

## تقابل سختی و مقاومت

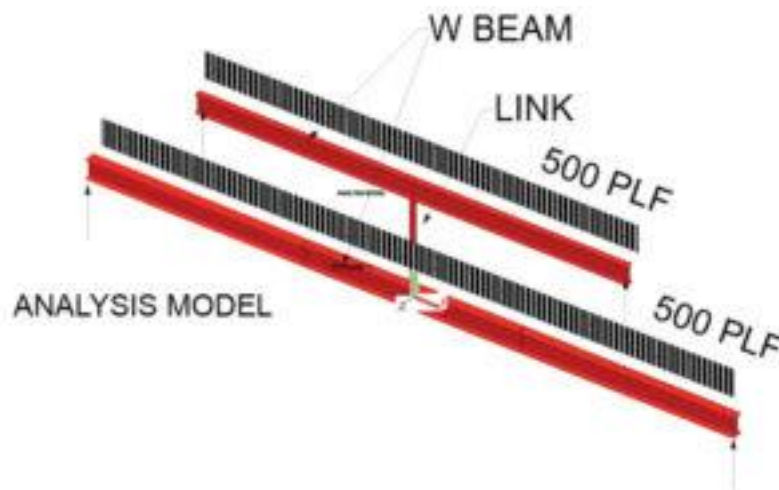
سختی و مقاومت چه ارتباطی با هم دارند؟ احتمالاً برای مهندسان مطالبی در خصوص طراحی تیرهای مرکب، طراحی ستون یا تیرهای حاوی میلگردهای فشاری تداعی می‌شود. در این مباحث ضریبی موسوم به "Π" وجود دارد. این ضریب، معرف نسبت مدول الاستیسیته‌ی بین مواد می‌باشد. از این ضریب برای تبدیل سختی مصالح مختلف به یک حالت متداول استفاده می‌شود. این موضوع، مبنای درک تأثیر سختی در توزیع نیروها در یک مقطع می‌باشد.

با این حال، سختی مواد، مدول الاستیسیته و مساحت سطح مقطع تنها مؤلفه‌هایی نیستند که بر توزیع جریان نیرو اثرگذار خواهند بود. محدودیت‌های هندسی اعم از طول اعضا، شرایط تکیه گاهی و مشخصه‌های سطح مقطع بر جریان نیرو در یک سیستم اثرگذار می‌باشند. در حقیقت، کل مهندسی سازه متأثر از نسبت سختی مابین اعضای یک سازه است. در این جا، جریان نیرو در قالب توزیع نیروهای داخلی سیستم‌ها، اعم از نیروی محوری، ممان، برش و پیچش تعریف می‌گردد.

به منظور بررسی اثر سختی و مقاومت، این مقاله به بررسی دو سیستم می‌پردازد: (۱) سیستم‌های استاتیکی سازه‌ای و (۲) اتصالات. دلیل اهمیت این مسئله چیست؟ مبنای دستیابی به سازه‌ی ایمن، سازگاری تغییر شکل اعضای سازه‌ای می‌باشد. در صورت نبود سازگاری، اعضا تحت تنش بیش از حدی قرار گرفته و به شکل پیش رونده‌ای تخریب می‌شوند.

## سیستم‌های سازه‌ای

اغلب اوقات، اعضا به گونه‌ای به هم متصل می‌شوند که بار مشابهی را تحمل کنند؛ هرچند که در غالب موارد چنین اتفاقی رخ نمی‌دهد. در این شرایط، بار به نسبت سختی اعضا توزیع می‌گردد.

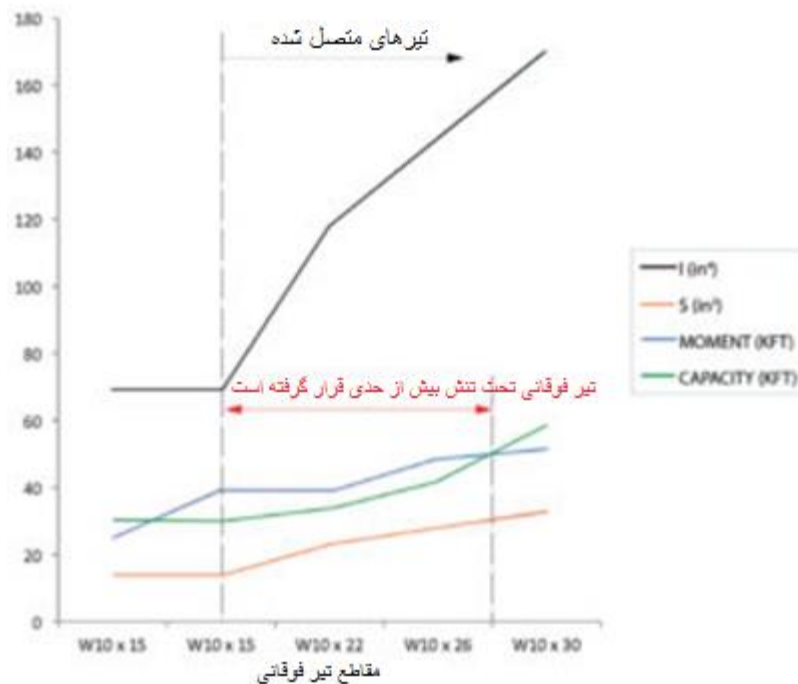


شکل ۱. مدل تحلیلی - تیرهای متصل شده.

برای نشان دادن اثرات اندرکنش اعضا با سختی‌های متفاوت، از یک مدل ساده استفاده می‌گردد (شکل ۱). در ابتدا، تیرها به صورت اعضای مستقل از هم و بر مبنای بار خطی ۵۰۰ پوند بر فوت در نظر گرفته می‌شوند. بر اساس ممان حاصله، یک مقطع  $W10*15$  برای تیر فوقانی ۲۰ فوتی و یک مقطع  $W10*30$  برای تیر تحتانی ۳۰ فوتی انتخاب شد. به هنگام اتصال، ممان تیر فوقانی تا ۱۵۵ درصد افزایش و ممان تیر تحتانی نیز تا ۳۳٫۵ درصد کاهش می‌یابد. دلیل این اختلاف، سختی بیش از حد تیر فوقانی در اثر طول کوتاه‌تر آن در مقایسه با تیر تحتانی می‌باشد.

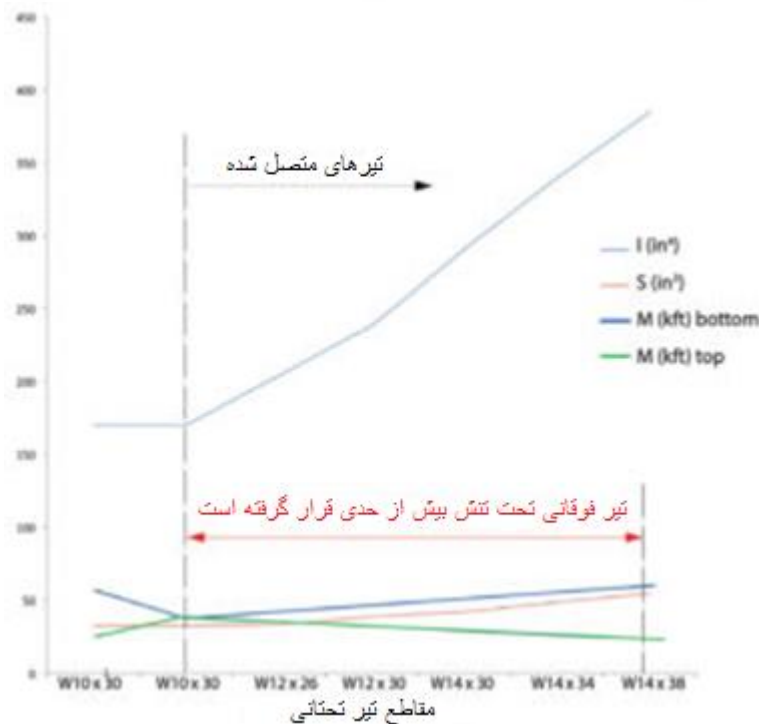
به منظور حذف تنش بیشینه، می‌توان ابعاد تیر فوقانی را در عین حفظ اندازه‌ی تیر تحتانی، افزایش داد. جهت تحمل بار افزایش یافته‌ی ناشی از تیر تحتانی، ضروری است که ابعاد تیر فوقانی را تا  $W10*30$  ارتقا دهیم.

افزایش ابعاد مقطع منجر به مدول بزرگ‌تر در مقطع و در نتیجه، ممان اینرسی بیشتر می‌گردد. با نگاه به روند تغییرات مدول مقطع و ممان اینرسی، به این نتیجه می‌رسیم که ممان اینرسی و در نتیجه سختی، ۲٫۵ برابر شده است؛ در حالی که مدول مقطع ۲٫۳ برابر خواهد شد؛ مسئله‌ای که خلاف خواسته‌ی ما می‌باشد (مدول مقطع  $S=bd^2/6$ ؛ ممان اینرسی  $I=bd^3/12 = b$  عرض،  $d$  عمق). (شکل ۲ الف را مشاهده کنید).



شکل ۲ الف. اثر افزایش اندازه‌ی تیر فوقانی

راه حل دیگر این است که سختی تیر تحتانی را افزایش دهیم. در این شرایط، به منظور دستیابی به سختی‌ای که موجب حذف اثرات بار وارده بر تیر فوقانی (بدون هرگونه تغییری در اندازه‌ی آن) می‌گردد، بایستی ابعاد آن را به  $W14*38$  برسانیم. شکل ۲ ب نشان دهنده‌ی اندرکنش دو تیر می‌باشد. توجه داشته باشید که راه حل دوم، اقتصادی‌تر است. در راه حل نخست، ۳۰۰ پوند در حالی که سازه اضافه شد که طی شرایط نخست، تنها ۲۴۰ پوند به وزن فولاد اضافه شده بود. با این حال، عمق تیر از ۱۰ اینچ به ۱۴ اینچ ارتقا پیدا نمود. تیری که دارای عمق ۱۴ اینچ است، بدان سبب مد نظر قرار گرفته که ممان اینرسی و سختی آن بدون افزایش وزن، به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. چنانچه عمق بیش‌تر از ۱۰ اینچ نگردد، ابعاد آن به صورت  $W10*68$  خواهد شد. راه حل سوم آن است که شرایط مرزی تیر تحتانی را تغییر دهیم؛ برای مثال، دوران تکیه گاه را محدود نمایی‌ام.



شکل ۲ ب. اثر افزایش اندازهی تیر تحتانی.

نحوه‌ی وقوع این شرایط در حالت عملی به چه ترتیبی است؟ حالات وقوع آن، فراتر از حد تصور ما می‌باشد.

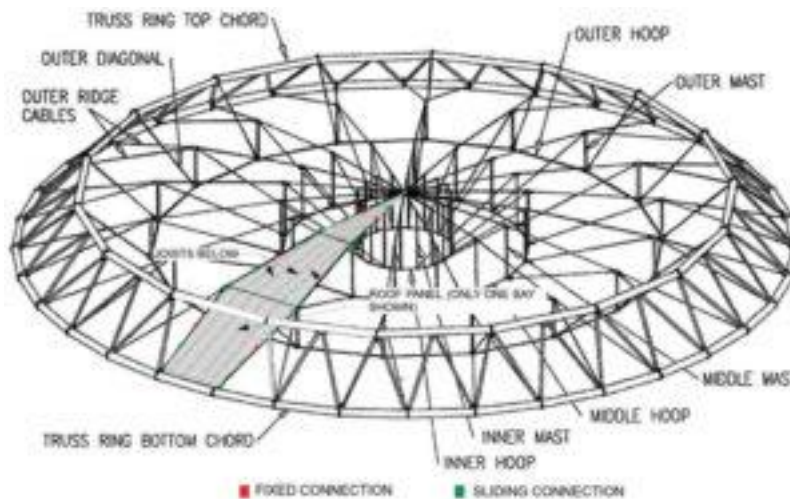
یک مثال ساده در این زمینه سقف سازه‌ی چوبی و شکل دادن پنجره‌های شیروانی است که در اکثر ساختمان‌های مسکونی به کار می‌رود (شکل ۳). تیر ستون فقراتی توسط تیرهای شیروانی مورب به تیرهای آبروی بام متصل می‌گردد. تخته کوبی بام به صورت سیستم کام و زبانه عملکرد دیافراگمی بسیار محدودی را به وجود می‌آورد. اغلب اوقات، اعضای این سازه‌ها بر مبنای سهم بار و دهانه‌ی آن‌ها و بدون توجه به اتصال مابینشان طراحی می‌شوند؛ بنابراین، از بحث اشتراک بار صرف‌نظر می‌شود. با این حال، در صورت تحلیل سه بعدی سازه (که بر مقوله‌ی اشتراک بار مابین اعضا دلالت دارد)، به وضوح می‌توان بیان داشت که تخصیص بار فرضی نادرست بوده و آن عضو ستون فقراتی که متناسب با سهم بار فرضی طراحی شده، تحت بار بیش از حدی قرار می‌گیرد و رفتار آن مشابه مثال فوق خواهد بود.



شکل ۳. نمونه‌ای از اشتراک بار بین اعضا در یک سقف چوبی



مجدداً، دلیل این امر آن است که عضو جناغی در مقایسه با تیر آبروی بام سخت‌تر بوده و سهم بیشتری از کل بار را دریافت می‌نماید. بیشتر مهندسان اندازه‌ی عضو جناغی و معمولاً عمق آن را افزایش می‌دهند؛ چرا که در تحمل ممان اثربخشی بیشتری خواهد داشت. با این حال، بایستی سختی و همچنین مقاومت را اصلاح نمود. طبق مثال فوق (شکل‌های ۲ الف و ب)، افزایش اندازه‌ی تیر به ویژه عمق آن، سبب افزایش مدول مقطع خواهد شد. در عین حال، ممان اینرسی نیز چندین برابر می‌شود. افزایش سختی عضو نیز منجر به جذب بار بیشتر و در نتیجه، ممان‌های بزرگ‌تر خواهد شد.



شکل ۴. پانل‌های سقف شناور در یک سقف کابلی

به هنگام ترکیب مقاطع با ظرفیت‌های تنشی و رفتار تنش/ کرنش متفاوت، بایستی به بررسی سازگاری تنش و کرنش، به عنوان یکی از معیارهای سختی و سطح مقطع اعضا پردازیم. به عنوان مثالی در این زمینه، می‌توان از یک پوشش سقف کابلی همراه با پانل‌های پیش ساخته‌ی سقف (شکل ۴) نام برد. اعضای پیرامونی پانل‌ها، مرزهایی را پدید می‌آورند که عرشه را بر روی کناره‌های طولانی و تیرچه‌ها را بر روی لبه‌های کوتاه نگه می‌دارد.

پانل‌ها به صورت پیش ساخته بوده و بر روی شبکه‌ی کابلی قرار می‌گیرند. به منظور جلوگیری از لغزش پانل‌ها و مقاومت در برابر نیروی بالابرنده‌ی ناشی از باد، اعضای هم راستا با کابل به آن قلاب می‌شوند. مدول الاستیسیته (E) کابل برابر است با  $2.0 \times 10^6$  کیلو پوند بر اینچ مربع و مقاومت آن در دوره بهره برداری با ضریب ایمنی ۲،۲ برابر با ۹۰ کیلو پوند بر اینچ مربع است. آن عضو لبه که به کابل قلاب شده است، مقطعی سازه‌ای با مدول الاستیسیته  $2.9 \times 10^6$  و تنش بهره برداری ۲۱،۷ کیلو پوند بر اینچ مربع می‌باشد. در صورتی که کابل و عضو لبه به شکلی صلب به هم پیچ شده باشند، بایستی سازگاری تنش را کنترل نمود. پیش از جاگذاری پانل‌ها، بایستی آن‌ها را تا حد ۵۰ درصد ظرفیت مجاز خود، پیش تنیده بنماییم. کرنش نامتقارن مابین پیش بار و بیشینه بار کابل برابر است با  $2.25 \times 10^{-6}$  و برای عضو لبه، مقدار آن برابر است با  $0.75 \times 10^{-6}$ . این امر به منزله‌ی آن است که کرنش موجود در کابل تحت کل بار، ۳ مرتبه بزرگ‌تر از کرنش مجاز در عضو لبه است که به نوبه‌ی خود منجر به خرابی عضو لبه خواهد شد. راه حل این کار، آن است که عضو لبه‌ی یک پانل را تنها در یک موقعیت به کابل قلاب نموده و امکان لغزش را به سایر اتصالات بدهیم. این اتصالات اضافی بایستی در برابر بار بالابرنده‌ی باد مقاوم باشند. طرح اتصال لغزنده مشتمل بر یک لوله‌ی دو تکه با جداره‌ی نئوپرنی است که مابین سطح کابل و وجه داخلی لوله قرار می‌گیرد. لوله‌ی دو تکه با استفاده از پیچ‌های U شکل به کابل پیچ می‌شود.

سیستم‌های سازه‌ای کمی وجود دارد که در آن، تغییر شکل‌ها موجب افزایش ظرفیت می‌گردد. در سیستم‌های کابلی یا طنابی شکل (Catenary systems)، تغییر شکل‌های الاستیک موجب تشدید خمیدگی و در نتیجه، ظرفیت باربری آن می‌گردد. سازه‌های کابلی و غشایی از این عملکرد طنابی بهره می‌برند.

## اتصالات

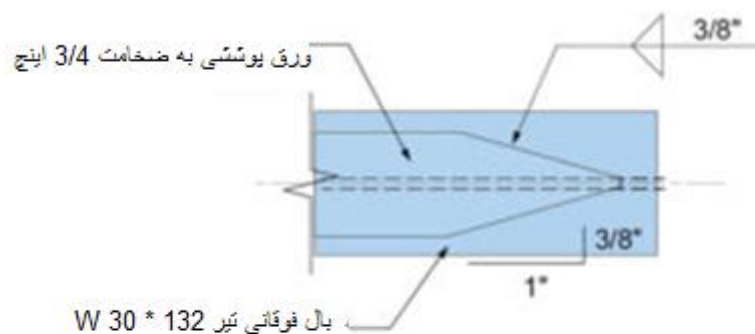
اهمیت بررسی سازگاری اتصالات قابل اغماض نخواهند بود. با این حال، غالباً از تحلیل‌های دقیق جسم آزاد بر روی انتقال بار در اتصالات صرف نظر می‌گردد.

یک نمونه از سازگاری اتصالات، اتصال ورقه‌ی پوششی به منظور تقویت یک شاه‌تیر است. اتصال انتهایی ورقه‌ی پوششی به بال شاه‌تیر، از آن جهت بحرانی است که کرنش ورقه‌ی مذکور بایستی در تطابق با کرنش بال شاه‌تیر باشد.

به واسطه‌ی جوش‌ها، بایستی بار را از بال فوقانی به ورقه‌ی پوششی انتقال داد. جوش، یک نوع اتصال برشی را بین اعضا به وجود می‌آورد؛ بنابراین، ظرفیت برشی جوش برای یکپارچگی اتصال حائز اهمیت است. با استفاده از دیاگرام جسم آزاد و بررسی سازگاری کرنش بین سطح اتصال ورق پوششی و بال، می‌توان نحوه‌ی جوش و شکل انتهایی ورقه‌ی پوششی را تعیین نمود. بال تحت بار قرار گرفته و در نتیجه متحمل تغییر شکل می‌گردد. به منظور انتقال ایمن بار، ورقه‌ی پوششی بایستی در تطابق با این تغییر شکل باشد. حد بار انتقال یافته به واسطه‌ی ظرفیت جوش‌های متصل کننده‌ی ورقه به بال تعیین می‌شود. سختی موضعی مقطع ورق پوششی، تعیین کننده‌ی میزان بار جذب شده خواهد بود. در این طرح، می‌توان شکل انتهایی ورقه‌ی پوششی را به نحوی متناسب نمود که بتوان بار انتقال یافته را با ظرفیت جوش‌ها و یا جوش‌ها را با سختی ورقه‌ی پوششی منطبق کرد. در این جا یک مثال ارائه می‌گردد:

تیر  $W30 * 132$  دارای ممان  $665$  کیلو پوند بر فوت است که به نوبه‌ی خود، تنش خمشی  $(fb)$   $21$  کیلو پوند بر اینچ مربع را پدید می‌آورد. ورقه‌ی پوششی با ضخامت  $3/4$  اینچ به بال تیر جوش داده می‌شود. کرنش حاصل از تنش بال تیر بایستی مشابه با ورقه‌ی پوششی باشد.

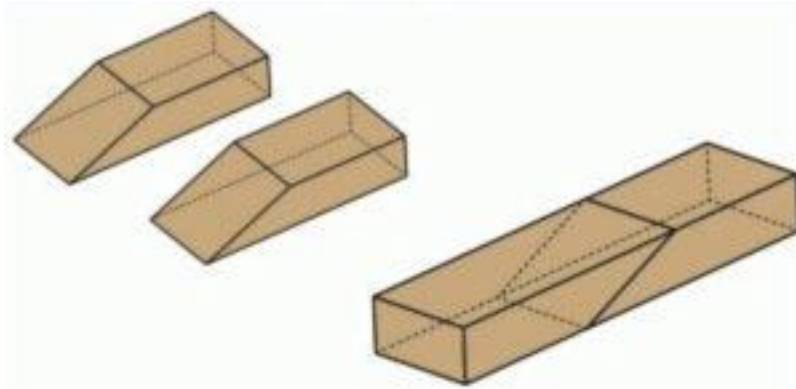
ورقه به کمک جوش گوشه‌ی  $3/8$  اینچی به بال متصل می‌شود. ظرفیت جوش برابر با  $5,6$  کیلو پوند بر اینچ است. در مورد جوش‌های صورت گرفته بر روی دو طرف ورقه، بار انتقال یافته برابر است با  $F = 2 \times 5,6 = 11,6$  کیلو پوند بر اینچ. افزایش موضعی سطح ورق پوششی در این ناحیه نباید از  $A = F / fb$  تجاوز کند.



شکل ۵. جزئیات انتهایی ورقه‌ی پوششی

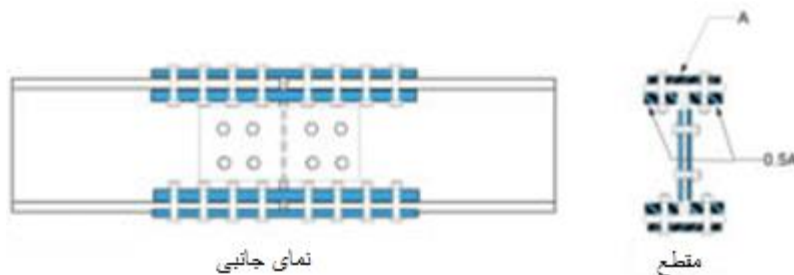
$A$  برابر است با  $0,522 = 11,6 / 21$  اینچ مربع. در این جا به این دلیل از تنش بال استفاده می‌گردد که کرنش ورقه‌ی پوششی بایستی منطبق با کرنش بال باشد. مدول الاستیسیته  $(E)$  بال و ورق پوششی مشابه یکدیگر می‌باشد؛ بنابراین، افزایش نامتقارن عرض ورقه‌ی  $3/4$  اینچی بر روی  $1$  اینچ، برابر است با  $0,736 = 0,522 / 0,75$ . هر دو سمت کناری ورقه‌ها در پلان به صورت

مخروطی و باریک شونده می‌باشند؛ بنابراین، شیب ناحیه‌ی باریک شونده برابر است با  $2/0,736$  یا  $1:0,368$  یا  $3,8$  inch: ۱ inch (شکل ۵). شدت کل بار انتقال یافته وابسته به عرض ورقه در این مثال است. با انتقال هرچه بیشتر بار به ورقه، سطح تنش در بال تیر کاهش یافته و به لحاظ تئوری، شیب ناحیه‌ی اریب افزایش می‌یابد. یکی از گزینه‌های کاربردی‌تر در این زمینه، کاهش اندازه‌ی جوش است.



شکل ۶. اتصالات وصله‌ای چوبی

وصله‌ها در اتصالات چوبی (شکل ۶) از قاعده‌ی مشابهی استفاده می‌نمایند. به واسطه‌ی اریب نمودن محل اتصال مقاطع، می‌توان بدون اعمال تنش اضافی به خط پیوند، به انتقال بار همواری دست یافت. از این وصله‌ها برای افزایش طول عضو استفاده می‌گردد. خرابی این اتصالات عموماً در رأس اتصال اریب بروز می‌کنند. در صورت خرابی خط پیوند در این ناحیه، اتصال گسیخته خواهد شد. دلیل این امر، ازدیاد تنش در نواحی باقی مانده‌ی خط پیوند می‌باشد. نمونه‌ی دیگر از نحوه‌ی تأثیرگذاری سختی یک عضو بر عملکرد آن عبارت است از وصله‌ای که به شکل ساده به تیر بال پهن، پیچ شده است. نیروی یک تیر به وسیله‌ی ورقه‌های وصله به تیر دیگر منتقل می‌شود.

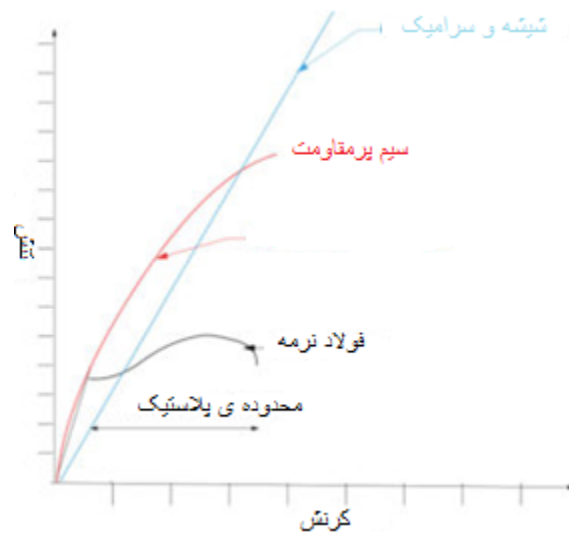


شکل ۷. وصله‌ی تیر فولادی

ورقه‌های موجود در هر سمت جان، بر روی وجه بیرونی بال‌ها و در ناحیه‌ی تحتانی بال‌ها به یکدیگر پیچ شده و اتصال را پدید می‌آورند (شکل ۷). پیچ‌های رابط تحت برش دابل قرار می‌گیرند. ورقه‌های موجود بر وجه بیرونی بال‌ها متمایز از ورقه‌هایی هستند که به زیر بال متصل شده‌اند. عرض ورقه‌های بیرونی به عرض کامل بال‌ها نیز می‌تواند برسد. ورقه‌های موجود در زیر هر بال، در هریک از طرفین جان قرار گرفته، جان و سه گوش را از هم جدا نموده و در نتیجه، عرض ترکیبی آن کمتر از عرض ورقه‌ی فوقانی خواهد بود. ظرفیت کامل یک پیچ تحت برش دابل تنها در شرایطی محقق می‌گردد که هر دو صفحه‌ی برشی پیچ تا سرحد بیشینه تنش برشی مجاز خود تحت تنش قرار بگیرد.



این پدیده تنها در شرایطی رخ می‌دهد که کرنش ورق بال فوقانی برابر با کرنش ورق تحتانی گردد. در نتیجه، مساحت ورقه‌ی فوقانی بایستی برابر با مجموع سطوح ورقه‌های تحتانی بال باشد. به علت وجه مشترک جان و سه گوش، کل عرض ورقه‌های تحتانی بال کمتر از ورقه‌ی فوقانی می‌باشد. به واسطه‌ی افزایش ضخامت ورقه‌های زیر بال، مساحت ورقه‌ی فوقانی نیز به همان میزان درآمده و کرنشی یکسان را در ورقه‌های اتصال پدید می‌آورد.



شکل ۸. منحنی تنش - کرنش برای مصالح مختلف

## مصالح

کلیدی مثال‌های فوق بر مبنای مصالح کاملاً الاستیک قرار دارد. رفتار الاستیک به منزله‌ی آن است که رابطه‌ی تنش/کرنش خطی می‌باشد. در بیشتر طرح‌ها فرض بر آن است که مصالح رفتاری خطی دارند؛ این مسئله امکان برون یابی نیروها و تنش‌های یک سازه یا اتصال را مهیا می‌نماید. انجام این فرض، امکان جمع آثار بار را فراهم می‌آورد. با این حال، بیشتر مصالح تحت محدوده‌های تنشی بالاتر، رفتاری غیرخطی از خود بروز می‌دهند. شکل ۸ نشان دهنده‌ی منحنی تنش - کرنش برای سیم‌های پر مقاومت فولادی و مواد سرامیکی و شیشه‌ای می‌باشد. توجه داشته باشید که فولاد نرمه در محدوده‌ی پلاستیک (تسلیم) تغییر شکل داده اما مقاومت بسیار کمی را به دست می‌آورد. این امر منجر به افت سختی خواهد گردید. در نتیجه، در محدوده‌ی تسلیم، عضو مقداری از بار خود را به اعضای سخت‌تر دیگر سازه که تحت تنش کمتری قرار گرفته و مصالح آن به تنش تسلیم نرسیده‌اند، منتقل می‌نماید. تغییر در هندسه‌ی سیستم، موجب ناپایداری اعضای فشاری گردیده و بایستی بررسی شود. با این حال، تسلیم فولاد به واسطه‌ی مقاومت شکست مصالح و همچنین، سخت شوندگی کرنشی آن‌ها محدود می‌گردد. سخت شوندگی کرنشی در ازای تنش‌های سیکلی در محدوده‌ی تسلیم رخ داده و موجب کاهش شکل پذیری مصالح می‌گردد.

رفتار کاملاً الاستیک مصالح (بدون وقوع حد خمیری در ازای هر سطح از تنش) به نوعی شکننده و کم دوام می‌باشد. این مواد عکس‌العمل غیرقابل پیش بینی در قبال بار بیش از حد از خود بروز داده و خرابی آن‌ها بدون هشدار می‌باشد. دلیل این امر، آن است که ضرایب ایمنی ۴ الی ۶ در طراحی شیشه و سنگ و ضریب ایمنی ۱,۶ به فولاد نرمه تعلق می‌گیرد.

## کلام آخر

توزیع سختی در یک سیستم سازه‌ای بر جریان نیروی آن، تأثیر می‌گذارد. به واسطه‌ی تغییر در سختی، می‌توان به باز توزیع نیرو و ممان پردازیم. با بررسی سازگاری تغییر شکل و کرنش‌های بین اجزا، به درک بهتری از توزیع نیروها و ممان‌ها دست

یافته و به طراحی اقتصادی تر و ایمن تر نائل می گردیم. چندین برنامه ی کامپیوتری برای تحلیل این روابط و در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح وجود دارد. با این حال، از آن جا که این تحلیل ها قادر به توصیف رفتار خمیری مصالح نمی باشند، تحلیل های المان محدودی بر روی اتصالات منجر به نتایج غیرواقعی می گردد.

ارزیابی سازگاری کرنش در طراحی مواد کاملاً الاستیک، حائز اهمیت است. بدون لحاظ آن، احتمال خرابی پیش رونده در مقطع زیاد خواهد بود.

مترجم: پوریا نخعی

منبع:

<http://www.structuremag.org/?p=۱۱۵۷۵>