



کنترل کمانش پیچشی جانبی تیرورقهای فولادی به وسیله سخت کننده دلتا

ابوالفضل عربزاده^۱، محسن ورمزیاری^۲

۱- بخش عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- بخش عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

:

mv.civil@yahoo.com

خلاصه

کمانش پیچشی جانبی یکی از ناپایداریهای عمده اعضاء سازه‌ای جدار نازک تحت خمش است. در این نوع ناپایداری عضو سازه‌ای به صورت ناگهانی دچار افت جانبی و پیچش قابل توجهی در خارج از صفحه بارگذاری می‌شود. روش متداول برای جلوگیری از رخداد این نوع کمانش مهاربندی جانبی عضو و یا استفاده از سیستم دال بتنی در قسمت فوقانی مقطع است. با استفاده از سخت کننده‌های دلتا می‌توان مقاومت پیچشی و سختی جانبی تیرها و تیرورقها را بالا برده و در نتیجه از بروز کمانش در مقطع جلوگیری می‌کنند. در این مقاله به کمک برنامه تحلیل المان محدود (ANSYS 5.4) مقاطع با سخت کننده دلتا مدلسازی شده و ظرفیت مقطع دلتا در مقابل کمانش پیچشی جانبی بررسی شده که در نتیجه آن نسبت فاصله بهینه اتصال سخت کننده دلتا به ارتفاع جان در حدود ۰/۲ تا ۰/۲۵ و نسبت ضخامت بهینه این سخت کننده‌ها برابر ۱/۵ تا ۲/۰ تعیین شده است.

کلمات کلیدی: مقطع دلتا، سخت کننده دلتا، کمانش پیچشی جانبی، پارامتر ضخامت، پارامتر ارتفاع

مقدمه

در زمینه طراحی اعضاء خمشی فولادی از جمله تیر و تیورق تحقیقات وسیعی انجام شده، که البته بیشتر آنها به منظور بهبود رفتار و مقاومت خمشی این اعضاء انجام شده است. ولی همچنانکه پیداست پایداری جانبی این اعضاء و به تبع آن بحث کمانش پیچشی جانبی آنها نیز باید مورد توجه قرار گیرد. در کنفرانس بین المللی AISC در ۱۹۵۹ ایده‌های عمده‌ای در مورد بهبود سختی و پایداری جانبی تیرها و نیز تیورقها مطرح شد که از آن جمله، استفاده از سخت کننده‌های مایل یا دلتا در طرح تیورقهای فولادی بود [۱]. این سخت کننده‌ها با اتصال به بال فشاری و جان تیورقهای I شکل باعث پایدار نمودن اجزاء تیورق در برابر بارهای وارده شده و در نتیجه از رخداد کمانش پیچشی جانبی در آنها جلوگیری می‌کنند [۲ و ۳]. مقطع پیشنهاد شده به لحاظ هندسه استفاده شده مقطع دلتا نام گرفت [۱] شکل (۱). پس از آن تحقیقات معدودی به صورت آزمایشگاهی و نیز مدلسازی کامپیوتری روی این مقطع انجام گرفته که رفتار این مقطع را تحت بارگذاریهای مختلف مورد بررسی قرار داده اند [۴ و ۵]. آنچه که در بخشهای بعدی این مقاله ارائه خواهد شد، مطالعه تاثیر سخت کننده‌های دلتا بر افزایش لنگر بحرانی کمانش پیچشی جانبی تیورقهای فولادی است. برای مقاطع معمول I شکل یک حالت عمده ناپایداری ایجاد خیز جانبی ناگهانی همراه با پیچش محور مقطع تحت لنگر خمشی وارد بر دو انتهای تیر است. این ناپایداری به کمانش پیچشی جانبی موسوم بوده و علت آن کمانه کردن ناحیه فشاری مقطع با تاثیر از لنگر وارده به دو انتهاست که به خاطر وجود یکپارچگی در مقطع با پیچش کلی مقطع همراه می‌شود [۳ و ۷]. معادله دیفرانسیل حاکم بر مساله فوق را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$EC_w \frac{d^4 \phi}{dz^4} - GJ \frac{d^2 \phi}{dz^2} - \frac{M_0}{EI_y} \phi = 0 \quad (1)$$

حل این معادله لنگر بحرانی کمانش را به صورت رابطه (۲) به دست می‌دهد که مربوط به قلمرو ارتجاعی است:

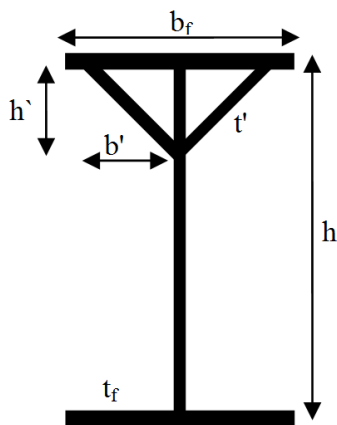
۱ استادیار گروه سازه

۲ کارشناسی ارشد سازه



$$M_{cr} = \sqrt{\frac{\pi^4 E^2 C_w I_y}{L^4} + \frac{\pi^2 E I_y G J}{L^2}} \quad (2)$$

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 دهنه بوده و نیز M_{cr} لنگر بحرانی کمانش مقطع است. همچنین ϕ زاویه پیچش مقطع و Z محور عمود بر مقطع تیر است.



شکل ۱- مقطع دلتا به همراه پارامترهای ابعادی آن

با دقت در رابطه (۲) در می‌یابیم که لنگر بحرانی کمانش پیچشی جانبی 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. البته در مقاطع با ارتفاع کم عامل اول و در مقاطع با ارتفاع زیاد عامل دوم نقش به‌سزایی خواهند داشت. لازم به ذکر است که آیین‌نامه‌ها معمولاً به جای استفاده از سهم مشارکتی هر کدام از این عوامل از مقدار بزرگتر آنها استفاده می‌نمایند که قدری محافظه‌کارانه به نظر می‌رسد [۷]. بر مبنای تحقیقات انجام شده محققان [۲ و ۶] می‌توان دریافت که افزودن سخت‌کننده‌های دلتا با تاثیر در هر دو عامل بالا می‌تواند مقاومت مقطع معمول I شکل را در کمانش پیچشی جانبی به شکل قابل توجهی افزایش دهد.

تعریف مساله

مطابق بخش قبل به کارگیری سخت‌کننده‌های دلتا مقاومت مقطع معمول تیرها و تیرورق‌ها را در برابر بروز ناپایداری از نوع کمانش پیچشی جانبی افزایش می‌دهند. این پژوهش به منظور دستیابی به مقادیری از ضخامت سخت‌کننده‌های دلتا و نیز ارتفاع اتصال آنها به جان که در آن مقطع دلتا بیشترین لنگر بحرانی را به دست می‌دهد، انجام شده است. متغیرهای مساله عبارتند از نسبت ضخامت سخت‌کننده به ضخامت جان یا t'/t که پارامتر ضخامت نامیده شده و فاصله اتصال سخت‌کننده به جان تا بال فوقانی مقطع یا h'/h که پارامتر ارتفاع انتخاب شده است شکل (۱). پاسخ مورد نظر برای مساله نیز لنگر بحرانی کمانش پیچشی جانبی مقطع در نظر گرفته شده است.

بررسی دقت تحلیل کمانشی نرم‌افزار

دقت تحلیل کمانشی نرم‌افزار با تحلیل مدل مقطع I شکل و مقایسه جواب آن با حل معادله دیفرانسیل تغییر شکل تیر مطابق رابطه (۲) انجام شده است. گزینه تحلیل کمانشی مقادیر ویژه برای تحلیل مدل انتخاب شده و از مشخصات مکانیکی فولاد St37 برای مصالح معرفی شده استفاده شده است. مشخصات مقطع استفاده شده و نیز مقاطع تحلیل شده دلتا در جدول (۱) آمده است.

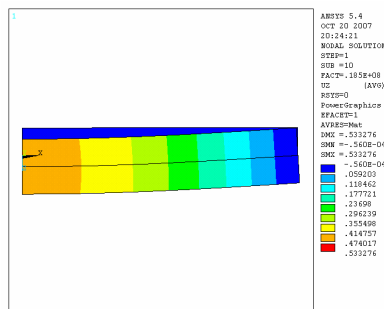
جدول ۱- مشخصات هندسی مقطع مدلسازی شده در نرم‌افزار (واحد متر)

نام مقطع	h	h'	B _f	b'	t	t _f	t'	t'/t	h'/h	L
A1	۱/۰	—	۰/۴	—	۰/۰۱	۰/۰۳	—	—	—	۲/۰

لنگر بحرانی از رابطه (۲) برابر $19/909 \text{ MN.m}$ به دست می‌آید. لنگر بحرانی به دست آمده از تحلیل عددی برابر $18/503 \text{ MN.m}$ است که خطای حدود ۷ درصد را نشان می‌دهد و با توجه به خطای موجود در محاسبات مدل عددی، قابل قبول بوده و می‌توان به نتایج تحلیل برنامه اعتماد نمود. نمای



کمانش یافته مقطع در شکل (۲) آمده است. البته میزان خطا در تحلیل مقاطع کم ارتفاع کمتر از این میزان است که برای نمونه تحلیل مدل عددی ساخته شده از IPE40 در نرم افزار میزان خطای ۳ درصد را نسبت به حل نظری نشان می‌دهد. همان استفاده شده، نیز نحوه مدلسازی و روند تحلیل در اینجا مشابه مدل‌های اصلی بوده بنابراین تشریح این مطلب در بخش بعد ارائه شده است.



شکل ۲- نمای کمانش یافته مقطع I شکل

معرفی مدل عددی و نحوه تحلیل

به منظور مدلسازی مسئله در نرم‌افزار از المان Shell93 استفاده شده است. ویژگی‌های مکانیکی فولاد نیز منطبق بر مشخصات فولاد St37 در نظر گرفته شده است. نوع رفتار ماده نیز ایزوتروپیک ارتجاعی تعریف شده است. در مدلسازی هندسه مسئله با توجه به اینکه در این تحقیق سعی در مقایسه متغیرهای مورد بررسی با نتایج تحقیقات قبلی بوده، بنابراین با ابعادی منطبق بر ابعاد مدلی که در مراجع [۱] آمده، مدلسازی انجام شده است. سطوح مورد نظر برای متغیرهای مساله نیز در محدوده‌ای انتخاب شده که قابل مقایسه با مقادیر پیشنهادی در مقالات و تحقیقات انجام شده دیگر محققان باشد و مطابق جدول (۲) است.

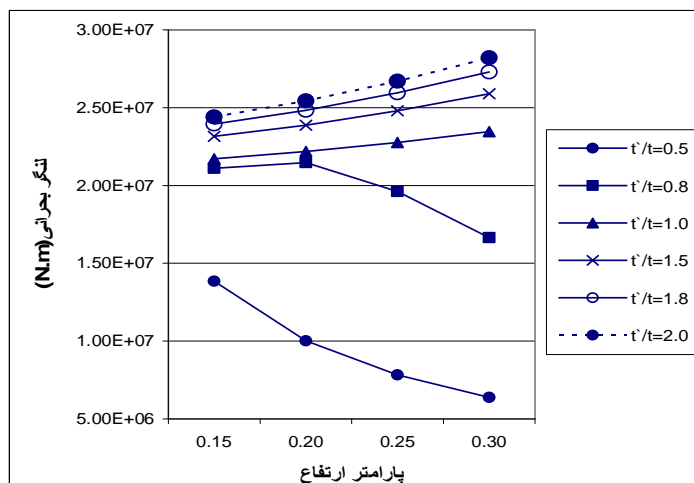
جدول ۲- سطوح انتخابی برای متغیرهای مساله

متغیر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴	سطح ۵	سطح ۶
h/h	۰/۱۵	۰/۲۰	۰/۲۵	۰/۳۰	--	--
t/t	۰/۵	۰/۸	۰/۱	۱/۵	۱/۸	۲/۰

همچنین برای مدلسازی بهتر و سرعت انجام تحلیل از شرایط مرزی موجود در نرم افزار برای ایجاد تقارن و در نتیجه مدلسازی نصف طول تیر استفاده شده است. نوع تحلیل نیز کمانشی مقادیر ویژه انتخاب شده و استخراج مدهای کمانشی مدل با بهره گیری از نوع حل SubSpace توسط برنامه انجام می‌گیرد. مش‌بندی مدل نیز دستی و به گونه‌ای انجام گرفته که دقت حل در حد مطلوب بوده و از طرفی حجم و زمان عملیات تحلیل مشکل ساز نباشد. از آنجایی که در تحلیل کمانشی با تغییر شکلهای زیاد روبرو هستیم، بایستی از مناسب بودن اشکال المانها جهت جلوگیری از اعوجاج آنها و در نتیجه پایین آمدن دقت و یا واگرایی حل، اطمینان حاصل کنیم که این کار توسط نرم افزار انجام و در صورت رخداد با بروز پیام هشدار مشخص می‌شود و نهایتاً اینکه المان Shell93 با داشتن گره‌های میانی می‌تواند تغییر شکلهای کمانش ارتجاعی را به نحو مناسبی نشان دهد.

نتایج تحلیل و بررسی آنها

در این بخش نتایج تحلیل عددی مساله به صورت لنگر بحرانی کمانش پیچشی جانبی ارائه شده و تاثیر پارامترهای مساله بر آن مورد بررسی قرار گرفته است. الگوی کمانش ایجاد شده معمول مدلهای در شکل (۳) ارائه شده است. البته بایستی عنوان نمود که در برخی از حالات که پارامتر ضخامت مقادیر کمی را اختیار می‌کند، تحت لنگر وارده خود سخت کننده‌ها دچار کمانش شده و لنگر بحرانی مدل کمتر از مقطع بدون سخت کننده به دست می‌آید.

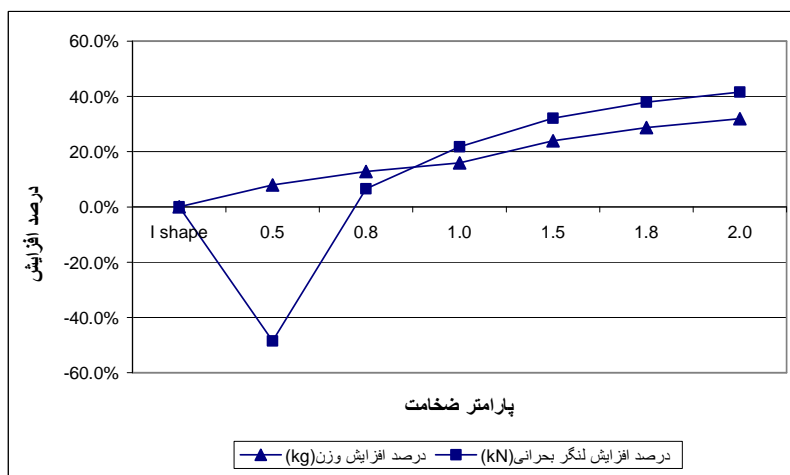


شکل ۵ - تأثیر پارامتر ارتفاع بر لنگر بحرانی

بطور کلی افزایش پارامتر ارتفاع برای نسبت ضخامت بیشتر از ۱/۰ لنگر بحرانی مدل را افزایش می‌دهد و با بالاتر رفتن مقدار پارامتر ضخامت این روند در تقابل با پارامتر ارتفاع افزایش می‌یابد و با توجه به اینکه تأثیر مقادیر بالای پارامتر ارتفاع در نسبت‌های ضخامت بالا نقش مثبت در افزایش ظرفیت کمانشی مدل دارد، مقادیر ۰/۲ تا ۰/۲۵ برای این پارامتر مناسب می‌نماید.

بررسی افزایش وزن و افزایش لنگر بحرانی

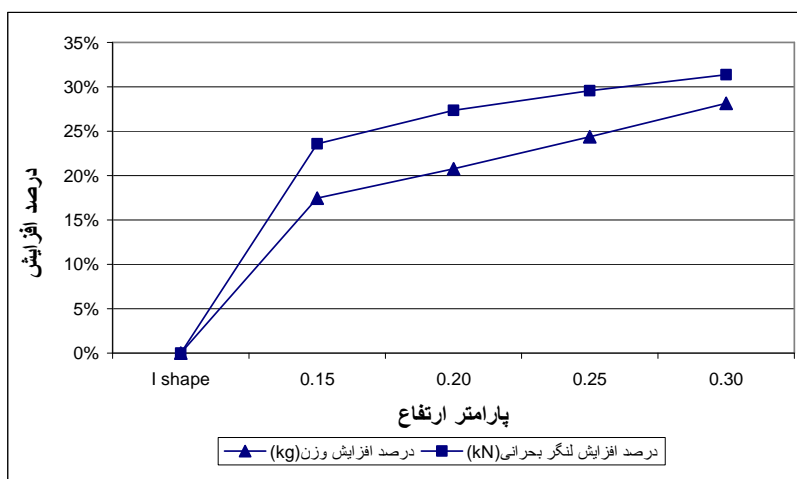
با اضافه نمودن سخت کننده‌های دلتا اگرچه میزان سختی جانبی و مقاومت پیچشی ناحیه فشاری شاهتیرها افزایش می‌یابد ولی وزن مقطع نیز بالا خواهد رفت که میزان آن به دو پارامتر ضخامت و ارتفاع بستگی دارد. در شکل (۶) درصد افزایش وزن مقطع دلتا با لنگر بحرانی متناظر مقایسه شده تا بتوان بر مبنای نرخ افزایش این دو کمیت مقادیر بهینه پارامترهای مساله را تعیین نمود.



شکل ۶ - مقایسه درصد افزایش وزن و لنگر بحرانی بر مبنای پارامتر ضخامت

همانطور که از نمودار ارائه شده در شکل (۶) پیداست بدون لحاظ نمودن نسبت‌های کم ضخامت با افزایش پارامتر ضخامت وزن مقطع نسبت به حالت بدون سخت کننده یا همان مقطع I شکل افزایش می‌یابد و همراه با آن لنگر بحرانی کمانش پیچشی جانبی مدل نیز افزایش دارد. با دقت در شکل می‌توان دریافت که نرخ افزایش در لنگر بحرانی از مقدار نسبت ارتفاع ۱/۰ به بالا نسبت به درصد افزایش وزن مدل بیشتر است و بنابراین نسبت‌های در حدود ۱/۵ تا ۲/۰ نتیجه بهتری به دست خواهند داد.

در صورتی که بخواهیم افزایش لنگر بحرانی مقطع دلتا را نسبت به مقطع معمول با در نظر گرفتن در عامل افزایش وزن و نیز پارامتر ارتفاع بررسی کنیم، مطابق شکل (۷) با افزایش پارامتر ارتفاع تغییر وزن نمونه‌ها نرخ افزایشی داشته ولی برای لنگر بحرانی نرخ افزایش بعد از مقدار ۰/۲۵ قابل توجه نیست. بنابر مطالبی که ذکر شد با در نظر گرفتن عامل وزن مقدار مناسب پارامتر ضخامت ۰/۲ تا ۰/۲۵ باید اختیار شود.



شکل ۷ - مقایسه درصد افزایش وزن و لنگر بحرانی بر مبنای پارامتر ارتفاع

نتیجه گیری

- از نتایجی که در قسمت قبل ارائه شد می توان نکات زیر را به عنوان جمع بندی ارائه نمود.
- ۱- سخت کننده های دلتا به نحو مطلوبی ظرفیت مقاطع I شکل را در برابر کماتش پیچشی جانبی افزایش که میزان آن برای مقادیر بهینه پارامترهای ارتفاع و ضخامت در حدود ۲۵٪ تا ۴۰٪ است.
 - ۲- برای به دست آوردن بیشترین ظرفیت مقطع دلتا در کماتش پیچشی جانبی مقدار مطلوب پارامتر ضخامت در حدود ۱/۵ تا ۲/۰ پیشنهاد می شود.
 - ۳- استفاده از مقادیر پارامتر ارتفاع در محدوده ۰/۲ تا ۰/۲۵ تاثیر بیشتری را در افزایش لنگر بحرانی مقطع دلتا با توجه به وزن مقطع نشان می دهد.
 - ۴- بکار بردن سخت کننده های دلتا با ضخامتی کمتر از ضخامت جان نقش منفی در افزایش لنگر بحرانی کماتش پیچشی جانبی داشته و برای پارامتر ضخامت مقدار حداقل ۱/۰ پیشنهاد می شود.
 - ۵- با توجه به نتایج تحقیقات انجام شده در مورد تیرورقهای دلتا [۶ و ۴ و ۲] مقادیر پیشنهادی در این مقاله برای پارامترهای ضخامت و ارتفاع علاوه بر افزایش مطلوب لنگر بحرانی کماتش پیچشی جانبی مقطعی مناسب در برابر بارهای خمشی و پیچشی را به دست می دهد.

مراجع

1. HOMER M. HADLEY, Consulting Engineer, Seattle, "The Bridge Delta Girder Single-Webbed and Double-Webbed", AISC National Engineering Conference, Omaha, Nebr in May 1964.
2. HOMER M. HADLEY, Consulting Engineer, "Exploratory tests on a steel delta girder", Civil Engineering Magazine, May 1961
3. N.S. Trahair, "Flexural-Torsional Buckling of Structures", E & FN SPON, Sydney, 1993
۴. کاهه، محسن، "تخمین بار بحرانی تیرورق های فولادی با سخت کننده دلتا به روش اجزاء محدود"، پایان نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۸۳
۵. عربزاده، ابوالفضل، کاهه، محسن، رفتار کماتشی یک پانل سخت شده با سخت کننده دلتا تحت اثر بار خمشی، دومین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، اردیبهشت ۱۳۸۴
۶. عربزاده، ابوالفضل، ورمزیاری، محسن، "ارزیابی مقاومت پیچشی تیرورقهای با سخت کننده دلتا"، سومین کنگره ملی مهندسی عمران، اردیبهشت ماه ۱۳۸۶
۷. طاحونی، شاپور، "طراحی سازه های فلزی"، انتشارات علم و ادب، ۱۳۸۱