



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



عنوان درس:

طراحی پیشرفته سازه های فولادی

Advanced Design of Steel Structures



فصل پنجم

مبانی نظری و آیین نامه ای مقاومت برشی تیر ورقها

Chapter 5:

Shear Strength of Plate Girders



Plate Girders

- ✓ A plate girder is a beam built up from plate elements to achieve a more efficient arrangement of material than is possible with rolled beams.
- ✓ Plate girders are economical where spans are long enough to permit saving in cost by proportioning for the particular requirements.
- ✓ Plate girders may be of riveted, bolted or welded construction.



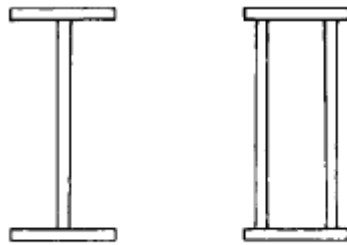
A plate girder cross section can take several forms. The usual configuration is a single web with two equal flanges, with all parts connected by welding.

The box section, which has two webs as well as two flanges, is a torsionally superior shape and can be used when large unbraced lengths are necessary.

Hybrid girders, in which the steel in the flanges is of a higher strength than that in the web or webs, are sometimes used



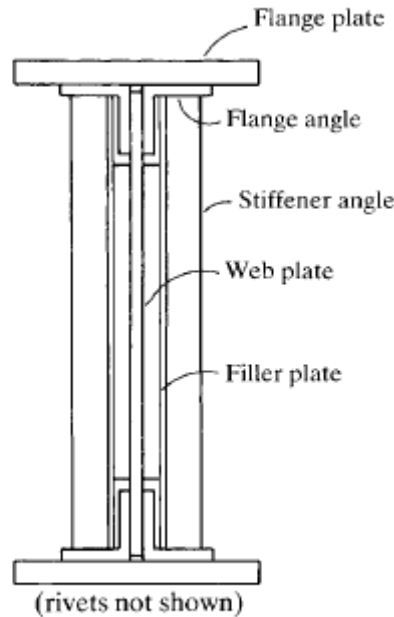
فصل پنجم: مبانی نظری و آیین نامه ای مقاومت برشی تیر ورقها



(a) Welded



(b) Riveted without Stiffeners



(c) Riveted with Stiffeners

It should be evident that the welded plate girder is far superior to the riveted or bolted girder in terms of simplicity and efficiency.

We consider only I-shaped welded plate girders in this section



فصل پنجم: مبانی نظری و آیین نامه ای مقاومت برشی تیر ورقها





فصل پنجم: مبانی نظری و آیین نامه ای مقاومت برشی تیر ورقها





فصل پنجم: مبانی نظری و آیین نامه ای مقاومت برشی تیر ورقها





فصل پنجم: مبانی نظری و آیین نامه ای مقاومت برشی تیر ورقها





فصل پنجم: مبانی نظری و آیین نامه ای مقاومت برشی تیر ورقها





فصل پنجم: مبانی نظری و آیین نامه ای مقاومت برشی تیر ورقها





In general, plate girders have the following advantages, particularly compared with trusses:

1. The price for fabrication is lower than for trusses, but it is higher than for rolled beam sections.
2. Erection is cheaper and faster than for trusses.
3. Built-up girders require smaller vertical clearances than trusses.
4. The built-up girder has fewer critical points for stresses than do trusses.



In general, plate girders have the following advantages, particularly compared with trusses:

5. A bad connection is not as serious as in a truss, where such a situation could spell disaster.
6. There is less danger of injury to built-up girders in an accident, compared with trusses. Should a truck run into a bridge plate girder, it would probably just bend it a little, but a similar accident with a bridge truss member could cause a broken member and, perhaps, failure.
7. A built-up girder is more easily painted than a truss



BUILT-UP GIRDER PROPORTIONS

Depth

The depths of built-up girders vary from about $1/6$ to $1/15$ of their spans, with average values of $1/10$ to $1/12$, depending on the particular conditions of the job.

One condition that may limit the proportions of the girder is the largest size that can be fabricated in the shop and shipped to the job. There may be a transportation problem such as clearance requirements that limit maximum depths to 10 or 12 ft along the shipping route.

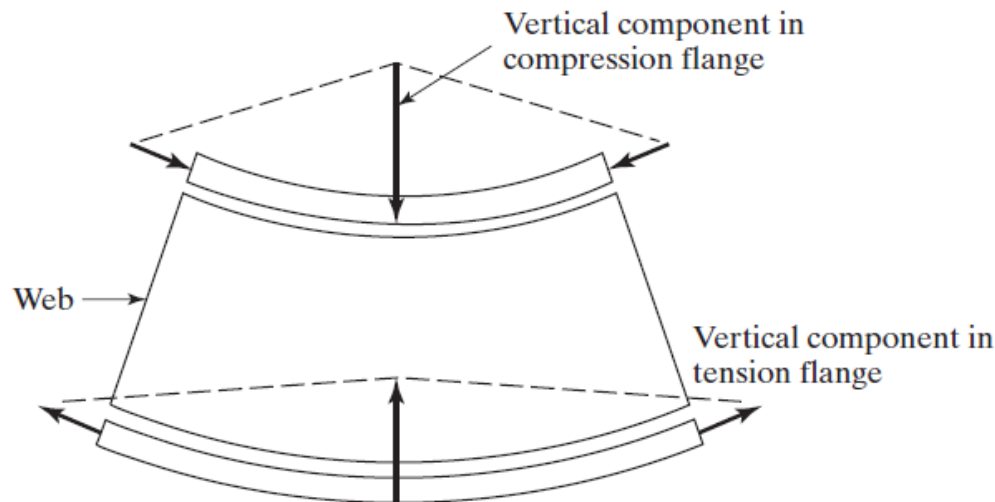


✓ طراحی تیرها بر اساس معیار خمش

✓ کنترل حالت حدی تسلیم (خمش پلاستیک)

✓ Compression Flange Yielding (CFY)

✓ Tension Flange Yielding (TFY)





طراحی تیرها بر اساس معیار خمش

✓ کمانش پیچشی-جانبی

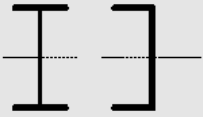



✓ Lateral Torsional Buckling (LTB)

✓ کمانش موضعی ورقهای مقطع

✓ Compression Flange Local Buckling (FLB)



Selection Table for the Application
of Chapter F Sections

| Section in Chapter F | Cross Section | Flange Slenderness | Web Slenderness | Limit States |
|-------------------------|---|-----------------------|--------------------|-----------------------|
| F2 |  | C | C | Y, LTB |
| F3 |  | NC, S | C | LTB, FLB |
| F4 |  | C, NC, S | C, NC | CFY, LTB, FLB, TFY |
| F5 |  | C, NC, S | S | CFY, LTB, FLB, TFY |



طراحی تیرها بر اساس معیار خمش

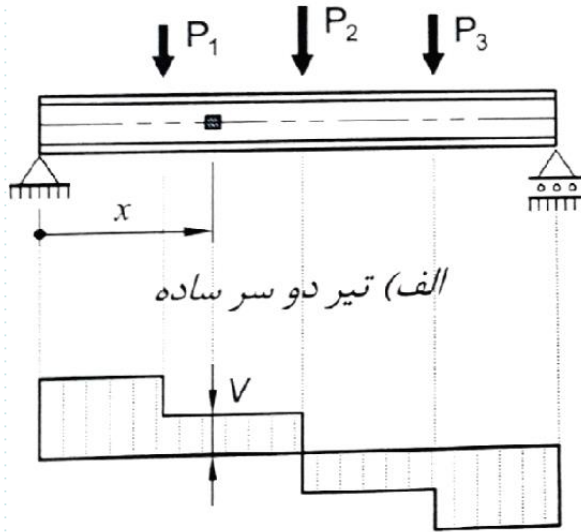
مبحث ۱۰ الزام می کند که بال مقاطع I شکل حتما باید شرایط فشردگی یا غیرفشرده را دارا باشد در حالی که جان مقطع می تواند فشرده، غیرفشرده و یا لاغر باشد.

اما AISC استفاده از ورقهای لاغر را برای بال مقطع هم مجاز می داند ولی روابطی را جهت کاهش شدید ظرفیت خمشی مقطع ارائه می کند



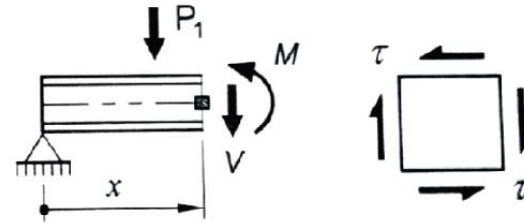
فصل پنجم: مبانی نظری و آیین نامه ای مقاومت برشی تیر ورقها

مبانی نظری مقاومت برشی تیر ورقها

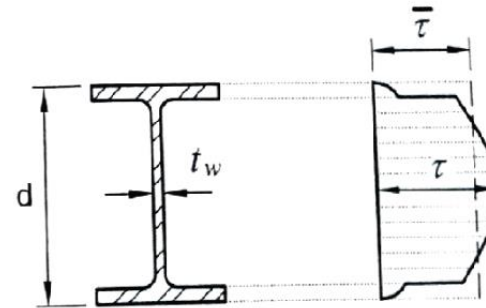


الف) تیر دو سر ساده

ب) نمودار نیروی برشی



پ) وضعیت تنش در نقطه مورد نظر (نقطه پررنگ)



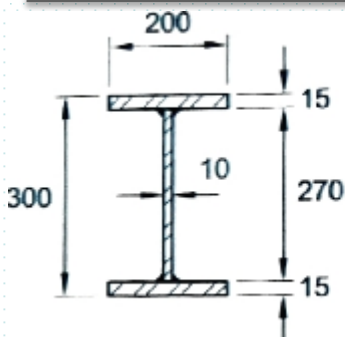
ت) توزیع واقعی تنش برشی در ارتفاع مقطع تیر
و تنش برشی متوسط

$$\tau = \frac{VQ}{It_w}$$



فصل پنجم: مبانی نظری و آیین نامه ای مقاومت برشی تیر ورقها

مبانی نظری مقاومت برشی تیر ورقها



$$V = 200 \text{ kN}$$

$$I = \frac{200 \times 300^3}{12} - \frac{190 \times 270^3}{12}$$

$$= 13835.25 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

الف) در محل محور خنثی:

$$Q_1 = \sum A_i \bar{y}_i = 200 \times 15 \times (150 - 7.5) + 135 \times 10 \times \frac{135}{2} = 518.625 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

$$\tau = \frac{V Q_1}{I t_w} = \frac{200 \times 10^3 \times 518.625 \times 10^3}{13835.25 \times 10^4 \times 10} = 74.97 \text{ MPa}$$

ب) در محل اتصال بال به جان و در داخل بال:

$$Q_2 = \sum A_i \bar{y}_i = 200 \times 15 \times (150 - 7.5) = 427.5 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

$$\tau = \frac{V Q_2}{I b_f} = \frac{200 \times 10^3 \times 427.5 \times 10^3}{13835.25 \times 10^4 \times 200} = 3.09 \text{ MPa}$$

پ) در محل اتصال بال به جان و در داخل جان:

$$\tau = \frac{V Q_2}{I t_w} = \frac{200 \times 10^3 \times 427.5 \times 10^3}{13835.25 \times 10^4 \times 10} = 61.80 \text{ MPa}$$

مجموع برش قابل تحمل توسط بال‌ها به‌طور میانگین و تقریبی از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$V_f = 2 \times \left[\frac{0 + 3.09}{2} \times 15 \times 200 \right] \times 10^{-3} = 9.27 \text{ kN}$$

و سهم برش قابل تحمل توسط جان برابر خواهد بود با:

$$V_w = 200 - 9.27 = 190.73 \text{ kN}$$

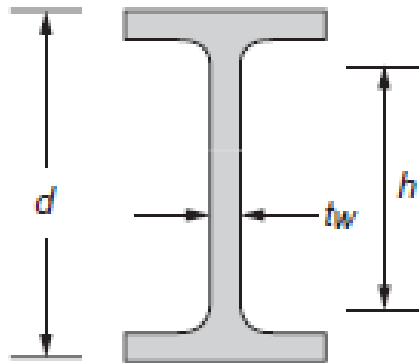


فصل پنجم: مبانی نظری و آیین نامه ای مقاومت برشی تیر ورقها

مبانی نظری مقاومت برشی تیر ورقها

$$\tau = f_v = \frac{V}{dt_w}$$

بر اساس معیارهای تسلیم $V_n = dt_w \tau_y$ حداکثر برش اسمی قابل تحمل





مبانی نظری مقاومت برشی تیر ورقها

$$\Rightarrow \sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2 = F_y^2$$

$$\Rightarrow \sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x\sigma_y + 3\tau_{xy}^2 = F_y^2$$

$$(\sigma_x = 0, \sigma_y = 0, \tau_{xy} = \tau_y) \Rightarrow 3\tau_y^2 = F_y^2$$

$$\Rightarrow \tau_y = \frac{1}{\sqrt{3}}F_y \cong 0.58F_y$$

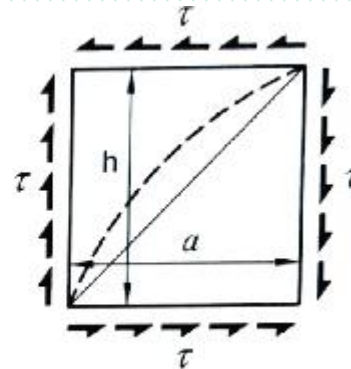
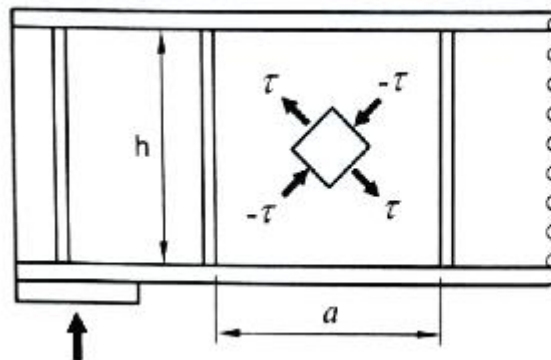
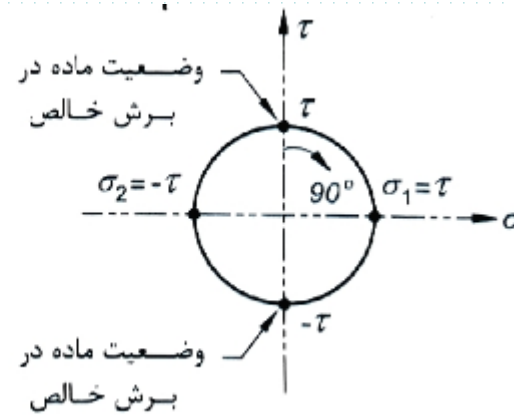
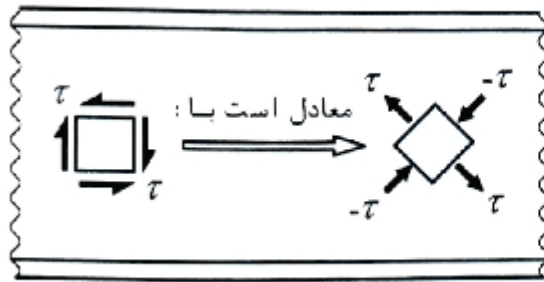
$$V_n = 0.6F_y dt_w = 0.6F_y A_w$$

مداخلت برش اسمی قابل تحمل مطابق AISC360



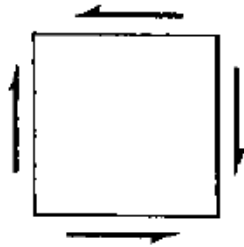
مبانی نظری کمانش برشی جان تیر ورقها تحت اثر برش

اگر ضخامت جان مقطع از یک حد مشخصی نازکتر باشد، قبل از رخ دادن تسلیم برشی در جان مقطع ممکن است ورق جان دچار کمانش برشی و ناپایداری موضعی گردد.

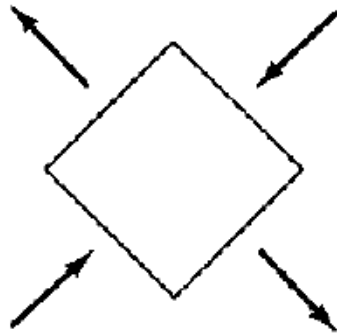




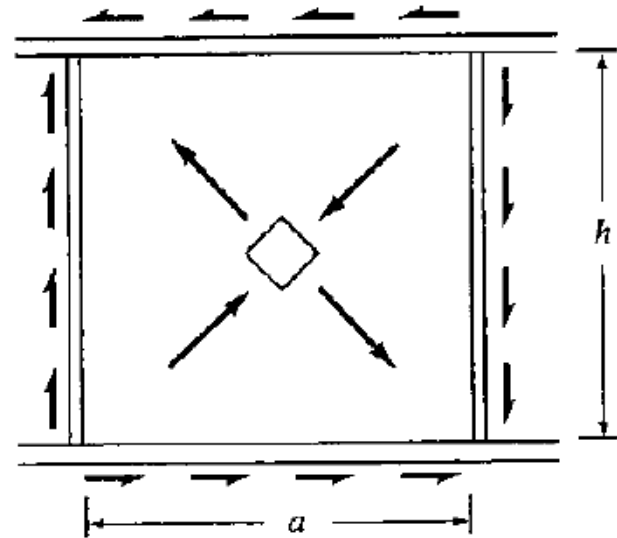
مبانی نظری کمانش برشی جان تیر ورقها تحت اثر برش



(a) Element in pure shear



(b) Principal stress on element in pure shear



(c) Principal stress on panel in pure shear

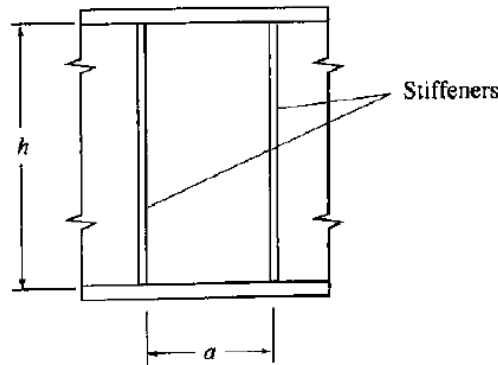
$$\tau_{cr} = \frac{\pi^2 k_v E}{12(1 - \nu^2)(h/t_w)^2}$$



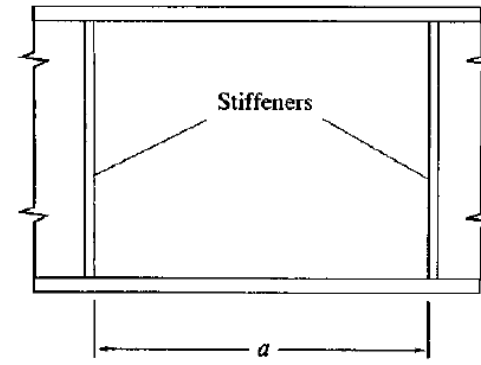
مبانی نظری کمانش برشی جان تیر ورقها تحت اثر برش

$$\tau_{cr} = \frac{\pi^2 k_v E}{12(1 - \nu^2)(h/t_w)^2}$$

k_v web plate shear buckling coefficient.



(a) $\frac{a}{h} < 1$



(b) $\frac{a}{h} > 1$

$$k_v = \begin{cases} 5.34 + \frac{4}{(a/h)^2} & \frac{a}{h} \geq 1.0 \\ 4 + \frac{5.34}{(a/h)^2} & \frac{a}{h} < 1.0 \end{cases}$$



مبانی نظری کمانش برشی جان تیر ورقها تحت اثر برش

$$\tau_{cr} = \frac{\pi^2 k_v E}{12(1 - \nu^2)(h/t_w)^2}$$

(2) The web plate shear buckling coefficient, k_v , is determined as follows:

(i) For webs without transverse stiffeners

$$k_v = 5.34$$

(ii) For webs with transverse stiffeners

$$k_v = 5 + \frac{5}{(a/h)^2} \quad (G2-5)$$

$$= 5.34 \text{ when } a/h > 3.0 \longrightarrow \text{AISC360-10} > > > 5$$

where

a = clear distance between transverse stiffeners, in. (mm)



فصل پنجم: مبانی نظری و آیین نامه ای مقاومت برشی تیر ورقها

مبانی نظری کمانش برشی جان تیر ورقها تحت اثر برش

$$C_v = \frac{\tau_{cr}}{\tau_y} = \frac{\pi^2 E k_v}{\tau_y (12)(1 - \mu^2)(h/t)^2} \quad \mu = 0.3, \tau_y = 0.6 F_{yw}$$

$$C_v = \frac{\tau_{cr}}{\tau_y} = \frac{\pi^2 k_v E}{0.6 F_y \times 12 (1 - 0.3^2) (\frac{h}{t_w})^2} = \frac{1.51 k_v E}{(\frac{h}{t_w})^2 F_y}$$

As in all stability situations, residual stresses and imperfections cause inelastic buckling as critical stresses approach yield stress.

کمانش برشی جان از نوع کمانش برشی غیر الاستیک

$$\tau_{cr} = \sqrt{\tau_{prop. \text{ limit}} \times \tau_{cr \text{ ideal elastic}}}$$

The proportional limit is taken as $0.8 \tau_y$.

$$C_v = \frac{\tau_{cr}}{\tau_y} = \sqrt{0.8 \times \frac{1.51 k_v E}{(h/t_w)^2 F_y}} = \frac{1.1 \sqrt{k_v E / F_y}}{(h/t_w)}$$



مبانی نظری کمانش برشی جان تیر ورقها تحت اثر برش

شرط عدم وقوع کمانش برشی در جان این است که ضریب C_v بزرگتر یا مساوی یک باشد:

$$C_v = \frac{\tau_{cr}}{\tau_y} = \sqrt{0.8 \times \frac{1.51 k_v E}{(h/t_w)^2 F_y}} = \frac{1.1 \sqrt{k_v E / F_y}}{(h/t_w)} \geq 1 \quad \longrightarrow \quad \frac{h}{t_w} \leq 1.1 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}}$$

اگر دو ضریب C_v بدست آمده از روابط قبل را با هم برابر قرار دهیم مرز کمانش برشی الاستیک و غیر الاستیک به دست می آید:

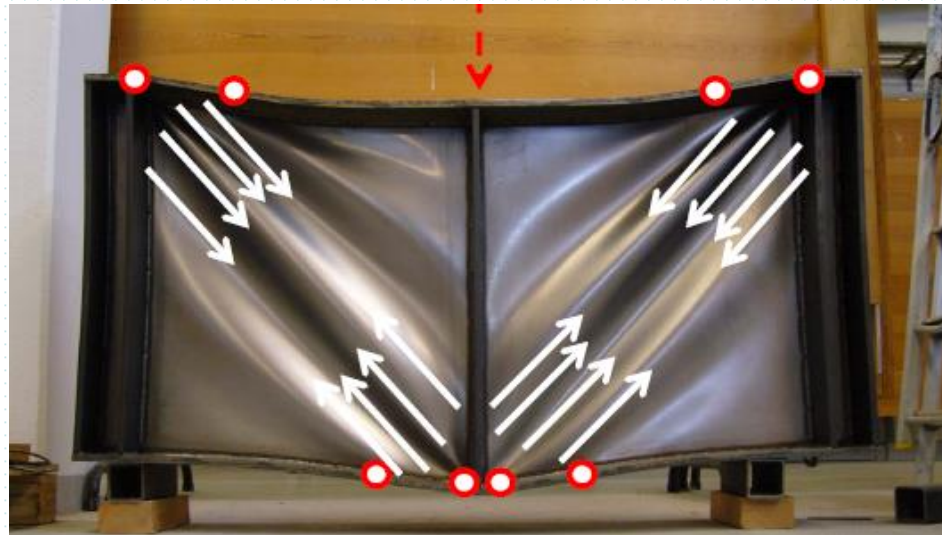
$$\frac{1.51 k_v E}{(h/t_w)^2 F_y} = \frac{1.1 \sqrt{k_v E / F_y}}{(h/t_w)} \Rightarrow \frac{h}{t_w} = \frac{1.51 k_v E / F_y}{1.1 \sqrt{k_v E / F_y}} \quad \longrightarrow \quad \frac{h}{t_w} = 1.37 \sqrt{k_v E / F_y}$$



فصل پنجم: مبانی نظری و آیین نامه ای مقاومت برشی تیر ورقها

مبانی آیین نامه ای طراحی اعضا برای برش بدون توجه به عمل میدان کششی

$$V_n = 0.6F_y A_w C_{v1}$$





مبانی آیین نامه ای طراحی اعضا برای برش بدون توجه به عمل میدان کششی

$$V_n = 0.6F_y A_w C_{v1}$$

(b) For all other I-shaped members and channels

(1) The web shear strength coefficient, C_{v1} , is determined as follows:

(i) When $h / t_w \leq 1.10\sqrt{k_v E / F_y}$

$$C_{v1} = 1.0 \quad (G2-3)$$

where

h = for built-up welded sections, the clear distance between flanges,
in. (mm)

= for built-up bolted sections, the distance between fastener lines,
in. (mm)

(ii) When $h / t_w > 1.10\sqrt{k_v E / F_y}$

$$C_{v1} = \frac{1.10\sqrt{k_v E / F_y}}{h / t_w} \quad (G2-4)$$



فصل پنجم: مبانی نظری و آیین نامه ای مقاومت برشی تیر ورقها

مبانی آیین نامه ای طراحی اعضا برای برش بدون توجه به عمل میدان کششی

$$V_n = 0.6F_y A_w C_{v1}$$

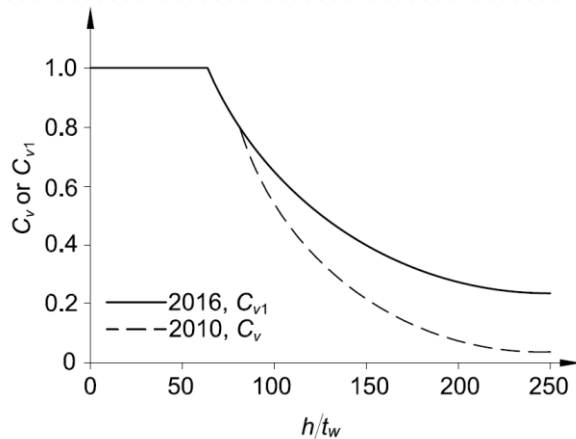
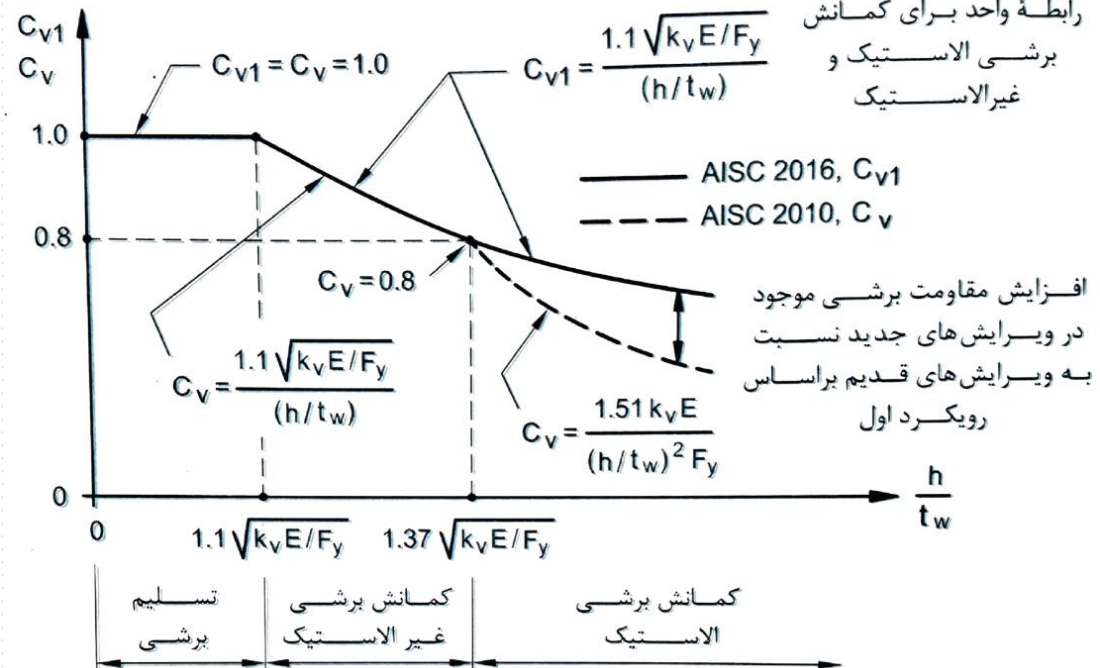
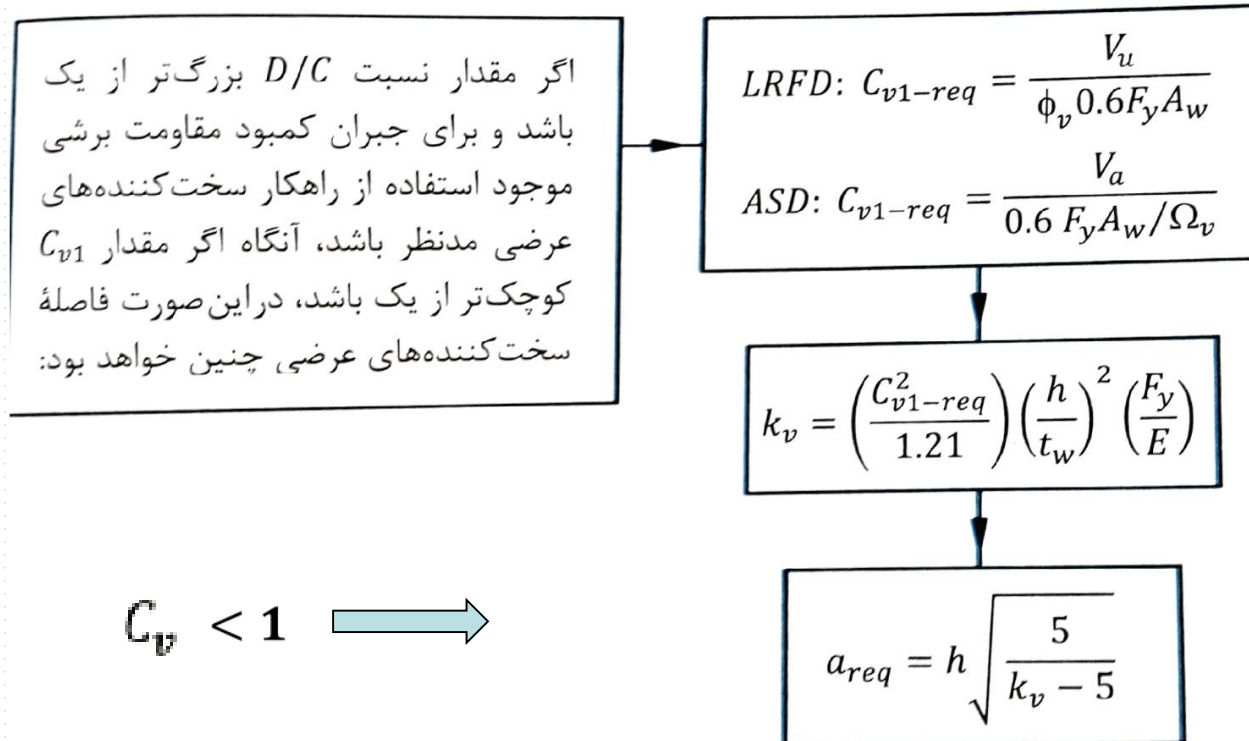


Fig. C-G2.1. Shear buckling coefficient for $F_y = 50$ ksi (345 MPa).



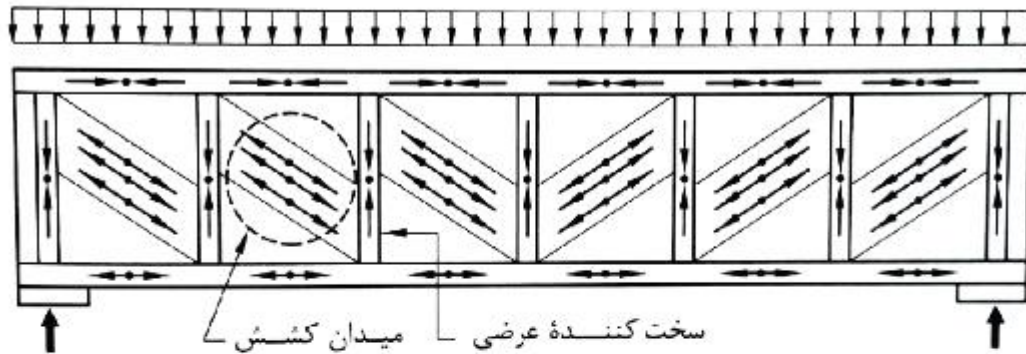


مبانی آیین نامه ای طراحی اعضا برای برش بدون توجه به عمل میدان کششی

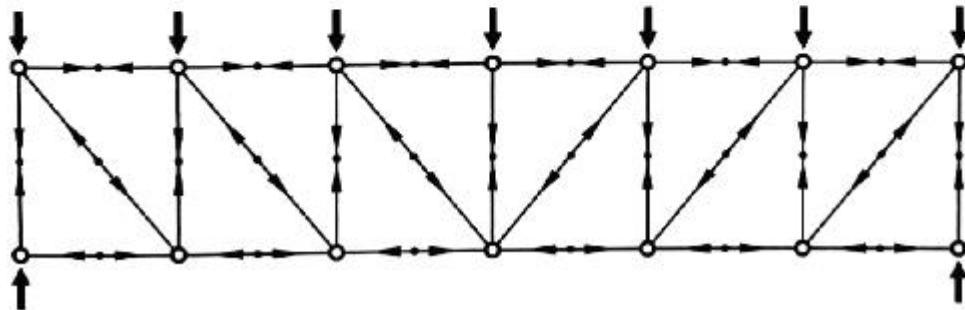




مبانی نظری مقاومت برشی اسمی تیرورق با توجه به عمل میدان کششی



الف) پدید آمدن میدان کشش در حداثیل بین سخت کننده های عرضی



ب) مشابهت عملکرد میدان های کششی در جان تیرورق با عملکرد یک خرپا

✓ اگر در جان تیرورق سخت کننده های عرضی تعبیه شود و فاصله آنها از یک به مشفصی بیشتر نباشد، پس از رسیدن تنشهای برشی در ورق جان به هر نظیر کمانش برشی ورق جان همپنان به باربری خود ادامه می دهد.

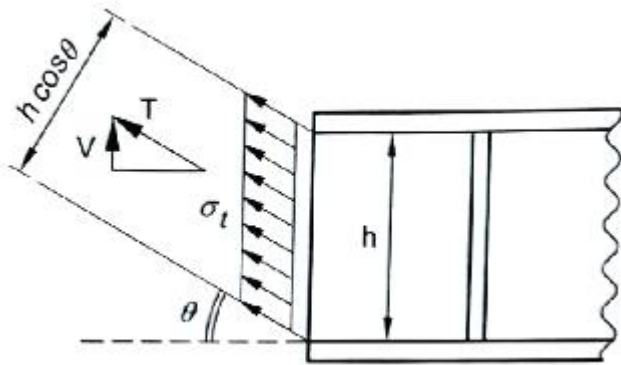
✓ تیرورق پس از کمانش جان به واسطه وجود سخت کننده های عرضی و نیز کشش ایجاد شده در امتداد مایل مانند یک خرپا عمل می کند.



فصل پنجم: مبانی نظری و آیین نامه ای مقاومت برشی تیر ورقها

مبانی نظری مقاومت برشی اسمی تیرورق **با توجه** به عمل میدان کششی

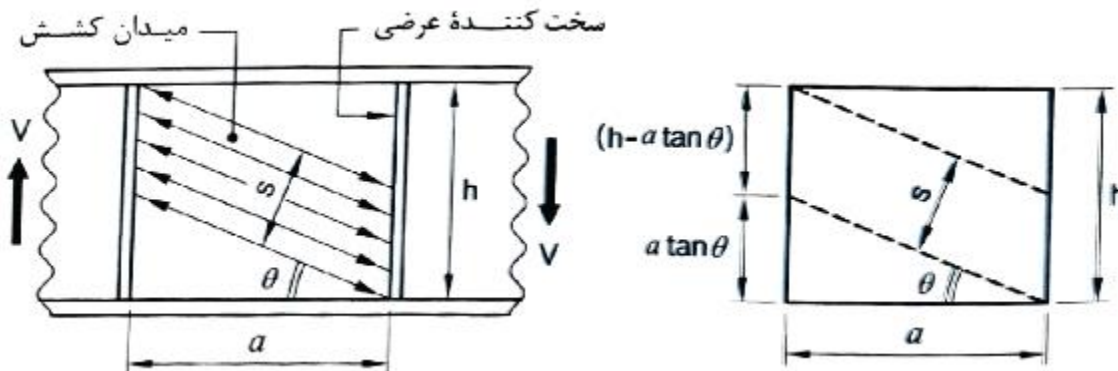
$$= V_{cr} + V_{tf} = \tau_y A_w C_v + V_{tf}$$



Membrane stresses in tension-field action.

$$T = \sigma_t \times h \times \cos \theta = \sigma_t h \cos \theta$$

✓ چون بال تیرورق سفتی برشی ناپیزی دارد توسعه میدان کششی فقط می تواند در محدوده ای از جان صورت گیرد

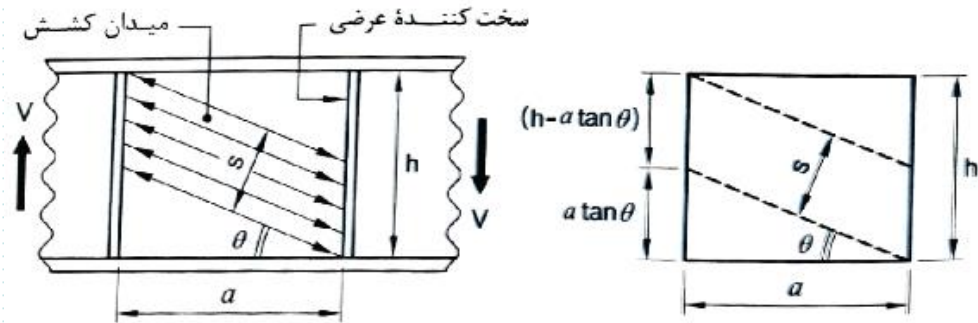




فصل پنجم: مبانی نظری و آیین نامه ای مقاومت برشی تیر ورقها

مبانی نظری مقاومت برشی اسمی تیرورق **با توجه** به عمل میدان کششی

$$V_n = V_{cr} + V_{tf} = \tau_y A_w C_v + \textcircled{V_{tf}}$$



نیروی کششی موثر T_1 ناشی از ایجاد میدان کششی در جان تیر ورق:

$$T_1 = \sigma_t t_w s = \sigma_t t_w (h - a \tan \theta) \cos \theta = \sigma_t t_w (h \cos \theta - a \sin \theta)$$

مولفه قائم نیروی کششی T_1 که به صورت فشاری توسط سفت کننده های عرضی تحمل می شود:

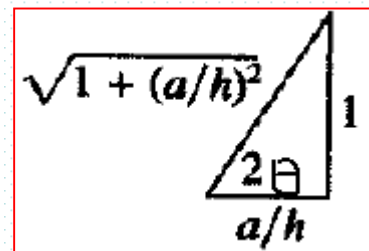
$$V_{ft1} = T_1 \sin \theta = \sigma_t t_w (h \cos \theta - a \sin \theta) \sin \theta = \sigma_t t_w \left(\frac{h}{2} \sin 2\theta - a \sin^2 \theta \right)$$



مبانی نظری مقاومت برشی اسمی تیر ورق با توجه به عمل میدان کششی

برای تعیین امتداد بهینه برای توسعه حوزه کشش در جان تیر ورق کافی است از رابطه V_{ft1} نسبت به θ مشتق گرفته ی برابر صفر قرار داده می شود:

$$\begin{aligned}\frac{dV_{tf1}}{d\theta} = 0 &\Rightarrow \frac{h}{2} \times 2\cos 2\theta - 2a \sin \theta \times \cos \theta = 0 \\ &\Rightarrow h \cos 2\theta - a \sin 2\theta = 0 \\ &\Rightarrow \tan 2\theta = h/a\end{aligned}$$



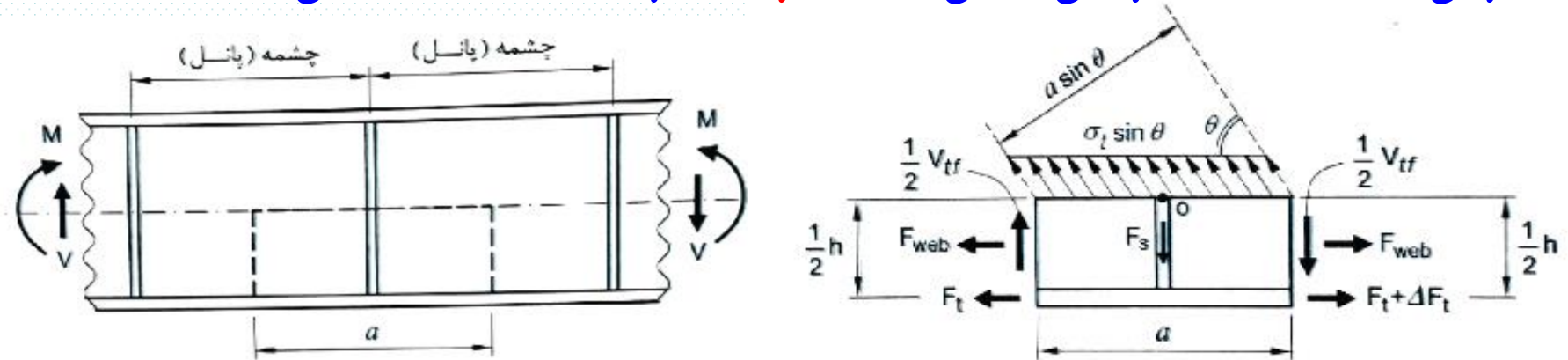
$$\sin 2\theta = \frac{1}{\sqrt{1 + (a/h)^2}}$$

$$\sin^2 \theta = \frac{1}{2} (1 - \cos 2\theta) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{(a/h)}{\sqrt{1 + (a/h)^2}} \right)$$

$$V_{tf1} = \frac{1}{2} \sigma_t h t_w \left[\sqrt{1 + (a/h)^2} - \frac{a}{h} \right]$$



مبانی نظری مقاومت برشی اسمی تیرورق با توجه به عمل میدان کششی



$$\sum F_x = 0 \Rightarrow \Delta F_t = (\sigma_t \sin \theta \times a t_w) \cos \theta = \frac{1}{2} \sigma_t a t_w \sin 2\theta$$

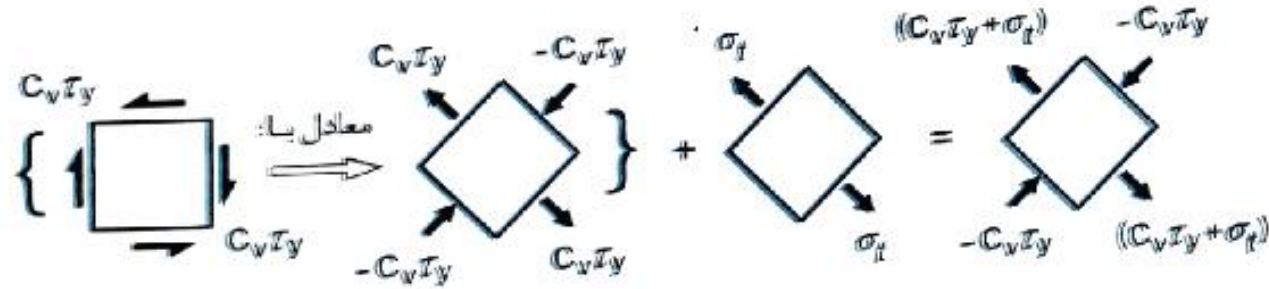
$$\sum M_0 = 0 \Rightarrow \frac{1}{2} V_{tf} \times a = \Delta F_t \times \frac{h}{2} \Rightarrow V_{tf} = \frac{h}{a} \Delta F_t$$

$$V_{tf} = \frac{1}{2} h t_w \sigma_t \sin 2\theta$$

$$V_{tf} = \frac{1}{2} h t_w \sigma_t \left[\frac{1}{\sqrt{1 + (a/h)^2}} \right]$$



مبانی نظری مقاومت برشی اسمی تیرورق **با توجه** به عمل میدان کششی



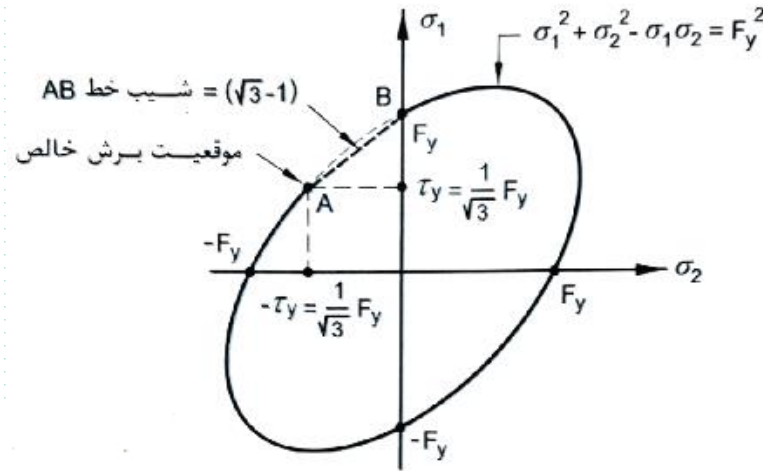
برای تعیین مقدار σ_t کافی است از یکی از معیارهای تسلیم ماده استفاده شود :

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2 = F_y^2$$



فصل پنجم: مبانی نظری و آیین نامه ای مقاومت برشی تیر ورقها

مبانی نظری مقاومت برشی اسمی تیرورق **با توجه** به عمل میدان کششی



$$\text{شیب} = \frac{F_y \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}}\right)}{(F_y/\sqrt{3})} = (\sqrt{3} - 1)$$

$$\sigma_1 = (\sqrt{3} - 1) \sigma_2 + F_y$$

$$\sigma_1 = \frac{F_y}{\sqrt{3}} C_v + \sigma_t$$

$$\sigma_2 = -\frac{F_y}{\sqrt{3}} C_v$$



$$\begin{aligned} \frac{F_y}{\sqrt{3}} C_v + \sigma_t &= (\sqrt{3} - 1) \left(\frac{-F_y}{\sqrt{3}} C_v \right) + F_y \\ \sigma_t &= F_y (1 - C_v) \end{aligned}$$



فصل پنجم: مبانی نظری و آیین نامه ای مقاومت برشی تیر ورقها

مبانی نظری مقاومت برشی اسمی تیرورق **با توجه** به عمل میدان کششی

$$V_n = V_{cr} + V_{tf} = \tau_y A_w C_v + V_{tf}$$

$$V_n = \tau_y A_w C_v + V_{tf}$$

$$\tau_y = \frac{1}{\sqrt{3}} F_y$$

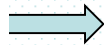
$$V_{tf} = \frac{1}{2} h t_w \sigma_t \left[\frac{1}{\sqrt{1 + (a/h)^2}} \right]$$

$$\sigma_t = F_y (1 - C_v)$$

$$V_n = \frac{1}{\sqrt{3}} F_y A_w C_v + \frac{1}{2} h t_w F_y (1 - C_v) \sqrt{1 + (a/h)^2}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{3}} F_y A_w \left[C_v + \frac{\sqrt{3}(1 - C_v)}{2\sqrt{1 + (a/h)^2}} \times \frac{h t_w}{A_w} \right]$$

$$= 0.577 F_y A_w \left[C_v + \frac{(1 - C_v)}{1.15\sqrt{1 + (a/h)^2}} \times \frac{h t_w}{A_w} \right]$$



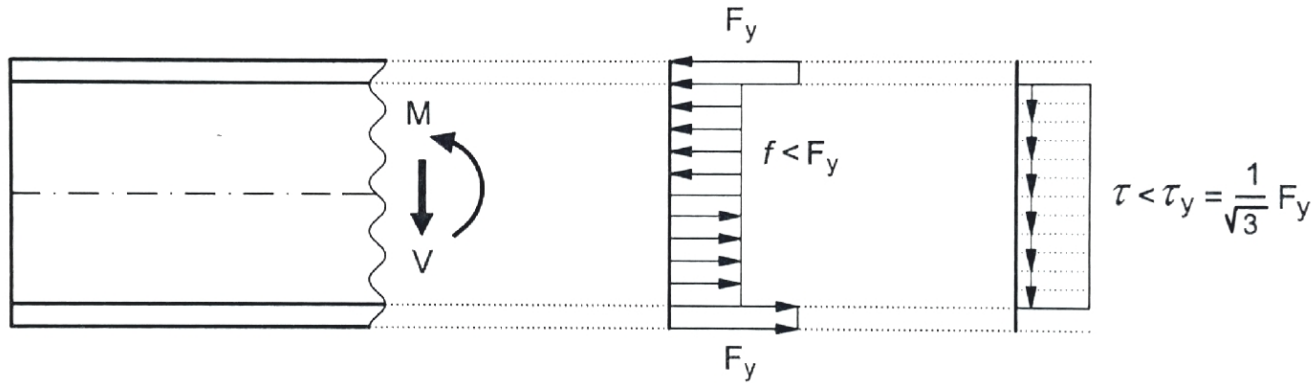
$$V_n = 0.6 F_y A_w \left[C_v + \frac{(1 - C_v)}{1.15\sqrt{1 + (a/h)^2}} \right]$$



فصل پنجم: مبانی نظری و آیین نامه ای مقاومت برشی تیر ورقها

مبانی نظری اندرکنش فمش و برش در تیر ورقها

روش اول: تسلیم کامل بال



الف) بخشی از طول تیر

ب) توزیع تنش عمودی

پ) توزیع تنش برشی

توزیع فرضی تنش های عمودی و برشی بر اساس مفهوم تسلیم کامل بال



مبانی نظری اندرکنش فمش و برش در تیر ورقها

چنانچه مقاومت‌های اسمی مقطع در حالت عدم حضور هم‌زمان M و V در مقطع با M_n و V_n و مقاومت‌های اسمی مقطع در حالت حضور هم‌زمان M و V در مقطع با M'_n و V'_n نمایش داده شوند، آنگاه برای رابطه‌سازی بین M'_n و V'_n می‌توان به شرح زیر عمل نمود:

$$V'_n = \tau A_w$$

$$V_n = \tau_y A_w = \frac{F_y}{\sqrt{3}} A_w$$

$$\frac{V'_n}{V_n} = \frac{\tau}{(F_y/\sqrt{3})} = \sqrt{3} \frac{\tau}{F_y} \Rightarrow \tau = \frac{1}{\sqrt{3}} F_y \left(\frac{V'_n}{V_n} \right)$$

از سوی دیگر اگر جان تیر لاغر و ظریف باشد، در این صورت مقاومت خمشی اسمی نظیر حالت حدی تسلیم آن را می‌توان برابر M_y فرض نمود. پس:

$$M_n = M_y = F_y S \cong F_y \left(A_f h + \frac{t_w h^2}{6} \right) = F_y A_f h \left(1 + \frac{A_w}{6A_f} \right)$$

$$M'_n \cong F_y A_f h + f \times \frac{t_w h^2}{4} = F_y A_f h \left(1 + \frac{f}{F_y} \frac{A_w}{4A_f} \right)$$



مبانی نظری اندرکنش فمش و برش در تیرورقها

بر اساس معیار تسلیم فان میززا رابطه بین f و τ می تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$f^2 + 3\tau^2 = F_y^2 \Rightarrow f = \sqrt{F_y^2 - 3\tau^2}$$

$$f = \sqrt{F_y^2 - F_y^2 \left(\frac{V'_n}{V_n}\right)^2} = F_y \sqrt{1 - (V'_n/V_n)^2}$$

$$M'_n = F_y A_f h \left(1 + \frac{A_w}{4A_f} \sqrt{1 - (V'_n/V_n)^2} \right)$$

$$\frac{M'_n}{M_n} = \frac{1 + \frac{A_w}{4A_f} \sqrt{1 - (V'_n/V_n)^2}}{\left(1 + \frac{A_w}{6A_f} \right)}$$



مبانی نظری اندرکنش فمش و برش در تیرورقها

اگر نسبت A_w/A_f به طور محافظه کارانه برابر دو فرض شود، در این صورت رابطه اندرکنش M و V به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{4}{3} \frac{M'_n}{M_n} - \frac{1}{2} \sqrt{1 - (V'_n/V_n)^2} = 1$$

مقدار V'_n/V_n برای آنکه M'_n دقیقاً با M_n یکسان باشد

$$\frac{4}{3} \times 1 - \frac{1}{2} \sqrt{1 - (V'_n/V_n)^2} = 1 \Rightarrow \frac{V'_n}{V_n} = \frac{\sqrt{5}}{3} \cong 0.75$$

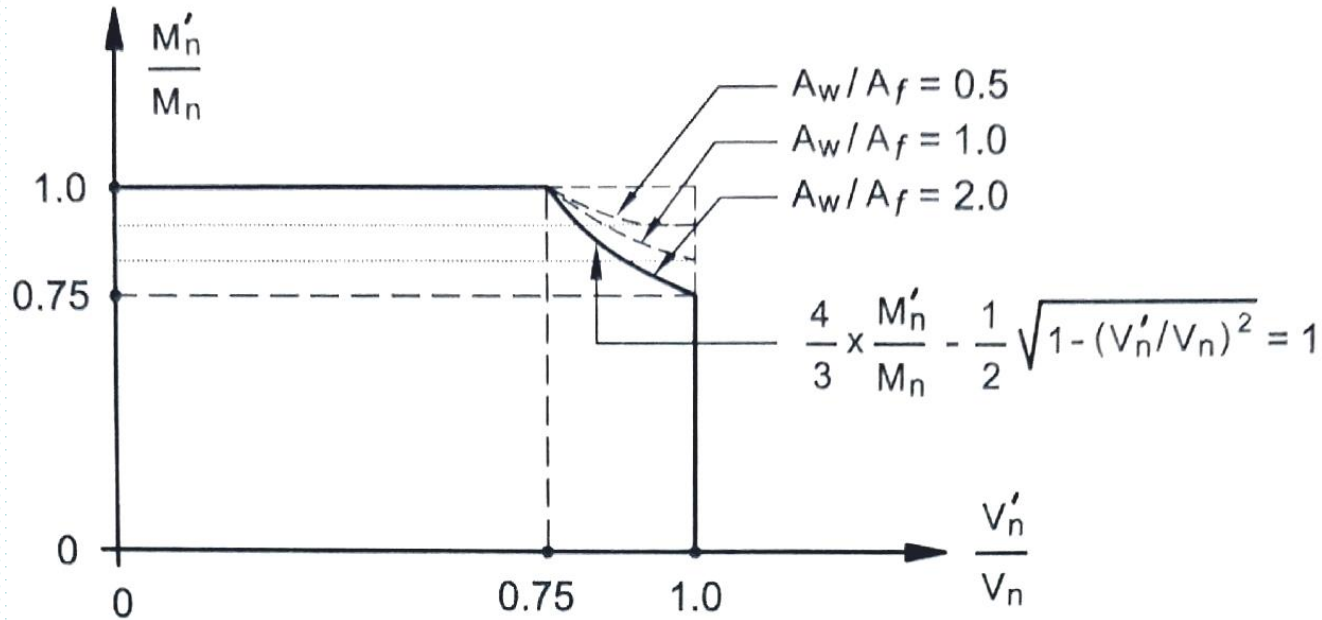
از سوی دیگر مقدار M'_n/M_n برای آنکه V'_n دقیقاً با V_n یکسان باشد، از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\frac{4}{3} \frac{M'_n}{M_n} - \frac{1}{2} \times 0 = 1 \Rightarrow \frac{M'_n}{M_n} = \frac{3}{4} = 0.75$$



فصل پنجم: مبانی نظری و آیین نامه ای مقاومت برشی تیر ورقها

مبانی نظری اندرکنش فمش و برش در تیر ورقها

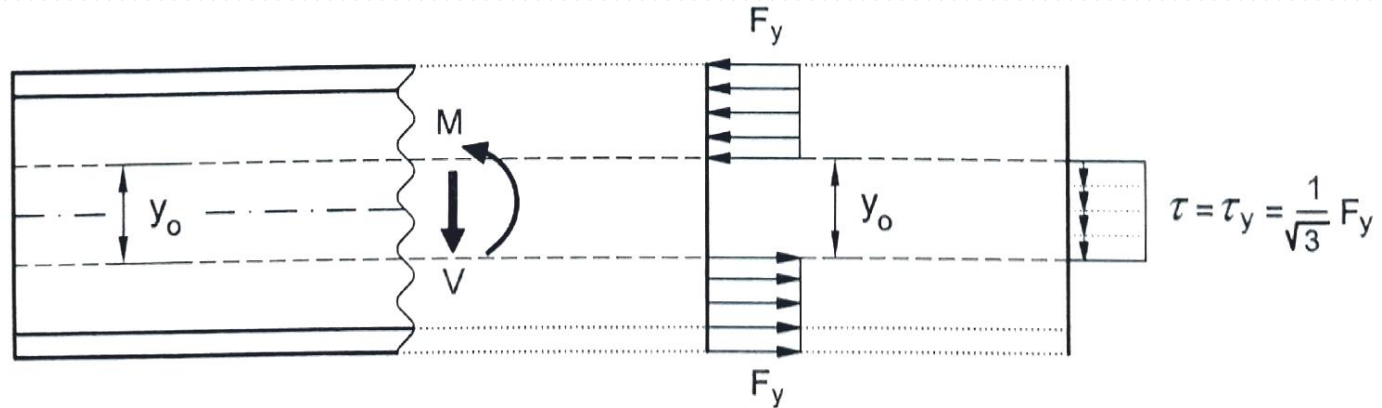


منحنی تغییرات $\frac{M'_n}{M_n}$ بر حسب $\frac{V'_n}{V_n}$ بر اساس تسلیم کامل بال و با فرض $\frac{A_w}{A_f} = 2$



مبانی نظری اندرکنش فمش و برش در تیر ورقها

روش دوم: تسلیم کامل بال به همراه بخشی از جان و تسلیم برشی بخش باقیمانده جان



الف) بخشی از طول تیر

ب) توزیع تنش عمودی پ) توزیع تنش برشی

توزیع فرضی تنش‌های عمودی و برشی در مقطع بر اساس تسلیم کامل بال به همراه بخشی از جان و تسلیم برشی بخش باقیمانده جان



مبانی نظری اندرکنش فمش و برش در تیرورقها

چنانچه مقاومت‌های اسمی مقطع در حالت عدم حضور همزمان M و V در مقطع با M_n و V_n و مقاومت‌های اسمی مقطع در حالت حضور همزمان M و V در مقطع با M'_n و V'_n نمایش داده شوند،

$$V'_n = \tau_y y_0 t_w$$

$$V_n = \tau_y h t_w$$

$$\frac{V'_n}{V_n} = \frac{y_0}{h} \Rightarrow y_0 = \left(\frac{V'_n}{V_n} \right) h$$

$$M'_n \cong F_y A_f h + F_y \left[\frac{t_w h^2}{4} - \frac{t_w y_0^2}{4} \right]$$

چنانچه در رابطه به جای $h t_w$ از A_w و به جای y_0 از رابطه

$$M'_n = F_y A_f h \left\{ 1 + \frac{1}{4} \frac{A_w}{A_f} \left[1 - \left(\frac{V'_n}{V_n} \right)^2 \right] \right\}$$



فصل پنجم: مبانی نظری و آیین نامه ای مقاومت برشی تیر ورقها

مبانی نظری اندرکنش فمش و برش در تیر ورقها

از سوی دیگر اگر تیر دارای جان لاغر باشد، در این صورت در حالت عدم حضور همزمان M و V در مقطع، M_n برابر خواهد بود با:

$$M_n = M_y \cong F_y A_f h + F_y \frac{t_w h^2}{6} = F_y A_f h \left(1 + \frac{A_w}{6A_f} \right)$$

چنانچه نسبت A_w/A_f با a_r نمایش داده شود

$$\frac{M'_n}{M_n} = \frac{1 + \frac{a_r}{4} \left[1 - \left(\frac{V'_n}{V_n} \right)^2 \right]}{\left(1 + \frac{a_r}{6} \right)}$$

مقدار V'_n/V_n برای آنکه M'_n دقیقاً با M_n یکسان باشد، به ازای کلیه مقادیر a_r

$$1 + \frac{a_r}{6} = 1 + \frac{a_r}{4} \left[1 - \left(\frac{V'_n}{V_n} \right)^2 \right] \Rightarrow \left(\frac{V'_n}{V_n} \right) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cong 0.6$$

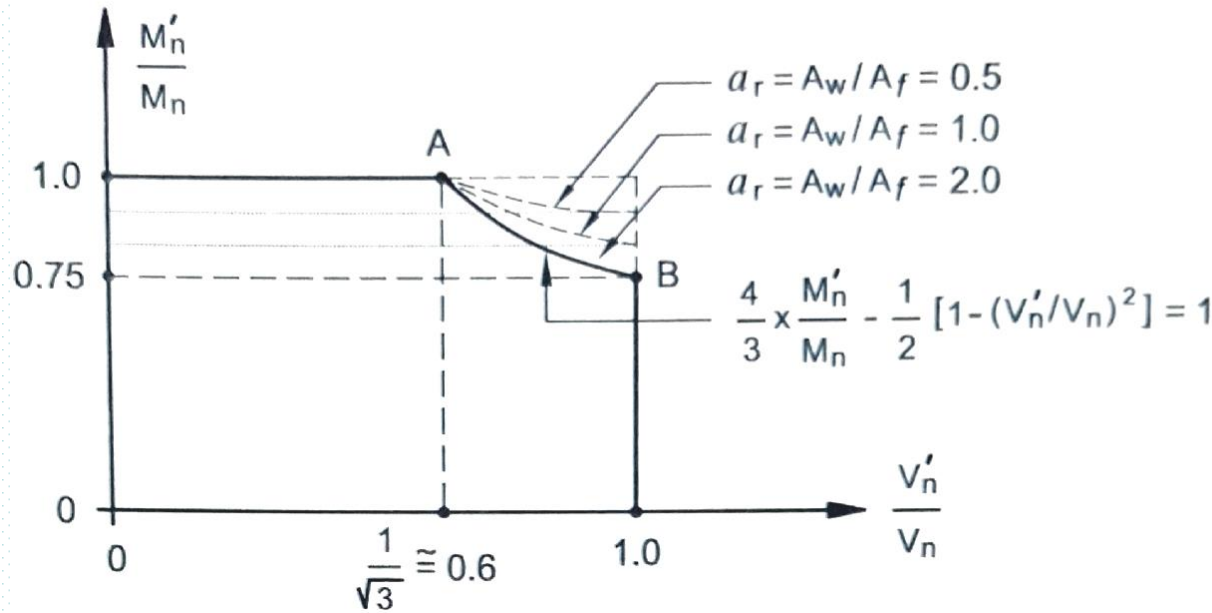
مقدار M'_n/M_n برای آنکه V'_n دقیقاً با V_n یکسان باشد، به مقدار a_r بستگی دارد و اگر مقدار a_r به طور تقریبی برابر دو فرض شود، آنگاه مقدار M'_n/M_n از رابطه زیر به دست می آید:

$$\frac{M'_n}{M_n} = \frac{1}{1 + \frac{2}{6}} = \frac{3}{4} = 0.75$$



فصل پنجم: مبانی نظری و آیین نامه ای مقاومت برشی تیر ورقها

مبانی نظری اندرکنش فمش و برش در تیر ورقها



منحنی تغییرات $\frac{M'_n}{M_n}$ بر حسب $\frac{V'_n}{V_n}$ بر اساس تسلیم بال به همراه بخشی از جان و تسلیم

برشی بخش باقیمانده جان (روش تقریبی دوم)



مبانی آیین نامه ای طراحی برای برش با توجه به عمل میدان کششی

The nominal shear strength, V_n , is determined as follows:

(a) When $h / t_w \leq 1.10 \sqrt{k_v E / F_y}$

$$V_n = 0.6 F_y A_w$$

(b) When $h / t_w > 1.10 \sqrt{k_v E / F_y}$

(1) When $2A_w / (A_{fc} + A_{ft}) \leq 2.5$, $h / b_{fc} \leq 6.0$ and $h / b_{ft} \leq 6.0$

$$V_n = 0.6 F_y A_w \left[C_{v2} + \frac{1 - C_{v2}}{1.15 \sqrt{1 + (a / h)^2}} \right]$$

(2) Otherwise

$$V_n = 0.6 F_y A_w \left[C_{v2} + \frac{1 - C_{v2}}{1.15 \left[a / h + \sqrt{1 + (a / h)^2} \right]} \right]$$



مبانی آیین نامه ای طراحی برای برش با توجه به عمل میدان کششی

where

The web shear buckling coefficient, C_{v2} , is determined as follows:

(i) When $h / t_w \leq 1.10 \sqrt{k_v E / F_y}$

$$C_{v2} = 1.0 \quad (G2-9)$$

(ii) When $1.10 \sqrt{k_v E / F_y} < h / t_w \leq 1.37 \sqrt{k_v E / F_y}$

$$C_{v2} = \frac{1.10 \sqrt{k_v E / F_y}}{h / t_w} \quad (G2-10)$$

(iii) When $h / t_w > 1.37 \sqrt{k_v E / F_y}$

$$C_{v2} = \frac{1.51 k_v E}{(h / t_w)^2 F_y} \quad (G2-11)$$

A_{fc} = area of compression flange, in.² (mm²)

A_{ft} = area of tension flange, in.² (mm²)

b_{fc} = width of compression flange, in. (mm)

b_{ft} = width of tension flange, in. (mm)

k_v is as defined in Section G2.1



فصل پنجم: مبانی نظری و آیین نامه ای مقاومت برشی تیر ورقها

مبانی آیین نامه ای طراحی اعضا برای برش بدون توجه به عمل میدان کششی

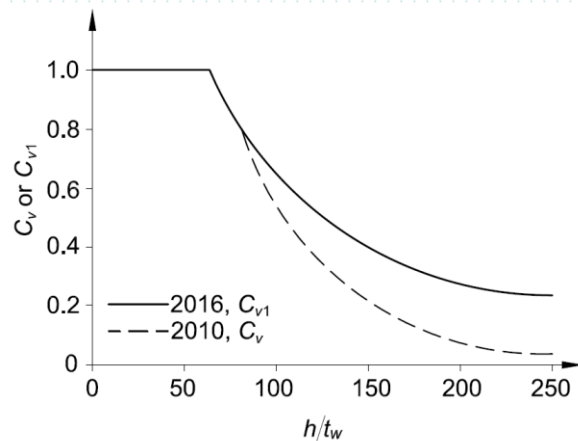
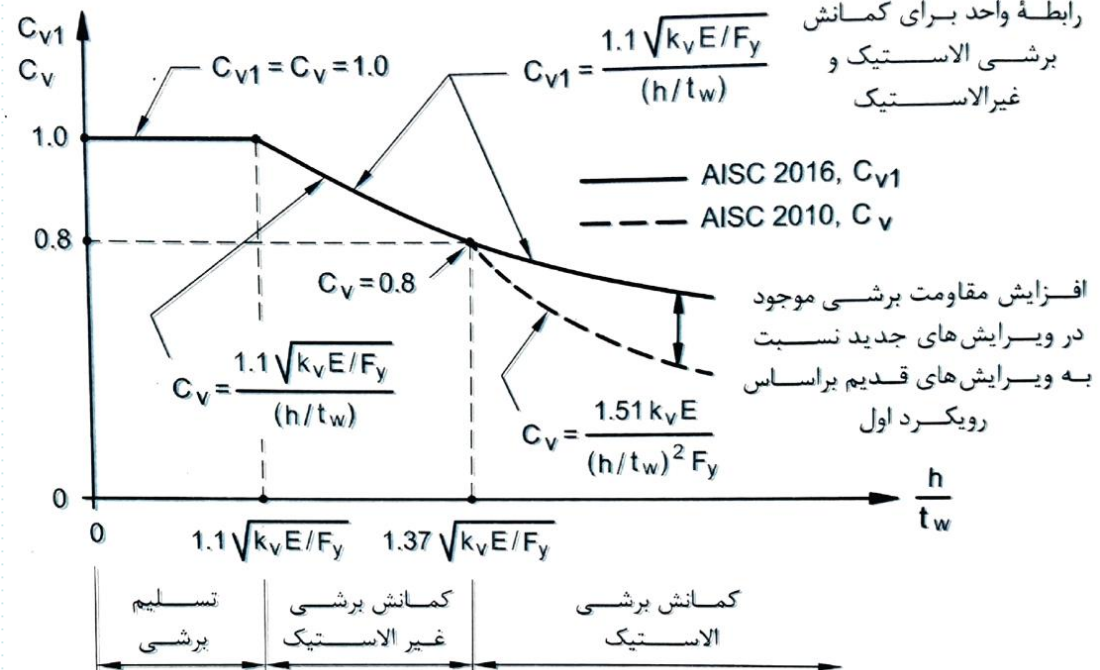


Fig. C-G2.1. Shear buckling coefficient for $F_y = 50$ ksi (345 MPa).





مبانی آیین نامه ای طراحی برای برش با توجه به عمل میدان کششی

نکته دیگری که توجه به آن ضروری است این است که چون در رویکرد با استفاده از عمل میدان کششی برخلاف رویکرد بدون استفاده از عمل میدان کششی، در نواحی کمانش برشی الاستیک و غیرالاستیک برای C_{v2} روابط مجزایی ارائه شده است، در نتیجه این امکان وجود دارد که در رویکرد با استفاده از عمل میدان کششی در محدوده کمانش برشی الاستیک حتی با وجود لحاظ نمودن آثار مثبت ناشی از عمل میدان کششی، مقدار V_n کوچکتر از مقدار V_n در رویکرد بدون استفاده از عمل میدان کششی به دست آید. به همین دلیل مطابق آیین نامه AISC 360 و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان مقدار V_n می تواند بر اساس بزرگترین مقدار به دست آمده از رویکرد بدون استفاده از عمل میدان کششی و رویکرد با استفاده از عمل میدان کششی در نظر گرفته شود.

$$V_n = \max(V_{n1} \text{ و } V_{n2})$$

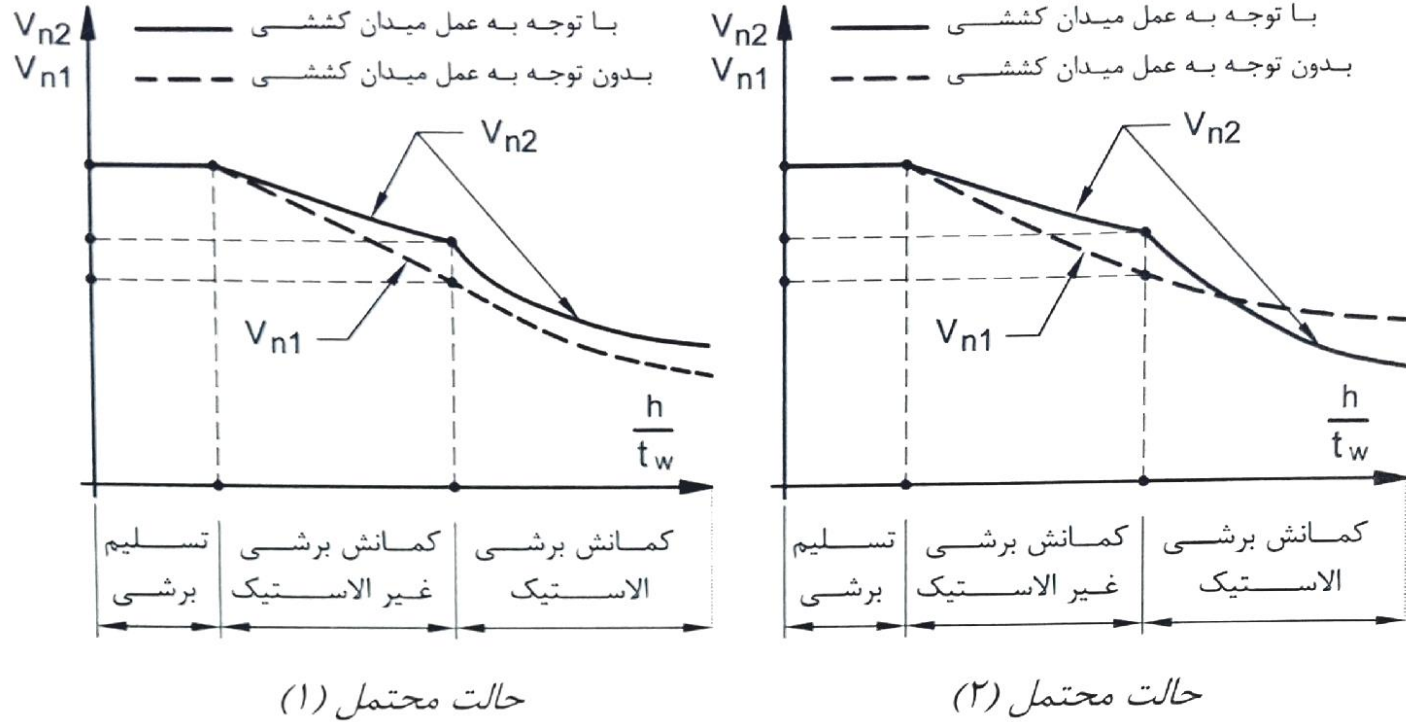
V_{n1} = مقاومت برشی اسمی بر اساس رویکرد بدون توجه به عمل میدان کششی

V_{n2} = مقاومت برشی اسمی بر اساس رویکرد با توجه به عمل میدان کششی



فصل پنجم: مبانی نظری و آیین نامه ای مقاومت برشی تیر ورقها

مبانی آیین نامه ای طراحی برای برش با توجه به عمل میدان کششی



$$V_n = \max(V_{n1} \text{ و } V_{n2})$$

V_{n1} = مقاومت برشی اسمی بر اساس رویکرد بدون توجه به عمل میدان کششی

V_{n2} = مقاومت برشی اسمی بر اساس رویکرد با توجه به عمل میدان کششی



الزامات سفت کننده های عرضی در تیر ورقها

مطابق آیین نامه AISC 360 و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان در مواردی که در تیر مورد نظر $h/t_w \leq 2.54\sqrt{E/F_y}$ باشد، یا با فرض $k_v = 5.34$ مقاومت برشی مورد نیاز تیر کوچک تر یا مساوی مقاومت برشی موجود آن باشد، آنگاه از منظر برش لزومی به تعبیه سخت کننده های عرضی در طول تیر نخواهد بود.

اگر $h/t_w \leq 2.54\sqrt{E/F_y}$ باشد، آنگاه چون به ازای کوچک ترین مقدار k_v که برابر $5/34$ است، مقدار h/t_w کوچک تر از $h/t_w \leq 1.1\sqrt{k_v E/F_y}$ خواهد بود، در نتیجه تحت این شرایط مقادیر C_{v1} و C_{v2} همواره برابر یک خواهند بود و از این رو از منظر برش تعبیه سخت کننده عرضی در طول تیر عملاً هیچ فایده ای نخواهد داشت. زیرا در این گونه موارد در صورت تعبیه سخت کننده های عرضی در طول تیر، تغییری در مقدار V_n حاصل نمی شود. بنابراین در این گونه مقاطع اگر مقطع در برابر برش پاسخگو نباشد، آنگاه تنها راه حل، افزایش مقدار A_w بوده و تعبیه سخت کننده عرضی در طول تیر عملاً نمی تواند مقاومت برشی موجود را افزایش دهد.



الزامات سفت کننده های عرضی در تیر ورقها

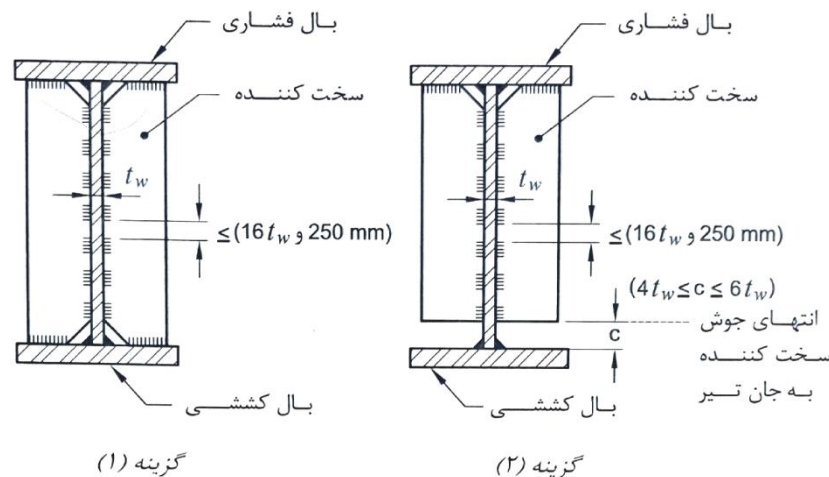
اگر $h/t_w > 2.54\sqrt{E/F_y}$ باشد، در این صورت تعبیه سخت کننده عرضی در جان تیر اجباری نبوده و اگر مقاومت برشی موجود از مقاومت برشی مورد نیاز بیشتر باشد، آنگاه می توان در جان تیر از سخت کننده های عرضی استفاده ننمود. بنابراین می توان چنین نتیجه گرفت که تعبیه سخت کننده های عرضی در جان تیر زمانی می تواند ضروری باشد که اولاً مقاومت برشی موجود کوچک تر از مقاومت برشی مورد نیاز باشد، ثانیاً مقدار h/t_w بزرگ تر از $2.54\sqrt{E/F_y}$ باشد تا اینکه بتوان از طریق تعبیه سخت کننده های عرضی در جان تیر، مقدار k_v و در نتیجه مقدار C_{v1} در رویکرد بدون استفاده از عمل میدان کششی و مقدار C_{v2} در رویکرد با توجه به عمل میدان کششی و نهایتاً مقدار V_n را افزایش داد.



الزامات سخت کننده های عرضی در تیر ورقها

مطابق آیین نامه AISC 360 و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان در صورت نیاز به تعبیه سخت کننده های عرضی در طول تیر رعایت الزامات زیر ضروری است:

در صورتی که به عمل تماسی مستقیم بین قطعه سخت کننده و بال کششی تیر، برای انتقال بارهای متمرکز یا عکس العمل های تکیه گاهی نیاز نباشد، در این صورت می توان سخت کننده عرضی میانی را نرسیده به بال کششی قطع کرد. در صورت قطع نمودن ورق سخت کننده، جوش هایی که قطعه سخت کننده را به جان تیر متصل می کنند، باید نه کمتر از چهار برابر و نه بیشتر از شش برابر ضخامت جان، از هر جوش اتصال سخت کننده به جان تا بال کششی تیر فاصله داشته باشند.





الزامات سخت کننده های عرضی در تیر ورقها

مطابق آیین نامه AISC 360 و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان در صورت نیاز به تعبیه سخت کننده های عرضی در طول تیر رعایت الزامات زیر ضروری است:

کمانش موضعی ورق های سخت کننده باید توسط رابطه زیر کنترل شود:

$$\frac{b_s}{t_s} < 0.56 \sqrt{\frac{E}{F_{yst}}}$$



الزامات سخت کننده های عرضی در تیر ورقها

مطابق آیین نامه AISC 360 و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان در صورت نیاز به تعبیه سخت کننده های عرضی در طول تیر رعایت الزامات زیر ضروری است:

اگر در چشمه مورد نظر نیاز به تعبیه سخت کننده عرضی باشد، آنگاه حداقل ممان اینرسی لازم قطعات سخت کننده عرضی متصل به این چشمه به شرح زیر تعیین می شود:

(۱) اگر در چشمه مورد نظر از عمل میدان کششی استفاده نشده باشد یا استفاده از عمل میدان کششی مجاز نباشد و در آن چشمه $C_{v1} \geq 0.8$ باشد، آنگاه حداقل ممان اینرسی لازم قطعات سخت کننده عرضی از طریق رابطه زیر تعیین می شود:

$$I_{st} \geq I_{st2}$$

(۲) اگر در چشمه مورد نظر از عمل میدان کششی استفاده نشده باشد و در آن چشمه $C_{v1} < 0.8$ باشد، یا اگر در چشمه مورد نظر از عمل میدان کششی استفاده شده باشد، آنگاه حداقل ممان اینرسی لازم قطعات سخت کننده عرضی از طریق رابطه زیر تعیین می شود:

$$I_{st} \geq \max \left[I_{st2} \text{ و } I_{st2} + (I_{st1} - I_{st2})\rho_w \right]$$



الزامات سفت کننده های عرضی در تیر ورقها

مطابق آیین نامه AISC 360 و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان در صورت نیاز به تعبیه سخت کننده های عرضی در طول تیر رعایت الزامات زیر ضروری است:

$$I_{st1} = \frac{h^4 \rho_{st}^{1.3} \left(\frac{F_{yw}}{E} \right)^{1.5}}{40}$$

$$\rho_{st} = \max(F_{yw}/F_{yst} \text{ و } 1.0)$$

$$I_{st2} = \left[\frac{2.5}{(a/h)^2} - 2 \right] b_p t_w^3 \geq 0.5 b_p t_w^3$$

$$b_p = \min(a \text{ و } h)$$

$$\rho_w = \left[\frac{V_r - V_{c2}}{V_{c1} - V_{c2}} \right] \geq 0$$

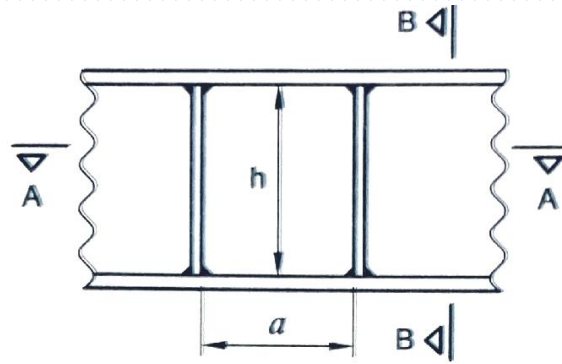
$$V_{c1} = \text{همان مقاومت برشی موجود } \phi_v V_n$$

$$V_{c2} = \phi_v V_n = 0.9 \times 0.6 F_y A_w C_{v2}$$

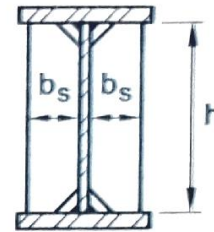
$$V_r = \text{مقاومت برشی مورد نیاز در چشمه مورد نظر}$$



الزامات سفت کننده های عرضی در تیر ورقها

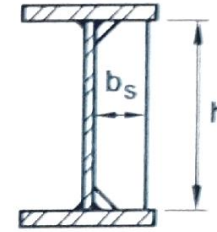


الف) بخشی از طول تیر



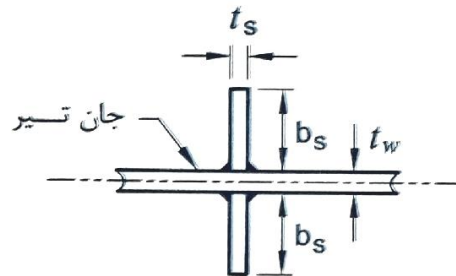
ب) مقطع B-B

(سخت کننده های جفت)



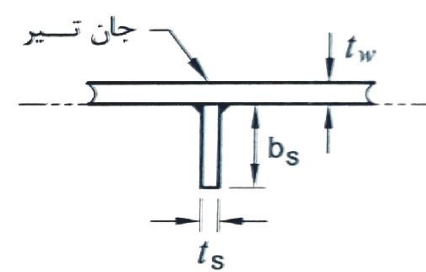
پ) مقطع B-B

(سخت کننده های تکی)



$$I_{st} = \frac{1}{12} t_s (2b_s + t_w)^3 - \frac{1}{12} t_s t_w^3 \cong \frac{2}{3} t_s b_s^3$$

ت) مقطع A-A: سخت کننده های جفت



$$I_{st} = \frac{1}{3} t_s b_s^3$$

ث) مقطع A-A: سخت کننده های تکی

سخت کننده های عرضی جفت و تکی

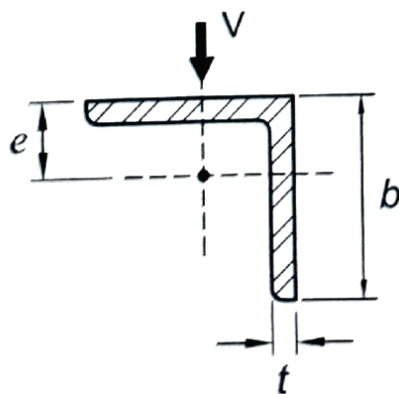


مبانی آیین نامه ای طراحی اعضای با مقطع نبشی تک برای برش

مطابق آیین نامه AISC 360 و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان مقدار مقاومت برشی اسمی (V_n) اعضای با مقطع نبشی تک باید از طریق رابطه زیر تعیین شود:

که در آن:

$$V_n = 0.6F_y A_w C_{v2}$$



A_w = مساحت ساق مقاوم در برابر نیروی برشی و برابر است با bt

b = پهنای ساق مقاوم نبشی تک در برابر نیروی برشی

t = ضخامت ساق مقاوم نبشی تک در برابر نیروی برشی

k_v = باید برابر $1/2$ در نظر گرفته شود.

ϕ_v = باید برابر 0.9 در نظر گرفته شود.

$$\text{اگر: } \frac{b}{t} \leq 1.1 \sqrt{k_v E / F_y} \quad \Rightarrow \quad C_{v2} = 1.0$$

$$\text{اگر: } 1.1 \sqrt{k_v E / F_y} < \frac{b}{t} \leq 1.37 \sqrt{k_v E / F_y} \quad \Rightarrow \quad C_{v2} = \frac{1.1 \sqrt{k_v E / F_y}}{(b/t)}$$

$$\text{اگر: } \frac{b}{t} > 1.37 \sqrt{k_v E / F_y} \quad \Rightarrow \quad C_{v2} = \frac{1.51 \times k_v E}{(b/t)^2 F_y}$$



مبانی آیین نامه ای طراحی اعضای با مقطع سپری برای برش

مطابق آیین نامه AISC 360 و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان مقدار مقاومت برشی اسمی (V_n) اعضای با مقطع سپری و برش در صفحه تقارن باید از رابطه زیر تعیین شود:

$$V_n = 0.6F_y A_w C_{v2}$$

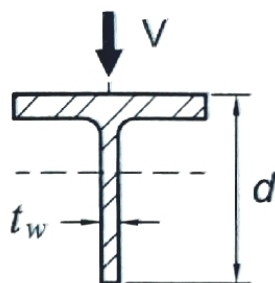
A_w = مساحت جان سپری و برابر است با dt_w

d = عمق کلی مقطع سپری

t_w = ضخامت جان مقطع سپری

$k_v = 1.2$ باید برابر $1/2$ در نظر گرفته شود ($k_v = 1.2$).

ϕ_v = باید برابر 0.9 در نظر گرفته شود.



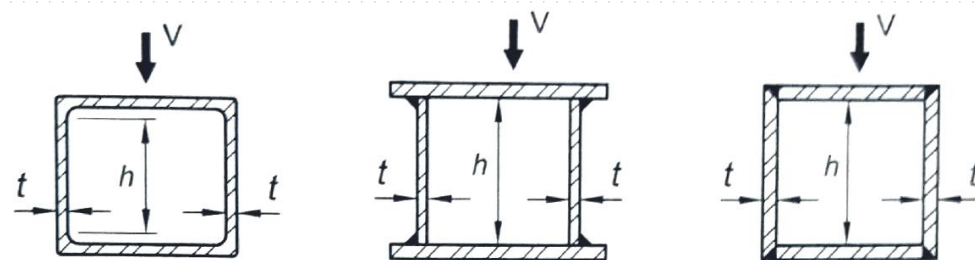
$$\text{اگر: } \frac{d}{t_w} \leq 1.1 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} \implies C_{v2} = 1.0$$

$$\text{اگر: } 1.1 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} < \frac{d}{t_w} \leq 1.37 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} \implies C_{v2} = \frac{1.1 \sqrt{k_v E / F_y}}{(d / t_w)}$$

$$\text{اگر: } \frac{d}{t_w} > 1.37 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} \implies C_{v2} = \frac{1.51 \times k_v E}{(d / t_w)^2 F_y}$$



مبانی آیین نامه ای طراحی اعضای با مقطع قوطی شکل نورد شده یا ساخته شده از ورق برای برش



$$V_n = 0.6F_y A_w C_v$$

مقاطع قوطی شکل نورد شده و ساخته شده از ورق تحت اثر برش

$A_w =$ مجموع مساحت مؤثر جان های مقاوم مقطع قوطی در برابر برش طبق رابطه: $A_w = 2ht$
 $t =$ ضخامت طراحی جان های مقطع قوطی شکل که مساوی $0.93t$ برای ساخته شده با جوش قوس الکتریکی و مساوی t برای مقاطع ساخته شده با جوش زیرپودری است.

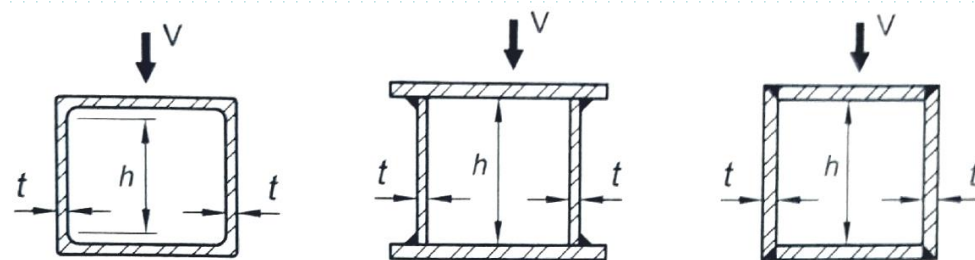
$h =$ پهنای مؤثر جان مقاوم در برابر برش و برای مقاطع نورد شده مساوی فاصله آزاد بین دو بال منهای شعاع گردی محل اتصال جان ها به بال ها و در صورت مشخص نبودن شعاع گردی در محل اتصال جان ها به بال ها مساوی بعد بیرونی مقطع (بعد کلی مقطع) منهای سه برابر ضخامت بال و برای مقاطع ساخته شده از ورق مساوی فاصله خالص بین دو بال است.

$k_v =$ باید برابر پنج در نظر گرفته شود ($k_v = 5$).

$\phi_v =$ باید برابر 0.9 در نظر گرفته شود.



مبانی آیین نامه ای طراحی اعضای با مقطع قوطی شکل نورد شده یا ساخته شده از ورق برای برش



$$V_n = 0.6F_y A_w C_{v2}$$

مقاطع قوطی شکل نورد شده و ساخته شده از ورق تحت اثر برش

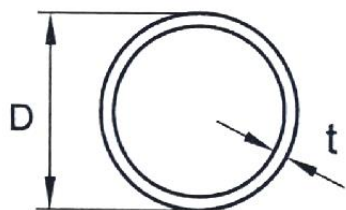
$$\text{اگر: } \frac{h}{t} \leq 1.1 \sqrt{k_v E / F_y} \implies C_{v2} = 1.0$$

$$\text{اگر: } 1.1 \sqrt{k_v E / F_y} < \frac{h}{t} \leq 1.37 \sqrt{k_v E / F_y} \implies C_{v2} = \frac{1.1 \sqrt{k_v E / F_y}}{(h/t)}$$

$$\text{اگر: } \frac{h}{t} > 1.37 \sqrt{k_v E / F_y} \implies C_{v2} = \frac{1.51 \times k_v E}{(h/t)^2 F_y}$$



مبانی آیین نامه ای طراحی اعضای با مقطع لوله برای برش



مقطع لوله ای شکل تحت اثر برش

$$V_n = \frac{1}{2} F_{cr} A_g$$

$$F_{cr1} = \frac{1.60E}{\sqrt{\frac{L_v}{D}} \left(\frac{D}{t}\right)^{\frac{5}{4}}} \quad \text{و} \quad F_{cr2} = \frac{0.78E}{\left(\frac{D}{t}\right)^{\frac{3}{2}}}$$

$$F_{cr} = \max(F_{cr1} \text{ و } F_{cr2}) \leq 0.6F_y$$

A_g = سطح مقطع کلی مقطع

D = قطر بیرونی مقطع

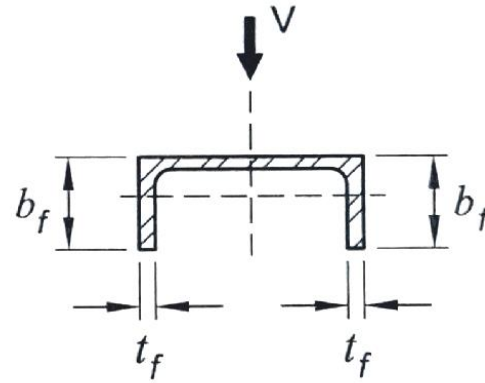
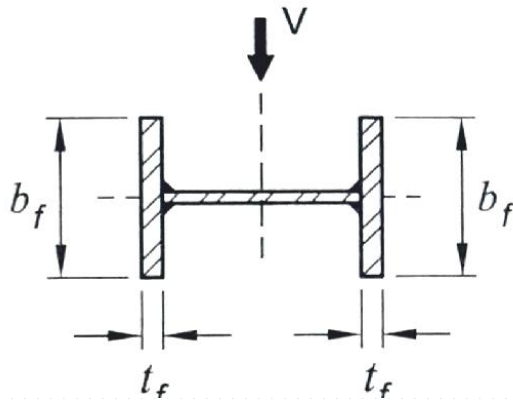
t = ضخامت طراحی مقطع لوله ای که مساوی $0.93t$ برای مقاطع ساخته شده با قوس الکتریکی و

مساوی t برای مقاطع ساخته شده با جوش زیرپودری است.

L_v = فاصله بین محل نیروی برشی حداکثر تا محل نیروی برشی صفر در طول عضو



مبانی آیین نامه ای طراحی اعضا برای برش در راستای عمود بر محور ضعیف مقطع



$$V_n = 0.6F_y A_w C_v$$

A_w = مجموع مساحت بال های مقطع ($A_w = 2b_f t_f$)

b_f = پهنای بال های مقطع

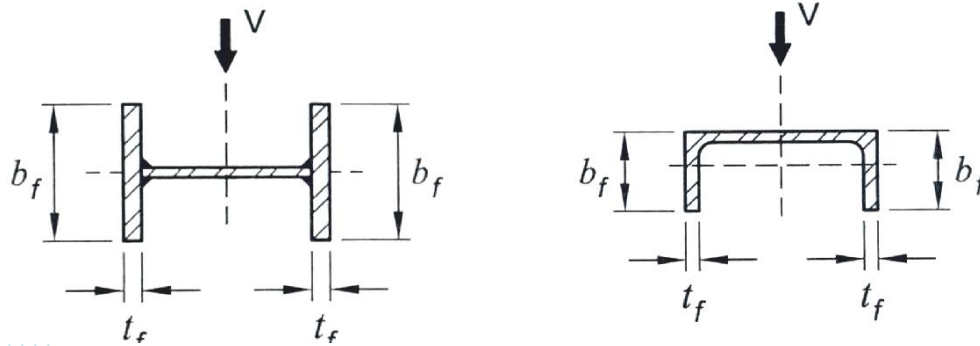
t_f = ضخامت بال های مقطع

k_v = باید برابر ۱/۲ در نظر گرفته شود ($k_v = 1.2$).

ϕ_v = باید برابر ۰/۹ در نظر گرفته شود.



مبانی آیین نامه ای طراحی اعضا برای برش در راستای عمود بر محور ضعیف مقطع



$$V_n = 0.6F_y A_w C_{v2}$$

$C_{v2} =$ باید بر اساس $\frac{b}{t_f}$ (که در آن: $b = \frac{1}{2} b_f$ برای مقاطع I شکل و $b = b_f$ برای مقاطع ناودانی)

و به شرح زیر در نظر گرفته شود:

$$\text{اگر: } \frac{b}{t_f} \leq 1.1 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} \implies C_{v2} = 1.0$$

$$\text{اگر: } 1.1 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} < \frac{b}{t_f} \leq 1.37 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} \implies C_{v2} = \frac{1.1 \sqrt{k_v E / F_y}}{(b/t_f)}$$

$$\text{اگر: } \frac{b}{t_f} > 1.37 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} \implies C_{v2} = \frac{1.51 \times k_v E}{(b/t_f)^2 F_y}$$