

مقایسه ظرفیت کمانش جانبی-پیچشی تیرهای دوبل ناودانی به همراه قیود خودایستای متصل کننده با تیرهای مقطع I شکل به همراه مهار جانبی خارجی

آرین اصغری^۱، سید رسول میرقادر^{۲*}، سمیرا ابراهیمی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران گرایش سازه، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران

۲- استاد، مهندسی عمران، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران

۳- استادیار، مهندسی عمران، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۱۱۵۵-۴۵۶۳، rmirghaderi@ut.ac.ir

چکیده

در سازه‌های فولادی، تیرهای قاب خمشی به دلیل این که عضو شکل پذیر سازه می‌باشند، از نقش حائز اهمیتی برخوردار هستند. ظرفیت تیرهای فولادی متعارف از کم‌ترین ظرفیت پلاستیک و ظرفیت کمانش جانبی-پیچشی محاسبه می‌شود. به منظور دست‌یافتن به ظرفیت پلاستیک تیرها، وقوع کمانش جانبی-پیچشی با استفاده از مهارهای جانبی-پیچشی به تعویق انداخته می‌شود تا ظرفیت پلاستیک مقطع حاکم شود. در بعضی از سازه‌ها امکان جانمایی مهارهای جانبی-پیچشی مناسب وجود ندارد؛ به همین دلیل، اجرایی بودن بعضی از تیرها با چالش‌هایی مواجه است. راهکار مناسب برای رفع این چالش، استفاده از مقاطع دابل ناودانی به جای مقاطع I شکل و استفاده از قیدهای متصل کننده ناودانی‌ها به یکدیگر به جهت بالابردن ظرفیت کمانشی مقطع است. در این مطالعه، چندین قید میانی جهت اتصال تیرهای دابل ناودانی به یکدیگر در نظر گرفته شدند و از بین آن‌ها، قید میانی با بهترین عملکرد به عنوان قید میانی مناسب، جهت اتصال دابل ناودانی‌ها به یکدیگر معرفی شدند. در این تحقیق با استفاده از نرم افزار آباکوس به مدل سازی تیرهای دابل ناودانی و مقایسه آن با تیرهای دارای مقطع I شکل پرداخته شده است. جهت اعمال حالت‌های مختلف بارگذاری، لنگر متمرکز اعمال شده در یک انتهای تیر، به صورت ضربی از لنگر اعمال شده در انتهای دیگر تیر در نظر گرفته شد. همچنین در این مطالعه، جهت بررسی طول تیرها، چهار طول تیر یعنی ۴، ۶، ۸ و ۱۰ متر استفاده شد. نتایج تحقیق نشان داد که از بین طول‌های متنوع در نظر گرفته شده برای فواصل بین قیدهای میانی اتصال دابل ناودانی‌ها به یکدیگر، مقدار طول مهاری استفاده شده برای تیر با مقطع ناودانی تک مناسب می‌باشد. علاوه بر این، نتایج تحقیق تأیید می‌کند که قید میانی ملحوظ شده برای اتصال ناودانی‌ها به یکدیگر دارای عملکرد مناسبی است و منجر می‌شود که ظرفیت خمشی در تیرهای دابل ناودانی، مشابه ظرفیت خمشی در تیرهای I شکل متناظر باشد.

واژگان کلیدی

دابل ناودانی، قیدهای متصل کننده، کمانش جانبی-پیچشی، ظرفیت خمشی

A Comparative Study on the Lateral-Torsional Buckling Capacity of Double Channel Beams with Self-Supporting Connective Constraints versus I-Shaped Beams with External Lateral Bracing

A. Asghari, S.R. Mirghaderi, S. Ebrahimi

Abstract

In steel structures, beams in Moment-Resisting Frames play an essential role due to their ductile nature as structural members. The capacity of beam-column joints is determined by the lesser of the plastic moment capacity and the lateral-torsional buckling capacity. In order to attain the plastic moment capacity of the beams, lateral-torsional bracing is applied to postpone lateral-torsional buckling, allowing the plastic moment of the section to control the behavior. However, in some structures, it is a challenge to appropriately place lateral-torsional bracing, leading to difficulties in the execution of certain beams. A practical solution to this challenge is to use double channel sections instead of I-sections, along with intermediate connectors between the channels to improve the section's buckling capacity.

In this study, several intermediate connectors were considered for joining double channel beams, and among them, the connector with the best performance was identified as the most suitable intermediate connector for joining double channels. Using ABAQUS software, this research modeled double channel beams and compared them with I-shaped beams. To apply different loading conditions, the concentrated moment applied at one end of the beam was considered as a multiple of the moment applied at the other end. Additionally, in this study, four different beam lengths—4, 6, 8, and 10 m—were used to examine the effect of beam length.

The research results revealed that, among the various spacing lengths considered for the intermediate connectors in the double channel sections, the restraining length used for the single channel section beams was found to be appropriate. Moreover, the study confirmed that the intermediate connector used to join the channels performed effectively, leading to a flexural capacity in double channel beams comparable to that of equivalent I-shaped beams.

Keywords

Double Channel, Intermediate Connectors, Lateral-Torsional Buckling, Flexural Capacity

نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد / ۵

۱- مقدمه

در تیرهای فولادی، تیرهای با مقطع دویل ناودانی با توجه به تشابه رفتار آنها به مقاطع I شکل و در دسترس بودن این مقاطع، می‌توانند جایگزین مناسبی برای مقاطع I شکل فولادی باشند. از مزایای ناودانی، صاف بودن یک وجه از این مقطع است که می‌تواند برای نصب و جوشکاری به قسمت‌های دیگر از سازه بسیار مناسب باشد.

مطابق AISC-341 [۱] با توجه به این که تیرهای مورد استفاده در سیستم قاب خمشی دارای نقش فیوز سازه‌ای هستند و عضو تغییرشکل-کنترل می‌باشند، انتظار اتلاف انرژی و وقوع تسلیم خمشی وجود دارد. همچنین این تیرها می‌بایست تغییرشکل‌های فراررتجاعی در برابر نیروهای جانبی را با توجه به نوع قاب خمشی تحمل کنند. تیرهای مورد استفاده در قاب‌های خمشی باید پس از ناحیه محافظت شده مفصل پلاستیک و در سراسر تیر با توجه به طول مورد نیاز مطابق AISC-360 و AISC-341 که در روابط شماره (۱) و (۲) ارائه شده است، در بال‌های مقطع و یا به صورت پیچشی مهار شوند [۱ و ۲].

$$L_p = 1.76r_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (۱)$$

$$L_p = \frac{0.086r_y E}{R_y F_y} \quad (۲)$$

(L_p): طول مهارنشده عضو در مرز بین حالت حدی تسلیم و حالت حدی کمانش جانبی-پیچشی
(r_y): شعاع ژیراسیون حول محور y
(E): مدول الاستیسیته
(F_y): تنش تسلیم
(R_y): نسبت تنش تسلیم مورد انتظار به تنش تسلیم مشخصه

متیو^۱ و همکاران [۳] در مطالعه‌ای به بررسی رفتار کمانش جانبی-پیچشی تیرهای دارای یک محور تقارن تحت لنگر ثابت پرداختند و دو آزمایش برای فهم تأثیر بال فشاری و توسعه مدل عددی تأییدشده انجام دادند. با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده از

لنگر بحرانی مقاطع، تفاوت‌های بین IS:800-2007 و Eurocode3 را در محاسبات ظرفیت خمشی بررسی کردند.

سپس ژو^۲ و همکاران [۴] در مطالعات آزمایشگاهی و عددی، مقدار ظرفیت مقطع I شکل با یک محور تقارن و ضوابط آیین‌نامه‌های مختلف را مورد بررسی قرار دادند.

در ادامه روسی^۳ و همکاران [۵] نیز به بررسی عددی کمانش پیچشی-جانبی و تأثیرات ناپایدار و خشی بارگذاری‌ها بر تیرهای I شکل پرداختند. آن‌ها دریافتند که اختلافاتی بین نتایج عددی و استاندارد‌های مختلف وجود دارد. همچنین، امکان وقوع کمانش جانبی تحریف‌شده (LDB) و تأثیر آن بر پایداری جانبی تیرها را مورد بررسی قرار دادند.

در رابطه با مقاطع دویل ناودانی، دی‌مارتینو^۴ و همکاران [۶] نیز روش‌هایی را برای مدل‌سازی عددی معتبر مقاطع دویل ناودانی سردنورد جهت استفاده در تهیه نمودارهای لنگر-دوران ارائه نمودند.

همچنین توماج و همکاران [۷] به بررسی اثر کمانش موضعی بال بر ظرفیت و شکل‌پذیری مقاطع دویل ناودانی به‌هم چسبیده در مقایسه با مقاطع I شکل پرداختند. نتیجه این تحقیق آن بود که مقاطع ناودانی به نسبت مقاطع I شکل در شکل‌پذیری متوسط نتیجه بهتری نسبت به شکل‌پذیری بالا دارند.

جین‌سین‌لاپادامرونگ^۵ و همکاران [۸] با استفاده از ورق گاست و دوخت‌های افقی، یک اتصال جدید را ارائه نمودند که با یکپارچه‌کردن دویل ناودانی‌ها، مقدار ظرفیت کمانش جانبی-پیچشی را می‌توان افزایش داد. این نوع اتصال و تیر در قاب‌های خمشی خرابایی ویژه کاربرد دارند.

اکستروم^۶ و وسلی^۷ [۹] با بررسی پارامترهای مهم ازجمله لاغری اجزای تشکیل‌دهنده مقطع تیر، ابعاد مقطع، محل و نوع بارگذاری برای تغییرشکل‌های ایجادشده را بررسی و ظرفیت حالات مختلف را مقایسه کردند.

فام^۸ و همکاران [۱۰] نیز به مطالعه کمانش جانبی-پیچشی ناودانی سردنورد از جنس آلومینیوم پرداختند. آن‌ها با بارگذاری چهار نقطه‌ای و مدل‌سازی اجزای محدود این نمونه‌ها به تأثیر پارامترهای مختلف در تعیین ظرفیت کمانشی این مقطع پرداختند.

² Xu

³ Rossi

⁴ De Martino

⁵ Jiansinlapadamrong

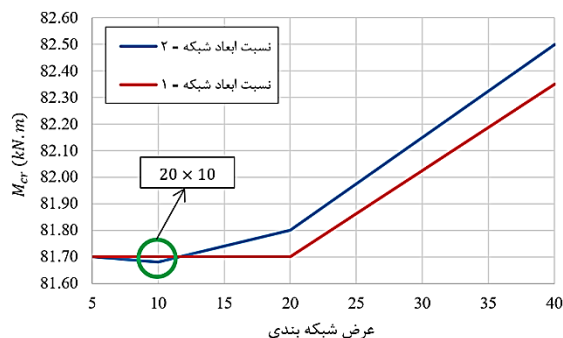
⁶ Ekström

⁷ Wesley

⁸ Fam

¹ Mathew

۲۵۰ مگاپاسکال، تنش کششی نهایی ۴۰۰ مگاپاسکال، کرنش نهایی ۰/۲ و ضریب پواسون ۰/۳ می‌باشد. در این مدل‌سازی، از المان نوع پوسته‌ای با ۴ گره^{۱۱} استفاده شده و نحوه شبکه‌بندی مقاطع از نوع Structured بوده است. پس از انجام آنالیز حساسیت شبکه‌بندی، مقدار شبکه ۱۰×۲۰ (مقدار ۲۰ در راستای طول تیر و ۱۰ در راستای عمود بر طول تیر) مطابق شکل (۱) انتخاب شده است.



شکل ۱- نمودار آنالیز حساسیت شبکه‌بندی

ابعاد مقاطع مورد استفاده در این تحقیق مطابق جدول (۱) به‌گونه‌ای تعیین شده‌اند که ممان اینرسی و اساس مقطع الاستیک و پلاستیک مقاطع I شکل و ناودانی پشت‌به‌پشت که مورد مقایسه قرار گرفته‌اند، تقریباً یکسان باشند. لازم به ذکر است که فاصله ناودانی‌ها از یکدیگر در این تحقیق برابر با ۲۰۰ میلی‌متر است و طول تیرهای مدل‌سازی‌شده، برای در نظر گرفتن اثر طول تیر، چهار مقدار ۱۰، ۸، ۶ و ۴ متر است.

جدول ۱- ابعاد مقاطع مدل‌سازی‌شده

نام مقاطع	d (mm)	b _f (mm)	t _w (mm)	t _f (mm)	λ _f	λ _{hd-f}	λ _w	λ _{hd-w}
B-I-1	209.6	205	9.1	14.2	7.2	7.7	19.9	63.3
B-I-2	414	259.1	10	16.9	7.7	7.7	38.0	63.3
B-C-1	200	108	6	15	7.2	7.9	28.3	64.6
B-C-2	400	120	8	18	6.7	7.9	45.5	64.6

برای اعمال شرایط مرزی، مطابق شکل‌های (۲) و (۳) در هر انتهای تیر، تمامی نقاط بال و جان به نقطه مرکز سطح مقطع تیر

^{۱۱} S4R

آناپایان^۱ و همکاران [۱۱] یک تیر فولادی با مقطع I شکل سردنورد را از نظر کماتش جانبی-پیچشی و میزان کاهش ظرفیت خمشی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بیش از ۵۰ تیر مختلف شامل ۱۳ مقطع با دهانه‌های بین ۱۲۰۰ الی ۴۰۰۰ میلی‌متر را آزمایش کردند و در آخر، دقت آیین‌نامه‌ها مورد مطالعه و مقایسه قرار گرفت.

دهمانی^۲ و دریزی^۳ [۱۲] به مدل‌سازی چند تیر ناودانی در نرم‌افزار انسیس، جهت ارائه فرمول برای ظرفیت مقاطع ناودانی با خروج از مرکزیت بار اعمال‌شده پرداختند.

غنام^۴ [۱۳] با ارائه چینش‌های متفاوت برای مقاطع ناودانی سردنورد و اتصال ناودانی‌ها به یکدیگر با استفاده از پیچ‌های خودکار، یک مقطع مرکب جدید را بررسی نمود. در تحقیقات انجام‌شده، پارامترهای مختلف موجود از قبیل ابعاد مقطع، ضخامت فولاد، گرید فولاد مورد استفاده و فاصله میان اتصال‌های مقاطع در برنامه انسیس^۵، تحت بارگذاری چهار نقطه‌ای مورد مطالعه قرار گرفت. نتیجه این تحقیق، منجر به ارائه یک ضریب اصلاحی برای کاهش ظرفیت خمشی با افزایش فاصله میان اتصال ناودانی‌ها شد.

والس^۶ و استن^۷ [۱۴] دو روش مدل‌سازی عددی برای مقاطع I شکل با اعمال اثرات نقص اولیه ارائه نمودند. در نتیجه این تحقیق، تفاوت دو نرم‌افزار مدل‌سازی و تفاوت مدل‌سازی با المان پوسته‌ای^۸ و سه‌بعدی^۹ مورد بررسی قرار گرفت.

با توجه به مطالب بیان‌شده، تحقیق درباره ظرفیت کماتشی مقاطع دابل ناودانی با قیدهایی که این دو مقطع را به یکدیگر متصل می‌کند، تشخیص بهترین قید با مقطع مناسب برای اتصال دو ناودانی به یکدیگر و تعیین فاصله مناسب برای این قیده‌ها، مورد نیاز است.

۲- مدل‌سازی عددی

به‌منظور مدل‌سازی عددی مقاطع، از نرم‌افزار آباکوس^{۱۰} استفاده شده است. نوع فولاد مورد استفاده در این مدل‌سازی، فولاد A36 مطابق با استاندارد انجمن آزمایش مصالح آمریکا است که دارای مدول الاستیسیته برابر با ۲×۱۰^۵ مگاپاسکال، تنش تسلیم

^۱ Anapayan

^۲ Dahmani

^۳ Drizi

^۴ Ghannam

^۵ Ansys

^۶ Vales

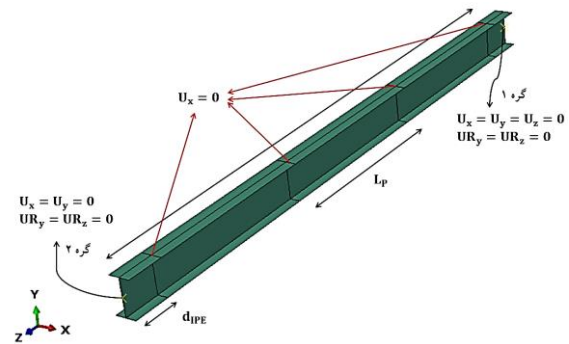
^۷ Stan

^۸ Shell

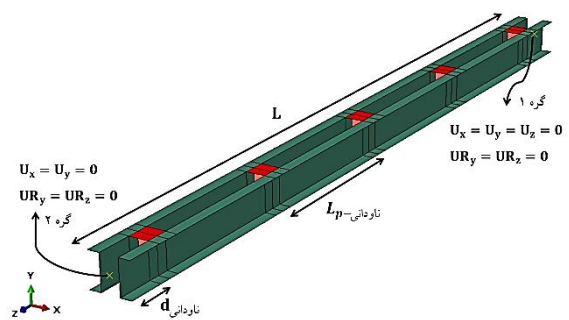
^۹ Solid

^{۱۰} ABAQUS

مقید شده‌اند، به‌نحوی که انگار یک صفحه صلب در انتهای تیر جای‌گذاری شده است. سپس نقطه مذکور، به‌صورت یک اتصال صلب در نظر گرفته شده، به‌گونه‌ای که تمامی درجات آزادی به‌جز دوران در راستای محور X ، بسته شده‌اند. توجه شود که دوران در راستای محور X برای اعمال بارگذاری بسته نشده است. همچنین به‌منظور جلوگیری از حضور نیروهای محوری در تیر، در گره شماره ۲، درجه آزادی در راستای محور طول تیر آزاد گذاشته شده است.



شکل ۲- شرایط مرزی مدل I شکل با مهارهای جانبی



شکل ۳- شرایط مرزی مدل دوبل ناودانی با قید مهارکننده

جهت اعمال حالت‌های مختلف بارگذاری، لنگر متمرکز اعمال‌شده در گره شماره ۱، به‌صورت ضریبی از لنگر اعمال‌شده در گره شماره ۲ می‌باشد. این ضریب با توجه به هدف این تحقیق برای پوشش‌دادن حالات مختلف بارگذاری، به‌صورت اعداد در بازه ۱- الی ۱+ با گام‌های ۰/۲۵ انتخاب شده‌اند. این ضرایب شامل مقادیر ۱-، ۰/۷۵-، ۰/۵-، ۰/۲۵-، ۰، ۰/۲۵+، ۰/۵+، ۰/۷۵+ و ۱+ هستند. با استفاده از این نوع بارگذاری، می‌توان حالاتی شبیه به بارگذاری ثقیلی و بارگذاری زلزله را مشاهده نمود.

به‌منظور اعمال مهار جانبی در تیرهای I شکل، امکان حرکت نقاط متقاطع بال و جان مقطع در راستای محور X گرفته شده است. جهت محاسبه ظرفیت کماتشی تیرها، با توجه به هدف استفاده از تیرهای دوبل ناودانی به‌عنوان تیرهای قاب خمشی و انتظار عملکرد غیرخطی در نواحی مفصل پلاستیک، استفاده از تحلیل‌های خطی مناسب نبوده و استفاده از تحلیل غیرخطی مورد نیاز است.

برای محاسبه ظرفیت تیرها، ابتدا یک تحلیل خطی مقدار ویژه^۱ بر روی مدل انجام می‌شود و تغییرشکل‌های مود اول از نرم‌افزار استخراج می‌گردد. در این تحلیل، با اعمال بارگذاری واحد در مدل، نرم‌افزار تلاش می‌کند ضریبی برای بار اعمال‌شده که منجر به صفرشدن دترمینان ماتریس سختی مدل تیر می‌شود، محاسبه نماید. همچنین میزان تغییرمکان نسبی اجزای تیر محاسبه می‌گردد. سپس یک مدل دیگر مشابه مدل اول ساخته شده که در آن مصالح به‌صورت غیرخطی تعریف شده‌اند و از تحلیل غیرخطی ریکس^۲ برای به‌دست‌آوردن ظرفیت تیرها استفاده می‌گردد. باید توجه شود که برای اعمال شرایط کماتش جانبی-پیچشی در تحلیل غیرخطی، نیاز به اعمال نقص ساخت^۳ در مدل‌سازی است؛ که برای اعمال آن باید از نتایج تحلیل قسمت اول (تحلیل خطی مقدار ویژه) به‌عنوان نقص ساخت مرتبط با مود اول کماتش تیر استفاده نمود.

با توجه به این که در نتایج تحلیل مرحله اول، مقدار جابه‌جایی به‌گونه‌ای است که بیش‌ترین تغییرشکل حاصل‌شده برابر با ۱ در نظر گرفته شده است؛ باید این تغییرشکل با ضریب بزرگ‌نمایی مناسب در تحلیل مرحله دوم وارد شود. ضریب بزرگ‌نمایی متناسب با این تحلیل مطابق تحقیقات پیشین انجام‌شده برای کماتش جانبی-پیچشی برابر با ۰/۰۱ طول مهارنشده تیر در نظر گرفته شده است. همچنین مطابق تحقیقات روی^۴ و همکاران [۱۵] مقدار خطای ساخت برای کماتش موضعی در بال تیر برابر با ۰/۵٪ ضخامت بال ناودانی پیشنهاد شده است.

توجه شود که برای اعمال مراحل گفته‌شده ابتدا باید در مدل اول، در تنظیمات برنامه درخواست ارائه فایل تغییرمکان‌های ایجادشده، داده شود؛ سپس در مدل دوم، فایل مدل قبلی به‌عنوان تغییرمکان اولیه گره‌های شبکه‌بندی اعمال گردد.

² Eigen Value

² Riks

³ Imperfection

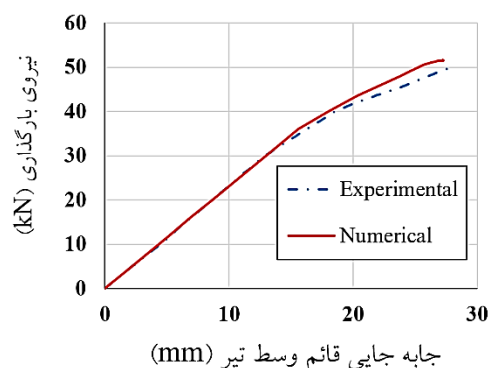
⁴ Roy

۳- صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی

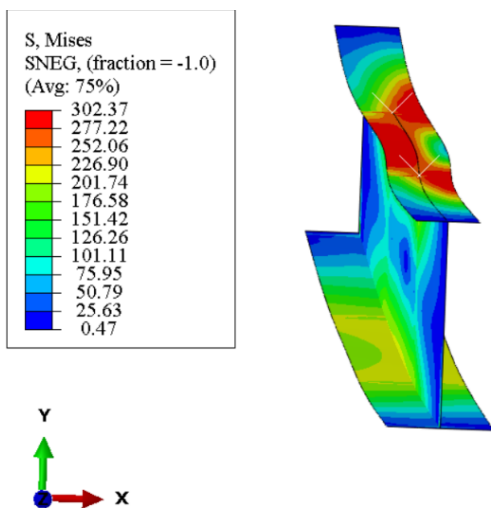
برای صحت‌سنجی مدل‌سازی انجام‌شده در نرم‌افزار آباکوس، باید نمونه آزمایشگاهی تست‌شده را مدل‌سازی عددی کرده و نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شود. به این منظور، مدل‌سازی تیر با مقطع I شکل با یک محور تقارن که تست آزمایشگاهی آن توسط متیو و همکاران [۳] انجام شده، صورت گرفته است. نمونه آزمایش‌شده یک تیر فولادی با طول ۳۹۰۰ میلی‌متر که در چهار نقطه در طول تیر با فواصل یکسان دارای مهارجانبی بوده است، می‌باشد. این تیر تحت بارگذاری چهار نقطه‌ای قرار گرفته است. به‌طوری که بارهای متمرکز در نقاط مهارشده تیر اعمال شده‌اند. شکل (۴) به مقایسه بین منحنی‌های نیرو-جابجه جایی قائم وسط تیر در نمونه آزمایشگاهی و مدل ساخته‌شده در نرم‌افزار آباکوس می‌پردازد. همچنین، شکل (۵) تغییرشکل یافته مدل عددی را با نمونه آزمایشگاهی مقایسه می‌کند.

با توجه به دوران ایجادشده ناشی از کماتش جانبی-پیچشی در وسط دهانه تیر مورد آزمایش، میزان تغییرمکان قائم در آزمایش، در کناره بال تحتانی لحاظ شده است. این میزان تغییرمکان به دلیل دوران تیر، دارای مقدار بیش‌تری از سایر نقاط است. بنابراین در برداشت نتایج از مدل‌سازی عددی، از تغییرمکان قائم در محل مذکور استفاده شده است. همچنین لازم به ذکر است آثار ناشی از تنش پسماند در مدل‌سازی‌ها دیده نشده است.

نتایج مقایسه در شکل (۴) نشان می‌دهد که ظرفیت محاسبه‌شده توسط مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی در حدود ۳٪ تفاوت داشته و در نتیجه می‌توان مدل‌سازی عددی را با نتایج آزمایشگاهی منطبق دانست. همچنین از شکل (۴) می‌توان دریافت که خروجی مدل‌سازی عددی تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.



شکل ۴- مقایسه نمودارهای نیرو-جابجه جایی مدل آزمایشگاهی و مدل عددی



(الف)



(ب)

شکل ۵- مقایسه تغییرشکل یافته نمونه آزمایشگاهی با مدل عددی (الف) تغییرشکل یافته مدل عددی و (ب) تغییرشکل یافته نمونه آزمایشگاهی [۳]

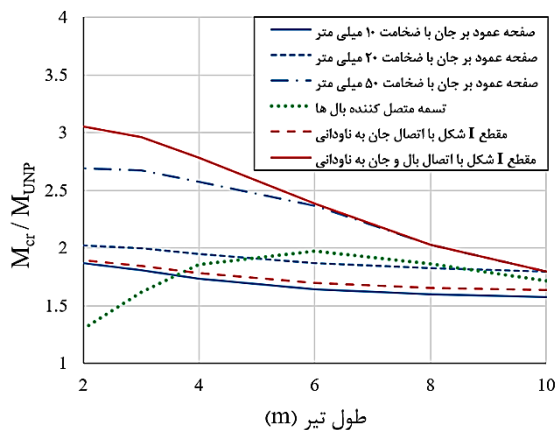
۴- مقایسه میان قیدهای مختلف اتصال دوبل ناودانی‌ها

مقاطع مورد استفاده به‌عنوان قید در اتصال دوبل ناودانی‌ها به یکدیگر، با استفاده از یک تیر با مقطع دوبل ناودانی به ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر و پهنای بال ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت‌های بال و جان ۱۰ میلی‌متر و فاصله میان ناودانی‌ها به میزان ۲۰۰ میلی‌متر بررسی شده‌اند. قیدهایی که مورد مقایسه قرار گرفتند شامل موارد زیر هستند:

- صفحه عمود بر جان ناودانی
- تسمه‌های متصل‌کننده بال‌ها
- مقطع I شکل فقط با اتصال جان به ناودانی
- مقطع I شکل با اتصال بال و جان به ناودانی

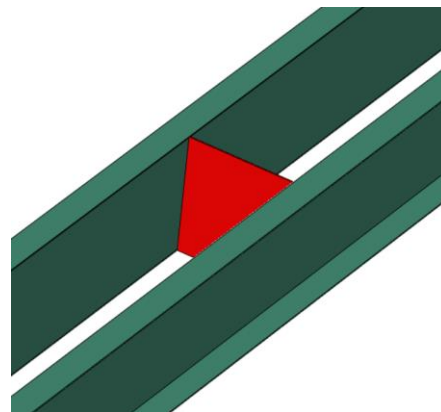
در مدل سازی جهت مقایسه قیدها، از یک عدد قید در وسط طول تیر در همه حالات استفاده شد. لازم به ذکر است که جهت نرمالیزه کردن نتایج، لنگر بحرانی هر قید نسبت به لنگر بحرانی تیر دابل ناودانی متناظر بدون قید در نظر گرفته شده است.

شکل (۹) نتایج مربوط به قیدهای مختلف را نسبت به تیر بدون قید نمایش می دهد. با توجه به نتایج ارائه شده، قید I شکل با اتصال بال و جان به ناودانی به عنوان قید مناسب برای اتصال دابل ناودانی ها انتخاب شد.



شکل ۹- نمودار نسبت لنگر بحرانی تیر با قیدهای مختلف

قید به صورت صفحه عمود بر جان ناودانی مطابق شکل (۶)، با ضخامت های ۱۰، ۲۰ و ۵۰ میلی متر و ارتفاعی برابر با ارتفاع تیر انتخاب شده است. قید به صورت تسمه های متصل کننده بال های ناودانی به یکدیگر مطابق شکل (۷)، با ضخامت ۱۰ میلی متر و پهنای ۱۰۰ میلی متر در نظر گرفته شده است. قید به صورت مقطع I شکل (با اتصال جان به ناودانی و اتصال بال و جان به ناودانی) مطابق شکل (۸)، با ارتفاع مقطع تیر و ضخامت بال و جان آن مطابق با ضخامت بال و جان مقطع تیر انتخاب شده است. پهنای بال مقطع I شکل دو برابر پهنای بال مقطع ناودانی تعیین گردید.



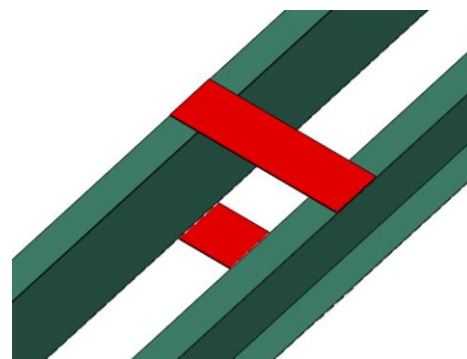
شکل ۶- جانمایی صفحه عمود بر جان ناودانی

۵- مقایسه ظرفیت کمانشی مقطع دابل ناودانی مهار شده

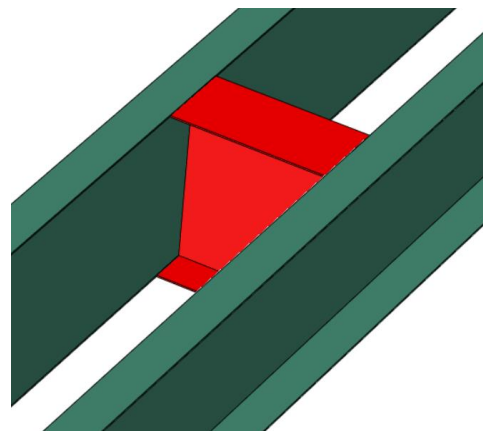
به یکدیگر و I شکل مهار شده به عامل خارجی

مقاطع I شکل مهار شده به عامل خارجی با توجه به پژوهش های صورت گرفته درباره این مقطع و استفاده گسترده در صنعت، به عنوان یک معیار برای بررسی ظرفیت کمانشی مقاطع دابل ناودانی مهار شده با یکدیگر قرار گرفت.

با توجه به جدول (۲)، حالت کمانشی بحرانی در بعضی بارگذاری ها به جای حالت کمانش جانبی-پیشی، کمانش موضعی در بال تیر می باشد. با توجه به این که تیرهای انتخاب شده، فشرده لرزه ای هستند و ضوابط آیین نامه ها به گونه ای تنظیم شده اند که ظرفیت خمشی ناشی از کمانش موضعی اجزای تیرهای فشرده لرزه ای، از مقدار ظرفیت خمشی تسلیم بال تیرها بیش تر باشد، بنابراین در تیرهایی که مود اول کمانش آن ها کمانش موضعی است، در آن مقطع کمانش جانبی-پیشی بعد از کمانش موضعی رخ داده و در تعیین ظرفیت تیر فولادی تأثیری ندارد.



شکل ۷- جانمایی تسمه های متصل کننده بال ها

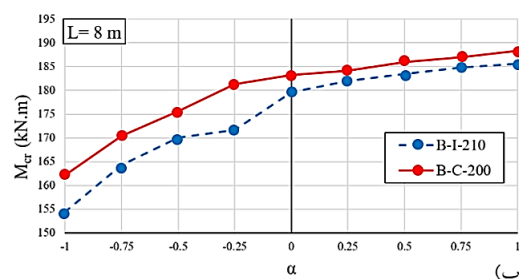
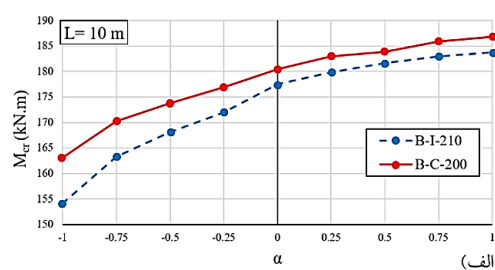


شکل ۸- جانمایی مقطع I شکل

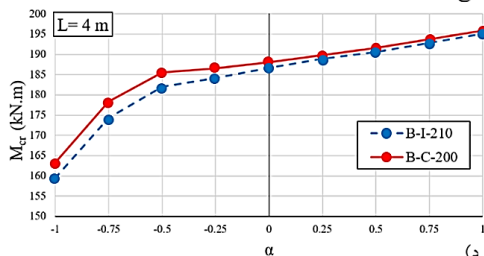
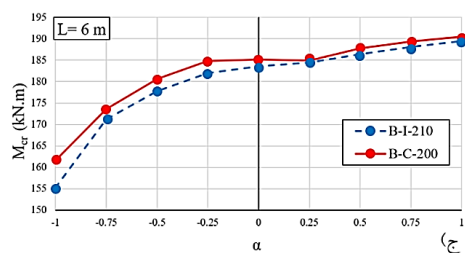
جدول ۲- نوع کمانش بحرانی در بارگذاری‌های مختلف (حرف G معادل کمانش جانبی-پیچشی و حرف L معادل کمانش موضعی است)

مقطع تیر	-1	-0.75	-0.5	-0.25	0	0.25	0.5	0.75	1
B-C-1 (10 m)	G	G	G	G	G	G	G	G	G
B-C-1 (8 m)	G	G	G	G	G	G	L	L	L
B-C-1 (6 m)	G	G	G	G	G	L	L	L	L
B-C-1 (4 m)	G	G	L	L	L	L	L	L	L
B-C-2 (10 m)	G	G	G	G	G	G	G	L	L
B-C-2 (8 m)	G	G	G	G	G	G	L	L	L
B-C-2 (6 m)	G	G	G	G	G	L	L	L	L
B-C-2 (4 m)	G	L	L	L	L	L	L	L	L

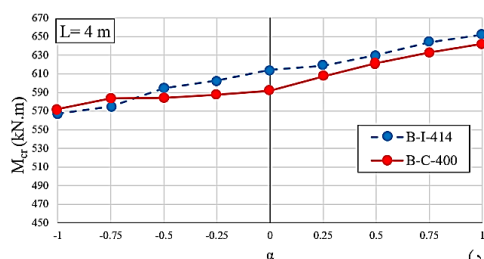
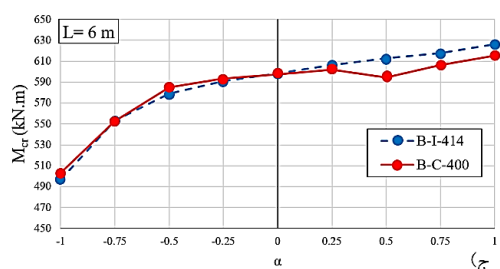
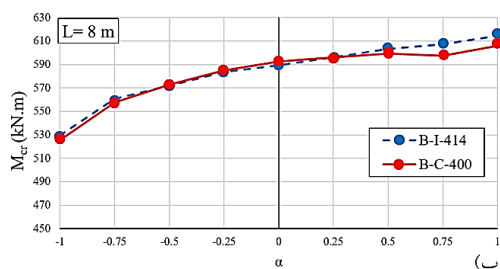
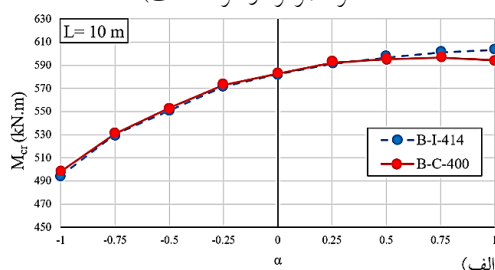
با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل‌های غیرخطی، طول‌های مورد نظر برای جای‌گذاری قیدهای مهارکننده، تقریباً مناسب بوده و فواصل مهارجانبی خارجی استفاده‌شده برای تک‌ناودانی به‌صورت پیوسته در سراسر تیر در نظر گرفته شد و طبق این نتایج، مقدار در نظر گرفته‌شده دارای رفتار مناسبی است. همچنین مطابق آیین‌نامه‌های طراحی، جهت عملکرد صحیح ناحیه محافظت‌شده مفصل پلاستیک، دقیقاً بعد از ناحیه محافظت‌شده، استفاده از یک عدد قید متصل‌کننده در مدل‌سازی‌ها اعمال شده است. مطابق شکل‌های (۹) و (۱۰) در هر دو نوع ناودانی، مقدار لنگر بحرانی کمانشی از مقدار لنگر بحرانی کمانشی تیر I شکل متناظر با مهار جانبی خارجی بیش‌تر است.



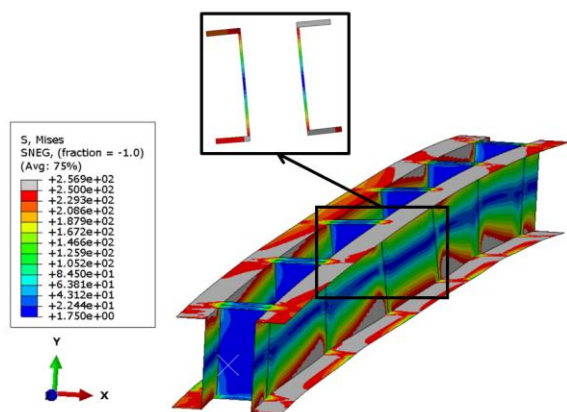
شکل ۹- نمودار لنگر بحرانی مقاطع B-I-1 و B-C-1 (α ضریب لنگر متمرکز در گره ۱ است)



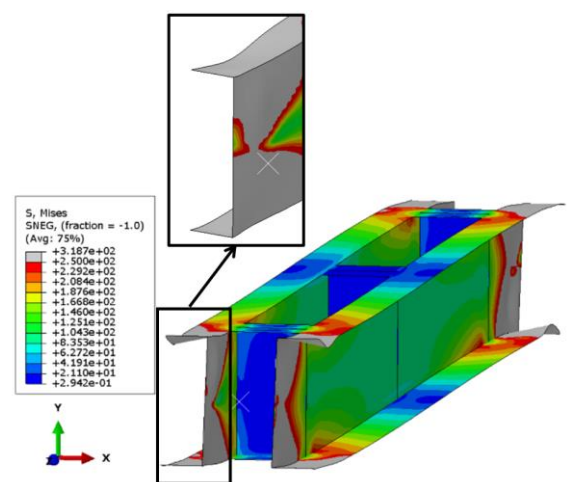
ادامه شکل ۹- نمودار لنگر بحرانی مقاطع B-I-1 و B-C-1 (α ضریب لنگر متمرکز در گره ۱ است)



شکل ۱۰- نمودار لنگر بحرانی مقاطع B-I-2 و B-C-2 (α ضریب لنگر متمرکز در گره ۱ است)

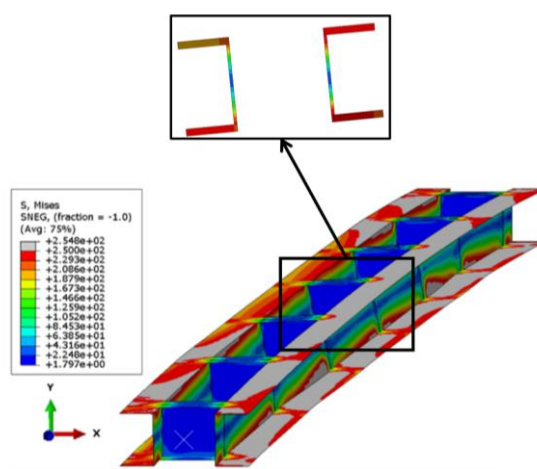


شکل ۱۳- تنش و تغییر شکل تیر B-C-2 (10 m) در حالت $\alpha=-1$

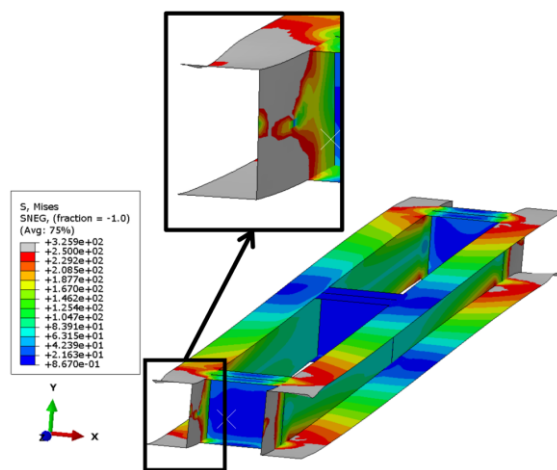


شکل ۱۴- تنش و تغییر شکل تیر B-C-2 (4 m) در حالت $\alpha=1$

بر اساس نتایج به دست آمده طول مهار مقطع ناودانی تک برای جای گذاری قیدهای میانی متصل کننده دابل ناودانی ها به یکدیگر مناسب هستند. از بررسی های انجام شده، می توان نتیجه گرفت که تأثیر گذاری قیدهای متصل کننده در طول های بزرگتر، بیش تر بوده و بهترین حالت ظرفیت کمانش جانبی-پیچشی تیرهای فولادی در بارگذاری لرزه ای می باشد ($\alpha=1$). همچنین مشاهده می شود با افزایش ارتفاع تیر، میزان اختلاف نتایج با مقطع I شکل کم تر می شود. به عبارت دیگر قیدهای میانی عملکرد بهتری در تیرهای دابل ناودانی با ارتفاع کم تر نشان می دهند. در شکل های (۱۱) الی (۱۴) تغییر شکل تیر و تنش های ایجاد شده در اجزای تعدادی از تیرها نمایش داده شده است.



شکل ۱۱- تنش و تغییر شکل تیر B-C-1 (10 m) در حالت $\alpha=-1$



شکل ۱۲- تنش و تغییر شکل تیر B-C-1 (4 m) در حالت $\alpha=-1$

۶- برآورد هزینه ساخت

هدف اصلی این تحقیق ارائه یک روش برای اجرای تیرهای قاب خمشی در صورت نبود امکان مهار جانبی است. اما به جهت بررسی با فرض امکان اجرای مهار جانبی بعد از ناحیه محافظت شده برای مقاطع I شکل، به مقایسه یک نمونه از تیر با ارتفاع ۴۰۰ میلی متری دابل ناودانی با طول ۶ متر با مقطع PG-W500×20+F470×50 که در این طول، نیاز به مهار جانبی ندارد، پرداخته می شود. نحوه انتخاب مقطع I شکل ذکر شده با استفاده از تأمین حداقل شعاع ژیراسیون مورد نیاز حول محور ضعیف مقطع می باشد. نتایج نهایی بر اساس جدول (۳) است. با توجه به تخمین قیمت تمام شده برای ساخت و اجرای تیرهای ذکر شده، هزینه مقطع I شکل ۲/۴ برابر مقطع دابل ناودانی به همراه قیدهای متصل کننده است.

جدول ۳- مقایسه وزن و طول جوشکاری مورد نیاز ساخت

نام	وزن مقاطع (کیلوگرم)	طول جوشکاری	قیمت کل (ریال)
B-I-1	۲۰۹/۶	۲۰۵	۴۱۵/۲۲۱/۱۵۰
B-I-2	۴۱۴	۲۵۹/۱	۹۹۶/۴۱۴/۱۵۰

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، می‌توان نتیجه گرفت که تأثیرگذاری قیدهای متصل‌کننده در طول‌های بزرگ‌تر، بیش‌تر بوده و بهترین حالت ظرفیت کمانش جانبی-پیچشی تیرهای فولادی در بارگذاری لرزه‌ای می‌باشد. همچنین قیدهای میانی عملکرد بهتری در تیرهای دویل ناودانی با ارتفاع کم‌تر دارند.

به جهت بررسی بیش‌تر آثار تنش پسماند ناشی از جوش، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی به مدل‌سازی تیرهای دویل ناودانی به همراه تنش‌های پسماند پرداخته شود.

۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

تیرهای دویل ناودانی با توجه به سهولت در اجرا، با استفاده از قیدهای متصل‌کننده ناودانی‌ها، قابلیت استفاده در سازه‌های فولادی بدون نصب مهار جانبی خارجی را دارند. این قابلیت، امکان نصب این تیرها در محلهایی که اتصال مهار جانبی در تیرهای متعارف مورد نیاز باشد را ایجاد می‌کند.

در این تحقیق، مقاطع مختلف جهت استفاده به‌عنوان قیدهای متصل‌کننده ناودانی‌ها و طول مورد نیاز برای نصب این قیدها در نرم‌افزار آباکوس بررسی و مقایسه شده‌اند. برای بررسی، ابتدا یک مدل خطی ساخته شده و سپس با استفاده از تغییرشکل‌های مدل خطی، خطای ساخت برای مدل غیرخطی تعریف شده و با تحلیل غیرخطی، ظرفیت کمانش مقاطع برای انواع بارگذاری‌های ممکن به‌دست آمده است.

مطالعات نشان می‌دهند که مقطع I شکل نسبت به صفحه عمود بر جان ناودانی و تسمه‌های متصل‌کننده بال‌ها عملکرد بهتری داشته و باید بال و جان مقطع به ناودانی‌ها جوش شود. لازم به ذکر است که علت کاهش محسوس ظرفیت تسمه‌های متصل‌کننده بال، ضعف ورق در کمانش در داخل صفحه برای ناودانی‌های با فاصله نسبتاً زیاد از یکدیگر می‌باشد.

در قسمت دیگر از این تحقیق که به بررسی طول مورد نیاز برای جانمایی قیدهای متصل‌کننده ناودانی‌ها پرداخته شده است، با مدل‌سازی ۱۴۴ مدل شامل مقاطع I شکل دارای مهار جانبی و مقاطع دویل ناودانی با قیدهای متصل‌کننده، فاصله مورد نیاز برای جانمایی قیدهای متصل‌کننده بررسی شد.

نتایج به‌دست‌آمده تأیید می‌کنند که طول مهار مقطع ناودانی تک، جهت جای‌گذاری قیدهای میانی متصل‌کننده دویل ناودانی‌ها به یکدیگر، برای طول تیرهای تست‌شده (۴ الی ۱۰ متر) و ارتفاع مقاطع ۲۰۰ الی ۴۰۰ میلی‌متر مناسب هستند. بدین ترتیب، نیازی به مهار جانبی برای مقاطع دویل ناودانی با قیدهای میانی متصل‌کننده نمی‌باشد و این تیر به‌صورت خودایستا می‌تواند همانند مقاطع جعبه‌ای از ایجاد پیچش و کمانش جانبی-پیچشی قبل از رسیدن به ظرفیت پلاستیک مقطع جلوگیری نماید.

[15] Roy, K., Lau, H.H., Ting, T.C.H., Chen, B., and Lim, J.B. (2021), "Flexural behaviour of back-to-back built-up cold-formed steel channel beams: Experiments and finite element modelling", In Structures, Vol. 29, pp. 235-253.

- [1] ANSI/AISC 341, (2022), Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction.
- [2] ANSI/AISC 360, (2022), Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction.
- [3] Mathew, D.B., Girija, K., Nazeer, M., Anagha, N., and Jeyapragasm, V.V.K. (2024), "Experimental and numerical analysis of lateral-torsional buckling behaviour of monosymmetric simply supported beam. Asian Journal of Civil Engineering", 25(3), pp. 2471-2482.
- [4] Xu, Y.L., Shi, Y.J., Wu, Y.R., and Ban, H.Y. (2018), "Experimental and numerical study on lateral-torsional buckling behavior of high performance steel beams", International Journal of Structural Stability and Dynamics, 18(07), pp. 1850090.
- [5] Rossi, A., Martins, C.H., Nicoletti, R.S., and de Souza, A.S.C. (2020), "Reassessment of lateral torsional buckling in hot-holled I-beams", In Structures, Vol. 26, pp. 524-536.
- [6] A. De Martino, A. Ghersi, and F. M. Mazzolani, (1990), "Bending behaviour of double-C thin-walled beams", International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, pp. 637-648.
- [7] کشاورزی، ف.، میرقادی، س.، توماج، م. (۱۳۹۵)، "بررسی کمانش‌های موضعی غیرالاستیک تیرهای دابل ناودانی و مقایسه آن با مقطع I شکل معادل"، هفتمین کنفرانس ملی و دومین کنفرانس بین‌المللی سازه و فولاد. تهران.
- [8] Jiansinlapadamrong, C., Price, B., and Chao, S.H. (2018), "Cyclic behavior of steel double-channel built-up components with a new lateral-torsional-buckling prevention detail", Journal of Structural Engineering, 144(8), pp. 04018127.
- [9] Wesley, D. (2017), "Lateral-torsional Buckling of Steel Channel Beams A parametric study through FE-analysis".
- [10] Pham, N.H., Pham, C.H., and Rasmussen, K.J. (2021), "Global buckling capacity of cold-rolled aluminium alloy channel section beams", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 179, pp. 106521.
- [11] Anapayan, T., Mahendran, M., and Mahaarachchi, D. (2011), "Lateral distortional buckling tests of a new hollow flange channel beam", Thin-Walled Structures, 49(1), pp. 13-25.
- [12] Dahmani, L., and Drizi, S. (2015), "Lateral torsional buckling of an eccentrically loaded channel section beam", Strength of Materials, Vol, 47, pp. 912-916.
- [13] Ghannam, M. (2019), "Bending moment capacity of cold-formed steel built-up beams", International Journal of Steel Structures, 19(2), pp. 660-671.
- [14] Valeš, J., and Stan, T.C. (2017), "FEM modelling of lateral-torsional buckling using shell and solid elements", Procedia Engineering, Vol. 190, pp.464-471.

