

بررسی کمانش انتقالی جان در تیرهای فولادی

ابوالفضل عربزاده^{۱*}، محسن ورمزیاری^۲، حمید محرمی^۳

۱. دانشیار مهندسی سازه، دانشگاه تربیت مدرس

۲. دانشجوی دکترا، مهندسی سازه، دانشگاه تربیت مدرس

۳. دانشیار مهندسی سازه، دانشگاه تربیت مدرس

*arabzade@modares.ac.ir

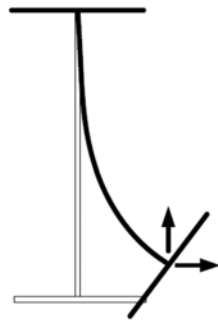
تاریخ دریافت: [۱۳۹۲/۱۲/۱۱] تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۴/۸]

چکیده-کمانش انتقالی جان حالتی از ناپایداری است که در تیرهای تحت بار متمرکز با بال فشاری مهار شده و بال کششی بدون مهاربندی دیده می‌شود. مطالعات قبلی و نتایج آزمایش‌ها کمانش انتقالی جان را ناشی از کمانش موضعی جان در زیر ناحیه بارگذاری و ناپایداری کلی در طول بال کششی تیر می‌دانند. در این مقاله مطالعه جامع و دقیق روی رفتار و سازوکار رخداد این ناپایداری و همچنین ارزیابی ظرفیت باربری تیر تحت کمانش انتقالی جان با استفاده از آزمایش صورت گرفته و در نتیجه آن یک مدل ساده که اصلاح کننده مدل قبلی است پیشنهاد شده است. همچنین آزمایش‌ها برای بررسی اثر ابعاد بال کششی بر ظرفیت تیر صورت گرفته و طبق نتایج آن می‌توان این ناپایداری را با چشم‌پوشی از آثار موضعی پلاستیک در زیر محل بارگذاری، در قلمرو ارتجاعی در نظر گرفت. از طرفی در این پژوهش مشخص شد که وجود بال کششی عامل افزایش بار ظرفیت تیر است ولی برای مقادیر عرض کم بال کششی و یا مقاطع بدون بال کششی نیز ظرفیت باربری قابل ملاحظه‌ای در برابر کمانش انتقالی جان مشاهده شد. همچنین نتایج تخمینی مدل پیشنهادی در ظرفیت کمانش انتقالی جان برای تیرها تطابق خوبی با نتایج آزمایش دارد.

واژگان کلیدی: کمانش انتقالی جان، ناپایداری، بال کششی، تیر فولادی، بار بحرانی.

۱- مقدمه

می‌کنند. اگر چه در ابتدا تصور می‌شد این ناپایداری در نتیجه حرکت بال کششی باشد، بعدها مشخص شد که این تغییر شکل به ناپایداری جان در ناحیه زیر بارگذاری مرتبط است [۳]. شکل (۱) مقطع تیر را تحت کمانش انتقالی جان نشان می‌دهد.

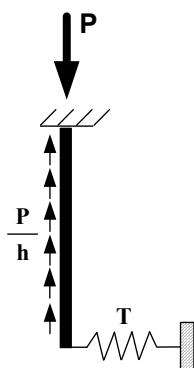


شکل (۱) کمانش انتقالی جان

به طور معمول تیرهای تحت بار با مهاربندی جانبی در بال فوقانی (بال فشاری) در برابر خمش، برش و کمانش موضعی در بال فشاری و ناحیه فشاری جان به ویژه تحت بارهای موضعی طراحی می‌شوند. در طراحی تیر، بال پایینی (کششی) بدون حرکت در نظر گرفته می‌شود، در حالی که در آزمایش‌ها و در حالت واقعی تحت برخی شرایط بارگذاری، هندسه مقطع و وضعیت تکیه‌گاه‌ها نوعی از ناپایداری مشاهده شده است که در آن بال کششی دچار تغییر شکل جانبی می‌شود. این ناپایداری در آیین‌نامه‌های طراحی تحت نام کمانش انتقالی جان یا ناپایداری بال کششی نام‌گذاری شده است.

آزمایش‌های انجام شده به وسیله‌ی دانلیز و فیشر [۱] و همچنین یورا [۲] تغییر مکان جانبی بال کششی را تأیید

با توجه به وجود گیرداری جانبی کافی در بال فشاری، این



شکل (۲) مدل پیشنهادی یورا (h ارتفاع جان) [۲]

سامرز و یورا مدل پیشنهادی یورا را اصلاح کرده و مدل بهتری برای تخمین ظرفیت باربری تیر تحت کماتش انتقالی جان ارائه کردند. مطالعه آن‌ها بر پایه نتایج آزمایش روی مدل‌های کوچک مقیاس از تیرهایی با تکیه‌گاه ساده و دارای قید جانبی در بال فوقانی و همچنین انجام تحلیل خطی کماتشی مقدار ویژه استوار بود. مدل آنها گیرداری بال کششی تیر برای کماتش قائم جان را نیز در نظر می‌گرفت. آیین نامه AISC [۴] از مدل سامرز در روابط طراحی تیرها در برابر این ناپایداری استفاده می‌کند. مدل سامرز رفتار تیرهای با تکیه‌گاه گیردار و تکیه‌گاه ساده را یکسان در نظر گرفته و برای سختی فنر معادل بال کششی به جای ضریب ۴۸ رابطه (۱) در مدل یورا از ضریب ۸۰ به عنوان مقدار بینابین ۴۸ و ۱۹۲ استفاده می‌کند. همچنین سامرز برای لحاظ نمودن اثر ناکاملی و تنش پسماند پیشنهاد استفاده از ضریب اطمینان در رابطه پیشنهادی را می‌دهد.

مولین و چنگ [۵] با تمرکز روی کار سامرز یک رابطه اندرکنشی برای بار کماتش تیر تحت تنش‌های قائم ناشی از بارگذاری موضعی که عامل ناپایداری است و تنش‌های ناشی از خمش تیر ارائه کردند. بار به دست آمده از این رابطه نسبت به مدل سامرز دقت بهتری نشان می‌داد. همچنین گراندین و چنگ [۶] نیز اصلاحاتی بر مدل پیشنهادی سامرز اعمال کردند. آنها مجموعه‌ای از آزمایش‌ها و تحلیل‌های عددی که در برگزیده تنش‌های پسماند، ناکاملی اولیه و آثار رفتار

نوع ناپایداری متفاوت از کماتش پیچشی جانبی معمول در تیرها بوده و می‌توان آنرا تا حدی مشابه کماتش اعوجاجی (کوماتش پیچشی جانبی همراه با اعوجاج مقطع) تیرها دانست. این مقاله به بررسی کماتش انتقالی جان از طریق انجام آزمایش و اصلاح مدل سامرز و یورا [۳] که در آیین‌نامه AISC [۴] استفاده شده، می‌پردازد.

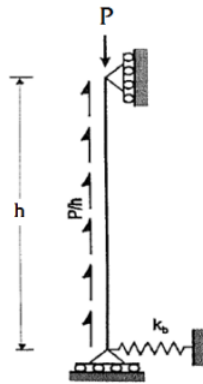
۲- تاریخچه تحقیقات

بررسی پژوهش‌های قبل نشان می‌دهد که مطالعات کمی در مورد پدیده کماتش انتقالی جان انجام شده است. یورا در پژوهش‌های خود ظرفیت باربری تیر تحت بار متمرکز و تحت اثر این پدیده را ارزیابی کرد. مدل یورا طبق شکل (۲) با این فرض که ناپایداری در جان رخ می‌دهد و بال کششی مشابه یک فنر محدود کننده تغییر مکان جانبی جان در ناحیه کششی عمل می‌کند، در نظر گرفته شده است. ارتفاع ستون در مدل وی برابر با ارتفاع جان تیر در نظر گرفته می‌شود که انتهای بالای آن به وسیله گیرداری ایجاد شده از سوی بال فشاری مقید است. انتهای پایینی ستون نیز به وسیله فنری به سختی T که مقدار آن از رابطه (۱) به دست می‌آید مقید می‌شود. در این رابطه E مدول ارتجاعی مصالح، I_f لنگر اینرسی بال کششی حول محور قوی خود (محور ضعیف تیر) و L طول تیر است.

$$T = \frac{48EI_f}{L^3} \quad (1)$$

شرایط تیر واقعی برای مدل یورا به صورت تکیه‌گاه ساده انتخاب شده و بنابراین بال کششی به صورت یک تیر ساده حول محور قوی خود، در برابر ناپایداری مقاومت می‌کند. علاوه بر این یورا از طریق تحلیل پایداری مدل خود، نموداری را پیشنهاد داد که در آن بار کماتشی ستون (بار کماتش انتقالی تیر متناظر) به سختی بال کششی مرتبط می‌شود. این مدل اولین تلاش برای توصیف پدیده کماتش انتقالی جان بود و عدم دقت و مشکلاتی در استفاده به عنوان یک روند طراحی داشت.

در این مقاله نیز تمرکز روی بررسی مدل یاد شده است است. سامرز و یورا نتایج آزمایش و آسیب‌های واقعی در سازه‌ها را گزارش کرده‌اند که نیاز به طراحی اعضاء در مقابل این ناپایداری را توجیه می‌کند. مدل پیشنهادی آن‌ها یک ستون با شرایط مرزی مشخص در دو انتها است، شکل (۳). ظرفیت تیر تحت بارگذاری در برابر کمناش انتقالی جان از تحلیل پایداری این ستون به دست می‌آید.



شکل (۳) مدل سامرز و یورا در کمناش انتقالی جان [۳]

این پژوهشگران ناحیه‌ای از جان با عرضی معادل ارتفاع مقطع را به عنوان یک ستون (با مقطع مستطیلی به ابعاد: عرض = ضخامت جان و طول = ارتفاع مقطع) در نظر گرفتند. به جای تنش قائم گسترده در جان ناشی از اعمال بار متمرکز نیز بار معادل فرض شده و همچنین انتهای بالای ستون در دو حالت گیردار و مفصلی به ترتیب معادل بال فشاری چرخش مقید و چرخش نامقید مدل می‌شود. همان‌گونه که در شکل (۳) دیده می‌شود بال پایینی به عنوان یک فنر در مقابل حرکت جانبی جان عمل می‌کند. با این حال بخاطر اختلاف در مدل ایده‌ال و رفتار واقعی، عدم دقت‌هایی در تخمین بار کمناشی تیر دیده می‌شود. مدل سامرز روابطی را به منظور طراحی در آیین نامه AISC ارائه می‌دهد.

۴- مدل تنوری و آزمایشگاهی

۴-۱- مدل پیشنهادی

مدل پیشنهادی یک ستون مشابه ستون مدل مرجع [۳] با طول h (ارتفاع مقطع تیر واقعی) به عنوان ناحیه موثر

غیرخطی مصالح و تغییر شکل‌های بزرگ کمناشی بود انجام دادند. آژاگ و یوهانسن [۷] در مطالعه خود این ناپایداری را بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها فقط نقطه بحرانی شروع ناپایداری را به عنوان یک معیار تغییر مکانی به دست می‌دهد و به تخمین بار بحرانی نمی‌پردازد و در نتیجه آن رابطه‌ای که به مشخصات ابعادی تیر مرتبط شده و پتانسیل رخداد ناپایداری در مقطع را نشان می‌دهد ارائه شده است.

تاپکایا [۸] نیز مطالعه عددی روی این پدیده انجام داد و با توجه به آن، پیشنهادهایی برای اصلاح روابط طراحی موجود ارائه کرد. در پژوهش او این پدیده مشابه پژوهش‌های مراجع [۲ و ۱] ناپایداری بال کششی نام‌گذاری شده است. همچنین در روابط پیشنهادی وی ضرابی برای در نظر گرفتن اثر تغییرات لنگر خمشی در طول تیر ناشی از اثر بارگذاری و گیرداری تکیه‌گاه‌ها معرفی شده است. جزئیات بیشتر مدل سامرز و یورا در مراجع [۳، ۸ و ۵] ارائه شده است.

با توجه به اعوجاج مقطع، کمناش انتقالی جان مشابهت‌هایی با کمناش پیچشی جانبی اعوجاجی در تیرها از نظر الگوی تغییر شکل مقطع دارد [۹]. با این حال تاکنون این پدیده از این دیدگاه مورد بررسی قرار نگرفته است. اگرچه مجموعه پژوهش‌های بالا از سال ۱۹۷۰ انجام گرفته اما این نوع ناپایداری به طور دقیق مورد بررسی نشده است. در این مقاله بازبینی کاملی بر پژوهش‌های قبل برای به دست آوردن درک بیشتر از کمناش انتقالی صورت گرفته است. علاوه بر آن اصلاح صورت گرفته بر مدل مرجع [۳] نیز بار بحرانی را با اختلاف کمتری نسبت به نتایج آزمایشگاهی تخمین می‌زند.

۳- تعریف مساله

در این قسمت جزئیات مدل سامرز و یورا [۳] شرح داده می‌شود. با توجه به این نکته که روابط طراحی آیین‌نامه AISC [۳] بر پایه نتایج پژوهش‌های این مرجع ارائه شده،

پتانسیل کل برای این ستون به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_0^h EI(W'')^2 dx + \frac{1}{2} k(W|_{4h/5})^2 - \frac{P}{2h} \int_0^h (h-x)(W')^2 dx \quad (2)$$

که در آن E مدول ارتجاعی و I لنگر اینرسی ناحیه مربعی از جان زیر محل بارگذاری و حول محور ضعیف بوده و W و P به ترتیب تابع تغییر شکل ستون و بار متمرکز وارد بر تیر در حالت واقعی (معادل بار گسترده با توزیع مثلثی وارد بر ستون) است. k سختی در نظر گرفته شده برای مقید سازی تغییر شکل از طرف بال کششی است.

$$W = a_1 \frac{x^2}{h^2} + a_2 \frac{x^3}{h^3} \quad (3)$$

تابع تغییر شکل رابطه (3) از درجه 3 انتخاب و در رابطه (2) جای‌گذاری شده و طبق روش ریتز، پتانسیل کل نسبت به ضرایب آن کمینه می‌شود:

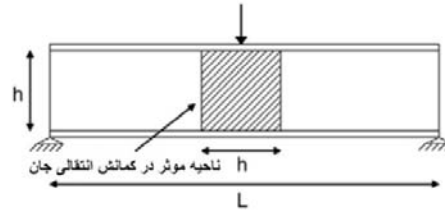
$$\frac{\partial \Pi}{\partial a_i} = 0 \quad (4)$$

با انجام محاسبات و ساده سازی، معادله مشخصه به دست آمده از رابطه (4) به شکل زیر است:

$$\left(\frac{h}{100}\right)P^2 - \left(\frac{8EI}{5} + 0.02L^3\right)P + \left(\frac{12E^2 I^2}{h^2} + 2.13EIk h + 0.005k^2 h^4\right) = 0 \quad (5)$$

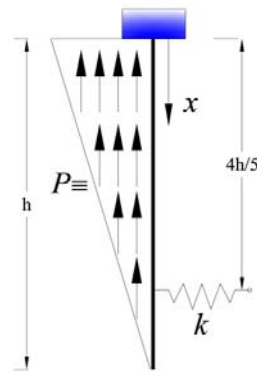
حل رابطه (5) نسبت به P، مقدار بار بحرانی برای مدل پیشنهادی را نتیجه می‌دهد. با در نظر گرفتن مقادیر معین برای ویژگی‌های مکانیکی و مشخصات هندسی مدل پیشنهادی و فرض مستقل بودن پارامتر k در این رابطه می‌توان مقدار نسبی بار بحرانی مدل را بر حسب مقادیر kh/P_e طبق نمودار شکل (6) نشان داد (P_e: بار بحرانی اوپلر ستون است). همچنین با افزایش سختی فنر مقید

جان در کماتش انتقالی و با ابعاد مقطع مستطیلی (عرض=ضخامت جان و طول=ارتفاع جان) است. شکل (4).



شکل (4) ناحیه موثر در کماتش انتقالی در تیر واقعی

توزیع خطی تنش قائم جان ناشی از بارگذاری، در طول ستون در نظر گرفته شده است. تکیه‌گاه فوقانی آن به صورت گیردار (مشابه حالت بال فشاری مقید در تیر واقعی) فرض می‌شود. همچنین یک فنر به سختی k نقش محدود سازی تغییر شکل به وسیله سختی خمشی ناحیه کششی جان و سختی خمشی بال کششی را دارد. در مدل‌های قبل، فنر در قسمت پایین ستون قرار داده شده و این مدل‌ها قید یا گیرداری در مقابل کماتش انتقالی را تماماً به وجود بال کششی نسبت می‌دهند در حالی که در مدل‌های با عرض بال کم و یا عرض بال صفر هم ظرفیت زیادی در تیر دیده می‌شود. همچنین تغییر شکل مقطع تیر نشان می‌دهد ورق جان در ناحیه‌ای بین تار خنثی تا پایین مقطع انحنای بیشتری دارد. بنابراین در مدل پیشنهادی محل فنر مقید کننده تغییر شکل به جای پایین ستون در این محدوده فرض شده و پس از بررسی نقاط مختلف، ارتفاع $4h/5$ ستون انتخاب شده است. شکل (5).

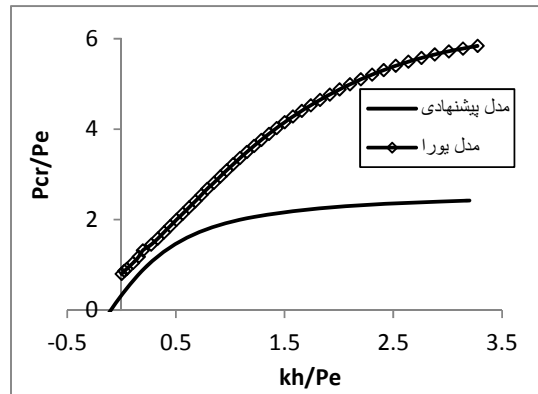


شکل (5) مدل پیشنهادی برای کماتش انتقالی جان

سرد و روش جوش نقطه‌ای (به عنوان یک روش غیر ذوبی) برای اتصال قطعات به یکدیگر استفاده شده که مقدار تنش پسماند به مراتب کمتر در مقایسه با جوش گوشه (به عنوان یک روش ذوبی) ایجاد می‌کند و بنابراین اثر تنش‌های پسماند در نظر گرفته نشده است. همچنین تکیه‌گاه‌ها نیز به صورت ساده و سازگار با رخداد و توسعه تغییر شکل‌های ناپایداری جانبی ساخته شده تا ممانعتی در برابر حرکت جانبی و خمش بخش پایینی مقطع به سمت خارج صفحه جان نداشته باشند. سه نمونه تیر با عرض بال کششی مختلف ($Bf14=14mm$, $Bf0=0/0mm$ و $Bf18=18mm$) ساخته شده است. شکل و ابعاد نمونه‌ها همراه با نقطه اعمال بار و محل قرارگیری تغییر مکان سنج‌ها در شکل (۷) نشان داده شده است. اهداف آزمایش شامل بررسی سازوکار شروع و گسترش ناپایداری، الگوی تغییر شکل و اثر ابعاد بال کششی و نیز تغییر شکل‌های موضعی زیر بار بوده است. شکل (۸) چیدمان آزمایش را نشان می‌دهد.

در حین آزمایش و در ابتدای بارگذاری، تغییر مکان جانبی به علت وجود ناکاملی در نمونه‌ها وجود داشته بیشتر می‌شود ولی نرخ افزایش آن با ازدیاد بار کاهش می‌یابد. با افزایش بیشتر بار، بخشی از جان که زیر فک بارگذاری قرار دارد دچار تغییر شکل‌های پلاستیک موضعی شده و پس از آن تا رسیدن به بار حداکثر، تغییر شکل تیر به صورت حرکت جانبی بال کششی گسترش می‌یابد. پس از رسیدن به بار حداکثر، تیر باز هم ظرفیت باربری دارد اما با تغییر شکل جانبی زیاد در بال کششی همراه می‌شود.

کننده کماتش در ناحیه کششی مقطع، نرخ رشد ظرفیت باربری در مدل پیشنهادی کمتر از مدل یورا [۲] خواهد بود.

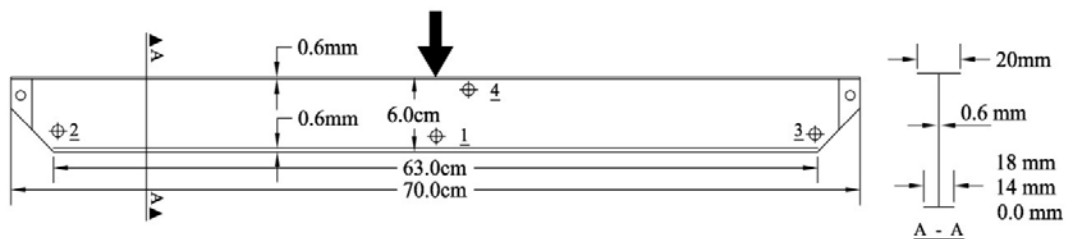


شکل (۶) منحنی بار بحرانی مدل پیشنهادی

بخش سمت راست این نمودار تا حد زیادی شبیه به نمودار ارائه شده به وسیله مرجع [۲] است؛ نکته قابل توجه اینکه با در نظر گرفتن بخش سمت چپ نمودار می‌توان مشاهده کرد که مقدار سختی ناحیه کششی مقطع k اثر کاهشی نیز بر مقدار بار بحرانی دارد و در واقع وجود بال کششی مقطع همواره اثر مثبت بر ظرفیت تیر ندارد. سامرز برای برخی حالات چنین موضوعی را مشاهده نموده ولی در پایه ریزی روابط مدل خود صحبتی از این مطلب به میان نمی‌آورد.

۲-۴-۲- آزمایش‌ها

بخش دیگر از اهداف این پژوهش انجام آزمایش روی نمونه‌های آزمایشگاهی بوده است. ابعاد نمونه‌ها به گونه‌ای انتخاب شده که کماتش انتقالی جان در آنها محتمل باشد. در ساخت نمونه‌ها با توجه به ضخامت کم آنها، از خمش



شکل (۷) ابعاد نمونه‌ها و طرح آزمایش (حسگرهای تغییر مکان Φ ۱ تا ۴ تا St1 تا St4 نام‌گذاری شده‌اند)

۴-۳- نتایج

از آزمایش‌های انجام شده موارد زیر مشاهده شد:

- کمناش انتقالی جان معمولاً با کمناش موضعی و لهیدگی جان زیر ناحیه بارگذاری همراه می‌شود. بخش عمده این تغییر شکل‌ها همزمان با رسیدن تیر به بیشینه ظرفیت آغاز شده و در حین کاهش ظرفیت باربری تیر به طور قابل ملاحظه افزایش می‌یابند.

- تغییر شکل در ابتدا با حرکت بال کششی به دلیل ناکاملی‌های موجود آغاز شده و سپس کمناش یا تسلیم موضعی رخ داده و در پایان با افزایش بار، کمناش انتقالی جان در طول تیر گسترش می‌یابد. پس از گسترش این کمناش، ظرفیت باربری تیر با نرخ تقریباً ملایمی کاهش می‌یابد.

- تغییر شکل‌های مرتبط با کمناش انتقالی جان با توجه به رفتار نمونه‌ها در حین برداشتن بار و در پایان آزمایش تقریباً در قلمرو ارتجاعی هستند.

- بار بحرانی تیر متأثر از تغییر عرض بال کششی بوده ولی تاثیر آن بر ظرفیت باربری تیر چشمگیر نیست.

بار کمناش انتقالی نمونه‌های آزمایشگاهی به همراه بار به دست آمده از مدل تئوری و همچنین مدل سامرز (رابطه آیین نامه AISC) در جدول (۱) ارائه شده است. عواملی مانند ناکاملی نمونه‌ها در فرایند ساخت، ایده‌آل نبودن شرایط آزمایش و همچنین تغییر شکل‌های موضعی پلاستیک را از جمله دلایل اختلاف نتایج مدل تئوری با آزمایش‌ها می‌توان بیان کرد.

نتایج ارائه شده در مراجع [۵ و ۶] برای ارزیابی دقت مدل پیشنهادی در پیش‌بینی بار کمناش انتقالی جان مورد استفاده قرار گرفته است؛ جدول (۲) و جدول (۳). همچنانکه مشاهده می‌شود مقدار خطای به دست آمده بین مقادیر بار مدل تئوری و بار آزمایش‌ها نشان دهنده وجود کران بالا یا پایین در تخمین ظرفیت است. برای داشتن یک تخمین کاربردی برای اهداف مهندسی می‌توان ضرایب اصلاحی برای مدل تئوری ارائه نمود که نیازمند داشتن اطلاعات آزمایشگاهی و انجام پژوهش‌های بیشتر در زمینه کمناش انتقالی جان است.

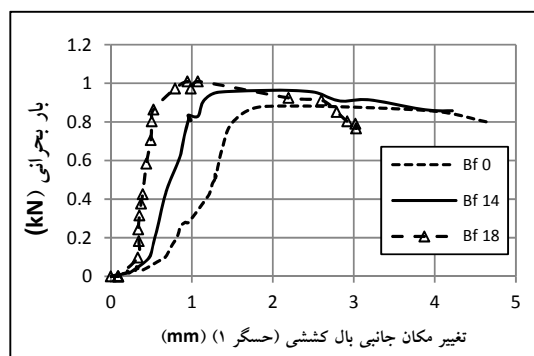


شکل (۸) طرح آزمایش همراه با قاب بارگذاری و محل قرارگیری حسگرهای تغییر مکان



شکل (۹) نمونه‌های تغییر شکل یافته در پایان آزمایش

در ادامه نمونه باربرداری شده و عمده تغییر شکل‌های مرتبط با کمناش انتقالی جان پس از رسیدن بار به مقدار صفر به حالت قبل از بارگذاری تغییر یافت. همچنین مشاهده شد که نرخ تغییر مکان جانبی در نمونه‌ها وابستگی مستقیم به عرض بال کششی دارد. تغییر شکل نمونه‌ها پس از بارگذاری در شکل (۹) نشان داده شده است. همچنین نتایج آزمایش به صورت منحنی‌های بار-تغییر مکان جانبی بال کششی نمونه‌ها، در شکل (۱۰) ارائه شده‌اند. بار بیشینه نمونه‌ها به عنوان بار بحرانی نمونه‌ها در نظر گرفته شده است و در بخش بعد با مقدار بار پیش‌بینی شده به وسیله مدل پیشنهادی مقایسه می‌شود.



شکل (۱۰) منحنی بار منحنی بار تغییر مکان نمونه‌ها

جدول (۱) نتایج آزمایش و مقایسه آن با مدل پیشنهادی و مدل سامرز (رابطه آیین نامه AISC)

مدل	بار آزمایش P_e (kN)	بار مدل تئوری P_t (kN)	خطا نسبی (%)	بار رابطه آیین نامه P_{AISC} (kN)	خطا به رابطه آیین نامه (%)
Bf 0	۰/۸۸	۰/۴۸	-۴۵/۵	(برای این مقطع قابل کاربرد نیست)	-----
Bf 14	۰/۹۶	۰/۶۵۳	-۳۲/۰	۰/۵۳۳	-۴۴/۵
Bf 18	۱/۰۱	۰/۸۰۷	-۲۰/۱	۱/۱۳	۱۱/۹

جدول (۲) مقایسه بار به دست آمده از مدل پیشنهادی با نتایج آزمایش‌های مولین و چنگ [۵]

نام نمونه	بار مدل پیشنهادی (kN)	بار آزمایش مولین و چنگ (kN)	خطای نسبی (%)
A	۰/۴۳۰	۰/۴۶۶	-۷/۷
B	۰/۳۹۸	۰/۳۶۴	۹/۳
C	۰/۳۵۹	۰/۲۹۵	۲۱/۷
D	۰/۳۴۰	۰/۳۸۳	-۱۱/۲
E	۰/۳۱۴	۰/۲۶۱	۲۰/۳
F	۰/۲۸۳	۰/۲۳۰	۲۳/۰
G	۰/۲۵۵	۰/۲۶۴	-۳/۴
H	۰/۲۳۸	۰/۲۴۹	-۴/۴
I	۰/۲۱۹	۰/۲۳۳	-۶/۰

جدول (۳) مقایسه بار به دست آمده از مدل پیشنهادی با نتایج آزمایش‌های گراندین و چنگ [۶]

شماره نمونه	بار مدل پیشنهادی (kN)	بار آزمایش گراندین و چنگ (kN)	خطای نسبی (%)
۱	۱۰۴/۵	۱۱۲	-۶/۷
۲	۱۳۲/۶۵	۱۳۵	-۱/۷
۳	۱۴۸/۱	۱۳۷	۸/۱
۴	۱۸۷/۴	۱۷۰	۱۰/۲

۵- نتیجه گیری

در این مقاله کماتش انتقالی جان (ناپایداری بال کششی) به وسیله‌ی مدل تئوری و انجام آزمایش مورد بررسی قرار گرفت. مطالعه روی سازوکار رخداد و گسترش این ناپایداری و ارزیابی ظرفیت باربری تیرها به روش تئوری و آزمایشگاهی انجام شد. نتایج را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- بار بحرانی مدل پیشنهادی، ظرفیت کماتش انتقالی برای نمونه‌های آزمایشگاهی پژوهشگران را با اختلاف کمتری تخمین می‌زند. البته این تخمین گاه اندکی پایین‌تر یا اندکی

بالاتر بوده که می‌توان با انجام آزمایش‌های بیشتر، رابطه بار بحرانی را با اعمال ضرایبی برای داشتن تخمینی با کران بالا اصلاح نمود.

- اگرچه بار بحرانی کماتش انتقالی جان متأثر از وجود بال کششی تیر است ولی این ناپایداری در مقاطع بدون بال کششی (شبهه مقاطع T شکل) نیز رخ می‌دهد ولی مقدار ظرفیت مقطع کمتر از حالت I شکل است. پیشنهاد می‌شود مدل‌های کماتش انتقالی جان به شکلی اصلاح شوند که الزاماً وابسته به وجود بال کششی نباشند و یک روش جامع برای در نظر گرفتن مقاطع دیگر ارائه کرد.

Structural Steel Buildings; AISC, Inc., Chicago, USA, 2010.

[5] Mullin, D.; Cheng, J.J.; "The effect of tension flange movement on the strength of point loaded I-beams"; Structural Engineering Report No. 208, University of Alberta, Canada, 1995.

[6] Grondin, G.Y.; Cheng, J.J.; "Sidesway web buckling of steel beams"; Engineering Journal-American Institute of Steel Construction Inc.; 36 (4), 1999, pp.169-179.

[7] Axhag, F.; Johansson, B.; "Tension flange instability of I-beams"; Journal of Constructional Steel Research; 49 (1), 1999, pp. 69-81.

[8] Topkaya, C.; "A numerical study on linear bifurcation web buckling of steel I-beams in the sidesway mode"; Journal of Engineering Structures; 28 (7), 2006, pp.1028-1037.

[9] Yoo, H.; Lee, C.; "Stability of Structures, Principles and Applications"; Elsevier, Burlington, USA, 2001.

• با توجه به الگوی تغییر شکل نمونه‌ها و همچنین رفتار پس از بارگذاری آنها می‌توان (با چشم‌پوشی از آثار کمانش و تغییر شکل‌های پلاستیک موضعی) تغییر شکل‌های مرتبط با کمانش انتقالی جان را با مدل‌های ارتجاعی مورد بررسی قرار داد.

• دامنه تغییرشکل کمانش انتقالی جان موجب کاهش بسیار زیاد در ظرفیت باربری تیر نمی‌شود و بهتر است روابط موجود بیشتر کنترل‌کننده تغییر شکل باشند.

• ضخامت ورق جان (سختی خمشی جان) پارامتر موثری در مقدار بار بحرانی است؛ با این حال مدل موجود در آیین‌نامه به طور کامل اثر این عامل را وارد نمی‌کند و مناسب است تغییراتی در آن لحاظ شود.

• استفاده از سخت‌کننده‌های جان زیر بار متمرکز علاوه بر جلوگیری از رخداد کمانش موضعی و لهیدگی، پایداری تیر در مقابل کمانش انتقالی جان را بیشتر می‌کنند.

• بهتر است در معرفی مدل‌های کمانش انتقالی جان، اندر کنش این ناپایداری با کمانش موضعی، لهیدگی جان و کمانش قائم جان به شکل هم‌زمان و به ویژه برای تیرهای تحت بار گسترده یا بارگذاری غیر از بار متمرکز در وسط دهانه بررسی شود.

• استفاده از سیستم‌های مهاربندی برای ناحیه کششی (به ویژه بال کششی) مقطع تیر به همراه سخت‌کننده‌های عرضی جان در جلوگیری از این ناپایداری موثر خواهد بود.

۶- مراجع

[1] Fisher, J. W.; Daniels, J. H.; "Static behavior of composite beams with variable load position"; Fritz Engineering Laboratory; Report No. 324.3, Lehigh University, Bethlehem, Pennsylvania, 1967.

[2] Yura, J.A.; "Web Behavior of Concentrated Loads in Steel Beams"; Column Research Council; Louis, Missouri, USA, 1970.

[3] Summers, P. A.; Yura, J. A.; "The Behavior of Beams Subjected to Concentrated Loads"; PMFSEL, Report No. 82-5, University of Texas, Austin, USA, 1982.

[4] American Institute of Steel Construction (AISC); Load and Resistance Factor Design Specification for

