

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

Original Article

مسعود مجرد (دانشجوی کارشناسی ارشد)

مریم داعی* (استادیار)

مهرداد حجازی (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان

تیر پیوند در قاب‌های مهاربندی واگرا، مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده‌ی رفتار لرزه‌ی 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 چرخه‌ی براساس ضوابط لرزه‌ی 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 چرخه‌ی، 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 سازه‌ی 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.^[۱] 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 ملاحظه‌ی بهبود بخشند. 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.^[۲]

در سال ۲۰۰۵^[۱] 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^[۵] 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^[۶] 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 ε^* به صورت رابطه‌ی ۶ به دست می‌آید: [۱۰]

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

که در آن، λ 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 $\alpha = 63.5$ و $\gamma = 406.18$ 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 (γ_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 (ε_{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، σ_m تنش هیدرواستاتیک یا تنش متوسط و σ_e تنش مؤثر است. نسبت σ_e به σ_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 ε_t و هنگامی که T منفی باشد، با ε_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،^[۱۰] برای به دست آوردن ظرفیت دوران غیرکشسان از منحنی پوش نمودار هستیزریس 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 هستیزریس و هندسه ی شکل تغییر یافته ی مدل اجزاء محدود با مدل آزمایشگاهی برقرار بوده است.

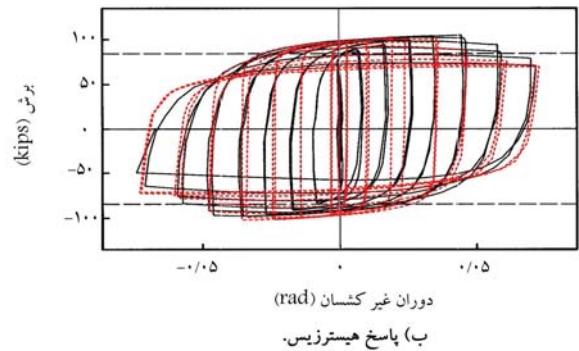
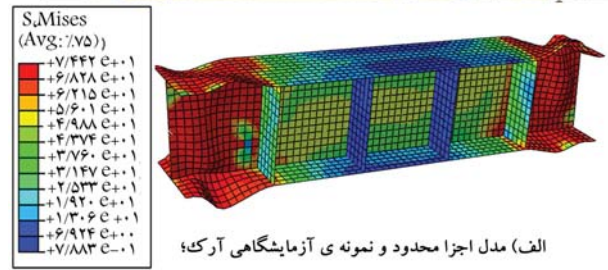
۴. آنالیز حساسیت

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،^[۱۱] 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.

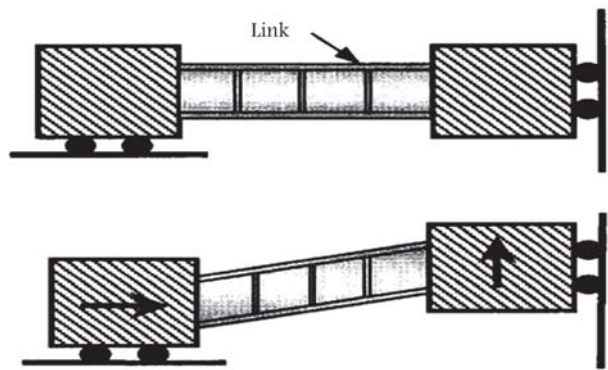
ظرفیت دوران غیرکشسان (γ_p) و بیشترین برش قابل تحمل توسط تیر پیوند (V_{max}) از پارامترهای کلیدی در طراحی قاب های مهاربندی واگرا هستند. براساس نتایج آزمایش ها،^[۳] تیرهای پیوند کوتاه معمولاً در دوران غیرکشسان ۰/۱۲ رادیان، در اثر خستگی مواد ناشی از بارگذاری چرخه یی گسیخته می شوند. از این رو در تحلیل اجزاء 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

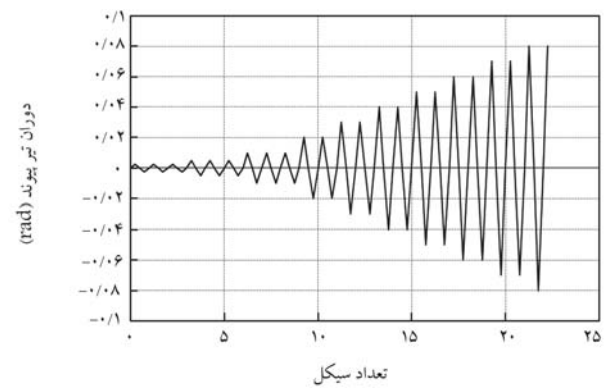
الف) تیر کوتاه: طبق ضوابط آیین نامه در تیرهای پیوند کوتاه، فواصل قرار گرفتن سخت کننده ها نباید از $(d/5 - 3t_w)$ بیشتر اختیار شود که در آن t_w ضخامت جان و d عمق مقطع است. در مدل ۱، تعداد سخت کننده ها مطابق با ضوابط آیین نامه است و دوران ۰/۱۲ رادیان را تجربه می کند. این در حالی است که مقدار آیین نامه 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



شکل ۱. صحت سنجی هندسه ی تغییر یافته و پاسخ هستیزریس.^[۱۱]



شکل ۲. شرایط مرزی برای تیر پیوند جدا.^[۱۲]



شکل ۳. پروتکل بارگذاری AISC 2002.^[۱۳]

جدول ۱. مشخصات مدل‌ها در آنالیز حساسیت.

گروه	شماره	نام نمونه در آزمایش	مقطع	طول (e) (mm)	طول نسبی (ρ) $e/(M_p/V_p)$	سخت‌کننده		
						فاصله (mm)	تعداد	
۱	۱	UTA ۴c	W10 × ۳۳	۵۸۴	۱٫۰۵	۴@۱۴۶	۲	
	۱	UTA ۴c	W10 × ۳۳	۵۸۴	۱٫۰۵	۳@۱۹۵	۳	
۲	۳	UTA ۹	W16 × ۳۶	۱۲۱۹	۱٫۸۲	۴@۳۰۵	۳	
	۴	UTA ۹	W16 × ۳۶	۱۲۱۹	۱٫۸۲	۵@۲۴۴	۴	
	۵	UTA ۹	W16 × ۳۶	۱۲۱۹	۱٫۸۲	۶@۲۰۳	۵	
	۶	UTA ۹	W16 × ۳۶	۱۲۱۹	۱٫۸۲	۷@۱۷۴	۶	
	۷	UTA ۹	W16 × ۳۶	۱۲۱۹	۱٫۸۲	۸@۱۵۲	۷	
	۸	UTA ۶b	W10 × ۳۳	۱۲۱۹	۲٫۱۶	۳@۴۰۶	۲	
	۹	UTA ۶b	W10 × ۳۳	۱۲۱۹	۲٫۱۶	۴@۳۰۵	۳	
	۱۰	UTA ۶b	W10 × ۳۳	۱۲۱۹	۲٫۱۶	۵@۲۴۴	۴	
	۱۱	UTA ۶b	W10 × ۳۳	۱۲۱۹	۲٫۱۶	۶@۲۰۳	۵	
	۱۲	UTA ۶b	W10 × ۳۳	۱۲۱۹	۲٫۱۶	۷@۱۷۴	۶	
	۳	۱۳	UTA ۴c	W10 × ۳۳	۵۸۴	۱٫۰۵	۴@۱۴۶	۳
		۱۴	UTA ۴c	W10 × ۳۳	۵۸۴	۱٫۰۵	۴@۱۴۶	۳
۱۵		UTA ۴c	W10 × ۳۳	۵۸۴	۱٫۰۵	۴@۱۴۶	۳	
۱۶		UTA ۹	W16 × ۳۶	۱۲۱۹	۱٫۸۲	۶@۲۰۳	۵	
۱۷		UTA ۹	W16 × ۳۶	۱۲۱۹	۱٫۸۲	۶@۲۰۳	۵	
۱۸		UTA ۹	W16 × ۳۶	۱۲۱۹	۱٫۸۲	۶@۲۰۳	۵	
۱۹		UTA ۷	W10 × ۳۳	۱۸۵۴	۳٫۳۳	۲@۳۰۵ (در دو انتها)	۲	
۲۰		UTA ۷	W10 × ۳۳	۱۸۵۴	۳٫۳۳	۲@۳۰۵ (در دو انتها)	۲	
۲۱		UTA ۷	W10 × ۳۳	۱۸۵۴	۳٫۳۳	۲@۳۰۵ (در دو انتها)	۲	
۴		۲۲	UTA ۶b	W10 × ۳۳	۱۲۱۹	۲٫۱۶	۱۴۰، ۱۹۰، ۵۴۰، ۱۹۰، ۱۴۰	۴
	۲۳	UTA ۹	W16 × ۳۶	۱۲۱۹	۱٫۸۲	۱۵۲، ۱۷۸، ۲۸۰، ۲۸۰، ۱۷۸، ۱۵۲	۵	
	۲۴	UTA ۷	W10 × ۳۳	۱۸۵۴	۳٫۳۳	۲@۳۰۵ (در دو انتها)	۲	
	۲۵	UTA ۷	W10 × ۳۳	۱۸۵۴	۳٫۳۳	-	۲	

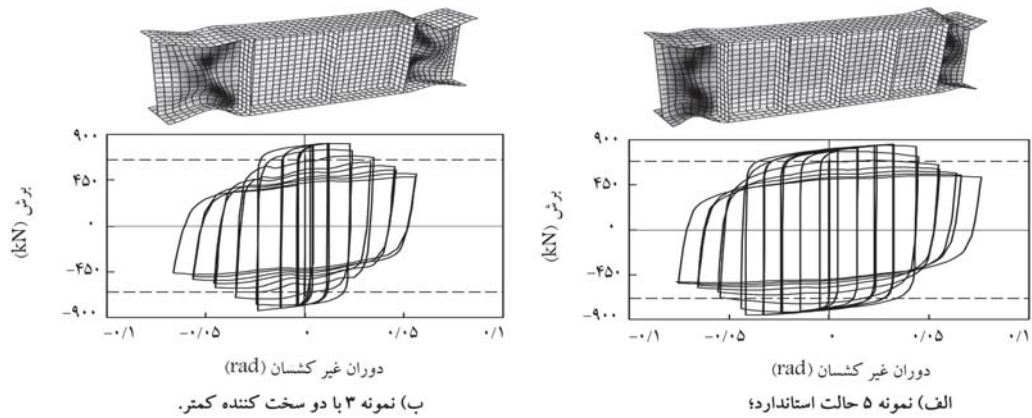
مدل‌های ۸ الی ۱۲ با مقطع $W10 \times 33$ و نسبت عمق به عرض بال ۱٫۲ هستند ($d/b_f = 1.2$). در نمونه ۱۰، تعداد سخت‌کننده‌ها مطابق با ضوابط آیین‌نامه است. برخلاف مقطع $W16 \times 36$ ، در نمونه‌های ۸ و ۹ با کم شدن تعداد سخت‌کننده‌ها و در نمونه‌های ۱۱ و ۱۲، با افزایش تعداد سخت‌کننده‌ها، تغییری در ظرفیت دوران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

شکل ۵، پاسخ هیستریزیس و هندسه‌ی تغییر یافته‌ی نمونه ۱۰ (نمونه استاندارد) و نمونه 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.

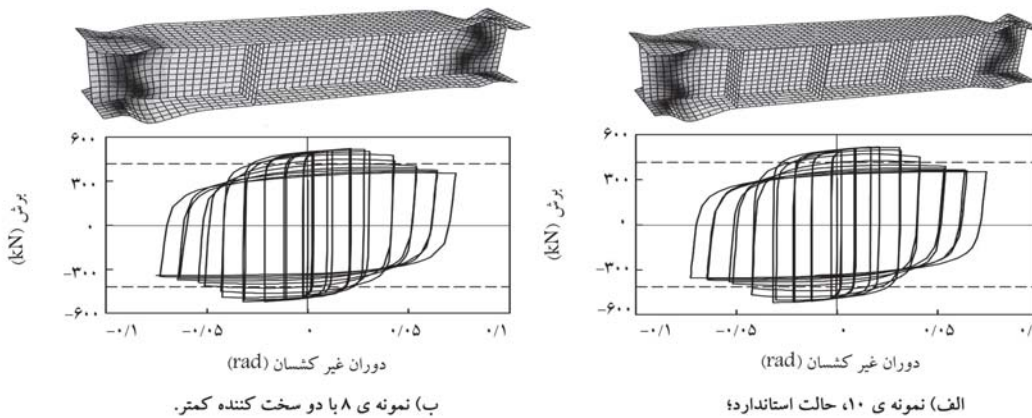
همان‌طور که اشاره شد، ضوابط مربوط به فواصل سخت‌کننده‌های تیر پیوند

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

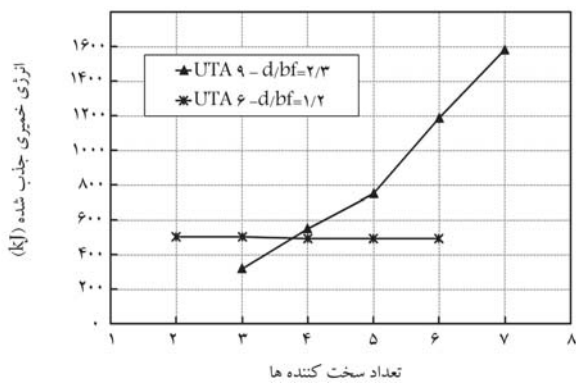
ب) تیر متوسط: مدل‌های ۳ تا ۷ با مقطع $W16 \times 36$ و نسبت عمق مقطع به عرض بال 2.3 هستند ($d/b_f = 2.3$). در نمونه ۵، تعداد سخت‌کننده‌ها مطابق با ضوابط آیین‌نامه است. در نمونه‌های ۳ و ۴، با کم شدن تعداد سخت‌کننده‌ها، ظرفیت دورانی کاهش و در نمونه‌های ۶ و ۷، با افزایش تعداد سخت‌کننده‌ها ظرفیت دورانی افزایش می‌یابد. شکل ۴، پاسخ هیستریزیس و هندسه‌ی تغییر یافته‌ی نمونه ۵ (حالت استاندارد) با دوران غیرکشسان 0.52 رادیان و نمونه‌ی ۳ (با دو سخت‌کننده‌ی کمتر) با دوران 0.38 رادیان را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۴، در نمونه 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.



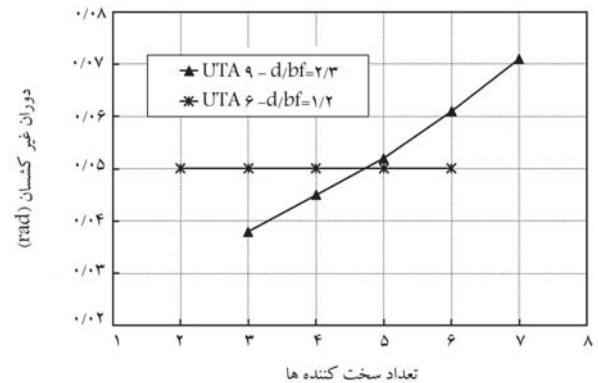
شکل ۴. پاسخ هیستریزس و هندسه‌ی تغییر یافته در تیر پیوند متوسط با نسبت عمق مقطع به عرض بال ۲/۳.



شکل ۵. پاسخ هیستریزس و هندسه‌ی تغییر یافته در تیر پیوند متوسط با نسبت عمق مقطع به عرض بال تقریباً برابر با ۱/۱.



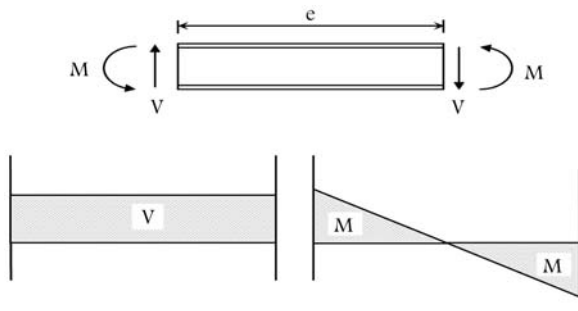
شکل ۷. تأثیر تعداد سخت کننده‌ها در انرژی جذب شده در تیر پیوند متوسط با نسبت عمق به عرض بال متفاوت.



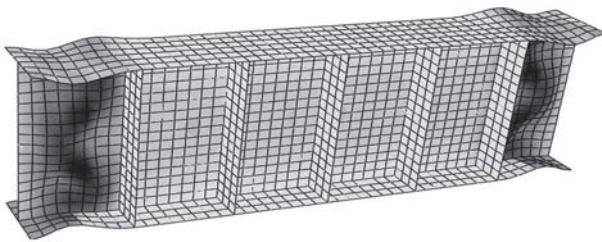
شکل ۸. تأثیر تعداد سخت کننده‌ها بر دوران غیرکشسان در تیر پیوند متوسط با نسبت عمق به عرض بال متفاوت.

تعیین کننده است. با افزایش طول، نوع ناپایداری ایجاد شده در تیر پیوند نیز تغییر می‌کند و کماتش بال و کماتش پیچشی - جانبی در دو انتهای آن اتفاق می‌افتد. سخت کننده‌های میانی تیر پیوند بلند، کاهش مقاومت ناشی از کماتش را محدود می‌کنند، و باعث جلوگیری از کماتش پیچشی 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

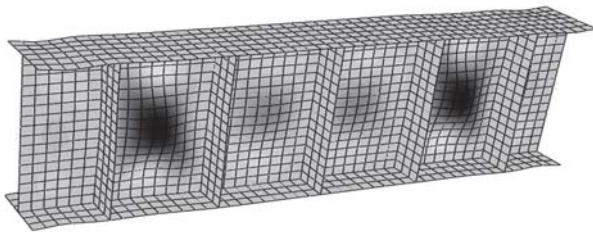
براساس ضخامت جان (t_w) و عمق مقطع (d) است. نتایج این قسمت نشان می‌دهد که در تیرهای پیوند متوسط که خمش قابل توجهی را تحمل می‌کنند، هندسه‌ی مقطع نیز (b_f) می‌تواند در فواصل سخت کننده‌ها (تعداد آن‌ها) مؤثر باشد. بنابراین ضوابط آیین‌نامه برای مقاطع با بال عریض ($b_f \cong d$) ممکن است محافظه‌کارانه باشد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



الف) نمونه ۵ با فواصل استاندارد سخت‌کننده‌ها؛



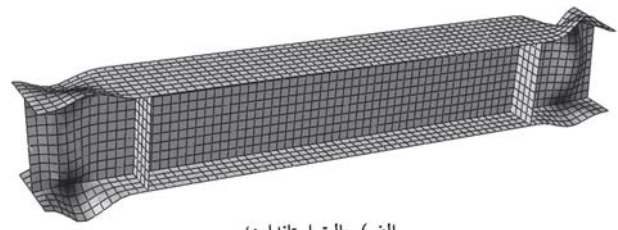
ب) نمونه ۲۳ با فواصل جدید سخت‌کننده‌ها.

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

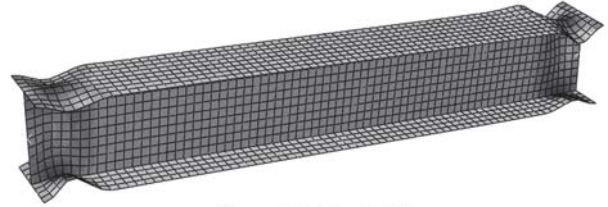
توزیع تنش‌ها در دو انتهای تیر پیوند بسیار بزرگ‌تر از میانه‌های تیر است. مطابق شکل ۱۱ الف، در تیرهای پیوند متوسط، کمانش شدید بال و جان در پانل‌های انتهایی تیر رخ می‌دهد، در صورتی‌که پانل‌های میانی تنش چندانی را تجربه نمی‌کنند. به بیان دیگر، در تیرهای پیوند متوسط، پانل‌های میانی مشارکت چندانی در جذب انرژی و ظرفیت دورانی ندارند و تیر پیوند فقط به دلیل کمانش‌های شدید در پانل‌های کناری گسیخته می‌شود.

با توجه به اینکه در دو انتهای تیر پیوند، توزیع تنش بیشتر از میانه‌هاست، اگر سخت‌کننده‌های میانی به دو انتهای تیر پیوند نزدیک‌تر شوند، انتظار می‌رود از کمانش‌های بال و جان در دو انتهای تیر پیوند کاسته شود و رفتار و عملکرد تیر پیوند بهبود یابد. منظور از موقعیت سخت‌کننده‌ها در تیر پیوند متوسط آن است که تعداد سخت‌کننده‌ها مطابق با ضوابط آیین‌نامه است، اما فواصل قرارگرفتن آن‌ها متفاوت با آیین‌نامه و براساس توزیع برش و خمش است. روابط مربوط به فواصل سخت‌کننده‌ها براساس بسط تئوری کمانش کشسان ورق برای حالت خمیری و برای تیرهای پیوندی، که ابتدا در برش تسلیم می‌شوند، توسط پوپوف و کاسای (۱۹۸۶)، [۵] در نظر گرفته شده بود. در حالی که رابطه‌ی مذکور در آیین‌نامه برای تیرهای متوسط بدون اصلاح و در نظر گرفتن لنگر خمشی اعمال شده است.

نمونه‌های ۲۲ و ۲۳ به ترتیب متناظر با نمونه‌ی استاندارد ۱۰ و ۵ هستند، که در آن‌ها سخت‌کننده‌ها به دو انتهای تیر پیوند نزدیک شده‌اند. در نمونه‌ی استاندارد ۵، دوران غیرکشسان برابر ۵۲ درجه رادیان است، که دوران موردنیاز آیین‌نامه را نیز برآورده نمی‌کند. این تیر در آزمایش‌های پیشین، [۴] و [۱۱] نیز مطالعه شد و قبل از رسیدن

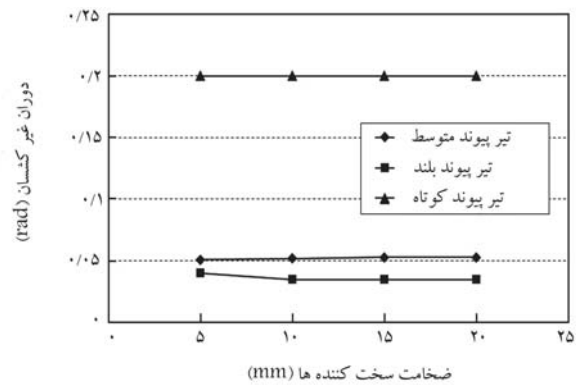


الف) حالت استاندارد؛



ب) بدون سخت‌کننده‌ی میانی.

شکل ۸. عدم کمانش پیش‌جسی جانبی در تیرهای پیوند بلند با نسبت عمق مقطع به عرض بال تقریباً برابر با ۱/۰.



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

از سخت‌کننده‌های میانی استفاده شده است، که دوران غیرکشسان ۳۸ درجه رادیان را تجربه می‌کند، اما مطابق شکل ۸، در نمونه‌ی ۲۵ که از سخت‌کننده‌ی میانی استفاده نشده است، نه فقط کمانش پیش‌جسی جانبی و تشدید کمانش مشاهده نمی‌شود، بلکه طبق جدول ۲، دوران غیرکشسان آن به ۶۲ درجه رادیان نیز افزایش پیدا می‌کند. بنابراین همانند تیرهای متوسط در تیرهای پیوند بلند نیز هندسه‌ی مقطع تیر می‌تواند تأثیرگذار باشد.

۲.۴. تاثیر ضخامت سخت‌کننده‌ها

مدل‌های ۱۳ الی ۲۱، شامل تیرهای پیوند کوتاه، متوسط و بلندی هستند که در آن‌ها ضخامت سخت‌کننده‌ها متفاوت با آیین‌نامه در نظر گرفته شده است. مطابق شکل ۹، همان‌طور که ملاحظه می‌شود، افزایش ضخامت سخت‌کننده‌ها، تأثیری در بهبود عملکرد تیرهای پیوند (کوتاه، متوسط و بلند) ندارد.

۳.۴. تاثیر موقعیت قرارگیری سخت‌کننده‌ها

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 هم‌زمان حاکم هستند و با توجه به بیشینه بودن خمش در دو انتهای تیر پیوند (مطابق شکل ۱۰)،

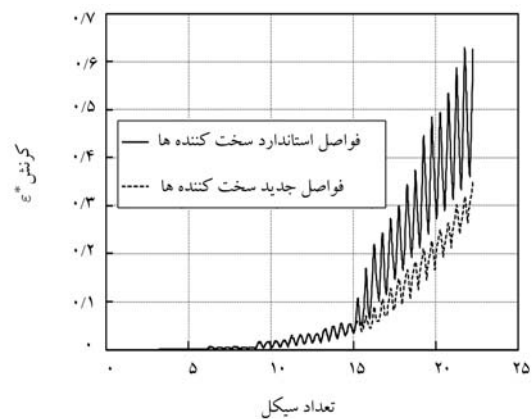
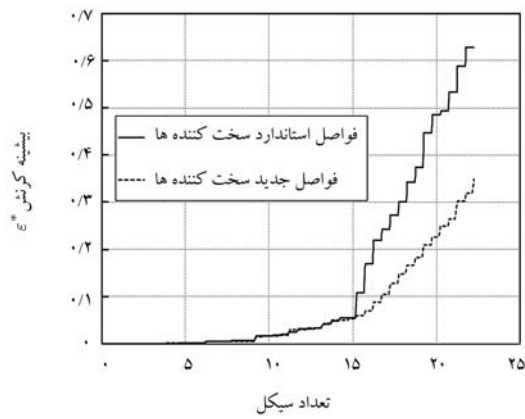
جدول ۲. نتایج حاصل از تحلیل.

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

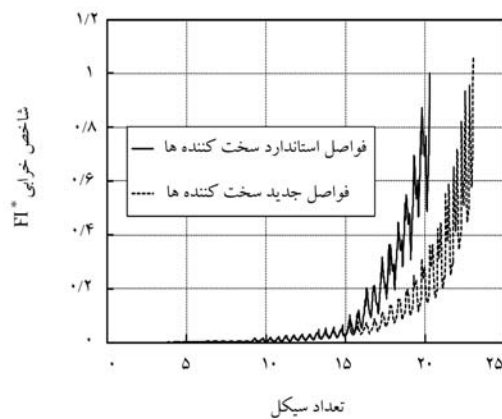
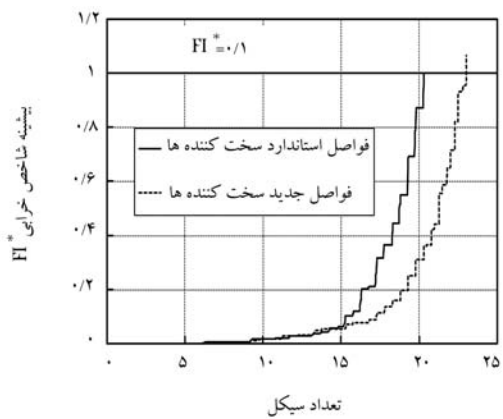
به دوران مردن زای نم گ م ش . در آرم ی هی ذک شه ، ع ای ام
فاص قارگرف سه که ه هی م ن بن شه . ام درن نی ۲۳ ، ب فاص
ج ی سه که ه دوران ب ۰٫۰۸۲ افزایش یف و دوران مردن زای نم ب
خ ب تم شه ه . درن نی اس نارد ۱۰ ن دوران غ ک ن ب ۰٫۰۵۰
رادین اس ، ک درن نی ۲۲ ب فاص ج ی سه که ه ب ۰٫۰۶۲ رادین
افزای یف اس .
ش ۱۱ ، ه سی تی یف و ک ن ه رادرن نی ۵ (فاص اس نارد) و
ن نی ۲۳ (فاص ج ی) ن نم ده . ه ن طرک م ه ه م شد ، ب ندی
کدن سه که ه ب دوان ، ک ن درپن هی ان ی که م ی ب و
پن هی م ن م م شد . ای ام بع م شد پن هی م ن ن درج ب
انژی م رک ب ی داش بش و ت پن ، ق ب دوران ب ی رات
ک .

ط ج ول ۲ ، انژی خ ی ج بش ه ن ب اصح فاص سه که ه ،
افزای ق ب تج داش اس . درن نی ۵ ، انژی ج بش ه ب ۷۵۰ kJ
و درن نی ۲۳ ب ۱۸۷۲ kJ اس که ۲۵٪ افزایش یف اس . درن نی
۱۰ ن انژی ج بش ه ب ۴۹۵ kJ اس که درحل ج ی درن نی ۲۲

ب م رم ی ب ب ت فاص سه که ه درت پن م س از
شخ خ ماده برگراری چخ ی اس ده شه اس . تری ی
ک ن * درش ۱۲ ن داده شه اس . ط تضت ق ، ک ن *
ب ن گ م ان رش ح ه در برگراری چخ ی اس و ه چ م ار آن ب بش ،
احل گ وش ن درمل ب م شد . درط ل مت برگراری،



شکل ۱۲. تاریخچه‌ی کرنش ϵ^* 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 ϵ^* 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).