

## شبیه‌سازی رفتار چرخه‌ای مهاربندهای کمانش‌تاب

امیرحسین سلمان پور، فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله  
فریدون اربابی، استاد، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

### چکیده

نگرانی‌های زیادی را در مورد عملکرد لرزه‌ای این سیستم ایجاد کرده است [۱-۴].

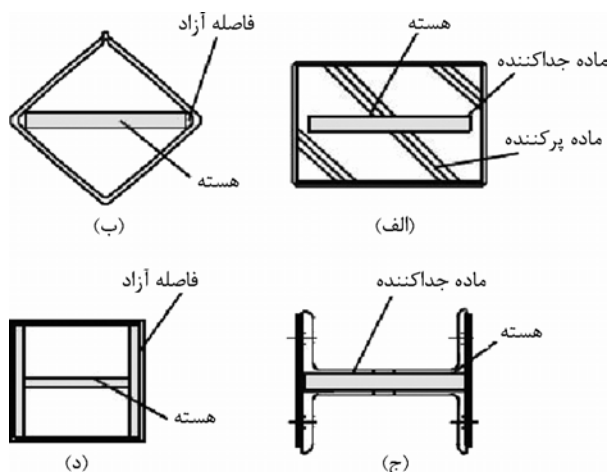
رفتار چرخه‌ای مهاربندهای متعارف به دلیل کمانش مهاربند در فشار، بسیار نامنظم و ناپایدار بوده و زوال زیادی را در مقاومت نشان می‌دهد. از آنجا که کمانش مهاربند در فشار عامل اصلی عملکرد نامطلوب مهاربندهای متعارف می‌باشد، در دو دهه گذشته مطالعات بسیاری به منظور توسعه مهاربندهایی با رفتار الاستوپلاستیک ایده‌آل‌تر صورت گرفته است. مهاربندهای کمانش‌تاب در این راه ایجاد شده و توسعه یافته‌اند. یک مهاربند کمانش‌تاب از یک هسته فلزی (معمولاً فولادی) و یک مکانیسم خارجی برای جلوگیری از کمانش هسته در فشار تشکیل می‌شود. تاکنون مکانیسم‌های مختلفی برای جلوگیری از کمانش هسته پیشنهاد گردیده که در شکل (۱-الف) تا (۱-د) شماری از آنها دیده می‌شود. متداول‌ترین مکانیسم برای جلوگیری از کمانش هسته، قرار دادن هسته در یک غلاف فولادی و پر کردن آن با یک ملات پرکننده مانند بتن می‌باشد، شکل (۱-الف).

با توجه به رواج روزافزون استفاده از مهاربندهای کمانش‌تاب (*Buckling-Restrained Braces = BRBs*) در دنیا و استفاده بالقوه آن در ایران، مطالعه دقیق‌تر رفتار و عملکرد لرزه‌ای این مهاربندها اهمیت ویژه‌ای دارد. تقریباً در تمامی مطالعات صورت گرفته، رفتار چرخه‌ای مهاربندهای کمانش‌تاب با استفاده از مدل دو خطی شبیه‌سازی شده است. در این مقاله، با استفاده از مدل فولاد *Giuffre-Menegotto-Pinto*، مدلی قابل اعتمادتر برای شبیه‌سازی رفتار چرخه‌ای این مهاربندها ارائه می‌گردد. مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که مدل مزبور به خوبی قادر است رفتار چرخه‌ای مهاربندهای کمانش‌تاب را شبیه‌سازی کند. همچنین در این مقاله راهکاری برای شبیه‌سازی پدیده خستگی سیکل کم (*Low-Cycle Fatigue*) این مهاربندها پیشنهاد می‌شود.

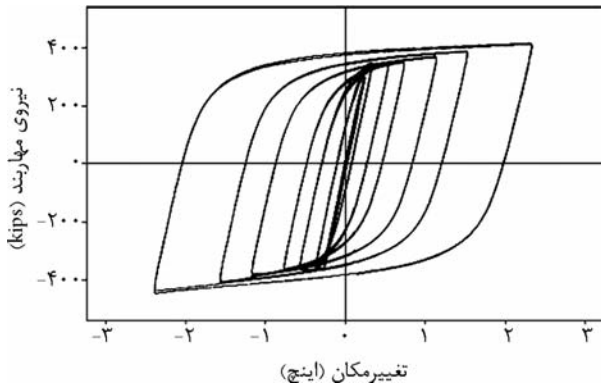
**کلیدواژه‌ها:** مهاربند کمانش‌تاب، شبیه‌سازی رفتار چرخه‌ای، پدیده خستگی سیکل کم

### ۱- مقدمه

سیستم مهاربندی همگرا، متداولترین سیستم سازه‌ای برای مقابله با بارهای لرزه‌ای در سازه‌های فولادی می‌باشد. استفاده از این سیستم به دلیل صرفه اقتصادی و طرح و اجرای آسان روز به روز رواج بیشتری می‌یابد. تمایل مهندسين به استفاده از این سیستم، پس از زمین‌لرزه نورث‌ریج ۱۹۹۴ و خسارت‌های غیرمنتظره‌ای که در جریان آن به قابهای خمشی فولادی وارد آمد، به طور چشم‌گیری افزایش یافته است. با این وجود، آسیبهایی که در بسیاری از زمین‌لرزه‌های اخیر مانند زمین‌لرزه‌های مکزیک (۱۹۸۵)، لوماپریتا (۱۹۸۹)، نورث‌ریج (۱۹۹۴)، کوبه (۱۹۹۵) و ... به قابهای مهاربندی شده همگرای متعارف وارد آمده،



شکل (۱): چند نمونه از مکانیسم‌های جلوگیری از کمانش هسته.



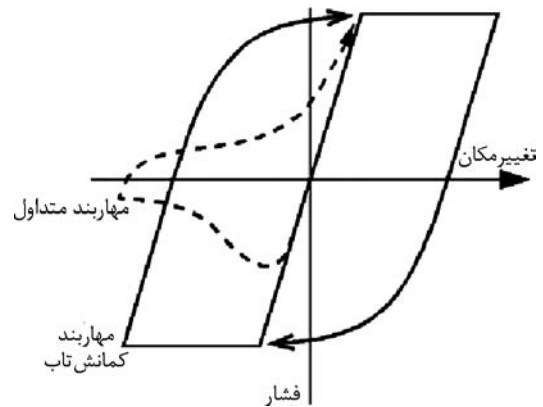
شکل (۳): رفتار چرخه‌ای یک مهاربند کمانش‌تاب [۵].

استفاده از مهاربند کمانش‌تاب به جای مهاربند متعارف، علاوه بر بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه، موجب صرفه‌جویی قابل‌ملاحظه‌ای نیز در هزینه ساخت می‌شود. این دو عامل موجب گردیده تمایل به استفاده از این مهاربند در ساخت و ساز روز به روز افزایش یابد. از این رو مطالعه دقیقتر رفتار و عملکرد لرزه‌ای قابهای مهاربندی شده کمانش‌تاب، از اهمیت زیادی برخوردار است. اولین گام در این راه، توسعه یک مدل عددی قابل اعتماد برای شبیه‌سازی رفتار مهاربند کمانش‌تاب می‌باشد. از آنجا که تقریباً در تمامی مطالعات، رفتار چرخه‌ای مهاربند کمانش‌تاب با استفاده از مدل دو خطی شبیه‌سازی گردیده، در این مقاله کوشش شده تا با استفاده از مدل فولاد *Giuffre-Menegotto-Pinto* مدلی دقیقتر برای شبیه‌سازی رفتار چرخه‌ای این مهاربند ارائه گردد. همچنین این مقاله پیشنهاداتی برای شبیه‌سازی پدیده خستگی سیکل کم مهاربندهای کمانش‌تاب ارائه می‌نماید.

## ۲- شبیه‌سازی رفتار چرخه‌ای مهاربندهای کمانش‌تاب

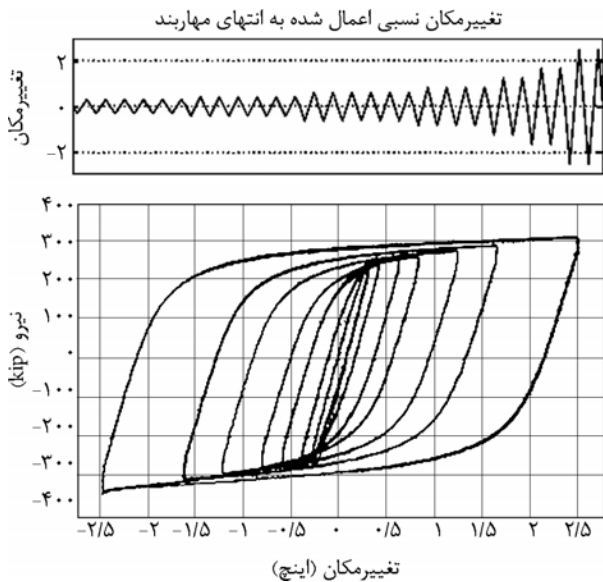
در این مطالعه به منظور شبیه‌سازی رفتار چرخه‌ای و پدیده خستگی سیکل کم مهاربندهای کمانش‌تاب از ساختار نرم‌افزاری *OpenSees* (*Open System for Earthquake Engineering Simulation*) استفاده گردیده است. *OpenSees* یک ساختار نرم‌افزاری برای شبیه‌سازی رفتار سیستم‌های سازه‌ای و ژئوتکنیکی در زمین‌لرزه می‌باشد [۶]. ساختار کد-باز و مجانی این نرم‌افزار بر پایه برنامه‌نویسی به زبان *Tcl* قرار داشته و شامل

مهاربندهای کمانش‌تاب به گونه‌ای ساخته می‌شوند که هسته بتواند در راستای طولی، مستقل از مکانیسم جلوگیری از کمانش عمل کرده و تمام نیروی محوری مهاربند، توسط هسته تحمل گردد. با جلوگیری از کمانش هسته، این المان می‌تواند در فشار همانند کشش جاری شده و به این ترتیب توانایی جذب انرژی آن به طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد. شکل (۲) رفتار یک مهاربند کمانش‌تاب را با یک مهاربند متعارف مقایسه می‌نماید.



شکل (۲): مقایسه رفتار چرخه‌ای مهاربندهای کمانش‌تاب و متعارف.

تاکنون آزمایشهای متعددی بر روی انواع مختلف مهاربندهای کمانش‌تاب انجام شده است. نتایج این آزمایشها نشان می‌دهد که مهاربند کمانش‌تاب دارای رفتار چرخه‌ای پایدار، منظم و نسبتاً متقارن بوده و منحنی چرخه‌ای آن نزدیک به منحنی چرخه‌ای دو خطی ایده‌آل است. همچنین در منحنی چرخه‌ای این مهاربند، سختی شدگی ایزوتروپیک و کینماتیک مشهود می‌باشد. سختی غیرالاستیک مهاربند کمانش‌تاب نسبتاً کم و در هر چرخه نسبت به چرخه پیش کاهش می‌یابد. نکته قابل توجه در مورد مهاربندهای کمانش‌تاب این است که مقاومت این مهاربندها در فشار بیش از مقاومت آنها در کشش می‌باشد. دلیل این پدیده انتقال درصد کمی از نیروی محوری در فشار، از هسته به مکانیسم جلوگیری از کمانش می‌باشد. مقدار این اضافه مقاومت عمدتاً به شکل هسته و نوع مکانیسم جلوگیری از کمانش بستگی دارد و بین ۶/۵ تا ۱۳ درصد گزارش شده است [۵]. شکل (۳) رفتار چرخه‌ای مهاربند کمانش‌تاب را نشان می‌دهد.



شکل (۴): تاریخچه بارگذاری آزمایش ۱-۹۹ و پاسخ مهاربند [۵].

به گونه‌ای که نسبت سختی غیرالاستیک مهاربند به سختی الاستیک هسته جاری شونده از  $0.4/2$  در دامنه  $0.31$  اینچ به  $0.2/1$  در دامنه  $0.63$  اینچ،  $1$  درصد در دامنه  $1.26$  اینچ و  $0.5/5$  در دامنه  $2.51$  اینچ می‌رسد. همچنین بیشینه مقاومت کششی مهاربند در این آزمایش به  $314/5$  kips و بیشینه مقاومت فشاری آن به  $341/3$  kips می‌رسد. در مجموع می‌توان گفت که نمونه دارای رفتار چرخه‌ای پایدار، منظم و نسبتاً متقارن بوده و اثر سخت‌شدگی ایزوتروپیک و کینماتیک در منحنی چرخه‌ای آن مشهود است. همان‌طور که اشاره شد، برای شبیه‌سازی این آزمایش، المان *truss* و رفتار چرخه‌ای *steel02* مورد استفاده قرار گرفته است. پارامترهای این مدل و مقادیر کالیبره شده آنها در جدول (۲) آمده است. نکات قابل توجه در این جدول به شرح زیر می‌باشد:

- مساحت مقطع المان به گونه‌ای تنظیم شده که سختی الاستیک المان با سختی الاستیک نمونه برابر باشد.
- تنش جاری شدن فولاد به گونه‌ای تنظیم شده است که مدل و نمونه در نیروی کششی یکسانی جاری گردند.
- سختی غیرالاستیک مدل به طور متوسط  $0.1$  سختی الاستیک هسته جاری شونده فرض شده است.
- برای پارامترهای انتقال از ناحیه الاستیک به ناحیه پلاستیک، از حد بالای مقادیر متداول استفاده شده است.
- برای شبیه‌سازی سخت‌شدگی کرنشی ایزوتروپیک

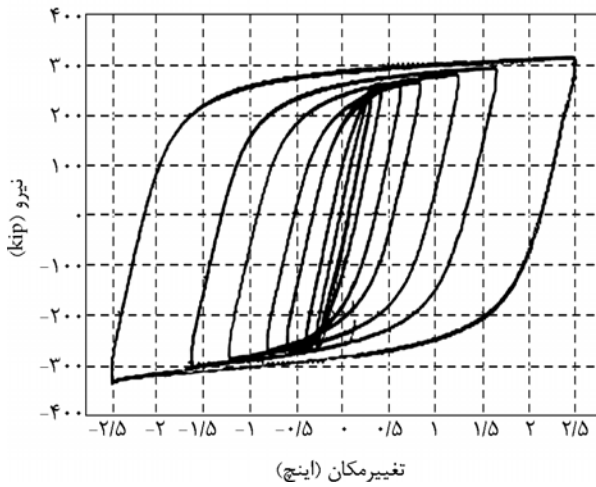
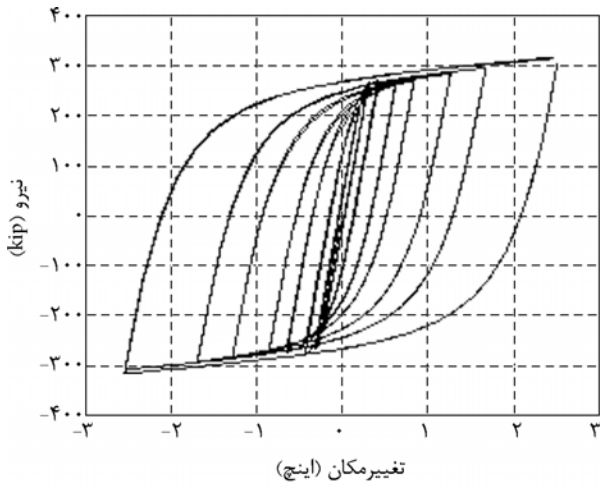
کتابخانه‌ای بسیار غنی از مصالح، مقاطع، المانهای سازه‌ای و ژئوتکنیکی، الگوریتم‌های حل و ... می‌باشد. ویژگیهای فوق به همراه کمکهای کم نظیر انجمنهای اینترنتی این ساختار به کاربران، دلایل اصلی استفاده از این ساختار در مطالعه حاضر می‌باشد. هر چند "رابط گرافیکی کاربر" بسیار ضعیف این ساختار، استفاده از آن را تا حدودی دشوار می‌نماید، ولی مزایای ذکر شده همچنان آن را مورد توجه کاربران قرار داده است.

برای شبیه‌سازی رفتار چرخه‌ای مهاربندهای کامانش‌تاب از مدلی مشتمل بر المان *truss* و فولاد *steel02* [۷] استفاده گردیده است. مدل فوق (مدل  $S_0$ )، با استفاده از نتایج ۵ آزمایش انجام شده در سالهای ۱۹۹۹ و ۲۰۰۰ بر روی این نوع مهاربندها [۵]، کالیبره شده است. ذکر این نکته نیز ضروری است که فولاد *Steel02* از مدل فولاد *Giuffre-Menegotto-Pinto* به همراه سخت‌شدگی ایزوتروپیک استفاده می‌کند [۷]. در ادامه، جزئیات شبیه‌سازی یکی از آزمایشهای فوق (آزمایش ۱-۹۹) بررسی می‌شود. نمونه مورد آزمایش، محصول شرکت ژاپنی *Nippon Steel* بوده و مشخصات آن در جدول (۱) آمده است. شکل (۴) نیز تاریخچه بارگذاری آزمایش و پاسخ مهاربند را نشان می‌دهد. ذکر این نکته ضروری است که نتایج آزمایشهای انجام شده در پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله در تهران بر روی این مهاربندها نیز در آینده ارائه خواهد شد.

سختی الاستیک کل مهاربند  $910$  Ksi است که این مقدار تقریباً  $0.86$  سختی هسته جاری شونده مهاربند می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌گردد، سختی غیر-الاستیک مهاربند با افزایش دامنه چرخه‌ها کاهش می‌یابد؛

جدول (۱): مشخصات مهاربند کامانش‌تاب در آزمایش ۱-۹۹.

طول کل مهاربند	هسته فولادی			طول کل
	نوع فولاد و تنش تسلیم	طول ناحیه جاری شونده	مساحت	
in	ksi	in	in <sup>2</sup>	in
۲۱۱/۸۱۱	JIS SM490A (۶۰/۷)	۱۲۱/۷	۴/۵	۶ × ۰/۷۵



شکل (۵): مقایسه نتیجه آزمایش ۱-۹۹ و شبیه‌سازی آن.

### ۳- شبیه‌سازی پدیده خستگی سیکل کم مهاربند کمانش‌تاب

در این مطالعه برای شبیه‌سازی پدیده خستگی سیکل کم مهاربند کمانش‌تاب از مدل *Fatigue Material* استفاده گردیده است. این مدل توسط *Uriz* برای استفاده در مدل‌های مبتنی بر مقاطع رشته‌ای توسعه یافته است. مدل فوق از رابطه *Coffin-Manson*، الگوریتم *Counting Modified Rainflow Cycle* و قانون *Miner* برای محاسبه شاخص خسارت خستگی *Fatigue Damage Index* استفاده می‌کند. هنگامی که شاخص خسارت در یک رشته به ۱ برسد، مدل مذکور تنش در آن رشته را به صفر رسانده و آن رشته را از محاسبات حذف می‌کند [۷-۸]. پارامترهای مدل *Fatigue Material* پارامترهای  $\epsilon_0, m$  در رابطه *Coffin-Manson* می‌باشند:

پارامترهای  $a_2$  و  $a_4$  برابر  $0.1$  فرض شده‌اند و پارامترهای  $a_1$  و  $a_3$  به گونه‌ای تنظیم گشته‌اند که بیشینه مقاومت کششی نمونه و مدل با یکدیگر برابر گردند. لازم به ذکر است که در مدل *Steel02* پارامتر  $a_1$  میزان افزایش در تنش تسلیم فشاری پس از تجربه کرنش پلاستیک به میزان  $a_2 \frac{F_y}{E}$  و پارامتر  $a_3$  میزان افزایش در تنش تسلیم کششی پس از تجربه کرنش پلاستیک به میزان  $a_4 \frac{F_y}{E}$  را نشان می‌دهند.

جدول (۲): پارامترهای مدل  $S_0$  برای شبیه‌سازی آزمایش ۱-۹۹.

پارامتر	تعریف	مقدار	توضیح	
پارامترهای المان	$A$	مساحت سطح مقطع المان	$= \frac{K_t L_t}{E}$ اینچ ۶/۷۵۲	
	$F_y$	تنش تسلیم	$= \frac{A_{sc} F_{ysc}}{A}$ ksi ۴۰/۴۵۴	
	$E$	سختی الاستیک	فرض شده ksi ۲۹۸۰۰	
پارامترهای مصالح	$b$	نسبت سخت‌شدگی کرنشی	$= 0.01 \frac{K_t}{K_{sc}}$ ۰/۰۱۱۶	
	$R_0$	پارامترهای انتقال از ناحیه الاستیک به ناحیه پلاستیک	پیشنهادی	
		$cR_1$	۰/۹۲۵	
		$cR_2$	۰/۱۵	
	$a_1$	پارامترهای سخت‌شدگی کرنشی ایزوتروپیک	کالیبره شده	۰/۰۰۰۴۴۵
	$a_2$		فرض شده	۰/۰۱
$a_3$	کالیبره شده		۰/۰۰۰۴۴۵	
$a_4$	فرض شده		۰/۰۱	

شکل (۵) نتیجه شبیه‌سازی آزمایش ۱-۹۹ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل مورد نظر توانسته است به خوبی رفتار چرخه‌ای نمونه ۱-۹۹ را شبیه‌سازی کند. ضعف اصلی این مدل ناتوانی در شبیه‌سازی اضافه مقاومت مهاربندهای کمانش‌تاب در فشار می‌باشد. دلیل این امر عدم امکان تعریف تنش جاری شدن متفاوت در کشش و فشار در مدل *steel02* می‌باشد. با توجه به قابلیت برنامه‌ریزی ساختار *OpenSees*، مدل *steel02* برای مطالعات بعدی این پروژه در حال اصلاح می‌باشد. لازم به ذکر است، بر اساس نتایج پنج مورد شبیه‌سازی انجام شده، مقدار میانگین پارامترهای  $a_1$  و  $a_3$ ،  $0.000447$  و انحراف از معیار آنها  $2e-6$  برآورد گردیده است.

ذکر این نکته ضروری است که در قسمت قبل برای شبیه‌سازی رفتار چرخه‌ای مهاربند، از المان *truss* استفاده شده است و امکان ردگیری کرنش هسته به صورت مستقیم وجود ندارد. برای این مورد مناسبت دارد که پارامتر  $\varepsilon_0$  برای کرنش المان اصلاح شود. این کار به سادگی با استفاده از نسبت طول هسته جاری شونده به طول کل المان امکان‌پذیر است:

$$\varepsilon_0 = \frac{0.13932 \times L_{sc}}{L_{element}} \quad (3)$$

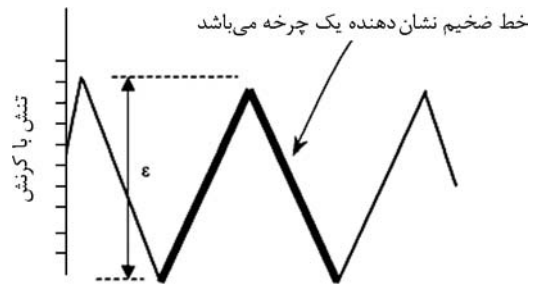
در نهایت، توجه به این نکته ضروری است که سطح کرنش در مهاربندهای کمانش‌تاب، به دلیل عدم کمانش، بسیار کمتر از مهاربندهای متعارف می‌باشد. در نتیجه مهاربندهای کمانش‌تاب نسبت به مهاربندهای متعارف عمر خستگی سیکل کم بسیار بیشتری دارند. به عبارت دیگر، احتمال شکست این مهاربندها در اثر خستگی سیکل کم بسیار ناچیز است.

#### ۴- اثر اضافه مقاومت فشاری مهاربند کمانش‌تاب بر پاسخ قابهای مهاربندی شده با آن

همان‌گونه که اشاره شد، مدل توسعه یافته (مدل  $S_0$ ) قادر به شبیه‌سازی اضافه مقاومت فشاری مهاربند کمانش‌تاب نمی‌باشد. لذا این پرسش مطرح می‌شود که اضافه مقاومت فشاری مهاربند کمانش‌تاب تا چه میزان پاسخ سازه را تحت تأثیر قرار می‌دهد و چشم‌پوشی از آن تا چه اندازه از اعتبار نتایج می‌کاهد. به منظور پاسخ به این پرسش، در ابتدا دو مدل با اضافه مقاومت‌های صفر و ۱۰ درصد با استفاده از المان *truss* و رفتار چرخه‌ای دوخطی *Hysteretic Material* [۷] برای شبیه‌سازی رفتار چرخه‌ای مهاربند کمانش‌تاب توسعه داده شد. رفتار چرخه‌ای این دو مدل که آنها را به ترتیب  $H_0$  و  $H_{10}$  می‌نامیم، در شکل (۷) نشان داده شده است. پارامترهای مدل اول که دارای اضافه مقاومت فشاری صفر درصد می‌باشد (مدل  $H_0$ )، همانند مدل  $S_0$  تنظیم شده است. پارامترهای مدل دوم (مدل  $H_{10}$ ) به‌گونه‌ای تنظیم شده که این مدل علاوه بر ویژگی‌های مدل‌های  $H_0$  و  $S_0$ ، دارای بیشینه مقاومت فشاری برابر با نمونه آزمایش ۱-۹۹ باشد. پارامترهای این دو مدل در جدول (۳) آمده است. تعاریف پارامترهای مدل *Hysteretic Material* در شکل (۸) ذکر شده است.

$$\varepsilon_i = \varepsilon_0 (N_f)^m \quad (1)$$

در رابطه بالا  $\varepsilon_0$  کرنشی است که در آن یک چرخه کامل باعث گسیختگی ماده می‌شود و  $N_f$  تعداد چرخه‌های کامل با کرنش  $\varepsilon_i$  می‌باشد که موجب گسیختگی ماده می‌گردد [۸]. تعریف یک چرخه کامل با کرنش  $\varepsilon$  در شکل (۶) آمده است.



شکل (۶): نمایش یک چرخه کامل و کرنش متناظر با آن در رابطه Coffin-Manson.

به منظور تنظیم پارامترهای مدل *Fatigue Material* برای مهاربند کمانش‌تاب، حداقل به نتایج دو آزمایش خستگی سیکل کم نیاز است. متأسفانه تاکنون آزمایش‌های اندکی به منظور مطالعه عمر خستگی مهاربندهای کمانش‌تاب صورت پذیرفته است. بیشتر آزمایش‌های انجام شده نیز توسط شرکت‌های سازنده این مهاربندها صورت گرفته و نتایج آنها منتشر نشده است. اطلاعاتی که در این زمینه موجود است تنها به نتایج یک آزمایش محدود می‌گردد که در آن، نمونه مورد آزمایش در ۱۷ سیکل کامل با تغییرشکل ۵/۶۹ سانتیمتر دچار گسیختگی گشته است. در آزمایش فوق طول کل نمونه ۵۳۸ سانتیمتر و طول قسمت جاری شونده هسته ۳۰۹/۱۲ سانتیمتر بوده است [۵]. برای تنظیم پارامترهای مدل *Fatigue Material* با استفاده از نتیجه آزمایش فوق، پارامتر  $m$  را برابر با مقدار میانگین معرفی شده توسط *Uriz* یعنی  $-0.458$  فرض نموده‌ایم [۸]. از سوی دیگر با این فرض که تمام تغییرشکل نمونه توسط هسته جاری شونده ایجاد گشته، می‌توان نتیجه گرفت که هسته در ۱۷ سیکل کامل با کرنش  $\varepsilon_{17} = \frac{2 \times 5.69}{309.12} = 0.03806$  گسیخته شده است. بنابراین:

$$\varepsilon_{17} = 0.03806, m = -0.458 \Rightarrow \varepsilon_0 = 0.13932 \quad (2)$$

جدول (۳): پارامترهای مدل‌های  $H_0$  و  $H_{10}$  برای شبیه‌سازی آزمایش ۹۹-۱.

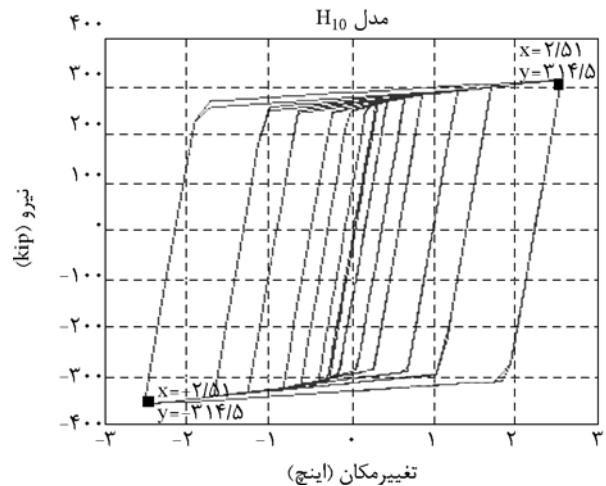
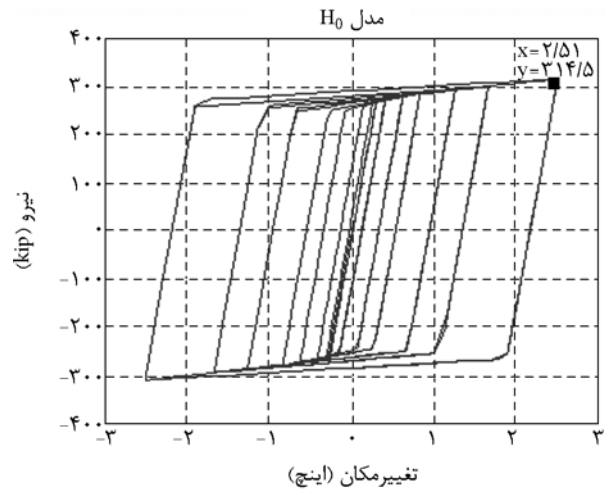
پارامتر	تعریف	مقدار ( $H_0$ )	مقدار ( $H_{10}$ )
A	مساحت سطح مقطع المان	۶/۷۵۲	۶/۷۵۲
$e1p, s1p$	نیرو و تغییرشکل در نقطه اول منحنی در جهت مثبت	۰/۰۰۱۳۶ ۴۰/۴۵۴	۰/۰۰۱۳۶ ۴۰/۴۵۴
$e2p, s2p$	نیرو و تغییرشکل در نقطه دوم منحنی در جهت مثبت	۰/۰۶۹۲ ۸۰/۰۵۸	۰/۰۶۹۲ ۸۰/۰۵۸
$e1n, s1n$	نیرو و تغییرشکل در نقطه اول منحنی در جهت منفی	-۰/۰۰۱۳۶ -۴۰/۴۵۴	-۰/۰۰۱۳۶ -۴۰/۴۵۴
$e2n, s2n$	نیرو و تغییرشکل در نقطه دوم منحنی در جهت منفی	-۰/۰۶۹۲ -۸۰/۰۵۸	-۰/۰۷۵۰ -۹۱/۱۸۰
$pinchX$	ضریب <i>Pinching</i> تغییرشکل در بارگذاری مجدد	۰/۰۱	۰/۰۱
$pinchY$	ضریب <i>Pinching</i> نیرو در بارگذاری مجدد	۰/۸۵	۰/۸۵
$damage1$	خسارت ناشی از شکل‌پذیری ( <i>Damage due to ductility</i> )	۰/۰	۰/۰
$damage2$	خسارت ناشی از انرژی ( <i>Damage due to energy</i> )	۰/۰	۰/۰
$beta$	مطابق شکل (۸)	۰/۰	۰/۰

ذکر این نکته ضروری است که آرایش مهاربندها در سازه فوق به صورت شورون در نظر گرفته شده که آرایش متداول در استفاده از این نوع مهاربند می‌باشد. جدول (۴) میانگین بیشینه پاسخهای این سه مدل را در ۱۰ زمین‌لرزه با شدت ۲ درصد در ۵۰ سال نشان می‌دهد. بررسی نتایج این جدول نشان می‌دهد که:

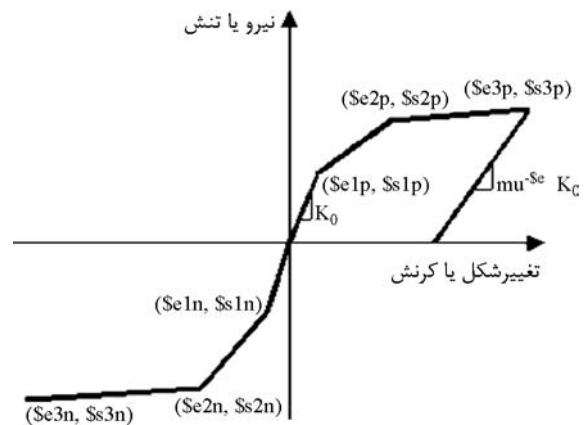
۱- اضافه مقاومت مهاربندهای کمانش‌تاب در فشار تأثیر ناچیزی بر پاسخ سازه مورد مطالعه، به جز پاسخ تغییرمکان عمودی وسط تیر (نقطه اتصال مهاربندها به یکدیگر در آرایش شورون) دارد.

۲- هر چند دقت مدل دو خطی در مجموع خوب می‌باشد، اما خطای ناشی از این مدل‌سازی، بیشتر از خطای ناشی از صرف‌نظر کردن از اضافه مقاومت فشاری مهاربندها می‌باشد. با توجه به مطالب فوق می‌توان نتیجه گرفت که مدل  $S_0$ ، مدلی قابل اعتماد برای شبیه‌سازی رفتار چرخه‌ای مهاربند کمانش‌تاب بوده و دقت آن بیشتر از مدل دو خطی متداول می‌باشد.

در ادامه، به منظور مطالعه اثر اضافه مقاومت فشاری مهاربندهای کمانش‌تاب بر پاسخ سازه‌های مهاربندی شده کمانش‌ناپذیر، پاسخ یک سازه مهاربندی شده کمانش‌ناپذیر ۶ طبقه که رفتار چرخه‌ای مهاربندهای آن با استفاده از مدل‌های  $H_0$ ،  $H_{10}$  و  $S_0$  شبیه‌سازی شده، مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل (۷): رفتار چرخه‌ای مدل‌های  $H_0$  و  $H_{10}$ .



شکل (۸): رفتار مدل *Hysteretic Material* و پارامترهای آن.

Mexico earthquake of September 19, 1985 behavior of steel buildings, *Earthquake Spectra*, 5(1), 51-88.

2. Kim, H. and Goel, S. (1992). Seismic evaluation and upgrading of braced structures for potential local failures, UMCEE 92-24, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, MI.
3. Krawinkler, H. et al (1996). Northridge earthquake of January 17, 1994: reconnaissance report, 2 Steel Buildings, *Earthquake Spectra*, 11, Suppl. C, 25-47.
4. Tremblay, R. et al (1996). Seismic design of steel buildings: lessons from the 1995 Hyogo-Ken Nanbu earthquake, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 23(3), 727-756.
5. Black, C., Makris, N., and Aiken, I. (2002). Component testing, stability analysis and characterization of buckling restrained braces, Final Report to Nippon Steel Corporation.
6. OpenSees Web Site, <http://opensees.berkeley.edu>.
7. Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M.H., Fenves, G.L., et al (2006). OpenSees Command Language Manual, Available at <http://opensees.berkeley.edu/>.
8. Uriz, P. (2005). Towards earthquake resistance design of concentrically braced frames, Dissertation for PhD Degree in Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, USA.

جدول (۴): اثر اضافه مقاومت فشاری مهارندهای کمانش‌تاب بر پاسخ قابهای مهاربندی شده با آن.

مدل $S_0$	مدل $H_0$	مدل $H_{10}$	
۰/۰	۰/۰	۰/۸۳	تغییر شکل قائم در وسط تیر (سانتیمتر)
۲/۹۷	۲/۸۵	۲/۸۱	تغییر مکان جانبی نسبی طبقه %
۰/۶۵	۰/۷۶	۰/۷۶	تغییر مکان جانبی نسبی ماندگار طبقه %
۱/۵۱	۱/۴۹	۱/۴۶	چرخش ستون %
۸/۲۴	۷/۰۰	۷/۰۹	شاخص خسارت مهاربند %
۱۳/۴	۱۲/۷	۱۳/۳	شکل‌پذیری مهاربند
۶۶/۲	۶۶/۶	۶۷/۷	نسبت نیرو به ظرفیت فشاری ستون %

## ۵- نتایج

در این مقاله، با استفاده از رفتار چرخه‌ای فولاد *steel02* در ساختار نرم‌افزاری *OpenSees*، مدلی برای شبیه‌سازی رفتار چرخه‌ای مهاربند کمانش‌تاب توسعه یافته است. بررسیهای انجام شده نشان می‌دهد که مدل فوق‌العاده است به خوبی رفتار چرخه‌ای مهاربند کمانش‌تاب را شبیه‌سازی کند. تنها ضعف این مدل ناتوانی در شبیه‌سازی اضافه مقاومت مهاربند در فشار می‌باشد که اثر قابل توجهی در نتایج ندارد و خطای ناشی از آن کمتر از خطای مدل دو خطی است که عموماً برای این مهاربند به کار می‌رود. همچنین در این مقاله پارامترهای مدل *Fatigue Material* برای شبیه‌سازی پدیده خستگی سیکل کم مهاربند کمانش‌تاب کالیبره شده است.

## ۶- مراجع

1. Oosteras, J. and Krawinkler H. (1989). The