



# Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir



## Investigation of Seismic Behavior of Coupled Steel Shear Wall Designed with Performance-Based Plastic Design Method

Ehsan Vaziri<sup>1</sup>, Mohammad Gholami<sup>2\*</sup>, Abdolreza Zare<sup>2</sup>

1- Yasouj University, Yasouj, Iran

2 Assistant Professor, Yasouj University, Yasouj, Iran

### ABSTRACT

Coupled steel plate shear wall consist of two shear wall with flat web plate with rigid beam-column connection, that connected with coupling beam at story level. Coupled steel plate shear wall consist of two panels with rigid beam-column connection, that connected with coupling beam at story level so its possible to use opening in wall. In this study, two types of six story steel plate shear wall with coupling beam with trapezoidally corrugated infill plate designed with performance plastic design method and two other types designed with force base design. All models have been designed in ABAQUS software and the software outputs were compared and verified by the behavioral mechanism of uncoupling shear wall of the trapezoidal corrugated sheet and the shear wall of the flat web sheet. Subsequently, these four samples were analuzed with time history analysis with the three Northridge, Kobe and Tabas earthquake records. Investigated output of this study consist of relative drift at the peak of maximum displacement of each records and residual drift. With the result of these four models figure out that relative drift are in allowable drift ratio (2%). But each design procedure has advantages than the other one. Advantages of performance plastic design in comparison with force base design are consume less steel material and distribute uniform relative drift ratio. While the advantages of force base design has less relative drift ratio. Hence, in frames which designed by force-based design in comparison with performance based plastic design has less residual drift.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 17 February 2019

**Revise Date:** 02 August 2019

**Accept Date:** 18 September 2019

### Keywords:

Steel plate shear wall;  
Couple shear wall;  
Force based design;  
Performance-based plastic design

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.171726.1787

\*Corresponding author: Mohammad Gholami  
Email address: m.gholami@yu.ac.ir

## بررسی رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی همبسته طراحی شده بر اساس روش طراحی

### پلاستیک بر اساس عملکرد

احسان وزیری<sup>۱</sup>، محمد غلامی<sup>۲\*</sup>، عبدالرضا زارع<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

۲- استادیار دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

۳- استادیار دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

### چکیده

سیستم دیوار برشی فولادی همبسته شامل دو دیوار برشی فولادی می‌باشد که توسط تیر پیوند در تراز طبقات به هم متصل شده‌اند و بدین طریق امکان ایجاد بازشو در دیوار فراهم می‌شود. در این پژوهش، ۲ نمونه دیوار برشی همبسته‌ی ۶ طبقه با ورق جان تخت با روش طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد و ۲ نمونه دیگر با روش طراحی بر اساس نیرو، طراحی و در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شدند و خروجی‌های نرم‌افزار با سازوکار رفتاری دیوار برشی فولادی غیرهمبسته و همبسته با ورق جان تخت مقایسه و مورد تأیید قرار گرفتند. در ادامه، این ۴ نمونه تحت سه رکورد زلزله *Kobe Northridge* و *Tabas* تحت تحلیل تاریخچه زمانی قرار گرفتند. خروجی‌های موردبررسی شامل تغییر مکان جانبی نسبی طبقات در لحظه بیشترین جابجایی بام و تغییر مکان جانبی نسبی پسماند می‌باشند. با توجه به این خروجی‌ها مشخص شد که هرچند هر ۴ نمونه، تغییر مکان جانبی نسبی مجاز ۲ درصد را جابگو هستند، اما هرکدام از روش‌های طراحی دارای مزیت‌هایی نسبت به دیگری هستند. مزیت‌های روش طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد نسبت به روش طراحی بر اساس نیرو مصرف کمتر فولاد و توزیع یکسان‌تر تغییر مکان جانبی نسبی در طبقات می‌باشد؛ درحالی‌که مزیت روش طراحی بر اساس نیرو داشتن تغییر مکان جانبی نسبی کمتر می‌باشد. در ضمن تغییر مکان جانبی نسبی پسماند در نمونه‌های طراحی شده با روش طراحی بر اساس نیرو نسبت به نمونه‌های طراحی شده با روش طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد کمتر می‌باشد.

کلمات کلیدی: دیوار برشی فولادی همبسته، طراحی بر اساس نیرو، طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد

doi:	شناسه دیجیتال:				سابقه مقاله:	
	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت	
10.22065/JSCE.2019.171726.1787						
https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.171726.1787	۱۴۰۰/۰۴/۳۰	۱۳۹۸/۰۶/۲۷	۱۳۹۸/۰۶/۲۷	۱۳۹۸/۰۵/۱۱	۱۳۹۷/۱۱/۲۸	
محمد غلامی m.gholami@yu.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

استفاده از سیستم دیوار برشی فولادی به دلیل سختی و شکل پذیری مناسب در حال حاضر رو به افزایش است. در دو دهه اخیر پژوهشگران زیادی از جمله بهبهانی فرد و همکاران [۱]، خرازی و همکاران [۲]، قلهکی و همکاران [۳]، حسین زاده و همکاران [۴] و مفید و همکاران [۵] بر روی دیوار برشی فولادی با ورق جان تخت پژوهش کردند. آن‌ها تئوری میدان کششی خالص را توسعه دادند و میدان کششی قطری را که در یک ورق نازک مقید شده به وسیله قاب سخت، شکل می‌گیرد، به عنوان مکانیزم اصلی مقاومت در برابر برش در نظر گرفتند. سیستم دیوارهای برشی فولادی همبسته، از دو دیوار برشی فولادی با ورق جان تخت و اتصال تیر به ستون صلب، تشکیل یافته، که در تراز طبقات با تیرهای پیوند متصل شده‌اند. پیکربندی این سیستم علاوه بر حفظ مزایای دیوارهای برشی فولادی، انعطاف پذیری بیشتری در ارتباط با عملکرد ساختمان ارائه نموده و راندمان سازه را افزایش می‌دهد. در چند سال اخیر برلو و همکاران [۶ و ۷] و ونگ و همکاران [۸] پژوهش‌های متعددی بر روی دیوار برشی همبسته با درجه همبستگی متفاوت انجام دادند. آن‌ها طی این پژوهش‌ها متوجه سازوکار رفتاری و اثرات مزیت بخش همبستگی دیوارهای برشی فولادی همبسته شدند. شکسته‌بند و همکاران [۹] چند نمونه دیوار برشی فولادی همبسته با رفتار خمشی، برشی و خمشی-برشی تیر پیوند در ادامه پژوهش‌های برلو و همکاران مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش ابعاد تیر پیوند، میزان استهلاک انرژی و همچنین مقاومت مدل‌ها تحت بارگذاری رفت و برگشتی افزایش می‌یابد. در همه پژوهش‌های ذکر شده از روش طراحی بر اساس نیرو<sup>۱</sup> (FBD) [۱۰]، برای طراحی سیستم دیوار برشی فولادی استفاده شده است. این پژوهشگران [۶، ۷، ۸ و ۹] در تحقیقات خود متوجه شدند که توزیع تغییر مکان جانبی نسبی در طبقات نمونه‌های همبسته مورد بررسی غیر یکنواخت می‌باشد؛ در ادامه، برای حل این مشکل و استفاده از ظرفیت شکل پذیری در همه طبقات، روش طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد (PBPD)<sup>۲</sup> توسط گوش<sup>۳</sup> و همکاران [۱۱] برای طراحی دیوار برشی فولادی غیر همبسته و گرجی و همکاران [۱۲] برای طراحی دیوار برشی فولادی همبسته مورد استفاده قرار گرفت. ایشان نتیجه گرفتند که روش طراحی بر اساس عملکرد منجر به توزیع یکسان تر تغییر مکان جانبی نسبی در طبقات می‌شود. رویکرد طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد بر مبنای تحلیل پلاستیک انجام می‌شود. در این روش طراحی، مکانیزم تسلیم از پیش انتخاب شده و تغییر مکان جانبی نسبی هدف به عنوان اهداف عملکرد در نظر گرفته شده است. در این پژوهش چندین مدل دیوار برشی فولادی همبسته با رفتار خمشی و خمشی-برشی تیر پیوند به روش طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد و طراحی بر اساس نیرو، طراحی و در نرم افزار آباکوس مورد تحلیل تاریخچه زمانی تحت ۳ رکورد زلزله قرار گرفتند. در نهایت وزن نمونه‌ها، تغییر مکان‌های جانبی نسبی طبقات در لحظه‌ای که جابجای بام بیشترین مقدار را دارد و تغییر مکان‌های جانبی نسبی پسماند برای مدل‌ها محاسبه شد است.

۲- محاسبه برش پایه و توزیع آن در طبقات در روش طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد

برخلاف آیین‌نامه‌های طراحی جاری، در رویکرد طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد، توزیع نیروهای جانبی طراحی بر اساس حداکثر برش طبقه ناشی، از تحلیل‌های غیرخطی تاریخچه زمانی گسترده، تعیین و در ارتفاع سازه توزیع می‌شود. این توزیع نیروهای جانبی در روابط ۱ تا ۳ ارائه شده است [۱۱].

$$F_i = (\beta_i - \beta_{i+1}) F_n : i = n \rightarrow \beta_{n+1} = 0 \quad (1)$$

$$F_n = V \left[ \frac{(W_n h_n)}{\sum_{j=1}^n (W_j h_j)} \right]^{0.75T-0.2} \quad (2)$$

<sup>1</sup> Force Based Design

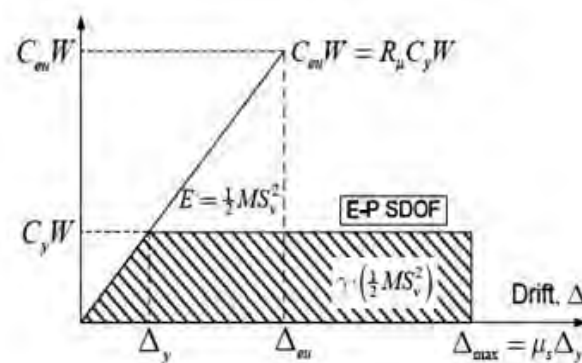
<sup>2</sup> Performance Based Plastic Design

<sup>3</sup> Ghosh

$$\beta_i = \frac{V_i}{V_n} = \left[ \frac{\sum_{j=1}^n (W_j h_j)}{(W_n h_n)} \right]^{0.75T-0.2} \quad (3)$$

در این روابط ضریب توزیع برش در سطح طبقه  $i$ ؛  $V_i$  و  $V_n$  به ترتیب نیروهای برش طبقه  $i$  و در سطح بالاترین طبقه  $n$ ؛  $W_i$  و  $W_j$  به ترتیب وزن‌های لرزه‌ای در سطح طبقه  $i$  و  $j$ ؛  $h_i$  و  $h_j$  به ترتیب ارتفاع‌های سطح طبقه  $i$  و  $j$  از سطح زمین؛  $W_n$  وزن لرزه‌ای بالاترین طبقه؛  $h_n$  ارتفاع بالاترین طبقه از سطح زمین؛  $T$  پریود اساسی سازه؛  $F_i$  و  $F_n$  به ترتیب نیروهای جانبی اعمال شده در سطح طبقه  $i$  و  $n$  و در نهایت  $V$  برش پایه طراحی است.

برای رسیدن به عملکرد مطلوب سازه در برابر زلزله‌های بزرگ، کنترل تغییر مکان جانبی نسبی ضروری است؛ که این امر باید در روند طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد در نظر گرفته شود. در روش طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد برش پایه طراحی با انتخاب یک سازوکار تسلیم مطلوب و پوش سازه به‌طور یکنواخت تا رسیدن به تغییر مکان جانبی نسبی هدف پیشنهادی، تعیین می‌شود. در این راستا مقدار کار موردنیاز برای انجام این کار  $\gamma$  برابر انرژی ورودی  $E = \frac{1}{2} MS_v^2$  یک سیستم یک درجه آزادی (SDOF) معادل مطابق شکل ۱ فرض می‌شود.



شکل ۱: پاسخ سازه ایدآل شده و مفهوم تعادل انرژی

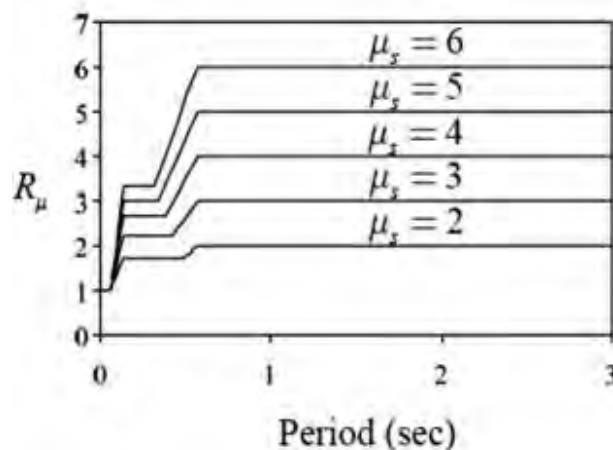
در نهایت برش پایه طراحی از معادله کارمایه از طریق رابطه ۴، ضریب بدون بعد  $\lambda$  وابسته به پریود سازه از طریق رابطه ۵ و ضریب اصلاح  $\gamma$  وابسته به ضریب شکل‌پذیری ( $\mu = \Delta_{max}/\Delta_y$ ) و ضریب کاهش شکل‌پذیری ( $R_\mu = C_{eu}/C_y$ ) مرتبط با پریود سازه از طریق رابطه ۶ محاسبه می‌شود.

$$\frac{V}{W} = \frac{(-\lambda + \sqrt{\lambda^2 + 4\gamma S_a^2})}{2} \quad (4)$$

$$\lambda = \left[ \sum_{i=1}^n (\beta_i - \beta_{i+1}) h_i \right] \times \left[ \frac{(W_n h_n)}{\sum_{j=1}^n (W_j h_j)} \right]^{0.75T-0.2} \times \left[ \frac{\theta_p 8 \Pi^2}{T^2 g} \right] \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{(2\mu_s - 1)}{R_\mu^2} \quad (6)$$

در آن  $V$  برش پایه طراحی؛  $W$  وزن لرزه‌ای سازه؛  $\lambda$  یک پارامتر بدون بعد وابسته به پیوند سازه، ویژگی‌های مودال و تغییر مکان جانبی نسبی هدف؛  $S_a$  ضریب شبه شتاب بر اساس طیف طراحی؛  $\gamma$  ضریب اصلاح و  $C_2$  ضریبی برای در نظر گرفتن اثر لاغر شدگی در رفتار چرخه‌ای دیوار برشی است. همچنین در این پژوهش از روش پیشنهادی Newmark و Hall برای به دست آوردن ضریب کاهش شکل‌پذیری و ضریب شکل‌پذیری سازه مطابق شکل ۲ استفاده شده است.



شکل ۲: ضرایب کاهش شکل‌پذیری Hall و Newmark

باید توجه داشت که در رویکرد پیشنهادی، برش پایه طراحی شامل ضریب اهمیت ( $I$ ) نمی‌باشد. این ضریب افزایشی سطح نیروی طراحی، در تلاش برای پایین آوردن تغییر مکان جانبی نسبی و تقاضای شکل‌پذیری سازه برای یک سطح زلزله معین است. با این وجود، این ضریب نمی‌تواند به‌عنوان یک روش مستقیم برای به دست آوردن هدفی همچون کنترل سطح خرابی مورد توجه قرار گیرد. کاهش پتانسیل آسیب باید با استفاده از محدودیت‌های مناسب دیگری انجام یابد. در این راستا رویکرد طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد، انتخاب تغییر مکان جانبی نسبی هدف مطلوب را به‌عنوان پارامتر حاکم استفاده کرده و فرض می‌نماید تغییر مکان جانبی نسبی هدف انتخابی، ضریب اهمیت را در بر خواهد داشت.

### ۳- طراحی دیوارهای برشی فولادی همبسته

#### ۳-۱- روش‌های طراحی

##### ۳-۱-۱- طراحی بر اساس نیرو دیوار برشی فولادی همبسته

برلو و همکاران [۷ و ۸] چندین مدل دیوار برشی فولادی همبسته را به روش طراحی بر اساس نیرو، طراحی و به‌صورت عددی و آزمایشگاهی مورد تحلیل قراردادند و پس از بررسی رفتار این نوع دیوارها، متوجه شدند که در ابتدا ورق جان به دلیل تشکیل میدان کششی تسلیم شده و سپس تیرهای طبقات و تیرهای پیوند تسلیم می‌شوند و به عبارتی سه منبع برای اتلاف انرژی وجود دارد. برلو و همکاران [۷ و ۸] در نهایت برای طراحی دیوارهای برشی همبسته روشی ارائه کردند که به‌صورت کلی و در قالب ۴ گام در زیر ارائه می‌شود:

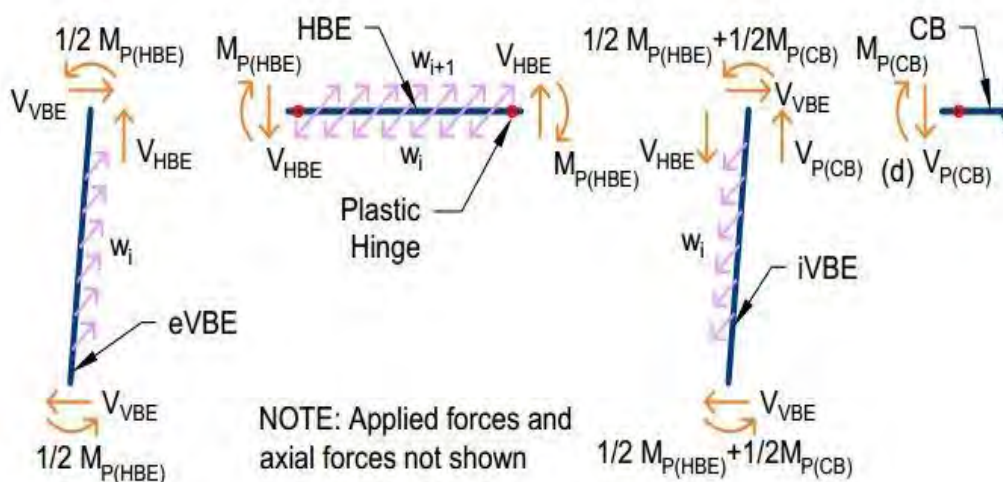
گام ۱: محاسبه برش پایه و توزیع آن در طبقات طبق روش ASCE-7 (محاسبه برش پایه بر اساس نیرو)

گام ۲: ضخامت ورق جان دیوار برشی فولادی برای ۱۰۰ درصد برش هر طبقه طبق رابطه ۷ محاسبه می‌شود.

$$V_n = 0.42 F_y t_w L_{cf} \sin(2\alpha) \quad (7)$$

گام ۳: بر اساس ضخامت به دست آمده برای ورق جان دیوار برشی در گام ۱، تیرهای طبقات و تیرهای پیوند بر اساس ظرفیت تسلیم ورق جان طراحی می‌شوند. در شکل ۳ نحوه محاسبه نیروی وارد بر تیر و ستون نشان داده شده است؛ در این تصویر،  $M_{p(cb)}$  و  $V_{p(cb)}$  به ترتیب لنگر پلاستیک در تیر همبند و نیروی برشی حاصل از تشکیل مفاصل پلاستیک در تیر همبند،  $M_{p(HBE)}$  و  $V_{p(HBE)}$  به ترتیب لنگر پلاستیک در تیر طبقه و نیروی برشی حاصل از تشکیل مفاصل پلاستیک در تیر طبقه و  $W_i$  و  $W_{i+1}$  به ترتیب نیروهای ناشی از تسلیم میدان کششی در طبقه  $i$ ام و طبقه  $i+1$ ام می‌باشند. در اینجا از ارائه توضیحات بیشتر خودداری می‌شود و برای توضیحات بیشتر به پژوهش برلو و همکاران [۷ و ۸] مراجعه شود.

گام ۴: ستون‌ها بر اساس ظرفیت تسلیم ورق جان، تیرهای طبقات و تیرهای پیوند طراحی می‌شوند.



شکل ۳: دیاگرام نیروی داخلی دیوار برشی فولادی همبسته [۷ و ۸]

۳-۱-۲- طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد دیوار برشی فولادی همبسته

در روش طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد برای طراحی اعضا باید گام‌های ۱ تا ۳ را طی کرد:

گام ۱: برش پایه هر طبقه مطابق مطالب ارائه شده در بخش ۲ محاسبه شده طبق روابط ۱ تا ۳ در ارتفاع سازه توزیع می‌شود.

گام ۲: ضخامت ورق جان، تیرهای طبقات و تیرهای پیوند به نحوی تعیین می‌شود که جواب گوی نیروی وارد بر طبقات باشند.

برای این کار ابتدا مقاطع تیرهای طبقات و ستون‌ها فرض می‌شوند و سپس طبق رابطه ۸ نیروی طراحی ورق جان هر طبقه ( $P_i$ ) و طبق رابطه ۹ ضخامت ورق جان هر پنل دیوار برشی تعیین می‌شود.

$$\left( \sum_{i=1}^n F_i h_i \right) \theta_p = 4M_{pc} \theta_p + 4 \sum_{i=1}^n M_{phi} \theta_p + 2 \sum_{i=1}^n M_{pbi} \theta_p + \sum_{i=1}^n P_i h_{si} \theta_p \quad (8)$$

$$P_i / 2 = 0.42 F_y t_w L_{cf} \sin(2\alpha) \quad (9)$$

در این روابط  $F_i$  نیروی وارد در تراز هر طبقه؛  $h_i$  ارتفاع هر طبقه از تراز پایه؛  $\theta_p$  تغییر مکان جانبی نسبی پلاستیک؛  $M_{pc}$  ظرفیت لنگر پلاستیک در پای هر ستون؛  $M_{pbi}$  ظرفیت لنگر پلاستیک در تیر طبقه  $i$ ام؛  $M_{pbc}$  ظرفیت لنگر پلاستیک در تیر پیوند طبقه  $i$ ام و  $h_{si}$  ارتفاع هر طبقه است.

گام ۳: ابعاد تیرهای طبقات و تیرهای پیوند به نحوی کنترل می‌شوند که قبل از ورق جان تسلیم نشوند و بر اساس طراحی ظرفیت جوابگوی مقاومت باشند. نیروی وارد بر تیرها همانند روش ارائه شده توسط برلو و همکاران [۷ و ۸] و مطابق شکل ۳ محاسبه می‌شود. در صورتی که مقطع فرض شده در گام ۲ جوابگو نباشد، مقطع تیر تغییر داده می‌شود و طراحی به گام ۲ برمی‌گردد. گام ۴: ستون‌ها بر اساس ظرفیت تسلیم ورق جان، تیرهای طبقات و تیرهای پیوند طراحی می‌شوند. نیروی وارد بر ستون‌ها، مانند گام ۲ با روش ارائه شده توسط برلو و همکاران [۷ و ۸] و مطابق شکل ۳ تعیین می‌شود. در صورتی که مقطع ستون فرض شده جوابگو نباشد، طراحی به گام ۲ برمی‌گردد.

### ۳-۲- طراحی نمونه‌ها

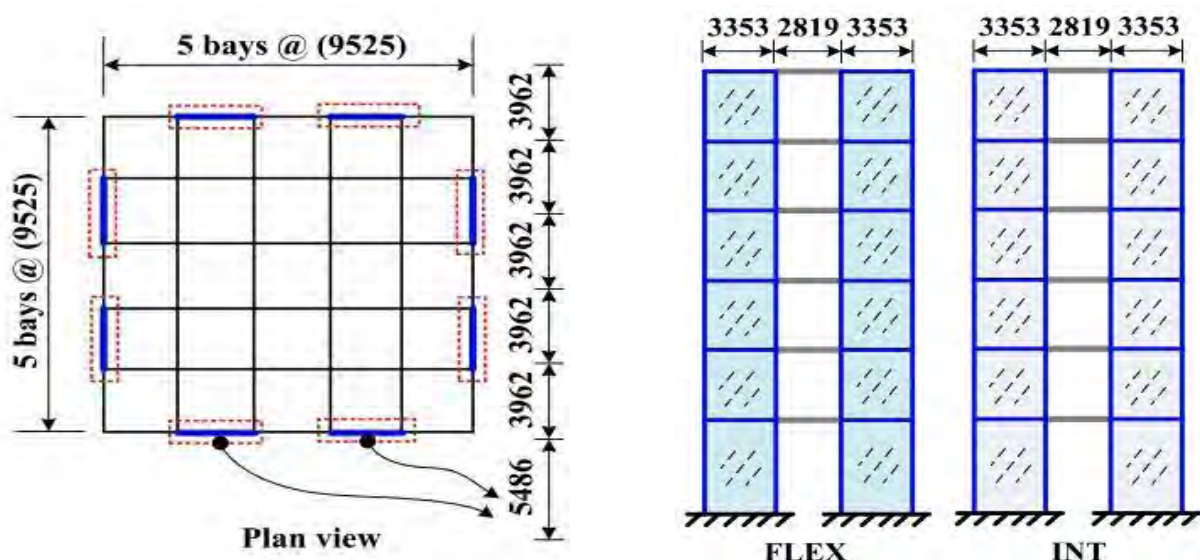
بر اساس روش طراحی نیرویی و روش طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد، ۴ نمونه سازه ۶ طبقه مورد طراحی قرار گرفت است. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده، هندسه پلان این سازه‌ها مطابق ساختمان SAC انتخاب شده است [۱۳]. جرم اولین طبقه  $10 \times 10^6$  کیلوگرم و جرم سایر طبقات  $9.9 \times 10^6$  کیلوگرم هستند. پیکربندی سازه در هر جهت دارای چهار دیوار برشی در محیط می‌باشد. کاربری ساختمان اداری، موقعیت آن در شهر لس‌آنجلس کالیفرنیا با خاک نوع D می‌باشد. برش پایه محاسبه شده از هر دو روش طراحی در جداول ۱ ارائه شده است. به دلیل اثر مزیت بخش همبستگی، در روند طراحی بر اساس نیرو مدلهای، ضخامت ورق جان برای تحمل حدود ۶۰ الی ۷۰ درصد برش پایه محاسبه شده است. برای ساخت المان‌های مرزی از فولاد A992 و برای ساخت ورق‌های جان پرکننده از فولاد A36 استفاده شده است. مقاطع طراحی شده در جدول ۲ ارائه شده؛ با توجه به این که در این مدل‌ها تغییر ابعاد تیر پیوند سبب تغییر رفتار دیوار برشی فولادی همبسته می‌شود دلیل نام‌گذاری مدل‌ها به شرح زیر می‌شود:

الف) دیوار برشی فولادی همبسته با ابعاد یکسان تیرهای پیوند و تیرهای استفاده شده در طبقات پنل دیوار برشی

$$(Flex \Rightarrow M_{P(CB)} / M_{P(HBE)} = 1)$$

ب) دیوار برشی فولادی همبسته با ابعاد تیرهای پیوند حدود دو برابر تیر استفاده شده در طبقات پنل دیوار برشی

$$(Int \Rightarrow M_{P(CB)} / M_{P(HBE)} = 2)$$



شکل ۴: هندسه و ابعاد مدل در پلان و ارتفاع

جدول ۱: محاسبه‌ی برش پایه

پارامترهای طراحی بر اساس نیرو	پارامترهای طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد برای سطح خطر MCE
$T(sec)$ ۰/۱۵۵	$T(sec)$ ۰/۷
$S_a(g)$ ۱/۰۷	$S_a(g)$ ۱/۰۷
$C_s$ ۰/۱۵۳	$\theta_y(\%)$ ۰/۱۵
	$\theta_u(\%)$ ۲
	$\theta_p = (\theta_u - \theta_y)$ ۱/۵۰
	$C_2$ ۱/۲
$V(Kg)$ ۲۲۳۰	$\mu_s = (\theta_u / \theta_y) / C_2$ ۳/۳۳
	$R_\mu$ ۳/۲۳
	$\gamma$ ۰/۵۴
	$\lambda$ ۳/۷۳
	$V/W$ ۰/۱۶۰
	$V(Kg)$ ۲۳۳۰

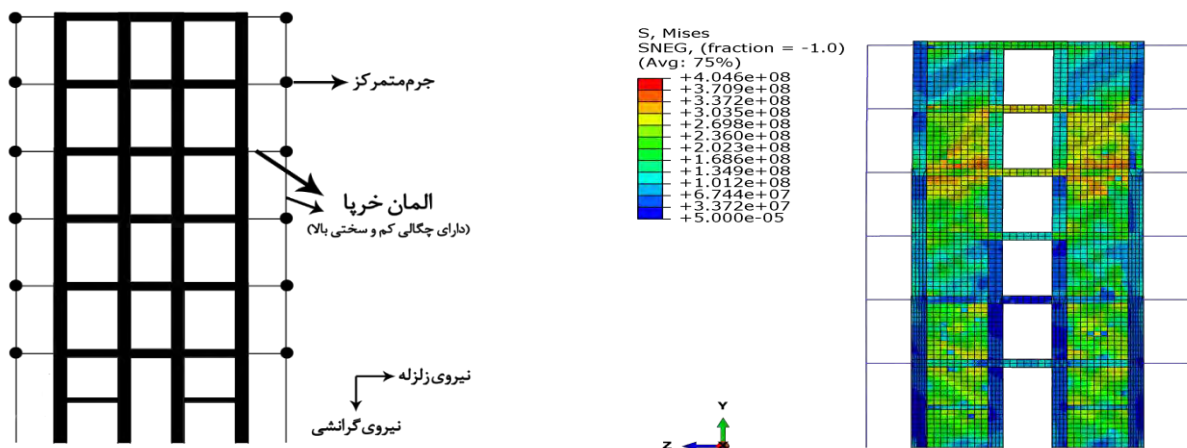
#### ۴- مدل سازی

در این پژوهش ورق‌ها، تیرها و ستون‌های دیوار برشی با المان‌های Shell چهار گره‌ی با انتگرال کاهش یافته (S4R) در نرم افزار آباکوس مدل سازی شده‌اند. محل اتصال دیوار با زمین به صورت گیردار مدل سازی شده است و جهت جلوگیری از حرکت خارج از صفحه‌ی تیرها، از تکیه‌گاه جانبی در محل اتصال تیر به ستون استفاده شده است. تیرهای همبند به صورت مستقیم به المان‌های مرزی قائم متصل شده‌اند. فرم نقص اولیه خارج از صفحه مطابق با مدل اول کمانش هر ورق با ماکزیمم مقدار برابر با 1/500 نسبت ارتفاع پانل به ضخامت ورق در مدل ایجاد شده است. برای در نظر گرفتن اثر  $P-\Delta$ ، مطابق با شکل ۵ جرم طبقات به صورت جرم متمرکز به دو ستون کناری که با المان خرپا مدل شده‌اند، اعمال می‌گردد. از ویژگی‌های المان خرپا، داشتن سختی در برابر نیروهای محوری و عدم وجود سختی جانبی می‌باشد؛ بدین ترتیب در برابر بار جانبی از خود هیچ سختی نشان نمی‌دهد. با توجه به اینکه ساختمان در هر راستا دارای ۴ سیستم باربری جانبی به صورت دیوار برشی همبسته می‌باشد و همچنین دارای تقارن در پلان می‌باشد، باید به هر کدام از دیوارهای برشی همبسته یک چهارم جرم لرزه‌ای طبقات را اعمال کرد. هنگامی دیوار برشی تحت بار جانبی زیاد قرار می‌گیرد، رفتارهای غیرخطی از جمله تشکیل عناصر پلاستیک در دو انتهای HBE، کمانش ورق، و تسلیم میدان کششی مشاهده می‌شود. با توجه به این رفتار پیچیده، جهت ایجاد همگرایی عددی در مدل، از آنالیز Explicit در آباکوس استفاده شده است.



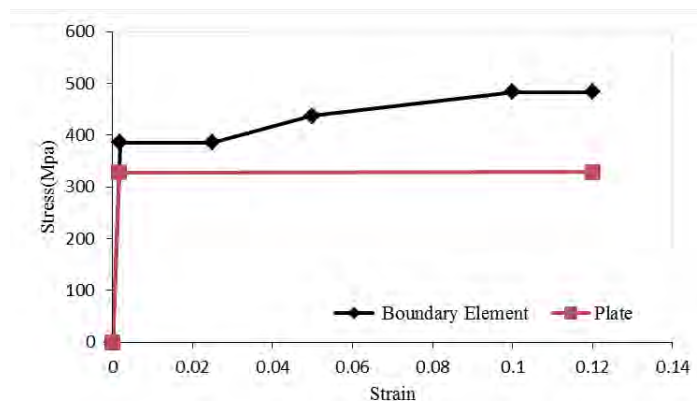
جدول ۲: مقاطع طراحی شده

Frame design	Story	plate (mm)	Ext.VBE	Int.VBE	HBE	CB
FLEX Flat plate (AISC)	۶	۰/۹۴	W24×94	W24×103	W18×35	W18×35
	۵	۱/۷۸	W24×94	W24×103	W18×40	W18×40
	۴	۲/۳۹	W24×162	W24×146	W18×46	W18×46
	۳	۲/۷۷	W24×162	W24×146	W18×50	W18×50
	۲	۳/۱۸	W24×279	W24×229	W18×50	W18×50
	۱	۳/۱۸	W24×279	W24×229	W18×50	W18×50
FLEX Flat plate (PBPD)	۶	۱/۲	W18×97	W18×86	W14×30	W14×30
	۵	۱/۵	W18×97	W18×86	W14×30	W14×30
	۴	۲	W18×119	W18×106	W14×38	W14×38
	۳	۲	W18×119	W18×106	W14×38	W14×38
	۲	۲/۵	W18×211	W18×143	W14×53	W14×53
	۱	۲/۵	W18×211	W18×143	W14×53	W14×53
INT Flat plate (AISC)	۶	۰/۷۹	W24×76	W24×131	W18×35	W18×86
	۵	۱/۱۲	W24×76	W24×131	W18×35	W18×86
	۴	۱/۷۸	W24×162	W24×131	W18×40	W18×86
	۳	۲/۷۷	W24×162	W24×131	W18×50	W18×97
	۲	۳/۱۸	W24×250	W24×207	W18×50	W18×97
	۱	۳/۱۸	W24×250	W24×207	W18×50	W18×97
INT Flat plate (PBPD)	۶	۱	W18×86	W18×76	W14×30	W14×61
	۵	۱	W18×86	W18×76	W14×30	W14×61
	۴	۱/۶	W18×106	W18×97	W14×38	W14×82
	۳	۱/۶	W18×106	W18×97	W14×38	W14×82
	۲	۲	W18×192	W18×130	W14×53	W16×89
	۱	۲	W18×192	W18×130	W14×53	W16×89



شکل ۵: معرفی مدل جهت تحلیل تاریخیچه زمانی

مصالح ورق و قاب به ترتیب از استانداردهای ASTM-A36 و ATM-A572 انتخاب شده است و به منظور مطالعه رفتار غیرخطی قاب و ورق از دیاگرام تنش- کرنش شکل ۶ استفاده شده است. تنش تسلیم تیر و ستون ۳۸۵ مگاپاسکال و تنش تسلیم ورق فولادی ۳۲۷ مگاپاسکال می باشد. مدل الاستیسیسته و ضریب پواسن به ترتیب برابر با ۲۱۰ گیگا پاسکال و ۰٫۳ می باشد.



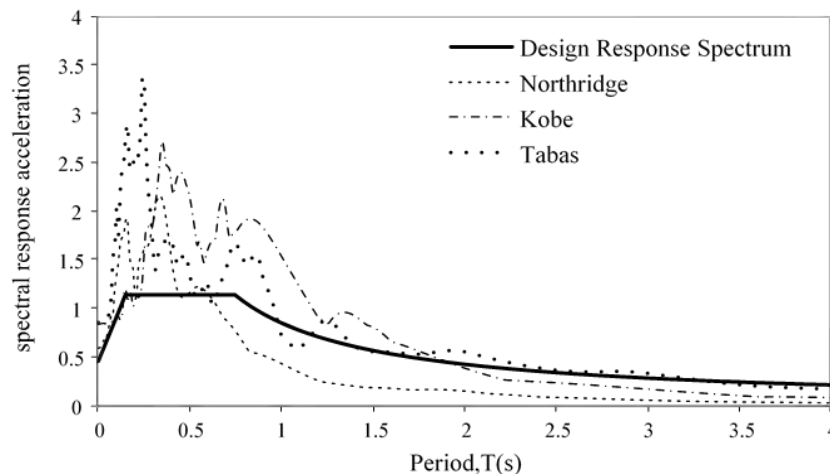
شکل ۶: نمودار تنش- کرنش ورق و المانهای مرزی سیستم دیوار برشی با ورق کنگره‌ای

از نکات دیگر در مدل سازی، معرفی میرایی ۵٪ برای مصالح است. برای معرفی میرایی، از ضرایب میرایی رایلی استفاده شده است. برای تحلیل تاریخیچه زمانی سازه‌های شش طبقه، از رکورد سه زلزله Northridge، Kobe و Tabas استفاده می شود. مشخصات هر کدام از سه زلزله در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: مشخصات شتاب‌نگاشت‌های استفاده شده در تحلیل تاریخیچه زمانی

زلزله	ایستگاه	مؤلفه	PGA(g)
Northridge	Newhall fire	Horizontal-360	0.589
Kobe	KJMA	Horizontal-000	0.821
Tabas	Tabas	Horizontal-L1.AT2	0.834

برای تحلیل تاریخیچه زمانی، سه شتاب‌نگاشت مورد استفاده مطابق آئین‌نامه بارگذاری آمریکا ASCE-7 و متناسب با دوره تناوب هر سازه، مقیاس می شوند. طیف پاسخ طراحی و طیف پاسخ شتاب‌نگاشت‌ها پس از مقیاس شدن در شکل ۷ ارائه شده است. شتاب طیف پاسخ طراحی ( $S_{Ds}$ ) برابر ۱/۱g و شتاب طیف طراحی در ثانیه یک ( $S_{D1}$ ) برابر ۰/۸g است.

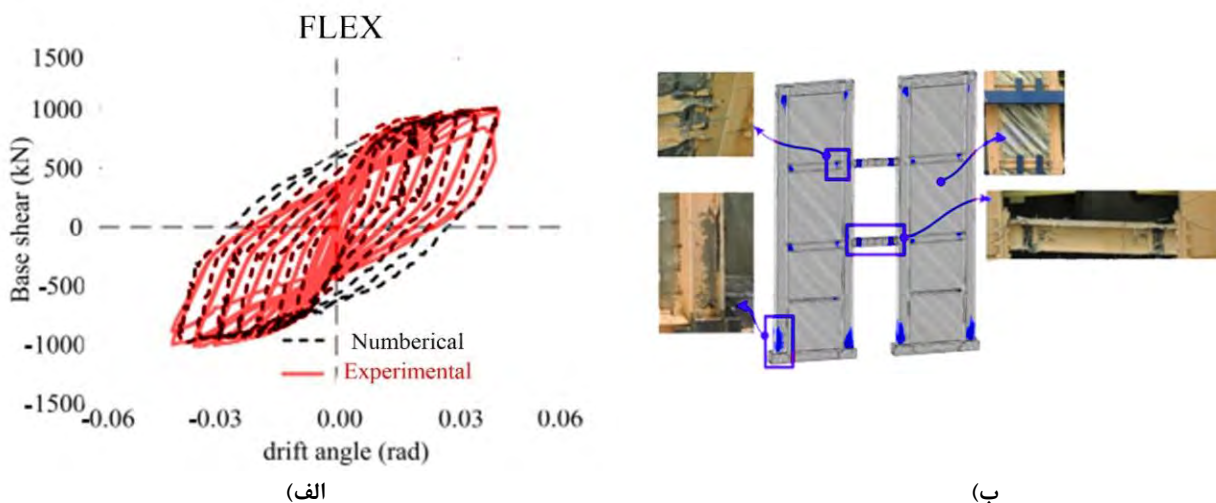


شکل ۷: طیف پاسخ طراحی و طیف پاسخ شتاب‌نگاشت‌ها جهت تحلیل تاریخچه زمانی

#### ۳-۴- صحت سنجی

##### ۳-۴-۱- صحت سنجی با نمونه‌ی آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی همبسته

در جهت صحت سنجی، نمونه آزمایشگاهی ۳ طبقه دیوار برشی فولادی همبسته که توسط wange و همکاران [۹] مورد بررسی قرار گرفت، در این مطالعه مدل‌سازی و سپس تحلیل عددی شد. (مشخصات مصالح و ابعاد نمونه آزمایشگاهی توسط wange و همکاران [۹] ارائه شده است و در اینجا جهت اختصار آورده نشده است). نمودار هیستریزیس مدل عددی و آزمایشگاهی در تصویر ۸ (الف) باهم مقایسه شده‌اند. از نظر مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی حاصل از نمودار چرخه‌ای، تطابق خوبی بین نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی وجود دارد. جهت امکان مقایسه‌ی بهتر، مقدار مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی در جدول ۴ مشخص شده‌اند. محل‌های ایجاد تسلیم و ایجاد میدان کششی در مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی در تصویر ۸ (ب) باهم مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود هم در مدل عددی و هم در نمونه آزمایشگاهی مفاصل پلاستیک در دو انتهای تیرها، در پای ستون و در دو انتهای تیرهای همبند تشکیل شده است. همچنین مشاهده می‌گردد که هم در مدل و هم در نمونه، میدان کششی در ورق ایجاد شده است. مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی مدل‌های عددی و نمونه‌های آزمایشگاهی که در جدول ۴ باهم ارائه شده‌اند، تطابق خوبی باهم دارند.



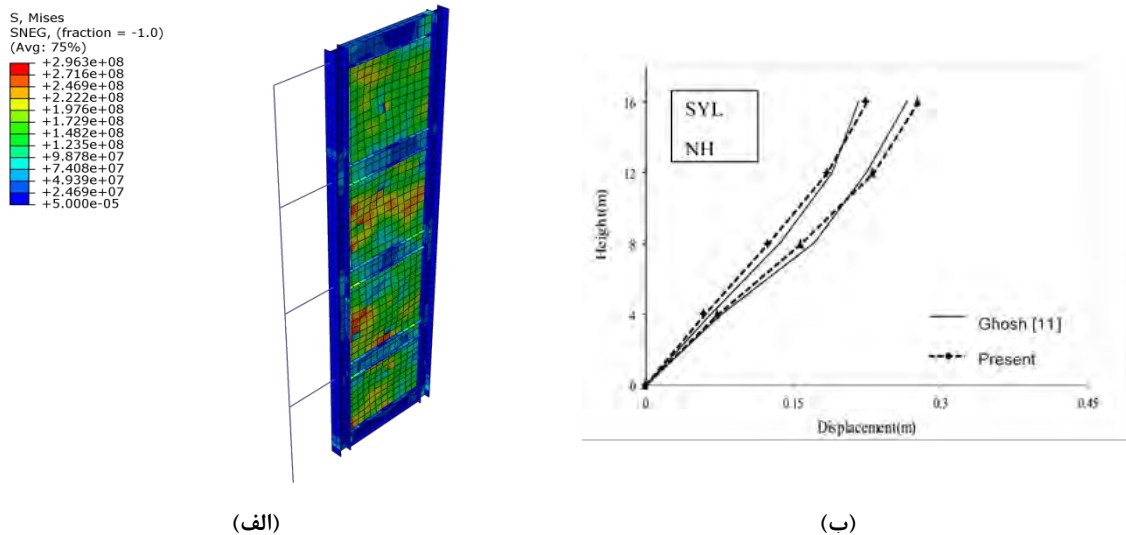
شکل ۸: (الف) مقایسه نمودار هیستریزیس مدل عددی و آزمایشگاهی [۹] (ب) مقایسه تسلیم‌شدگی مدل عددی و آزمایشگاهی [۹]

جدول ۴: مقایسه نتایج مدل عددی و نمونه‌های آزمایشگاهی

مدل	مقاومت تسلیم (کیلونیوتن)		نسبت آزمایشگاهی به عددی	مقاومت نهائی (کیلونیوتن)		نسبت آزمایشگاهی به عددی
	آزمایشگاهی	عددی		آزمایشگاهی	عددی	
Flex مدل	۴۷۶/۲	۴۹۳/۶	۰/۹۶	۱۰۲۱	۱۰۳۳	۰/۹۸

۴-۳-۲- صحت سنجی تحلیل تاریخچه زمانی دیوار برشی فولادی با ورق جان تخت

گوش و همکاران [۱۱] عملکرد چند مدل دیوار برشی را تحت تحلیل تاریخچه زمانی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای مدل‌سازی از نرم‌افزار Perform 3d استفاده کردند. در پژوهش حاضر یکی از مدل‌های بررسی شده توسط گوش و همکاران که شامل دیوار برشی فولادی ۴ طبقه با ورق جان تخت می‌باشد در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و تحت تحلیل تاریخچه زمانی قرار گرفت است. در شکل ۹ دیوار برشی مدل‌سازی شده نمایش و نمودار جابجایی طبقات در لحظه‌ای بیشترین جابجایی بام مورد مقایسه قرار گرفت است.

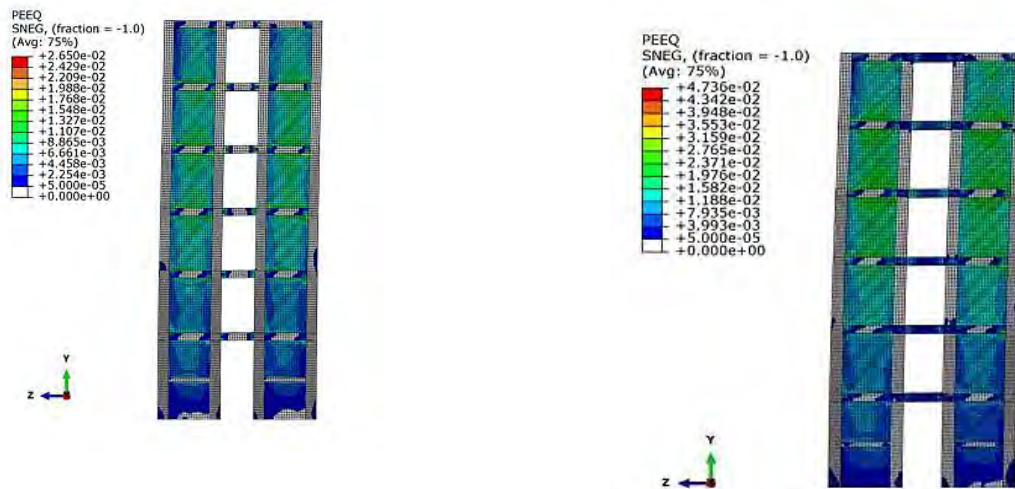


شکل ۹: (الف) مدل سازی دیوار برشی فولادی با ورق جان تخت (ب) مقایسه رفتاری تحت تحلیل تاریخچه زمانی [۱۱]

## ۵- نتایج

### ۵-۱- بررسی مکانیزم تسلیم

در شکل ۱۰، با استفاده از معیار PEEQ، تسلیم‌شدگی در دو مدل طراحی شده با روش عملکردی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در هر دو مدل، مکانیزم تسلیم مورد انتظار در این روش طراحی ایجاد شده است: یعنی ایجاد مفاصل پلاستیک در دو انتهای HBES و در پایه‌ی VBES، تسلیم میدان کششی ایجاد شده در ورق و تسلیم‌شدگی خمشی و اندرکنش خمشی-برشی به ترتیب در تیرهای کوبله نمونه‌های Flex و INT. در ضمن در هر دو نمونه، تسلیم میدان کششی قبل از ایجاد سایر تسلیم‌شدگی‌ها رخ داده است. مکانیزم تسلیم در نمونه‌های طراحی شده با روش نیرویی، که در مقاله‌ی [۸] توضیح داده شده است، مشابه با مکانیزم تسلیم توضیح داده شده در بالا می‌باشد و لذا در جهت اختصار در تحقیق حاضر آورده نشده است.



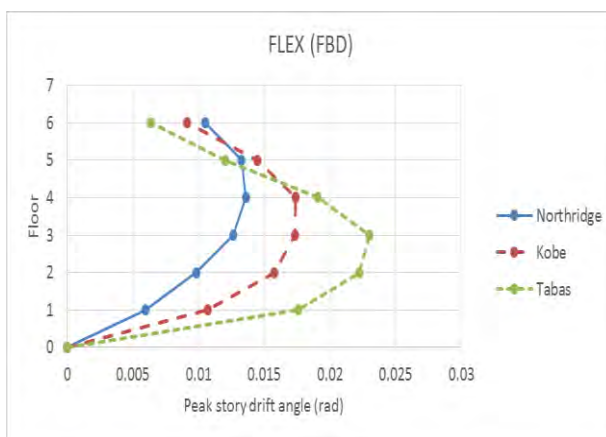
(ب)

(ف)

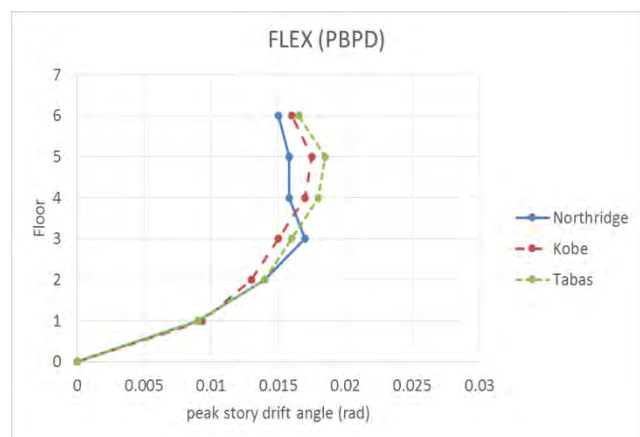
شکل ۱۰: نمایش تسلیم‌شدگی (الف) در مدل FLEX (ب) در مدل INT

## ۲-۵- توزیع تغییر مکان جانبی نسبی در طبقات

در شکل ۱۱ و ۱۲ نمودار جابجایی نسبی طبقات برای هر ۴ مدل دیوار برشی فولادی همبسته ارائه شده است.

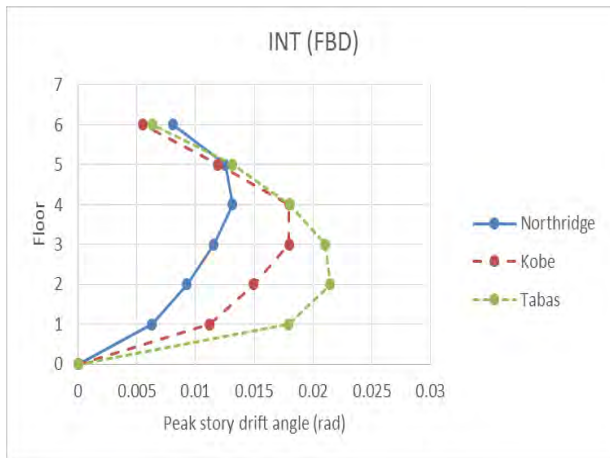


(الف)

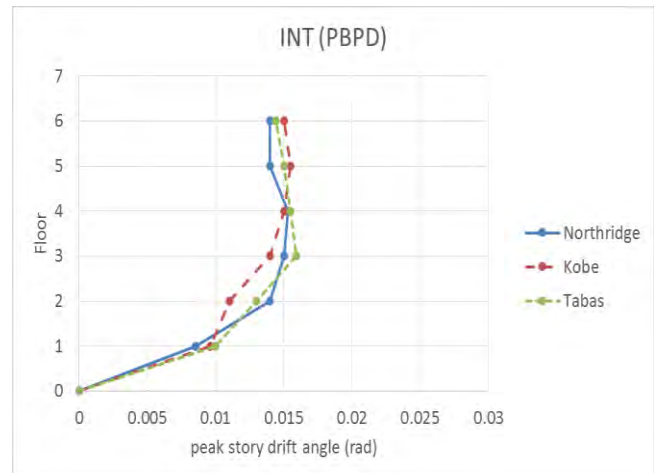


(ب)

شکل ۱۱: نمودار توزیع تغییر مکان جانبی نسبی در طبقات برای دیوار برشی فولادی همبسته با ورق جان تخت و رفتار خمشی تیر پیوند (الف) طراحی بر اساس نیرو (ب) طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد



(الف)



(ب)

شکل ۱۲: نمودار توزیع تغییر مکان جانبی نسبی در طبقات برای دیوار برشی فولادی همبسته با ورق جان تخت و رفتار خمشی-برشی تیر پیوند (الف) طراحی بر اساس نیرو (ب) طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد

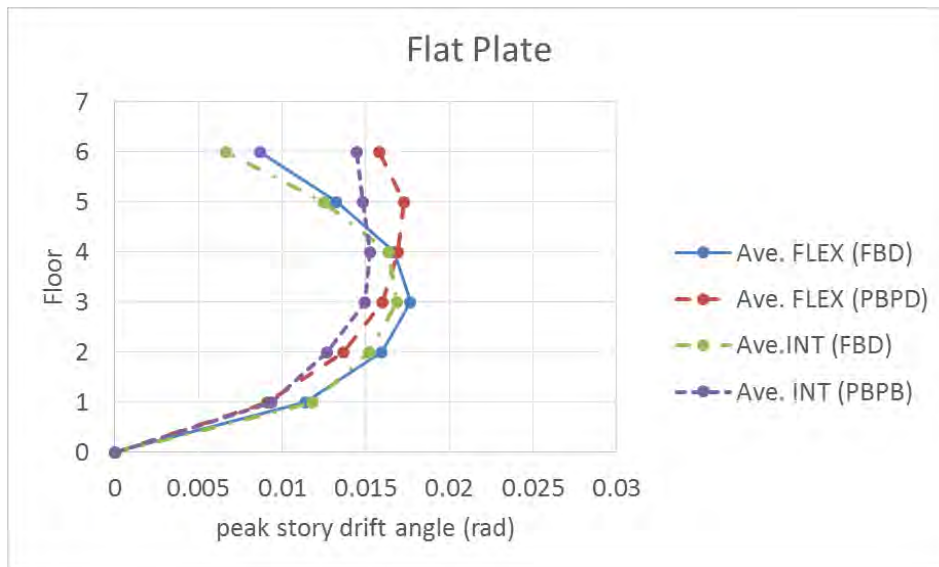
از نمودار شکل ۱۱- الف و ۱۲- الف این طور نتیجه می شود که روش طراحی بر اساس نیرو قادر به استفاده درست از ظرفیت شکل پذیری سازه نیست، زیرا با افزایش صلبیت سازه از عملکرد بهینه جان کاسته می شود. در مدل های طراحی شده به روش طراحی بر اساس نیرو در طبقات میانی تمرکز تغییر مکان جانبی نسبی داریم؛ به همین دلیل در این طبقات ماکزیمم تغییر مکان جانبی نسبی وجود دارد. از نمودار شکل ۱۱- ب و ۱۲- ب این طور نتیجه می شود که روش طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد، قادر به استفاده درست از ظرفیت شکل پذیری سازه بوده زیرا هیچ تراکم مفاصل پلاستیک در هیچ طبقه ای وجود ندارد، به عبارت دیگر تغییر مکان ناگهانی در طبقات وجود نداشته و تغییر مکان جانبی نسبی در ارتفاع سازه به صورت تقریباً یکسان است. از بین ۴ مدل طراحی شده، مدل دیوار برشی فولادی همبسته با رفتار خمشی تیر پیوند که به روش طراحی بر اساس نیرو طراحی شده است دارای بیشترین تغییر مکان جانبی نسبی می باشد.

برای ارزیابی عملکرد قاب های طراحی شده به دو روش طراحی بر اساس نیرو و طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد، میانگین نمودارهای ارائه شده در شکل های ۱۱ و ۱۲ در شکل ۱۳ برای هر ۴ مدل ارائه شده است.

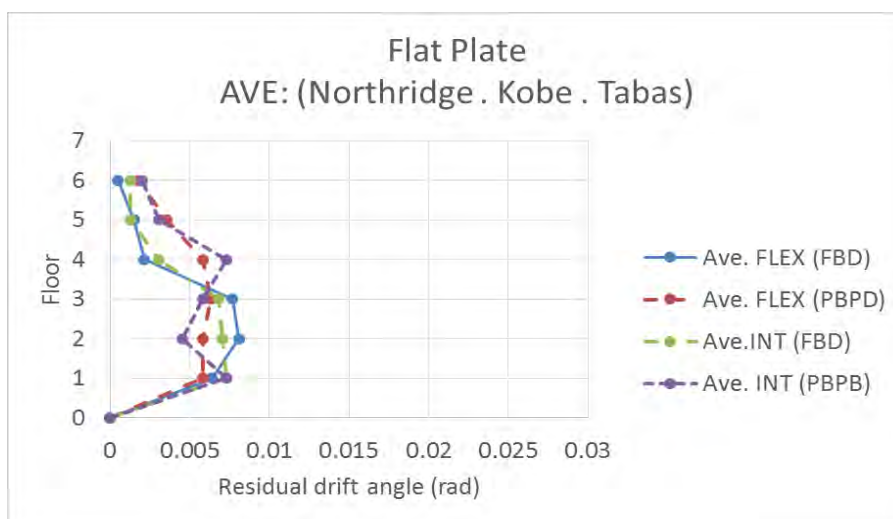
همان طور که در شکل ۱۳ نمایش داده شده است میانگین تغییر مکان جانبی نسبی همه مدل های طراحی شده به هر دو روش طراحی، تغییر مکان جانبی نسبی مجاز ۲ درصد را جوابگو بوده اند در حالی که مدل هایی که با روش طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد طراحی می شوند، دارای توزیع تغییر مکان جانبی نسبی یکسان تری در ارتفاع سازه هستند.

نمودار تغییر مکان جانبی نسبی پسماند برای ۴ مدل دیوار برشی فولادی همبسته با ورق جان تخت طراحی شده به روش طراحی بر اساس نیرو و طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد در شکل ۱۴ نمایش داده شده است.

همان طور که در نمودار شکل ۱۴ نمایش داده شده است مدل های طراحی شده به روش طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد دارای تغییر مکان جانبی نسبی پسماند یکسانی هستند که دلیل آن جاری شدن ورق جان و تشکیل مفاصل تیرهای طبقات و تیرهای پیوند می باشد. بیشترین تغییر مکان جانبی نسبی پسماند مربوط به طبقات میانی مدل دیوار برشی فولادی همبسته با رفتار خمشی-برشی تیر پیوند، طراحی شده به روش طراحی بر اساس نیرو می باشد که نشان دهنده تراکم مفاصل پلاستیک در این طبقات می باشد.



شکل ۱۳: نمودار میانگین توزیع تغییر مکان جانبی نسبی در طبقات برای ۴ مدل دیوار برشی فولاد همبسته با ورق جان تخت در حالت طراحی بر اساس نیرو و طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد

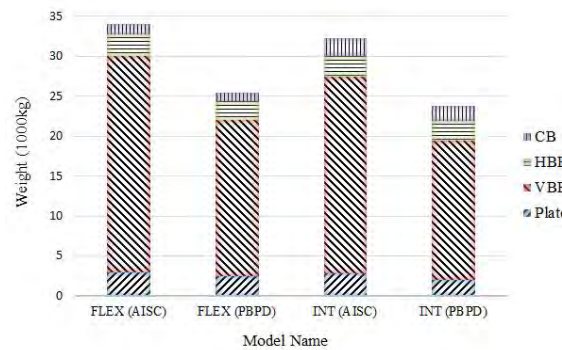


شکل ۱۴: نمودار تغییر مکان جانبی نسبی پسماند برای هر ۴ مدل طراحی شده با روش‌های طراحی بر اساس نیرو و طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد

### ۵-۳- وزن نمونه‌ها

در شکل ۱۵ نمودار وزن اجزاء تشکیل‌دهنده نمونه‌ها نمایش داده شده است.

با توجه به نمودار شکل ۱۵، وزن نمونه‌های طراحی شده با روش طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد حدود ۳۰ درصد کمتر از وزن نمونه‌های طراحی شده با روش طراحی بر اساس نیرو می‌باشد. از طرفی مدل دیوار برشی همبسته با ورق جان تخت با رفتار خمشی-برشی تیر پیوند که بر اساس روش طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد طراحی شده است به دلیل اثر مزیت بخش همبستگی دارای کمترین وزن در بین نمونه‌ها می‌باشد.



شکل ۱۵: نمودار وزن اجزاء تشکیل دهنده نمونه‌ها

## ۶- نتیجه گیری

در این پژوهش ۲ مدل دیوار برشی فولادی همبسته با ورق جان تخت و رفتار خمشی تیر پیوند و ۲ مدل دیوار برشی فولادی همبسته با ورق جان تخت با رفتار خمشی-برشی تیر پیوند به دو روش طراحی بر اساس نیرو و طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد طراحی شدند. مدل‌های مذکور در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و مورد تحلیل تاریخچه زمانی تحت سه رکورد زلزله Northridge، Kobe و Tabas قرار گرفتند و در نهایت نتایج زیر حاصل شد:

- وزن نمونه‌های طراحی شده به روش طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد حدود ۳۰ درصد کمتر از نمونه‌های طراحی شده با روش طراحی بر اساس نیرو می‌باشد.
- توزیع تغییر مکان جانبی نسبی در طبقات در مدل‌های طراحی شده با روش طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد نسبت مدل‌های طراحی شده با روش طراحی بر اساس نیرو، یکنواخت‌تر می‌باشد.
- تغییر مکان جانبی نسبی پسماند در مدل‌های طراحی شده با روش طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد نسبت مدل‌های طراحی شده با روش طراحی بر اساس نیرو، بیشتر می‌باشد.

## ۷- مراجع

- [1]. Behbahanifard, M. R., Grondin, G. Y., & Elwi, A. E. A. (2003). Experimental and numerical investigation of steel plate shear walls. University of Alberta, Department of Civil and Environmental Engineering.
- [2]. Kharrazi, M. H., Ventura, C. E., Prion, H. G., & Sabouri-Ghomi, S. (2004, August). Bending and shear analysis and design of ductile steel plate walls. In 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, BC, Canada, paper(No. 77).
- [3]. SABOURI, G. S., & GHOL, H. M. (2008). Ductility of thin steel plate shear walls.
- [4]. Hosseinzadeh, S. A. A., & Tehranizadeh, M. (2014). Behavioral characteristics of code designed steel plate shear wall systems. Journal of Constructional Steel Research, 99, 72-84.
- [5]. Emami, F., Mofid, M., & Vafai, A. (2013). Experimental study on cyclic behavior of trapezoidally corrugated steel shear walls. Engineering Structures, 48, 750-762.
- [6]. Borello, D. J., & Fahnstock, L. A. (2012). Seismic design and analysis of steel plate shear walls with coupling. Journal of Structural Engineering, 139(8), 1263-1273.
- [7]. Borello, D. J., & Fahnstock, L. A. (2012). Behavior and mechanisms of steel plate shear walls with coupling. Journal of Constructional Steel Research, 74, 8-16.
- [8]. Wang, M., Borello, D. J., & Fahnstock, L. A. (2017). Boundary frame contribution in coupled and uncoupled steel plate shear walls. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 46(14), 2355-2380.
- [9]. Pavir, A., & Shekastehband, B. (2017). Hysteretic behavior of coupled steel plate shear walls. Journal of Constructional Steel Research, 133, 19-35.
- [10]. AISC, A. (2005). AISC 341-05. Seismic provisions for structural steel buildings. Chicago (IL): American Institute of Steel Construction.
- [11]. Kharmale, S. B., & Ghosh, S. (2013). Performance-based plastic design of steel plate shear walls. Journal of Constructional Steel Research, 90, 85-97.
- [12]. Gorji, M. S., & Cheng, J. R. (2018). Plastic analysis and performance-based design of coupled steel plate shear walls. Engineering Structures, 166, 472-484.
- [13]. FEMA. (2000). FEMA 355 State of the Art Report on Systems Performance of Steel Moment Frames Subject to Earthquake Ground Shaking. Rep. No. FEMA-355C.