



سومین کنفرانس ملی سازه و فولاد  
سومین کنفرانس ملی کاربرد فولادهای پر استحکام در صنعت سازه  
اولین کنفرانس ملی سازه‌های سبک فولادی (LSF)



## بررسی رفتار دینامیکی قاب‌های فولادی مقاوم سازی شده با دیوار برشی فولادی موج‌دار به روش اجزا محدود\*\*

\* میرمسعود عوفی<sup>۱</sup>، بهمن فرهمند آذر<sup>۲</sup>، علی حدیدی<sup>۳</sup>

### چکیده

دیوارهای برشی فولادی (SSW)، از دهه ۱۹۷۰ میلادی در ساختمان‌های مختلف به عنوان سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی بخصوص زلزله مورد توجه قرار گرفته و در ساختمان‌های متعددی در جهان به مورد اجرا گذاشته شده است. این پدیده در جهان به سرعت رو به گسترش می‌باشد. سیستم مذکور در دو زلزله قوی نورتریج آمریکا ۱۹۹۴ و کوبه ژاپن ۱۹۹۵ و همچنین در آزمایشگاه‌ها از خود رفتار مناسبی را نشان داده است.

با توجه به این که در تحقیقات پیشین اکثر مطالعات بر روی دیوارهای برشی فولادی صاف متمرکز گردیده است و مطالعات بر روی دیوارهای برشی موج دار مراحل ابتدایی خود را طی می‌کند، لذا در مقاله حاضر، رفتار قاب‌های فولادی مقاوم سازی شده با دیوار برشی فولادی موج دار و تاثیر الگوی چیدمان این صفحات، تحت بارگذاری دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین میزان اتلاف انرژی و انرژی کرنشی ایجاد شده در هر دو نوع دیوار برشی صاف و موج‌دار ناشی از بارگذاری لرزه‌ای مقایسه گردیده است. لازم به ذکر است که از شتاب نگاشت زلزله ناغان با شتاب ماکزیمم  $0.72g$  در تحلیل تاریخیچه زمانی استفاده شده است.

### کلمات کلیدی

دیوار برشی فولادی صاف، دیوار برشی فولادی موج دار، تحلیل تاریخیچه زمانی، انرژی کرنشی.

\*۱. دانشجوی کارشناسی ارشد عمران - سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شبستر، [m.afvi@yahoo.com](mailto:m.afvi@yahoo.com)

\*۲. دانشیار گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شبستر، [b-farahmand@tabrizu.ac.ir](mailto:b-farahmand@tabrizu.ac.ir)

\*۳. استادیار گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شبستر، [A\\_hadidi@tabrizu.ac.ir](mailto:A_hadidi@tabrizu.ac.ir)

\*\* این مقاله مستخرج از پایان نامه کارشناسی ارشد می‌باشد.



# سومین کنفرانس ملی سازه و فولاد

## سومین کنفرانس ملی کاربرد فولادهای پر استحکام در صنعت سازه

### اولین کنفرانس ملی سازه‌های سبک فولادی (LSF)



#### ۱ - مقدمه

در سه دهه اخیر دیوارهای برشی فولادی (SSW) به عنوان یک سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی مورد توجه قرار گرفته و در ساختمان‌های متعددی درجهان به مورد اجرا گذاشته شده است. این پدیده نوین درجهان به سرعت روبه گسترش می‌باشد. بکارگیری این سیستم در مقایسه با قاب‌های فولادی خمشی تا حدود ۵۰ درصد صرفه جویی در مصرف فولاد را در سازه ساختمان به همراه داشته است.

دیوارهای برشی فولادی معمولاً در دو نوع سخت شده و سخت نشده ساخته می‌شوند. به طور کلی انواع سخت شده از نظر عملکرد لرزه‌ای و نیز مسائل بهره‌برداری مناسب‌تر می‌باشند، ولی بخاطر وجود سخت‌کننده‌های متعدد و جزئیات اجرائی فراوان، باید وقت و هزینه زیادی برای ساخت آنها صرف گردد. دیوارهای برشی سخت نشده حین باربری دچار کماتش برون صفحه ای می‌شوند که می‌تواند منجر به بروز اشکالاتی در بهره‌برداری از سازه شود [۱]. بنابراین در این مقاله، ایده دیوار برشی فولادی موجدار به عنوان جایگزینی برای دیوارهای برشی سخت شده مطرح گردیده است و انتظار می‌رود که این ورق‌ها به دلیل دارا بودن سختی ذاتی برون صفحه‌ای، از مقاومت کماتشی بالایی برخوردار بوده و در نهایت عملکرد مشابه دیوارهای برشی سخت شده داشته باشد.

در تحقیقات انجام شده توسط Jeffrey W. Berman و همکاران درباره رفتار چرخه‌ای و جذب انرژی قاب‌های فولادی دارای سیستم‌های دیوار برشی صاف و موجدار مشاهده شد که قاب با ورق صاف شکل‌پذیری بیشتری دارد [۲]. در تحقیقات آزمایشگاهی که بوسیله S. Tipping<sup>1</sup> و همکاران درباره استفاده از دیوار برشی فولادی موجدار انجام شده است و بر استفاده از این سیستم در ساختمان‌های مسکونی ساخته شده از ورق فولادی تاکید شده است [۳]. موسسه سازه‌های فولادی آمریکا درباره استفاده از دیوارهای برشی بر شکل‌پذیری و قابلیت جذب انرژی این دیوارها تحت بارگذاری چرخه‌ای تاکید دارد [۴]. شوکتی و همکاران رفتار چرخه‌ای دیوار برشی فولادی ساخته شده از ورق‌های صاف و موجدار را مورد بررسی قرار داده و در نهایت مقاومت بالای ورق موجدار در جابجایی‌های پایین و جذب انرژی بیشتر دیوار برشی صاف نسبت به دیوار برشی موجدار را توصیه نموده است [۵].

#### ۲ - مدلسازی به روش عناصر محدود

در پروژه حاضر برای انجام مطالعات پارامتریک از نرم افزار المان محدود ANSYS ویرایش 11.0 استفاده شده است [۶]. همچنین به منظور مدل کردن مقاطع تیر، ستون و همچنین دیوار برشی از المان Shell 181 استفاده گردید. این المان برای مدل کردن پوسته‌های مسطح و منحنی با ضخامت نازک تا متوسط به کار می‌رود. المان فوق‌الذکر دارای چهار گره، چهار ضخامت و خصوصیات مصالح ارتوتروپیک می‌باشد. این المان در هر گره دارای شش درجه آزادی است که شامل سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی دورانی می‌باشد. المان Shell 181 دارای قابلیت‌های خمیری، خزش، سخت‌شدگی تنش، تغییر-شکل‌های بزرگ و کرنش‌های بزرگ و مناسب برای تحلیل‌های غیرخطی می‌باشد. المان جرمی Mass 21 در تحلیل‌های دینامیکی استفاده می‌شود. در این مطالعه برای مدل کردن جرم طبقات از این المان استفاده شده است.

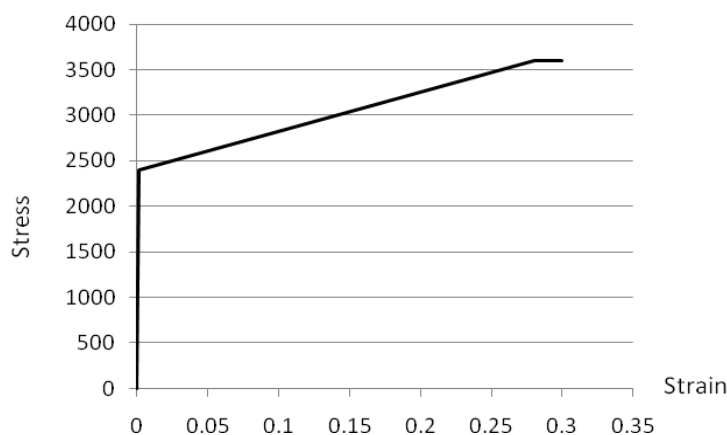


## سومین کنفرانس ملی سازه و فولاد سومین کنفرانس ملی کاربرد فولادهای پر استحکام در صنعت سازه اولین کنفرانس ملی سازه‌های سبک فولادی (LSF)



### ۳ - رفتار مصالح

در مدل‌های مورد نظر تنها مصالح موجود فولاد می‌باشد. تمامی مدل‌های مورد استفاده از فولاد ساختمانی از نوع A36 که گونه فولاد ساختمانی معمول در ایران می‌باشد، در نظر گرفته شد. مقاومت تسلیم فولاد  $2400 \text{ kg/cm}^2$  و مقاومت نهایی آن  $3700 \text{ kg/cm}^2$  آن تعیین گردید. مدلسازی رفتار فولاد با استفاده از معیار تسلیم von Mises و با در نظر گرفتن غیرخطی مصالح و اعمال ضریب پواسون  $0/3$  انجام گرفت. منحنی فولاد سه خطی با سخت‌شوندگی سینماتیک بکار گرفته شد. سه نقطه‌ای که برای ایجاد نمودار تنش - کرنش فولاد استفاده شدند عبارتند از:  $(0,0)$  و  $(0/00114, 2400)$  و  $(0/28, 3700)$ . تصویر نمودار تنش - کرنش این فولاد در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): نمودار تنش - کرنش فولاد

### ۴ - مشخصات قاب‌های تحلیلی

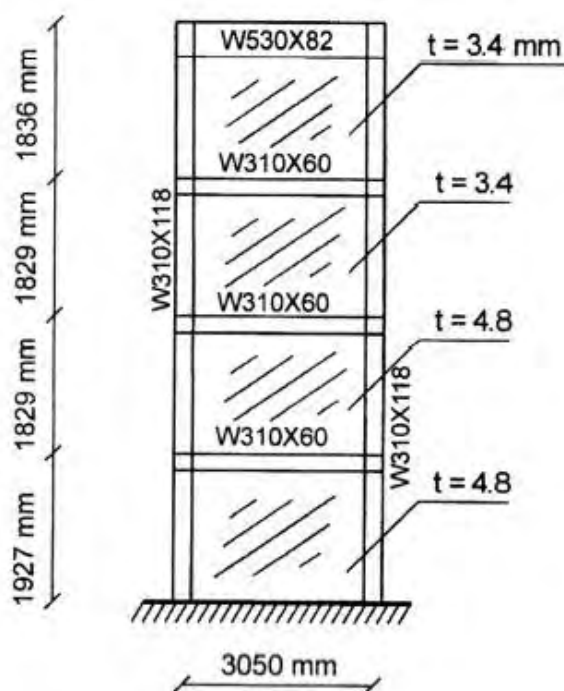
به منظور بررسی اندرکنش قاب فولادی و دیوار برشی فولادی، قاب یک دهانه چهار طبقه از مرجع [۷] انتخاب شد. در شکل (۲) مشخصات قاب و دیوار برشی فولادی آورده شده است.



# سومین کنفرانس ملی سازه و فولاد

## سومین کنفرانس ملی کاربرد فولادهای پر استحکام در صنعت سازه

### اولین کنفرانس ملی سازه‌های سبک فولادی (LSF)

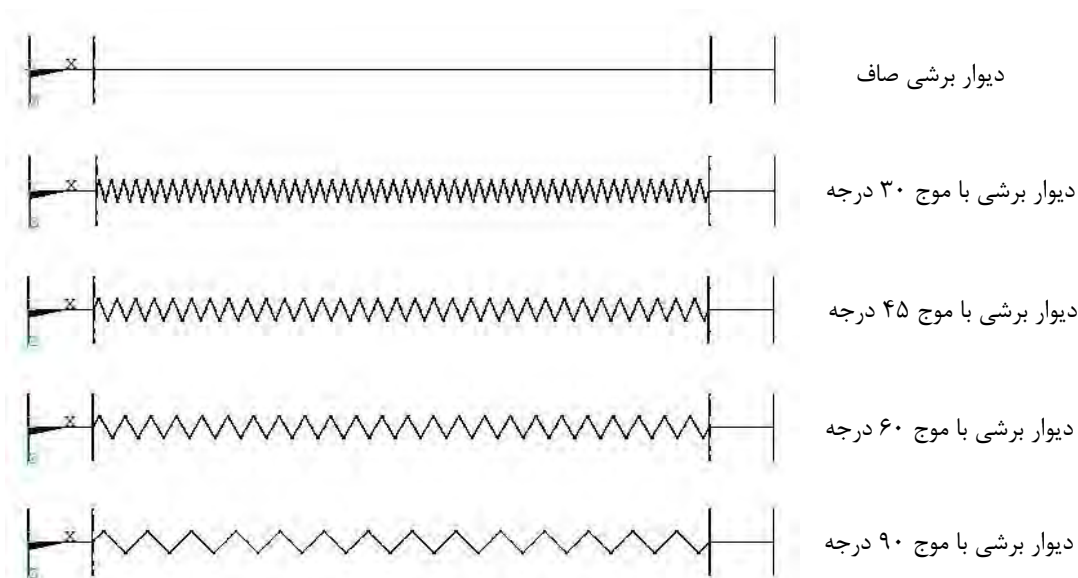


شکل (۲): مشخصات مدل‌های تحلیلی

در این مطالعه به منظور بررسی تاثیر زاویه موج در عملکرد دیوار برشی، زوایای موج ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه در نظر گرفته شد و میزان جذب انرژی کرنشی نمونه‌ها نسبت به دیوار برشی صاف سنجیده شد. در شکل (۳) جزئیات مدلسازی آورده شده است.



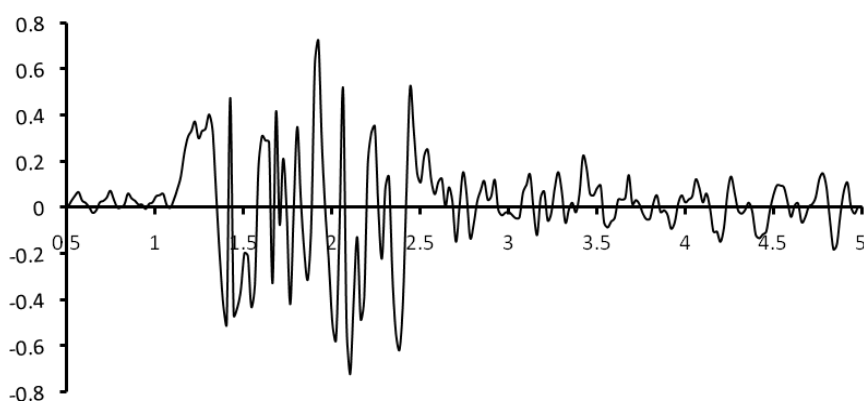
## سومین کنفرانس ملی سازه و فولاد سومین کنفرانس ملی کاربرد فولادهای پر استحکام در صنعت سازه اولین کنفرانس ملی سازه‌های سبک فولادی (LSF)



شکل (۳): جزئیات مدلسازی

### ۵ - نحوه اعمال بارگذاری

بارگذاری به صورت اعمال همزمان بارهای ثقیلی و لرزه‌ای بر روی قاب‌ها انجام گرفت و میرایی پنج درصد اعمال گردید. بار مرده برابر  $500 \text{ kg/m}^2$  و بار زنده  $200 \text{ kg/m}^2$  در نظر گرفته شده است، همچنین برای بارگذاری زلزله، از شتاب‌نگاشت زلزله ناغان با مدت زمان پنج ثانیه استفاده شده است. در شکل (۴) شتاب‌نگاشت زلزله ناغان آورده شده است.



شکل (۴): شتاب‌نگاشت زلزله ناغان

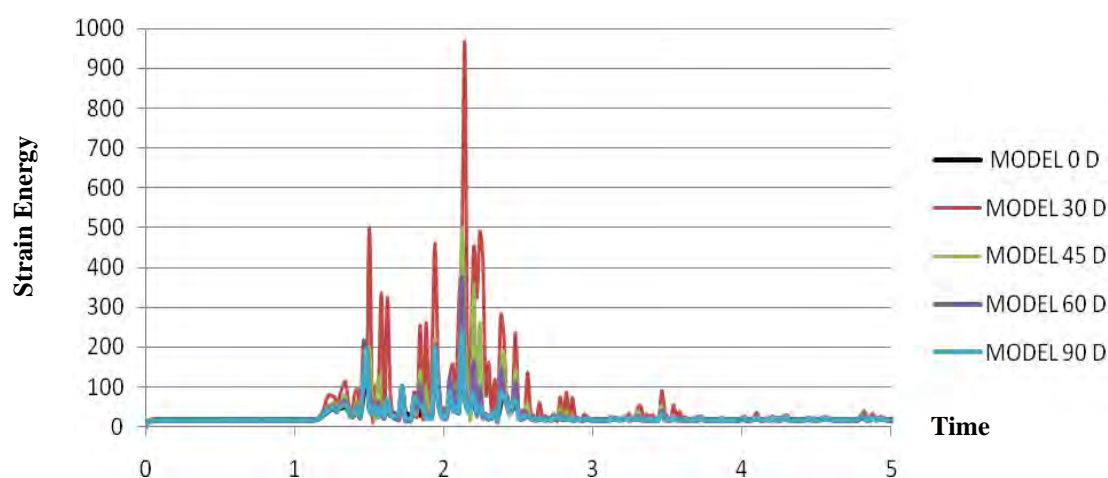
### ۶ - نتایج به دست آمده از مطالعات تحلیلی



## سومین کنفرانس ملی سازه و فولاد سومین کنفرانس ملی کاربرد فولادهای پر استحکام در صنعت سازه اولین کنفرانس ملی سازه‌های سبک فولادی (LSF)



میزان جذب انرژی کرنشی ناشی از بارگذاری دینامیکی در تمامی مدل‌های تحلیلی با حالات مختلف دیوار برشی موج‌دار و صاف در شکل (۵) آورده شده است. نتایج تحلیل نشان داد که در طول بارگذاری، کمترین جذب انرژی کرنشی مربوط به دیوار برشی صاف می‌باشد و با اعمال زاویه موج میزان جذب انرژی کرنشی در سیستم افزایش می‌یابد. در شکل (۶) کانتور تنش برای نمونه‌ها در برخی از گام‌های بارگذاری آورده شده است. فقط در نمونه صاف دیوار برشی در گام‌های بارگذاری دچار کماتس خارج از صفحه می‌شد. برای این منظور در این نمونه از سخت کننده استفاده شد.



شکل (۵): میزان انرژی کرنشی مدل‌های تحلیلی در طول بارگذاری دینامیکی

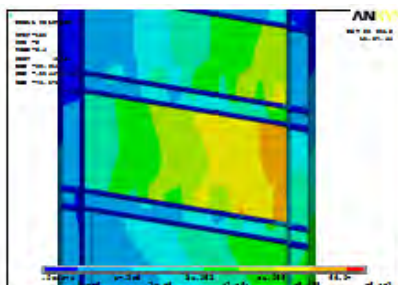




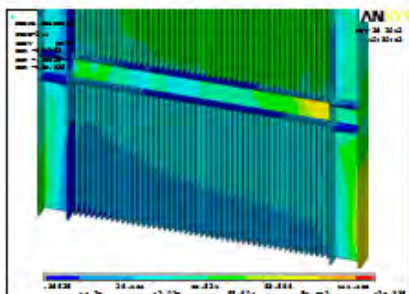
# سومین کنفرانس ملی سازه و فولاد

## سومین کنفرانس ملی کاربرد فولادهای پر استحکام در صنعت سازه

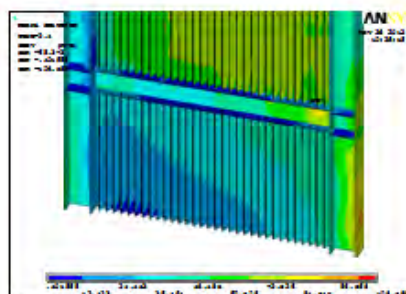
### اولین کنفرانس ملی سازه‌های سبک فولادی (LSF)



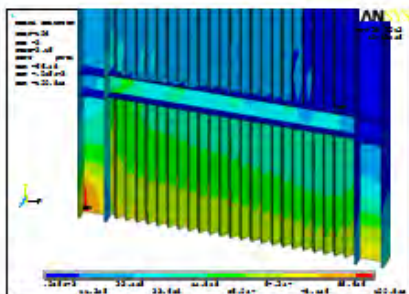
دیوار برشی صاف



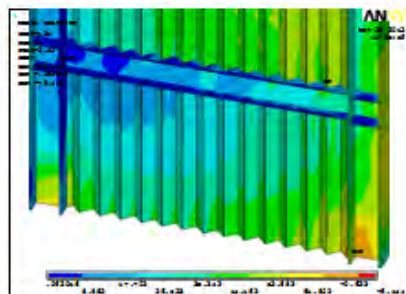
دیوار برشی با موج ۳۰ درجه



دیوار برشی با موج ۴۵ درجه



دیوار برشی با موج ۶۰ درجه



دیوار برشی با موج ۹۰ درجه

شکل (۶): کانتور تنش برای نمونه‌ها در برخی از گام‌های بارگذاری

به منظور تاثیر زاویه خم در میزان اتلاف انرژی، نسبت جذب انرژی کرنشی در دیوارهای برشی موجدار نسبت به دیوار برشی صاف سنجیده شد. نتایج نشان داد که در خم ۹۰ درجه این مقدار برابر ۳.۳۲٪ می‌باشد و برای خم ۶۰ درجه این مقدار به بیش از ۱۲٪ می‌رسد. با افزایش تندی زاویه میزان جذب انرژی کرنشی افزایش یافته و برای خم ۴۵ درجه به بیش از ۳۱٪ می‌رسد و در نهایت برای خم ۳۰ درجه که تندترین زاویه را در بین تمامی نمونه‌های تحلیلی دارا بود به بیش از ۱۰۴ درصد می‌رسد. این مطالب در نمودار نشان داده شده در شکل (۷) آورده شده است.



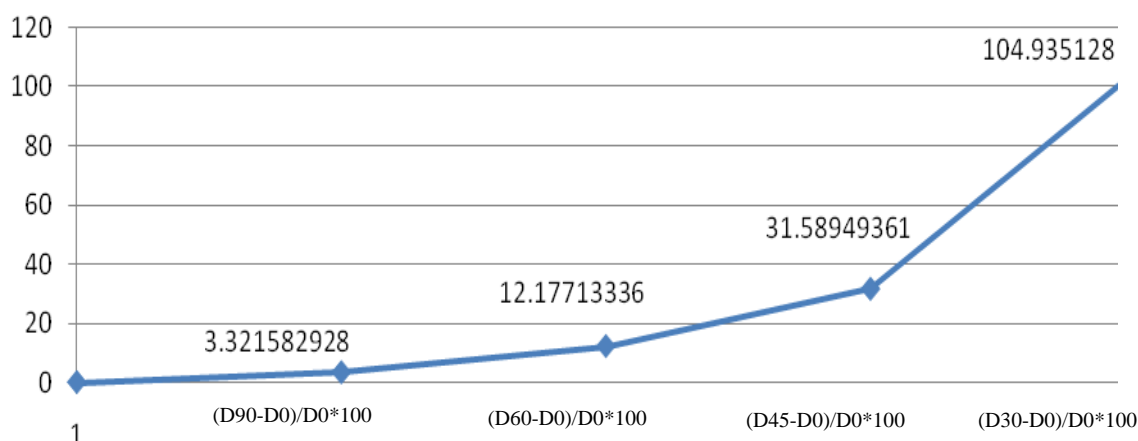
# سومین کنفرانس ملی سازه و فولاد

## سومین کنفرانس ملی کاربرد فولادهای پر استحکام در صنعت سازه

### اولین کنفرانس ملی سازه‌های سبک فولادی (LSF)

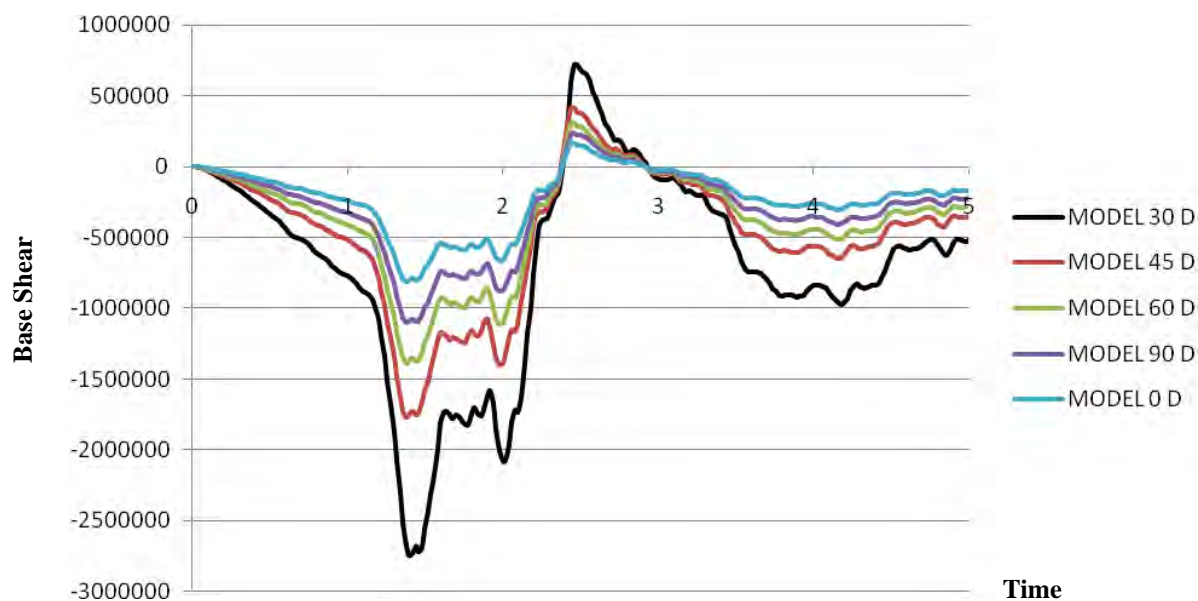


## RATIO



شکل (۷): نسبت جذب انرژی کرنشی در دیوارهای برشی موج‌دار نسبت به دیوار برشی صاف

در شکل (۸)، نمودار برش پایه برای تمامی نمونه‌ها در گام‌های مختلف بارگذاری آورده شده است. مشاهده می‌شود نمونه با دیوار برشی موج‌دار ۳۰ درجه، بیشترین برش پایه را نسبت به سایر نمونه‌ها دارد. مقدار برش پایه نمونه با دیوار برشی موج-دار ۳۰ درجه، بیش از ۳.۲۴ برابر برش پایه نمونه با دیوار برشی صاف می‌باشد. این نسبت برای دیوار برشی موج‌دار ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه، به ترتیب برابر ۲.۱۵، ۱.۷ و ۱.۳۵ برابر برش پایه نمونه با دیوار برشی صاف می‌باشد.







# سومین کنفرانس ملی سازه و فولاد

## سومین کنفرانس ملی کاربرد فولادهای پر استحکام در صنعت سازه

### اولین کنفرانس ملی سازه‌های سبک فولادی (LSF)



شکل (۸): نمودار برش پایه نمونه‌ها

#### ۶ - نتیجه گیری

با توجه به نتایج بدست آمده از مقایسه نمودارهای انرژی کرنشی نمونه‌های تحلیلی به موارد زیر می‌توان اشاره نمود:

- کمترین جذب انرژی کرنشی مربوط به دیوار برشی صاف می‌باشد و با اعمال زاویه موج، میزان جذب انرژی کرنشی در سیستم افزایش می‌یابد.
- با افزایش تندی زاویه میزان جذب انرژی کرنشی افزایش می‌یابد.
- دیوار برشی صاف در طول بارگذاری دچار کماتش می‌شد و نیاز به افزودن سخت کننده می‌باشد.
- در دیوارهای برشی موجدار به دلیل دارا بودن سختی ذاتی برون صفحه‌ای از مقاومت کماتشی بالایی برخوردار بوده و در نهایت عملکردی شبیه به دیوارهای برشی سخت شده داشتند.
- با کاهش تندی زاویه، برش پایه نیز کاهش یافته و در نهایت کمترین برش پایه مربوط به نمونه با دیوار برشی صاف و بیشترین برش پایه مربوط به نمونه با دیوار برشی موجدار ۳۰ درجه می‌باشد.
- افزایش جذب انرژی کرنشی و همچنین افزایش برش پایه، نشانگر توانایی سیستم در اتلاف انرژی و شکل پذیری آن می‌باشد. می‌توان نتیجه گرفت با افزایش تندی زاویه شکل پذیری سیستم نیز افزایش پیدا می‌کند.

#### مراجع

- [۱] صبوری، سعید، سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی - مقدمه‌ای بر دیوارهای برشی فولادی، انتشارات انگیزه، ۱۳۸۰.
- [2] J.W.Berman, O.C.Celika, M.Brunea, "Comparing hysteretic behavior of light-gauge steel plate shear walls and braced frames". Engineering Structures, 2005, Vol. 27, PP. 475-485.
- [3] S.Tipping1, B.Stojadinovic, "Innovative Corrugated Steel Shear Walls for Multi-Story Residential Buildings". The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008, Beijing, China.
- [4] Seismic provisions for structural steel buildings, American Institute of Steel Construction, AISC, 1997, Chicago.
- [۵] شوکتی، حسین، یوسفی خاتونی، سیروس، مقایسه رفتار غیر خطی دیوارهای برشی فولادی با ورق‌های صاف و موج-دار، مجله علمی پژوهشی عمران مدرس، دوره یازدهم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۰.
- [6] P.A.Canonsburg, "ANSYS Structural Analysis Guide, Release 11.0", SAS. IP, Inc., 2009.
- [7] R.G.Driver, G.L.Kulak, D.G.LaurieKennedy, A.E.Elwi, "Cyclic test of four-story steel plate shear wall", J. Struct. Eng, 1998, Vol. 1242, PP. 112-130.