

مطالعه اثر موقعیت سخت کننده طولی در کمانش جان تیرورق های فولادی I شکل خمیده در پلان با یک محور تقارن تحت خمش

امیرسامان افشین فر^۱، جعفر عسگری مارنانی^۲، سید مهدی زهرائی^{۳*}

۱- کارشناسی ارشد سازه دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی

۲- استادیار گروه عمران دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی

۳- استاد دانشکده عمران دانشگاه تهران، صندوق پستی ۴۵۶۳-۱۱۱۵۵، تهران، ایران

*mzahrai@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۵

تاریخ دریافت: ۹۹/۱/۲۳

چکیده

تیرورق هایی که در پل ها استفاده شده است معمولاً دارای جانی عمیق و نسبتاً لاغر هستند. در نتیجه، کمانش جان یکی از عوامل مهم در طراحی اینگونه تیرورق ها است. زمانی که حالت حدی کمانش جان بر طراحی حاکم شود، از سخت کننده های طولی و عرضی به منظور افزایش مقاومت مقطع استفاده می شود. محل قرارگیری سخت کننده ها در تیرورق های مستقیم تحت مطالعات گسترده ای قرار گرفته که منجر به ارائه موثرترین محل قرارگیری برای سخت کننده های طولی و عرضی شده است. مطالعه در زمینه تیرورق های خمیده در پلان به گستردگی آن در تیرورق های مستقیم نیست به ویژه در حالتی که سخت کننده های طولی در مقطع نامتقارن مد نظر باشد. این پژوهش به بررسی محل بهینه سخت کننده طولی در تیرورق های خمیده در پلان با مقطعی نامتقارن (بال فشاری بزرگتر از بال کششی)، تحت دهانه ای با تکیه گاه های ساده با تنش تسلیم 50 ksi (345 MPa) می پردازد. از مطالعات پارامتریک برای انتخاب محدوده های لاغری مقطع و شعاع انحنای تیرورق استفاده شد. تیرورق تحت بارگذاری با خمش زیاد و برش کم قرار گرفت. بر اساس نتایج این مقاله، قرارگیری سخت کننده طولی در فواصل یک ششم، یک پنجم و یک چهارم برابر عمق تیر از بال فشاری می تواند کمانش خمشی جان را کنترل کند. این رخداد بیانگر لزوم مد نظر قرار دادن اثر ابعاد بال فشاری در بیان محل بهینه سخت کننده طولی در تیرورق های تحت خمش است. در میان محل های گفته شده، قرارگیری سخت کننده طولی در فاصله ربع عمق تیر از بال فشاری، بهترین پاسخ برشی را در تیرورق دارد. به همین منظور، در این پژوهش محل بهینه سخت کننده طولی در فاصله ربع عمق تیر از بال فشاری است.

واژگان کلیدی: تیرورق های فولادی خمیده در پلان، سخت کننده طولی، کمانش موضعی جان، خمش خالص

مقدمه

با گذر زمان سازه‌ها رفته رفته بلند مرتبه‌تر و بزرگتر می‌شوند. کارفرمایان ترجیح می‌دهند که در شهر خود دارای سازه یکتا و منحصر به فردی باشند. علاوه بر این از مواد جدید و بهتر به صورت موثرتری استفاده می‌شود. استفاده از مواد کمتر نیز در دستور کار است. نتایج این رویکردها منجر به حذف ستون‌ها و افزایش دهانه‌ها شده است. هرچه سازه‌ها جسورانه‌تر ساخته شوند بیشتر مورد تحسین عموم قرار می‌گیرند. زیبایی دیگر تنها در هنر وجود ندارد و اعمال زیبایی در مهندسی ضرورت فراگیری سازوکارهای پیچیده‌تری را شامل می‌شود.

استفاده از تیورق‌های خمیده در پلان در ساخت جاده‌ها و اتوبان‌ها در حال افزایش است. پل‌های خمیده در شرایطی که محدودیت فضا برای قراردادی تکیه‌گاه‌ها وجود دارد، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند علاوه بر این در جاده‌ها و خطوط ریلی نیز وجود تکیه‌گاه‌ها برای عدم خروج این سازه‌ها از تراز اولیه خود بسیار ضروری است.

از دیگر عواقب این نوع ساخت و سازه‌های بزرگ، نیاز به استفاده از تیورق‌های عمیق با دهانه‌های بزرگ‌تر است. با افزایش عمق تیورق، پایداری موضعی جان چالش اصلی می‌شود. برای حصول اطمینان از این که ناپایداری موضعی جان، کنترل کننده ظرفیت تیورق نشود از سخت‌کننده‌های عرضی و طولی استفاده می‌شود. در پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه محل قرارگیری و اثر سخت‌کننده‌های عرضی برای تیورق‌های مستقیم و خمیده و همچنین برای سخت‌کننده طولی در تیورق‌های مستقیم، مناسب بوده و رفتار سخت‌کننده‌ها در این شرایط شناخته شده است، اما اثر سخت‌کننده طولی در تیر ورق‌های خمیده به قدر کافی تحت بررسی قرار نگرفته، به ویژه در رابطه با مقاطع نامتقارن پژوهش کافی صورت نگرفته است.

هدف اصلی این پژوهش بررسی اثر وجود سخت کننده طولی در محل‌های مختلفی از تار فشاری جان بر کنترل کمانش موضعی جان و افزایش مقاومت خمشی و برشی تیورق‌های خمیده در پلان با مقطع نامتقارن است. سخت‌کننده‌های

عرضی باعث افزایش ظرفیت برشی شده اما اثر کمی بر ظرفیت خمشی مقطع دارند، در حالی که سخت‌کننده‌های طولی اگر در محل مناسب قرار داشته باشند، می‌توانند باعث افزایش ظرفیت خمشی و برشی شوند.

روش مدل سازی

از نرم‌افزار آباکوس برای تمامی کارهای محاسباتی بهره گرفته شد. در مطالعات اخیر نیز از نرم‌افزار آباکوس برای بررسی رفتار تیورق‌های خمیده در پلان بهره گرفته شده است (جانگ و وایت در سال‌های ۲۰۰۱، کیم در سال ۲۰۰۷، ساس و دانگ در سال ۲۰۰۸ و الخوری در سال ۲۰۱۴). همچنین از المان Shell S4R برای مش‌بندی تمامی اجزای تیورق استفاده شده است (بال‌های فوقانی و تحتانی، جان، سخت‌کننده‌های عرضی و سخت‌کننده طولی). این المان برای بررسی المان‌های پوسته‌ای با قابلیت تغییرشکل‌های بزرگ مناسب بوده و شرح هندسی دقیقی از حرکات دورانی بزرگ دارد.

المان‌های پوسته‌ای، المان‌هایی هستند که فرضیه صفحه‌ای کیرچکوف را ارضا کنند (HKS, 1998):

- صفحه در حالت اولیه تخت است.
- مواد تشکیل دهنده همگن و ایزوتروپیک است.
- ضخامت در قیاس با ابعاد دیگر کوچک‌تر است.
- مقطع صفحه‌ای، صفحه‌ای باقی می‌ماند.
- کرنش‌ها در صفحه میانی نسبت به کرنش‌های خمشی قابل چشم‌پوشی هستند.
- خطوط مستقیم عمود بر صفحه میانی پس از تغییرشکل نیز مستقیم باقی می‌ماند.
- خطوط مستقیم عمود بر صفحه میانی پس از تغییرشکل نیز بر صفحه میانی عمود هستند.
- ضخامت ورق در طی تغییرشکل تغییر نمی‌کند.

المان پوسته‌ای مذکور، از ۵ نقطه انتگرال‌گیری و روش گاس جردن برای ضخامت، با یک نقطه انتگرال‌گیری برای هر المان استفاده می‌کند. از المان پوسته‌ای مشابه، S4، نیز که از ۴ نقطه انتگرال‌گیری برای هر المان استفاده شده است،

بال‌ها و جان، از ۱۶ المان در عرض بال فشاری و ۱۲ المان در عرض بال کششی استفاده شده است (شکل‌های ۱ تا ۳).
 شکل ۱. نمایی از بخش مرکزی خمیدگی

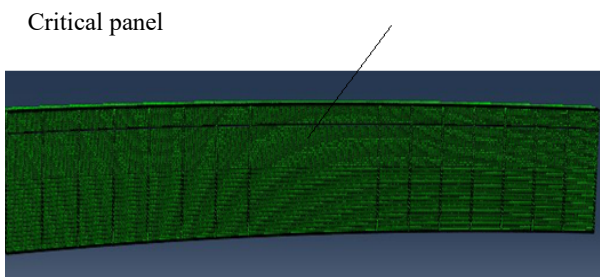


Fig. 1. A scene from the center of curve

شکل ۲. جزئیات مش بندی

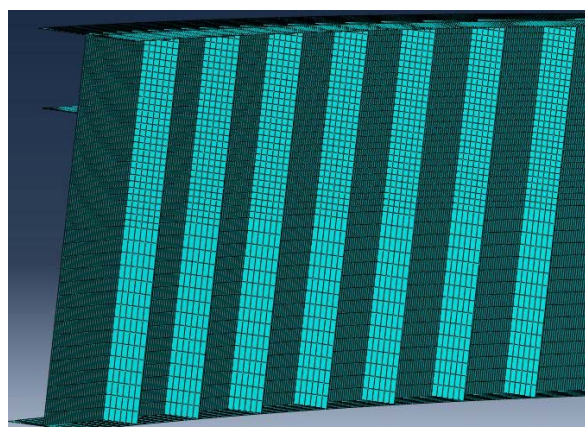


Fig. 2. Details of finite element model mesh

شکل ۳. نمایی از پشت مدل

under loads stiffeners

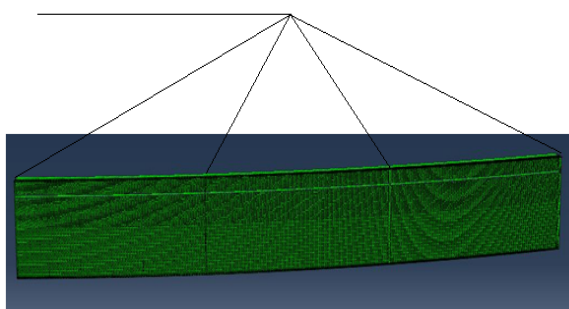


Fig. 3. A scene from behind of model

عمق جان، D ، شامل فاصله لب به لب بال‌های فشاری و کششی است. این عمق با توجه به محل‌های مختلفی که برای سخت‌کننده طولی در نظر گرفته شده به ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ بخش

می‌توان بهره برد اما به هر حال نشان داده شده است که برای کمانش موضعی جان، المان S4R مناسب بوده و پاسخ صحیح می‌دهد. از این رو استفاده از المانی با نقاط انتگرال‌گیری کمتر مناسب تر است (وایت و گراب، ۲۰۰۵). وایت در سال ۲۰۰۱ نشان داد که استفاده از ۱۰ المان در عرض بال و استفاده از ۲۰ المان در عمق جان برای بدست آوردن پاسخ‌های صحیح کمانشی مناسب هستند.

راکی و لگت نیز در سال ۱۹۶۲ محل بهینه سخت کننده طولی به منظور افزایش ظرفیت خمشی تیرورق‌های مستقیم را در فاصله ۰/۲۲ عمق جان از بال فشاری بدست آوردند. براساس این پژوهش، آیین‌نامه آشتو فاصله یک پنجم عمق جان از بال فشاری را به عنوان محلی بهینه برای قرارگیری سخت کننده طولی بیان می‌کند (آشتو ۲۰۰۷). با توجه به اینکه این محل براساس تحقیقی بیان شده که تنها روی تیرورق‌های غیرخمیده و مستقیم صورت گرفته بود، پس الخوری در سال ۲۰۱۴ محل بهینه سخت کننده طولی را در تیرورق‌های خمیده در پلان با مقطع متقارن بررسی کرد و محل بهینه را یک پنجم عمق جان از بال فشاری بدست آورد. ایشان از ۱۴ المان در عرض بال ۲۴ اینچی و از ۳۰ المان در نیمه فشاری جان و ۱۵ المان در نیمه کششی جان استفاده کردند، در حالی که عمق جان ۱۲۰ اینچ بود. در آیین‌نامه آشتو ۲۰۱۲ محل بهینه سخت کننده طولی، $2Dc/5$ برای تمامی مقاطع اعم از متقارن و غیرمتقارن بیان شده، که Dc عمقی از جان است که تحت فشار می‌باشد. از آنجا که که تحقیقی در خصوص محل بهینه سخت کننده طولی در تیرورق‌های خمیده در پلان با مقطع نامتقارن صورت نگرفته، در این پژوهش به بررسی این مهم پرداخته شده است. به همین منظور محل‌های $D/6, D/5, D/4, D/3, D/2$ در این مطالعه برای سخت کننده طولی در نظر گرفته شده است. مدل‌های اجزای محدودی نیز با این محل‌ها برای سخت کننده طولی سازگاری دارند. در ضمن از ۴۵ المان برای مش بندی جان استفاده شده که شامل ۳۰ المان در ناحیه تحت فشار و ۱۵ المان در ناحیه تحت کشش است. به منظور هر چه نزدیکتر کردن ابعاد مش بندی

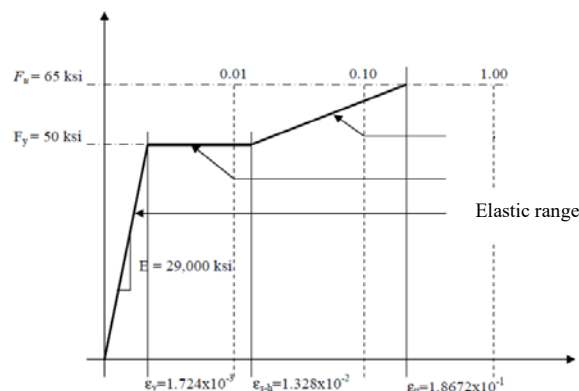


Fig. 4. Stress-strain curve of steel

شرایط مرزی تیورورق

در این پژوهش از تکیه‌گاه ساده برای تیورورق استفاده شد (شکل ۵).

-قیود تکیه‌گاهی عمودی: تمامی گره‌ها در تکیه‌گاه‌ها در عرض

stiffeners	Stiffeners width(inch)	Stiffeners thickness(inch)
Stiffener under loads	11	1.2
Stiffeners of supports	11	1.2
Transverse stiffeners	11	0.875
Longitudinal stiffeners	11	1.2

بال کششی (تحتانی) در جهت عمودی (قائم) مقید می‌شوند.

-قیود تکیه‌گاهی مماسی (افقی): تمامی گره‌ها در تکیه‌گاه سمت چپ در عرض بال کششی (تحتانی) در جهت مماسی (افقی) مقید می‌شود.

-قیود شعاعی: گره‌هایی که محل اتصال بال به جان می‌باشند، چه بال فشاری و چه بال کششی، در تکیه‌گاه‌ها و محل‌های اعمال بار در جهت شعاعی مقید می‌شوند.

جدول ۱. ابعاد سخت کننده‌ها

Table. 1. Dimensions of stiffeners

شکل ۵. تعیین عکس العمل‌ها و قیود

Radial

قابل تقسیم است. عمق ۱۲۰ اینچی (۳/۰۵ متری) که به صورت رایج در تیورورق‌های پل‌ها استفاده می‌شود انتخاب شد. hardening تو محدودیت $b_f > D/6$ را برای انتخاب Plastic range ر می‌گیرد. به همین منظور عرض ۲۲ اینچی (۵۵۸/۸ میلی‌متری) برای بال کششی (تحتانی) و با توجه به محدودیت $0.1 < I_{yc}/I_{yt} < 1.0$ عرض ۳۰ اینچی (۷۶۲ میلی‌متری) برای بال فشاری (فوقانی) انتخاب شد تا عدم تقارن در مقطع با پرهیز نمودن از مقطعی T شکل لحاظ شود. ابعاد ورق‌های سخت‌کننده تحت بار متمرکز در محل‌های بارگذاری و تکیه‌گاه‌ها با توجه به بند ۶، ۱۰، ۱۱، ۱، ورق‌های سخت‌کننده عرضی با توجه به بند ۶، ۱۰، ۱۱، ۲ و ورق سخت‌کننده طولی براساس بند ۶، ۱۰، ۱۱، ۳ آیین‌نامه آشتو طراحی براساس حالات حدی ۲۰۱۲ تعیین شد.

مشخصات فولاد تیورورق

از فولادی با خواص الاستوپلاستیک برای مدل‌سازی تیورورق استفاده شد (شکل ۴). در شکل مذکور از منحنی سه خطی برای بیان خواص الاستوپلاستیک فولاد بهره گرفته شده است. ضریب یانگ یا مدول الاستیسیته ۲۹۰۰۰ کیلو پوند بر اینچ مربع (۲۰۰ گیگا پاسکال) و ضریب پواسن ۰/۳ منظور شده است. مقاومت تسلیم فولاد ۵۰ کیلو پوند بر اینچ مربع (۳۴۵ مگاپاسکال) و تنش نهایی نیز ۶۵ کیلو پوند بر اینچ مربع (۴۵۰ مگاپاسکال) لحاظ شده است.

شکل ۴. منحنی تنش-کرنش فولاد

براساس اطلاعات مذکور تحلیل مقادیر ویژه خطی صورت پذیرفت و اولین بردار مثبت که بیانگر وقوع کمانش در ناحیه فشاری جان است (با توجه به اینکه لنگر مثبت به تیوروق وارد شده است) مد نظر قرار گرفت و نیروی بحرانی به عنوان خروجی برای مدل‌هایی که کمانش در ورق جان را شامل شد، بدست آمد. زمانیکه سخت کننده طولی در فواصل $(1/4, 1/5, 1/6)$ ارتفاع جان از بال فشاری بود، کمانش موضعی جان رخ نداد. اما در الباقی مدل‌ها کمانش رخ داد و نیروی بحرانی متناظر شناسایی شد در جدول (۳) اختلاف قابل قبول و دقت در مدل‌سازی‌ها قابل مشاهده است.

جدول ۳. راستی آزمایی مدل

Table 3. Verification of model

در شکل‌های ۶ تا ۸ نمونه‌های مدل‌سازی شده با سخت کننده طولی مستقر در فواصل ثلث، نصف و چهارپنجم عمق جان از بال فشاری آورده شده است.

شکل ۶. مد کمانش در صورتیکه سخت کننده طولی در فاصله نصف ارتفاع جان از بال فشاری قرار دارد

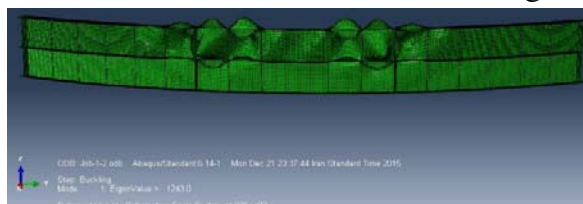


Fig. 6. Buckling mode while longitudinal stiffener is at D/2 from compression flange

شکل ۷. مد کمانش در صورتیکه سخت کننده طولی در فاصله ثلث ارتفاع جان از بال فشاری قرار دارد

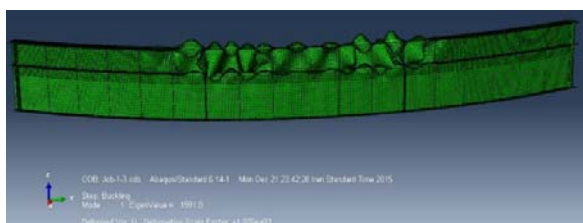


Fig. 7. Buckling mode while longitudinal stiffener is at D/3 to compression flange

شکل ۸. مد کمانش در صورتیکه سخت کننده طولی در فاصله چهارپنجم ارتفاع جان از بال فشاری قرار دارد

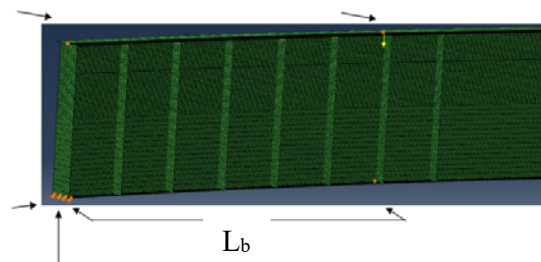


Fig. 5. Defining reactions and restraints

El-Khoury	This study	d_s/D	difference
936.2	936.8	0	-0.06%
1974.9	1991.8	0.333333	-0.86%
1236.6	1243	0.5	-0.52%
876.2	878.27	0.8	-0.24%

راستی آزمایی مدل

در بخش اعتبار سنجی از مقاله (Elkhoury, 2014) استفاده شده است. ایشان در سال ۲۰۱۴ در دانشگاه پنسیلوانیا بهینه یابی محل سخت کننده طولی در تیوروق‌های خمیده در پلان را با در نظر گرفتن اثر تنش پسماند مورد مطالعه قرار دادند. مدل G08 با مشخصات ذیل به منظور اعتبار سنجی مورد استفاده قرار گرفت:

- شعاع انحنای (R) ۱۰۰ فوت - ضخامت جان (tw) ۰.۸ اینچ - ضخامت بال (tf) ۱.۳۳ اینچ - فاصله مهار جانبی (L_b) ۱۰

Absence of residual stress	Presence of Residual stress	d_s/D	difference
967.3	936.8	0	3.15%
2005.3	1991.8	0.333333	0.67%
1259.4	1243	0.5	1.30%
906.47	878.27	0.8	3.11%

فوت - عرض پانل خمشی (d_0) ۱۲۰ اینچ - جان با عمق ۱۲۰ اینچ - عرض بال ۲۴ اینچ. جزئیات مربوط به تنش پسماند نیز براساس جدول (۲) به مدل اعمال شد.

جدول ۲. تاثیر تنش پسماند بر نیروی بحرانی

Table 2. Effect of residual stress on critical force

موضعی جان در نمونه‌ها با شرایط مختلف است. باتوجه به تحقیقی که فیدرسون^۲ در سال ۲۰۰۰ روی اثر نقص هندسی اولیه در ورق‌های خمیده بر نتایج تحلیل بردار مقادیر ویژه خطی انجام داد، عدم اعمال نقص هندسی تأثیری در مود اول کمانشی (همان مودی که در این تحقیق مد نظر است) ندارد و تنها بار بحرانی کمانشی که بدست می‌آید نسبت به بار بحرانی کمانشی در حالت واقعی بیشتر بوده و نیاز به اعمال ضریب کاهش دارد. با در نظر گرفتن این نکته که تحلیل بردار مقادیر ویژه خطی به منظور بدست آوردن نقطه انشعابی (مد کمانشی) سازه بدون نقص مناسب بوده و همچنین با توجه به تحقیق مذکور، اعمال نقص هندسی اولیه به مدل نرم‌افزاری می‌تواند تأثیر منفی در بدست آوردن اولین مود کمانشی داشته باشد. در پایان با در نظر گرفتن این نکته که در این تحقیق، اولین مود کمانشی مد نظر بوده و مقادیر بارهای بحرانی به صورت نسبی با هم مقایسه می‌شوند، نقص اولیه هندسی در مدلسازی‌ها اعمال نشده است.

شکل ۹. مدل مک گوایر

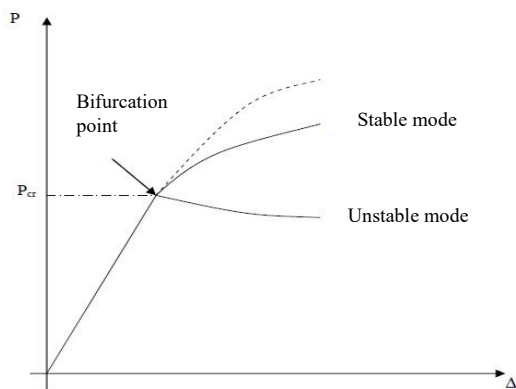


Fig. 9. McGuire et al. 2000³

همچنین به منظور بررسی اثر لحاظ نمودن تنش پسماند مدل سازی صحت سنجی برای حالت بدون تنش پسماند نیز محاسبه شد. نتیجه این بررسی نشان می‌دهد که لحاظ نکردن تنش پسماند در مدلسازی تغییری در مد کمانش ایجاد نکرده و کمتر از ۲٪ در نیروی بحرانی کمانشی اثر گذار است. با توجه به این بررسی و با توجه به اینکه آنالیز خطی می‌باشد،

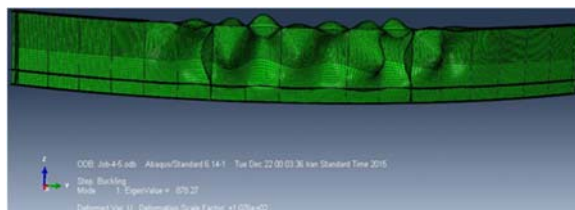


Fig. 8. Buckling mode while longitudinal stiffener is at 4D/5 to compression flange

روش تحلیل و آنالیز

در این پژوهش از نرم‌افزار ABAQUS و روش Buckle استفاده شده است. در این روش نرم‌افزار با حل مقادیر ویژه (Eigenvalue)، نیروی حد کمانش و شکل مود کمانشی مربوطه را محاسبه می‌کند. روش تحلیل مقادیر ویژه از اصل پایداری سازه‌ها استفاده می‌کند که در یک سیستم سازه‌ای، وقتی کمانش رخ می‌دهد که دترمینان سختی صفر شود. به این صورت که در ابتدا ماتریس سختی متناظر با شرایط اولیه بارگذاری سازه ذخیره می‌شود، سپس یک اختلال کوچک یا بار زنده به سازه اعمال می‌شود. در این حالت شرایط اولیه بارگذاری نشده و ماتریس سختی، همان ماتریس اصلی سازه است. سپس برنامه ماتریس‌های تنشی ناشی از بار زنده را داده و با انجام محاسبات مقادیر ویژه، ضریب افزایشده‌ای به بار زنده اعمال شده تا سازه به نقطه انشعابی (ناپایداری) رسیده، و دترمینان سختی سیستم صفر شده و کمانش رخ دهد. با این توضیح، نرم‌افزار با استفاده از انرژی کرنشی ماتریس سختی و با استفاده از انرژی پتانسیل بارهای خارجی، ماتریس سختی کاهش یافته را محاسبه می‌کند. ابعاد ماتریس‌های ذکر شده بر اساس تعداد درجات آزادی سیستم و تعداد مودهای معرفی شده تعیین می‌شود.

$$[K] - \lambda_i [G] = 0$$

که در این رابطه $[K]$ ماتریس سختی، $[G]$ ماتریس سختی هندسی و λ_i مقدار ویژه مود i ام است.

در این پژوهش با توجه به اینکه کمانش در محدوده فشاری جان مد نظر است و با توجه به نوع بارگذاری که منجر به ایجاد محدوده فشاری در نیمه فوقانی جان می‌شود، اولین بردار ویژه با مقدار مثبت در این آنالیز مد نظر قرار می‌گیرد، که نوع مود کمانشی بیانگر بحرانی بودن یا نبودن کمانش

لذا از اثر تنش پسماند نیز در مدل سازی ها صرف نظر شده است.

شکل ۱۰. مدل سازی با لحاظ نکردن تنش پسماند در نصف عمق

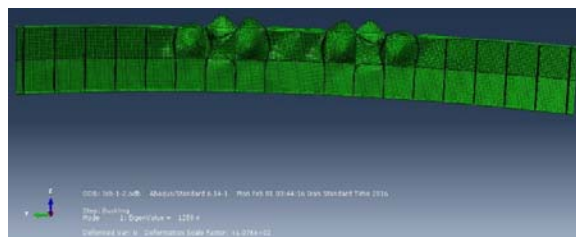


Fig. 10. Model in D/2 in absence of residual stress

• F_{yf}/F_{yw} : نسبت تنش تسلیم بال ها به تنش تسلیم جان.

• t_w : ضخامت جان تیورق (لاغری جان تیورق D/t_w).

• t_f : ضخامت بال تیورق (لاغری بال تیورق b_f/t_f).

• d_{os} : فاصله بین سخت کننده های عرضی (نسبت ابعاد پانل d_{os}/D)، در محدوده ای که برش حاکم است.

• d_{ob} : فاصله بین سخت کننده های عرضی (نسبت ابعاد پانل d_{ob}/D)، در محدوده ای که خمش حاکم است.

1. Bifurcation point .

• Lb : ط

2. C.A. Featherston.

همان گونه پیش از

3. McGuire et al., 2000

موارد زیر است:

• تیورق های I شکل با یک محور تقارن $b_{ft} > b_{fc}$.

• استفاده از فولاد ASTM A572 رده ۵۰ برای

همه المان های تیورق: $F_y = 50 \text{ ksi} (345 \text{ MPa})$

بنابراین پارامترهایی که در این پژوهش متغیر بوده و

نقطه تمرکز این مطالعه بوده، شامل پارامترهای t_w , t_f و d_{ob} و R است.

طراحی به روش 2^k فاکتوریل

این روش در سال ۲۰۰۱ توسط متگومری برای ساختن ماتریس مدل سازی استفاده شد. این روش نسبت به روش هایی مثل آرایش تصادفی ارجحیت داده شد، زیرا که این روش براساس سطوح مختلف عمل می کند.

محدوده پارامترها

هدف طراحی 2^k فاکتوریل ترکیب کردن پارامترهای مختلف در حالتی است که متغیر باشند. بنابراین انتخاب محدوده ای مناسب برای پارامترها از اهمیت زیادی برخوردار است. محدوده هایی که در این مطالعه بیان می شود، از آیین نامه آشتو ۲۰۱۲ اقتباس شده است:

شکل ۱۱. مدل سازی با لحاظ نکردن تنش پسماند در ثلث عمق

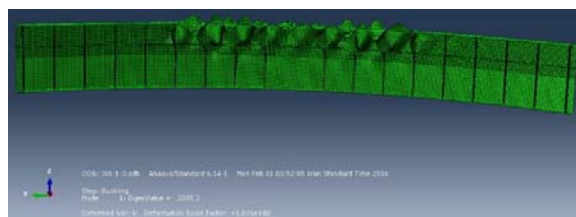


Fig. 11. Model in D/3 in absence of residual stress

در شکل های ۱۰ و ۱۱ نیز مد کمانشی در اثر لحاظ نکردن تنش پسماند در حالت استفاده از سخت کننده طولی در $1/3$ و $1/2$ جان از بال فشاری آورده شده که قابل مقایسه با شکل های ۶ و ۷ می باشد.

مطالعه پارامتری

پارامترهای مرتبطی که بتوانند تیر ورق فولادی خمیده در پلان، با تکیه گاه های ساده، تحت یک دهانه را به خوبی توصیف کنند شامل موارد ذیل است:

• b_{fc}/b_{ft} : نسبت عرض بال فوقانی به بال تحتانی.

(فاصله سخت‌کننده عرضی در محدوده برشی). به منظور کنترل کمانش برشی در تیروورق از کمترین فاصله اجرایی ۰/۵ در محدوده برشی استفاده شد ($d_{0s}/D=0.5$). اما در رابطه با d_{0b}/D می‌توان نوشت:

$$\begin{array}{ll} d_{0b}/D=2 & \text{سطح کم} \\ d_{0b}/D=3 & \text{سطح زیاد} \end{array}$$

۴. R: آشتو ۲۰۱۲ مقدار شعاع انحنا را برای تیروورق‌های خمیده در پلان با $b_{fc}>30\text{in}$ به ۱۰۰۰ فوت محدود می‌کند، $R>1000\text{ft}$ در این پژوهش به منظور بررسی اثر انحنا، مقدار ۳۰۰ فوت نیز برای شعاع انحنا در نظر گرفته شده است، در نتیجه می‌توان نوشت:

جدول ۴. محدوده پارامترهای مدلسازی

Table. 4. Range of modeling parameters

R=300 ft	سطح کم
R=1000 ft	سطح متوسط
R=2000 ft	سطح زیاد

جدول ۴ محدوده پارامترها را نشان می‌دهد. سایر مقادیر که در این پژوهش ثابت در نظر گرفته شده اند عبارتند از:

عرض بال فشاری (b_{fc}) و عرض بال کششی (b_{ft}): براساس محدودیت‌های موجود در خصوص ابعاد بال‌های تیروورق‌ها در آیین‌نامه آشتو، عرض بال‌های کششی و فشاری به گونه‌ای انتخاب شد که اثر نامتقارنی (یک محور تقارنی) در مقطع با پرهیز از مقطعی T شکل، به خوبی دیده شود:

$$b_{fc}=30\text{ in} , b_{ft}=22\text{ in}$$

طول مهار جانبی (L_b): آیین‌نامه آشتو ۲۰۱۲، محدودیت $L_b<R/1000$ را برای کنترل کمانش پیچشی جانبی تیروورق‌های فولادی پیشنهاد می‌کند. با توجه به اینکه کمترین شعاع انحنا موجود در این پژوهش ۳۰۰ فوت است، پس برای

۱. t_w : برای جان با سخت‌کننده عرضی، تا لاغری ۱۵۰ مجاز است (آشتو ۲۰۱۲)، $D/t_w<150$ برای جان با سخت‌کننده طولی و عرضی لاغری ۳۰۰ نیز مجاز است (آشتو ۲۰۱۲)، $D/t_w<300$ بنابراین در این مطالعه:

$$\begin{array}{ll} D/t_w<150 & \text{سطح کم} \\ D/t_w<300 & \text{سطح زیاد} \end{array}$$

۲. t_f : بال تیروورق درحالتیکه لاغری، b_f/t_f حداکثر ۱۸ باشد، فشرده در نظر گرفته می‌شود، لاغری بال غیر فشرده نیز از مقدار ۲۴ نمی‌تواند بیشتر باشد $b_f/t_f<24$ (آشتو ۲۰۱۲). پس محدوده لاغری بال نیز براساس حالات زیر تعیین می‌شود:

$$\begin{array}{ll} b_f/t_f<16 & \text{سطح کم} \\ b_f/t_f<18 & \text{سطح متوسط} \\ b_f/t_f<24 & \text{سطح زیاد} \end{array}$$

۳. d_{0b} : در آیین‌نامه آشتو ۲۰۱۲ محدوده‌ای که برای فاصله میان سخت‌کننده‌های عرضی در محدوده‌ای که برش حاکم است، $d_0/D<3$ است که در این حالت میدان عمل کشش را می‌توان در نظر گرفت. همچنین $d_0/D=0.5$ کمترین فاصله اجرایی سخت‌کننده‌های عرضی در محدوده برش است. در این پژوهش به منظور بررسی اثر حضور سخت‌کننده عرضی در محدوده خمشی، فاصله سخت‌کننده‌های عرضی به دو

	parameter	rates		
		low	mid	high
۱	D/t_w	۱۵۰	-	۳۰۰
	t_w	0.4 in	-	0.8 in
۲	b_f/t_f	16	18	24
	t_f	1.87 in	1.66 in	1.25 in
۳	d_{ob}/D	2	-	3
	d_{ob}	240 in	-	360 in
۴	R	300 ft	1000 ft	2000 ft

نوع در محدوده خمش و در محدوده برش تقسیم شد، d_{0b} (فاصله سخت‌کننده عرضی در محدوده خمشی) و d_{0s}

براساس محدوده‌های تعیین شده برای پارامترهای متغیر ماتریس‌های مدل‌سازی براساس تمامی حالات ترکیبی ممکن تشکیل شد که بخشی از آن در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵. مثالی از پارامترهای مدل‌سازی

تیرورق‌های مدل‌سازی به دو بخش تقسیم شده و هر بخش نیز به سه گروه تقسیم می‌شود. b_f نشان اول لاغری جان ۱۵۰ و در بخش دوم ۳۰۰ در نظر گرفته شده، در گروه ۱ هر بخش لاغری بال فشاری ۱۶، در گروه ۲ لاغری بال فشاری ۱۸ و در گروه ۳ لاغری بال فشاری ۲۴ در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است که در هر گروه ضخامت بال‌ها براساس لاغری بال فشاری در نظر گرفته شده و به هر دو بال فشاری و کششی ضخامتی یکسان تعلق می‌گیرد. در پایان با احتساب شعاع‌های انحنای و عرض پانل مختلف، ۳۶ نمونه مدل‌سازی حاصل می‌شود. با توجه به مدل‌سازی این نمونه در حضور سخت‌کننده طولی در محل‌های مختلف نصف، ثلث، ربع، یک پنجم، یک ششم عمق تیرورق و حالتیکه سخت‌کننده طولی نداریم، در نتیجه در مجموع ۲۱۶ مدل‌سازی شکل می‌گیرد.

بارگذاری

در این مطالعه بارگذاری تیرورق به گونه‌ای است که تحت خمش بالا و برش کم قرار بگیرد و بیشینه خمش در پانل میانی تیرورق اعمال شود، به این منظور تیرورق در دو نقطه 1R, 1L دارای تکیه‌گاه ساده بوده و در نقاط 2R, 2L تحت بارگذاری با نیروی متمرکز فشاری قرار می‌گیرد. تیرورق در محل‌های بارگذاری و تکیه‌گاهی مهار جانبی می‌شود. در شکل ۱۳ چگونگی بارگذاری و همچنین نمودار خمشی و برشی تیرورق آورده شده است.

شکل ۱۳. نمودار بارگذاری، برش و خمش

تمامی شعاع‌ها $L_b = 30ft$ در نظر گرفته می‌شود. عمق جان (D) نیز براساس تیرورق‌های رایج و مرسوم ۱۲۰ اینچ در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۲ نمونه‌ای از مقطع بکار گرفته شده در این مطالعه قابل مشاهده است.

شکل ۱۲. نمایی از مقطع تیرورق

	G	t_w	D/t_w	$t_f(in)$	b_f/t_f	$d_o(in)$	d_o/D	R(ft)
1 st	G19	0.4	150	1.87	16	240	2	300
	G20							1000
	G21							2000
	G22					360	3	300
	G23							1000
	G24							2000
2 nd	G25			1.66	18	240	2	300
	G26							1000
	G27							2000
	G28					360	3	300
	G29							1000
	G30							2000
3 rd	G31			1.25	24	240	2	300
	G32							1000
	G33							2000
	G34					360	3	100
	G35							1000
	G36							2000

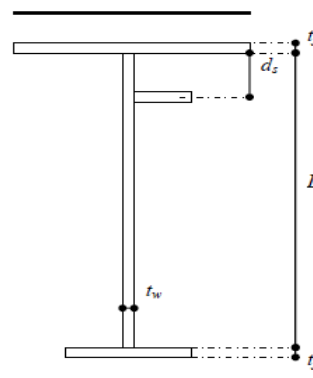


Fig. 12. Section configuration for the girder

ساخت ماتریس مدل‌سازی

در این بخش قسمتی از جداول نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدودی تیرورق که برای تمامی ۶ گروه موجود در ماتریس مدل صورت پذیرفته آورده شده است (جدول ۶). خانه‌های با رنگ سبز بیانگر وقوع کماتش موضعی جان، رنگ سفید بیانگر کماتش برشی جان، رنگ زرد بیانگر وقوع کماتش موضعی بال فشاری و رنگ نارنجی بیانگر وقوع کماتش موضعی جان و بال فشاری به صورت همزمان است.

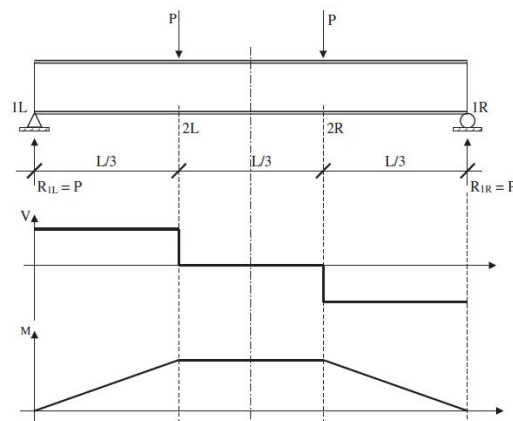


Fig. 13. Loading, shear and moment diagrams

نتایج عددی

جدول ۶. نیروهای بحرانی گروه ۳ در حالیکه سخت کننده طولی در عمق های مختلف جان قرار می گیرد

$D/t_w=150$		$P_{cr}(kips)$					
$b_f/t_f=24$		$d_0/D=2$			$d_0/D=3$		
$R(ft)$		300	1000	2000	300	1000	2000
Girders		G13	G14	G15	G16	G17	G18
d_s/D	0	842.29	785.34	782.9	813.67	760.34	757.94
	1/6	2003.6	2128	2135.7	1995.2	2118.7	2125.3
	1/5	1931.2	2036.1	2042.6	1921	2023.7	2029.2
	1/4	1822.3	1901.7	1906.3	1809.9	1885.2	1889.3
	1/3	1604.2	1627.9	1628.3	1597.2	1614.4	1614.2
	1/2	1107.8	1015.2	1006.9	1079.2	992.02	989.27

Table 6. Critical force of group 3 while longitudinal stiffeners are placed in different depths of web

اعماق $D/4, D/5, D/6$ از بال فشاری تیرورق رخ نمی دهد. همچنین مقاومت برشی در حضور تیرورق در عمق $D/4$ نسبت به اعماق $D/5, D/6$ بیشتر است.

گروه ۳ با لاغری بال ۲۴:

در رابطه با لاغری بال ۲۴ در $G13, G14, G15, G16, G17, G18$ در حضور سخت کننده طولی در اعماق $D/4, D/5, D/6$ از بال فشاری، تیرورق دچار کماتش خمشی جان نمی شود و همچنین مشاهده شد که در این گروه کماتش برشی رخ نداده است (شکل ۱۴). در حالی که کماتش خمشی جان اتفاق نمی افتد، حالت حدی کماتش موضعی بال فشاری کنترل کننده ظرفیت تیرورق است.

لاغری ۱۵۰، گروههای ۱، ۲ و ۳

گروه ۱ با لاغری بال ۱۶:

در رابطه با نتایج گروه ۱ در $G01, G02, G03, G04, G05$ کماتش خمشی جان در حضور سخت کننده طولی در اعماق $D/4, D/5, D/6$ از بال فشاری تیرورق رخ نمی دهد. همچنین مقاومت برشی در حضور تیرورق در عمق $D/4$ نسبت به اعماق $D/5, D/6$ بیشتر است.

گروه ۲ با لاغری بال ۱۸:

در رابطه با نتایج گروه ۲ در $G07, G08, G09, G10, G11$ کماتش خمشی جان در حضور سخت کننده طولی در

به هنگام تعیین محل بهینه سخت کننده طولی برای افزایش ظرفیت خمشی مقطع، علاوه بر طول تار فشاری جان تیر ورق، عرض بال و تاثیر آن که در جذب لنگر ورودی بر تیروورق دارد نیز باید مد نظر قرار گیرد. در این مطالعه مشاهده شد که عریض تر بودن بال فشاری نسبت به بال کششی باعث جذب درصدی از لنگر مثبت ورودی به تیر ورق بوده، به گونه‌ای که حضور سخت کننده طولی تنها در تار فشاری جان تیروورق می‌تواند کنترل کننده کمانش موضعی جان تحت خمش باشد.

- به جز مدل‌های گروه ۳ که به علت لاغری ۲۴ بال فشاری و لاغری جان ۱۵۰ که منجر به وقوع کمانش بال فشاری در حضور سخت کننده طولی در اعماق $D/4, D/5, D/6$ می‌شود، در سایر گروه‌ها در حالتی که سخت کننده طولی در عمق‌های مذکور قرار دارد، حالت حدی کمانش برشی کنترل کننده حالت حدی تیروورق است. مشاهده شد هنگامی که کمانش برشی کنترل کننده حالت حدی تیروورق بوده، حضور سخت کننده طولی در عمق $D/4$ موجب افزایش ۴-۵ درصدی ظرفیت برشی تیروورق نسبت به عمق $D/6$ است چون در این حالت سخت کننده طولی در فاصله کمتری از تار خشی تیروورق قرار داشته و برش را بهتر از سایر حالات کنترل می‌کند. با توجه به کنترل کمانش موضعی جان و بیشترین ظرفیت برشی در حالتی که سخت کننده طولی در عمق $D/4$ قرار دارد، پس می‌توان در این پژوهش محل بهینه سخت کننده طولی را عمق $D/4$ از بال فشاری در نظر گرفت.

- در گروه ۳ که کمانش بال فشاری حالت حدی کنترل کننده ظرفیت تیروورق بود حضور سخت کننده طولی در عمق $D/6$ ، منجر به افزایش ۱۰-۱۳ درصدی ظرفیت خمشی بال فشاری نسبت به $D/4$ شد. زیرا با کاهش طول آزاد جان در مجاورت بال فشاری، سختی در این محدوده افزایش یافته و منجر به افزایش ظرفیت خمشی تیروورق در این حالت می‌شود.

زمانی که که ظرفیت تیر ورق در حالتی که حالت حدی کمانش موضعی بال فشاری حاکم باشد در حضور سخت کننده طولی در عمق $D/6$ از بال فشاری نسبت به سایر محل‌ها بیشتر است.

شکل ۱۴. بررسی وقوع کمانش جان در گروه های ۱۳، ۱۴، ۱۵

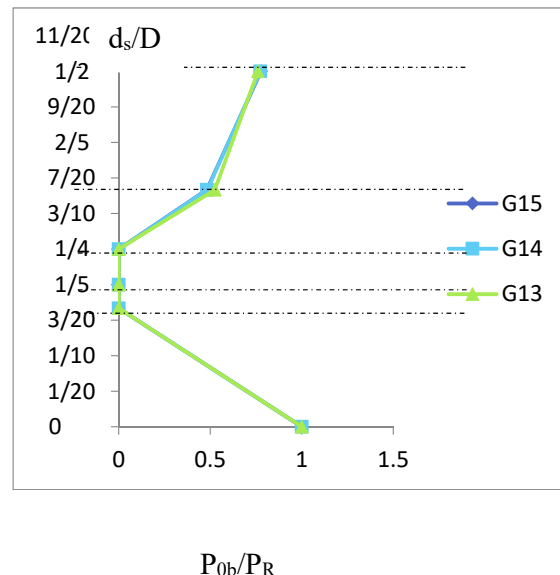


Fig. 14. Considering web buckling in G13, G14, G15

- نتایج مربوط به جان با لاغری ۳۰۰، گروه های ۴، ۵ و ۶: در رابطه با گروه های ۴، ۵ و ۶ یعنی از G19 تا G36 در حضور سخت کننده طولی در عمق‌های $D/3, D/4, D/5, D/6$ از بال فشاری، تیروورق دچار کمانش خمشی جان نمی‌شود و حالتی که کمانش برشی جان حالت حدی کنترل کننده است، قرارگیری سخت کننده طولی در عمق $D/3$ از بال فشاری، نسبت به سایر محل‌ها مقاومت برشی بالاتری را در پی خواهد داشت.

نتیجه گیری

براساس ۲۱۶ مدل سازی که جزء به جزء تحت بررسی قرار گرفت، نتایج حاصل از این مطالعه شامل موارد ذیل است:

- در تمامی تیروورق‌های مدل سازی شده، کمانش موضعی جان ناشی از خمش در حضور سخت کننده طولی در عمق‌های $D/4, D/5, D/6$ اتفاق نیفتاده است. در نتیجه

مراجع

- [9] Chen W.F., Lui E.M. (1991). **Stability design of steel frames**. CRC Press Inc., 1991.
- [10] Consortium of University Research Team (CURT), (1975). **Tentative design specifications for horizontally curved highway bridges**. Part of Final Rep. Research Project HPR2-(111), 1975.
- [11] Cooper P.B. (1967). **Strength of longitudinally stiffened plate girders**. IABSE Colloq. Des. Plate box girders ultimate strength, London, 1967.
- [12] Culver C., and Nasir G., (1971). **Inelastic flange buckling of curved plate girders**. J. Struct. Div., ASCE, 97 (4), 1239-1256, 1971.
- [13] Culver C. (1972). **Design recommendations for curved highway bridges**. Final Rep. for Research Project 68-32, Pennsylvania Department of Transportation, Harrisburg, Pa, 1972.
- [14] Devore J. and Peck R. (2001). **Statistics: The Exploration and Analysis of data, Fourth Edition**. Pacific Grove, CA, Thomson Learning, Inc., 2001.
- [15] Featherson C.A. (2000). **The use of finite element analysis in the examination of instability in flat plates and curved panels under compression and shear**. International J. of Non-Linear Mechanics, 35 (3), 515-529.
- [1] American Association of State and Highway Transportation Officials (AASHTO) (2007). **AASHTO LRFD bridge design specifications**, Washington, D.C. 2007
- [2] American Institute of Steel Construction (AISC) (2005). **Load and resistance factor design specification for structural steel buildings**, Chicago. 2005
- [3] Basler K., Thürlimann B. (1963). **Plate girders – Strength in bending**. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1963 Vol. 128, 655-682.
- [4] Basler K., (1963). **Plate girders – Strength in shear**. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1963 Vol. 128, 683-719.
- [5] Bijlaard P. (1940). **Theory of the plastic stability of thin plates**. Pubs. Intern. Assoc. Bridge and Structural Eng., 1940-1941, Vol. VI, 45.
- [6] Bleich F. (1924). **Theorie und berechnung der eiseren bracken**. Julius Springer, Berlin, 1924.
- [7] Bleich F. (1952). **Buckling strength of metal structures**. McGraw-Hill book company, Inc.
- [8] Bryan G.H. (1891). **On the stability of a plane plate under thrusts in its own plane, with applications to the buckling of the sides of a ship**. Proc. London Math. Soc., 1952, Vol. 22, 54.

Effect of longitudinal stiffener placement on web buckling of horizontally curved plate girder with one symmetry axis under flexure

Amirsaman Afshinfar¹, Jafar Asgari Marnani², Seyed Mehdi Zahrai^{3*}

1. M.Sc. in Structural Engineering, Islamic Azad university of Central Tehran branch

2. Associate Professor - Civil Engineering Department, Islamic Azad university of Central Tehran branch

3. Professor – School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

*mzahrai@ut.ac.ir

Abstract

The plate girders used in bridges usually have a deep and relatively thin web, therefore, the buckling of the web is one of the important factors in the design of such girders. While the limit state of web buckling is dominant in design, longitudinal and transverse stiffeners are used to increase cross-sectional strength. The location of stiffeners in straight girders has been extensively studied, which has led to the most effective placement for longitudinal and transverse stiffeners. In the case of curved beams in the plan is not as extensive as in the case of straight girders, especially in the case of longitudinal stiffeners in the asymmetric section.

The main objective of this research is to investigate how to increase bending and shear strength of a horizontally curved plate girder when web local buckling is the controlling limit state. Transverse stiffeners increase shear strength but have little impact on bending strength in plate girders while longitudinal stiffeners can increase bending strength and shear strength if properly located. For this purpose, this research is intended to determine the optimal location of a single longitudinal stiffener along the web of horizontally curved plate girders to achieve the greatest increase in high moment-low shear strength, when web local buckling is the controlling limit state. Summarized herein is a study that explored single span, horizontally curved, plate girders having a yield stress of 50 ksi (345 MPa) to investigate their flexural behavior as a function of the position of a single longitudinal stiffener at various locations along the depth of the web. The studies were conducted using ABAQUS with the girder cross-sections under high vertical bending moment and low shear.

The general-purpose shell element type S4R was used to model all of the plate components of the girders (i.e. the web, the top and bottom flanges, and the stiffeners). This is a four-node quadrilateral large strain shell element with reduced integration. The shell element uses five integration points and a trapezoidal integration rule in the thickness direction. The shell element type S4 has also been used. It is the same shell element with the same properties but without reduced integration. Based on the results obtained in this research, some recommendations are made for positioning longitudinal stiffeners on horizontally curved girders:

-Placement of longitudinal stiffener at distances $D/4$, $D/5$, $D/6$ from the compression flange can control the flexural buckling of the web.

-The effects of residual stress on buckling mode and critical buckling force also have been studied in this research that shows less importance in mode and force due to being in elastic range.

-Among the above-mentioned locations, the location of the longitudinal stiffener at a distance of $D/4$ from the compression flange has the best shear response in the beam. Therefore, in this study, the optimal location of the longitudinal stiffener at a distance of $D/4$ from the compression flange.

For future research in this area, it is also recommended to assess: different ratio of curved plate girder with asymmetric cross section, different ratio of web slenderness, inelastic effect of longitudinal stiffener on curved plate girder with asymmetric cross section and cyclic load effects in the same cross section.

Keywords: Horizontally curved plate girders, longitudinal stiffener, local buckling of web, pure bending