

مهار جانبی بال تحتانی تیرهای فولادی در سیستم تیر و دال مختلط به وسیله سخت کننده عرضی جان

احسان دهقانی^{۱*}، سید حسام سرکشیک زاده^۲

۱- استادیار، مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه قم، قم

۲- کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، گرایش سازه، دانشگاه قم، قم

*قم، صندوق پستی ۳۷۱۶۱۷۴۳۱۵، dehghani@qom.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۳۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۸)

چکیده

یکی از معیارهای مهم در تعیین مقاومت خمشی تیرهای فولادی کمانش جانبی پیشگی است. در سیستم تیر و دال مختلط، بال فوقانی توسط برشگیرها به دال بتنی متصل شده‌اند و در برابر کمانش جانبی مهار شده است. در قاب‌های خمشی که تیر تحت لنگر مضاعف قرار می‌گیرد علاوه بر بال فوقانی بال تحتانی نیز تحت فشار قرار گرفته و احتمال کمانش جانبی آن وجود دارد. برای جلوگیری از رخداد این نوع کمانش تدابیری از جمله اتصال دو تیر مجاور هم بوسیله دیافراگم و المانهای خرپایی که بال تحتانی را به دال بتنی متصل می‌کنند اتخاذ می‌شود. در این مقاله با استفاده از مدل‌سازی به روش اجزاء محدود، یک جزئیات جدید برای مهار جانبی بال تحتانی تیرها در سیستم تیر و دال مختلط بررسی شده است. در این جزئیات بال تحتانی بوسیله یک جفت سخت‌کننده عرضی به دال بتنی متصل می‌شود و بوسیله یک جفت برشگیر عرضی از دوران آن جلوگیری می‌شود. نتایج حاصل از این مقاله نشان می‌دهد که اعمال جزئیات ذکر شده سبب کنترل ضوابط کمانش پیشگی جانبی در تیر شده و مانع ایجاد این نوع کمانش در بال تحتانی خواهد شد.

واژگان کلیدی

کمانش پیشگی جانبی، سخت کننده عرضی جان، تیر و دال مختلط، برشگیر، روش اجزای محدود

Lateral bracing of bottom flange in beam-slab composite system by web stiffener E. Dehghani, H. Sarkeshik

Abstract

Lateral torsional buckling is one of the important criterion for determining the flexural strength in steel beam design. Probability of it increases when laterally unbraced length is long. On one hand, lateral bracing should have sufficient stiffness to provide lateral support for compression flange of beam. On the other hand, this support must have enough strength. Composite beams consist of reinforced concrete slab and steel beam. To join the reinforced concrete and steel beam, stud has been used to transfer the horizontal force from concrete to steel beams. In fact, it plays role of lateral bracing for top flange. Bottom flange is also under pressure in the case of double curvature bending and there is probability of lateral torsional buckling. Common methods of beam lateral bracing are connecting two adjacent beams to each other and connecting bottom flange to concrete slab. In this study a new detail has been introduced for lateral bracing of the beam-slab composite system. In this study, bottom flange is connected to concrete slab by a pair of transverse web stiffeners and its rotation is prevented by a pair of transverse studs. Finite element analysis results show that this detail can prevent bottom flange from lateral torsional buckling.

Keywords

Lateral torsional buckling, Stiffener web, Beam-slab composite, Stud, Finite element method

تیرهای I شکل تحت خمش، حول محور اصلی خود نسبت به محور فرعی از سختی و مقاومت بیشتری برخوردارند. چنانچه این اعضاء بطور مناسب در برابر تغییر شکل‌های جانبی و پیچشی مهار نشوند، قبل از رسیدن به ظرفیت درون صفحه‌ای خود دچار کمانش جانبی پیچشی می‌شوند. دلیل وقوع کمانش جانبی پیچشی این است که بال فشاری تیر که در حقیقت مانند ستونی روی تکیه‌گاه ارتجاعی قرار دارد، ناپایدار می‌شود. بال فشاری در بار بحرانی، گرایش به خمش جانبی پیدا می‌کند و سایر قسمت‌های مقطع که پایدار هستند، از خمش جانبی جلوگیری می‌کنند. در نتیجه مجموعه مقطع چرخش کرده و در جهت جانبی حرکت می‌کند. بنابراین کمانش جانبی پیچشی یک تیر، ترکیبی از چرخش و خمش جانبی است که در اثر ناپایدار شدن بال فشاری صورت می‌گیرد. معادله دیفرانسیل حاکم بر مسأله فوق را به صورت زیر می‌توان نوشت [۱]:

$$EC_w \frac{d^4 \phi}{dz^4} - GJ \frac{d^2 \phi}{dz^2} - \frac{M_o}{EI_y} \phi = 0 \quad (1)$$

حل این معادله لنگر بحرانی کمانش را به صورت رابطه (۲) به دست می‌دهد:

$$M_o = \sqrt{\frac{\pi^4}{L^4} EC_w EI_y + \frac{\pi^2}{L^2} EI_y GJ} \quad (2)$$

در این روابط E مدول ارتجاعی، G مدول برشی، C_w ثابت تابیدگی مقطع، J ثابت پیچش مقطع، I_y لنگر دوم اینرسی حول محور ضعیف و L طول دهانه آزاد بوده و نیز M_o لنگر بحرانی کمانش مقطع است.

با دقت در رابطه (۲) در می‌یابیم که لنگر بحرانی کمانش جانبی پیچشی در این رابطه به دو عامل بستگی دارد که بیانگر مشارکت مقاومت پیچشی مقطع و نیز مشارکت مقاومت ستونی بال فشاری هستند. بنابراین برای افزایش لنگر بحرانی هم می‌توان مقاومت پیچشی مقطع را بالا برد و هم پایداری جانبی مقطع را افزایش داد.

سیستم تیر و دال مختلط به سیستم سازه‌ای اطلاق می‌شود که متشکل از مقاطع دال بتن مسلح و تیر فولادی می‌باشد. در این سیستم‌ها به منظور یکپارچگی بین بتن مسلح و تیر فولادی از برشگیرهایی استفاده می‌شود که وظیفه آنها انتقال نیروی افقی از پوشش بتنی سقف به تیرهای فولادی می‌باشد و در واقع نقش مهار جانبی را برای بال فوقانی ایفا می‌کنند. زمانیکه بال فوقانی در این نوع سیستم تحت فشار قرار می‌گیرد

برشگیرها از رخداد کمانش کمانش جانبی پیچشی در آنها جلوگیری می‌کنند. بررسی‌ها نشان می‌دهند که در قاب‌های خمشی به دلیل لنگر مضاعف، بال تحتانی نیز تحت فشار قرار گرفته و از آنجایی که دارای تکیه‌گاه جانبی نمی‌باشد باعث ناپایداری بال تحتانی شده و کمانش می‌کند. جهت رفع این مشکل روش‌های مهاری از جمله اتصال دو تیر مجاور هم بوسیله دیافراگم، افزودن المان‌های خرابایی که بال تحتانی را به دال بتنی متصل می‌کنند در نظر گرفته می‌شود. اولین سری مطالعات تئوری مهار تیرها در برابر کمانش جانبی پیچشی بوسیله Flint و Winter در زمینه استحکام و سختی لازم مهار موثر صورت گرفت [۲ و ۳]. در سال ۱۹۸۴ Trahair و Nethercot راه حل‌هایی برای مهار تیرهای بارگذاری شده با ممان یکنواخت، بار نقطه‌ای یا بار یکنواخت که به صورت پیوسته و گسسته مهار شده بودند ارائه کردند [۴]. طبق نتایج آنها مهار جانبی هنگامی که در بال فشاری قرار گیرد بیشترین تاثیر را دارد. در سال ۱۹۸۸ Tong و Chen رفتار کمانش یک تیر با تکیه‌گاه ساده تحت لنگر یکنواخت را مطالعه کردند و معادله‌ای برای محاسبه سختی مهار پیچشی ارائه دادند، معادله‌ای که اعوجاج جان که اغلب تاثیر قابل توجهی بر روی مهار می‌گذارند را به حساب نیاورده است [۵]. در سال ۲۰۰۱ Yura یک سری مطالعات آزمایشگاهی در مورد کمانش جانبی پیچشی تیرها با مهار جانبی پیچشی انجام داد و در این مطالعات اثرات متفاوتی از خروج از مرکزیت، اندازه سختی‌ها و محل قرارگیری سختی‌ها مورد مطالعه قرار داد و معادلات کلی طراحی برای مهار جانبی و پیچشی ارائه نمود [۶]. مطابق روابط یورا، برای تیرهای الاستیک تحت لنگر یکنواخت، سختی مهار جانبی ایده‌آل به شکل زیر تعریف می‌شود:

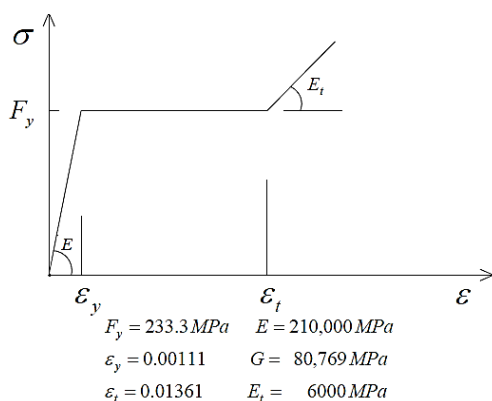
$$\beta_i^* = (4M_f/hl_b)C_d \quad \text{مهار وابسته} \quad (3)$$

$$\beta_i^* = (10M_f/hl_b)C_d \quad \text{مهار پیوسته} \quad (4)$$

در این روابط، M_f ممان ماکزیمم تیر، h فاصله بین مرکز بال‌ها، l_b طول مهارنشده و $C_d = 1 + \left(\frac{M_s}{M_l}\right)^2$ که M_s و M_l بیشترین لنگر خمشی است که موجب ایجاد فشار در بال‌های فوقانی و تحتانی می‌شود. در صورتی که تیر تحت انحنای مضاعف قرار داشته باشد ضریب C_d مساوی ۲ است در غیر این صورت مساوی ۱ است. آیین نامه AISC^۱ برای محاسبه سختی لازم مهار جانبی از روابط (۳) و (۴) استفاده می‌کند [۷]. در سال ۲۰۰۸، Yura و همکارانش آنالیزهای اجزاء محدودی را به صورت پارامتری



المان پوسته چهار وجهی S4R، برای مدل‌سازی برشگیرها از المان حجمی ۱۰ گرهی C3D10 و برای مدل‌سازی دال بتنی از المان حجمی ۸ گرهی غیر هندسی C3D8R شده است. میلگردها با المان T3D2 مدل‌سازی شده‌اند. برای معرفی رفتار تنش کرنش مصالح فولادی، منحنی تنش کرنش ارتجاعی خمیری سه خطی نشان داده شده در شکل (۱) مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدول یانگ و ضریب پواسون نیز به ترتیب برابر ۲۱۰ GPa و ۰/۳ فرض می‌شوند و از تنش‌های پسماند صرف نظر می‌شود.



شکل ۱- منحنی تنش کرنش فولاد

برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی بتن از مدل آسیب دیده خمیری بتن استفاده می‌گردد. در این مدل که با استفاده از آن مفاهیم الاستیک آسیب‌دیده ایزوتروپیک و پلاستیک کششی و فشاری، رفتار غیرخطی بتن بیان می‌شود. پارامترهای اساسی در تعیین رفتار بتن مطابق مدل پلاستیک آسیب‌دیده در جدول (۱) خلاصه گردیده است [۱۱]. منحنی تنش کرنش کششی و فشاری بتن مطابق شکل (۲) مورد استفاده قرار می‌گیرد. مش بندی مدل نیز دستی و به گونه‌ای انجام گرفته است که دقت حل در حد مطلوب بوده و از طرفی حجم و زمان انجام عملیات مشکل‌ساز نباشد.

۲-۲- بارگذاری و شرایط تکیه گاهی

برای محاسبه لنگر کمانشی جانبی پیچشی تیر در سیستم تیر و دال مختلط، تیر دو سر ساده با مقاطع IPE200 تا IPE300 به طول ۶ متر و بتن با مقطع مستطیلی ۱۵×۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود. درجات آزادی جابجایی دال در راستاهای عمود بر مقطع تیر مقید شده‌اند و برشگیرها با فواصل یکسان ۵۰۰ میلی‌متر به بال فوقانی تیر متصل گردیده‌اند. نمایی از شکل هندسی سیستم تیر و دال به همراه برشگیر در شکل (۲) نشان داده شده است. در محل تکیه‌گاه‌ها به منظور جلوگیری از

بر روی تیرها انجام دادند تا سختی و استحکام مورد نیاز برای مهارهای دیافراگم برشی توسعه دهند و بدین نتیجه رسیدند که سختی مورد نیاز برای پایداری مهار، اغلب به عنوان تابعی از سختی مهار ایده‌آل است و همچنین برای کنترل تغییر شکل‌ها و نیروهای مهار، سختی واقعی مورد نیاز بیشتر از سختی ایده‌آل است [۸]. در سال ۲۰۱۲، Egilmez و همکارانش مطالعاتی برای ارزیابی و بهبود پتانسیل مهار در تیرهای عرشه فولادی مورد استفاده در پل‌ها انجام دادند [۹]. آنها دریافتند که ساخت سیستم‌های PMDF جایگزین مناسبی برای مهار تیرها در پل‌های فولادی است و به طور قابل توجهی تعداد قاب‌های عرضی و دیافراگم‌های مورد نیاز برای پایداری مهار تیرهای فلزی در طول ساخت را کاهش می‌دهند.

هدف از این مقاله بررسی امکان جلوگیری از کمانش جانبی پیچشی تیر و دال مختلط تحت اثر لنگر مضاعف، بوسیله‌ی اتصال یک جفت سخت کننده عرضی به بال تحتانی است که بال فشاری را به دال بتنی مهار می‌کند. برای این منظور از مدل‌سازی به روش اجزاء محدود استفاده شده است و با انجام تحلیل غیرخطی هندسی اثرات اضافه کردن این سخت‌کننده‌ها در به تعویق افتادن کمانش پیچشی جانبی بررسی شده است.

۲- مدل اجزای محدود غیرخطی

به منظور بررسی رفتار کمانش جانبی پیچشی تیرها در سیستم تیر و دال مختلط، یک مدل اجزاء محدود در نرم افزار Abaqus 6.14 [۱۰] ساخته شده است. مدل‌های ساخته شده به روش غیرخطی هندسی تحلیل شده‌اند و اثرات وجود سخت‌کننده با حالت عدم وجود آنها مقایسه شده است. در ادامه جزئیات مدل‌سازی شرح می‌گردد.

۲-۱- مش بندی مدل و خصوصیات مصالح

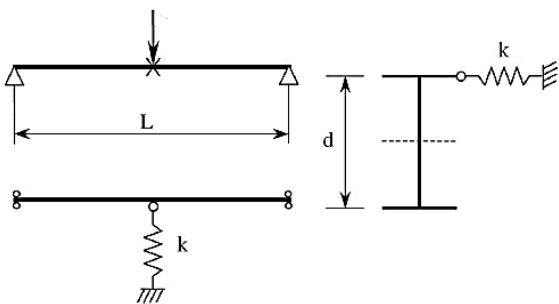
برای تحلیل سازه هر دو اثرات غیرخطی مادی در فولاد و بتن و همچنین اثرات غیرخطی هندسی در نظر گرفته شده‌اند. در تحلیل‌های انجام شده از دو نوع تحلیل کمانشی و استاتیکی غیرخطی هندسی نرم افزار استفاده شده است. در تحلیل کمانشی، مقادیر ویژه و شکل مودهای کمانشی به دست می‌آید. این تحلیل فقط در حالت الاستیک انجام می‌شود و اثرات غیرخطی مادی را نمی‌توان در آن در نظر گرفت؛ چرا که در تحلیل مقادیر ویژه ماتریس سختی ثابت می‌باشد. روش استاتیکی برای یافتن نیروهای داخلی، رفتار پس کمانش و اثرات متقابل کمانش‌های موضعی و کلی، روشی کارآمد می‌باشد. برای مدل‌سازی جان، بال‌ها (فوقانی و تحتانی) و سخت‌کننده‌ها از

جدول ۱- پارامترهای اساسی در تعیین رفتار بتن مطابق مدل

پلاستیک آسیب دیده

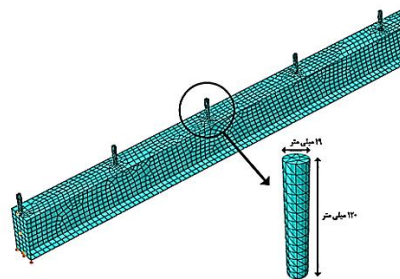
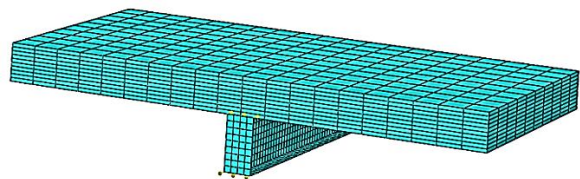
پارامتر	توضیح	مقدار
f'_{bo}/f'_{co}	نسبت حداکثر تنش فشاری دو محوره به حداکثر تنش فشاری تک محوره	۱/۱۶
ϕ	زاویه تورم اندازه گیری شده در یک فشارمحوری بالا در سطح p-q	۳۶
e	خروج از مرکزیت سطح پتانسیل پلاستیک و نشان دهنده سرعت میل تابع پتانسیل به خط مجانب	۰/۱
k	نسبتی از تنش ها در آزمایش سه محوری	۰/۶۶۶
dc	تعیین کننده سختی بتن در نقاط مختلف تنش-کرنش (پارامتر خسارت)	-

تیر بین نقاط مهار کمانش می‌کند. طبق رابطه ارائه شده توسط یورا تیر مورد نظر به سختی مهار $\beta_l^* = 149/9 \text{ N/mm}$ نیاز دارد و ظرفیت کمانشی در این حالت مقدار $28913/28 \text{ N}$ می‌باشد. به منظور بررسی صحت و سقم مدل‌سازی انجام شده در این مقاله، تیر فوق‌الذکر تحت بار متمرکز در وسط دهانه مطابق شکل (۳) با نرم‌افزار مدل‌سازی شده و تحت تحلیل کمانشی قرار گرفت. سپس با فنی در وسط دهانه مهار جانبی بال فوقانی مدل‌سازی گردید. با افزایش سختی‌های فنر تیر تحت تحلیل کمانشی قرار گرفت و نتایج مطابق جدول (۲) بدست آمد.



شکل ۳- مدل تیر دو سر ساده با مهار جانبی مطابق با آزمایش Yura [۶]

کمانش‌های موضعی ناخواسته از ورق‌های انتهایی استفاده شده است. بارگذاری تیرها به صورت یک جفت لنگر خمشی انتهایی است که یک انحنای مضاعف را در تیر و دال مختلط ایجاد می‌کند.



شکل ۲- شکل هندسی تیر و دال مختلط به همراه برشگیر

جدول ۲- نتایج تحلیل کمانش تیر با سخت کننده متفاوت

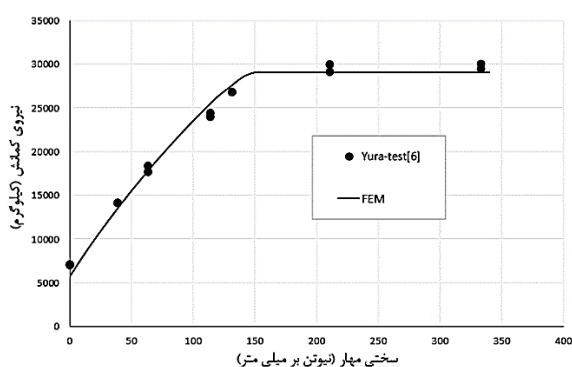
نیروی کمانشی (N)	سختی فنر (N/mm)
۶۵۳۰	۰
۹۸۵۰	۲۰
۱۳۶۷۲	۴۰
۱۷۱۹۸	۶۰
۲۰۴۷۲	۸۰
۲۳۵۱۴	۱۰۰
۲۶۳۲۸	۱۲۰
۲۸۵۳۷	۱۴۰
۲۹۰۸۲	۱۶۰

مقدار بار بحرانی در سختی ایده‌آل بدست آمده از روش اجزای محدود برابر 29074 نیوتن است که در مقایسه با مقدار حاصل از آزمایش تنها 1% بیشتر است. علت اختلاف در مقادیر بار بحرانی را می‌توان ناشی از اختلاف موجود در مصالح بکار رفته در آزمایش و مدل اجزاء محدود دانست. در شکل (۴) نتایج تحلیل نرم افزار Abaqus برای سختی فنر از صفر تا 350 نیوتن بر میلی‌متر آورده شده و با نتایج آزمایشگاهی یورا مقایسه شد. این مقایسه نشان می‌دهد که نتایج مدل‌های المان محدود

۳- بررسی صحت مدل‌سازی

چنانچه قبلاً ذکر شد، یورا به منظور مطالعه پدیده مهار جانبی چند نمونه تیر را مورد آزمایش قرار داد [۶]. مقطع یکی از تیرهای مورد آزمایش، تیر دو سر ساده $W12 \times 14$ به طول 732 سانتی متر (24 فوت) است که در وسط دهانه روی بال فوقانی تحت بار متمرکز قرار دارد. برای حالتی که مهار به بال فوقانی (فشاری) متصل شده، با افزایش سختی مهار ظرفیت کمانشی افزایش می‌یابد تا به سختی مهار ایده‌آل برسد و سختی مهار بیش از این مقدار نمی‌تواند ظرفیت کمانشی را افزایش دهد و

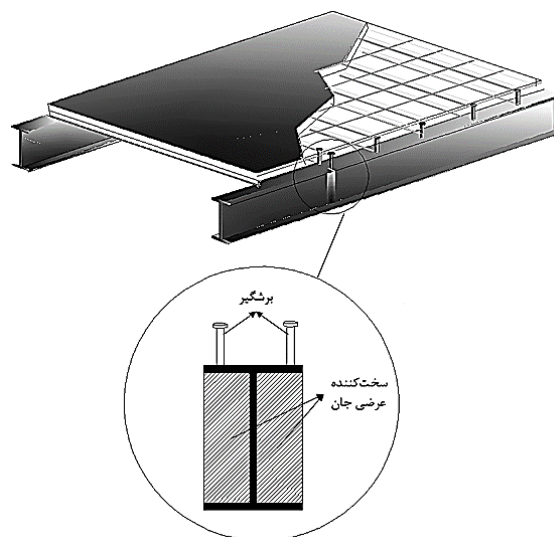
به خوبی با نمودارهای آزمایشگاهی Yura [6] تطابق دارد.



شکل ۴- مقایسه نتایج مدل المان محدود با داده‌های آزمایشگاهی Yura [6]

۴- بررسی نتایج آنالیز اجزاء محدود مدل‌ها

پس از صحت سنجی مدل‌سازی و مقایسه نتایج با روابط تحلیلی موجود، به منظور بررسی میزان تاثیر سخت‌کننده عرضی جان روی مهار جانبی بال تحتانی، چند نمونه تیر و دال مختلط با مقاطع IPE200 تا IPE300 به روش غیرخطی تحلیل می‌گردند (شکل ۵). در این تحلیل‌ها، نتایج تحلیل به صورت لنگر بحرانی کمانش جانبی پیچشی تیر ارائه شده و تاثیر سخت‌کننده عرضی جان با ضخامت‌های متفاوت و موقعیت قرارگیری مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۵- تصویر سه بعدی از جزئیات پیشنهادی مورد بررسی

۴-۱- بررسی اثر ضخامت سخت‌کننده

برای مشاهده اثر سخت‌کننده عرضی جان بر مقدار لنگر بحرانی

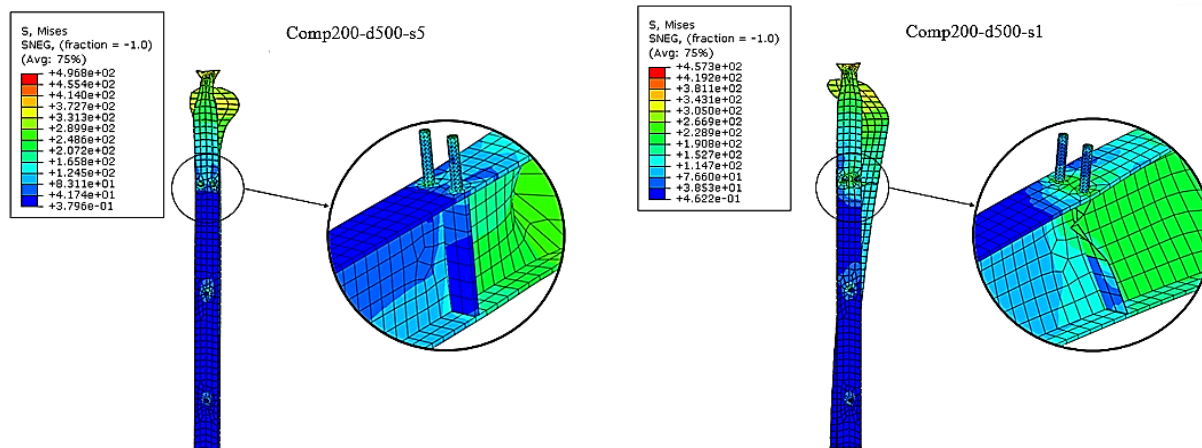
کمانش، از سخت‌کننده‌هایی به ضخامت ۱، ۳، ۵، ۸، ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر استفاده شده است. طبق آیین‌نامه AISC در محدوده دو برابر ارتفاع مقطع از بر تکیه‌گاه (ناحیه پلاستیک) مجاز به استفاده از سخت‌کننده نمی‌باشیم، از این رو سخت‌کننده‌ها با در نظر گرفتن ۱۰ سانتی‌متر حاشیه امن در فاصله مجاز از بر تکیه‌گاه، که برای هر مقطع متفاوت است، قرار داده شده‌اند. برای هر یک از مدل‌های ساخته شده یک اسم انتخاب شده است، که این اسم بیانگر کلیه مشخصات مدل تیر و دال مختلط می‌باشد. برای مدل تیر و دال مختلط بدون سخت‌کننده نام Comp200 و برای مدل تیر و دال مختلط همراه سخت‌کننده، نام Copm200-d500-s5 انتخاب شده است که عدد اول نمایانگر مقطع فولادی، عدد دوم فاصله سخت‌کننده از بر تکیه‌گاه و عدد سوم ضخامت سخت‌کننده می‌باشد. ابعاد سخت‌کننده با توجه به مقطع استفاده شده متفاوت می‌باشد؛ طول سخت‌کننده متناسب با ارتفاع مقطع و عرض آن متناسب با عرض بال مقطع است. مقادیر بدست آمده به صورت منحنی لنگر-دوران برای مقادیر متفاوت ضخامت سخت‌کننده ترسیم شده است که نتایج به صورت مقایسه‌ای در یک نمودار در کنار هم قرار داده شده است. همچنین به منظور مقایسه نتایج، لنگر پلاستیک نهایی محاسبه شده است که مقدار آن مساوی ZF_y می‌باشد، Z اساس مقطع پلاستیک تیر و دال مختلط است که برای هر سیستم با مقطع مختلف محاسبه شده است. برای مقایسه در شکل (۶) نتایج تحلیل اجزاء محدود سیستم تیر و دال مختلط در دو حالت متفاوت سخت‌کننده عرضی جان نشان داده شده است.

همانطور که در شکل (۶) مشاهده می‌گردد سخت‌کننده عرضی جان از دوران بال تحتانی تحت فشار جلوگیری کرده و باعث پایداری تیر شده است. به این نکته باید توجه داشت که ضخامت سخت‌کننده در مهار بال تحتانی تاثیر بسزایی دارد، همانطور که نشان داده شده سخت‌کننده با ضخامت کم تاثیر چندانی در مهار تیر نداشته و سخت‌کننده خود ناپایدار شده است. برای محاسبه ظرفیت باربری در سیستم تیر و دال مختلط با سخت‌کننده‌های متفاوت مقدار دوران بال تحتانی بدست آمده است. در شکل (۷) مقادیر بدست آمده از تحلیل به صورت منحنی لنگر-دوران برای مقادیر متفاوت ضخامت سخت‌کننده برای مقطع IPE200 به صورت مقایسه‌ای در یک نمودار در کنار هم قرار داده شده است.

از نتایج تحلیل ارائه شده چنین می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از سخت‌کننده عرضی جان لنگر بحرانی کمانش جانبی پیچشی را افزایش می‌دهد. به طور کلی استفاده از سخت‌کننده

سیستم‌های مورد مطالعه یکسان است؛ به‌طوریکه با افزایش ضخامت سخت‌کننده از ۱ میلی‌متر به ۳ میلی‌متر لنگر بحرانی به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد، در حالی که افزایش ضخامت تا ۱۵ میلی‌متر افزایش چندانی در لنگر بحرانی ندارد. همچنین استفاده از سخت‌کننده به ضخامت ۱ میلی‌متر لنگر بحرانی را افزایش نمی‌دهد و در اصل تاثیر مهاری ندارد.

عرضی جان بال تحتانی را به خوبی مهار می‌کند و ظرفیت تیر را تا نزدیک لنگر نهایی پلاستیک بالا می‌برد. اگر نمودارهای لنگر دوران برای سیستم‌های تیر و دال مختلط با مقاطع IPE مختلف همانند شکل (۸) با هم مقایسه شود، خواهیم دید که به ازای تمامی مقاطع IPE روند افزایش مقاومت کمانش سیستم تیر و دال مختلط نسبت به افزایش ضخامت سخت‌کننده برای تمام

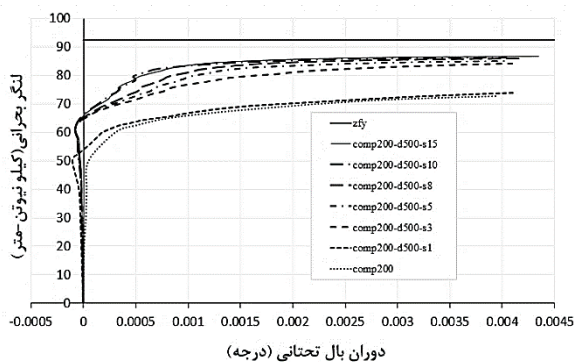


شکل ۶- کانتورهای تنش وان میس در تیر با ضخامت‌های مختلف سخت‌کننده

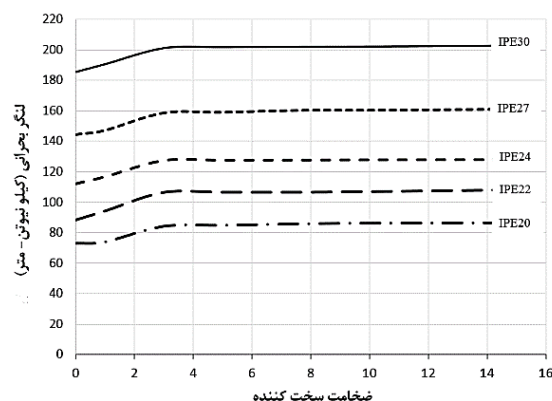
۴-۲- بررسی اثر محل قرارگیری سخت‌کننده

برای مشاهده اثر موقعیت سخت‌کننده بر ظرفیت کمانشی تیر در سیستم تیر و دال مختلط از مدل‌هایی با سخت‌کننده به ضخامت ۵ میلی‌متر که در فواصل مختلف از بر تکیه‌گاه قرار دارند استفاده شده است. مقادیر بدست آمده به صورت منحنی لنگر-دوران برای مقادیر متفاوت موقعیت سخت‌کننده ترسیم شده است که نتایج به صورت مقایسه‌ای در یک نمودار در کنار هم قرار داده شده است. برای مقایسه در شکل (۹) تغییر شکل بزرگ شده تیر در حالت قرارگیری سخت‌کننده در فواصل متفاوت، نشان داده شده است.

در شکل (۹) نتایج تحلیل برای تیر بدون سخت‌کننده، تیر با سخت‌کننده به فاصله ۱ متر از تکیه‌گاه و تیر با سخت‌کننده در فاصله نیم متری از تکیه‌گاه نشان داده شده است. همانگونه که دیده می‌شود، هنگامی که سخت‌کننده در فاصله ۱ متری از تکیه‌گاه قرار می‌گیرد با حالتی که سخت‌کننده استفاده نشده است تفاوت چندانی ندارد، ولی در حالت استفاده از سخت‌کننده در فاصله پنجاه سنتی متری بال تحتانی مهار شده و دوران کاهش یافته است. برای بررسی دقیق‌تر اثر موقعیت سخت‌کننده، مقدار لنگر بحرانی را در هر موقعیت سخت‌کننده نسبت به دوران بال در یک نمودار مطابق شکل (۱۰) تنظیم شده است.

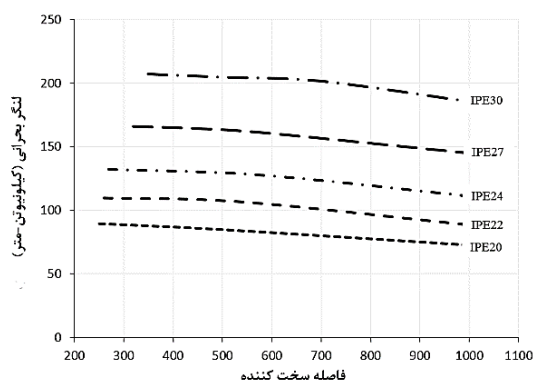


شکل ۷- نمودار لنگر-دوران با ضخامت‌های متفاوت سخت‌کننده برای مقطع IPE200



شکل ۸- تاثیر ضخامت سخت‌کننده بر لنگر بحرانی مقاطع IPE

نتیجه گرفت که استفاده از سخت‌کننده عرضی جان تا یک فاصله مشخص تاثیر مهاری روی تیر دارد و اگر فاصله سخت‌کننده از تکیه گاه از حدی بیشتر شود سخت‌کننده تاثیری در بهبود مقاومت کمانشی و مهار بال تحتانی نخواهد داشت؛ همچنین استفاده از سخت‌کننده در محدوده پلاستیک علی‌رغم افزایش مقاومت کمانشی تیر، عملکرد مناسبی برای سازه ندارد. اگر نمودارهای لنگر دوران برای سیستم‌های تیر و دال مختلط با مقاطع IPE مختلف همانند شکل (۱۱) با هم مقایسه شود، خواهیم دید که به ازای تمامی مقاطع IPE تاثیر موقعیت سخت‌کننده برای تمام سیستم‌های مورد مطالعه یکسان است. در نتیجه مطلوب‌ترین حالت برای قرارگیری سخت‌کننده در فاصله‌ی حداقل از محدوده مفصل پلاستیک احتمالی تیر می‌باشد.

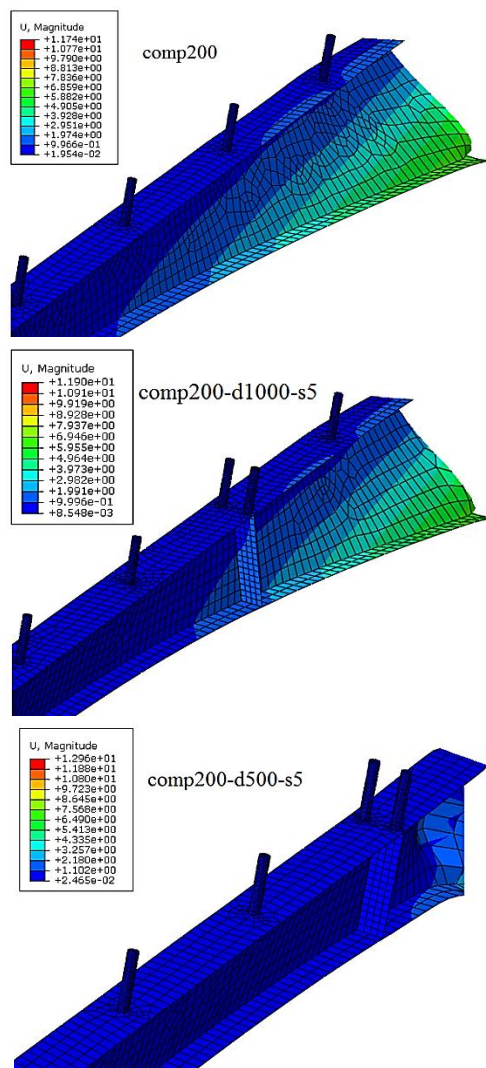


شکل ۱۱- تاثیر موقعیت‌های متفاوت سخت‌کننده بر لنگر بحرانی

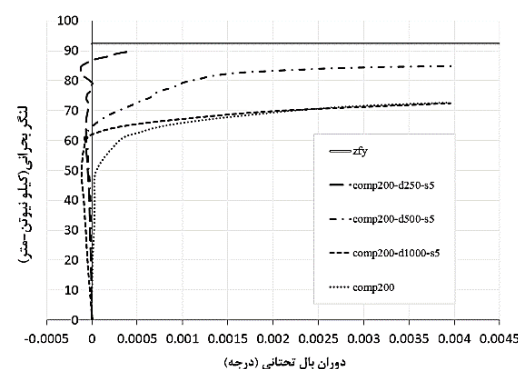
۴-۳- مقایسه نتایج با روابط آیین نامه

طبق روابط ارائه شده در آیین نامه AISC [۷]، مهار موثر به سختی مناسب و مقاومت کافی نیاز دارد. مقاومت مورد نیاز در این حالت از رابطه $P_{rb} = 0.008M_r C_d / h_o$ و سختی لازم از رابطه $\beta_{br} = \frac{4M_r C_d}{L_b h_o}$ محاسبه می‌گردد. M_r مقاومت خمشی لازم (نیوتن-میلی متر) می‌باشد و C_d ضریب اصلاح لنگر است که در خمش انحنای مضاعف برابر ۲ در نظر گرفته می‌شود و h_o فاصله بین بال‌ها و L_b طول مهار نشده می‌باشد. با ساده سازی روابط آیین نامه ضخامت مورد نیاز برای ارضای مقاومت به صورت $t = 0.072 \frac{z}{b^2}$ و ضخامت مورد نیاز برای ارضای ضابطه سختی به صورت $t = 0.0366 \frac{zh^2}{l_b b^3}$ محاسبه می‌گردد که در این روابط z اساس مقطع پلاستیک سیستم کامپوزیت، l_b طول مهار نشده، h طول سخت‌کننده، b عرض سخت‌کننده و t ضخامت سخت‌کننده می‌باشد. با توجه به نتایج جدول (۳) ملاحظه می‌شود که ضخامت مورد نیاز برای مهار بال تحتانی تیر در

نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد / ۱۰۱



شکل ۹- کانتورهای تغییر شکل جانبی در تیر با موقعیت قرارگیری متفاوت سخت‌کننده



شکل ۱۰- نمودار لنگر-دوران با موقعیت‌های متفاوت سخت‌کننده برای مقطع IPE200

از نتایج تحلیل ارائه شده برای سیستم تیر و دال مختلط در حالت قرارگیری سخت‌کننده در فواصل متفاوت، چنین می‌توان

بیان شد مشخص گردید که مقدار ضخامت ۳ میلی متر مطلوب ترین حالت را به دست می دهد، چرا که استفاده از مقادیر پایین تر اثر مطلوبی نداشته و مقادیر بالای آن نیز در افزایش بیشتر لنگر بحرانی چندان موثر نیستند؛ که این خود تاییدی بر دقت مناسب ضوابط طراحی آیین نامه AISC می باشد.

سیستم تیر و دال مختلط با مقاطع مختلف، مقدار یکسان ۳ میلی متر می باشد؛ یعنی برای مهار بال تحتانی بوسیله سخت کننده عرضی جان، سخت کننده با ضخامت ۳ میلی متر جوابگو است و مقدار ضخامت های بیشتر از آن باعث بهبود عملکرد مهاری سخت کننده نمی شود. از نتایج اجزاء محدود که در بخش قبل

جدول ۳- ضخامت مورد نیاز هر مقطع برای ارضای روابط آیین نامه

پارامتر	IPE200	IPE220	IPE240	IPE270	IPE300
Z_{comp} (mm ³)	۳۸۴۹۰۵	۴۶۳۷۸۳	۵۵۳۶۳۰/۸	۶۹۶۹۸۰/۶	۸۷۴۶۲۴/۵
l_b (mm)	۵۰۰	۵۴۰	۵۸۰	۶۴۰	۷۰۰
h (mm)	۱۸۳	۲۰۱/۶	۲۲۰/۴	۲۴۹/۶	۲۷۸/۶
b (mm)	۹۴/۴	۱۰۴/۱	۱۱۳/۸	۱۲۸/۴	۱۴۲/۹
$t_{strength}$ (mm)	۳/۰۷۲	۳/۰۳۷	۳/۰۷۸	۳/۰۰۶	۳/۰۸۴
t_{stiff} (mm)	۱/۱۲	۱/۱۳	۱/۱۵	۱/۱۷	۱/۲۱

۵- نتیجه گیری

نتایج حاصل از تحقیق عبارتند از:

- ۱- مدل سازی اجزاء محدود توانست روابط کمانش غیرخطی را به خوبی تحلیل کند.
- ۲- مدل سازی اجزاء محدود تیر و دال مختلط به همراه برشگیر رفتار این سیستم را به خوبی شبیه سازی می کند.
- ۳- سخت کننده های عرضی جان چنانچه همراه با زوج برشگیر به دال بتنی اتصال پیدا کنند، می توانند جایگزین سایر سیستم های مهار جانبی بال تحتانی تیر فولادی در سیستم تیر مختلط با دال بتنی شوند.
- ۴- ضخامت سخت کننده تا حدی که حداقل سختی برای جلوگیری از کمانش پیشگی جانبی را فراهم آورد، اهمیت دارد و ضخامت های بیشتر ورق های سخت کننده موجب افزایش مقاومت خمشی تیر مختلط نمی گردد. در مورد نمونه های بررسی شده که سیستم تیر و دال مختلط با پروفیل های IPE200, IPE220, IPE240, IPE270 و IPE300 بودند؛ روند افزایش مقاومت کمانش سیستم تیر و دال مختلط نسبت به افزایش ضخامت سخت کننده برای تمام سیستم های مورد مطالعه یکسان است و ضخامت بهینه سخت کننده های عرضی برابر ۳ میلی متر بدست آمده است.
- ۵- استفاده از سخت کننده عرضی جان تا یک فاصله مشخص تاثیر مهاری روی تیر دارد و اگر فاصله سخت کننده از تکیه گاه از حدی بیشتر شود سخت کننده تاثیری در بهبود مقاومت کمانشی و مهار بال تحتانی نخواهد داشت؛ همچنین استفاده از

سخت کننده در محدوده پلاستیک علی رغم افزایش مقاومت تیر، عملکرد مناسبی برای سازه ندارد. به ازای تمامی مقاطع IPE، تاثیر موقعیت سخت کننده برای تمام سیستم های مورد مطالعه یکسان است و در نتیجه مطلوب ترین حالت برای قرارگیری سخت کننده در حداقل فاصله از محدوده مفصل پلاستیک احتمالی در تیر.

۶- طبق روابط ارائه شده در آیین نامه AISC، مهار موثر برای جلوگیری از کمانش باید دارای سختی و مقاومت کافی باشد. بر اساس این روابط برای مهار بال تحتانی بوسیله سخت کننده عرضی جان، سخت کننده با ضخامت ۳ میلی متر جوابگو است و مقدار ضخامت های بیشتر از آن باعث بهبود عملکرد مهاری سخت کننده نمی شود. که این روابط با نتایج بدست آمده از مدل سازی اجزاء محدود کاملاً تطابق دارد.

۶- مراجع

- [1] Chen, W.F. (2007), "Plasticity in reinforced concrete", J. Ross Publishing.
- [2] Flint, A.R. (1951), "The influence of restraints on the stability of beams", The Structural Engineer, Vol. 29, pp. 235-246.
- [3] Winter, G. (1960), "Lateral bracing of columns and beams", Transactions of the American Society of Civil Engineers, Vol. 125, pp. 807-826.
- [4] Trahair, N.S. and Nethercot, D. (1984), "Bracing requirements in thin-walled structures", Elsevier Applied Science Publishers, Developments in Thin-Walled Structures, Vol. 99, pp. 93-130.
- [5] Geng-Shu, T. and Shao-Fan, C. (1988), "Buckling of laterally and torsionally braced beams", Journal of Constructional



Steel Research, Vol. 11, pp. 41-55.

- [6] Yura, J.A. (2001), "Fundamentals of beam bracing", Engineering Journal-American Institute of Steel Construction, Vol. 38, pp. 11-26.
- [7] ANSI, A. (2010), AISC 341-10, Seismic provisions for structural steel buildings, Chicago (IL): American Institute of Steel Construction.
- [8] Yura, J., Helwig, T., Herman, R. and Zhou, C. (2008), "Global lateral buckling of I-shaped girder systems", Journal of structural engineering, Vol. 134, pp. 1487-1494.
- [9] Egilmez, O.O., Helwig, T.A. and Herman, R. (2011), "Buckling behavior of steel bridge I-girders braced by permanent metal deck forms", Journal of Bridge Engineering, Vol. 17, pp. 624-633.
- [10] Hibbit, K. Sorensen, Inc., (2005), ABAQUS/standard user's manual, version 6.5, Hibbit, Karlsson & Sorensen.
- [11] Chaudhari, S.V. and Chakrabarti, M.A. (2012), "Modeling of concrete for nonlinear analysis using finite element code ABAQUS", International Journal of Computer Applications, Vol. 44, pp. 14-18.

پی نوشت

¹ American institute of steel constructors

² Permanent metal deck form