



بررسی مقاومت خمشی تیر ورق دلتا بدون سخت کننده و با سخت کننده طولی

مهردادخلقی فرد^{۱*}، حسن ارجمند^۲

۱- گروه عمران، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران

* kholghifard.m@gmail.com

ارسال: اردیبهشت ماه ۹۹ پذیرش: خرداد ماه ۹۹

چکیده

مقطع بهینه در تیر ورق دلتا مقطعی می باشد که محل اتصال سخت کننده ها بر روی جان باید بیست درصد ارتفاع جان از بال فشاری فاصله داشته باشد. رفتار این تیر ورق ها بستگی به پاسخ عناصر ورقی دارد که در معرض بارگذاری غالب درون صفحه ای قرار گرفته اند. در این مطالعه به بررسی و مقایسه مقاومت کمانش مقطع بهینه تیر ورق دلتا با تیر ورق بدون سخت کننده و با سخت کننده پرداخته می شود. با مدلسازی تیر ورق دلتا، تیر ورق بدون سخت کننده و تیر ورق با سخت کننده طولی در نرم افزار اجزاء محدود ANSYS، خمش کمانشی در حالات مختلف بدست می آید. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که استفاده از سخت کننده دلتا، افزایش نسبتاً بالایی در مقاومت کمانشی مقطع، هنگامی که تحت اثر خمش خالص قرار دارد نسبت به مقطع بدون سخت کننده و همچنین مقطع تقویت شده با سخت کننده طولی ایجاد می کند. مقایسه حالت بهینه سخت کننده دلتا با مقطع بدون سخت کننده نشان می دهد که با استفاده از سخت کننده دلتا می توان به مقاومتی در حدود ۲۵٪ برابر بیشتر از حالتی که فقط ضخامت جان در مقطع افزایش می یابد دست یافت.

کلمات کلیدی: مقاومت خمشی، تیر ورق، سخت کننده دلتا

۱- مقدمه

از دیدگاه ریاضی، تفاوت اصلی بین ستون و صفحه این است که کمیت هایی نظیر تغییر شکل جانبی و لنگر خمشی که در ستون تابع یک متغیر مستقل هستند، ولی در صفحات تابعی از دو متغیر مستقل می باشند. در نتیجه، رفتار یک صفحه بوسیله معادلات دیفرانسیل جزئی مشخص می شود، در صورتی که برای بررسی رفتار ستون ها معادلات دیفرانسیل معمولی کافی هستند. یک تفاوت بارز نیز بین ستون و صفحه با مقایسه کمانش این دو آشکار خواهد شد و آن اینکه برخلاف ستون های تحت فشار، ورق ها یک تعادل پایدار، همراه با یک مقدار قابل توجه مقاومت پس کمانشی از خود نشان می دهند. تیر ورق ها معمولاً از دو ورق بال و یک ورق جان تشکیل می شوند که به منظورهای خاص، سخت کننده هایی به صورت عرضی و یا طولی در جان آنها تعبیه می شود. از آنجائیکه در تیر ورق با سطوح بزرگی از ورق با ضخامت کم روبرو هستیم، بزرگترین مسئله ای که در طراحی با آن

مواجه می‌شویم، ناپایداری ارتجاعی (کمانش) این ورق‌ها می‌باشد. هنگامی که یک ورق در معرض تنش‌های فشاری، برشی و یا ترکیبی از آن‌ها قرار می‌گیرد، بار بحرانی تئوریک را می‌توان برای آن محاسبه نمود.

نوع فولاد بال و جان تیورورق در اغلب موارد یکی است ولی گاهی مواقع برای افزایش اقتصاد طرح، بال تیورورق را از فولاد قویتر انتخاب می‌کنند. در این حالت به تیورورق به دست آمده، تیورورق دوگانه می‌گویند. یک نوع دیگر از تیورورق‌ها نیز وجود دارد که به منظور افزایش مقاومت پیچشی بال آن از دو ورق مایل استفاده می‌کنند. عبارت دیگر سخت کننده طولی، به صورت مورب از روی جان به بال وصل شده است که به این نوع تیورورق، تیورورق دلتا می‌گویند [۱]. تیورورق‌های تقویت شده توسط سخت کننده‌های طولی غالباً در پل‌ها و به جهت مقابله با نیروهای خمشی بسیار زیاد در آن‌ها استفاده می‌شوند.

مطالعات اولیه در این رابطه در حدود سالهای ۱۹۶۶ توسط ین و مولر [۲] با آزمایش خستگی بر روی تیورورق‌های چندین پانله بزرگ مقایسه انجام شد [۳]. نتایج آزمایش‌ها به مقدار زیادی اثرات سهم تنش‌های خمشی ثانویه را که بوسیله بریسینگ ورق، اعمال شده و بر روی خستگی مرزهای جوش شده جان اعمال گشته را نمایان کرد. ماندا و اوکورا [۴] در سال ۱۹۸۵ مطالعات تئوری تنش‌های خمشی ثانویه را در مرزهای جوش شده جان با استفاده از تجزیه و تحلیل ورق به وسیله المان محدود غیرخطی به مورد اجرا گذاشتند تا نتایج را در رابطه با مقاومت خستگی جوش‌های گوشه، برای بدست آوردن معیار طراحی مقاومت خستگی برای تیورورق‌های با ابعاد عملی استفاده کنند. مطالعات اوکورا توجه سایرین را به این مسئله جلب کرد که پیشنهادی را در مورد یک حد برای عمل بار بر روی جان ارائه دهند، همچنین آن‌ها این مسئله را با صراحت و برجستگی اعلام کردند که بایستی تحقیقات آزمایشگاهی بسیار بیشتری در مورد نحوه عمل خستگی جان‌های لاغر خصوصاً هنگامی که در معرض بارگذاری برشی و بیش از دو میلیون سیکل قرار دارند، انجام شود. امروزه استفاده از تیورورق‌ها در انواع مختلف سازه‌های ساختمانی گستره وسیعی را به خود اختصاص داده است. یکی از انواع این تیورورق‌ها، تیورورق‌های با سخت کننده دلتا می‌باشد؛ که تحقیقات صورت گرفته حاکی از عملکرد بهتر این نوع تیورورق در ظرفیت‌های خمشی و برشی نسبت به سایر تیورورق‌های معمولی با مقاطع معادل است (شیری).

در این تحقیق میزان بار کمانشی ناشی از خمش تیورورق تقویت شده با سخت کننده دلتا و بدون سخت کننده با استفاده از روش اجزاء محدود مورد مطالعه قرار گرفته است. با شبیه سازی تیر ورق دلتا، تیر ورق بدون سخت کننده و تیر ورق با سخت کننده طولی در نرم افزار اجزاء محدود ANSYS، خمش کمانشی در حالات مختلف بدست آمده و این نتایج با هم مقایسه می‌شوند [۳،۵]. مقطع دلتای تحت اثر خمش خالص در حالت بهینه، محل اتصال سخت کننده‌ها بر روی جان باید بیست درصد ارتفاع جان از بال فشاری فاصله دارد [۶-۷].

۲- مواد و روش تحقیق

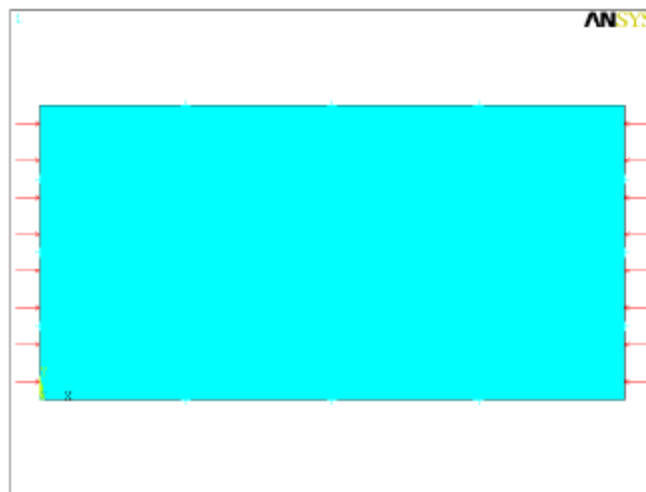
نرم افزار ANSYS یک نرم‌افزار مهندسی و از دسته ابزارهای تحلیلی است که از روش اجزاء محدود (FEM) برای مدل‌سازی و تحلیل در آن استفاده می‌شود. ابزارهای پیش بینی شده در انسیس امکان تحلیل انواع مختلف سازه‌ها مانند قاب، مخزن، سد، پل ... و اجزای سازه‌ای مانند اتصالات فولادی، اعضای فولادی یا بتنی، ایزولاتورها، ... را به روش‌های مختلف فراهم ساخته است. از آن جمله می‌توان به تحلیل‌های استاتیکی، بارگذاری رفت و برگشتی، مودال، تاریخچه زمانی، طیفی و ... اشاره کرد. برای شبیه‌سازی شرایط مختلف تکیه گاهی گزینه‌های متعددی به صورت شتاب، جابجایی، نیرو و یا لنگر با الگوهای مختلف در دسترس هستند که به طور ثابت یا متغیر با زمان قابل استفاده‌اند. همچنین مدل‌های رفتاری مختلفی از مصالح شکل پذیر و ترد مانند مدل‌های دو و چند خطی فولاد، مدل دراگر- پراگر و مدل شکست بتن در آن پیش بینی شده است که در حوزه رفتار غیر خطی بکار می‌روند.

برای بررسی کمانش یک ورق در نرم افزار ANSYS با توجه به مشخصات و نیز توصیه‌هایی که در مراجع آمده است از المان shell93 که قابلیت کمانه شدن و تغییر شکل‌های بزرگ را دارد استفاده شده است [۸]. این المان برای مدل‌های زیر به کار می‌رود:

- سازه‌های صفحه‌ای و پوسته‌ای سه بعدی
- سازه‌های غشایی دو و سه بعدی
- سیستم‌های سازه‌ای خمش صفحه‌ای دو و سه بعدی

فرمول بندی این المان چهار گرهی، ترکیبی از رفتار غشایی و خمشی را در بردارد. غشاء یک فرمول بندی ایزو پارامتریک حاوی مولفه‌های سختی انتقالی در صفحه و مولفه‌های سختی دورانی در جهت عمود بر صفحه المان دارد. المان خمش صفحه‌ای، حاوی مولفه‌های سختی دورانی در جهت عمود بر صفحه المان مزبور می‌باشد. در رفتار المان خمش صفحه‌ای هیچ گونه اثرات ناشی از تغییر شکل‌های برشی مدنظر قرار نگرفته است. بارگذاری بر روی این المان به صورت بار فشار عمودی، بار گرانشی و حرارتی مقدور می‌باشد. المان shell نتایج خود را به صورت نیروهای عمود صفحه‌ای و نیروهای غشایی برشی در واحد طول و گشتاورهای خمشی خارج از صفحه در واحد طول ارائه می‌دهد.

ورق نشان داده شده در شکل (۱) دارای ۲۰ سانتی متر طول و ۱۰ سانتی متر عرض و ۱ میلی‌متر ضخامت می‌باشد. فولاد مورد استفاده نیز دارای خاصیت $E=210 \text{ GPa}$ و $\nu=0.3$ می‌باشد. بر اساس تئوری کمانش صفحات و پوسته‌ها بار کمانشی برابر با 75.9 KN/m می‌باشد.



شکل ۱- نمایی از ابعاد ورق مورد تحلیل

تحلیل کمانشی در ANSYS دارای ۴ گام می‌باشد:

۱- ساخت مدل

۲- به دست آوردن پاسخ استاتیکی

۳- به دست آوردن تحلیل کمانشی

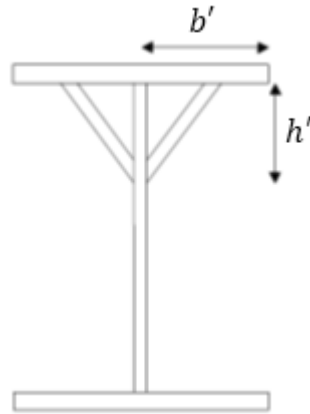
۴- بررسی نتایج

انتخاب نوع المان از نرم افزار المان Elastic 8node 93 انتخاب می‌گردد. مقدار 0.001 (۱ میلی‌متر) برای ضخامت ورق در نظر گرفته می‌شود و مقدار ضریب الاستیسیته برابر با 210×10^9 (210 GPa) و مقدار ضریب پواسون برابر با 0.3 مقدار دهی شده است. از طریق منوی mesh tools طول و عرض مستطیل به ترتیب به ۱۶ و ۸ قسمت تقسیم شده است. در اولین گام تحلیل

استاتیکی بر روی مدل انجام می شود. پاسخ های به دست آمده به عنوان شرایط اولیه تحلیل کمانشی مورد استفاده می باشد. تحلیل کمانشی با تعیین ۲ مود برای تحلیل کمانشی و انتخاب این نوع آنالیز تحلیل پایان می پذیرد.

۳- نتایج و تحلیل

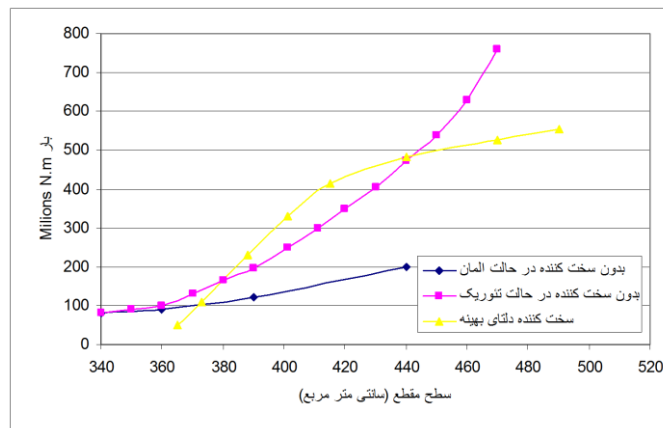
حالت اول: در این حالت مشخصات مقطع به شرح زیر می باشد (شکل ۲). ارتفاع ۱m ، نصف عرض بال $b' = 40cm$ ، ضخامت جان $h = 20cm$ ، ضخامت بال ۳ cm



شکل ۲- مقطع دلتا

الف) شبیه سازی تیر ورق ها و مقایسه تیر ورق دلتا حالت بهینه با مقطع بدون سخت کننده: چنانچه در شکل (۳) نیز دیده می شود منحنی مربوط به رشد بار با افزایش سطح مقطع در جاییکه فقط ضخامت جان افزایش یافته، در حالت تئوریک تابعی از درجه ۳ بوده و بنابراین در ضخامت های بالا، مقاومت قابل توجهی از خود نشان می دهد، اما اینکه این مقادیر در عمل نیز چنین باشند جای تردید است، چرا که با افزایش ضخامت ورق جان، بال ها دیگر توان نگهداری لبه های ورق را نداشته و به همین خاطر ورق جان آزادانه تر به کمانش افتاده و مقاومت در برابر کمانش در آن از مقادیر تئوریک کمتر خواهد شد. جهت بررسی بیشتر این مسئله مقطع بدون سخت کننده را با ضخامت های مختلف در نرم افزار ANSYS مدل سازی نموده و بار کمانشی برای هر حالت بدست می آید که در شکل (۳) هم آورده شده است.

برای رسیدن به مقاومت های بالا می توان از طرق دیگری همچون افزایش ضخامت ورق های بال و یا ترکیبی از افزایش ضخامت بال و جان نیز دست یافت، ولی قدر مسلم بهترین حالت زمانی رخ خواهد داد که برای رسیدن به مقاومت های بالا تمام پارامترها همزمان در نظر گرفته شده و برای دستیابی به آن تمامی فاکتورهای موثر را لحاظ نمود، ولی به طور کلی افزودن سخت کننده دلتا در یک وضعیت معمول با توجه به آنچه که در این قسمت بیان شد، می تواند در افزایش بار کمانشی بسیار مؤثر باشد.

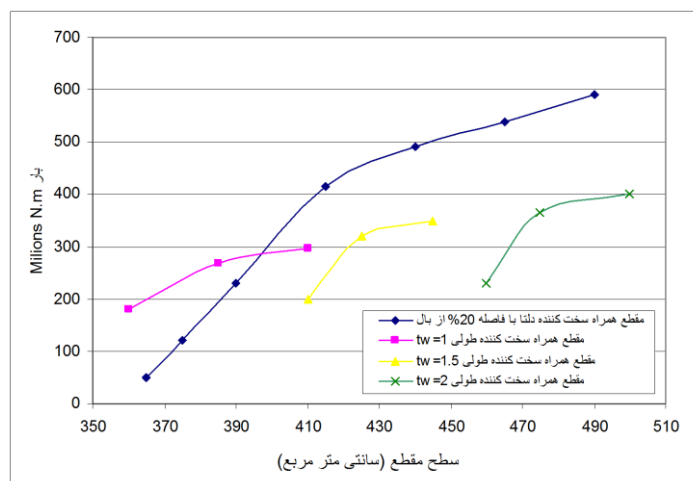


شکل ۳- مقایسه حالت بهینه دلتا با مقطع بدون سخت کننده و حالت تئوریک

ب) مقایسه سخت کننده دلتا با سخت کننده طولی

برای انجام این مقایسه بهترین حالت از میان وضعیتهای مختلف سخت کننده دلتا که بر روی آن‌ها تحلیل انجام شده را انتخاب کرده و سپس سخت کننده طولی را مطابق با آنچه در آیین نامه AASHTO آمده است طراحی و مقطع را در نرم افزار مدل سازی و تحلیل نمودیم که نتایج به طور مفصل در ابتدای فصل آورده شده است. چنانچه این مقدار را بر روی نمودار و در کنار منحنی مربوط به سخت کننده طولی قرار دهیم، می بینیم که مقاومت مقطع با سخت کننده دلتا از مقاومت مقطع با سخت کننده طولی در شرایط هم وزنی مقاطع بالاتر است، به عبارت دیگر با استفاده از مقدار معینی از مصالح، با بهره جویی از سخت کننده دلتا به مقاومت بهتری نسبت به حالتی که از سخت کننده طولی استفاده می کنیم، دست خواهیم یافت.

برای بررسی بیشتر این مسئله با تغییراتی در ضخامت جان و سخت کننده طولی، نمودارهایی ترسیم شده که در شکل (۴) نشان داده شده است.

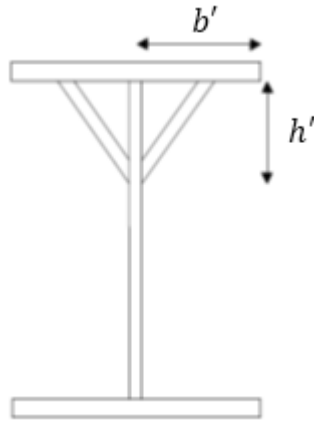


شکل ۴- مقایسه سخت کننده دلتا با سخت کننده طولی

در نمودارهای مربوط به مقاطع همراه سخت کننده طولی، افزایش سطح مقطع، به دلیل افزایش ضخامت سخت کننده آن می باشد. در این نمودارها، افزایش ضخامت سخت کننده تا نقطه شکستگی نمودار باعث رشد خوبی در میزان مقاومت کمانشی مقطع می گردد ولی از آنجا به بعد نرخ رشد بسیار کم و ثابت شده است و افزایش بیشتر ضخامت سخت کننده را توجیه نمی کند. چنانچه در شکل (۴) دیده می شود، اگر فقط ضخامت جان را افزایش دهیم بدلیل ضعیف ماندن خود سخت کننده، افزایش چندانی در مقاومت خود مقطع حاصل نخواهد شد، چرا که سخت کننده قبل از اینکه مقطع به حد تحمل خود برسد کمانش کرده و از پایداری خارج می شود. در اینجا می بایستی به بررسی این مسئله پرداخت که آیا می توان از کمانش سخت کننده صرف نظر کرده و به صرف اینکه ورق سخت کننده پس از کمانش وارد مرحله پس کمانشی شده و بنابراین پایداری آن به طور کامل از بین نرفته و از طرفی هم جان و بال مقطع مقادیر بیشتری از این نیرو را بی آنکه کمانشی در آن‌ها رخ دهد می توانند تحمل کنند، کمانش سخت کننده را نادیده گرفت؟ در پاسخ چنین می توان گفت که اصولاً بدلیل استفاده از سخت کننده‌های طولی در تیرورق‌های مورد استفاده در پل‌ها و وجود بارهای متحرک و بارگذاری‌های تناوبی در آن‌ها چنانچه در فصل سوم نیز به آن اشاره شد، جان تیرورق‌ها در معرض بریسینگ قرار گرفته و کمانش حتی قسمتی از مقطع، این مسئله را تشدید کرده و به شکست سازه بعد از مدتی تناوب در بارگذاری خواهد انجامید. پس لزوماً استفاده از یک سخت کننده ضعیف نمی تواند بهبودی در مقاومت مقطعی که تحت اثر بارگذاری تناوبی قرار دارد، ایجاد کند.

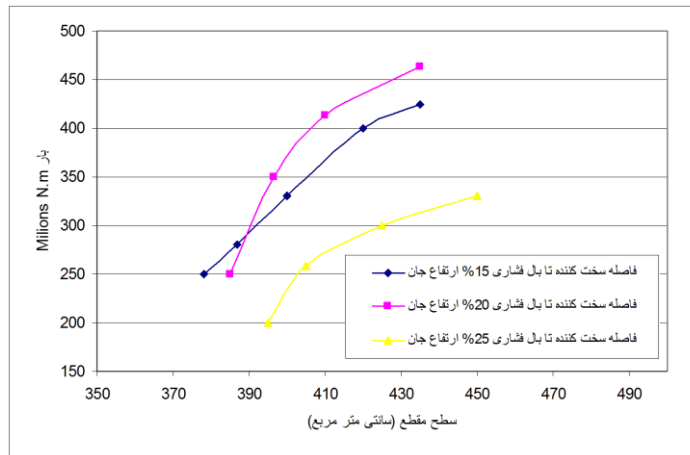
حالت دوم: مقاطع بعدی که برای بررسی بیشتر وضعیت بهینه سخت کننده دلتا در نظر گرفته شده‌اند به همراه مشخصاتشان در زیر آمده‌اند (شکل ۵).

ارتفاع ۱ m ، نصف عرض بال $b' = 40\text{cm}$ ، ضخامت جان ۱ cm ، ضخامت بال ۳ cm و h' نیز متغیر بوده و ۲۰، ۱۵ و ۲۵ سانتی متر می باشد.



شکل ۵- مقطع دلتا

چنانچه در شکل (۶) نیز مشاهده می شود هنگامی که موقعیت سخت کننده بر روی جان در فاصله یک پنجم از بال فشاری قرار دارد وضعیت بهتری نسبت به سایر حالت ها در برابر خمش از خود نشان می دهد.

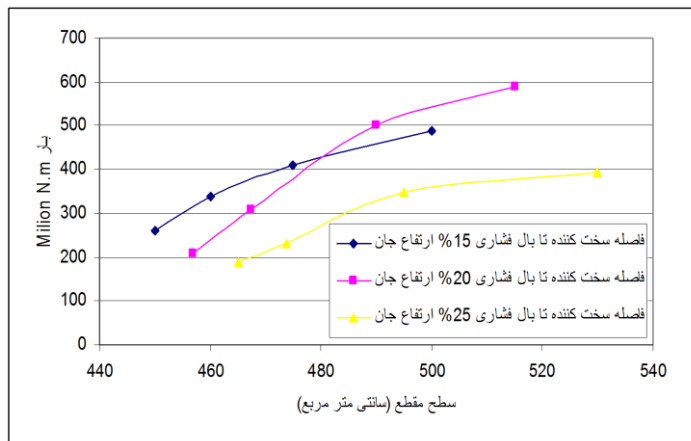


شکل ۶- مقایسه مقاومت مقاطع مختلف برحسب نسبت فاصله از بال فشاری به سطح مقطع

مقطع بعد دارای مشخصات زیر می باشد:

ارتفاع ۱ m ، نصف عرض بال $b' = 50\text{cm}$ ، ضخامت جان ۱ cm ، ضخامت بال ۳ cm و h' نیز متغیر بوده و ۱۵ cm ، ۲۰ cm ، ۲۵ cm می باشد.

در این حالت هم می توان گفت که فاصله بهینه بیست درصد ارتفاع جان می باشد ولیکن همانگونه که از شکل (۷) مشاهده می شود نمودار مربوط به فاصله ۱۵ سانتی متری (۱۵ درصدی) قسمت زیادی از ابتدای گراف را در وضعیت مطلوب تری قرار دارد و این بدان دلیل است که باز شدن سخت کننده دلتا و افزایش فاصله محل اتصال سخت کننده به بال تا مرکز بال سبب می گردد تا عرض سخت کننده افزایش یافته و در نتیجه افزایش فاصله سخت کننده تا بال های فشاری این امر را دو چندان نمایان کند.



شکل ۷- مقایسه مقاومت مقاطع مختلف برحسب نسبت فاصله از بال فشاری به سطح مقطع

۴- نتیجه گیری

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که استفاده از سخت کننده دلتا، افزایش نسبتاً بالایی در مقاومت کمانشی مقطع، هنگامی که تحت اثر خمش خالص قرار دارد نسبت به مقطع بدون سخت کننده و همچنین مقطع تقویت شده با سخت کننده طولی ایجاد می کند. همچنین مقایسه حالت بهینه سخت کننده دلتا با مقطع بدون سخت کننده نشان داد که با استفاده از سخت کننده دلتا می توان به مقاومتی در حدود ۲.۵ برابر بیشتر از حالتی که فقط ضخامت جان در مقطع افزایش می یابد دست یافت. استفاده از سخت کننده دلتا به جای سخت کننده طولی در حالتی که وزن هر دو مقطع یکسان باشد، می تواند مقاومت مقطع را تا حدود ۳۰٪ افزایش دهد.

۵- مراجع

1. Chai H. (2001). Contact buckling and postbuckling of thin rectangular plates, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 49(2), 209-230.
2. Yen, B.T. Mueller, J.A. (1966). Fatigue tests of large sized welded plate girders, Welding Research Council Bulletin, 118(118), 1-25.
3. Shahabian, F. and M. Roberts, T. (1999). Buckling of slender web plates subjected to combinations of in-plane loading, Journal of Constructional Steel Research, 51(2), 99-121.
4. Okura, I. and Maeda, Y. (1985). Analysis of deformation-induced fatigue of thin-walled plate girder in shear. Doboku Gakkai Ronbunshu, 362, 131-138.
5. Wang, C. Chen, M. Y. and Xiang, Y. (2004). Plastic buckling of rectangular plates subjected to intermediate and end inplane loads, International Journal of Solids and Structures, 41(16-17), 4279-4297.
6. Rhodes, J. (2003). Some observations on the post-buckling behaviour of thin plates and thin-walled members, Thin-Walled Structures, 41(2-3), 207-226.
7. Bakker, M.C.M. Rosmanit, M. and Hofmeyer, H. (2009). Prediction of the elasto-plastic post-buckling strength of uniformly compressed plates from the fictitious elastic strain at failure, Thin-Walled Structures, 47(1), 1-13.

۸. قوهستانی، س. و شیری، م. (۱۳۹۸). بررسی تأثیر موقعیت و وضعیت هندسی بازشو در مقاومت کمانشی تیرورق های سوراخدار با سخت کننده دلتا تحت تاثیر نیروی برشی، نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد، (۲۵)، ۳۵-۴۴.