

فصل ۵

مباحث تکمیلی در طراحی تیر

طراحی کاربردی سازه های فولادی (جلد یک) - محسن گرامی

در این فصل:		
۲	پیشگفتار	۵-۱
۳۹	تیرهای لانه زنبوری	۵-۲
۲	طرح تیر با استفاده از ورق تقویت	۵-۳
۹	طراحی تیرهای سراسری	۵-۴
۲۰	بررسی تیر در محل اعمال بارهای متمرکز	۵-۵
۳۳	طراحی تیرها تحت اثر خمش دو محوره از مقاطع I شکل	۵-۶
۶۰	تستهای فصل پنجم	۵-۷
۶۱	مسائل فصل پنجم	۵-۸

۵-۱ پیشگفتار

در این فصل به بررسی مباحث ویژه در طراحی تیرها پرداخته می‌شود. در طراحی یک تیر چنانچه مقاومت مورد نیاز از مقاومت طراحی بیشتر گردید، می‌توان به جای تغییر مقطع تیر نسبت به تقویت آن اقدام نمود. این موضوع در بخش (۵-۲) به تفصیل بیان شده است. چنانچه تیر به صورت سراسری (نامعین) قرار گرفته باشد، موضوع بازتوزیع لنگر در آن و مباحث مربوط به طرح تیر سراسری با ورق تقویت در بخش (۵-۳) آمده است. در سالهای اخیر با گران شدن قیمت فولاد استفاده از تیرهای لانه زنبوری رایج شده است که ضوابط خاص طراحی این تیرها در بخش (۵-۴) مورد بحث قرار می‌گیرد. موضوع بررسی تیر تحت بارهای متمرکز شدید از مواردی است که بر اساس مبانی بخش (۵-۵) باید کنترل گردد. چنانچه خمش حول محور X در یک مقطع با خمش حول محور Y همزمان اتفاق افتد، طراحی تیر با خمش دو محوره موضوعیت پیدا می‌کند که ضوابط آن در بخش (۵-۶) ارائه شده است.

۵-۲ طرح تیر با استفاده از ورق تقویت

در طرح و اجرای تیرها در مواردی نیمرخهای نورد شده را با استفاده از ورقهایی در بال (تقویت خمشی) یا ورقهایی در جان (تقویت برشی) تقویت می‌کنند. چهار دلیل اساسی برای طرح تیر با ورق تقویت عبارت است از:

(الف) وجود تغییرات در لنگر خمشی در طول تیر، طراح را ترغیب می‌کند که به منظور صرفه جویی اقتصادی از مقطع ثابت در طول تیر استفاده ننموده و در محلهایی که تغییرات لنگر زیاد است از ورقهای تقویتی در بال، استفاده کند.

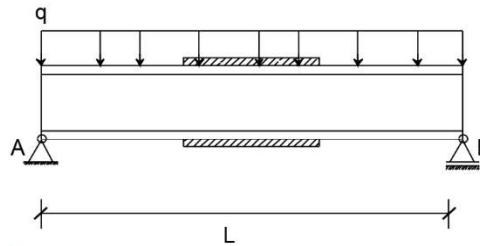
(ب) در مواردی که نیمرخهای مورد نظر طراح در بازار موجود نباشد، استفاده از نیمرخهای موجود و تقویت آنها در نواحی با لنگر خمشی زیاد امری اجتناب ناپذیر است.

(ج) در مواردی که نیمرخ مورد نظر در طراحی برای برش جوابگو نباشد، از ورقهای تقویتی در جان تیر استفاده می‌شود. با توجه به اینکه عموماً تیرها بدون تقویت جان نیز پاسخگوی برش می‌باشند، عملاً تقویت برشی مورد نظر، مورد پیدا نمی‌کند.

(د) با توجه به اینکه افزایش شماره تیر به افزایش ارتفاع آن منجر می‌شود، لذا بعضاً به دلیل محدودیت در ضخامت سقف، بجای افزایش شماره پروفیل به تقویت تیر پرداخته می‌شود.

هرچند که استفاده از ورقهای تقویتی در جان تیرها موجب افزایش لنگر اینرسی و اساس مقطع نیمرخ خواهد شد، اما تقویت بال نیمرخها با ورق، افزایش بیشتری در لنگر اینرسی و اساس مقطع خواهد داشت. از طرفی تقویت هر یک از بالهای کششی یا فشاری ممکن است به تنهایی عملکرد مطلوبی نداشته باشد، اما تقویت همزمان هر دو بال باعث می‌شود که در محل قرارگیری تار خنثی تغییر کمتری حاصل شود و در نتیجه اساس مقطع در بال کششی و فشاری به صورت تقریباً یکسان افزایش پیدا کند.

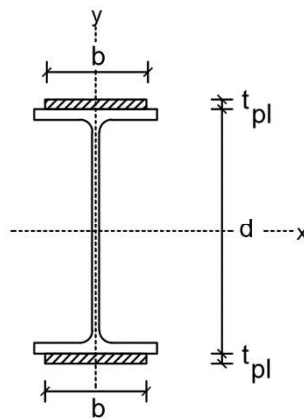
تیر دو سر ساده‌ای که بار گسترده یکنواخت به شدت q را تحمل می‌کند و دارای مقطعی از نیمرخ I و ورق تقویتی است مطابق شکل ۵-۱ در نظر بگیرید.



شکل ۵-۱ تیر دو سر ساده تحت اثر بار گسترده یکنواخت با ورق تقویت در بال بالا و پایین

۵-۲-۱ تعیین مقطع ورق تقویت

پس از تعیین اندازه اولیه برای ورقهای تقویتی، تعیین مقادیر اساس مقطع پلاستیک در هر دو حالت تقویت یک بال یا هر دو بال به آسانی میسر است. این اساس مقطع پلاستیک باید بزرگتر از اساس مقطع مورد نیاز باشد.



شکل ۵-۲ نیمرخ I با ورق تقویت در هر دو بال

$$Z_x = Z_{xi} + A_{pl}(d + t_{pl}) \quad ۱-۵$$

$A_{pl} = b_{pl} \times t_{pl}$	سطح مقطع ورق تقویت برابر	A_{pl}	اساس مقطع پروفیل تنها	Z_{xi}
	ضخامت ورق تقویت	t_{pl}	اساس مقطع تیر با ورق تقویتی	Z_x
	عرض ورق تقویت	b_{pl}	ارتفاع پروفیل	d

در صورت عدم وجود محدودیتهای اجرایی استفاده از ورقهای تقویتی با مساحتیهای مساوی در هر دو بال کششی و فشاری برای نیمرخهای دارای دو محور تقارن از نظر اقتصادی مناسبتر است.

۵-۲-۲ تعیین طول نظری L_{pl} و طول عملی L'_{pl} ورق تقویت

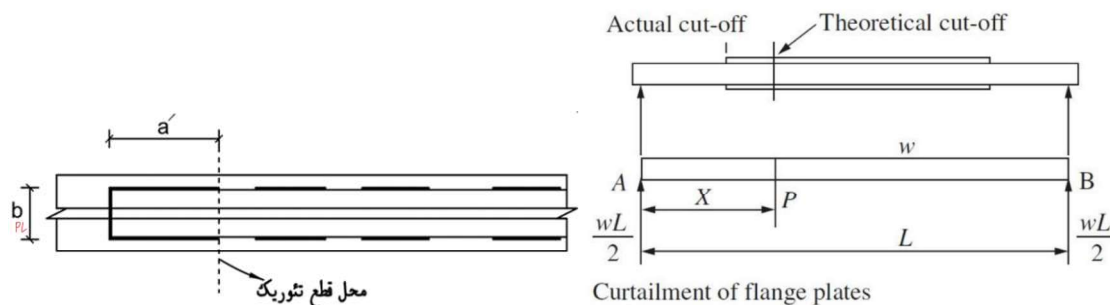
با توجه به دیاگرام لنگر خمشی تیر و با نوشتن معادله لنگر در طول تیر می توان محلی که ظرفیت یا مقاومت طراحی لنگر $\phi_b M_{nx}$ برابر مقدار M_u است، تعیین کرد و بدین طریق طول نظری ورق تقویت را مشخص نمود. بدین ترتیب مطابق رابطه زیر، با

تقسیم تیر به دو ناحیه با ورق و بدون ورق تقویت، بیشترین لنگر نهایی هر ناحیه محاسبه شده و با ظرفیت اسمی همان ناحیه مقایسه می گردد.

$$M_u \leq \phi_b M_n \rightarrow \begin{cases} M_{u1} \leq \phi_b M_{n1} \\ M_{u2} \leq \phi_b M_{n2} \end{cases} \quad ۲-۵$$

M_{u1}	لنگر مقاوم اسمی تیر با مقطع بدون ورق تقویت	M_{n1}	لنگر مقاوم اسمی تیر با مقطع بدون ورق تقویت
M_{u2}	لنگر نهایی برای تیر در ناحیه با ورق تقویت	M_{n2}	لنگر مقاوم اسمی تیر با مقطع با ورق تقویت

آیین نامه لازم می داند ورقهای تقویتی بعد از محل قطع تئوریک به اندازه طول a' ادامه یابند. اندازه طول a' به گونه ای تعیین می شود که جوش در این فاصله قادر باشد علاوه بر تأمین اتصال کامل بین ورق و بال، نیرویی معادل نیروی کششی یا فشاری ورق تقویتی را تحمل نماید. شکل زیر ورق تقویتی بال به عرض b_{pl} و ضخامت t_{pl} را که بعد از محل قطع تئوریک به اندازه a' ادامه یافته است، نشان می دهد.



شکل ۳-۵ نمایش ورق تقویتی بال، محل قطع تئوری و طول محاسباتی ورق

آیین نامه مقادیر زیر را برای طول a' برحسب بعد و هندسه جوش پیشنهاد می کند. با تعیین مقدار a' و اضافه کردن آن به دو طرف ورق تقویت، طول عملی ورق $L_{pl} = L_{pl} + 2a'$ بدست می آید.

- در حالتی که جوش ورق تقویتی به بال تیر در دو لبه طرفین ورق به طول a' و نیز در عرض ورق به پهنای b_{pl} و با ضخامت حداقل برابر $\frac{3}{4}$ ضخامت ورق انجام گیرد $a' = b_{pl}$ در نظر گرفته می شود.
- در حالتی که جوش ورق تقویتی به بال تیر در دو لبه طرفین ورق به طول a' و نیز در عرض ورق به پهنای b_{pl} و با ضخامت کمتر از $\frac{3}{4}$ ضخامت ورق انجام گیرد $a' = 1.5b_{pl}$ در نظر گرفته می شود.
- چنانچه ورق تقویتی به بال تیر تنها در دو لبه طرفین ورق به طول a' جوش شود، در این صورت $a' = 2b_{pl}$ در نظر گرفته می شود.

آیین نامه ایران مقرر می دارد که بال مقاطع تیرهای نورد شده و تیرهای ساخته شده از ورق را می توان به کمک ورقهای بال، تقویت نمود. در مواردی که اتصال ورق تقویتی بال به بال مقاطع تیرها از نوع پیچشی باشد، در هر بال مجموع سطح مقطع ورقهای تقویتی نباید از ۷۰ درصد سطح مقطع کل بال (شامل ورقهای تقویتی) تجاوز نماید. یکی از دلایل این محدودیت عدم استفاده از نیمرخهای ضعیف با ورقهای تقویتی دارای سطح مقطع زیاد است که در ابعاد نیمرخ ناهماهنگی ایجاد می کند. لذا مساحت هریک از ورقهای تقویتی بالایی و پایینی تیر نباید از ۲.۳۳ برابر مساحت بال بالا یا پایین تیر بیشتر باشد.

$$A_{pl} = b_{pl} t_{pl} \leq 0.7(A_{pl} + A_f) \rightarrow A_{pl} \leq 2.33A_f \quad ۳-۵$$

A_{pl}	مساحت بال تیر	A_f
t_{pl}	عرض ورق تقویت	b_{pl}
$A_{pl} = b_{pl} t_{pl}$	سطح مقطع ورق تقویت برابر	
	ضخامت ورق تقویت	

اگر رابطه فوق جوابگو نباشد باید شماره پروفیل را افزایش داد و ابعاد ورق تقویت را کم کرد.

عرض ورقهای تقویتی جهت عملیات جوشکاری باید حداقل ۳ تا ۴ سانتیمتر از عرض بال تیر اصلی کمتر یا بیشتر باشد. لذا برای

انتخاب مقدار اولیه برای عرض ورق، می‌توان از مقادیر $b_{pl} \geq b_f + 3cm$ و یا $b_{pl} \leq b_f - 3cm$ استفاده نمود و مقدار t_{pl} را بر اساس سطح مقطع مورد نیاز ورق تقویت، بدست آورد.

به منظور تعیین طول نظری ورق تقویت برای تیر ساده تحت اثر بار گسترده، رابطه تقریبی $L_t = L \sqrt{\frac{Z_{req} - Z_o}{Z_{req}}}$ ارائه شده است که در آن L_t طول نظری ورق تقویت و L طول کل دهانه است.

۵-۲-۳ کنترل ورق تقویت

از آنجا که مقطع تیر به صورت فشرده فرض شده است، لازم است شرط فشردگی ورق تقویت (مطابق جدول ضوابط فشردگی مقطع) برقرار باشد. لذا کنترل کمانش موضعی به کمک رابطه زیر برای ورق تقویت الزامی است.

$$\lambda_{pl} = \frac{b_{pl}}{t_{pl}} \leq \lambda_{p,pl} = 1.12 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad ۴-۵$$

λ_{pl}	لاغری مقطع ورق تقویت	$\lambda_{p,pl}$	حد لاغری فشردگی ورق تقویت
----------------	----------------------	------------------	---------------------------

توجه: گاهی برای کنترل خیز یک تیر می‌توان به جای افزایش شماره تیر، آن را تقویت نمود در این حالت لنگر اینرسی تیر با تقویت، افزایش یافته و باعث کاهش خیز تیر می‌شود.

۵-۲-۴ مراحل گام به گام طراحی تیر با ورق تقویت

مراحل گام به گام طرح تیر به کمک ورق تقویت به شرح زیر است:

گام ۱: ابتدا لنگر خمشی حداکثر تیر با استفاده از دیاگرام لنگر تعیین می‌شود.

گام ۲: با تعیین مقاومت خمشی طراحی، اساس مقطع پلاستیک مورد نیاز بدست می‌آید.

گام ۳: در صورتیکه اساس مقطع پلاستیک پروفیل به تنهایی جوابگو نباشد از ورق تقویت در مقطع استفاده نموده و به کمک رابطه (۵-۱) عرض و ضخامت ورق تقویت، تعیین می‌شود.

گام ۴: با استفاده از دیاگرام لنگر و لنگر قابل تحمل پروفیل، طول نظری ورق بدست می‌آید.

گام ۵: با محاسبه a' و برای هر دو سر ورق ($2a'$) و افزودن آن به طول نظری، طول عملی تقویت بدست می‌آید.

گام ۶: کنترل‌های لازم از نظر مساحت مجاز ورق تقویت و کمانش موضعی انجام می‌شود.

مثال ۵-۱

یک تیر ساده به طول دهانه ۴ متر و تحت اثر بار مرده $2 \frac{ton}{m}$ با در نظر گرفتن وزن تقریبی و بار زنده $3 \frac{ton}{m}$ قرار دارد. این تیر را از نیمرخ IPE27 با ورق تقویتی در محل حداکثر لنگر، طراحی نمایید. مهار جانبی پیوسته در طول دهانه تیر قرار داده می شود. α' را برابر b فرض نمایید.

حل:

گام ۱- محاسبه بار نهایی و لنگر خمشی نهایی

$$q_D = 2 \frac{ton}{m} = 2 \frac{ton}{m} \times 0.01 \frac{m}{cm} = 0.02 \frac{ton}{cm}$$

$$M_D = \frac{q_D L^2}{8} = \frac{0.02 \times 400^2}{8} = 400 \text{ ton.cm}$$

$$q_L = 3 \frac{ton}{m} = 3 \frac{ton}{m} \times 0.01 \frac{m}{cm} = 0.03 \frac{ton}{cm}$$

$$M_L = \frac{q_L L^2}{8} = \frac{0.03 \times 400^2}{8} = 600 \text{ ton.cm}$$

$$M_u = 1.2M_D + 1.6M_L = 1.2 \times 400 + 1.6 \times 600 = 1440 \text{ ton.cm}$$

گام ۲- کنترل ظرفیت خمشی

با استفاده از مهار جانبی پیوسته، لنگر خمشی پلاستیک کنترل کننده می باشد.

$$M_u \leq \phi_b M_n = \phi_b Z_x f_y$$

$$Z_x \geq \frac{M_u}{\phi_b f_y} = \frac{1440}{0.9 \times 2.4} = 666.7 \text{ cm}^3$$

اساس مقطع پلاستیک بدست آمده با مقطع IPE27 (بدون ورق تقویت) مقایسه می شود.

$$IPE27 \rightarrow Z_{xi} = 460.5 \text{ cm}^3$$

ملاحظه می شود که مقطع IPE27 جوابگوی نیاز خمشی تیر نیست و لذا به ورق تقویتی نیاز خواهد بود.

گام ۳- تعیین ابعاد مقطع ورق - روش اول

عرض و ضخامت ورق با سعی و خطا تعیین می شود. ابتدا عرض ورق با توجه به توصیه های اجرایی انتخاب می شود.

$$b_{pl} \leq b_f - 3 \text{ cm} = 14 - 3 = 11 \rightarrow \text{try } b_{pl} = 10 \text{ cm}$$

ضخامت ورق با توجه به اساس مقطع پلاستیک مورد نیاز تعیین می گردد.

$$Z_x = Z_{xi} + A_{pl}(d + t_{pl})$$

$$Z_x = 460.5 + b_{pl} t_{pl} (d + t_{pl}) \geq 666.7$$

$$IPE27 \rightarrow d = 27 \text{ cm}, b_f = 14 \text{ cm}, t_f = 1.02 \text{ cm}$$

$$10 t_{pl} (27 + t_{pl}) \geq 666.7 - 460.5 = 206.2 \xrightarrow{\text{solve}} t_{pl} \geq 0.74 \text{ cm}$$

با توجه به محدودیت سطح مقطع ورق:

$$A_{pl} \leq 2.33A_f$$

$$A_{pl} = b_{pl}t_{pl} = 10 t_{pl} \leq 2.33A_f = 2.33 b_f t_f = 2.33 \times 14 \times 1.02 \rightarrow t_{pl} \leq 3.3cm$$

و با توجه به محدودیت فشردگی ورق:

$$\lambda_{pl} = \frac{b_{pl}}{t_{pl}} \leq \lambda_{p,pl} = 1.12 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda_{pl} = \frac{b_{pl}}{t_{pl}} = \frac{10}{t_{pl}} \leq \lambda_{p,pl} = 1.12 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1.12 \sqrt{\frac{2040}{2.4}} = 32.6 \rightarrow t_{pl} \geq 0.3 cm$$

با توجه به سه نامعادله فوق، ضخامت ۸ میلیمتر برای ورق انتخاب می‌گردد.

$$use PL 10 \times 0.8cm$$

گام ۴- تعیین ابعاد مقطع ورق - روش دوم

عرض و ضخامت ورق با سعی و خطا تعیین می‌شود. ابتدا ضخامت ورق با توجه به ابعاد ورقهای موجود، با ضخامت نزدیک به ضخامت بال پروفیل انتخاب می‌شود.

$$IPE27 \rightarrow d = 27cm, b_f = 14cm, t_f = 1.02cm$$

$$t_{pl} \rightarrow \{8mm, 10mm, 12mm\} \rightarrow try t_{pl} = 0.8cm$$

عرض ورق با توجه به اساس مقطع پلاستیک مورد نیاز تعیین می‌گردد.

$$Z_x = 460.5 + b_{pl}t_{pl}(d + t_{pl}) \geq 666.7$$

$$0.8b_{pl}(27 + 0.8) \geq 666.7 - 460.5 = 206.2 \xrightarrow{solve} b_{pl} \geq 9.27cm$$

با توجه به محدودیت جوشکاری:

$$b_{pl} \leq b_f - 3cm = 14 - 3 = 11cm$$

با توجه به محدودیت سطح مقطع ورق:

$$A_{pl} \leq 2.33A_f$$

$$A_{pl} = b_{pl}t_{pl} = 0.8 b_{pl} \leq 2.33A_f = 2.33 b_f t_f = 2.33 \times 14 \times 1.02 \rightarrow b_{pl} \leq 41.6cm$$

و با توجه به محدودیت فشردگی ورق:

$$\lambda_{pl} = \frac{b_{pl}}{t_{pl}} \leq \lambda_{p,pl} = 1.12 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda_{pl} = \frac{b_{pl}}{t_{pl}} = \frac{b_{pl}}{0.8} \leq \lambda_{p,pl} = 1.12 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1.12 \sqrt{\frac{2040}{2.4}} = 32.6 \rightarrow b_{pl} \leq 26.1 cm$$

با توجه به سه نامعادله فوق، عرض ۱۰ سانتیمتر برای ورق انتخاب می‌گردد.

$$\rightarrow try b_{pl} = 10cm$$

$$use PL 10 \times 0.8cm$$

گام ۵- تعیین طول ورق

IPE27 جوابگوی لنگر وسط دهانه نمی باشد، در نتیجه لنگر قابل تحمل پروفیل محاسبه و سپس محلی در طول دهانه که IPE27 جوابگو است، تعیین می گردد.

$$M_u \leq \phi_b Z_x f_y$$

$$M_u = R_A x - \frac{\omega_u x^2}{2} \leq \phi_b Z_{xi} f_y = 0.9 \times 460.5 \times 2.4 = 995 \text{ ton.cm}$$

$$\frac{0.072 \times 400}{2} x - \frac{0.072 x^2}{2} = 995 \rightarrow x^2 - 400x + 27639 = 0$$

$$\rightarrow x = 200 \pm \sqrt{200^2 - 1 \times 27639} \rightarrow \begin{cases} x = 89 \text{ cm} \\ x = 311 \text{ cm} \end{cases}$$

نقاط بدست آمده، نقاطی هستند که لنگر نهایی و ظرفیت خمشی مقطع برابر شده اند. لذا برای طول ۸۹ سانتیمتر ابتدا و انتهای تیر، مقطع بدون ورق جوابگو خواهد بود.

$$L_{pl} = 311 - 89 = 222 \text{ cm}$$

$$OR: L_{pl} = 2 \left(\frac{400}{2} - 89 \right) = 222 \text{ cm}$$

طول عملی ورق تقویت L'_{pl} برابر است با طول نظری ورق تقویت بعلاوه $2a'$

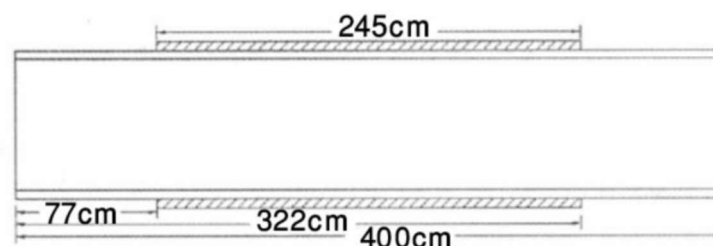
$$a' = b_{pl} = 10 \text{ cm}$$

$$L'_{pl} \geq L_{pl} + 2a'$$

$$L'_{pl} \geq 222 + 20 = 242 \text{ cm} \rightarrow \text{say } L'_{pl} = 245 \text{ cm}$$

$$\text{use PL } 245 \times 10 \times 0.8 \text{ cm}$$

مقطع طولی تیر به صورت شماتیک در شکل زیر نمایش داده شده است.



ورق $10 \times 0.8 \text{ cm}$ به طول 2.4 m در بالا و پایین مقطع جوش می شود که معادل $\frac{245}{400} = 61\%$ درصد از طول ورق است. البته ورق در این ابعاد برای کل طول تیر مورد نیاز نمی باشد و می توان عرض ورق را در فواصل معین کاهش داد یا ورق را با عرض متغیر در نظر گرفت.

گام ۶- کنترل برش

$$\lambda_w = \frac{h_c}{t_w} = \frac{219}{6.6} = 33.2 \leq 2.24 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 2.24 \times \sqrt{\frac{2040}{2.4}} = 65.31 \rightarrow C_v = 1, \phi_v = 1$$

$$V_u \leq \phi_v V_n$$

$$V_u = 1.2 \times \frac{q_D L}{2} + 1.6 \times \frac{q_L L}{2}$$

$$V_u = 1.2 \times \frac{2 \times 4}{2} + 1.6 \times \frac{3 \times 4}{2} = 14.4 \text{ ton}$$

$$V_n = 0.6 f_y A_w C_v$$

$$V_n = 0.6 \times 2.4 \times (27 \times 0.66) \times 1 = 25.7 \text{ ton}$$

$$V_u = 14.4 \text{ ton} \leq \phi_v V_n = 25.7 \text{ ton} \rightarrow OK$$

مقطع جوابگو می‌باشد.

گام ۷- کنترل فشردگی مقطع

$$\lambda_f = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{13.5}{2(1.02)} = 6.6 \leq \lambda_{fp} = 0.38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0.38 \sqrt{\frac{2040}{2.4}} = 11.08$$

$$\lambda_w = \frac{h}{t_w} = \frac{21.9}{0.66} = 32.2 \leq \lambda_{pw} = 3.76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 3.76 \sqrt{\frac{2040}{2.4}} = 109.6$$

مقطع شرایط فشرده بودن را دارد.

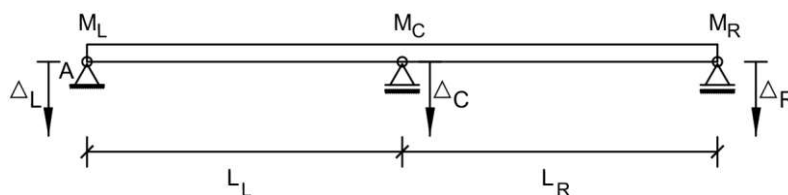
توجه: میان مهندسین محاسب رسم است در تیرهای دو سر مفصل با بار گسترده طول ورق تقویت را $\frac{2}{3}$ طول دهانه تیر در نظر گرفته می‌شود. با توجه به این ضابطه طول ورق تقویت در مثال بالا $L = \frac{2}{3} \times 4 = 2.66 \text{ m}$ خواهد شد.

۵-۳ طراحی تیرهای سراسری

لنگر حداکثر در یک تیر ساده با بار گسترده مقدار $\frac{qL^2}{8}$ می‌باشد. این لنگر حداکثر در یک تیر سراسری با توجه به تعداد دهانه و طول دهانه و میزان بار وارده تعیین می‌گردد. لنگر حداکثر در تیرهای سراسری کمتر از لنگر در تیر دو سر مفصل معادل خود می‌باشد، لذا استفاده از تیرهای سراسری می‌تواند باعث کاهش لنگر طراحی و کاهش خیز تیر گردد. در تیرهای سراسری، تیر می‌تواند از کنار ستونها عبور نماید که در اصطلاح کارگاهی به تیرهای مذکور، تیرهای خورجینی اطلاق می‌شود.

۵-۳-۱ تحلیل تیر سراسری به کمک قضیه سه لنگر

تیرهای سراسری، تیرهای نامعینی هستند که معمولاً بر روی سه تکیه‌گاه یا بیشتر قرار می‌گیرند و لنگر خمشی در تیر در محل تکیه‌گاهها نیز وجود خواهد داشت. از قضیه سه لنگر می‌توان برای تحلیل تیرهای سراسری نامعین استفاده کرد. این قضیه رابطه‌ای بین لنگرها و خیزهای سه نقطه از یک عضو خمشی برقرار می‌کند. در این روش مجهول نامعینی همان لنگرهای خمشی مجهول در محل تکیه‌گاهها هستند. رابطه سه لنگر را باید به شمار درجات نامعینی تیر سراسری به کار گرفت. به این ترتیب معادله‌های اضافی در دسترس قرار می‌گیرند که با حل همزمان آنها لنگرهای خمشی مجهول پیدا خواهد شد. در ادامه تحلیل، دیگر نیروهای مجهول سازه با استفاده از روابط ایستایی محاسبه می‌گردند. در شکل زیر یک تیر سراسری دو دهانه نشان داده شده است. برای تعیین لنگر M_c در تکیه‌گاه میانی، قضیه سه لنگر به صورت زیر نوشته می‌شود:

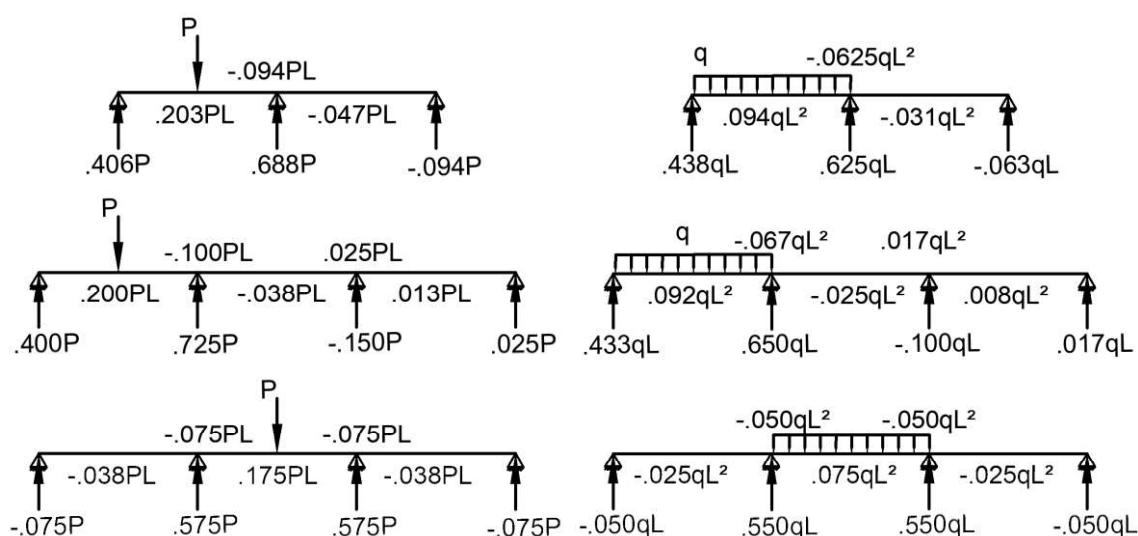


شکل ۴-۵ تیر سراسری دو دهانه

$$M_L \frac{L_L}{I_L} + 2M_C \left[\frac{L_L}{I_L} + \frac{L_R}{I_R} \right] + M_R \frac{L_R}{I_R} = -6 \frac{S_L \bar{x}_L}{I_L L_L} - 6 \frac{S_R \bar{x}_R}{I_R L_R} + 6E \left[-\frac{\Delta_L}{L_L} + \frac{\Delta_C}{L_L} + \frac{\Delta_C}{L_R} - \frac{\Delta_R}{L_R} \right] \quad ۵-۵$$

M_R, M_L	لنگر در تکیه‌گاه‌های چپ و راست	S_R	مساحت نمودار لنگر خمشی در سمت راست تکیه‌گاه C
M_C	لنگر در تکیه‌گاه میانی	S_L	مساحت نمودار لنگر خمشی در سمت چپ تکیه‌گاه C
Δ_L	نشست تکیه‌گاه چپ	$\bar{x}_R$	فاصله بین مرکز سطح نمودار لنگر در سمت راست تا تکیه‌گاه کناری
Δ_R	نشست تکیه‌گاه راست	$\bar{x}_L$	فاصله بین مرکز سطح نمودار لنگر در سمت چپ تا تکیه‌گاه کناری
Δ_C	نشست تکیه‌گاه میانی		

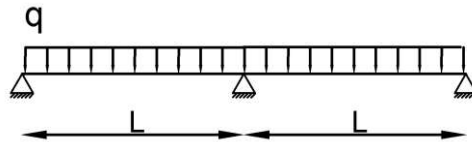
جهت دستیابی به اطلاعات بیشتر در مورد قضیه سه لنگر و نحوه بکارگیری آن در شرایط مختلف به کتب تحلیل سازه مراجعه نمایید. به عنوان مثال نمودار لنگر در تعدادی از تیرهای سراسری در دهانه‌های با عرض یکسان L و بار گسترده یکنواخت q یا بار متمرکز P در شکل زیر ارائه شده است. توجه شود که در جداول زیر لنگرهای دهانه مربوط به وسط دهانه است. در تیرهای سرتاسری لنگر ماکزیمم مثبت دهانه، در وسط دهانه قرار نمی‌گیرد و مقدار آن نیز کمی بیشتر از لنگر وسط دهانه است. با این وجود اعداد مربوط به وسط دهانه ارائه شده تا لنگر تحت شرایط مختلف بارگذاری متمرکز و گسترده، قابل محاسبه بوده و قانون جمع آثار (سوپر پوزیشن) برای تیر صادق باشد.



شکل ۵-۵ عکس‌العملهای تکیه‌گاهی و لنگرهای میانی در تیرهای سراسری

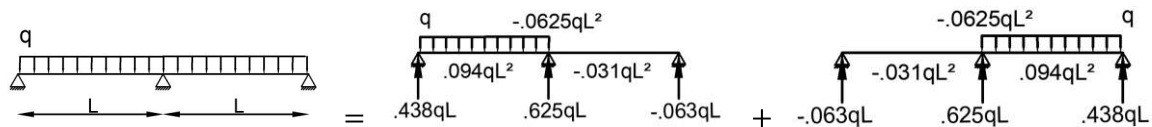
مثال ۵-۲

شکل زیر مربوط به تیر سراسری با دو دهانه ۵ متری است که تحت اثر بار گسترده $q = 2 \frac{\text{ton}}{\text{m}}$ قرار گرفته است. مطلوب است محاسبه عکس‌العمل قائم تکیه‌گاهها و لنگر موجود در بالای تکیه‌گاه میانی، با استفاده از جداول محاسباتی.



حل:

با مقایسه وضعیت تیر با حالت‌های نشان داده شده در جدول، نتیجه تحلیل تیر از مجموع نتایج تحلیل تیر در دو حالت زیر قابل دستیابی است:



گام ۱- محاسبه عکس‌العمل تکیه‌گاههای کناری

$$R_{Left} = R_{Right} = .438qL + (-.063qL) = .375 \times 2 \frac{\text{ton}}{\text{m}} \times 5\text{m} = 3.75 \text{ ton}$$

گام ۲- محاسبه عکس‌العمل تکیه‌گاه میانی

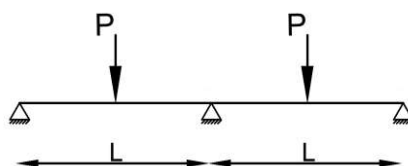
$$R_{mid} = .625qL + .625qL = 1.25 \times 2 \frac{\text{ton}}{\text{m}} \times 5\text{m} = 12.5 \text{ ton}$$

گام ۳- محاسبه لنگر بالای تکیه‌گاه میانی

$$M_{mid} = -.0625qL^2 + (-.0625qL^2) = -.125 \times 2 \frac{\text{ton}}{\text{m}} \times (5\text{m})^2 = -6.25 \text{ ton.m}$$

مثال ۵-۳

شکل زیر مربوط به تیر سراسری با دو دهانه ۵ متری تحت اثر بار متمرکز $q = 10\text{ton}$ است. مطلوب است محاسبه عکس‌العمل قائم تکیه‌گاهها و لنگر موجود در بالای تکیه‌گاه میانی، با استفاده از جداول محاسباتی.

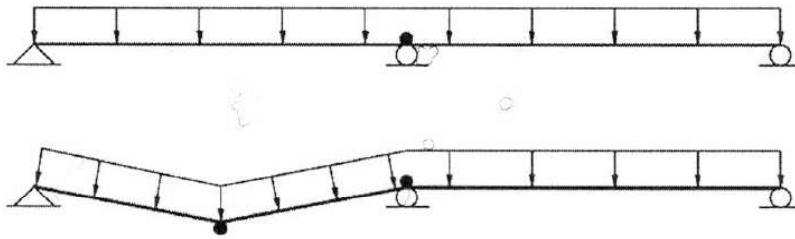


حل:	
گام ۱-	محاسبه عکس العمل تکیه گاههای کناری
$R_{Left} = R_{Right} = .406P + (-.094P) = .312 \times 10ton = 3.1 ton$	
گام ۲-	محاسبه عکس العمل تکیه گاه میانی
$R_{mid} = .688P + .688P = 1.376 \times 10ton = 13.8 ton$	
گام ۳-	محاسبه لنگر بالای تکیه گاه میانی
$M_{mid} = -.094PL + (-.094PL) = -.188 \times 10ton \times 5m = -9.4 ton.m$	

۲-۳-۵ باز توزیع لنگر^۱

نکته قابل توجه در بررسی تیرهای سراسری، اثرات رفتار خمیری (پلاستیک) سازه یا باز توزیع لنگر در تحلیل و طراحی آن است. سازه ها در حالت شکست نهایی و در صورت برقرار بودن شرایط لازم دارای رفتار خمیری می باشند. این رفتار سبب باز توزیع لنگرها و انتقال نیروها از نقطه شکست به نقاط دیگر سازه قبل از شکست نهایی عضو می شود. رفتار خمیری در صورتی امکان پذیر است که سازه قابلیت شکل پذیری داشته باشد. شکل پذیری سازه های فولادی نیز به فشرده بودن مقطع و مهار جانبی کافی طبق مطالب فصل چهارم دارد. بنابراین اگر شرایط لازم از نظر رفتار خمیری سازه برقرار باشد، با رسیدن یک نقطه از سازه به حداکثر ظرفیت، الزاماً شکست در سازه اتفاق نمی افتد و باربری سازه در اثر باز توزیع لنگرها با انتقال نیروها به نقاط دیگر سازه ادامه خواهد داشت تا مکانیزم شکست در سازه ایجاد شود. به عبارت دیگر، شکست نهایی سازه فقط پس از تشکیل مکانیزم شکست در سازه اتفاق می افتد. برای درک بهتر از رفتار خمیری سازه یا باز توزیع لنگر، اگر به تیر سراسری نشان داده شده در شکل زیر توجه شود، با افزایش بار وارده، به تدریج یک نقطه از تیر به ظرفیت نهایی خود می رسد. از نظر تئوری ارتجاعی در وضعیتی که اولین نقطه از تیر که به ظرفیت نهایی خود برسد، تیر به حداکثر ظرفیت خود رسیده است و بار وارده نیز حداکثر بار نهایی تیر محسوب می شود. اما از نظر تئوری شکست یا رفتار خمیری سازه، این حالت ظرفیت نهایی یا شکست تیر محسوب نمی شود و باربری تیر ادامه خواهد داشت تا مکانیزم شکست در تیر ایجاد شود.

¹ Moment Redistribution



شکل ۵-۶ نمایش تیر سراسری و ایجاد اولین مفصل پلاستیک در تیر

نقاط به حداکثر ظرفیت رسیده با قابلیت شکل‌پذیری را اصطلاحاً مفصل پلاستیک می‌نامند. بنابراین تشکیل اولین مفصل پلاستیک الزاماً شکست سازه محسوب نمی‌شود و می‌تواند فقط تغییر وضعیت سازه از حالت نامعین به معین باشد. باربری و تغییر شکل سازه از تشکیل اولین مفصل پلاستیک ادامه خواهد داشت تا مکانیزم شکست در سازه ایجاد شود. بنابراین ظرفیت باربری سازه از تئوری خمیری حداقل برابر یا بیشتر از تئوری ارتجاعی می‌باشد. به عبارت دیگر، لنگرهای بدست آمده از تئوری ارتجاعی را می‌توان بر اساس رفتار خمیری سازه، باز توزیع و بهینه نمود. باید توجه داشت که عمل باز توزیع لنگر بسته به اینکه اولین مفصل پلاستیک در کدام محل تشکیل می‌شود، می‌تواند سبب افزایش یک لنگر و کاهش لنگر دیگر شود. ذکر این نکته نیز ضروری است که در صورت استفاده از تحلیل پلاستیک، نیازی به باز توزیع لنگرها نبود زیرا رفتار خمیری سازه در تحلیل آن در نظر گرفته شده بود. اما با توجه به تحلیل ارتجاعی، اثرات رفتار خمیری سازه باید به شکل دیگری اعمال شود که به آن باز توزیع لنگر می‌گویند. باید به این نکته نیز توجه داشت که رفتار خمیری سازه یا باز توزیع لنگر در جهت کاهش لنگرهای طراحی می‌باشد و استفاده از آن الزامی نمی‌باشد. اما باز توزیع لنگر روشی مناسب برای بهینه نمودن طرح و کاهش مصالح مصرفی می‌باشد.

برای تشریح ضوابط آیین‌نامه در مورد باز توزیع لنگر، تیر سراسری در دهانه AB فرض می‌شود. چنانچه لنگر منفی حداکثر M_A^- در محل تکیه‌گاه A به وجود آید، می‌توان تیر را برای تحمل ۰٫۹ لنگر منفی تکیه‌گاه محاسبه نمود که به آن لنگر منفی باز توزیع شده $M_A^{-(R)}$ گفته می‌شود. باز توزیع لنگر در تکیه‌گاه B نیز به صورت مشابه انجام می‌شود. در این صورت لازم است لنگر مثبت M_{AB}^+ در میان دهانه AB به مقدار ۰٫۱ میانگین لنگرهای منفی در دو سر تیر افزایش یابد که به آن لنگر مثبت باز توزیع شده $M_{AB}^{+(R)}$ گفته می‌شود. بدین ترتیب لنگر منفی باز توزیع شده $M_A^{-(R)}$ برای تکیه‌گاه A و $M_B^{-(R)}$ برای تکیه‌گاه B و لنگر مثبت باز توزیع شده $M_{AB}^{+(R)}$ در میان دهانه AB مطابق روابط زیر محاسبه می‌شود.

$$M_A^{-(R)} = 0.9 M_A^-$$

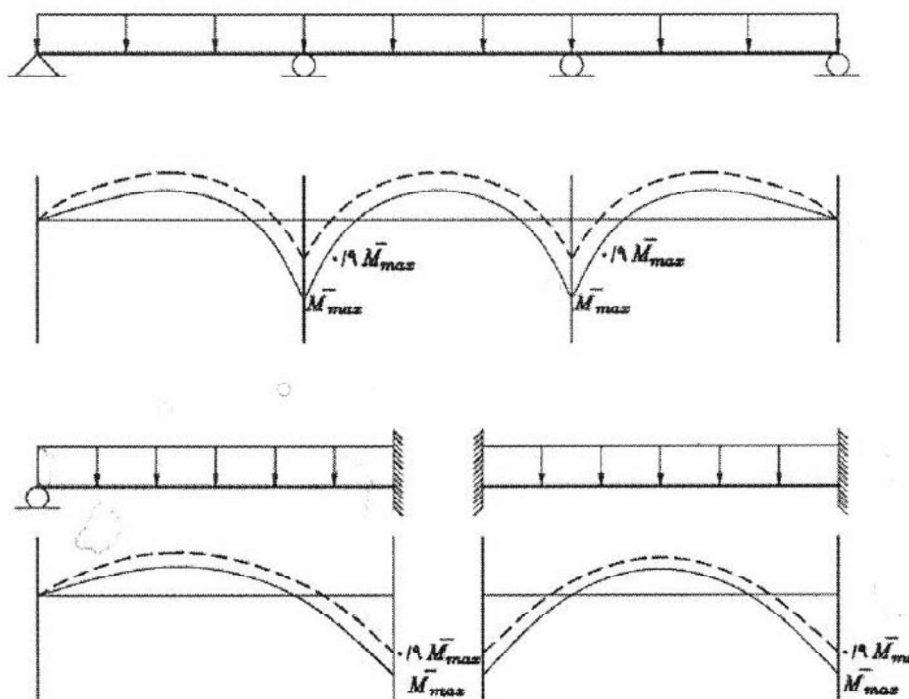
$$M_B^{-(R)} = 0.9 M_B^-$$

$$M_{AB}^{+(R)} = M_{AB}^+ + 0.1 \left| \frac{M_A^- + M_B^-}{2} \right|$$

۶-۵

$M_B^{-(R)}$	لنگر منفی باز توزیع شده در تکیه‌گاه A	$M_A^{-(R)}$
M_B^-	لنگر منفی در تکیه‌گاه A	M_A^-
M_{AB}^+	لنگر مثبت باز توزیع شده در میان دهانه AB	$M_{AB}^{+(R)}$
	لنگر مثبت در میان دهانه AB	

لازم به ذکر است محل وقوع بیشینه لنگر مثبت، در وسط دهانه قرار نداشته و لازم است مقدار لنگر مثبت با استفاده از روابط تحلیلی محاسبه شود. باز توزیع لنگر برای اعضای که شرایط مقطع فشرده با نگهداری جانبی را دارند، در تکیه‌گاه مانند تیر سراسری ادامه می‌یابند و یا با اتصال صلب به ستون متصل هستند و به صورت عضوی از قاب صلب کار می‌کنند قابل انجام است. مقادیر محاسبه شده لنگر تحت اثر بار ثقلی بوده که از تحلیل ارتجاعی بدست آمده است. کاهش لنگر منفی در مورد تیرهای طره و یا در مواردی که تحلیل پلاستیک استفاده می‌شود، مجاز نمی‌باشد. باز توزیع لنگر در چند حالت در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۵-۷ باز توزیع لنگر در تیر سراسری و تغییر دیاگرام لنگر

۵-۳-۳ موقعیت مهارهای جانبی

نکته مهم دیگر در طراحی تیرهای سراسری، موقعیت مهارهای جانبی می‌باشد. با توجه به ضرورت مهار بال فشاری و همچنین تغییر موقعیت بال فشاری در تیرهای سراسری، معمولاً از مهارهای پیچشی استفاده می‌شود. مهارهای پیچشی معمولاً در وسط جان مقطع قرار داده می‌شوند که از نظر مهار جانبی هر دو بال مقطع موثر باشند.

۵-۳-۴ مراحل گام به گام طراحی تیرهای سراسری

مراحل گام به گام طرح تیر سراسری به شرح زیر است:

گام ۱: ابتدا دیاگرام لنگر واقعی تیر رسم شود.

گام ۲: با فرض فشرده‌گی مقطع، لنگرهای باز توزیع شده محاسبه می‌شود.

- گام ۳: تیر سراسری برای لنگر حداکثر (لنگر منفی) طرح می‌گردد.
- گام ۴: شرایط فشردگی مقطع بررسی می‌شود، اگر شرایط برقرار نبود گام ۴ انجام می‌گردد.
- گام ۵: در صورتی که شرایط فشردگی برقرار نباشد از دیاگرام لنگر باز توزیع شده نمی‌توان استفاده کرد، در این حالت از دیاگرام لنگر واقعی استفاده کرده و مراحل از گام ۲ مجدداً تکرار می‌شود.

۵-۳-۵ تیرهای سراسری با تقویت در ناحیه لنگر منفی

چنانچه در قسمتهای قبل بیان گردید در تیرهای سراسری معمولاً لنگر تکیه‌گاه مقدار بیشتری از لنگر دهانه می‌باشد. با توجه به اینکه لنگر منفی مذکور خیلی سریع صفر می‌شود (شیب تغییرات لنگر منفی به علت برش زیاد در تکیه‌گاه قابل توجه است) لذا ایده استفاده از ورق تقویتی در ناحیه لنگر منفی، جهت اقتصادی شدن تیر مناسب است. معمول است که تیرهای سراسری را برای لنگر دهانه طرح و برای لنگر تکیه‌گاه تقویت می‌نمایند. در طراحی تیرهای سراسری با ورق تقویت دو حالت در نظر گرفته می‌شود. چنانچه تیر سراسری با مقطع فشرده و مهار جانبی کافی باشد، در این حالت مقاومت خمشی طراحی تیر $M_u = \phi_b M_p$ بوده و طراحی آن با لنگر باز توزیع شده تیر در ناحیه لنگر مثبت انجام می‌شود و با لنگر منفی باز توزیع شده تیر، تقویت آن طراحی می‌گردد. چنانچه تیر سراسری با فواصل مهار جانبی ناکافی باشد، در این حالت مقاومت خمشی طراحی تیر از ضوابط فصل خمش، تعیین و طراحی آن با لنگر تیر در ناحیه مثبت انجام شده و با لنگر منفی تیر، تقویت آن طراحی می‌گردد.

۵-۳-۶ مراحل گام به گام طراحی تیرهای سراسری با ورق تقویت

با توجه به اینکه تیر سراسری سازه نامعین است و با توجه به نوع دیاگرام لنگر تیر سراسری که در آن لنگر حداکثر (M^-) با شیب زیادی کاهش می‌یابد، استفاده از ورق تقویت در این تیرها امری معمول محسوب می‌گردد. در این ارتباط، تیر برای لنگر حداکثر مثبت (M^+) دهانه طراحی شده و برای حداکثر لنگر منفی (M^-) تکیه‌گاه با ورق، تقویت می‌شود. بنابراین طرح تیر، اقتصادی‌تر خواهد بود و به طول کمی از ورق تقویت نیاز می‌باشد. اصول مربوط به طرح ورق تقویت (ابعاد ورق تقویت و طول آن) تابع همان ضوابط قبلی است که در بخش (۵-۲) تشریح گردیده است.

مراحل گام به گام طرح تیر سراسری به کمک ورق تقویت به شرح زیر است:

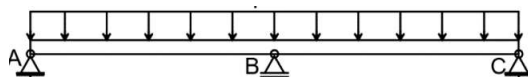
- گام ۱: ابتدا دیاگرام لنگر واقعی تیر رسم شود.
- گام ۲: با فرض فشردگی مقطع، لنگرهای باز توزیع شده محاسبه می‌شود.
- گام ۳: تیر سراسری برای لنگر مثبت طراحی می‌گردد.
- گام ۴: عرض و ضخامت ورق تقویت برای تحمل لنگر منفی تعیین می‌گردد.
- گام ۵: با استفاده از دیاگرام لنگر و لنگر قابل تحمل پروفیل، طول نظری ورق بدست می‌آید.
- گام ۶: با محاسبه a' و افزودن آن به طول نظری در هر طرف ورق، طول عملی بدست می‌آید.
- گام ۷: کنترل‌های لازم از نظر کماتش موضعی و مساحت مجاز ورق تقویت انجام می‌گردد.
- گام ۸: شرایط فشردگی مقطع بررسی می‌شود، اگر شرایط برقرار نبود گام ۸ انجام می‌شود.

گام ۹: در صورتی که شرایط فشردگی برقرار نباشد از دیاگرام لنگر باز توزیع شده نمی توان استفاده کرد در این حالت از دیاگرام لنگر واقعی استفاده کرده و مراحل از گام ۲ مجدداً تکرار می گردد.

توجه: چنانچه تیر سراسری دارای شرایط فشردگی باشد، برای طراحی می توان از دیاگرام لنگر باز توزیع شده استفاده نمود؛ در غیر این صورت باید از دیاگرام لنگر واقعی در طراحی تیر و ورق تقویت استفاده گردد.

مثال ۴-۵

طرح تیر ۱۸ متری دو دهانه شکل زیر، از پروفیل *IPE* و ورق تقویت مورد نظر است. مقاومت خمشی طراحی $\phi_b M_p$ در نظر گرفته شود و در انتهای حل مسئله شرایط قطعه طوری تعیین گردد که مقطع تیر فشرده شود. بار مرده $q_D = 1.5 \frac{\text{ton}}{\text{m}}$ و بار زنده $q_L = 0.437 \frac{\text{ton}}{\text{m}}$ می باشد. ترکیب بار $1.2D + 1.6L$ مد نظر قرار گیرد.



حل:

گام ۱- محاسبه بار نهایی (ضریبدار) و تعیین نتایج تحلیل تیر

بار نهایی (ضریبدار) با توجه به ترکیب بار مشخص شده، محاسبه می شود.

$$q_u = 1.2 \times 1.5 + 1.6 \times 0.437 = 2.5 \frac{\text{ton}}{\text{m}}$$

تعیین نتایج تحلیل با استفاده از جدول نتایج تحلیل تیر سراسری انجام می شود.

عکس العمل تکیه گاه کناری:

$$R_A = R_C = .438qL + (-.063qL) = .375 \times 2.5 \frac{\text{ton}}{\text{m}} \times 9\text{m} = 8.44 \text{ ton}$$

عکس العمل تکیه گاه میانی:

$$R_B = .625qL + .625qL = 1.25 \times 2.5 \frac{\text{ton}}{\text{m}} \times 9\text{m} = 28.125 \text{ ton}$$

بیشینه لنگر منفی:

$$M^- = M_B = -.0625qL^2 + (-.0625qL^2) = -.125 \times 2.5 \frac{\text{ton}}{\text{m}} \times (9\text{m})^2 = -25.31 \text{ ton.m}$$

بیشینه لنگر مثبت:

برای محاسبه مقدار بیشینه لنگر مثبت، لازم است ابتدا محل آن مشخص گردد. از روش تعیین محل برش صفر استفاده می شود.

$$R_A - q_u \cdot x = 0 \rightarrow 8.44 \text{ ton} - 2.5 \frac{\text{ton}}{\text{m}} x = 0 \rightarrow x = 3.38\text{m}$$

$$M^+ = M(x = 3.38\text{m}) = R_A \cdot x - \frac{q_u x^2}{2} = 8.44 \times 3.38 - \frac{2.5 \times 3.38^2}{2} = 14.24 \text{ ton.m}$$

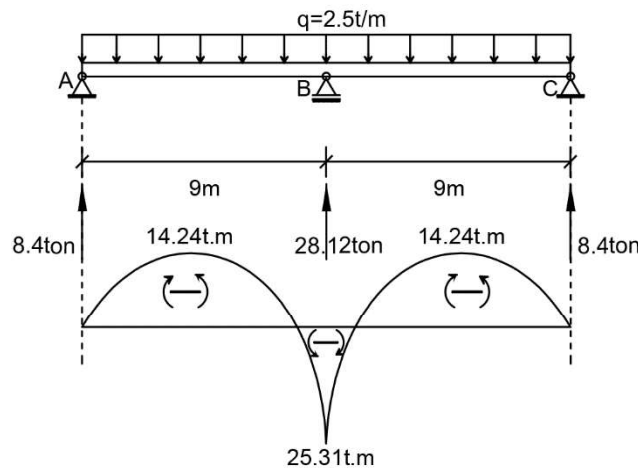
چنانچه ملاحظه می گردد محل لنگر بیشینه مثبت در وسط تیر واقع نشده است. همچنین مقدار آن با مقدار لنگر مثبت حاصل از جدول نتایج تحلیل متفاوت است.

$$M_{mid} = .094qL^2 - .031qL^2 = .063 \times 2.5 \frac{\text{ton}}{\text{m}} \times (9\text{m})^2 = 12.76 \text{ ton.m}$$

از این رو لازم است مقدار لنگر در محل بیشینه آن محاسبه گردد. در مواردی که تیر دارای درجه نامعینی زیاد است و یا بارگذاری اعمال شده از سادگی کافی برخوردار نیست، تعیین مقدار لنگر بیشینه نیاز به محاسبات بیشتری دارد.

گام ۲- ترسیم نمودار لنگر

دیاگرام لنگر تیر مطابق شکل زیر است.



شکل ۵-۸ نمایش تیر مثال و دیاگرام لنگر آن

گام ۳- بازتوزیع لنگر

با توجه به اینکه مقطع تیر در ابتدا فشرده فرض شده است، از دیاگرام لنگر بازتوزیع شده استفاده می‌شود.

$$M^{-(R)} = 0.9M^- = 0.9 \times 25.31 = 22.78 \text{ ton.m}$$

$$M^{+(R)} = 14.24 + 0.1 \left| \frac{25.31 + 0}{2} \right| = 15.5 \text{ ton.m}$$

تیر برای لنگر مثبت طراحی می‌گردد.

گام ۴- کنترل ظرفیت خمشی و انتخاب مقطع

$$Z_{xi} \geq \frac{M^+}{\phi_b f_y} = \frac{1550}{0.9 \times 2.4} \Rightarrow Z_x \geq 717.6 \text{ cm}^3$$

با اساس مقطع پلاستیک بدست آمده IPE33 به عنوان مقطع قابل کنترل انتخاب می‌گردد.

$$IPE33 \rightarrow b_f = 16 \text{ cm}, t_f = 1.15 \text{ cm}, d = 33 \text{ cm}, Z_x = 804 \text{ cm}^3, I_x = 11770 \text{ cm}^4, G = 49.1 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

از آنجا که دهانه تیر بیشتر از 6m است، اثر وزن تیر باید متناسب با تحلیل بارگذاری آن به شرح زیر بدست آید. و به لنگرهای طراحی

اضافه گردد و دوباره باز توزیع لنگر صورت گیرد.

$$q_u = 1.2 \times (1.5 + 0.0491) + 1.6 \times 0.437 = 2.55 \frac{\text{ton}}{\text{m}}$$

$$M_w^+ = 14.24 \times \frac{2.55}{2.5} = 14.52 \text{ ton.m}$$

$$M_w^- = 25.31 \times \frac{2.55}{2.5} = 25.81 \text{ ton.m}$$

گام ۵- باز توزیع لنگر

$$M^{-(R)} = 0.9M^- = 0.9 \times 25.81 = 23.22 \text{ ton.m}$$

$$M^{+(R)} = 14.52 + 0.1 \left| \frac{25.81+0}{2} \right| = 15.81 \text{ ton.m}$$

$$Z_x \geq \frac{M^+}{\phi_b F_y} = \frac{1581}{0.9 \times 2.4} \rightarrow Z_x \geq 731.9 \text{ cm}^3$$

بنابراین از همان *IPE33* استفاده می شود.

حال پروفیل برای تحمل لنگر منفی توسط ورق تقویت می شود.

گام ۶- تعیین ابعاد مقطع ورق

عرض و ضخامت ورق با سعی و خطا تعیین می شود. ابتدا ضخامت ورق با توجه به ابعاد ورقهای موجود، با ضخامت نزدیک به ضخامت بال پروفیل انتخاب می شود.

$$IPE33 \rightarrow b_f = 16 \text{ cm}, t_f = 1.15 \text{ cm}, d = 33 \text{ cm}$$

$$t_{pl} \rightarrow \{8 \text{ mm}, 10 \text{ mm}, 12 \text{ mm}\} \rightarrow \text{try } t_{pl} = 0.8 \text{ cm}$$

عرض ورق با توجه به اساس مقطع پلاستیک لازم در محل تکیه گاه B تعیین می گردد.

$$Z_x \geq \frac{M^-}{\phi_b f_y} = \frac{2322}{0.9 \times 2.4} \Rightarrow Z_x \geq 1075 \text{ cm}^3$$

$$Z_x = 804 + b_{pl} t_{pl} (d + t_{pl}) \geq 1075$$

$$0.8 b_{pl} (33 + 0.8) \geq 1075 - 804 = 271 \xrightarrow{\text{solve}} b_{pl} \geq 10.02 \text{ cm}$$

با توجه به محدودیت جوشکاری:

$$b_{pl} \leq b_f - 3 \text{ cm} = 16 - 3 = 13 \text{ cm}$$

با توجه به محدودیت سطح مقطع ورق:

$$A_{pl} \leq 2.33 A_f$$

$$A_{pl} = b_{pl} t_{pl} = 0.8 b_{pl} \leq 2.33 A_f = 2.33 b_f t_f = 2.33 \times 16 \times 1.15 \rightarrow b_{pl} \leq 53.6 \text{ cm}$$

و با توجه به محدودیت فشردگی ورق:

$$\lambda_{pl} = \frac{b_{pl}}{t_{pl}} \leq \lambda_{p,pl} = 1.12 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda_{pl} = \frac{b_{pl}}{t_{pl}} = \frac{b_{pl}}{0.8} \leq \lambda_{p,pl} = 1.12 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1.12 \sqrt{\frac{2040}{2.4}} = 32.6 \rightarrow b_{pl} \leq 26.1 \text{ cm}$$

با توجه به سه نامعاده فوق، عرض ۱۲ سانتیمتر برای ورق انتخاب می گردد.

→ try $b_{pl} = 12cm$
use PL $12 \times 0.8cm$

گام ۷- محاسبه طول ورق تقویت

$$M_u \leq \phi_b Z_x f_y$$

$$M_u = R_A x - \frac{q_u x^2}{2} \leq \phi_b Z_x f_y = 0.9 \times 804 \times 2.4 = 1737 \text{ ton.cm}$$

$$\frac{0.025 x^2}{2} - 8.4x = 1737 \rightarrow x^2 - 400x - 138960 = 0$$

$$\rightarrow x = 200 \pm \sqrt{200^2 + 1 \times 138960} \rightarrow \begin{cases} x = -166cm \\ x = +838cm \end{cases}$$

نقاط بدست آمده، نقاطی هستند که لنگر نهایی و ظرفیت خمشی مقطع برابر شده‌اند. پاسخ منفی خارج از محدوده تیر بوده و قابل قبول نیست.

$$L_{pl} = 2(900 - 838) = 124cm$$

طول عملی ورق تقویت L'_{pl} برابر است با طول نظری ورق تقویت بعلاوه $2a'$ و از آنجا که جزئیات جوش ورق تقویت به بال تیر مشخص نیست، در بحرانی‌ترین حالت $a' = 2b_{pl}$ فرض می‌شود.

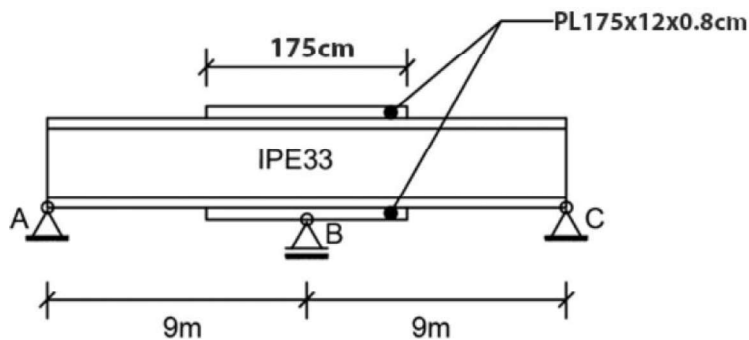
$$a' = 2b_{pl} = 2 \times 12 = 24cm$$

$$L'_{pl} \geq L_{pl} + 2a'$$

$$L'_{pl} \geq 124 + 2 \times 24 = 172cm \rightarrow \text{say } L'_{pl} = 175cm$$

$$\text{use PL } 175 \times 12 \times 0.8cm$$

مقطع طولی تیر به صورت شماتیک در شکل زیر نمایش داده شده است.



$$0.15 \times \left(\frac{9+9}{2}\right) = 1.35m$$

توجه ۱: با توجه به اینکه طول ورق تقویت $1.75m$ بدست آمد، ملاحظه می‌گردد که طول این ورق معادل $\frac{1.75}{18} \times 100 = 9.72\%$ از طول دهانه می‌باشد. میان مهندسین محاسب رسم است که طول ورق تقویت تیرهای سراسری را حدود 15% متوسط دهانه‌های طرفین تیر در نظر می‌گیرند.

توجه ۲: کد نبشی نشیمن تکیه‌گاه وسط $1cm$ پایینتر جوش می‌شود.

گام ۸- کنترل فشردگی ابعاد مقطع

$$\lambda_f = \frac{b_f}{2t_f} \frac{16}{2(1.15)} = 6.95 \leq \lambda_{pf} = 0.38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0.38 \sqrt{\frac{2040}{2.4}} = 11.08$$

$$\lambda_w = \frac{h_c}{t_w} = \frac{27.1}{0.75} = 36.13 \leq \lambda_{pw} = 3.76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 3.76 \sqrt{\frac{2040}{2.4}} = 109.6$$

گام ۹- فواصل مهار جانبی

جهت فشردگی مقطع بایستی فواصل مهارها کمتر از L_p شود.

$$IPE33 \rightarrow r_y = 3.55 \text{ cm}$$

$$L_p = 1.76 r_y \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1.76 \times 3.55 \sqrt{\frac{2040}{2.4}} = 182.2 \text{ cm}$$

$$\rightarrow L_b \leq L_p = 182.2 \text{ cm}$$

با فرض n تکیه‌گاه در هر دهانه، آن دهانه به $n+1$ قسمت تقسیم می‌شود.

$$n + 1 \geq \frac{L}{L_b} = \frac{900}{182.2} = 4.94 \rightarrow n + 1 = 5 \rightarrow n = 4$$

$$L_b = \frac{L}{n+1} = \frac{900}{5} = 180 \text{ cm}$$

بنابراین بجز در تکیه‌گاهها، باید ۴ عدد مهار جانبی در هر دهانه تیر و در فواصل ۱۸۰ سانتیمتر منظور شود تا بتوان تیر را فشرده فرض نمود.

۴-۵ بررسی تیر در محل اعمال بارهای متمرکز بزرگ

به طور معمول در اغلب تیرها انجام کنترل لنگر، برش، خیز و ارتعاش کافی است. در مواردی که بار بزرگی به صورت متمرکز و یا به صورت گسترده با پهنای کم بر تیر یا ستون وارد شود، امکان دارد در محل اعمال بار نیاز به سخت کننده باشد. به طور مثال در محل اعمال بارهای متمرکز، جان تیر باید برای جاری شدن موضعی، لهیدگی و کمانش توام با انتقال جانبی کنترل گردد. به عنوان مثال بار متمرکز بزرگ را می‌توان در نقاط زیر یافت:

- در محلی که یک ستون روی یک تیر قرار می‌گیرد.
- در محل اتصال مهاربندهای شورون (هفتی و هشتی) به تیر.
- در محل تکیه‌گاهها.

چنانچه بر اساس کنترل های انجام شده (جاری شدگی یا تسلیم موضعی جان، لهیدگی جان، کمانش توام با انتقال جانبی) مشخص گردید که جان تیر در زیر بار متمرکز جوابگو نمی باشد، می‌توان برای جبران این نقیصه نسبت به موارد زیر اقدام نمود:

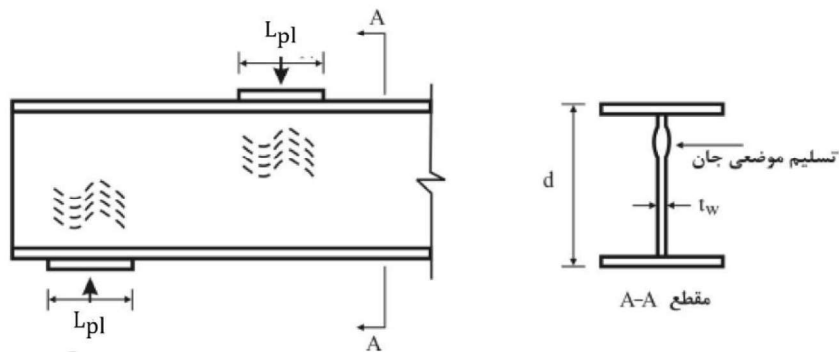
- تقویت جان تیر از طریق تعبیه سخت کننده در جان تیر.
- تقویت جان تیر از طریق تعبیه ورق مضاعف به جان تیر.

- اضافه نمودن عرض ورق اعمال کننده بار متمرکز (N).
- تغییر شماره پروفیل و افزایش آن به منظور افزایش مساحت جان.

۵-۴-۱ تسلیم (جاری شدگی) موضعی جان

هنگامی که بارهای متمرکز سنگین به تیرهای فولادی اعمال می‌شوند، به علت تنشهای فشاری بیش از حد در محل اتصال بال به جان، تسلیم موضعی رخ می‌دهد. محل بحرانی این تسلیم موضعی، جایی است که گودی و کلفتی ریشه اتصال بال به جان تمام شده و ضخامت نازک جان پدیدار می‌شود. هر چه بار متمرکز مقدار زیادتر و عرض صفحه‌ای که بار متمرکز را به بال تیر منتقل می‌کند کمتر و جان نازکتر شود، احتمال وقوع این پدیده بیشتر خواهد بود.

در شکل زیر تیری نشان داده شده که تحت بار متمرکز ضریبدار (و یا عکس‌العمل تکیه‌گاهی که خود نوعی بار متمرکز است) به مقدار R_u می‌باشد. میزان تنشهای فشاری در مقطع بحرانی در زیر بار متمرکز به نحوه توزیع تنش در محل بار بستگی دارد. آیین‌نامه‌های طراحی برای سهولت در امر محاسبات، توزیع تنش را در محل مقطع بحرانی به صورت یکنواخت در سطحی به اندازه $(L_{pl} + \gamma K)t_w$ در نظر می‌گیرند. برای بار متمرکز میان تیر، مقدار $\gamma = 5.0$ و برای بار متمرکز کنار تیر، مقدار $\gamma = 2.5$ می‌باشد و تفاوت آنها در مقایسه فاصله محل بار متمرکز تا لبه تیر با عمق تیر است. K فاصله بین سطح بال تا پایان گودی ریشه اتصال بال به جان در پروفیل‌های نورد شده و یا تا انتهای جوش گوشه در پروفیل‌های ساخته شده است. L_{pl} عرض صفحه تماس است^۱ که مقدار آن باید بزرگتر از K باشد.



شکل ۵-۹ پدیده جاری شدن موضعی جان تیر در اثر نیروهای متمرکز

مقاومت طراحی تسلیم موضعی جان با استفاده از رابطه ϕR_n به دست می‌آید که $\phi = 1$ بوده و R_n به صورت زیر به دست می‌آید:

$$R_u \leq (\phi = 1) \times R_n$$

$$R_n = f_{yw} t_w (L_{pl} + \gamma K) \quad \text{۷-۵}$$

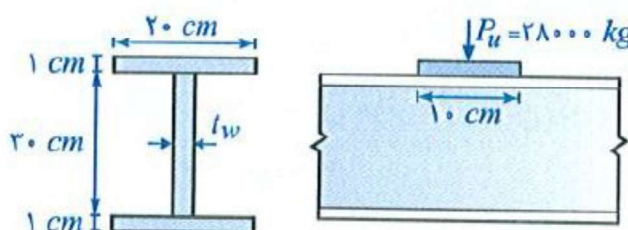
^۱ نامگذاری ارائه شده با نامگذاری آیین‌نامه اندکی متفاوت است. برای اطلاع از جزئیات بیشتر به بند ۲-۱۰-۹-۲-۱۰ مبحث دهم مراجعه شود.

ϕ	ضریب کاهش مقاومت برابر $\phi = 1$	t_w	ضخامت جان تیر
R_u	نیروی متمرکز ضریبدار	d	ارتفاع کلی مقطع تیر
R_n	مقاومت اسمی جان در برابر تسلیم موضعی	f_{yw}	تنش تسلیم فولاد جان تیر
L_{pl}	عرض صفحه تماس است که مقدار آن باید بزرگتر از K باشد.		
K	فاصله بین سطح بال تا پایان گودی ریشه اتصال بال به جان یا تا انتهای جوش گوشه		
γ	در حالتی که بار متمرکز در فاصله ای بیشتر از d از انتهای عضو وارد شود $\gamma = 5$ و در غیر این صورت $\gamma = 2.5$		

اصولاً در نیمرخهای نورد شده که بارهای متمرکز قابل ملاحظه ای را تحمل نمی کنند، جاری شدن موضعی جان رخ نخواهد داد. معمولاً در تیرورقها با جانهای نازک که بارهای سنگین در عرض کم را تحمل می کنند احتمال وقوع این پدیده بیشتر است. اگر کنترل با استفاده از روابط فوق برقرار نشود، تعبیه قطعات تقویتی (سخت کننده) فشاری در محل بارهای متمرکز الزامی است. در صورتی که نیروی نهایی متمرکز وارد بر عضو بیشتر از R_n باشد، یک جفت سخت کننده در محل بار متمرکز استفاده می شود که مقاومت آن حداقل برابر با اختلاف مقاومت مورد نیاز و مقاومت موجود می باشد.

مثال ۵-۵

برای تیر شکل زیر با فرض اینکه هیچگونه سخت کننده در جان تیر تعبیه نشده باشد. با کنترل تسلیم موضعی جان، حداقل ضخامت جان تیر را محاسبه نمایید.



شکل ۵-۱۰ نمایش تیر مثال

حل:

$$R_u \leq \phi R_n \Rightarrow R_u \leq f_{yw} t_w (5K + L_{pl})$$

$$\phi = 1$$

$$K = t_f + a_w$$

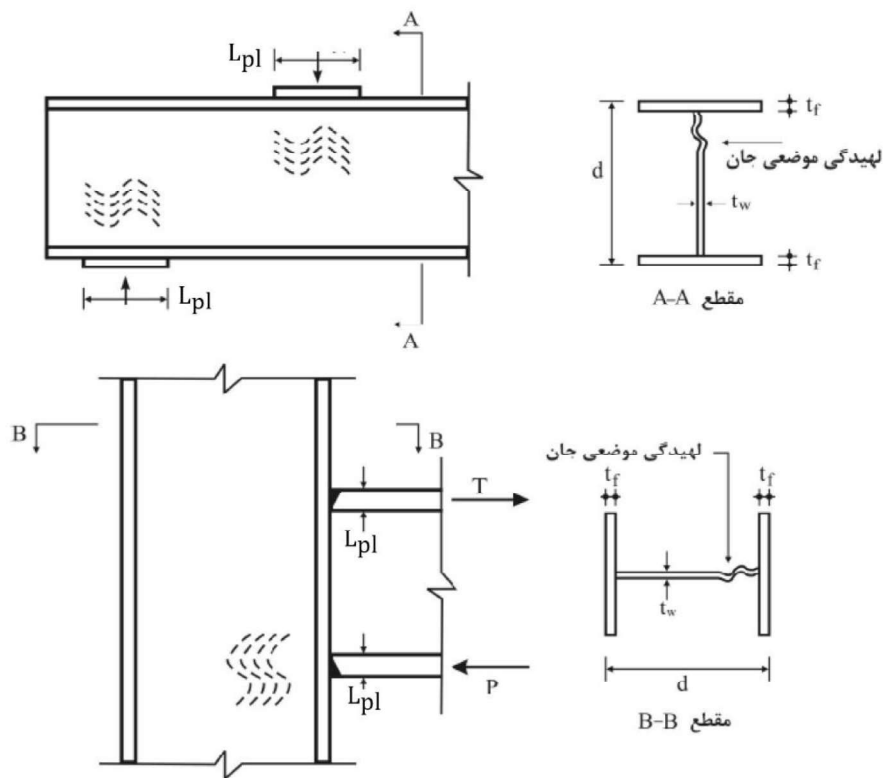
با فرض بعد جوش ۱۰ میلیمتر، می توان نتیجه گرفت $K = 1 + 1 = 2\text{ cm}$ و بنابراین:

$$28\text{ ton} \leq 2.4 t_w (5 \times 2 + 10) \Rightarrow t_w \geq 0.58\text{ cm}$$

در نتیجه جان تیر از ورق با ضخامت ۶ میلیمتر و یا ۸ میلیمتر قابل قبول است.

۵-۴-۲ چروکیدگی موضعی جان تیر

پدیده دیگری که هنگام اعمال بارهای متمرکز سنگین در مقطع بحرانی تیر رخ می‌دهد، چین خوردگی، لهیدگی یا چروکیدگی جان در اثر ناپایداری است. آیین‌نامه ایران کنترل‌های زیر را که براساس معیار پایداری تدوین شده است، پیشنهاد می‌کند که جهت جلوگیری از پدیده چروکیدگی جان است. مقاومت طراحی لهیدگی جان با استفاده از رابطه ϕR_n محاسبه می‌شود که $\phi = 0.75$ بوده و R_n برای بارهای متمرکز میانی تیر (در فاصله مساوی یا بیش از نصف ارتفاع تیر از انتهای عضو) به صورت زیر محاسبه می‌شود^۱.



شکل ۵-۱۱ پدیده لهیدگی در جان تیر

$$R_u \leq (\phi = 0.75) \times R_n$$

$$R_n = 0.8 t_w^2 \left[1 + 3 \left(\frac{L_{pl}}{d} \right) \left(\frac{t_w}{t_f} \right)^{1.5} \right] \sqrt{E f_{yw} \frac{t_f}{t_w}}$$

A-۵

ضخامت بال و جان پروفیل (تیر یا ستون)

 t_w, t_f ضریب کاهش مقاومت برابر $\phi = 0.75$ ϕ

ارتفاع کلی مقطع تیر

 d

نیروی متمرکز ضریبدار

 R_u

تنش تسلیم فولاد جان تیر

 f_{yw}

مقاومت اسمی جان در برابر لهیدگی

 R_n

^۱ برای اطلاع از ضوابط بار متمرکز در لبه تیر به بند ۱۰-۲-۹-۱۰-۳ مبحث دهم مراجعه شود.

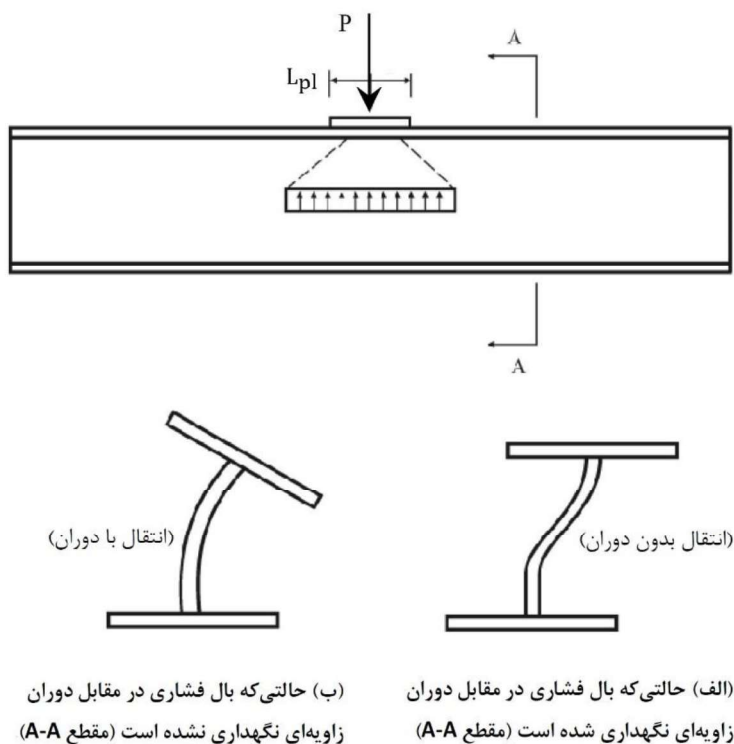
L_{pl}	عرض صفحه تماس است که مقدار آن باید بزرگتر از K باشد.
K	فاصله بین سطح بال تا پایان گودی ریشه اتصال بال به جان یا تا انتهای جوش گوشه
E	مدول الاستیسیته فولاد

در صورتی که R_u از مقادیر ارائه شده در رابطه ϕR_n تجاوز کند باید قطعات تقویتی فشاری در روی جان اعضایی که تحت اثر بار متمرکز هستند قرار داده شود.

توجه: در طراحی با توجه به کنترل تسلیم موضعی جان و کنترل لهیدگی جان، دو مقدار برای عرض صفحه تماس (L_{pl}) به دست می‌آید که مقدار بزرگتر برای آن منظور می‌گردد.

۳-۴-۵ کمانش جانبی جان در مقابل نیروی متمرکز فشاری

کنترل کمانش جانبی جان در مقابل نیروی متمرکز فشاری مربوط به حالتی است که یک نیروی فشاری متمرکز تکی، به عضوی اعمال می‌شود که از حرکت جانبی بین بال فشاری تحت بار و بال کششی، در محل تاثیر نیروی متمرکز توسط مهار جانبی جلوگیری نشده است.



شکل ۵-۱۲ کمانش جانبی جان در مقابل نیروی متمرکز فشاری

مقاومت طراحی کمانش جانبی جان با استفاده از رابطه ϕR_n محاسبه می‌شود که $\phi = 0.85$ بوده و R_n به صورت زیر محاسبه

می‌شود. در صورتی که $\frac{h}{t_w} \geq \frac{L_b}{b_f}$ بزرگتر از 2.3 (در بال نگهداری شده در مقابل دوران زاویه‌ای) و یا بزرگتر از 1.7 (در بال نگهداری نشده

در مقابل دوران زاویه‌ای) باشد، لزومی به کنترل کمانش جانبی جان نیست.

$$R_u \leq (\phi = 0.85) \times R_n$$

$$R_n = \frac{C_r t_w^3 t_f}{h^2} \left[\gamma + 0.4 \left(\frac{\frac{h}{t_w}}{\frac{t_{pl}}{b_f}} \right)^3 \right] \quad ۹-۵$$

ϕ	ضریب کاهش مقاومت برابر $\phi = 0.85$	t_w, t_f	ضخامت بال و جان تیر
R_u	نیروی متمرکز ضریبدار	d	ارتفاع کلی مقطع تیر
R_n	مقاومت اسمی جان در برابر کمانش جانبی	f_{yw}	تنش تسلیم فولاد جان تیر
L_{pl}	بزرگترین طول بدون تکیه‌گاه جانبی در هر یک از بال‌ها در محل بار متمرکز		
K	فاصله بین سطح بال تا پایان گودی ریشه اتصال بال به جان یا تا انتهای جوش گوشه		
h	برای پروفیل نورد شده برابر h_c و برای پروفیل ساخته شده برابر $h - 2t_f$		
γ	اگر بال بارگذاری شده در مقابل دوران زاویه‌ای نگهداری شده باشد $\gamma = 1$ و در غیر این صورت $\gamma = 0$		

مقدار C_r با توجه به مقادیر M_u و M_y در محل بار متمرکز از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

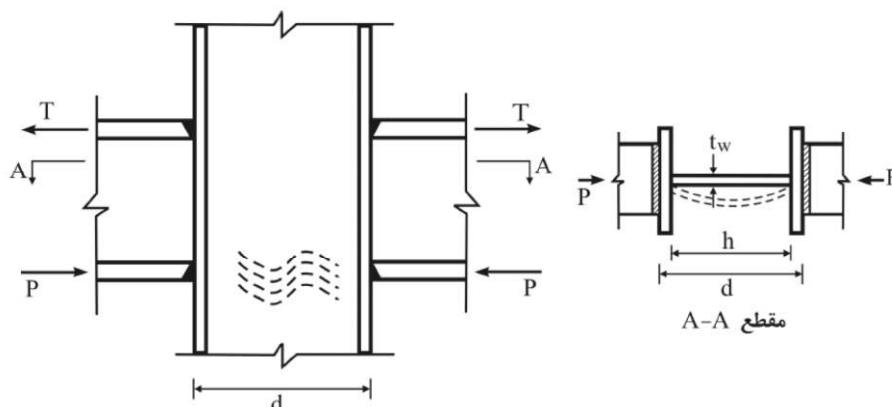
$$C_r = \begin{cases} 6.6 \times 10^6 \text{ MPa} & \leftarrow \{M_u < M_y\} \\ 3.3 \times 10^6 \text{ MPa} & \leftarrow \{M_u \geq M_y\} \end{cases} \quad ۱۰-۵$$

M_u مقاومت خمشی مورد نیاز M_y لنگر خمشی تسلیم که برابر است با $S_x F_y$

اگر در محل اعمال بار متمرکز بال تیر دارای مهار جانبی باشد، عملاً انتقال بدون دوران می‌باشد و اگر در محل اعمال بار متمرکز بال تیر دارای مهار جانبی نباشد، انتقال با دوران است. در صورتی که مقاومت مورد نیاز از مقاومت طراحی بیشتر باشد، باید بال کششی مهار شود و یا از یک جفت سخت‌کننده در زیر بار متمرکز بال یا ورق تقویتی جان (ورق مضاعف) استفاده نمود و اگر بال بارگذاری شده در مقابل دوران زاویه‌ای نگهداری نشده باشد، تعبیه مهار جانبی برای هر دو بال فشاری و کششی در محل بار متمرکز ضروری است.

۵-۴-۴ کمانش فشاری جان در مقابل جفت نیروی متمرکز فشاری

کنترل فشاری جان در مقابل جفت نیروی متمرکز فشاری مربوط به حالتی است که یک جفت نیروی فشاری متمرکز تنها یا یک جفت مؤلفه فشاری زوج نیرو، در جهت مخالف به بالهای مقابل عضو اعمال گردد.



شکل ۵-۱۳ کمانش فشاری جان در مقابل جفت نیروی متمرکز فشاری

مقاومت طراحی کمانش جانبی جان با استفاده از رابطه ϕR_n محاسبه می شود که $\phi = 0.9$ بوده و R_n به صورت زیر محاسبه می شود.

$$R_u \leq (\phi = 0.9) \times R_n$$

۱۱-۵

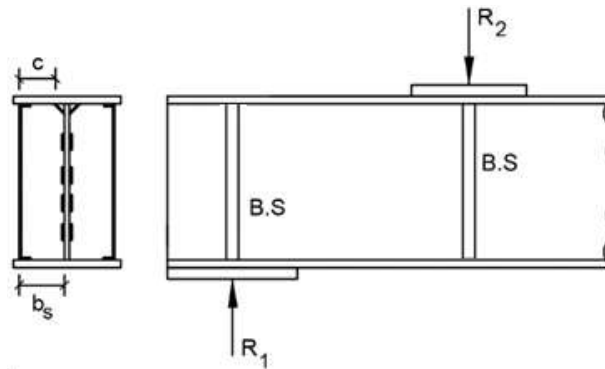
$$R_n = \frac{24t_w^3}{h} \sqrt{E f_{yw}}$$

ϕ	ضریب کاهش مقاومت برابر $\phi = 0.9$	t_w	ضخامت جان تیر
R_u	نیروی متمرکز فشاری ضریب دار	f_{yw}	تنش تسلیم فولاد جان تیر
R_n	مقاومت اسمی جان در برابر کمانش فشاری		
h	برای پروفیل نورد شده برابر h_c و برای پروفیل ساخته شده برابر $h - 2t_f$		

چنانچه جفت نیروی فشاری در فاصله کمتر از $\frac{d}{2}$ از انتهای عضو اثر کند، مقاومت اسمی باید به نصف تقلیل یابد. در صورت عدم ارضاء رابطه فوق، تعبیه یک جفت سخت کننده دارای مقاومت حداقل برابر اختلاف مقاومت مورد نیاز، در محل بارهای متمرکز ضروری است.

۵-۴-۵ تعبیه سخت کننده های فشاری در محل بارهای متمرکز

برای جلوگیری از پدیده جاری شدن موضعی جان، لهیدگی جان و کمانش توأم با انتقال جانبی در جان تیر بهتر است که جان تیر با جفت ورق هایی عمود بر آن تقویت گردد. شکل زیر جفت ورق های تقویتی را در محل بار متمرکز میانی و تکیه گاه نشان می دهد.

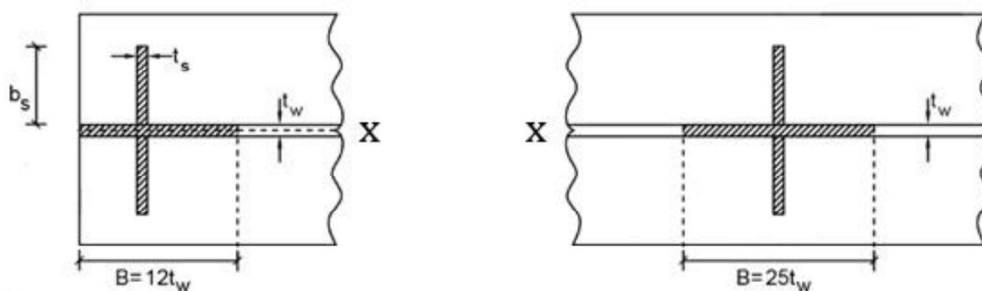


الف) مقطع تیر

ب) تقویت کننده ها در محل بار متمرکز

شکل ۵-۱۴ تعبیه مقاطع تقویتی در محل بارهای متمرکز

ورقه‌های تقویتی در هر طرف جان، دارای عرض b_s و ضخامت t_s هستند. این ورق‌ها بایستی به طور کامل و بدون هیچ گونه فاصله‌ای توسط جوش به بال تیروورقی که نیروی متمرکز به آن اعمال می‌شود، متصل شوند. معمولاً برای اتصال بهتر ورق‌های تقویتی، عرض آنها را در محل اتصال به بال با اجرای پخ مناسب کاهش می‌دهند. این کار موجب اتصال مناسب ورق به بال مورد نظر خواهد شد. در شکل زیر مقاطعی که طبق آیین‌نامه در تحمل بارهای متمرکز میانی و کناری مؤثر هستند، نشان داده شده است.



(الف)

(ب)

شکل ۵-۱۵ سطح مقطع مؤثر در برابر بارهای متمرکز از نمای بالا

اگر قطعه تقویتی نیاز باشد، این مقاطع به صورت ستونی فرضی با بار محوری فشاری و طول مؤثر $0.75h$ (ارتفاع آزاد جان بین دو بال) در نظر گرفته می‌شوند. سطح مقطع این ستون عبارت است از سطح مقطع جفت قطعه تقویتی به اضافه نواری از جان که پهنای آن در مقاطع تقویتی میانی $25t_w$ و در مقاطع انتهایی $12t_w$ است. بنابر این با تعیین تنش فشاری f_{cr} ستون فرضی، محاسبه ظرفیت ستون و مقایسه آن با نیروی محوری نهایی ستون P_u ، کفایت سخت‌کننده‌ها بررسی می‌شود. سطح مقطع، لنگر اینرسی، شعاع ژیراسیون و سایر مشخصات ستون فرضی به قرار زیر هستند. لنگر اینرسی مقطع ستون از رابطه $I_x = \frac{1}{12} t_s (2b_s + t_w)^3 + \frac{1}{12} (B - t_s) t_w^3$ بدست می‌آید که ترم دوم آن (مربوط به ورق جان) ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن است، لذا خواهیم داشت:

$$P_u \leq \phi_c f_{cr} A_g$$

$$A_g = 2b_s t_s + B t_w$$

۱۲-۵

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

$$r_x = \sqrt{\frac{I_x}{A_g}}$$

$$\lambda_x = \frac{K_x L_x}{r_x} = \frac{0.75h}{r_x}$$

ϕ_c	ضریب کاهش مقاومت برابر $\phi = 0.9$	t_w	ضخامت جان تیر
R_u	نیروی متمرکز فشاری ضریبدار	K_x	ضریب لاغری ستون فرضی برابر $K_x = 0.75$
R_n	مقاومت اسمی سخت کننده در برابر نیروی فشاری	A_g	سطح مقطع ستون فرضی
B	طولی از جان تیر که در ستون فرضی قرار دارد	r_x	شعاع ژیراسیون ستون فرضی حول محور X
b_s	عرض ورق سخت کننده عمود بر جان	λ_x	لاغری ستون فرضی حول محور X
t_s	ضخامت ورق سخت کننده	h	ارتفاع سخت کننده برابر ارتفاع آزاد جان

همچنین لازم است کمانش موضعی ورق تقویت کنترل گردد. لازم به ذکر است ورق تقویت در حکم بال ستون فرضی بوده و ضابطه آن با توجه به جدول حدود فشردگی اعضای فشار، محاسبه می شود.

$$\frac{b_s}{t_s} \leq 0.56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad ۱۳-۵$$

در صورت برقرار نبودن روابط فوق، ضخامت سخت کننده افزایش می یابد و یا از سخت کننده دابل در زیر بار متمرکز استفاده می شود. تقویت کننده ها باید ضوابط زیر را برآورده نمایند:

- پهنای هر سخت کننده به اضافه نصف ضخامت جان ستون نباید از یک سوم پهنای بال تیر یا ورق اتصال (که بار متمرکز را وارد می کند) کمتر باشد.
- ضخامت ورقهای تقویت نباید از نصف ضخامت بال تیر یا ورق اتصال (که بار متمرکز را وارد می کند) کمتر باشد. همچنین ضخامت تقویت کننده ها نباید از پهنای هر تقویت کننده تقسیم بر ۱۶ کمتر باشد.
- ارتفاع ورق تقویت کننده باید مساوی ارتفاع آزاد جان (فاصله بین دو بال) باشد.

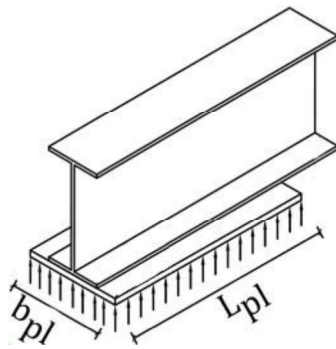
۵-۴-۶ طراحی ورق زیرسری و ورق تقسیم فشار در تیر

تیرهایی که روی دیوار و یا شناژ بتنی قرار می گیرند، دارای عکس العمل های بزرگ هستند و خطر لهیدگی در محل نشیمن آنها وجود دارد. برای جلوگیری از لهیدگی، یک صفحه در زیر تیر و با ابعادی بزرگتر از بال آن تعبیه می شود، تا عمل انتقال تنش به صورت متناسب با مقاومت اتکایی مصالح نشیمن صورت پذیرد. مطابق شکل زیر هدف از طراحی یک ورق زیرسری تعیین سه پارامتر طول ورق، عرض ورق و ضخامت ورق است که هر کدام بر حسب مورد به صورت زیر تعیین می گردند:

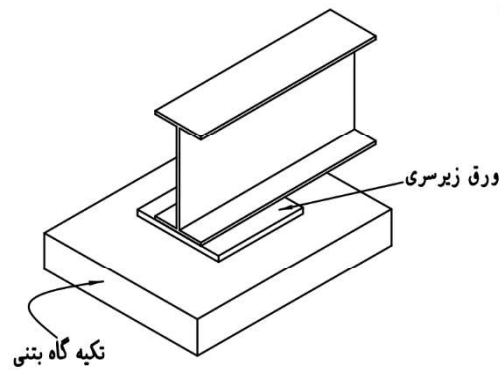
(الف) طول ورق L_{pl} طوری تعیین می گردد که روابط تسلیم موضعی، کمانش موضعی و لهیدگی جان معتبر باشد.

(ب) عرض ورق b_{pl} بر اساس مقایسه مقاومت مورد نیاز فشاری با مقاومت اتکایی نهایی مصالح در زیر ورق تعیین می شود.

(ج) ضخامت ورق t_{pl} بر اساس کنترل مقاومت خمشی ورق زیر سری تعیین می شود.



(ب) نحوه توزیع تنش در زیر صفحه زیرسری



(الف) نمایش وضعیت زیرسری

شکل ۵-۱۶ ورق زیرسری

مراحل گام به گام طراحی ورقهای زیر سری به شرح زیر است:

گام ۱: ابتدا طول تکیه گاهی L_{pl} براساس روابط تسلیم موضعی، کمانش موضعی و لهیدگی جان تعیین می شود.

گام ۲: از مقایسه مقاومت مورد نیاز و اتکایی طراحی در زیر صفحه نتیجه می شود:

$$P_u \leq \phi_c f_p A_{pl} \quad ۱۴-۵$$

$$A_{pl} = b_{pl} \times L_{pl}$$

ϕ_c	ضریب کاهش مقاومت برابر با 0.65	A_{pl}	مساحت ورق نشیمن
P_u	نیروی فشاری ضریبدار	f_p	تنش اتکایی اسمی مصالح زیر ورق نشیمن
b_{pl}	عرض ورق نشیمن	L_{pl}	طول ورق نشیمن

بنابراین عرض ورق از رابطه $b_{pl} \geq \frac{P_u}{\phi_c f_p N}$ بدست می آید.

تنش اتکایی اسمی برای فشار مستقیم برای تکیه گاه مصالح بنایی یا سنگ آهکی یا ماسه سنگ متراکم با ملات ماسه سیمان برابر

$$f_p = 60 \frac{kg}{cm^2}, \text{ برای تکیه گاه مصالح بنایی با آجر فشاری و ملات ماسه سیمان برابر } f_p = 40 \frac{kg}{cm^2} \text{ و برای تکیه گاه بتنی برابر } f_p = 0.85 f'_c \text{ می باشد.}^1$$

برای جوش بال تیر به ورق زیرسری لازم است $b_{pl} \geq b_f + 3cm$ در نظر گرفته شود. در انتها ضخامت ورق از طریق کنترل

خمش ورق (در بر تیر) به عرض $\frac{B-b_f}{2}$ تعیین می شود.

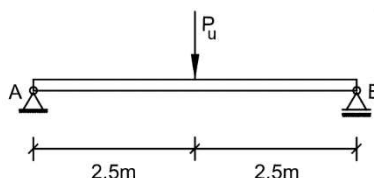
$$t \geq \frac{b_{pl}-b_f}{2} \sqrt{\frac{2P_u}{0.9f_y A_p}} \quad ۱۵-۵$$

^۱ برای اطلاع از روابط دقیق به بند ۱۰-۲-۸-۹ مبحث دهم مراجعه شود.

مثال ۵-۶

تیر نشان داده شده در شکل زیر تحت اثر بار متمرکز مرده 60ton و بار زنده 25ton در وسط دهانه خود قرار

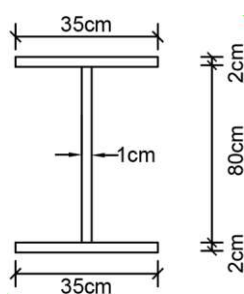
دارد.



مطلوبست انجام کنترلهای لازم در محل بار متمرکز در دو حالت زیر:

الف) در صورتی که از $IPB70$ استفاده شده باشد و طول ورق نشیمن در محل بار متمرکز $L_{pl} = 10\text{cm}$ باشد.

ب) در صورتی که از تیر ورقی مطابق شکل زیر استفاده شده باشد و طول ورق نشیمن در محل بار متمرکز $L_{pl} = 25\text{cm}$ باشد. در صورت نیاز ورق های تقویتی در محل بار متمرکز را طراحی کنید.



حل الف) مقطع از پروفیل

مشخصات $IPB70$ از جدول اشتال استخراج می شود:

$$IPB70 \rightarrow d = 70\text{cm}, b_f = 30\text{cm}, t_f = 3.2, t_w = 1.7, S_x = 7340\text{cm}^3, c = 5.9\text{cm}, h_c = 58.2\text{cm}$$

گام ۱- کنترل تسلیم موضعی جان

$$L_{pl} = 10\text{cm}, K = 5.9\text{cm}$$

$$P_u = 1.2P_D + 1.6P_L = 1.2 \times 60 + 1.6 \times 25 = 112\text{ton}$$

$$R_n = f_{yw}t_w(5k + N) = 2.4 \times 1.7 \times (5 \times 5.9 + 10) = 161.2\text{ton}$$

$$P_u \leq \phi R_n$$

$$P_u = 112\text{ton} \leq \phi R_n = 1 \times 161.2\text{ton} \rightarrow OK$$

جان تیر مورد نظر با توجه به نیروی نهایی متمرکز، در مقابل جاری شدن موضعی مناسب است.

گام ۲- کنترل لهیدگی جان تیر

بار در فاصله بیش از $\frac{d}{2} = \frac{70}{2} = 35\text{cm}$ از تکیه گاه قرار دارد.

$$R_u \leq \phi R_n ; \phi = 0.75$$

$$R_n = 0.8t_w^2 \left[1 + 3 \left(\frac{N}{d} \right) \left(\frac{t_w}{t_f} \right)^{1.5} \right] \sqrt{E f_{yw} \frac{t_f}{t_w}}$$

$$R_u = 112 \text{ ton} \leq 0.75 \times 0.8 \times 1.7^2 \left[1 + 3 \left(\frac{10}{70} \right) \left(\frac{1.7}{3.2} \right)^{1.5} \right] \sqrt{2040 \times 2.4 \times \frac{3.2}{1.7}} = 194.1 \text{ ton} \rightarrow OK$$

گام ۳- کنترل کمانش توأم با انتقال جانبی در جان تیر

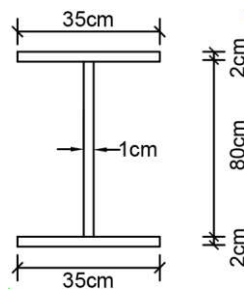
تیر فقط در دو تکیه‌گاه دارای مهار جانبی بال فشاری است و بال بارگذاری شده در مقابل دوران زاویه‌ای نگهداری نشده است.

$$\frac{\frac{h}{t_w}}{\frac{L_b}{b_f}} = \frac{\frac{58.2}{1.7}}{\frac{500}{30}} = 2.05 \geq 1.7$$

بنابراین نیازی به کنترل کمانش جانبی نیست.

حل (ب) مقطع تیرورق

در این قسمت از تیرورق مطابق شکل زیر استفاده می‌شود.



گام ۴- کنترل تسلیم موضعی جان

در تیرورقها $K = t_f + a_w$ می‌باشد که a_w بعد جوش بال به جان تیرورق است. در این مثال $a_w = 1 \text{ cm}$ در نظر گرفته می‌شود.

$$L_{pl} = 25 \text{ cm}, K = 2 + 1 = 3 \text{ cm}$$

$$P_u \leq \phi R_n ; \phi = 1$$

$$P_u = 1.2P_D + 1.6P_L = 1.2 \times 60 + 1.6 \times 25 = 112 \text{ ton}$$

$$R_n = f_{yw} t_w (5k + N) \Rightarrow 2.4 \times 1 (5 \times 3 + 25) = 96 \text{ ton}$$

$$P_u = 112 \text{ ton} \not\leq \phi R_n = 1 \times 96 = 96 \text{ ton}$$

بنابراین جاری شدن موضعی جان در اثر بارهای نهایی متمرکز رخ می‌دهد.

گام ۵- کنترل لهیدگی در جان تیر

$$P_u \leq \phi R_n ; \phi = 0.75$$

$$R_n = 0.8t_w^2 \left[1 + 3 \left(\frac{N}{d} \right) \left(\frac{t_w}{t_f} \right)^{1.5} \right] \sqrt{E f_{yw} \frac{t_f}{t_w}}$$

$$112 \text{ ton} \leq 0.75 \times 0.8 \times 1^2 \left[1 + 3 \left(\frac{25}{84} \right) \left(\frac{1}{2} \right)^{1.5} \right] \sqrt{2040 \times 2.4 \times \frac{2}{1}} = 78.1 \text{ ton}$$

لهیدگی در جان تیر تحت اثر بارهای نهایی متمرکز رخ می‌دهد.

گام ۶- کنترل کمانش توأم با انتقال جانبی در جان تیر

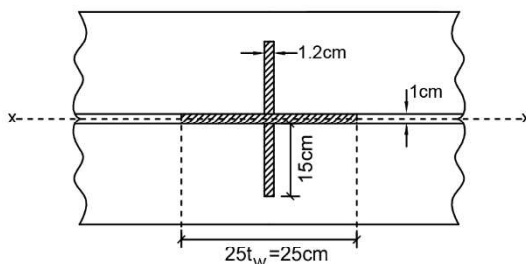
تیر فقط در دو تکیه‌گاه دارای مهار جانبی بال فشاری است و بال بارگذاری شده در مقابل دوران زاویه‌ای نگهداری نشده است.

$$\frac{\frac{h}{t_w}}{\frac{L_b}{b_f}} = \frac{\frac{80}{1}}{\frac{500}{35}} = 5.6 \geq 1.7$$

بنابراین نیازی به کنترل کمانش جانبی نیست.

گام ۷- طراحی قطعات تقویت کننده در محل بار متمرکز

در شکل زیر سطح مقطع مؤثر در برابر لهیدگی نشان داده شده است. عرض تقویت در هر سمت جان $b_s = 15 \text{ cm}$ و ضخامت آن $t_s = 1.2 \text{ cm}$ فرض می‌شود.



$$\text{try } b_s = 15 \text{ cm}, t_s = 1.2 \text{ cm}$$

$$A_g = 2b_s t_s + B t_w = 2 \times 15 \times 1.2 + 25 \times 1 = 61 \text{ cm}^2$$

$$I_x = \frac{1}{12} t_s (2b_s + t_w)^3 + \frac{1}{12} (B - t_s) t_w^3$$

$$I_x = \frac{1}{12} \times 1.2 \times (2 \times 15 + 1)^3 = 2979.1 \text{ cm}^4$$

توجه شود که ترم حذف شده لنگر اینرسی ستون برابر $\frac{1}{12} (B - t_s) t_w^3 = \frac{1}{12} \times (25 - 1.2) \times 1^3 = 1.98$ بوده که در مقایسه با لنگر اینرسی مقطع قابل صرف نظر کردن است.

$$r_x = \sqrt{\frac{I_x}{A_g}} = \sqrt{\frac{2979.1}{61}} = 6.99 \text{ cm}$$

$$\lambda_x = \frac{K_x L_x}{r_x} = \frac{0.75 h}{r_x} = \frac{0.75 \times 80}{6.99} = 8.57 \rightarrow f_e = 274 \frac{\text{ton}}{\text{cm}^2} \rightarrow f_{cr} = 2.39 \frac{\text{ton}}{\text{cm}^2}$$

$$P_u \leq \phi_c f_{cr} A_g$$

$$P_u = 112 \text{ ton} \leq \phi_c f_{cr} A_g = 0.9 \times 2.39 \times 61 = 131.3 \text{ ton}$$

بنابراین از ورقهای تقویت کننده به عرض 15cm و ضخامت 1.2cm استفاده می شود. با توجه به آنکه عرض تقویت 15cm می باشد، عرض ورق در محل اتصال با توجه به پخ در محل جوش، به 14.5cm کاهش می یابد.

use $2PL\ 80 \times 15 \times 1.2\text{cm}$

گام ۸- کنترل کمانش موضعی ورق تقویت

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

$$\frac{b_s}{t_s} = \frac{15}{1.2} = 12.5 \leq 0.56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0.56 \sqrt{\frac{2040}{2.4}} = 16.33 \rightarrow OK$$

۵-۵ طراحی تیرها تحت اثر خمش دو محوره از مقاطع I شکل

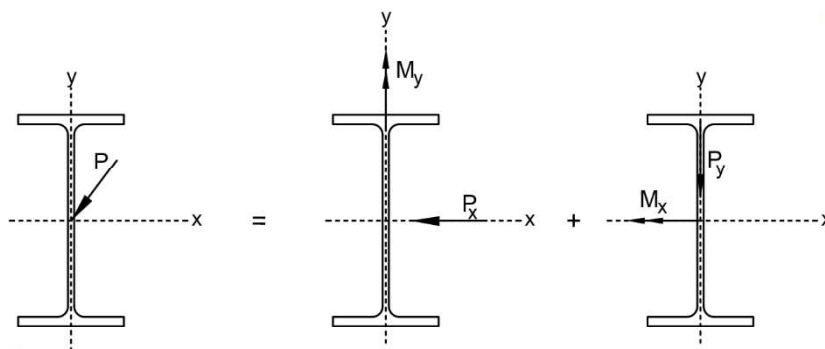
خمش دو محوره در صورتی در مقطع پدید می آید که بارهای اعمالی بر تیر منطبق بر هیچکدام از محوره های اصلی نباشد. در شکل زیر نیروی ضریبدار P_u در امتداد هیچکدام از محوره های اصلی مقطع نیست. این نیرو را می توان به دو مؤلفه P_{ux} ، P_{uy} تجزیه نمود که مؤلفه P_{ux} حول محور y لنگر خمشی ایجاد می کند در حالی که مؤلفه P_{uy} حول محور x لنگر خمشی ایجاد می کند. این در حالی است که بار P_u از مرکز سطح مقطع که منطبق بر مرکز برش است می گذرد و در نتیجه لنگر پیچشی ایجاد نمی شود. در این حالت باید رابطه ۵-۱۶ در بحرانی ترین نقطه تیر کنترل گردد.

$$\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \leq 1 \quad ۱۶-۵$$

$\phi_b = 0.9$ ضریب کاهش مقاومت برابر

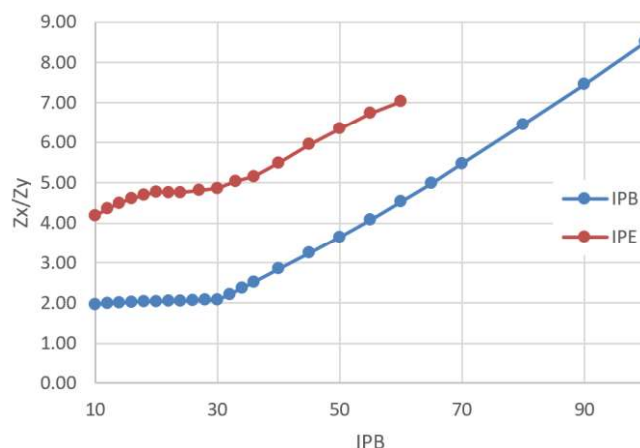
M_{ux}, M_{uy} لنگر نهایی تحت بار ضریبدار حول محوره های اصلی مقطع

M_{nx}, M_{ny} مقاومت اسمی یا ظرفیت خمشی اسمی حول دو محور اصلی مقطع



شکل ۵-۱۷ خمش دو محوره

از آنجا که رابطه ۵-۱۶ دارای دو اساس مقطع پلاستیک مجهول Z_x, Z_y است، برای حل معادله فوق، ارتباطی میان دو اساس مقطع پلاستیک برای مقاطع پروفیل IPE و IPB مطابق شکل زیر تخمین زده می شود.



شکل ۵-۱۸ ارتباط Z_x, Z_y

بر اساس شکل ۵-۱۸ نسبت دو مقدار اساس مقطع پلاستیک برای پروفیل‌های IPB از ۲ تا ۹ و برای پروفیل‌های IPE از ۴ تا ۷ تغییر می‌نماید. بدین ترتیب در حل مسائل طراحی با توجه به مقدار لنگر مورد نیاز طراحی (در دو راستا) و وضعیت لاغری تیر، مقداری به صورت حدس اولیه انتخاب شده و با حل رابطه ۵-۱۶ مقطع اولیه برای تیر انتخاب می‌گردد. سپس با کنترل وضعیت خمش تیر نسبت به تایید و یا تغییر مقطع اولیه اقدام می‌گردد.

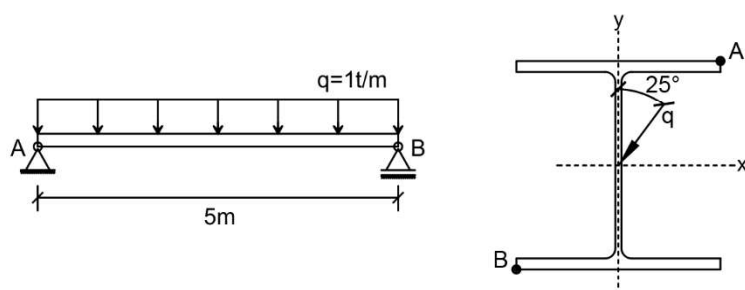
برای مقاطع متداول مثال‌های این کتاب، استفاده از مقادیر $\frac{Z_x}{Z_y} = 2.0 (IPB), 5.0 (IPE)$ برای پروفیل‌های IPB و IPE توصیه

می‌شود.

مثال ۵-۷

مطلوبست طرح تیر ساده از پروفیل **IPB** که تحت بار ضربدار گسترده یکنواخت به شدت $q_u = 1 \frac{\text{ton}}{\text{m}}$ با زاویه 25°

نسبت به محور قائم بر تیر قرار دارد. مهارهای جانبی در طول تیر پیوسته می‌باشد.



شکل ۵-۱۹ نمایش تیر

حل:

گام ۱- تعیین لنگر مورد نیاز طراحی

$$q_{ux} = q_u \times \sin 25 = 0.42 \frac{\text{ton}}{\text{m}}$$

$$q_{uy} = q_u \times \cos 25 = 0.91 \frac{\text{ton}}{\text{m}}$$

بنابراین با تعیین شدت بار نهایی گسترده یکنواخت حول دو محور x و y لنگرهای خمشی بدست می آید. نقطه بحرانی در وسط دهانه قرار دارد.

$$M_{ux} = \frac{q_{uy}L^2}{8} = \frac{0.91 \times 5^2}{8} = 2.84 \text{ton.m} = 284 \text{ton.cm}$$

$$M_{uy} = \frac{q_{ux}L^2}{8} = \frac{0.42 \times 5^2}{8} = 1.31 \text{ton.m} = 131 \text{ton.cm}$$

گام ۲- حدس مقطع اولیه برای طراحی تیر

$$\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} = \frac{M_{ux}}{\phi_b Z_x f_y} + \frac{M_{uy}}{\phi_b Z_y f_y} = \frac{284}{0.9 \times Z_x \times 2.4} + \frac{131}{0.9 \times 0.5 Z_x \times 2.4} \leq 1.0$$

$$\rightarrow Z_x \geq 253 \rightarrow \text{try IPB16}$$

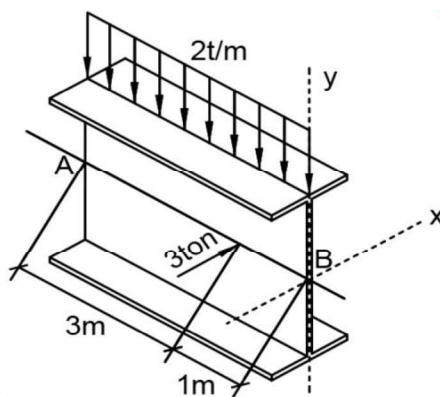
گام ۳- کنترل وضعیت خمش

$$IPB16 \rightarrow b_f = 16 \text{cm}, t_f = 1.3 \text{cm}, Z_x = 341.7 \text{cm}^3, Z_y = 168.5 \text{cm}^3$$

$$\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} = \frac{284}{0.9 \times 341.7 \times 2.4 = 738.1} + \frac{131}{0.9 \times 168.5 \times 2.4 = 364.0} = 0.74 \leq 1 \rightarrow OK$$

مثال ۵-۸

مطلوب است کنترل تیر دو سر مفصل از پروفیل **IPB20** با توجه به بارهای نهایی نشان داده شده در شکل زیر. تکیه‌گاههای جانبی تیر فقط در نقاط **A** و **B** قرار دارند.

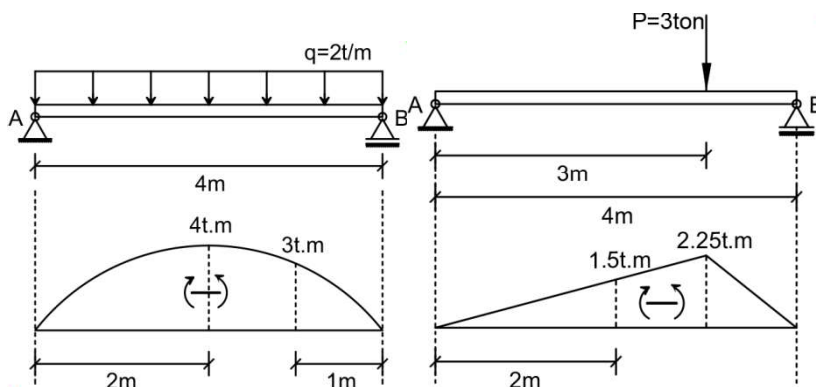


شکل ۵-۲ نمایش سه بعدی تیر

حل:

گام ۱- تعیین لنگر مورد نیاز طراحی

ابتدا باید دیاگرام لنگر نهایی حول محور ضعیف و محور قوی ترسیم گردد.



دیاگرام لنگر نهایی حول محور ضعیف

دیاگرام لنگر نهایی حول محور قوی

پس از تعیین وضعیت دیاگرام لنگر، برای تعیین مقطع بحرانی برای خمش، محل اعمال بار متمرکز و مقطع وسط دهانه کنترل می گردد.

در محل اعمال بار متمرکز

$$\begin{cases} M_{ux} = \frac{2\text{ton/m} \times 4\text{m}}{2} \times 1\text{m} - \frac{2\text{ton/m} \times (1\text{m})^2}{2} = 3\text{ton.m} \\ M_{uy} = \frac{3\text{ton} \times 3\text{m} \times 1\text{m}}{4\text{m}} = 2.25\text{ton.m} \end{cases}$$

در مقطع وسط دهانه

$$\begin{cases} M_{ux} = \frac{2\text{ton/m} \times (4\text{m})^2}{8} = 4\text{ton.m} \\ M_{uy} = 2.25\text{ton.m} \times \frac{2}{3} \left(\text{or } \frac{3\text{ton} \times 1\text{m}}{4\text{m}} \times 2\text{m} \right) = 1.5\text{ton.m} \end{cases}$$

بنابراین تیر باید در محل بار متمرکز و در مقطع وسط دهانه کنترل گردد.

گام ۲- تعیین وضعیت خمش

$$\text{try IPB20} \rightarrow d = 20\text{cm}, b_f = 20\text{cm}, t_f = 1.5\text{cm}, t_w = 0.9\text{cm}, r_y = 5.07\text{cm}, I_y = 2003\text{cm}^4, S_x = 570\text{cm}^3, Z_x = 620.0\text{cm}^3, Z_y = 303.4\text{cm}^3$$

$$L_p = 1.76r_y \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1.76(5.07) \sqrt{\frac{2040}{2.4}} = 260.2\text{cm}$$

$$r_{ts}^2 = \frac{I_y h_o}{2S_x} \rightarrow r_{ts} = \sqrt{\frac{(2003)(20-1.5)}{2(570)}} = 5.7\text{cm}$$

$$J = \frac{1}{3}(2t_f^3 b_f + t_w^3 h) = \frac{1}{3}[2(1.5)^3(20) + (0.9)^3(20 - 2(1.5))] = 49.13\text{cm}^4$$

$$L_r = 1.95r_{ts} \frac{E}{0.7f_y} \sqrt{\frac{J \times c}{S_x h_o} + \sqrt{\left(\frac{J \times c}{S_x h_o}\right)^2 + 6.76 \left(\frac{0.7f_y}{E}\right)^2}}$$

$$L_r = 1.95(5.7) \frac{2040}{0.7 \times 2.4} \sqrt{\frac{49.13 \times 1}{(570)(20-1.5)} + \sqrt{\left(\frac{49.13 \times 1}{(570)(20-1.5)}\right)^2 + 6.76 \left(\frac{0.7 \times 2.4}{2040}\right)^2}} = 1334.5\text{cm}$$

$$L_p = 260.15\text{cm} \leq L_b = 400\text{cm} \leq L_r = 1334.5\text{cm}$$

وضعیت خمش: کمانش پیچشی جانبی غیرارنجایی

گام ۳- محاسبه ظرفیت خمش حول محور قوی و ضعیف

برای محاسبه C_b نیاز به معادله لنگر می‌باشد که برای مقطعی به فاصله x از تکیه گاه به صورت زیر بدست می‌آید:

$$M_{ux} = R_u x - q_u \frac{x^2}{2} \rightarrow M_{ux} = -x^2 + 4x$$

$$M_A \left(x = \frac{1}{4} \times 4 \right) = -(1)^2 + 4 \times 1 = 3 \text{ ton.m}$$

$$M_B \left(x = \frac{2}{4} \times 4 \right) = -(2)^2 + 4 \times 2 = 4 \text{ ton.m}$$

$$M_C \left(x = \frac{3}{4} \times 4 \right) = -(3)^2 + 4 \times 3 = 3 \text{ ton.m}$$

$$M_{max} = M_B = 4 \text{ ton.m}$$

$$C_b = \frac{12.5M_{max}}{2.5M_{max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} R_m = \frac{12.5 \times 4}{(2.5 \times 4) + (3 \times 3) + (4 \times 4) + (3 \times 3)} \times 1 = 1.136$$

$$\text{IPB20} \rightarrow Z_x = 620.0\text{cm}^3$$

$$M_{px} = Z_x f_y = 620 \times 2.4 = 1488 \text{ ton.cm}$$

$$M_{nx} = C_b [M_{px} - (M_{px} - 0.7f_y S_x) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right)] \leq M_{px}$$

$$M_{nx} = 1.136 \left[1488 - (1488 - 0.7 \times 2.4 \times 570) \left(\frac{400 - 260.2}{1334.5 - 260.2} \right) \right] = 1611.9 \text{ ton.cm} \leq$$

$$1488 \text{ ton.cm} \rightarrow M_{nx} = 1488 \text{ ton.cm}$$

$\phi_b M_{nx} = 0.9 \times 1488 = 1339.2 \text{ ton.cm}$ $Z_y = 2 \times \frac{t_f \times b_f^2}{4} = \frac{t_f \times b_f^2}{2} = \frac{1.5 \times 20^2}{2} = 300 \text{ cm}^3$ $\phi_b M_{ny} = 0.9 \times 303.4 \times 2.4 = 648 \text{ ton.cm}$	
گام ۴- کنترل خمش دو محوره در محل اعمال بار متمرکز $\begin{cases} M_{ux} = 3 \text{ ton.m} = 300 \text{ ton.cm} \\ M_{uy} = 2.25 \text{ ton.m} = 225 \text{ ton.cm} \end{cases}$ $\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \leq 1$ $\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} = \frac{300}{1339.2} + \frac{225}{648} = 0.57 \leq 1$ در مقطع وسط دهانه $\begin{cases} M_{ux} = 4 \text{ ton.m} = 400 \text{ ton.cm} \\ M_{uy} = 1.5 \text{ ton.m} = 150 \text{ ton.cm} \end{cases}$ $\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} = \frac{400}{1339.2} + \frac{150}{648} = 0.53 \leq 1$ مقطع جوابگو می باشد ولی لازم است پروفیل با شماره کمتر از IPB20 مورد بررسی قرار گیرد.	
گام ۵- حدس مقطع اولیه برای طراحی تیر $\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} = \frac{M_{ux}}{\phi_b Z_x f_y} + \frac{M_{uy}}{\phi_b Z_y f_y} = \frac{400}{0.9 \times Z_x \times 2.4} + \frac{150}{0.9 \times 0.5 Z_x \times 2.4} \leq 1.0$ $\rightarrow Z_x \geq 324 \rightarrow \text{try IPB16}$	

۵-۶ تیرهای لانه زنبوری

هدف از ساخت تیر لانه زنبوری که به نوعی مزایای اصلی آن نیز محسوب می‌گردد، این است که تیر بتواند لنگر خمشی بیشتری را با خیز (تغییر شکل) نسبتاً کم و همچنین وزن کمتر در مقایسه با تیر نورد شده مشابه تحمل کند. در کنار مزایای فوق، به دلیل ضعف شدید ظرفیت برشی این نوع مقاطع، در مبحث ۱۰ مقررات ملی ساختمان ویرایش ۹۲ استفاده از آنها به شرح زیر محدود شده است که ملاک عمل در استفاده از این نوع تیرها را تعیین می‌کند.

الف) قابهای خمشی: □ در الزامات تکمیلی طراحی لرزه‌ای قابهای خمشی معمولی، متوسط و ویژه به ترتیب قسمت (پ) بندهای (۱۰-۳-۷)، (۱۰-۳-۸-۱) و (بند ۱۰-۳-۹-۱) مقرر شده است که □ استفاده از تیرهای با جان سوراخ‌دار متوالی (لانه زنبوری) به عنوان اعضای باربر جانبی در قابهای خمشی مجاز نیست. همچنین □ در صورت لزوم ایجاد سوراخ دسترسی در جان تیر، این سوراخ باید خارج از ناحیه حفاظت شده دو انتهای تیر و در نیمه میانی طولی دهانه تیر قرار گیرد. اطراف سوراخ باید به نحوی تقویت شود که مقاومت برشی و خمشی تیر به طور کامل فراهم گردد.

ب) قابهای مهاربندی شده همگرا: □ در الزامات تکمیلی طراحی لرزه‌ای قابهای مهاربندی شده همگرای معمولی و ویژه به ترتیب در قسمت (ب) بند (۱۰-۳-۱۰-۲) و (چ) بند (۱۰-۳-۱۱-۱) مقرر شده است که □ تعبیه سوراخهای متوالی در جان تیرهای دهانه‌های مهاربندی شده با هر نوع مهاربندی (قطری، ضربدری، ۷ و ۸) مجاز نیست. همچنین □ در صورت لزوم به تعبیه سوراخ دسترسی در جان تیر، اطراف آن باید به نحوی تقویت گردد که مقاومت‌های طراحی در مقطع سوراخ‌دار از مقاومت‌های طراحی مقطع کامل تیر کمتر نباشد.

پ) قابهای مهاربندی شده واگرا: □ در قسمت (ب) بند (۱۰-۳-۱۲-۱) الزامات تکمیلی {کانال همراه ناظر ساختمان} طراحی لرزه‌ای قابهای مهاربندی شده واگرا مقرر شده است که □ جان (یا جانها) باید از یک ورق تک بدون هرگونه ورق مضاعف در نظر گرفته شود و در آن هیچگونه بازشویی نباید ایجاد شود.

بنابراین طبق ضوابط فوق استفاده از تیرهای لانه زنبوری در «اعضای اصلی باربر جانبی ساختمان» در قابهای خمشی و همچنین در دهانه‌های مهاربندی شده با هر نوع مهاربندی همگرا و واگرا و کلیه دهانه‌هایی که در (مسیر) انتقال نیروی زلزله به پایه ساختمان مشارکت دارند مجاز نیست. □ استفاده از تیرهای لانه زنبوری به عنوان تیرچه‌های سقف و یا در تیرهای ساده (دو سر مفصل) در دهانه‌های فاقد مهاربند مناسب است.

توجه ۱: کاربرد تیر لانه زنبوری در سقف کامپوزیت ممنوع است.

توجه ۲: پرکردن سوراخهای تیر لانه زنبوری با بتن در تیرهای سقف مناسب است.

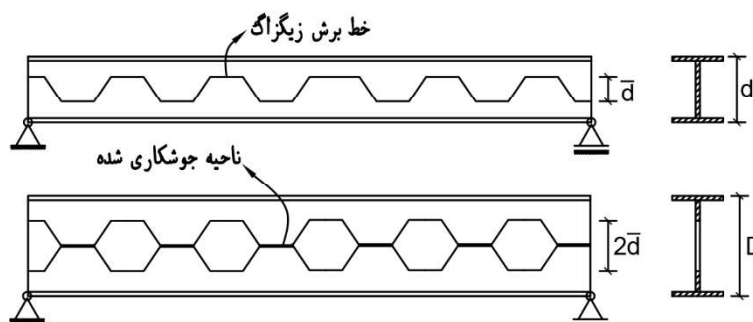
توجه ۳: برشکاری تیر لانه زنبوری در کارخانه با گیوتین انجام می‌شود و برشکاری کارگاه به صورت حرارتی است که مطلوب

نمی‌باشد.

۵-۶-۱ ساختار لانه زنبوری

از نیمرخهای گرم نورد شده کارخانه‌ای با ایجاد یک الگوی برش در جان تیر و اتصال دو قسمت بریده شده به یکدیگر، تیر لانه زنبوری بدست می‌آید. در این تیرها، سوراخهایی به صورت متوالی در جان تیر ایجاد شده و تیر جدید دارای ارتفاعی بیشتر از تیر نورد شده اولیه می‌باشد. در این حالت افزایش ارتفاع تیر موجب افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت خمشی تیر گردیده، بدون آنکه تغییر قابل ملاحظه‌ای در وزن تیر ایجاد گردد. به طوریکه برای مقاطع I شکل این افزایش مقاومت بیشتر از میزان افزایشی است که در ارتفاع اتفاق می‌افتد. در همین ارتباط لازم است موضوع افزایش ارتفاع تیرهای لانه زنبوری و امکان بیشتر شدن این ارتفاع از ضخامت سقف (حدوداً ۳۰ سانتیمتر) مورد توجه قرار گیرد. چه بسا استفاده از تیر لانه زنبوری طراح را مجبور به استفاده از سقف کاذب نماید.

در تیرهای نورد شده معمولی تأمین افزایش لنگر اینرسی و مقاومت خمشی از طریق افزایش ارتفاع به این صورت انجام می‌گیرد که در وسط تیر یک برش طولی مطابق شکل ۵-۲۱ انجام می‌گیرد. این برش به صورت زیگزاگ است و قسمت بریده شده فوقانی با یک پله انتقال روی قسمت بریده شده تحتانی حرکت کرده و دو قسمت به یکدیگر جوش می‌شوند.



شکل ۵-۲۱ تیر لانه زنبوری ساخته شده از پروفیل معمولی

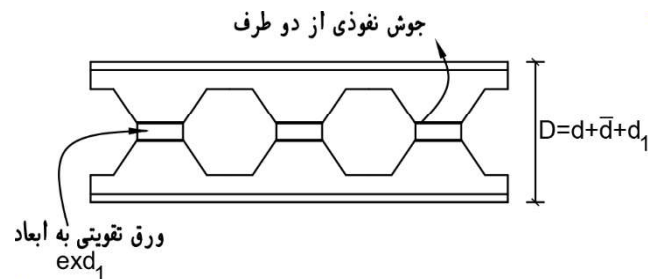
دو قسمت نیمه شده تیر که با جوش نفوذی از دو طرف به یکدیگر متصل می‌شوند، تشکیل یک تیر لانه زنبوری با سوراخهای متوالی در جان خود را می‌دهد که در آن ارتفاع تیر به اندازه $\bar{d}$ که همان ارتفاع برش زیگزاگ است، افزایش پیدا کرده است. در تیرهای لانه زنبوری که معمولاً برای افزایش باربری تیر بکار می‌روند، موارد زیر باید در نظر گرفته شود:

الف) افزایش ارتفاع تیر می‌تواند مقاومت خمشی و سختی خمشی تیر را حدوداً به نسبت $\frac{D}{d}$ و $\frac{D^2}{d^2}$ افزایش دهد. هر چند که $\bar{d}$ در رابطه $\bar{d} < d - 2t_f$ صدق می‌کند، ولی معمولاً $\bar{d} = \frac{d}{2}$ منظور می‌گردد، بنابراین مقاومت خمشی یا اساس مقطع تیر لانه زنبوری حدوداً ۱٫۵ برابر مقطع تیر اصلی و سختی خمشی یا لنگر اینرسی مقطع تیر لانه زنبوری حدوداً ۲٫۲۵ برابر مقطع تیر اصلی می‌باشد.

ب) در صورتی که نیاز باشد مقاومت خمشی و سختی خمشی افزایش یابد، می‌توان از ورقهای تقویتی به منظور افزایش ارتفاع جان تیر استفاده نمود که در این صورت طبق شکل ۵-۲۲ هندسه سوراخها به صورت هشت ضلعی بدست می‌آید.

ج) سوراخهای متوالی ایجاد شده در جان تیر، اگر چه برای عبور لوله‌های تأسیسات و برق مفید است، اما این سوراخها باعث می‌گردد که پیوستگی در تنشهای برشی عمودی در جان تیر را مخدوش نموده و تنشهای خمشی اضافی در اطراف سوراخها به وجود می‌

آورد. از طرفی وجود سوراخها تنشهای برشی غیر یکنواختی در دو قسمت فوقانی و تحتانی مقطع لانه زنبوری ایجاد کرده که این تنشها حدوداً بیش از دو برابر تنشهای برشی در تیر با جان پر متناظر است.



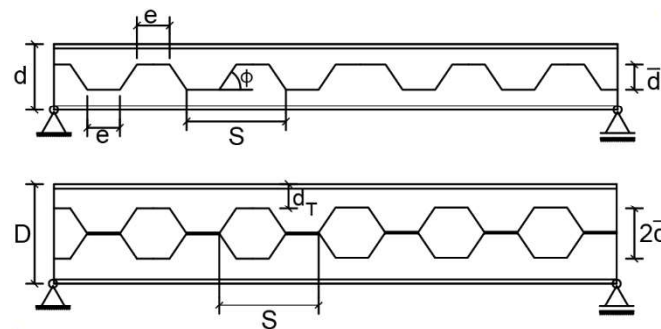
شکل ۵-۲۲ تیر لانه زنبوری ساخته شده با ورق تقویتی اضافی

(د) وجود سوراخها موجب می شود که تغییرشکلهای برشی اضافی در تیر ایجاد گردد که برای محاسبه این تغییرشکلهای، اثر سوراخها در محاسبه لنگر اینرسی تیر باید در نظر گرفته شود.

(ه) از آنجا که کلیه ضعیفهای به وجود آمده در تیرهای لانه زنبوری معمولاً به دلیل وجود سوراخهای متوالی در جان تیر است، لذا چنانچه تیر در هر یک از معیارهای کنترل پاسخگو نباشد می توان با پر کردن سوراخ، ضعف به وجود آمده را جبران نمود.

۵-۶-۲ مشخصات هندسی سوراخها

یک نمونه از الگو برش در شکل ۵-۲۳ نشان داده شده است. مقادیر $\bar{d}$, ϕ , e می تواند توسط طراح انتخاب گردد.



شکل ۵-۲۳ مشخصات هندسی تیر اصلی و تیر لانه زنبوری

با داشتن $\bar{d}$, ϕ , e و با توجه به شکل ۵-۲۳ می توان مقادیر d_T , D , S را از روابط زیر بدست آورد:

$$S = 2(e + \bar{d} \cot \phi)$$

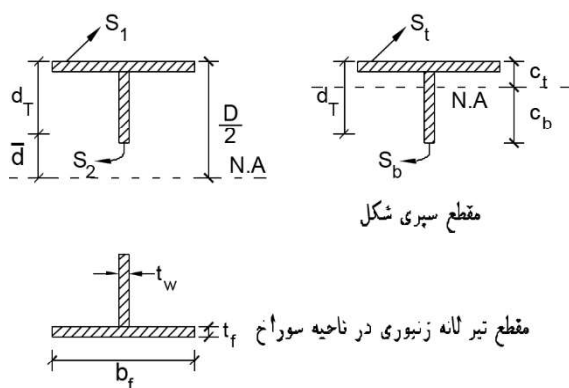
$$D = d + \bar{d}$$

$$d_T = \frac{D - 2\bar{d}}{2} = \frac{d - \bar{d}}{2}$$

ارتفاع تیر لانه زنبوری	D	گام سوراخها	S
ارتفاع ناحیه سپری شکل	d_T	ارتفاع برش زیگزاگ	$\bar{d}$

d ارتفاع تیر اصلی ϕ زاویه برش سوراخ‌ها

زاویه ϕ معمولاً حدود ۴۵ تا ۶۰ درجه در نظر گرفته می‌شود. چنانچه مقدار زاویه ϕ برابر ۹۰ درجه در نظر گرفته شود، سوراخ‌های بدست آمده در تیر به صورت مربع مستطیل خواهد بود. انتخاب مقادیر e و $\bar{d}$ و زاویه ϕ نقش بسیار مؤثری در محدود نمودن تنش‌های برشی و محوری خواهد داشت. مشخصات هندسی مقطع تیرهای لانه زنبوری در محل سوراخ و مقطع T شکل فوقانی یا تحتانی به صورت شکل ۲۴-۵ می‌باشد.



شکل ۲۴-۵ مقطع تیر لانه زنبوری در سوراخ‌ها و مقطع T شکل

$$I_g = 2 \left(I_t + A_t \left(\frac{D}{2} - C_t \right)^2 \right)$$

$$S_1 = \frac{I_g}{\frac{D}{2}}$$

$$S_2 = \frac{I_g}{\bar{d}}$$

$$S_t = \frac{I_t}{C_t}$$

$$S_b = \frac{I_t}{C_b}$$

	I_g	لنگر اینرسی مقطع زنبوری در محل سوراخ حول محور خنثی
	I_t	لنگر اینرسی مقطع سپری شکل حول محور خنثی
مساحت قسمت سپری شکل	A_t	
اساس مقطع تیر لانه زنبوری در تار نظیر محل سوراخ	S_2	اساس مقطع تیر لانه زنبوری در تار انتهایی
فاصله از تار خنثی تا پایینترین تار مقطع سپری	C_b	فاصله از تار خنثی تا بالاترین تار مقطع سپری
اساس مقطع قسمت سپری شکل در پایین‌ترین تار	S_b	اساس مقطع قسمت سپری شکل در بالاترین تار
	S_t	

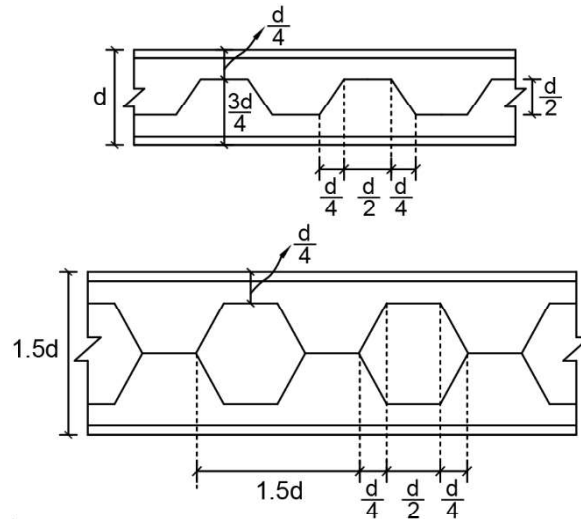
به منظور محاسبه تنش‌های برشی، مقادیر لنگر حداکثر در مقطع تیر لانه زنبوری و مقطع سپری شکل عبارت است از:

$$Q = A_t \left(\frac{D}{2} - C_t \right)$$

$$\bar{Q} = t_w \frac{C_b^2}{2}$$

Q	لنگر سطح حداکثر مقطع لانه زنبوری	$\bar{Q}$	لنگر سطح حداکثر مقطع سپری شکل
t_w	ضخامت جان مقطع سپری شکل		

معمولاً در جدول پروفیل‌های ساختمانی از برش پای نر برای تیرهای لانه زنبوری استفاده می‌شود. این برش استاندارد در شکل ۵-۲۵ نشان داده شده است و مشخصات آن به شرح زیر است:



شکل ۵-۲۵ تیر لانه زنبوری با برش پای نر

با توجه به شکل ۵-۲۵

$$e = \bar{d} = \frac{d}{2}$$

$$\tan \phi = 2$$

با استفاده از رابطه فوق:

$$S = 2(e + \bar{d} \cot \phi) = 2\left(\frac{d}{2} + \frac{d}{2} \times \frac{1}{2}\right) = 1.5d$$

$$D = d + \bar{d} = d + \frac{d}{2} = 1.5d$$

$$d_r = \frac{d - \bar{d}}{2} = \frac{d - \frac{d}{2}}{2} = \frac{d}{4}$$

۵-۶-۳ معیارهای طراحی در تیرهای لانه زنبوری

معیارهای طراحی در تیرهای لانه زنبوری شامل معیار خمش، کمانش موضعی، برش قائم، برش افقی، تنش خمشی شعاعی و تنش فشاری مستقیم در جان تیر لانه زنبوری است که از این معیارها عموماً معیار خمش و معیار برش قائم تعیین کننده بوده و نیاز به کنترل دارد.

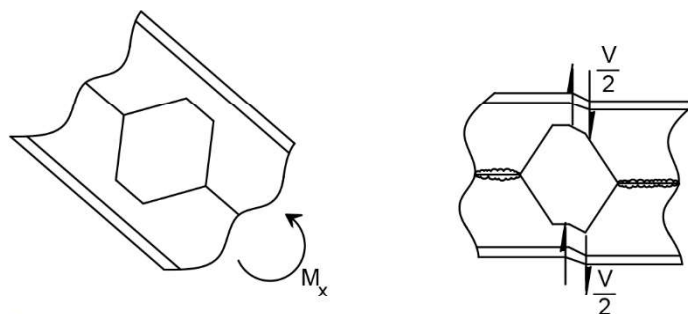
۱-۳-۶-۵ معیار خمش

به طور کلی تغییرشکلهای ایجاد شده در تیرهای لانه زنبوری دو قسمت است:

قسمت اول که مربوط به تغییرشکلهای خمشی است که با فرض اساسی تئوری خمشی ساده که در آن کلیه صفحات عمود بر تار خنثی پس از تغییر شکل، صفحه باقی می ماند، بدست می آید.

قسمت دوم که مربوط به تغییرشکلهای به دلیل وجود سوراخهای متوالی در جان تیر است که در اثر آن نیروهای برشی در تیر ایجاد تغییرشکلهای اضافی می کنند.

در شکل ۲۶-۵ یک محدوده از سوراخ لانه زنبوری به همراه تغییرشکلهای خمشی و برشی آن نشان داده شده است.

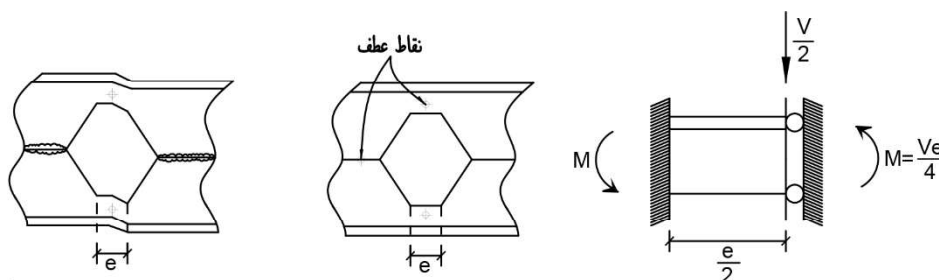


الف) تغییر شکل خمشی

ب) تغییر شکل برشی

شکل ۲۶-۵ تغییرشکلهای خمشی و برشی در تیر لانه زنبوری

تغییرشکل برشی و نمودار آزاد ناحیه سوراخ دار در فاصله e که دارای مقطع سپری است در شکل ۲۷-۵ نشان داده شده است.



شکل ۲۷-۵ نمودار آزاد مقطع سپری شکل تحت اثر نیروهای برشی

بنابراین تنشهای خمشی در مقطع لانه زنبوری دو دسته هستند.

دسته اول که تنشهای محوری ناشی از خمش اصلی M_x هستند که دارای توزیع خطی در عمق D می باشند.

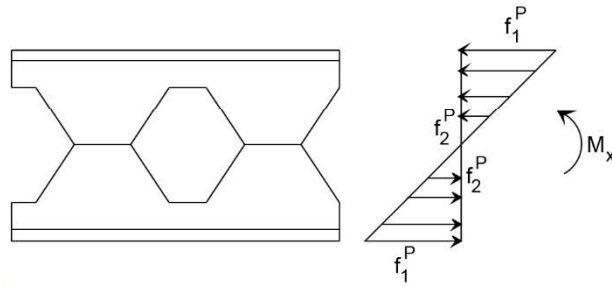
دسته دوم که تنشهای محوری ناشی از خمش ثانویه m_x که دارای توزیع خطی در عمق d_T هستند.

از آنجا که ترکیب تنشهای محوری ناشی از خمش اصلی و خمش ثانویه در نقاط مختلف در عمق تیر ملاک عمل می باشد لذا

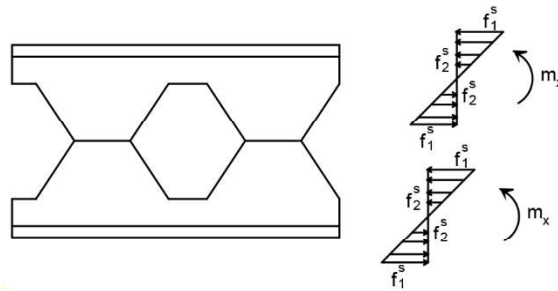
مقادیر ترکیب تنشها را در فواصل S در طول تیر تعیین کرده و با مقادیر مجاز کنترل می کنیم.

در شکل ۲۸-۵ چگونگی توزیع تنشهای خمشی اصلی و ثانویه در عمق تیر نشان داده شده است. تنشهای محوری ناشی از خمش

اصلی در تارهای بالایی و انتهایی مقطع زنبوری عبارتند از:



الف) تنشهای ناشی از خمش اصلی



ب) تنشهای ناشی از خمش ثانویه

شکل ۵-۲۸ چگونگی توزیع تنش های خمشی

$$f_1^P = \frac{M_x}{S_1}$$

$$f_2^P = \frac{M_x}{S_2}$$

تنش محوری ناشی از خمش اصلی در دورترین تار f_1^P
تنش محوری ناشی از خمش اصلی در نزدیکترین تار f_2^P

تنشهای محوری ناشی از خمش ثانویه در تارهای ابتدایی و انتهایی مقطع T شکل عبارتند از:

$$f_1^S = \frac{m_x}{S_t}$$

$$f_2^S = \frac{m_x}{S_b}$$

تنش محوری ناشی از خمش ثانویه در بالاترین تار f_1^S
تنش محوری ناشی از خمش ثانویه در پایین ترین تار f_2^S

در روابط فوق m_x عبارت است از:

$$m_x = \frac{V_x e}{4}$$

برای کنترل تنشهای ترکیبی در محل سوراخها، ابتدا M_x ، V_x ، m_x در سرتاسر طول تیر و در فواصل S تعیین می گردد و تنشهای حداکثر اصلی و ثانویه در این نقاط بدست می آید. مقادیر قدر مطلق تنشها جمع گردیده و به صورت کششی یا فشاری با تنشهای مجاز مقایسه می شود و نتیجه خواهد شد:

$$f_1 = |f_1^p| + |f_1^s| = \left| \frac{M_x}{S_1} \right| + \left| \frac{m_x}{S_t} \right|$$

$$f_2 = |f_2^p| + |f_2^s| = \left| \frac{M_x}{S_2} \right| + \left| \frac{m_x}{S_b} \right|$$

سوراخی که در آن تنشهای موجود f_1, f_2 از تنش مجاز کوچکتر نباشد، از لحاظ خمشی پاسخگو نبوده و بایستی پر گردد. تنش مجاز تیرهای لانه زنبوری از روابط بخش (۴-۸) تعیین می شود. با توجه به اینکه مقطع تیرهای لانه زنبوری را نباید فشرده در نظر گرفت، بنابراین حداکثر تنش مجاز خمشی این تیرها ($F_b = 0/6F_y$) خواهد بود. در مثال های این فصل با فرض وجود مهارهای جانبی مناسب، تنش مجاز تیرها ($F_b = 0/6F_y$) منظور گردیده است.

توجه ۱: در روابط فوق M از دیاگرام لنگر و m تابع برش بوده و از دیاگرام برش بدست می آید. با توجه به اینکه تعیین f_{max} جهت طراحی مورد نیاز است لذا یافتن f_{max} مسئله مهمی می باشد. بدیهی است f_{max} الزاماً به خاطر M_{max} (وسط دهانه) حاصل نمی شود، همچنین f_{max} الزاماً به خاطر V_{max} (تکیه گاه) حاصل نمی گردد. لذا لازم است محلی که در آن f ماکزیمم می شود با استفاده از رابطه تعیین نمود.

توجه ۲: اینکه در میان مهندسين محاسب رسم شده که در تیرهای لانه زنبوری سه سوراخ از طرفین و سه سوراخ از وسط تیر پر شود، هیچگونه معیار و توجیه محاسباتی ندارد، بلکه چه بسا سوراخهایی غیر از سوراخهای مذکور نیاز به پر شدن داشته باشد.

۵-۶-۳-۲ معیار کماتش موضعی اجزای سپری شکل

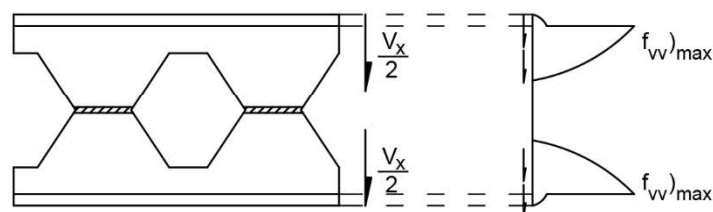
با توجه به اینکه اجزای مقطع سپری شکل تحت اثر تنشهای فشاری ناشی از خمش اولیه و ثانویه قرار می گیرند، بایستی دارای مقاومت و سختی کافی در مقابل کماتشهای موضعی باشند. بنابراین اجزای مقطع باید روابط زیر را برآورده نمایند:

$$\frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{795}{\sqrt{F_y}}$$

$$\frac{d_T}{t_w} \leq \frac{1065}{\sqrt{F_y}}$$

۵-۶-۳-۳ معیار برش قائم

برش موجود در تیر لانه زنبوری به دو قسمت تقسیم شده و به صورت جداگانه روی دو مقطع سپری شکل، تنش برشی ماکزیمم را به صورت زیر و مطابق شکل ۵-۲۹ به وجود می آورد.



شکل ۵-۲۹ توزیع تنش برشی قائم در تیر لانه زنبوری

$$(f_{vv}) \frac{\frac{V_x}{2} \bar{Q}}{I_t t_w v_{y_{max}}}$$

در محاسبه تنشهای برشی ماکزیمم می‌توان به جای رابطه دقیق (۵-۳۴) از رابطه قابل قبول (۵-۳۵) نیز استفاده کرد.

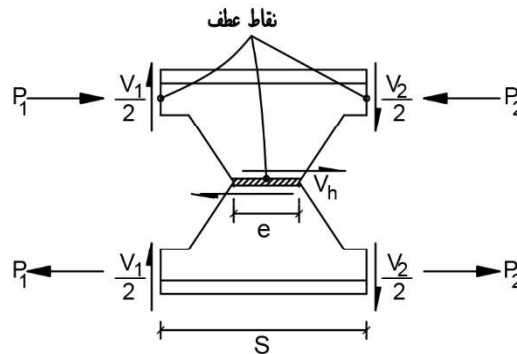
$$(f_{vv}) \frac{V_x}{2 d_T t_w v_{y_{max}}}$$

در صورتی که روابط فوق ارضاء نشود، باید مقطع سوراخ را در این ناحیه پر نمود که در صورت پر شدن سوراخ، تنش برشی در مقطع با جان پر به صورت زیر کنترل می‌شود:

$$f_v = \frac{V_x}{D t_w} \leq F_v = 0.4 F_y$$

۵-۳-۴-۵ معیار برش افقی

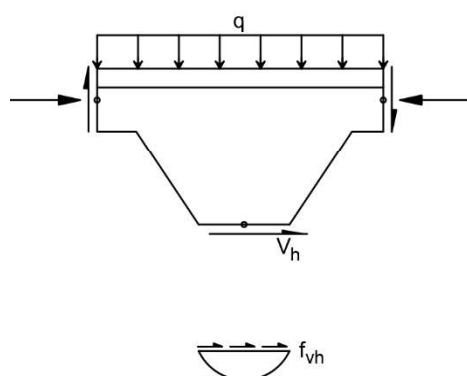
نمودار نیروهای وارده در حد فاصل یک گام سوراخ در شکل ۵-۳۰ نشان داده شده است. چنانچه جریان برش افقی در محور میانی تیر بدست آید و در طول S ضرب شود، کل نیروی برشی افقی در فاصله S بدست می‌آید. با توجه به اینکه در یک گام S فقط در طول e مقطع طولی پر و در بقیه جاها سوراخ می‌باشد، لذا مقدار نیروی برشی مؤثر در فاصله e برابر است با:



شکل ۵-۳۰ توزیع نیروهای برشی در یک سوراخ تیر لانه زنبوری

$$V_h = qS$$

در رابطه فوق $q = \frac{VQ}{I_g}$ جریان برش افقی در محل محور خنثی تیر می‌باشد. چنانچه مقدار برش در طول یک سوراخ ثابت فرض شود، تنش برشی افقی در جان تیر و در فاصله e به صورت شکل ۵-۳۱ توزیع سهمی شکل داشته و حداکثر آن حدود یک و نیم برابر مقدار متوسط آن می‌باشد.



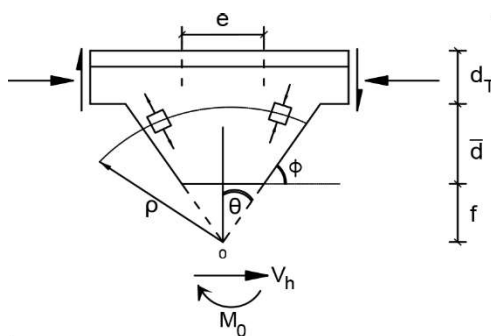
شکل ۳۱-۵ نحوه توزیع تنش برشی افقی در جان

$$f_{vh} = 1/5 \frac{V_h}{et_w} \leq F_v = 0.4F_y$$

در صورتی که رابطه فوق جوابگو نباشد و مقدار تنش برشی از مقدار مجاز آن بیشتر گردد با پر کردن سوراخ تیر در این ناحیه می توان این نقیصه را از بین برد.

۵-۳-۶-۵ معیار تنش خمشی شعاعی

همانگونه که در شکل ۳۲-۵ نشان داده شده است، نیروی برش افقی V_h در جان تیر و در محدوده $\bar{d}$ ایجاد لنگر خمشی کرده که این لنگر می تواند جان تیر در محدوده سوراخ را دچار ناپایداری ناشی از خمش نماید.



شکل ۳۲-۵ تنش های خمشی شعاعی ایجاد شده در جان تیر

نیروی برشی افقی V_h و لنگر خمشی در شعاعی به اندازه ρ ، تنش خمشی f_{br} ایجاد می کند که روی یک مقطع مستطیل کمائی شکل به ضخامت t_w و طول $2\rho\theta$ به صورت خطی تغییر می کند. بنابراین می توان نوشت:

$$\begin{aligned} M_o &= V_h f \\ f &= \frac{e}{2 \tan \theta} \\ f_{br} &= \frac{(V_h \rho - V_h f)}{(2\rho\theta)^2 \frac{t_w}{6}} \end{aligned}$$

در رابطه فوق f_{br} تابعی از ρ است، لذا مقدار حداکثر آن را باید تعیین نمود:

$$\frac{\partial f_{br}}{\partial \rho} = 0 \Rightarrow (f_{br}) \frac{3 V_h \tan \theta}{4 t_w \theta^2 e} \bigg|_{br \max}$$

θ بر حسب رادیان

مقدار تنش مجاز خمشی شعاعی نیز به صورت زیر تعیین می‌شود که در این رابطه $C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}}$ است:

$$F_{br} = \left[1 - \frac{10/434}{C_c^2} \left(\frac{\bar{d}}{t_w} \right)^2 \right] 0.6 F_y$$

چنانچه در ناحیه‌ای از تیر لانه زنبوری، تنشهای خمشی شعاعی از مقادیر مجاز تجاوز کند، باید سوراخ در آن ناحیه پر گردد.

۵-۳-۶- معیار تنش فشاری مستقیم در جان تیر لانه زنبوری

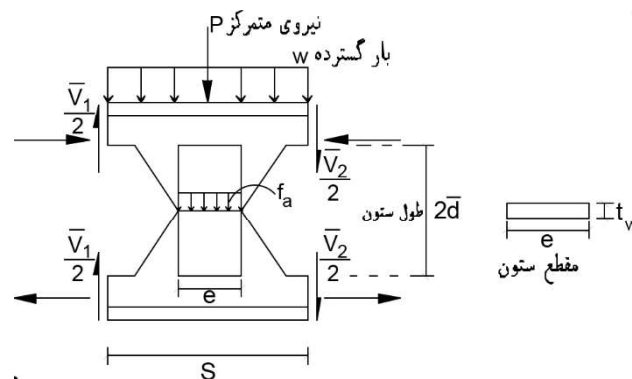
نیروهای وارده بر روی تیر لانه زنبوری شامل نیروهای گسترده یکنواخت و نیروی متمرکز چنانچه روی بال فوقانی تیر وارد گردند مطابق شکل ۵-۳۳ نصف از بارهای فوق در ناحیه سوراخ دار جان باید از مقطع جان به ابعاد $e \times t_w$ بگذرند.

با توجه به اینکه جان تیر در ارتفاع $2\bar{d}$ مانند یک ستون فشاری عمل می‌کند بایستی بدون آنکه ناپایداری در آن ایجاد گردد، تنشهای فشاری f_a را مطابق رابطه زیر تحمل کند:

$$f_a = \frac{\frac{wS}{2} + \frac{P}{2}}{et_w} \leq F_a$$

تنش مجاز فشاری بر حسب لاغری ستون یعنی $\frac{2\bar{d}}{r}$ تعیین می‌گردد که در آن ارتفاع ستون و r شعاع ژیراسیون است که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$r = \frac{t_w}{\sqrt{12}}$$

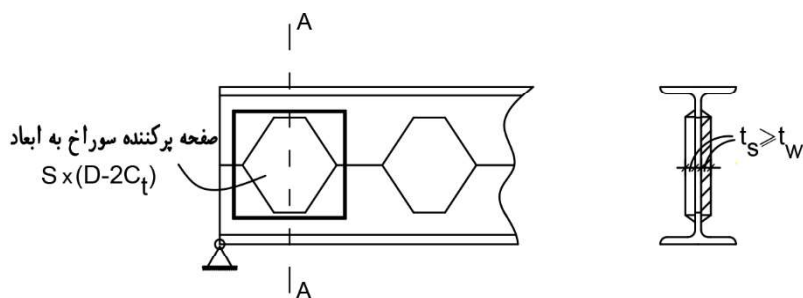


شکل ۵-۳۳ تنشهای فشاری مستقیم در جان تیر لانه زنبوری

با تعیین لاغری ستون، تنش مجاز فشاری بر حسب جداول و یا روابط ارائه شده در فصل طراحی مقاطع فشاری تعیین می‌شود. در صورتی که رابطه (۵-۴۴) محقق نگردد می‌توان در ناحیه مورد نظر مقطع سوراخ را پر نموده و همچنین از سخت‌کننده عمود بر صفحه جان به منظور افزایش ظرفیت باربری فشاری استفاده نمود.

به منظور طراحی تیرهای لانه زنبوری ابتدا باید دیاگرام لنگر خمشی M_x و نیروی برشی V_x در طول تیر رسم گردد و مقادیر عددی آنها در فواصل سوراخهای تیر لانه زنبوری تعیین شود. سپس با توجه به لنگر خمشی حداکثر، مقطع ابعاد تیر لانه زنبوری و آرایش سوراخها تعیین می گردد.

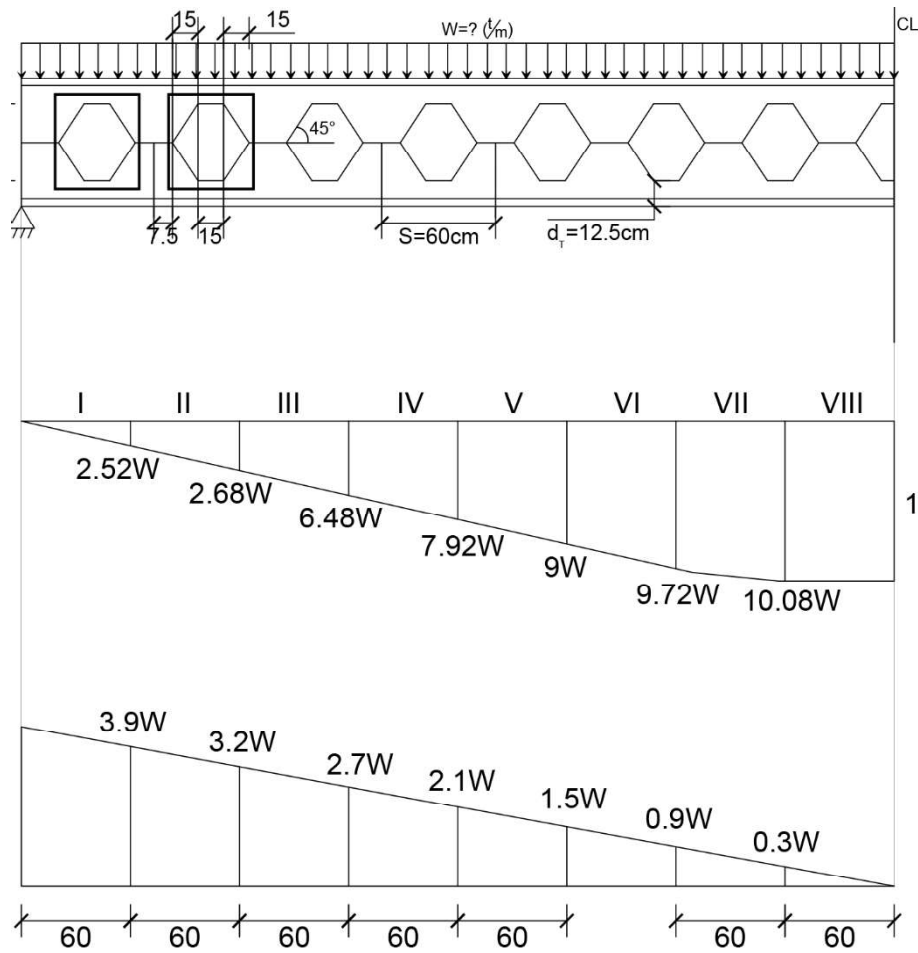
با کنترل معیارهای فوق در طول تیر چنانچه در ناحیه ای از تیر لانه زنبوری پرکردن سوراخها لازم باشد، ورق پرکننده سوراخ بهتر است به صورت مضاعف در طرفین جان و یا یکطرفه در داخل جان و با حداقل ضخامت جان مطابق شکل ۵-۳۶ اجرا گردد. جوش اتصال ورق به جان باید قابلیت تحمل برش ظرفیت مقطع را داشته باشد. همچنین ارتفاع این ورق به نحوی انتخاب گردد که در ناحیه صاف جان تیر قرارگیرد.



شکل ۵-۳۶- نحوه پرکردن سوراخ در تیر لانه زنبوری

مثال ۵-۹

تیری با دهانه ۹ متر با مقطع $IPE40$ زنبوری شده در شکل ۵-۳۷ موجود است. مشخصات این تیر شامل $(e = 15\text{cm}, \bar{d} = 15\text{cm}, \phi = 45^\circ)$ می باشد و دو سوراخ منتهی به دو انتهای تیر پر گردیده است. مطلوب است تعیین میزان بار گسترده یکنواختی که این تیر می تواند تحمل کند.



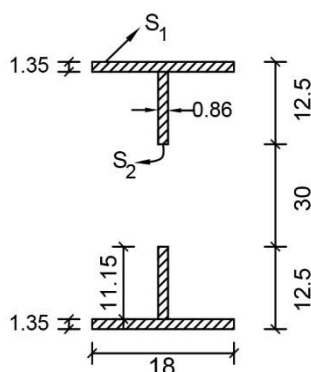
شکل ۵-۳۷- دیاگرام لنگر خمشی و نیروی برشی تیر (مثال ۵-۴)

حل:

از آنجا که از برش پای نر استفاده نشده است باید مقادیر S, D, d_T از روابط مربوطه محاسبه می گردد:

$$\begin{cases} S = 2(e + \bar{d} \cot \phi) = 2(15 + 15 \cot 45^\circ) = 60 \text{ cm} \\ D = d + \bar{d} = 40 + 15 = 55 \text{ cm} \\ d_T = \frac{d - \bar{d}}{2} = \frac{40 - 15}{2} = 12.5 \text{ cm} \end{cases}$$

مقطع تیر لانه زنبوری مطابق شکل زیر است.



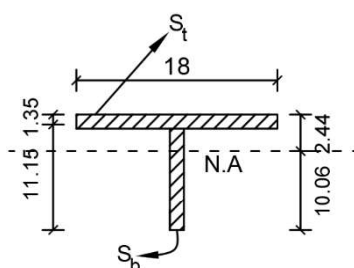
مشخصات مقطع لانه زنبوری به شرح زیر است:

$$I_{gx} = \frac{1}{12} \times 18 \times 55^3 - \frac{(18 - 0.86)(55 - 2 \times 1.35)^3}{12} - \frac{1}{12} \times 0.86 \times 30^3 = 43296/3 \text{ cm}^4$$

$$S_1 = \frac{I_g}{\frac{D}{2}} = \frac{43296/3}{\frac{55}{2}} = 1574/4 \text{ cm}^3$$

$$S_2 = \frac{I_g}{\frac{d}{2}} = \frac{43296/3}{15} = 2886/42 \text{ cm}^3$$

مشخصات مقطع سپری در شکل زیر رسم شده است.



خصوصیات هندسی مقطع به شرح زیر است:

$$C_b = \frac{\sum A_i \bar{y}_i}{\sum A_i} = \frac{11/15 \times 0.86 \times 5/58 + 1/35 \times 18 \times 11/83}{11/15 \times 0.86 + 1/35 \times 18} = 10/06 \text{ cm}$$

$$C_t = 12/5 - 10/06 = 2/44 \text{ cm}$$

$$A_t = 1/35 \times 18 + 11/15 \times 0.86 = 33/9 \text{ cm}^2$$

$$I_t = \frac{1}{12} \times 0.86 \times 11/15^3 + 11/15 \times 0.86 \times (10/06 - 5/58)^2 + \frac{1}{12} \times 18 \times 1/35^3 + 1/35 \times 18 \times (2/44 - 0/68)^2 = 370/76 \text{ cm}^4$$

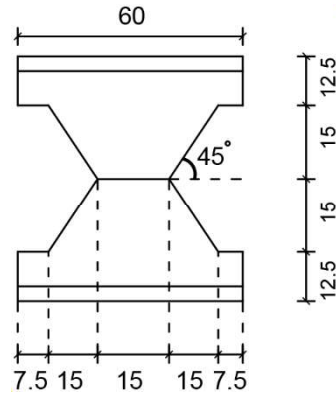
$$S_t = \frac{I_t}{C_t} = \frac{370/76}{2/44} = 151/95 \text{ cm}^3$$

$$S_b = \frac{I_t}{C_b} = \frac{370/76}{10/06} = 36/85 \text{ cm}^3$$

$$\bar{Q} = t_w \frac{C_b^2}{2} = 0.86 \times \frac{(10/06)^2}{2} = 43/5 \text{ cm}^3$$

$$Q = A_t \left(\frac{D}{2} - C_t \right) = 33/9(27/5 - 2/44) = 849/53 \text{ cm}^3$$

در شکل زیر نمای تیر لانه زنبوری در یک گام رسم شده است.



معیارهای طراحی به صورت زیر کنترل می‌شوند:

گام ۱- معیار خمشی

$$f_1^p = \frac{M_x}{S_1}, f_1^s = \frac{m_x}{S_t}$$

$$f_2^p = \frac{M_x}{S_2}, f_2^s = \frac{m_x}{S_b}$$

$$m_x = \frac{V_x e}{4} = \frac{V_x \times 0/15}{4} = 0/0375 V_x$$

جدول نیروها و تنشها در نواحی هشت گانه تیر به صورت زیر است.

واحد	ناحیه	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
$t.m$	M_x	2.52w	4.68w	6.48w	7.92w	9w	9.72w	10.08w	10.125w
t	V_x	4.5w	3.9w	3.3w	2.7w	2.1w	1.5w	0.9w	0.3w
$t.m$	m_x	*	*	0.124w	0.101w	0.079w	0.056w	0.034w	0.011w
kg/cm^2	f_1^p	160.06w	297.25w	411.6w	503w	571.6w	617.4w	640.2w	643.1w
kg/cm^2	f_2^p	87.3w	162.14w	224.5w	274.4w	311.8w	336.75w	349.2w	350.8w
kg/cm^2	f_1^s	*	*	81.44w	66.63w	51.83w	37.02w	22.2w	7.40w
kg/cm^2	f_2^s	*	*	335.8w	274.7w	213.7w	152.6w	91.6w	30.5w
kg/cm^2	$f_1^p + f_1^s$	160.06w	297.25w	493.04w	569.63w	623.43w	654.42w	662.4w	650.5w
kg/cm^2	$f_2^p + f_2^s$	87.3w	162.14w	560.3w	549.1w	525.5w	489.35w	440.8w	381.3w
تنش بحرانی		160.06w	297.25w	560.3w	569.63w	623.43w	654.4w	662.4w	650.5w

* مشاهده می‌شود که در نواحی I و II به دلیل پر بودن سوراخها از لنگرهای ثانویه صرف‌نظر می‌شود.

$$f_b = 662/4w \leq F_b = 0/6F_y = 1440 \quad \frac{kg}{cm^2} \Rightarrow w \leq 2/14 \quad \frac{t}{m}$$

گام ۲- معیار کمانش موضعی اجزای سپری شکل

طبق شکل ۵-۳۹ ابعاد مقطع سپری را به منظور جلوگیری از کمانش موضعی کنترل می‌شود:

$$\frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{795}{\sqrt{F_y}} \Rightarrow \frac{18}{2 \times 1/35} = 6/67 \leq \frac{795}{\sqrt{2400}} = 16/23$$

$$\frac{d_T}{t_w} \leq \frac{1065}{\sqrt{F_y}} \Rightarrow \frac{12/5}{0/86} = 14/53 \leq \frac{1065}{\sqrt{2400}} = 21/47$$

گام ۳- معیار برش قائم در تیر لانه زنبوری

با توجه به اینکه دو سوراخ اول (ناحیه I و II) پر گردیده لذا اولین پانلی که در آن برش حداکثر است پانل III است. بنابراین با توجه به دیگرام برش، مقدار برش در سوراخ سوم برابر است با:

$$V_x = 3/3w$$

$$(f_{vv}) \frac{V_x}{I_t t_w} \bar{Q} = \frac{3/3w \times 1000 \times 43/5}{2 \times 370/76 \times 0/86} \frac{kg}{cm^2}_{max}$$

$$F_v = 0/4F_y = 0/4 \times 2400 = 960 \frac{kg}{cm^2}$$

$$(f_{vv}) v \frac{t}{m_{max}}$$

گام ۴- معیار برش افقی

با توجه به شکل ۵-۳۷ حداکثر نیروی برشی افقی بین ناحیه III و IV به وقوع می‌پیوندد. بنابراین از متوسط نیروی برشی نواحی III و IV استفاده می‌شود:

$$V = \frac{3/3w + 2/7w}{2} = 3w$$

$$V_h = \frac{VQ}{I_g} S = \frac{3w \times 1000 \times 849/53}{43296/3} \times 60 = 3531/8w$$

$$(f_{vh}) \frac{3}{2} \frac{V_h}{et_w} \frac{3}{2} \frac{3531/8w}{15 \times 0/86} \frac{t}{m_{max}}$$

گام ۵- معیار تنش خمشی شعاعی

$$\theta = \frac{\pi}{4} \Rightarrow \tan \theta = 1$$

$$(f_{br}) \frac{3}{4} \frac{V_h \tan \theta}{t_w \theta^2 e} \frac{3}{4} \frac{(3531/8w) \times 1}{0/86 \times \left(\frac{\pi}{4}\right)^2 \times 15}_{max}$$

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}} = \sqrt{\frac{2\pi^2 \times 2/1 \times 10^6}{2400}} = 131/42$$

$$F_{br} = \left[1 - \frac{10/434}{C_c^2} \left(\frac{\bar{d}}{t_w} \right)^2 \right] 0/6 F_y = \left[1 - \frac{10/434}{(131/42)^2} \left(\frac{15}{0/86} \right)^2 \right] \times 0/6 \times 2400$$

$$\Rightarrow F_{br} = 1175/35 \frac{kg}{cm^2}$$

$$(f_{br})_{br} \frac{t}{m_{max}}$$

گام ۶- معیار تنش فشاری مستقیم در جان تیر لانه زنبوری

$$f_a = \frac{wS}{et_w} = \frac{w \times 60 \times 10}{2 \times 15 \times 0/86} = 23/26w \frac{kg}{cm^2}$$

$$r = \frac{t_w}{\sqrt{12}} = \frac{0/86}{\sqrt{12}} = 0/25 \Rightarrow \lambda = \frac{2\bar{d}}{r} = \frac{2 \times 15}{0/25} = 120 \Rightarrow F_a = 731 \frac{kg}{cm^2}$$

$$f_a \leq F_a \Rightarrow 23/26w \leq 731 \Rightarrow w \leq 31/42 \frac{t}{m}$$

بنابراین میزان شدت بار حداقل بدست آمده از ۶ معیار فوق برابر است با:

$$w \leq \min(2/17, 4/26, 2/34, 3/53, 31/42) = 2/17 \frac{t}{m}$$

همانگونه که مشاهده می شود معیار تعیین کننده معیار خمشی است.

۵-۶-۴ راه حل ساده برای تیرهای لانه زنبوری

با توجه به اینکه کنترل ۶ معیار فوق در حل مسائل عملی وقتگیر و طولانی است و از طرفی معیار خمشی و برش قائم نسبت به بقیه موارد معمولاً تعیین کننده هستند لذا در عمل فقط کنترلهای الف و ج انجام می شود. در این ارتباط مراحل گام به گام طراحی تیرهای لانه زنبوری به صورت زیر ارائه می شود:

گام ۱: رسم دیاگرام برش و لنگر خمشی در طول تیر

گام ۲: طرح پروفیل از مقطع زنبوری براساس لنگر ماکزیمم ($F_b = 0/6 F_y$) طبق رابطه زیر:

$$S_1 \geq \frac{M_{max}}{F_b}, \quad F_{by}$$

در این رابطه S_1 اساس مقطع تیر لانه زنبوری در ناحیه سوراخ دار است.

گام ۳: کنترل برش قائم در تیر با استفاده از رابطه فوق می باشد در صورتی که این رابطه برقرار نباشد باید در ناحیه مورد نظر، سوراخها را با ورق پرکننده سوراخ پر نمود.

گام ۴: تعیین معادلات نیروی برشی و لنگر خمشی در طول تیر

گام ۵: کنترل خمش اولیه و ثانویه:

برای راحتی کار نسبت به حالت قبل، کنترل خمش اولیه و ثانویه فقط در دورترین تار مقطع انجام می شود.

با جایگذاری در رابطه فوق داریم:

$$f_1 = |f_1^p| + |f_1^s| = \left| \frac{M_x}{S_1} \right| + \left| \frac{V_x e}{4S_t} \right| \leq F_b$$

با فرض استفاده از برش پای تیر $e = \frac{d}{2}$ خواهد بود و در نتیجه رابطه به صورت زیر بیان می شود:

$$f_1 = \left| \frac{M_x}{S_1} \right| + \left| \frac{V_x d}{8S_t} \right| \leq F_b = 0.6F_y$$

در صورتی که رابطه فوق برقرار نباشد، از تعیین علامت معادله حاصل برحسب x ناحیه ای که باید سوراخهای آن پر شود، محاسبه می گردد.

توجه ۱: تاثیر علامت های نیروی برشی و لنگر خمشی در کاربرد رابطه (۵-۴۸) در بازه مورد بررسی تیر (x مورد نظر) به علت

حضور قدر مطلق به صورت زیر می باشد:

$$\begin{cases} V_x > 0 \\ M_x > 0 \end{cases} \Rightarrow f_1 = \frac{M_x}{S_1} + \frac{V_x d}{8S_t} \leq F_b = 0.6F_y$$

$$\begin{cases} V_x < 0 \\ M_x > 0 \end{cases} \Rightarrow f_1 = \frac{M_x}{S_1} - \frac{V_x d}{8S_t} \leq F_b = 0.6F_y$$

$$\begin{cases} V_x > 0 \\ M_x < 0 \end{cases} \Rightarrow f_1 = -\frac{M_x}{S_1} + \frac{V_x d}{8S_t} \leq F_b = 0.6F_y$$

$$\begin{cases} V_x < 0 \\ M_x < 0 \end{cases} \Rightarrow f_1 = -\frac{M_x}{S_1} - \frac{V_x d}{8S_t} \leq F_b = 0.6F_y$$

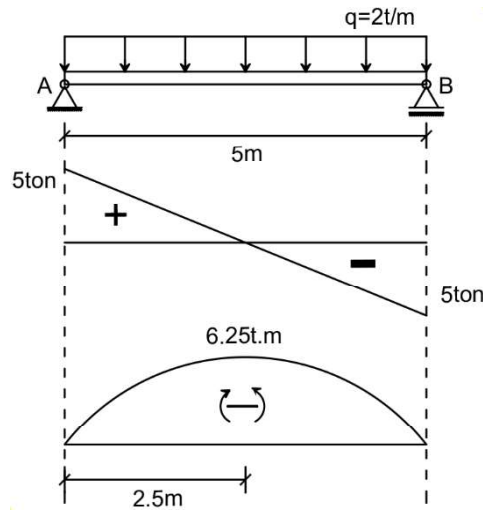
توجه ۲: چنانچه استفاده از ورق تقویت در تیرهای لانه زنبوری مورد نظر باشد می توان مشابه ضوابط بخش مربوطه عمل نمود.

فقط می بایست بجای استفاده از مشخصات پروفیل معمولی، مشخصات تیر زنبوری جایگزین روابط مذکور گردد.

مثال ۱۰-۵

برای شکل زیر چنانچه فقط در محل دو تکیه گاه مهار جانبی بال فشاری باشد، تیر زنبوری را از $2CPE$ طرح نموده

و در صورت لزوم صفحات پر کننده سوراخهای تیر زنبوری را محاسبه کنید.



شکل دیاگرام لنگر و برش تیر مثال

حل:

$$S_1 \geq \frac{M_{max}}{0.6F_y} = \frac{6.25 \times 10^5}{0.6 \times 2400} = 4375 \text{ cm}^3$$

با توجه به S_1 بدست آمده و با فرض برش پای نر از 2CPE18 استفاده می شود:

$$CPE18(D = 27\text{cm}, S_1 = 228\text{cm}^3, S_t = 11/9\text{cm}^3, C_t = 0/88\text{cm}, t_w = 0/53\text{cm})$$

کنترل معیار برش قائم:

$$(f_{vv}) \frac{V_x}{2d_t t_w} = \frac{5 \times 10^3}{2 \times 2 \times \frac{18}{4} \times 0/53} = 100 \text{ kg/cm}^2$$

معادلات نیروی برشی و لنگر خمشی در طول تیر در بازه سمت چپ عبارتند:

$$V_x = \frac{qL}{2} - qx = 5000 - 20x \text{ kg}$$

$$M_x = \frac{qL}{2}x - q\frac{x^2}{2} = 5000x - 10\frac{x^2}{2} = 5000x - 10x^2 \text{ kg.cm}$$

از آنجایی که نیروی برشی و لنگر خمشی در بازه سمت چپ تیر مثبت می باشد رابطه (۴۸-۵) به صورت زیر مورد استفاده قرار گرفته است:

$$f_1 = \frac{M_x}{S_1} + \frac{Vd}{8S_t} = \frac{(5000x - 10x^2)}{2 \times 228} + \frac{(5000 - 20x) \times 18}{8 \times 2 \times 11/9} \leq 0/6F_y$$

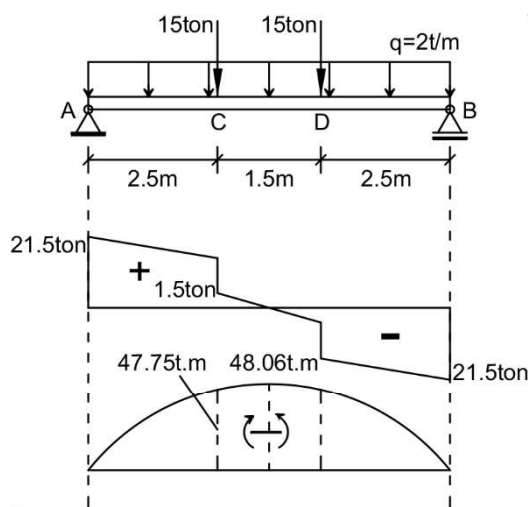
$$\Rightarrow -0/022x^2 + 10/96x - 1/89x + 472.7 - 1440 \leq 0$$

$$\Rightarrow -0/022x^2 + 9/07x - 967/3 \leq 0$$

با توجه به اینکه $\Delta = b^2 - 4ac < 0$ است بنابراین این عبارت همواره منفی است و در نتیجه نیازی به پرکردن سوراخهای تیر لانه زنبوری نیست.

مثال ۱۱-۵

برای تیر شکل ۵-۴۲ در صورتی که فقط در محل دو تکیه‌گاه دارای مهار جانبی بال فشاری باشد، تیر زنبوری را از 2CPE طرح نموده و در صورت لزوم صفحات پرکننده سوراخهای تیر زنبوری را محاسبه کنید.



شکل دیاگرام لنگر و برش تیر (مثال ۵-۶)

حل:

$$S_1 \geq \frac{M_{max}}{0.6F_y \frac{48/06 \times 10^5}{0.6 \times 2400} \frac{S_1}{2}} \quad \text{با توجه به } S_1 \text{ بدست آمده و با فرض برش پای نر از } 2CPE40 \text{ استفاده می‌شود:}$$

$$CPE40(D = 60cm, S_1 = 1790cm^3, S_t = 104cm^3, C_t = 1/85cm, t_w = 0/86cm)$$

کنترل معیار برش قائم:

$$(f_{vv}) \frac{V_x}{2d_T t_w} \frac{21/5 \times 10^3}{2 \times 2 \times \frac{40}{4} \times 0/86} \frac{kg}{cm^2} \quad \text{max}$$

کنترل خمشی در این تیر در دو ناحیه صورت می‌گیرد:

الف) بررسی نواحی کناری از محل تکیه‌گاه تا محل بار متمرکز (از نقطه A تا C):

$$V_x = \frac{qL}{2} - qx = 21500 - 20x \quad kg$$

$$M_x = \frac{qL}{2}x - q\frac{x^2}{2} = 21500x - 20\frac{x^2}{2} \text{ kg.cm} \quad 0 \leq x \leq 2/5m$$

$$f_1 = \frac{M_x}{S_1} + \frac{Vd}{8S_t} = \frac{(21500x - 10x^2)}{2 \times 1790} + \frac{(21500 - 20x) \times 40}{8 \times 2 \times 104} \leq 0/6F_y$$

$$\Rightarrow -0/0028x^2 + 5/52x - 923/17 \leq 0$$

ریشه‌های معادلات فوق عبارتند از:

$$x_1 = 184/5 \text{ cm}$$

$$x_2 = 1786/92 \text{ cm}$$

184.5	250	1786.92
-	+	+
O.K	N.G	O.K

بنابراین از فاصله $184/5 \text{ cm}$ از تکیه‌گاهها تا فاصله 250 cm از تکیه‌گاهها، سوراخهای تیر لانه زنبوری بایستی پر شود.

(ب بررسی ناحیه میانی دو بار متمرکز (از نقطه C تا D):

$$V_x = \frac{qL}{2} - qx = 1500 - 20x \text{ kg}$$

$$M_x = 21500x - 10x^2 - 15000(x - 250)$$

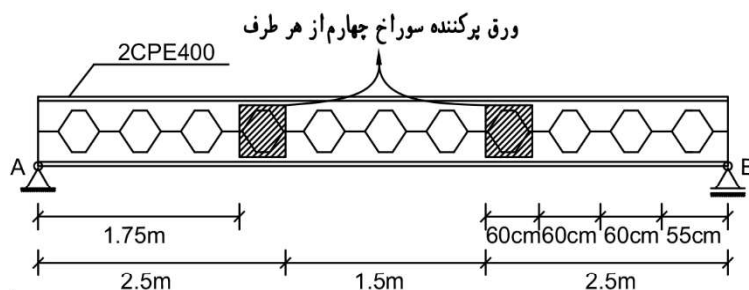
$$\Rightarrow M_x = -10x^2 + 6500x + 3750000 \text{ kg.cm} \quad 2/5 \leq x \leq 4m$$

$$f_1 = \frac{M_x}{S_1} + \frac{Vd}{8S_t} = \frac{(-10x^2 + 6500x + 3750000)}{2 \times 1790} + \frac{(1500 - 20x) \times 40}{8 \times 2 \times 104} \leq 0/6F_y$$

$$\Rightarrow -0/0028x^2 + 1/34x - 356/45 \leq 0$$

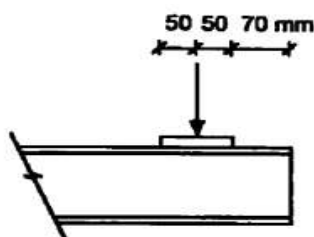
با توجه به اینکه $\Delta = b^2 - 4ac < 0$ است، بنابراین این عبارت همواره منفی است و در نتیجه نیازی به پرکردن سوراخهای میانی نیست.

در شکل زیر نحوه پرکردن سوراخها در طول تیر نشان داده شده است.



۵-۷ تستهای فصل پنجم

۱. در صورتی که نیروی متمرکز مطابق شکل زیر روی صفحه فولادی $۱۰۰ \times ۱۰۰ \times ۲۰$ میلیمتر در نزدیکی انتهای آزاد تیر طره ای فولادی با مقطع IPE200 وارد گردد، مقاومت طراحی در برابر تسلیم موضعی جان کدام است؟ فولاد از نوع ST37 است. (آبان ۹۳)



(1) 270

(2) 180

(3) 200

(4) 250

$$\phi R_n = 1(240 \times 5.6(2.5 \times 20.5 + 100)) = 203.3 \text{ kN}$$

۱۰-۲-۹-۲-۱۰ تسلیم موضعی جان در مقابل نیروی متمرکز کششی و فشاری

الزامات این بند برای نیروی کششی متمرکز تکی، نیروی فشاری متمرکز تکی و هر دو مؤلفه فشاری و کششی زوج نیروی متمرکز کاربرد دارد (شکل ۱۰-۲-۹-۱۷).

مقاومت طراحی تسلیم موضعی جان در مقابل نیروی متمرکز کششی و فشاری مساوی ϕR_n می باشد که در آن ϕ ضریب کاهش مقاومت مساوی ۱ و R_n مقاومت اسمی می باشد که براساس حالت حدی تسلیم موضعی جان به شرح زیر تعیین می شود.

۱- در حالتی که بار متمرکز، در فاصلهای بزرگتر از d از انتهای عضو وارد می شود:

$$R_n = F_y t_w (\Delta k + l_p) \quad (۱۰-۲-۹-۲۴)$$

۲- در حالتی که بار متمرکز، در فاصلهای مساوی یا کوچکتر از d از انتهای عضو وارد می شود:

$$R_n = F_y t_w (2/\Delta k + l_p) \quad (۱۰-۲-۹-۲۵)$$

۵-۸ مسائل فصل پنجم

توجه:

- فولاد مصرفی پروفیلها و ورقها از نوع ST37 می باشد.
- در کلیه مسائل، مهار جانبی تیرها در محل تکیه گاه و در بارهای متمرکز در نظر گرفته شود.
- وزن تیر به صورت جداگانه در نظر گرفته نشود.
- پارامتر κ طبق مقادیر اعلام شده فرض می شود که در محدوده زیر قرار دارد:

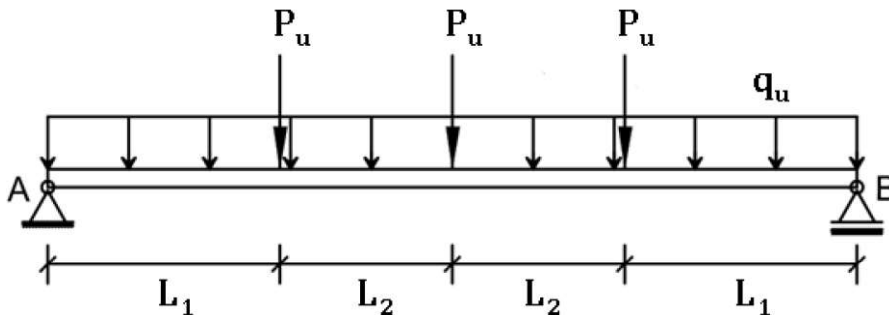
$$15 \leq \kappa \leq 40$$

تمرین ۵-۱

یک تیر ساده تحت بارهای ضربیدار نشان داده شده قرار دارد. در تکیه گاه و محل بارهای متمرکز دارای تکیه گاه جانبی است. با فرض آنکه در کارگاه فقط $IPB45$ و ورق موجود است، تیر را با پروفیل دابل $2IPB45$ و ورق تقویت در دو وضعیت طرح نمایید.

الف) $2IPB$ کنار هم (ولی نجسبیده به هم)ب) $2IPB$ چسبیده به هم

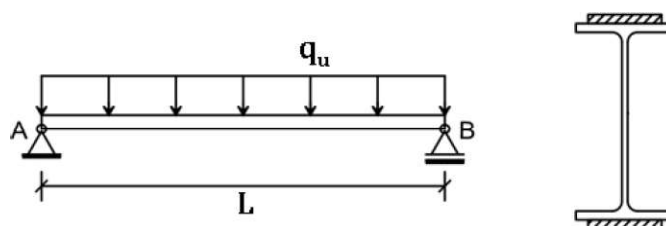
$$L_1 = \left(\frac{\kappa}{5}\right)m, L_2 = \left(\frac{\kappa}{6}\right)m, P_u = \left(\frac{\kappa}{2}\right)ton, q_u = 2 \frac{ton}{m}$$



تمرین ۵-۲

تیر ساده تحت بار گسترده ضربیدار q_u و مهار جانبی پیوسته قرار دارد. چنانچه بالاترین نیمرخ موجود در بازار $IPE(d)$ باشد، تیر را از مقطع IPE با ورق تقویت در هر دو بال فشاری و کششی طراحی کنید.

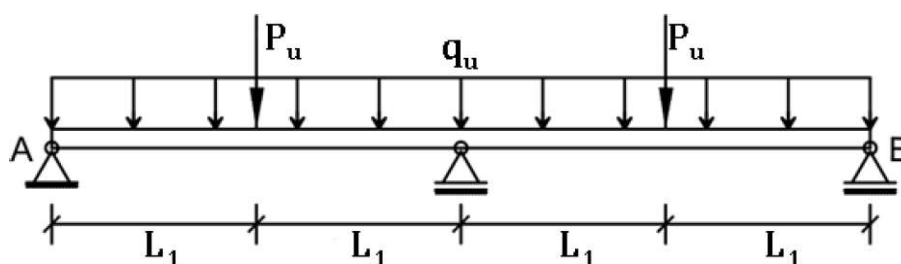
$$d = roundup(60 - \kappa)(cm), L = \left(\frac{60 - \kappa}{2}\right)m, q_u = \left(\frac{60 - \kappa}{10}\right) \frac{ton}{m}$$



تمرین ۳-۵

تیر سراسری مطابق شکل در تکیه گاههای خود دارای مهار جانبی است. چنانچه تیر علاوه بر بار گسترده ضریبدار q_u تحت تاثیر دو بار متمرکز ضریبدار P_u در وسط دهانه ها باشد، تیر را از پروفیل IPB طراحی نمایید. بزرگترین مقطع موجود در بازار $IPB36$ می باشد.

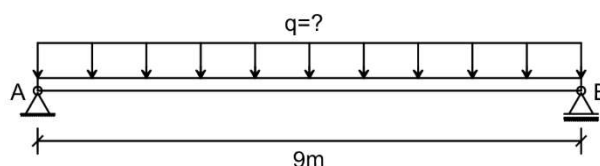
$$L_1 = \left(\frac{\kappa}{8}\right) m, q_u = \left(\frac{\kappa}{10}\right) \frac{ton}{m}, P_u = (\kappa) ton$$



تمرین ۴-۵

تیری به دهانه L با مقطع $IPB40$ زنبوری شده است. ارتفاع کل تیر برابر ۶۰ سانتیمتر و زاویه برش ۴۵ درجه در نظر گرفته شده است. دو سوراخ منتهی به دو انتهای تیر پر گردیده است. مطلوبست تعیین میزان بار گسترده یکنواخت ضریبدار که این تیر می تواند تحمل کند. فرض می شود که تیر دارای تکیه گاه جانبی کافی بوده است.

$$L = \left(\frac{60 - \kappa}{5}\right) m$$

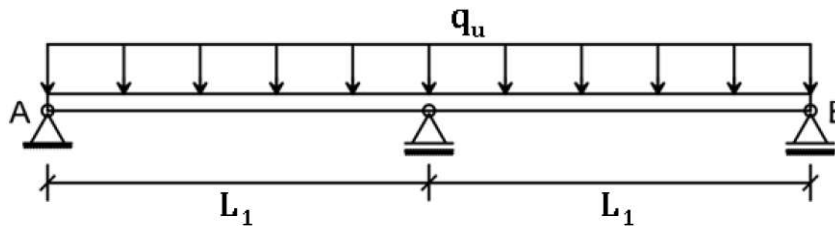


$$e = \frac{d}{4}$$

تمرین ۵-۵

تیر سراسری با دو دهانه مساوی مفروض است. چنانچه تکیه‌گاههای جانبی تیر کافی بوده و این تیر تحت تاثیر بار گسترده یکنواخت ضریبدار q_u قرار گیرد، مطلوبست طرح تیر لانه زنبوری شده از پروفیل IPB .

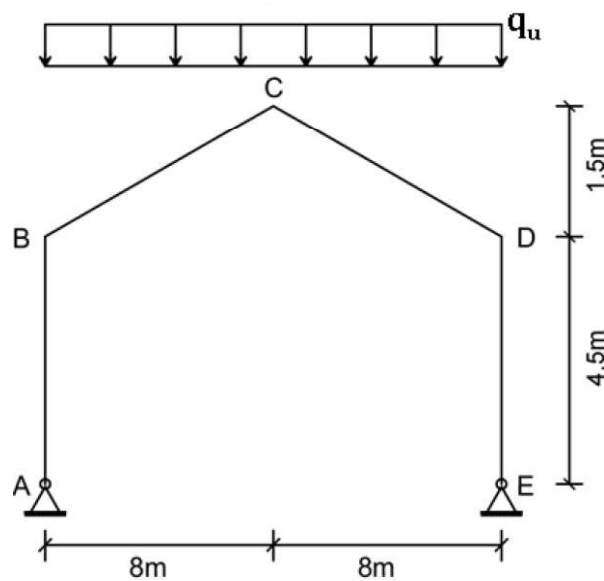
$$L_1 = \left(\frac{\kappa}{5}\right) m, q_u = \left(\frac{\kappa}{10}\right) \frac{ton}{m}$$



تمرین ۵-۶

ساختمان صنعتی شکل زیر، تنها تحت تاثیر بارهای قائم در طول دهانه خود قرار دارد. چنانچه مجموع بارهای قائم ضریبدار وارده بر قاب میانی روی تصویر سطح افق $q_u = 250 \frac{kg}{m^2}$ بوده و فواصل قابها از یکدیگر (در صفحه عمود) برابر ۸ متر باشد، تیر سقف را از مقطع لانه زنبوری مطابق با برش پای نر طراحی کنید. تیر سقف از تکیه گاه جانبی کافی برخوردار است. اتصال در نقطه C مفصلی بوده و تیرهای BC و DC زنبوری هستند.

$$q_u = (0.01 \kappa) \frac{ton}{m^2}$$



تمرین ۵-۷

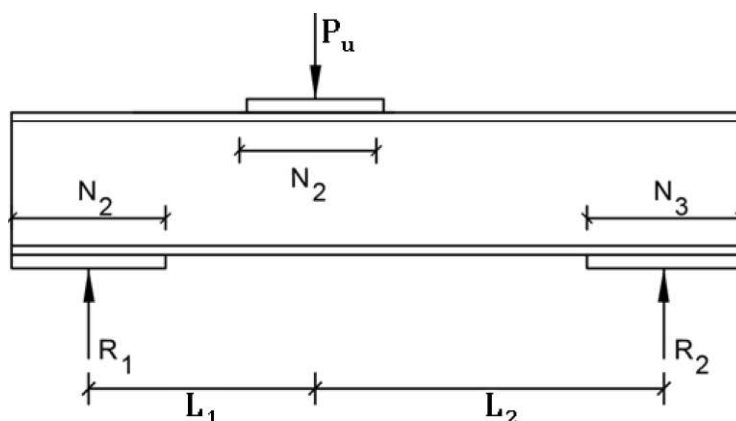
تیر شکل زیر دارای اتکاء جانبی مناسب بوده و تحت بار قائم ضریبدار P_u قرار دارد.

الف) تیر را از مقطع IPB طرح نمایید.

ب) طولهای ورق N_1, N_2, N_3 را با توجه به محدودیت‌های تیر در محل بارهای متمرکز، محاسبه نمایید.

ج) ورق‌های زیرسری را در محل تکیه‌گاه‌ها طرح نمایید. بستر تکیه‌گاه بتنی از نوع $C20$ می‌باشد.

$$L_1 = (\kappa)cm, L_2 = (1.5\kappa)cm, P_u = (\kappa)ton$$



تمرین ۵-۸

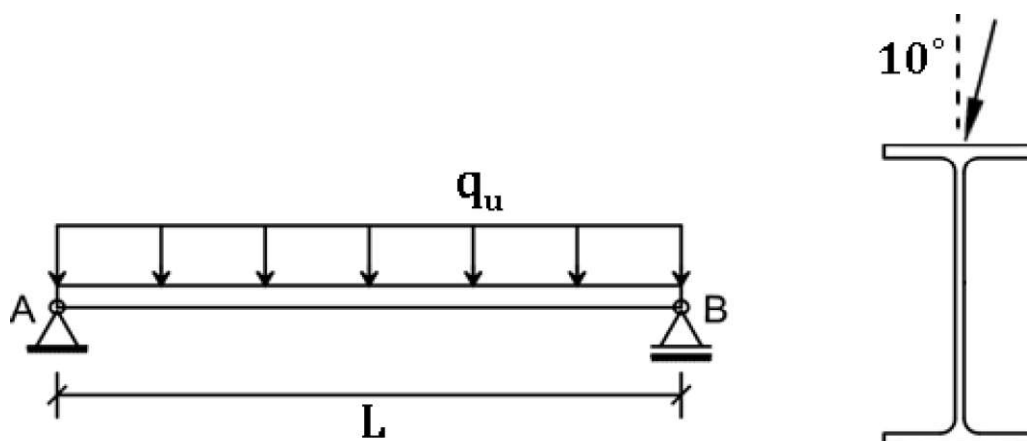
تیر ساده به طول L تحت بار گسترده ضریبدار به شدت q_u با زاویه 10° نسبت به محور قائم مقطع تیر قرار دارد.

تیر از نیمرخ $IPE(d)$ می‌باشد. مطلوب است تعیین حداکثر بار قابل تحمل تیر.

نکته: از آنجا که تیر به صورت ساده فرض گردیده است، لذا در جهت هر دو محور خمش، دارای تکیه‌گاه مفصلی

خواهد بود.

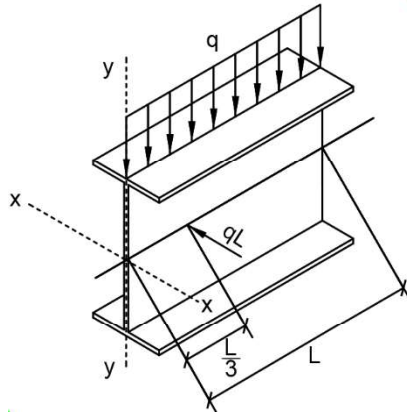
$$d = roundup(60 - \kappa)(cm), L = \left(\frac{60 - \kappa}{5}\right)m$$



تمرین ۵-۹

مطلوبست طرح تیر ساده به طول L از پروفیل IPB تحت بار گذاری گسترده ضربیدار q_u و بار متمرکز به شدت $q_u L$ که در فاصله $\frac{1}{3}$ طول دهانه به صورت افقی بر تیر اثر نموده است.

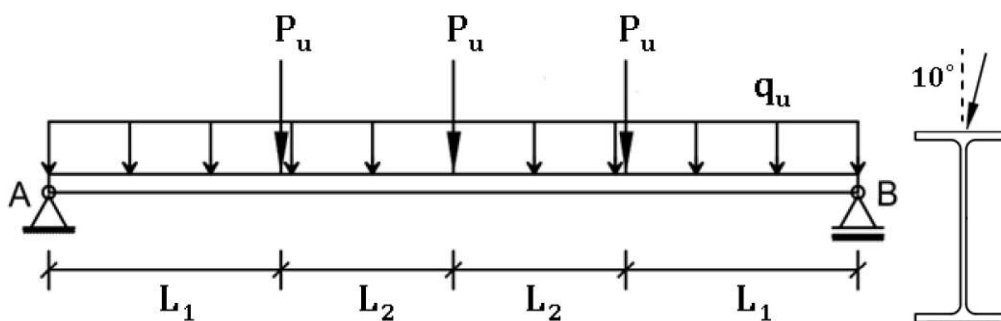
$$d = \text{roundup}(\kappa)(cm), L = \left(\frac{\kappa}{5}\right)m, q_u = \left(\frac{\kappa}{20}\right)\frac{ton}{m}$$



تمرین ۵-۱۰

یک تیر ساده تحت بارهای ضربیدار نشان داده شده قرار دارد. در تکیه گاه و محل بارهای متمرکز دارای تکیه گاه جانبی است. با فرض آنکه در کارگاه فقط $IPB45$ و ورق موجود است، تیر را با پروفیل $IPB45$ طرح نمایید.

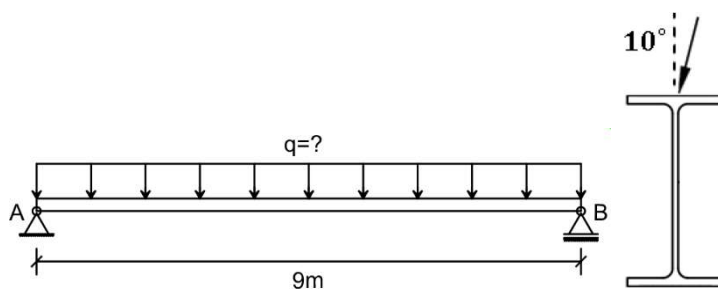
$$L_1 = \left(\frac{\kappa}{5}\right)m, L_2 = \left(\frac{\kappa}{6}\right)m, P_u = \left(\frac{\kappa}{2}\right)ton, q_u = 2\frac{ton}{m}$$



تمرین ۵-۱۱

تیری به دهانه L با مقطع $IPB40$ ساخته شده است. مطلوبست تعیین میزان بار گسترده یکنواخت ضربیدار که این تیر می تواند تحمل کند. فرض می شود که تیر دارای تکیه گاه جانبی کافی بوده است.

$$L = \left(\frac{60 - \kappa}{5}\right)m$$



تمرین ۵-۱۲ (اختیاری)

تیر ورق ساده با دهانه ۶ متر مفروض است. جان تیر $PL60 \times 0.8\text{cm}$ و بالهای آن $PL20 \times 1\text{cm}$ است. فشردگی مقطع تیر را کنترل کرده و حداکثر بار منفردی را که می‌تواند در وسط دهانه تیر وارد شود، تعیین کنید. اگر عرض تکیه‌گاهها 30cm و طول تماس بار متمرکز با بال تیر 35cm باشد، کنترل‌های لازم را در محل تکیه‌گاهها و در محل اثر بار متمرکز کنترل کنید. تیر بدون ورق زیرسری، به طول ۲۰ سانتیمتر از هر طرف بر روی تکیه‌گاه بتنی از نوع C20 قرار دارد.

تمرین ۵-۱۳ (اختیاری)

برای حمال ریل جرثقیل، تیری با نیمرخ I مطابق شکل زیر انتخاب شده است. هرگاه بال فوقانی این حمال در مقاطع C, B, A در مقابل تغییر مکان جانبی مهار شده باشد، مطلوبست تعیین حداکثر مقدار P_u .

