

# بررسی تأثیر پارامترهای هندسی سخت‌کننده‌ها در انواع تیر پیوند قاب‌های مهاربندی واگرا در افزایش جذب انرژی

مسعود مجرد (دانشجوی کارشناسی ارشد)

مریم داعی\* (استادیار)

مهرداد حجازی (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۸ (ص. ۲۵-۲۰، شماره ۱/۲، ص. ۸۱-۷۳)  
دروزی ۲ - ۳۵، شماره ۱/۲، ص. ۸۱-۷۳

تیر پیوند در قاب‌های مهاربندی واگرا، مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده‌ی رفتار لرزه‌یی سیستم مذکور است. استفاده از سخت‌کننده‌های میانی با به تأخیر انداختن کماتش جان می‌تواند شکل‌پذیری را در سیستم قاب‌های مهاربندی واگرا افزایش دهد و قابلیت جذب انرژی را بهبود بخشد. ضوابط موجود برای طراحی سخت‌کننده‌ها در آیین‌نامه، براساس تیرهای پیوند کوتاه تحت برش بوده و بدون در نظر گرفتن اثر خمش در تیرهای متوسط نیز اعمال شده است. در نوشتار حاضر، تأثیر جزئیات سخت‌کننده‌ها و هندسه‌ی مقطع تیر پیوند در قالب آنالیز حساسیت در انواع تیر پیوند بررسی شده است. برای این منظور، رفتار ۲۵ نمونه تیر پیوند با مقاطع و طول‌های مختلف تحت بارگذاری چرخه‌یی براساس ضوابط لرزه‌یی AISC، در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس شبیه‌سازی و پیشنهادهایی به منظور بهبود عملکرد و قابلیت جذب انرژی تیر پیوند ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در تیرهای متوسط با تغییر آرایش سخت‌کننده‌ها، عملکرد آن‌ها بهبود می‌یابد. همچنین تأثیر هندسه‌ی مقطع و نقش بال‌ها در عملکرد و ضوابط مربوط به طراحی سخت‌کننده‌های انواع تیر پیوند نشان داده شده است.

**واژگان کلیدی:** قاب مهاربندی واگرا، تیر پیوند، بارگذاری چرخه‌یی، شاخص خرابی مواد، انرژی تلف شده.

## ۱. مقدمه

ایده‌ی اصلی طراحی قاب مهاربندی واگرا، در اختیار داشتن مزایای هر دو سیستم مقاوم باربر جانبی یعنی قاب خمشی و قاب مهاربندی شده‌ی همگرا در یک سیستم سازه‌یی بوده است. سیستم مهاربندی واگرا در اوایل دهه‌ی ۷۰ با هدف دست یافتن به سیستمی با سختی زیاد و قابلیت جذب انرژی بالا در زلزله‌های شدید مطرح شد.<sup>[۱]</sup> ویژگی‌های مطلوب سیستم مذکور نظیر داشتن هم‌زمان سختی و شکل‌پذیری مناسب، امکان ایجاد بازشوهای بزرگ و اقتصادی بودن آن باعث شد تا استفاده از آن در عرصه‌ی ساخت و ساز روز به روز گسترش یابد.

استفاده از سخت‌کننده‌های میانی، یکی از پارامترهای مهم برای حفظ پایداری و رفتار انعطاف‌پذیر قاب مهاربندی واگراست. سخت‌کننده‌های میانی می‌توانند آثار مخرب کماتش جان را کنترل کنند و همچنین مقاومت، قابلیت جذب انرژی و به طور کلی رفتار تیر پیوند را به طور قابل ملاحظه‌یی بهبود بخشد. محافظه‌کارانه بودن

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۱/۲۶، اصلاحیه ۱۳۹۶/۵/۴، پذیرش ۱۳۹۶/۵/۱۷

DOI:10.24200/J30.2018.2060.2080

روابط آیین‌نامه‌ی مربوط به فواصل سخت‌کننده‌ها در تیرهای پیوند کوتاه در بیشتر مطالعات پیشین مشاهده و پیشنهاد شده است که فواصل سخت‌کننده‌ها در تیر کوتاه بررسی بیشتری شود.<sup>[۲]</sup>

در سال ۲۰۰۵<sup>[۱]</sup> در مطالعه‌ی عددی تیرهای پیوند مشاهده شد که تعدادی از تیرهای پیوند متوسط قبل از رسیدن به ظرفیت دورانی مورد نیاز آیین‌نامه، گسیخته می‌شوند و علت آن، ضوابط مربوط به فواصل قرارگیری سخت‌کننده‌ها تشخیص داده شد. همچنین در سال ۱۹۸۶<sup>[۵]</sup> فواصل قرارگیری سخت‌کننده‌ها برای تیرهای پیوند کوتاه که تحت تأثیر برش قابل توجهی هستند، پیشنهاد شد. اما رابطه‌ی ذکر شده برای تیر پیوند متوسط که تحت تأثیر هم‌زمان برش و خمش قابل توجهی هستند، نیز استفاده شده است و این نتیجه به دست آمد که ضوابط مرتبط برای تیرهای پیوند متوسط که در آن‌ها اثر خمش در نظر گرفته نشده است، محافظه‌کارانه نیست و باعث گسیختگی می‌شود. محافظه‌کارانه نبودن ضوابط مربوط به سخت‌کننده‌های تیر پیوند متوسط، در مطالعات دیگری نیز نتیجه گرفته شد. برخی پژوهشگران<sup>[۶]</sup> نیز رفتار ۶۸ نمونه تیر پیوند متوسط و بلند را مطالعه و مشاهده کردند که اندرکنش خمش و برش

یکدیگر تفسیر کرد. بر این اساس برای نرخ رشد حفره‌ها، رابطه‌ی ۵ ارائه شده است:

$$\ln \left( \frac{R}{R_0} \right)_{cyclic} = C \int_{tensile} \exp(|\nu_r \Delta T|) d\varepsilon_t - C \int_{compression} \exp(|\nu_r \Delta T|) d\varepsilon_c \quad (5)$$

که در آن،  $R$  قطر لحظه‌ی حفره‌ها، انتگرال اول بیانگر افزایش حفره‌ها و انتگرال دوم، بیانگر کاهش حفره‌هاست. از رابطه‌ی ۵، مقدار بحرانی کرنش  $\varepsilon^*$  به صورت رابطه‌ی ۶ به دست می‌آید: [۱۰]

$$\varepsilon_{critical}^* = \exp(-\lambda \cdot \varepsilon_p) \cdot \varepsilon_p^{critical} \quad (6)$$

که در آن،  $\lambda$  ثابت مصالح است. بنابراین شاخص خرابی چرخه‌ی به صورت رابطه‌ی ۷ تعریف می‌شود و به این معناست هنگامی که  $FI^*$  برابر با ۱/۷ شد، اندازه‌ی حفره‌ها برابر با مقدار بحرانی می‌شود و گسیختگی در مواد اتفاق می‌افتد.

$$FI^* = \frac{\varepsilon^*}{\varepsilon_{critical}^*} \quad (7)$$

### ۳. مدل‌سازی اجزاء محدود و صحت‌سنجی

برای بررسی رفتار تیر پیوند و کاهش مقاومت آن در اثر کمناش‌های بال و جان، از مدل اجزاء محدود در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. نتایج حاصل از مدل عددی ساخته‌شده با نتایج مدل آزمایشگاهی آرک، [۱۱] در شکل ۱ مقایسه شده است. در شبیه‌سازی تیر پیوند با توجه به کوچک بودن ضخامت از المان پوسته‌ی S4R استفاده شده است. گره‌ها در المان‌های پوسته‌ی، سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی دورانی دارند، بنابراین برای تحلیل تغییرشکل‌های بزرگ مناسب هستند.

برای بهبود زمان محاسباتی از روش انتگرال‌گیری کاهش یافته استفاده شده است. فولاد استفاده‌شده در آزمایش از نوع ASTM A992 است و برای معیار جاری شدن از سطح تسلیم فون میسز استفاده شده و سخت‌شوندگی به صورت سخت‌شوندگی کینماتیک غیرخطی مطابق با رابطه‌ی ۸ تعریف شده است:

$$\alpha = \frac{C}{\gamma} (1 - e^{-\gamma \varepsilon^{pl}}) + \alpha_1 e^{-\gamma \varepsilon^{pl}} \quad (8)$$

برای مشخصات خمیری از مقادیر  $\alpha = 63/5$ ،  $\gamma = 406/18$  و  $\varepsilon^{pl} = 37/175$  استفاده شده است. [۱۲] همچنین برای مدل‌سازی از تیر پیوند جدا استفاده شده و شرایط تکیه‌گاهی مطابق با شکل ۲ بوده است.

به منظور ایجاد شرایط تکیه‌گاهی صحیح، تمام گره‌های انتهایی در هر انتها باید نسبت به هم انتقال و دوران‌های یکسان داشته باشند. همچنین اثر تغییرشکل‌های بزرگ در رفتار غیرخطی مواد با دستور NLgeom در نظر گرفته شده است. برای ارزیابی کمناش و کاهش مقاومت تیر پیوند همانند مدل آزمایشگاهی از پروتکل بارگذاری موجود در آیین‌نامه‌ی AISC 2002، [۱۳] برای قاب‌های مهاربندی‌شده‌ی واگرا مطابق شکل ۳ استفاده شده است.

دوران غیرکشسان ( $\gamma_p$ ) تیر پیوند با کم کردن مقدار کشسان از زاویه‌ی دوران کل مطابق رابطه‌ی ۹ به دست می‌آید که در آن  $V$  نیروی برشی و  $k_e$  سختی کشسان تیر پیوند هستند:

$$\gamma_p = \gamma - \frac{V}{k_e} \quad (rad) \quad (9)$$

در تیرهای پیوند متوسط، که در بازه‌ی طول نسبی ۱/۸ تا ۲/۲ قرار دارند، به وضوح بیشتر از سایر تیرهای پیوند متوسط است. حاکم بودن هم‌زمان برش و خمش باعث شکست تیر پیوند متوسط قبل از رسیدن به ظرفیت دورانی خود می‌شود. به‌منظور بهبود عملکرد تیرهای پیوند متوسط پیشنهاد شد که تعداد سخت‌کننده‌ها افزایش یابد یا اینکه از سخت‌کننده در دو طرف جان استفاده شود. در ضمن عملکرد بسیار مطلوب تیرهای پیوند بلند نیز مشاهده شد.

در مطالعه‌ی اجزاء محدود یک نمونه تیر پیوند متوسط و با استفاده از الگوریتم بهینه‌یابی (۱۲، ۲۰) [۷] نشان داده شد که با تغییر فواصل سخت‌کننده‌ها و افزایش ضخامت آن‌ها می‌توان انرژی جذب‌شده در تیر پیوند را افزایش داد. در مطالعه‌ی حاضر، با انجام آنالیز حساسیت بر روی ۲۵ نمونه تیر پیوند، مهم‌ترین پارامترهای مربوط به سخت‌کننده‌های میانی که در رفتار تیر پیوند مؤثر هستند، شناسایی شدند و براساس نتایج حاصل از آنالیزهای انجام‌شده، پیشنهادهایی برای تغییر آرایش سخت‌کننده‌ها به منظور بهبود عملکرد لرزه‌ی تیر پیوند ارائه شده است. در تحلیل عددی رفتار تیر پیوند تحت بارگذاری چرخه‌ی، از شاخص خستگی مواد استفاده و مدل‌های اجزاء محدود در آباکوس، [۸] شبیه‌سازی شدند.

### ۲. شاخص خستگی مواد در بارگذاری چرخه‌ی

خستگی به‌صورت انتشار ترک و شکست به‌واسطه‌ی اعمال تنش‌های چرخه‌ی تعریف می‌شود. بارگذاری چرخه‌ی، آثار منفی زیادی در مقاومت و شکل‌پذیری سازه‌ها دارد. در مطالعات اخیر، از اساس معیار تنش و کرنش اصلاح‌شده برای تعیین خستگی کم تکرار در اجزاء فولادی استفاده شده است. براساس معیار مذکور در بارگذاری یکنواخت، شاخص خرابی به‌صورت تقسیم کرنش خمیری معادل بر مقدار بحرانی آن تعریف می‌شود (رابطه‌ی ۱):

$$Failure Index = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_{critical}^*} \quad (1)$$

کرنش خمیری معادل براساس مولفه‌های کرنش خمیری ( $\varepsilon_{ij}^p$ ) و مقدار بحرانی آن به صورت رابطه‌های ۲ و ۳ تعریف می‌شوند: [۹]

$$\varepsilon_p = \int_0^t \sqrt{\frac{2}{3} \varepsilon_{ij}^p \varepsilon_{ij}^p} dt \quad (2)$$

$$\varepsilon_p^{critical} = \alpha \exp \left( \nu_r \Delta \frac{\sigma_m}{\sigma_e} \right) \quad (3)$$

که در آن،  $\sigma_m$  تنش هیدرواستاتیک یا تنش متوسط و  $\sigma_e$  تنش مؤثر است. نسبت  $\sigma_e$  به  $\sigma_m$  پارامتر سه‌محوره بودن تنش نامیده می‌شود ( $T = \sigma_m / \sigma_e$ ).

در سال‌های اخیر، روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی خستگی مواد تحت بارگذاری چرخه‌ی پیشنهاد شده است. در پژوهش حاضر، برای پیش‌بینی خستگی چرخه‌ی مواد از مدل کرنش خمیری کاهش‌یافته (DSPS) استفاده شده است. [۱۴] در بارگذاری چرخه‌ی، هنگامی که  $T$  مثبت باشد، کرنش خمیری معادل را با  $\varepsilon_t$  و هنگامی که  $T$  منفی باشد، با  $\varepsilon_c$  نشان داده می‌شود. معادله‌ی ۴، اختلاف این دو مقدار را مشخص می‌کند، که بیانگر میزان رشد حفره‌ها در بارگذاری چرخه‌ی است.

$$\varepsilon^* = \varepsilon_t - \varepsilon_c \quad (4)$$

وقوع خرابی در فازات را می‌توان به‌صورت رشد حفره‌ها و به هم پیوستن آن‌ها به

مطابق روش پیشنهادی ریچاردز<sup>[۱۰]</sup> برای به دست آوردن ظرفیت دوران غیرکشسان از منحنی پوش نمودار هستیزیس براساس نیروی برشی و دوران غیرکشسان استفاده می شود. منحنی پوش از به هم وصل کردن بیشینه ی برش، در اولین سیکل برای هر سطح دوران به دست می آید. ظرفیت دوران غیرکشسان نقطه یی است که منحنی پوش به اندازه ی ۸۰٪ برش بیشینه افت کند. به منظور اطمینان از صحت سنجی روند مدل سازی، نتایج حاصل از تحلیل با نتایج مدل آزمایشگاهی آرک مقایسه شده است. طبق شکل ۱، تطابق خوبی بین پاسخ هستیزیس و هندسه ی شکل تغییر یافته ی مدل اجزاء محدود با مدل آزمایشگاهی برقرار بوده است.

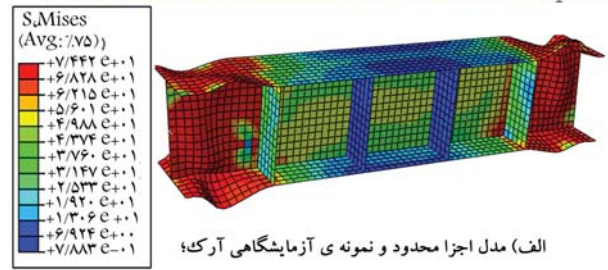
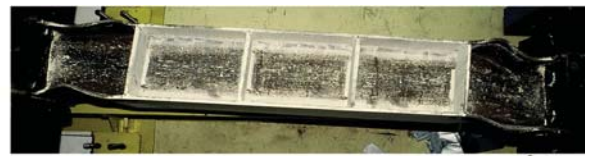
#### ۴. آنالیز حساسیت

در بخش حاضر، به منظور بررسی حساسیت رفتار لرزه یی تیر پیوند به مشخصات هندسی سخت کننده های به کاررفته در آن، ۲۵ مدل در ۵ گروه مختلف مطابق با جدول ۱ ساخته و تأثیر تعداد، موقعیت و ضخامت سخت کننده ها که می تواند در طراحی تیر پیوند نقش داشته باشند، بررسی شدند. در واقع هدف آن است که تأثیر پارامترهای مختلف ذکرشده، به طور جداگانه برای انواع تیرهای کوتاه، متوسط و بلند بررسی شود. پروتکل بارگذاری استفاده شده و همچنین سایر شرایط مدل سازی مطابق با توضیحات بخش صحت سنجی است. برای مدل سازی از نمونه های آزمایشگاهی آرک<sup>[۱۱]</sup> مطابق با جدول ۱ در ۵ گروه استفاده شده است. مدل های گروه ۱، تأثیر تعداد سخت کننده در تیر پیوند کوتاه و مدل های گروه ۲، تأثیر تعداد سخت کننده ها در تیر پیوند متوسط را بررسی می کنند. مدل های گروه ۳، تأثیر ضخامت سخت کننده ها در تیر پیوند کوتاه، متوسط، و بلند را بررسی می کند. مدل های ۲۲ و ۲۳ در گروه ۴، تأثیر فواصل قرارگیری سخت کننده ها را در تیر پیوند متوسط و مدل های ۲۴ و ۲۵ در گروه ۵ نیز یک نمونه تیر پیوند بلند با و بدون استفاده از سخت کننده ی میانی را بررسی می کنند.

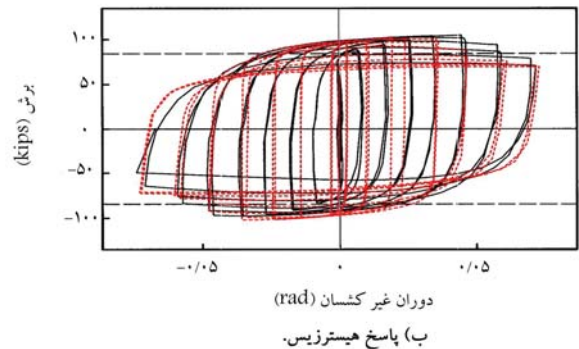
ظرفیت دوران غیرکشسان ( $\gamma_p$ ) و بیشترین برش قابل تحمل توسط تیر پیوند ( $V_{max}$ ) از پارامترهای کلیدی در طراحی قاب های مهاربندی واگرا هستند. براساس نتایج آزمایش ها<sup>[۳]</sup>، تیرهای پیوند کوتاه معمولاً در دوران غیرکشسان ۰٫۱۲ رادیان، در اثر خستگی مواد ناشی از بارگذاری چرخه یی گسیخته می شوند. از این رو در تحلیل اجزاء محدود پژوهش حاضر نیز بالاترین حد برای دوران تیرهای پیوند مقدار ۰٫۱۲ رادیان در نظر گرفته شده است. نتایج عددی حاصل از تحلیل در انتهای بخش حاضر در جدول ۲ ارائه شده است؛ اما در ادامه، ابتدا در مورد تأثیر هر یک از این پارامترها در عملکرد تیر پیوند بحث شده است.

#### ۱.۴. تأثیر تعداد سخت کننده ها

الف) تیر کوتاه: طبق ضوابط آیین نامه در تیرهای پیوند کوتاه، فواصل قرار گرفتن سخت کننده ها نباید از  $(d/5 - 3t_w)$  بیشتر اختیار شود که در آن  $t_w$  ضخامت جان و  $d$  عمق مقطع است. در مدل ۱، تعداد سخت کننده ها مطابق با ضوابط آیین نامه است و دوران ۰٫۱۲ رادیان را تجربه می کند. این در حالی است که مقدار آیین نامه برای تیرهای پیوند برشی برابر ۰٫۰۸ رادیان است. در مدل ۲، با یک سخت کننده ی کمتر (افزایش فواصل سخت کننده ها)، باز هم تیر پیوند دوران غیرکشسان ۰٫۱۲ رادیان را تجربه می کند که عملکرد خوب تیرهای پیوند کوتاه با یک سخت کننده ی کمتر را نشان می دهد. بیشینه ی برش قابل تحمل توسط تیر با کاهش یکی از سخت کننده ها کاهش می یابد، اما این کاهش ناچیز است. این

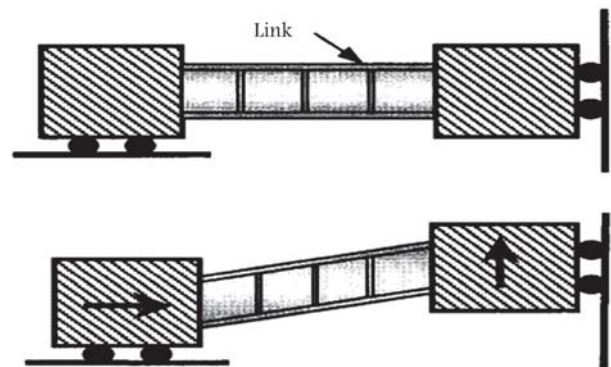


الف) مدل اجزاء محدود و نمونه ی آزمایشگاهی آرک؛

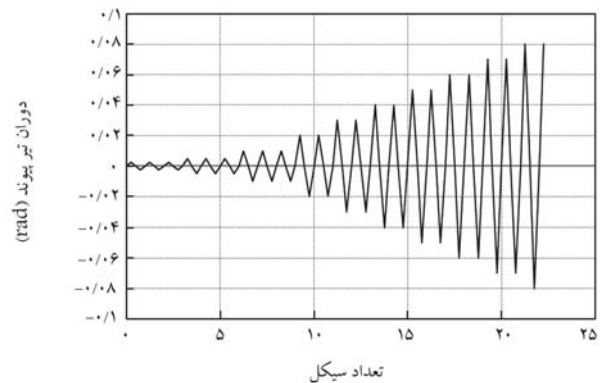


ب) پاسخ هستیزیس.

شکل ۱. صحت سنجی هندسه ی تغییر یافته و پاسخ هستیزیس<sup>[۱۱]</sup>.



شکل ۲. شرایط مرزی برای تیر پیوند جدا<sup>[۱۲]</sup>.



شکل ۳. پروتکل بارگذاری AISC 2002<sup>[۱۳]</sup>.

جدول ۱. مشخصات مدل‌ها در آنالیز حساسیت.

گروه	شماره	نام نمونه در آزمایش	مقطع	طول (e) (mm)	طول نسبی (ρ) $e/(M_p/V_p)$	تعداد	فاصله (mm)	سخت‌کننده	ضخامت (mm)	
۱	۱	UTA۴c	W۱۰ × ۳۳	۵۸۴	۱٫۰۵	۲	۴@۱۴۶		۱۰	
	۱	UTA ۴c	W۱۰ × ۳۳	۵۸۴	۱٫۰۵	۳	۳@۱۹۵		۱۰	
۲	۳	UTA۹	W۱۶ × ۳۶	۱۲۱۹	۱٫۸۲	۳	۴@۳۰۵		۱۰	
	۴	UTA۹	W۱۶ × ۳۶	۱۲۱۹	۱٫۸۲	۴	۵@۲۴۴		۱۰	
	۵	UTA۹	W۱۶ × ۳۶	۱۲۱۹	۱٫۸۲	۵	۶@۲۰۳		۱۰	
	۶	UTA۹	W۱۶ × ۳۶	۱۲۱۹	۱٫۸۲	۶	۷@۱۷۴		۱۰	
	۷	UTA۹	W۱۶ × ۳۶	۱۲۱۹	۱٫۸۲	۷	۸@۱۵۲		۱۰	
	۸	UTA ۶b	W۱۰ × ۳۳	۱۲۱۹	۲٫۱۶	۲	۳@۴۰۶		۱۰	
	۹	UTA ۶b	W۱۰ × ۳۳	۱۲۱۹	۲٫۱۶	۳	۴@۳۰۵		۱۰	
	۱۰	UTA ۶b	W۱۰ × ۳۳	۱۲۱۹	۲٫۱۶	۴	۵@۲۴۴		۱۰	
	۱۱	UTA ۶b	W۱۰ × ۳۳	۱۲۱۹	۲٫۱۶	۵	۶@۲۰۳		۱۰	
	۱۲	UTA ۶b	W۱۰ × ۳۳	۱۲۱۹	۲٫۱۶	۶	۷@۱۷۴		۱۰	
	۳	۱۳	UTA ۴c	W۱۰ × ۳۳	۵۸۴	۱٫۰۵	۳	۴@۱۴۶		۵
		۱۴	UTA ۴c	W۱۰ × ۳۳	۵۸۴	۱٫۰۵	۳	۴@۱۴۶		۱۵
۱۵		UTA ۴c	W۱۰ × ۳۳	۵۸۴	۱٫۰۵	۳	۴@۱۴۶		۲۰	
۱۶		UTA۹	W۱۶ × ۳۶	۱۲۱۹	۱٫۸۲	۵	۶@۲۰۳		۵	
۱۷		UTA۹	W۱۶ × ۳۶	۱۲۱۹	۱٫۸۲	۵	۶@۲۰۳		۱۵	
۱۸		UTA۹	W۱۶ × ۳۶	۱۲۱۹	۱٫۸۲	۵	۶@۲۰۳		۱۵	
۱۹		UTA۷	W۱۰ × ۳۳	۱۸۵۴	۳٫۳۳	۲	۲@۳۰۵ (در دو انتها)		۵	
۲۰		UTA۷	W۱۰ × ۳۳	۱۸۵۴	۳٫۳۳	۲	۲@۳۰۵ (در دو انتها)		۱۵	
۲۱		UTA۷	W۱۰ × ۳۳	۱۸۵۴	۳٫۳۳	۲	۲@۳۰۵ (در دو انتها)		۲۰	
۴		۲۲	UTA ۶b	W۱۰ × ۳۳	۱۲۱۹	۲٫۱۶	۴	۱۴۰، ۱۹۰، ۵۴۰، ۱۹۰، ۱۴۰		۱۰
	۲۳	UTA۹	W۱۶ × ۳۶	۱۲۱۹	۱٫۸۲	۵	۱۵۲، ۱۷۸، ۲۸۰، ۲۸۰، ۱۷۸، ۱۵۲		۱۰	
	۲۴	UTA۷	W۱۰ × ۳۳	۱۸۵۴	۳٫۳۳	۲	۲@۳۰۵ (در دو انتها)		۱۰	
	۲۵	UTA۷	W۱۰ × ۳۳	۱۸۵۴	۳٫۳۳	۲	-		۱۰	

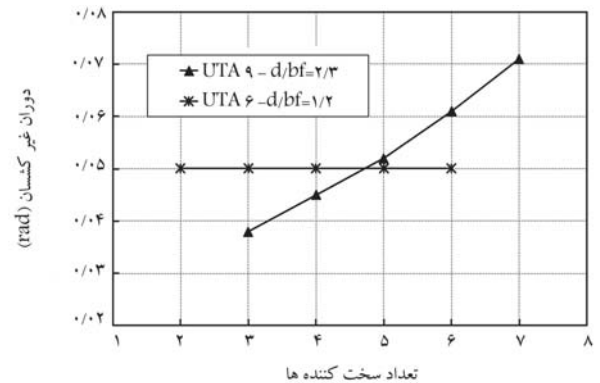
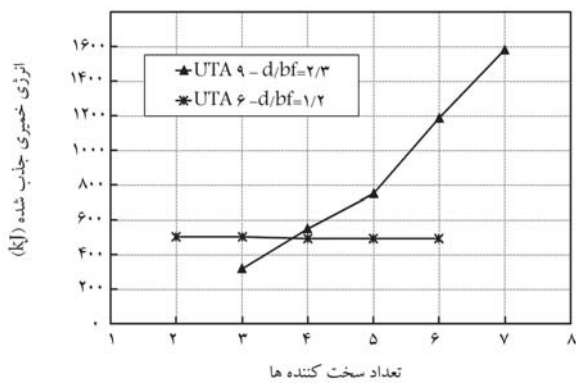
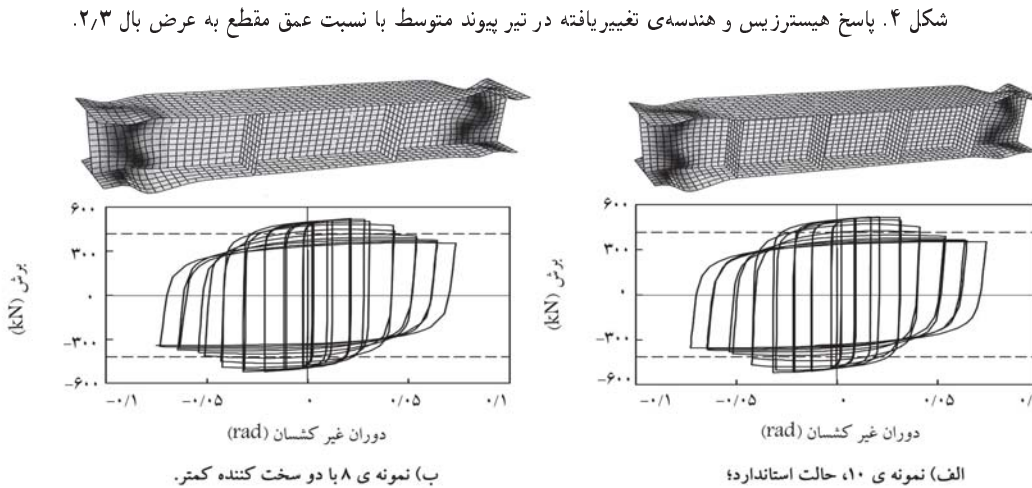
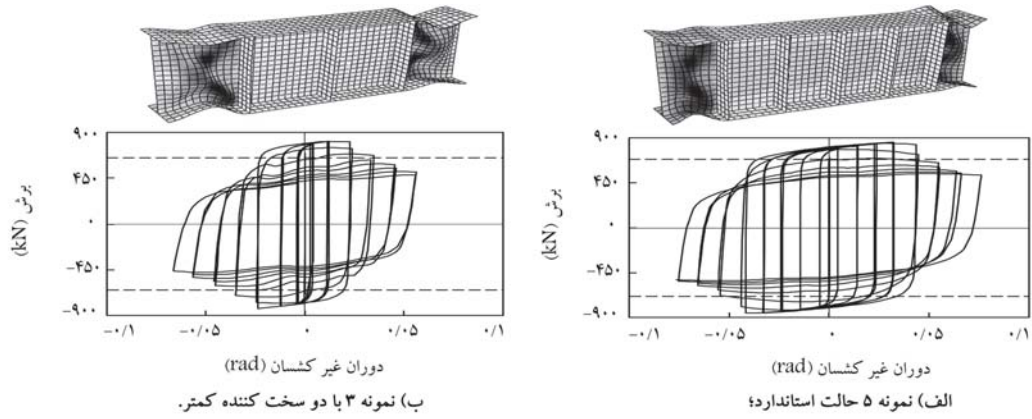
مدل‌های ۸ الی ۱۲ با مقطع  $W10 \times 33$  و نسبت عمق به عرض بال ۱٫۲ هستند ( $d/b_f = 1.2$ ). در نمونه‌ی ۱۰، تعداد سخت‌کننده‌ها مطابق با ضوابط آیین‌نامه است. برخلاف مقطع  $W16 \times 36$ ، در نمونه‌های ۸ و ۹ با کم شدن تعداد سخت‌کننده‌ها و در نمونه‌های ۱۱ و ۱۲، با افزایش تعداد سخت‌کننده‌ها، تغییری در ظرفیت دوران آن ایجاد نمی‌شود.

شکل ۵، پاسخ هیستریزیس و هندسه‌ی تغییر یافته‌ی نمونه‌ی ۱۰ (نمونه استاندارد) و نمونه‌ی ۸ (با دو سخت‌کننده‌ی کمتر) را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، کاهش سخت‌کننده‌ها تأثیری در تشدید کمانش و افت مقاومت در پاسخ هیستریزیس آن ندارد. در شکل‌های ۶ و ۷، تأثیر هندسه‌ی مقطع تیر پیوند متوسط در دوران غیرکشسان و میزان انرژی جذب شده در تیرهای پیوند متوسط با تعداد سخت‌کننده‌ی متفاوت نشان داده شده است.

همان‌طور که اشاره شد، ضوابط مربوط به فواصل سخت‌کننده‌های تیر پیوند

مورد نشان می‌دهد که رابطه‌ی ذکرشده برای فواصل سخت‌کننده‌ها محافظه‌کارانه است.

ب) تیر متوسط: مدل‌های ۳ تا ۷ با مقطع  $W16 \times 36$  و نسبت عمق مقطع به عرض بال  $2.3$  هستند ( $d/b_f = 2.3$ ). در نمونه‌ی ۵، تعداد سخت‌کننده‌ها مطابق با ضوابط آیین‌نامه است. در نمونه‌های ۳ و ۴، با کم شدن تعداد سخت‌کننده‌ها، ظرفیت دورانی کاهش و در نمونه‌های ۶ و ۷، با افزایش تعداد سخت‌کننده‌ها ظرفیت دورانی افزایش می‌یابد. شکل ۴، پاسخ هیستریزیس و هندسه‌ی تغییر یافته‌ی نمونه‌ی ۵ (حالت استاندارد) با دوران غیرکشسان  $52^\circ$  رادیان و نمونه‌ی ۳ (با دو سخت‌کننده‌ی کمتر) با دوران  $38^\circ$  رادیان را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۴، در نمونه‌ی ۳ با کاهش تعداد سخت‌کننده‌ها کمانش بال و جان در دو انتهای تیر پیوند شدیدتر می‌شود که افت مقاومت در پاسخ هیستریزیس را به دنبال دارد.



شکل ۷. تأثیر تعداد سخت کننده‌ها در انرژی جذب شده در تیر پیوند متوسط با نسبت عمق به عرض بال متفاوت.

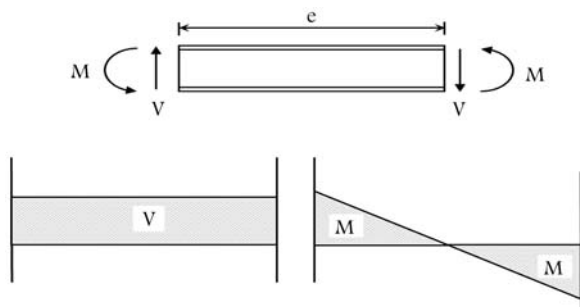
شکل ۸. تأثیر تعداد سخت کننده‌ها بر دوران غیر کشسان در تیر پیوند متوسط با نسبت عمق به عرض بال متفاوت.

تعیین کننده است. با افزایش طول، نوع ناپایداری ایجاد شده در تیر پیوند نیز تغییر می‌کند و کمانش بال و کمانش پیششی - جانبی در دو انتهای آن اتفاق می‌افتد. سخت کننده‌های میانی تیر پیوند بلند، کاهش مقاومت ناشی از کمانش را محدود می‌کنند، و باعث جلوگیری از کمانش پیششی جانبی تیر پیوند می‌شوند و عملکرد تیر پیوند بلند را بهبود می‌بخشند. نمونه‌های ۲۴ و ۲۵ با مقطع  $W 10 \times 33$  هستند که عرض بال آن‌ها تقریباً برابر عمق مقطع است. در نمونه‌ی ۲۴، مطابق با آیین‌نامه

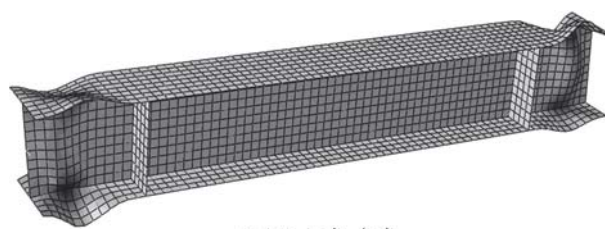
بر اساس ضخامت جان ( $t_w$ ) و عمق مقطع ( $d$ ) است. نتایج این قسمت نشان می‌دهد که در تیرهای پیوند متوسط که خمش قابل توجهی را تحمل می‌کنند، هندسه‌ی مقطع نیز ( $b_f$ ) می‌تواند در فواصل سخت کننده‌ها (تعداد آن‌ها) مؤثر باشد. بنابراین ضوابط آیین‌نامه برای مقاطع با بال عریض ( $b_f \cong d$ ) ممکن است محافظه‌کارانه باشد و نیازمند مطالعه‌ی بیشتری است.

(ج) تیر پیوند بلند: در تیرهای پیوند بلند، برش ناچیز و لنگر خمشی در دو انتهای تیر

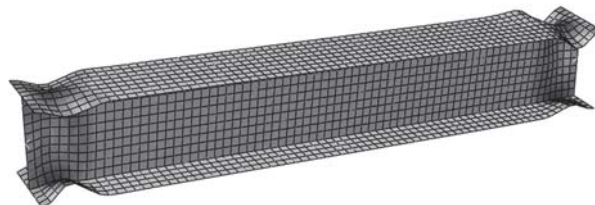




شکل ۱۰. توزیع تنش ها در تیر پیوند متوسط.

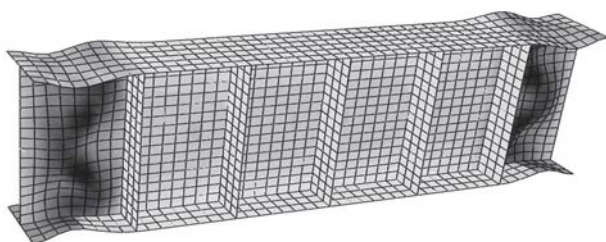


(الف) حالت استاندارد؛

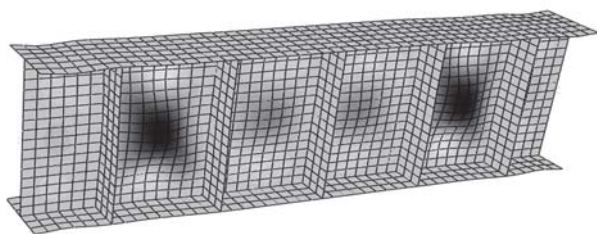


(ب) بدون سخت کننده ی میانی.

شکل ۸. عدم کمانش پیچشی جانبی در تیرهای پیوند بلند با نسبت عمق مقطع به عرض بال تقریباً برابر با  $1/7$ .

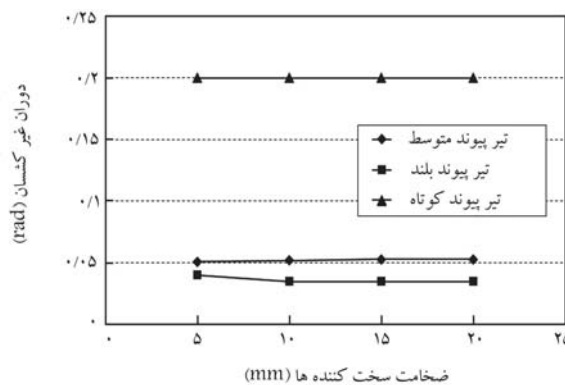


(الف) نمونه ۵ با فواصل استاندارد سخت کننده ها؛



(ب) نمونه ۲۳ با فواصل جدید سخت کننده ها.

شکل ۱۱. هندسه ی تغییر یافته و محل کمانش در تیر پیوند متوسط.



شکل ۹. تاثیر ضخامت سخت کننده در تیر پیوند کوتاه، متوسط و بلند.

توزیع تنش ها در دو انتهای تیر پیوند بسیار بزرگتر از میانه های تیر است. مطابق شکل ۱۱ الف، در تیرهای پیوند متوسط، کمانش شدید بال و جان در پانل های انتهایی تیر رخ می دهد، در صورتی که پانل های میانی تنش چندانی را تجربه نمی کنند. به بیان دیگر، در تیرهای پیوند متوسط، پانل های میانی مشارکت چندانی در جذب انرژی و ظرفیت دورانی ندارند و تیر پیوند فقط به دلیل کمانش های شدید در پانل های کناری گسیخته می شود.

با توجه به اینکه در دو انتهای تیر پیوند، توزیع تنش بیشتر از میانه هاست، اگر سخت کننده های میانی به دو انتهای تیر پیوند نزدیک تر شوند، انتظار می رود از کمانش های بال و جان در دو انتهای تیر پیوند کاسته شود و رفتار و عملکرد تیر پیوند بهبود یابد. منظور از موقعیت سخت کننده ها در تیر پیوند متوسط آن است که تعداد سخت کننده ها مطابق با ضوابط آیین نامه است، اما فواصل قرار گرفتن آن ها متفاوت با آیین نامه و براساس توزیع برش و خمش است. روابط مربوط به فواصل سخت کننده ها براساس بسط تئوری کمانش کشسان ورق برای حالت خمیری و برای تیرهای پیوندی، که ابتدا در برش تسلیم می شوند، توسط پوپوف و کاسای (۱۹۸۶)، [۵] در نظر گرفته شده بود. در حالی که رابطه ی مذکور در آیین نامه برای تیرهای متوسط بدون اصلاح و در نظر گرفتن لنگر خمشی اعمال شده است.

نمونه های ۲۲ و ۲۳ به ترتیب متناظر با نمونه ی استاندارد  $1/7$  و  $5/7$  هستند، که در آن ها سخت کننده ها به دو انتهای تیر پیوند نزدیک شده اند. در نمونه ی استاندارد ۵، دوران غیرکشسان برابر  $5/7$  رادیان است، که دوران مورد نیاز آیین نامه را نیز برآورده نمی کند. این تیر در آزمایش های پیشین، [۴] و [۱۱] نیز مطالعه شد و قبل از رسیدن

از سخت کننده های میانی استفاده شده است، که دوران غیرکشسان  $3/8$  رادیان را تجربه می کند، اما مطابق شکل ۸، در نمونه ی ۲۵ که از سخت کننده ی میانی استفاده نشده است، نه فقط کمانش پیچشی جانبی و تشدید کمانش مشاهده نمی شود، بلکه طبق جدول ۲، دوران غیرکشسان آن به  $6/7$  رادیان نیز افزایش پیدا می کند. بنابراین همانند تیرهای متوسط در تیرهای پیوند بلند نیز هندسه ی مقطع تیر می تواند تأثیرگذار باشد.

#### ۲.۴. تاثیر ضخامت سخت کننده ها

مدل های ۱۳ الی ۲۱، شامل تیرهای پیوند کوتاه، متوسط و بلندی هستند که در آن ها ضخامت سخت کننده ها متفاوت با آیین نامه در نظر گرفته شده است. مطابق شکل ۹، همان طور که ملاحظه می شود، افزایش ضخامت سخت کننده ها، تأثیری در بهبود عملکرد تیرهای پیوند (کوتاه، متوسط و بلند) ندارد.

#### ۳.۴. تاثیر موقعیت قرارگیری سخت کننده ها

در تیرهای پیوند کوتاه، برش قابل توجه و سهم لنگر خمشی در برابر برش بسیار ناچیز است. اما در تیرهای پیوند متوسط، نیروی برشی و لنگر خمشی هم زمان حاکم هستند و با توجه به بیشینه بودن خمش در دو انتهای تیر پیوند (مطابق شکل ۱۰)،

جدول ۲. نتایج حاصل از تحلیل.

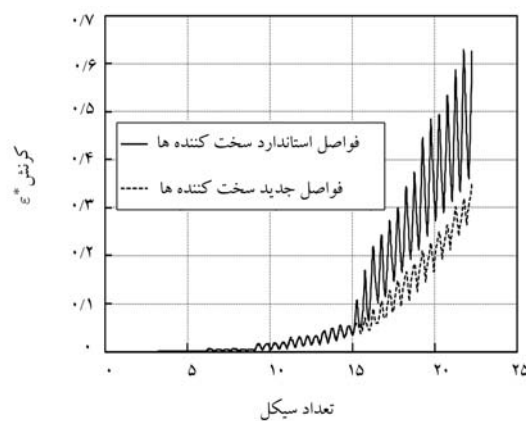
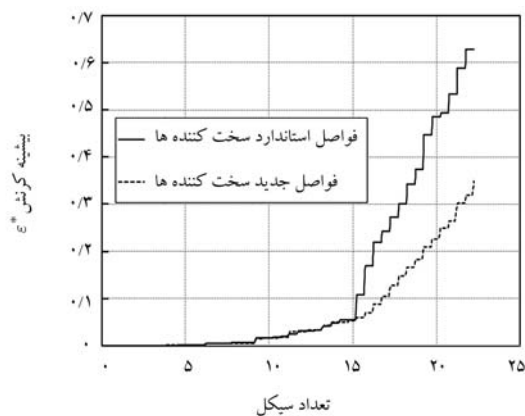
دوران مورد نیاز AISC براساس	نتایج			شماره مدل
	انرژی جذب شده $E_p(kJ)$	دوران غیرکشسان $\gamma_p(rad)$	برش بیشینه $V_{max}(kN)$	
۰٫۰۸	۲۴۶۲	۰٫۱۲	۶۰۵	۱
۰٫۰۸	۲۱۵۱	۰٫۱۲	۵۹۸	۲
۰٫۰۶۷	۳۱۹	۰٫۰۳۸	۸۱۰	۳
۰٫۰۶۷	۵۵۰	۰٫۰۴۵	۸۳۲	۴
۰٫۰۶۷	۷۵۰	۰٫۰۵۲	۸۵۲	۵
۰٫۰۶۷	۱۱۸۵	۰٫۰۶۱	۸۵۸	۶
۰٫۰۶۷	۱۵۷۰	۰٫۰۷۱	۸۷۴	۷
۰٫۰۵۰	۵۰۲	۰٫۰۵۰	۵۲۲	۸
۰٫۰۵۰	۵۰۲	۰٫۰۵۰	۵۲۲	۹
۰٫۰۵۰	۴۹۵	۰٫۰۵۰	۵۲۲	۱۰
۰٫۰۵۰	۴۹۵	۰٫۰۵۰	۵۲۲	۱۱
۰٫۰۵۰	۴۹۵	۰٫۰۵۰	۵۲۲	۱۲
۰٫۰۸	۲۴۸۰	۰٫۱۲	۶۰۵	۱۳
۰٫۰۸	۲۴۹۰	۰٫۱۲	۶۰۵	۱۴
۰٫۰۸	۲۵۳۰	۰٫۱۲	۶۰۵	۱۵
۰٫۰۶۷	۸۱۴	۰٫۰۵۲	۸۵۲	۱۶
۰٫۰۶۷	۷۲۹	۰٫۰۵۲	۸۵۲	۱۷
۰٫۰۶۷	۷۲۱	۰٫۰۵۲	۸۵۲	۱۸
۰٫۰۲	۲۶۵	۰٫۰۳۸	۳۶۳	۱۹
۰٫۰۲	۲۰۹	۰٫۰۳۸	۳۶۳	۲۰
۰٫۰۲	۲۱۶	۰٫۰۳۸	۳۶۳	۲۱
۰٫۰۴۷	۶۰۵	۰٫۰۶۲	۵۲۶	۲۲
۰٫۰۶۷	۱۸۷۲	۰٫۰۸۲	۸۵۹	۲۳
۰٫۰۲	۲۱۶	۰٫۰۳۸	۳۶۳	۲۴
۰٫۰۲	۵۷۲	۰٫۰۶۲	۳۶۳	۲۵

به دوران مردن زای نمودار می‌شود. در آزمون‌های مذکور، عا این امر  
 فاصله قرارگرفته که هم‌زمان بنشیند. در نتیجه ۲۳، به فاصله  
 چیه که در دوران به ۰٫۰۸۲ افزایش یافته و دوران مردن زای نمودار  
 خب تم شده است. در نتیجه ۱۰ دوران غ که به ۰٫۰۵۰  
 رادین است، که در نتیجه ۲۲ به فاصله چیه که به ۰٫۰۶۲ رادین  
 افزایش یافته است.

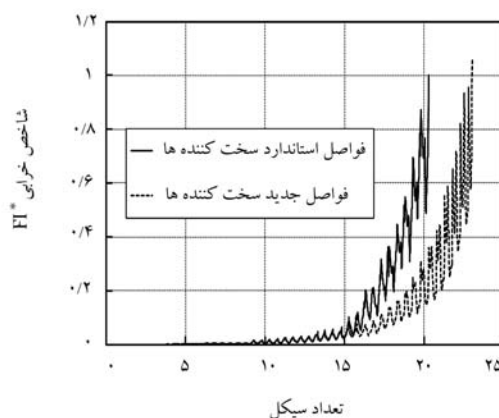
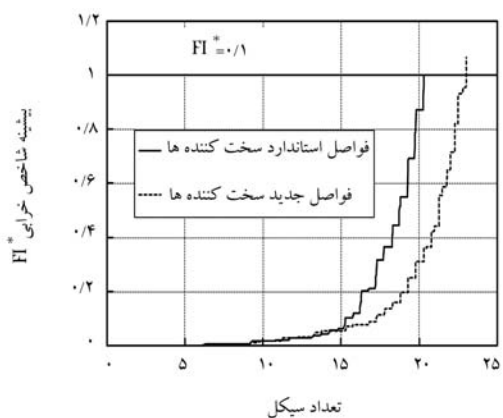
ش ۱۱، هم‌سایه یافته و که نه رادین ۵ (فاصله است نارد) و  
 نتیجه ۲۳ (فاصله چیه) نتیجه هم‌سایه هم‌سایه شد، بنده  
 کندن که به دوران، که در نتیجه ای که می‌یابد و  
 پنهانی نمودار شده است. این امر به شدت پنهانی نمودار درجه  
 انرژی مرکز به داشته باشد و پنهانی دوران به ای رات  
 ک.

جدول ۲، انرژی خب به به فاصله که به  
 افزایش یافته است. در نتیجه ۵، انرژی به به ۷۵۰ kJ  
 و در نتیجه ۲۳ به ۱۸۷۲ kJ است که ۲۵٪ افزایش یافته است. در نتیجه  
 ۱۰ انرژی به به ۴۹۵ kJ است که در نتیجه ۲۲

به هم‌سایه به به فاصله که به در نتیجه پنهانی نمودار  
 شخ خ ماده برگراری چیه است ده شده است. تری  
 کن \* در ۱۲ ن داده شده است. ط تضت ق، کن \*  
 به نگرمان رشحه در برگراری چیه است و چه ار آن به به  
 احل گ وش ن در مل به شد. در ط مل برگراری،



شکل ۱۲. تاریخچه‌ی کرنش  $\epsilon^*$  برای نمونه‌ی ۵ با فواصل استاندارد و نمونه‌ی ۲۳ با فواصل جدید سخت‌کننده‌ها.



شکل ۱۳. تاریخچه‌ی شاخص خرابی چرخه‌ی مواد برای نمونه‌ی ۵ با فواصل استاندارد و نمونه‌ی ۲۳ با فواصل جدید سخت‌کننده‌ها.

چرخه‌ی شبیه‌سازی و تحلیل شدند. از نکات مشاهده‌شده در آنالیز حساسیت، تأثیر هندسه‌ی مقطع تیر پیوند و عرض بال در رفتار تیرهای پیوند متوسط و بلند که تحت تأثیر خمش قابل توجه هستند، بوده است. نتایج حاصل از تحلیل به این صورت است:

۱. ضوابط مربوط به فواصل سخت‌کننده‌ها در تیرهای پیوند کوتاه محافظه‌کارانه بوده است. تیرهای کوتاه با یک سخت‌کننده‌ی کمتر نیز رفتار بسیار مناسبی را نشان می‌دهند.

۲. در ضوابط مربوط به فواصل سخت‌کننده‌های تیر پیوند متوسط اثر خمش در نظر گرفته نشده است و کماتش معمولاً در پانل‌های انتهایی به دلیل خمش قابل توجه در دو انتهای تیر رخ می‌دهد. بدون استفاده از سخت‌کننده‌ی اضافی و فقط با اصلاح فواصل سخت‌کننده‌ها می‌توان کماتش را در پانل‌های انتهایی کاهش و در نتیجه ظرفیت دورانی تیر و جذب انرژی آن را افزایش داد.

۳. افزایش ضخامت سخت‌کننده‌ها نسبت به مقدار موردنیاز آیین‌نامه، تأثیری در بهبود عملکرد تیرهای پیوند ندارد.

۴. با توجه به خمش قابل توجه در تیرهای متوسط و نقش بال‌ها در تحمل خمش، هندسه‌ی مقطع می‌تواند در فواصل مربوط به سخت‌کننده‌ها تأثیرگذار باشد. برای مقاطع W که عرض بال آن‌ها کمتر از نصف عمق مقطع است (بال کوتاه)، با کاهش تعداد سخت‌کننده‌ها، کماتش بال و جان شدید می‌شود و کاهش عملکرد تیر را به دنبال دارد. افزایش تعداد سخت‌کننده‌ها نیز باعث بهبود عملکرد تیر

کرنش  $\epsilon^*$  در نمونه‌ی ۲۳ همواره کوچک‌تر از نمونه‌ی ۵ است که بیانگر رفتار بهتر نمونه‌ی ۲۳ تحت بارگذاری چرخه‌ی است. همچنین تاریخچه‌ی شاخص خرابی مواد  $FI^*$  و بیشترین مقدار آن در طول مدت بارگذاری برای نمونه‌های ۵ و ۲۳ در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود. نمونه‌ی ۲۳، تقریباً ۳ سیکل بارگذاری دیرتر از نمونه‌ی ۵ به شکست می‌رسد که نشان می‌دهد در حالت جدید، تیر پیوند عملکرد مطلوب‌تری دارد.

## ۵. نتیجه‌گیری

در حال حاضر در آیین‌نامه‌ها، فواصل قرارگرفتن سخت‌کننده‌ها در حالت برش خالص پیشنهاد شده است و برای تیرهای پیوند متوسط و بلند نیز بدون در نظر گرفتن اثر خمش استفاده می‌شود. در نظر گرفتن اثر خمش در ضوابط مربوط به فواصل قرار گرفتن سخت‌کننده‌های تیرهای پیوند، یکی از دلایل شکست تیر پیوند قبل از رسیدن به ظرفیت دورانی مورد نیاز آیین‌نامه است. در پژوهش حاضر نشان داده شد که با اصلاح فواصل سخت‌کننده‌ها در تیر پیوند متوسط و بدون استفاده از سخت‌کننده‌ی اضافی می‌توان عملکرد و قابلیت جذب انرژی آن را بهبود بخشید. اصلاح فواصل سخت‌کننده‌ها این امکان را می‌دهد که بتوان از ظرفیت بیشتر تیر پیوند استفاده کرد. برای مقایسه‌ی بهتر در تیرهای پیوند متوسط از شاخص خستگی چرخه‌ی مواد برای تعیین لحظه‌ی گسیختگی مواد تحت بارگذاری چرخه‌ی استفاده شده است. تعداد ۲۵ نمونه تیر پیوند (کوتاه، متوسط و بلند) در نرم‌افزار آباکوس تحت بارگذاری



تأثیرگذار است. برای تیرهای پیوند بلندی که بال آن‌ها کمتر از نصف عمق مقطع است (بال کوتاه)، همان‌طور که در آیین‌نامه نیز ذکر شده است، استفاده از سخت‌کننده‌ی میانی برای جلوگیری از کمانش پیچشی جانبی و افت عملکرد تیر پیوند الزامی است. اما در تیرهای بلندی که بال آن‌ها تقریباً برابر عمق مقطع است (بال عریض)، در صورت عدم استفاده از سخت‌کننده‌ی میانی، کمانش پیچشی جانبی رخ نمی‌دهد و عملکرد تیر پیوند نیز دچار افت نمی‌شود.

پیوند می‌شود. اما برای مقاطعی که عرض بال آن‌ها تقریباً برابر با عمق مقطع است (بال عریض)، با کاهش یا افزایش تعداد سخت‌کننده‌ها تغییری در عملکرد آن به‌وجود نمی‌آید. ضوابط طراحی سخت‌کننده‌ها در آیین‌نامه فقط براساس ضخامت جان ( $t_w$ ) و عمق مقطع ( $d$ ) است که مورد مذکور، تأثیر هندسه‌ی مقطع (عرض بال ( $b_f$ )) را نیز در ضوابط طراحی سخت‌کننده‌ها نشان می‌دهد.

۵. همچنین همانند تیرهای متوسط در تیرهای بلند، هندسه‌ی مقطع تیر پیوند

## پانویس

1. degraded significant plastic strain

## منابع (References)

1. Azad, S.K. and Topkaya, C. "A review of research on steel eccentrically braced frames", *J. Const. Steel Res.*, **128**, pp. 53-73 (2017).
2. Mohebkah, A. and Chegeni, B. "Overstrength and rotation capacity for EBF links made of European IPE sections", *Thin Wall Struct.*, **74**, pp. 255-260 (2014).
3. Okazaki, T. and Engelhardt, M.D. "Cyclic loading behavior of EBF links constructed of ASTM A992 steel", *J. Const. Steel Res.*, **63**(6), pp. 751-765 (2007).
4. Richards, P.W. and Uang, C.M. "Effect of flange width-thickness ratio on eccentrically braced frames link cyclic rotation capacity", *J. Struct. Eng.*, **131**(10), pp. 1546-1552 (2005).
5. Kasai, K. and Popov, E.P. "Cyclic web buckling control for shear link beams", *J. Struct. Eng.*, **112**, pp. 505-523 (1986).
6. Daneshmand, A. and Hashemi, B.H. "Performance of intermediate and long links in eccentrically braced frames", *J. Const. Steel Res.*, **70**, pp. 167-176 (2012).
7. Ohsaki, M. and Nakajima, T. "Optimization of link member of eccentrically braced frames for maximum energy dissipation", *J. Const. Steel Res.*, **75**, pp. 38-44 (2012).
8. Rice, J.R. and Tracey, D.M. "On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields", *J. Mech. Phys. Solids*, **17**(3), pp. 201-217 (1969).
9. ABAQUS Ver.6.14 Documentation, Dassault Systems, Providence (2014).
10. Kanvinde, A.M. "Micromechanical simulation of earthquake-induced fracture in steel structures", Report No.145, Stanford University (2004).
11. Arce, G. "Impact of higher strength steels on local buckling and overstrength of links in eccentrically braced frames", Master Thesis, Dept. Struct. Eng., Texas Univ., Texas (2002).
12. Richards, P.W. "Cyclic stability and capacity design of steel eccentrically braced frames", Ph.D. Dissertation, Dept. Struct. Eng., California Univ., San Diego (2004).
13. AISC. "Seismic provisions of structural steel building", American Institute of Steel Construction, Chicago (2002).