

## ارزیابی لرزه‌ای سازه‌های فولادی سبک (LSF)

علی جعفروند<sup>1</sup>، میثم جلیل خانی<sup>2</sup>

1- استادیار، گروه سازه، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

ali\_jafarvand@yahoo.com

2- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

m.jalilkhani@yahoo.com

### چکیده

امروزه به منظور مقاوم سازی هرچه بیش تر سازه‌ها در برابر زلزله از روش‌های مختلفی بهره گرفته می‌شود. یکی از روش‌های مؤثر در بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌ها، استفاده از سیستم‌های سازه‌ای فولادی سبک (LSF) است. این نوع سیستم‌ها در هنگام وقوع زلزله‌های شدید، مقدار نیروی جانبی کمی را دریافت می‌کنند و به دلیل دو خاصیت ویژه، یعنی پیش ساخته بودن اعضای سازه‌ای و عایق حرارتی مناسب، موجب شده است که این سیستم سازه‌ای به طور گسترده‌ای در کشورهای پیشرفته‌ی جهان برای ساخت منازل مسکونی مورد استفاده قرار گیرند. به دلیل آن‌که در طراحی لرزه‌ای این سازه‌ها به روش سنتی، طراحی اتصالات به درستی در نظر گرفته نمی‌شود، در این سازه‌ها اتصالات به عنوان نقطه‌ی ضعف اصلی این سازه‌ها در هنگام وقوع زمین لرزه‌های شدید به شمار می‌آید. در این مقاله به روش تحلیل استاتیکی غیرخطی در نرم افزار المان محدود ABAQUS رفتار لرزه‌ای دیوارهای سیستم LSF و اتصالات آن مورد مطالعه قرار گرفته است.

**واژه‌های کلیدی:** سازه‌های فولادی سبک (LSF)، تحلیل استاتیکی غیرخطی، ارزیابی لرزه‌ای

### 1. مقدمه

در سال‌های اخیر کارهای تحقیقاتی بسیاری در خصوص سازه‌های فولادی سبک (LSF) در سطح جهان انجام پذیرفته است. عمده‌ی این فعالیت‌ها در زمینه‌ی بررسی عملکرد سازه‌ای اشکال مختلف پروفیل‌های جدار نازک و یا ارزیابی لرزه‌ای این سازه‌ها بوده است. روش‌های مختلف مورد استفاده در این راستا را می‌توان به دو گروه زیر تقسیم کرد:

1- روش‌های آزمایشگاهی و ساخت مدل‌های فیزیکی

2- تحلیل‌های عددی با استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود.

روش‌های آزمایشگاهی با وجود نتایج مستدل، به دلیل نیاز به ساخت مدل‌های فیزیکی زیاد و صرف زمان و هزینه‌ی زیاد، کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این روش‌ها اغلب با تکرار آزمایشی مشخص بر روی مدل‌های فیزیکی متعدد سعی می‌شود به نتایج یکسانی دست یافت. روش دوم استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود مانند ANSYS و ABAQUS است. این تحلیل‌گرها به دلیل دقت بسیار بالا و روش‌های مدل‌سازی و تحلیل آسان، امروزه بیش از پیش مورد اقبال مهندسان سازه قرار گرفته است. در این مقاله نیز از قابلیت‌های این نرم‌افزارها برای مدل‌سازی و تحلیل استفاده شده است.

نتایج حاصل از مطالعات، نشان می‌دهد که نقطه‌ی ضعف سیستم‌های سازه‌ای LSF در هنگام وقوع زلزله‌های شدید عمدتاً در اتصالات دیوارهای این سیستم‌های سازه‌ای متمرکز می‌باشد. از جمله اتصالات مهم می‌توان به: اتصالات مقاطع جدارنازک قائم (Stud) به مقاطع جدارنازک افقی (Track)، اتصالاتی که دیوار را به قاب متصل می‌کند، اتصال اعضای مهاري به قاب دیوار اشاره نمود. در طراحی سنتی به دلیل عدم در نظر گرفتن این اتصالات در طراحی لرزه‌ای این سیستم‌های سازه‌ای، این سازه‌ها در برابر زلزله از خود ضعف‌هایی را بروز می‌دهند. در بخش اول این مقاله ابتدا به معرفی دو نوع متعارف دیوارهای لرزه‌بر به کار رفته در سازه‌های فولادی سبک پرداخته و روش تعیین مشخصات مقاومتی آن‌ها به روش آزمایشگاهی بیان می‌گردد، در بخش دوم با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS 6.9 به بررسی پاسخ لرزه‌ای دیتیل رایج این دیوارها پرداخته و با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

## 2. دیوارهای لرزه‌بر در سازه‌های LSF

امروزه به منظور تأمین پایداری جانبی سازه‌های فولادی سبک از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. دو سیستم لرزه‌بر رایج در این سازه‌ها عبارتند از:

1- استفاده از سیستم دیوار برشی 2- استفاده از دهانه‌های مهاربندی شده با تسمه‌های فولادی قطری. در ادامه به شرح مختصری از هر یک از این سیستم‌ها و نتایج به دست آمده از کارهای گذشته انجام گرفته بر روی سازه‌های فولادی سبک پرداخته می‌شود.

### 2-1. دیوار برشی

یکی از عناصر لرزه‌بر متعارف که در سازه‌های فولادی سبک به کار برده می‌شود، دیوارهای برشی هستند. این دیوارها، همانند سازه‌های سنتی برای تحمل بارهای جانبی ناشی از باد و زلزله استفاده می‌شوند. تا به امروز عملکرد لرزه‌ای این دیوارها، سختی جانبی آن‌ها، به درستی مشخص نشده است. در سازه‌های فولادی سبک که از این سیستم لرزه‌بر برای تأمین پایداری جانبی استفاده شده است مشکل اصلی مربوط به اتصال دیوار برشی به سازه است. این اتصال به واسطه‌ی آن‌که جزء اتصالات دوگانه به حساب می‌آید در تعیین عملکرد لرزه‌ای و ضریب رفتار این دسته از سازه‌های فولادی سبک هنوز ابهامات بسیاری وجود دارد. برای بررسی رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی در سازه‌های فولادی سبک مطالعات بسیاری انجام شده است که در ادامه به بیان برخی از نتایج پرداخته می‌شود:

1) مطابق با کارهای آزمایشگاهی انجام گرفته مشخص شده است که این دیوارها تا 0/4 ظرفیت باربری خود می توانند سختی الاستیک مطلوبی داشته باشند.

2) مطالعه بر روی عملکرد تخته های گچی که به عنوان پوشش بیرونی این دیوارها استفاده می شود نشان می دهد که این صفحات سختی و مقاومت جانبی سیستم LSF را به طور قابل ملاحظه ای افزایش می دهند. این صفحات با وجود این که وظیفه ی تحمل بارهای جانبی را بر عهده ندارند اما با استفاده از آنها می توان ظرفیت باربری جانبی سازه های فولادی سبک را تا 30٪ افزایش داد.

3) مطابق با نتایج کارهای آزمایشگاهی و مدل سازی های عددی حداکثر مقدار دوران ناشی از تغییر مکان نسبی طبقات در سازه های فولادی سبک به میزان 0/02 رادیان و مقدار میرایی 6٪ به عنوان نسبت میرایی مناسب در هنگام وقوع زلزله های شدید برای این سازه ها پیشنهاد داده شده است.

4) در طی یک کار تحقیقاتی انجام گرفته توسط Gad توصیه شده است که مقدار ضریب شکل پذیری در اثر کاهش مقاومت ( $R_y$ ) برای سازه های فولادی سبک بین دو عدد 3-1/5 انتخاب شود.

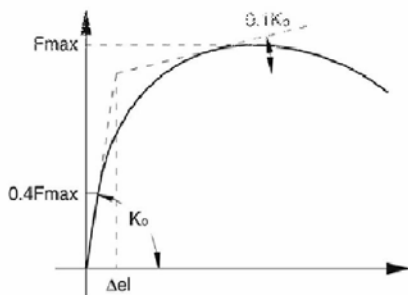
## 2-2. دهانه های مهاربندی شده با تسمه های قطری

یکی دیگر از روش های تأمین پایداری جانبی سازه های فولادی سبک، استفاده از تسمه های فولادی قطری در برخی از دهانه ها می باشد. اغلب این اعضا از جنس فولاد با نقطه ی تسلیم بالا انتخاب می شوند. برای این دیوارها معمولاً از دو نوع پوشش OSB یا صفحات موج دار در دو طرف دیوار استفاده می شود. این پوشش ها می توانند به طور قابل توجهی ظرفیت باربری جانبی دیوار را افزایش دهند و عایق حرارتی مناسبی به حساب آیند. این اعضای قطری دارای چرخه های هیستریزس پایدار و مقارنی بوده و می توانند در هنگام وقوع زمین لرزه های شدید، انرژی بیشتری را جذب کنند. طبق آزمایش های انجام گرفته معلوم شده است عمده ی خسارت بوجود آمده در این اعضا اغلب در محل اتصال مهاربند به دیوار می باشد. در این مقاله نیز این نوع سیستم لرزه بر مورد ارزیابی لرزه ای قرار گرفته است.

## 3. مشخصات مقاومتی دیوارهای لرزه بر در سازه های LSF

در این بخش از مقاله به معرفی روش های آزمایشگاهی مورد استفاده به منظور تعیین مشخصات مقاومتی دیوارهای لرزه بر در سازه های فولادی سبک پرداخته می شود. در این روش ها جهت تعیین رفتار لرزه ای دیوارهای سازه های فولادی سبک و اتصالات آنها یک مدل فیزیکی از دیوار را تحت آزمایش کشش قرار داده می شود. برای این منظور ابتدا با استفاده از یک جک هیدرولیکی، با سرعت یک سانتی متر بر دقیقه به روش کنترل تغییر مکان، مدل فیزیکی تحت بارگذاری جانبی

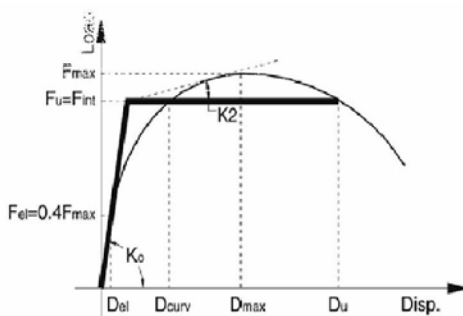
قرار داده می شود. در پایان آزمایش نمودار نیرو-تغییر مکان برای آن ترسیم می شود. مطابق با شکل (1) به راحتی می توان مقدار سختی اولیه دیوار ( $K_0$ ) و تغییر مکان متناظر با حد الاستیک ( $\Delta_{el}$ ) آن را به دست آورد که در ادامه شرح داده شده است.



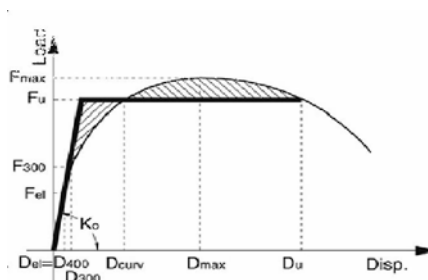
شکل (1): نمودار بار-تغییر شکل مدل فیزیکی دیوار

به دو روش می توان پارامترهای مقاومت مصالحی دیوار همانند: تنش متناظر با نقطه تسلیم ( $F_y$ ) و مقاومت نهایی دیوار ( $F_u$ ) و سختی اولیه دیوار ( $K_0$ ) را تخمین زد:

الف) ابتدا مقدار نیروی ماکزیمم از نمودار شکل (1) تعیین می گردد سپس  $0.4/4$  نیروی ماکزیمم را حساب کرده و در آن ارتفاع از منحنی بر منحنی نیرو-تغییر مکان مماسی رسم می گردد. شیب نیم خط حاصله بیانگر مقدار سختی اولیه دیوار ( $K_0$ ) خواهد بود. اگر روی منحنی و در تراز نیروی ماکزیمم خطی را چنان بر منحنی مماس کرد تا شیبی برابر یک دهم سختی اولیه داشته باشد نقطه برخورد دو نیم خط مماسی، بیانگر نقطه تسلیم دیوار ( $F_y$ ) خواهد بود. حال اگر از این نقطه خطی به موازات محور تغییر مکان رسم شود، به نحوی که منحنی را در یک نقطه قطع کند، آن نقطه بیانگر مقدار بار نهایی  $F_u$  دیوار خواهد بود. بدین ترتیب مقاومت تسلیم و نهایی دیوار به دست می آید.



شکل (2): مدل دوخطی برای تعیین نقطه تسلیم دیوار



شکل (3): منحنی دوخطی شده برای تعیین بار نهایی دیوار

ب) در این روش که توسط کاوایی ارائه شده است برای تعیین سختی اولیه دیوار ( $K_0$ ) در تغییر مکان معادل 400 نیوتن، خطی بر منحنی بار-تغییر شکل مماس می‌شود. این خط مبین سختی اولیه دیوار خواهد بود، برای تعیین نقطه‌ی تسلیم معادل، خط دوم به گونه‌ای ترسیم می‌شود که مساحت محصور بین مدل دو خطی و منحنی با یکدیگر برابر شوند. دو روش بالا، جزء روش‌های آزمایشگاهی برای تعیین مشخصات مقاومتی دیوارهای سازه‌های فولادی سبک به‌شمار می‌آیند. این دو روش علیرغم ترسیمی بودن معمولاً نتایج مناسبی را برای دیوارها ارائه می‌دهند. این روش‌های تعیین مشخصات مقاومت مصالحی دیوارها به دلیل نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی، انجام آن‌ها مستلزم هزینه‌های فراوان است. در این مقاله این مشخصات صرفاً با معرفی مشخصات مصالح به کار رفته در مقطع دیوار برای کل دیوار با نرم‌افزار ABAQUS به راحتی قابل تعیین است.

#### 4. انواع بارگذاری‌ها

بر روی دیوار می‌توان دو نوع بارگذاری انجام داد:

1. بارگذاری یکنواخت (Uniform)

2. بارگذاری چرخه‌ای (Cyclic)

هر یک از این نوع بارگذاری‌ها برای اهداف مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در ارزیابی لرزه‌ای سازه‌ها به روش استاتیکی غیرخطی اغلب از مدل بارگذاری یکنواخت استفاده می‌شود. در این روش با اعمال یک تغییر شکل جانبی یکنواخت کوچک به بالای دیوار، مقدار آن را با گام‌های مشخصی افزایش داده تا سازه دچار تغییر شکل‌های بزرگ شود. در پایان با استفاده از کدهای رنگی نرم‌افزار می‌توان محل تمرکز تنش‌ها را مشاهده کرد. مطابق با آزمایشات انجام شده، تفاوت نتایج بین این دو نوع بارگذاری به طور متوسط کم‌تر از 20 درصد عنوان شده است. به عنوان مثال:

1. مقادیر شکل‌پذیری به دست آمده برای نمونه‌های با پوشش OSB در قیاس با آزمایشات چرخه‌ای در حدود 10 تا 25 درصد کم‌تر از مقادیر حاصله برای شکل‌پذیری در آزمایشات با بارگذاری یکنواخت است.

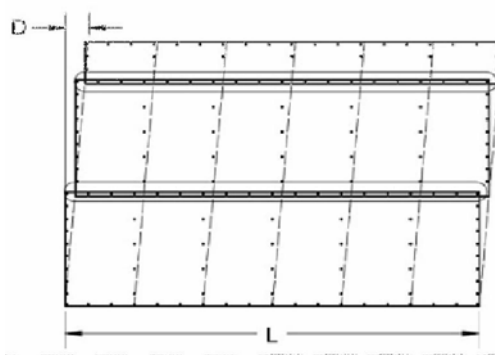
2. مقادیر بار نهایی به دست آمده برای نمونه‌ها که تحت بار چرخه‌ای هستند در حدود 5 تا 10 درصد کم‌تر از مقادیر حاصله برای بار نهایی از بارگذاری‌های یکنواخت است.

در این مقاله از روش اعمال بار یکنواخت در بالای قاب به منظور بارگذاری دیوار استفاده شده است. در این راستا گره بالای قاب در طرف مقابل بارگذاری به عنوان نقطه‌ی کنترل کننده تغییر شکل (Displacement Controller Point) در نظر گرفته شده است. در این تحلیل از گام‌های بارگذاری (Increment) 0/01 استفاده شده است. امروزه طراحی لرزه‌ای دیوارها در سیستم فولادی سبک بر اساس فرض رفتار الاستیک خطی این عناصر استوار است. در این روش ابتدا دیوار را به المان‌های مجزا تفکیک کرده سپس مقادیر سختی و مقاومت برشی تک‌تک این عناصر به دست آورده می‌شوند. در پایان، این مقادیر با یکدیگر جمع آثار قوا گردیده و بدین ترتیب مقاومت و سختی جانبی دیوار تعیین می‌شوند. عناصر مؤثر در سختی و مقاومت برشی دیوار عبارتند از:

1. اتصال دهنده‌های صفحات برشی به یکدیگر
2. اتصال دهنده‌های صفحات فلزی به قاب
3. مقاومت برشی تأمین شده توسط مقطع صفحات در پایین و بالا
4. کمایش برشی صفحات فلزی پوششی
5. سطح گسیختگی صفحه در محل کشش و فشار.

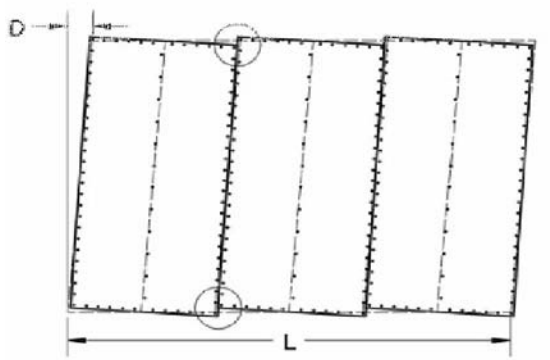
به طور کلی در دیوارهای یک سیستم فولادی سبک تغییر شکل جانبی وابسته به سه پارامتر است:

1. مقدار تغییر شکل برشی پوشش صفحه‌ای (OSB یا صفحات موج‌دار) در هنگام اعمال بار جانبی
  2. بلند شدن پای دیوار
  3. تغییر شکل غیرخطی اتصالات دیوار به قاب
- همانطور که در شکل (4) نشان داده شده است عمده‌ی تغییر شکل غیرخطی دیوار مربوط به اتصالاتی است که صفحات پوششی را به هم وصل می‌کنند. اگر بار جانبی افزایش یابد در نهایت به مرحله‌ای می‌رسد که بست‌ها به تسلیم رسیده و نیروی جانبی وارده بین پیچ‌های خودکار قائم باز توزیع می‌شوند.



شکل (4): تغییر شکل غیرخطی مقطع دیوار با صفحات پوششی

در شکل (5) دیوار با پوشش از نوع OSB نشان داده شده است. وقتی دیوار تحت بار جانبی قرار می گیرد، ورق های OSB به مثابه یک جسم صلب در جای خود فقط دوران می کنند. در نتیجه در محل اتصال ورق ها تمایل به لغزش ایجاد شده و این اتصالات مستعد خرابی هستند



شکل (5): دیوار با پوشش OSB

## 5. معرفی مدل تحلیلی:

در این مقاله ابتدا با استفاده از نرم افزار المان محدود ABAQUS 6.9 مقطعی از دیوار سازه های فولادی سبک (شکل 6) با مهاربند در دو طرف، و استفاده از پلیت در اتصال مهاربند به قاب دیوار مدل سازی شده و تحت شرایط مرزی یکسان تحت بارگذاری قرار می گیرند. بدین طریق اثر مهاربند و نحوه ی اتصال آن در عملکرد لرزه ای این دیوارها مورد ارزیابی قرار می گیرد. ابعاد دیوار انتخابی  $2/4 \times 2/4$  متر می باشد و در آن از 5 مقطع ناودانی جدارنازک قائم با ابعاد  $90 \times 36 \times 0/550$  در فواصل  $0/6$  متر استفاده شده است. در قسمت بالا و پائین دیوار از دو مقطع ناودانی با همان ابعاد مورد استفاده قرار گرفته است. تسمه هایی از جنس فولاد با نقطه ی تسلیم بالا به منظور افزایش سختی جانبی دیوار با ابعاد  $3 \times 0/84$  سانتی متر مورد استفاده قرار گرفته است. برای مدل سازی اعضای دیوار از دو نوع فولاد استفاده گردید. تمامی مقاطع ناودانی شکل از جنس فولاد سرد نورد شده با مشخصات مقاومت مصالحی زیر در نظر گرفته شده است:

ضریب پواسون  $= 0/3$

مقاومت حد تسلیم  $= 592/26 \text{ Gpa}$

مدول یانگ  $= 168/93 \text{ Mpa}$

برای اعضای مهاربندی، از جنس فولاد معمولی در نظر گرفته شد:

ضریب پواسون  $= 0/3$

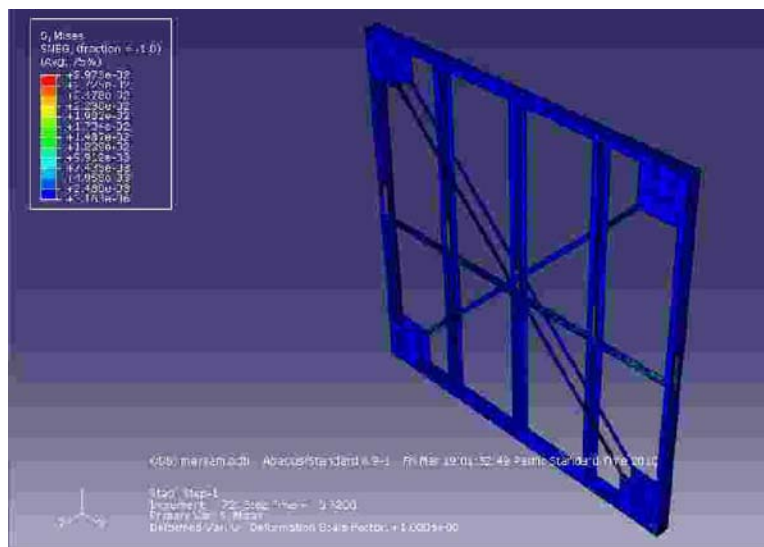
مقاومت حد تسلیم  $= 207 \text{ Gpa}$

مدول یانگ  $= 500 \text{ Mpa}$

هر یک از مدل ها به روش تحلیل استاتیکی غیرخطی بارافزون (Pushover) مورد ارزیابی لرزه ای قرار گرفتند. برای این منظور ابتدا فرض گردید که در قسمت بالای دیوار یک تغییر شکل کوچک 10 سانتی متری وجود دارد سپس با معرفی تعداد گام های افزایشی 0/01 این تغییر شکل را افزایش داده تا دیوار دچار تغییر شکل های بزرگ شود. در پایان برای هر دو نمونه نمودارهای رفتاری به دست آمده و نتایج با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفتند.

این مدل‌ها از سه جهت با یکدیگر مورد مقایسه شده‌اند.

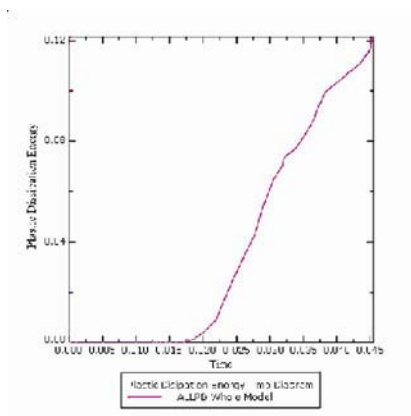
- 1- تغییر مکان گوشه‌ی سمت راست و بالای قاب نسبت به برش پایه که در حقیقت بیانگر ظرفیت باربری لرزه‌ای دیوار می‌باشد.
- 2- میزان قابلیت اتلاف انرژی پلاستیک دیوار در تغییر شکل‌های بزرگ.
- 3- تغییرات نیروی برشی پایه دیوار با افزایش گام‌های بارگذاری



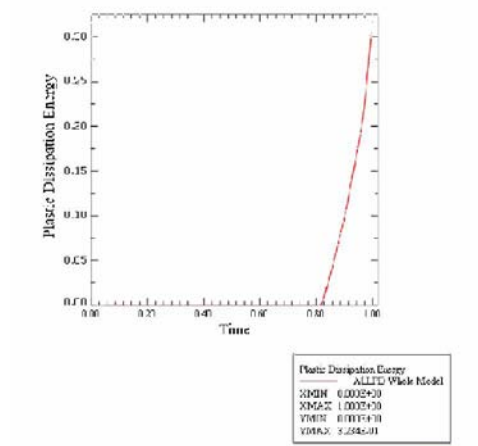
شکل (6): مدل دیوار در نرم‌افزار ABAQUS 6.9 با مهاربند در هر دو وجه دیوار

بررسی نتایج نشان می‌دهد که استفاده از پلست‌ها در گوشه‌های دیوار به منظور اتصال تسمه‌های فولادی به قاب دیوار موجب می‌شود که طول جوش مورد استفاده برای این اتصالات افزایش پیدا کرده و میزان قابلیت اتلاف انرژی پلاستیک دیوار در تغییر شکل‌های بزرگ به طور چشم‌گیری افزایش پیدا کند. این موضوع به وضوح در نمودارهای اشکال 7 و 8 قابل تشخیص است. در منحنی شکل 8 استفاده از پلست موجب افزایش شدید اتلاف انرژی پلاستیک در کل دیوار شده است.

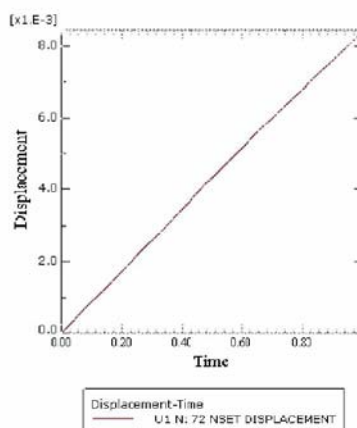




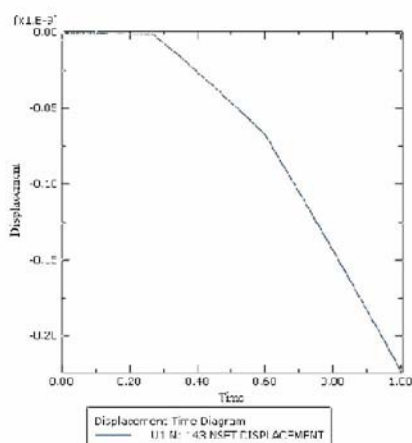
شکل (7): تغییرات میزان اتلاف انرژی پلاستیک در دیوار بدون استفاده از پلیت اتصالی



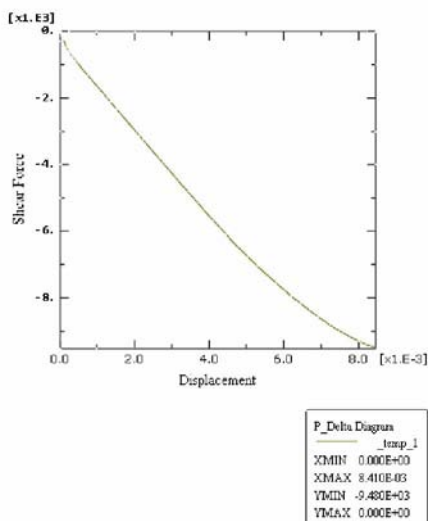
شکل (8): تغییرات میزان اتلاف انرژی پلاستیک در دیوار با پلیت اتصالی



شکل (9): نمودار تغییرات تغییر مکان نقطه کنترلی - زمان برای دیوار بدون پلیت



شکل (10): نمودار تغییر مکان - زمان، نقطه‌ی کنترلی در حالت بدون استفاده از پلیت



شکل (11): منحنی ظرفیت دیوار بدون استفاده از پلیت

## 6. نتایج

- 1- به منظور کاهش میزان آسیب پذیری سازه‌های فولادی سبک در برابر زلزله‌های شدید می‌بایست به اتصالات این سازه‌ها به خصوص دیوارهای لرزه‌بر آن توجه ویژه‌ای نمود.
- 2- استفاده از پلیت‌هایی با ضخامتی برابر اعضای فولادی سرد نورد شده قائم اما از جنس فولاد ساختمانی می‌تواند علاوه بر استحکام اتصالات تسمه‌های مهاري به قاب دیوار، به میزان قابل توجهی از میزان تغییر شکل جانبی سازه بکاهد.

- 3- استفاده از پلیت‌های اتصالی برای نصب تسمه‌های مهاري به قاب سازه‌های فولادی سبک به میزان قابل توجهی موجب افزایش جذب انرژی لرزه‌ای دیوار در هنگام وقوع زلزله‌های شدید می‌شود.
- 4- با افزایش مرحله‌ای تغییر شکل به قاب دیوار به تدریج میزان تغییر شکل جانبی دیوار افزایش یافته و تمرکز تنش‌ها عمدتاً به دو ناحیه اتصالات مهاربندها به قاب و مرکز مقاطع ناودانی قائم محدود می‌شود.

## 9. مراجع

- [1] FEMA 450.NEHRP recommendation for seismic regulations for new buildings and other structures, 2003 edition, part 1: provisions.Washington, DC,USA: building seismic safety council, National institute of building science; 2004.
- [2] SEI/ASCE 7-02. Minimum design loads for buildings and other structures. Reston VA, USA: American of Civil Engineers; 2003
- [3] Al-kharat M,Rogers CA, Inelastic performance of cold-formed steel strap braced walls, J Constr Steel Res 2007;460-74.