

بررسی عرض موثر شاه تیرهای مرکب فولادی-بتنی

امین محب خواه^{۱*}، حامد ایوک پور^۲، علیرضا جهان پور^۳

- ۱- دانشیار دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه ملایر
- ۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه ملایر
- ۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه ملایر

*amoheb@malayeru.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۶/۱۰/۱۲]

تاریخ دریافت: [۹۶/۰۸/۱۵]

چکیده

یکی از عوامل مهم که در تعیین ظرفیت باربری تیرهای مرکب نقش مهمی ایفا می‌کند، عرض مؤثر آن‌ها است. از عوامل تأثیرگذار بر عرض مؤثر می‌توان به نسبت عرض دال به طول دهانه (S/L)، تعداد و صلبیت گل‌میخ‌ها و نیز مقاومت مصالح به‌کار گرفته‌شده در تیر اشاره نمود. با وجود مطالعات فراوانی که درباره عرض مؤثر تیرچه‌های مرکب صورت گرفته‌است، هنوز شاه‌تیرهای موجود در سیستم سقف‌های مرکب -بنا به دلایلی و در جهت اطمینان- غالباً^۱ به صورت غیرمرکب و بدون لحاظ کردن اثر دال بتنی طراحی می‌شوند که این امر می‌تواند منجر به غیراقتصادی شدن طرح شود. با توجه به اینکه تاکنون عرض مؤثر این قبیل شاه‌تیرها بررسی نشده است، در این مقاله عرض مؤثر شاه‌تیرهای مرکب در قاب‌های ساختمانی ساده ابتدا با فرض رفتار الاستیک-خطی از طریق روش اجزای محدود و به کمک نرم‌افزار آباکوس ارزیابی می‌شود. برای این منظور، تعدادی شاه‌تیر مرکب با نسبت‌های S/L مختلف به صورت دو سر مفصل (تحت بارگذاری‌های متمرکز و گسترده) با توجه به تقارن و یا عدم تقارن پانل‌های مجاور و همچنین با در نظر گرفتن اثر تیرچه‌های فرعی مرکب، تحلیل شده و تغییرات مقادیر عرض مؤثر آنها در طول دهانه محاسبه شد. در ادامه، برای بررسی اثر ترک خوردگی و خرابی دال بتنی در میزان عرض مؤثر این نوع از شاه‌تیرها، تعدادی از نمونه‌ها به روش غیرخطی نیز تحلیل شده و عرض مؤثر آنها دوباره محاسبه شد. مقایسه مقادیر عرض مؤثر بدست آمده از تحلیل عددی با مقادیر پیشنهادی بحث دهم از مقررات ملی ساختمان ایران نشان می‌دهد که این قبیل شاه‌تیرهای مرکب -حتی با وجود آثار تیرچه‌های مرکب متعامد و عملکرد دوجبهه دال بتنی- قادر به تامین عرض مؤثر پیشنهادی مقررات ملی ساختمان بوده و می‌توان آنها را به صورت مرکب تحلیل و طراحی نمود.

واژگان کلیدی: شاه‌تیر مرکب، مدل اجزاء محدود، عرض مؤثر، تیرچه مرکب، رفتار غیرخطی.

۱- مقدمه

به دلیل امکان استفاده از مزایای مصالح بتنی و فولادی (مانند مقاومت فشاری بالای بتن و ظرفیت کششی فولاد) به طور همزمان در این قبیل تیرها است. اگر بین دال بتنی و تیر فولادی اتصالی وجود نداشته باشد، در این صورت رفتار تیر به صورت

سالم‌هاست که استفاده از تیرهای مرکب که در آن‌ها دال بتنی با استفاده از اتصالات برشی به یک پروفیل فولادی متصل می‌شود در ساختمان‌های اسکلت فولادی رواج دارد. این امر

S/L (نسبت فاصله مرکز به مرکز تیرچه‌های مرکب از یکدیگر به طول دهانه) بستگی دارد. مطالعات گذشته بیشتر روی نسبت‌های S/L بین ۰/۰۶ تا ۰/۲۴ برای پل‌ها و نسبت‌های ۰/۲۵ تا ۰/۷ برای ساختمان‌های معمولی صورت گرفته است. این در حالی است که اگر در شاه‌تیرهای موجود در سقف‌های مختلط با تعبیه اتصالات برشی از لغزش بین دال بتنی و پروفیل فولادی جلوگیری شود، به نظر می‌رسد که باید از نسبت‌های بالاتر از ۰/۵ که در ساختمان‌های متداول رایج‌تر است، برای محاسبه عرض مؤثر این نوع شاه‌تیرها - در حالتی که پانل‌های دو طرف مساوی و متقارن است - استفاده نمود.

چاپمن و بالاکریشان [2] در سال ۱۹۶۴ هفده عدد تیر دو سر مفصل T شکل که تعداد اتصالات برشی در آن‌ها متفاوت بود را تحت بارهای متمرکز و گسترده استاتیکی به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. بروسنان و یانگ [3] برای بررسی چگونگی تغییرات عرض مؤثر در تیرهای L شکل، شش عدد تیر مرکب با نسبت‌های مختلف S/L (بین ۰/۲۵ تا ۰/۵) را به روش اجزاء محدود را مطالعه کرده و نتیجه گرفتند که عرض مؤثر در این قبیل تیرها با افزایش نسبت S/L افزایش می‌یابد [3].

آمادیو و فراجیاکومو [5] در سال ۲۰۰۲ با استفاده از روش اجزاء محدود به بررسی عرض مؤثر در تیرهای مرکب طره پرداختند. برای این منظور، آن‌ها چند نمونه تیر مرکب طره (به طول ۲/۵ متر و S/L بین ۰/۴ تا ۰/۶) را تحت بارگذاری متمرکز و گسترده به روش خطی و غیرخطی تحلیل نمودند. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که عرض مؤثر دال بتنی در طول تیر متغیر بوده و در نواحی میانی به بیشترین مقدار خود می‌رسد. همچنین، ملاحظه شد که با ورود تیر به حوزه غیرخطی، عرض مؤثر دال بتنی افزایش می‌یابد. آمادیو و همکاران [6] با استفاده از آزمایش‌های تجربی، روند تغییرات عرض مؤثر را در هنگام افزایش بار بررسی کردند. نی و همکاران [7] به بررسی عرض مؤثر در حالت مقاومت نهایی پرداختند و از طریق مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی، چگونگی توزیع تنش و کرنش طولی در دال بتنی را مطالعه کردند. پراکاش و همکاران [8] به روش عددی اثر رفتار غیرخطی اتصالات برشی در ظرفیت باربری تیرهای مرکب را بررسی نمودند. باران و توپکایا [9] رفتار خمشی تیرهای

غیرمرکب خواهد بود. با استفاده از عملکرد مرکب دال و تیر فولادی می‌توان ظرفیت تیر را تا حدود سی درصد تیر مشابه با عملکرد غیرمرکب افزایش داد [1].

ضوابط تیرهای مرکب از سال ۱۹۴۴ در آیین‌نامه آشتو وارد شده و در طراحی پل‌ها استفاده شده است. همچنین ضوابط این نوع از تیرها در سال ۱۹۵۲ برای طراحی تیرچه‌های مرکب موجود در قاب‌های ساختمانی وارد آیین‌نامه AISC شد. در این آیین‌نامه‌ها در خصوص طراحی شاه‌تیرهای فولادی (تیرهای اصلی) در سقف‌های مرکب سخنی به میان نیامده است. این نوع شاه‌تیرها بیشتر در عمل بنا به دلایلی به صورت غیرمرکب و بدون در نظر گرفتن عملکرد مختلط طراحی می‌شوند. استدلال برخی از طراحان این است که اگر تیرچه‌های فرعی عمود بر تیر اصلی به صورت مرکب طراحی شوند دیگر نمی‌توان تیر اصلی را نیز مرکب در نظر گرفت؛ زیرا دال بتنی نمی‌تواند به طور همزمان برای هر دو تیر فولادی متعامد نقش تقویتی و عملکرد مرکب داشته باشد.

با وجود این‌که شاه‌تیرهای مرکب فولادی-بتنی موجود در سقف‌های مختلط به صورت غیر مرکب طراحی می‌شوند، اما در اجرای آنها اتصالات برشی کافی به منظور جلوگیری از لغزش دال بتنی بر روی پروفیل شاه‌تیر فولادی تعبیه می‌شود (شکل ۱).

شکل ۱. تیرچه‌ها و شاه‌تیر مرکب قبل از بتن‌ریزی



Fig. 1. Composite girder and secondary beams before the construction of concrete slab

یکی از عواملی که در بررسی تیرهای مرکب باید مورد توجه قرار گیرد عرض مؤثر آن‌ها است. عرض مؤثر تیرهای مرکب به عوامل مختلفی از جمله: درجه انعطاف‌پذیری اتصال برشی، نوع و مقدار بارگذاری، علامت لنگر خمشی، شرایط تکیه گاهی و نسبت

مستطیلی به ارتفاع تنش طولی بیشینه موجود در دال بتنی قرار گیرد، عرض این مستطیل همان عرض مؤثر مورد نظر برای تیرهای مرکب با رفتار الاستیک خطی خواهد بود. این مفهوم با استفاده از شکل (۲) و روابط زیر قابل بیان و محاسبه است:

شکل ۲. مفهوم عرض مؤثر [6]

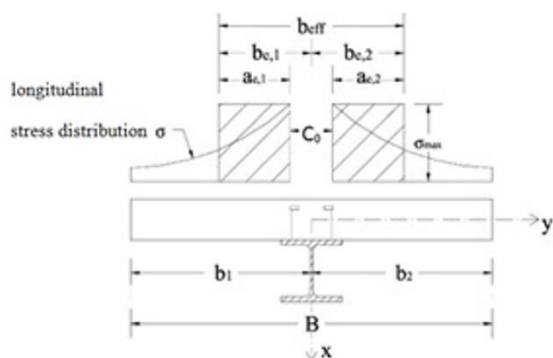


Fig. 2. The concept of effective width [6]

شکل ۳. مقدار عرض مؤثر پیشنهادی مقررات ملی ساختمان برای تیرچه‌های مرکب [1]

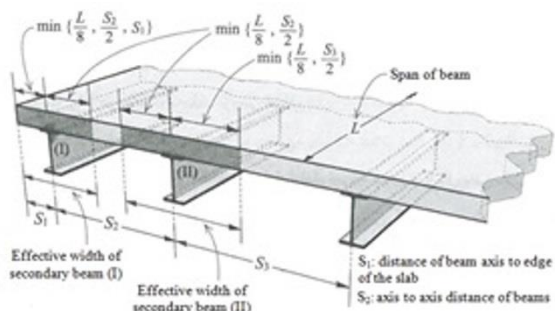


Fig. 3. The proposed effective width of INBC for secondary composite beams [1]

$$a_{e_i} = \int_{C_0}^{b_i} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{\max}} \right) dy \quad i = 1, 2 \quad (1)$$

$$b_{\text{eff}} = C_0 + a_{e_1} + a_{e_2} \quad (2)$$

که در این روابط، C_0 طول اتصال برشی، σ توزیع تنش محوری طولی موجود در دال مقطع مرکب، σ_{\max} بیشینه‌ی تنش طولی موجود در دال، b_i عرض دال بتنی در هر طرف تیر فولادی و b_{eff} عرض مؤثر دال بتنی است. مبحث دهم از مقررات ملی ساختمان ایران [11]، مقدار

فولادی-بتنی نیمه مرکب با اتصالات برشی ناودانی را به صورت آزمایشگاهی بررسی نموده و نتیجه گرفتند که حتی برای تیرهای با درجه پایین عملکرد مرکب، ظرفیت خمشی و سختی، بیش‌تر از نمونه پروفیل فولادی تنها است. ونگ و نی [10] به بررسی عرض مؤثر در تیرهای مرکب با دال بتنی دارای بازشو پرداختند.

با وجود مطالعات فراوانی که درباره رفتار تیرهای مرکب و عوامل مختلف تاثیرگذار روی رفتار آن‌ها صورت گرفته است، تاکنون در خصوص رفتار شاه‌تیرهای مرکب فولادی-بتنی در قاب‌های ساختمانی ساده (قاب با تیرهای دو سر مفصل) با وجود اجرای آن‌ها به صورت مرکب در ساخت و سازهای متداول و چگونگی تغییرات عرض مؤثر در طول آن‌ها با نسبت $S/L > 0.7$ ، هیچ‌گونه بررسی صورت نگرفته است. پس با توجه به کاربرد فراوان شاه‌تیرهای مرکب در قاب‌های ساختمانی اسکلت فلزی به عنوان سیستم باربر ثقلی در ساختمان‌های متداول و ناشناخته بودن آثار تیرهای مرکب فرعی و عملکرد دو جهته دال بتنی روی ظرفیت نهایی شاه‌تیرهای مرکب، انجام مطالعات دقیق با هدف اقتصادی نمودن طراحی آن‌ها ضروری می‌نماید.

در این مقاله سعی می‌شود تا به روش اجزاء محدود، مقدار عرض مؤثر شاه‌تیرهای مرکب متداول در صنعت ساخت و ساز کشور و چگونگی تغییرات آن در طول دهانه بررسی شده و با مقدار عرض مؤثر پیشنهادی مقررات ملی ساختمان [11] که برای تیرچه‌های مرکب ارائه شده است مقایسه شود.

۲- مفهوم عرض مؤثر

برای طراحی تیرچه‌های مرکب لازم است تا مقاومت قسمتی از دال بتنی در محاسبه مقطع مرکب در نظر گرفته شود. به عبارت دیگر، لنگر خمشی در این قبیل تیرها توسط مجموعه تیر فولادی و بخشی از دال بتن متکی بر آن - که عرض مؤثر نام دارد - تحمل می‌گردد. لذا، اولین گام برای طراحی تیرهای مرکب، محاسبه عرض مؤثر دال بتنی بر حسب پارامترهای تاثیر گذار است.

اگر مساحت زیر نمودار توزیع تنش محوری طولی موجود در دال بتنی در مقطع عرضی، معادل با مساحت

الاستیک از روش تحلیل Static General و در حالت رفتار غیرخطی از روش تحلیل Static Riks استفاده شد. برای مدل سازی بتن در نرم افزار آباکوس از مدل خسارت پلاستیک بتن استفاده می شود. برای این نوع مدل لازم است منحنی تنش- کرنش فشاری و کششی به همراه پارامتر خرابی بتن در هر دو فاز فشاری و کششی در نرم افزار تعریف شود. برای توصیف منحنی تنش-کرنش فشاری بتن از مدل الاستو پلاستیک با نرم شوندگی کرنشی که کاربرا و چو [13] پیشنهاد نموده اند استفاده شد. برای تعریف منحنی تنش-کرنش کششی بتن فرض شد که تنش به صورت خطی با افزایش کرنش تا مقدار مقاومت کششی بتن افزایش می یابد و بعد از آن بدلیل وجود ترک های کششی به صورت خطی تا مقدار صفر کاهش می یابد. کرنش نهایی بتن در فاز کششی ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شده است. پارامترهای خرابی فشاری و کششی بتن نیز بر اساس روابط موجود در مرجع [12] محاسبه و در نرم افزار وارد شد. برای مدل سازی رفتار پروفیل فولادی و میلگردها از مدل الاستیک-پلاستیک با سخت شوندگی استفاده شده است.

۳-۳- اعتبارسنجی مدل اجزاء محدود

در این بخش برای اعتبارسنجی مدل عددی فوق الذکر، تیر مرکب آزمایش شده توسط چاپمن و بالا کریشن [2] با ابعاد نشان داده شده در شکل (۴) به طول ۵/۵ متر به صورت دوسر مفصل تحت بار متمرکز میانی مدل سازی و تحلیل شد. برای این منظور، دال بتنی با استفاده از ۸ المان حجمی در عرض دال، ۵۲ المان در طول و ۱ المان در ارتفاع دال به صورت سه بعدی مدل شد. پروفیل فولادی نیز به وسیله ۵ المان حجمی در ارتفاع جان و ۴ المان حجمی در عرض هر یک از بال های فوقانی و تحتانی و ۱ المان در ضخامت بال و جان و ۴۸ المان در طول پروفیل فولادی شبیه سازی شد. برای مدل کردن میلگردهای طولی نیز، ۴۸ المان خرپا و برای میلگردهای عرضی ۸ المان خرپا استفاده شد. گل میخ ها در این بخش از پژوهش، هم به صورت سه بعدی (مدفون در دال بتنی) و هم با استفاده از قید Tie مدل سازی می شوند.

منحنی بار-تغییر مکان حاصل از تحلیل عددی این تیر با هر

عرض مؤثر دال بتنی در هر طرف تیر فولادی مرکب را برابر با حداقل مقدار بدست آمده از مقادیر زیر پیشنهاد می کند (شکل ۳):

- یک هشتم طول دهانه تیر
- نصف فاصله محور تا محور تیرهای مجاور
- فاصله ی لبه دال بتنی تا محور تیر

۳- روش مدل سازی عددی و اعتبارسنجی

۳-۱- مدل سازی نمونه ها

در این پژوهش عرض مؤثر شاه تیرهای مرکب تحت لنگر مثبت در دو حالت مصالح با رفتار الاستیک-خطی و نیز مصالح با رفتار الاستو-پلاستیک غیرخطی از طریق روش اجزای محدود به کمک نرم افزار آباکوس [12] بررسی می شود. برای این منظور، نمونه های مورد نظر به صورت سه بعدی با المان های حجمی^۱ برای دال بتنی و تیر فولادی و المان های خرپا^۲ برای آرماتورها مدل سازی شد. در عمل برای اجرای اتصال ساده (مفصلی) تیر فرعی به شاه تیر و انتقال نیروی برشی، از ورق یا نبشی جان استفاده می شود. بنابراین و با عنایت به اینکه هدف از این پژوهش بررسی رفتار موضعی اتصال ساده تیر به شاه تیر نیست و همچنین با فرض عدم ایجاد خرابی در نبشی جان، درجات آزادی انتقالی گره های تیر فرعی و شاه تیر در محدوده ی ارتفاع نبشی جان با استفاده از قید Tie به یکدیگر متصل شدند تا قادر به انتقال نیروی برشی باشند. همچنین، به منظور سهولت مدل سازی و با توجه به اینکه برای محاسبه عرض مؤثر شاه تیرها، نباید هیچگونه شکست یا خرابی در گل میخ ها ایجاد شود، پس برای مدل سازی اتصالات برشی و انتقال برش در بین دال بتنی و شاه تیر فولادی در نمونه آزمایشگاهی مورد بحث در بخش ۳-۳ و سایر مدل های مطالعه پارامتری نیز از قید Tie استفاده شد. میلگردهای دال بتنی نیز به صورت مدفون در دال مدل شدند.

۳-۲- روش تحلیل

برای تحلیل مدل های در نظر گرفته شده در حالت رفتار

1 Soild
2 Truss

این پلان برحسب نسبت‌های مختلف عرض دال به طول دهانه $(S/L > 0.7)$ در گروه‌های متقارن و نامتقارن جدول (۱). تمامی شاه‌تیرهای بررسی شده تحت بار مرده ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمربع و بار زنده ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع و با فرض عملکرد مرکب، تحلیل و طراحی شدند. مقاطع بدست آمده برای این تیرها با استفاده از پروفیل‌های موجود در بازار در جدول (۱) نوشته شده است.

به منظور لحاظ نمودن آثار تیرچه‌های مرکب فرعی روی عرض مؤثر شاه‌تیر مرکب، این تیرچه‌ها نیز مدل‌سازی شده‌اند. مقاومت تسلیم و نهایی پروفیل‌های فولادی به ترتیب برابر با ۲۴۰ و ۳۷۰ مگاپاسکال، مقاومت تسلیم و نهایی آرماتورهای فولادی به ترتیب برابر با ۲۲۰ و ۳۶۰ مگاپاسکال و مقاومت فشاری و کششی بتن مصرفی در دال نیز به ترتیب برابر با ۲۵ و ۳/۱ مگاپاسکال فرض شده است. ضخامت دال بتنی ۸۰ میلی‌متر است.

شکل ۶. پلان تیرریزی سقف مورد بررسی

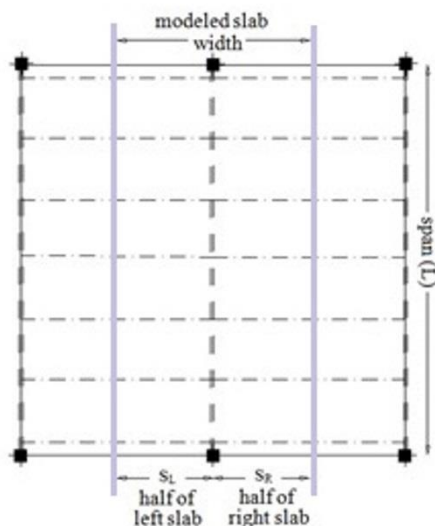


Fig. 6. Plan of the studied composite floor

مدل‌های گروه I همان‌گونه که در جدول (۱) مشخص است، دارای پانل‌های مجاور متقارن و مستطیلی با نسبت‌های S/L بین ۰/۵ تا ۱/۱ است. مدل‌های گروه II فهرست شده در جدول (۱) همان مدل‌های گروه I است با این تفاوت که عرض دال سمت چپ شاه‌تیر مرکب به منظور ایجاد حالت نامتقارن،

دو روش مدل‌سازی گل‌میخ‌ها در کنار منحنی بدست آمده از آزمایش در شکل (۵) ترسیم شده است. چنانکه ملاحظه می‌شود، استفاده از هر دو روش مدل‌سازی اتصالات برشی، نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد. بنابراین، در بخش مطالعه پارامتری به منظور سهولت مدل‌سازی، از قید Tie برای اتصال دال بتنی به شاه‌تیر فولادی استفاده می‌شود. با مقایسه منحنی حاصل از مدل‌سازی با قید Tie و منحنی ظرفیت آزمایشگاهی در این شکل ملاحظه می‌شود که بیشینه بار قابل تحمل مدل عددی (۵۰۱ کیلو نیوتن) در حدود ۹۷/۵ درصد ظرفیت آزمایشگاهی است.

شکل ۴. مقطع تیر مرکب آزمایش شده در مرجع [2] (ابعاد برحسب mm)

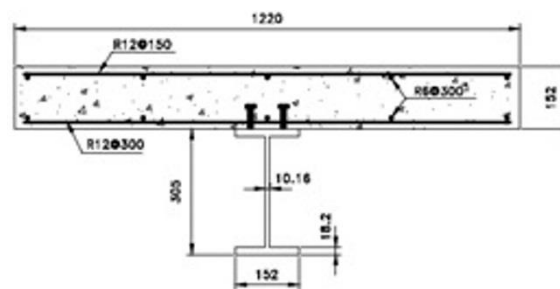


Fig. 4. Cross section of the tested composite beam in Ref. [2] (dimensions in mm)

شکل ۵. منحنی ظرفیت عددی و آزمایشگاهی تیر مرکب بررسی شده

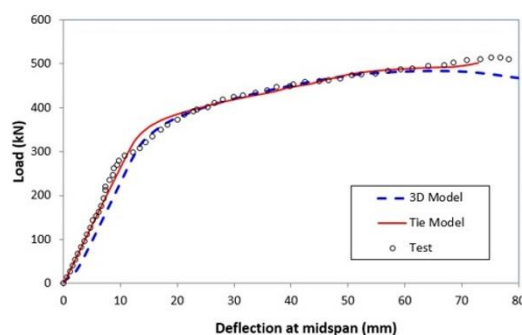


Fig. 5. Numerical and experimental load-deflection curve of the composite beam

۴- معرفی شاه‌تیرهای مرکب بررسی شده

به منظور بررسی رفتار شاه‌تیرهای مرکب استفاده شده در ساختمان‌های مسکونی متداول، پلان تیرریزی ساده نشان داده شده در شکل (۶) در نظر گرفته می‌شود. هدف اصلی از این پژوهش عبارتست از بررسی مقدار عرض مؤثر شاه‌تیر میانی در

بودند که به علت متقارن بودن پانل‌ها نسبت به شاه‌تیر میانی، فقط نیمی از آن‌ها در جهت عرضی برای کاهش حجم محاسبات در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است، به علت متقارن بودن مدل‌ها در راستای طولی شاه‌تیر (تیر دوسرمفصل تحت بارگذاری متقارن)، در ادامه فقط نتایج عرض مؤثر مقاطع ابتدا تا وسط دهانه شاه‌تیر مرکب نمایش داده می‌شود. تغییرات عرض مؤثر شاه‌تیرهای مرکب گروه I تحت بار متمرکز در وسط دهانه در شکل (V) نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، عرض مؤثر محاسباتی برای شاه‌تیرهای مرکب مدل شده از مقدار عرض مؤثر محاسبه شده توسط روابط مبحث دهم از مقررات ملی (INBC) - که برای شاه‌تیرهای مورد نظر تعمیم داده شده‌اند - بیشتر است که این امر نشان دهنده‌ی عدم تأثیر - پذیری نامطلوب عرض مؤثر شاه‌تیرهای مرکب از تیرچه‌های مرکب متعامد با آن‌ها است. پس، می‌توان برای اطمینان از روابط مقررات ملی برای محاسبه عرض مؤثر شاه‌تیرهای مرکب استفاده نمود، هرچند اختلاف زیادی که در محاسبه عرض مؤثر مانند نسبت‌های $(S/L > 0.7)$ وجود دارد، لزوم ارائه فرمول‌های دقیق‌تر را به منظور اقتصادی‌تر نمودن طراحی‌ها ایجاب می‌کند. همچنین، ملاحظه می‌شود که عرض مؤثر محاسبه شده برای شاه‌تیرهای مرکب بررسی شده با افزایش نسبت S/L افزایش یافته‌است که این امر بیان‌گر امکان طراحی شاه‌تیرهای موجود در سقف‌های مرکب به صورت مختلط است.

شکل ۷. تغییرات عرض مؤثر مدل‌های گروه I

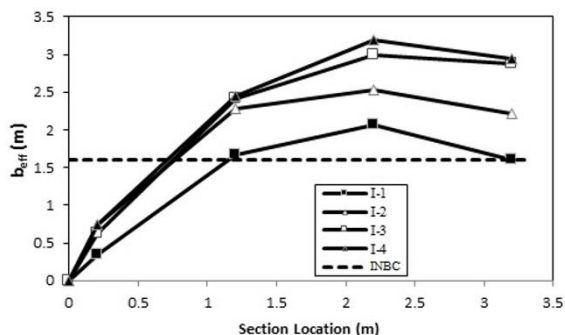


Fig. 7. The variation of the effective width of type-I models

افت منحنی‌های تغییرات عرض مؤثر در شکل (V) که در

به نصف عرض دال سمت راست شاه‌تیر کاهش یافته‌است. مدل‌های گروه III نیز همان مدل‌های گروه I است با این تفاوت که که دال واقع در سمت چپ شاه‌تیر مرکب مانند شاه‌تیرهای موجود در قاب‌های کناری پلان سازه‌های ساختمانی، حذف شده‌اند.

جدول ۱. مشخصات شاه‌تیرهای مرکب مورد مطالعه

Type	Model No.	Span length (m)	Modeled slab width (m)	S_R (m)	S_L (m)	$(S_R+S_L)/L$	Girder section
I	1	6.4	3.2	1.6	1.6	0.5	2IPE 180+ 2PL220X10
	2	6.4	4.5	2.25	2.25	0.7	2IPE 200+ 2PL220X12
	3	6.4	5.8	2.9	2.9	0.9	2IPE 220+ 2PL240X12
	4	6.4	7	3.5	3.5	1.1	2IPE 240+ 2PL260X12
II	1	6.4	2.4	1.6	0.8	0.38	2IPE 180+ 2PL220X10
	2	6.4	3.375	2.25	1.125	0.53	2IPE 200+ 2PL220X12
	3	6.4	4.35	2.9	1.45	0.68	2IPE 220+ 2PL240X12
	4	6.4	5.25	3.5	1.75	0.82	2IPE 240+ 2PL260X12
III	1	6.4	1.6	1.6	0.0	0.25	2IPE 180+ 2PL220X10
	2	6.4	2.25	2.25	0.0	0.35	2IPE 200+ 2PL220X12
	3	6.4	2.9	2.9	0.0	0.45	2IPE 220+ 2PL240X12
	4	6.4	3.5	3.5	0.0	0.55	2IPE 240+ 2PL260X12

Table 1. Characteristics of the studied composite girders

۵- نتایج تحلیل و بحث

تمامی شاه‌تیرهای معرفی شده در بخش قبل با استفاده از روش شرح داده شده در بخش ۳ مدل‌سازی و تحلیل شده و مقادیر عرض مؤثر دال بتنی به کمک روابط بخش ۲ در دو حالت خطی (تحت بار متمرکز میانی) و غیرخطی (تحت بار گسترده یکنواخت) محاسبه شد. در ادامه به ارائه و بررسی نتایج حاصل از این تحلیل‌ها پرداخته شده و مقادیر بدست آمده برای عرض مؤثر در روش عددی با مقادیر پیشنهادی مقررات ملی ساختمان مقایسه می‌شود.

۵-۱- نتایج تحلیل خطی

۵-۱-۱-۵- مدل‌های گروه I

همان‌گونه که در بخش قبل بیان شد، این گروه از مدل‌ها دارای پانل‌های مستطیلی منظم و متقارن با نسبت‌های S/L مختلف

بتنی در محل عرض مؤثر بیشینه نمایش می‌دهد. به دلیل نامساوی بودن عرض دال‌های سمت چپ و راست شاه‌تیر فولادی، ملاحظه می‌شود که توزیع تنش محوری طولی در دال به صورت نامتقارن بوده و دال سمت چپ شاه‌تیر فولادی به علت دارا بودن عرض کمتر، تنش‌های طولی کمتری را تحمل می‌نماید.

شکل ۹. تغییرات عرض مؤثر مدل‌های گروه II

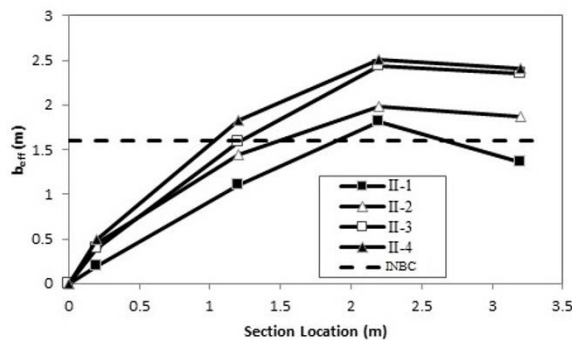


Fig. 9. The variation of the effective width of type-II models

شکل ۱۰. توزیع تنش‌های طولی در مقطع عرضی دال برای مدل‌های گروه II

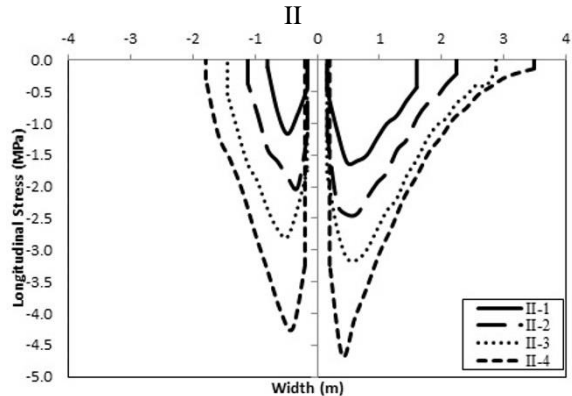


Fig. 10. The longitudinal stress distribution on the width of the slab of type-II models

۳-۱-۵- مدل‌های گروه III

تغییرات عرض مؤثر شاه‌تیرهای مرکب گروه III تحت بار متمرکز در وسط دهانه در شکل (۱۱) نشان داده شده‌است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در این گروه هم عرض مؤثر محاسباتی برای شاه‌تیرها از مقدار عرض مؤثر محاسبه شده توسط روابط مبحث دهم از مقررات ملی بیشتر است. همچنین مشابه مدل‌های دو گروه دیگر ملاحظه می‌شود که در

تمام نسبت‌های S/L در وسط دهانه روی داده‌است ممکن است به دلیل اعمال بار متمرکز در وسط دهانه - در محدوده‌ی پروفیل شاه‌تیر فولادی- و افزایش بیشینه تنش‌های طولی موجود در دال بتنی به دلیل تمرکز تنش و در نتیجه کاهش عرض مؤثر محاسبه شده باشد و یا بخاطر انتقال مستقیم بار به پروفیل فولادی شاه‌تیر و کاهش نسبت تنش‌ها در داخل دال بتنی باشد.

شکل ۸. توزیع تنش‌های محوری طولی در مقطع عرضی

دال بتنی شاه‌تیرها را -در محل عرض مؤثر بیشینه- برای مدل‌های گروه I نمایش می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، با افزایش نسبت S/L، توزیع تنش طولی در راستای عرض مقطع مرکب پهن‌تر شده که نشان دهنده‌ی افزایش عرض مؤثر مقطع است.

شکل ۸. توزیع تنش‌های طولی در مقطع عرضی دال برای مدل‌های گروه I

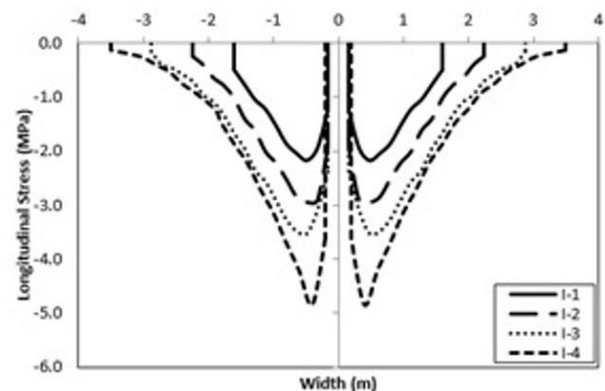


Fig. 8. The longitudinal stress distribution on the width of the slab of type-I models

۲-۱-۵- مدل‌های گروه II

تغییرات عرض مؤثر شاه‌تیرهای مرکب گروه II تحت بار متمرکز در وسط دهانه در شکل (۹) نشان داده شده‌است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در این گروه هم عرض مؤثر محاسباتی برای شاه‌تیرها (حتی برای نسبت‌های $S/L > 0.7$) از مقدار عرض مؤثر محاسبه شده توسط روابط مبحث دهم از مقررات ملی بیشتر است. همچنین مشابه مدل‌های گروه I ملاحظه می‌شود که در این گروه نیز منحنی‌های تغییرات عرض مؤثر در تمام نسبت‌های S/L در مقطع وسط دهانه دچار افت می‌شوند. شکل (۱۰) توزیع تنش‌های محوری طولی را در دال

بار گسترده یکنواخت فزاینده به صورت غیرخطی تحلیل و مورد بررسی قرار گرفتند. تغییرات عرض مؤثر نمونه‌ها در مقابل تغییرات نسبت بار اعمالی به بار حداکثر در شکل (۱۳) نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل ملاحظه می‌شود، عرض مؤثر با وارد شدن مدل‌ها به حوزه رفتار غیرخطی و ترک خوردن دال بتنی، افزایش یافته‌است که این امر نمایانگر تأمین عرض مؤثر مورد نیاز برای طراحی شاه‌تیر مرکب حتی در حالت پلاستیک است. حصول نتایج مشابه برای مدل‌های I-1 و II-1 و III-1 نشان می‌دهد که این قبیل شاه‌تیرها را حتی در پلان‌های نامتقارن نیز می‌توان به صورت مختلط تحلیل و طراحی نمود.

شکل ۱۳. تغییرات عرض مؤثر شاه‌تیرهای مرکب I-1، II-1 و III-1 بر حسب نسبت بار

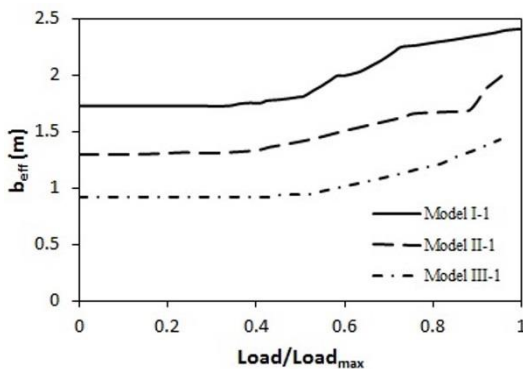


Fig. 13. The variation of the effective width versus load ratio for model I-1, II-1 and III-1

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله به منظور بررسی عرض مؤثر شاه‌تیرهای مرکب فولادی-بتنی، با استفاده از روش اجزاء محدود و با در نظر گرفتن رفتار خطی و آثار غیرخطی مصالح، عرض مؤثر شاه‌تیرهای مرکب با پانل‌های مجاور متقارن و نامتقارن تحت بارهای متمرکز و گسترده با نسبت‌های مختلف S/L برای دال بتنی، مطالعه شد. در ادامه به مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش اشاره می‌شود:

۱- نتایج تحلیل خطی نشان داد که با وجود عملکرد دوجبهته دال بتنی (توزیع همزمان بار ثقلی در جهت تیرچه‌ها و تیر اصلی)، شاه‌تیرهای مرکب فولادی-بتنی میانی بررسی شده

این گروه نیز منحنی‌های تغییرات عرض مؤثر در تمام نسبت‌های S/L در مقطع وسط دهانه دچار افت می‌شوند. شکل (۱۲) توزیع تنش‌های محوری طولی را در دال بتنی در محل عرض مؤثر پیشینه نمایش می‌دهد.

شکل ۱۱. تغییرات عرض مؤثر مدل‌های گروه III

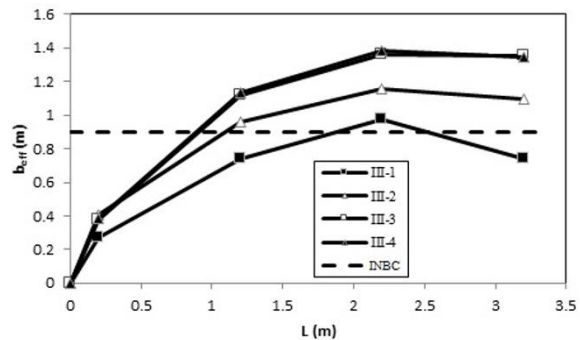


Fig. 11. The variation of the effective width of type-III models under a concentrated load

شکل ۱۲. توزیع تنش‌های طولی در مقطع عرضی دال برای مدل‌های گروه III

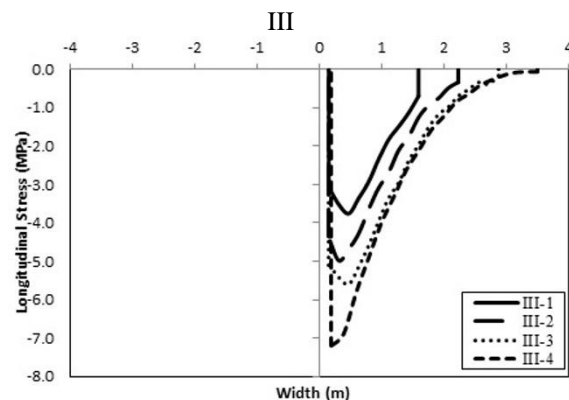


Fig. 12. The longitudinal stress distribution on the width of the slab of type-III models

با توجه به نتایج تحلیل خطی گروه‌های سه‌گانه فوق می‌توان نتیجه گرفت که در برای اطمینان، عرض مؤثر پیشنهادی مقررات ملی ساختمان برای شاه‌تیرهای مرکب بررسی شده در این پژوهش (حتی برای نسبت‌های $S/L > 0.7$) قابل استفاده و کاربرد است.

۲-۵- نتایج تحلیل غیرخطی

به منظور پی بردن به تغییرات عرض مؤثر در حوزه رفتار غیرخطی، مدل‌های I-1، II-1 و III-1 به عنوان نمونه تحت

References

۷- مراجع

- [1] Azhari M., Amoushahi H. & Mirghaderi R. 2014, Limit state design of steel structures (LRFD), Vol. 5: members design, Arkan Danesh, Isfahan (In Persian).
- [2] Chapman J. C. & Balakrishnan S. 1964, Experiments on composite beams. *The Structural Engineering*, **42**(11), 369-383.
- [3] Brosnan D. P. & Uang C. M. 1995, Effective width of composite L-beams in buildings. *Engineering Journal*, AISC, Second Quarter, 73-80.
- [4] El-Lobody E. & Lam D. 2003, Finite Element Analysis of Steel-Concrete Composite Girders. *Advances in Structural Engineering*, **6**(4), 267-281 .
- [5] Amadio C., & Fragiaco M. 2002, Effective width evaluation for steel-concrete composite beams. *Journal of Constructional Steel Research*, **58**(3), 373-388.
- [6] Amadio C., Fedrigo C., Fragiaco M. & Macorini L. 2004, Experimental evaluation of effective width in steel-concrete composite beams. *Journal of Constructional Steel Research*, **60**(2), 199-220.
- [7] Nie J. G., Tian C. Y. & Cai C. S. 2008, Effective width of steel-concrete composite beam at ultimate strength state. *Engineering Structures*, **30**(5), 1396-1407.
- [8] Prakash A., Anandavalli N., Madheswaran C. K., Rajasankar J. & Lakshmanan N. 2011, Three dimensional FE model of stud connected steel-concrete composite girders subjected to monotonic loading. *International Journal of Mechanics and Applications*, **1**(1), 1-11.
- [9] Baran E. & Topkaya C. 2014, Behavior of steel-concrete partially composite beams with channel type shear connectors. *Journal of Constructional Steel Research*, **97**, 69-78.
- [10] Wang Y. H., & Nie J. G. 2015, Effective flange width of steel-concrete composite beam with partial openings in concrete slab. *Materials and Structures*, **48**(10), 3331-3342.
- [11] Iranian National Building Code 2013, Part 5: Design and construction of steel buildings. Ministry of Road and Urban Development, Tehran (In Persian).
- [12] ABAQUS User's Manual, Version 6.13, 2013 Hibbit, Karlson and Sorensen Inc..
- [13] Carrreira D. J., & Chu K. h. 1985, Stress- strain relationship for plain concrete in compration. *ACI Stuct. J*, **82**(11), 797-804.

- قادر به تأمین عرضی بیش از عرض مؤثر پیشنهادی مقررات ملی ساختمان هستند.
- ۲- شاه تیرهای مرکب فولادی-بتنی کناری نیز قادر به تأمین عرض مؤثر پیشنهادی مقررات ملی ساختمان هستند.
- ۳- عرض مؤثر ارتجاعی شاه تیرهای مرکب فولادی-بتنی در همه‌ی مدل‌های متقارن و نامتقارن بررسی شده با افزایش نسبت S/L (مانند تیرچه‌های مرکب فولادی-بتنی) افزایش می‌یابد.
- ۴- نتایج تحلیل غیرخطی نشان می‌دهد که عرض مؤثر شاه تیرهای مرکب با ورود به حوزه رفتار غیرخطی و ترک خوردگی دال بتنی، افزایش می‌یابد.
- ۵- برای اطمینان می‌توان از مقدار عرض مؤثر پیشنهادی مقررات ملی ساختمان برای این قبیل شاه تیرها استفاده نمود و آنها را به صورت مرکب تحلیل و طراحی نمود.

Investigation on the effective width of steel-concrete composite girders

A. Mohebkah^{1*}, H. Ivakpur², A.R. Jahanpour¹

1- Assistant Prof., Structural Eng. Dept., Faculty of Civil and Architectural Eng., Malayer University

2- Associate Prof., M.Sc. of Structural Engineering, Faculty of Civil and Architectural Eng., Malayer University

*amoheb@malayeru.ac.ir

Abstract:

Steel-concrete composite beams have been widely used in building and bridge construction since about a century ago. Construction with composite system provides some advantages including: reduction in the weight of steel (saving of 20 to 30%), increasing floor stiffness and increasing span length. In order to analyze such composite beams using the ordinary beam theory, the concept of *effective width* is used instead of their actual width. Effective width is one of the most influencing factors which plays an important role in determining the ultimate load bearing capacity of steel-concrete composite beams. There are a number of influencing parameters which affect the value of composite beams' effective width including the ratio between the half width of the slab and the beam length (S/L), the number and rigidity of the shear connectors, the steel section yield strength and the concrete slab strength. There are numerous studies in the literature which have been conducted on the effective width of composite I-beams. However, the steel-concrete composite girders are generally analyzed and designed in current practice (on the safe side) as non-composite steel girders without taking into account the effect of concrete slab, yet. This procedure may lead to an uneconomic design. Although such girders have been widely used in the construction of residential steel building frames, however, their effective width has not been investigated, yet. This paper develops a three dimensional finite-element model using ABAQUS for the elastic and inelastic nonlinear static analysis of steel-concrete composite girders and uses it to investigate the real effective width of concrete slab in these kinds of girders under two types of loadings (a concentrated point load and a uniform distributed load) on their moment gradient factor in different behavioral zones. The concrete slab and steel section were modeled using the three-dimensional eight-node solid element (C3D8). However, the reinforcements were modeled using the Truss one-dimensional elements. To simulate the shear connectors implicitly, the concrete slab and steel girder were joined together with the Tie command available in ABAQUS.

To achieve this end, some simply-supported with different ratios of S/L, and symmetric/unsymmetric adjacent concrete panels were designed first taking into account the effects of secondary perpendicular composite I-beams. Then, considering the actual distribution curve of axial elastic compressive stress within the concrete slab in each model and estimating the area under the curves, their effective width was calculated in different locations along the girders lengths. Furthermore, in order to investigate the effects of concrete slab cracking and damage on the effective width of such composite girders, some of the above mentioned girders were analyzed nonlinearly and their effective widths were recalculated. Comparison of the calculated effective width values with the corresponding values proposed in the Iranian National Building Codes (INBC- Part 10) showed that such composite girders are capable of providing the effective width given in INBC. This indicates that despite the effects of perpendicular composite I-beams as well as bi-directional action of concrete slab, the investigated steel-concrete composite girders can be analyzed and designed as common composite beams.

Keywords: Composite beam, Steel girder, Finite element method, Nonlinear analysis, Concrete slab.