



## بررسی رفتار چرخه‌ای مهاربندهای قطری فولادی ساخته شده از ورق‌های موج‌دار سینوسی

مرتضی نقی پور<sup>۱</sup>، مهدی خراسانی<sup>۲</sup>

۱-استاد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، m-naghi@nit.ac.ir

۲-دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، Mehdi\_kh11@yahoo.com

:

Mehdi\_kh11@yahoo.com

### چکیده

در ساختمان‌های فولادی سیستم‌های باربر جانبی معمولاً قاب خمشی و مهاربندها می‌باشند. سیستم‌های مهاربندی همگرای قطری که در این مطالعه به بررسی آن پرداخته شده است، موجب اتلاف انرژی القایی ناشی از زلزله می‌گردند. این اتلاف انرژی توسط کشیدگی و کاهش طول مهاربند در اثر نیروهای رفت و برگشتی محوری حاصل می‌شود. نبشی‌ها و ناودانی‌ها از جمله مقاطع متداول بعنوان اعضای مهاربندی می‌باشند که در این مقاله به بررسی رفتار مقاطع ساخته شده از ورق‌های موج‌دار سینوسی با استفاده از روش اجزا محدود (نرم افزار آباکوس) پرداخته شده است. در این مقاله تاثیر پارامترهایی از قبیل دامنه و طول موج مقطع موج‌دار سینوسی بر روی عملکرد چرخه‌ای آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد مقاطع سینوسی با طول موج و دامنه کوتاه‌تر دارای قابلیت اتلاف انرژی بیشتری می‌باشند و از مقاومت کم‌انرژی‌تری در مقایسه با مقاطع با طول موج و دامنه بلندتر برخوردار می‌باشند.

کلمات کلیدی: مقطع موج‌دار سینوسی، مهاربند موج‌دار، رفتار چرخه‌ای، روش اجزا محدود.

### ۱. مقدمه

قاب‌های مهاربندی فولادی با ایجاد سختی و مقاومت قابل ملاحظه از سیستم‌های سازه‌ای مرسوم در تحمل نیروهای جانبی از قبیل زلزله و باد می‌باشند. سیستم‌های مهاربندی، موجب اتلاف انرژی القایی ناشی از زلزله می‌گردند. در واقع بکارگیری سیستم‌های بادبندی مانع گسیختگی ترد در اتصالات تیر به ستون همانند آنچه در زلزله نوتریچ در سال ۱۹۹۴ و زلزله کوبه در ۱۹۹۵ رخ داد، می‌شود [1]. البته طراحی دقیق قابهای بادبندی فولادی به منظور جلوگیری از خرابی فجیع بعلت گسیختگی بادبند در بارگذاری شدید زلزله بسیار مهم می‌باشد [2]. ورق‌های موج‌دار فولادی نیز از جمله مقطع سرد نورد شده می‌باشند. این ورق‌ها از قرن هیجدهم تا به امروز در مصارف سازه‌ای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. از طرفی سیستم‌های مهاربندهای همگرا با تامین سختی و مقاومت جانبی زیاد و عملکرد مناسب آن در زلزله‌ها، از متداول‌ترین سیستم‌های باربر جانبی هستند. با توجه به اینکه رفتار سایر مهاربندهای همگرا و منحنی هیستریزس آنها در بارگذاری سیکلی، بر اساس رفتار مهاربندی‌های قطری است، شناخت رفتار مهاربندهای قطری ضروری به نظر می‌رسد [3][4].

<sup>۱</sup>استاد دانشگاه

<sup>۲</sup>دانشجو



در این مقاله به بررسی رفتار الاستوپلاستیک بادبندهای فولادی با مقاطع موج دار سینوسی تحت بارگذاری رفت و برگشتی پرداخته می شود و عملکرد سیکلی غیر الاستیک و پارامترهای تاثیرگذار بر رفتار بادبندهای فولادی سرد نورد شده همچون دامنه و طول موج به روش اجزای محدود با استفاده از نرم افزار کامپیوتری ABAQUS مورد بررسی قرار می گیرد.

## ۲. پارامترهای بادبند

جذب انرژی از طریق اتلاف هیستریزیس یکی از موارد مهم در طراحی لرزه ای می باشد، زیرا این امر می تواند باعث کاهش دامنه پاسخ لرزه ای و در پی آن کاهش آسیب پذیری روی سازه شود. بادبندهای فولادی از اعضای سازه ای مهم بوده و بطور گسترده بعنوان اتلاف کننده انرژی در سازه ها بکار می روند و همچنین باعث حداقل کردن جابه جایی طبقات نیز می شوند.

مهمترین پارامترهایی که طراحی کاربردی و ارزیابی شکل پذیری بادبندهای فولادی با مقطع بسته در نظر گرفته می شود طبق آیین نامه AISC عبارتند از پارامتر لاغری  $\lambda_s$  و پارامتر لاغری عضو  $\lambda_c$  که بصورت زیر ارائه می شوند:

$$\lambda_s = \frac{1}{\pi} \frac{b}{t} \sqrt{3(1-\nu^2)} \frac{\sigma_y}{E} \quad (\text{برای مقاطع قوطی}) \quad (1)$$

$$\lambda_s = \frac{d}{2t} \sqrt{3(1-\nu^2)} \frac{\sigma_y}{E} \quad (\text{برای مقاطع دایره ای}) \quad (2)$$

$$\lambda_c = \frac{1}{\pi} \frac{kL}{r} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (3)$$

که در این روابط  $b$  ضخامت بال مقطع قوطی،  $t$  ضخامت اعضای برشی مقطع،  $\sigma_y$  تنش تسلیم اسمی،  $E$  مدول الاستیسیته،  $\nu$  ضریب پواسون،  $d$  قطر خارجی مقطع دایره ای،  $K$  ضریب طول موثر،  $L$  طول اسمی بادبند و  $r$  شعاع زیراسیون مقطع است. باید توجه داشت مقادیر این پارامترها در صورت طراحی براساس آیین نامه AISC باید از حد مجاز ذکر شده در این آیین نامه کمتر باشند. از طرفی مقاطع بادبندها باید شرایط فشردگی آیین نامه مبحث دهم مقررات ملی ساختمان را داشته باشند. با فرض مقطع فشرده این روابط بصورت روابط ۴ و ۵ [5] می باشند. کلیه مقاطع بکاررفته در این مقاله به گونه ای می باشند که این شرایط را ارضاء کنند.

$$\frac{b}{t} \leq 1.40 \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} \quad (\text{برای مقاطع قوطی}) \quad (4)$$

$$\frac{d}{t} \leq 0.11 \frac{E}{\sigma_y} \quad (\text{برای مقاطع دایره ای}) \quad (5)$$

## ۳. مدل سازی عددی به روش اجزاء محدود

رویکردهای تحقیقی اصلی در تحلیل رفتار سیکلی بادبندها عبارتند از:

(۱) مدل های تجربی

(۲) مدل های مفصل پلاستیک

(۳) مدل های اجزا محدودی الاستو-پلاستیک [6]

در این مقاله از نرم افزار جامع و قدرتمند آباکوس<sup>۱</sup> که از بهترین نرم افزارهای اجزا محدود مهندسی است، با توجه به مزایای آن نسبت به سایر نرم افزارهای اجزا محدود استفاده شده است.

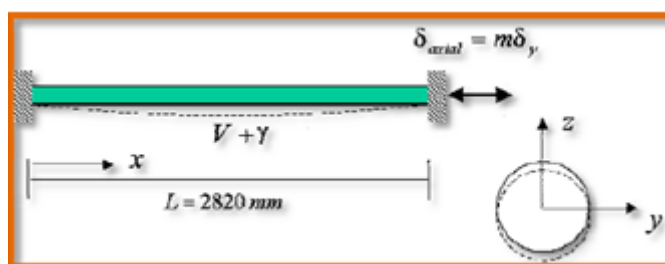
<sup>1</sup>ABAQUS

### ۳-۱. المان بکار رفته در مدل سازی عددی

المان SHELL (S4R) برای مدل سازی عضو بادبند در نظر گرفته شده است. المان S4R یک المان سه بعدی، منحنی مضاعف و از نوع المان ۴ گرهی شل با ۶ درجه آزادی در هر گره که از درون یابی دو سویه استفاده می کند. همچنین از روش انتگرال گیری اصلاح شده نیوتن-رافسون و روش کنترل تغییر مکان در تحلیل استفاده شده است. [7]

### ۳-۲. جزئیات آزمایش

برای صحت سنجی روش عددی نتایج با نمونه های آزمایشگاهی موجود در مرجع [8] مورد مقایسه قرار گرفته است. جزئیات آزمایش در مرجع ارائه شده است.



شکل ۱- بادبند فولادی با مقطع دایره ای توخالی و نقص اولیه [2]

جدول ۱- مشخصات بادبند آنالیز شده در نمونه آزمایشگاهی [8]

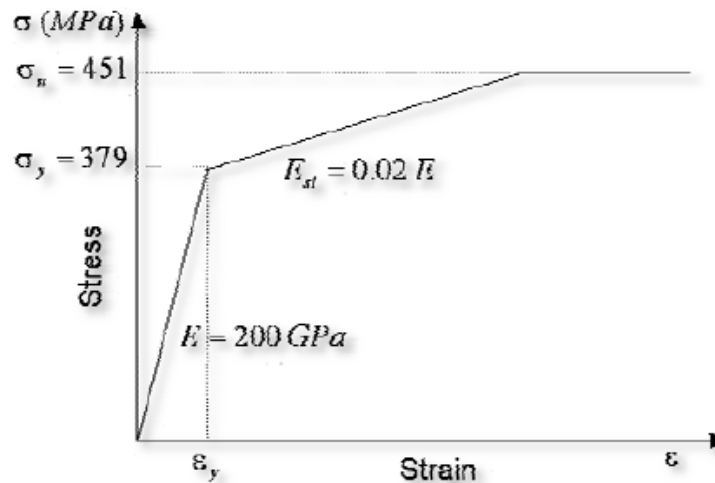
شماره آزمایش	شکل قطعه	Ag (mm <sup>2</sup> )	L (mm)	$\lambda_s$	$\lambda_c$	$\delta_y$ (mm)	P <sub>Y</sub> (kN)
S7B	CHS 139.7x3.5	1498	2820	0.06	0.4	5.34	568

شکل و ابعاد بادبند آنالیز شده در جدول ۱ آمده است. پارامترهای بادبندهای انتخاب شده ( $\lambda_c=0.4$  و  $\lambda_s=0.06$ ) در نظر گرفته شده است. این مقادیر طبق آئین نامه AISC باعث می گردد، مقطع فشرده رفتار غیرالاستیک داشته باشد. قابهای تحلیلی طبق شکل (۱) بصورت یک سر گیردار و یک سر تکیه گاه گیردار لغزنده که تحت بارگذاری محوری رفت و برگشتی قرار گرفته اند، می باشند. نقص اولیه نیز بصورت تابع رابطه (۶) در مرجع [2] اعمال شده است، که در آن  $\gamma_0$  (تغییر مکان اولیه وسط دهانه)، ۵ میلی متر در نظر گرفته شده است.

$$\gamma_x = \gamma_0 \sin(\pi x / l) \quad (6)$$

### ۳-۳. مصالح مدل

جنس مقاطع سرد نورد شده نمره A500 طبق استاندارد ASTM با تنش تسلیم  $\sigma_y=379$  Mpa و تنش حد نهایی  $\sigma_u=451$  Mpa می باشد. برای مدل کردن رفتار غیرخطی مصالح از قانون سخت شوندگی کینماتیکی استفاده شده است. شکل (۲) مدل سه خطی تنش- کرنش مصالح که در تحلیل استفاده شده است را نشان می دهد.



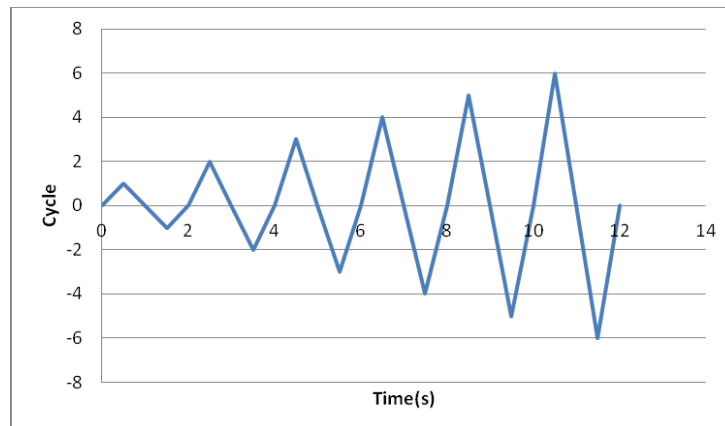
شکل ۲- مدل سه خطی رابطه تنش- کرنش فولاد [2]

باید توجه داشت که تحقیقات گذشته نشان می دهد، که بادنندهای فولادی هنگامی که تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار می گیرند، با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری دچار افت مقاومت می شوند، [4] که محققان علت این امر را اثر باشینگر می نامند [9]. در این پژوهش برای در نظر گرفتن این اثر از سخت شوندهگی کینماتیکی برای فولاد استفاده شده است.

### ۳-۴. تاریخچه بارگذاری رفت و برگشتی

در این تحلیل از تاریخچه بارگذاری بکار رفته در کار آزمایشگاهی [8] استفاده شده است. تاریخچه بارگذاری یک افزایش یکنواخت در دامنه تغییر مکان تا شکست با  $m=1,2,3,\dots$  می باشد که در آن هر دامنه یکبار تکرار می شود.  $m$  مضرری از تغییر مکان تسلیم  $\delta_y$  می باشد، که در آن  $\delta_y$  از رابطه زیر بدست می آید:

$$\delta_y = \frac{\sigma_y L}{E} \quad (7)$$

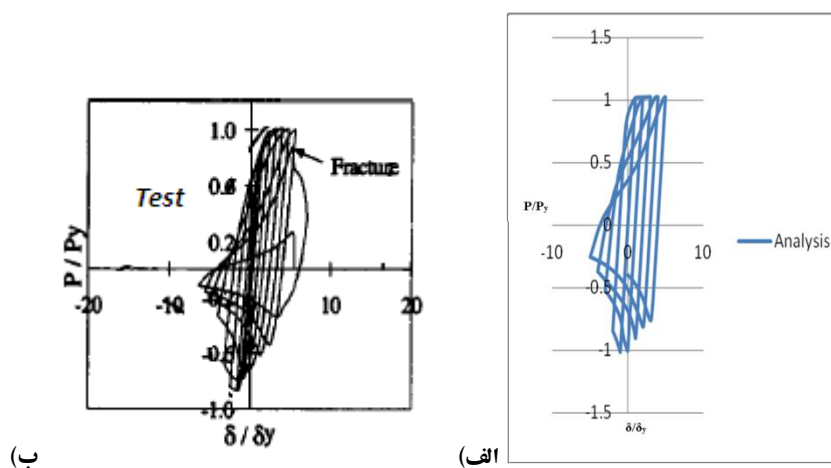


شکل ۳- نمودار سیکل-زمان بارگذاری کار آزمایشگاهی

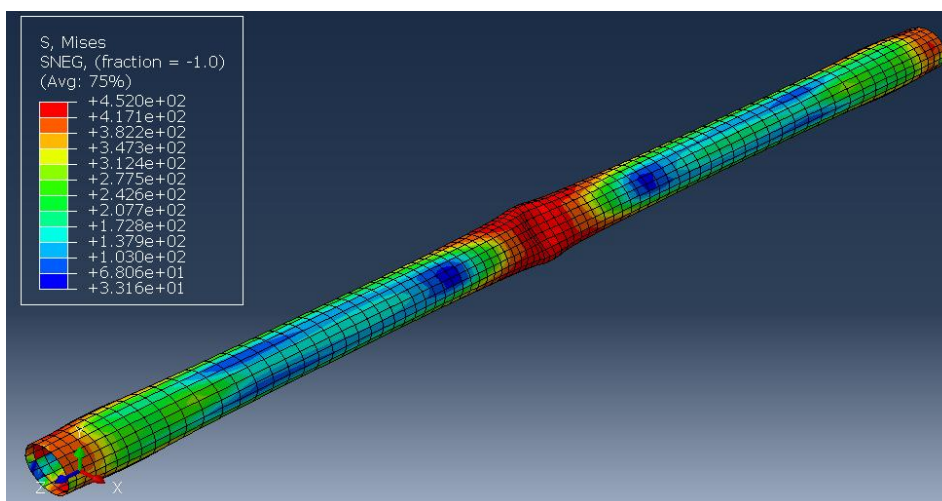
### ۳-۵. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی اجزا محدود

در شکل (۴) نمودار هم‌پایه شده بار محوری به بار تسلیم  $\frac{P}{P_y}$  بر حسب تغییر مکان محوری به تغییر مکان محوری تسلیم  $\frac{\delta}{\delta_y}$  برای کار آزمایشگاهی و نرم‌افزار اجزا محدود آورده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمودارها با درصد خطا قابل قبول، دارای انطباق نسبی خوبی هستند. به علت اینکه در کار آزمایشگاهی امکان گیرداری کامل برای اعضا وجود ندارد، درحالی که نرم‌افزار اجزا محدود این گیرداری را به طور کامل در نظر می‌گیرد، اندکی خطا ایجاد شده است. همچنین وجود تنش‌های پسماند نیز در عدم انطباق کامل نتایج آزمایشگاهی و عددی اثر می‌گذارد.



شکل ۴- نتایج حاصل از صحت سنجی مدلسازی عددی و کار آزمایشگاهی

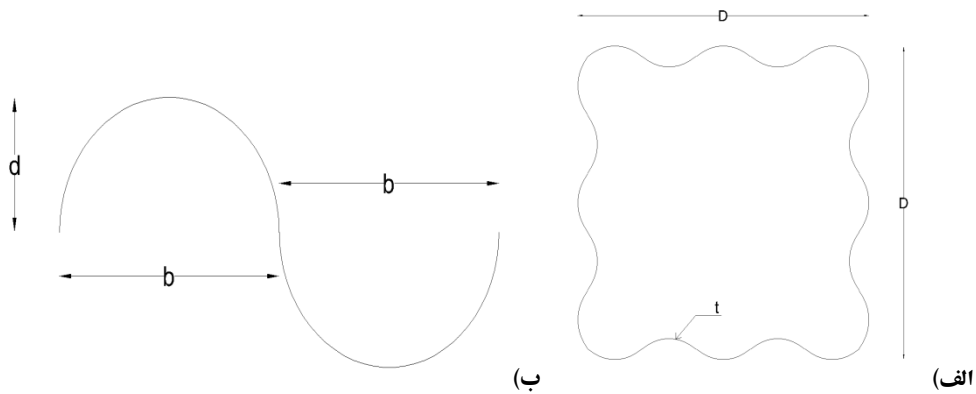


شکل ۵- تغییر شکل نمونه در مدل‌سازی عددی



### ۶. نمونه‌های مورد بررسی

در این قسمت، برای بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر رفتار بادبندها، نمونه‌های مختلفی که در طول و مساحت دارای شرایط یکسانی هستند، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین بعد جانبی همه مدل‌ها نیز برای برابری سختی جانبی، یکسان در نظر گرفته شده است. در شکل (۶) جزئیات مقاطع و در جدول (۲) مشخصات نمونه‌های مورد بررسی آورده شده است.



شکل ۶- الف) مقطع موج‌دار سینوسی مدل‌سازی شده، ب) پارامترهای مقطع موج‌دار

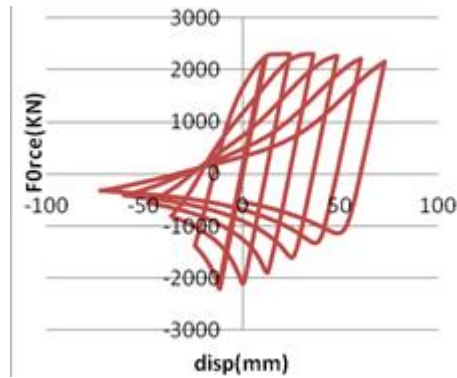
جدول ۲- مشخصات بادبندهای موج‌دار سینوسی مدل‌سازی شده در نمونه

نام نمونه	D (mm)	b (mm)	d (mm)	t (mm)	L (mm)	A (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_y$ (MPa)	$\delta_y$ (mm)
Sc1	۳۰۲,۵	۵۵	۱۳,۷۵	۵,۳۵	۶۴۰,۳	۷۰۰۰	۳۷۹	۱۲,۱۳
Sc2	۳۳۰	۵۵	۲۷,۵	۳,۶۲	۶۴۰,۳	۷۰۰۰	۳۷۹	۱۲,۱۳
Sc3	۳۴۵	۵۵	۳۵	۲,۸۶	۶۴۰,۳	۷۰۰۰	۳۷۹	۱۲,۱۳
Sc4	۳۰۰	۳۰	۱۵	۵,۳	۶۴۰,۳	۷۰۰۰	۳۷۹	۱۲,۱۳
Sc5	۳۰۰	۳۹	۱۵	۵,۲۳	۶۴۰,۳	۷۰۰۰	۳۷۹	۱۲,۱۳
Sc6	۳۰۰	۵۴	۱۵	۵,۳	۶۴۰,۳	۷۰۰۰	۳۷۹	۱۲,۱۳

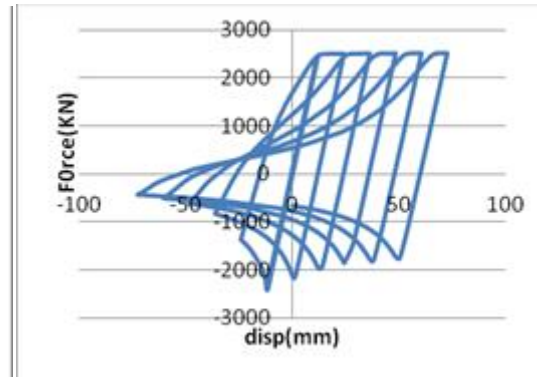


### ۷. بررسی نتایج بدست آمده از تحلیل‌ها

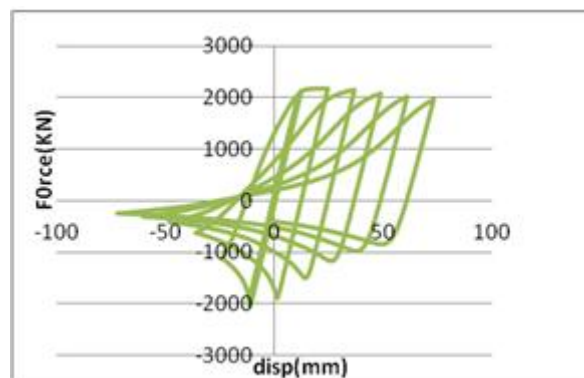
در شکل (۷) نمودار چرخه‌های هیستریزیس برای نمونه‌های Sc1، Sc2 و Sc3 که همگی دارای طول موج یکسان می باشند، آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش دامنه موج‌ها از ۱۳،۷۵ به ۳۵ میلی‌متر مقاومت کششی و فشاری نمونه‌ها افت کرده و در پی آن جذب انرژی مقاطع کاهش می‌یابد، که کاهش انرژی هدر رفته با افزایش دامنه موج‌ها در بادبندها با مقاطع موج‌دار سینوسی در شکل (۸) کاملاً مشهود می‌باشد.



(ب) نمودار بار تغییر مکان نمونه Sc2

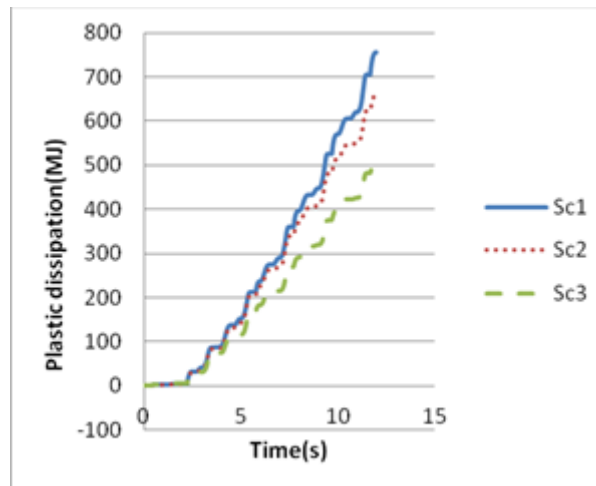


(الف) نمودار بار تغییر مکان نمونه Sc1



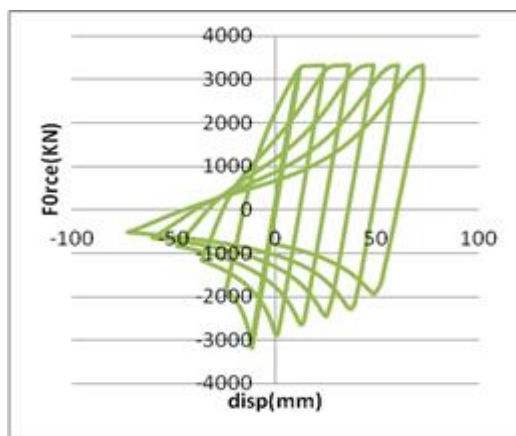
(ج) نمودار بار تغییر مکان نمونه Sc3

شکل ۷- چرخه‌های هیستریزیس برای مقاطع بادبند موج‌دار سینوسی با دامنه‌های مختلف

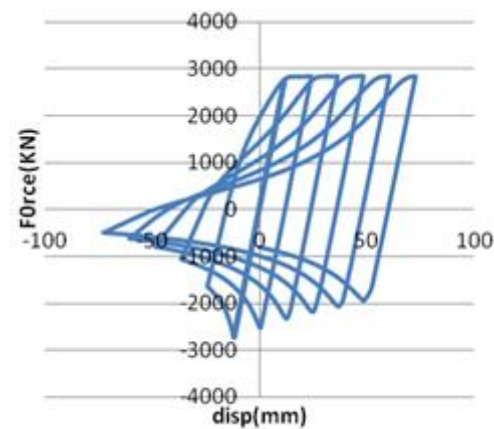


شکل ۸- نمودار انرژی هدررفته بر حسب زمان برای بادبندهای سینوسی با دامنه موج متفاوت

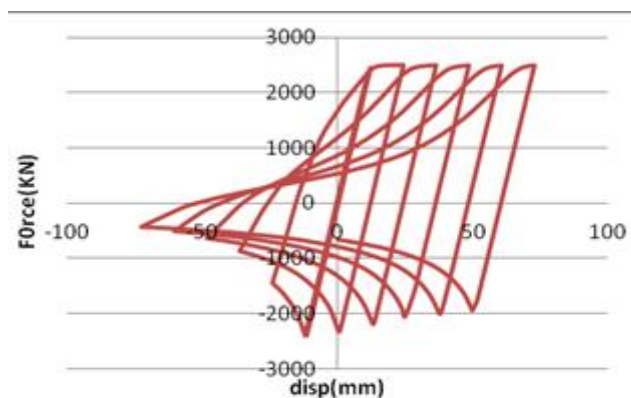
از طرفی دیگر برای بررسی تاثیر تغییرات طول موج بر رفتار چرخه‌ای بادبندهای موج دار سینوسی نمونه‌های Sc4، Sc5 و Sc6 که همگی دارای دامنه موج برابری هستند، را در نظر می‌گیریم. همان‌طور که از شکل (۹) برمی‌آید، با افزایش طول موج از ۳۰ به ۵۴، مقطع با طول موج کمتر دارای قدرت جذب انرژی بیشتر می‌باشد و طبق شکل (۱۰) ظرفیت اتلاف انرژی بیشتری نیز دارند.



ب) نمودار بار تغییر مکان نمونه Sc5



الف) نمودار بار تغییر مکان نمونه Sc4



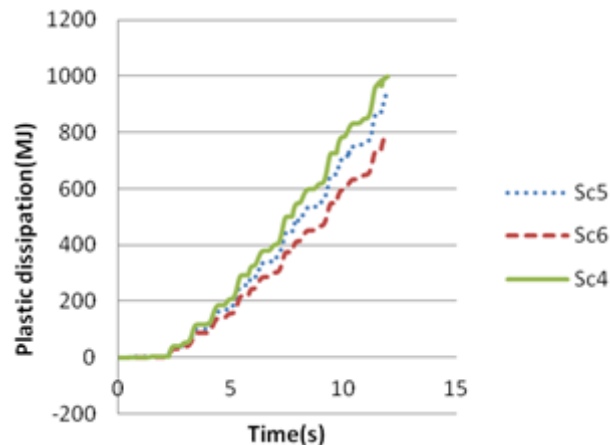
ج) نمودار بار تغییر مکان نمونه Sc6

شکل ۹- چرخه‌های هیستریزس برای مقاطع بادبند موج دار سینوسی با طول موج‌های مختلف





نهمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۲۱ و ۲۲ اردیبهشت ماه ۱۳۹۵  
دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران



شکل ۱۰- نمودار انرژی هدررفته بر حسب زمان برای بادبندهای سینوسی با طول موج‌های متفاوت

### ۸. نتیجه گیری

آنالیزها روی مقاطع مختلف بادبندها ساخته شده از ورق‌های موج‌دار سینوسی نشان می‌دهد:

- (۱) مقاطع با دامنه کوچکتر قابلیت جذب انرژی بیشتری نسبت به مقاطع با سایر طول موج‌ها می‌باشند.
- (۲) هرچه دامنه مقاطع موج‌دار سینوسی کمتر شود، مقاومت فشاری و کششی آنها افزایش خواهد یافت.
- (۳) مقاطع با طول موج کوتاه‌تر نیز دارای اتلاف انرژی بیشتری با کاهش طول موج می‌باشند و از مقاومت کم‌تری بهره‌مندی در مقایسه با مقاطع با طول موج بلندتر برخوردار می‌باشند.

### ۹. مراجع

- [1] ASCE. (2000). Steel moment frames after Northridge. J. Struct. Eng., 126(1) (special issue).
- [2] Mamaghani, I.H.P. (2012). "Cyclic Elastoplastic Large Displacement Analysis and Stability Evaluation of Steel Tubular Braces", American Transactions on Engineering & Applied Sciences.
- [3] B. Mason, E.P. Popov, "Cyclic response prediction for braced steel frames" J. of Struct Div ASCE, 106 (ST7), 1980.
- [4] R. Tremblay, "Inelastic seismic response of steel bracing members" J. of Constructional Steel research 2002. Structural Stability, Structural Stability Research Council, Montreal, Quebec, Canada,
- [5] مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی، ویرایش چهارم، ۱۳۹۲
- [6] Mamaghani, I.H.P., Usami, T., and Mizuno, E. (1996a). Inelastic large deflection analysis of structural steel members under cyclic loading. Engineering Structures, UK, Elsevier Science, 18(9), pp. 659-668.
- [7] Zienkiewicz, O.C. (1977). The finite element method. 3rd Ed., McGraw-Hill, New York.
- [8] Elchalakani, M., Zhao, X. L., Grzebieta, R. (2003). Test of cold-formed circular tubular braces under cyclic axial loading. J. of Struct. Eng., ASCE, 129(4), pp. 507-514.
- [9] Black R. G., Wenger, A. B., Popov, E. (1980), "Inelastic buckling of steel struts under cyclic load reversals," Berkeley, University of California.

Surf and download all data from SID.ir: [www.SID.ir](http://www.SID.ir)

Translate via STRS.ir: [www.STRS.ir](http://www.STRS.ir)

Follow our scientific posts via our Blog: [www.sid.ir/blog](http://www.sid.ir/blog)

Use our educational service (Courses, Workshops, Videos and etc.) via Workshop: [www.sid.ir/workshop](http://www.sid.ir/workshop)