



http://journalisss.ir

ارزیابی عملکرد تیر پیوند قوطی شکل با اتصال فلنجی دارای مقطع کاهش یافته تحت بارگذاری چرخه‌ای

دانیال پسران بهبهانی^۱، نادر فنائی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۲- دانشیار، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۹۶۹۷۶۴۴۹۹، fanaie@kntu.ac.ir

چکیده

مطالعات پیشین، ایجاد پارگی‌های ترد و زود هنگام در اتصال تیر پیوند به ستون را در مجاورت جوش‌های شیار اتصال بال تیر پیوند به بال ستون و در مواجهه با زلزله نشان داده‌اند؛ این نوع پارگی به صورت مشابه در اتصال‌های فلنجی تیر پیوند به تیر خارج از پیوند نیز مشاهده شده است. در این تحقیق ایده استفاده از تیر پیوند قوطی شکل با مقطع کاهش یافته در نرم افزار اجزای محدود آباکوس، به منظور کاهش مقدار تقاضای کرنش پلاستیک ایجاد شده در انتهای بال تیر پیوند و در نتیجه جلوگیری از ایجاد پارگی در این ناحیه مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که استفاده از مقطع کاهش یافته منجر به کاهش مقدار تقاضای کرنش پلاستیک معادل در انتهای بال‌های تیر پیوند قوطی شکل تا ۳۸٪ برای تیرهای پیوند برشی، تا ۴۱٪ برای تیرهای پیوند متوسط و تا ۶۸٪ برای تیرهای پیوند بلند و در نتیجه جلوگیری از ایجاد پارگی‌های زود هنگام در ناحیه مجاور جوش شیار اتصال بال تیر به ورق انتهایی می‌گردد؛ مقدار کرنش پلاستیک معادل در انتهای تیر پیوند قوطی، با کاهش پارامترهای a و b و افزایش پارامتر c (پارامترهای هندسی مقطع کاهش یافته) کاهش می‌یابد و پارامتر c بیشترین و b کمترین تأثیر را بر مقدار این پارامتر دارد؛ همچنین با استفاده از مقطع کاهش یافته در تیر پیوند قوطی شکل، مقدار اتلاف انرژی تیر پیوند به دلیل افزایش مشارکت بال در اتلاف انرژی، تا ۳۵٪ برای تیرهای پیوند برشی، تا ۱۵۸٪ برای تیرهای پیوند متوسط و تا ۲۵۰٪ برای تیرهای پیوند بلند افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی

قاب مهاربندی واگرا، تیر پیوند قوطی شکل، کرنش پلاستیک معادل، مدل سازی اجزای محدود

Evaluation of the Performance of Box Link Beam with Reduced Section Flange under Cyclic Loading

D. Pesaran Behbahani, N. Fanaie

Abstract

Previous studies have demonstrated the occurrence of brittle and early stage cracks in the connection between the link beam and the column, specifically in the vicinity of the groove welds that connect the flanges of the link beam to the column, when subjected to seismic activity. A similar type of rupture has also been observed in the end-plate connections of the link beam to the external link beam. This research explores the concept of utilizing a box-shaped link beam with a reduced cross-section in the Abaqus finite element software to magnify the plastic strain demand generated at the flange ends of the box link beam. The objective is to prevent rupture in this specific region. The results indicate that the maximum equivalent plastic strain at the end of the link beam flanges can be reduced by up to 38% for short link beams, up to 41% for intermediate link beams, and up to 68% for long link beams. Consequently, this approach effectively prevents premature ruptures in the area adjacent to the groove weld connecting the beam flange to the end plate. The magnitude of the equivalent plastic strain at the end of the box link beam decreases as parameters "a" and "b" decrease, and parameter "c" (geometric parameters of the reduced cross-section) increases. Parameter "c" exhibits the most significant influence on this parameter, while parameter "b" has the least significant impact. Additionally, the adoption of a reduced cross-section in the box link beam results in an increase of up to 35% in the energy dissipation of the link beam due to enhanced participation of the flanges in energy dissipation for short link beams, up to 158% for intermediate link beams, and up to 250% for long link beams.

Keywords

Eccentrically braced frame, Box link beam, Equivalent plastic strain, Finite element modeling



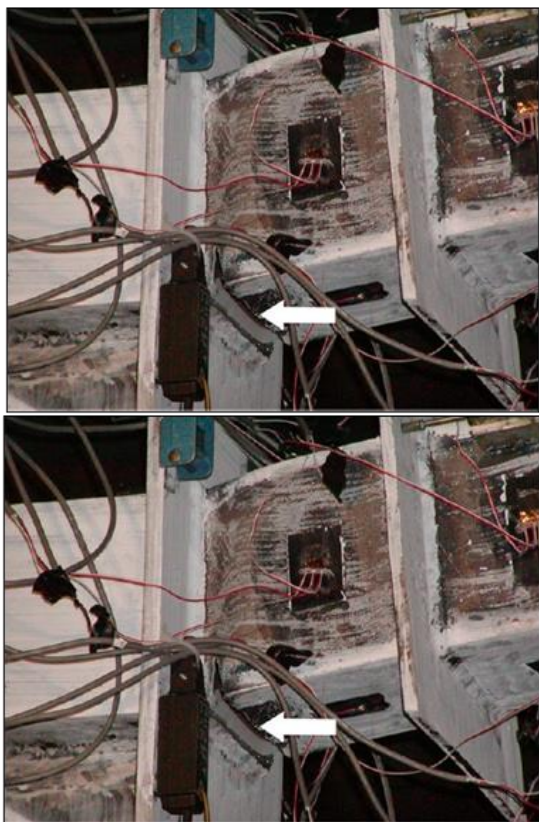
۱- مقدمه و تاریخچه تحقیقات

قاب‌های مهاربندی‌شده واگرا در اوایل دهه ۱۹۷۰ میلادی، با هدف ترکیب شکل‌پذیری مطلوب قاب‌های خمشی و سختی جانبی مناسب قاب‌های مهاربندی‌شده همگرا (در صورتی که طول تیر پیوند از نصف طول دهانه قاب متناظر تجاوز نکند) [۱] در ژاپن مورد استفاده قرار گرفتند. با توجه به تمرکز رفتارهای غیرارتجاعی و اتلاف انرژی ورودی ناشی از زلزله به سازه در تیر پیوند، خسارات ناشی از زلزله نیز در تیر پیوند متمرکز شده و از ایجاد خسارت در سایر اعضای سازه‌ای جلوگیری می‌شود. استفاده از دو نوع تیرهای I شکل و قوطی‌شکل به‌عنوان تیر پیوند رایج است؛ اما در مواردی که تعبیه مهارهای جانبی در انتهای تیرهای پیوند وجود ندارد (بین هسته دو آسانسور و یا در مواردی که نما امکان تعبیه مهار جانبی را نمی‌دهد و یا بعضی پل‌ها)، استفاده از تیرهای پیوند قوطی‌شکل به‌دلیل سختی پیش‌فشی بالا و موضوعیت نداشتن کمانش پیش‌فشی جانبی، بر تیرهای پیوند I شکل دارای مزیت است. رفتار غیرارتجاعی و در نتیجه تغییر شکل‌های بزرگ ایجادشده در تیرهای پیوند به‌عنوان فیوز سازه‌ای، موجب ایجاد تقاضای تغییرشکلی قابل توجه در انتهای بال‌های تیر پیوند و در مجاورت جوش‌های شیارهای اتصال بال تیر به ستون در تیرهای پیوند کناری و یا اتصال به تیر خارج از پیوند در تیرهای پیوند میانی می‌شود؛ از سوی دیگر در نواحی مجاور جوش‌ها در اتصالات تیر پیوند، به‌دلیل عملیات حرارتی جوشکاری، خواص فلز پایه استفاده‌شده تضعیف شده و همچنین تنش‌های پسماند در این ناحیه^۱ ایجاد می‌شوند. با توجه به مجموعه موارد ذکرشده، پارگی بال تحت بارگذاری‌های چرخه‌ای قبل از بروز شکل‌پذیری مناسب، بسیار محتمل است؛ مطالعات قبلی پس از زلزله‌های نورتریج و کوبه نشان داده است که اتصالات تیر پیوند به ستون، مستعد پارگی در تغییر مکان جانبی نسبی کوچک و در ناحیه مجاور جوش شیارهای بال تیر پیوند به ستون هستند. در آزمایش‌های انجام‌شده توسط برمن و بروئو^۲ [۲] بر روی یک قاب مهاربندی واگرای دارای تیر پیوند قوطی‌شکل تحت بارگذاری چرخه‌ای نیز پارگی در مجاورت جوش شیارهای بال تحتانی به سخت‌کننده انتهایی مطابق با شکل (۱) مشاهده گردید.

۱-۱- سیستم مهاربندی واگرا

به‌منظور تعیین نوع مکانیزم تسلیمی تیر پیوند، از پارامتر طول نرمال‌شده آن استفاده می‌شود و بر حسب مقدار طول نرمال‌شده، تیرهای پیوند به سه دسته تیرهای پیوند برشی ($e \leq 1.6 \frac{M_p}{V_p}$)، برشی-خمشی ($1.6 \frac{M_p}{V_p} < e \leq 2.6 \frac{M_p}{V_p}$) و خمشی ($e > 2.6 \frac{M_p}{V_p}$) تقسیم می‌شوند. در این روابط، e طول تیر پیوند، M_p لنگر پلاستیک و V_p ظرفیت برشی پلاستیک مقطع است.

اضافه مقاومت در تیرهای پیوند کوتاه به‌صورت نسبت حداکثر برش ایجادشده در تیر پیوند به ظرفیت برشی اسمی مقطع و در تیرهای پیوند متوسط و بلند به‌صورت حداکثر لنگر ایجادشده در دو انتهای تیر پیوند به لنگر پلاستیک مقطع تعریف می‌شود. برمن و همکاران [۳] نشان دادند که مقدار سخت‌شدگی کرنشی برای تیر پیوند قوطی‌شکل، به‌صورت متوسط ۱۱٪ بیش‌تر از تیر پیوند I شکل است؛ آن‌ها مقدار ضریب اضافه‌مقاومت برای تیرهای پیوند قوطی‌شکل با رفتار برشی را بین ۱/۳ تا ۱/۹ و برای تیرهای پیوند بلندتر بین ۱/۱ تا ۱/۶ پیشنهاد دادند.



شکل ۱- پارگی بال پایینی تیر پیوند قوطی‌شکل در مجاورت جوش

انتهای آن [۲]

^۱ Heat Affected Zone

^۲ Berman and Bruneau

مطابق با مطالعات کاسای و پوپوف^۱ [۴]، استفاده از سخت‌کننده‌های انتهایی به منظور افزایش مقاومت در برابر بارهای متمرکز وارد شده توسط مهاربندها و همچنین استفاده از سخت‌کننده‌های میانی به منظور جلوگیری از کماتش برشی در ورق جان با نسبت فشردگی بالا الزامی است. برمن و بروئو [۳] به منظور بررسی روابط تئوری برای تعیین نسبت فشردگی مجاز بال و جان و همچنین فاصله سخت‌کننده‌های عرضی، با استفاده از مدل‌های اجزای محدود، حداکثر نسبت‌های فشردگی مجاز برای جان و بال را مطابق با جدول (۱) ارائه کردند.

۱-۲- اتصالات تیر به ستون

مشاهده پارگی‌های ترد در اتصالات تیر به ستون در قاب‌های خمشی فولادی در زلزله‌های ۱۹۹۴ نورتریج و ۱۹۹۵ کوبه، نگرانی‌هایی در مورد قابلیت اطمینان اتصالات رایج تا آن زمان ایجاد کرد [۵]. در اتصالات خمشی رایج تا قبل از زلزله نورتریج، اتصال بال‌های تیر به بال ستون با استفاده از جوش‌های شیار با نفوذ کامل انجام و جان تیر نیز از طریق پیچ و مهره به ورق برشی متصل می‌شد. محل اتصال تیر به ستون به دلیل ماهیت ترد جوش و تضعیف مصالح در مجاورت آن به دلیل انجام عملیات جوشکاری و تمرکز تنش ناشی از سوراخ‌های دسترسی، تقاضای تغییرشکلی زیاد و تمرکز کرنش‌های پلاستیک، وجود ورق پشت‌بند، تنش‌های سه‌محوره بالا و... از نقاط حساس و مستعد پارگی فولاد محسوب می‌شود. برخی از ایده‌های مطرح شده به منظور اصلاح اتصالات پس از این زلزله‌ها عبارتند از: اصلاح جزئیات مربوط به جوشکاری در اتصالات (ریکلز و همکاران^۲ [۶])، تقویت تیر در محل اتصال به ستون (چن و همکاران^۳ [۷])، انگلهارت و سابول^۴ [۸])، اتصال با مقطع کاهش یافته و... تضعیف تیر در بخش‌هایی از آن به منظور ایجاد فاصله در محل تشکیل مفصل پلاستیک از بر ستون، ایده‌ای است که در دهه ۱۹۸۰ میلادی توسط پلامیر^۵ پیشنهاد شد که به اتصال استخوانی مشهور است.

در اتصال RBS بخشی از بال‌های تیر، در فاصله کوتاهی از بر ستون به منظور ایجاد مفصل پلاستیک در ناحیه کاهش یافته و برای محافظت از جوش بال تیر به ستون آسیب‌پذیرتر می‌شود؛ به این

ترتیب بخش قابل توجهی از انرژی ورودی زلزله به سازه از طریق تسلیم و تشکیل مفاصل پلاستیک در مقطع کاهش یافته تلف می‌شود و در نتیجه تقاضای اتلاف انرژی در سایر اجزای سازه کاهش می‌یابد. هندسه مقطع کاهش یافته به منظور استفاده در اتصال RBS، ابتدا به صورت یک برش ثابت در نظر گرفته شد و سپس به منظور ایجاد تسلیم‌شدگی یکنواخت در بال، برش بال زاویه‌دار به جای برش با عرض ثابت پیشنهاد شد.

جدول ۱- حداکثر نسبت فشردگی بال و جان در تیر پیوند قوطی‌شکل

رفتار تیر پیوند	نسبت لاغری	مقدار حداکثر نسبت فشردگی مجاز	
		نسبت لاغری	مقدار حداکثر نسبت فشردگی مجاز
برشی	بال $\frac{b'_f}{t_f}$	1.00	$\sqrt{\frac{E_s}{F_{yf}}}$
	جان $\frac{d'_w}{t_w}$ (با سخت‌کننده)	1.67	$\sqrt{\frac{E_s}{F_{yw}}}$
	جان $\frac{d'_w}{t_w}$ (بدون سخت‌کننده)	0.64	$\sqrt{\frac{E_s}{F_{yw}}}$
برشی-خمشی	بال $\frac{b'_f}{t_f}$	0.64	$\sqrt{\frac{E_s}{F_{yf}}}$
	جان $\frac{d'_w}{t_w}$	0.64	$\sqrt{\frac{E_s}{F_{yw}}}$
خمشی	بال $\frac{b'_f}{t_f}$	0.64	$\sqrt{\frac{E_s}{F_{yf}}}$
	جان $\frac{d'_w}{t_w}$	0.64	$\sqrt{\frac{E_s}{F_{yw}}}$

در تحقیقات بعدی مشخص شد که برش مقطع با عرض ثابت و یا زاویه‌دار باعث ایجاد تمرکز تنش در گوشه‌های مقطع کاهش یافته می‌شود، به همین دلیل برای به حداقل رساندن تمرکز تنش در بال، استفاده از برش شعاعی پیشنهاد شد و مشاهده گردید که استفاده از برش شعاعی دارای بهترین عملکرد لرزه‌ای است. شمای کلی یک نمونه مقطع I شکل با بال برش خورده شعاعی در شکل (۲) آمده است.

¹ Kasai and Popov

² Ricles et al

³ Chen et al

⁴ Engelhardt and Sabol

⁵ Andre Plumier

حداکثر تقاضای کرنش‌های پلاستیک از بر ستون می‌شود. همچنین استفاده از اتصال با مقطع کاهش‌یافته منجر به کاهش ۵ تا ۱۲ درصد مقدار لنگر خمشی ایجادشده در بر ستون می‌شود که به این ترتیب مقدار نیروهای واردشده بر چشمه اتصال نیز کاهش می‌یابد [۱۱].

۳-۱- اتصالات تیر پیوند به ستون

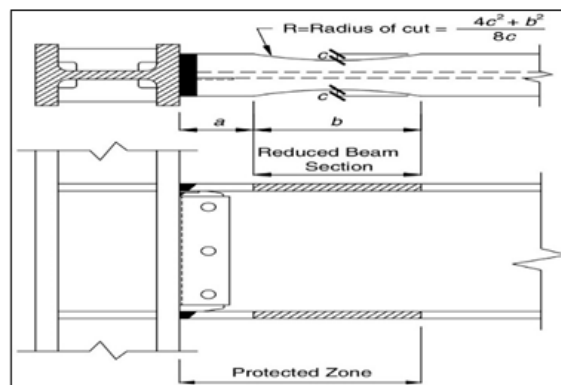
در زلزله نورث‌ریج، پارگی در اتصال تیرهای پیوند به ستون نیز مشاهده شد. اتصال تیر پیوند به ستون تا قبل از این زلزله مشابه با اتصالات قاب خمشی در نظر گرفته می‌شد با این تفاوت که مطابق با تحقیقات مالی و پوپوف^۱ [۱۳] به جای استفاده از ورق برشی جان با اتصال پیچی، ورق برشی با جوش به جان تیر پیوند متصل می‌شد.

جدول ۲- محدودیت‌های هندسی مقطع کاهش‌یافته

پارامتر ناحیه کاهش‌یافته	محدودیت پارامتر کاهش‌یافته بر اساس FEMA350	محدودیت پارامتر کاهش‌یافته بر اساس مبحث دهم مقررات ملی
a	$0.5b_f \leq a \leq 0.75b_f$	$0.5b_f \leq a \leq 0.75b_f$
b	$0.65d_b \leq b \leq 0.85d_b$	$0.65d_b \leq b \leq 0.85d_b$
c	$0.2b_f \leq c \leq 0.25b_f$	$0.1b_f \leq c \leq 0.25b_f$
r	$r = \frac{4c^2 + b^2}{8c}$	$r = \frac{4c^2 + b^2}{8c}$

انگلهارت و پوپوف اتصال تیرهای پیوند بلند به ستون را مورد بررسی قرار دادند؛ آن‌ها مشاهده کردند که حتی با استفاده از اتصال جوشی جان تیر پیوند به ورق برشی، به دلیل تقاضای نیرویی و تغییرشکلی شدیدتر اتصال تیر پیوند نسبت به اتصال تیر به ستون در قاب‌های خمشی، پارگی‌های ناگهانی در بال تیر پیوند و در مجاورت جوش شیار آن، قبل از ایجاد کرنش‌های غیرارتجاعی قابل توجه است.

آرک و همکاران^۲ [۱۴] چندین نمونه تیر پیوند بال‌پهن با طول‌های مختلف را که در دو انتها به وسیله اتصال فلنجی به تیر خارج از پیوند متصل شده بودند را مورد آزمایش قرار دادند و مشاهده کردند که برخی نمونه‌ها به دلیل ایجاد پارگی جوش بین تیر پیوند و ورق‌های انتهایی^۳ خراب شدند.



شکل ۲- برش شعاعی در اتصال با مقطع کاهش‌یافته [۹]

آزمایش‌های انجام‌شده بر روی اتصال RBS نشان داده است که کماتش موضعی جان و سپس کماتش پیچشی جانبی در محل مقطع کاهش‌یافته رخ می‌دهد و در نهایت کماتش موضعی بال صورت می‌گیرد؛ به همین دلیل استفاده از سخت‌کننده‌های عرضی در دو انتهای مقطع کاهش‌یافته پیشنهاد می‌شود. با استفاده از مقطع کاهش‌یافته در تیر، تشکیل مفصل پلاستیک به مقطع ضعیف انتقال یافته که این ناحیه می‌تواند کرنش‌های غیرارتجاعی بزرگی را بدون بروز پارگی تحمل کند و به این ترتیب مقدار تقاضای کرنش در بر ستون کاهش می‌یابد [۹]. کارایی RBS در جلوگیری از بروز پارگی در بر ستون، به طراحی مناسب پارامترهای هندسی برش بال از جمله شکل و محل قرارگیری و نسبت کاهش بال بستگی دارد. شایان‌ذکر است که با استفاده از مقطع کاهش‌یافته در دو انتهای تیر قاب خمشی، مقدار سختی جانبی قاب کاهش و تغییرمکان جانبی نسبی ارتجاعی آن در حدود ۴ تا ۹ درصد افزایش می‌یابد [۱۰].

مطابق با مقایسه انجام‌شده توسط **داورپناه و همکاران** [۱۱] بر روی محدودیت‌های هندسی مقاطع کاهش‌یافته، در جدول (۲) مقادیر این پارامترها طبق مبحث دهم مقررات ملی ساختمان و FEMA350 مقایسه شده است [۱۲]. در جدول (۲)، a معرف فاصله لبه مقطع کاهش‌یافته از انتهای بال، b برابر اندازه وتر دایره بریده‌شده از بال در مقطع کاهش‌یافته و c برابر با فاصله لبه بال از مرکز قطاع دایره بریده‌شده از بال تیر، b_f برابر با عرض بال و d ارتفاع تیر مورد نظر است. مطابق با مطالعات **داورپناه و همکاران**، استفاده از محدودیت‌های FEMA350 برای پارامترهای هندسی برش بال [۱۲]، موجب عملکرد مناسب‌تری به‌منظور دورکردن

¹ Malley and Popov

² Arce et al

³ End plate



تسای و همکاران^۱ [۱۵] به مطالعه رفتار لرزه‌ای اتصال تیر پیوند برشی به ستون قوطی شکل پرداختند و مشاهده کردند که هیچ یک از نمونه‌های آزمایش شده قادر به رسیدن به دوران غیرالاستیک ۰/۰۸ رادیان با اتصالات رایج تیر پیوند به ستون قبل از زلزله نورتریج نبودند. مد خرابی نهایی قالب نمونه‌ها، پارگی بال در مجاورت جوش‌های شیارهای اتصال بال تیر پیوند به ستون بود.

با توجه به پارگی‌های مشاهده شده در اتصال تیر پیوند به ستون، اکازاکی^۲ [۱۶] به بررسی رفتار اتصالات مختلف به منظور بهبود شکل‌پذیری اتصال تیر پیوند به ستون پرداخت. در گام اول اکازاکی به بررسی آزمایشگاهی ۳ نمونه تیر پیوند با طول‌های مختلف با اتصال مشابه به اتصالات تیر پیوند به ستون قبل از زلزله نورتریج پرداخت و مشاهده کرد که این نمونه‌ها قادر به دستیابی به دوران پلاستیکی بیش‌تر از نصف ظرفیت دورانی هدف نیستند و پارگی در بال تیر پیوند و در مجاورت سوراخ دسترسی جوش در تمامی نمونه‌ها مشاهده شد. اکازاکی دلیل ایجاد پارگی‌های ذکر شده را جذب انرژی ناکافی فلز جوش استفاده شده در تست شارپی، باقی ماندن ورق‌های پشت‌بند^۳ سوراخ دسترسی جوش و شکل کلی این اتصالات عنوان کرد. به منظور رفع عیوب ذکر شده، اکازاکی به بررسی اتصال تیر پیوند به ستون با استفاده از جوش‌های با توانایی جذب انرژی بیش‌تر، سوراخ دسترسی با هندسه اصلاح شده، حذف ورق‌های پشت‌بند پس از جوشکاری و استفاده از جوش تقویتی برای اتصال بال تیر پیوند به ستون پرداخت و مشاهده کرد که استفاده از اتصال تیر پیوند به ستون با استفاده از جزئیات اصلاح شده، موجب بهبود نسبی عملکرد اتصال و افزایش ظرفیت دورانی نمونه‌ها به میزان ۲۰٪ نسبت به اتصالات مربوط به قبل از زلزله نورتریج می‌شود؛ اما این بهبود رفتار جهت رسیدن به عملکردی مطلوب کافی نیست.

۱-۳-۱- اتصال تیر پیوند به ستون با مقطع کاهش یافته (RLS)^۴

هیدرون^۵ [۱۷] به تحقیق در مورد استفاده از مقاطع کاهش یافته در اتصال تیرهای پیوند به ستون با مدل‌سازی عددی پرداخت. در نمونه‌های مورد بررسی در این مطالعه، پارامترهای هندسی برش شعاعی در انتهای تیر پیوند به گونه‌ای انتخاب شده بود که مقدار

لنگر ایجاد شده در انتهای تیر پیوند، کم‌تر از ظرفیت پلاستیک مقطع کاهش یافته باشد؛ شایان ذکر است با توجه به طول کوتاه و گرا دیان لنگر شدید در تیر پیوند، در بعضی موارد نیاز به تغییر محدودیت‌های پارامترهای هندسی برش در مقطع کاهش یافته نسبت به قاب‌های خمشی است. مطابق با نتایج این تحقیق، مزیت استفاده از تیر با مقطع کاهش یافته به عنوان تیر پیوند در قاب مهاربندی و اگر، کاهش تقاضای کرنشی در انتهای تیر پیوند و همچنین کاهش نیروهای منتقل شده به سایر اعضای قاب است. با استفاده از مقطع کاهش یافته در بال‌های تیر پیوند تحت بارگذاری چرخه‌ای، مقدار کرنش در بر ستون تا ۷۵٪ کاهش یافته است. به صورت کلی با تضعیف کردن بال تیر پیوند در محل اتصال به ستون، مقدار کاهش کرنش پلاستیک در بر ستون برای تیرهای پیوند با طول متوسط و بلند بیش‌تر از تیرهای پیوند کوتاه است؛ اما مقدار این کاهش برای تیرهای پیوند برشی نیز قابل توجه است [۱۷].

مطابق با مطالعات برمن و همکاران [۱۸]، استفاده از مقطع کاهش یافته در تیر پیوند می‌تواند موجب کاهش ۶۰ الی ۸۰ درصد تقاضای کرنش پلاستیک در بر ستون و انتقال محل حداکثر این پارامتر به مرکز مقطع کاهش یافته شود. شایان ذکر است که با استفاده از مقاطع کاهش یافته در دو انتهای تیر پیوند، طول مؤثر آن کاهش یافته که می‌تواند منجر به تغییر طول نرمال شده و رفتار تسلیم شوندگی آن شود که این موضوع باید مدنظر قرار گیرد. مطابق با مطالعات ناصری‌فر و دانش [۱۹]، نمونه‌های تیر پیوند با مقطع کاهش یافته که تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند، قادر به رسیدن به دوران ۵٪ بدون بروز پارگی در جوش بال تیر به ستون هستند. کماتش جان در محل مقطع کاهش یافته به کماتش بال و زوال مقاومت در نمونه‌ها منجر می‌شود و در نهایت پارگی جوش بال تیر پیوند به ورق فلنجی حالت نهایی مقطع را تعیین می‌کند.

۲- صحت‌سنجی مدل‌سازی

در این تحقیق به منظور مدل‌سازی از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده است؛ با توجه به تقریبی بودن حل به روش اجزای محدود، لازم است تا شرایط مورد نیاز برای دستیابی به حل با دقت قابل قبول در نرم‌افزار، من جمله اندازه مش‌ها، نوع المان‌های مورد

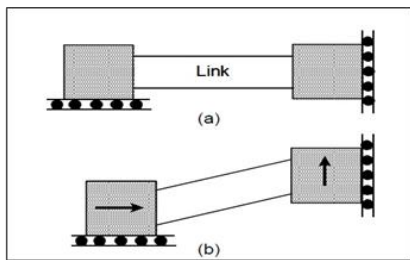
¹ Tsai et al

² Taichiro Okazaki

³ Backing bars

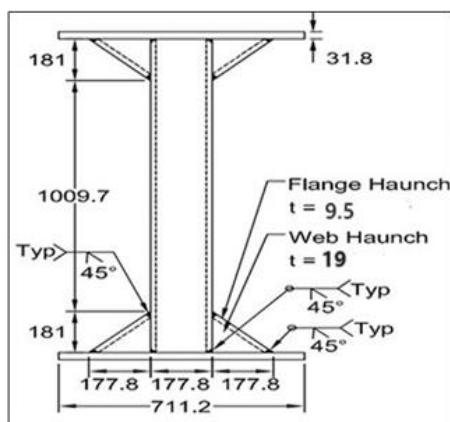
⁴ Reduced Link Section

⁵ Heidrun Osp Hauksdottir



شکل ۳- شرایط مرزی تیرهای پیوند در آزمایش‌های برمن و بروئو [۲]

ضخامت بال و جان تیر مورد نظر به ترتیب برابر با ۱۵/۹ و ۹/۵ میلی‌متر و ابعاد بیرون تا بیرون بال و بیرون تا بیرون جان به ترتیب برابر با ۱۷۷/۸ و ۲۶۰/۴ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. شکل کلی نمونه و طول آن در شکل (۴) نشان داده شده است. اتصال تیر پیوند به سایر اجزای آزمایش توسط اتصال فلنجی با ۱۴ عدد پیچ پرمقاومت A490 با قطر ۲۵/۴ میلی‌متر به همراه دو ورق اتصال با ضخامت ۳۱/۸ میلی‌متر برقرار شده است؛ مدول الاستیسیته فولاد مورد استفاده برابر با ۲۰۰ گیگاپاسکال، چگالی فولاد ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و نسبت پواسون آن برابر ۰/۳ تعریف شده است؛ همچنین تنش تسلیم فولاد بال و جان نمونه تیر پیوند مورد نظر، به ترتیب برابر با ۳۷۱ و ۳۸۵ مگاپاسکال تعیین شده است.



شکل ۴- شکل کلی نمونه تیر پیوند [۲]

۱-۱-۲- رفتار پلاستیک مصالح

به منظور تعیین شروع تسلیم‌شدگی المان تحت تنش‌های چندمحوره، غالباً معیار تسلیم فون میز^۴ برای مصالح ایزوتروپیک استفاده می‌گردد. فون میز معیار تسلیم خود را بر حسب نامتغیر دوم تانسور تنش انحراف‌آور ارائه کرده است؛ سخت‌شدگی

استفاده، مدل‌های مناسب برای تعریف رفتار مصالح و شرایط مرزی و ... از طریق مدل‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی و مقایسه نتایج، مورد بررسی قرار گیرد تا در مدل‌سازی‌های بعدی نیز نتایج به دست آمده قابل استناد باشد. با توجه به این که تاکنون آزمایشی بر روی تیر پیوند قوطی شکل با مقطع کاهش یافته انجام نگرفته، در این بخش از تحقیق از دو نمونه مختلف آزمایشگاهی، یک نمونه تیر پیوند قوطی شکل با رفتار برشی-خمشی و دارای اتصال فلنجی در دو انتها (مطابق تحقیقات برمن و بروئو [۳]) و یک نمونه اتصال خمشی تیر به ستون دارای تیر با مقطع کاهش یافته (مطابق تحقیقات پاچومیس^۱ و همکاران [۲۰]) به منظور صحت‌سنجی مدل‌سازی استفاده شده است.

۱-۲- صحت‌سنجی تیر پیوند قوطی شکل

در این قسمت، از یک نمونه تیر پیوند قوطی شکل با رفتار متوسط (طول نرمال شده برابر با ۲/۱) و بدون سخت‌کننده‌های میانی که توسط برمن و بروئو [۳] مورد آزمایش قرار گرفته و در دو انتها توسط اتصال فلنجی به سایر اجزا متصل شده، به منظور صحت‌سنجی دقت مدل‌سازی استفاده شده است. در دو انتهای تیر پیوند برای شبیه‌سازی بهتر شرایط مرزی در محل اتصال مهاربندی‌ها توسط ورق گاست و همچنین جلوگیری از ایجاد پارگی به دلیل تغییر ناگهانی مقطع در محل اتصال تیر به ورق انتهایی، لچکی‌هایی^۲ تعبیه شده است. جهت جلوگیری از ایجاد نیروهای محوری در تیر پیوند، پیکربندی آزمایش به گونه‌ای تنظیم شده که تیر بارگذاری^۳ قادر به حرکت انتقالی در جهت محور طولی تیر پیوند باشد؛ اما اجازه دوران به آن داده نشده است. شرایط مرزی تیر پیوند به صورت ساده شده در شکل (۳) نشان داده شده است. بارگذاری جابه‌جایی کنترل به صورت جابه‌جایی عمود بر محور تیر مطابق با پروتکل بارگذاری AISC 2002 بر نمونه اعمال گردیده است.

^۴ von Mises yield criterion

^۱ Pachoumis

^۲ Haunches

^۳ Loading beam

جدول ۳- پارامترهای سخت‌شدگی ترکیبی

پارامتر	فولاد جان	فولاد بال
تنش تسلیم (MPa)	۳۸۵	۳۷۱
C_1 (MPa)	۱۱۲۰۰	۳۴۰۰
γ_1	۲۸۰	۱۷۰
C_2 (MPa)	۲۵۰۰	۳۰۰۰
γ_2	۵۰	۸۰
C_3 (MPa)	۷۰۰	۱۰۰۰
γ_3	۳.۲	۵
b	۵	۸
k_{∞} (MPa)	۵۵	۶۰

۲-۱-۲- مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس

به منظور افزایش دقت مدل‌سازی و در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری مربوط به پیکربندی آزمایش، اتصال فلنجی در دو انتهای تیر پیوند و همچنین قسمتی از تیرهای بارگذاری و پایه نیز مدل شده‌اند. با توجه به عملکرد اصطکاکی پیچ‌ها در اتصال فلنجی، ضریب اصطکاک 0.7 بین اجزای در حال تماس با یک‌دیگر در نظر گرفته شده است. همچنین نیروی پیش‌تندگی پیچ‌ها برابر با 260 کیلونیوتن در نرم‌افزار اعمال شد. شکل (۵) نمونه مدل‌سازی شده در نرم‌افزار را نشان می‌دهد.

برای مدل‌سازی از المان‌های توپر با نام اختصاری C3D8I در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. استفاده از روش تحلیل دینامیکی ضمنی^۵ و در نظر گرفتن روند حل و بارگذاری به صورت شبه‌استاتیکی، می‌تواند منجر به همگرایی آسان‌تر در طول حل و دقت بالاتر حل شود؛ به همین دلیل در این قسمت از روش مذکور استفاده شده است. برای واقعی‌تر کردن رفتار مدل ساخته شده، $1/200$ عرض ورق‌ها به عنوان اندازه ناکاملی هندسی در نرم‌افزار آباکوس لحاظ شده است. شکل کلی این ناکاملی با استفاده از تحلیل مقدار ویژه^۶ و مطابق با شکل کمانش یافته در مدهای اول و دوم کمانشی در نظر گرفته شده است. در نهایت با توجه به موارد ذکر شده، نمودارهای هیستریزس و انرژی کرنشی تلف‌شدهٔ تجمعی کل نمونه آزمایشگاهی و مدل‌سازی شده، در شکل (۶)

کرنشی در فولاد، نحوه تغییرات سطح تسلیم پس از ارضاشدن رابطه تسلیم را ارائه می‌کند. سه نوع سخت‌شدگی ایزوتروپیک^۱، سینماتیک^۲ و ترکیبی، از مقبولیت زیادی در میان محققان برخوردار هستند. در سخت‌شدگی ایزوتروپیک، محل مرکز سطح تسلیم ثابت باقی مانده، اما اندازه آن در تمام جهات به صورت یکسان بزرگ می‌شود. در سخت‌شدگی سینماتیک، اندازه سطح تسلیم ثابت باقی می‌ماند؛ اما محل مرکز سطح تسلیم جابه‌جا می‌شود. با توجه به این که مطالعات مختلف وجود هر دو نوع سخت‌شدگی را در فولاد شناسایی کرده‌اند، سخت‌شدگی ترکیبی با ترکیب دو نوع سخت‌شدگی نام برده شده از دقت مناسب‌تری در مدل‌سازی سخت‌شدگی فولاد برخوردار است. در این تحقیق از سخت‌شدگی ترکیبی چابوچی^۳ [۲۱] به منظور مدل‌سازی رفتار پلاستیک فولاد، مطابق روابط (۱) و (۲) استفاده شده است.

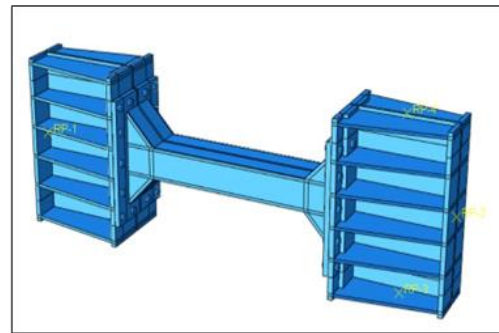
$$\alpha = \sum \alpha^i = \sum [\alpha_0^i e^{-\gamma_i(\varepsilon^p)} + \frac{C_i}{\gamma_i} [1 - e^{-\gamma_i(\varepsilon^p)}]] \quad (1)$$

$$k = k_0 + k_{\infty} (1 - e^{-b\varepsilon_{eq}^p}) \quad (2)$$

در رابطه (۱) برای سخت‌شدگی کرنشی سینماتیک، α سابقه تنش^۴ نام دارد و معرف محل مرکز سطح تسلیم در سخت‌شدگی سینماتیک است. C_i و γ_i ، به ترتیب معرف شیب اولیه سخت‌شدگی و نرخ کاهش شیب در سابقه تنش^۴ نام و از ثابت‌های مصالح هستند. ε^p نماد کرنش پلاستیک و α_0^i سابقه تنش اولیه است. رابطه (۲) معرف سخت‌شدگی کرنشی ایزوتروپیک است که در آن k معرف اندازه سطح تسلیم، k_0 اندازه اولیه سطح تسلیم، k_{∞} حداکثر تغییر در اندازه سطح تسلیم، b ثابت مصالح و ε_{eq}^p مقدار کرنش پلاستیک معادل است. در نهایت مطابق با روش ذکر شده برای کالبره کردن پارامترهای سخت‌شدگی در مطالعه پسران و فغانی [۲۲] با توجه به نمودارهای تنش-کرنش ارائه شده برای فولادهای مورد نظر، مقادیر پارامترهای سخت‌شدگی کرنشی مطابق با جدول (۳) به دست آمده است.

^۵ Dynamic implicit^۶ Eigen value analysis^۱ Isotropic^۲ Kinematic^۳ Chaboche^۴ Backstress

مقایسه شده‌اند که این شکل نشان‌دهنده دقت مناسب مدل‌سازی انجام شده است.

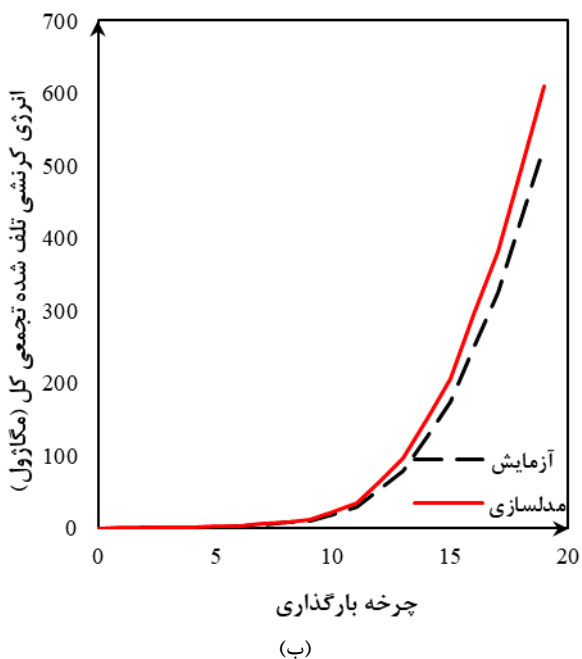
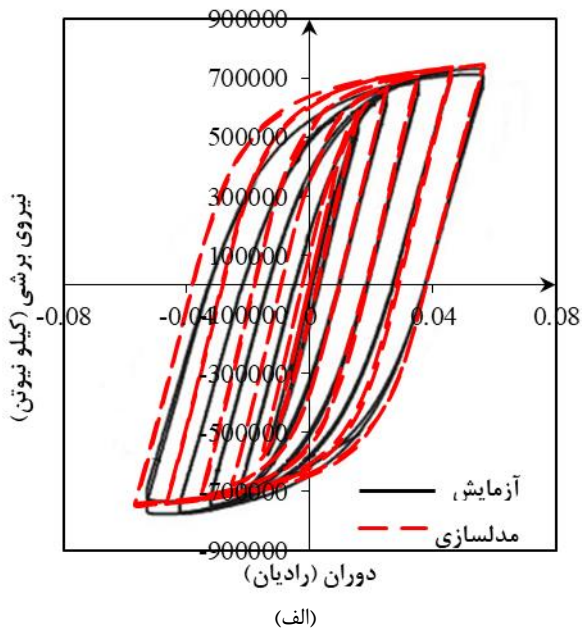


شکل ۵- مدل‌سازی تیر پیوند در نرم‌افزار آباکوس

۲-۲- صحت‌سنجی اتصال خمشی تیر کاهش‌یافته به ستون

به‌منظور صحت‌سنجی مدل‌سازی برای اتصال RBS، از آزمایش انجام‌شده توسط پاچومیس و همکاران [۲۰] استفاده شده است. ابعاد کلی مربوط به این اتصال در شکل (۷) و مشخصات تیر و ستون مورد استفاده در آزمایش، در جدول (۴) ارائه شده است. مقادیر پارامترهای هندسی در مقطع کاهش‌یافته، a و b و c نیز به‌ترتیب برابر با ۷۲، ۱۰۲/۶ و ۲۲/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. تنش تسلیم و تنش نهایی فولاد مورد استفاده در تمام قسمت‌های نمونه مورد نظر به‌ترتیب برابر با ۳۱۰ و ۴۳۰ مگاپاسکال ارائه شده است. با توجه به این که آزمایش چرخه‌ای برای فولاد مورد نظر به‌منظور به‌دست‌آوردن پارامترهای سخت‌شدگی ترکیبی ارائه نگردیده است، برای تعریف رفتار پلاستیک فولاد، از سخت‌شدگی ترکیبی با واردکردن مقادیر تنش-کرنش واقعی به‌دست‌آمده از تست کشش (نیم‌چرخه)^۱ در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است.

به‌منظور بارگذاری از پروتکل بارگذاری موجود در AISC2002 استفاده شده است که این پروتکل بر مبنای جابه‌جایی تسلیم اتصال ارائه شده است. جهت مدل‌سازی، از المان‌های پوسته‌ای^۲ S8R5 استفاده شده است. المان ذکرشده دارای ۸ گره و ۵ درجه آزادی شامل ۳ درجه آزادی انتقالی و ۲ درجه آزادی دورانی در هر گره است. نمونه مدل‌سازی‌شده در نرم‌افزار آباکوس، در شکل (۸) نشان داده شده است.



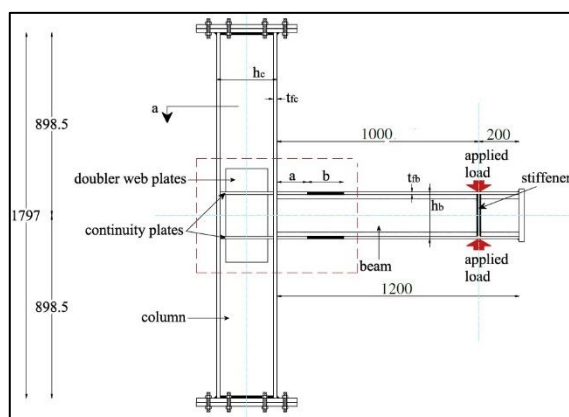
شکل ۶- مقایسه (الف) نمودار هیستریزیس و (ب) اتلاف انرژی کرنشی تجمعی کل نمونه مدل‌شده در مقاله حاضر با نمونه آزمایشگاهی مربوط به مرجع [۳]

به‌منظور افزایش دقت مدل‌سازی، ناکاملی‌های هندسی اولیه با اندازه ۱/۲۰۰ عرض بال و متناسب با مدهای کم‌انرژی اول و دوم حاصل از تحلیل کم‌انرژی در نرم‌افزار آباکوس اعمال شده است. برای تحلیل نمونه موردنظر تحت بارگذاری چرخه‌ای، از روش

^۱ Half cycle

^۲ Shell element

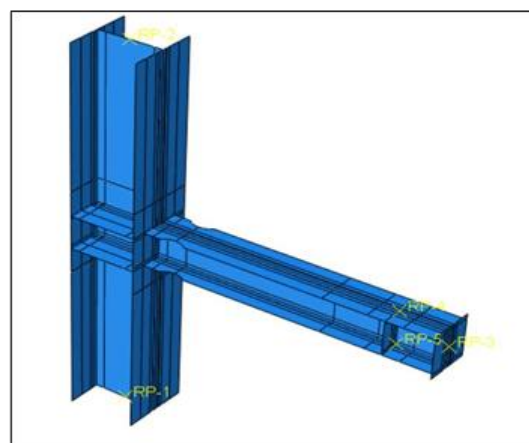
دینامیکی ضمنی به صورت شبه استاتیکی استفاده شده است. در نهایت منحنی‌های هیستریزیس لنگر دوران و انرژی کرنشی تلف شده تجمعی کل به دست آمده از آزمایش و مدل سازی در شکل (۹) مقایسه شده اند.



شکل ۷- ابعاد کلی اجزای اتصال [۱۹]

جدول ۴- مشخصات تیر و ستون در نمونه مورد نظر

	نوع مقطع	ضخامت			
		عمق مقطع (mm)	عرض مقطع (mm)	ضخامت جان (mm)	ضخامت بال (mm)
تیر	HE 180A	۱۷۱	۱۸۰	۶	۹.۵
ستون	HE 300B	۳۰۰	۳۰۰	۱۱	۱۹



شکل ۸- نمونه مدل سازی شده در آباکوس

۳- بررسی پارامتری استفاده از مقطع کاهش یافته در تیر پیوند قوطی شکل

در این بخش از تحقیق، استفاده از مقاطع کاهش یافته (RLS) به منظور کاهش مقدار تقاضای تغییرشکلی (کرنش پلاستیک) در مجاورت جوش های نفوذی انتهایی اتصال تیر پیوند قوطی شکل

و در نتیجه افزایش عمر پارگی تیر پیوند تحت بارگذاری چرخه ای مورد بررسی قرار گرفته است.

با استفاده از مقطع کاهش یافته در بال تیر پیوند، مقدار لنگر خمشی مورد نیاز در انتهای تیر، به واسطه کاهش مقاومت خمشی و ایجاد فیوز سازه ای در محل مقطع کاهش یافته، محدود می شود. نمودار لنگر خمشی در طول یک تیر پیوند با مقطع کاهش یافته در شکل (۱۰) نمایش داده شده است.

مطابق با پیشنهاد هیدرون و همکاران [۱۷]، به منظور طراحی پارامترهای هندسی مقطع کاهش یافته در تیرهای پیوند I شکل، دو محدودیت زیر باید رعایت شوند:

(۱) تقاضای لنگر انتهای تیر پیوند هنگامی که تقاضای لنگر در مقطع کاهش یافته به ظرفیت پلاستیک مقطع کاهش یافته رسید، به ظرفیت پلاستیک مقطع کاهش نیافته تیر، محدود گردد؛ تا مفصل پلاستیک در مقطع کاهش یافته قبل از انتهای تیر تشکیل شود (رابطه (۳)). با توجه به گرا دیان شدیدتر لنگر در تیرهای پیوند به دلیل طول کوتاه تر این تیرها نسبت به تیرهای موجود در قاب خمشی، دست یافتن به ξ کوچک تر از ۱ غالباً ممکن نیست (۴) نسبت لنگر مورد تقاضا در انتهای تیر پیوند، هنگامی که تقاضای لنگر در مقطع کاهش یافته به ظرفیت پلاستیک مقطع کاهش یافته رسید، به لنگر پلاستیک مقطع کاهش نیافته است) و به همین دلیل هیدرون استفاده از پارامترهای a و b کوچک تر و c بزرگ تر از مقادیر پیشنهاد شده برای اتصالات RBS در قاب های خمشی را مجاز دانست.

آن ها حداقل مقدار a را برابر با $3/5$ اینچ و حداکثر مقدار c را در صورت نیاز برابر $0.275b_f$ پیشنهاد کردند. به منظور بزرگ تر نشدن قطاع کاهش یافته از نیم دایره، حداکثر اندازه پارامتر b نباید بیش تر از $2c$ شود. در این بخش برای مطالعه پارامتری، هر یک از سه پارامتر a ، b و c در چهار سطح مطابق با جدول (۵) مورد بررسی قرار گرفته اند.

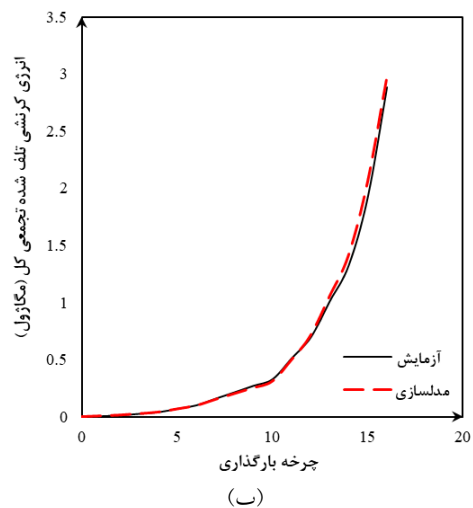
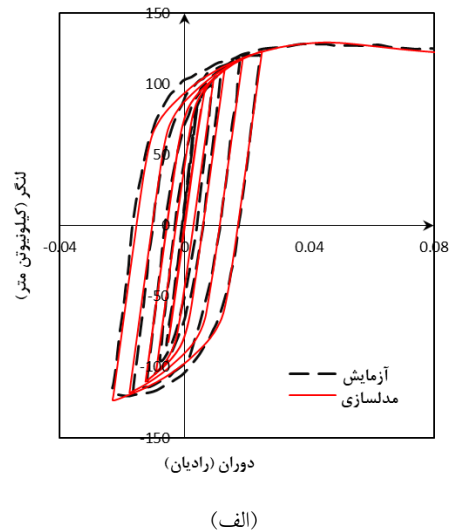
$$M_L = \frac{eM_{PRLS}}{e_{RLS}} \leq M_P \quad (3)$$

در این رابطه M_L لنگر مورد تقاضا در انتهای تیر پیوند و M_P ظرفیت پلاستیک مقطع کاهش نیافته است.

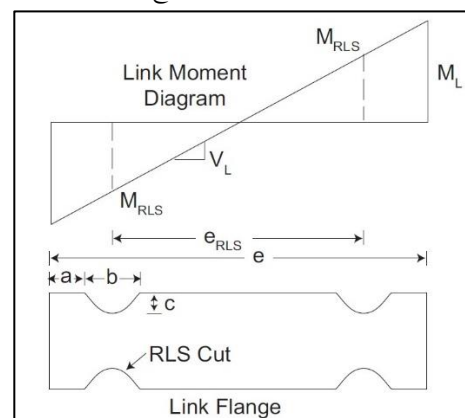
(۲) رفتار تیر پیوند با مقطع کاهش یافته از لحاظ نوع مکانیزم تسلیم مشابه با تیر پیوند بدون مقطع کاهش یافته باشد به این معنی که طول نرمال شده (رابطه (۴)) در محل مقاطع کاهش یافته تیرهای پیوند کوتاه کوچک تر از $1/6$ ، برای تیرهای پیوند متوسط بین $1/6$ تا $2/6$ و برای تیرهای پیوند بلند بیش تر از $2/6$ در نظر گرفته شود.

$$\rho_{RLS} = \frac{V_{PRLS}}{M_{PRLS}} \quad (4)$$

در این رابطه V_p ظرفیت برش پلاستیک مقطع تیر است.



شکل ۹- مقایسه (الف) نمودار هیستریزس و (ب) اتلاف انرژی کرنشی تجمعی کل نمونه مدل شده در مقاله حاضر با نمونه آزمایشگاهی مربوط به مرجع [۱۹]



شکل ۱۰- نمودار لنگر در تیر پیوند با مقطع کاهش یافته [۱۶]

جدول ۵- مقادیر پارامترهای a، b و c مورد بررسی

پارامترهای	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
هندسی مقطع				
کاهش یافته				
a	$0.375b_f$	$0.5b_f$	$0.625b_f$	$0.75b_f$
b	$0.55d$	$0.65d$	$0.75d$	$0.85d$
c	$0.1b_f$	$0.175b_f$	$0.25b_f$	$0.275b_f$

۳-۱- مشخصات نمونه‌های مورد نظر برای مدل‌سازی به صورت پارامتری

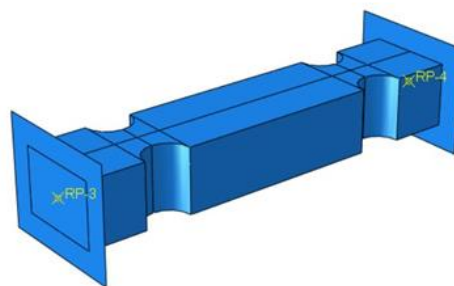
به منظور بررسی نحوه تغییر رفتار تیر پیوند قوطی شکل با تغییرات پارامترهای هندسی مقطع کاهش یافته، یک نمونه تیر پیوند قوطی شکل با ضخامت بال و جان به ترتیب برابر ۱۸ و ۱۰ میلی متر و ارتفاع و عرض کلی ۱۸۱ و ۲۳۵ میلی متر انتخاب شده است. مشخصات فولاد در نظر گرفته شده برای بال و جان این نمونه مشابه با نمونه تیر پیوند قوطی شکل صحت سنجی شده در قسمت قبلی مطابق با جدول (۳) در نظر گرفته شده است. نسبت فشردگی بال و جان در نمونه مورد نظر به ترتیب برابر با ۱۲ و ۱۴/۵ است و به این ترتیب از بروز کمناش های موضعی بال و جان قبل از رسیدن به دوران هدف (بدون استفاده از سخت کننده های میانی) جلوگیری می گردد (مطابق با جدول (۱)). به منظور بررسی تأثیر استفاده از مقطع کاهش یافته بر روی هر سه نوع مکانیزم تسلیمی تیر پیوند، طول نمونه ها برای تیرهای پیوند کوتاه، متوسط و بلند به ترتیب برابر ۶۶۰/۲، ۱۰۴۰ و ۱۴۶۰ میلی متر در نظر گرفته شده است؛ بنابراین طول نرمال شده تیرهای پیوند مورد نظر به ترتیب برابر با ۱/۴۹، ۲/۳۵ و ۳/۳۰ به دست می آید. در نام گذاری نمونه های مورد نظر، حروف (S)، (I) و (F) به ترتیب به معنای برشی، متوسط و خمشی هستند.

در این بخش برای مدل سازی از المان های پوسته ای S8R5 استفاده شده است. یک نمونه تیر پیوند قوطی شکل با مقطع کاهش یافته مدل سازی شده در نرم افزار، در شکل (۱۱) نشان داده شده است. شرایط مرزی نمونه ها مشابه با شرایط مرزی نمونه تیر پیوند قوطی شکل صحت سنجی شده در قسمت قبلی در نظر گرفته شده است. به منظور بارگذاری، از پروتکل بارگذاری اصلاح شده تیر پیوند، توسط ریچاردز و یانگ [۲۳] استفاده شده است که در جدول (۶) آمده است. برای در نظر گرفتن نقص های هندسی اولیه در نمونه ها، تحلیل مقدار ویژه برای تعیین شکل مدهای کمناشی استفاده شده و حداکثر اندازه این نقص های هندسی برابر با ۱/۲۰۰

¹ Richards and Uang



عرض ورق‌های متناظر در مدل‌سازی وارد شد. به‌منظور مدل‌سازی نمونه‌ها از روش تحلیل دینامیکی ضمنی به‌صورت شبه‌استاتیکی استفاده شده است.



شکل ۱۱- نمونه مدل‌سازی شده تیر پیوند قوطی شکل با مقطع کاهش یافته

به‌منظور بررسی تأثیر اندازه مش بر روی پاسخ نمونه‌ها، از یک نمونه تیر پیوند متوسط با ۳ اندازه مش ۰/۵، ۱ و ۲ اینچ استفاده شد و مشاهده شد که با تغییر اندازه مش از ۰/۵ به ۲ اینچ، منحنی‌های هیستریزس بر هم منطبق هستند؛ اما پارامتر کرنش پلاستیک معادل (PEEQMax) حساسیت بیشتری به اندازه مش‌ها نشان می‌دهد و با در نظر گرفتن بُعد مش برابر با ۱ اینچ، نتایج همگرا می‌شوند. جهت امکان مقایسه دقیق‌تر نتایج برای مدل‌سازی پارامتری، اندازه مش در تمام نمونه‌ها به‌منظور دقت مناسب مدل‌سازی و همچنین اقتصادی‌بودن هزینه محاسباتی، برابر با ۱ اینچ در نظر گرفته شده است.

۲-۳- نتایج مدل‌سازی

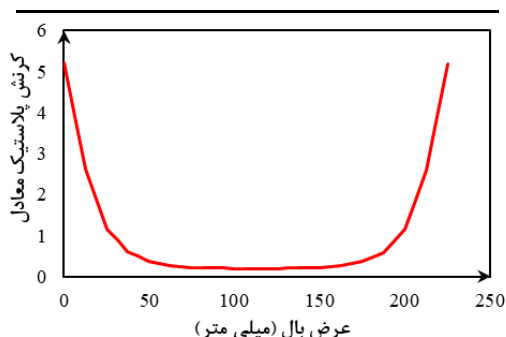
۲-۳-۱- بررسی کرنش پلاستیک معادل در بال تیر پیوند

در این قسمت از پارامتر کرنش پلاستیک معادل (PEEQMAX) در نرم‌افزار آباکوس) که بیانگر مقدار کرنش پلاستیک تجمعی از ابتدای بارگذاری چرخه‌ای است استفاده شده است. در شکل (۱۲) نحوه توزیع کرنش پلاستیک معادل در عرض بال در انتهای تیر پیوند قوطی شکل با رفتار خمشی نمایش داده شده است؛ مطابق با این شکل، مقدار حداکثر کرنش پلاستیک معادل در گوشه‌های خارجی مقطع قوطی ایجاد می‌شود و مقدار این پارامتر با حرکت به سمت وسط بال کاهش می‌یابد (روند تغییر کرنش پلاستیک معادل در عرض بال برای نمونه‌های متوسط و برشی مشابه با نمونه خمشی است). کانتور کرنش پلاستیک معادل برای سه نمونه S49، I42 و F45 در شکل (۱۳) ارائه شده که تمرکز کرنش پلاستیک در گوشه‌های مقطع و همچنین در مقطع کاهش یافته را نشان می‌دهد. نحوه تغییر کرنش پلاستیک معادل (در دوران

پلاستیک هدف ۰/۰۲ رادیان) در گوشه‌های بال در تیر پیوند بلند با تغییرات پارامترهای هندسی مقطع کاهش یافته در شکل (۱۴) نمایش داده شده است. مطابق با شکل (۱۴) تغییرات کرنش پلاستیک معادل در انتهای تیر پیوند با تغییر پارامتر b قابل اغماض است؛ با افزایش پارامتر c و کاهش پارامتر a مقدار کرنش پلاستیک معادل در انتهای تیر پیوند کاهش می‌یابد؛ اما تأثیر پارامتر c بر تغییر کرنش پلاستیک معادل به مراتب از پارامتر a بیش‌تر است.

جدول ۶- پروتکل بارگذاری اصلاح شده توسط ریچاردز و یانگ

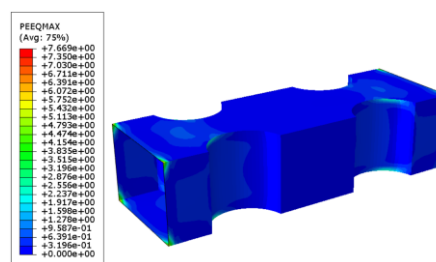
تعداد تکرار	دوران تیر پیوند (رادیان)
۶	۰/۰۰۳۷۵
۶	۰/۰۰۵
۶	۰/۰۰۷۵
۶	۰/۰۱
۴	۰/۰۱۵
۴	۰/۰۲
۲	۰/۰۳
۱	۰/۰۴
۱	۰/۰۵
۱	۰/۰۷
۱	۰/۰۹
۱	۰/۱۱



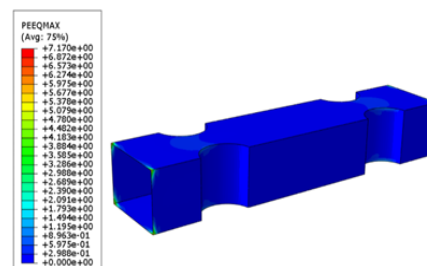
شکل ۱۲- توزیع کرنش پلاستیک معادل در عرض انتهای بال تیر پیوند قوطی شکل بلند

نرخ کاهش کرنش پلاستیک معادل در انتهای تیر پیوند با کاهش پارامتر a، برای مقادیر بزرگ‌تر پارامتر c، افزایش می‌یابد؛ همچنین نرخ کاهش کرنش پلاستیک معادل با افزایش پارامتر c برای مقادیر کوچک‌تر a شدیدتر است. روند کلی تغییرات کرنش پلاستیک معادل در گوشه بال برای نمونه‌های متوسط و برشی نیز مشابه با نمونه‌های خمشی است.

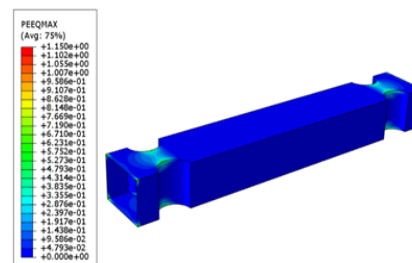
مقادیر حداکثر کرنش پلاستیک معادل در انتهای بال تیر پیوند
 قوطی شکل بدون مقطع کاهش یافته در دوران هدف (۰/۰۸) رادیان
 برای تیر پیوند برشی، ۰/۰۳۵ رادیان برای تیر پیوند متوسط و
 ۰/۰۲ رادیان برای تیر پیوند بلند) به همراه حداکثر کاهش این
 پارامتر با استفاده از مقطع کاهش یافته، برای انواع تیر پیوند در
 جدول (۷) ارائه شده است. مطابق با این جدول، استفاده از مقطع
 کاهش یافته در تیرهای پیوند قوطی شکل بلند (به دلیل گرا دیان لنگر
 کوچک تر) مؤثرتر از نمونه های متوسط و برشی است و استفاده
 از مقطع کاهش یافته در تیر پیوند کوتاه، کم ترین تأثیر را بر مقدار
 حداکثر کرنش پلاستیک معادل در انتهای بال دارد؛ با کاهش مقادیر
 پارامترهای a و b و افزایش پارامتر c نسبت به محدودیت
 ارائه شده در مبحث دهم مقررات ملی ساختمان (جدول (۲))
 می توان به مقادیر کاهش بیش تری برای مقدار کرنش پلاستیک
 معادل در تیرهای پیوند رسید.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۳- کانتور کرنش پلاستیک معادل برای یک نمونه (الف) تیر

پیوند برشی (ب) متوسط (ج) خمشی

جدول ۷- تأثیر مقطع کاهش یافته بر کرنش پلاستیک معادل در گوشه بال تیر پیوند قوطی شکل

نوع تیر پیوند	حداکثر کرنش پلاستیک	حداکثر درصد کاهش	حداکثر درصد کاهش کرنش پلاستیک
	معادل در نمونه بدون مقطع کاهش یافته و در دوران هدف	کرنش پلاستیک معادل بدون تجاوز از محدودیت های هندسی مبحث دهم	معادل با تجاوز از محدودیت های هندسی مبحث دهم
تیر پیوند بلند	۲/۷۹	۵۵٪	۶۸٪
تیر پیوند متوسط	۵/۴۵	۳۷٪	۴۲٪
تیر پیوند کوتاه	۸/۴	۲۰٪	۳۸٪

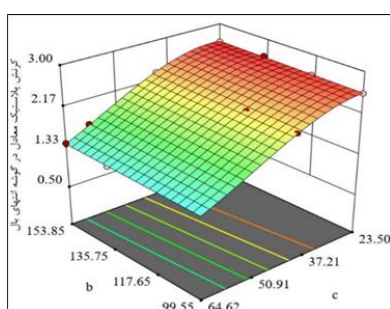
است؛ مطابق با تحقیقات **هیدرون**، حداکثر مقدار کرنش پلاستیک
 در انتهای تیرهای پیوند I شکل با در نظر گرفتن پارامتر ξ به مقدار
 ۰/۸۶، برای انواع نمونه های برشی، متوسط و خمشی، به ترتیب تا
 ۷۵٪، ۹۸٪ و ۹۸٪ کاهش یافته است. برخلاف تیرهای پیوند I
 شکل که در آنها تمرکز کرنش پلاستیک در وسط بال رخ می دهد،
 در تیرهای پیوند قوطی شکل تمرکز کرنش در گوشه های بال اتفاق
 می افتد؛ همچنین **هیدرون** [۱۷] کاهش در مقدار کرنش پلاستیک
 در نمونه های با ξ بزرگ تر از ۱ متصور نشده بود؛ در حالی که در

مطابق با تحقیقات **هیدرون** [۱۷]، پارامتر ξ که تابع هر سه
 پارامتر a و b و c است، مهم ترین تأثیر را بر مقدار کرنش پلاستیک
 معادل در انتهای تیر پیوند دارد. نحوه تغییرات حداکثر کرنش
 پلاستیک معادل در انتهای تیر پیوند بلند با پارامتر ξ در شکل (۱۵)
 نشان داده شده است. مطابق با این شکل با کاهش پارامتر ξ مقدار
 کرنش پلاستیک معادل در انتهای تیر پیوند بلند، کاهش یافته است؛
 مطالعات **هیدرون** بر روی تیرهای پیوند I شکل نیز کاهش کرنش
 پلاستیک در انتهای تیر پیوند با کاهش پارامتر ξ را نشان داده

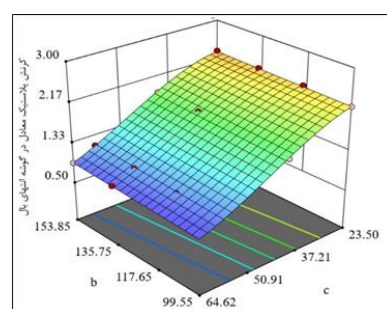
تحقیق حاضر با وجود این که مقدار ξ برای اکثر نمونه‌های متوسط و برشی بزرگ‌تر از ۱ به دست آمده (یعنی تسلیم در انتهای تیر پیوند زودتر از مقطع کاهش یافته آغاز شده)، اما به دلیل سخت‌شدگی کرنشی قابل توجه فولاد مورد استفاده، با ادامه روند بارگذاری و افزایش لنگر در محل مقطع کاهش یافته، تسلیم در مقطع کاهش یافته نیز رخ می‌دهد، سپس موجب محدود شدن کرنش پلاستیک حداکثر در انتهای تیر پیوند می‌شود. به این ترتیب در صورت قابل توجه بودن سخت‌شدگی فولاد مورد استفاده حتی با وجود مقادیر ξ بزرگ‌تر از ۱ نیز می‌توان کرنش پلاستیک در انتهای تیر پیوند را کم‌تر کرد؛ اما ممکن است مقدار این کاهش جهت جلوگیری از ایجاد پارگی در انتهای تیر پیوند کافی نباشد و به همین دلیل تا حد امکان استفاده از مقادیر ξ کوچک‌تر از ۱ ارجح است. روند کلی تغییرات برای نمونه‌های برشی و متوسط

نیز مشابه با نمونه‌های تیر پیوند خمشی است؛ اما پراکندگی داده‌های آن‌ها بیش‌تر است.

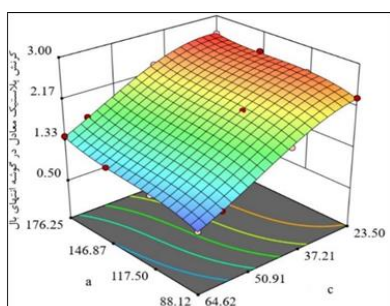
به صورت کلی، استفاده از مقطع کاهش یافته منجر به کاهش کرنش پلاستیک معادل در انتهای تیر و افزایش این پارامتر در محل مقطع کاهش یافته می‌شود. مقدار کرنش پلاستیک معادل در گوشه بال در تغییرات حداکثر کرنش پلاستیک معادل در مرکز مقطع کاهش یافته و کرنش پلاستیک معادل در انتهای تیر پیوند با تغییر پارامترهای هندسی a و b و c معکوس یک‌دیگر هستند اما تأثیر پارامتر b بر تغییر مقدار کرنش پلاستیک معادل در مقطع کاهش یافته بیش‌تر از تأثیر آن در کرنش پلاستیک معادل در انتهای تیر پیوند است. در شکل (۱۴) توزیع کرنش پلاستیک معادل در گوشه بال تیر پیوند بلند نمایش داده شده است.



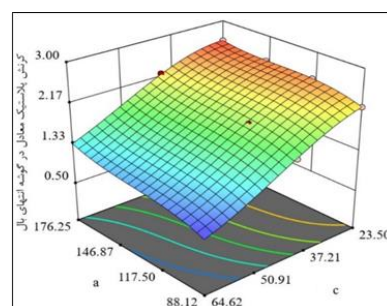
ب) $a = 176.25 \text{ mm}$



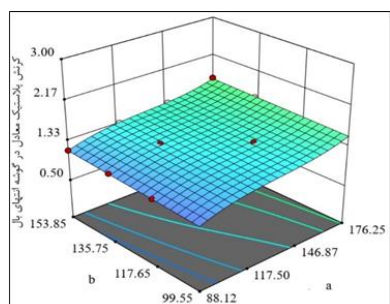
الف) $a = 88.12 \text{ mm}$



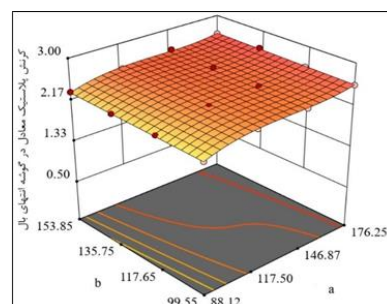
ت) $b = 153.85 \text{ mm}$



پ) $b = 99.55 \text{ mm}$



ج) $c = 58.75 \text{ mm}$



س) $c = 23.5 \text{ mm}$

شکل ۱۴- نحوه تغییرات کرنش پلاستیک معادل در گوشه بال تیر پیوند بلند

۳-۲-۲- اتلاف انرژی در تیر پیوند قوطی شکل با مقطع

کاهش یافته

اتلاف انرژی نسبت به نمونه‌های بدون مقاطع کاهش یافته در انواع مختلف تیر پیوند برشی، متوسط و خمشی تا دوران پلاستیک هدف به ترتیب ۰/۰۸، ۰/۰۳۵ و ۰/۰۲ رادیان در جداول (پ-۱) تا (پ-۳) ارائه شده است. مطابق با نتایج ارائه شده، با توجه به ضعیف تر شدن بال تیر در محل مقطع کاهش یافته و تسلیم مصالح بال در این ناحیه، قسمت بزرگتری از بال در اتلاف انرژی زلزله شرکت می‌کند و به این ترتیب اتلاف انرژی تا دوران هدف در غالب نمونه‌ها، از نمونه‌های بدون مقطع کاهش یافته بیشتر است. مقدار اتلاف انرژی در نمونه‌های تیر پیوند برشی دارای مقطع کاهش یافته تا ۳۵٪، اتلاف انرژی نمونه‌های تیر پیوند متوسط دارای مقطع کاهش یافته تا ۱۵۸٪ و اتلاف انرژی نمونه‌های تیر پیوند بلند با مقطع کاهش یافته، تا ۲۵۰٪ بیش تر از نمونه بدون مقطع کاهش یافته متناظر است. با کاهش پارامترهای a و b و افزایش پارامتر c ، اتلاف انرژی تیر پیوند افزایش می‌یابد. افزایش پارامتر c بیشترین تأثیر را بر افزایش اتلاف انرژی تیر پیوند دارد و تأثیر پارامتر a در تغییر اتلاف انرژی تیر پیوند بیش تر از پارامتر b است.

۳-۲-۳- مقادیر اضافه مقاومت برای تیرهای پیوند قوطی شکل

با مقطع کاهش یافته

مطابق با مقادیر اضافه مقاومت ارائه شده در جدول‌های (پ-۱) تا (پ-۳)، با استفاده از مقطع کاهش یافته در تیر پیوند قوطی شکل می‌توان نیروی منتقل شده به اعضای نیرو کنترل قاب را برای تیرهای پیوند برشی، متوسط و خمشی به ترتیب تا حداکثر ۱۴٪، ۲۳٪ و ۳۸٪ کاهش داد. با کاهش نیروی منتقل شده به اعضای نیرو کنترل قاب، می‌توان این اعضا را برای نیروهای کوچکتری طراحی کرد. با افزایش پارامتر a اضافه مقاومت تیر پیوند افزایش و با افزایش پارامتر c ، مقدار آن کاهش پیدا می‌کند. تأثیر پارامتر b بر اضافه مقاومت تیر پیوند ناچیز است. نمودار هیستریزس (و کاهش حداکثر نیروی برشی) برای یک نمونه تیر پیوند بلند بدون مقطع کاهش یافته و یک نمونه دارای مقطع کاهش یافته (نمونه F28) در شکل (۱۶) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با توجه به این که معیاری برای پارگی فولاد در تحقیق حاضر در نظر گرفته نشده است، کماتش‌های موضعی حالت نهایی مقاطع را تعیین می‌کند.

۳-۲-۴- سختی ارتجاعی در تیر پیوند قوطی شکل با مقطع

کاهش یافته

مشابه با اتصالات RBS در قاب خمشی، استفاده از مقطع کاهش یافته در تیرهای پیوند قوطی شکل در قاب مهاربندی و اگرچه نیز موجب کاهش سختی ارتجاعی و در نتیجه افزایش تغییر شکل جانبی قاب می‌گردد. سختی مؤثر تیرهای پیوند در آیین‌نامه FEMA-356 [۲۴]، از ترکیب سختی برشی و خمشی مطابق رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$K_e = \frac{K_s K_b}{K_s + K_b} \quad (5)$$

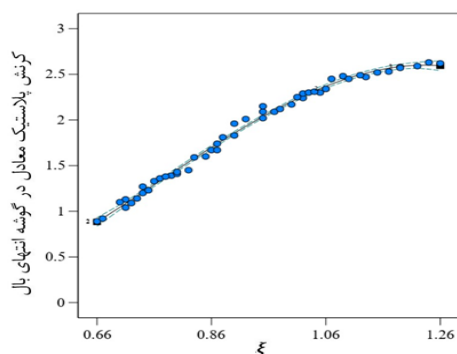
سختی خمشی (K_b) و سختی برشی (K_s) تیر پیوند نیز از روابط (۶) و (۷) تعیین می‌شوند.

$$K_b = \frac{12EI_b}{e^3} \quad (6)$$

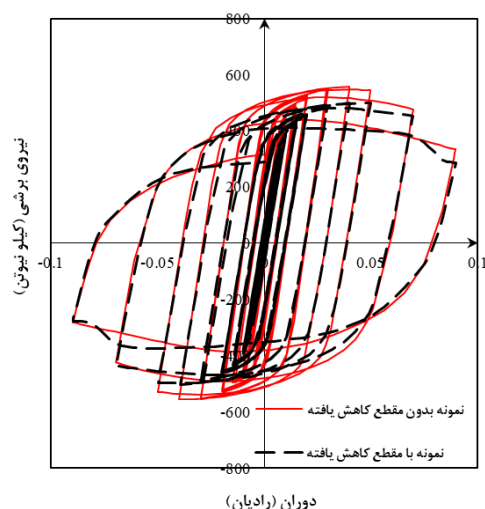
$$K_s = \frac{GA_w}{e} \quad (7)$$

در روابط فوق، I_b ممان اینرسی مقطع تیر پیوند، e طول تیر پیوند، E مدول ارتجاعی فولاد، G مدول برشی مقطع و A_w سطح خالص جان‌های مقطع قوطی است. با استفاده از مقطع کاهش یافته ممان اینرسی مقطع کاهش می‌یابد و در نتیجه سختی نیز کم می‌شود. هر چه مقدار لنگر مورد نیاز در مقطع کاهش یافته افزایش یابد (کاهش پارامترهای a و b)، تأثیر مقطع کاهش یافته بر سختی تیر بیش تر شده و سختی ارتجاعی مقطع نیز کاهش می‌یابد.

سختی ارتجاعی نمونه‌های با مقطع کاهش یافته، برای تیرهای پیوند برشی تا ۱۷٪، برای تیرهای پیوند متوسط تا ۱۹٪ و برای تیرهای پیوند خمشی تا ۲۳٪ کاهش یافته است. پارامتر c بیشترین تأثیر را بر سختی ارتجاعی تیر پیوند دارد و با افزایش آن، سختی ارتجاعی نمونه‌ها کاهش می‌یابد.



شکل ۱۵- نحوه تغییرات کرنش پلاستیک معادل در گوشه بال تیر پیوند بلند با پارامتر ξ



شکل ۱۶- مقایسه نمودار هیستریزیس یک نمونه تیر پیوند بدون مقطع کاهش یافته با نمونه دارای مقطع کاهش یافته

۴- نتیجه گیری

هدف از این تحقیق بررسی اثربخشی استفاده از مقطع کاهش یافته در تیرهای پیوند قوطی شکل، به منظور کاهش کرنش پلاستیک معادل در انتهای تیر پیوند و جلوگیری از ایجاد پارگی در این ناحیه است. استفاده از مقاطع کاهش یافته در هر سه نوع تیر پیوند برشی، متوسط و خمشی در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مدل سازی اجزای محدود نشان می دهد که:

۱) با استفاده از مقطع کاهش یافته در تیر پیوند قوطی شکل، مقدار حداکثر کرنش پلاستیک معادل در انتهای بال تیر پیوند را می توان تا ۳۸٪ برای نمونه های برشی، تا ۴۱٪ برای نمونه های متوسط و تا ۶۸٪ برای نمونه های خمشی کاهش داد؛ بنابراین تأثیر استفاده از مقطع کاهش یافته در تیر پیوند قوطی شکل در کاهش مقدار کرنش پلاستیک معادل در انتهای بال برای نمونه های خمشی (به دلیل گرادین ملایم تر لنگر خمشی) به مراتب بیش تر از نمونه های برشی و متوسط است.

۲) مطابق با مطالعات **هیدرون [۱۷]** بر روی تیرهای پیوند I شکل، نتایج مدل سازی انجام شده در این تحقیق نیز نشان می دهد غالباً با کاهش نسبت تقاضای لنگر در انتهای تیر پیوند به لنگر پلاستیک مقطع کاهش نیافته (۴) (هنگامی که مقدار تقاضای لنگر در مقطع کاهش یافته به لنگر پلاستیک مقطع کاهش یافته می رسد)، مقدار کرنش پلاستیک در انتهای بال تیرهای پیوند کاهش می یابد. کاهش مقادیر پارامترهای a و b و افزایش پارامتر C می تواند منجر به کاهش مقدار ϵ و در نتیجه کاهش مقدار تقاضای کرنش پلاستیک در انتهای بال تیر پیوند شود. برخلاف تیرهای پیوند I شکل که در آنها تمرکز کرنش پلاستیک در وسط بال رخ می دهد، در تیرهای پیوند قوطی شکل تمرکز کرنش در گوشه های بال اتفاق می افتد؛ همچنین **هیدرون [۱۷]**

کاهش در مقدار کرنش پلاستیک در نمونه های با ϵ بزرگ تر از ۱ متصور نشده بود در حالی که در تحقیق حاضر با وجود این که مقدار ϵ برای اکثر نمونه های متوسط و برشی بزرگ تر از ۱ به دست آمده، اما به دلیل سخت شدگی قابل توجه فولاد مورد بررسی، کرنش پلاستیک معادل در انتهای تیر پیوند کاهش یافته است.

۳) کاهش مقدار نیروهای منتقل شده از تیر پیوند به سایر اجزای قاب مهاربندی و اگر از دیگر مزایای استفاده از مقطع کاهش یافته در تیر پیوند قوطی شکل است که می تواند منجر به کاهش لنگر (و یا نیروی برشی متناظر) منتقل شده به اجزای نیرو کنترل قاب تا حداکثر ۱۴٪، ۲۳٪ و ۳۸٪ به ترتیب برای تیرهای پیوند برشی، متوسط و خمشی گردد.

۴) با استفاده از مقطع کاهش یافته در تیر پیوند قوطی شکل، اتلاف انرژی نمونه ها تا دوران هدف، به دلیل افزایش مشارکت بال در اتلاف انرژی (تسلیم بال در محل مقطع کاهش یافته) تا ۳۵٪ برای تیرهای پیوند برشی، تا ۱۵۸٪ برای تیرهای پیوند متوسط و تا ۲۵۰٪ برای تیرهای پیوند خمشی افزایش می یابد.

۵) مشابه با قاب های خمشی دارای اتصال RBS، استفاده از مقطع کاهش یافته منجر به کاهش سختی ارتجاعی به ترتیب تا ۳۳٪ برای تیر پیوند بلند، تا ۱۹٪ برای تیر پیوند متوسط و تا ۱۷٪ برای تیر پیوند کوتاه شده که می تواند افزایش تغییر شکل نسبی جانبی قاب مهاربندی و اگر را به دنبال داشته باشد که باید در طراحی مدنظر قرار گیرد.

۵- پیشنهاد برای مطالعات آتی

۱. در نظر گرفتن معیار پارگی برای فولاد در مدل سازی اجزای محدود و بررسی نحوه ایجاد پارگی در مقطع
۲. بررسی رفتار تیر پیوند قوطی شکل با مقطع کاهش یافته در قاب مهاربندی و اگر تحت بارگذاری چرخه ای
۳. بررسی آزمایشگاهی رفتار قاب مهاربندی و اگر با تیر پیوند قوطی شکل با اتصال با مقطع کاهش یافته

- [15] Tsai, K.C., Chen, C.H., Engelhardt, M.D., and Nakashima, M. (2000), "Cyclic Behavior of Link-to-Box Column Connections in Steel Eccentrically Braced Frames", Paper presented at the ICSSD 2000: 1 st Structural Conference on Structural Stability and Dynamics.
- [16] Okazaki, T. (2004), "Seismic Performance of Link-to-Column Connections in Steel Eccentrically Braced Frames", The University of Texas at Austin.
- [17] Hauksdottir, H.O. (2008), "Application of the Reduced Beam Section Concept for Improving the Ductility of Certain Eccentrically Braced Frames", University of Washington.
- [18] Berman, J.W., Okazaki, T., and Heidrun H.O. (2010), "Reduced Link Sections for Improving the Ductility of Eccentrically Braced Frame Link-to-Column Connections", Journal of structural engineering 136, No. 5: 543-553.
- [19] Naserifar, Ali, and Fakhreddin Danesh (2016). "Experimental Study on Application of Reduced Section in Long Link-to-Column Connections". Advances in Structural Engineering 19, No. 5: 795-805.
- [20] Pachoumis, D.T., Galoussis, E.G., Kalfas, C.N., and Efthimiou, I.Z. (2010), "Cyclic Performance of Steel Moment-Resisting Connections with Reduced Beam Sections Experimental Analysis and Finite Element Model Simulation", Engineering Structures 32, No. 9: 2683-2692.
- [21] Chaboche, J.L. (1986), "Time-Independent Constitutive Theories for Cyclic Plasticity", International Journal of plasticity 2, No. 2: 149-188.
- [22] Behbahani, Danial Pesaran, and Nader Fanaie (2022). "Elimination of Intermediate Stiffeners in Box Link Beam Using Low Yield Point Steel". Journal of Constructional Steel Research 188: 107014.
- [23] Richards, P.W., and Uang, Ch.M. (2006), "Testing Protocol for Short Links in Eccentrically Braced Frames", Journal of Structural Engineering 132, No. 8: 1183-1191.
- [24] Federal Emergency Management Agency, FEMA-356 (2000), Prestandard and Commentary for Seismic Rehabilitation of Buildings, Washington DC.
- [1] Popov, E.P., Kazuhiko, K., and Engelhardt, M.D. (1987), "Advances in Design of Eccentrically Braced Frames", Earthquake Spectra 3, No. 1: 43-55.
- [2] Berman, J.W., and Bruneau, M. (2005), "Approaches for the Seismic Retrofit of Braced Steel Bridge Piers and Proof-of-Concept Testing of an Eccentrically Braced Frame with Tubular Link", Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.
- [3] Berman, J.W., and Bruneau, M. (2006), "Further Development of Tubular Eccentrically Braced Frame Links for the Seismic Retrofit of Braced Steel Truss Bridge Piers".
- [4] Kasai, K., and Popov, E.p. (1986), "Cyclic Web Buckling Control for Shear Link Beams", Journal of Structural Engineering 112, No. 3: 505-523.
- [5] Cheol-Ho, L., and Chung, S.W. (2007), "A Simplified Analytical Story Drift Evaluation of Steel Moment Frames with Radius-Cut Reduced Beam Section", Journal of Constructional Steel Research 63, No. 4: 564-570.
- [6] Ricles, J.M., Changshi Mao, L., and Fisher, J.W. (2002), "Inelastic Cyclic Testing of Welded Unreinforced Moment Connections", Journal of Structural Engineering 128, No. 4: 429-440.
- [7] Chen, Ch., Lin, Ch., and Lin, Ch.H. (2006), "Ductile Moment Connections Used in Steel Column-Tree Moment-Resisting Frames", Journal of Constructional Steel Research 62, No. 8: 793-801.
- [8] Engelhardt, M.D., and Sabol, T.A. (1998), "Reinforcing of Steel Moment Connections with Cover Plates: Benefits and Limitations", Engineering structures 20, No. 4-6: 510-520.
- [9] Pachoumis, D.T., Galoussis, E.G., Kalfas, C.N., and Christitsas, A.D. (2009), "Reduced Beam Section Moment Connections Subjected to Cyclic Loading: Experimental Analysis and Fem Simulation.", Engineering Structures 31, No. 1: 216-223.
- [10] Chambers, J.J., Shaheed A., and Stenger, F. (2003), "Effect of Reduced Beam Section Frame Elements on Stiffness of Moment Frames", Journal of Structural Engineering 129, No. 3: 383-393.
- [۱۱] داورپناه، م.، معمارزاده، پ.، و فتحی، ف. (۱۳۹۳)، "بررسی رفتار چرخه‌ای اتصالات خمشی جوشکاری شده با مقطع کاهش یافته از پروفیل‌های فولادی ایرانی"، اولین کنفرانس ملی با تمرکز بر توسعه مهندسی عمران، معماری، برق و مکانیک در ایران.
- [12] FEMA-350, (2000), Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings, prepared by the SAC Joint Venture for the Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- [13] Malley, J.O., and Popov, E.P. (1983), "Design Considerations for Shear Links in Eccentrically Braced Frames".
- [14] Arce, G. (2002), "Impact of higher strength steels on local buckling and overstrength of links in eccentrically braced frames", Master's Thesis, The University of Texas at Austin, Austin, TX.



جدول پ-۱- نتایج به دست آمده برای تیر پیوند برشی

نام	a (mm)	b (mm)	c (mm)	ρ_{RLS}	ξ	کرنش پلاستیک معادل در گوشه انتهای بال	کرنش پلاستیک در گوشه بال در مرکز مقطع کاهش یافته	اتلاف انرژی نسبی	اضافه مقاومت برشی	اضافه مقاومت خمشی در انتهای تیر	سختی ارتجاعی نسبی
S1	۸۸.۱۲	۹۹.۵	۲۳.۵	۱.۰۵	۱.۴۲	۷.۴۸	۰.۱۳	۱	۱.۵۵	۱.۱۵	۰.۹۵
S2	۱۱۷.۵	۹۹.۵	۲۳.۵	۰.۸۹	۱.۶۷	۷.۸۷	۰.۰۸	۱	۱.۵۶	۱.۱۶	۰.۹۶
S3	۱۴۶.۸۷	۹۹.۵	۲۳.۵	۰.۷۳	۲.۰۴	۸.۰۷	۰.۰۵	۱	۱.۵۶	۱.۱۵	۰.۹۷
S4	۱۷۶.۲۵	۹۹.۵	۲۳.۵	۰.۵۶	۲.۶۲	۸.۱۱	۰.۰۱	۱	۱.۵۵	۱.۱۷	۰.۹۷
S5	۸۸.۱۲	۱۱۷.۶۵	۲۳.۵	۱	۱.۴۹	۷.۵۸	۰.۰۹	۱	۱.۵۵	۱.۱۵	۰.۹۶
S6	۱۱۷.۵	۱۱۷.۶۵	۲۳.۵	۰.۸۴	۱.۷۷	۷.۸۹	۰.۰۵	۱	۱.۵۶	۱.۱۵	۰.۹۷
S7	۱۴۶.۸۷	۱۱۷.۶۵	۲۳.۵	۰.۶۷	۲.۱۹	۸.۰۶	۰.۰۲	۱	۱.۵۶	۱.۱۵	۰.۹۷
S8	۱۷۶.۲۵	۱۱۷.۶۵	۲۳.۵	۰.۵۲	۲.۸۷	۸.۱۴	۰	۱	۱.۵۷	۱.۱۶	۰.۹۸
S9	۸۸.۱۲	۱۳۵.۷۵	۲۳.۵	۰.۹۵	۱.۵۶	۷.۶۲	۰.۰۶	۱	۱.۵۵	۱.۱۵	۰.۹۶
S10	۱۱۷.۵	۱۳۵.۷۵	۲۳.۵	۰.۷۹	۱.۸۸	۷.۸۹	۰.۰۳	۱	۱.۵۵	۱.۱۵	۰.۹۷
S11	۱۴۶.۸۷	۱۳۵.۷۵	۲۳.۵	۰.۶۳	۲.۳۶	۸.۱	۰.۰۱	۱	۱.۵۶	۱.۱۴	۰.۹۸
S12	۱۷۶.۲۵	۱۳۵.۷۵	۲۳.۵	۰.۴۶	۳.۱۷	۸.۱۸	۰	۱	۱.۵۷	۱.۱۶	۰.۹۸
S13	۸۸.۱۲	۱۵۳.۸۵	۲۳.۵	۰.۹	۱.۶۵	۷.۶۱	۰.۰۳	۱	۱.۵۵	۱.۱۵	۰.۹۷
S14	۱۱۷.۵	۱۵۳.۸۵	۲۳.۵	۰.۷۴	۲.۰۱	۷.۹۳	۰.۰۲	۱	۱.۵۵	۱.۱۶	۰.۹۷
S15	۱۴۶.۸۷	۱۵۳.۸۵	۲۳.۵	۰.۵۸	۲.۵۶	۸.۱۳	۰	۱	۱.۵۶	۱.۱۴	۰.۹۸
S16	۱۷۶.۲۵	۱۵۳.۸۵	۲۳.۵	۰.۴۲	۳.۵۵	۸.۲۵	۰	۱	۱.۵۵	۱.۱۵	۰.۹۸
S17	۸۸.۱۲	۹۹.۵۵	۴۱.۱۲	۱.۲۴	۱.۱۹	۶.۸	۰.۲۸	۱.۰۴	۱.۴۹	۱.۱	۰.۸۹
S18	۱۱۷.۵	۹۹.۵۵	۴۱.۱۲	۱.۰۵	۱.۴۱	۷.۴۳	۰.۱۸	۱.۰۲	۱.۵۴	۱.۱۴	۰.۹۱
S19	۱۴۶.۸۷	۹۹.۵۵	۴۱.۱۲	۰.۸۶	۱.۷۲	۷.۶۱	۰.۱۱	۱	۱.۵۶	۱.۱۴	۰.۹۲
S20	۱۷۶.۲۵	۹۹.۵۵	۴۱.۱۲	۰.۶۷	۲.۲۱	۷.۸۵	۰.۰۶	۱	۱.۵۶	۱.۱۵	۰.۹۳
S21	۸۸.۱۲	۱۱۷.۶۵	۴۱.۱۲	۱.۱۸	۱.۲۵	۷	۰.۲	۱.۰۴	۱.۵	۱.۱۱	۰.۹
S22	۱۱۷.۵	۱۱۷.۶۵	۴۱.۱۲	۰.۹۹	۱.۴۹	۷.۵۷	۰.۱۲	۱.۰۲	۱.۵۴	۱.۱۴	۰.۹۱
S23	۱۴۶.۸۷	۱۱۷.۶۵	۴۱.۱۲	۰.۸	۱.۸۵	۷.۶۴	۰.۰۷	۱.۰۱	۱.۵۶	۱.۱۴	۰.۹۳
S24	۱۷۶.۲۵	۱۱۷.۶۵	۴۱.۱۲	۰.۶۱	۲.۴۲	۷.۸۷	۰.۰۳	۱	۱.۵۶	۱.۱۵	۰.۹۴
S25	۸۸.۱۲	۱۳۵.۷۵	۴۱.۱۲	۱.۱۲	۱.۳۲	۷.۱	۰.۱۴	۱.۰۳	۱.۵۱	۱.۱۲	۰.۹۱
S26	۱۱۷.۵	۱۳۵.۷۵	۴۱.۱۲	۰.۹۳	۱.۵۹	۷.۵۹	۰.۰۸	۱.۰۱	۱.۵۴	۱.۱۵	۰.۹۲
S27	۱۴۶.۸۷	۱۳۵.۷۵	۴۱.۱۲	۰.۷۴	۱.۹۹	۷.۸۳	۰.۰۴	۱	۱.۵۵	۱.۱۴	۰.۹۴
S28	۱۷۶.۲۵	۱۳۵.۷۵	۴۱.۱۲	۰.۵۵	۲.۶۷	۷.۹۳	۰.۰۱	۱	۱.۵۷	۱.۱۶	۰.۹۵
S29	۸۸.۱۲	۱۵۳.۸۵	۴۱.۱۲	۱.۰۶	۱.۳۹	۷.۱۶	۰.۰۹	۱.۰۲	۱.۵۲	۱.۱۳	۰.۹۲
S30	۱۱۷.۵	۱۵۳.۸۵	۴۱.۱۲	۰.۸۷	۱.۶۹	۷.۶۴	۰.۰۶	۱	۱.۵۴	۱.۱۵	۰.۹۳
S31	۱۴۶.۸۷	۱۵۳.۸۵	۴۱.۱۲	۰.۶۸	۲.۱۶	۷.۸۸	۰.۰۲	۱	۱.۵۵	۱.۱۴	۰.۹۴
S32	۱۷۶.۲۵	۱۵۳.۸۵	۴۱.۱۲	۰.۴۹	۲.۹۹	۸.۰۸	۰	۱	۱.۵۵	۱.۱۵	۰.۹۵
S33	۸۸.۱۲	۱۱۷.۶۵	۵۸.۷۵	۱.۴۵	۱.۰۲	۵.۶۳	۰.۴	۱.۲۳	۱.۳۸	۱.۰۲	۰.۸۳
S34	۱۱۷.۵	۱۱۷.۶۵	۵۸.۷۵	۱.۲۲	۱.۲۱	۶.۷۲	۰.۲۳	۱.۰۹	۱.۴۶	۱.۱	۰.۸۵
S35	۱۴۶.۸۷	۱۱۷.۶۵	۵۸.۷۵	۰.۹۸	۱.۵	۶.۸۹	۰.۱۲	۱.۰۴	۱.۵۳	۱.۱۲	۰.۸۷
S36	۱۷۶.۲۵	۱۱۷.۶۵	۵۸.۷۵	۰.۷۵	۱.۹۷	۷.۳۶	۰.۰۶	۱.۰۱	۱.۵۵	۱.۱۴	۰.۸۸
S37	۸۸.۱۲	۱۳۵.۷۵	۵۸.۷۵	۱.۳۸	۱.۰۷	۵.۹۳	۰.۳۱	۱.۲۱	۱.۴	۱.۰۴	۰.۸۴
S38	۱۱۷.۵	۱۳۵.۷۵	۵۸.۷۵	۱.۱۵	۱.۲۹	۶.۹۷	۰.۱۷	۱.۰۸	۱.۴۸	۱.۱۱	۰.۸۶
S39	۱۴۶.۸۷	۱۳۵.۷۵	۵۸.۷۵	۰.۹۱	۱.۶۲	۷.۰۲	۰.۰۸	۱.۰۳	۱.۵۴	۱.۱۳	۰.۸۸
S40	۱۷۶.۲۵	۱۳۵.۷۵	۵۸.۷۵	۰.۶۸	۲.۱۸	۷.۴۶	۰.۰۵	۱.۰۱	۱.۵۵	۱.۱۴	۰.۹
S41	۸۸.۱۲	۱۵۳.۸۵	۵۸.۷۵	۱.۳۱	۱.۱۳	۶.۱۶	۰.۲۲	۱.۱۹	۱.۴۲	۱.۰۵	۰.۸۵
S42	۱۱۷.۵	۱۵۳.۸۵	۵۸.۷۵	۱.۰۷	۱.۳۸	۷.۱۲	۰.۱۲	۱.۰۶	۱.۵	۱.۱۲	۰.۸۷
S43	۱۴۶.۸۷	۱۵۳.۸۵	۵۸.۷۵	۰.۸۴	۱.۷۶	۷.۱۲	۰.۰۵	۱.۰۲	۱.۵۴	۱.۱۵	۰.۸۹

نام	a (mm)	b (mm)	c (mm)	ρ_{RLS}	ξ	کرنش پلاستیک معادل در گوشه انتهای بال	کرنش پلاستیک معادل در گوشه بال در مرکز مقطع کاهش یافته	اتلاف انرژی نسبی	اضافه مقاومت برشی	اضافه مقاومت خمشی در انتهای تیر	سختی ارتجاعی نسبی
S44	۱۷۶.۲۵	۱۵۳.۸۵	۵۸.۷۵	۰.۶۱	۲.۴۳	۷.۶۷	۰.۰۲	۱	۱.۵۵	۱.۱۶	۰.۹۱
S45	۸۸.۱۲	۱۳۵.۷۵	۶۴.۶۲	۱.۴۹	۰.۹۹	۵.۱۶	۰.۴۱	۱.۳۵	۱.۳۴	۱	۰.۸۱
S46	۱۱۷.۵	۱۳۵.۷۵	۶۴.۶۲	۱.۲۴	۱.۱۹	۶.۵	۰.۲۴	۱.۱۵	۱.۴۴	۱.۰۹	۰.۸۴
S47	۱۴۶.۸۷	۱۳۵.۷۵	۶۴.۶۲	۰.۹۹	۱.۵	۶.۶۶	۰.۱	۱.۰۶	۱.۵۲	۱.۱۳	۰.۸۶
S48	۱۷۶.۲۵	۱۳۵.۷۵	۶۴.۶۲	۰.۷۴	۲.۰۱	۷.۱۸	۰.۰۵	۱.۰۲	۱.۵۴	۱.۱۳	۰.۸۸
S49	۸۸.۱۲	۱۵۳.۸۵	۶۴.۶۲	۱.۴۲	۱.۰۵	۵.۵۵	۰.۳۳	۱.۲۹	۱.۳۷	۱.۰۲	۰.۸۳
S50	۱۱۷.۵	۱۵۳.۸۵	۶۴.۶۲	۱.۱۶	۱.۲۷	۶.۷۳	۰.۱۶	۱.۱۲	۱.۴۶	۱.۰۹	۰.۸۵
S51	۱۴۶.۸۷	۱۵۳.۸۵	۶۴.۶۲	۰.۹۱	۱.۶۳	۶.۸۳	۰.۰۷	۱.۰۴	۱.۵۳	۱.۱۲	۰.۸۷
S52	۱۷۶.۲۵	۱۵۳.۸۵	۶۴.۶۲	۰.۶۶	۲.۲۵	۷.۵۶	۰.۰۳	۱.۰۲	۱.۵۵	۱.۱۵	۰.۸۹
نمونه بدون مقطع کاهش یافته						۸.۳۴	-	۱	۱.۵۵	۱.۱۵	۱

جدول پ-۲- نتایج به دست آمده برای تیر پیوند متوسط

نام	a (mm)	b (mm)	c (mm)	ρ_{RLS}	ξ	کرنش پلاستیک معادل در گوشه انتهای بال	کرنش پلاستیک معادل در گوشه بال در مرکز مقطع کاهش یافته	اتلاف انرژی نسبی	اضافه مقاومت برشی	اضافه مقاومت خمشی در انتهای تیر	سختی ارتجاعی نسبی
II	۸۸.۱۲	۹۹.۵۵	۲۳.۵	۲.۰۸	۱.۱۲	۴.۶۴	۰.۱۴	۱.۰۱	۱.۰۶	۱.۲۷	۰.۹۴
IP	۱۱۷.۵	۹۹.۵۵	۲۳.۵	۱.۹۲	۱.۲۱	۴.۹۹	۰.۱۱	۱.۰۲	۱.۰۸	۱.۳۱	۰.۹۵
IIb	۱۴۶.۸۷	۹۹.۵۵	۲۳.۵	۱.۷۶	۱.۳۳	۵.۱۳	۰.۰۹	۱	۱.۱۳	۱.۳۵	۰.۹۶
IIc	۱۷۶.۲۵	۹۹.۵۵	۲۳.۵	۱.۶	۱.۴۶	۵.۲۷	۰.۰۶	۱	۱.۱۸	۱.۳۹	۰.۹۶
Id	۸۸.۱۲	۱۱۷.۶۵	۲۳.۵	۲.۰۳	۱.۱۵	۴.۷۲	۰.۱	۱.۰۷	۱.۰۶	۱.۲۷	۰.۹۵
Ie	۱۱۷.۵	۱۱۷.۶۵	۲۳.۵	۱.۸۷	۱.۲۵	۵.۰۱	۰.۰۸	۱.۰۱	۱.۰۹	۱.۳۲	۰.۹۵
Iv	۱۴۶.۸۷	۱۱۷.۶۵	۲۳.۵	۱.۷۱	۱.۳۶	۵.۱۵	۰.۰۶	۱	۱.۱۳	۱.۳۵	۰.۹۶
IIa	۸۸.۱۲	۱۳۵.۷۵	۲۳.۵	۱.۹۸	۱.۱۸	۴.۷۵	۰.۰۷	۱.۰۴	۱.۰۶	۱.۲۸	۰.۹۵
Iq	۱۱۷.۵	۱۳۵.۷۵	۲۳.۵	۱.۸۲	۱.۲۸	۴.۹۸	۰.۰۵	۱	۱.۱	۱.۳۲	۰.۹۶
IIo	۱۴۶.۸۷	۱۳۵.۷۵	۲۳.۵	۱.۶۶	۱.۴	۵.۲۲	۰.۰۳	۱	۱.۱۴	۱.۳۵	۰.۹۶
III	۸۸.۱۲	۱۵۳.۸۵	۲۳.۵	۱.۹۴	۱.۲۱	۴.۷۷	۰.۰۵	۱.۰۲	۱.۰۷	۱.۲۹	۰.۹۵
IIp	۱۱۷.۵	۱۵۳.۸۵	۲۳.۵	۱.۷۷	۱.۳۲	۵.۰۶	۰.۰۳	۱	۱.۱	۱.۳۳	۰.۹۶
IIb	۱۴۶.۸۷	۱۵۳.۸۵	۲۳.۵	۱.۶۱	۱.۴۵	۵.۲۱	۰.۰۲	۱	۱.۱۴	۱.۳۶	۰.۹۶
IIc	۸۸.۱۲	۹۹.۵۵	۴۱.۱۲	۲.۴۷	۰.۹۴	۳.۷۹	۰.۳۳	۱.۸۸	۰.۹۵	۱.۱۳	۰.۸۸
Id	۱۱۷.۵	۹۹.۵۵	۴۱.۱۲	۲.۲۸	۱.۰۲	۴.۴۵	۰.۲۶	۱.۵۶	۰.۹۸	۱.۱۸	۰.۸۹
IIf	۱۴۶.۸۷	۹۹.۵۵	۴۱.۱۲	۲.۰۹	۱.۱۲	۴.۴۸	۰.۲	۱.۲۷	۱.۰۴	۱.۲۴	۰.۹
IIv	۱۷۶.۲۵	۹۹.۵۵	۴۱.۱۲	۱.۹	۱.۲۳	۴.۸۸	۰.۱۵	۱.۰۸	۱.۱	۱.۳	۰.۹۱
IIa	۸۸.۱۲	۱۱۷.۶۵	۴۱.۱۲	۲.۴۱	۰.۹۷	۳.۹۱	۰.۲۵	۱.۷۷	۰.۹۶	۱.۱۵	۰.۸۸
IIq	۱۱۷.۵	۱۱۷.۶۵	۴۱.۱۲	۲.۲۲	۱.۰۵	۴.۵	۰.۱۹	۱.۴۷	۱	۱.۲	۰.۹
IIo	۱۴۶.۸۷	۱۱۷.۶۵	۴۱.۱۲	۲.۰۳	۱.۱۵	۴.۵۶	۰.۱۴	۱.۲۱	۱.۰۵	۱.۲۶	۰.۹۱
IIp	۱۷۶.۲۵	۱۱۷.۶۵	۴۱.۱۲	۱.۸۴	۱.۲۷	۴.۹۶	۰.۱۱	۱.۰۳	۱.۱۲	۱.۳۱	۰.۹۲
IIp	۸۸.۱۲	۱۳۵.۷۵	۴۱.۱۲	۲.۳۵	۰.۹۹	۴.۰۳	۰.۲	۱.۷	۰.۹۷	۱.۱۶	۰.۸۹
IIp	۱۱۷.۵	۱۳۵.۷۵	۴۱.۱۲	۲.۱۶	۱.۰۸	۴.۶۱	۰.۱۵	۱.۳۸	۱.۰۱	۱.۲۱	۰.۹
IIc	۱۴۶.۸۷	۱۳۵.۷۵	۴۱.۱۲	۱.۹۷	۱.۱۸	۴.۶۵	۰.۱	۱.۱۴	۱.۰۶	۱.۲۷	۰.۹۱
Id	۱۷۶.۲۵	۱۳۵.۷۵	۴۱.۱۲	۱.۷۸	۱.۳۱	۵.۰۲	۰.۰۷	۱	۱.۱۳	۱.۳۲	۰.۹۳
IIe	۸۸.۱۲	۱۵۳.۸۵	۴۱.۱۲	۲.۳	۱.۰۲	۴.۱۱	۰.۱۵	۱.۶۱	۰.۹۸	۱.۱۷	۰.۸۹
IIv	۱۱۷.۵	۱۵۳.۸۵	۴۱.۱۲	۲.۱	۱.۱۱	۴.۵۷	۰.۱۱	۱.۳۱	۱.۰۲	۱.۲۳	۰.۹۱
IIa	۱۴۶.۸۷	۱۵۳.۸۵	۴۱.۱۲	۱.۹۱	۱.۲۲	۴.۷۲	۰.۰۷	۱.۰۶	۱.۰۸	۱.۲۸	۰.۹۲



نام	a (mm)	b (mm)	c (mm)	ρ_{RLS}	ξ	کرنش پلاستیک معادل در گوشه انتهای بال	کرنش پلاستیک معادل در گوشه بال در مرکز مقطع کاهش یافته	اتلاف انرژی نسبی	اضافه مقاومت برشی	اضافه مقاومت خمشی در انتهای تیر	سختی ارتجاعی نسبی
I۲۹	۱۷۶.۲۵	۱۵۳.۸۵	۴۱.۱۲	۱.۷۲	۱.۳۵	۵.۰۵	۰.۰۵	۰.۹۸	۱.۱۴	۱.۳۳	۰.۹۳
I۳۰	۱۴۶.۸۷	۱۱۷.۶۵	۵۸.۷۵	۲.۵	۰.۹۴	۳.۵	۰.۳۳	۲.۳۱	۰.۹۴	۱.۱	۰.۸۴
I۳۱	۱۷۶.۲۵	۱۱۷.۶۵	۵۸.۷۵	۲.۲۶	۱.۰۳	۴.۰۸	۰.۲۲	۱.۶۸	۱	۱.۱۸	۰.۸۶
I۳۲	۱۴۶.۸۷	۱۳۵.۷۵	۵۸.۷۵	۲.۴۲	۰.۹۶	۳.۶۱	۰.۲۶	۲.۱	۰.۹۶	۱.۱۳	۰.۸۵
I۳۳	۱۷۶.۲۵	۱۳۵.۷۵	۵۸.۷۵	۲.۱۹	۱.۰۷	۴.۲۴	۰.۱۷	۱.۵۶	۱.۰۳	۱.۲	۰.۸۷
I۳۴	۱۱۷.۵	۱۵۳.۸۵	۵۸.۷۵	۲.۵۹	۰.۹	۳.۴۱	۰.۳	۲.۵۸	۰.۹۱	۱.۰۸	۰.۸۴
I۳۵	۱۴۶.۸۷	۱۵۳.۸۵	۵۸.۷۵	۲.۳۵	۰.۹۹	۳.۷۴	۰.۲	۱.۹۳	۰.۹۸	۱.۱۵	۰.۸۶
I۳۶	۱۷۶.۲۵	۱۵۳.۸۵	۵۸.۷۵	۲.۱۲	۱.۱	۴.۳۷	۰.۱۲	۱.۴۳	۱.۰۵	۱.۲۲	۰.۸۷
I۳۷	۱۷۶.۲۵	۱۵۳.۸۵	۶۴.۶۲	۲.۳۷	۰.۹۸	۳.۷۹	۰.۲۳	۲	۰.۹۸	۱.۱۴	۰.۸۴
I۳۸	۱۴۶.۸۷	۱۵۳.۸۵	۶۴.۶۲	۲.۵۵	۰.۹۲	۳.۲۱	۰.۲۹	۲.۴۶	۰.۹۳	۱.۰۹	۰.۸۳
I۳۹	۱۷۶.۲۵	۱۵۳.۸۵	۶۴.۶۲	۲.۲۹	۱.۰۲	۳.۹۲	۰.۱۸	۱.۸۴	۱	۱.۱۶	۰.۸۵
نمونه بدون مقطع کاهش یافته						۵.۴۵	-	۱	۱.۱۷	۱.۳۹	۱

جدول پ-۳- نتایج به دست آمده برای تیر پیوند بلند

نام	a (mm)	b (mm)	c (mm)	ρ_{RLS}	ξ	کرنش پلاستیک معادل در گوشه انتهای بال	کرنش پلاستیک معادل در گوشه بال در مرکز مقطع کاهش یافته	اتلاف انرژی نسبی	اضافه مقاومت برشی	اضافه مقاومت خمشی در انتهای تیر	سختی ارتجاعی نسبی
F1	۸۸.۱۲	۹۹.۵۵	۲۳.۵	۳.۲۳	۱.۰۲	۲.۲۴	۰.۱۱	۱.۱۲	۰.۷۳	۱.۱۷	۰.۹۴
F2	۱۱۷.۵	۹۹.۵۵	۲۳.۵	۳.۰۷	۱.۰۷	۲.۴۵	۰.۰۹	۱.۰۳	۰.۷۵	۱.۱۹	۰.۹۵
F3	۱۴۶.۸۷	۹۹.۵۵	۲۳.۵	۲.۹۱	۱.۱۳	۲.۴۷	۰.۰۸	۰.۹۹	۰.۷۷	۱.۲۱	۰.۹۵
F4	۱۷۶.۲۵	۹۹.۵۵	۲۳.۵	۲.۷۵	۱.۱۹	۲.۵۸	۰.۰۷	۰.۹۶	۰.۸	۱.۲۲	۰.۹۶
F5	۸۸.۱۲	۱۱۷.۶۵	۲۳.۵	۳.۱۸	۱.۰۳	۲.۳	۰.۰۸	۱.۰۹	۰.۷۴	۱.۱۷	۰.۹۴
F6	۱۱۷.۵	۱۱۷.۶۵	۲۳.۵	۳.۰۲	۱.۰۹	۲.۴۸	۰.۰۷	۱.۰۳	۰.۷۵	۱.۱۹	۰.۹۵
F7	۱۴۶.۸۷	۱۱۷.۶۵	۲۳.۵	۲.۸۶	۱.۱۵	۲.۵۲	۰.۰۶	۰.۹۷	۰.۷۸	۱.۲۲	۰.۹۵
F8	۱۷۶.۲۵	۱۱۷.۶۵	۲۳.۵	۲.۷	۱.۲۲	۲.۵۹	۰.۰۵	۰.۹۵	۰.۸۱	۱.۲۳	۰.۹۶
F9	۸۸.۱۲	۱۳۵.۷۵	۲۳.۵	۳.۱۳	۱.۰۵	۲.۳	۰.۰۶	۱.۰۳	۰.۷۴	۱.۱۹	۰.۹۴
F10	۱۱۷.۵	۱۳۵.۷۵	۲۳.۵	۲.۹۷	۱.۱	۲.۴۵	۰.۰۵	۰.۹۸	۰.۷۶	۱.۲	۰.۹۵
F11	۱۴۶.۸۷	۱۳۵.۷۵	۲۳.۵	۲.۸۱	۱.۱۷	۲.۵۳	۰.۰۴	۰.۹۴	۰.۷۸	۱.۲۲	۰.۹۵
F12	۱۷۶.۲۵	۱۳۵.۷۵	۲۳.۵	۲.۶۵	۱.۲۴	۲.۵۳	۰.۰۳	۰.۹۶	۰.۸۱	۱.۲۴	۰.۹۶
F13	۸۸.۱۲	۱۵۳.۸۵	۲۳.۵	۳.۰۸	۱.۰۶	۲.۳۴	۰.۰۴	۱.۰۱	۰.۷۵	۱.۱۸	۰.۹۵
F14	۱۱۷.۵	۱۵۳.۸۵	۲۳.۵	۲.۹۲	۱.۱۲	۲.۴۹	۰.۰۴	۰.۹۷	۰.۷۶	۱.۲	۰.۹۵
F15	۱۴۶.۸۷	۱۵۳.۸۵	۲۳.۵	۲.۷۶	۱.۱۹	۲.۵۷	۰.۰۳	۰.۹۵	۰.۷۹	۱.۲۳	۰.۹۶
F16	۱۷۶.۲۵	۱۵۳.۸۵	۲۳.۵	۲.۶۱	۱.۲۶	۲.۶۲	۰.۰۲	۰.۹۴	۰.۸۱	۱.۲۴	۰.۹۶
F17	۸۸.۱۲	۹۹.۵۵	۴۱.۱۲	۳.۸۳	۰.۸۶	۱.۶۷	۰.۲۶	۲.۱۳	۰.۶۵	۱.۰۲	۰.۸۷
F18	۱۱۷.۵	۹۹.۵۵	۴۱.۱۲	۳.۶۴	۰.۹	۱.۹۶	۰.۲۳	۱.۹۱	۰.۶۷	۱.۰۵	۰.۸۸
F19	۱۴۶.۸۷	۹۹.۵۵	۴۱.۱۲	۳.۴۵	۰.۹۵	۲.۰۲	۰.۲	۱.۶۳	۰.۷	۱.۰۸	۰.۸۹
F20	۱۷۶.۲۵	۹۹.۵۵	۴۱.۱۲	۳.۲۶	۱.۰۱	۲.۲۵	۰.۱۷	۱.۳۵	۰.۷۳	۱.۱۲	۰.۹
F21	۸۸.۱۲	۱۱۷.۶۵	۴۱.۱۲	۳.۷۷	۰.۸۷	۱.۷۴	۰.۲۱	۲.۱	۰.۶۷	۱.۰۴	۰.۸۸
F22	۱۱۷.۵	۱۱۷.۶۵	۴۱.۱۲	۳.۵۸	۰.۹۲	۲.۰۱	۰.۱۹	۱.۷۹	۰.۶۸	۱.۰۶	۰.۸۹
F23	۱۴۶.۸۷	۱۱۷.۶۵	۴۱.۱۲	۳.۳۹	۰.۹۷	۲.۰۹	۰.۱۶	۱.۵۳	۰.۷۱	۱.۱	۰.۹
F24	۱۷۶.۲۵	۱۱۷.۶۵	۴۱.۱۲	۳.۲	۱.۰۲	۲.۲۹	۰.۱۳	۱.۲۷	۰.۷۴	۱.۱۳	۰.۹
F25	۸۸.۱۲	۱۳۵.۷۵	۴۱.۱۲	۳.۷۱	۰.۸۸	۱.۸۱	۰.۱۷	۲.۰۲	۰.۶۸	۱.۰۴	۰.۸۸
F26	۱۱۷.۵	۱۳۵.۷۵	۴۱.۱۲	۳.۵۲	۰.۹۵	۲.۰۹	۰.۱۵	۱.۷۴	۰.۶۹	۱.۰۷	۰.۸۹



نام	a (mm)	b (mm)	c (mm)	ρ_{RLS}	ξ	کرنش پلاستیک معادل در گوشه انتهای بال	کرنش پلاستیک معادل در گوشه بال در مرکز مقطع کاهش یافته	اتلاف انرژی نسبی	اضافه مقاومت برشی	اضافه مقاومت خمشی در انتهای تیر	سختی ارتجاعی نسبی
F27	۱۴۶.۸۷	۱۳۵.۷۵	۴۱.۱۲	۳.۳۳	۰.۹۸	۲.۱۲	۰.۱۲	۱.۴۵	۰.۷۲	۱.۱	۰.۹
F28	۱۷۶.۲۵	۱۳۵.۷۵	۴۱.۱۲	۳.۱۴	۱.۰۴	۲.۳۱	۰.۰۹	۱.۱۸	۰.۷۵	۱.۱۴	۰.۹۱
F29	۸۸.۱۲	۱۵۳.۸۵	۴۱.۱۲	۳.۶۶	۰.۹	۱.۸۳	۰.۱۴	۱.۸۷	۰.۶۹	۱.۰۵	۰.۸۸
F30	۱۱۷.۵	۱۵۳.۸۵	۴۱.۱۲	۳.۴۷	۰.۹۵	۲.۱۵	۰.۱۲	۱.۶۱	۰.۷	۱.۰۸	۰.۸۹
F31	۱۴۶.۸۷	۱۵۳.۸۵	۴۱.۱۲	۳.۲۸	۱	۲.۱۷	۰.۰۹	۱.۳۳	۰.۷۳	۱.۱۱	۰.۹
F32	۱۷۶.۲۵	۱۵۳.۸۵	۴۱.۱۲	۳.۰۹	۱.۰۶	۲.۳۴	۰.۰۷	۱.۰۹	۰.۷۶	۱.۱۵	۰.۹۱
F33	۸۸.۱۲	۱۱۷.۶۵	۵۸.۷۵	۴.۶۳	۰.۷۱	۱.۰۴	۰.۳۷	۳.۲۳	۰.۵۶	۰.۸۶	۰.۷۹
F34	۱۱۷.۵	۱۱۷.۶۵	۵۸.۷۵	۴.۴	۰.۷۴	۱.۲۷	۰.۳۳	۳.۰۳	۰.۵۹	۰.۹	۰.۸۱
F35	۱۴۶.۸۷	۱۱۷.۶۵	۵۸.۷۵	۴.۱۷	۰.۷۹	۱.۳۹	۰.۳	۲.۸۵	۰.۶۱	۰.۹۴	۰.۸۲
F36	۱۷۶.۲۵	۱۱۷.۶۵	۵۸.۷۵	۳.۹۳	۰.۸۳	۱.۵۹	۰.۲۶	۲.۵۷	۰.۶۴	۰.۹۸	۰.۸۳
F37	۸۸.۱۲	۱۳۵.۷۵	۵۸.۷۵	۴.۵۶	۰.۷۲	۱.۰۹	۰.۳۲	۳.۲	۰.۵۷	۰.۸۷	۰.۸
F38	۱۱۷.۵	۱۳۵.۷۵	۵۸.۷۵	۴.۳۳	۰.۷۶	۱.۳۳	۰.۲۹	۳.۰۶	۰.۵۹	۰.۹۱	۰.۸۱
F39	۱۴۶.۸۷	۱۳۵.۷۵	۵۸.۷۵	۴.۱	۰.۸	۱.۴۱	۰.۲۶	۲.۷۱	۰.۶۲	۰.۹۵	۰.۸۳
F40	۱۷۶.۲۵	۱۳۵.۷۵	۵۸.۷۵	۳.۸۶	۰.۸۵	۱.۶	۰.۲۲	۲.۴۴	۰.۶۶	۱	۰.۸۴
F41	۸۸.۱۲	۱۵۳.۸۵	۵۸.۷۵	۴.۴۹	۰.۷۳	۱.۱۴	۰.۲۸	۳.۱۶	۰.۵۸	۰.۸۸	۰.۸
F42	۱۱۷.۵	۱۵۳.۸۵	۵۸.۷۵	۴.۲۶	۰.۷۷	۱.۳۶	۰.۲۶	۲.۸۹	۰.۶	۰.۹۲	۰.۸۲
F43	۱۴۶.۸۷	۱۵۳.۸۵	۵۸.۷۵	۴.۰۲	۰.۸۲	۱.۴۵	۰.۲۲	۲.۶۴	۰.۶۴	۰.۹۶	۰.۸۳
F44	۱۷۶.۲۵	۱۵۳.۸۵	۵۸.۷۵	۳.۷۹	۰.۸۷	۱.۶۷	۰.۱۸	۲.۲۴	۰.۶۷	۱.۰۱	۰.۸۴
F45	۸۸.۱۲	۱۳۵.۷۵	۶۴.۶۲	۴.۹۴	۰.۶۶	۰.۸۹	۰.۳۹	۳.۵	۰.۵۲	۰.۸۱	۰.۷۷
F46	۱۱۷.۵	۱۳۵.۷۵	۶۴.۶۲	۴.۶۹	۰.۷	۱.۱	۰.۳۶	۳.۳۶	۰.۵۵	۰.۸۴	۰.۷۸
F47	۱۴۶.۸۷	۱۳۵.۷۵	۶۴.۶۲	۴.۴۳	۰.۷۴	۱.۲	۰.۳۲	۳.۱۸	۰.۵۷	۰.۸۹	۰.۸
F48	۱۷۶.۲۵	۱۳۵.۷۵	۶۴.۶۲	۴.۱۸	۰.۷۸	۱.۳۸	۰.۲۸	۲.۹۴	۰.۶۱	۰.۹۳	۰.۸۱
F49	۸۸.۱۲	۱۵۳.۸۵	۶۴.۶۲	۴.۸۶	۰.۶۷	۰.۹۲	۰.۳۵	۳.۴۴	۰.۵۳	۰.۸۲	۰.۷۷
F50	۱۱۷.۵	۱۵۳.۸۵	۶۴.۶۲	۴.۶۱	۰.۷۱	۱.۱۳	۰.۳۲	۳.۲۶	۰.۵۶	۰.۸۶	۰.۷۹
F51	۱۴۶.۸۷	۱۵۳.۸۵	۶۴.۶۲	۴.۳۵	۰.۷۵	۱.۱۲	۰.۲۸	۳.۰۳	۰.۵۹	۰.۹	۰.۸
F52	۱۷۶.۲۵	۱۵۳.۸۵	۶۴.۶۲	۴.۱	۰.۸	۱.۴۳	۰.۲۴	۲.۷۶	۰.۶۲	۰.۹۵	۰.۸۲
نمونه بدون مقطع کاهش یافته						۲.۷۹	-	۱	۰.۸۳	۱.۳۱	۱