

## بررسی دیوار برشی فولادی بر اساس روش طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد

محسن علی شایانفر<sup>۱\*</sup>، مرتضی رئیسی دهکردی<sup>۲</sup>، علی‌رضا رضائیان<sup>۳</sup>، علی گوهررخی<sup>۴</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۱۰/۲۸	<p>دیوار برشی فولادی یک المان سازه‌ای فولادی جدید برای مقاومت در برابر بارهای جانبی، به‌ویژه زلزله است. رفتار این سیستم‌ها به دلیل فقدان روشی مناسب برای تحلیل و طراحی آن‌ها به‌خوبی شناخته نشده است که این امر منجر به الزامات طراحی محافظه‌کارانه‌ای می‌شود. روش پیشنهادی طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد، یک رویکرد سیستماتیک برای تحلیل و طراحی سازه‌ها ارائه می‌دهد. این روش با استفاده از تغییر مکان هدف و مکانیزم تسلیم به‌عنوان محدودیت‌های عملکردی، یک رویکرد قاعده‌مند برای تحلیل و طراحی این سیستم‌ها فراهم می‌کند. علاوه‌برآن، بر اساس تغییرمکان هدف مناسب برای هر سطح خطر، عملکردی مطلوب در سطوح خطر متفاوت فراهم می‌کند. در این مطالعه، روش پیشنهادی با روش آیین‌نامه‌ای بر اساس دستورالعمل‌های ضوابط لرزه‌ای AISC برای طراحی یک ساختمان اداری چهارطبقه با دیوار برشی فولادی به‌عنوان سیستم مقاوم در برابر بار جانبی مقایسه شده است.</p>
پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۰۲	
<p><b>واژگان کلیدی:</b></p> <p>دیوار برشی فولادی، طراحی بر اساس عملکرد، طراحی پلاستیک، تغییر مکان هدف، مکانیزم تسلیم.</p>	

### ۱- مقدمه

در این مطالعه، روش پیشنهادی طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد برای طراحی لرزه‌ای سیستم‌های دیوار برشی فولادی ارائه شده است. روش Performance Based Plastic Design (PBPD) یک رویکرد سیستماتیک برای تحلیل و طراحی سازه‌های SPSW (Steel Plate Shear Wall) ارائه می‌دهد. همان‌طور که برای دیگر سیستم‌ها انجام شده است، تغییرمکان جانبی هدف و مکانیزم تسلیم از پیش انتخاب شده به‌عنوان محدودیت‌های عملکردی استفاده می‌شوند. نیروهای جانبی طراحی با استفاده از یک معادله انرژی که در آن انرژی موردنیاز برای راندن سازه تا تغییرمکان هدف محاسبه شده است به‌عنوان کسری از انرژی ورودی الاستیک، از طیف طراحی الاستیک انتخاب شده به دست می‌آیند. سپس طراحی پلاستیک برای اعضای

قاب به‌منظور دستیابی به مکانیزم تسلیم و رفتار در نظر گرفته شده انجام می‌شود. علاوه‌براین، با روش PBPD پیشنهادی، دو سطح طراحی بر اساس تغییرمکان جانبی مناسب برای هر سطح خطر، می‌تواند به‌آسانی برای به‌دست‌آوردن عملکرد مطلوب در سطوح خطر مختلف برای سیستم‌های SPSW اجرا شود. با استفاده از روش PBPD در طراحی سازه‌های SPSW، درک و کنترل بیشتری از طراحی، تعداد تکرار کمتر و کنترل مستقیم تغییرمکان جانبی را می‌توان به دست آورد.

در ادامه، روش آیین‌نامه (AISC) متداول برای طراحی SPSW به‌طور خلاصه توضیح داده شده، سپس روش PBPD پیشنهادی برای SPSW با اتصالات تیر به ستون گیردار ارائه شده است. آن‌گاه روش پیشنهادی برای طراحی یک نمونه SPSW چهارطبقه با در نظر گرفتن سطوح خطر

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: shayanfar@iust.ac.ir

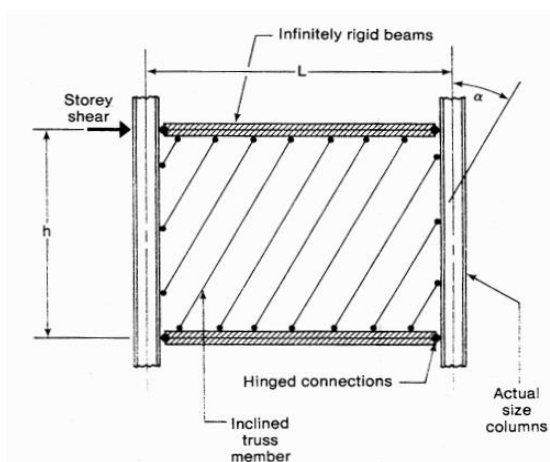
۱. استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲. استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳. استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج

۴. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

مختلف به کار برده شده است. عرض دهانه دیوار برشی فولادی است.  $A_c$  و  $A_b$  به ترتیب مساحت مقطع اعضای مرزی قائم و افقی و  $I_c$  ممان اینرسی ستون حول محور عمود بر پانل هستند.



شکل ۲: مدل نواری توربورن و همکاران [۲]

اعضای مرزی افقی که تنها از یک طرف به ورق جان متصل هستند، مانند عضو مرزی واقع در تراز بام، نسبت به اعضای مرزی میانی که از دو طرف به ورق جان اتصال دارند، آزادی عمل بیشتری در خمش حول محور عمود بر پانل دارند. برای منظور کردن این اثر تیملر و کولاک رابطه (۲) را با لحاظ کردن سختی خمشی عضو مرزی افقی برای محاسبه زاویه شیب میدان کشش ارائه کردند:

$$\tan^4 \alpha = \frac{1 + \left( \frac{1}{2A_c} + \frac{L^3}{120 h I_b} \right) ht_w}{1 + \left( \frac{1}{2A_b} + \frac{h^3}{320 L I_c} \right) ht_w} \quad (2)$$

در رابطه (۲)،  $I_b$  ممان اینرسی تیر حول محور عمود بر پانل بوده، سایر پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند.

رابطه (۲) توسط آیین‌نامه AISC 341 برای محاسبه زاویه میدان کشش پیشنهاد شده است [۱۳].

صبوری و همکارانش تئوری اندرکنش ورق و قاب (PFI) را ارائه کردند. این تئوری برای طراحی و پیش‌بینی رفتار دیوارهای برشی فولادی به کار می‌رود. آن‌ها برای بیان ایده فولاد نرم رفتار دیوار برشی فولادی را به سه دسته کلی تقسیم‌بندی کردند. منحنی تغییر مکان این سه دسته در شکل (۳) نشان داده شده است [۴].

## ۲-۲- تحقیقات آزمایشگاهی

نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر روی دیوارهای برشی فولادی تحت بارهای چرخه‌ای نشانگر سختی زیاد، مقاومت

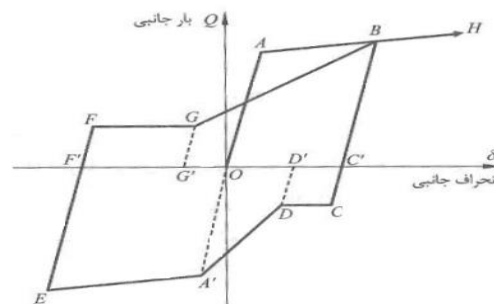
مختلف به کار برده شده است.

## ۲- پیشینه تحقیق

### ۲-۱- تحقیقات نظری

مطالعه دیوارهای برشی فولادی از منظر تحلیلی موردعلاقه بسیاری از پژوهشگران بوده است. رفتار این سیستم باربر جانبی لرزه‌ای تحت بارهای استاتیکی و چرخه‌ای مورد بررسی قرار گرفته و مدل‌های تحلیلی گوناگونی برای آن ارائه شده است. در زیر خلاصه‌ای از پژوهش‌های تحلیلی انجام شده توسط محققان مختلف ارائه می‌شود.

می‌مورا و آکی‌یاما در سال ۱۹۷۷ مدلی را برای توصیف رفتار چرخه‌ای دیوار برشی فولادی بر اساس فرضیاتی ساده توسعه دادند. [۱] شکل (۱) مدل چرخه‌ای مزبور را نشان می‌دهد.



شکل ۱: مدل چرخه‌ای می‌مورا و آکی‌یاما [۱]

توربورن و همکاران در سال ۱۹۸۳ با توجه به سختی بالای اجزای مرزی قائم مدل تحلیلی ساده‌ای را به منظور شبیه‌سازی رفتار میدان کشش بر اساس نظریه میدان کشش خالص توسعه دادند. در مدل تحلیلی مزبور که مدل نواری<sup>۱</sup> نام گرفت، میدان کشش توسط اعضای خرپایی کششی با زوایای شیب یکسان مدل شد (شکل (۲)). آن‌ها نشان دادند تعداد ده عضو خرپایی برای بیان عمل میدان کشش کفایت می‌کند [۲].

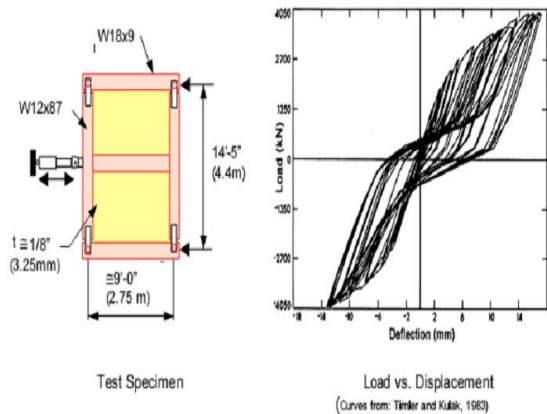
تیملر و کولاک در سال ۱۹۸۳ با منظور کردن سختی خمشی ستون‌ها، زاویه شیب میدان کشش را به صورت تابعی از سختی محوری اعضای مرزی و سختی خمشی ستون‌ها چنین به دست آورده‌اند [۳].

$$\tan^4 \alpha = \frac{1 + \frac{t_w L}{2A_c}}{1 + \left( \frac{h^3}{360 L I_c} + \frac{1}{A_b} \right) ht_w} \quad (1)$$

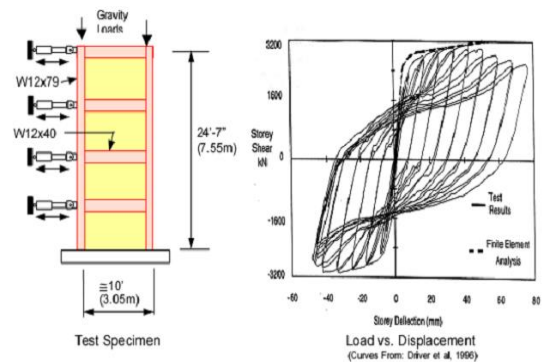
در این رابطه،  $t_w$  ضخامت ورق جان،  $h$  ارتفاع طبقه و  $L$

<sup>۱</sup> Strip Model

در شکل (۶) نشان داده شده، از یک سامانه دوگانه دیوار برشی جوش‌شده به یک قاب خمشی ویژه با مقیاس ۱:۲ تشکیل شده است. وی نشان داد که حتی با وجود خرابی زود هنگام ستون در این نمونه، رفتار رفت و برگشتی نمونه افزایش مقاومتی معادل ۱.۳ و شکل‌پذیری بسیار خوبی را نشان می‌دهد [۵].



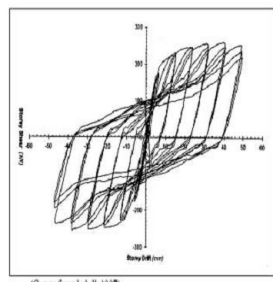
شکل ۵: قاب مورد آزمایش تحت بارهای چرخه‌ای [۳]



شکل ۶: آزمایش انجام شده در دانشگاه آلبرتا همراه نمونه‌ای از رفتار چرخه‌ای [۵]



Test Specimen

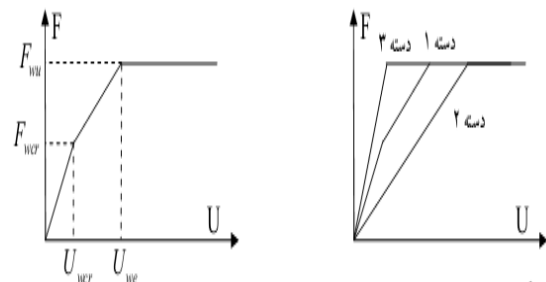


Load vs. Displacement

شکل ۷: نمودار نیرو-تغییر مکان یکی از نمونه‌های آزمایش شده در دانشگاه بریتیش کلمبیا [۶]

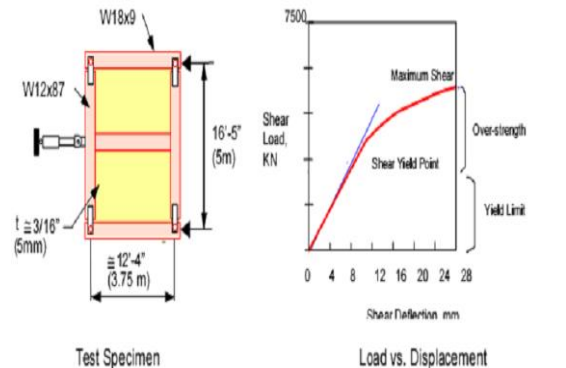
در سال‌های اخیر در دانشگاه بریتیش کلمبیا مجموعه‌ای از آزمایش‌های بارگذاری چرخه‌ای دیوار برشی فولادی انجام

کافی، شکل‌پذیری مناسب و استهلاک زیاد انرژی حاصل از زلزله در این سیستم باربر لرزه‌ای جانبی است. پژوهشگران دانشگاه آلبرتا آزمایش‌های متعددی را تحت بارگذاری‌های یکنواخت و چرخه‌ای بر روی دیوارهای برشی فولادی سخت‌نشده انجام دادند. شکل (۴) نمونه مورد آزمایش و نیز نمودار نیرو-تغییر مکان برای حالت بارگذاری یکنواخت را نشان می‌دهد [۳].



شکل ۳: سه دسته تقسیم‌بندی شده برای رفتار ورق بر اساس تئوری PFI و منحنی رفتار ورق بر اساس تئوری PFI [۴]

نمودار نیرو-تغییر مکان در شکل (۴) بیانگر رفتار نرم و شکل‌پذیر و نیز مقاومت زیاد پس از تسلیم نمونه است. نمونه مورد آزمایش دارای شکل‌پذیری بیشتر از ۴ بوده است.



Test Specimen

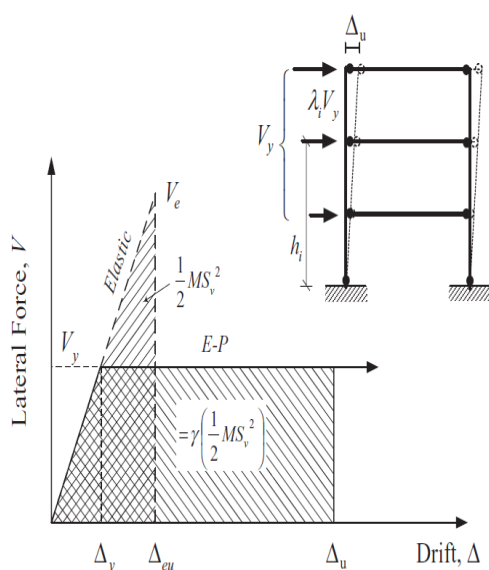
Load vs. Displacement

شکل ۴: اولین آزمایش انجام شده در دانشگاه آلبرتا تحت بار استاتیکی [۳]

شکل (۵) یک نمونه آزمایش توسط تیملر و کولاک را تحت بار چرخه‌ای نشان می‌دهد. این شکل همچنین پاسخ حلقه‌های پسماند نیرو-تغییر مکان بار چرخه‌ای و تغییر مکان دیوار برشی فولادی مورد نظر را نشان می‌دهد. آزمایش، افزایش مقاومت تا دوبرابر را با شکل‌پذیری قابل توجه نشان می‌دهد [۳].

در ایور در سال ۱۹۹۸ نتایج بارگذاری چرخه‌ای یک نمونه چهار طبقه دیوار برشی فولادی را منتشر کرد. این نمونه که

هدف و مکانیزم تسلیم به‌عنوان اهداف عملکردی استفاده می‌شود. این دو پارامتر طراحی به‌طور مستقیم به‌ترتیب به درجه و توزیع آسیب سازه‌ای مربوط می‌شوند. برش پایه طراحی برای یک سطح خطر خاص، که در آیین‌نامه‌ها بر اساس طیف طراحی به دست می‌آید، با مساوی قرار دادن کار موردنیاز برای رساندن سازه به‌طور یکنواخت تا تغییر مکان هدف با انرژی موردنیاز سازه معادل یک درجه آزادی الاستو پلاستیک (EP-SDOF) که به همان حالت رسیده، به دست می‌آید (شکل ۸)).



شکل ۸: مفهوم کلی PBPD

همچنین یک توزیع جدید از نیروهای جانبی طراحی بر اساس توزیع نسبی برش‌های ماکزیمم طبقه که از نتایج پاسخ دینامیکی غیرخطی به دست آمده، استفاده می‌شود. [۸] سپس طراحی پلاستیک برای طراحی اعضای سازه و اتصالات برای رسیدن به مکانیزم تسلیم موردنظر انجام می‌شود. بنابراین تعیین برش پایه طراحی، توزیع نیروی جانبی و طراحی پلاستیک، سه قسمت اصلی روش PBPD است که در ادامه بررسی خواهد شد.

باید اشاره کرد که در این روش طراحی، طراح تغییرمکان‌های هدف را سازگار با شکل‌پذیری و آسیب قابل قبول و یک مکانیزم تسلیم برای پاسخ مطلوب و سهولت در بازرسی و تعمیر خرابی پس از زلزله انتخاب می‌کند. نیروهای جانبی طراحی بر اساس سطح خطر موردنظر (طیف طراحی) و تغییرمکان هدف تعیین می‌شوند. بنابراین نیاز به ضرایبی مانند  $R$ ،  $I$ ،  $C_D$  و غیره نیست که در طراحی‌های آیین‌نامه‌ای مرسوم موردنیاز است. این ضرایب

شد. در این مطالعات بارهای برشی چرخه‌ای به دو نمونه یک‌طبقه وارد شده‌اند. شکل (۷) پاسخ حلقه‌های پسماند نیرو-تغییرمکان یکی از نمونه‌ها را پس از آزمایش نشان می‌دهد [۶].

چن و هنگ در سال ۲۰۰۶ میلادی رفتار چرخه‌ای دیوار برشی فولادی دارای ورق میانی با حد تسلیم پایین را مطالعه کردند. ایشان آزمایش‌هایی را بر روی دیوارهای برشی مزبور انجام داده، تأثیر نسبت پهنا به ضخامت پانل، پیوستگی و نیز انواع مختلف اتصالات قاب دیوار برشی را بر روی رفتار اعضای مرزی بررسی کردند. ایشان پیشنهاد کردند برای رسیدن به عملکرد بسیار خوب دیوار برشی فولادی در محدوده ارتجاعی و غیرارتجاعی، نسبت‌های پهنا به ضخامت یا عمق به ضخامت را می‌توان زیر ۱۰۰ در نظر گرفت [۷].

### ۳- ضرورت انجام تحقیق

همان‌طور که در مطالعات آزمایشگاهی اخیر نشان داده شده است، SPSW می‌تواند به‌عنوان المان مقاوم لرزه‌ای با پاسخ‌های هیستریزیس پایدار مورد استفاده قرار گیرد. در مقایسه با دیگر سیستم‌های مقاوم در برابر بار جانبی، SPSW دارای مزایای اقتصادی، ساخت‌وساز سریع، جزئیات موردنیاز کمتر، و رفتار شکل‌پذیر پایدار است. با وجود این، رفتار سیستم‌های SPSW به دلیل فقدان روشی مناسب برای تحلیل و طراحی این سیستم‌ها به‌خوبی شناخته نشده است. این امر منجر به الزامات طراحی محافظه‌کارانه‌ای می‌شود. به‌علاوه، یک پاسخ هیستریزیس pinch در سیستم‌های SPSW به دلیل اتلاف انرژی به‌واسطه پس‌کمانش ناشی از میدان کشش موردانتظار است. [۱۶] این رفتار، پیش‌بینی بیشترین تغییرمکان جانبی را بعد از اولین تسلیم، وقتی که سازه با استفاده از روش طراحی الاستیک مرسوم آن‌گونه که در ضوابط معمول در آیین‌نامه‌های رایج طراحی شده، مشکل می‌کند. همچنین اگر در طراحی مکانیزم تسلیم کلی در نظر گرفته نشود، عملکرد پلاستیک یا خرابی در سیستم‌های SPSW تنها در چند سطح اندک متمرکز می‌شود.

باتوجه به موارد ذکر شده، استفاده از روشی مناسب برای تحلیل و طراحی سیستم دیوار برشی فولادی ضروری است.

### ۴- روش PBPD

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، در روش PBPD از تغییرمکان

یا

$$\left(\frac{V_y}{W}\right)^2 + \frac{V_y}{W} \left( h^* \times \frac{\theta_p 8\pi^2}{T^2 g} \right) \theta_p - \gamma S_a^2 = 0 \quad (6)$$

از حل معادله (۶) نسبت برش پایه طراحی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{V_y}{W} = \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + 4\gamma S_a^2}}{2} \quad (7)$$

که  $\alpha$  پارامتر بی‌بعدی است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\alpha = \left( h^* \times \frac{\theta_p 8\pi^2}{T^2 g} \right) \quad (8)$$

عبارت  $\theta_p$  مؤلفه پلاستیک نسبت تغییرمکان هدف و  $h^* = \sum_{i=1}^N (\lambda_i h_i)$  است.

همان‌طور که اشاره شد، معادله (۷) برای  $V_y$  با فرض رفتار نیرو-تغییرشکل الاستو پلاستیک ( $E_p$ ) ایدئال و حلقه‌های هیستریزیس «کامل» سیستم به دست آمده است. این مشخصه سیستم‌های فولادی شکل‌پذیر نظیر قاب خمشی یا مهاربندی واگراست. برای سیستم‌هایی که ویژگی هیستریزیس را ندارند، مانند قاب‌های مهاربندی با مهاربندهای کم‌انرژی یا قاب‌های بتن مسلح یا دیوارهای برشی فولادی، اصلاحاتی باید انجام پذیرد. تحقیقات زیادی روی اثر تنزل رفتار هیستریزیس در تغییرمکان‌های هدف انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند تغییرمکان‌های هدف نسبت به سیستم‌های بدون تنزل در رفتار هیستریزیس در پیوندهای کوتاه، بزرگ‌تر اما برای پیوندهای بزرگ‌تر تقریباً مساوی‌اند.

#### ۴-۲- توزیع نیروی جانبی

برای در نظر گرفتن آثاری مانند سهم مودهای بالاتر در توزیع نیروهای جانبی طراحی، اصلاحاتی در روابط آیین‌نامه‌ای انجام شده است. در جدیدترین آن‌ها، شورای بین‌المللی تدوین آیین‌نامه‌ها [۱۱] رابطه زیر را ارائه کرده است:

$$F_i^* = \left( \frac{w_i h_i^k}{\sum_{j=1}^n w_j h_j^k} \right) V \quad (9)$$

که  $w$  و  $h$  به ترتیب جرم لرزه‌ای و ارتفاع از تراز پایه،

بر اساس ملاحظات زیادی از جمله قضاوت مهندسی به دست می‌آیند.

قابل توجه است که در روش PBPD، کنترل جابه‌جایی و تسلیم در مراحل اولیه طراحی انجام می‌شود و سعی و خطاهای اضافی برای رسیدن به طراحی نهایی، حذف یا مینیمم می‌شوند. از دیگر فواید این روش آن است که با انتخاب اعضای تسلیم‌شونده (فیوز) مناسب و قراردادن آن‌ها در محل‌های مناسب، درحالی‌که اعضای تسلیم‌ناپذیر می‌توانند برای ظرفیت شکل‌پذیری صفر یا مینیمم طراحی شوند، می‌توان چیدمان سازه‌ای بدیعی ایجاد کرد. تمام این موارد را می‌توان این‌گونه بیان کرد که عملکرد، ایمنی و اقتصادی بودن افزایش می‌یابند.

#### ۴-۱- برش پایه طراحی

یکی از موارد اصلی در روش PBPD تعیین برش پایه طراحی برای سطح خطر موردنظر است. این امر با مساوی قراردادن کار موردنیاز برای رساندن سازه به‌طور یکنواخت تا تغییرمکان هدف با انرژی موردنیاز سازه معادل یک درجه آزادی الاستو پلاستیک (EP-SDOF) که به همان حالت رسیده، حساب می‌شود. با فرض رفتار نیرو-تغییرشکل الاستو پلاستیک ( $E_p$ ) ایدئال سیستم، می‌توان معادله کار-انرژی را به صورت زیر نوشت:

$$(E_e + E_p) = \gamma \left( \frac{1}{2} M S_v^2 \right) = \frac{1}{2} \gamma M \left( \frac{T}{2\pi} S_a g \right)^2 \quad (3)$$

که  $E_e$  و  $E_p$  به ترتیب مؤلفه‌های الاستیک و پلاستیک انرژی (کار) موردنیاز برای رساندن سازه به تغییرمکان هدف،  $S_v$  شبه‌سرعت طیفی،  $S_a$  شبه‌شتاب طیفی،  $T$  پیوند طبیعی و  $M$  جرم کلی سازه است. ضریب اصلاح انرژی،  $\gamma$ ، به ضریب شکل‌پذیری سازه ( $\mu_s$ ) و ضریب کاهش شکل‌پذیری ( $R_\mu$ ) بستگی دارد که از رابطه زیر به دست می‌آید:

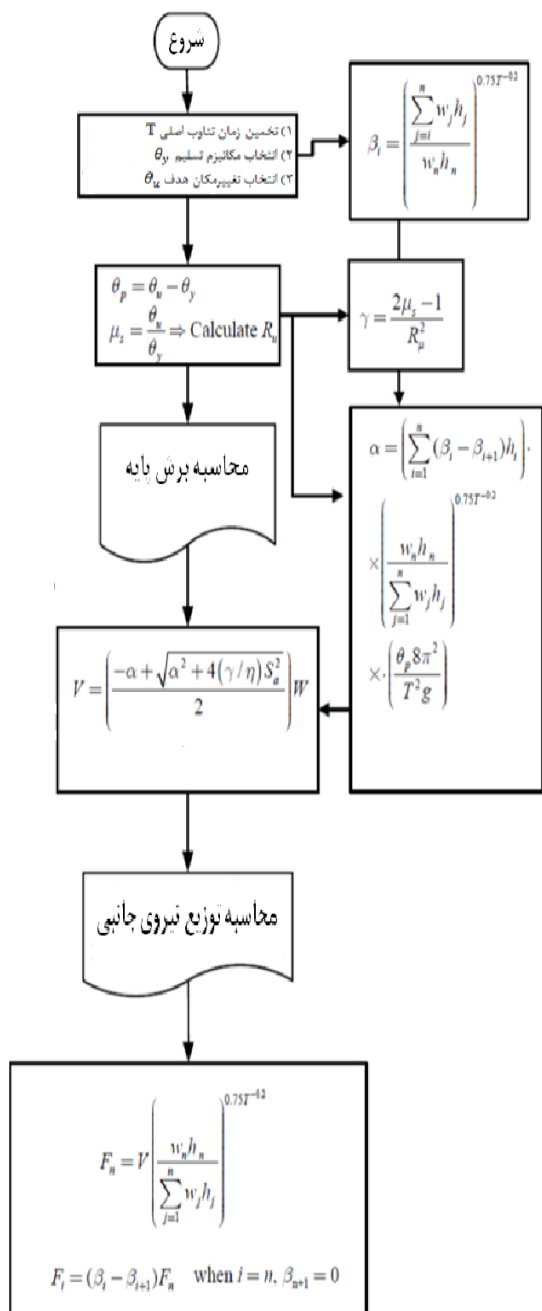
$$\gamma = \frac{2\mu_s - 1}{R_\mu^2} \quad (4)$$

همچنین معادله کار-انرژی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{1}{2} \left( \frac{W}{g} \right) \left( \frac{T}{2\pi} \times \frac{V_y}{W} g \right)^2 + V_y \left( \sum_{i=1}^N \lambda_i h_i \right) \theta_p = \frac{1}{2} \gamma \left( \frac{W}{g} \right) \times \left( \frac{T}{2\pi} S_a g \right)^2 \quad (5)$$

$$\frac{V_i}{V_n} = \beta_i = \left( \frac{\sum_{j=i}^n w_j h_j}{w_n h_n} \right)^{0.75T-0.2} V_y \quad (14)$$

در شکل (۹) الگوریتم تعیین و توزیع برش پایه طراحی بر اساس روش طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد آمده است.



شکل ۹: الگوریتم تعیین و توزیع برش پایه طراحی بر اساس روش طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد [۸]

برش پایه و توان  $k$  تابعی از پیوند اصلی است. با وجود این، پاسخ دینامیکی غیرخطی که از مطالعه بر روی تعدادی از سیستم‌های سازه‌ای به دست آمده، نشان می‌دهد توزیع نیروهای برشی حداکثر در ارتفاع سازه با آنچه آیین‌نامه‌ها ارائه می‌دهند، متفاوت است [۸].

به منظور نزدیک کردن توزیع برش طراحی طبقه به نتایج پاسخ غیرخطی، از یک عبارت نمایی، همان‌طور که در رابطه زیر آمده، استفاده شد:

$$V_i^* = \left( \frac{\sum_{j=i}^n w_j h_j}{\sum_{j=1}^n w_j h_j} \right)^{0.75T-0.2} V \quad (10)$$

برش پایه،  $V_i^*$ ، نشان‌دهنده مجموع نیروهای جانبی بالای سطح  $i$  در آن سطح است. ثابت‌های عبارت توانی در رابطه (۱۰) با توجه به تجربیات مناسبی از نتایج پاسخ غیرخطی برای تعدادی از سیستم‌های سازه‌ای متداول به دست آمده‌اند [۱۲].

$V_y$  برش پایه طراحی است که از رابطه (۵) در روش PBDP به دست می‌آید. برای  $i = n$ ، رابطه (۱۰) مقدار برش،  $V_n$ ، یا نیروی جانبی،  $F_n$ ، در طبقه آخر را می‌دهد:

$$V_n = \left( \frac{w_n h_n}{\sum_{j=1}^n w_j h_j} \right)^{0.75T-0.2} V_y \quad (11)$$

از مقایسه روابط (۱۰) و (۱۱)، نسبت  $V_i/V_n$  را به عنوان ضریب توزیع برش،  $\beta_i$ ، می‌توان این‌گونه بیان کرد:

$$\frac{V_i}{V_n} = \beta_i = \left( \frac{\sum_{j=i}^n w_j h_j}{w_n h_n} \right)^{0.75T-0.2} V_y \quad (12)$$

سپس، نیروی جانبی در سطح  $i$ ،  $F_i$ ، به شکل زیر به دست می‌آید:

$$F_i = (\beta_i - \beta_{i+1}) V_n \quad (13)$$

یا

قاب خمشی پیرامونی در روش آیین‌نامه‌ای رایج چشم‌پوشی شده است که منجر به سیستمی بزرگ‌تر با مقاومت اضافی می‌شود.

### ۵-۳- طراحی اعضای مرزی افقی و قائم

به‌طور کلی، در روش طراحی بر اساس ظرفیت مبتنی بر بیشترین نیروهای ناشی از میدان کشش در تسلیم کامل، ورق‌های جان باید در طراحی<sup>۱</sup> HBE و<sup>۲</sup> VBE در نظر گرفته شوند. بنابراین نیروهای محوری، برشی و لنگرهای خمشی در المان‌های مرزی به‌علت خرابی کلی و برشی و همچنین عمل میدان کشش در ورق‌های جان ایجاد می‌شوند. [۱۳] شایان ذکر است که ضخامت واقعی ورق‌های جان باید برای روش طراحی بر اساس ظرفیت استفاده شود. HBE باید مقاومت کافی را داشته باشد به‌طوری‌که تسلیم کششی کامل در ورق جان بتواند ایجاد شود. مفصل پلاستیک مجاز به تشکیل در هر جای HBE به‌جز در دو انتهای آن نیستند. توجه ویژه‌ای باید به HBE بالایی و پایینی شود؛ زیرا آن‌ها باید مقاومت کافی برای مهار مؤلفه قائم میدان کشش در جان‌های کاملاً تسلیم‌شده داشته باشند.

سه روش در ضوابط لرزه‌ای AISC برای دستیابی به طراحی بر اساس ظرفیت برای VBE پیشنهاد شده است. این روش‌ها عبارت‌اند از: ۱. تحلیل پوش‌آور غیرخطی؛ ۲. ترکیبی از برنامه‌های کامپیوتری الاستیک خطی و مفهوم طراحی براساس ظرفیت؛ ۳. روش طراحی براساس ظرفیت غیرمستقیم. همچنین ضوابط لرزه‌ای AISC یک الزام برای سختی VBE برای جلوگیری از انعطاف‌پذیری و کمانش بیش از حد در صفحه این اعضا تحت میدان کشش در ورق‌ها در نظر گرفته است. این الزام چنین بیان شده است:

$$I_c \geq \frac{0.00307 t_w h^4}{L} \quad (17)$$

### ۶- روش طراحی پیشنهادی PBPD برای قاب‌های با دیوار برشی فولادی

#### ۶-۱- تغییر مکان هدف<sup>۲</sup> و مکانیزم تسلیم<sup>۴</sup>

تغییر مکان هدف و مکانیزم تسلیم، دو معیار اصلی در روش PBPD است. مقدار منطقی برای تغییر مکان هدف (باتوجه به رفتار سازه و اهداف عملکردی موردنظر) و

### ۵- روش آیین‌نامه‌ای متداول برای طراحی دیوار برشی فولادی

#### ۵-۱- برش پایه طراحی

مشابه دیگر سیستم‌های سازه‌ای، برش پایه طراحی برای SPSW مطابق روش ASCE [۱۲] دست می‌آید. در این روش، پرپود اصلی سازه بر اساس رابطه آیین‌نامه‌ای مناسب تخمین زده شده، سپس کمترین برش پایه طراحی موردنیاز از معادله کلی  $V = C_s W$  محاسبه می‌شود. ضریب پاسخ لرزه‌ای،  $C_s$ ، را می‌توان از طیف پاسخ طراحی الاستیک داده‌شده، با در نظر گرفتن ضریب اصلاح پاسخ  $R$  و ضریب اهمیت  $I$ ، به دست آورد.

#### ۵-۲- طراحی ورق‌های جان

پس از آنکه برش پایه طراحی موردنیاز به دست آمد، برش‌های طبقه در هر طبقه با استفاده از توزیع جانبی داده‌شده در آیین‌نامه محاسبه می‌شود. سپس می‌توان اندازه ورق‌های جان را با مقایسه تقاضای مقاومت برشی کلی ( $V_u$ ) با مقاومت برشی طراحی ورق  $\phi V_n$  به صورت زیر، به دست آورد:

$$V_n = 0.42 F_y t_w L_{cf} \sin 2\alpha \quad (15)$$

$$\phi = 0.90$$

که  $t_w$  ضخامت جان و  $L_{cf}$  فاصله آزاد بین بال‌های VBE است.  $F_y$  مقاومت تسلیم اسمی ورق و  $\alpha$  زاویه تسلیم ورق به رادیان (نسبت به امتداد قائم) است که به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\tan^4 \alpha = \frac{1 + \frac{t_w L}{2A_c}}{1 + t_w h \left( \frac{1}{A_b} + \frac{h^3}{360 I_c L} \right)} \quad (16)$$

که:

$h$  = فاصله بین محور تا محور HBE

$A_b$  = مساحت مقطع HBE

$A_c$  = مساحت مقطع VBE

$I_c$  = ممان اینرسی VBE حول محور عمود بر خط محوری

ورق جان

$L$  = فاصله بین محور تا محور VBE

باید اشاره کرد که در واقع ورق‌های جان برای تحمل کل بار جانبی طراحی می‌شوند؛ یعنی از مقاومت فراهم‌شده توسط

<sup>3</sup> Target Drift

<sup>4</sup> Yield Mechanism

<sup>1</sup> Horizontal Boundary Element

<sup>2</sup> Vertical Boundary Element

شروع می‌شود. بنابراین برای جلوگیری از خرابی کلی یک تغییرمکان نسبی ۳٪ برای سازه‌های تحت سطح خطر MCE (۲٪ در ۵۰ سال) انتخاب شد.

مکانیزم تسلیم مطلوب برای سیستم‌های SPSW با اتصالات HBE به VBE مفصلی و همچنین خمشی در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، ورق‌های جان کاملاً تسلیم شدند و میدان کشش به‌عنوان مکانیزم تشکیل شده است. مفصل‌های پلاستیک باید در انتهای HBE برای داشتن یک مکانیزم کامل در مورد اتصال HBE به VBE گیردار تشکیل شوند. از آنجاکه تشکیل مفصل پلاستیک در VBE (به‌جز در پایه) و هر نقطه‌ای در HBE به‌جز در دو انتها منجر به رفتار تنزلی SPSW تحت بارگذاری جانبی می‌شود [۱۵]، از این‌گونه مفصل‌شدگی پلاستیک باید جلوگیری شود. همچنین باید اشاره شود که ورق جان در اولین طبقه می‌تواند به HBE پایینی یا المان دیگری که به زمین ثابت شده، مهار شود.

### ۶-۲- تخمین تغییرمکان تسلیم<sup>۳</sup>

تغییرشکل جانبی یک قاب SPSW از دو قسمت تغییرشکل‌های برشی و خمشی تشکیل شده است. تغییرشکل برشی با زاویه  $\alpha$  که زاویه تسلیم جان نسبت به قائم است، در معادله زیر نشان داده شده است:

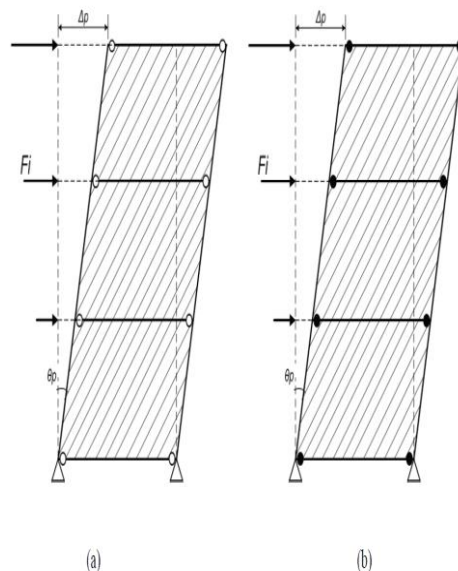
$$\frac{\Delta_s}{h} = \frac{2\varepsilon_y}{\sin 2\alpha} \quad (18)$$

که  $\varepsilon_y$  کرنش تسلیم فولاد ورق‌های جان است. اگرچه زاویه  $\alpha$  برای سیستم‌های SPSW مختلف ثابت نیست، می‌توان نشان داد که برای  $40^\circ \leq \alpha \leq 50^\circ$ ، اختلاف در  $1/\sin 2\alpha$  فقط حدود ۱۰.۵٪ است. بنابراین مقدار اولیه  $45^\circ$  برای  $\alpha$  می‌تواند تخمین خوبی باشد. با قراردادن  $\alpha = 45^\circ$ ، قسمت برشی تغییرمکان تسلیم را می‌توان این‌گونه نوشت:

$$(\theta_y)_s \approx 2\varepsilon_y \quad (19)$$

باتوجه به تغییرات مقاطع ستون در ارتفاع VBE در SPSW، قسمت خمشی تغییرشکل جانبی را می‌توان به‌وسیله در نظر گرفتن یک تنش محوری متوسط در ستون‌ها در حالت مکانیزم تسلیم تخمین زد. با داشتن تنش

همچنین مکانیزم تسلیم مطلوب باید در همان ابتدای روش PBPD فرض شود. همان‌طور که در بخش ۲ نشان داده شده است، برش پایه طراحی به‌دست‌آمده از روش PBPD بر اساس این دو معیار مهم محاسبه می‌شود.



شکل ۱۰: مکانیزم تسلیم مطلوب برای دیوار برشی فولادی: (a) اتصال تیر به ستون مفصلی، (b) اتصال تیر به ستون گیردار

در مورد سیستم SPSW، آن‌گونه که توسط آیین‌نامه‌های سازه‌ای [۱۰] پیشنهاد شده است، تغییرمکان هدف تحت سطح خطر طراحی ( $DBE^1$ )، ۱۰٪ احتمال وقوع در ۵۰ سال) می‌تواند ۲٪ در نظر گرفته شود. تسلیم کامل ورق جان و نیز تسلیم در اتصال HBE به VBE (در مورد اتصال گیردار)، بدون کاهش عمده در مقاومت در این سطح از تغییرمکان میان طبقه برای یک SPSW موردانتظار است. همچنین محدودیت تغییرمکان ۲٪، آسیب به اعضای غیرسازه‌ای تحت زلزله سطح طراحی را حداقل خواهد کرد. تحت سطح خطر MCE (۲٪ احتمال وقوع در ۵۰ سال)، مقدار مناسب برای تغییرمکان هدف می‌تواند بر اساس نتایج مطالعات آزمایشگاهی روی سیستم‌های SPSW در مقیاس بزرگ تخمین زده شود. نتایج مربوط به نمونه‌های آزمایشگاهی در مقیاس بزرگ، نشان می‌دهد مقاومت در تغییرمکان نسبی حدود ۳٪ کاهش می‌یابد. کاهش مقاومت در چرخه‌های بعدی با تغییرمکان‌های بزرگ‌تر ادامه می‌یابد. بر اساس این نتایج آزمایشگاهی، سختی منفی پس از کماتش در منحنی در تغییرمکان نسبی طبقه نزدیک به ۳٪

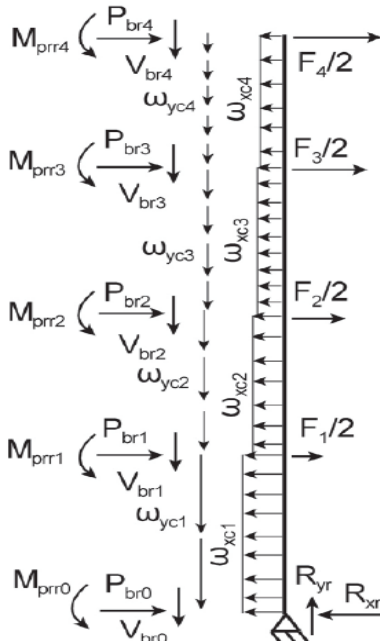
<sup>3</sup> Yield Drift

<sup>1</sup> Design Base Earthquake

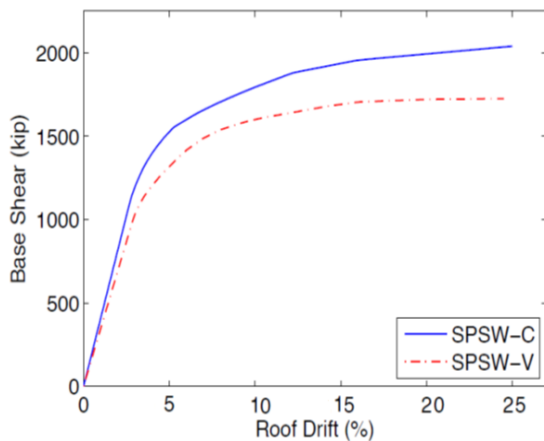
<sup>2</sup> Maximum Base Earthquake



بالایی و پایینی، نیروهای محوری قابل توجهی در HBE به وجود می‌آورد. نیروهای محوری عمدتاً از VBE تحت اثر نیروهای تسلیم ورق و همچنین مؤلفه افقی ناشی از اختلاف بین نیروهای تسلیم ورق بالایی و پایینی HBE به دست می‌آیند. [۱۴] وقتی که اندازه HBE به دست آمد، VBE را می‌توان با استفاده از نیروهای نهایی ناشی از ورق‌های جان و HBE طراحی کرد.



شکل ۱۱: دیاگرام آزاد برای VBE سمت راست [۹]



شکل ۱۲: منحنی پشور اور ارائه شده توسط برمن و برنو برای سازه موردنظر [۳۱]

#### ۶-۶- طراحی المان‌های مرزی قائم (VBE)

یک روش تحلیلی را که قبلاً برای دیگر سیستم‌ها (به‌عنوان مثال قاب‌های خمشی) مورد استفاده قرار می‌گرفته، می‌توان برای طراحی بر اساس ظرفیت ستون‌ها (VBE) در دیوار برشی فولادی (SPSW) استفاده کرد.

محوری متوسط،  $\sigma_{avg}$ ، مؤلفه خمشی تغییرمکان تسلیم را می‌توان این‌گونه به دست آورد:

$$(\theta_y)_f = \frac{\sigma_{avg}}{E} \times \frac{h}{L} \quad (20)$$

باید اشاره شود از آنجاکه نیروی محوری قابل توجهی در ستون طبقه بالایی وجود دارد و بنابراین تغییرشکل جانبی به تغییرمکان جانبی منجر می‌شود، ارتفاع کامل ستون‌ها در محاسبه تغییرمکان تسلیم برای SPSW استفاده شده است. همچنین باید ذکر شود از اثر ورق در محاسبه تغییرشکل محوری ستون‌ها صرف نظر شده است.

#### ۶-۳- محاسبه برش پایه طراحی

با داشتن تغییرمکان هدف و مکانیزم تسلیم، آن‌طورکه در بخش ۴-۱ عنوان شد و همچنین به‌وسیله تخمین تغییرمکان هدف با روش پیشنهادی در بخش ۴-۲، می‌توان برش پایه طراحی PBPD موردنیاز را به‌دنبال مراحل عمومی ارائه‌شده در بخش چهار محاسبه کرد.

#### ۶-۴- طراحی ورق‌های جان فولادی

طراحی ورق‌های جان با استفاده از رویکرد طراحی پلاستیک انجام می‌شود. ضخامت موردنیاز ورق در هر طبقه با فرض اینکه ورق تمام برش طبقه را ورق جان تحمل می‌کند، این‌گونه به دست می‌آید. [۱۶]

$$t_i = \frac{2V_i}{0.95F_y L} \quad (21)$$

که  $V_i$  برش طبقه،  $F_y$  تنش تسلیم ورق و  $L$  عرض دهانه است.

ورق‌های جان باید بر اساس کوچک‌ترین ضخامت در دسترس اندازه‌گذاری شوند. از آنجاکه المان‌های مرزی (HBE و VBE) باید برای نیروهای موردانتظار نهایی از ورق‌های جان بر اساس رویکرد طراحی بر مبنای ظرفیت طراحی شوند، طراحی ورق جان به‌صورت محافظه‌کارانه منجر به سنگین‌تر شدن این المان‌ها می‌شود.

#### ۶-۵- طراحی المان‌های مرزی افقی (HBE)

HBE بر پایه رویکرد طراحی بر اساس ظرفیت طراحی می‌شود. طراحی بر اساس ظرفیت HBE باید بر مبنای نیروهای متناظر با مقاومت تسلیم موردانتظار از میدان کشش در ورق‌های جان، باتوجه به ضخامت واقعی این ورق‌ها انجام شود.

علاوه‌براین خمش باتوجه به اختلاف در تنش ورق‌های جان

MCE نیز با استفاده از همین روش تحت سطح خطر زلزله ماکزیمم (احتمال ۲٪ در ۵۰ سال) انجام شده است. با این سه طراحی، اختلاف بین عملکردهای طراحی آیین‌نامه‌ای و طراحی PBPD برای سازه‌های دیوار برشی فولادی (SPSW) را می‌توان مقایسه کرد.

جدول ۱: ارتفاع طبقات و وزن مؤثر لرزه‌ای

طبقه	ارتفاع از تراز پایه (ft)	وزن مؤثر (kips)
بام	51	2613
۴	38.5	2542
۳	26	2542
۲	13.5	2103
مجموع	-	9800

جدول ۲: پارامترهای کلی طراحی

پارامترهای طراحی آیین‌نامه‌ای از (ASCE/SEI 7-05)	
1.17g	$S_{ds}$
51	ارتفاع ساختمان
0.38 sec.	$T$
7	$R$
1	$I$
9800 kips	وزن مؤثر کل

جدول (۳) پارامترهای طراحی استفاده‌شده در روش PBPD را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، برش‌های پایه طراحی PBPD موردنیاز برای دو سطح خطر مختلف DBE و MCE به دست آمده است. تغییرمکان هدف برای این دو سطح خطر، بر اساس مباحث بیان‌شده در بخش ۴-۱، به ترتیب ۲٪ و ۳٪ فرض شده است. همچنین یک ضریب  $C_2$  به مقدار ۱.۲ روی این تغییرمکان‌های هدف برای به‌دست‌آوردن تغییرمکان هدف برای دستیابی

در این روش، باید تعادل VBE تحت نیروهای نهایی ناشی از تسلیم ورق جان و HBE در نظر گرفته شود. یکی از این روش‌ها توسط برمن و برنو [۱۶] پیشنهاد شده است. در این روش، دیگرام آزادی از طول کامل VBE با نیروهای اعمال شده، همان‌طور که در شکل (۱۱) برای VBE سمت راست نشان داده شده، برای به‌دست‌آوردن نیروهای طراحی در نظر گرفته شده است. بر اساس این دیگرام آزاد، می‌توان نیروهای محوری و برشی و همچنین لنگرها را در VBE محاسبه کرد.

انتظار می‌رود سازه‌های SPSW که بر اساس روش پیشنهادی بالا طراحی شوند، بدون نیاز به انجام تکرار چندین تحلیل و طراحی، به اهداف عملکردی موردنظر تحت سطح خطرهای لرزه‌ای مختلف برسند.

## ۷- سازه دیوار برشی فولادی (SPSW) ۴ طبقه با اتصالات HBE به VBE گیردار

### ۷-۱- فرضیات و طراحی

روش PBPD پیشنهادی برای طراحی یک ساختمان اداری چهارطبقه با SPSW به‌عنوان سیستم مقاوم در برابر بار جانبی اعمال خواهد شد. ساختمان در نظر گرفته‌شده، ساختمان چهارطبقه‌ای مربوط به  $MCEER^1$  [۱۷] است که دوباره به‌وسیله برمن و برنو [۱۶] با استفاده از SPSW به‌عنوان سیستم مقاوم در برابر بار جانبی طراحی شده است. این ساختمان چهارطبقه به‌عنوان ساختمانی اداری در این بخش طراحی خواهد شد. چهار قاب SPSW برای تحمل بارهای لرزه‌ای در نظر گرفته شده است.

جدول (۱) ارتفاع طبقات و وزن‌های لرزه‌ای را نشان می‌دهد. پارامترهای کلی طراحی در جدول (۲) نشان داده شده است. ضرایب  $R$  و  $I$  در این جدول برای طراحی آیین‌نامه‌ای استفاده می‌شوند.

باید اشاره کرد سه طراحی مختلف در اینجا در نظر گرفته شده که عبارت‌اند از: ۱. طراحی آیین‌نامه‌ای؛ ۲. طراحی DBE؛ ۳. طراحی MCE. طراحی آیین‌نامه‌ای براساس دستورالعمل‌های ضوابط لرزه‌ای AISC و همچنین دستورالعمل AISC Design Guide [۱۱] انجام شده است. طراحی DBE با استفاده از روش PBPD و فرض سطح خطر طراحی (احتمال ۱۰٪ در ۵۰ سال) و طراحی

<sup>1</sup> Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research

باتوجه به اینکه برش پایه طراحی آن بزرگتر است، قابل پیش‌بینی بود.

جدول ۴: برش پایه طراحی برای سه طراحی

برش پایه در یک قاب (kips)	V/W	مدل
409.5	0.167	طراحی آیین‌نامه
696.5	0.284	PBPD (DBE)
861.62	0.352	PBPD (MCE)

جدول ۵: نتایج طراحی آیین‌نامه‌ای

طبقه	طراحی آیین‌نامه‌ای		
	$t_p$ (in)	HBE	VBE
		W30x148	
۴	0.04	W30x132	W40x436
۳	0.07	W30x148	W40x436
۲	0.1	W30x148	W40x480
۱	0.12	W40x215	W40x480

جدول ۶: نتایج طراحی PBPD (DBE)

طبقه	PBPD (DBE)		
	$t_p$ (in)	HBE	VBE
		W30x173	
۴	0.07	W30x173	W40x480
۳	0.11	W30x148	W40x531
۲	0.13	W30x148	W40x531
۱	0.14	W40x221	W40x531

جدول ۷: نتایج طراحی PBPD (MCE)

طبقه	PBPD (MCE)		
	$t_p$ (in)	HBE	VBE
		W30x173	
۴	0.09	W30x173	W40x480
۳	0.14	W30x173	W40x531
۲	0.17	W30x173	W40x531
۱	0.18	W40x298	W40x593

به تغییر مکان هدف مؤثر که رفتار  $pinch$  در آن لحاظ شده، استفاده شده است.

جدول ۳: پارامترهای طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد برای

سازه دیوار برشی فولادی چهارطبقه

(MCE)	(DBE)	پارامترهای طراحی
1.755g	1.17g	$S_a$
0.38 sec.	0.38 sec.	$T$
0.70%	0.70%	تغییر مکان تسلیم ( $\theta_y$ )
3%	2%	تغییر مکان هدف ( $\theta_u$ )
2.30%	1.30%	تغییر مکان پلاستیک ( $\theta_p = \theta_u - \theta_y$ )
3.57	2.38	$\mu_s = \theta_u / \theta_y$
2.7	2.27	$R\mu$
1.2	1.2	$C_2$
0.843	0.73	$\gamma$
6.98	3.27	$\alpha$
0.352	0.284	V/W
3446.5 kips	2786 kips	برش پایه طراحی ( $V$ )

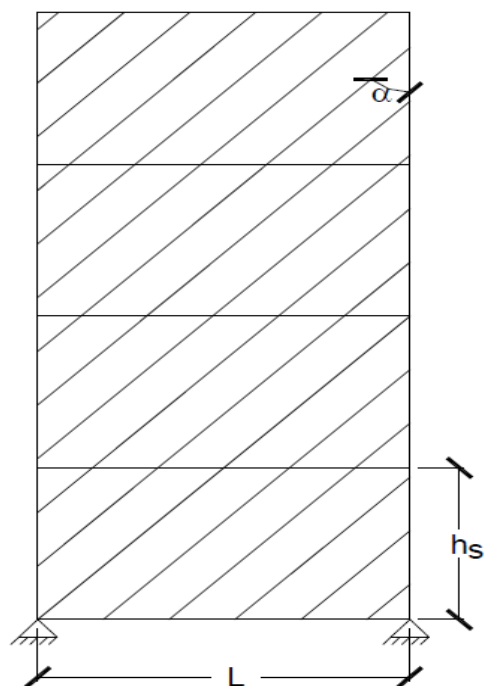
برش پایه طراحی موردنیاز تحت سطح خطر MCE نسبت به DBE بزرگتر به دست می‌آید. بنابراین اگر دو سطح طراحی در نظر گرفته شود، سطح خطر MCE حاکم است. برش‌های پایه طراحی موردنیاز برای سه طراحی مختلف در جدول (۴) نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، طراحی آیین‌نامه‌ای کمترین برش پایه را داراست. سپس این برش‌های پایه طراحی برای یافتن ضخامت موردنیاز برای ورق‌های جان در هر طراحی استفاده شدند. نتایج طراحی نهایی برای سه طراحی در نظر گرفته شده در جداول ۵، ۶ و ۷ نشان داده شده است. این نتایج شامل ضخامت ورق‌های جان و اندازه‌های HBE و VBE برای هر طراحی است. همان‌طور که دیده می‌شود، ضخامت‌های ورق و همچنین اندازه المان‌های مرزی برای طراحی MCE در مقایسه با دو طراحی دیگر بزرگتر بدست آمده، که این امر

استفاده شده است. همچنین ثابت شده مدل سازی ورق های جان با استفاده از این نوارها منجر به نتایجی می شود که مطابقت خوبی با داده های آزمایشگاهی دارد [۱۴].

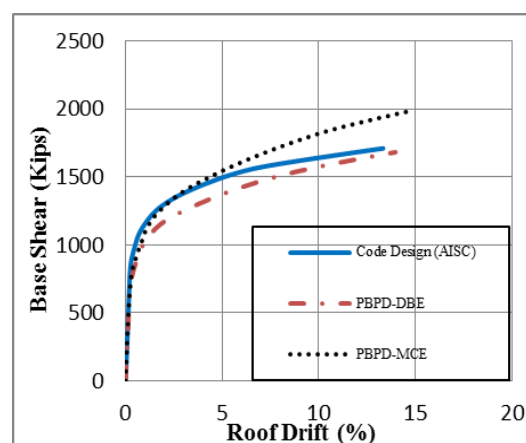
جدول ۸: دوران مفاصل پلاستیک در طراحی آیین نامه ای

طراحی آیین نامه ای			
		Left Plastic Hinge	Right Plastic Hinge
HBE 0	دوران موجود	0.00532	0.00886
	دوران تسلیم	0.00458	
	نسبت	1.16	1.93
HBE 1	دوران موجود	0.00730	0.00476
	دوران تسلیم	0.00532	
	نسبت	1.37	0.90
HBE 2	دوران موجود	0.02241	0.01110
	دوران تسلیم	0.00532	
	نسبت	4.22	2.09
HBE 3	دوران موجود	0.01649	0.01878
	دوران تسلیم	0.00537	
	نسبت	3.07	3.50
HBE 4	دوران موجود	0.01873	0.01636
	دوران تسلیم	0.00569	
	نسبت	3.29	2.88

۷-۲- ارزیابی عملکرد با استفاده از تحلیل پوش اور  
تحلیل پوش اور روی سه طراحی مختلف بخش قبلی به منظور مقایسه عملکرد آنها انجام شده است. نرم افزار OpenSees [۱۹] برای مدل سازی و تحلیل این سیستم های SPSW استفاده شد.



شکل ۱۳: مدل نواری استفاده شده در تحلیل



شکل ۱۴: منحنی پوش اور برای سه طراحی

در مدل سازی با OpenSees، نوارهایی فقط کششی در یک جهت برای نشان دادن رفتار پس از کمانش ورق های جان استفاده شد. این نوارهای کششی در شکل (۱۳) نشان داده شده اند. جمعاً ۱۰ نوار کششی برای مدل کردن ورق های جان استفاده شده است. ثابت شده که مدل سازی ورق های جان با استفاده از این نوارها منجر به نتایجی می شود که جمعاً ۱۰ نوار کششی برای مدل کردن ورق های جان

جدول ۱۰: دوران مفاصل پلاستیک در طراحی PBPD - MCE

PBPD - MCE			
		Left Plastic Hinge	Right Plastic Hinge
HBE 0	دوران موجود	0.00476	0.00608
	دوران تسلیم	0.00469	
	نسبت	1.02	1.30
HBE 1	دوران موجود	0.01847	0.01285
	دوران تسلیم	0.00538	
	نسبت	3.43	2.39
HBE 2	دوران موجود	0.02795	0.01954
	دوران تسلیم	0.00534	
	نسبت	5.24	3.66
HBE 3	دوران موجود	0.02775	0.02613
	دوران تسلیم	0.00534	
	نسبت	5.20	4.90
4 HBE	دوران موجود	0.02837	0.02671
	دوران تسلیم	0.00530	
	نسبت	5.35	5.04

جدول ۹: دوران مفاصل پلاستیک در طراحی PBPD - DBE

PBPD - DBE			
		Left Plastic Hinge	Right Plastic Hinge
HBE 0	دوران موجود	0.00495	0.00643
	دوران تسلیم	0.00473	
	نسبت	1.05	1.36
HBE 1	دوران موجود	0.01330	0.00836
	دوران تسلیم	0.00536	
	نسبت	2.48	1.56
HBE 2	دوران موجود	0.02028	0.01332
	دوران تسلیم	0.00536	
	نسبت	3.79	2.49
HBE 3	دوران موجود	0.01829	0.01798
	دوران تسلیم	0.00534	
	نسبت	3.43	3.37
4 HBE	دوران موجود	0.01930	0.01768
	دوران تسلیم	0.00530	
	نسبت	3.64	3.34

منحنی‌های پوش اور، پروفیل تغییرمکان، الگوی بار و برش طبقات در تغییرمکان هدف برای سه طراحی مختلف SPSW در شکل‌های (۷)، (۸)، (۹) و (۱۰) نشان داده شده است. همچنین دوران تسلیم و دوران دو انتهای تیرها در تغییرمکان هدف در جداول ۸، ۹ و ۱۰ آمده است.

#### ۸- بحث در نتایج

همان‌طورکه در نتایج طراحی نهایی دیده می‌شود، ضخامت‌های ورق و همچنین اندازه المان‌های مرزی برای طراحی MCE در مقایسه با دو طراحی دیگر بزرگ‌تر به دست آمده‌اند که این امر باتوجه به اینکه برش پایه طراحی آن بزرگ‌تر است، قابل پیش‌بینی بود. همچنین علی‌رغم استفاده از المان‌های تیر ستون غیرخطی پلاستیسیته گسترده برای مدل‌سازی HBE و VBE، نتایج آنالیز مشخص کرد که تسلیم به انتهای اعضا محدود است.

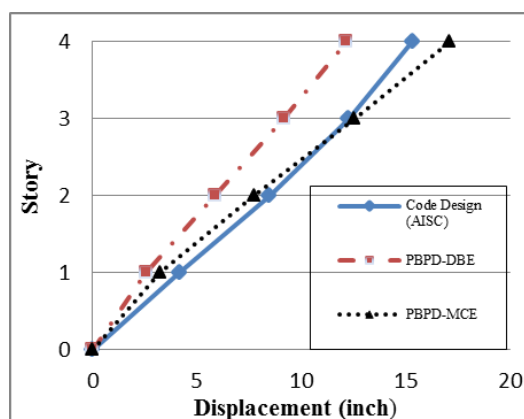
شکل (۱۴) منحنی‌های پوش اور برای سه طراحی مختلف SPSW را نشان می‌دهد. همان‌طورکه انتظار می‌رفت، مقاومت نهایی طراحی PBPD-MCE بیشتر از دو طراحی دیگر است. همچنین در شکل (۱۵) پروفیل تغییرمکان در تغییرمکان هدف برای سه طراحی ترسیم شده است. همان‌طورکه دیده می‌شود، در روش پیشنهادی توزیع تغییرمکان تقریباً یکنواخت‌تر است. همچنین در روش آیین‌نامه‌ای در مقایسه با طراحی در روش پیشنهادی برای زلزله طراحی میزان تغییرمکان به‌ویژه در طبقات بالایی بیشتر است. باید اشاره کرد باتوجه به جداول ۵، ۶ و ۷ و مقایسه مقاطع و ضخامت ورق‌های جان، می‌توان گفت روش پیشنهادی نسبت به روش آیین‌نامه اقتصادی نیست. همچنین باتوجه به اینکه در روش PBPD آثار مودهای بالاتر در نظر گرفته شده است، با عنایت به شکل‌های (۱۵) و (۱۶) طراحی آیین‌نامه‌ای برای طبقات پایینی دست بالا و برای طبقات بالایی دست پایین است.

دوران تسلیم و دوران دو انتهای تیرها در تغییرمکان هدف در جداول ۸، ۹ و ۱۰ آمده است. همان‌طورکه دیده می‌شود هدف عملکردی که تشکیل مفصل پلاستیک در دو انتهای تیرهاست، در روش PBPD کاملاً به دست آمده است.

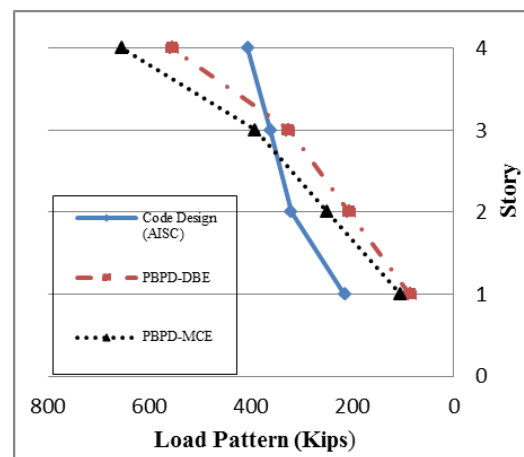
#### ۹- نتیجه گیری

در این مطالعه، روش آیین‌نامه‌ای بر اساس دستورالعمل‌های

برای مدل‌سازی هر نوار از یک المان خربایی<sup>۱</sup> و مصالح هیستریسیس<sup>۲</sup> استفاده شده است. این مدل مواد باعث توسعه کشش المان‌های با رفتار pinched می‌شود که مشخصه ورق‌های جان در میدان کشش است. HBE و VBE با استفاده از المان‌های تیر ستون غیرخطی پلاستیسیته گسترده<sup>۳</sup> با مقاطع فایبر<sup>۴</sup> مدل‌سازی شده‌اند. این المان‌ها به جای مفاصل پلاستیک مجزا برای حساب کردن امکان تسلیم در مکان‌های دیگری از انتهای HBE استفاده شده‌اند. به‌هرحال، نتایج آنالیز مشخص کرده که تسلیم به انتهای اعضا محدود است [۲۰].



شکل ۱۵: پروفیل تغییرمکان طبقات در تغییرمکان هدف



شکل ۱۶: الگوی بار برای سه طراحی

از آنجا که از فولاد A36 برای ورق‌های جان استفاده شده، یک ضریب اضافه مقاومت  $R_y = 1.3$  در مدل‌سازی این نوارهای کششی در نظر گرفته شده است. اتصالات گیردار بین HBE و VBE همان‌طورکه در طراحی فرض شده بود، مدل‌سازی شده‌اند. همچنین پایه‌های ستون‌ها به‌صورت تکیه‌گاه مفصلی مدل شده‌اند.

<sup>3</sup> distributed plasticity nonlinear beam-column elements

<sup>4</sup> Fiber

<sup>1</sup> truss element

<sup>2</sup> Hysteretic Material Model

یا مینیمم می‌شود. از دیگر فواید این روش آن است که با انتخاب ورق جان به‌عنوان عضو تسلیم‌شونده و تشکیل میدان کشش و همچنین تشکیل مفصل پلاستیک در دو انتهای تیرها (فیوز)، ستون‌ها به‌عنوان اعضای تسلیم‌ناپذیر می‌توانند برای ظرفیت شکل‌پذیری صفر یا مینیمم طراحی شوند که چیدمان سازه‌ای بدیعی ایجاد می‌شود. تمام این موارد را می‌توان چنین بیان کرد که عملکرد، ایمنی و اقتصادی بودن افزایش می‌یابد.

#### ۱۰- تقدیر و تشکر

در اینجا لازم است که از راهنمایی‌های ارزنده استادان گرامی جناب آقای دکتر شایانفر، جناب آقای دکتر رئیسی و جناب آقای دکتر رضائیان کمال تشکر و قدردانی به عمل آید.

ضوابط لرزه‌ای AISC با روش پیشنهادی برای طراحی یک ساختمان اداری چهارطبقه با دیوار برشی فولادی به‌عنوان سیستم مقاوم در برابر بار جانبی در سطوح خطر مختلف مقایسه شده است. برای ارزیابی و مقایسه عملکرد طراحی‌های مختلف، تحلیل پوش اور روی تمام نمونه قاب‌ها انجام گرفت. همچنین از نوارهایی فقط کششی برای مدل‌سازی رفتار ورق‌های جان فولادی در قاب‌های SPSW استفاده شده است.

باتوجه به اینکه در روش PBPD آثار مودهای بالاتر در نظر گرفته شده است، طراحی آیین‌نامه‌ای برای طبقات پایینی دست بالا و برای طبقات بالایی دست پایین است. همچنین باتوجه به اینکه در روش PBPD کنترل جابه‌جایی و تسلیم در مراحل اولیه طراحی انجام می‌شود، سعی و خطاهای اضافی برای رسیدن به طراحی نهایی حذف

#### ۶- مراجع

- [1] مجتبی‌ ازهری و رسول میرقادری، طراحی سازه‌های فولادی جلد چهارم مباحث طراحی لرزه‌ای، انتشارات ارکان دانش، ایران، ۱۳۹۰.
- [2] Thorburn, L.J., Kulak, G.L., and Montgomery, C.J. "Analysis of Steel Plate Shear Walls," Structural Engineering Report No. 107, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada, 1983.
- [3] Timler P.A. and Kulak G.L. "Experimental Study of Steel plate shear walls," Structural Engineering Report No. 114, Department of Civil Engineering University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada, 1983.
- [4] س. صبوری و ر. اسعد سجادی، «مقایسه رفتار دیوارهای برشی فولادی با فولاد معمولی ساختمانی و فولاد نرم»، سومین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، ایران، ۱۳۸۶.
- [5] Driver, R.G., Kulak, G.L., Elwi, A.E., and Kennedy, D.J.L. "Cyclic Test of Four-Story Steel Plate Shear Wall", ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol.124, No.2, 1998, PP.112-120.
- [6] Lubell, A.S. "Performance of Unstiffened Steel Plate Shear Walls Under Cyclic Quasi-static Loading", M.S. Thesis, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 1997.
- [7] Chen, S. and Jhang, C. "Cyclic Behavior of Low Yield Steel Shear Walls", Thin Walled Structures, Vol. 44, 2006, PP. 730-738.
- [8] Chao S-H, Goel SC, Lee S-S. "A seismic design lateral force distribution based on inelastic state of structures", Earthquake Spectra, 23: 3, 2007, PP. 547-569.
- [9] Newmark NM, Hall WJ. "Earthquake Spectra and Design", Engineering Monographs on Earthquake Criteria, Structural Design, and Strong Motion Records, Vol 3, Earthquake Engineering Research Institute, University of California, Berkeley, CA, 1982.
- [10] FEMA, Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, FEMA 440, Federal Emergency Management Agency: Washington, DC, 2006.
- [11] International Code Council (ICC), International Building Code, ICC, Birmingham, AL, 2006.
- [12] ASCE, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, SEI/ASCE 7- 05, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2005.
- [13] AISC, ANSI/AISC 341-10, Seismic Provision for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction Inc., Chicago, IL, 2010.
- [14] Sabelli, R., and Bruneau, M., Steel Plate Shear Walls (AISC Design Guide # 20), American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, 2007.

- [15] Ghosh S., Adam F., and Das A. "Design of steel plate shear walls considering inelastic drift demand", Journal of Constructional Steel Research, 65, 2009, PP. 1431\_1437.
- [16] Berman, J. W., and Bruneau, M. "Capacity Design of Vertical Boundary Elements in Steel Plate Shear Walls", Engineering Journal, 45(1), 2008, PP. 55-71.
- [17] Yang, Y.T. and Whittaker, A.S. "MCEER Demonstration Hospitals, Mathematical Models and Preliminary Analysis Results", Technical Report, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY, 2002.
- [18] Sabelli, R., and Bruneau, M., Steel Plate Shear Walls (AISC Design Guide # 20), American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, 2007.
- [19] Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees), User Manual 2.2.0 available at <http://opensees.berkeley.edu>, 2010.
- [20] Berman, J. W. "Seismic behavior of code designed steel plate shear walls", Engineering Journal., 33, 2011, PP. 230-244.