

# ارائه مدلی برای افزایش فاصله و کاهش ابعاد سخت کننده‌های تیرپیوند قوطی شکل قاب‌های مهاربندی شده برون‌محور

سمیرا ابراهیمی<sup>۱</sup>، حمزه شکیب<sup>۲\*</sup>، مسعود سلطانی محمدی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

shakib@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۲/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۲/۲۰

**چکیده-** تیرهای پیوند با مقطع عرضی قوطی در قاب‌های مهاربندی شده برون‌محور به دلیل دارا بودن پایداری پیچشی ذاتی برخلاف تیرهای پیوند I شکل، نیاز به مهارجانبی ندارند و کماتش پیچشی جانبی در آن‌ها کمتر رخ می‌دهند. با این وجود مقاطع عرضی I شکل، به دلیل حاکم بودن شرایط مرزی گیردار در تمام وجه ورق جان نسبت به ورق جان مقاطع عرضی قوطی که دارای شرایط مرزی ساده هستند، دارای مزیت می‌باشند. در این تحقیق، تیرهای پیوند با مقاطع عرضی قوطی و I شکل مختلف در محدوده غیرالاستیک مورد بررسی قرار گرفته‌اند و سعی شده است که با تغییر در نحوه آرایش سخت‌کننده‌های تیرپیوند قوطی شکل، افزایش فواصل و کاهش ابعاد آن‌ها حاصل شود. برای انجام مطالعات عددی از نرم‌افزار اجزاء محدود و پروتکل بارگذاری AISC 2005 استفاده شده است. بررسی عددی مدل‌های مختلف تیرپیوند نشان می‌دهد که چنانچه تیرهای پیوند I شکل و قوطی دارای مشخصات هندسی یکسان باشند تیرهای پیوند I شکل به دلیل عملکرد بهتر ورق جان، از ظرفیت دوران بالاتری برخوردار هستند که این افزایش ظرفیت در حدود دو برابر می‌باشد. همچنین بررسی نتایج نشان می‌دهد که آرایش جدید سخت‌کننده‌های تیرپیوند قوطی، باعث افزایش فواصل آن‌ها در حدود ۳۰٪ و کاهش ابعاد آن‌ها در حدود ۱۵٪ شده به گونه‌ای که بر ظرفیت زاویه دوران نیز تأثیر نامطلوبی نمی‌گذارد. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهند که ابعاد سخت‌کننده‌ها در صورت ارضاء مساحت و ممان اینرسی مورد نیاز تأثیری روی ظرفیت زاویه دوران ندارند.

**واژگان کلیدی:** تیرپیوند، مقاطع عرضی، زاویه دوران، سخت‌کننده، قاب‌های مهاربندی شده برون‌محور

## ۱- مقدمه

مورد استفاده قرار می‌گیرند. تیرهای پیوند در قاب‌های

مهاربندی شده برون‌محور مانند یک فیوزشکل‌پذیر، در حالی که از کماتش مهاربندها جلوگیری می‌کنند نیروهای مهاربندی را از طریق خود به ستون یا مهاربند

قاب‌های مهاربندی شده برون‌محور به دلیل دارا بودن توأم مزایای قاب‌های خمشی و قاب‌های مهاربندی شده هم‌محور، بیشتر از دو دهه است که در ساختمان‌ها

دیگر انتقال می‌دهند به همین دلیل در قاب‌های برون‌محور مهمترین عضو قاب محسوب می‌شوند [۱]. تیرهای پیوند با مقطع عرضی I شکل برای جلوگیری از کمانش پیچشی جانبی نیاز به مهارجانبی دارند که تأمین این مهارها در پایه‌های پل و برج‌ها بسیار مشکل می‌باشد به همین دلیل از مقاطع عرضی I شکل به طور گسترده نمی‌توان در این موارد استفاده کرد. تیرهای پیوند با مقطع عرضی قوطی به دلیل دارا بودن پایداری پیچشی ذاتی نیاز به مهارجانبی ندارند و کمانش پیچشی جانبی در آن‌ها کمتر رخ می‌دهد [۲، ۳، ۴، ۵].

ورق جان تیرهای پیوند I شکل به دلیل حضور بال‌ها و سخت‌کننده‌ها در دو سمت هر وجهش، دارای شرایط مرزی گیردار<sup>۱</sup> می‌باشد. ورق جان تیرهای پیوند قوطی به دلیل قرار گرفتن بال‌ها و سخت‌کننده‌ها در یک طرف هر وجهش، دارای شرایط مرزی ساده<sup>۲</sup> می‌باشد. به همین دلیل تیرهای پیوند I شکل در به تأخیر انداختن کمانش موضعی نسبت به تیرهای پیوند قوطی دارای برتری می‌باشند.

سخت‌کننده‌های جان تیرپیوند از کمانش موضعی ورق جان جلوگیری می‌کنند و این امکان را فراهم می‌آورند که تیرهای پیوند به زاویه دوران بالاتری دست پیدا کنند [۶، ۷، ۸]. بنابراین علاوه بر طول تیرپیوند، آرایش مناسب سخت‌کننده‌ها نیز عامل مهمی برای دستیابی به زاویه دوران مناسب می‌باشد. Popov و Kasai در سال ۱۹۸۶ رابطه‌ای برای فواصل سخت‌کننده‌های تیرپیوند I شکل [۹] و Berman و Bruneau در سال ۲۰۰۷ رابطه‌ای برای فواصل و ابعاد سخت‌کننده‌های تیرپیوند قوطی شکل ارائه داده‌اند. در تحقیق‌های انجام

شده توسط Berman و Bruneau سخت‌کننده‌ها به صورت دور تا دور از بیرون به بال و جان تیرپیوند قوطی متصل می‌شوند [۲، ۱۰، ۱۱].

در این تحقیق، تیرهای پیوند با مقاطع عرضی قوطی و I شکل که دارای تشابه هندسی می‌باشند، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این تحقیق ابتدا ظرفیت زاویه دوران تیرهای پیوند قوطی شکل و I شکل که از نظر هندسی دارای شرایط مشابه بودند با یکدیگر مقایسه و بررسی شده‌اند و سپس به دلیل این‌که فواصل سخت‌کننده‌ها تحت شرایط هندسی مشابه، در تیرهای پیوند قوطی نسبت به تیرهای پیوند I شکل کمتر می‌باشد، مدلی برای افزایش فاصله و کاهش ابعاد سخت‌کننده‌های جان تیرپیوند قوطی ارائه شده است. برای فواصل و ابعاد سخت‌کننده‌های جان در مدل جدید، رابطه‌ای ارائه شده، که صحت نتایج با مدل Berman و Bruneau کنترل شده است. سپس به این سوال پاسخ داده شده است که آیا عرض سخت‌کننده‌ها تأثیر بیشتری بر روی ظرفیت زاویه دوران دارند یا ضخامت آن‌ها.

## ۲- معادلات طراحی تیرهای پیوند با مقاطع عرضی مختلف

در تیرهای پیوند با مقاطع عرضی مختلف، عمدتاً برش توسط جان و خمش توسط بال تحمل می‌شود. تیرپیوند با مقاطع عرضی قوطی و I شکل در شکل ۱ نمایش داده شده است.

فواصل سخت‌کننده‌های تیرپیوند، به شرایط مرزی ورق جان که بین بال‌ها و سخت‌کننده‌ها قرار می‌گیرند بستگی دارند. فواصل سخت‌کننده‌های تیرپیوند با مقاطع عرضی مختلف از روابط زیر به دست می‌آید.

1- clamped  
2- Simply Supported

رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\rho = \frac{e}{M_p/V_p} \quad (3)$$

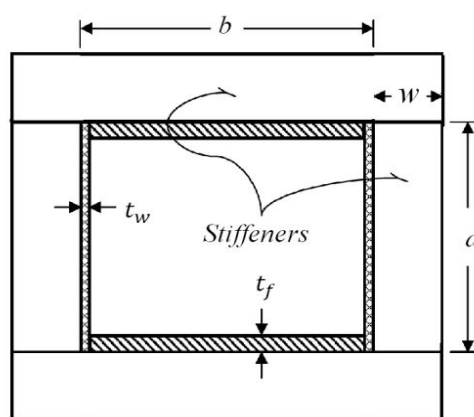
که در آن  $e$  طول تیرپیوند،  $M_p$  ممان پلاستیک و  $V_p$  برش پلاستیک تیرپیوند می‌باشد. در تمام موارد برای طول‌های تیرپیوند نرمالیز شده که بین دو مقدار  $1/6$  و  $2/6$  قرار دارند از درون‌یابی خطی استفاده می‌شود و برای تیرهای پیوند با  $\rho \geq 2/6$  به دلیل حاکم بودن کمانش بال فقط در فاصله  $1/5b$  از دو انتهای تیرپیوند از سخت‌کننده استفاده می‌شود [۱۲].

از روابط بالا می‌توان دریافت در صورت برقراری شرایط هندسی یکسان، فواصل سخت‌کننده‌ها در تیرپیوند قوطی نسبت به تیرپیوند I شکل کمتر می‌باشد که به دلیل حاکم بودن شرایط مرزی ساده<sup>۱</sup> در تمام وجوه ورق جان تیرپیوند قوطی می‌باشد در صورتی که در تیرپیوند I شکل شرایط مرزی گیردار<sup>۲</sup> در تمام وجوه ورق جان حاکم می‌باشد. این شرایط مرزی در فواصل سخت‌کننده‌های تیرهای پیوند خود را در ضریب کمانش ورق نشان می‌دهد [۱۳].

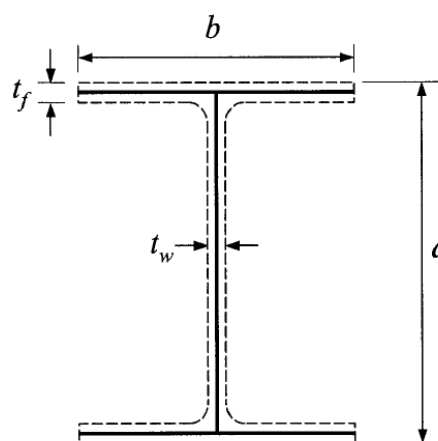
در تیرهای پیوند، سخت‌کننده‌ها باید قادر به تحمل نیروی وارده ناشی از به وجود آمدن میدان کشش باشند و برای این نیرو طراحی شوند. Salmon و Johnson نشان دادند که نیروی وارده به سخت‌کننده‌ها از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۴].

$$P_s = \frac{1}{2} \sigma_t t_w a \left( 1 - \frac{\frac{a}{d}}{\sqrt{1 + \left(\frac{a}{d}\right)^2}} \right) \quad (4)$$

که در آن  $\sigma_t$  تنش میدان کشش است که آن را  $F_{uw}$  (مقاومت نهایی جان تیرپیوند) در نظر می‌گیرند و بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند. سخت‌کننده‌های متصل از



(الف)



(ب)

شکل (۱) مقاطع عرضی تیرپیوند (الف) مقطع عرضی قوطی (ب) مقطع عرضی I شکل.

(الف) تیر پیوند I شکل [۹]

$$a = \begin{cases} 30t_w - \frac{d}{5} \rho \leq 1.6 \\ 52t_w - \frac{d}{5} \rho \geq 2.6 \end{cases} \quad a \leq d \quad (1)$$

(ب) تیرپیوند قوطی شکل (سخت کننده جان از یک سمت) [۲]

$$a = \begin{cases} 20t_w - \frac{d}{8} \rho \leq 1.6 \\ 37t_w - \frac{d}{8} \rho \geq 2.6 \end{cases} \quad a \leq d \quad (2)$$

که در آن  $a$  فاصله سخت‌کننده‌ها،  $d$  ارتفاع پانل،  $t_w$  ضخامت جان و  $\rho$  طول نرمالیز شده تیرپیوند می‌باشد که از

در قوانین AISC LRFD برای مقابله با کمناش سخت‌کننده‌ها یک حداقل ممان‌اینرسی برای آن‌ها در نظر گرفته شده است که از رابطه زیر به دست آورده می‌شود [۱۵].

$$I_{st} \geq j a t_w^3 \text{ و } j = \frac{2.5}{\left(\frac{a}{d}\right)^2} \geq 0.5 \quad (7)$$

در رابطه بالا  $I_{st}$  ممان اینرسی مورد نیاز سخت‌کننده‌ها می‌باشد که از رابطه زیر به دست می‌آید.

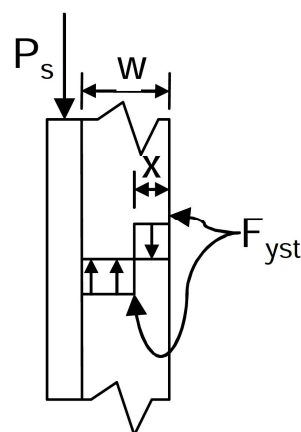
$$I_{st} = \frac{w^3 t_s}{3} \quad (8)$$

سخت‌کننده‌های جان مقطع عرضی I شکل برای تیرهای با ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متر و بیشتر، باید در تمام ارتفاع و در هر دو طرف تعبیه شوند. برای تیرهای پیوند با ارتفاع کمتر از ۶۰۰ میلی‌متر کافی است که سخت‌کننده‌ها در یک طرف جان قرار بگیرند. پهنای هر یک از این سخت‌کننده‌ها نباید از  $t_w - \frac{b}{2}$  و ضخامت آن‌ها نباید از  $t_w \times 0.75$  یا ۸ میلی‌متر کمتر اختیار شود [۱۶].

### ۳- تعیین حداکثر زاویه دوران پلاستیک تیرپیوند

برای به دست آوردن حداکثر زاویه دوران قابل تحمل تیرپیوند از منحنی هیسترتیک که محور افقی آن دوران و محور قائم آن نیروی برشی تیرپیوند می‌باشد استفاده می‌شود. از منحنی backbone می‌توان برای به دست آوردن حداکثر زاویه دوران قابل تحمل تیرپیوند کمک گرفت، به این صورت که در ۸۰٪ برش حداکثر تیرپیوند یک خط به موازات محور افقی رسم می‌شود هر جا که خط رسم شده منحنی backbone را قطع نمود زاویه دوران متناظر آن، حداکثر زاویه دوران پلاستیک تیرپیوند را نشان می‌دهد که نمونه‌ای از آن در شکل ۳ نشان داده شده است.

یک سمت به جان تیرپیوند قوطی به صورت خارج از مرکز بارگذاری می‌شوند که از شکل ۲ برای تعیین نیرویی که سخت‌کننده‌های تیرپیوند قوطی را به حالت تسلیم و جاری شدگی می‌رساند استفاده می‌شود. در این جا  $x$  فاصله از لبه بیرونی سخت‌کننده تا نقطه‌ای است که علامت تنش روی سخت‌کننده عوض می‌شود.



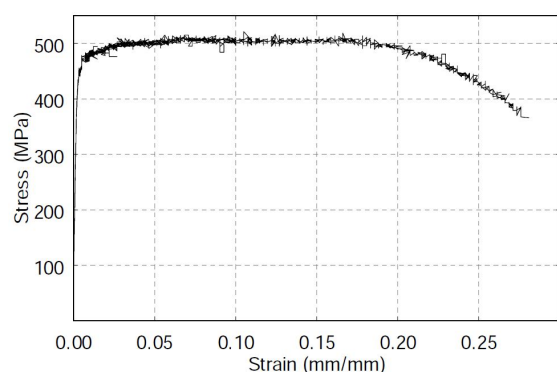
شکل (۲) نیرو و تنش در سخت‌کننده‌هایی که از یک سمت به جان متصل شده‌اند.

نیرویی که سخت‌کننده نشان داده شده در شکل ۲ را به حالت تسلیم و جاری شدگی می‌رساند از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۴].

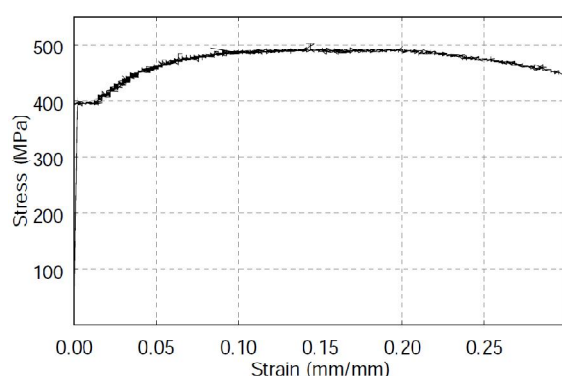
$$P_s = 0.414 w t_s F_{yst} \quad (5)$$

در این جا  $t_s$  ضخامت سخت‌کننده،  $w$  عرض سخت‌کننده،  $F_{yst}$  تنش تسلیم سخت‌کننده و  $A_{st} = w t_s$  می‌باشد. با برابر قرار دادن (۴) و (۵) مساحت مورد نیاز برای سخت‌کننده‌های متصل از یک سمت به جان تیرپیوند قوطی شکل به دست آورده می‌شود [۲].

$$A_{st} = \frac{F_{uw} t_w a}{0.828 F_{yst}} \left( 1 - \frac{\frac{a}{d}}{\sqrt{1 + \left(\frac{a}{d}\right)^2}} \right) \quad (6)$$



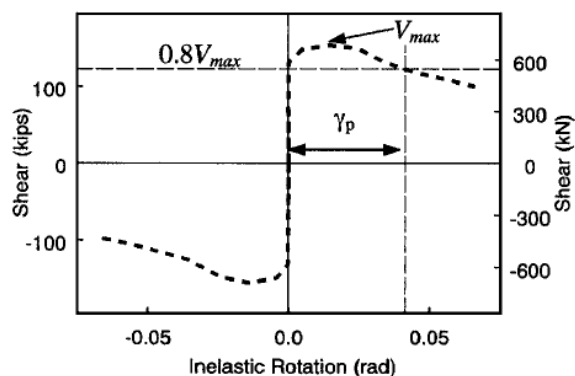
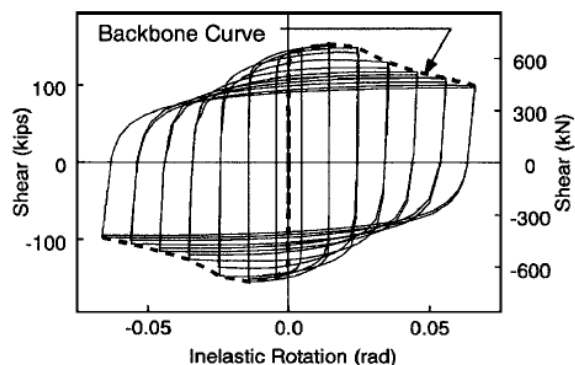
(الف)



(ب)

شکل (۴) نمودار تنش - کرنش (الف) مصالح جان (ب) مصالح بال و سخت کننده ها [۲].

تیرهای پیوند در نرم افزار ABAQUS مدل سازی شده اند در این مدل سازی از المان های Shell (S4) برای بال ها، جان ها و سخت کننده ها استفاده شده و برای مصالح از مدل پلاستیک که دارای سخت شوندگی کرنشی از نوع کینماتیک است بهره گرفته شده است. شرایط مرزی مشابه مدل Richards و Uang [۱۷] در نظر گرفته شده که در شکل ۵ نمایش داده شده است. برای اعمال نیرو از پروتکل بارگذاری AISC 2005 استفاده شده است که به صورت جابه جایی قائم به انتهای سمت راست مدل اعمال گردیده است.



شکل (۳) به دست آوردن حداکثر زاویه دوران قابل تحمل تیر پیوند [۱۷].

#### ۴- نمونه های تیر پیوند

در این تحقیق تیرهای پیوند با مقاطع عرضی قوطی و I شکل و به ازای نسبت های فشردگی بال تیر پیوند قوطی و I شکل ۸، ۱۷، ۲۴، نسبت های فشردگی جان تیر پیوند قوطی ۱۲، ۱۶، ۲۴، نسبت فشردگی جان تیر پیوند I شکل ۶، ۸، ۱۲ و ۴ طول نرمالیز شده تیر پیوند ۱/۲، ۱/۶، ۲/۱، ۳، مورد بررسی قرار گرفته اند. تمام نمونه های تیر پیوند قوطی شکل I و I شکل دارای ضخامت بال ۱۶ میلی متر می باشند. ضخامت جان تیرهای پیوند قوطی شکل ۸ میلی متر و I شکل ۱۶ میلی متر در نظر گرفته شده است. در تمام نمونه ها از فولاد ASTM A572 Gr. 50 استفاده شده است که نمودار تنش - کرنش آن ها در شکل ۴ نمایش داده شده است.

که در آن  $K_s(\alpha)$  ضریب کمناش ورق،  $\alpha$  حاصل تقسیم فاصله سخت‌کننده‌ها  $a$  به ارتفاع پانل  $d$  می‌باشد. برای به دست آوردن فاصله سخت‌کننده‌ها از فرایند مشابهی که توسط Popov و Kasai برای تیرپیوند I شکل [۹] و Berman و Bruneau برای تیرپیوند قوطی شکل با سخت‌کننده جان از یک سمت ارائه شده است [۲]، کمک گرفته شده است. برای به دست آوردن فاصله سخت‌کننده‌ها از  $\alpha \leq 1$  استفاده می‌شود.

$$\alpha = \frac{11.44}{\beta \sqrt{\gamma_u}} \quad (10)$$

$\beta$  نسبت فشردگی جان می‌باشد که از تقسیم ارتفاع پانل  $d$  به ضخامت جان  $t_w$  به دست می‌آید و  $\gamma_u$  زاویه دوران نهایی تیرپیوند می‌باشد. در نتیجه فواصل سخت‌کننده‌های تیرهای پیوند قوطی شکل با آرایش جدید سخت‌کننده، با در نظر گرفتن شرایط مرزی ورق جان، انجام یک سری کارهای عددی و اعمال ضرایب اطمینان از روابط زیر به دست می‌آید.

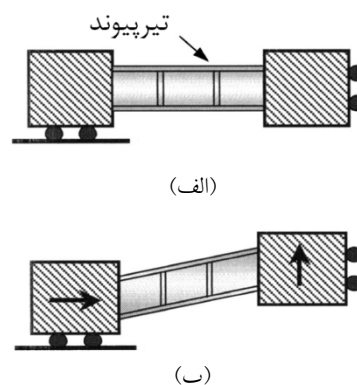
$$a = \begin{cases} 25t_w \rho \leq 1.6 \\ 50t_w \rho \geq 2.6 \end{cases} \quad a \leq d \quad (11)$$

برای طول‌های نرمالیز شده تیرپیوند که بین دو مقدار  $1/6$  و  $2/6$  قرار دارند از درون‌یابی خطی استفاده می‌شود. از مقایسه روابط (۲) و (۱۱) می‌توان دریافت که اگر سخت‌کننده‌ها از دو سمت به جان تیرپیوند قوطی متصل شوند، از فواصل بیشتری نسبت به حالتی که سخت‌کننده‌ها فقط از یک سمت به جان اتصال می‌یابند، برخوردار هستند که این افزایش در حدود ۳۰٪ می‌باشد.

## ۵-۲- رابطه پیشنهادی برای ابعاد سخت‌کننده‌های

### جان تیرپیوند قوطی شکل در آرایش جدید

اگر سخت‌کننده‌ها به جان تیرپیوند قوطی شکل همانند



شکل (۵) شرایط مرزی (الف) شکل مدل قبل از اعمال نیرو (ب) شکل مدل بعد از تغییر شکل حاصل از اعمال نیرو [۱۷].

## ۵- مطالعات عددی سخت‌کننده‌های تیر

### پیوند قوطی شکل

سخت‌کننده‌های جان تیرپیوند، کمناش جان را به تأخیر انداخته و باعث می‌شوند که تیرپیوند به زاویه دوران بالاتری دست پیدا کند [۶، ۷، ۸]. در این تحقیق برای سخت‌کننده‌های جان تیرپیوند قوطی شکل، آرایشی مناسب ارائه شده که باعث افزایش فواصل و کاهش ابعاد آن‌ها می‌شود.

## ۵-۱- رابطه پیشنهادی برای فواصل سخت‌کننده‌های

### جان تیرپیوند قوطی شکل در آرایش جدید

در تیرهای پیوند قوطی اگر سخت‌کننده‌ها از دو سمت به جان تیرپیوند اتصال یابند، در این صورت جان تیرپیوند در بالا و پایین دارای شرایط مرزی ساده و در طرفین دارای شرایط مرزی گیردار خواهد بود. Cook و Rockey در سال ۱۹۶۳ با انجام یک سری مطالعات عددی ضریب کمناش ورق با شرایط مرزی فوق‌الذکر را به دست آوردند [۱۸] که این ضریب کمناش از روابط زیر به دست می‌آید [۱۹].

$$K_s(\alpha) = \begin{cases} 5.34 + \frac{2.31}{\alpha} - \frac{3.44}{\alpha^2} + \frac{8.39}{\alpha^3} & (\alpha \geq 1) \\ \frac{5.34}{\alpha^2} + \frac{2.31}{\alpha} - 3.44 + 8.39 & (\alpha \leq 1) \end{cases} \quad (9)$$

سخت‌کننده‌ها می‌توان نتیجه گرفت که سخت‌کننده‌های متصل از دو سمت به جان تیرپیوند قوطی شکل به ابعاد کمتری نیاز دارند که این کاهش در حدود ۱۵٪ می‌باشد.

## ۶- اعتبار سنجی مدل‌های المان محدود

برای بررسی صحت کارهای انجام شده در این تحقیق، از مطالعات آزمایشگاهی Berman و Bruneau [۲] استفاده شده است. در تحقیق ایشان یک قاب یک طبقه یک دهانه با عرض دهانه ۳/۶۶ متر، ارتفاع طبقه ۲/۳۶ متر و تیرپیوند قوطی شکل با مشخصات ابعادی زیر در نظر گرفته شده است.

$$d=b=150 \text{ mm}, t_f=16 \text{ mm}, t_w=8 \text{ mm}, e=460 \text{ mm}, \\ a=152 \text{ mm}, w=64 \text{ mm}, t_s=10 \text{ mm}$$

برای مصالح از ASTM A572 Gr. 50 استفاده شده است. مقطع تیرپیوند مورد نظر دارای برش پلاستیک ( $V_p=495 \text{ kN}$ ) و ممان پلاستیک ( $M_p=158 \text{ kN-m}$ ) و طول تیرپیوند ۴۵۶ میلی‌متر می‌باشد که در این صورت دارای طول تیرپیوند نرمالیز شده ( $\rho=1/44$ ) می‌باشد و رفتار تیرپیوند از نوع برشی خواهد بود. در تحقیق ایشان، برای بارگذاری از پروتکل ATC 24 که به صورت جابه‌جایی افقی به بالای هر ستون اعمال می‌شود بهره گرفته شده است.

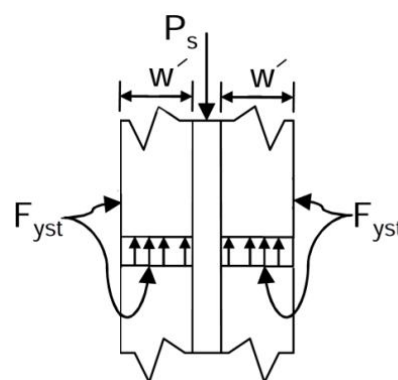
برای بررسی صحت سنجی نتایج، مدلی همانند تیرپیوند مذکور در نرم‌افزار ABAQUS ساخته شده و منحنی‌های هیستریتیک مطابق شکل ۷ مورد مقایسه قرار گرفته است.

در شکل ۷ نمودار خط پر منحنی هیستریتیک حاصل از مدل ساخته شده در نرم‌افزار ABAQUS می‌باشد و نمودار نقطه چین منحنی هیستریتیک حاصل از تحقیق Berman و Bruneau می‌باشد. از مقایسه دو نمودار حاصل می‌توان دریافت که مدل‌های ساخته شده در نرم‌افزار ABAQUS از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشند.

شکل ۶ از دو سمت اتصال یابند، به صورت هم‌مرکز بارگذاری می‌شوند. در این حالت نیرویی که سخت‌کننده‌ها را به تسلیم و جاری شدگی می‌رساند از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۴].

$$P_s = w t_s F_{yst} \quad (12)$$

در این جا  $w = 2w'$  تعریف می‌شود.



شکل (۶) نیرو و تنش در سخت‌کننده‌هایی که از دو سمت به جان متصل شده‌اند.

با انجام روند توضیح داده شده برای سخت‌کننده‌های متصل از یک سمت به جان تیرپیوند، مساحت مورد نیاز سخت‌کننده‌های متصل از دو سمت به جان تیرپیوند از رابطه (۱۳) به دست می‌آید.

$$A_{st} = \frac{F_{uw} t_w a}{2 F_{yst}} \left( 1 - \frac{\frac{a}{d}}{\sqrt{1 + \left(\frac{a}{d}\right)^2}} \right) \quad (13)$$

در این جا ممان اینرسی مورد نیاز سخت‌کننده‌ها از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$I_{st} \geq j a t_w^3 \text{ و } j = \frac{2.5}{\left(\frac{a}{d}\right)^2} - 2 \geq 0.5 \text{ و } I_{st} = \frac{w^3 t_s}{12} \quad (14)$$

از مقایسه مساحت و ممان اینرسی مورد نیاز برای

## ۷- بررسی نتایج مدل‌های المان محدود

در این تحقیق رفتار تیرهای پیوند با مقاطع عرضی و آرایش‌های مختلف سخت‌کننده با یکدیگر مقایسه شده و سعی شده است با ارائه یک مدل جدید علی‌رغم افزایش فواصل و کاهش ابعاد سخت‌کننده‌های تیرپیوند قوطی شکل، ظرفیت زاویه دوران آن‌ها تغییری نکند.

### ۷-۱- مقایسه تیرهای پیوند با مقاطع عرضی مختلف

در این قسمت رفتار تیرهای پیوند با مقاطع عرضی قوطی و I شکل با یکدیگر مقایسه گردیده به همین منظور تیرهای پیوند قوطی و I شکل با مساحت، ممان اینرسی، طول و فواصل یکسان سخت‌کننده در نظر گرفته شده‌اند. مقایسه حداکثر زاویه دوران قابل تحمل توسط تیرهای پیوند با مقاطع عرضی مختلف که از نظر هندسی دارای شرایط مشابهی می‌باشند، در ادامه ارائه می‌شود. در جدول ۱ برش و ممان پلاستیک تیرهای پیوند با نسبت‌های مختلف فشردگی بال و جان مشخص شده است.

جدول (۱): برش و ممان پلاستیک تیرهای پیوند

	$b/t_f$	$d/t_w$ (قوطی)	$d/t_w$ (I)	$M_p$ (KN-m)	$V_p$ (KN)
S1	۸	۱۲	۶	۱۱۷/۵	۳۹۳
S2	۸	۱۶	۸	۱۵۹/۶	۵۲۵/۵
S3	۸	۲۴	۱۲	۲۵۲/۱۵	۷۹۰
S4	۱۷	۱۲	۶	۲۱۷	۳۹۳
S5	۱۷	۱۶	۸	۲۸۸	۵۲۵/۵
S6	۱۷	۲۴	۱۲	۴۳۶/۶	۷۹۰
S7	۲۴	۱۲	۶	۲۹۴	۳۹۳
S8	۲۴	۱۶	۸	۳۸۸/۲	۵۲۵/۵
S9	۲۴	۲۴	۱۲	۵۸۰	۷۹۰

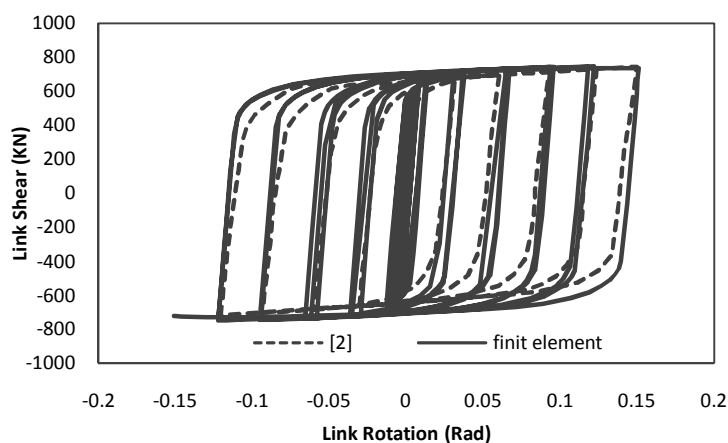
در این جا  $t_w$  ضخامت جان،  $t_f$  ضخامت بال،  $b$  عرض بال،  $d$  عمق جان می‌باشد. در جدول ۲ به مقایسه حداکثر

زاویه دوران تیرهای پیوند I شکل و قوطی شکل پرداخته شده است. از جدول ۲ می‌توان نتیجه گرفت که تیرهای پیوند دارای مقاطع عرضی I شکل نسبت به مقاطع عرضی قوطی از ظرفیت زاویه دوران به مراتب بیشتری (در حدود دو برابر) برخوردار هستند. که این امر به دلیل وجود سخت‌کننده‌ها و ورق‌های بال در دو سمت هر وجه ورق جان تیرپیوند I شکل می‌باشد. در شکل ۸ منحنی هیستریک دوران - برش برای مقطع عرضی S<sub>7</sub> و  $p=2/1$  نشان داده شده است که از آن می‌توان نتیجه گرفت که تیرهای پیوند I شکل دارای رفتار به مراتب بهتری هستند. در مدل‌های المان محدود رنگ‌های پررنگ‌تر بیان‌کننده تنش و کرنش بیشتر در مدل می‌باشد، در نتیجه تنش و کرنش در دو انتهای تیرپیوند نسبت به مابقی نواحی بیشتر می‌باشد.

### ۷-۲- بررسی صحت رابطه ارائه شده برای فواصل سخت‌کننده‌های متصل از دو سمت به جان تیرپیوند قوطی شکل (رابطه ۱۱).

در این قسمت به بررسی صحت رابطه‌های ارائه شده برای فواصل و ابعاد سخت‌کننده‌های تیرپیوند قوطی شکل که دارای سخت‌کننده جان از دو سمت می‌باشند، پرداخته می‌شود. با توجه به این که رابطه ارائه شده در (۲) توسط Berman و Bruneau قبلاً اثبات شده است، در ادامه برای بررسی صحت رابطه ارائه شده در این تحقیق به مقایسه نتایج حاصل از رابطه‌های (۲) و (۱۱) پرداخته می‌شود. تیرهای پیوند قوطی شکل که یکبار دارای سخت‌کننده جان از یک سمت و بار دیگر دارای سخت‌کننده جان از دو سمت می‌باشند، در نظر گرفته شده‌اند. برای هر مدل به طور جداگانه فواصل سخت‌کننده‌ها و ابعاد آن‌ها تعیین شده است.





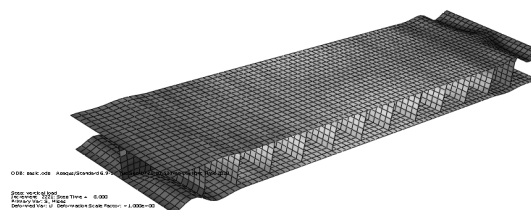
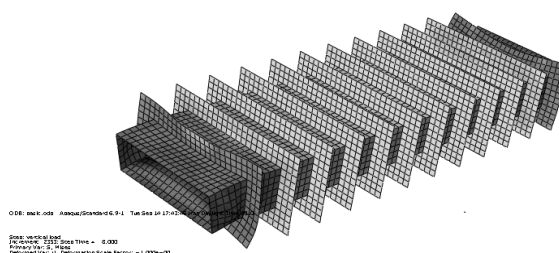
شکل (۷) مقایسه منحنی هیسترتیک نمونه ساخته شده در نرم افزار ABAQUS با نتایج Bruneau و Berman.

جدول (۲) زاویه دوران نهایی تیرهای پیوند دارای مقاطع مختلف

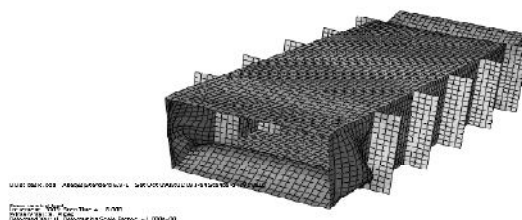
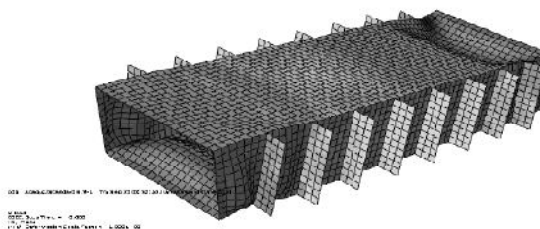
	تیر پیوند قوطی شکل						تیر پیوند I شکل									
	$\rho=1/2$		$\rho=1/6$		$\rho=2/1$		$\rho=3$		$\rho=1/2$		$\rho=1/6$		$\rho=2/1$		$\rho=3$	
	$a$ (mm)	$\gamma_u$ (rad)	$a$ (mm)	$\gamma_u$ (rad)	$a$ (mm)	$\gamma_u$ (rad)	$\gamma_u$ (rad)		$a$ (mm)	$\gamma_u$ (rad)	$a$ (mm)	$\gamma_u$ (rad)	$a$ (mm)	$\gamma_u$ (rad)	$a$ (mm)	$\gamma_u$ (rad)
S1	۱۲۰	۰/۲	۱۲۰	۰/۲	۱۲۶	۰/۲	۰/۲		۱۲۰	۰/۲	۱۲۰	۰/۲	۱۲۶	۰/۲	۰/۲	
S2	۱۲۲	۰/۲	۱۲۲	۰/۲	۱۵۹	۰/۲	۰/۲		۱۲۲	۰/۲	۱۲۲	۰/۲	۱۵۹	۰/۲	۰/۲	
S3	۱۲۸	۰/۲	۱۲۸	۰/۲	۱۶۸	۰/۲	۰/۱۶		۱۲۸	۰/۲	۱۲۸	۰/۲	۱۶۸	۰/۲	۰/۲	
S4	۱۱۰	۰/۲	۱۲۶	۰/۲	۱۱۶	۰/۲	۰/۰۶۶		۱۱۰	۰/۲	۱۲۶	۰/۲	۱۱۶	۰/۲	۰/۲	
S5	۱۳۲	۰/۲	۱۲۵	۰/۲	۱۴۴	۰/۱۱	۰/۰۵۷		۱۳۲	۰/۲	۱۲۵	۰/۲	۱۴۴	۰/۲	۰/۲	
S6	۱۳۳	۰/۲	۱۲۶	۰/۲	۱۹۳	۰/۲	۰/۰۴۱		۱۳۳	۰/۲	۱۲۶	۰/۲	۱۹۳	۰/۲	۰/۲	
S7	۱۱۳	۰/۲	۱۲۰	۰/۰۹۳	۱۲۱	۰/۰۸۲	۰/۰۴		۱۱۳	۰/۲	۱۲۰	۰/۲	۱۲۱	۰/۲	۰/۰۴۷	
S8	۱۲۷	۰/۲	۱۳۲	۰/۰۸۲	۱۵۵	۰/۰۵	۰/۰۳		۱۲۷	۰/۲	۱۳۲	۰/۲	۱۵۵	۰/۲	۰/۰۴۶	
S9	۱۲۶	۰/۲	۱۳۱	۰/۱۱	۱۹۳	۰/۰۳۹	۰/۰۲۱		۱۲۶	۰/۲	۱۳۱	۰/۲	۱۹۳	۰/۲	۰/۰۴۴	

جدول (۳) بررسی صحت رابطه ارائه شده برای فواصل سخت کننده های متصل از دو سمت به جان تیر پیوند (رابطه ۱۱).

	قوطی (برمن)						قوطی (اصلاحی)					
	$\rho=1/2$		$\rho=1/6$		$\rho=2/1$		$\rho=1/2$		$\rho=1/6$		$\rho=2/1$	
	$a$ (mm)	$\gamma_u$ (rad)	$a$ (mm)	$\gamma_u$ (rad)	$a$ (mm)	$\gamma_u$ (rad)	$a$ (mm)	$\gamma_u$ (rad)	$a$ (mm)	$\gamma_u$ (rad)	$a$ (mm)	$\gamma_u$ (rad)
S1	۱۲۰	۰/۲	۱۲۰	۰/۲	۱۲۶	۰/۲	۱۲۰	۰/۲	۱۲۰	۰/۲	۱۲۶	۰/۲
S2	۱۲۲	/۲	۱۲۲	۰/۲	۱۵۹	۰/۲	۱۲۲	۰/۲	۱۲۲	۰/۲	۱۵۹	۰/۲
S3	۱۲۸	۰/۲	۱۲۸	۰/۲	۱۶۸	۰/۲	۱۹۲	۰/۲	۱۷۰/۶	۰/۲	۱۶۸	۰/۲
S4	۱۱۰	۰/۲	۱۲۶	۰/۱۱	۱۱۶	۰/۰۸۹	۱۱۰	۰/۲	۱۲۶	۰/۲	۱۱۶	۰/۲
S5	۱۳۲	۰/۲	۱۲۵	۰/۰۹۸	۱۴۴	۰/۰۶	۱۳۲	۰/۲	۱۴۵/۸	۰/۱	۱۴۴	۰/۰۹۵
S6	۱۳۳	۰/۲	۱۲۶	۰/۰۸۹	۱۹۳	۰/۱۵	۱۶۶/۲۵	۰/۲	۱۷۶/۴	۰/۰۸۱	۱۹۳	۰/۱۵
S7	۱۱۳	۰/۲	۱۲۰	۰/۰۵۳	۱۲۱	۰/۰۵	۱۱۳	۰/۲	۱۲۰	۰/۰۸۹	۱۲۱	۰/۰۷۲
S8	۱۲۷	۰/۲	۱۳۲	۰/۰۶	۱۵۵	۰/۰۳۹	۱۴۸/۲	۰/۲	۱۴۸/۵	۰/۰۶۶	۱۵۵	۰/۰۴۹
S9	۱۲۶	۰/۲	۱۳۱	۰/۰۶۷	۱۹۳	۰/۰۲۹	۱۷۶/۴	۰/۲	۱۹۶/۵	۰/۰۶۸	۲۲۰/۵	۰/۰۲۵



شکل (۸) مدل المان محدود و منحنی هیستریتیک دوران - برش برای مقطع عرضی  $S_7$  و  $\rho=2/1$ .



شکل (۹) مدل المان محدود و منحنی هیستریتیک دوران - برش برای مقطع عرضی  $S_9$  و  $p=1/6$

تیرهای پیوند قوطی با مقطع عرضی  $S_4$  استفاده شده است. برای بررسی تأثیر ابعاد سخت‌کننده‌ها، عرض سخت‌کننده نصف و ضخامت آن دو برابر در نظر گرفته شده است (هر دو مورد جوابگوی مساحت و ممان اینرسی مورد نیاز هستند). در جدول ۴ منظور از قوطی ( $A_{st1}$ ) مدلی است که سخت‌کننده آن دارای عرض دو برابر و ضخامت نصف نسبت به مدل قوطی ( $A_{st2}$ ) می‌باشد. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴ می‌توان گفت در صورت ارضاء مساحت و ممان اینرسی مورد نیاز برای سخت‌کننده‌های تیرپیوند قوطی شکل، عرض سخت‌کننده بر ضخامت آن دارای برتری نمی‌باشد. در شکل ۱۰ به عنوان نمونه منحنی هیسترتیک دوران-برش برای مقطع  $S_4$  و  $p=3$  آورده شده است که نشان دهنده این نکته است که عرض سخت‌کننده بر ضخامت آن دارای برتری نمی‌باشد.

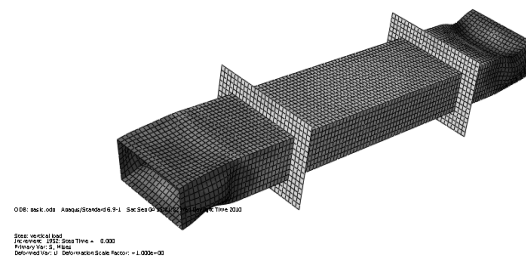
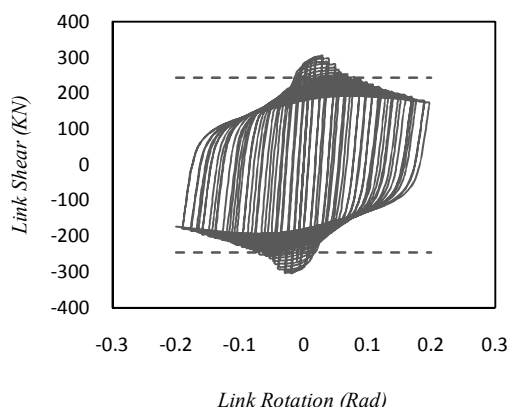
از جدول ۳ می‌توان نتیجه گرفت رابطه ارائه شده برای فواصل و ابعاد سخت‌کننده‌های تیرپیوند قوطی شکل که دارای سخت‌کننده جان از دو سمت می‌باشند، قابل اطمینان است و با کمک این روش می‌توان فواصل سخت‌کننده‌ها را در حدود ۳۰٪ افزایش و ابعاد آن‌ها را در حدود ۱۵٪ کاهش داد. به عنوان نمونه در شکل ۹ منحنی هیسترتیک دوران-برش برای مقطع  $S_9$  و  $p=1/6$  که دارای آرایش‌های مختلف سخت‌کننده است آورده شده است.

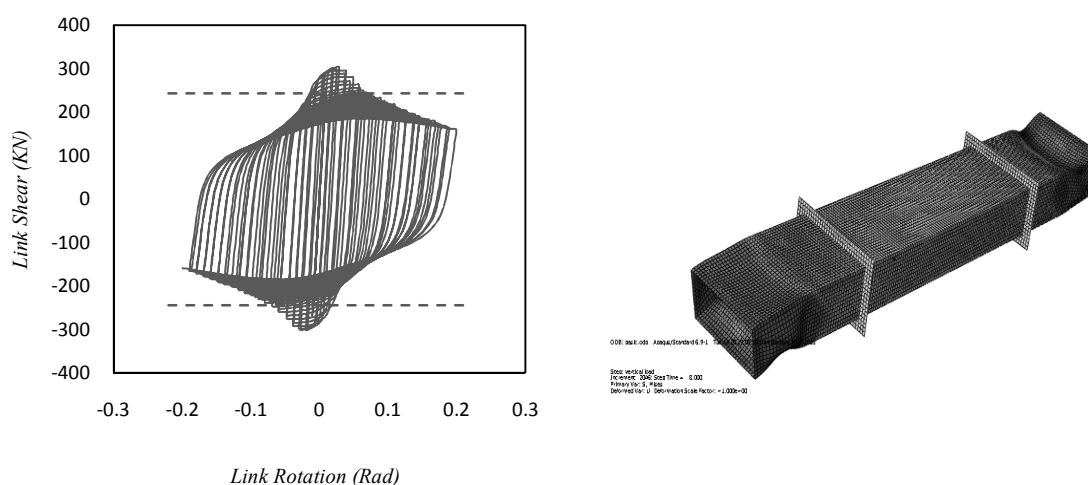
### ۷-۳- بررسی تأثیر ابعاد سخت‌کننده‌های تیرپیوند قوطی شکل بر روی ظرفیت زاویه دوران

در تیرهای پیوند قوطی شکل همواره این ابهام وجود دارد که آیا عرض سخت‌کننده‌ها تأثیر بیشتری بر روی زاویه دوران دارند یا ضخامت آن‌ها؟ در این قسمت برای بررسی تأثیر ابعاد سخت‌کننده‌ها روی ظرفیت زاویه دوران، از

جدول (۴) بررسی تأثیر ابعاد سخت‌کننده‌های تیرپیوند قوطی شکل.

		قوطی ( $A_{st1}$ )						قوطی ( $A_{st2}$ )					
		قوطی (الف)		قوطی (ب)		قوطی (ج)		قوطی (الف)		قوطی (ب)		قوطی (ج)	
		$a$ (mm)	(rad)	$a$ (mm)	(rad)	$a$ (mm)	(rad)	$a$ (mm)	(rad)	$a$ (mm)	(rad)	$a$ (mm)	(rad)
$S_4$	$1/2p$	۱۱۰	۰/۲	۱۱۰	۰/۲	۱۱۰	۰/۲	۱۱۰	۰/۲	۱۱۰	۰/۲	۱۱۰	۰/۲
	$1/6p$	۱۲۶	۰/۲	۱۲۶	۰/۱۱	۱۲۶	۰/۲	۱۲۶	۰/۲	۱۲۶	۰/۱۱	۱۲۶	۰/۲
	$2/1p$	۱۱۶	۰/۲	۱۱۶	۰/۰۸۹	۱۱۶	۰/۱۲	۱۱۶	۰/۲	۱۱۶	۰/۰۸۳	۱۱۶	۰/۱۲
	$3p$		۰/۰۶۶		۰/۰۶۶		۰/۰۶۶		۰/۰۶۵		۰/۰۶۵		۰/۰۶۵





شکل (۱۰) مدل المان محدود و منحنی هیستریک دوران - برش برای مقطع عرضی  $S_4$  و  $\rho=3$

## ۸- نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که شرایط مرزی ورق جان تیرپیوند نقش حائز اهمیتی در ظرفیت زاویه دوران تیرپیوند ایفا می‌کند، به نحوی که در صورت برقراری تشابه هندسی (مساحت و ممان اینرسی) بین تیرهای پیوند با مقاطع عرضی مختلف (I شکل و قوطی)، تیرپیوند I شکل به دلیل برقراری شرایط مرزی گیردار روی تمام وجوه ورق جان (از بالا و پایین توسط بال‌ها و در طرفین توسط سخت‌کننده‌ها به طور کامل مهار شده‌اند) از زاویه دوران به مراتب بیشتری نسبت به تیرپیوند قوطی که ورق جان آن در تمام وجوه دارای شرایط مرزی ساده است (از بالا و پایین توسط بال و در طرفین توسط سخت‌کننده به طور ساده مهار شده است)، برخوردار می‌باشد که این افزایش ظرفیت زاویه دوران، در حدود دو برابر می‌باشد. و این برتری با افزایش طول تیرپیوند چشمگیرتر می‌شود یعنی تیرهای پیوند I شکل بلند از ظرفیت زاویه دوران بیشتری نسبت به تیرهای پیوند قوطی شکل بلند برخوردار هستند. همچنین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که سخت‌کننده‌های متصل از دو سمت به جان تیرپیوند قوطی

شکل (مدل پیشنهادی) نسبت به سخت‌کننده‌های متصل از یک سمت (مدل برمن) دارای فواصل بیشتر در حدود ۳۰٪ و ابعاد کمتر در حدود ۱۵٪ هستند. همچنین از این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که رابطه‌های ارائه شده برای فواصل و ابعاد سخت‌کننده‌های متصل از دو سمت به جان تیرپیوند قوطی شکل دارای تطابق خوبی با رابطه‌های ارائه شده برای فواصل و ابعاد سخت‌کننده‌های متصل از یک سمت به جان تیرپیوند قوطی می‌باشند. همچنین نتایج تحقیق نشان می‌دهند در صورت ارضاء شدن مساحت و ممان اینرسی مورد نیاز سخت‌کننده‌ها، هیچ کدام از ابعاد سخت‌کننده بر دیگری برتری ندارد.

## ۹- منابع

- [1] Roeder CW., Popov EP.; "Eccentrically braced steel frames for earthquakes." Journal of the Structural Division, 1978; 104(3), p.p. 391-412.
- [2] Berman JW., Bruneau M.; "Experimental and analytical investigation of tubular links for eccentrically braced frames." Journal of Structural Engineering, 2007; p.p.1929-1938.

- [13] Ronald D. Ziemian.; “*Structural stability research council guide to stability design criteria for metal structures*” 6nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2010.
- [14] Salmon CG., Johnson JE.; “*Steel structures design and behavior, 4nd Edition*” New York: HarperCollins College Publishers, 1996.
- [15] AISC; “*Manual of steel construction.*” 8nd Edition, Chicago: American Institute of Steel Construction, 1980.
- [۱۶] مبحث دهم مقررات ملی ساختمان (طرح و اجرای ساختمان های فولادی) / دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان ۱۳۸۷/
- [17] Richards P., Uang CM.; “*Effect of flange width-thickness ratio on eccentrically braced frames Link cyclic rotation capacity.*” Journal of Structural Engineering-ASCE, 2005; 131(10), p.p. 1546– 52.
- [18] Rockey KC., Cook IT.; “*Shear buckling of clamped and simply supported infinitely long plates reinforced by transverse stiffeners.*” Aero. Quart. Vol. 13, 1962.
- [19] Galambos T. V.; “*Structural stability research council guide to stability design criteria for metal structures*” 5nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1998.
- [3] Dusicka P., Itani AM., Buckle IG.; “*Cyclic behavior of shear links and tower shaft assembly of San Francisco–Oakland Bay bridge tower.*” Technical report CCEER 02-06. Center for Civil Engineering Earthquake Research; 2002.
- [4] Itani AM.; “*Cyclic behavior of Richmond–San Rafael tower links.*” Technical report CCEER 97-4. Center for Civil Engineering Earthquake Research; 1997.
- [5] Berman JW., Bruneau M.; “*Supplemental system retrofit considerations for braced steel bridge piers.*” Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2005; 34(4–5):497–517.
- [6] Hjelmstad KD., Popov EP.; “*Cyclic behavior and design of link beams.*” Journal of Structural Engineering, 1983; 109(10), p.p. 2387–403.
- [7] Kasai K., Popov EP.; “*Cyclic web buckling control for shear link beams.*” Journal of Structural Engineering , 1986a; 112(3), p.p. 505–523.
- [8] Malley JO., Popov EP.; “*Shear links in eccentrically braced frames.*” Journal of Structural Engineering, 1984; 110(9), p.p. 2275–95.
- [9] Kasai K., Popov EP.; “*Study of seismically resistant eccentrically braced steel frame systems.*” Report no. UCB/EERC-86/1. Earthquake Engineering Research Center; 1986.
- [10] Berman JW., Bruneau M.; “*Approaches for the seismic retrofit of braced steel bridge piers and proof-of-concept testing of a laterally stable eccentrically braced frame.*” Technical report MCEER-05-0004 . Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 2005.
- [11] Berman JW., Bruneau M.; “*Further development of tubular eccentrically braced frame links for the seismic retrofit of braced steel truss bridge piers.*” Technical report MCEER-06-0006. Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 2006.
- [12] Engelhardt MD., Popov EP.; “*Experimental performance of long links in eccentrically braced frames.*” Journal of Structural Engineering, 1992; 118(11), p.p. 3067–88.