مجله نخبگان علوم و مهندسی
Journal of Science and Engineering Elites
جلد ۵- شماره ۲- سال ۱۳۹۹
www.ElitesJournal.ir

Archive of SID

# 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 صفحه‌ای قرار گرفته‌اند. 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 سخت‌کننده دلتا، افزایش نسبتاً بالایی در مقاومت کمانشی مقطع، هنگامی که تحت اثر خمش خالص قرار دارد نسبت به مقطع بدون سخت‌کننده و همچنین مقطع تقویت‌شده با سخت‌کننده طولی ایجاد می‌کند. مقایسه حالت بهینه سخت کننده دلتا با مقطع بدون سخت کننده نشان می‌دهد که با استفاده از سخت کننده دلتا می‌توان به مقاومتی در حدود۲.۵ برابر بیشتر از حالتی که فقط ضخامت جان در مقطع افزایش می‌یابد دست یافت.

**کلمات کلیدی: مقاومت خمشی، تیر ورق، سخت‌کننده دلتا**

## ۱- مقدمه

از دیدگاه ریاضی، تفاوت اصلی بین ستون و صفحه این است که کمیت‌هایی نظیر تغییر شکل جانبی و لنگر خمشی که در ستون تابع یک متغییر مستقل هستند، ولی در صفحات تابعی از دو متغییر مستقل می‌باشند. در نتیجه، رفتار یک صفحه بوسیله معادلات دیفرانسیل جزئی مشخص می‌شود، در صورتی‌که برای بررسی رفتار ستون‌ها 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 ستون‌های تحت فشار، ورق‌ها یک تعادل پایدار، همراه با یک مقدار قابل توجه مقاومت پس کمانشی از خود نشان می‌دهند. تیر ورق‌ها معمولا از دو ورق بال و یک ورق جان تشکیل می‌شوند که به منظورهای خاص، سخت‌کننده‌هایی به صورت عرضی و یا طولی در جان آن‌ها تعبیه می‌شود. از آنجائیکه در تیرورق با سطوح بزرگی از ورق با ضخامت کم روبرو هستیم، بزرگترین مسئله‌ای که در طراحی با آن



www.SID.ir

Archive of SID

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 تئوریکی را می‌توان برای آن محاسبه نمود.

نوع فولاد بال و جان تیرورق در اغلب موارد یکی است ولی گاهی مواقع برای افزایش اقتصاد طرح، بال تیرورق را از فولاد قویتر انتخاب می‌کنند. در این حالت به تیرورق به دست آمده، تیرورق دوگانه می‌گویند. یک نوع دیگر از تیرورق‌ها نیز وجود دارد که به منظور افزایش مقاومت پیچشی بال آن از دو ورق مایل استفاده می‌کنند. بعبارت دیگرسخت کننده طولی، به صورت مورب از روی جان به بال وصل شده است که به این نوع تیرورق، تیرورق دلتا می گویند[۱]. تیرورق های تقویت شده توسط سخت کننده های طولی غالباً در پل ها و به جهت مقابله با نیروهای خمشی بسیار زیاد در آن ها استفاده می شوند.

مطالعات اولیه در این رابطه درحدود سالهای ۱۹۶۶ توسط ین و مولر[۲] با آزمایش خستگی بر روی تیرورق‌های چندین پانله بزرگ مقایس انجام شد[۳]. نتایج آزمایش ها 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. مائدا 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 تیرورق‌های 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 درمورد 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 تیرورق‌ها در انواع مختلف سازه‌های ساختمانی گستره وسیعی را به خود اختصاص داده است. یکی از انواع این تیرورق‌ها، تیرورق‌های با سخت‌کننده دلتا می‌باشد؛ که تحقیقات صورت گرفته حاکی از عملکرد بهتر این نوع تیرورق در ظرفیت‌های خمشی و برشی نسبت به سایر تیرورق‌های معمولی با مقاطع معادل است(شیری).

در این تحقیق میزان بار کمانشی ناشی از خمش تیرورق تقویت شده با سخت‌کننده 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 می شوند [۳،۵]. مقطع دلتای تحت اثر خمش خالص در حالت بهینه، محل اتصال سخت کننده ها 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.

www.SID.ir

Archive of SID

برای بررسی کمانش یک ورق در نرم‌افزار 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 مدل های زیر به کار می رود:

- سازه های صفحه ای و پوسته ای سه بعدی
- سازه های غشایی دو و سه بعدی
- سیستم های سازه ای خمش صفحه 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 مولفه های سختی انتقالی در صفحه و مولفه های سختی دورانی در جهت عمود بر صفحه المان دارد. المان خمش صفحه، حاوی مولفه های سختی دورانی در جهت عمود بر صفحه المان مزبور می باشد. در رفتار المان خمش صفحه هیچ گونه اثرات ناشی از تغییر شکل های 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 صفحه ای و نیروهای غشایی برشی در واحد طول و گشتاورهای خمشی خارج از صفحه در واحد طول ارائه می دهد.

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

**شکل ۱ – نمایی از ابعاد ورق مورد تحلیل**

تحلیل کمانشی در ANSYS دارای ۴ گام می باشد:

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 می گردد. مقدار ۰.۰۰۱ (۱ میلیمتر) برای ضخامت ورق در نظر گرفته می شود و مقدار ضریب الاستیسیته برابر با 210e9 (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

www.SID.ir

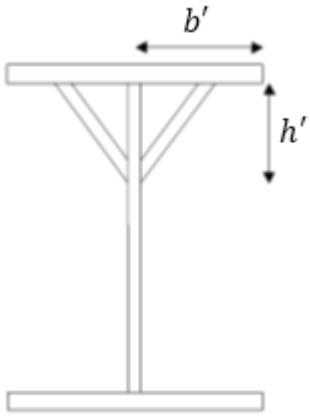
Archive of SID

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 می‌باشد (شکل ۲).

ارتفاع ۱m ، نصف عرض بال $b' = 40cm$ ، ضخامت جان $h = 20\ cm$ ۱ cm ، ضخامت بال ۳ cm

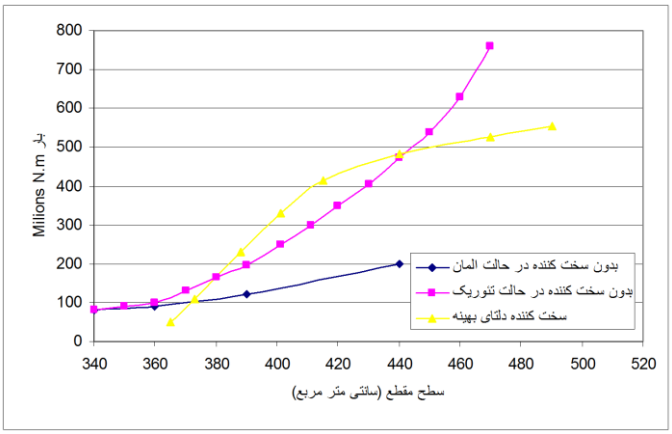



**شکل ۲ – مقطع دلتا**

الف) شبیه سازی تیر ورق ها و مقایسه تیر ورق دلتا حالت بهینه با مقطع بدون سخت‌کننده:

چنانچه در شکل(۳) نیز دیده می‌شود منحنی مربوط به رشد بار با افزایش سطح مقطع در جائیکه فقط ضخامت جان افزایش یافته، درحالت تئوریک تابعی از درجه۳ بوده و بنابراین در ضخامت‌های بالا، مقاومت قابل توجهی از خود نشان می‌دهد، اما اینکه این مقادیر در عمل نیز چنین باشند جای تردید است، چرا که با افزایش ضخامت ورق جان، بال‌ها دیگر توان نگهداری لبه‌های ورق را نداشته و به همین خاطر ورق جان آزادانه‌تر به کمانش افتاده و مقاومت در برابر کمانش در آن از مقادیر تئوریک کمتر خواهد شد. جهت بررسی بیشتر این مسئله مقطع بدون سخت‌کننده را با ضخامت‌های مختلف در نرم افزار ANSYS مدلسازی نموده و بار کمانشی برای هر حالت بدست می آید که در شکل(۳) هم آورده شده است.

برای رسیدن به مقاومت‌های بالا می‌توان از طرق دیگری همچون افزایش ضخامت ورق‌های 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 مقاومت‌های بالا تمام پارامترها همزمان درنظر گرفته شده و برای دستیابی به آن تمامی فاکتورهای موثر را لحاظ نمود، ولی به طور کلی افزودن سخت‌کننده دلتا در یک وضعیت معمول با توجه به آنچه که در این قسمت بیان شد، می‌تواند در افزایش بار کمانشی بسیار مؤثر باشد.




**شکل ۳ – مقایسه حالت بهینه دلتا با مقطع بدون سخت‌کننده و حالت تئوریک**

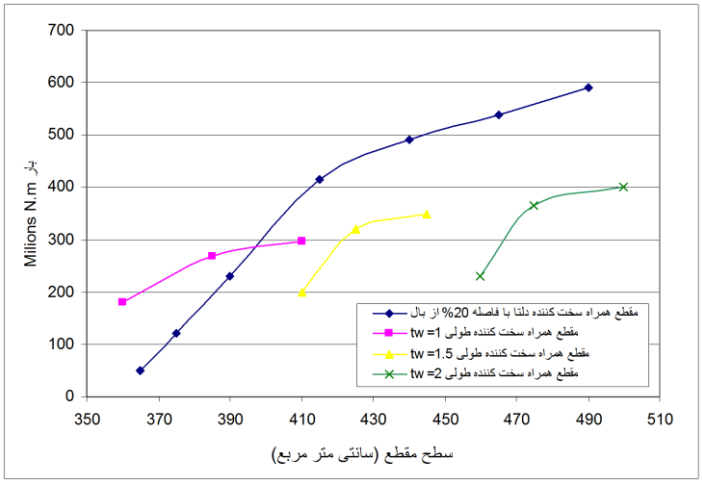
www.SID.ir

Archive of SID

ب) مقایسه سخت‌کننده دلتا با سخت‌کننده طولی

برای انجام این مقایسه بهترین حالت از میان وضعیتهای مختلف سخت‌کننده دلتا که بر روی آن‌ها تحلیل انجام شده را انتخاب کرده و سپس سخت‌کننده طولی را مطابق با آنچه در آیین‌نامه AASHTO آمده است طراحی و مقطع را در نرم افزار مدلسازی 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 سخت‌کننده طولی قرار دهیم، می‌بینیم که مقاومت مقطع با سخت کننده دلتا از مقاومت مقطع با سخت‌کننده طولی در شرایط هم‌وزنی مقاطع بالاتر است، به عبارت دیگر با استفاده از مقدار معینی از مصالح، با بهره جویی از سخت‌کننده دلتا به مقاومت بهتری نسبت به حالتی که از سخت‌کننده طولی استفاده می‌کنیم، دست خواهیم یافت.

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




**شکل ۴ – مقایسه سخت‌کننده دلتا با سخت‌کننده طولی**

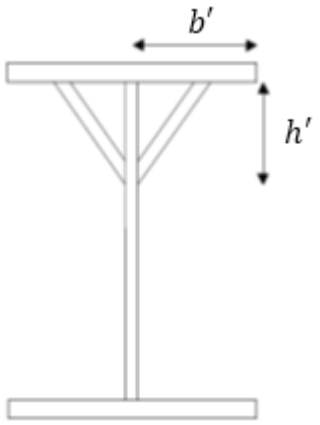
در نمودارهای مربوط به مقاطع همراه سخت‌کننده طولی، افزایش سطح مقطع، به دلیل افزایش ضخامت سخت‌کننده آن می‌باشد. در این نمودارها، افزایش ضخامت سخت‌کننده تا نقطه شکستگی نمودار باعث رشد خوبی در میزان مقاومت کمانشی مقطع می‌گردد ولی از آنجا به بعد نرخ رشد بسیار کم و ثابت شده است و افزایش بیشتر ضخامت سخت‌کننده را توجیه نمی‌کند. چنانچه در شکل(۴) دیده می‌شود، اگر فقط ضخامت جان را افزایش دهیم بدلیل ضعیف ماندن خود سخت‌کننده، افزایش چندانی در مقاومت خود مقطع حاصل نخواهد شد، چرا که سخت‌کننده قبل از اینکه مقطع به حد تحمل خود برسد کمانش کرده و از پایداری خارج می‌شود. دراینجا می‌بایستی به بررسی این مسئله پرداخت که آیا می‌توان از کمانش سخت‌کننده صرفنظر کرده و به صرف اینکه ورق سخت‌کننده 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 بی‌آنکه کمانشی در آن‌ها رخ دهد می‌توانند تحمل کنند، کمانش سخت‌کننده را نادیده گرفت؟ در پاسخ چنین می‌توان گفت که اصولا بدلیل استفاده از سخت‌کننده‌های 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 سخت‌کننده ضعیف نمی‌تواند بهبودی در مقاومت مقطعی که تحت اثر بارگذاری تناوبی قرار دارد، ایجاد کند.

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

www.SID.ir

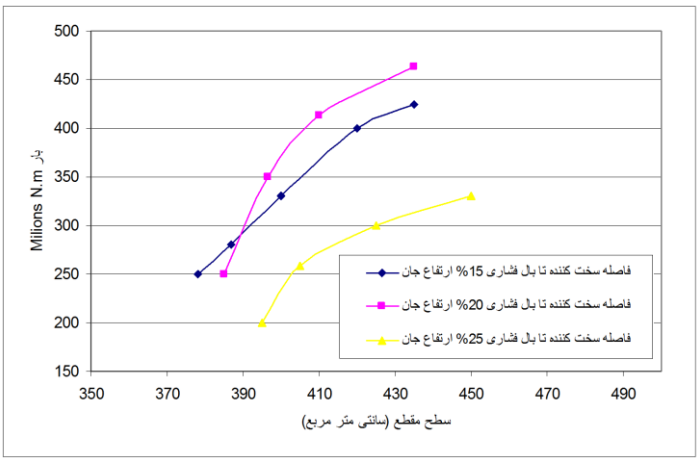
Archive of SID

ارتفاع ۱ m ، نصف عرض بال $b' = 40cm$ ، ضخامت جان ۱ cm ، ضخامت بال ۳ cm و $h'$ نیز متغیر بوده و ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر می‌باشد.




**شکل ۵ – مقطع دلتا**

چنانچه در شکل(۶) نیز مشاهده می‌شود هنگامی که موقعیت سخت‌کننده بر روی جان در فاصله یک پنجم از بال فشاری قرار دارد وضعیت بهتری نسبت به سایر حالت‌ها در برابر خمش از خود نشان می‌دهد.




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

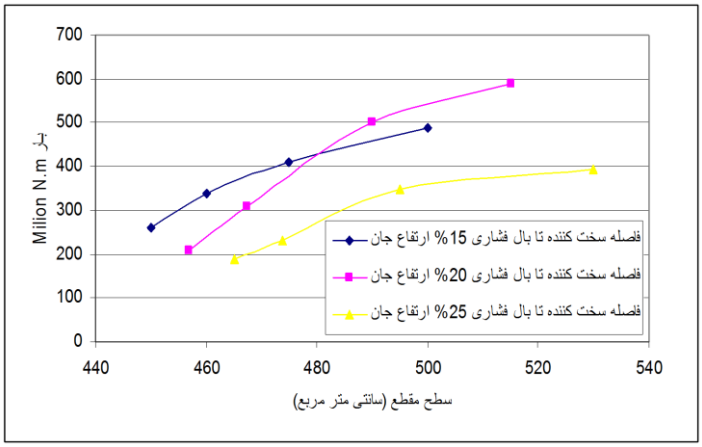
مقطع بعد دارای مشخصات زیر می‌باشد:

ارتفاع ۱ m ، نصف عرض بال $b' = 50cm$ ، ضخامت جان ۱ cm ، ضخامت بال ۳ cm و $h'$ نیز متغیر بوده و ۱۵ cm ، ۲۰ cm ، ۲۵ cm می‌باشد.

دراین حالت هم می‌توان گفت که فاصله بهینه بیست درصد ارتفاع جان می‌باشد ولیکن همانگونه که از شکل (۷) مشاهده می‌شود نمودار مربوط به فاصله ۱۵سانتی‌متری (۱۵ درصدی) قسمت زیادی از ابتدای گراف را در وضعیت مطلوب‌تری قرار دارد و این بدان دلیل است که باز شدن سخت‌کننده دلتا و افزایش فاصله محل اتصال سخت‌کننده به بال تا مرکز بال سبب می‌گردد تا عرض سخت‌کننده افزایش یافته و درنتیجه افزایش فاصله سخت‌کننده تا بال‌های فشاری این امر را دو چندان نمایان کند.

www.SID.ir

Archive of SID




**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 سخت‌کننده دلتا، افزایش نسبتاً بالایی در مقاومت کمانشی مقطع، هنگامی که تحت اثر خمش خالص قرار دارد نسبت به مقطع بدون سخت‌کننده و همچنین مقطع تقویت شده با سخت‌کننده طولی ایجاد می‌کند. همچنین مقایسه حالت بهینه سخت کننده دلتا با مقطع بدون سخت کننده نشان داد که با استفاده از سخت کننده دلتا می‌توان به مقاومتی در حدود ۲.۵ برابر بیشتر از حالتی که فقط ضخامت جان در مقطع افزایش می‌یابد دست یافت. استفاده از سخت کننده دلتا به جای سخت کننده طولی در حالتی که وزن هر دو مقطع یکسان باشد، می‌تواند 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 درمقاومت کمانشی تیرورق‌های سوراخ‌دار با سخت‌کننده دلتا تحت تاثیر نیروی برشی، نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد، (۲۵)، ۳۵-۴۴.

www.SID.ir