



موسسه آموزش عالی
جهاد دانشگاهی خوزستان

گروه آموزشی مهندسی عمران

فولاد پیشرفته



فصل (۶)

طراحی تیر ورق

Design of Plate Girder Beam

خواننده محترم لطفاً کلیه محاسبات انجام گرفته در تمامی مثال‌های این بخش را از نظر صحت نتایج کنترل نموده و در صورت مشاهده هرگونه مشکل محاسباتی با ذکر آدرس دقیق، موضوع را از طریق ارسال ایمیل به n.siahpolo@gmail.com یا siahpolo@acecr.ac.ir اطلاع دهید. بدیهی است که اصلاحات شما می‌تواند به بهبود نوشته حاضر کمک شایانی نماید.

تهیه و تنظیم:

دکتر نوید سیاه پلو

استادیار گروه آموزشی مهندسی عمران

ویرایش ۶- بهار ۱۴۰۲

توجه مهم! هرگونه کپی برداری از بخش یا تمام مطالب موجود در این جزوه آموزشی و یا انتشار آن در فضای مجازی و هرگونه وبسایتی بدون کسب اجازه از مؤلف، تخلف محسوب شده و برابر ماده ۲۳ قانون حمایت حقوق مؤلفان و مصنفان و هنرمندان قابل پیگرد قانونی است.

مثال ۱

تیر ورقی به طول ۸ متر با دو انتهای ساده مفروض است. بار گسترده مرده و زنده یکنواخت بدون ضریب برابر 5 tonf/m و 3.67 tonf/m بر این تیرورق وارد می شود. اگر فرض شود تیرورق در تمام طول خود دارای مهار جانبی کافی است و جنس فولاد مصرفی ورقهای بال، جان و سخت کننده ها $St37$ باشد مطلوبست طرح کامل تیر ورق.

در ابتدا نیروی برشی و لنگر خمشی ضربیدار محاسبه می شود. با استفاده از ترکیب بار ثقلی مبحث ۶ برای روش LRFD (1.2D+1.6L) داریم:

$$q_u = 1.2DL + 1.6LL = 1.2 \left(5 \frac{\text{tonf}}{\text{m}} \right) + 1.6 \left(3.67 \frac{\text{tonf}}{\text{m}} \right) = 11.5 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$

$$V_u = \frac{q_u L}{2} = \frac{11.5 \frac{\text{tonf}}{\text{m}} \times 8 \text{m}}{2} = 46 \text{tonf}$$

$$M_u = \frac{q_u L^2}{8} = \frac{11.5 \frac{\text{tonf}}{\text{m}} \times (8 \text{m})^2}{8} = 92 \text{ tonf.m} = 9200000 \text{ kgf.cm}$$

گام ۱ - محاسبه ارتفاع تیر ورق (ارتفاع آزاد جان)

ارتفاع تیروقتی تیر دو سر مفصل باشد (دهانه ساده):

$$\frac{L}{12} \leq h \leq \frac{L}{8} \rightarrow \frac{800}{12} = 67 \text{ cm} \leq h \leq \frac{800}{8} = 100 \text{ cm} [1]$$

اگر فرض کنیم ضخامت جان تیر ورق ۱ سانتی متر است ($t_w = 1 \text{ cm}$)، ارتفاع اقتصادی تیر ورق عبارتست از

$$h = \sqrt[3]{\frac{3M_u}{0.9\alpha F_y t_w}} = \sqrt[3]{\frac{3 \times 9200000}{0.9 \times 0.7 \times 2400 \times 1.0 \text{cm}}} = 135 \text{ cm} \Rightarrow [2]$$

$$h = \max([1], [2]) \Rightarrow h = 140 \text{ cm}$$

گام ۲ - تعیین ابعاد ورق بال

$$M_u = 9200000 \leq \phi_b M_n = 0.9\alpha F_y S_x = 0.9 \times 0.7 \times 2400 \times S_x \Rightarrow S_x \geq 6084 \text{ cm}^4$$

$$S_x = 6084 \leq h \times \left(A_f + \frac{h t_w}{6} \right) = 140 \times \left(A_f + \frac{140 \times 1}{6} \right) \Rightarrow A_f = 20.1 \text{ cm}^2$$

آنگاه عرض و ضخامت بال براساس A_f محاسبه می شود. برای حدس اولیه عرض بال ۲۰ و ضخامت آن ۱ سانتی متر انتخاب می گردد ($t_f = 1 \text{ cm}$ و $b_f = 20 \text{ cm}$). در ادامه سایر مشخصات مقطع بدست می آیند:

$$I_x = \frac{b_f d^3}{12} - \frac{(b_f - t_w) h_w^3}{12} = \frac{20 \times 142^3}{12} - \frac{(20 - 1) 140^3}{12} = 427480 \text{ cm}^4$$

$$S_x = \frac{I_x}{0.5 h_w + t_f} = \frac{427480}{0.5 \times 140 + 1} = 6020.8 \text{ cm}^3$$

توجه:

در انتخاب عرض بال فشاری توجه به این نکته داشته باشید که عرض ورق هایی که در بازار ایران موجودند بین ۱ متر تا ۲ متر هستند (۱، ۱/۲، ۱/۵ و ۲ متر). پس عرض را باید بنحوی انتخاب کنید که دورریز ورق نداشته باشیم. مثلاً اگر ۲۰ سانتی متر در نظر گرفته شود، از ورق به عرض ۱/۲ متر، ۶ عدد ورق بال بدست می آید.

گام ۳ - کنترل حدود کمانش موضعی بال و جان

ابتدا شرایط فشردگی بال بررسی می شود:

$$0.35 \leq K_c = \frac{4}{\sqrt{\frac{h}{t_w}}} = \frac{4}{\sqrt{140}} = 0.34 \leq 0.76$$

$$F_L = 0.7F_y = 0.7 \times 2400 = 1680$$

$$\lambda_f = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{20}{2 \times 1} = 10$$

$$\lambda_{pf} = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.38 \sqrt{\frac{2.1 \times 10^6}{2400}} = 11.24$$

$$\lambda_{rf} = 0.95 \sqrt{K_c \frac{E}{F_L}} = 0.95 \sqrt{0.34 \frac{2.1 \times 10^6}{1680}} = 19.58$$

$$\lambda_f = 10 \leq \lambda_{pf} = 11.24$$

در نتیجه بال تیر ورق فشرده است. البته استفاده از بال فشرده برای تیرورق‌ها رایج نیست بنابراین در این قسمت لازم است ضخامت ورق بال بنحوی اصلاح شود که بال غیر فشرده شود. پس با انتخاب ضخامت بال برابر ۰/۸ سانتی متر داریم:

$$\lambda_{pf} = 11.24 \leq \lambda_f = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{20}{2 \times 0.8} = 12.5 \leq \lambda_{rf} = 19.58$$

بال غیر فشرده است. در ادامه وضعیت کمانش موضعی جان بررسی شده است:

$$\lambda_w = \frac{h}{t_w} = \frac{140}{1} = 140$$

$$\lambda_{pw} = 3.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 3.76 \sqrt{\frac{2.1 \times 10^6}{2400}} = 111.2$$

$$\lambda_{rw} = 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 168.6$$

$$\lambda_w = 140 \geq \lambda_{rw} = 168.6$$

جان لاغر نیست در حالیکه برای صرفه اقتصادی تیر ورق و البته کمتر شدن وزن آن استفاده از جان لاغر متداول تر است. در ادامه ضخامت جان از ۱ سانتی متر به ۰/۸ کاهش یافته و بدین ترتیب جان لاغر می شود.

$$\lambda_w = \frac{h}{t_w} = \frac{140}{0.8} = 175 > \lambda_{rw} = 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 168.6$$

در این حالت لازم است یکبار دیگر ممان اینرسی و اساس مقطع محاسبه شود:

$$I_x = \frac{b_f d^3}{12} - \frac{(b_f - t_w) h_w^3}{12} = \frac{20 \times 141.6^3}{12} - \frac{(20 - 0.8) 140^3}{12} = 341532 \text{ cm}^4$$

$$S_x = \frac{I_x}{0.5h_w + t_f} = \frac{341532}{0.5 \times 140 + 0.8} = 4823 \text{ cm}^3$$

گام ۴- ظرفیت خمشی مقطع

برای محاسبه ظرفیت خمشی اسن، M_n لازم است از حالت «مقاومت خمشی I شکل با یک یا دو محور تقارن با جان لاغر و خمش حول محور قوی- تیر ورقها» استفاده شود.

الف) تسلیم بال فشاری

$$a_w = \frac{h_c t_w}{b_{fc} t_{fc}} \leq 10 \rightarrow a_w = \frac{140 \times 0.8}{20 \times 0.8} = 7 \leq 10$$

$$R_{pg} = 1 - \frac{a_w}{1200 + 300a_w} \left(\frac{h_c}{t_w} - 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \right) \leq 1$$

$$R_{pg} = 1 - \frac{7}{1200 + 300 \times 7} \left(\frac{140}{0.8} - 5.7 \sqrt{\frac{2.1 \times 10^6 \frac{kg}{cm^2}}{2400 \frac{kg}{cm^2}}} \right) = 0.986 \leq 1$$

$$M_n = R_{pg} F_y S_{xc} \rightarrow M_n = 0.986 \times 2400 \frac{kg}{cm^2} \times 4823 cm^3 \times 10^{-5} = 114.2 ton.m$$

(ب) حالت حدی کمانش پیچشی جانبی

در صورت مسئله ذکر شده است که تیر ورق در تمام طول خود دارای مهارجانی کافی است در نتیجه:

$$L_b = 0 \leq L_p \rightarrow \text{نیازی به کنترل حالت حدی کمانش پیچشی جانبی نمی باشد}$$

(پ) کمانش موضعی بال فشاری

$$F_{cr} = F_y - 0.3 F_y \left(\frac{\lambda - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) \leq F_y$$

$$F_{cr} = 2400 - 0.3 \times 2400 \left(\frac{12.5 - 11.24}{19.58 - 11.24} \right) = 2291 \frac{kg}{cm^2} \leq F_y = 2400 \frac{kg}{cm^2}$$

$$M_n = R_{pg} F_{cr} S_{xc} = 0.986 \times 2291 \frac{kg}{cm^2} \times 4823 cm^3 \times 10^{-5} = 108.9 ton.m$$

(ت) تسلیم کششی

با توجه به اینکه مقطع تیر ورق متقارن است پس $S_{xt} = S_{xc}$. بنابراین نیازی به کنترل حالت حدی تسلیم کششی نیست.

$$S_{xt} \geq S_{xc} \rightarrow \text{نیازی به کنترل تسلیم کششی نیست}$$

توجه:

در این مسئله S_{xt} با S_{xc} برابر است

$$M_n^{\text{نهایی}} = \min\{M_n^1, M_n^2\} = \{114.2 ton.m, 108.9 ton.m\} = 108.9 ton.m$$

از آنجاییکه ابعاد تیر ورق نهایی شده است، لازم است وزن واحد طول تیر ورق نیز در محاسبه وارد شود (W). ضمن آنکه وزن مجموعه جوش‌های و سخت‌کننده‌ها نیز می‌باید منظور شود. برای مجموع وزن جوش‌ها و سخت‌کننده‌ها می‌توان ۲۰٪ به وزن واحد طول تیر ورق اضافه کرد. در این راستا ابتدا وزن واحد طول تیر ورق (W) محاسبه و با اعمال ۲۰٪ اضافه، وزن نهایی تیر (W_t) برآورد می‌گردد:

$$A_g = 2 \times 20 \times 0.8 + 140 \times 0.8 = 144 cm^2$$

$$w = A_g \rho_s = 144 \times 7850 \times 10^{-4} = 113.04 kgf/m$$

$$w_t = 1.2W = 1.2 \times 113.04 = 136 kgf/m = 0.14 tonf/m$$

$$q_u = 1.2DL + 1.6LL = 1.2(5 + 0.14) + 1.6(3.67) = 12.04 \frac{tonf}{m}$$

$$V_u = \frac{q_u L}{2} = \frac{12.04 \times 8}{2} = 48.2 ton$$

$$M_u = \frac{q_u L^2}{8} = \frac{12.04 \times (8)^2}{8} = 96.3 tonf.m$$

$$M_u \leq \phi M_n \rightarrow 96.3 tonf.m \leq 0.9 \times 108.9 ton.m = 98 tonf.m \rightarrow ok$$

توجه:

اگر $M_u \leq \phi M_n$ برقرار نبود آنگاه می بایست ابعاد تیر ورق اصلاح گردد. در ابتدا ارتفاع جان رو بیشتر کنید اگر جواب نداد عرض بال رو افزایش دهید

گام ۵- کنترل تنش برشی

ابتدا فرض می شود که تیر ورق در طول خود سخت کننده نخواهد. پس $K_V = 5.34$ و متناظر با C_{v1} محاسبه می شود:

$$1.1 \sqrt{K_v \frac{E}{F_y}} = 1.1 \sqrt{5.34 \times \frac{2.1 \times 10^6}{2400}} = 75 < \frac{h}{t_w} = 175$$

$$C_{v1} = \frac{1.1}{\left(\frac{h}{t_w}\right)} \sqrt{K_v \frac{E}{F_y}} = \frac{1.1}{\left(\frac{140}{0.8}\right)} \sqrt{5.34 \times \frac{2.1 \times 10^6}{2400}} = 0.43$$

$$V_n = 0.6 F_y A_w C_{v1} = 0.6 \times 2400 \times (140 + 1.6) \times 0.8 \times 0.43 = 70142 \text{ kgf}$$

$$V_u = 48.2 \text{ tonf} \leq \phi_v V_n = 0.9 \times 70.1 \text{ ton} = 63.1 \text{ tonf} \rightarrow \text{ok}$$

جان تیر ورق بدون نیاز به سخت کننده جوابگوی نیروی برشی وارده می باشد. اما برای آشنایی با تاثیر سخت کننده ها بر ظرفیت باربری برشی، فرض می کنیم که سخت کننده های میانی به فاصله دومترا از هم قرار گرفته اند. دقت کنید که فاصله سخت کننده ها از هم (برای حالتی که تیر ورق بدون سخت کننده جوابگوی نیروی برشی نیست) براساس اسلاید ۵۱ بدست می آید.

$$\frac{h}{t_w} = \frac{140}{0.8} = 175 \rightarrow \frac{a}{h} = \frac{200}{140} < 3.0 \rightarrow k_v = 5 + \frac{5}{\left(\frac{a}{h}\right)^2} = 5 + \frac{5}{\left(\frac{200}{140}\right)^2} = 7.45$$

$$\frac{h}{t_w} = 175 > 1.1 \sqrt{K_v \frac{E}{F_y}} = 1.1 \sqrt{7.45 \times \frac{2.1 \times 10^6}{2400}} = 88.8$$

$$C_{v1} = \frac{1.1}{\left(\frac{h}{t_w}\right)} \sqrt{K_v \frac{E}{F_y}} = \frac{1.1}{\left(\frac{140}{0.8}\right)} \sqrt{7.45 \times \frac{2.1 \times 10^6}{2400}} = 0.51$$

$$V_n = 0.6 F_y A_w C_{v1} = 0.6 \times 2400 \times (140 + 1.6) \times 0.8 \times 0.51 = 83192 \text{ kgf}$$

$$V_u = 48.2 \text{ tonf} \leq \phi_v V_n = 0.9 \times 83.2 \text{ ton} = 75 \text{ tonf} \rightarrow \text{ok}$$

توجه:

در اگر رابطه $V_u \leq \phi_v V_n$ برقرار نبود آنگاه برای برقراری رابطه، دوراه وجود دارد:

۱- افزایش ابعاد جان

۲- کاهش فاصله سخت کننده ها

توجه:

توجه شود که چشمه اول دقیقاً بعد از تکیه گاه است و چشمه دوم به فاصله ۲۰۰ سانتی متری چشمه اول قرار دارد. بارسم دیاگرام برش و مشخص کردن چشمه اول و دوم و بانجام یک تناسب ساده به راحتی مقدار نیروی برشی در محل چشمه دوم بدست می آید:

$$\frac{V_u}{2} = \frac{48.2}{4} \rightarrow V_u = 24.1 \text{ ton}$$

قبلاً ثابت شد که تیرورق بدون نیاز به سخت کننده نیز می تواند برش وارده را تحمل کند (ظرفیت برشی تیر بدون سخت کننده ۶۳/۱ تن نیرو بدست آمد). ضمناً ثابت شد که استفاده از سخت کننده میانی با فاصله دو متر ظرفیت برشی را به ۷۵ تن نیرو ارتقا داد. بنابراین بدیهی است که برای نیروی ۲۴/۱ تن نیرو نیز جان تیر ورق جوابگو بوده و اساساً نیازی به استفاده از اثر میدان کشش هم نیست. اما برای آشنایی خوانندگان با محاسبات میدان کششی برای دومین چشمه از برتکیه گاه به کمک میدان کشش نتایج بشرح زیر ارائه می شود:

$$\frac{h}{t_w} = 175 > 1.37 \sqrt{K_v \frac{E}{F_y}} = 1.37 \sqrt{7.45 \times \frac{2.1 \times 10^6}{2400}} = 110.6 \rightarrow C_{v2} = \frac{1.51 k_v E}{\left(\frac{h}{t_w}\right)^2 F_y} = 0.321$$

در ادامه شرایط اسلاید ۵۲ درسنامه فصل ۶ کنترل می شود تا مشخص شود مقاومت برشی اسمی از کدام رابطه میدان کشش بدست آید:

$$\frac{h}{t_w} = 175 > 1.1 \sqrt{K_v \frac{E}{F_y}} = 88.8 \text{ and } \frac{h}{b_{ft}} = \frac{140}{20} = 7 \not\leq 6 \text{ and } \frac{h}{b_{fc}} = \frac{140}{20} = 7 \not\leq 6 \text{ and } \frac{2A_w}{A_{fc} + A_{ft}} = \frac{2 \times (140 + 2 \times 1) \times 0.8}{20 \times 1 + 20 \times 1} = 5.68 \not\leq 2.5$$

پس از رابطه دوم اسلاید ۵۲ استفاده می شود:

$$V_n = 0.6 F_y A_w \left(C_{v2} + \frac{1 - C_{v2}}{1.15 \left(\frac{a}{h} + \sqrt{1 + \left(\frac{a}{h} \right)^2} \right)} \right) = 82771 \text{ kgf}$$

جالب اینکه مقاومت برشی بدست آمده در اثر میدان کشش (۸۲۷۷۱ کیلوگرم نیرو) از مقاومت برشی بدون میدان کشش و با فرض وجود سخت کننده (۸۳۱۹۲ کیلوگرم نیرو) کمتر شد. مطابق تبصره ذیل رابطه ۱۰-۲-۶-۱۳ مبحث ۱۰ ویرایش ۱۴۰۱ چنانچه مقاومت برشی اسمی بدست آمده از اثر میدان کشش کمتر از مقاومت برشی اسمی بدون اثر میدان کشش شد، مقاومت برشی اسمی را می توان بدون اثر میدان کشش محاسب نمود. پس عملاً رابطه کنترل براساس مقاومت برشی بدون میدان کشش بشرح زیر است :

$$V_u = 24.1 \text{ tonf} \leq \phi_v V_n = 0.9 \times 83.2 \text{ ton} = 75 \text{ tonf} \rightarrow ok$$

گام ۶- طراحی سخت کننده میانی (برشی)

فرض کنید در جان تیر ورق سخت کننده برشی (میانی) به مشخصات زیر استفاده شده است:

$$\begin{aligned} a &= 200 \text{ cm} \\ b_s &= \frac{b_f - t_w}{2} = \frac{20 \text{ cm} - 1 \text{ cm}}{2} \simeq 9.5 \text{ cm}, \\ t_s &= 0.8 \text{ cm} \end{aligned}$$

توجه:

a فاصله هردو سخت کننده و b_s عرض سخت کننده و t_s ضخامت سخت کننده است

برای جلوگیری از احتمال کمانش محلی نسبت زیر باید رعایت شود:

$$\frac{b_s}{t_s} = \frac{9.5}{0.8} = 11.9 \leq 0.56 \sqrt{\frac{E}{F_{ys}}} = 16.56 : OK$$

همانطور که قبلاً گفته شد از نظر تئوری و با توجه به نیروی برشی وارد بر تیر ورق، نیازی به تعبیه سخت کننده عرضی نبود ولی در این مسئله استفاده شد. در این صورت معمولاً کنترل‌های مربوط به سخت کننده عرضی در بحرانی تری دهانه (دهانه‌ای که بیشترین مشخصات سخت کننده را مطالبه کند) انجام می‌شود. سخت کننده بحرانی مرز بین چشمه اول و دوم در نظر گرفته می‌شود. ضمن اینکه سخت کننده اتکایی (تکیه گاهی زیر بار متمرکز) جداگانه طراحی می‌شود. در اولین چشمه از اثر میدان کشش استفاده نشد. در این چشمه داشتیم:

$$C_{v1} = 0.51$$

بنابراین چون در این چشمه از میدان کشش استفاده نشده و مقدار C_{v1} از 0.8 کمتر است، براساس حالت ۲ اسلاید ۵۶ درسمانه فصل ۶ حداقل ممان اینرسی باید رابطه زیر را برآورده کند:

$$\rho_{st} = \max\left(\frac{F_{yw}}{F_{yst}}, 1\right) = 1.0$$

$$b_p = \min(a, h) = \min(200, 140) = 140 \text{ cm}$$

$$V_r = 48.2 \text{ tonf}$$

$$V_{c1} = \phi_v V_n = 0.9 \times 83.2 \text{ ton} = 75 \text{ tonf}$$

$$V_{c2} = 0.9 \times 0.6 F_y A_w C_{v2} = 0.6 \times 2400 \times (140 + 1.6) \times 0.8 \times 0.321 = 52362 \text{ kgf} = 52.4 \text{ tonf}$$

$$\rho_w = \frac{V_r - V_{c2}}{V_{c1} - V_{c2}} = \frac{48.2 - 52.4}{75 - 52.4} \not\geq 0.0 \rightarrow \rho_w = 0.0$$

$$I_{st1} = \frac{h^4 \rho_{st}^{1.3} \left(\frac{F_{yw}}{E}\right)^{1.5}}{40} = \frac{140^4 \times 1.0^{1.3} \left(\frac{2400}{2.1 \times 10^6}\right)^{1.5}}{40} = 371 \text{ cm}^4$$

$$I_{st2} = \left(\frac{2.5}{\left(\frac{a}{h}\right)^2} - 2\right) b_p t_w^3 = \left(\frac{2.5}{\left(\frac{200}{140}\right)^2} - 2\right) 140 \times 0.8^3 = -55.5 \geq 0.50 b_p t_w^3 = 35.84 \text{ cm}^4 \rightarrow I_{st2} = 35.84 \text{ cm}^4$$

$$I_{st} = \frac{1}{12} t_s (2b_s + t_w)^3 - \frac{1}{12} t_s t_w^3 \cong \frac{2}{3} t_s b_s^3 = \frac{2}{3} \times 0.8 \times 9.5^3 = 457.3 \text{ cm}^4$$

$$I_{st} = 457.3 \geq \max(I_{st2}, I_{st1} + (I_{st1} - I_{st2})\rho_w) = \max(35.84, 371 + (371 - 35.84) \times 0) = 371 \text{ cm}^4 OK$$

در مبحث ۱۰ ویرایش ۱۴۰۱ در خصوص طراحی جوش اتصال ورق سخت کننده عرضی به جان رابطه خاصی ارائه نشده است. بنابراین براساس پیشنهاد اسلاید ۵۹ درسمانه عمل می‌کنیم. طراحی جوش سخت کننده‌ها به جان با فرض اینکه الکتروود مصرفی ۶۰۱۳ بوده داریم:

$$\phi R_n = \phi (0.6 F_{ue}) t_e = 0.75 \times 0.6 \times 4200 \times 0.707 D = 1336 D$$

$$f_{vs} = 1.60 h \sqrt{\left(\frac{1500 F_y}{E}\right)^3} = 1.60 \times 140 \times \sqrt{\left(\frac{1500 \times 2400}{2.1 \times 10^6}\right)^3} = 502.8 = 2 * 1336 D \Rightarrow D = 2 \text{ mm} \not\geq 3 \text{ mm}$$

براساس جدول ۱۰-۲-۹-۲ صفحه ۱۹۵ مبحث ۱۰ ویرایش ۱۴۰۱ و با توجه به اینکه ضخامت قطعه نازک تر ۸ میلیمتر است (ضخامت ورق بال و جان هر دو ۸ میلیمتر است)، لذا حداقل بعد جوش ۵ میلیمتر انتخاب می‌شود.

گام ۷- جوش بال به جان

براساس مطالب ارائه شده در صفحه ۱۹۸ مبحث ۱۰ ویرایش ۱۴۰۱ جوشکاری ورق سخت کننده عرضی به بال الزامیست. برای طراحی این جوش از مطالب ارائه شده در اسلاید ۶۱ درسمانه فصل ۶ استفاده می‌شود:

$$Q = A\bar{y} = (20 \text{ cm} \times 0.8 \text{ cm}) \times 70.4 \text{ cm} = 1126.4 \text{ cm}^3$$

توجه:

$20\text{cm} \times 0.8\text{cm}$ مساحت بال و 70.4cm یعنی $70\text{ سانتی متر معادل نصف ارتفاع جان به اضافه نصف ضخامت بال}$

$$q_u = \frac{48200 \times 1126.4}{341532} = 159 = 2 \times 1336D \rightarrow D = 0.08\text{cm} = 0.8\text{mm} \nless 5\text{mm}$$

براساس جدول ۱۰-۲-۹-۲ صفحه ۱۹۵ مبحث ۱۰ ویرایش ۱۴۰۱ و با توجه به اینکه ضخامت قطعه نازک تر ۸ میلیمتر است (ضخامت ورق بال و جان هر دو ۸ میلیمتر است)، لذا حداقل بعد جوش ۵ میلیمتر انتخاب می شود.

$$D_{min} = 5\text{mm}$$

براساس توضیحات صفحه ۱۹۵ مبحث ۱۰ ویرایش ۱۴۰۱ در خصوص بیشینه بعد جوش گوشه و با توجه به اینکه ضخامت هر دو قطعه بیش از ۶ میلی متر است حداکثر ضخامت بعد جوش گوشه برابر است با ضخامت ورق جان (بال) منهای ۲ میلیمتر که در این مسئله می شود:

$$D_{max} = t - 2\text{mm} = 8 - 2 = 6\text{mm}$$

فرض کنید ساق جوش ۵ میلیمتر انتخاب شود. اگر بخواهیم از جوشکاری منقطع استفاده کنیم، کفایت دو رابطه زیر بطور همزمان برآورده شوند:

$$(\phi R_n)_1 = \phi \times 0.6F_{ue} \times 0.707D = 1336 \times 0.5 = 668 \frac{\text{kgf}}{\text{m}} \geq q_u = 159 \frac{\text{kgf}}{\text{m}} : OK$$

$$(\phi R_n)_2 = \phi \times 0.6F_y \times t_w = 0.9 \times 0.6 \times 2400 \times 0.8 = 1036 \text{ kgf/m} \geq q_u = 159 \frac{\text{kgf}}{\text{m}} : OK$$

گام ۸- کنترل خیز تیر

برای کنترل خیز تیر دوسر ساده داریم:

$$\Delta = \frac{5}{384} \times \frac{qL^4}{EI}$$

$$\Delta_{D+L} = \frac{5}{384} \times \frac{\left(50 \frac{\text{kg}}{\text{cm}} + 1.13 \frac{\text{kg}}{\text{cm}} + 36.7 \frac{\text{kg}}{\text{cm}}\right) (800\text{cm})^4}{2.1 \times 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \times 341532\text{cm}^4} = 0.65\text{cm} \leq \frac{800\text{cm}}{240} = 3.3\text{cm}$$

$$\Delta_{LL} = \frac{5}{384} \times \frac{\left(36.7 \frac{\text{kg}}{\text{cm}}\right) (800\text{cm})^4}{2.1 \times 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \times 341532\text{cm}^4} = 0.27\text{cm} \leq \frac{800\text{cm}}{360} = 2.22\text{cm}$$

توجه:

توجه شود اگر خیز جوابگو نبود ارتفاع تیر ورق را تغییر دهید. در هر صورت با تغییر ابعاد، ممان اینرسی را افزایش دهید تا خیز جوابگو باشد.

گام ۹- طراحی سخت کننده تکیه گاهی (فشاری)

برای کنترل نیاز به سخت کننده های تکیه گاهی دو روش وجود دارد (اصغری، ۱۳۹۹، ج ۲)

روش ۱: با استفاده از ۳ حالت حدی تسلیم موضعی جان، لهیدگی و کمانش جانبی جان پهنای نشیمن بنحوی محاسبه شود که نیازی به تعبیه سخت کننده اتکایی نباشد. این روش معمولاً برای تیرهای با مقطع کوچک مانند تیرهای گرم نورد شده استفاده می شود.

روش ۲: بدون توجه به حالت حدی تسلیم، لهیدگی و کمانش جانبی جان، با قضاوت مهندسی فرض شود که در محل بارهای اتکایی به سخت کننده نیاز است. در این حالت لازم نیست حالت های حدی تسلیم و لهیدگی کنترل شود. ضمن اینکه اگر از حرکت جانبی بال فشاری در تکیه گاه نیز جلوگیری شده باشد، لزوم تعبیه مهار جانبی در بال کششی برای جلوگیری از کمانش جانبی جان نیز باید مورد توجه قرار گیرد. اگر از هر دو بال در برابر حرکت جانبی جلوگیری شده باشد، نیازی به کنترل کمانش جانبی جان نیست. بعنوان حدس اولیه ابعاد سخت کننده اتکایی را شبیه سخت کننده میانی در نظر می گیریم:

$$b_s = 9.5 \text{ cm}$$

$$t_s = 0.8 \text{ cm}$$

در ادامه حداقل های آیین نامه ای کنترل می شود:

$$b_s = 9.5 \text{ cm} \geq \frac{b_1}{3} \text{ or } \frac{b_f}{3} - \frac{t_w}{2} = \frac{20}{3} - \frac{0.8}{2} = 6.26 \text{ cm}$$

$$t_s = 0.8 \text{ cm} \geq \frac{1}{2} t_f \text{ or } \frac{1}{2} t_1 = \frac{0.8}{2} = 0.4 \text{ cm}$$

$$\frac{b_s}{t_s} = \frac{9.5}{0.8} = 11.9 \leq 0.56 \sqrt{\frac{E}{F_{ys}}} = 16.56 : OK$$

الف : کنترل مقاومت اتکایی

با توجه به روابط اسلاید ۶۴ درسنامه داریم (در حل فرض کردیم پخ گوشه های ورق ۲ سانتی متر باشد):

$$R_{us} = R_u = 48.2 \text{ tonf}$$

$$\phi = 0.75$$

$$R_{ns} = 1.8 A_{pb} F_y = 1.8 \times 12 \times 2400 = 51840 \text{ kgf} = 51.8 \text{ tonf}$$

$$a_s = 9.5 - 2 = 7.5 \text{ cm}$$

$$A_{pb} = 2 a_s t_s = 2 \times 7.5 \times 0.8 = 12 \text{ cm}$$

$$\frac{D}{C} = \frac{R_{us}}{\phi R_{ns}} = \frac{48.2}{0.75 \times 51.8} = 1.24 \leq 1.0$$

چون رابطه فوق جواب نداد ضخامت سخت کننده تکیه گاهی را به ۱ سانتی متر افزایش می دهیم

ب : کنترل مقاومت ستونی

با توجه به روابط اسلاید ۶۶ درسنامه داریم (در حل فرض کردیم پخ گوشه های ورق ۲ سانتی متر باشد):

$$B = 12 t_w = 12 \times 0.8 = 9.6 \text{ cm},$$

$$A^+ = 2 b_s t_s + B t_w = 2 \times 9.5 \times 1 + 9.6 \times 0.8 = 26.68 \text{ cm}^2$$

$$I_x = \frac{1}{12} t_s (2 b_s + t_w)^3 + \frac{1}{12} (B - t_s) t_w^3 = \frac{1}{12} 1.0 \times (2 \times 9.5 + 0.8)^3 + \frac{1}{12} (9.6 - 1) 0.8^3 = 647 \text{ cm}^4$$

$$r^+ = \sqrt{\frac{I_x}{A^+}} = \sqrt{\frac{647}{26.7}} = 4.9 \text{ cm}$$

$$K = 0.75$$

$$h_s = 140 \text{ cm}$$

$$\lambda = \frac{K h_s}{r^+} = \frac{0.75 \times 140 \text{ cm}}{4.9 \text{ cm}} = 21.4 \leq 25 \rightarrow F_{cr} = 2400 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$R_{umax} = 48.2 \text{ tonf} \leq \phi_c F_{cr} A^+ = 0.9 \times 26.7 \times 2400 \times 10^{-3} = 57.7 \text{ tonf} \therefore OK$$

در روابط فوق، h_s ارتفاع سخت کننده است که بار سخت کننده های فشاری برابر ارتفاع جان تیر ورق فرض می شود. برای اتصال سخت کننده به جان می توان جوش ها را برای نیروی متمرکز طراحی کرد:

$$D_{min} = 5 \text{ mm}$$

$$D_{max} = t_s - 2 \text{ mm} = 10 - 2 = 8 \text{ mm}$$

انتخاب می کنیم:

$$D = 6 \text{ mm}$$

$$\text{select } l_w \geq \max(4D, 40\text{mm}) = \max(4 \times 6, 40 \text{ mm}) = 40 \text{ mm}$$

$$\phi R_n = \min \left\{ \begin{array}{l} \phi \times 0.6 F_{ue} \times 0.707 D \times 2n = 0.75 \times 0.6 \times 4200 \times 0.707 \times 0.6 \times 2 \times 2 = 3206 \text{ kgf/cm} \\ \phi \times 0.6 F_y \times t_s \times n = 0.9 \times 0.6 \times 2400 \times 1.0 \times 2 = 2592 \text{ kgf/cm} \end{array} \right.$$

$$= 2592 \text{ kgf/cm}$$

$$f_u = \frac{P_u}{h - 2(Clip)} = \frac{48200}{140 - 2 \times 2} = 354 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}} \rightarrow S = \frac{\phi R_n \times l_w}{f_u} = 2592 \times \frac{4}{354} = 30 \text{ cm}$$

$$\text{check: } S - l_w \leq \min(16t_s, 250\text{mm}) = \min(16 \times 10, 250) = 160 \text{ mm} \rightarrow S \leq 160 + 40 = 200 \text{ mm}$$

بنابراین از نوارهای جوش به طول ۵ سانتی متر، با ساق جوش ۶ میلیمتر و فاصله بین نوارهای جوش منقطع برابر ۲۰ سانتی متر استفاده می شود.

پایان