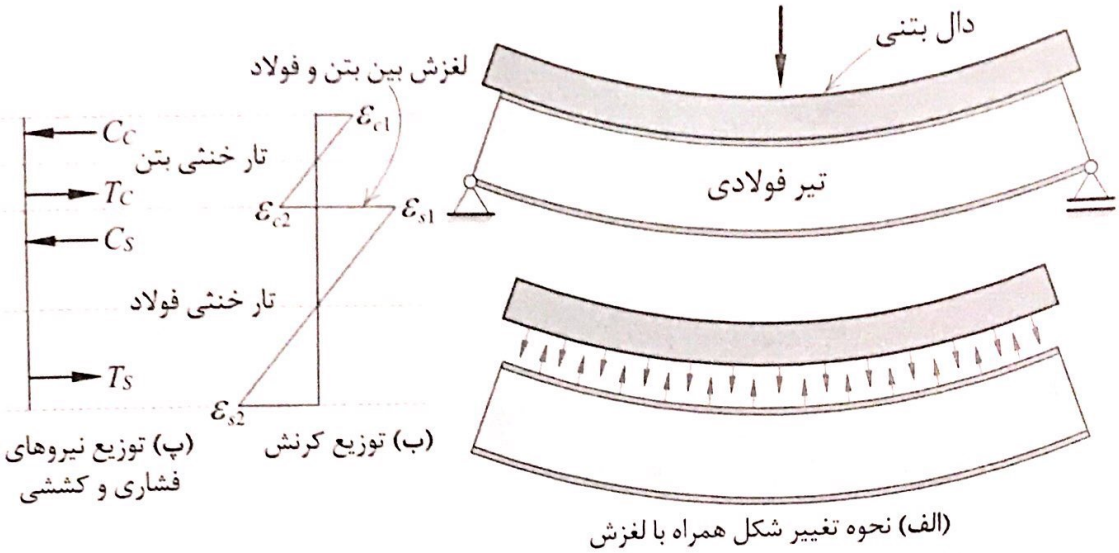
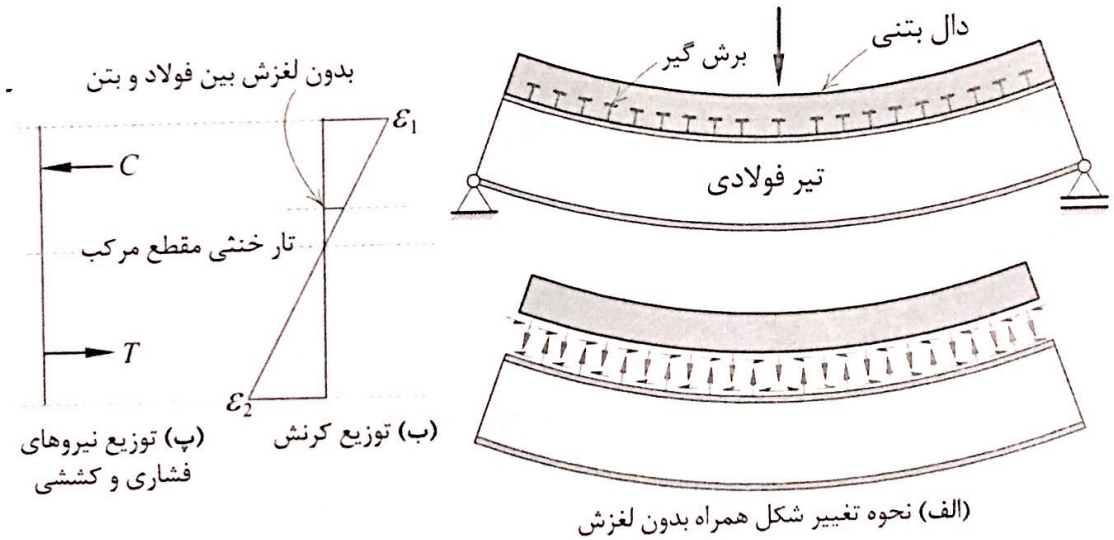


شکل ۷-۱- نحوه تغییر شکل و عملکرد مقطع مختلط تحت خمش به صورت عملکرد غیرمرکب



شکل ۷-۲- نحوه تغییر شکل و عملکرد مقطع مختلط تحت خمش به صورت عملکرد مرکب

شکل ۷-۱ نحوه رفتار یک مقطع مختلط بتن و فولاد را تحت اثر خمش نشان می‌دهد. در شکل ۷-۱- الف به دلیل امکان لغزش بین بتن و فولاد، هر دو جنس مستقل از یک‌دیگر عمل کرده و سهم باربری جداگانه‌ای دارند. در واقع می‌توان گفت که مطابق شکل ۷-۱- ب کرنش سطح تماس بین بتن و فولاد یکسان نبوده ($\varepsilon_{c2} \neq \varepsilon_{s1}$) و به همین دلیل مقطع به صورت

Scanned with CamScanner

۷- ٤- اعضای با مقطع مختلط تحت لنگر خمشی

بر اساس توضیحات ارائه شده در بخش ۷-۱، شاید بتوان مهم‌ترین مزیت مقاطع مختلط را اقتصادی‌تر شدن اعضای خمشی عنوان کرد. در واقع استفاده هم‌زمان از ظرفیت فشاری بتن و کششی فولاد می‌تواند معایب هر یک از دو مصالح را پوشش دهد؛ زیرا از یک سو مصالح بتنی مقاومت کششی چندانی ندارد و از سوی دیگر ورق‌های نازک فولادی تحت فشار ممکن است دچار کمانش شوند. از این‌رو بهینه‌ترین مقاطع مختلط تحت خمش مقاطعی هستند که در آن‌ها بتن تحت فشار و فولاد تحت کشش باشد.

اعضای خمشی مختلط عمدتاً جهت پوشش سقف‌های دارای دهانه زیاد یا بار زنده بزرگ به کار گرفته می‌شوند؛ هر چند در مواردی همانند اعضای محوری، یک مقطع مختلط به صورت مجزا از سیستم سقف، بارهای وارده را تحمل می‌کند. شکل ۷-۳ نمونه‌هایی از مقاطع مختلط تحت خمش را نشان می‌دهد.

۷-٤-۱- نحوه اجرای اعضای مختلط خمشی

به طور کلی در اعضای مختلط تحت خمش باید نحوه اجرای عضو از نظر شمع‌بندی مورد توجه قرار گیرد. اجرای اعضای مختلط در سازه‌ها بر اساس دو روش مختلف انجام می‌گیرد که بسته به نوع اجرا باید تمهیداتی را در طراحی اعضا در نظر گرفت:

الف) اجرای سقف با شمع‌بندی[1]:

در این روش اجرا پس از نصب قطعات فولادی از پایه‌های موقتی در زیر آن‌ها استفاده می‌شود که بتواند وزن قالب‌بندی و بتن تر را تا قبل از سفت شدن بتن تحمل کند. پس از رسیدن مقاومت بتن به حداقل ۷۵ درصد مقاومت فشاری بتن، پایه‌ها جمع‌آوردی شده و مقطع مختلط برای تحمل کلیه بارهای وارده تکمیل می‌شود.

1- Shoring

Scanned with CamScanner

ب) اجرای سقف بدون شمع‌بندی:

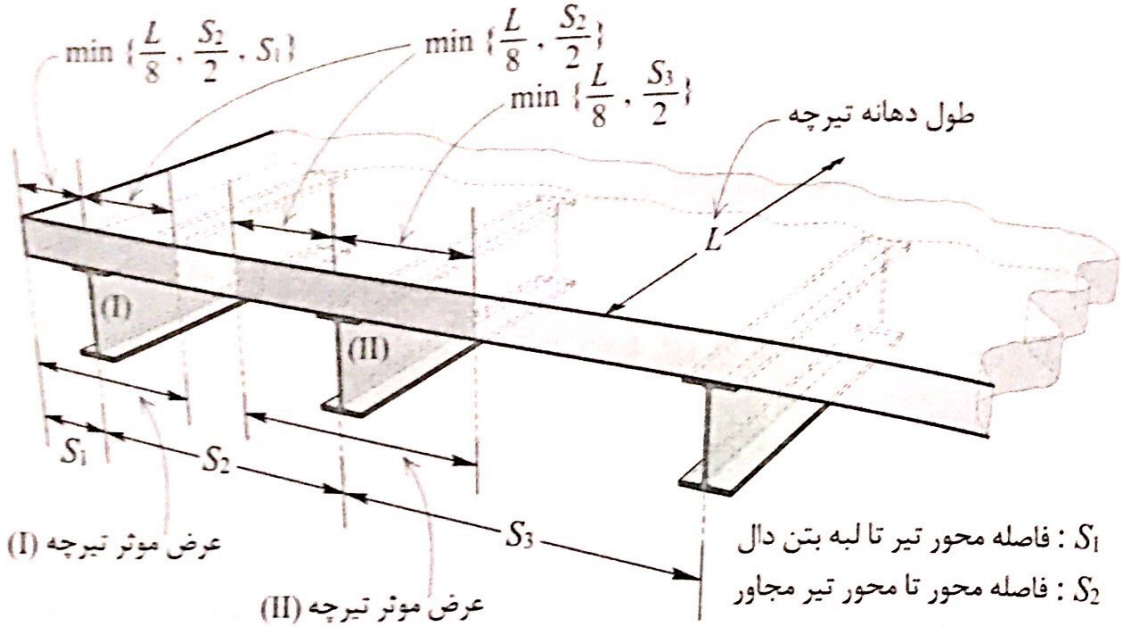
در این روش حین اجرای اعضای مختلط از پایه‌های موقت استفاده نمی‌شود؛ به همین دلیل قبل از سفت شدن بتن، مقطع فولادی تنها باید بتواند بارهای ناشی از وزن خود، وزن بتن تر و بارهای حین اجرا نظیر بار ناشی از قالب‌بندی را تحمل کند. مبنای محاسبه مقاومت خمشی عضو فولادی تنها، بر اساس روابط ارائه شده در فصل چهارم کتاب حاضر است.

۷-٤-۲- انواع اعضای خمشی مختلط و طراحی دال بتنی

همان‌گونه که گفته شد، عمدتاً اعضای خمشی مختلط جهت پوشش سقف‌ها کاربرد دارند (شکل ۷-۱۲). در چنین سقف‌هایی یک دال بتنی بر تیرچه‌های فولادی (شکل ۷-۳- ت) یا تیرچه‌های مختلط (شکل ۷-۳- ب) متکی می‌باشد. نحوه طراحی دال بتنی و محاسبه میلگردهای لازم در آن، بر اساس اصول طراحی سازه‌های بتن آرمه به کمک مبحث نهم از مقررات ملی ساختمان ایران یا آیین‌نامه ACI آمریکا انجام می‌گیرد. در چنین اعضایی دال یک‌طرفه همانند یک عضو خمشی طراحی می‌گردد و ضخامت دال به همراه اندازه و فواصل میلگردهای راستای عمود بر طول تیرچه، تعیین می‌گردد. هم‌چنین میلگردهای موازی تیرچه‌ها در دال بر اساس حداقل میلگردهای لازم در دال یک‌طرفه (تحت عنوان میلگرد افت و حرارت) تعیین می‌شود. از منظر مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران، ضخامت دال بتنی نباید کم‌تر از ۸۰ میلی‌متر نباید باشد.

از طرف دیگر برای طراحی تیرچه‌ها لازم است تا مقاومت قسمتی از دال بتنی در محاسبه مقطع مختلط دخیل گردد. به عبارتی لنگر خمشی که باید توسط تیرچه‌ها تحمل گردد، توسط مجموعه‌ای شامل تیرچه و بخشی از دال بتنی تحمل شده و سختی دال نیز در باربری تیرچه مؤثر خواهد بود. از این‌رو مبحث دهم از مقررات ملی ساختمان ایران و آیین‌نامه AISC آمریکا عرض مؤثر دال بتنی که در هر طرف تیر با آن به صورت مختلط عمل می‌کند را برابر با حداقل مقدار به دست آمده از مقادیری می‌دانند که عبارتند از:

Scanned with CamScanner



شکل ۷-۱۳- عرض مؤثر دال بتنی در اعضای خمشی مختلط

پس از تعیین عرض مؤثر دال بتنی در مقطع مختلط، می‌توان عضو مورد نظر را بر اساس بارهای وارده طراحی نمود. تعیین مقاومت خمشی اعضای مختلط خمشی بسته به شکل آن‌ها می‌تواند متفاوت باشد. بر این اساس می‌توان اعضای خمشی مختلط را به چهار گروه تقسیم‌بندی نمود:

۱- اعضای با مقطع فولادی متکی بر دال بتنی،

۲- اعضای با مقطع فولادی و دال بتنی به همراه ورق‌های فولادی شکل داده شده،

۳- اعضای با مقطع محاط در بتن،

۴- اعضای با مقطع پر شده با بتن.

جهت طراحی خمشی هر یک از مقاطع مذکور بر اساس طراحی به روش ضرایب بار و مقاومت لازم است تا رابطه (۷-۲۲) ارضا شود.

$$M_u \le \varphi_b M_n \;\; ; \;\; \varphi_b = ۰/۹ \qquad (۲۲-۷)$$

که در آن M_u مقاومت خمشی مورد نیاز یا حداکثر لنگر خمشی ایجاد شده در عضو حاصل از ترکیبات ضریب‌دار است.

Scanned with CamScanner

هم‌چنین φ_b ضریب کاهش مقاومت خمشی و برابر با ۰/۹ می‌باشد و M_n ظرفیت خمشی اسمی مقطع خمشی مختلط است که بسته به نوع مقطع تعیین می‌گردد. در ادامه فصل حاضر نحوه محاسبه M_n در حالات مختلف بررسی می‌شود.

۷-٤-۳- ظرفیت خمشی اسمی مقاطع مختلط شامل تیرچه فولادی و دال بتنی متکی بر آن

برای محاسبه ظرفیت خمشی مقاطع مختلط متکی بر دال بتنی که نمونه‌ای از آن در شکل ۷-۳- ت نشان داده شده است، ابتدا نحوه تغییرات لنگر خمشی در طول عضو بررسی می‌گردد. از آن جایی که دال بتنی در قسمت فوقانی مقطع قرار دارد، عملکرد بهینه مقطع در حالتی قابل بررسی است که علامت لنگر خمشی وارده به عضو مثبت باشد. در غیر این صورت، مصالح بتنی در مقطع تحت کشش قرار گرفته و از محاسبات حذف می‌شود. به همین سبب در اغلب موارد سعی می‌شود تا تیرچه‌های فولادی به صورت دو سر مفصل اجرا شود تا تحت بارهای ثقلی در آن‌ها لنگر منفی ایجاد نگردد. با این حال در حالت کلی ممکن است به تیرچه‌ها لنگر منفی نیز وارد شود که در این شرایط ظرفیت مقطع بر اساس ظرفیت نیم‌رخ فولادی و یا در حالات خاصی بر اساس ظرفیت نیم‌رخ فولادی به اضافه میلگردها تعیین می‌گردد.

بدین ترتیب ظرفیت خمشی اسمی مقاطع مختلط شامل تیرچه فولادی و دال بتنی متکی بر آن در حالت لنگر خمشی مثبت و منفی به صورت جداگانه محاسبه می‌شود:

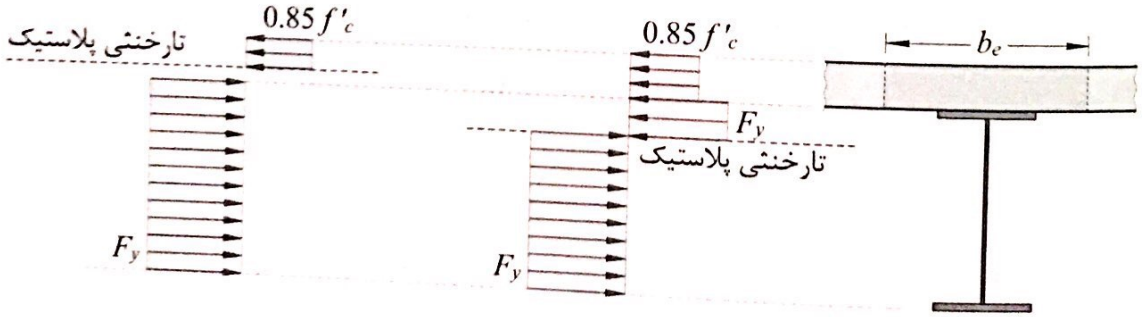
الف) مقاومت خمشی تحت لنگر مثبت:

تحت لنگر مثبت ظرفیت خمشی مقطع بر اساس منظور نمودن حالات حدی تسلیم و کمانش موضعی جان تعیین می‌شود. در واقع به دلیل اتکای بال فشاری مقطع به دال بتنی می‌توان گفت که دال بتنی نقش تکیه‌گاه ممتد جانبی را در خمش مثبت عضو ایفا می‌کند و حالت حدی کمانش پیچشی- جانبی حاکم نخواهد بود. از سوی دیگر دال بتنی اجازه کمانش موضعی را به بال فوقانی (بال فشاری در لنگر مثبت) نمی‌دهد و از این‌رو حالت حدی کمانش موضعی بال فشاری نیز مدنظر قرار نمی‌گیرد.

Scanned with CamScanner

برای در نظر گرفتن اثر کمانش موضعی جان، مبحث دهم از مقررات ملی ساختمان ایران و آیین‌نامه AISC آمریکا محدوده‌ای را برای نسبت عرض به ضخامت ورق جان تعیین کرده‌اند که حالت حدی تسلیم در صورت لاغر بودن جان به کمک توزیع تنش الاستیک و در غیر این صورت به کمک توزیع تنش پلاستیک بیان می‌شود. بر این اساس ظرفیت خمشی اسمی مقاطع مختلط متکی بر دال بتنی را می‌توان بدین صورت تعیین کرد:

۱- اگر $\frac{h}{t_w} \le ۳/۷۶\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ باشد، M_n بر اساس توزیع تنش پلاستیک در مقطع مختلط تعیین می‌گردد. بدین منظور پس از تعیین عرض مؤثر مقطع به کمک شکل ۷-۱۳، محل تار خنثی پلاستیک در مقطع تعیین می‌شود. محل تار خنثی پلاستیک به کمک برقراری تعادل نیرویی در مقطع و با فرض توزیع تنش یکنواخت $۰/۸۵f'_c$ در بتن و تنش یکنواخت F_y در فولاد (هم فشاری و هم‌کششی) حاصل می‌شود. بسته به ابعاد مقطع، محل تار خنثی می‌تواند در مصالح فولادی یا در مصالح بتنی قرار گیرد (شکل ۷-۱۴). قابل ذکر است که چنان‌چه محل تار خنثی در مصالح بتنی قرار گیرد، باید از بتن قرار گرفته در پایین آن صرف‌نظر کرده و محل تار خنثی مجدداً محاسبه شود.



شکل ۷-۱۴- توزیع تنش پلاستیک در مقطع مختلط

Scanned with CamScanner

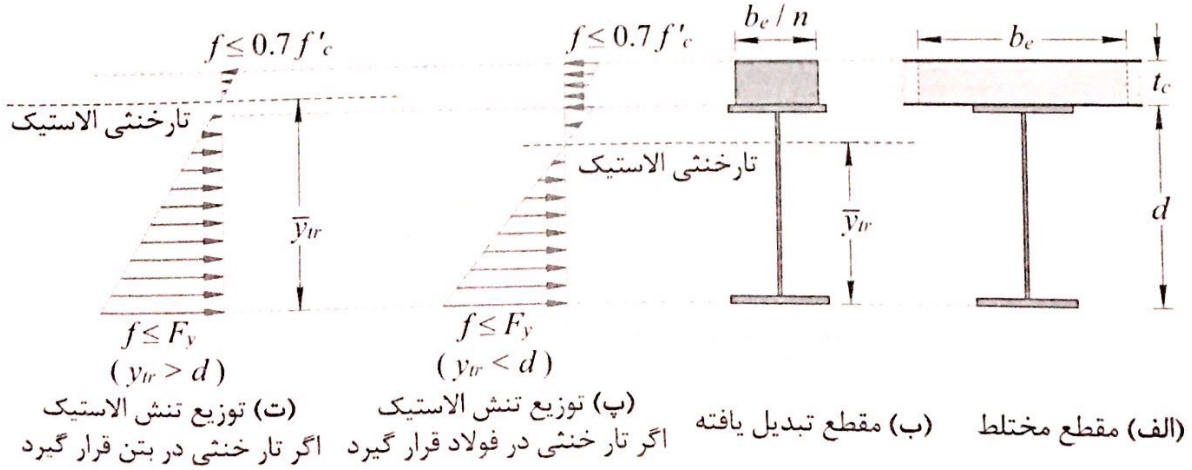
در صورتی که مساحت قسمت بتنی در عرض مؤثر، A_c و مساحت نیم‌رخ فولادی A_s نامیده شود، می‌توان گفت که اگر $A_sF_y > ۰/۸۵\, f'_cA_c$ باشد تار خنثی در فولاد قرار می‌گیرد (شکل ۷-۱۴-ب) و اگر $A_sF_y < ۰/۸۵\, f'_cA_c$ باشد تار خنثی در بتن قرار می‌گیرد (شکل ۷-۱۴-پ).

پس از تعیین محل تار خنثی پلاستیک، M_n به کمک لنگرگیری از نیروهای حاصل از توزیع تنش پلاستیک نسبت به تار خنثی پلاستیک به دست می‌آید.

۲- اگر $\frac{h}{t_w} > ۳/۷۶\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ باشد، M_n به کمک فرض توزیع تنش الاستیک خطی در مقطع تبدیل یافته تعیین می‌شود. چنان‌چه بر اساس رابطه (۷-۱۳)، n نسبت مدول الاستیسیته فولاد به بتن باشد، در مقطع مختلط عرض ناحیه بتنی در $\frac{۱}{n}$ ضرب می‌شود و محل مرکز سطح مقطع تبدیل یافته (تار خنثی الاستیک مقطع) تعیین می‌گردد. پس از محاسبه ممان اینرسی مقطع تبدیل یافته نسبت به تار خنثی الاستیک می‌توان ظرفیت خمشی اسمی مقطع را به کمک رابطه (۷-۲۳) تعیین نمود.

$$M_n = (M_{n۱}\ ,\ M_{n۲}) \qquad (۲۳-۷)$$

که در آن $M_{n۱}$ ظرفیت خمشی اسمی مقطع مختلط نظیر حالتی است که تنش کششی در دورترین تار فولادی F_y باشد و $M_{n۲}$ ظرفیت خمشی اسمی مقطع مختلط نظیر حالتی است که تنش فشاری در دورترین تار بتنی برابر با $۰/۷\, f'_c$ شود (شکل ۷-۱۵).



شکل ۷-۱۵- توزیع تنش الاستیک در مقطع مختلط

Scanned with CamScanner

قابل ذکر است که چنان‌چه محل تار خنثی در بتن قرار گیرد، مجدداً باید محاسبه مرکز سطح مقطع تبدیل یافته با حذف بتن تحت کشش انجام گیرد. از آن‌جایی که بر اساس توزیع الاستیک تنش، روابط خمش بر اساس علم مکانیک جامدات حاکم خواهد بود، می‌توان نوشت:

$$f_{s,max} = \frac{M_{n1}\bar{y}_{tr}}{I_{tr}} = F_y \Rightarrow M_{n1} = \frac{F_y I_{tr}}{\bar{y}_{tr}} \qquad (۲۴-۷)$$

حداکثر تنش کششی فولاد :

$$f_{c,max} = \frac{M_{n2}(d + t_c - \bar{y}_{tr})}{I_{tr}} \times \frac{1}{n} = 0.7 f'_c \qquad (۲۵-۷)$$

حداکثر تنش فشاری بتن:

$$\Rightarrow M_{n2} = \frac{0.7 f'_c I_{tr}}{d + t_c - \bar{y}_{tr}} n$$

که در آن‌ها $\bar{y}_{tr}$ فاصله مرکز سطح مقطع تبدیل یافته تا دورترین تار کششی فولاد، I_{tr} ممان اینرسی مقطع تبدیل یافته حول تار خنثی الاستیک، d ارتفاع نیم‌رخ فولادی و t_c ضخامت بتن می‌باشد.

ب) مقاومت خمشی تحت لنگر منفی:

چنان‌چه مقطع مختلط شامل تیرچه فلزی و دال بتنی متکی بر آن، تحت لنگر منفی قرار گیرد، به دلیل آن که نواحی فوقانی مقطع تحت کشش قرار می‌گیرد باید دال بتنی از محاسبات حذف گردد. در واقع می‌توان گفت این دسته از مقاطع مختلط در لنگر خمشی منفی به صورت مختلط عمل نمی‌کنند. در چنین شرایطی ظرفیت خمشی مقطع به کمک روابط فصل چهارم محاسبه می‌گردد. با این وجود مبحث دهم از مقررات ملی ساختمان ایران و آیین‌نامه AISC آمریکا اجازه می‌دهند در صورت برقراری شرایطی، ظرفیت خمشی منفی مقطع به کمک توزیع تنش پلاستیک بر روی مقطع مختلط و در نظر گرفتن اثر میلگردهای طولی تعیین شود که عبارتند از:

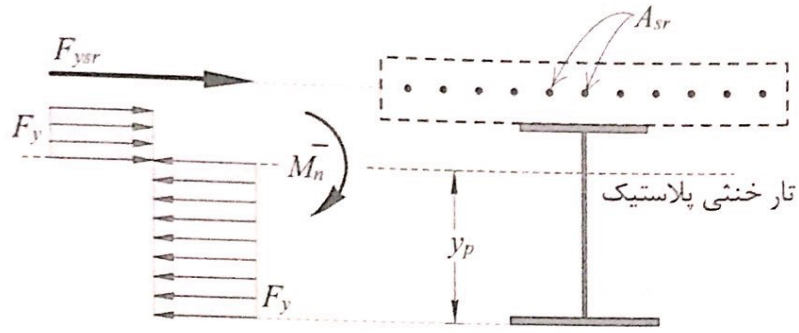
۱- مقطع فولادی فشرده و دارای اتکای جانبی کافی باشد.

۲- در ناحیه لنگر منفی، دال بتنی به کمک برش‌گیر کافی به تیر فولادی وصل شده باشد.

۳- در محدود عرض مؤثر دال بتنی، میلگردهای موازی با محور تیر به طور کامل الزامات طول مهاری را بر اساس آیین‌نامه طراحی بتنی آمریکا ACI یا مبحث نهم از مقررات ملی ساختمان ایران، ارضا کند.

Scanned with CamScanner

بدین ترتیب با توجه به شکل ۷-۱۶، ظرفیت خمشی منفی پس از تعیین تار خنثی پلاستیک مقطع تحت لنگر خمشی منفی محاسبه می‌گردد. برای تعیین محل تار خنثی پلاستیک، تعادل نیرویی مقطع بررسی شده و به کمک لنگرگیری حول تار خنثی پلاستیک ظرفیت خمشی اسمی مقطع حاصل می‌گردد.



(الف) مقطع مختلط (ب) توزیع تنش پلاستیک تحت لنگر منفی

شکل ۷-۱۶- توزیع تنش پلاستیک روی مقطع مختلط تحت لنگر خمشی منفی

در ادامه جهت وضوح بیش‌تر مطلب، مثال‌هایی از تعیین ظرفیت خمشی مقاطع مختلط شامل تیرچه فولادی و دال بتنی متکی بر آن ارائه می‌شود.

مثال ۷-۶:

برای پوشش سالنی به ابعاد ۲۰×۱۰m از یک دال بتنی به ضخامت ۱۰cm و تیرچه‌های فولادی IPE ۲۷۰ به فاصله ۲ متر از یک‌دیگر استفاده شده است. تیرچه‌ها به صورت دوسر مفصل به دهانه ۱۰ متر اجرا شده‌اند (شکل ۷-۱۷). در صورتی که بار مرده سقف به دلیل کف‌سازی روی دال بتنی $200\ kg/m^2$ باشد، حداکثر بار زنده‌ای را که سقف می‌تواند تحمل کند تعیین کنید. برای اجرای سقف از پایه‌های موقت قبل از سفت شدن بتن استفاده شده است.

$F_y = 3600\ kg/cm^2$, $E_s = 2/04\times10^6\ kg/cm^2$, $f'_c = 210\ kg/cm^2$

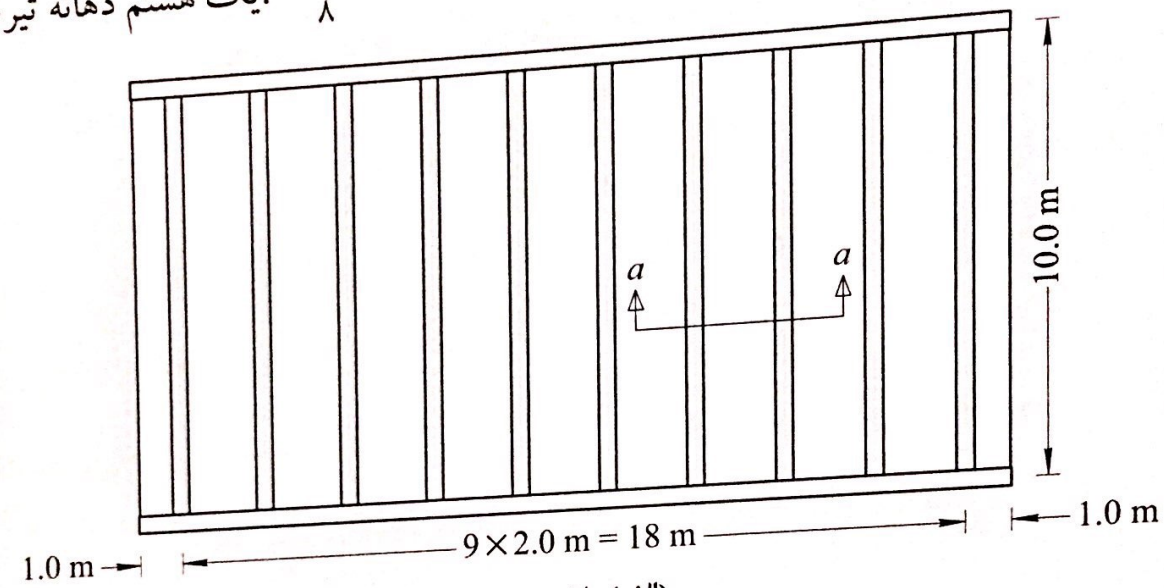
$w_c = 2400\ kg/m^3$, $w_s = 7850\ kg/m^3$

Scanned with CamScanner

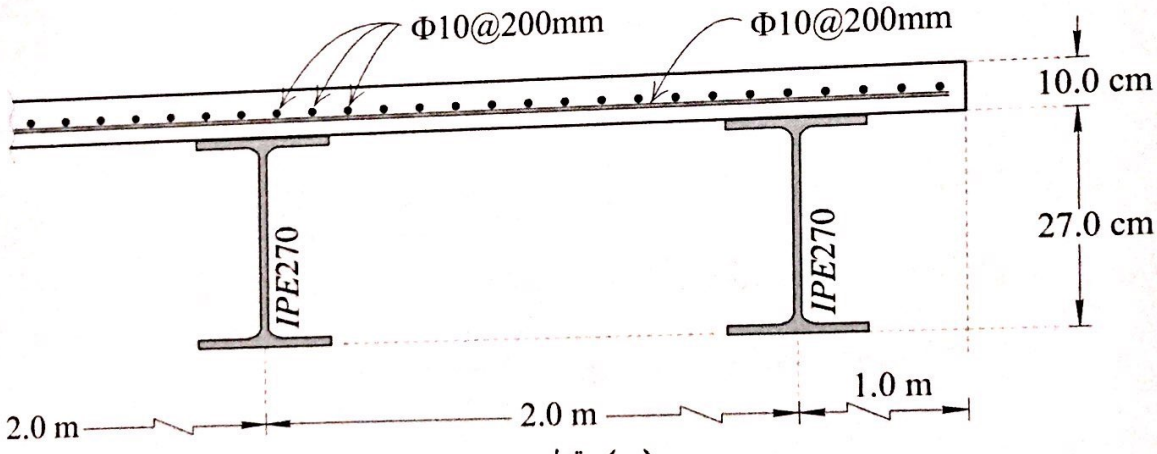
حل:

ابتدا عرض مؤثر دال بتنی در هر مقطع تعیین می‌شود. بر اساس شکل ۷-۱۳ و ۷-۱۷ می‌توان نوشت:

یک هشتم دهانه تیرچه: $\frac{۱۰۰۰}{۸} = ۱۲۵\,\text{cm}$



(الف) پلان سقف



(ب) مقطع a - a

شکل ۷-۱۷- پلان و مقطع مثال ۷-۶

نصف فواصل تیرچه‌ها: $\frac{S_۲}{۲} = \frac{S_۳}{۲} = \frac{۲۰۰}{۲} = ۱۰۰\,\text{cm}$

$S_۱ = ۱۰۰\,\text{cm}$

بنابراین عرض مؤثر تیرهای کناری و میانی یکسان و برابر $\frac{b_e}{۲} = ۱۰۰\,\text{cm}$ در هر طرف تیرچه می‌باشد.

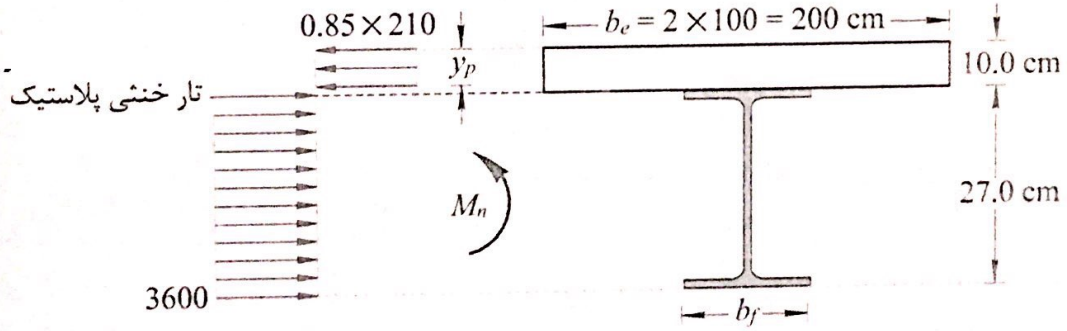
Scanned with CamScanner

مشخصات نیم‌رخ IPE ۲۷۰ بر اساس جدول پروفیل‌های ساختمان فولادی عبارت است از:

$$IPE\,۲۷۰: A = ۴۵/۹\,cm^۲\ ,\ W_s = ۳۶/۱\,kg/m\ ,\ d - ۲k = ۲۱/۹\,cm$$
$$d = ۲۷\,cm\ ,\ t_w = ۰/۶۶$$

با توجه به آن که تیرچه‌ها دو سر مفصل هستند، تحت بار ثقلی (مرده به اضافه زنده) در طول تیرچه فقط لنگر مثبت ایجاد می‌شود. از سوی دیگر با توجه به آن که $h/t_w = \frac{۲۱/۹}{۰/۶۶} = ۳۳/۱۸$ کوچک‌تر از $۳/۷۶\sqrt{E/F_y} = ۸۹/۵$ می‌باشد، ظرفیت خمشی اسمی مقطع بر اساس توزیع لنگر پلاستیک در مقطع به دست می‌آید. بدین منظور ابتدا باید محل تار خنثی پلاستیک تعیین شود. با توجه به شکل ۷-۱۸ می‌توان نوشت:

$$F_yA_s = ۳۶۰۰ \times ۴۵/۹ = ۱۶۵۲۴۰\,kg \le ۰/۸۵ f'_c A_c = ۰/۸۵ \times ۲۱۰ \times ۲۰۰ \times ۱۰ = ۳۵۷۰۰۰\,kg$$



(ب) توزیع تنش پلاستیک (الف) مقطع مختلط در عرض موثر

شکل ۷-۱۸- مقطع مختلط و توزیع تنش پلاستیک در مثال ۷-۶

بنابراین تار خنثی پلاستیک در ناحیه بتنی قرار می‌گیرد. اگر فاصله تار خنثی پلاستیک تا دورترین تار فشاری در بتن y_p نامیده شود، می‌توان نوشت:

$$\Sigma F = ۰ \Rightarrow ۰/۸۵ \times ۲۱۰ \times y_p \times ۲۰۰ = ۳۶۰۰ \times ۴۵/۹ \Rightarrow y_p = ۴/۶۲۹\,cm$$

هم‌چنین ظرفیت خمشی اسمی مقطع با لنگرگیری حول تار خنثی پلاستیک حاصل می‌شود:

$$M_n = ۰/۸۵ \times ۲۱۰ \times ۲۰۰ \times ۴/۶۲۹ \times \frac{۴/۶۲۹}{۲} + ۳۶۰۰ \times ۴۵/۹ \times \left(۱۰ + \frac{۲۷}{۲} - ۴/۶۲۹\right)$$
$$= ۳۵/۰۱ \times ۱۰^۵\,kg.cm$$

Scanned with CamScanner

بدین ترتیب ظرفیت خمشی نهایی مقطع مختلط تحت لنگر مثبت به دست می‌آید:

$$M_u \le \varphi_b M_n = ۰/۹ \times ۳۵/۰۱ = ۳۱/۵۱ t.m$$

بار مرده سقف بر اساس عرض باربر هر تیرچه که برابر با دو متر است تعیین می‌شود:

بار مرده وزن دال بتنی: $۲۴۰۰ \times ۰/۱ \times ۲ = ۴۸۰ kg/m$

بار مرده کف‌سازی: $۲۰۰ \times ۲ = ۴۰۰ kg/m$

بار مرده وزن میلگردها: $۷۸۵۰ \times ۱۰ \times \frac{\pi}{۴} \times ۰/۰۱^۲ + ۷۸۵۰ \times ۵ \times \frac{\pi}{۴} \times ۰/۰۱^۲ \times ۲ = ۱۲/۳ kg/m$

بار مرده وزن نیم‌رخ IPE: $۳۶/۱ kg/m$

$$\Rightarrow q_D = ۴۸۰ + ۴۰۰ + ۱۲/۳ + ۳۶/۱ = ۹۲۸/۴ kg/m$$

با توجه به دو سر مفصل بودن تیرچه، حداکثر لنگر ایجاد شده در تیر برابر با $\frac{q_u L^۲}{۸}$ می‌باشد.

$$M_u = \frac{q_u \times ۱۰^۲}{۸} \le ۳۱/۵۱ \Rightarrow q_u \le ۲/۵۲۱ t/m$$

$$q_u = ۱/۲ q_D + ۱/۶ q_L \Rightarrow ۲/۵۲۱ \ge ۱/۲ \times ۰/۹۲۸۴ + ۱/۶ \times q_L \Rightarrow q_L \le ۰/۸۷۹۳ t/m$$

بنابراین حداکثر بار زنده‌ای که سقف می‌تواند تحمل کند برابر با $۸۸۰ kg/m$ یا $۴۴۰ kg/m^۲$ به دست می‌آید.

مثال ۷-۷:

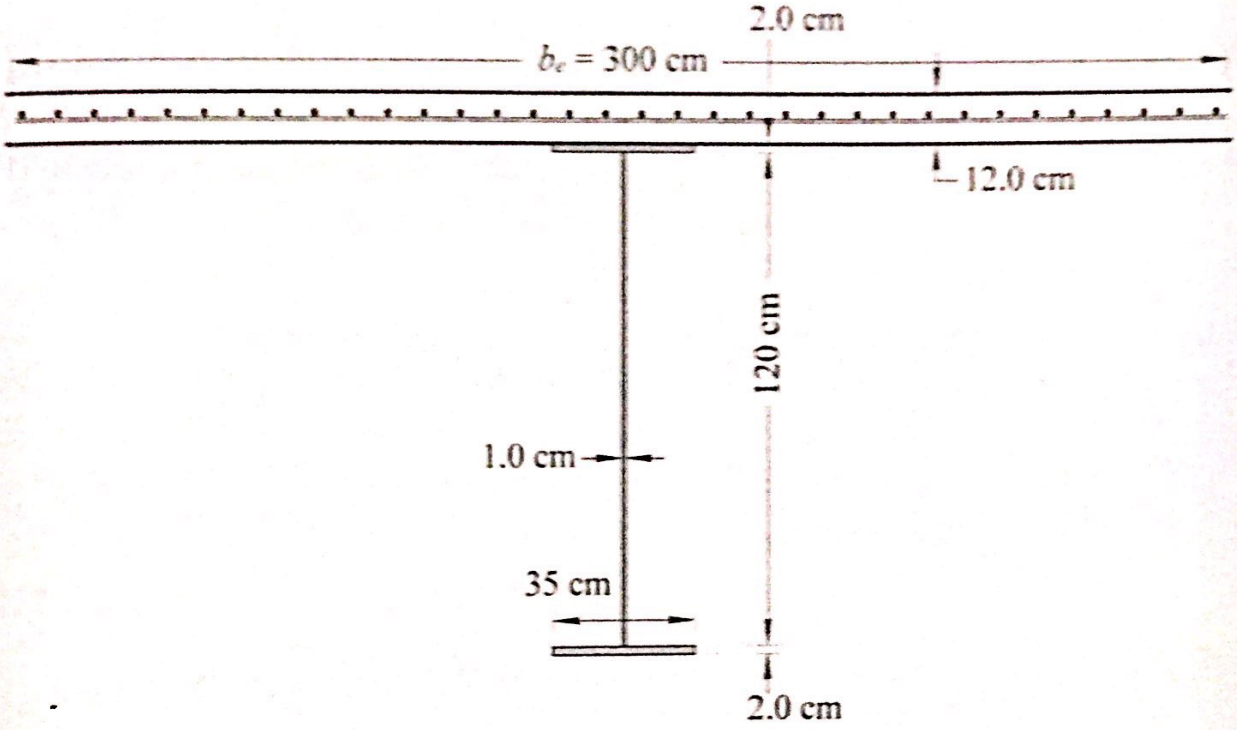
در پلان شکل ۷-۱۷ چنان‌چه جهت تیرریزی تغییر کند و تیرچه‌ها به دهانه ۱۸ متر و به فواصل ۱/۸۵ متر از هم اجرا گردند، بدون تغییر سایر مشخصات در مثال ۷-۶، تیرچه فلزی را از تیر ورقی مطابق شکل ۷-۱۹ طراحی کنید. بارهای وارده مشابه مثال ۷-۶ می‌باشد و برای اجرای سقف از شمع‌بندی استفاده نشده است. بار ناشی از وزن قالب‌بندی را $۵۰ kg/m^۲$ فرض کنید.

Scanned with CamScanner

مثال ۷-۸:

ظرفیت خمشی نهایی مقطع شکل ۷-۲۱-الف را تحت لنگر خمشی مثبت و منفی تعیین کنید.

$F_y = ۲۴۰۰ kg/cm^۲$, $E_s = ۲/۰۴ \times ۱۰^۶ kg/cm^۲$, $f'_c = ۲۵۰ kg/cm^۲$, $w_c = ۲۴۰۰ kg/m^۳$



شکل ۷-۲۱- مقطع مثال ۷-۸

حل:

الف) تحت لنگر خمشی مثبت:

برای مقطع شکل ۷-۲۱ می‌توان نوشت:

$$\frac{h}{t_w} = \frac{۱۲۰}{۱} = ۱۲۰ > ۳/۷۶\sqrt{\frac{۲/۰۴ \times ۱۰^۶}{۲۴۰۰}} = ۱۰۹/۶$$

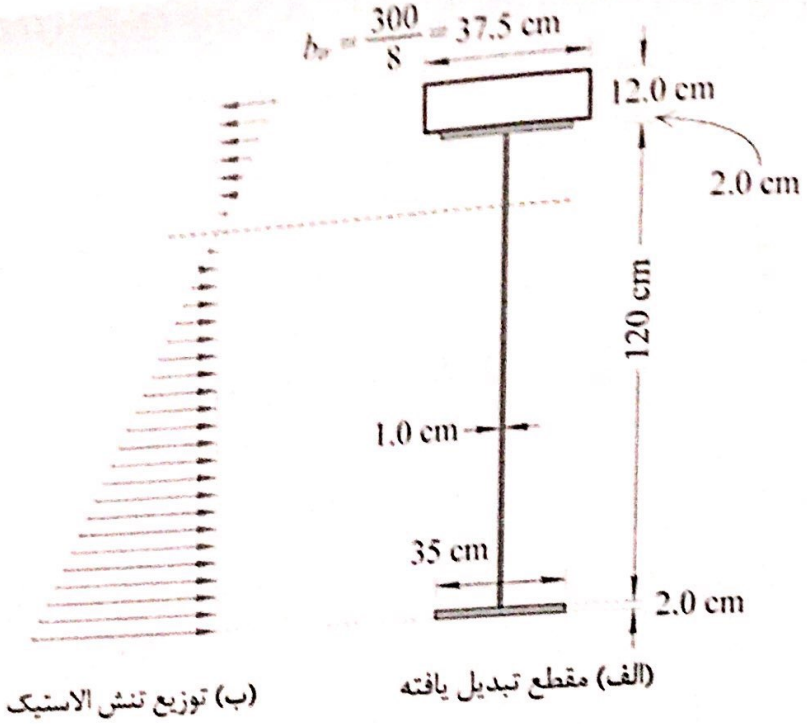
بنابراین ظرفیت خمشی اسمی مقطع بر اساس توزیع تنش الاستیک و رابطه (۷-۲۳) محاسبه می‌گردد. بدین منظور باید مقطع تبدیل یافته تشکیل گردد.

رابطه (۷-۱۱-ب): $E_c = ۰/۱۳۷ \times ۲۴۰۰^{۱/۵} \times \sqrt{۲۵۰} = ۲۵۴۶۸۷ kg/cm^۲$

رابطه (۷-۱۳): $n = \frac{۲/۰۴ \times ۱۰^۶}{۲۵۴۶۸۷} = ۸$

مقطع تبدیل یافته در شکل ۷-۲۲-الف نشان داده شده است.

Scanned with CamScanner



شکل ۷-۲۲- مقطع تبدیل یافته و توزیع تنش الاستیک روی مقطع

تار خنثی الاستیک مقطع بر مرکز سطح مقطع تبدیل‌یافته واقع است. اگر فاصله تار خنثی الاستیک تا دورترین تار کششی در فولاد $\bar{y}_{tr}$ نامیده شود، با فرض آن که تار خنثی در فولاد قرار گیرد، می‌توان نوشت:

$$\bar{y}_{tr} = \frac{۲\times۳۵\times۱+۱۲۰\times۱\times۶۲+۲\times۳۵\times۱۲۳+۳۷/۵\times۱۲\times۱۳۰}{۳۵\times۲+۱۲۰\times۱+۳۵\times۲+۳۷/۵\times۱۲} = ۱۰۵/۱\,\text{cm}$$

بدین ترتیب تار خنثی الاستیک در فولاد قرار می‌گیرد و فرض تحت فشار بودن کل بتن صحیح است.

$$I_{tr} = ۳۷/۵\times۱۲^۳\times\frac{۱}{۱۲}+۳۷/۵\times۱۲\times(۱۳۰-۱۰۵/۱)^۲+۳۵\times۲^۳\times\frac{۱}{۱۲}+۳۵\times۲$$
$$\times(۱۲۳-۱۰۵/۱)^۲+۱\times۱۲۰^۳\times\frac{۱}{۱۲}+۱\times۱۲۰\times(۱۰۵/۱-۶۲)^۲$$
$$+۳۵\times۲^۳\times\frac{۱}{۱۲}+۳۵\times۲\times(۱۰۵/۱-۱)^۲ = ۱/۴۳۲\times۱۰^۶\,\text{cm}^۴$$

رابطه (۷-۲۴): $M_{n۱} = \frac{۲۴۰۰\times۱/۴۳۲\times۱۰^۶}{۱۰۵/۱} = ۳۲۷\times۱۰^۵\,\text{kg.cm}$

رابطه (۷-۲۵): $M_{n۲} = \frac{۰/۷\times۲۵۰\times۱/۴۳۲\times۱۰^۶}{۳۰/۹}\times۸ = ۶۴۸\times۱۰^۵\,\text{kg.cm}$

Scanned with CamScanner

رابطه (۲۳-۷): $M_n = \min(۳۲۷ \ , \ ۶۴۸) = ۳۲۷ \, t.m$

$\Rightarrow M_u \le ۰/۹ \times ۳۲۷ = ۲۹۴/۳ \, t.m$

ب) تحت لنگر خمشی منفی:

با توجه به آن که جان شرایط فشردگی را ندارد، استفاده از ظرفیت میلگردها مجاز نیست بنابراین ظرفیت خمشی منفی فقط بر اساس ظرفیت مقطع تعیین می‌گردد. مشخصات جان و بال مقطع بدین صورت است:

$$\lambda_w = \frac{۱۲۰}{۱} = ۱۲۰ \ , \ \lambda_{pw} = ۳/۷۶\sqrt{\frac{E}{F_y}} = ۱۰۹/۶ \ , \ \lambda_{rw} = ۵/۷\sqrt{\frac{E}{F_y}} = ۱۶۶/۲$$

$$\lambda_f = \frac{۳۵}{۲ \times ۲} = ۸/۷۵ \ , \ \lambda_{pf} = ۰/۳۸\sqrt{\frac{E}{F_y}} = ۱۱/۱$$

با توجه به غیرفشرده بودن جان و فشرده بودن بال و این که مقطع متقارن بوده و فرض وجود تکیه‌گاه ممتد جانبی، ظرفیت خمشی اسمی مقطع به کمک رابطه (۴-۴۳) و بر اساس حالت حدی تسلیم به دست می‌آید.

$$Z = ۲ \times (۳۵ \times ۲ \times ۶۱ + ۶۰ \times ۱ \times ۳۰) = ۱۲۱۴۰ \, cm^۳$$

$$\Rightarrow M_p = ۱۲۱۴۰ \times ۲۴۰۰ = ۲۹۱/۴ \times ۱۰^۵ \, kg.cm$$

$$S_x = \frac{۳۵ \times ۱۲۴^۳ - ۳۴ \times ۱۲۰^۳}{۱۲ \times ۶۲} = ۱۰۷۲۶ \, cm^۳$$

$$\Rightarrow M_y = ۱۰۷۲۶ \times ۲۴۰۰ = ۲۵۷/۴ \times ۱۰^۵ \, kg/cm$$

رابطه (۴-۴۰): $R_{pc} = \frac{۲۹۱/۴}{۲۵۷/۴} - \left(\frac{۲۹۱/۴}{۲۵۷/۴} - ۱\right) \times \left(\frac{۱۲۰ - ۱۰۹/۶}{۱۶۶/۲ - ۱۰۹/۶}\right) = ۱/۱۰۸$

رابطه (۴-۴۴): $M_n = ۱/۱۰۸ \times ۲۵۷/۴ = ۲۸۵/۲ \, t.m$

$\Rightarrow M_u \le ۰/۹ \times ۲۸۵/۲ = ۲۵۶/۶ \, t.m$

Scanned with CamScanner

بنابراین لنگر الاستیک مقطع بر مبنای ظرفیت فشاری بتن برابر با $M_y = ۲۵/۱۳\ t.m$ حاصل می‌شود. با توجه به آن که بال مقطع غیرفشرده می‌باشد، ظرفیت خمشی اسمی مقطع به کمک رابطه (۷-۳۰) و بر اساس مشخصات بال حاصل می‌شود:

$$M_n = ۳۵/۰۳ - (۳۵/۰۳ - ۲۵/۱۳) \times \frac{۸۰ - ۶۵/۸۹}{۸۷/۴۶ - ۶۵/۸۹} = ۲۸/۵۵\ t.m$$

$$\Rightarrow M_u \le ۰/۹ \times ۲۸/۵۵ = ۲۵/۷\ t.m$$

۷-٤-۷- کنترل برش در اعضای مختلط تحت خمش

جهت کنترل برش در اعضای مختلط تحت خمش بر اساس اصول روش ضرایب بار و مقاومت باید رابطه (۷-۳۲) برقرار باشد.

$$V_u \le \varphi_v V_n \ ; \ (\varphi_v = ۰/۷۵ \text{ یا } ۰/۹ \text{ یا } ۱) \qquad (۳۲-۷)$$

که در آن V_u نیروی برشی حاصل از ترکیبات ضریب‌دار ایجاد شده در مقطع مختلط یا مقاومت برشی نهایی مورد نیاز مقطع است. هم‌چنین φ ضریب کاهش مقاومت برشی است که بسته به مورد یکی از مقادیر ۰/۷۵، ۰/۹ یا ۱/۰ منظور می‌شود. از طرف دیگر V_n مقاومت برشی اسمی مقطع مختلط است که به یکی از روش‌هایی که در ادامه بیان می‌شود محاسبه می‌شود:

الف- مقاطع مختلط شامل نیم‌رخ فولادی متکی بر دال بتنی:

بر مبنای مبحث دهم از مقررات ملی ساختمان ایران، ظرفیت برشی مقاطع مختلط متکی بر دال بتنی باید بر اساس ظرفیت برشی مقطع فولادی تنها محاسبه شود. به همین منظور کافی است که بر اساس ضوابط گفته شده در فصل چهارم یا پنجم ظرفیت برشی اسمی مقطع تعیین گردد که بسته به مشخصات نیم‌رخ، ضریب کاهش مقاومت برشی φ_v می‌تواند یکی از مقادیر ۰/۹ یا ۱/۰ را دارا باشد.

Scanned with CamScanner

ب- مقاطع مختلط محاط در بتن و پرشده با بتن:

ظرفیت برش نهایی مقاطع مختلط محاط در بتن و پرشده با بتن می‌تواند به یکی از سه روش زیر بیان گردد:

۱- بر اساس مقاومت برشی مقطع فولادی تنها بر اساس روابط فصل چهارم که در آن ضریب کاهش مقاومت φ_v می‌تواند یکی از مقادیر ۰/۹ و یا ۱/۰ را دارا باشد.

۲- بر اساس مقاومت برشی قسمت بتن مسلح شامل مقاومت برشی بتن (V_c) به اضافه مقاومت برشی میلگردهای عرضی (V_s) که بر اساس مبحث نهم از مقررات ملی ساختمان ایران یا آیین‌نامه ACI318 آمریکا تعیین می‌شود.

۳- بر اساس مجموع مقاومت برشی اسمی مقطع فولادی تنها به اضافه مقاومت برشی اسمی میلگردهای عرضی موجود در قسمت بتنی (بدون اعمال ضرایب کاهش φ_c یا φ_s در مبحث نهم از مقررات ملی ساختمان ایران) که پس از ترکیب مقاومت‌های برشی اسمی مذکور با اعمال ضریب کاهش مقاومت $\varphi_v = ۰/۷۵$ تعیین می‌گردد.

۷-٤-۸- کنترل تغییر مکان (افتادگی) در اعضای خمشی مختلط

کنترل افتادگی یا خیز اعضای خمشی مختلط همانند کنترل افتادگی سایر اعضای خمشی انجام می‌شود که در فصل چهارم از کتاب پیش‌رو بیان گردید. با این حال جهت محاسبه ممان اینرسی مقطع مختلط می‌بایست تمهیداتی در نظر گرفته شود. در روش‌های سنتی محاسبه خیز تیر ممان اینرسی مقطع مختلط بر اساس مشخصات مقطع تبدیل یافته و فرضیات الاستیک حاصل می‌شد اما نتایج تحقیقات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که ممان اینرسی مؤثر مقطع بین ۱۵ تا ۳۰ درصد باید کمتر از ممان اینرسی مقطع تبدیل‌یافته منظور گردد. بنابراین به عنوان یک پیشنهاد مهندسی می‌توان ممان اینرسی مؤثر مقطع I_{eff} را برای محاسبه تغییر مکان، برابر با $۰/۷۵ I_{tr}$ فرض نمود.

یک روش دیگر جهت محاسبه ممان اینرسی مؤثر مقطع استفاده از رابطه (۷-۳۳) می‌باشد.

Scanned with CamScanner

$$I_{eff} = I_s + \sqrt{\frac{\Sigma Q_n}{C_f}}\,(I_{tr} - I_s) \qquad (۳۳-۷)$$

که در آن I_{eff} ممان اینرسی مؤثر مقطع برای محاسبه افتادگی تیر، I_s ممان اینرسی نیم‌رخ فولادی در مقطع مختلط و I_{tr} ممان اینرسی مقطع تبدیل یافته ترک‌نخورده با فرضیات الاستیک (تبدیل بتن به فولاد) می‌باشد. هم‌چنین ΣQ_n مجموع مقاومت برشی اسمی برش‌گیرها در فاصله بین لنگر حداکثر تا لنگر خمشی صفر در طول عضو مختلط است که بر اساس روابط بخش آینده محاسبه می‌شود. از طرف دیگر C_f نیروی فشاری دال بتنی است که به وسیله رابطه (۷-۳۴) محاسبه می‌شود.

$$C_f = \min(A_s F_y \ , \ ۰/۸۵ f'_c A_c) \qquad (۳۴-۷)$$

که در آن A_s مساحت نیم‌رخ فولادی و A_c مساحت دال بتنی در عرض مؤثر آن است. مبحث دهم از مقررات ملی ساختمان ایران برای اعضای مختلط دارای برش‌گیر که برای اجرای آن‌ها از پایه‌های موقت (شمع‌بندی) استفاده نمی‌شود، تأکید می‌کند که محاسبه خیز حداکثر تیر باید بدین صورت انجام گیرد:

گام ۱: ابتدا بار ناشی از وزن تیر فولادی، دال بتنی‌تر و قالب‌بندی بر مقطع فولادی تنها اعمال شده و خیز اولیه تیر بر اساس ممان اینرسی مقطع فولادی محاسبه شود (Δ_1).

گام ۲: سپس بارهای مرده اضافی (شامل بارهای مرده‌ای که پس از سفت شدن بتن اعمال می‌شود مثل بار کف‌سازی، تیغه‌ها و ...) به اضافه بار زنده بر مقطع مختلط اعمال شده و خیز ثانویه تیر بر اساس مشخصات مقطع تبدیل یافته (I_{tr}) محاسبه شود (Δ_2).

گام ۳: مجموع مقادیر Δ_1 و Δ_2 نباید از $\frac{۱}{۲۴۰}$ طول دهانه عضو مختلط بیش‌تر گردد.

شایان ذکر است که هنگام محاسبه خیز تیر باید از مدول الاستیسیته فولاد (E_s) در روابط استفاده شود. ذکر این نکته نیز ضروری است که در حالاتی که دهانه اعضای خمشی مختلط بزرگ بوده و بار زنده زیادی به آن‌ها وارد می‌شود، تغییر مکان‌های درازمدت تیر به دلیل

Scanned with CamScanner

پدیده‌های افت و خزش در بتن نیز می‌تواند تعیین‌کننده باشد که در چنین شرایطی می‌توان به عنوان یک روش مهندسی مدول الاستیسیته محاسبه شده برای بتن را تا یک سوم کاهش داد.

هم‌چنین در اعضای خمشی سرتاسری که در طول عضو هم لنگر منفی و هم لنگر مثبت ایجاد می‌شود، ممان اینرسی مقاطع در طول تیر به دلیل اعمال لنگرهای متفاوت متغیر بوده و ممان اینرسی مؤثر برای محاسبه خیز تیر را باید با ترکیب مناسبی از ممان اینرسی مقطع تحت لنگر مثبت (I_{pos}) و تحت لنگر منفی (I_{neg}) محاسبه نمود:

$$I_{eff} = \alpha I_{pos} + \beta I_{neg} \qquad (۳۵-۷)$$

در شرح آیین‌نامه AISC آمریکا آمده است که چنان‌چه عضو سرتاسری فقط تحت بارهای ثقلی باشد، می‌توان از ضرایب $\alpha = ۰/۶$ و $\beta = ۰/۴$ استفاده کرد و چنان‌چه علاوه بر بارهای ثقلی عضو مختلط جزئی از سیستم باربر جانبی سازه نیز باشد، ضرایب $\alpha = \beta = ۰/۵$ مناسب به نظر می‌رسد.

مثال ۷-۱۲:

برای پوشش یک دهانه دوازده متری از تیرچه‌های فلزی به همراه دال بتنی استفاده شده است. چنان‌چه بار مرده کف‌سازی و تیغه‌ها جمعاً $۳۰۰\,kg/m^۲$ و بار زنده $۶۰۰\,kg/m^۲$ و جهت اجرای سقف از شمع‌بندی استفاده نشود، مقطع مختلط مناسب را جهت تحمل بارها طراحی کنید. فاصله تیرچه‌ها از یکدیگر ۲/۵ متر می‌باشد.

$$F_y = ۳۶۰۰\,kg/cm^۲ \; ; \; E_s = ۲/۰۴ \times ۱۰^۶\,kg/cm^۲ \; , \; w_c = ۲۴۰۰\,kg/m^۳ \; , \; f'_c = ۳۰۰\,kg/cm^۲$$

حل:

با توجه به فاصله تیرچه‌ها و الزامات دال‌های بتنی، ضخامت دال بتنی باید از $\frac{S}{۲۴} = ۱۰/۴\,cm$ بیش‌تر باشد. بنابراین ضخامت دال بتنی برابر با $t_c = ۱۲\,cm$ فرض می‌گردد. به دلیل عدم استفاده از پایه‌های موقت، مقطع فولادی تنها باید بتواند بارهای وارده قبل از

Scanned with CamScanner

۷-٤-۹- کنترل ارتعاش در اعضای مختلط تحت خمش

از آن‌جایی که اعضای خمشی مختلط عمدتاً جهت پوشش دهانه‌های بزرگ به کار می‌روند، ممکن است از نظر کنترل ارتعاش بحرانی گردند. نحوه انجام کنترل ارتعاش پیش‌تر در فصل چهارم کتاب پیش‌رو جهت استفاده خوانندگان ارائه شده است و می‌توانند به طریق مشابه جهت کنترل ارتعاش اعضای مختلط استفاده گردد. بر اساس مبحث دهم از مقررات ملی ساختمان ایران، جهت کنترل ارتعاش اعضایی که بار سطوح بزرگ خالی از تیغه‌بندی را تحمل می‌کنند کافی است فرکانس طبیعی (دوره‌ای) آن عضو به حدی باشد که از حد احساس بشر تجاوز نکند. از این‌رو کافی است که فرکانس طبیعی عضو مذکور کم‌تر از ۵ هرتز نباشد. جهت محاسبه فرکانس دوره‌ای در اعضای مختلط می‌توان از روابط (۷-۳۶) و (۷-۳۷) بهره گرفت.

اعضای خمشی دو سر ساده تحت بار یکنواخت: $f_n = \frac{\pi}{۲}\sqrt{\frac{E_s I_{tr} g}{q_D L^۴}}$ (۳۶-۷)

سایر اعضای خمشی: $f_n = ۰/۱۸\sqrt{\frac{g}{\Delta}}$ (۳۷-۷)

که در آن‌ها، I_{tr} ممان اینرسی مقطع تبدیل یافته، E_s مدول الاستیسیته فولاد، q_D بار مرده گستره بر واحد طول، L دهانه عضو خمشی و $g = ۹۸۰/۶ cm/s^۲$ و Δ خیز حداکثر عضو تحت بار مرده است.

شایان ذکر است نحوه انجام کنترل ارتعاش در سقف‌های مرکب بر اساس پیشنهادات آیین‌نامه AISC آمریکا در جلد دوم کتاب طراحی سازه‌های فولادی جهت استفاده خوانندگان ارائه شده است.

Scanned with CamScanner

مثال ۷-۱۳:

کنترل ارتعاش را برای تیر طراحی شده در مثال ۷-۱۲ (شکل ۷-۳۹) انجام دهید.

حل:

برای تیر مذکور مقادیر به کار رفته در رابطه (۷-۳۶) چنین هستند:

$$I_{tr}=۱۴۰۰۳۵\,cm^{۴}\ ;\ E_s=۲/۰۴\times۱۰^{۶}\,kg/cm^{۲}\ ;\ g=۹۸۰/۶\,cm/s^{۲}$$

$$q_D=(۲۵۰۰\times۰/۱۲+۳۰۰)\times۲/۵+۹۰/۷=۱۵۹۱kg/m=۱۵/۹۱kg/cm$$

$$L=۱۲۰۰cm$$

$$\Rightarrow f_n=\frac{\pi}{۲}\sqrt{\frac{۲/۰۴\times۱۰^{۶}\times۱۴۰۰۳۵\times۹۸۰/۶}{۱۵/۹۱\times۱۲۰۰^{۴}}}=۴/۵۷۷\,Hz$$

به دلیل آن که $f_n<۵\,Hz$ به دست آمده است، چنان‌چه عضو مذکور بار سطوح بدون تیغه‌بندی را تحمل کند از نظر ارتعاش قابل قبول نیست و ممکن است حین بهره‌برداری به دلیل حرکت افراد ارتعاش رخ داده قابل حس باشد. تقویت مقطع تیرچه می‌تواند یکی از راه‌حل‌های کنترل ارتعاش در عضو مورد نظر باشد که محاسبات آن بر عهده خوانندگان قرار می‌گیرد.

۷-۵- انتقال بار و برش‌گیرها در اعضای مختلط

همان‌گونه که در بخش‌های پیشین فصل حاضر مشاهده شد، مقاومت اسمی اعضای مختلط مستلزم عملکرد هم‌زمان مصالح فولادی و بتنی در تحمل بارهای وارده است. به عبارت دیگر مشابه آن چه که در شکل ۷-۲ نشان داده شد، باید از لغزش بین لایه‌های تماس فولاد و بتن جلوگیری نمود. از این‌رو آیین‌نامه‌ها استفاده از اجزایی را که بتواند کرنش سطح تماس دو ماده را با هم یکسان کند در اعضای مختلط ضروری می‌دانند. این اجزا که تحت عنوان برش‌گیرها در اعضای مختلط به کار می‌روند، می‌توانند در انواع مختلفی باشند که کاربرد دو نمونه از

Scanned with CamScanner

آن‌ها در سازه‌ها رواج بیش‌تری دارد. بر همین اساس، مبحث دهم از مقررات ملی ساختمان ایران و آیین‌نامه AISC آمریکا نحوه محاسبه ظرفیت برشی برش گیرهای گل‌میخ و ناودانی را بیان کرده‌اند و استفاده از سایر انواع برش گیر را فقط در صورتی مجاز می‌دانند که مقاومت برشی آن توسط آزمایشگاه‌های معتبر تأیید شده باشد.

۷-۵-۱- ظرفیت برشی اسمی برش‌گیرهای از نوع گل میخ[1]

گل‌میخ‌های کلاهک‌دار یکی از انواع رایج برش گیرها در اعضای مختلط هستند که در شکل ۷-۴۰ نشان داده شده است. الزامات مربوط به گل‌میخ‌های کلاهک‌دار (سرپهن) بدین شرح است:

۱- طول گل‌میخ پس از نصب حداقل باید ۴ برابر قطر گل‌میخ باشد ($H_s \geq 4d_s$).

۲- به استثنای گل‌میخ‌های نصب شده در داخل کنگره‌های ورق‌های فولادی شکل داده شده، برش گیرها باید حداقل ۲۵ میلی‌متر پوشش جانبی از بتن داشته باشند.

۳- حداقل فاصله گل‌میخ‌ها تا لبه بتن در امتداد طولی برابر ۲۰ میلی‌متر است و در صورت استفاده از بتن سبک این فاصله باید ۲۵ میلی‌متر منظور شود.

۴- حداقل فاصله مرکز تا مرکز گل‌میخ‌ها در هر امتداد ۴ برابر قطر گل‌میخ می‌باشد ($S \geq 4d_s$).

۵- حداکثر فاصله مرکز تا مرکز گل‌میخ‌ها نباید از ۳۰ برابر قطر گل‌میخ، ۸ برابر ضخامت دال بتنی و ۸۰۰ میلی‌متر بیش‌تر باشد.

$$S \leq \min(30d_s \ , \ 8t_c \ , \ 800mm) \qquad (۳۸-۷)$$

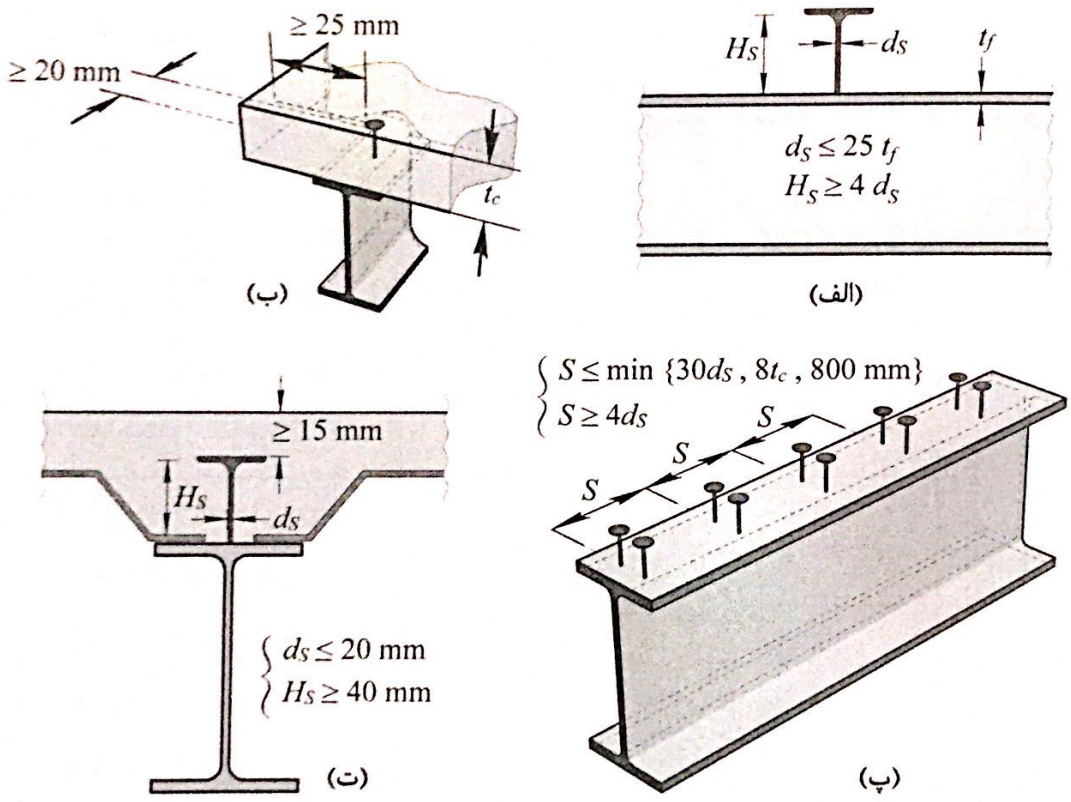
۶- قطر گل‌میخ نباید از ۲/۵ برابر ضخامت فلز پایه که به آن جوش می‌شود تجاوز نماید مگر در حالتی که گل‌میخ درست در امتداد جان مقطع قرار گیرد.

1- Stud

Scanned with CamScanner

۷- در مقاطع مختلط شامل ورق‌های فولادی شکل داده شده حداکثر قطر مجاز گل‌ها برابر ۲۰ میلی‌متر است و این گل‌میخ‌ها باید از طریق ورق فولادی شکل داده شده یا به طور مستقیم به مقطع فولادی جوش شوند و در هر حال گل‌میخ‌ها باید روی بال مقطع فولادی ذوب شوند.

۸- در ورق‌های فولادی شکل داده شده ارتفاع گل‌میخ‌ها پس از نصب از روی ورق فولادی شکل داده شده نباید کم‌تر از ۴۰ میلی‌متر باشد و ارتفاع بتن روی گل‌میخ نباید کم‌تر از ۱۵ میلی‌متر باشد.



شکل ۷-۴۰- محدودیت‌های برش‌گیرهای از نوع گل‌میخ

در صورت رعایت محدودیت‌های مذکور، مقاومت برشی اسمی هر برش‌گیر از نوع گل‌میخ که بر بال فوقانی تیر فولادی متصل می‌شود را می‌توان به کمک رابطه (۷-۳۹) تعیین نمود.

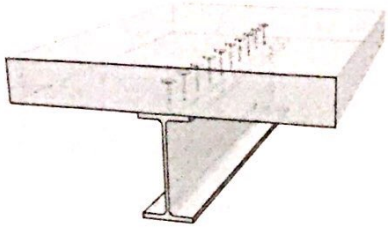
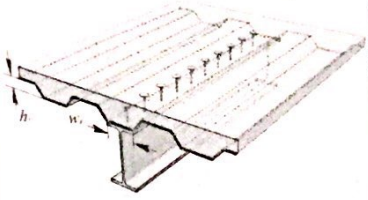
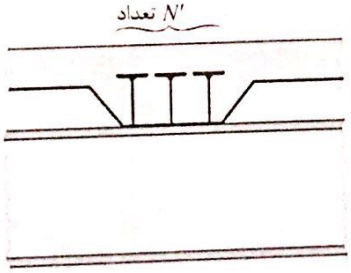
$$Q_n = \min\left(0.5\,A_{sa}\sqrt{f'_c E_c}\ ,\ R_g R_p A_{sa} F_u\right) \qquad (۷-۳۹)$$

در رابطه (۷-۳۹)، A_{sa} سطح مقطع گل‌میخ $\left(A_{sa} = \frac{\pi}{4} d_s^2\right)$، f'_c مقاومت فشاری مشخصه نمونه استاندارد بتنی، E_c مدول الاستیسیته بتن و F_u تنش کششی نهایی مصالح گل‌میخ است.

Scanned with CamScanner

هم‌چنین R_p و R_g ضرایب اصلاحی هستند که بر اساس تحقیقات جدیدتر محققان در رابطه (۷-۳۹) اعمال گردیده است. تعیین این ضرایب به کمک جدول ۷-۴ انجام می گیرد.

جدول ۷-۴- ضرایب اصلاحی R_p و R_g در رابطه (۷-۳۹)

ردیف	حالت	شکل		R_g	R_p
۱	مقاطع مختلط بدون استفاده از ورق‌های فولادی شکل داده شده			۱	۰/۷۵
۲	مقاطع مختلط با استفاده از ورق‌های فولادی شکل داده شده که کنگره‌ها موازی محور تیر فولادی هستند		$\frac{w_r}{h_r} \geq ۱/۵$	۱	۰/۷۵
۳			$\frac{w_r}{h_r} < ۱/۵$	۰/۸۵	۰/۷۵
۴	مقاطع مختلط با استفاده از ورق‌های فولادی شکل داده شده که کنگره‌ها عمود بر محور تیر فولادی هستند. (N' : تعداد گل‌میخ در یک کنگره در محل تقاطع با تیر)		$N' = ۱$	۱	۰/۶
۵			$N' = ۲$	۰/۸۵	۰/۶
۶			$N' \geq ۳$	۰/۷	۰/۶

۷-۵-۲- ظرفیت برشی اسمی برش‌گیرها از نوع ناودانی

مقاطع ناودانی گرم نورد شده نیز یکی از انواع رایج برش‌گیرها در اعضای مختلط هستند که در دال‌های بتنی مدفون می‌شوند. آرایش صحیح برش‌گیرهایی از نوع ناودانی در شکل ۷-۴۱- پ نشان داده شده است. این آرایش جهت ایجاد گیرایی مناسب و جلوگیری از لغزش بتن بر روی بال تیر فولادی پیشنهاد شده است.

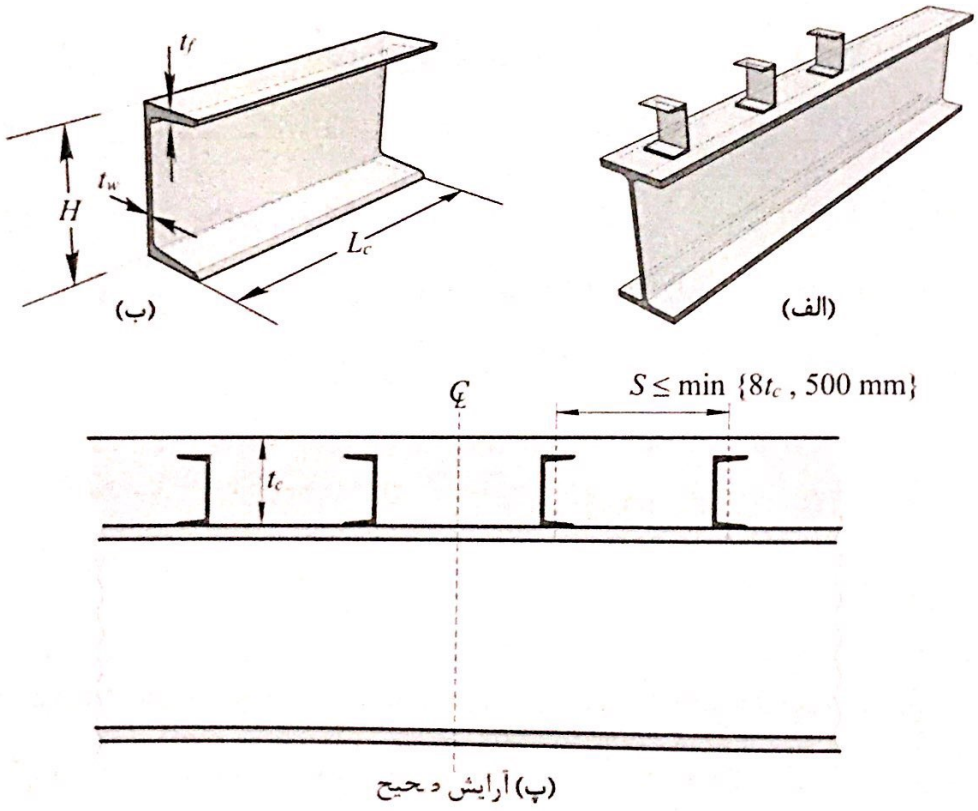
Scanned with CamScanner

محدودیت‌های استفاده از برش‌گیرهای ناودانی بر اساس مبحث دهم از مقررات ملی ساختمان ایران بدین شرح است:

۱- به استثنای برش‌گیرهای نصب شده در داخل کنگره‌های ورق‌های فولادی شکل داده شده، برش‌گیرها باید دارای حداقل ۲۵ میلی‌متر پوشش جانبی باشند.

۲- حداکثر فاصله مرکز تا مرکز برش‌گیرهای از نوع ناودانی نباید از ۸ برابر ضخامت دال بتنی و ۵۰۰ میلی‌متر تجاوز نماید.

$$S \le \min(8\,t_c\ ,\ 500\,mm) \qquad (۴۰-۷)$$



شکل ۷-۴۱- محدودیت‌های برش‌گیرهای از نوع ناودانی و ابعاد آن

آیین‌نامه AISC آمریکا تأکید می‌کند که برای جلوگیری از ایجاد خروج از مرکزیت قابل توجه در ناودانی‌ها لازم است که ناودانی‌ها توسط جوش‌هایی حداقل با بعد ۵ میلی‌متر ($\frac{۳}{۱۶}$ اینچ) به بال تیر وصل شود و ابعاد مقطع ناودانی نیز محدودیت‌های نشان داده شده در روابط (۷-۴۱) را ارضا کند.

Scanned with CamScanner

$$۱ \le \frac{t_f}{t_w} \le ۵/۵ \qquad (۷-۴۱-\text{الف})$$

$$\frac{H}{t_w} \ge ۸ \qquad (۷-۴۱-\text{ب})$$

$$\frac{L_c}{t_f} \ge ۶ \qquad (۷-۴۱-\text{پ})$$

$$۰/۵ \le \frac{r}{t_w} \le ۱/۶ \qquad (۷-۴۱-\text{ت})$$

که در آن‌ها t_f ضخامت بال ناودانی، t_w ضخامت جان ناودانی، H ارتفاع ناودانی، L_c طول ناودانی و r شعاع گردی اتصال بال به جان ناودانی می‌باشد. شایان ذکر است که مقاطع ناودانی موجود در جدول پروفیل‌های ساختمان فولادی روابط (۷-۴۱- الف، ب و ت) را ارضا می‌کنند و فقط کافی است شرط موجود در رابطه (۷-۴۱- پ) ارضا گردد.

در صورت رعایت محدودیت‌های مذکور مقاومت برشی اسمی مقاطع برش‌گیر از نوع ناودانی که بر بال فوقانی تیر نصب می‌شوند به کمک رابطه (۷-۴۲) قابل محاسبه است:

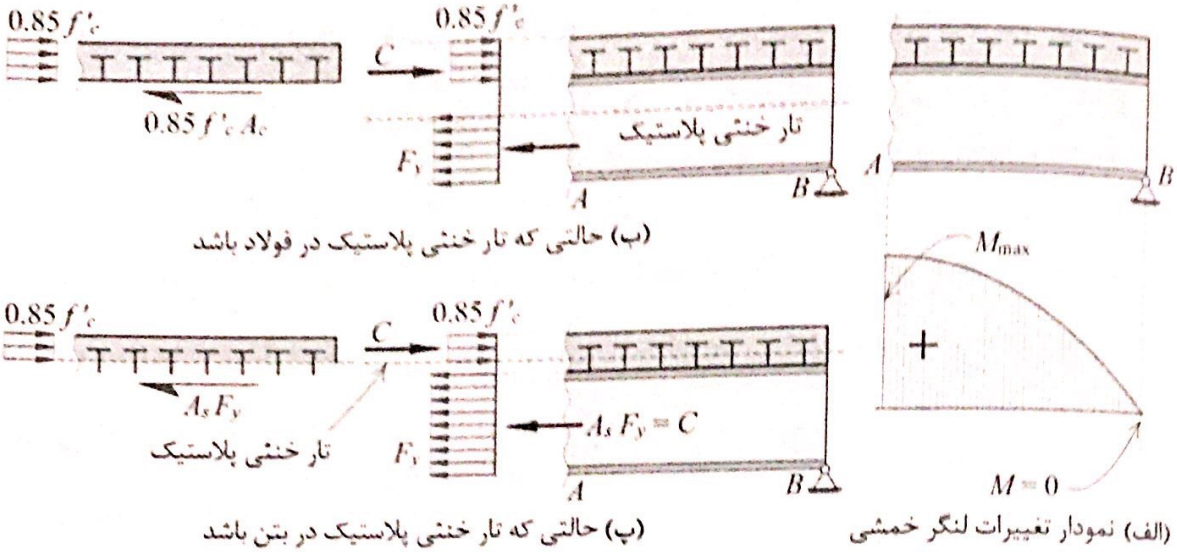
$$Q_n = ۰/۳(t_f + ۰/۵\,t_w)L_c\sqrt{f'_c\,E_c} \qquad (۷-۴۲)$$

که در آن f'_c مقاومت فشاری مشخصه نمونه استاندارد بتنی، E_c مدول الاستیسیته بتن و مقادیر L_c، t_f و t_w به ترتیب طول، ضخامت بال و ضخامت جان ناودانی هستند.

۷-۵-۳- نحوه انتقال بار و طراحی برش‌گیرها در اعضای مختلط تحت خمش

برش‌گیرها در اعضای مختلط تحت خمش جهت جلوگیری از لغزش دال بتنی بر روی بال تیر فولادی استفاده می‌شوند. از این‌رو برش‌گیرها باید مقاومت برشی کافی را در برابر نیروی افقی که باعث لغزش بتن بر روی فولاد خواهد شد را داشته باشد. به همین سبب برای محاسبه نیروی برشی وارده یا مقاومت برشی مورد نیاز کافی است تا نیروهای وارده به دال بتنی و تیرچه فولادی را در بازه‌ای از طول عضو مختلط بین نقطه لنگر خمشی حداکثر مثبت و لنگر صفر را بر اساس شکل ۷-۴۲ در نظر گرفت.

Scanned with CamScanner



شکل ۷-۴۲- تعیین مقاومت برشی مورد نیاز طراحی برش‌گیرها تحت لنگر مثبت خمشی

با توجه به شکل ۷-۴۲، بسته به این که تار خنثی پلاستیک در محل لنگر خمشی حداکثر مثبت در بتن یا فولاد قرار گیرد نیروی برشی وارد به برش‌گیرها را در طولی از تیر بین نقطه‌ای با لنگر خمشی حداکثر مثبت (نقطه A) تا نقطه‌ای با لنگر خمشی صفر (نقطه B) را می‌توان به کمک رابطه (۷-۴۳) تعیین نمود:

$$V_{hu} = \min\left(۰/۸۵ f'_c A_c \ , \ A_s F_y\right) \qquad (۴۳-۷)$$

که در آن f'_c مقاومت فشاری مشخصه نمونه‌ی استاندارد بتنی، F_y تنش تسلیم فولاد، A_s مساحت مقطع فولادی و A_c سطح مقطع بتن در محدوده عرض مؤثر در مقطع مختلط است. نیروی برشی V_{hu} باید توسط برش‌گیرهای موجود در طول AB تحمل شوند که با اعمال ضریب کاهش مقاومت $\varphi_v = ۱$، می‌توان تعداد برش‌گیرهای مورد نیاز را تعیین کرد.

$$V_{hu} \le \varphi_v V_{hn} = N Q_n \qquad (۴۴-۷)$$

که در آن Q_n مقاومت اسمی یک برش‌گیر است که به کمک یکی از روابط (۷-۳۹) یا (۷-۴۲) تعیین می‌شود. هم‌چنین N تعداد برش‌گیر مورد نیاز است که با آرایش یکسان (فواصل مساوی) در طولی از عضو بین لنگر صفر تا لنگر حداکثر مثبت توزیع می‌شود. مبحث دهم از

Scanned with CamScanner

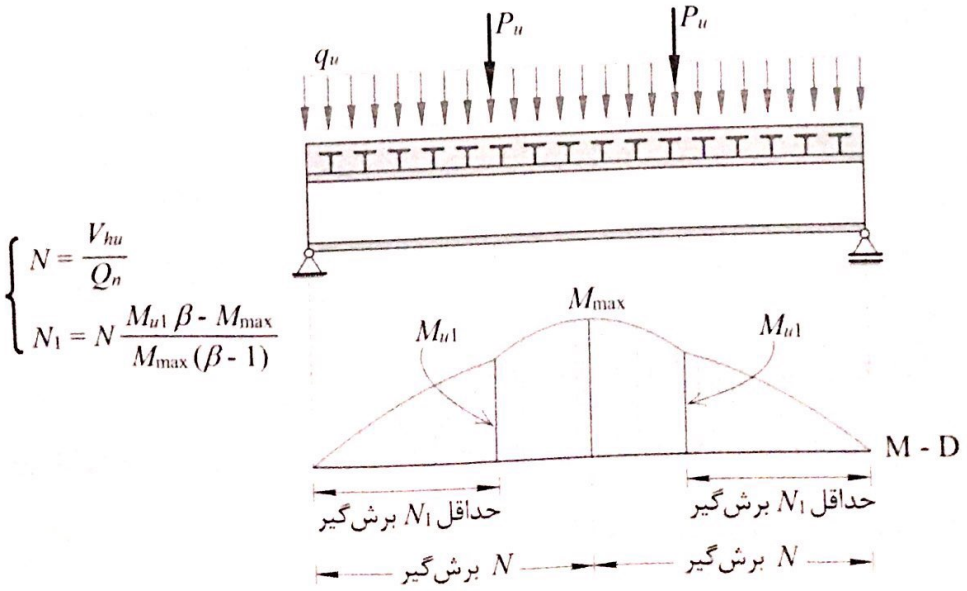
مقررات ملی ساختمان ایران و آیین‌نامه AISC آمریکا تأکید می‌کنند که چنان‌چه در بازه بین لنگر صفر تا لنگر حداکثر نیروی متمرکز قابل توجهی اعمال شود، لازم است تا کنترل گردد تعداد برش‌گیرهای موجود در طولی از عضو بین بار متمرکز تا نقطه لنگر صفر برای تحمل لنگر خمشی در محل بار متمرکز کافی باشد. از این‌رو پیشنهاد می‌گردد حداقل به تعداد N_1 برش‌گیر در بازه مذکور قرار گیرد که N_1 بر اساس رابطه (۷-۴۵) به دست می‌آید:

$$N_1 = N\frac{M_{u1}\beta - M_{max}}{M_{max}(\beta - 1)} \qquad (۷-۴۵)$$

که در آن M_{max} لنگر حداکثر عضو، M_{u1} لنگر در محل بار متمرکز و N تعداد برش‌گیر به دست آمده از رابطه (۷-۴۴) است. هم‌چنین β ضریبی است که به وسیله رابطه (۷-۴۶) محاسبه می‌شود:

$$\beta = \frac{I_{tr}}{I_s} \qquad (۷-۴۶)$$

که در آن I_{tr} ممان اینرسی مقطع تبدیل یافته و I_s ممان اینرسی مقطع فولادی تنهاست. قابل ذکر است که رابطه (۷-۴۵) در ویرایش سال ۱۳۸۷ مبحث دهم از مقررات ملی ساختمان ایران ارائه شده بود در ویرایش سال ۱۳۹۲ حذف شده است.



شکل ۷-۴۳- تعداد برش‌گیر لازم در نواحی مختلف تیر

Scanned with CamScanner

از سوی دیگر در نواحی لنگر خمشی منفی، در فاصله بین نقطه لنگر حداکثر منفی و لنگر صفر تعداد برش‌گیر لازم را می‌توان به کمک رابطه (۷-۴۷) محاسبه نمود.

$$N_r = \frac{V_{hu}}{Q_n} = \frac{F_{yr}A_{sr}}{Q_n} \qquad (۴۷-۷)$$

که در آن V_{hu} مقاومت برشی مورد نیاز برش‌گیرها در ناحیه لنگر منفی و برابر با $V_{hu} = F_{yr}A_{sr}$، Q_n ظرفیت یک برش‌گیر، F_{yr} تنش تسلیم میلگردهای موجود در دال بتنی موازی محور تیر و A_{sr} مساحت آن‌ها می‌باشد. تعداد برش‌گیر محاسبه شده به کمک رابطه (۷-۴۷) به صورت یکسان در طولی از تیر بین لنگر صفر و لنگر حداکثر منفی توزیع می‌شوند.

مثال ۷-۱۴:

اعضای مختلط مثال‌های ۷-۶ و ۷-۷ را در نظر بگیرید.

الف) برش‌گیرهای لازم برای عضو مختلط مثال ۷-۶ (شکل ۷-۱۷) را از گل‌میخ طراحی کنید.

ب) برش‌گیرهای لازم برای عضو مختلط مثال ۷-۷ (شکل ۷-۱۹) را از ناودانی طراحی کنید.

حل:

الف) با توجه به شکل ۷-۱۷- الف، تیرچه‌ها دو سر ساده به دهانه ۱۰ متر هستند. بنابراین لنگر دو انتها صفر و لنگر حداکثر مثبت در وسط طول عضو رخ می‌دهد. از این‌رو تعداد برش‌گیر محاسبه شده به کمک رابطه (۷-۴۴) در طول ۵ متری از طول تیرچه باید توزیع گردد. به عبارت دیگر در کل طول ۱۰ متری عضو مختلط به ۲N برش‌گیر نیاز است. مشخصات مقطع مختلط شکل ۷-۱۷- ب بدین شرح است:

$$f'_c = ۲۱۰\,kg/cm^۲ \;;\; A_c = b_e t_c = ۲۰۰\times۱۰ = ۲۰۰۰\,cm^۲$$

$$A_s = ۴۵/۹\,cm^۲ \;;\; F_y = ۳۶۰۰\,kg/cm^۲$$

$$V_{hu} = \min(۰/۸۵\times۲۱۰\times۲۰۰۰ = ۳۵۷۰۰۰\,kg \;;\; ۴۵/۹\times۳۶۰۰ = ۱۶۵۲۴۰) = ۱۶۵۲۴۰\,kg$$ رابطه (۷-۴۳):

Scanned with CamScanner

چنان‌چه از گل‌میخ‌هایی به قطر $d_s = ۱۶\,mm$ استفاده شود، می‌توان ظرفیت برشی هر گل‌میخ را به کمک رابطه (۷-۳۹) محاسبه کرد. بر اساس جدول ۷-۴ ردیف ۱، ضرایب اصلاحی $R_g = ۱$ و $R_p = ۰/۷۵$ حاصل می‌شود. هم‌چنین با فرض آن که مقاومت فلز گل‌میخ‌ها $F_u = ۴۵۰۰\,kg/cm^۲$ باشد، می‌توان نوشت:

$$E_c = ۰/۱۳۷ \times ۲۴۰۰^{۱/۵} \times \sqrt{۲۱۰} = ۲۳۳۴۲۵\,kg/cm^۲$$

$$A_{sa} = \frac{\pi}{۴} \times ۱/۶^۲ = ۲/۰۱\,cm^۲$$

رابطه (۷-۳۹):

$$Q_n = \min\left(۰/۵ \times ۲/۰۱ \times \sqrt{۲۱۰ \times ۲۳۳۴۲۵} = ۷۰۳۶\,kg \;,\; ۰/۷۵ \times ۱ \times ۲/۰۱ \times ۴۵۰۰ = ۶۷۸۴\,kg\right) = ۶۷۸۴\,kg$$

رابطه (۷-۴۴): $V_{hu} = ۱۶۵۲۴۰ \le N \times ۶۷۸۴ \Rightarrow N \ge ۲۵$

بنابراین به ۲۵ گل‌میخ سه پهن به قطر ۱۶ میلی‌متر در نصف طول تیرچه نیاز است (شکل ۷-۴۴). چنان‌چه در هر مقطع عضو مختلط از ۲ گل‌میخ در طرفین جان استفاده شود، کافی است گل‌میخ را در فواصل $S = \frac{۵۰۰}{۱۲/۵} = ۴۰\,cm$ از یکدیگر قرار دهیم. به همین سبب می‌توان در کل طول عضو از ۵۰ گل‌میخ به صورت جفت، با فواصل ۴۰ سانتی‌متر استفاده کرد.

قابل ذکر است که نتیجه حاصل کلیه محدودیت‌های مربوط به برش‌گیرهایی گل‌میخ را ارضا می‌کند.

ب) مقطع مثال ۷-۷ به صورت دو سر مفصل به دهانه ۱۸ متر می‌باشد. از این‌رو مشابه حالت قبل تعداد گل‌میخ‌های به دست آمده از رابطه (۷-۴۴) باید در نصف طول تیرچه قرار گیرند و به عبارت دیگر در کل طول عضو از $۲N$ برش‌گیر باید استفاده شود.

$$A_c = ۱۸۵ \times ۱۰ = ۱۸۵۰\,cm^۲ \;,\; A_s = ۹۲\,cm^۲$$

رابطه (۷-۴۳): $V_{hu} = \min(۰/۸۵ \times ۲۱۰ \times ۱۸۵۰ = ۳۳۰۲۲۵ \;,\; ۹۲ \times ۳۶۰۰ = ۳۳۱۲۰۰) = ۳۳۰۲۲۵\,kg$

چنان‌چه از ناودانی ۶۰ ⌊ به طول ۱۰ سانتی‌متر به عنوان برش‌گیر استفاده شود، می‌توان نوشت:

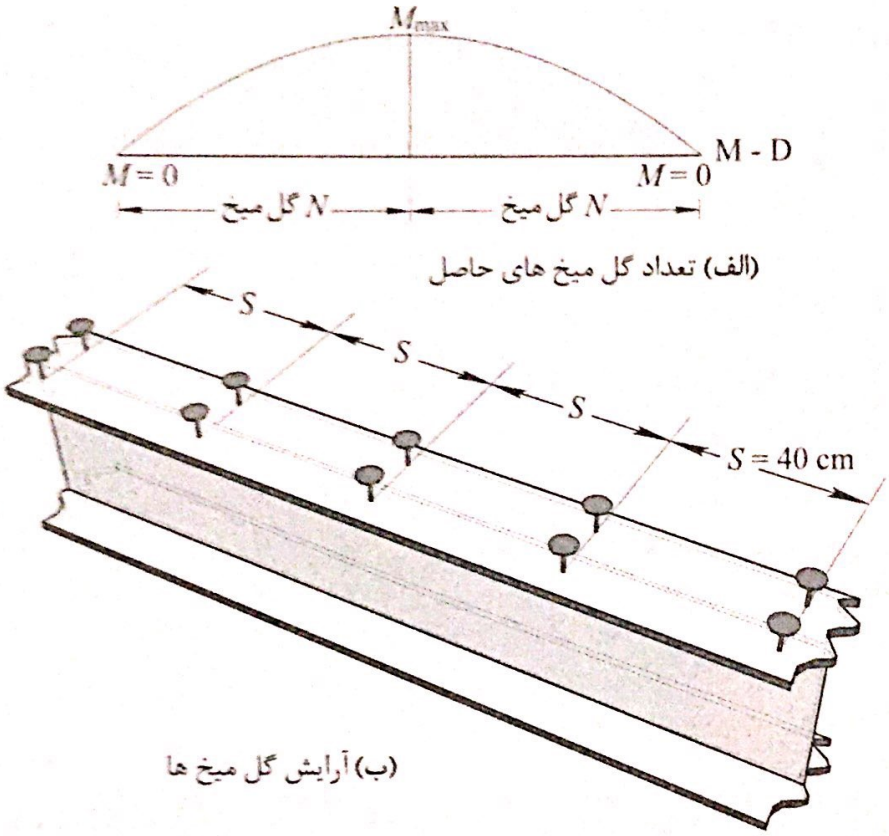
⌊۶۰ : $t_f = ۰/۶\,cm \;;\; t_w = ۰/۵\,cm$

رابطه (۷-۴۲): $Q_n = ۰/۳(۰/۶ + ۰/۵ \times ۰/۵) \times ۱۰ \times \sqrt{۲۱۰ \times ۲۳۳۴۲۵} = ۱۷۸۵۴\,kg$

Scanned with CamScanner

رابطه (۴۴-۷): $V_{hu} = ۳۳۰۲۲۵ \le N \times ۱۷۸۵۴ \Rightarrow N \ge ۱۸/۵ \Rightarrow N = ۱۹$

بنابراین جمعاً از ۴۰ ناودانی به عنوان برش‌گیر به فواصل ۴۵ سانتی‌متر در کل طول عضو مختلط استفاده می‌شود.



شکل ۷-۴۴- نتایج طراحی برش‌گیرهای مثال ۷-۱۴- الف

مثال ۷-۱۵:

چنان‌چه تیرچه‌های به کار رفته در ساخت اعضای مختلط مثال ۷-۹ دو سر ساده باشند، تعداد برش‌گیرهای لازم برای آن‌ها را در دو حالت الف و ب آن مثال تعیین کنید.

حل:

الف) در این حالت تیرچه‌ها عمود بر کنگره‌ها قرار دارند. اگر در هر کنگره در محل تقاطع با تیر از دو گل‌میخ استفاده شود ($N' = ۲$)، ضرایب اصلاحی R_p و R_g بر اساس جدول ۷-۴ به ترتیب برابر با ۰/۶ و ۰/۸۵ به دست می‌آیند. با توجه شکل ۷-۲۷، کنگره‌ها در فواصل

Scanned with CamScanner

۴۰ سانتی‌متری از یکدیگر قرار دارند (مرکز تا مرکز). از این‌رو تعداد کل گل‌میخ‌ها در نصف طول تیرچه برابر با $N=\frac{۵۰۰}{۴۰}\times ۲=۲۵$ می‌باشد که به دلیل آرایش زوج گل‌میخ‌ها $N=۲۴$ در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به شکل ۷-۲۸ می‌توان نوشت:

$$A_c=۲۵۰\times ۶=۱۵۰۰\,cm^۲\ ;\ A_s=۵۳/۸\,cm^۲$$

رابطه (۷-۴۳):

$$V_{hu}=\min(۰/۸۵\times ۲۱۰\times ۱۵۰۰=۲۶۷۷۵۰\,kg\ ,\ ۵۳/۸\times ۲۴۰۰=۱۲۹۱۲۰)=۱۲۹۱۲۰\,kg$$

رابطه (۷-۴۴): $۱۲۹۱۲۰\le ۲۴Q_n \Rightarrow Q_n\ge ۵۳۸۰\,kg$

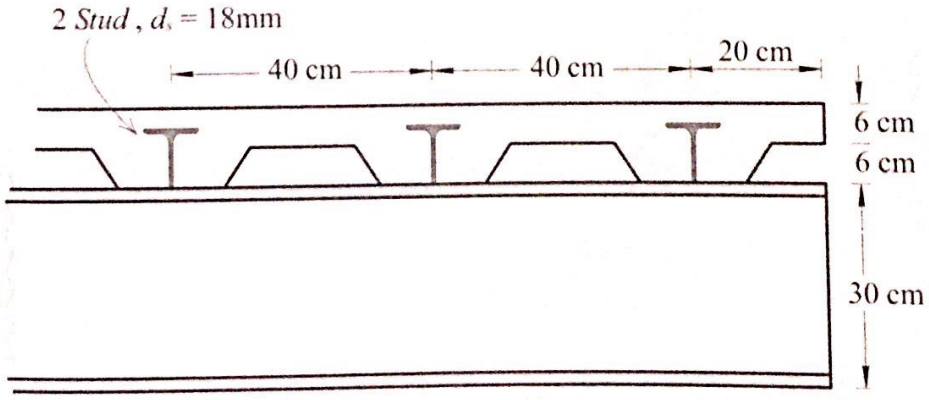
رابطه (۷-۳۹):

$$Q_n=\min\left(۰/۵A_{sa}\times\sqrt{۲۱۰\times ۲۳۳۴۲۵}=۳۵۰۰A_{sa}\ ,۰/۶\times ۰/۸۵\times A_{sa}\times ۴۵۰۰=۲۲۹۵A_{sa}\right)$$

$$=۲۲۹۵A_{sa}$$

$$\Rightarrow ۲۲۹۵A_{sa}\ge ۵۳۸۰ \Rightarrow A_{sa}\ge ۲/۳۴\,cm^۲$$

بنابراین باید از گل‌میخ‌هایی حداقل به قطر $d_s=۱۸\,mm$ استفاده گردد (شکل ۷-۴۵) که در تمام کنگره‌ها در محل تقاطع با تیر قرار می‌گیرند.



شکل ۷-۴۵- نتیجه طراحی مثال ۷-۱۵- الف

ب) در این حالت کنگره‌ها موازی تیرچه‌ها قرار دارند. با توجه به شکل ۷-۲۹- الف و ۷-۲۷، $W_r=۲۰\,cm$ و $h_r=۶\,cm$ می‌باشد. بنابراین بر اساس جدول ۷-۴ ضرایب $R_p=۰/۷۵$

Scanned with CamScanner

و $R_g=1$ به دست می‌آید. با توجه به شکل ۷-۲۹-ب می‌توان نوشت:

$$A_c=۲۰۰\times۶+۱۰۰\times۶=۱۸۰۰\,cm^2$$

رابطه (۷-۴۳):

$$V_{hu}=\min(۰/۸۵\times۲۱۰\times۱۸۰۰=۳۲۱۳۰۰\ ,\ ۵۳/۸\times۲۴۰۰=۱۲۹۱۲۰)=۱۲۹۱۲۰\,kg$$

در صورت استفاده از گل‌میخ‌هایی به قطر $d_s=۲۰\,mm$، مساحت مقطع گل‌میخ $A_{sa}=۳/۱۴\,cm^2$ حاصل می‌شود که بدین ترتیب ظرفیت برشی هر برش‌گیر به کمک رابطه (۷-۳۹) به دست می‌آید:

$$Q_n=\min\left(۰/۵\times۳/۱۴\times\sqrt{۲۱۰\times۲۳۳۴۲۵}=۱۰۹۹۲\ ,\ ۰/۷۵\times۱\times۳/۱۴\times۴۵۰۰=۱۰۵۹۸\right)$$
$$=۱۰۵۹۸\,kg$$

رابطه (۷-۴۴): $۱۲۹۱۲۰\le N\times۱۰۵۹۸\Rightarrow N\ge۱۲$

بنابراین از گل‌میخ‌هایی به قطر ۲۰ میلی‌متر در فواصل ۴۰ سانتی‌متری به صورت تکی (روی جان) استفاده می‌شود.

۷-۵-٤- نحوه انتقال بار در اعضای مختلط تحت نیروی محوری

انتقال بار در اعضای مختلط تحت نیروی محوری که نحوه طراحی و تعیین ظرفیت فشاری آن‌ها پیش‌تر در بخش ۷-۳ بیان شده، در دو وضعیت مختلف بررسی می‌شود. وضعیت اول نحوه انتقال بار از محل اعمال نیرو به ناحیه بتنی مقطع می‌باشد که در حالتی بررسی می‌شود که بار خارجی از طریق تماس مستقیم به بتن مقطع مختلط وارد می‌شود و وضعیت دوم نحوه انتقال بار بین مقطع فولادی و مصالح بتنی است که توسط تنش‌های چسبندگی یا برش‌گیر صورت می‌گیرد. ضوابطی که در ادامه بیان می‌شوند را می‌توان برای اعضای مختلط محوری محاط در بتن یا مقاطع پرشده با بتن به کار گرفت.

الف- مقاومت اتکایی مقاطع مختلط:

هنگامی که یک نیروی خارجی از طریق اتکای مستقیم به بتن مقطع مختلط محاط در بتن و یا پر شده با بتن اعمال می‌شود، در محل تماس بار و مصالح بتنی باید رابطه (۷-۴۸) ارضا شود.

Scanned with CamScanner