بررسی پایداری تیرورقها با سخت کننده‌های مورب نسبت به میانتار

واهاگ سیمونیان دانشیار گروه عمران، دانشکدهٔ فنی، دانشگاه تبریز
محمد ناصری تکمه داش کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکدهٔ فنی، دانشگاه تبریز

چکیده

در این پژوهش پایداری جان تیرورقها با سخت کنندههای مورب مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی نظری پایداری جان تیرورقها با سختکنندههای مورب اصولی که در تیرورقهای دارای سخت کنندههای قائم بکار رفتهاند، اساس قرار داده شدهاند. در این راستا بمنظور بدست آوردن ضرایب کمانش k از نرمافزار Lusas استفاده شده است. با توجه به روابط بدست آمده و نیز نتایج آزمایشات انجام شده، ملاحظه میشود که در حالت استفاده از سختکنندههای مورب، مقاومت پس کمانشی برشی جان که ناشی از عمل میدان کششی است، به نسبت زاویه سخت کنندههای مورب خیلی بیشتر از حالتیست که از سخت کنندههای قائم استفاده میشود. بنابراین در این حالت می‌توان ضخامت جان تیرورق را کاهش داد که میتواند باعث صرفهجویی شود. باید متذکر شد که نیروی وارد بر سخت کنندههای مورب بیشتر از سخت کنندههای قائم است که اضافه وزن ناشی از این امر کمتر از کاهش وزن کلی جان میباشد.

کلمات کلیدی: تیرورق، سخت کننده مورب، کمانش، پایداری

Investigation into the Stability of Plate Girders with Diagonal Stiffeners

W.Simonian Associate Professor, Dept. of Civil Eng., Univ. of Tabriz
M.Naseri Tekmedash M. Sc. Eng., Dept. of Civil Eng., Univ. of Tabriz

Abstract

In this research, web stability of plate girders with diagonal stiffeners has been studied. For theorical study of stability of plate girders with diagonal stiffeners same rules has been employed which are implied in studying the web stability of plate girders with vertical stiffeners. For obtaining the buckling factor k, Lusas software has been used. With regard to obtained formulas and tests results, it has been found that where diagonal stiffeners are used, the shear post-buckling strength of web which in turn is a result of the existing tension field action is higher than the case where vertical stiffeners are used. Thus by using diagonal stiffeners, the thickness of plate girder's web can be reduced which will cause economy. It should be noted that in this case, the force in diagonal stiffeners will be higher than that of vertical stiffeners, but the increase in weight of stiffeners is less than decrease of the weight of web plate due to employment of diagonal stiffeners.

Key words: Plate girders, Diagonal stiffeners, Buckling, Stability

۱- مقدمه

در یک تیرورق وظیفه جان تحمل نیروی برشی و یکپارچه کردن دو بال است. با توجه به اینکه در تیرورقها، با جانهای نازک با ارتفاع زیاد روبرو هستیم، لذا مسأله کمانش جان مطرح خواهد شد. برای مقابله با این مسأله میتوان ضخامت جان را افزایش داد. ولی این کار باعث افزایش وزن مقطع و غیر اقتصادی شدن طرح می‌شود. بنابراین استفاده از جان نازک که با سخت کننده‌هایی تقویت شده باشد، مطلوبتر است. تمامی مطالعاتی که تاکنون در مورد تیرورقها انجام شده است برای حالتی است که در آن از سخت کننده‌های قائم و یا قائم و طولی برای تقویت جان استفاده شده است. از آنجاییکه در ادبیات فنی موجود موضوع سخت کننده‌های میانی مورب مطرح نشده است، در این مقاله تأثیر اینگونه سخت کننده‌ها بر پایداری جان تیرورقها به‌لحاظ نظری و آنگاه تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی نظری پایداری جان تیرورقها با سخت کننده‌های مورب از اصول و مفاهیمی استفاده شده است که در بررسی پایداری جان تیرورقهای با سخت کننده‌های قائم بکار رفته‌اند که اساس این روشها بر پایه مطالعات باسلر [1] قرار دارد. بنابراین ابتدا اصول مربوط به تیرورقهای دارای سخت کننده‌های قائم مورد بررسی قرار گرفته‌اند و سپس این روشها برای حالت استفاده از سخت کننده‌های مورب شبیه‌سازی شده‌اند. در نهایت جهت پی‌بردن به صحت بررسیهای نظری اقدام به بررسی‌های تجربی با بکارگیری نمونه‌های آزمایشگاهی شده است. لازم بذکر است که در این مقاله مقدار E و μ بترتیب برابر $2.1*10^6$ kg/cm^2 و 0.3 در نظر گرفته شده‌اند.

۲- مفاهیم عمومی

از آنجائیکه در طراحی تیرورقها با سطوح بزرگ ورق با ضخامت کم مواجه هستیم، لذا مسأله کمانش عمده‌ترین مسأله ایست که در طراحی تیرورقها باید در نظر گرفته شود. یک مقطع مناسب تیرورق ممکن است جانی داشته باشد که نسبت عمق به ضخامت آن بقدری بزرگ باشد که کمانش در آن توسط تنشهای خمشی یا برشی و یا هر دو آنها رخ دهد قبل از اینکه از حداکثر ظرفیت خمشی مقطع استفاده شده باشد. انواع ناپایداریهایی که در طراحی تیرورقها محتمل هستند عبارتند از:

الف- ناپایداریهای بال فشاری:

۱- کمانش جانبی بال فشاری
۲- کمانش پیچشی بال فشاری
۳- کمانش قائم بال فشاری

ب- ناپایداریهای جان:

۱- کانش جان در اثر تنشهای برشی
۲- کمانش جان در اثر تنشهای خمشی جان
۳- کمانش جان در اثر تنشهای ناشی از خمش بال فشاری

با توجه به اینکه امتداد سخت کننده‌ها تأثیری در پایداری بال فشاری نخواهد داشت، نیازی به‌بررسی ناپایداری‌های بال فشاری در حالت استفاده از سخت کننده‌های مورب نمیباشد و روابط حاکم همانهایی خواهند بود که برای تیرورقهای دارای سخت‌کننده‌های قائم وجود دارد[4]. بنابراین منحصراً ناپایداریهای جان مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۳- ناپایداریهای جان تیرورق

همانطور که گفته شد، در یک تیرورق وظیفه جان تحمل نیروی برشی و اتصال دو بال بهیکدیگر است، لذا اختصاص ضخامت زیاد برای جان بجز افزایش وزن مقطع خاصیت دیگری نخواهد داشت. بنابراین استفاده از جان نازک که توسط سخت‌کننده‌هایی تقویت شده باشد مطلوبتر است. از طرفی با نازکتر شدن جان مسأله پایداری جان اهمیت بیشتری پیدا میکند. در حالت کلی هر قسمت از جان تیرورق محدود به سخت کننده‌های میانی از یک طرف و سخت کننده‌های طولی و یا بالهای تیرورق از طرف دیگر تحت اثر تنشهای فشاری ناشی از بارهای وارده از طرف بال، تنشهای برشی در امتداد چهار لبه و تنشهای خمشی در ارتفاع جان قرار دارد. تحلیل چنین وضع پیچیده تنشی مشکل بوده و از نظر طراحی مناسب نیست. بهترین روش این است که هر یک از سه نوع تنش فوق را بصورت مجزا بررسی نموده و سپس اثر ترکیب آنها را در نظر بگیریم.

۴-کمانش ورق جان در اثر تنشهای برشی

۱-۴- حالت استفاده از سخت کننده‌های قائم

در یک تیرورق که ارتفاع جان آن h و فاصله سخت کننده‌ها a باشد، تنش بحرانی کمانش برشی از رابطه زیر بدست می آید [5]:

$$\tau_{cr} = k\frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(h/t)^2} \qquad (۱)$$

که در آن k ضریب کمانش، E مدول یانگ، μ ضریب پواسون، t ضخامت صفحه میباشد. با فرض ساده بودن شرایط تکیه گاهی ورق (یعنی جابجائی لبه‌ها ممکن نیست ولی دوران آنها آزاد است) مقدار k از رابطه زیر بدست می آید [4]:

$$a/h \le 1 \rightarrow k = 4 + \frac{5.34}{(a/h)^2} \qquad (۲)$$

$$a/h > 1 \rightarrow k = 5.34 + \frac{4}{(a/h)^2}$$

اگر نسبت تنش بحرانی کمانش برشی به تنش جاری شدن برشی را با C_v نشان دهیم، مقدار آن از رابطه ۳ بدست می‌آید [4]:

$$C_v = \frac{3287434k}{F_y.(h/t)^2} \qquad (۳)$$

مانند کلیه حالات پایداری، هرگاه تنش بحرانی کمانش به تنش تسلیم نزدیک شود تنشهای پسماند و نقائص موجود سبب کمانش غیر ارتجاعی می‌شوند. در این حالت بنا بهنظر باسلر مقدار C_v از رابطه زیر بدست می آید [4]:

$$C_v = \frac{1621}{(h/t)}\sqrt{\frac{k}{F_y}} \qquad (۴)$$

۴-۲- مقاومت پس از کمانش جان در برش

اگر ورقی توسط دو بال و چندین ورق تقویتی تقویت شده باشد، دارای مقاومت پس از کمانش قابل توجهی خواهد بود. از سال ۱۸۹۸ این موضوع معلوم شده بود که یک تیرورق پس از کمانش جان در اثر تنشهای برشی درست همانند خرپا عمل میکند. در این حالت جان تیرورق مانند قطریهای کششی که بهعمل میدان کششی (Tension field action) موسوم است، عمل کرده و قطعات تقویتی قائم نقش قطعات فشاری خرپا را ایفا میکنند.

۴-۳- عمل میدان کششی-امتداد بهینه

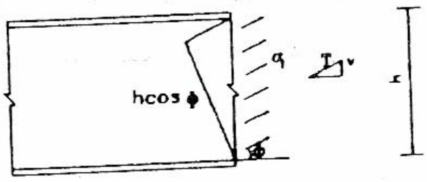
تنش غشایی کششی σ_t را که در جان تیرورق بوجود آمده است مطابق شکل (۱) در نظر میگیریم.

اگر این تنش در کل ارتفاع جان ایجاد شود مقدار نیروی کششی قطری T بصورت زیر بدست می آید:

$$T = \sigma_t ht.Cos\phi \qquad (۵)$$

مؤلفه قائم این نیرو همان نیروی برشی V می‌باشد که مقدار آن برابر است با:

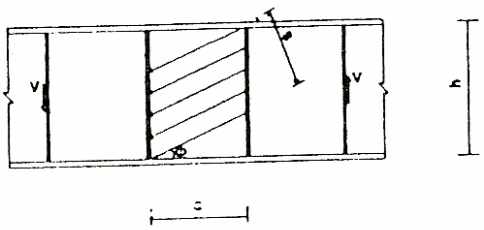
$$V = T.Sin\phi = (\sigma_t ht.Sin2\phi)/2 \qquad (۶)$$



شکل ۱- تنش غشایی در عمل میدان کششی

۴-۴- مقاومت برشی ناشی از عمل میدان کششی

بر طبق نظریه باسلر [1] سختی قائم بالهای تیرورقها ناچیز است و بهعبارتی بالهای تیرورقها در امتداد قائم انعطاف‌پذیر هستند. بنابراین اگر تنشهای کششی بتوانند در امتداد بالها ایجاد شوند لازم است در تمام طول بالها برای تحمل مؤلفه قائم این نیروها سخت کنندههای قائم تعبیه شوند. از آنجائی که انجام این عمل اقتصادی نیست و خود بال نیز قادر بهایجاد چنین سختی قائمی نیست، لذا عمل میدان کششی فقط می‌تواند در پهنایی از جان بوجود آید که مؤلفههای قائم نیروی کششی قطری بتوانند توسط سختکنندهها تحمل گردند. این محدوده از جان توسط پنهای s در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲- نیروهای ناشی از عمل میدان کششی

با توجه به شکل (۲) نیروی غشایی کششی مربوط به یک قطعه تقویتی قائم برابر $\sigma_t st$ میباشد و مؤلفه برشی این نیرو که بصورت فشار به سخت کننده وارد میشود برابر است با:

$$\Delta V_{tf} = \sigma_t st.Sin\phi \qquad (۷)$$

همچنین با توجه به شکل (۲) داریم:

$$s = h.Cos\phi - a.Sin\phi \qquad (۸)$$

به این ترتیب خواهیم داشت:

$$\Delta V_{tf} = \sigma_t t(\frac{h}{2}.Sin2\phi - a.Sin^2\phi) \qquad (۹)$$

برای اینکه مقدار ΔV_{tf} ماکزیمم شود باید مشتق آن نسبت به ϕ برابر صفر باشد. با صفر قرار دادن مشتق ΔV_{tf} نسبت به ϕ داریم:

$$tg2\phi = \frac{1}{a/h} \tag{۱۰}$$

$$Sin2\phi = \frac{1}{\sqrt{1+(a/h)^2}} \tag{۱۱}$$

$$Sin^2\phi = \frac{1}{2}[1-\frac{a/h}{\sqrt{1+(a/h)^2}}] \tag{۱۲}$$

با جاگذاری $Sin2\phi$ از رابطه (۱۱) در رابطه ۶ خواهیم داشت:

$$V_{tf} = \frac{\sigma_t ht}{2}(\frac{1}{\sqrt{1+(a/h)^2}}) \tag{۱۳}$$

یک تناقض آشکار در تعیین زاویه ϕ برای عمل میدان کششی جزئی از شکل (۲) با فرض اینکه میدان کششی کلی بدست آمده از معادله (۱۳) در همان زاویه تشکیل میشود، وجود دارد. اما با σ_t تعیین شده از معادله (۱۴) نتایج آزمایشات تطابق قابل ملاحظهای با روابط بدست آمده دارند [3].

۴-۵ شرط خرابی

با قبول این فرض که تنش بحرانی کمانش (τ_{cr}) پس از وقوع کمانش تا بار نهایی ثابت میماند که در نتیجه تنش میدان کششی (σ_t) علاوه بر تنشهای اصلی τ_{cr} عمل میکند و نیز فرض اینکه زاویه عمل میدان کششی بطور محافظه کارانهای برابر 45° میباشد (هر چند مقدار واقعی آن همواره کمتر از 45° است)، مقبولترین تئوری خرابی برای حالت تنشهای صفحهای در مصالح تغییر شکلپذیر تئوری انرژی تغییر شکل برشی است. با استفاده از این فرضیه برای شرایط تنش مورد بحث در تیرورق میتوان به رابطه زیر رسید [6]:

$$\sigma_t = F_y(1-C_v) \tag{۱۴}$$

۴-۶- ظرفیت نهایی برشی- ترکیب مقاومت کمانشی و پس کمانشی

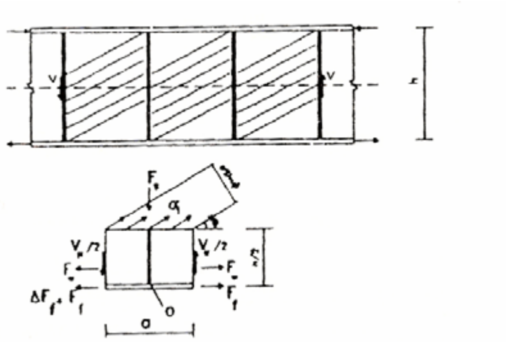
چون تیرورقهایی که دارای ورق جان نازکی میباشند، قبل از کمانش از خود مقاومت نشان میدهند و پس از کمانش نیز از خود مقاومت پس کمانشی بروز میدهند، لذا ظرفیت واقعی برشی آنها مجموع این دو مقدار خواهد بود بنابراین:

$$V_u = V_{cr} + V_{tf} \tag{۱۵}$$

$$V_u = F_y ht[\frac{C_v}{\sqrt{3}} + \frac{1-C_v}{2\sqrt{1+(a/h)^2}}] \tag{۱۶}$$

۴-۷- نیروی وارد بر سخت کننده های قائم

برش جسم آزادی از جان تیرورق را مطابق شکل (۳) در نظر میگیریم.



شکل ۳- نیروهای سخت کننده ناشی از عمل میدان کششی

دو ضلع قائم این مقطع حدفاصل بین سخت کنندهها و ضلع افقی آن وسط ارتفاع تیرورق میباشد. این مقطع طوری انتخاب شده است که در ضلع افقی آن حالت تنش میدان کششی و در اضلاع قائم آن برایند نیروهای برشی (که بعلت تقارن مقدار آنها برابر $V_{tf}/2$ است) معلوم میباشد. در شکل (۳) با نوشتن تعادل نیروها در امتداد قائم و قرار دادن $Sin^2\phi$ و σ_t از روابط (۱۲) و (۱۴) خواهیم داشت:

$$F_s = \frac{F_y(1-C_v).at}{2}[1-\frac{a/h}{\sqrt{1+(a/h)^2}}] \tag{۱۷}$$

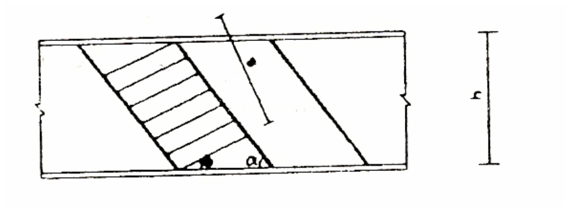
۴-۸- حالت استفاده از سخت کنندههای مورب

مطابق مطالب گفته شده قبلی تنش بحرانی کمانش برشی برای چنین حالتی از رابطه (۱) بدست میآید. محاسبه ضریب کمانش K برای چنین حالتی از قیود و تکیه گاهها با استفاده از

تئوریهای پایداری مستلزم حل معادلات دیفرانسیل جزئی پیچیده است که کاری بس دشوار است. لذا برای این منظور میتوان از نرم افزار Lusas استفاده کرد. مطابق آنچه که قبلاً اشاره شد مقدار C_v برای کمانش ارتجاعی و غیر ارتجاعی برشی در این حالت نیز از روابط (۳) و (۴) بدست می‌آید.

۴-۹- مقاومت پس از کانش جان در برش

تمامی مطالب گفته شده در بحث مقاومت پس از کمانش جان در برش مربوط به تیرورقها دارای سخت کننده قائم در این حالت نیز اعتبار خود را حفظ میکنند. بنا به مطالب گفته شده عمل میدان کششی در پهنایی از جان می‌تواند ایجاد شود که مؤلفههای قائم نیروی کششی قطری بتوانند توسط سختکنندهها تحمل گردند. با فرض اینکه سخت کنندههای مورب قادر به تحمل مؤلفههای قائم نیروی کششی قطری هستند، (صحت این فرض را آزمایشات نشان می‌دهند) این محدوده مطابق شکل (۴) خواهد بود.



شکل ۴- محدودة عمل میدان کششی

با توجه به شکل (۴) عرض حوزه میدان کششی از رابطه زیر بدست می آید:

$$s = h.Cos\phi - (a - h.Cotg\sigma).Sin\phi \qquad (۱۸)$$

اگر مطابق روند اشاره شده در بخش قبل عمل کنیم، نهایتا به روابط زیر خواهیم رسید.

$$tg2\phi = \frac{1}{a/h - Cotg\alpha} \qquad (۱۹)$$

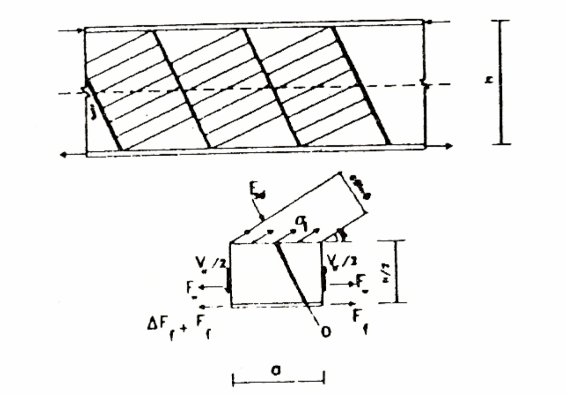
$$Sin2\phi = \frac{1}{\sqrt{1+(a/h - Cotg\alpha)^2}} \qquad (۲۰)$$

$$Sin^2\phi = \frac{1}{2}[1 - \frac{a/h}{\sqrt{1+(a/h - Cotg\alpha)^2}}] \qquad (۲۱)$$

$$V_u = F_y ht[\frac{C_v}{\sqrt{3}} + \frac{(1-C_v)}{2\sqrt{1+(a/h - Cotg\alpha)^2}}] \qquad (۲۲)$$

۴-۱۰- نیروی وارد بر سخت کنندههای مورب

برش جسم آزادی از جان تیرورق را مطابق شکل (۵) در نظر میگیریم. علت انتخاب چنین مقطعی قبلا شرح داده شد.



شکل ۵- نیروهای سخت کننده ناشی از عمل میدان کششی

با توجه به نمودار جسم آزاد شکل (۵) اگر تعادل نیروها را در جهت قائم بنویسیم با جاگذاری σ_t و $Sin^2\phi$ از روابط (۱۴) و (۲۱) خواهیم داشت:

$$F_s = \frac{F_y(1-C_v)at}{2.Sin\alpha}[1 - \frac{a/h - Cotg\alpha}{\sqrt{1+(a/h - Cotg\alpha)^2}}] \qquad (۲۳)$$

۴-۱۱- حالت استفاده از سخت کننده های مورب به همراه سخت کننده های قائم

تنش بحرانی کمانش برشی برای چنین حالتی نیز از رابطه ۱ بدست می‌آید. برای محاسبه k در این حالت نیز میتوان از نرمافزار Lusas استفاده نمود. مطابق آنچه که قبلا اشاره شده مقدار C_v برای کمانش ارتجاعی و غیر ارتجاعی برشی از روابط (۳) و (۴) بدست می آید.

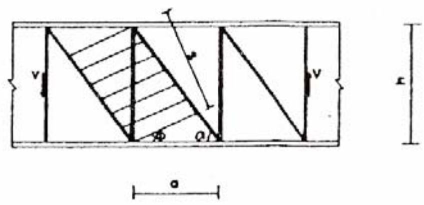
۴-۱۲- مقاومت پس از کمانش جان در برش

همانطور که قبلا گفته شد، عمل میدان کششی در پهنایی از جان می‌تواند ایجاد شود که مؤلفههای قائم نیروی کششی قطری بتوانند توسط سخت کنندهها تحمل گردند. در صورت استفاده از سخت کنندههای مورب با فرض اینکه این سخت کنندهها قادر به تحمل مؤلفه قائم نیروی کششی باشند (صحت این فرض را

آزمایشات نشان میدهند) این محدوده مطابق شکل (۶) خواهد بود:

با توجه به شکل (۶) داریم:

$$s = h.Cos\phi \qquad (۲۴)$$



شکل ۶- محدودهٔ عمل میدان کششی

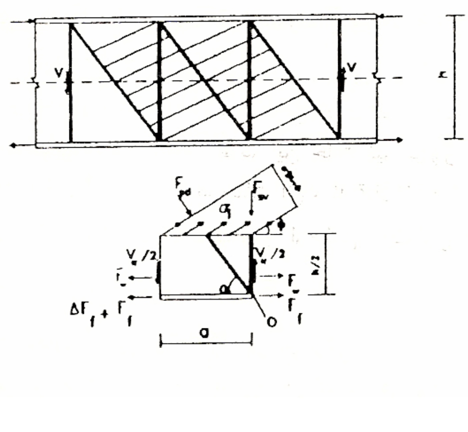
اگر مطابق روند اشاره شده در بخشهای قبل عمل کنیم، نهایتا به روابط زیر خواهیم رسید.

$$\phi = 45^\circ \qquad (۲۵)$$

$$V_u = F_y ht(\frac{C_v}{\sqrt{3}} + \frac{1-C_v}{2}) \qquad (۲۶)$$

۴-۱۳- نیروی وارد بر سخت کنندههای قائم و مورب

برش جسم آزادی از جان تیرورق را مطابق شکل (۷) در نظر میگیریم.



شکل ۷- نیروهای سخت کننده ناشی از عمل میدان کششی

علت انتخاب چنین مقطعی قبلاً شرح داده شد. اگر در نمودار آزاد شکل، تعادل نیروها را در جهت قائم بنویسیم با جاگذاری σ_t و ϕ از روابط (۱۴) و (۲۵) داریم:

$$F_{sd}.Sin\alpha + F_{sv} = \sigma_t taSin^2\phi \qquad (۲۷)$$

همانطورکه مشاهده میشود، در این رابطه دو مجهول وجود دارد. با توجه به اطلاعات موجود نمیتوان رابطه دیگری بین F_{sd} و F_{sv} بدست آورد. اما میتوان با انجام آزمایشات زیاد به رابطه بین F_{sd} و F_{sv} برحسب نسبتهای مختلف a/h و α رسید که از عهده این مقاله خارج است. بعنوان یک روش تقریبی میتوان سهم سخت کنندههای قائم از کل نیروی وارد بر سخت کنندهها را برابر حالتی در نظر گرفت که از سخت کنندههای مورب استفاده نشده باشد و بقیه نیروی کل وارد بر سخت کنندهها را سهم سخت کنندههای مورب درنظر گرفت.

۴-۱۴- مقایسه روابط بدست آمده و نتیجهگیری

همانطور که ملاحظه میشود، اگر در روابط (۲۲) و (۲۳) مقدار α را برابر 90° قرار دهیم، روابط (۱۶) و (۱۷) بدست میآید که حالت نظیر استفاده از سخت کنندههای قائم است. همچنین اگر در روابط (۲۲) و (۲۳) مقدار $Cotg\alpha$ را برابر a/h قرار دهیم، روابط (۲۶) و (۲۷) بدست میآید که حالت نظیر استفاده کننده های مورب به همراه سخت کنندههای قائم میباشد.

۵- کانش ورق جان در اثر تنشهای فشاری خمشی

۵-۱- حالت استفاده از سخت کننده های قائم

مقدار تنش بحرانی کمانش خمشی از رابطه زیر بدست میآید [5] :

$$F_{cr} = \frac{1898000k}{(h/t)^2} \qquad (۲۸)$$

که مقدار k برای تیرورقها برابر ۳۶/۴۶ در نظر گرفته میشود. بنابراین تنش بحرانی کمانش خمشی برای تیرورقها از رابطه (۲۹) بدست می آید [2].

$$F_{cr} = \frac{69201111}{(h/t)^2} \qquad (۲۹)$$

از آنجاییکه جان تیرورق درصد کمی از کل لنگر خمشی وارده بر تیرورق را تحمل میکند، بدین جهت صرفنظر کردن از منطقه انتقال کمانش ارتجاعی به غیر ارتجاعی تأثیر چندانی در تحلیل نخواهد کرد.

۲-۵- مقاومت پس از کمانش جان در خمش

قبلا نشان داده شد که تنش بحرانی کمانش خمشی برحسب h/t از رابطه (۲۹) بدست می آید. از حل این معادله برحسب h/t خواهیم داشت:

$$\frac{h}{t} \cong \frac{8300}{\sqrt{F_{cr}}} \qquad (۳۰)$$

یعنی اگر h/t از $\frac{8300}{\sqrt{F_{cr}}}$ کمتر باشد، جان تیرورق در اثر تنشهای خمشی کمانش نخواهد کرد. با تجاوز h/t از نسبت فوق ورق جان در خطر کمانش قرار می گیرد. اما وقوع چنین کمانشی به معنای این نیست که عمر تیرورق به پایان رسیده است. میتوان نشان داد در چنین حالتی تنش نهایی اسمی از رابطه ۳۰ بدست می آید [4]:

$$F_u = F_{cr}[1.0 - 0.0005\frac{A_w}{A_f}(\frac{h}{t} - \frac{8300}{\sqrt{F_{cr}}})] \qquad (۳۱)$$

۳-۵- حالت استفاده از سخت کنندههای مورب

مانند تمامی حالات کمانشی صفحه ای، تنش بحرانی کمانش ارتجاعی خمشی در این حالت نیز از رابطه (۲۹) بدست میآید. ضریب کمانش k در این حالت نیز برای نسبتهای مختلف a/h برای دو حالت گیردار و مفصلی بودن لبه های موازی بارگذاری و برای مقادیر مختلف با استفاده از نرم افزار $Lusas$ قابل محاسبه است.

۴-۵- مقاومت پس از کمانش جان در اثر خمش

همانطور که در بخش قبل ملاحظه شد، تنش بحرانی کمانش خمشی از رابطه (۲۹) بدست میآید. از حل این معادله برحسب h/t خواهیم داشت:

$$\frac{h}{t} = \frac{1378\sqrt{k}}{\sqrt{F_{cr}}} \qquad (۳۲)$$

تمامی مطالبی که در بخش ۲-۴- اشاره شد در این قسمت نیز اعتبار خود را حفظ خواهد کرد و تنها تفاوتی که در این دو حالت وجود دارد محدودیت نسبت h/t برای جلوگیری از کمانش خمشی است. اگر h/t نظیر حالت اخیر را در روابط بخش ۲-۴- قرار دهیم نهایتا به رابطه زیر خواهیم رسید:

$$F_u = F_{cr}[1.0 - 0.0005\frac{A_w}{A_f}(\frac{h}{t} - \frac{1378\sqrt{k}}{\sqrt{F_{cr}}})] \qquad (۳۳)$$

۵-۵- حالت استفاده از سخت کنندههای مورب بههمراه سخت کنندههای قائم

تنش بحرانی کمانش ارتجاعی در این حالت نیز از رابطه (۲۹) بدست میآید. در این حالت نیز میتوان برای محاسبه ضریب کمانش k از نرم افزار Lusas استفاده کرد.

۶-۵- مقاومت پس از کمانش جان در اثر خمش

مطابق توضیحات بخش ۴-۴- مقدار تنش نهایی اسمی خمشی در این حالت نیز از رابطه (۳۳) بدست خواهد آمد.

۶- کمانش ورق جان در اثر تنشهای فشاری ناشی از خمش بال فشاری (کمانش قائم بال فشاری)

۱-۶- حالت استفاده از سخت کنندههای قائم

میتوان نشان داد که در صورت برقراری رابطه زیر خطر کمانش قائم بال فشاری منتفی است [4]:

$$\frac{h}{t} \le \frac{984200}{\sqrt{F_y(F_y + 1160)}} \qquad (۳۴)$$

همانطور که گفته شد، در رابطه فوق اثر سخت کنندههای قائم در نظر گرفته نشده است. در حالیکه وجود سخت کنندهها باعث بالا رفتن ظرفیت کمانشی ورق جان میشود. برای در نظر گرفتن اثر این سخت کنندهها رابطه تجربی بصورت زیر ارائه شده است [4]:

$$a/h \le 1.5 \rightarrow \frac{h}{t} \le \frac{16770}{\sqrt{F_y}} \qquad (۳۵)$$

اگر از دو رابطه فوق محدودیت h/t را برای فولاد نرمه $(F_y = 2400)$ بدست آوریم خواهیم داشت:

$$\frac{h}{t} \le \frac{984200}{\sqrt{F_y(F_y + 1160)}} = 337 \qquad (۳۶)$$

$$\frac{h}{t} \le \frac{16770}{\sqrt{F_y}} = 342 \qquad (۳۷)$$

که ملاحظه می شود تفاوت چندانی باهم ندارند.

۶-۲- حالت استفاده از سخت کننده های مورب

همانطور که در بخش قبل اشاره شد، اگر اثر سخت کنندهها را در نظر نگیریم، محدودیت نسبت h/t برای جلوگیری از کمانش قائم بال فشاری با رابطه (۳۴) بیان میشود و ملاحظه شد که رابطهای که اثر سخت کنندههای قائم را در نظر میگیرد یک رابطه تجربی است که بر پایه آزمایشات بدست آمده است و از طرفی مقدار آن فرق چندانی با مقدار بدست آمده از رابطه ندارد. بنابراین میتوان به نفع اطمینان اثر سخت کنندههای مورب را در نظر نگرفت.

۶-۳- حالت استفاده از سخت کنندههای مورب بههمراه سخت کنندههای قائم

با توجـه به توضیحات قبلی در این حالت نیز میتوان رابطه (۳۴) را بعنوان محدودیت نسبت h/t برای جلوگیری از کمانش قائم بال فشاری مطرح نمود.

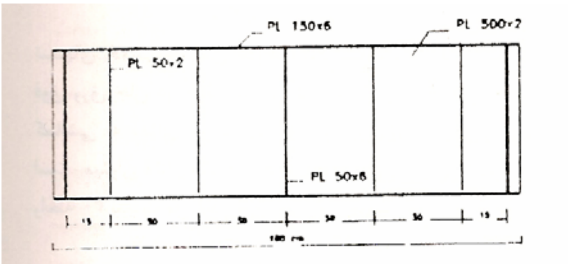
۷- آزمایشات

۷-۱- کلیات مربوط به آزمایشات

برای انجام آزمایشات سه نمونه ساخته شد. در نمونه اول از سخت کنندههای میانی قائم استفاده شد. در نمونه دوم علاوه بر سخت کنندههای قائم، سخت کنندههای مورب نیز به کار برده شدند و در نمونه سوم فقط از سخت کنندههای میانی مورب استفاده شد و در هر سه نمونه از سخت کنندههای باربر در محل تکیهگاهها و نیز محل اعمال بار متمرکز استفاده شد. لازم بذکر است که تمامی سخت کنندهها بصورت جفت در دو طرف جان نصب شدند. با توجه به کارایی دستگاههای موجود در آزمایشگاه با محدودیتهایی در انتخاب ابعاد نمونهها مواجه بودیم. به این ترتیب که دهانه تیرورقها را تا حداکثر 1.5^{m} و ارتفاع آنها را تا 0.5^{m} می توانستیم انتخاب کنیم. بنابراین دهانه و ارتفاع نمونههای با توجه به محدودیت دستگاهها انتخاب شدهاند. از طرفی از آنجائیکه هدف، بررسی مسأله کمانش برشی بود لازم بود که نسبت h/t جان بزرگ باشد تا خرابی جان در اثر کمانش برشی رخ بدهد نه در اثر جاری شدن برشی جان. بنابراین ضخامت جان تا حدامکان کم انتخاب شد که با توجه به مسائل اجرایی برابر 2^{mm} انتخاب شد. از طرفی ابعاد بالها طوری انتخاب شدند که بار نظیر حداکثر لنگر خمشی مقاوم مقطع از بار نظیر حداکثر نیروی برشی مقاوم مقطع بیشتر باشد. به عبارتی خرابی مقطع در اثر برش رخ بدهد. ابعاد سخت کنندهها نیز با توجه به نیروهای وارد بر آنها انتخاب شدند. قبل از انجام آزمایشات بر روی نمونهها دو غاب غلیظ آهک کشیده شد تا تغییر شکل و کمانش نمونهها حین آزمایش بهتر مشخص شود. هر سه نمونه تحت خمش قرار گرفتند. بارگذاری به تدریج از صفر شروع شده و تا لحظه گسیختگی نمونهها ادامه پیدا میکند. مدت زمان شروع بارگذاری نمونهها تا لحظه گسیختگی ۱۵ الی ۳۰ دقیقه طول میکشد.

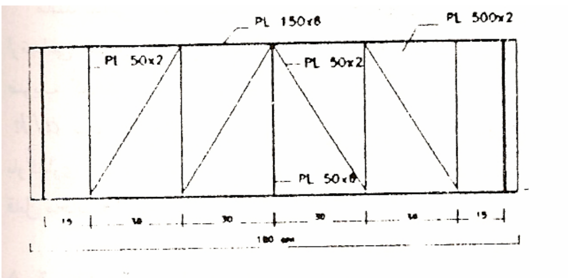
۷-۲- مشخصات هندسی نمونهها

در این قسمت مشخصات هندسی نمونهها آورده شده است. شکلهای (۸) تا (۱۰).



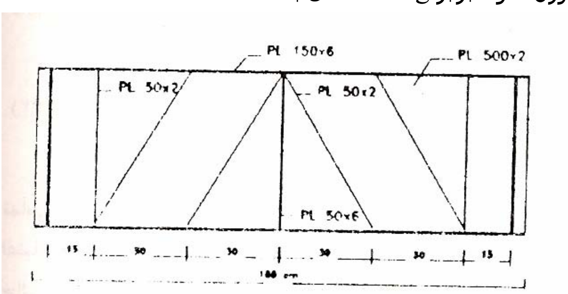
شکل ۸- مشخصات هندسی نمونهٔ شماره ۱

وزن نمونه برابر 45.1 kg می باشد.



شکل ۹- مشخصات هندسی نمونهٔ شماره ۲

وزن نمونه برابر 48.6 kg می باشد.



شکل ۱۰- مشخصات هندسی نمونهٔ شماره ۳

وزن نمونه برابر 47.1 kg می باشد.

۳-۷ مقایسه نتایج آزمایشات با روابط تئوری

در جدول (۱) نتایج آزمایشات و نیز نتایج تئوری پیشبینی شده نمونهها با استفاده از روابط بدست آمده آورده شده است.

جدول ۱- نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی نمونه ها و مقایسه آنها

ظرفیت باربری نمونه ها (ton)			
نمونه روشبررسی	باسختکننده قائم	باسختکننده قائم و مورب	باسختکننده مورب
نتیجهآزمایشگاهی	17.5	30.1	24.1
نتیجه تحلیلی	23.5	25.71	25.44
درصد اختلاف	25.5	17.08	5.3
علت اختلاف	اشکالدر جوشکاری و نحوة آزمایش	بازتوزیعتنشها پسازجاری شدنبرشیجان	خطاهای معمول آزمایش

همانطور که نتایج تحلیلی و آزمایشات نشان میدهند، به ازای افزایش جزئی وزن نمونهها در حالت استفاده از سخت کنندههای مورب، افزایش مقاومت زیادی را شاهد هستیم. بنابراین ضخامت جان لازم برای تیرورقی با سخت کنندههای مورب بمنظور حصول مقاومت برشی مشخص کمتر از ضخامت جان تیرورقی با سخت کنندههای قائم خواهد بود که باعث صرفهجوئی خواهد شد.

۸- نتیجه گیری کلی و ارائه پیشنهادات

همانطور که ملاحظه شده و نتایج آزمایشات نیز این مطلب را ثابت کرد، استفاده از سخت کنندههای مورب تأثیر قابل ملاحظهای در افزایش ظرفیت نهایی برشی تیرورق دارد. یعنی میتوان با استفاده از سخت کنندههای مورب، ضخامت ورق جان را کاهش داد؛ هر چند که در چنین حالتی وزن سخت کنندهها بالا میرود، ولی این افزایش وزن در مقایسه با کاهش وزن جان کم است. از طرفی در تمامی مراحل بررسی، سخت کنندههای مورب در امتدادی در نظر گرفته شدهاند که همامتداد با تنشهای فشاری ناشی از تنشهای برشی باشند. بنابراین در حالاتی که جهت نیروی برشی در یک مقطع تغییر میکند، (مثلا در جرثقیلها و پلها که بارهای متحرک را تحمل میکنند) نمیتوان از سخت کنندههای مورب استفاده کرد. در این حالات میتوان سخت کنندههای مورب را بطور ضربدری بکار برد که میتواند بعنوان یک پژوهش مجزا مورد بررسی قرار گیرد.

مراجع

[1] Basler, K. 1963 . Strength of Plate Girders in Shear. Transactions, ASCE, 128, Part II, 683-719.

[2] Basler, k. 1963. Strength of plate Girders in Bending. Transactions, ASCE, 128, part II, 655-682.

[3] Gaylord, E.H. & Gaylord, C.N. & Stallmeyer, J.E. 1992. Desing of Steel Structures. McGrow-Hill International Book Company.

[4] Salmon, C.G.& Johnson, J.E. 1980. Steel Structures. Design and Behavior. Harper & Rows. New York.

[5] Timoshonko, S.P. & Gere, J.M. 1961. Theory of Elastic Stability. McGrow-Hill International Book Company.

[۶] پوپوف، ایگور. ۱۳۷۳. مقاومت مصالح، ترجمه شاپور طاحانی، چاپ هشتم، ناشر: مؤلف.