) در رابطه (۳) محاسبه شده است:

$$3\tau_{cr}^2 + 3\tau_{cr}\sigma_{xy}\sin 2\theta + \sigma_{xy}^2 - \sigma_y^2 = 0 \quad (1)$$

$$U_{we} = d \left( \frac{\tau_{cr}}{G} + \frac{2\sigma_{xy}}{E \sin 2\theta} \right) \quad (2)$$

$$F_{vw} = bt \left( \tau_{cr} + \frac{\sigma_{xy} \sin 2\theta}{2} \right) \quad (3)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

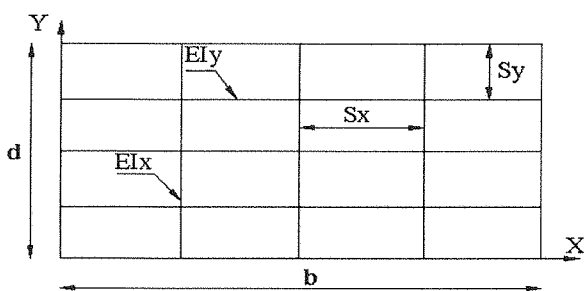
در روابط (۱) تا (۴)،  $\tau_{cr}$  تنش بحرانی کمانش ورق فولادی،  $\theta$  زاویه میدان کششی به وجود آمده در ورق فولادی،  $\sigma_y$  تنش کششی جاری شدن ورق فولادی،  $d$  و  $b$  به ترتیب ارتفاع و عرض ورق (شکل ۱۴)،  $G$  مدول برشی فولاد،  $E$  مدول الاستیسیته فولاد،  $t$  ضخامت ورق فولادی و  $\nu$  ضریب پواسون است.

تنش برشی بحرانی در حالت کمانش کلی با فرض اورتوتروپیک بودن<sup>۱</sup> کل ورق محاسبه می‌شود، یعنی ورق تقویت شده در دو جهت مانند صفحه‌ای عمل می‌کند که در دو جهت دارای سختی‌های متفاوتی است، در این صورت تنش بحرانی برای کمانش کلی از رابطه (۵) به دست می‌آید [۷].

$$\tau_{erg} = \left( D_x^{0.75} D_y^{0.25} \right) \frac{K_g \pi^2}{td^2} \leq \tau_{sy} \quad (5)$$

$$D_x = \frac{EI_x}{s_x} + \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (6)$$

$$D_y = \frac{EI_y}{s_y} + \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (7)$$



شکل (۱۴): ورق فولادی تقویت شده

در روابط (۵) و (۶) و (۷)،  $I_x$  و  $I_y$  به ترتیب ممان اینرسی سخت کننده‌ها در جهت  $X$  و  $Y$  و حول محور گذرنده از مرکز ورق است.  $s_x$  و  $s_y$  به ترتیب فاصله سخت کننده‌ها در جهت  $X$  و  $Y$  (شکل ۱۴) و  $K_g$  ضریب کمانشی کلی است که با توجه به شرایط مرزی ورق دیوار برشی تعیین می‌شود.  $\tau_{sy}$  تنش

کمتری به حد الاستیک می‌رسد (تقریباً به نسبت حد جاری شدن فولاد ورق مورد آزمایش به فولاد نرم انتخاب شده است)، یعنی سازه در تغییر مکان کمتری وارد ناحیه پلاستیک شده و شروع به جذب انرژی می‌کند. علت استفاده از فولاد نرم این است که بدون آسیب دیدن اجزای اصلی باربر سازه مانند ستون‌ها و تیرها، آن قسمت از سازه که وظیفه جذب انرژی را بر عهده دارد، زودتر شروع به جذب انرژی کند و این مهم به خوبی در نمودارهای به دست آمده مشاهده می‌شود.

نمودارهای به دست آمده از حالت (۳) (حالت P2TW) نشان می‌دهند که با افزایش سطح مقطع فولاد عادی، مقاومت سازه به همان نسبت افزایش می‌یابد، اما در تغییر مکان حد الاستیک سیستم نسبت به حالت (۱) تغییری حاصل نمی‌شود، و سازه در همان تغییر مکان قبلی شروع به جذب انرژی می‌کند. این مطلب حاکی از آن است که با افزایش مقطع می‌توان سختی سیستم را بالا برد ولی نمی‌توان در کاهش تغییر مکان حد الاستیک تغییری ایجاد کرد.

در مورد نمونه‌های P-2.3، PR-3.2-M2-15، PR-4.5-M1-15 و PR-4.5-G-10 در حالت (۱) مشاهده می‌شود که کمانش کلی در ناحیه الاستیک و در مورد نمونه PR-2.3-M2-60 کمانش موضعی در زیر پانل‌ها در ناحیه الاستیک رخ می‌دهد و بیشتر مقاومت نهایی ورق ناشی از خاصیت پس‌کمانشی است. در مورد نمونه PR-2.3-M2-60 کمانش موضعی در همه زیر صفحه‌ها با هم اتفاق نمی‌افتد، زیرا مقاومت ورق به صورت تدریجی است و نمودار در ناحیه الاستیک هم به صورت تدریجی وارد ناحیه پلاستیک می‌شود.

در مورد نمودار بقیه مدل‌ها مشاهده می‌شود که شیب قسمت اولیه تا رسیدن به حد الاستیک تقریباً یکنواخت و ثابت بوده و تغییر شیب به صورت ناگهانی است. این به دلیل رخ دادن کمانش موضعی در زیر پانل‌ها بعد از جاری شدن ورق فولادی و مقاومت پس‌کمانشی ناچیز آن است و دیگر اینکه تنش برشی در صفحه تقریباً یکسان و یکنواخت بوده و تغییر تنش در کل ورق به صورت همزمان اتفاق می‌افتد.

در مورد نمودارهای حالت (۲) و (۳) مشاهده می‌شود که در همه نمونه‌ها کمانش بعد از جاری شدن ورق فولادی به صورت موضعی و در زیر پانل‌ها اتفاق می‌افتد.

برای به دست آوردن منحنی پوش در حالت (۴) با استفاده از منحنی‌های هیستریزس آزمایش‌ها، بهترین منحنی دو خطی پوش برای هر نمونه رسم شده است.

برای رسم منحنی پوش به روش PFI [۱] لازم است محاسباتی برای به دست آوردن نقاط مورد نظر صورت گیرد که خلاصه نتایج آن در جدول (۲) آورده شده است. شایان ذکر

<sup>1</sup> Orthotropic

برشی جاری شدن ورق فولادی است که مقدار آن  $\tau_{xy} = \sigma_v / \sqrt{3}$  است.

اگر محل اتصال ورق به تیر و ستون های اطراف به صورت گیردار باشد،  $K_g = 6.9$  و اگر این شرایط به صورت ساده در نظر گرفته شود،  $K_g = 3.65$  فرض می شود. در عمل شرایط مرزی ورق دیوار برشی فولادی به صورت نیمه گیردار نزدیکتر است. با این حال اگر اتصال ورق به تیرها و ستون های اطراف به صورت جوشی باشد، شرایط به حالت گیردار و اگر اتصال ورق به صورت پیچی باشد، به حالت ساده نزدیک تر است [7].

اگر کمانش در مود موضعی اتفاق افتد، تنش برشی بحرانی الاستیک کمانش برای زیر صفحه فولادی محصور در میان سخت کننده ها ( $\tau_{cr}$ ) با فرض شرایط مرزی ساده از رابطه کلاسیک (8) به دست می آید:

$$\tau_{cr} = \frac{K_f \pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{s}\right)^2 \leq \tau_{xy} \quad (8)$$

در رابطه (8)،  $t$  ضخامت ورق فولادی و  $s$  فاصله بین سخت کننده ها است که در صورت متفاوت بودن فاصله سخت کننده ها در دو جهت کم ترین فاصله در رابطه لحاظ می شود.  $K_f$  ضریب کمانشی موضعی است که بر اساس روابط (9) و (10) تعیین می شود [1].

$$\frac{s_y}{s_x} \geq 1 \Rightarrow K_f = 5.35 + 4 \left(\frac{s_x}{s_y}\right)^2 \quad (9)$$

$$\frac{s_y}{s_x} \leq 1 \Rightarrow K_f = 5.35 \left(\frac{s_x}{s_y}\right)^2 + 4 \quad (10)$$

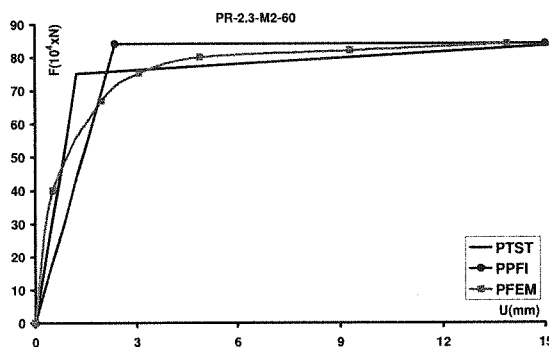
با توجه به روابط (9) و (10) تنش بحرانی کمانش تئوریک نمونه ها ( $\tau_{cr}$ ) به دست می آید که مقادیر آنها و هم چنین سایر پارامترهای مربوط به محاسبه آنها در جدول (3) آورده شده است. در محاسبات  $\nu = 0.3$  و  $E = 210000 \text{ N/mm}^2$  فرض می شود.

جدول (2): خلاصه نتایج مربوط به رسم منحنی پوش به روش PFI

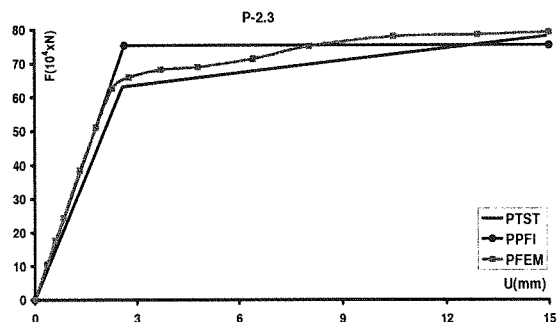
نمونه	$t$ (mm)	$\tau_{cr}$ ( $\text{N/mm}^2$ )	$\sigma_{cr}$ ( $\text{N/mm}^2$ )	$F_{wu}$ (N)	$U_{wu}$ (mm)
P-2.3	2.3	6	300	753480	2.64
PR-2.3-M2-60	2.3	104	140	840420	2.36
PR-3.2-M2-15	3.2	59	187	1024800	2.26
PR-3.2-M2-25	3.2	162	0	1088640	1.80
PR-3.2-M2-40	3.2	162	0	1088640	1.80
PR-3.2-M2-60	3.2	134	0	900480	1.49
PR-4.5-M1-15	4.5	32	187	1185975	1.96
PR-4.5-M1-35	4.5	132	9.6	1292760	1.55
PR-4.5-M1-55	4.5	132	9.6	1292760	1.55
PR-4.5-G-10	4.5	25	198	1171800	1.98
PR-4.5-G-30	4.5	137	0	1294650	1.53
PR-4.5-G-50	4.5	137	0	1294650	1.53

(3) آورده شده است. نتایج حالت های (1)، (4) و (5) برای هر مدل در شکل های (15) تا (26) با هم مقایسه شده است.

در جدول (2)،  $t$  ضخامت ورق فولادی در نمونه مربوطه است و  $\tau_{cr}$  تنش بحرانی کمانش بوده که با توجه به جدول



شکل (16): مقایسه منحنی های پوش در حالت های 1، 4 و 5 برای نمونه PR-2.3-M2-60

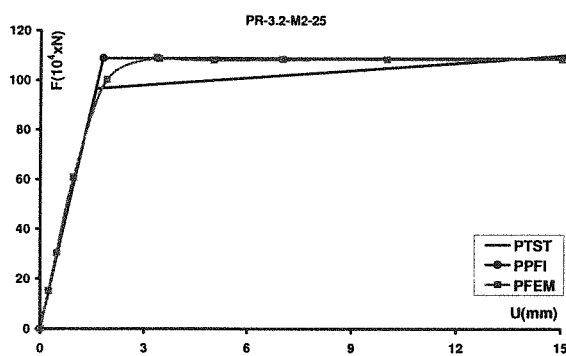


شکل (15): مقایسه منحنی های پوش در حالت های 1، 4 و 5 برای نمونه P-2.3

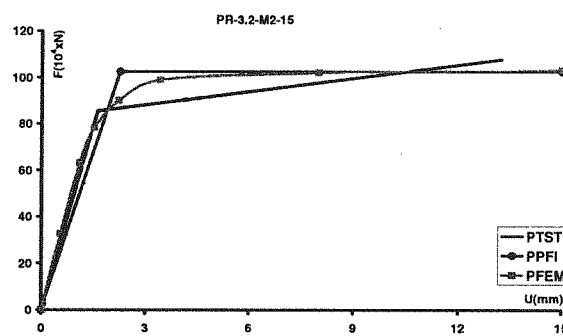


جدول (۳): نتایج روابط (۵) و (۸) برای به دست آوردن تنش کمانشی کلی و موضعی در نمونه ها و مشخص کردن نوع کمانش با استفاده از روابط تئوری

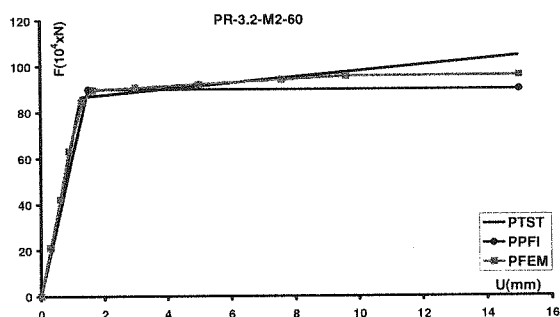
نمونه‌ها	$K_g$	$K_l$	$I_x$ ( $mm^4$ )	$I_y$ ( $mm^4$ )	$s_x$ ( $mm$ )	$s_y$ ( $mm$ )	$D_x$ ( $N.mm$ )	$D_y$ ( $N.mm$ )	$t$ ( $mm$ )	$\tau_{crs}$ ( $N/mm^2$ )	$\tau_{crl}$ ( $N/mm^2$ )	وضعیت کمانشی
P-2.3	5.06	-	-	-	-	-	-	-	2.3	6	-	کمانش کلی
PR-2.3-M2-60	5.06	9.35	8.1e4	8.1	300	300	570e5	570e5	2.3	178	104	کمانش موضعی
PR-3.2-M2-15	5.06	9.35	0.36e4	0.36	300	300	31.5e5	31.5e5	3.2	59	161	کمانش کلی
PR-3.2-M2-25	5.06	9.35	1.67e4	1.67	300	300	128.9e5	128.9e5	3.2	161	161	کمانش موضعی
PR-3.2-M2-40	5.06	9.35	1.71e4	1.71	300	300	131.7e5	131.7e5	3.2	161	161	کمانش موضعی
PR-3.2-M2-60	5.06	9.35	8.1e4	8.1	300	300	570e5	570e5	3.2	134	134	کمانش موضعی
PR-4.5-M1-15	5.06	16.94	0.51e4	0.51	700	450	31e5	39.7e5	4.5	44	132	کمانش کلی
PR-4.5-M1-35	5.06	16.94	6.43e4	6.43	700	450	211e5	318e5	4.5	132	137	کمانش موضعی
PR-4.5-M1-55	5.06	16.94	6.24e4	6.24	700	450	307e5	205e5	4.5	132	137	کمانش موضعی
PR-4.5-G-10	5.06	5.79	0.15e4	0.15	300	-	28e5	17.5e5	4.5	38	137	کمانش کلی
PR-4.5-G-30	5.06	5.79	4.05e4	4.05	300	-	301e5	17.5e5	4.5	137	137	کمانش موضعی
PR-4.5-G-50	5.06	5.79	4.67e4	4.67	300	-	360e5	17.5e5	4.5	137	137	کمانش موضعی



شکل (۱۸): مقایسه منحنی‌های پوش در حالت های ۱، ۲ و ۵ برای نمونه PR-3.2-M2-25

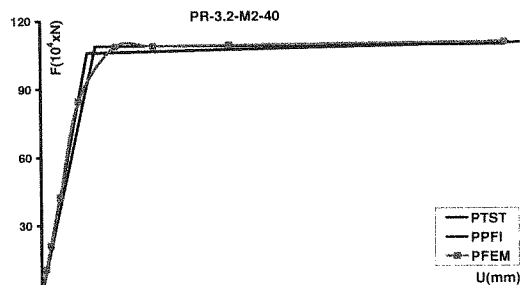


شکل (۱۷): مقایسه منحنی‌های پوش در حالت های ۱، ۲ و ۵ برای نمونه PR-3.2-M2-15



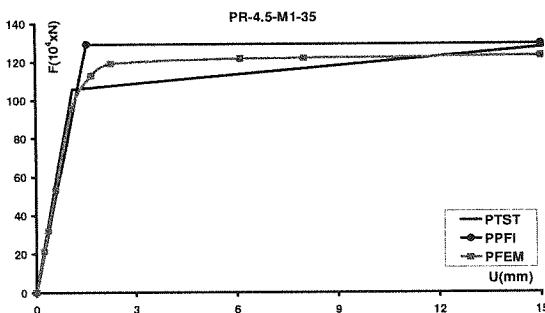
شکل (۲۰): مقایسه منحنی‌های پوش در حالت های ۴، ۱ و ۵ برای

نمونه PR-3.2-M2-60



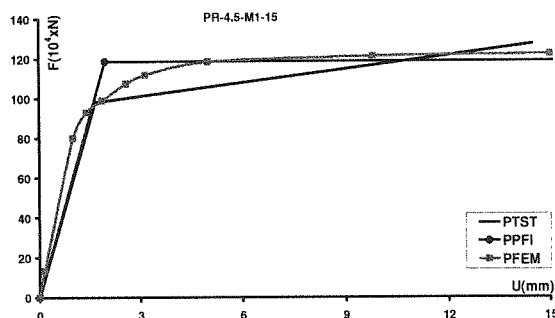
شکل (۱۹): مقایسه منحنی‌های پوش در حالت های ۴، ۱ و ۵ برای

نمونه PR-3.2-M2-40



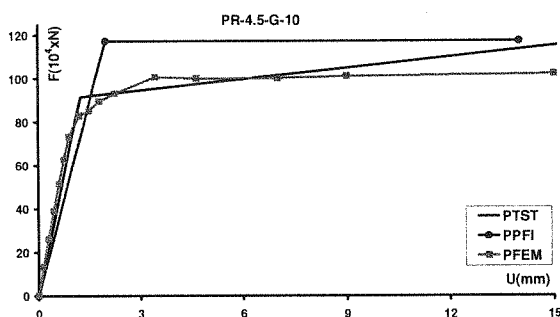
شکل (۲۲): مقایسه منحنی‌های پوش در حالت های ۴، ۱ و ۵ برای

نمونه PR-4.5-M1-35



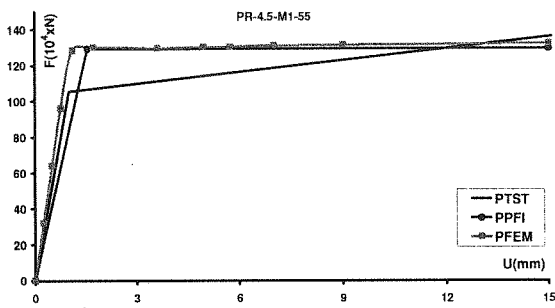
شکل (۲۱): مقایسه منحنی‌های پوش در حالت های ۴، ۱ و ۵ برای

نمونه PR-4.5-M1-15



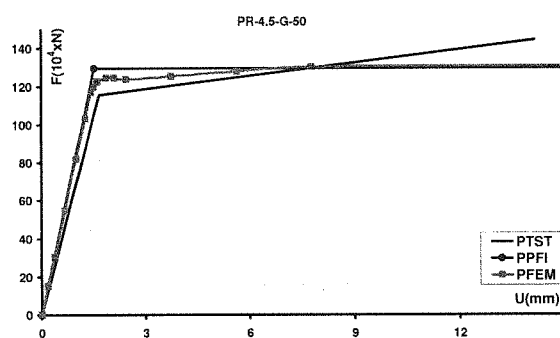
شکل (۲۴): مقایسه منحنی‌های پوش در حالت های ۴، ۱ و ۵ برای

نمونه PR-4.5-G-10



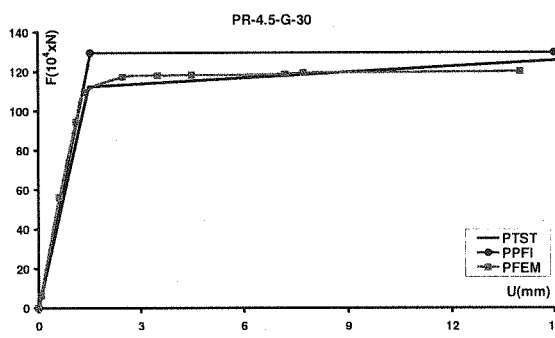
شکل (۲۳): مقایسه منحنی‌های پوش در حالت های ۴، ۱ و ۵ برای

نمونه PR-4.5-M1-55



شکل (۲۶): مقایسه منحنی‌های پوش در حالت های ۴، ۱ و ۵ برای

نمونه PR-4.5-G-50



شکل (۲۵): مقایسه منحنی‌های پوش در حالت های ۴، ۱ و ۵ برای

نمونه PR-4.5-G-30

مقایسه منحنی های پوش شکل های (۱۵) تا (۲۶) نشان می- دهد که در همه نمونه ها، روش PFI قدرت پیش بینی خوبی از رفتار ورق دیوار برشی فولادی دارد. سختی حاصل از روش PFI کمتر است که این نیز در جهت حصول اطمینان برای مقاصد طراحی مناسب است. مقایسه نمودارها در حالت ۱ و ۴ نشان می-دهد که بازسازی مدل ها به خوبی انجام شده است به طوری که رفتار ورق مطابقت فراوانی نسبت به منحنی های پوش دو خطی به دست آمده از منحنی های هیستریزیس آزمایش ها دارد و از این لحاظ می-توان به سایر نتایج به دست آمده از تحلیل اجزای محدود مدل ها اعتماد کرد.

اختلاف در بعضی نتایج منحنی های پوش در این حالت ها به این علت است که در حالت PFEM، نمونه ها به صورت کاملاً ایده آل مدلسازی شده اند، این در حالی است که در حالت PTST بعضی از خطاهای ناشی از ساخت نمونه ها و ابزارهای آزمایشگاهی در نتایج تاثیر می-گذارند. در روش PFI هم در استفاده از روابط کلاسیک، بعضی از پارامترها مانند ضریب سختی ساده سازی شده اند.

با توجه به اینکه روش PFI ضمن سادگی قادر به تحلیل و طراحی دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک، ضخیم، تقویت شده و هم چنین با بازشو است و مهندس طراح قادر به درک فیزیکی دیوار برشی است به طوری که با تغییر هر کدام از پارامترها می-تواند نسبت به تغییرات به وجود آمده در پارامتر تعیین کننده دیوار برشی فولادی مثل مقاومت و سختی کنترل کرده باشد، به کارگیری آن در طراحی این نوع دیوارها می-تواند بسیار مفید باشد. این روش علاوه بر محاسبه دستی می-تواند در نرم افزارهای موجود برای تحلیل سازه ها به کار گرفته شود که در شرایط حاضر در انحصار سعید صبوری است.

#### ع- خلاصه نتایج

- [۱] همان طور که از منحنی های پوش به دست آمده از طریق تحلیل به روش المان های محدود و مقایسه آنها با منحنی های به دست آمده از آزمایش ها مشاهده می شود، با استفاده از فولاد نرم، ورق فولادی در تغییر مکان های کمتری جاری می-شود. در حقیقت، ورق در تغییر مکان های کوچک تری شروع به جذب انرژی نموده، عمده انرژی وارده را قبل از اینکه اعضای اصلی سازه همانند ستون ها دچار آسیب جدی شوند، جذب می-نماید.
- [۲] با استفاده از فولاد نرم، با حد جاری شدن  $100 N/mm^2$  که حدوداً ۲۰۵ برابر کمتر از حد جاری شدن فولاد ساختمانی به کار رفته در آزمایش ها است، به همین نسبت تغییر مکان

حد جاری شدن سیستم کاهش یافته، سیستم در تغییر مکان کمتری شروع به جذب انرژی می-کند.

[۳] با افزایش ضخامت ورق فولادی به میزان ۲ برابر، نشان داده شد که مقاومت سیستم به همین میزان افزایش می-یابد ولی تغییر مکان حد جاری شدن ثابت می-ماند.

[۴] مقایسه تحلیل به روش PFI با نتایج آزمایشگاهی نشان می-دهد که این روش، ضمن سادگی، تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی یاد شده دارد. با توجه به اینکه آزمایش ها انجام شده، طیف وسیعی از ورق فولادی، از ورق تقویت شده در شرایط مختلف و با آرایش های گوناگون تا ورق بدون تقویت را پوشش می-دهد، در نتیجه می-توان در طراحی و تحلیل دیوارهای برشی فولادی با اطمینان کافی از این روش استفاده کرد.

#### ۵- مراجع

- [۱] صبوری، سعید؛ "سیستم های مقاوم در برابر بارهای جانبی، مقدمه ای بر دیوارهای برشی فولادی"، چاپ انگیزه، تهران، پاییز ۱۳۸۰
- [۲] صبوری، سعید؛ "سیستم های مقاوم در برابر بارهای جانبی، طرح اندیشه استفاده از فولاد نرم"، چاپ انگیزه، تهران، بهار ۱۳۸۲
- [۳] Roberts, T. M.; Sabouri-Ghomi, S.; "Hysteretic characteristics of Unstiffened Perforated Steel Plate Shear Panels", Thin Walled Structures, vol. 14, p.p. 139-151, 1992.
- [۴] Roberts, T. M.; Sabouri-Ghomi, S.; "Hysteretic characteristics of Unstiffened Plate Shear Panels" Thin - Walled Structures, vol. 12, p.p. 145-162, 1991.
- [۵] Sabouri-Ghomi, S.; Ventura, C. E.; Kharrazi, M.; "Shear Analysis and Design of Ductile Steel Plate Shear Walls" Journal of Structural Engineering, p.p. 878-889, 2005.
- [۶] Sabouri-Ghomi, S.; Roberts, T. M.; "Nonlinear dynamic analysis of thin steel plate shear walls" Comput. Struct. vol. 39(1/2), p.p. 121-127, 1991.
- [۷] Sayed-Ahmed, E., Y.; "Behavior of steel and (or) composite girders with corrugated steel webs" Can. Journal of civil Eng. vol. 28, p.p. 656-672, 2001.
- [۸] Takahashi, Y.; Takeda, T.; Takemoto, Y.; Takagi, M. "Experimental study on thin steel shear walls and particular steel bracing under alternative horizontal loads" Proc., IABSE Symp., Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads, Lisbon, Portugal, p.p. 185-191, 1973.
- [۹] Timler, P. A.; Ventura, C. E.; Prion, H.; Anjam, R. "Experimental and analytical studies of steel plate shear walls as applied to the design of tall buildings" Struct. Des. Tall Build, vol. 7(3), p.p. 233-249, 1998.
- [۱۰] Timler, P. A.; Kulak, G.L.; "Experimental study of steel plate shear walls" Structural Engineering Rep. No. 114, Dep. of Civil Engineering, Univ. of Alberta, Alberta, Canada, 1983.