



طراحی سازه‌های فولادی ۲

مدرس: دکتر شهاب‌الدین حاتمی

طراحی تیرورق

کتاب مرجع: طراحی سازه‌های فولادی به روش حالات حدی؛ جلد پنجم؛ ازهری. م. و همکاران.

عنوان مطالب

- کاربرد تیرورق
- اثر لاغری جان تیر بر ظرفیت خمشی
- طراحی تیرورق I شکل با جان لاغر براساس خمش
- کنترل برش در تیرورق بدون در نظر گرفتن عمل میدان کششی
- طراحی ورق‌های سخت‌کننده عرضی جان
- کنترل برش در تیرورق با در نظر گرفتن عمل میدان کششی
- طراحی ورق‌های سخت‌کننده عرضی جان با عمل میدان کششی



کاربرد تیرورق

هرگاه



- مقاطع نورده شده ظرفیت لازم را تامین نکنند
- مقطع نورده شده در ابعاد مورد نیاز، با قیمت متعارف در دسترس نباشد
- مقطع ساخته شده مقاومت بالاتری را از مقطع نورده شده با همان وزن تأمین کند
- تغییرات قابل توجه در گشتاور اعمالی به عضو وجود داشته باشد

استفاده از مقاطع خمشی ساخته شده از ورق (تیرورق) می‌تواند توجیه اقتصادی داشته باشد.

نمونه تیروورق در ساختمان فولادی



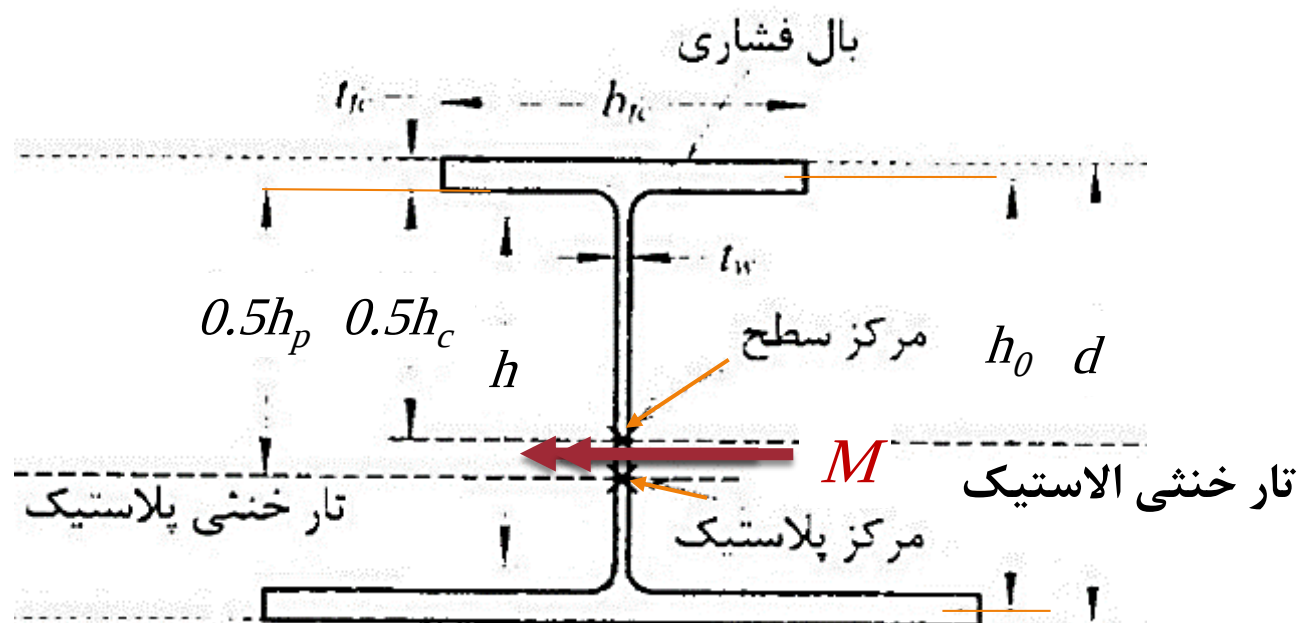
نمونه تیروورق در سوله ها



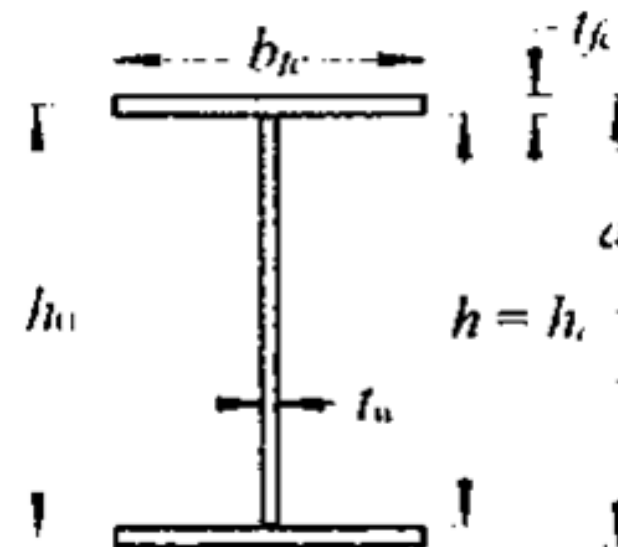
نمونه تیرورق در پل ها



مقطع I شکل با جان لاغر تحت خمش حول محور قوی

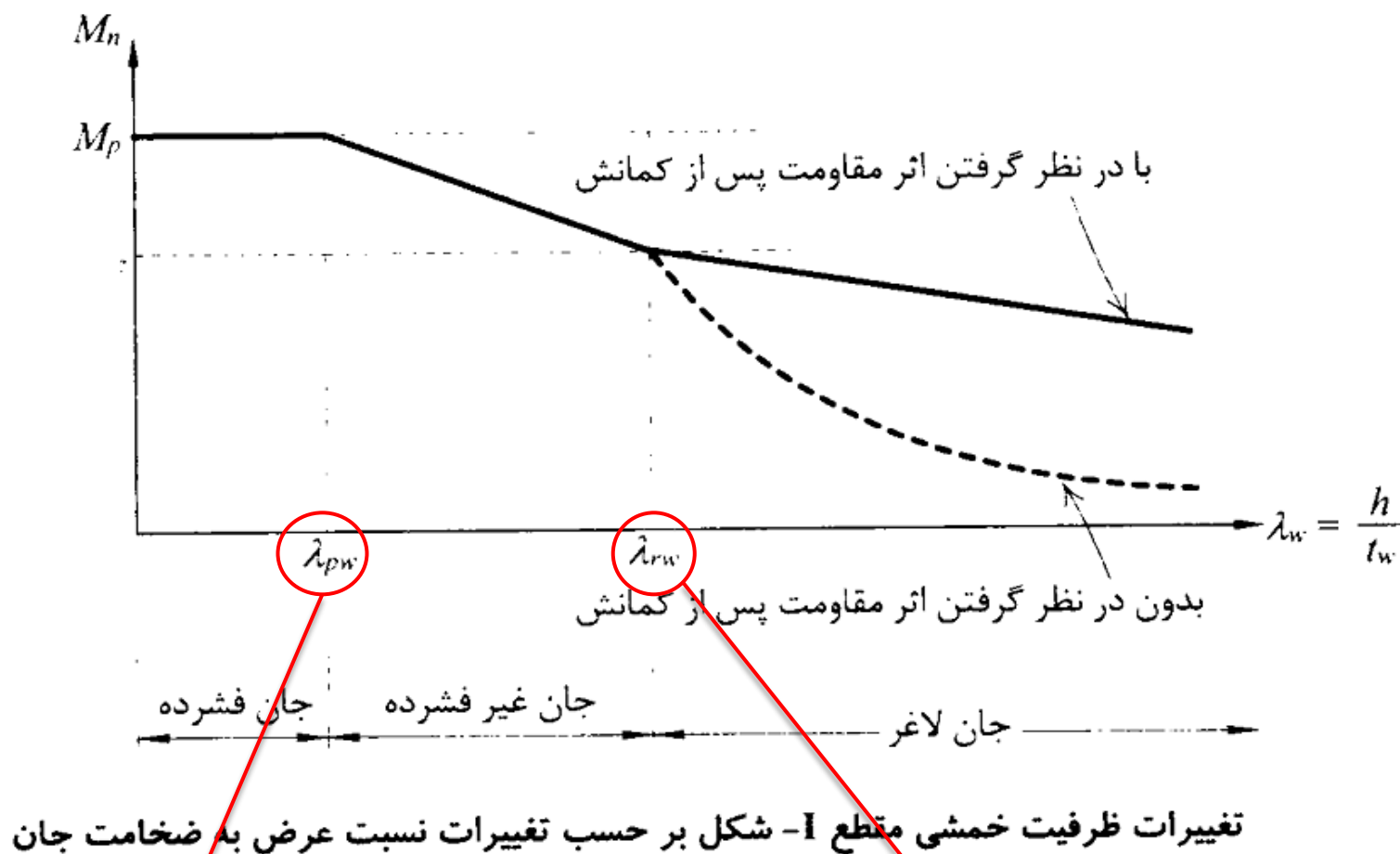


مقطع دارای یک محور تقارن
تحت خمش مثبت



مقطع دارای دو محور تقارن

اثر لاغری جان تیر بر ظرفیت خمشی



حد فشرده‌گی؛ براساس جداول ۱۰-۲-۲-۳ مبحث دهم

حد غیر فشرده‌گی؛ براساس جداول ۱۰-۲-۲-۳ مبحث دهم

مقطع I شکل با جان لاغر

اثر ضریب لاغری جان بر حالات حدی: $R_{pg} M_{yc}$ یا $R_{pg} M_{yt}$ جایگزین M_p

R_{pg} : ضریب کاهش مقاومت به دلیل لاغری جان، عددی کوچکتر از یک می باشد.

$$R_{pg} = 1 - \frac{a_w}{1200 + 300 a_w} \left(\frac{h_c}{t_w} - 5/7 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \right)$$

$$a_w = \frac{h_c t_w}{b_{fc} t_{fc}} \leq 1.$$



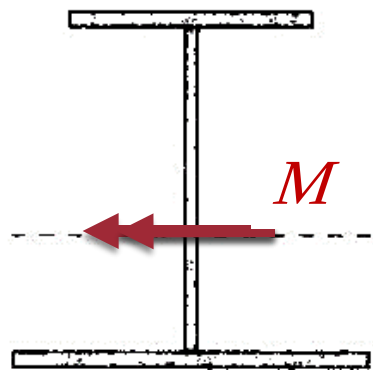
مقطع I شکل با جان لاغر

 M_{yt} و M_{yc} : لنگر الاستیک مقطع

به ترتیب نسبت به بال فشاری و کششی

$$M_{yc} = F_y S_{xc}$$

$$M_{yt} = F_y S_{xt}$$



حالت حدی تسلیم بال فشاری:

$$S_{xc} \leq S_{xt} \rightarrow M_{n1} = R_{pg} M_{yc}$$

حالت حدی تسلیم بال کششی:

$$S_{xc} > S_{xt} \rightarrow M_{n2} = M_{yt} = F_y S_{xt}$$

در این شکل، برای خمش مثبت، $S_{xc} < S_{xt}$



مقاطع I شکل با جان لاغر

حالت حدی کمانش پیچشی - جانبی:

$$M_{n3} = R_{pg} F_{cr} S_{xc}$$

$$L_p = 1.1 r_t \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$L_r = \pi r_t \sqrt{\frac{E}{0.7 F_y}}$$

$$r_t = \frac{b_{fc}}{\sqrt{1.2 \left(\frac{h_o}{d} + \frac{1}{6} a_w \frac{h^2}{h_o d} \right)}}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{اگر } L_b \leq L_p \rightarrow F_{cr} = F_y \rightarrow M_{n3} = M_{n1} = R_{pg} M_{yc} \\ \text{اگر } L_p < L_b \leq L_r \rightarrow F_{cr} = C_b \left[F_y - 0.7 F_y \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq F_y \\ \text{اگر } L_b > L_r \rightarrow F_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E}{\left(\frac{L_b}{r_t} \right)^2} \leq F_y \end{array} \right.$$

r_t شعاع ژیراسیون مؤثر در کمانش جانبی

b_{fc} عرض بال فشاری، h_o فواصل مراکز دو بال، h ارتفاع جان، d ارتفاع کل مقطع



ضریب اصلاح C_b

ضریب اصلاح C_b برای مقاطع با یک محور تقارن با ضریب R_m تشدید می شود ولی حداکثر آن ۳ می باشد.

$$C_b = \left(\frac{12.5M_{max}}{2.5M_{max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \right) R_m \leq 3.0$$

مبحث دهم، بند ۱۰-۲-۵-۱-۳

R_m : ضریب عدم تقارن مقطع

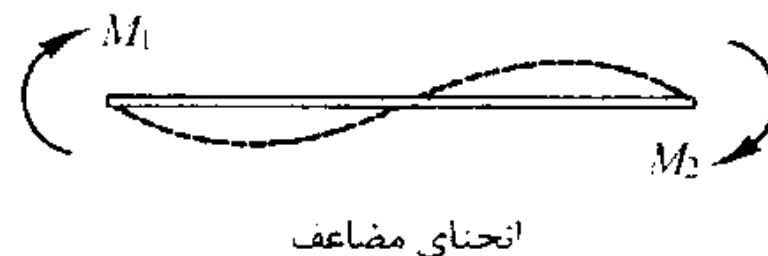
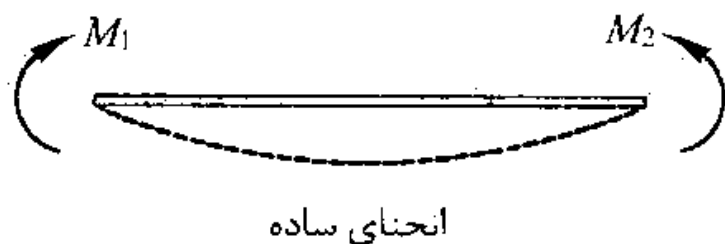
مقاطع دارای **دو محور تقارن**: $R_m = 1.0$

مقاطع دارای **یک محور تقارن** با انحنای ساده: $R_m = 1.0$

مقاطع دارای **یک محور تقارن** با انحنای مضاعف: $R_m = 0.5 + 2 \left(\frac{I_{y Top}}{I_y} \right)^2$

I_y : ممان اینرسی مقطع حول محور گذرنده از صفحه جان

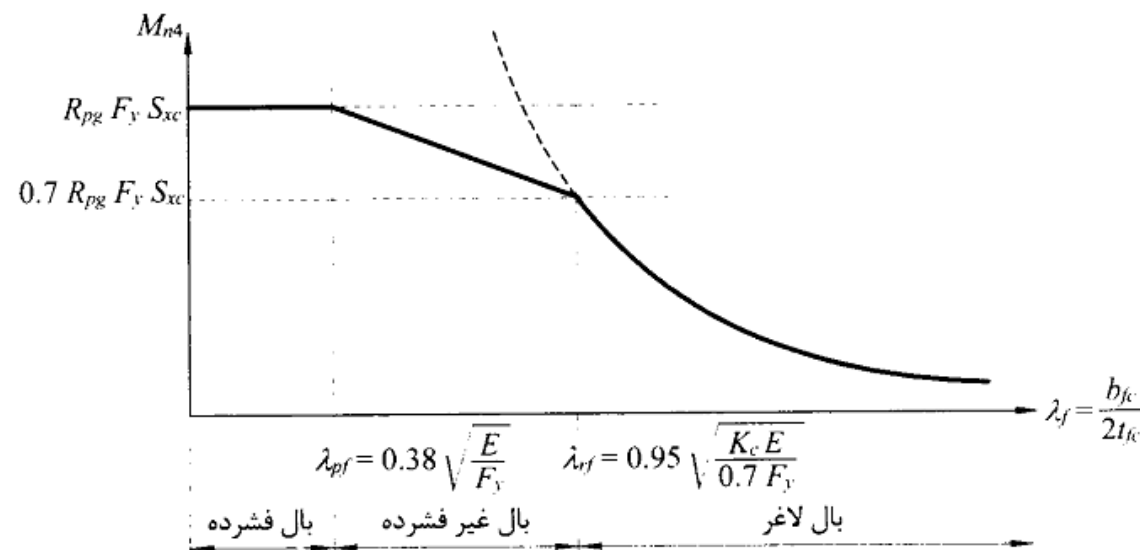
$I_{y Top}$: ممان اینرسی بال فوقانی مقطع حول محور گذرنده از صفحه جان



مقطع I شکل با جان لاغر

حالت حدی کمانش بال فشاری:

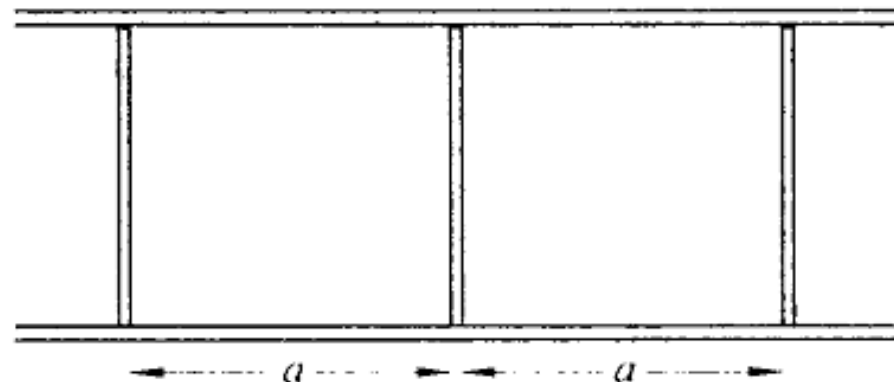
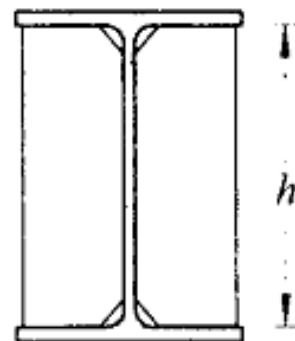
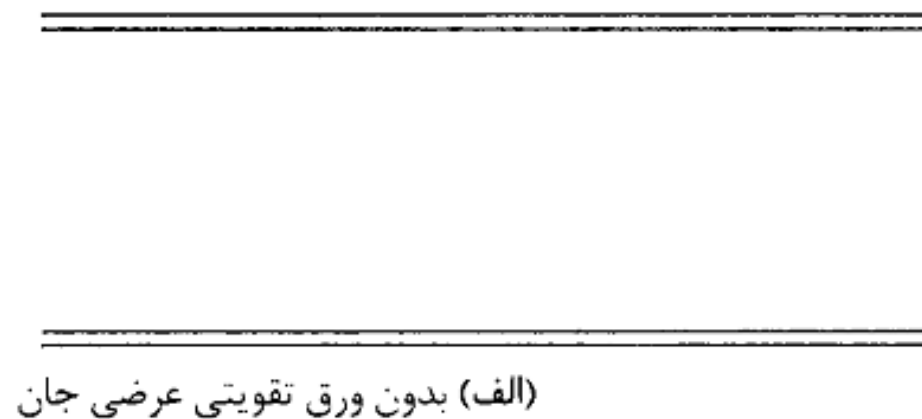
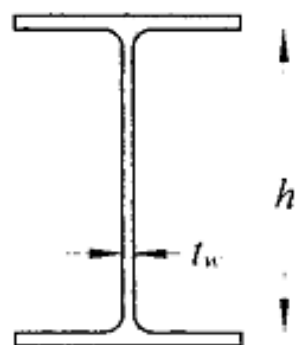
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{اگر بال فشرده باشد. } (\lambda_f \leq \lambda_{pf}) \rightarrow M_{n4} = M_{n1} = R_{pg} M_{yc} \\ \text{اگر بال غیر فشرده باشد. } (\lambda_{pf} < \lambda_f \leq \lambda_{rf}) \rightarrow \\ M_{nf} = \left[F_y - 0.3 F_y \left(\frac{\lambda_f - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) \right] R_{pg} S_{xc} \end{array} \right.$$



تغییرات ظرفیت خمشی اسمی مقاطع I- شکل با جان لاغر بر حسب تغییرات نسبت عرض به

ضخامت ورق نیم‌بال

کنترل برش در تیرورق

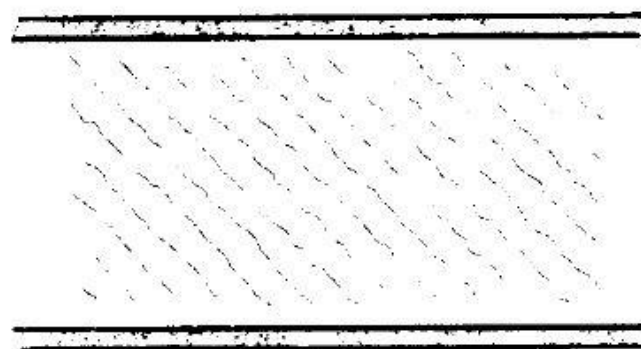


(ب) با ورق تقویتی عرضی جان

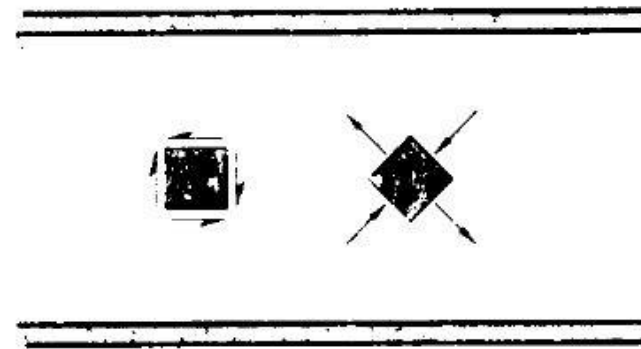
تیرهای با مقاطع I- شکل و ورق‌های تقویتی عرضی جان

کنترل برش

ایجاد کمانش برشی جان در اثر تنش‌های فشاری در راستای قطری جان



(ب) کمانش قطری جان ستون



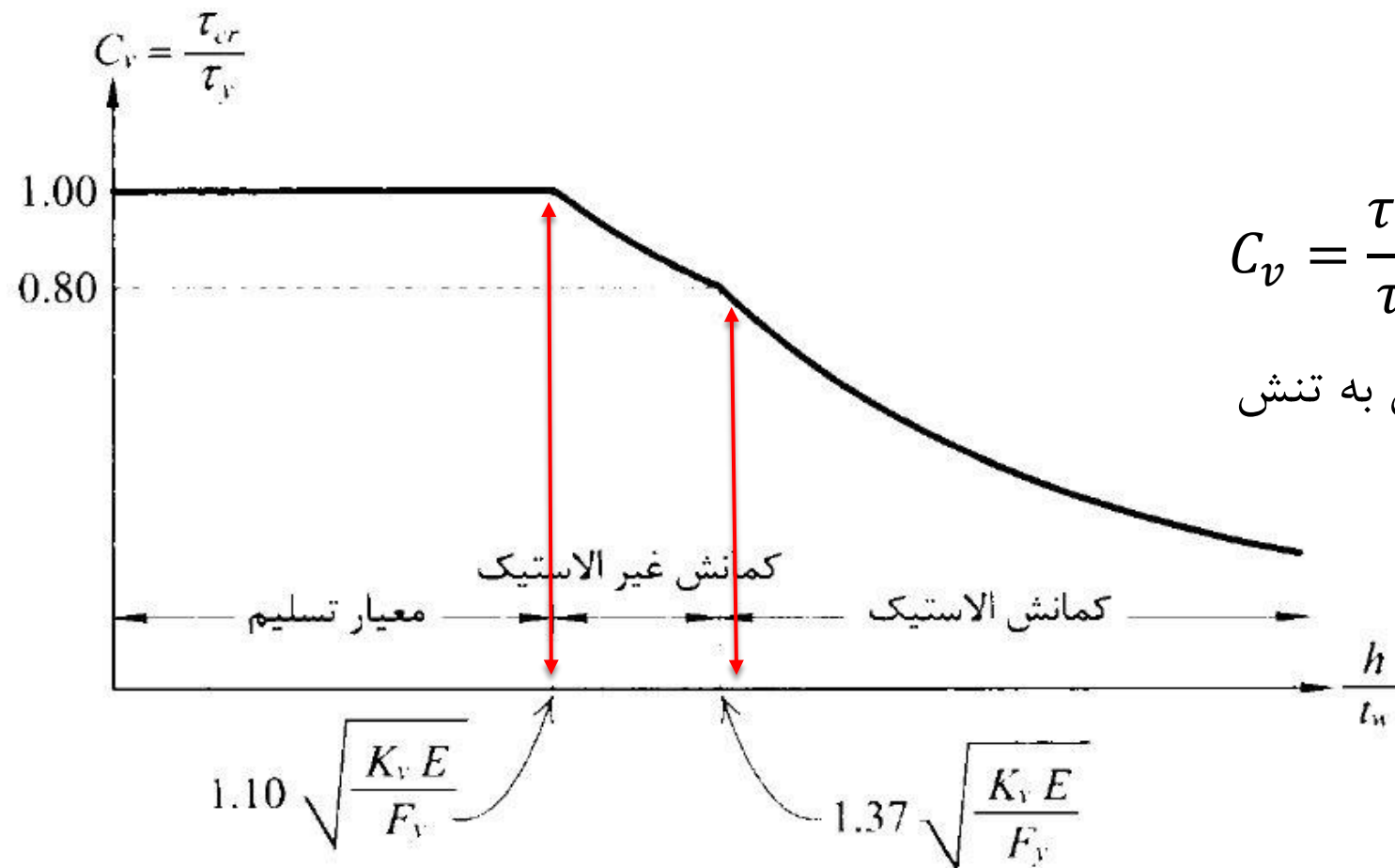
(الف) المان تنش

پدیده کمانش برشی در جان نازک مقاطع I- شکل



کنترل برش

کمانش برشی جان



$$C_v = \frac{\tau_{cr}}{\tau_y}$$

C_v : نسبت تنش بحرانی به کمانش برشی جان به تنش برشی تسلیم

تغییرات تنش بحرانی کمانش برشی بر حسب $\frac{h}{t_w}$



کنترل برش در تیرورق بدون در نظر گرفتن عمل میدان کششی

$$V_n = 0.6F_y A_w C_V \quad V_u \leq \phi_V V_n \quad \phi_V = 0.9$$

تسلیم برشی جان:

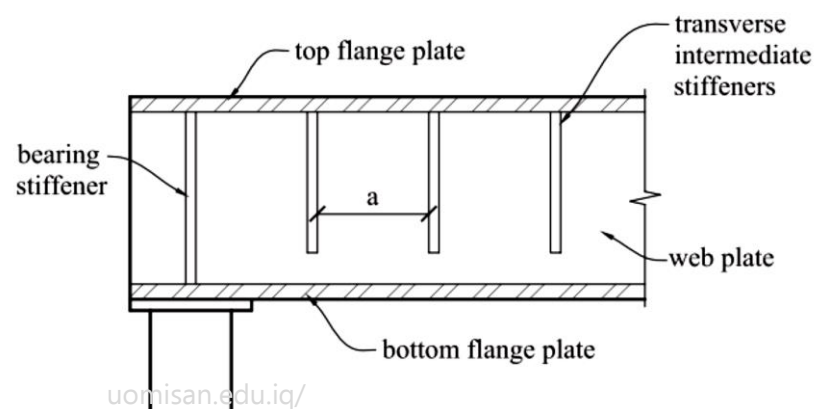
$$\frac{h}{t_w} \leq 1.1 \sqrt{\frac{K_V E}{F_y}} \rightarrow C_V = 1.0$$

کمانش برشی غیرالاستیک جان:

$$1.1 \sqrt{\frac{K_V E}{F_y}} < \frac{h}{t_w} \leq 1.37 \sqrt{\frac{K_V E}{F_y}} \rightarrow C_V = \frac{1.1 \sqrt{\frac{K_V E}{F_y}}}{\left(\frac{h}{t_w}\right)}$$

کمانش برشی الاستیک جان:

$$\frac{h}{t_w} > 1.37 \sqrt{\frac{K_V E}{F_y}} \rightarrow C_V = \frac{1.51 E K_V}{(h/t_w)^2 F_y}$$

ضریب گمانش برشی K_v 

۱. برای جان‌های سخت‌نشده (بدون سخت‌کننده عرضی) با $\frac{h}{t_w} < ۲۶۰$ ، $k_v=۵$ می‌باشد. به استثنای جان مقاطع سپری که برای آن $k_v=۱/۲$ است.

۲. برای جان‌های سخت‌شده (دارای سخت‌کننده عرضی):

$$\begin{cases} k_v = ۵ + \frac{۵}{(a/h)^2} \\ k_v = ۵ \end{cases}$$

$$\frac{a}{h} \leq \left\{ ۳ \text{ و } \left[\frac{۲۶۰}{h/t_w} \right]^2 \right\}$$

$$\frac{a}{h} > \left\{ ۳ \text{ یا } \left[\frac{۲۶۰}{h/t_w} \right]^2 \right\}$$

t_w = ضخامت جان مقطع

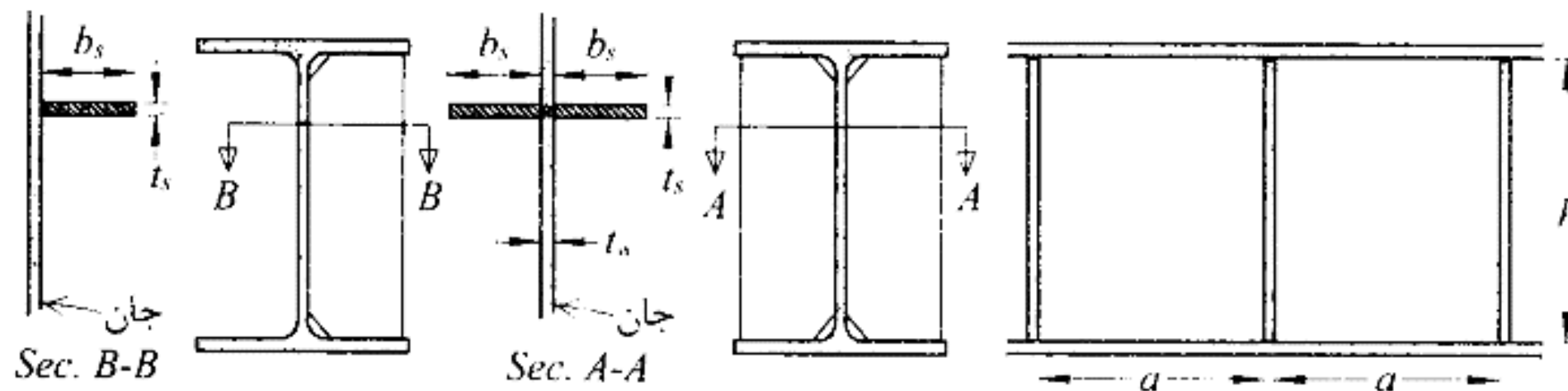
a = فاصله آزاد بین سخت‌کننده‌های عرضی جان

طراحی ورق‌های سخت‌کننده عرضی جان

I_{st} : ممان اینرسی مورد نیاز سخت‌کننده‌های عرضی

$$I_{st} \geq Ist_1$$

$$I_{st1} = b t w^3 j$$



b برابر کمترین مقدار **a** و **h**

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

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

$$\cong \frac{1}{3} b_s^3 t_s$$

$$j = \max \left(\frac{2/5}{\left(\frac{a}{h} \right)^2} - 2, 0/5 \right)$$

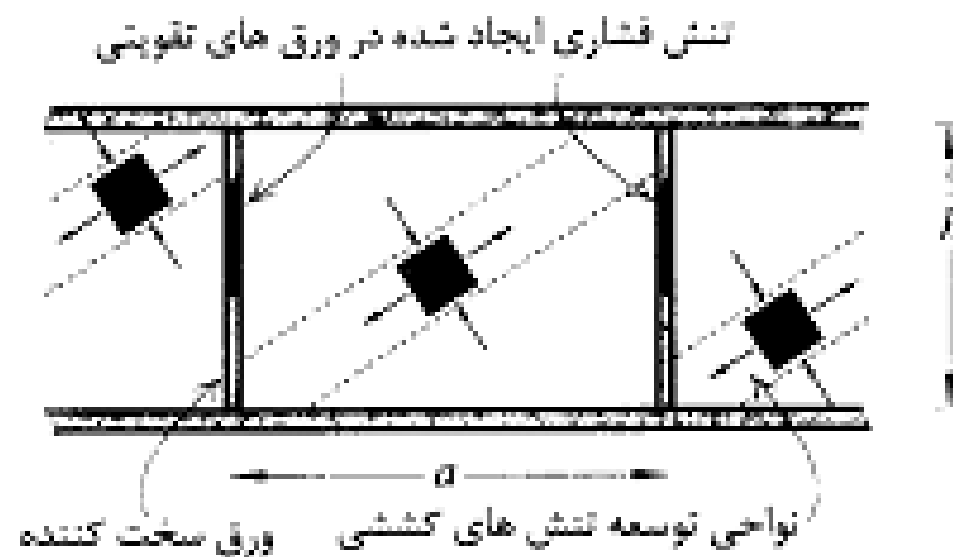
$$\frac{b_s}{t_s} \leq 0.56 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

کنترل فشردگی سخت‌کننده:

کنترل برش در تیرورق با لحاظ عمل میدان کششی

$$V_u \leq \phi_V V_n \quad \phi_V = 0.9$$

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





موارد ممنوعیت استفاده از عمل میدان کششی

۱- در تیرهای بدون ورق سخت کننده عرضی جان،

۲- در پانل‌های ابتدایی و انتهایی تیرورق،

۳- در پانل‌های دارای بازشو و پانل‌های مجاور آن،

$$4- \text{اگر:} \quad \frac{a}{h} \geq \min \left(3, \left(\frac{260}{h/t_w} \right)^2 \right)$$

$$\begin{cases} \frac{h}{b_{fc}} > 6 \\ \frac{h}{b_{ft}} > 6 \end{cases}$$

۶- اگر:

$$5- \text{اگر:} \quad \frac{2A_w}{A_{fc} + A_{ft}} > 2/5$$

۷- اگر سخت کننده جان، در کل ارتفاع جان امتداد نداشته باشد



طراحی ورق‌های سخت‌کننده عرضی جان با عمل میدان کششی

I_{st} : ممان اینرسی مورد نیاز سخت‌کننده‌های عرضی

V_c کمترین مقاومت برشی در دو چشمه مجاور

$V_{c1} = \phi_v V_{n1}$ بدون میدان کششی:

$V_{c2} = \phi_v V_{n2}$ با میدان کششی:

$I_{st1} = b t w^3 j$ بدون میدان کششی:

$I_{st2} = \frac{h^4 \rho_{st}^{1/3}}{40} \left(\frac{F_{yw}}{E} \right)^{1/5}$ با میدان کششی:

$$I_{st} \geq I_{st1} + (I_{st2} - I_{st1}) \left(\frac{V_u - V_{c1}}{V_{c2} - V_{c1}} \right)$$

F_{yw} : تنش تسلیم جان
 F_{yst} : تنش تسلیم سخت‌کننده

$$\rho_{st} = \max \left(\frac{F_{yw}}{F_{yst}}, 1 \right)$$