فصل ۸

طراحی صفحه ستون

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

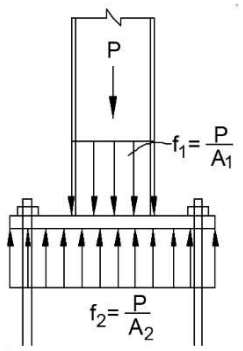
فهرست:

۸-۱	پیشگفتار
۸-۲	ظرفیت اتکایی بتن
۸-۳	کنترل ظرفیت خمشی صفحه ستون
8-4	کنترل ظرفیت برشی صفحه ستون
۸-۵	صفحه ستون تحت بار محوری فشاری بدون خروج از مرکزیت
۸-۶	طراحی صفحه ستون تحت خروج از مرکزیت کم
۸-۷	طراحی صفحه ستون تحت اثر بار محوری همراه با خروج از مرکزیت
۸-۸	خروج از مرکزیت کم
۸-۹	طراحی صفحه ستون با خروج از مرکزیت متوسط
۸-۱۰	طراحی صفحه ستون تحت خروج از مرکزیت زیاد
۸-۱۱	طراحی برای برش
12-8	طراحی میلمهار
۸-۱۳	طراحی صفحه ستون تحت بار محوری کششی
۸-۱۴	طراحی صفحه ستون با استفاده از سخت‌کننده (لچکی)
۸-۱۵	موارد ویژه در طراحی صفحه ستون
۸-۱۶	تستهای فصل هشتم
۸-۱۷	مسائل فصل هشتم

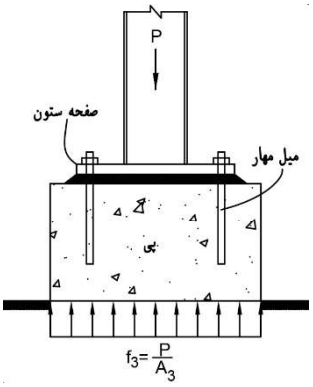
۸-۱ پیشگفتار

صفحه ستونها، صفحاتی هستند که نیروهای متمرکز پای ستون را به صورت گسترده روی سطح تکیه‌گاهی(روی سطح فونداسیون) توزیع می‌کنند. با توجه به اینکه وظیفه یک سازه تحمل بارهای وارده برآن و انتقال نیروها به تکیه‌گاههای مناسب است، طبیعتاً بایستی در هر مرحله از انتقال نیروها، تنشها به حد قابل قبولی کاهش یابد تا در مرحله نهایی، بارها بتوانند به سطح زمین منتقل شوند. صفحات زیر ستون در سازه‌های فولادی ضمن انتقال بارهای سازه به فونداسیون، نیروهای وارد برآن را در حد قابل قبول تنش مجاز بتن کاهش می‌دهند. به عبارت دیگر وظیفه اصلی صفحه ستونها کاهش تنشهای موجود در روی سطح فونداسیون و رساندن آنها به حد قابل تحمل و مجاز مصالحی است که فونداسیون از آن ساخته شده است.

فونداسیون نیز وظیفه توزیع و انتقال بارهای وارده از طرف سازه به زمین را بر عهده دارد و با کاهش تنشهای اعمالی برروی خاک تا حد قابل قبول، نیروهای یک سازه را به صورت رضایت بخشی به زمین منتقل می‌کند. در شکل زیر ستونی با نیروی فشاری P که توسط یک صفحه ستون به فونداسیون منتقل می‌شود، نشان داده شده است.



الف) انتقال نیرو از ستون به صفحه ستون



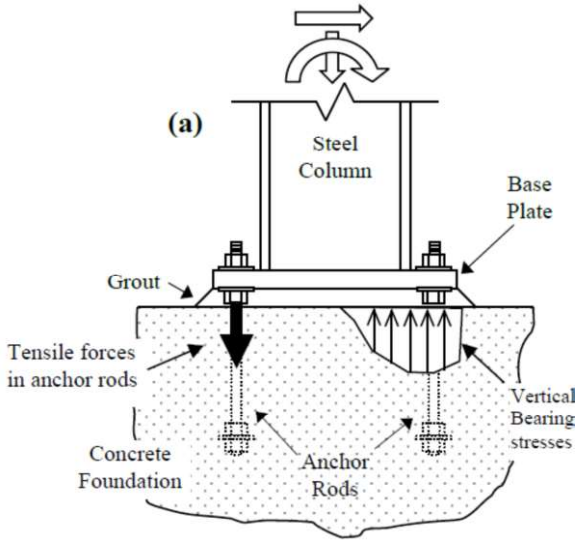
ب) انتقال نیرو از صفحه ستون به فونداسیون

شکل ۸-۱ توزیع و انتقال نیرو از ستون به فونداسیون

چون بتن نمی‌تواند تنش مستقیم را تحمل نماید، با استفاده از صفحه ستون، تنشها به سطح وسیعتری منتقل می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که $f_1=\frac{P_u}{A_1}$ (A_1 مساحت نیمرخ و f_1 تنش فشاری برروی صفحه ستون) بزرگتر از $f_2=\frac{P_u}{A_2}$ (A_2 مساحت صفحه ستون و f_2 تنش فشاری برروی بتن) و f_2 به مراتب بزرگتر از $f_3=\frac{P_u}{A_3}$ (A_3 سطح فونداسیون و f_3 تنش فشاری برروی زمین) است. از این رو مساحت صفحه ستون باید به اندازه‌ای باشد که تنش فشاری حاصل با اطمینان کافی به فونداسیون منتقل شود.

۸-۱-۱ تحلیل و طراحی اتصال پای ستون

تحلیل و طراحی صفحه ستونهای متداول، مانند صفحه ستون نشان داده شده در شکل زیر، بر اساس نیروها و لنگرهای ایجاد شده در اجزاء آن صورت می‌گیرد. نیروهای ناشی از بارگذاری و عکس‌العمل پی بر صفحه ستون، به صورت شماتیک در شکل زیر نمایش داده شده است.

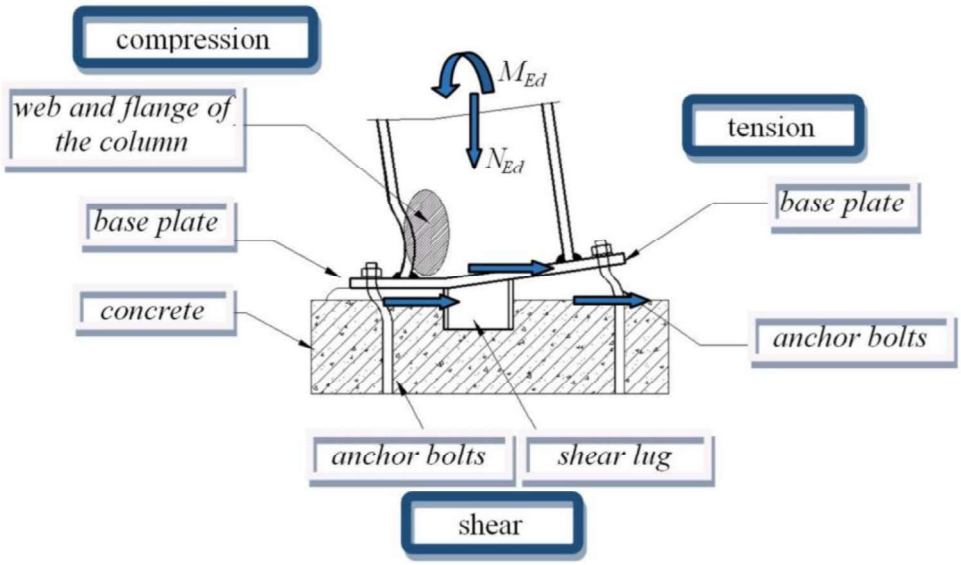


شکل ۸-۲ شماتیک نیروهای وارد شده به صفحه ستون

اجزاء صفحه ستون یا توجه به بارهای حاصل از ترکیب بارهای طراحی، به رده‌های زیر تقسیم‌بندی شده و طراحی می‌شوند.

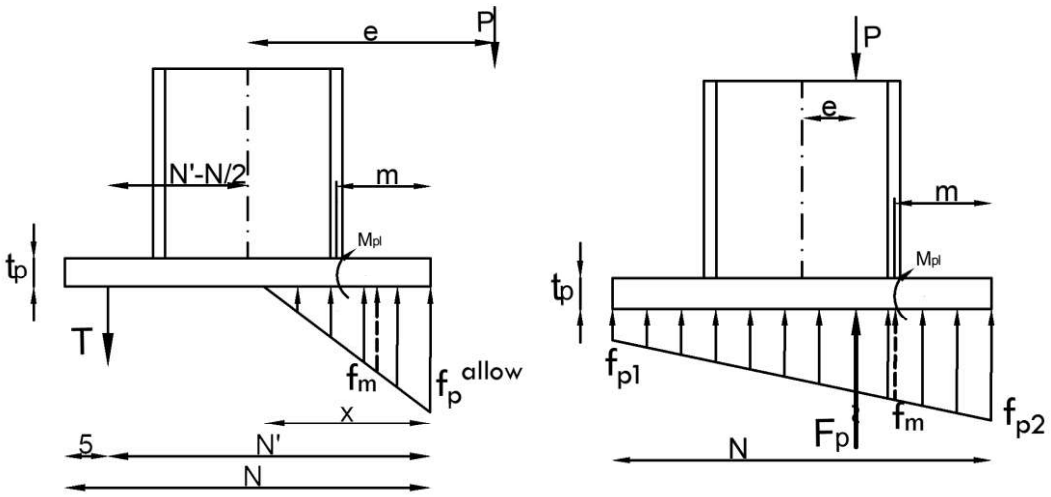
- مقاومت اتکایی پی بر اساس تنش ناشی از بار محوری فشاری و لنگر ستون.
- مقاومت کششی میل‌مهارها بر اساس نیروی ناشی از بار محوری کششی و لنگر ستون.
- مقاومت خمشی صفحه ستون ناشی از تنشهای اتکایی پی و کشش میل‌مهار.
- مقاومت برشی میل‌مهارها در صفحه ستون ناشی از بار برشی پای ستون.
- مقاومت برشی پی ناشی از بار برشی.
- مقاومت کششی پی ناشی جهت مهار کردن میل‌مهار کششی.
- طراحی اتصالات جوشی یا پیچ و مهره‌ای اتصال ستون به صفحه ستون.
- طراحی سخت‌کننده‌های اتصال پای ستون.

چنانچه مشاهده می‌شود کلیه اجزاء اتصال که در مسیر انتقال نیروهای ستون به پی و بستر خاک دارای نقش هستند، برای نیروی متناظر خود طراحی می‌شوند. در این کتاب، قسمتهایی از طراحی که در سازه‌های متداول دارای کاربرد بیشتری هستند، تشریح می‌گردد. جهت اطلاع از جزئیات و ضوابط کامل طراحی صفحه ستون و اجزاء آن، به آیین‌نامه‌های معتبر مراجعه گردد. وضعیتهای مختلف امکان خرابی یا غیر قابل قبول بودن اجزاء صفحه ستون، در شکل زیر مشاهده می‌شوند.



شکل ۸-۳ علائم مورد استفاده در طراحی صفحه ستون

علائم و پارامترهای تعریف شده در این کتاب، در ارتباط با طراحی صفحه ستون در شکل زیر مشاهده می‌شود.



شکل ۸-۴ علائم مورد استفاده در طراحی صفحه ستون

e	خروج از مرکزیت بار محوری و یا خروج از مرکزیت معادل برای لنگر خمشی ستون
N	طول صفحه ستون در راستای عمود بر محور خمش
B	عرض صفحه ستون، در راستای محور خمش ستون (عمود بر شکل)
A_{pl}	مساحت صفحه ستون $A_{pl} = B \times N$
d	بعد مقطع ستون در راستای عمود بر محور خمش
b_f	بعد مقطع ستون در راستای محور خمش (عمود بر شکل)
m	طول طره‌ای موثر صفحه ستون برای خمش ورق در راستای خمش ستون، برابر فاصله لبه ورق تا خط فرضی خمش ورق
n	طول طره‌ای موثر صفحه ستون برای خمش ورق در راستای عمود بر خمش ستون، برابر فاصله لبه صفحه تا خط فرضی خمش (عمود بر شکل)
t_p	ضخامت ورق صفحه ستون

f_p^{allow} ظرفیت یا مقاومت تنش اتکایی طراحی بتن

f_{p1}, f_{p2}, f_p مقدار تنش اتکایی بتن در موقعیت لبه‌های صفحه ستون

f_m مقدار تنش اتکایی بتن در موقعیت خط فرضی خمش ورق (مرکز بال ستون)

x طول ناحیه تنش فشاری اتکایی یا سطح صفحه ستون در تماس با شالوده

N' فاصله لبه صفحه ستون (لبه دارای تنش اتکایی) تا موقعیت نیروی کششی میل‌مهارها (مرکز سوراخ ورق) $N' = N - 5cm$
در شکل بالا، فاصله مرکز سوراخ تا نزدیکترین لبه ورق برابر ۵ سانتیمتر فرض شده است.

P نیروی محوری ستون یا نیروی محوری معادل با لنگر ستون

T نیروی کششی میل‌مهارها

F_p نیروی معادل با تنشهای فشاری اتکایی در موقعیت برایند تنشها

M_{pl} لنگر ایجاد شده در ورق صفحه ستون در موقعیت خط فرضی خمش ورق

۸-۱-۲ حدس اولیه ابعاد ورق

از آنجا که روند طراحی صفحه ستون، دارای بخشهای مختلفی بوده که ممکن است هر یک از آنها دارای سعی و خطا نیز باشد، بهتر است حدس اولیه هندسه ورق (شامل ابعاد، ضخامت و فاصله سوراخها از لبه) بر اساس ضوابط و محدودیتهای اجرایی انجام شود. بدین ترتیب در روند طراحی صفحه ستون، چنانچه مشخصات هندسی فرض شده جوابگو نباشند، با تغییر آنها مشخصات نهایی حاصل خواهد شد.

نکات فنی و اجرایی صفحه ستونها در انتهای این فصل از کتاب تشریح شده است. توصیه می‌شود جهت انطباق طراحی صفحه ستون با مسائل اجرایی، قسمت مذکور به صورت کامل مورد مطالعه قرار گیرد. با این وجود چند نکته مهم که دانستن آنها در ابتدای روند طراحی صفحه ستون الزامی است، به قرار زیر می‌باشد.

- ابعاد صفحه ستون به گونه‌ای انتخاب شود که فضای کافی برای قرارگیری مقطع ستون، وسایل اتصال ستون به صفحه، سوراخها و واشرهای مورد نیاز وجود داشته باشد. بنابراین توصیه می‌شود اندازه صفحه ستون از هر طرف، حداقل ۷ سانتیمتر بیش از بعد ستون در همان راستا باشد.

بدین ترتیب با دانستن مقطع ستون، ابعاد حداقل صفحه ستون، با توجه به مسائل اجرایی، مشخص می‌گردد.

- توصیه می‌شود ابعاد صفحه ستون مضربی از ۵ سانتیمتر انتخاب شود.

لذا ابعاد حداقل تعیین شده قبلی، با مضربی از ۵ به صورت افزایشی گرد[1] می‌شود.

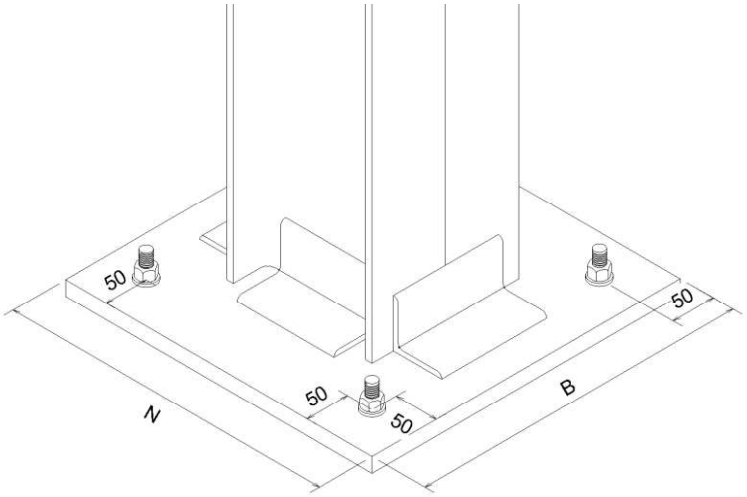
- صفحه ستون بایستی توسط میل‌مهارهایی که در بتن کار گذاشته شده، در جای خود ثابت و تنظیم گردد. برای اتصال صفحه ستون به فونداسیون، حداقل از ۴ میل‌مهار به قطر ۲۰ میلیمتر $(4\Phi 20)$ در چهار گوشه صفحه، استفاده می‌شود.

بدین ترتیب حداقل میل‌مهار مورد استفاده در صفحه ستون، مشخص شده است.

[1] Round-U

- برای بستن و تنظیم راحت مهره‌ها، لازم است بین مرکز میل‌مهارها تا کنار صفحات، فاصله‌ای حداقل مساوی ۲ برابر قطر میل‌مهار رعایت گردد.

به عبارت دیگر برای میل‌مهار با قطر ۲ سانتیمتر، حداقل فاصله ۴ سانتیمتر از مرکز سوراخ تا لبه صفحه لازم است که با افزایش قطر میل‌مهار، حداقل فاصله مورد نیاز افزایش می‌یابد. لذا در مسائل طراحی این فاصله به صورت پیش فرض برابر ۵ سانتیمتر در نظر گرفته می‌شود. شمای صفحه ستون و برخی ابعاد ذکر شده، در شکل زیر مشاهده می‌شود.

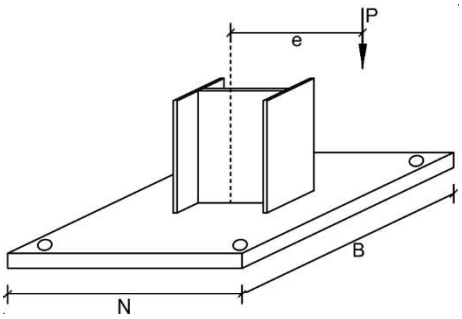


شکل ۸-۵ حداقل محدودیتهای ابعادی صفحه ستون

۸-۱-۳ خروج از مرکزیت بار محوری ستون

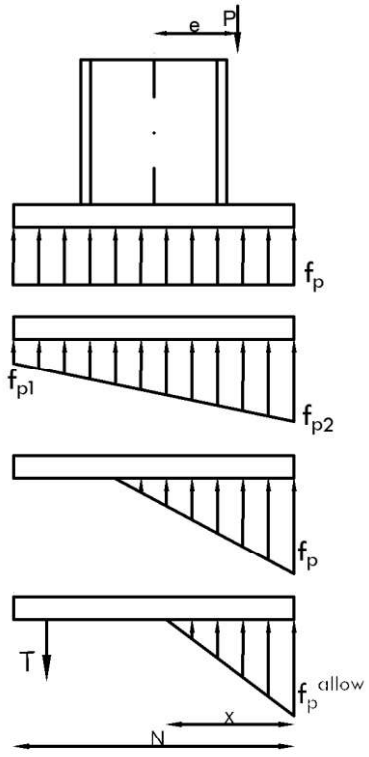
در اتصالات گیردار پای ستون، بار خمشی ستون به صفحه ستون منتقل می‌شود. بار خمشی مذکور، از طریق اعمال لنگر متمرکز به ستون و یا اعمال نیروی محوری با خروج از مرکزیت، ایجاد می‌شود که از دیدگاه محاسبات، این دو قابل تبدیل به یکدیگر هستند. به عبارت دیگر می‌توان مطابق رابطه زیر، مجموعه لنگر خمشی و نیروی محوری را به صورت یک نیروی فشاری ضریبدار P_u با خروج از مرکزیت e در نظر گرفت که در شکل نیز مشاهده می‌شود.

$$M_u = P_u \times e \rightarrow e = \frac{M_u}{P_u}$$



شکل ۸-۶ صفحه ستون تحت اثر نیروی محوری با خروج از مرکزیت

بر اساس مقدار خروج از مرکزیت، حالتهای مختلفی از توزیع تنش در زیر صفحه ستون پدید می‌آید که در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۸-۷ حالات مختلف توزیع تنش در زیرصفحه ستون

از آنجا که در وضعیتهای مختلف خروج از مرکزیت، توزیع نیروها و تنشهای صفحه ستون و در نتیجه محاسبات آن دارای تفاوت است، سه وضعیت «خروج از مرکزیت کم»، «خروج از مرکزیت متوسط» و «خروج از مرکزیت زیاد» تعریف شده و مشخصات کلی آنها در این بخش ذکر شده است. تفاوت وضعیتها با یکدیگر و جزئیات محاسبات آنها، در بخشهای مرتبط با آنها، با تفصیل بیشتری ارائه می‌گردد.

۸-۱-۳-۱ خروج از مرکزیت کم

هنگامی که صفحه ستون تحت تأثیر نیروی محوری خالص است، توزیع تنش یکنواخت برابر $f_p = \frac{P_u}{A}$ است. هنگامی که صفحه ستون تحت تأثیر نیروی محوری همراه با خروج از مرکزیت کم قرار دارد، تنش تماسی بین صفحه ستون و فونداسیون به صورت فشاری و با توزیع خطی است و صفحه به کشش نمی‌افتد. وضعیت «خروج از مرکزیت کم» به حالتی اطلاق می‌شود که کل سطح زیر صفحه ستون دارای تنش مثبت بوده و در نتیجه تحت فشار باشد. نیروی عکس‌العمل اتکایی، برایند تنشهای ایجاد شده است که در این وضعیت، موقعیت آن دقیقا زیر نیروی محوری بوده و نزدیک به مرکز صفحه ستون خواهد بود.

وضعیت «نیروی محوری بدون خروج از مرکزیت»، در واقع وضعیت مستقلی نبوده و حالت خاصی از وضعیت «خروج از مرکزیت کم» محسوب می‌گردد.

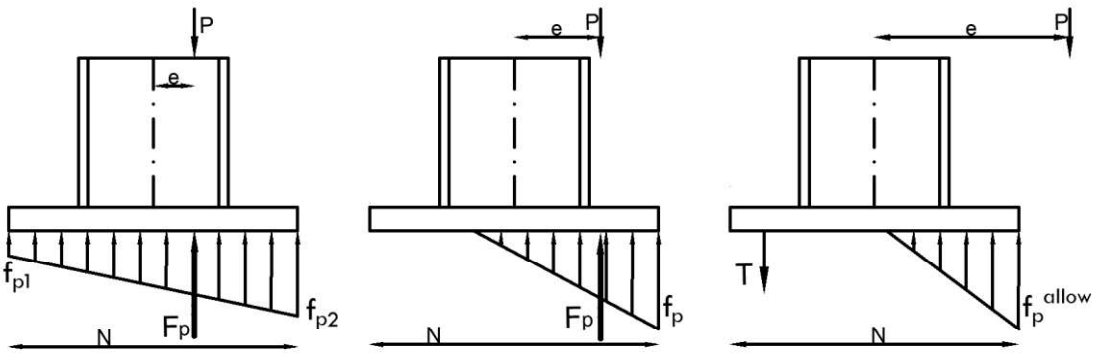
۸-۱-۳-۲ خروج از مرکزیت متوسط

با افزایش خروج از مرکزیت نسبت به وضعیت قبل، موقعیت نیروی عکس‌العمل اتکایی از مرکز صفحه ستون فاصله می‌گیرد تا لنگر ایجاد شده را خنثی نماید. در این وضعیت نیز، موقعیت آن دقیقا زیر نیروی محوری است. وضعیت «خروج از مرکزیت متوسط» به حالتی اطلاق می‌شود که تنش فشاری در بخشی از صفحه ستون (و نه تمام آن) ایجاد شده است ولی تنشهای اتکایی، لنگر بار اعمالی را خنثی نموده و نیازی به نیروهای کششی میل‌مهار نیست. فرض بر آن است که در این وضعیت، نیروی کششی در میل‌مهار ایجاد نمی‌گردد.

۸-۱-۳-۳ خروج از مرکزیت زیاد

با افزایش خروج از مرکزیت نسبت به وضعیت قبل، موقعیت نیروی عکس‌العمل اتکایی از مرکز صفحه ستون بیشتر فاصله می‌گیرد تا لنگر ایجاد شده را خنثی نماید. وضعیت «خروج از مرکزیت زیاد» به حالتی اطلاق می‌شود که تنش فشاری در بخشی از صفحه ستون (و نه تمام آن) ایجاد شده است ولی تنشهای اتکایی، پاسخگوی لنگر بار اعمالی نبوده و برای جبران آن، نیروهای کششی در میل‌مهارها ایجاد می‌شود. با توجه به نیروی کششی میل‌مهارها، در این وضعیت موقعیت نیروی اتکایی زیر نیروی محوری نخواهد بود.

سه وضعیت خروج از مرکزیت در شکل زیر مشاهده می‌شود.



الف- خروج از مرکزیت کم ب- خروج از مرکزیت متوسط پ- خروج از مرکزیت زیاد

شکل ۸-۸ وضعیتهای خروج از مرکزیت نیروی محوری

۸-۲ ظرفیت اتکایی بتن

بر اساس بارهای اعمال شده به صفحه ستون در وضعیتهای مختلف خروج از مرکزیت، تنشهای اتکایی در پی ایجاد می‌شود که معرف «نیاز» اتکایی خواهد بود. از سوی دیگر، ظرفیت اتکایی یا مقاومت اتکایی قابل تحمل بتن پی در محل تماس با ورق صفحه ستون، بر اساس مقاومت فشاری نهایی بتن به دست می‌آید. از آنجا که امکان تغییرات در مشخصات بتن بیشتر از فولاد است، انتظار می‌رود ضریب اطمینان مقاومت اتکایی بتن به صورت محافظه‌کارانه‌تری انتخاب شود. مقاومت اتکایی بتن در محل تماس با ورق صفحه ستون، یکی از عوامل تعیین ابعاد صفحه ستون است.

ظرفیت اتکایی طراحی برای مصالح نشیمن، توسط آیین‌نامه با رابطه کلی $P_u \le \phi_c P_p$ کنترل می‌شود. جهت بررسی ظرفیت اتکایی مصالح بتنی، ϕ_c ضریب کاهش مقاومت بتن برابر 0.65 و P_p نیروی مقاومت اتکایی اسمی حالت حدی خردشدگی مصالح بتنی، برابر $0.85f'_cA_1$ تعیین شده است. اعتبار این رابطه در وضعیتی است که سطح بتن از سطح صفحه ستون بزرگتر نباشد. در غیر این صورت، چنانچه سطح بتن از همه جهات، از صفحه بارگذاری (صفحه ستون) بزرگتر باشد، می‌توان ظرفیت اتکایی فوق را با ضریب $\sqrt{\frac{A_2}{A_1}}$ افزایش داد که حداکثر این نسبت، به عدد ۲ محدود می‌شود. در این رابطه A_1 سطح بارگذاری $(A_{pl} = A_1 = BN)$ و A_2 بزرگترین سطحی از پی است که از نظر هندسی (نسبت طول به عرض) مشابه و بزرگتر سطح ورق صفحه ستون باشد، به نحوی که مطابق شکل زیر، مرکز دو سطح در یک محل قرار داشته و $\sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \le 2$ یا به عبارت دیگر $A_2 \le 4A_1$برقرار باشد.

$$P_u \le \phi_c P_p = \phi_c \times 0.85\, f'_c A_1 \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \le 1.7 f'_c A_1$$

$$f_p = \frac{P_u}{A_{pl}} \le f_p^{allow} = \phi_c \frac{P_p}{A_{pl}}$$

از آنجا که نیروی محوری، نیروی برشی، لنگرها و پیچش وارد شده بر صفحه ستون، باعث ایجاد تنشهای مختلفی در نواحی متفاوت بتن می‌گردند، با استفاده از ظرفیت به صورت تنش، کنترل وضعیتهای مختلف دارای سهولت بیشتری خواهد بود. بدین ترتیب با تقسیم ظرفیت اتکایی بر سطح مقطع، تنش فشاری متناظر با ظرفیت اتکایی طراحی به صورت زیر قابل کنترل است:

$$\boldsymbol{f_p^{allow} = \phi_c \times 0.85\, f'_c \times min\left(\sqrt{\frac{A_2}{A_1}}, 2\right)} \qquad \textbf{۱-۸}$$

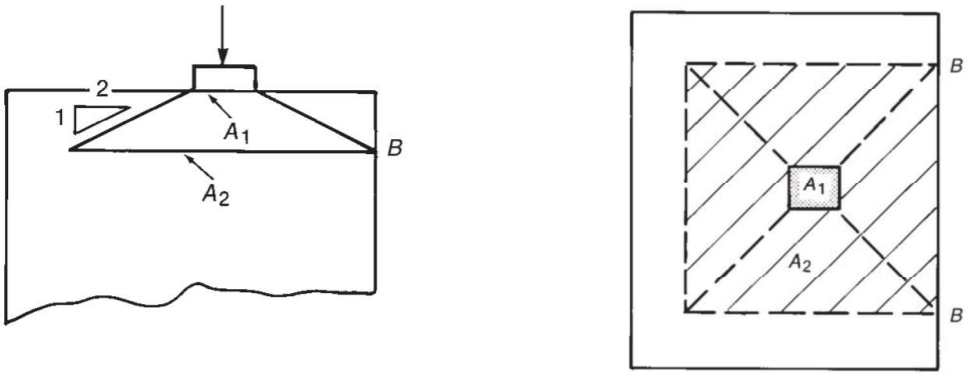
ϕ_c ضریب کاهش مقاومت اتکایی بتن برابر $\phi = 0.65$

f'_c مقاومت فشاری نهایی بتن

f_p^{allow} ظرفیت یا مقاومت تنش اتکایی طراحی بتن

A_1 سطح صفحه ستون در تماس با شالوده $(A_1 = A_{pl} = BN)$

A_2 سطح فعال پی در تحمل اتکاء



شکل ۸-۹ پلان و مقطع پی برای تعیین ضریب $\sqrt{\frac{A_2}{A_1}}$ صفحه ستون

در مسائل طراحی چنانچه اندازه ورق صفحه ستون مشخص نباشد، با استفاده از رابطه کنترل ظرفیت $P_u \leq \phi P_p$ سطح ورق مورد نیاز صفحه ستون، قابل محاسبه خواهد بود. به عنوان مثال چنانچه سطح مصالح اتکایی برابر سطح صفحه بارگذاری باشد، یا به عبارت دیگر $A_1 = A_2$ برقرار باشد خواهیم داشت:

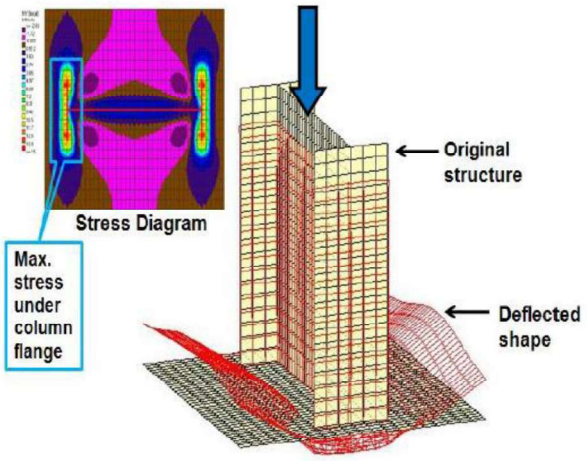
$$A_1 = A_2 \rightarrow P_u \leq \phi_c P_p = \phi_c \times 0.85\, f_c' A_1 \times 1 \rightarrow A_1 \geq \frac{P_u}{0.85 \phi_c f_c'}$$

و چنانچه $A_2 \geq 4A_1$ برقرار باشد خواهیم داشت:

$$A_2 \geq 4A_1 \rightarrow P_u \leq \phi_c P_p = \phi_c \times 0.85\, f_c' A_1 \times 2 \rightarrow A_1 \geq \frac{1}{2} \times \frac{P_u}{0.85 \phi_c f_c'}$$

در بیشتر ستونهای متداول، صفحه ستون به صورت مستقیم بر روی گروت قرار می‌گیرد. دلیل این امر، مقاومت فشاری زیاد گروت نسبت به بتن است. بدین ترتیب سطح گروت برابر سطح صفحه ستون بوده و بیش از سطح بتن خواهد بود. با توجه به دو حالت بررسی شده بالا، **توصیه می‌گردد مقاومت فشاری گروت، دو برابر مقاومت فشاری بتن انتخاب شود.**

چنانچه صفحه ستون دارای انعطاف‌پذیری بیش از اندازه باشد، تنش اتکایی بر سطح گسترش نیافته و در نواحی میانی متمرکز می‌شود. این وضعیت در شکل زیر نمایش داده شده است که با افزایش ضخامت ورق و یا استفاده از سخت‌کننده قابل حل می‌باشد.

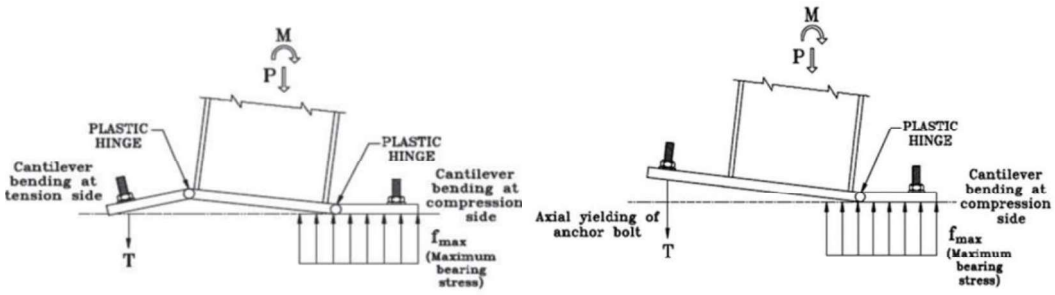


شکل ۸-۱۰ تغییرشکل خمشی صفحه ستون ناشی از تنشهای اتکایی

۸-۳ کنترل ظرفیت خمشی صفحه ستون

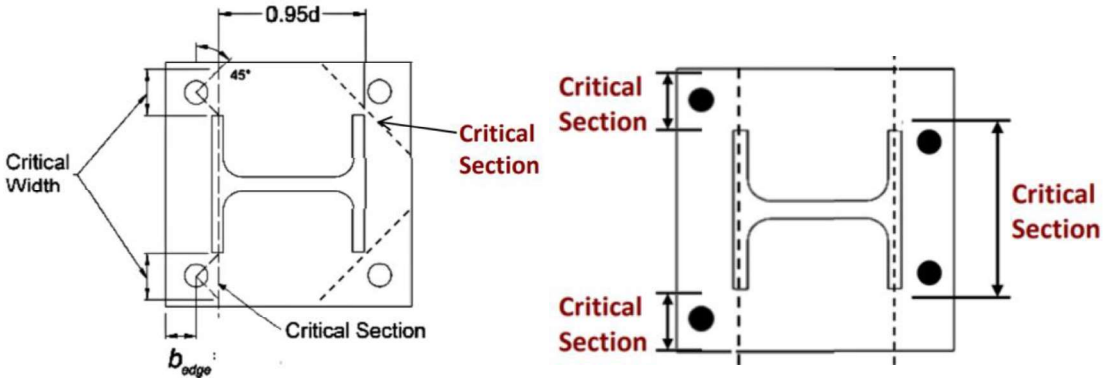
بر اساس بارهای اعمال شده به صفحه ستون در وضعیتهای مختلف خروج از مرکزیت، تنشهای اتکایی در پی و نیروهای کششی در میل‌مهارها ایجاد می‌شود. توزیع این نیروها بر روی صفحه ستون، خمشی ایجاد می‌کند که باید توسط ورق، تحمل شود. رفتار ورق در این حالت، مشابه تیری با مقطع مستطیلی است که تحت خمش حول محور اصلی قرار دارد. از آنجا که امکان کمانش پیچشی-جانبی در آن وجود ندارد، لذا طراحی خمشی ورق بر حسب لنگر پلاستیک انجام شده و اساس مقطع پلاستیک مقطع مستطیلی، در محاسبات استفاده خواهد شد.

طراحی خمش برای نقاط بحرانی صورت می‌گیرد، یعنی نقاطی که بیشترین لنگر خمشی در آنها وجود دارد. با توجه به هندسه ورق صفحه ستون، این نقاط خطوطی را تشکیل می‌دهند که با نامهای «خطوط فرضی بحرانی خمش» یا «خطوط بحرانی خمش» شناخته می‌شوند. خطوط بحرانی معمولا مطابق شکل زیر، در دو جهت، در زیر بالهای ستون ایجاد می‌گردند.



شکل ۸-۱۱ تسلیم خمشی صفحه ستون

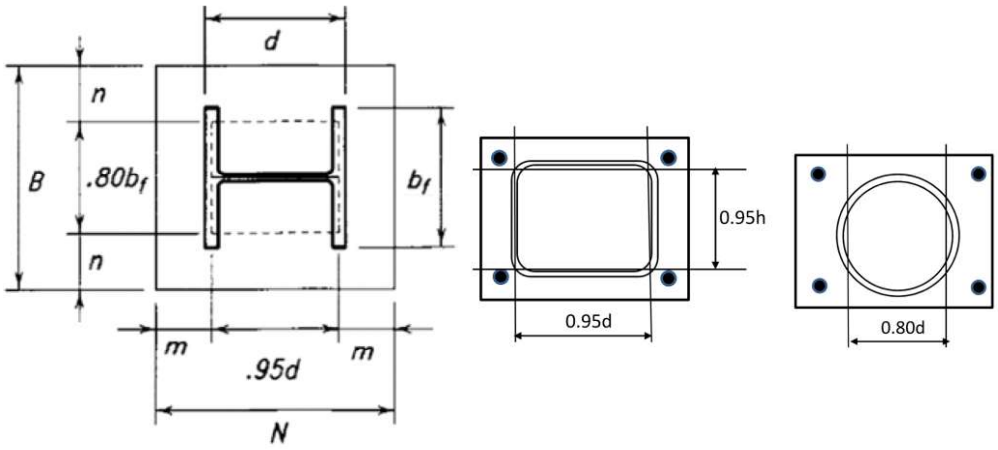
برای صفحه ستون دارای ستون با مقطع I شکل، چند خط بحرانی خمش در شکل زیر نشان داده شده‌اند.



شکل ۸-۱۲ خطوط بحرانی خمش در صفحه ستون

۸-۳-۱ محاسبه نیاز خمشی صفحه ستون

با توجه به نیروهای کششی میل‌مهار و نیروهای فشاری اتکایی، خمش ایجاد شده در صفحه ستون، بر روی خط فرضی خمش قابل محاسبه خواهد بود که «نیاز» خمشی صفحه ستون را مشخص می‌نمایند. خط فرضی خمش که به صورت متداول در مسائل طراحی استفاده می‌شود، خطی است که از لبه ورق به اندازه m فاصله دارد. برای تعیین مقادیر m, n به شکل زیر مراجعه گردد.



شکل ۸-۱۳ تعیین مقادیر m, n

۸-۳-۱-۱ نیاز خمشی تنش اتکایی

تنشهای اتکایی نشیمن ایجاد شده در راستای خمش ستون، در ناحیه‌ای به طول L و عرض c به ورق صفحه ستون بار گسترده‌ای را اعمال می‌کنند. بار اعمال شده در ورق صفحه ستون ایجاد خمش نموده که مقدار آن در موقعیت خط فرضی خمش، قابل محاسبه است. طول طره‌ای صفحه ستون در راستای محور x از ماکزیمم مقادیر طولی داخل یا خارج خط فرضی خمش، مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$L_x = \max(m, \lambda n')$$

و طول طره‌ای صفحه ستون در راستای محور y از ماکزیمم مقادیر طولی داخل یا خارج خط فرضی خمش، مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$L_y = \max(n, \lambda n')$$

در رابطه فوق n' فاصله میان خط فرضی خمش با جان یا بال ستون است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود[۲].

$$n' = \frac{\sqrt{d\, b_f}}{4}$$

ضریب λ ار رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$\lambda = \frac{2\sqrt{X}}{1+\sqrt{1-X}} \le 1 \; ; X = \frac{4d\, b_f}{\left(d+b_f\right)^2} \times \frac{P_u}{\phi_c P_p}$$

البته آیین‌نامه اجازه می‌دهد ضریب λ را به صورت محافظه‌کارانه، برابر واحد در نظر گرفت. بدین ترتیب مقدار L در هر راستا قابل محاسبه خواهد بود.

$$\boldsymbol{L_x = max\left(m, \frac{\sqrt{d\, b_f}}{4}\right); L_y = max\left(n, \frac{\sqrt{d\, b_f}}{4}\right)} \qquad ۲\text{-}۸$$

لنگر خمشی نهایی ناشی از تنش اتکایی، در طول طره L_x و عرض c از رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود.

$$\boldsymbol{M_{u,pl}^{(1)} = f_P L_x c\left(\frac{L_x}{2}\right) + \left(f_p - f_m\right) L c\left(\frac{2L_x}{3}\right)} \qquad ۳\text{-}۸$$

که در رابطه فوق f_p مقدار تنش اتکایی در لبه ورق و f_m مقدار تنش در خط خمش است و در فاصله میان آنها، تنش به صورت خطی تغییر می‌نماید. از آنجا که در راستای y مقدار تنشها متغیر است، از میانگین تنش برای محاسبه لنگر استفاده می‌شود. بدین ترتیب لنگر خمشی نهایی ناشی از تنش اتکایی، در طول طره L_y و عرض c از رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود.

$$\boldsymbol{M_{u,pl}^{(2)} = \frac{P_u}{NB} L_y c\left(\frac{L_y}{2}\right)} \qquad ۴\text{-}۸$$

لنگر خمشی نهایی ناشی از نیروی کششی میل‌مهار، در طول طره از رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود.

$$\boldsymbol{M_{u,pl}^{(3)} = T_u\left(N' - \frac{N}{2}\right)} \qquad ۵\text{-}۸$$

و لنگر خمشی نهایی طرح، ماکزیمم مقادیر محاسبه شده خواهد بود.

$$\boldsymbol{M_{u,pl} = max\left(M_u^{(1)}, M_u^{(2)}, M_u^{(3)}\right)} \qquad ۶\text{-}۸$$

---

[۲] طبق توصیه آیین‌نامه، توزیع تنش در دو ناحیه داخل و خارج خط فرضی خمش به صورت محافظه‌کارانه، یکسان در نظر گرفته شده است.

۸-۳-۲ محاسبه ظرفیت خمشی صفحه ستون

از طرف دیگر، ظرفیت خمشی صفحه ستون با توجه به اساس مقطع پلاستیک آن تعیین می‌شود. کنترل ظرفیت خمشی قسمتی از صفحه ستون به عرض c مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$M_{u,pl} \le \phi_b M_{n,pl}$$

که مقاومت خمشی طراحی صفحه ستون برابر است با:

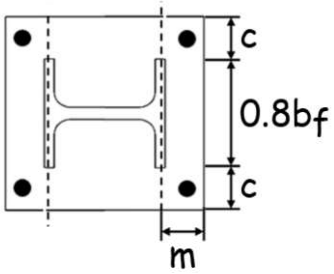
$$\phi_b M_{n,pl} = \phi_b f_y \frac{c\, t_p^2}{4}$$

بدین ترتیب، ضخامت مورد نیاز صفحه ستون در حالت حدی تسلیم، از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\boldsymbol{t_{pl} \ge \sqrt{\frac{4M_{u,pl}}{\phi_b c f_y}}} \qquad \textbf{۷-۸}$$

ϕ_b	ضریب کاهش مقاومت برابر $\phi_b = 0.9$	f_y	تنش تسلیم مصالح ورق
t_{pl}	ضخامت ورق	c	طول خط فرضی خمش صفحه ستون
$M_{u,pl}$	لنگر نهایی در خط بحرانی خمش صفحه ستون		

در رابطه فوق c عرضی از صفحه ستون است که در برابر خمش مقاومت می‌کند. در شکل زیر، میل‌مهار در روبروی ناحیه آزاد ورق قرار داشته و لذا کشش میل‌مهار، در طول c از خط فرضی ایجاد خمش خواهد نمود.



شکل ۸-۱۴ ناحیه موثر در برابر خمش صفحه ستون

در این حالت، برای تعیین c خواهیم داشت:

$$N = 2c + 0.8b_f \rightarrow c = \frac{N - 0.8b_f}{2}$$

لازم به ذکر است ضخامت صفحه ستون، بر اساس ظرفیت خمشی ورق در هر راستا و ظرفیت برشی ورق محاسبه گردیده و بیشترین مقدار آنها انتخاب خواهد شد..

۸-۴ کنترل ظرفیت برشی صفحه ستون

۸-۴-۱ برش

چنانچه در محل انتهای ستون نیروی برشی موجود باشد لازم است میل‌مهارهای صفحه ستون برای این برش طراحی شوند.

۸-۵ صفحه ستون تحت بار محوری فشاری بدون خروج از مرکزیت

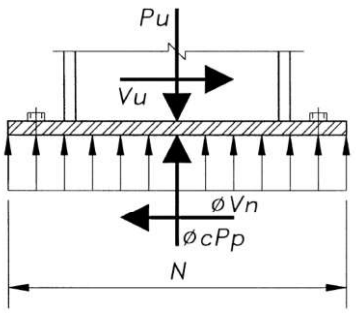
چنانچه اتصال پای ستون تحت بار فشاری خالص (بدون خروج از مرکزیت) قرار گیرد، لازم است ابعاد صفحه ستون به اندازه کافی بزرگ باشد تا بار انتقال یافته به بتن زیر صفحه ستون، از حد تحمل فشاری بتن فراتر نرود. همچنین ضخامت صفحه ستون باید در حد قابل قبول باشد.

مثال ۸-۱

ستونی از مقطع $2IPE20$ تحت اثر بارهای محوری $P_D = 30ton$ و $P_L = 15ton$ بدون خروج از مرکزیت قرار دارد. ورق صفحه ستون را با فرض استفاده از بتن $C25$ طراحی نمایید. ترکیب بار $1.2D + 1.6L$ مد نظر است.

حل:

شمای کلی صفحه ستون در شکل زیر نمایش داده شده است.



مشخصات هندسی $2IPE20$ از جدول اشتال تعیین می‌شود.

$$2IPE20 \rightarrow d = 20cm, b_f = 2 \times 10 = 20cm$$

$$C25 \rightarrow \mathrm{f'_c} = 250\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{cm^2}} = 0.25\frac{\mathrm{ton}}{\mathrm{cm^2}}$$

گام ۱- تعیین بار نهایی

$$P_u = 1.2P_D + 1.6P_L = 1.2 \times 30 + 1.6 \times 15 = 60\ ton$$

گام ۲- کنترل ضوابط اجرایی و حدس ابعاد صفحه ستون $N \times B$

$$N \geq d + 2 \times 7cm = 20 + 2 \times 7 = 34cm$$
$$B \geq b_f + 2 \times 7cm = 20 + 2 \times 7 = 34cm$$
$$\rightarrow try\ PL\ 40 \times 40cm \rightarrow N = B = 40cm$$

گام ۳- محاسبه نیاز اتکایی f_p

$$\mathrm{f_P} = \frac{\mathrm{P_u}}{\mathrm{BN}} = \frac{60}{40 \times 40} = 0.038 \frac{\mathrm{ton}}{\mathrm{cm^2}}$$

گام ٤- کنترل ظرفیت اتکایی

از آنجا که وضعیت $\mathrm{A_1}, \mathrm{A_2}$ مشخص نیست، بحرانی‌ترین حالت یعنی $\mathrm{A_1} = \mathrm{A_2}$ فرض می‌گردد.

$$\mathrm{f_p} \leq \mathrm{f_P^{allow}} = 0.85\ \phi_c \mathrm{f'_c} \times min\left(\sqrt{\frac{\mathrm{A_2}}{\mathrm{A_1}}}, 2\right) \leq \phi_c \times 0.85\ \mathrm{f'_c A_{pl}}$$

$$f_p = 0.038 \frac{ton}{cm^2} \leq f_P^{allow} = 0.65 \times 0.85 \times 0.25 = 0.138 \frac{ton}{cm^2} \rightarrow OK$$

اگر ظرفیت اتکایی جوابگو نبود، سطح مورد نیاز صفحه ستون بدین صورت محاسبه شده و ابعاد آن اصلاح می‌گردد.

$$f_p = \frac{P_u}{A_{pl}} \leq f_P^{allow} = 0.138 \frac{ton}{cm^2} \rightarrow A_{pl} = BN \geq \frac{P_u}{f_P^{allow}}$$

گام ۵- محاسبه نیازخمشی صفحه ستون

$$m = \frac{N - 0.95d}{2} = \frac{40 - 0.95 \times 20}{2} = 10.5cm$$
$$n = \frac{B - 0.8b_f}{2} = \frac{40 - 0.8 \times 20}{2} = 12cm$$

$$n' = \frac{\sqrt{d\ b_f}}{4} = \frac{\sqrt{20 \times 20}}{4} = 5cm$$
$$c = max(m, n, n') = max(10.5,12,5) = 12cm$$
$$M_{u,pl} = f_P \frac{Bc^2}{2} = 0.038 \times \frac{40 \times 12^2}{2} = 109.4ton.cm$$

گام ٦- کنترل ظرفیت خمشی صفحه ستون

$$M_{u,pl} \leq \phi_b M_{n,pl} = \phi_b f_y Z_{pl} = \phi_b f_y \frac{Bt_p^2}{4} \rightarrow t_{pl} \geq \sqrt{\frac{4M_{u,pl}}{\phi B f_y}}$$

$$M_{u,pl} = 109.4 \le \phi_b f_y \frac{Bt_p^2}{4} = 0.9 \times 2.4 \times 40 \times \frac{t_p^2}{4}\ ton.cm \rightarrow t_p \ge 1.59cm$$

و یا با استفاده از رابطه مستقیم:

$$t_{pl} \ge \sqrt{\frac{4M_{u,pl}}{\phi f_y B}} = \sqrt{\frac{4 \times 109.4}{0.9 \times 2.4 \times 40}} = 1.59cm \rightarrow t_{pl} = 1.6cm$$

گام ۷- نتیجه

$$\rightarrow USE\ PL40 \times 40 \times 1.6cm$$

برای این صفحه ستون حداقل $4\Phi20$ به عنوان میل‌مهار در چهار گوشه صفحه ستون استفاده می‌شود.

۸-۶ طراحی صفحه ستون تحت خروج از مرکزیت کم

با استفاده از معادلات استاتیک و روش طراحی ضرایب بار و مقاومت، روشهایی برای طراحی صفحه ستون ابداع شده است[۳]. این محاسبات بر معادل‌سازی لنگر پای ستون با خروج از مرکزیت معادل با آن توسط رابطه $e = \frac{M_u}{P_u}$ استوار است. کم بودن خروج از مرکزیت، با این ملاک تعیین می‌شود که لنگر ایجاد شده توسط فشار زیر صفحه ستون تحمل شود و خروج از مرکزیت زیاد، معادل ایجاد کشش در میل‌مهار می‌باشد. همچنین در این محاسبات، تنش زیر صفحه ستون به صورت یکنواخت فرض می‌شود که در ویرایشهای تکمیلی، توزیع تنش مثلثی نیز به آن افزوده شده است.

۸-۶-۱ روش کلی طراحی تحت خروج از مرکزیت کم

روند کلی طراحی به صورت زیر خواهد بود:

الف- تعیین بار محوری و لنگر اعمال شده

ب- انتخاب ابعادی برای صفحه ستون

پ- محاسبه خروج از مرکزیت معادل و محاسبه خروج از مرکزیت بحرانی

ت- در صورتی که خروج از مرکزیت از مقدار بحرانی آن کمتر باشد، ادامه روند و در غیر این صورت، به طراحی وضعیت «خروج از مرکزیت زیاد» رجوع می‌شود.

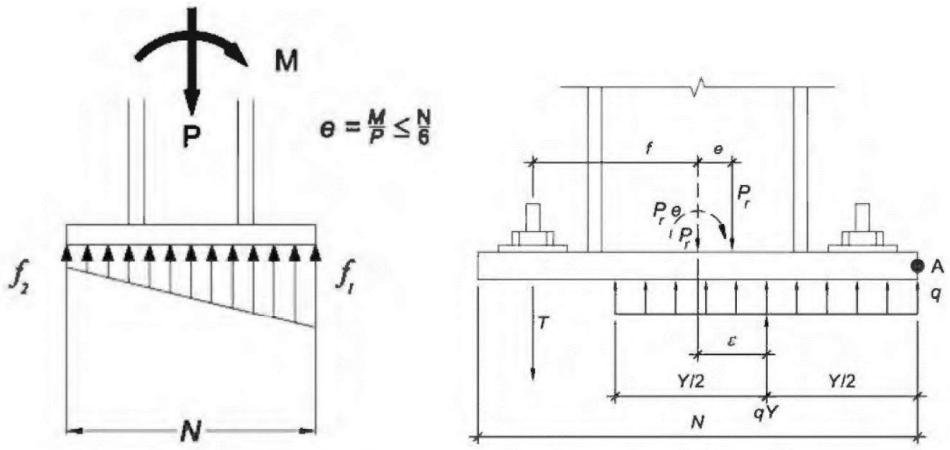
ث- تعیین طول اتکایی

ج- تعیین حداقل ضخامت مورد نیاز صفحه ستون

چ- تعیین اندازه میل‌مهار

[3] Drake and Eklin, 1999, Doyle and Fisher, 2005

نیروهای وارد بر صفحه ستون شکل زیر را در نظر بگیرید.



شکل ۸-۱۵ بیرون کشیدگی میل‌مهار کناری و کشش ناحیه بتنی

محاسبات

$$Case\ II$$

$$\Sigma F_y = 0 \rightarrow P_u = F_p$$

$$F_p = \frac{f_p B x}{2} \rightarrow x = \frac{2F_p}{f_p B} = \frac{2P_u}{f_p B}$$

$$\Sigma M = 0 \rightarrow F_p\left(\frac{x}{3}\right) = P_u\left(\frac{N}{2} - e\right) \rightarrow x = 3\left(\frac{N}{2} - e\right) \rightarrow e = \frac{N}{2} - \frac{x}{3}$$

$$x = \frac{2P_u}{f_p B} = 3\left(\frac{N}{2} - e\right) \rightarrow f_p = \frac{2}{3}\frac{\frac{P_u}{BN}}{\left(\frac{1}{2} - \frac{e}{N}\right)}$$

$$f_p \leq f_p^{allow} \rightarrow \frac{2}{3}\frac{\frac{P_u}{BN}}{\left(\frac{1}{2} - \frac{e}{N}\right)} \leq f_p^{allow} \rightarrow \frac{2}{3}\frac{P_u}{BNf_p^{allow}} \leq \frac{1}{2} - \frac{e}{N} \rightarrow \frac{e}{N} \leq \frac{1}{2} - \frac{2}{3}p$$

$$p = \frac{P_u}{f_p^{allow} BN}$$

$$Case\ II$$

$$x = 3\left(\frac{N}{2} - e\right)$$

$$f_p = \frac{2P_u}{Bx} \leq f_p^{allow}$$

نیروی وارد شده بر زیر صفحه ستون توسط رابطه $f_p \times B \times Y$ محاسبه می‌شود. با تعریف نماد q برای تنش وارد بر واحد طول صفحه ستون، نیروی وارده برابر qY خواهد بود که در آن:

$$q = f_p \times B$$

f_P	تنش میان صفحه ستون و بتن	q	تنش وارد بر واحد طول صفحه ستون
B	عرض صفحه ستون	Y	عرض ناحیه فشاری

این نیرو در مرکز سطح خود عمل می‌کند. نقطه‌ای که از لبه (نقطه A) به اندازه $\frac{Y}{2}$ فاصله داشته و از طرف دیگر، فاصله آن از محور ستون برابر است با:

$$\epsilon = \frac{N}{2} - \frac{Y}{2}$$

واضح است که با کاهش عرض ناحیه فشاری Y فاصله ϵ افزایش می‌یابد. کمترین مقدار Y متناظر با بیشترین مقدار تنش، یعنی مقدار ماکزیمم مجاز آن خواهد بود.

$$Y_{min} = \frac{P_r}{q_{max}} = \frac{P_r}{f_{P(max)} \times B}$$

و بیشترین مقدار ϵ نیز با کمترین مقدار Y متناظر خواهد بود.

$$\epsilon_{max} = \frac{N}{2} - \frac{Y_{min}}{2} = \frac{N}{2} - \frac{P_u}{2q_{max}}$$

جهت حفظ تعادل لنگر، لازم است خروج از مرکزیت بار اعمال شده P_u که $e = \frac{M_u}{P_u}$ است، با مرکز نیروی فشاری زیر صفحه ستون یا ϵ منطبق شود، یا به عبارت دیگر $e = \epsilon$. چنانچه e از بیشترین مقداری که ϵ می‌تواند اختیار کند فراتر رود، نیروی اعمال شده به ستون تنها با نیروی فشاری زیر صفحه ستون متعادل نشده و در این حالت میل‌مهار در وضعیت کشش قرار خواهند گرفت. به عبارت دیگر، برای مقادیر $e \le \epsilon_{max}$ خواهیم داشت:

$$e \le \epsilon_{max} \rightarrow Y \ge Y_{min}, q \le q_{max}, f_p \le f_{p(max)}$$

و چنانچه $e > \epsilon_{max}$ باشد، $q = q_{max}$ خواهد بود که به آن، مقدار بحرانی خروج از مرکزیت گفته می‌شود.

$$e_{cr} = \epsilon_{max} = \frac{N}{2} - \frac{P_r}{2q_{max}}$$

در تحلیل وضعیتهای مختلف بارگذاری صفحه ستون، چنانچه $e < e_{cr}$ باشد، واژگونی پدید نمی‌آید، میل‌مهار در معادله تعادل لنگر ظاهر نشده و بار اعمال شده در وضعیت «خروج از مرکزیت کم» طبقه‌بندی می‌شود.

از طرف دیگر اگر $e > e_{cr}$ باشد، معادله لنگر بدون ایجاد کشش در میل‌مهار قابل تعادل نخواهد بود و حضور نیروی کششی در میل‌مهار، لازم است. این گونه بارهای اعمالی، در وضعیت «خروج از مرکزیت زیاد» طبقه‌بندی می‌شوند.

۸-۶-۲ نیاز مقاومت اتکایی بتن صفحه ستون تحت خروج از مرکزیت کم

چنانچه ذکر گردید، فرض بر آن است که تنش اتکایی بتن به صورت یکنواخت در مساحت $Y \times B$ توزیع گردیده است. با تساوی $e = \epsilon$ طول ناحیه اتکایی قابل محاسبه خواهد بود.

$$e = \epsilon = \frac{N}{2} - \frac{Y}{2} \rightarrow Y = N - 2e$$

و تنش اتکایی بدین صورت محاسبه می‌شود.

$$q = f_P \times B = \frac{P_r}{BY} \times B = \frac{P_r}{Y}$$

چنانچه ذکر شد در وضعیت $e < e_{cr}$ (خروج از مرکزیت کم)، تنش اتکایی $q \leq q_{max}$ خواهد بود.

در وضعیت $e = e_{cr}$ طول ناحیه اتکایی از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$Y = N - 2\left(\frac{N}{2} - \frac{P_r}{2q_{max}}\right) = \frac{P_r}{q_{max}}$$

۸-۶-۳ نیاز مقاومت خمشی صفحه ستون در حالت اتکایی تحت خروج از مرکزیت کم

تنش فشاری میان بتن و صفحه ستون در طول طره‌ای اعمال نیرو، ایجاد لنگر خواهد نمود. در صورت اعمال لنگر توسط محور قوی ستون، m و در صورت لنگر حول محور ضعیف ستون، n طول طره است. اگر خمش حول محور قوی ستون باشد، تنش اتکایی f_P به این صورت محاسبه می‌شود.

$$f_P = \frac{P_r}{BY} = \frac{P_r}{B(N - 2e)}$$

مقاومت خمشی مورد نیاز صفحه ستون (در واحد عرض) از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$M_{pl} = \begin{cases} f_P \dfrac{c^2}{2} \leftarrow \{Y \geq c\} \\ f_{P(max)} Y\left(c - \dfrac{Y}{2}\right) \leftarrow \{Y < c\} \end{cases}$$

۸-۶-۴ نیاز مقاومت خمشی صفحه ستون در حالت کششی تحت خروج از مرکزیت کم

در وضعیت $e < e_{cr}$ (خروج از مرکزیت کم) کششی در ر ایجاد نشده و لذا در وضعیت کشش، لنگری در صفحه ستون توسط آنها ایجاد نمی‌شود. بنابراین تنشهای اتکایی حاکم بر تعیین ضخامت صفحه ستون خواهند بود.

۸-۷ طراحی صفحه ستون تحت اثر بار محوری همراه با خروج از مرکزیت

علامت مثبت برای تنشهای فشاری و علامت منفی برای تنشهای کششی استفاده شده است. بنابراین حداکثر تنشهای زیر صفحه ستون (در سمت بال فشاری ستون) از رابطه (۸-۱۸) و حداقل تنش های زیر صفحه ستون (در سمت بال کششی ستون) از رابطه (۸-۱۹) تعیین می‌شود.

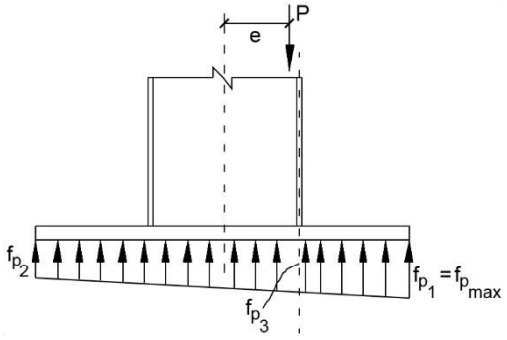
برای آنکه تنش تماسی f_{p2} به صورت فشاری باقی بماند، به عبارتی بین صفحه ستون و فونداسیون جدایی به وجود نیاید، لازم است که رابطه زیر برقرار باشد:

$$f_{p2} = \frac{P_u}{A}\left(1 - \frac{e_u}{\frac{N}{6}}\right) \geq 0 \Rightarrow e_u \leq \frac{N}{6} \qquad ۹\text{-}۸$$

۸-۷-۱ طراحی صفحه ستون با خروج از مرکزیت کم $\left(e_u \leq \frac{N}{6}\right)$

در این حالت هیچگونه جدایی بین صفحه ستون و فونداسیون در ناحیه کششی، به وجود نمی‌آید. بنابراین میل‌مهارها نقشی در تحمل کشش ایفاء نمی‌کنند، و اگر صفحه ستون، تحت برش قرار داشته باشد، تنشهای برشی حاصله را تحمل می‌کنند.

تنش بیشینه مطابق شکل ۸-۷ به صورت زیر تعیین می شود و با مقاومت نهایی فشاری بتن مقایسه می‌گردد.



شکل ۸-۱۶ توزیع تنش در زیرصفحه ستون در وضعیت $\left(e \leq \frac{N}{6}\right)$

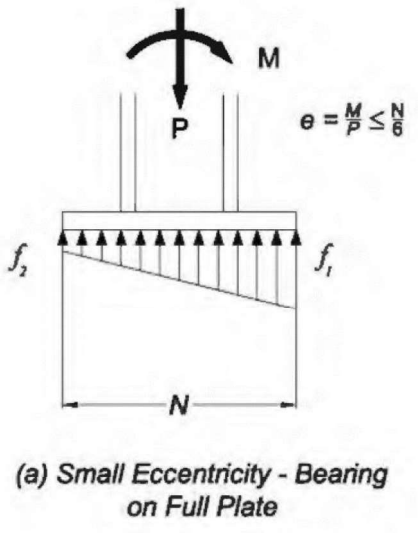
$f_{p1} = F_{u\,max}$
$f_{p2} = F_{u\,min}$
$f_{p3} = F_{um}$
F_{um}: تنش در زیر بال فشاری ستون

۸-۷-۲ نیاز برشی صفحه ستون تحت خروج از مرکزیت کم

و ضخامت مورد نیاز برشی از رابطه زیر حاصل می شود:

$$t_p = \frac{F_{u\,max} + F_{um}}{2\phi_v(0.6F_y)} m, \phi_v = 0.9 \qquad ۱۰\text{-}۸$$

۸-۸ خروج از مرکزیت کم



(a) Small Eccentricity - Bearing on Full Plate

کنترل تسلیم خمشی

$$N \geq d + 2 \times 7cm$$

$$B \geq b_f + 2 \times 7cm$$

$$m = \frac{N - 0.95h}{2}$$

$$n = \frac{B - 0.8b_f}{2}$$

$$n' = \frac{\sqrt{d\, b_f}}{4}$$

$$\frac{e}{N} < \frac{1}{6}$$

$$f_1, f_2 = \frac{P_u}{BN} \pm \frac{Pe}{\frac{BN^2}{6}} = \frac{P_u}{BN}\left(1 \pm 6\frac{e}{N}\right) \leq f_P^{allow} = \phi_c \times 0.85 f_c'$$

$$f_m = f_2 - (f_2 - f_1)\frac{m}{N}$$

$$M_{pl}^{(m)} = f_P Bm\left(\frac{m}{2}\right) + (f_p - f_m)Bm\left(\frac{2m}{3}\right) = \left(\frac{f_p}{2} + \frac{2f_p}{3} - \frac{2f_m}{3}\right)Bm^2 = \left(\frac{7}{6}f_p - \frac{2}{3}f_m\right)Bm^2$$

$$M_{pl}^{(m)} = \frac{f_m Bm^2}{2} + \frac{4P_u e m^3}{N^3}$$

$$c = max(n, n')$$

$$f_{avg} = \frac{P_u}{BN}$$

$$M_{pl}^{(c)} = \frac{f_{avg} Bc^2}{2}$$

$$M_{u,pl} = ma\,x\left(M_{pl}^{(m)}, M_{pl}^{(c)}\right)$$

$$f_1 > 0 \rightarrow 1 - 6\frac{e}{n} > 0 \rightarrow \frac{e}{N} < \frac{1}{6}$$

مثال ۲-۸

ستونی از مقطع $2IPE20$ تحت اثر بارهای محوری $P_D = 30ton$ و $P_L = 15ton$ لنگرهای $M_D = 0.67ton.m$ و $M_L = 1ton.m$ قرار دارد. ورق صفحه ستون را با فرض مقاومت نهایی بتن $C25$ طراحی نمایید. ترکیب بار $1.2D + 1.6L$ مد نظر است.

حل:

مشخصات هندسی $2IPE20$ از جدول اشتال تعیین می شود.

$$2IPE20 \rightarrow d = 20cm, b_f = 2 \times 10 = 20cm$$

$$C25 \rightarrow \mathrm{f'_c} = 250\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{cm^2}} = 0.25\frac{\mathrm{ton}}{\mathrm{cm^2}}$$

گام ۱- تعیین بارهای نهایی و خروج از مرکزیت معادل e

$$P_u = 1.2P_D + 1.6P_L = 1.2 \times 30 + 1.6 \times 15 = 60\ ton$$
$$M_u = 1.2M_D + 1.6M_L = 1.2 \times 0.67 + 1.6 \times 1 = 2.4\ ton.m = 240\ ton.cm$$

مقدار خروج از مرکزیت از رابطه زیر محاسبه می گردد:

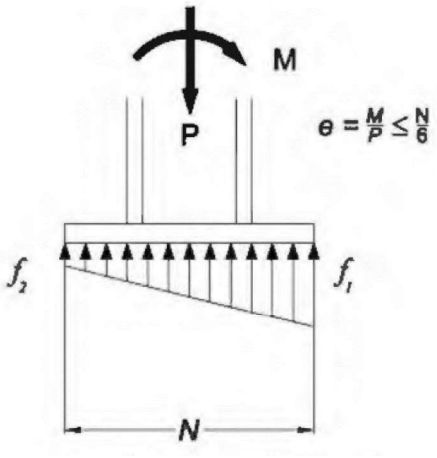
$$e = \frac{M_u}{P_u} = \frac{240}{60} = 4.0cm$$

گام ۲- کنترل ضوابط اجرایی و حدس ابعاد صفحه ستون $N \times B$

$$N \geq d + 2 \times 7cm = 20 + 2 \times 7 = 34cm$$
$$B \geq b_f + 2 \times 7cm = 20 + 2 \times 7 = 34cm$$
$$\rightarrow try\ PL\ 40 \times 40cm \rightarrow N = B = 40cm$$

گام ۳- تعیین وضعیت صفحه ستون

$$\frac{e}{N} = \frac{4.0}{40} = 0.1 < \frac{1}{6} = 0.17$$



گام ۴- محاسبه نیاز اتکایی f_1, f_2

$$f_1, f_2 = \frac{P_u}{BN} \pm \frac{P_u e}{\frac{BN^2}{6}} = \frac{P_u}{BN}\left(1 \pm 6\frac{e}{N}\right) \le f_P^{allow} = \phi_c \times 0.85 f_c'$$

$$f_1, f_2 = \frac{60}{40 \times 40}(1 \pm 6 \times 0.1)$$

$$f_1 = \frac{60}{40 \times 40}(1 - 6 \times 0.1) = 0.015\frac{ton}{cm^2}$$

$$f_2 = \frac{60}{40 \times 40}(1 + 6 \times 0.1) = 0.060\frac{ton}{cm^2}$$

گام ۵- کنترل ظرفیت اتکایی

$$f_1 = 0.015\frac{ton}{cm^2} \le f_P^{allow} = 0.65 \times 0.85 \times 0.25 = 0.138\frac{ton}{cm^2} \rightarrow OK$$

$$f_2 = 0.060\frac{ton}{cm^2} \le f_P^{allow} = 0.138\frac{ton}{cm^2} \rightarrow OK$$

گام ۶- محاسبه نیاز خمشی صفحه ستون

$$m = \frac{N - 0.95d}{2} = \frac{40 - 0.95 \times 20}{2} = 10.5cm$$

$$n = \frac{B - 0.8b_f}{2} = \frac{40 - 0.8 \times 20}{2} = 12cm$$

$$n' = \frac{\sqrt{d\, b_f}}{4} = \frac{\sqrt{20 \times 20}}{4} = 5cm$$

$$f_m = f_2 - (f_2 - f_1)\frac{m}{N} = 0.060 - \frac{18}{40}(0.060 - 0.015) = 0.040\frac{ton}{cm^2}$$

$$M_{pl}^{(m)} = \left(\frac{7}{6}f_2 - \frac{2}{3}f_m\right)Bm^2 = \left(\frac{7}{6} \times 0.06 - \frac{2}{3} \times 0.04\right) \times 40 \times 10.5^2 = 191\ ton.cm$$

$$c = max(n, n') = max(12,5) = 12cm$$

$$f_{avg} = \frac{P_u}{BN} = \frac{60}{40 \times 40} = 0.038 \frac{ton}{cm^2}$$

$$M_{pl}^{(c)} = \frac{f_{avg} B c^2}{2} = \frac{0.038 \times 40 \times 12^2}{2} = 108\ ton.cm$$

$$M_{u,pl} = max\left(M_{pl}^{(m)}, M_{pl}^{(c)}\right) = 191\ ton.cm$$

گام ۷- کنترل تسلیم خمشی صفحه ستون

$$M_{u,pl} \le \phi_b M_{n,pl} = \phi_b f_y Z_{pl} = \phi_b f_y \frac{B t_p^2}{4} \rightarrow t_{pl} \ge \sqrt{\frac{4M_{u,pl}}{\phi B f_y}}$$

$$M_{u,pl} = 191 \le \phi_b f_y \frac{B t_p^2}{4} = 0.9 \times 2.4 \times 40 \times \frac{t_p^2}{4}\ ton.cm \rightarrow t_p \ge 2.97cm$$

و یا با استفاده از رابطه مستقیم:

$$t_{pl} \ge \sqrt{\frac{4M_{u,pl}}{\phi f_y B}} = \sqrt{\frac{4 \times 191}{0.9 \times 2.4 \times 40}} = 2.97cm \rightarrow t_{pl} = 3.0cm$$

گام ۸- نتیجه

$$\rightarrow USE\ PL40 \times 40 \times 3.0cm$$

برای این صفحه ستون حداقل $4\Phi20$ به عنوان میل‌مهار در چهار گوشه صفحه ستون استفاده می‌شود.

حل:

ضخامت ورق بر اساس برش:

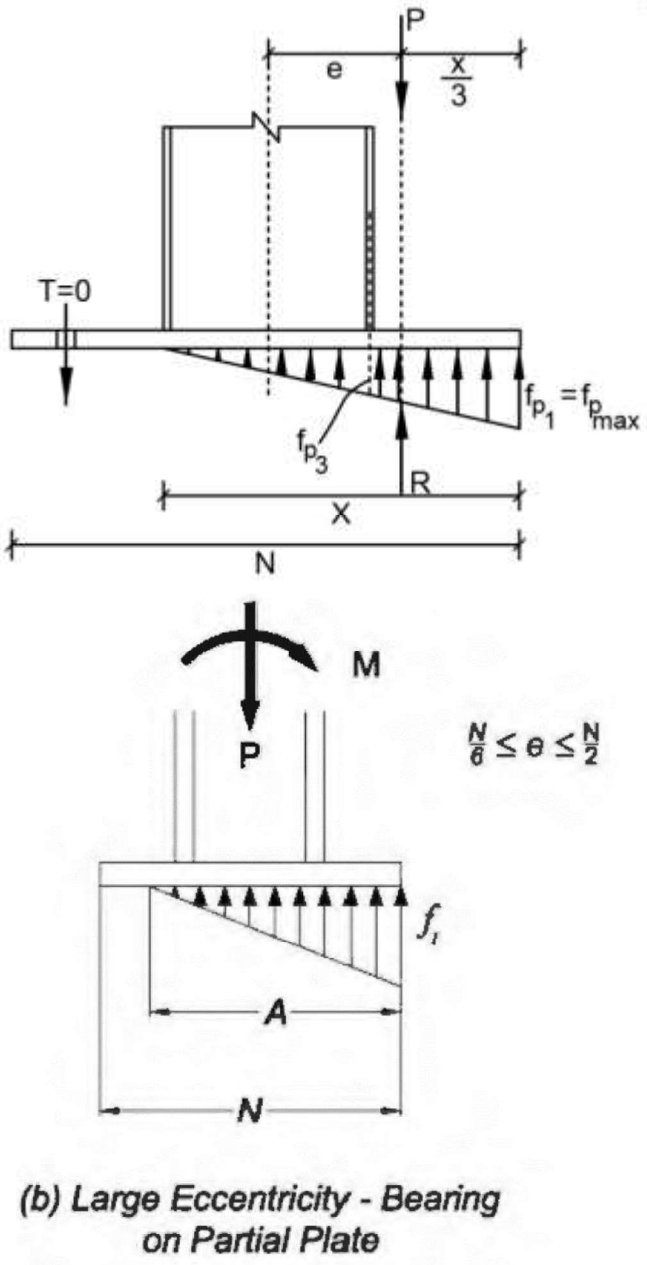
$$t_p = \frac{F_{u\,max} + F_{um}}{2\phi_v(0.6F_y)} m = \frac{167.30 + 126.20}{2 \times 0.9 \times 1440} \times 20 = 2.26\ \ cm$$

ضخامت نهایی ورق صفحه ستون حداکثر دو مقدار $7/54$ و $2/26$ می باشد. در نتیجه ضخامت ورق صفحه ستون $7/54$ سانتیمتر می‌باشد. البته چون ضخامت ورق بدست آمده زیاد است باید از سخت کننده استفاده نمود.

بنابراین از ورق $PL750 \times 750 \times 75mm$ به عنوان صفحه ستون برای ستون مورد نظر استفاده می شود.

۸-۹ طراحی صفحه ستون با خروج از مرکزیت متوسط

در این حالت فرض می‌شود که مطابق شکل زیر، برآیند نیروهای زیر صفحه ستون بر بار P_u منطبق است و از نیروی کششی ایجاد شده به دلیل ناچیز بودن، صرف نظر می‌شود. از طرفی محاسبه توزیع تنش در زیر صفحه ستون با استفاده از روابط قبلی امکان‌پذیر نیست، زیرا طول ناحیه به کشش افتاده مشخص نمی‌باشد.



شکل ۸-۱۷ توزیع تنش در زیر صفحه ستون در وضعیت $\left(\frac{N}{6} < e_u \le \frac{N}{2}\right)$

طول گسترش تنش فشاری از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$\frac{x}{3} = \frac{N}{2} - e_u \Rightarrow x = 3\left(\frac{N}{2} - e_u\right) \qquad 11\text{-}8$$

x: طول گسترش تنش

مثال ۳-۸

ستونی از مقطع $2IPE20$ تحت اثر بارهای محوری $P_D = 30ton$ و $P_L = 15ton$ لنگرهای $M_D = 1ton.m$ و $M_L = 3ton.m$ قرار دارد. ورق صفحه ستون را با فرض مقاومت نهایی بتن $C25$ طراحی نمایید. ترکیب بار $1.2D + 1.6L$ مد نظر است.

حل:

مشخصات هندسی $2IPE20$ از جدول اشتال تعیین می شود.

$$2IPE20 \rightarrow d = 20cm, b_f = 2 \times 10 = 20cm$$

$$C25 \rightarrow f'_c = 250\frac{kg}{cm^2} = 0.25\frac{ton}{cm^2}$$

گام ۱- تعیین بارهای نهایی و خروج از مرکزیت معادل e

$$P_u = 1.2P_D + 1.6P_L = 1.2 \times 30 + 1.6 \times 15 = 60\ ton$$
$$M_u = 1.2M_D + 1.6M_L = 1.2 \times 1 + 1.6 \times 3 = 6\ ton.m = 600\ ton.cm$$

مقدار خروج از مرکزیت از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$e = \frac{M_u}{P_u} = \frac{600}{60} = 10cm$$

گام ۲- کنترل ضوابط اجرایی و حدس ابعاد صفحه ستون $N \times B$

$$N \geq d + 2 \times 7cm = 20 + 2 \times 7 = 34cm$$
$$B \geq b_f + 2 \times 7cm = 20 + 2 \times 7 = 34cm$$
$$\rightarrow try\ PL\ 40 \times 40cm \rightarrow N = B = 40cm$$

گام ۳- تعیین وضعیت صفحه ستون

$$\frac{e}{N} = \frac{10}{40} = 0.25 > \frac{1}{6} = 0.17$$

$$f_p^{allow} = \phi_c \times 0.85f'_c \times min\left(\sqrt{\frac{A_2}{A_1}}, 2\right) = 0.85 \times 0.65 \times 0.25 \times 1 = 0.138\frac{ton}{cm^2}$$

$$p = \frac{P_u}{f_p^{allow} BN} = \frac{60}{0.138 \times 40 \times 40} = 0.272$$
$$\frac{e}{N} = 0.25 < \frac{1}{2} - \frac{2}{3}p = 0.32$$

گام ٤- محاسبه طول اتکاء x

$$x = 3\left(\frac{N}{2} - e\right) = 3\left(\frac{40}{2} - 10\right) = 30cm < N = 40cm \rightarrow OK$$

گام ٥- کنترل ظرفیت اتکایی f_p

$$f_p = \frac{2P_u}{Bx} = \frac{2 \times 60}{40 \times 30} = 0.100\frac{ton}{cm^2} \leq f_p^{allow} = 0.138\frac{ton}{cm^2} \rightarrow OK$$

از آنجا که مقادیر x, f_p بدست آمده در محدوده قابل قبول هستند، صفحه ستون در وضعیت خروج از مرکزیت متوسط قرار دارد.

گام ٦- محاسبه نیاز خمشی صفحه ستون $M_{u,pl}$

$$M_{u,pl} \leq \phi_b M_{n,pl}$$
$$m = \frac{N - 0.95d}{2} = \frac{1}{2}(40 - 0.95 \times 20) = 10.5cm$$
$$n = \frac{B - 0.8b_f}{2} = \frac{40 - 0.8 \times 20}{2} = 12cm$$
$$n' = \frac{\sqrt{d\, b_f}}{4} = \frac{\sqrt{20 \times 20}}{4} = 5cm$$
$$x = 30 > m = 18 \rightarrow f_m = f_p\left(1 - \frac{m}{x}\right) = 0.100\left(1 - \frac{18}{30}\right) = 0.04$$
$$M_{pl}^{(\mathrm{m})} = \left(\frac{7}{6}f_p - \frac{2}{3}f_m\right)Bm^2 \left(\frac{7}{6} \times 0.1 - \frac{2}{3} \times 0.04\right) \times 40 \times 10.5^2 = 397\ ton.cm$$
$$c = max(n, n') = max(12,5) = 12cm$$
$$f_{avg} = \frac{P_u}{BN} = \frac{60}{40 \times 40} = 0.038\frac{ton}{cm^2}$$
$$M_{pl}^{(\mathrm{c})} = \frac{f_{avg}Bc^2}{2} = \frac{0.038 \times 40 \times 12^2}{2} = 108\ ton.cm$$
$$M_{u,pl} = ma\,x\left(M_{pl}^{(\mathrm{m})}, M_{pl}^{(\mathrm{c})}\right) = 397\ ton.cm$$

گام ۷- کنترل ظرفیت خمشی صفحه ستون

$$M_{u,pl} \leq \phi_b M_n = \phi_b f_y Z_{pl} = \phi_b f_y B\frac{t_p^2}{4} \rightarrow t_{pl} \geq \sqrt{\frac{4M_{u,pl}}{\phi_b f_y B}}$$

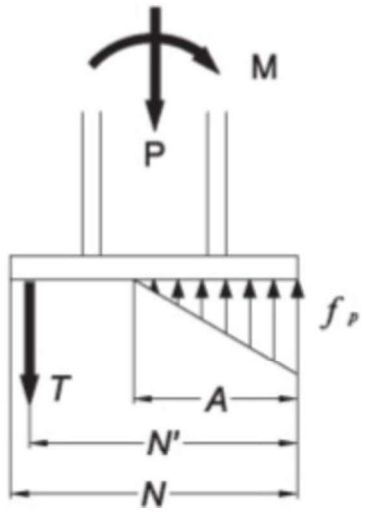
$$\rightarrow t_p \geq \sqrt{\frac{4 \times 397}{0.9 \times 2.4 \times 50}} = 3.83cm \rightarrow t_{pl} = 4.0cm$$

$$\rightarrow USE\ PL40 \times 40 \times 4.0cm$$

برای این صفحه ستون حداقل $4\Phi20$ به عنوان میل‌مهار در چهار گوشه صفحه ستون استفاده می‌شود.

۸-۱۰ طراحی صفحه ستون تحت خروج از مرکزیت زیاد

چنانچه مقدار لنگر اعمال شده در برابر بار محوری زیاد باشد، حضور میل‌مهار برای حفظ اتصال صفحه ستون به بتن لازم خواهد بود. وقوع این وضعیت برای قابهای خمشی که در برابر بارهای جانبی زلزله یا باد طراحی می‌شوند، متداول است که به صورت شماتیک در شکل زیر ترسیم شده است.



شکل ۸-۱۸ وضعیت «خروج از مرکزیت زیاد» در صفحه ستون

چنانچه پیش از این ذکر گردید، وضعیت خروج از مرکزیت زیاد در صورتی ایجاد می‌شود که:

$$e > e_{cr} = \frac{N}{2} - \frac{P_r}{2q_{max}}$$

۸-۱۰-۱ روند کلی طراحی تحت خروج از مرکزیت زیاد

روند کلی طراحی به صورت زیر خواهد بود:

الف- تعیین بار محوری و لنگر اعمال شده

ب- انتخاب ابعادی برای صفحه ستون

پ- محاسبه خروج از مرکزیت معادل و محاسبه خروج از مرکزیت بحرانی

ت- در صورتی که خروج از مرکزیت از مقدار بحرانی آن کمتر باشد، ادامه روند و در غیر این صورت، به طراحی وضعیت «خروج از مرکزیت زیاد» رجوع می‌شود.

ث- تعیین طول اتکایی و نیروی کششی میل‌مهار

ج- تعیین حداقل ضخامت مورد نیاز صفحه ستون (بیشترین مقدار از کنترل نیروی اتکایی و نیروی کششی)

چ- تعیین اندازه میل‌مهار

۸-۱۰-۲ نیروی اتکایی بتن و نیروی میل‌مهار تحت خروج از مرکزیت زیاد

در وضعیتی که $e > e_{cr}$ باشد، تنش اتکایی $q = q_{max}$ خواهد بود. جهت محاسبه نیروی اتکایی بتن و نیروهای میل‌مهار، تعادل نیروهای قائم $(\Sigma F_{vertical} = 0)$ در شکل فوق ایجاب می‌کند که:

$$T = q_{max}Y - P_r$$

T مقاومت کششی مورد نیاز در میل‌مهار

همچنین با تعادل لنگر حول نقطه B خواهیم داشت:

$$q_{max}Y\left(\frac{N}{2} - \frac{Y}{2} + f\right) - P_r(e+f) = 0$$

که بعد از بازنویسی معادله زیر حاصل می‌شود.

$$Y^2 - 2\left(\frac{N}{2} + f\right)Y + \frac{2P_r(e+f)}{q_{max}} = 0$$

معادله فوق دارای پاسخ زیر است:

$$Y = \left(f + \frac{N}{2}\right) \pm \sqrt{\left(f + \frac{N}{2}\right)^2 - \frac{2P_r(e+f)}{q_{max}}}$$

و نیروی اتکایی بتن برابر حاصلضرب $q_{max}Y$ خواهد بود و نیروی کششی میل‌مهار از رابطه $T = q_{max}Y - P_r$ محاسبه می‌شود.

حل معادله x برای برخی مقادیر بار نیرو و لنگر امکان‌پذیر نیست. به عبارت دیگر، فقط در صورتی که شرط $\left(f + \frac{N}{2}\right)^2 \geq \frac{2P_r(e+f)}{q_{max}}$ برقرار باشد، عبارت زیر رادیکال نامنفی بوده و معادله دارای پاسخ حقیقی خواهد بود. در غیر این صورت لازم است ابعاد صفحه ستون افزایش یابد.

با جایگذاری مقدار بحرانی e_{cr} در معادله x پاسخ بدین صورت حاصل می‌شود.

$$Y = \left(f + \frac{N}{2}\right) \pm \left[\left(f + \frac{N}{2}\right) - \frac{P_r}{q_{max}}\right]$$

که با استفاده از علامت منفی آن، مقدار x تعیین می‌گردد.

$$Y = \frac{P_r}{q_{max}}$$

۸-۱۰-۳ نیاز تسلیم خمشی صفحه ستون در حالت خروج از مرکزیت زیاد

در وضعیت خروج از مرکزیت زیاد، تنش اتکایی در بیشترین مقدار خود است:

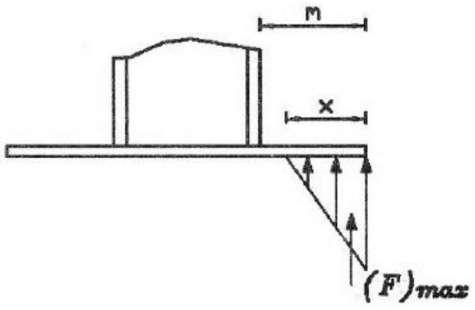
$$f_P = f_{P(max)}$$

$$M_{u,pl}^{(m)} \geq \begin{cases} \leftarrow \{x \geq m\} \\ \leftarrow \{x < m\} \end{cases}$$

۸-۱۰-۳-۱ حالت دوم

با توجه به نحوه توزیع تنش در زیر کف ستون، لنگر بحرانی صفحه در میان تار بال فشاری ستون مطابق شکل زیر، از رابطه (۸-۳۵) محاسبه می‌شود:

$$\boldsymbol{M_u = (P_u + T_u)(m - \frac{x}{3})} \qquad \text{۱۲-۸}$$



شکل ۸-۱۹ نمایش m و x در محاسبه لنگر نهایی در میانتار بال فشاری ستون

۸-۱۰-۳-۲ در جهت دیگر

$$M_{u,pl}^{(n)}$$

و نهایتا

$$Mmax$$

۸-۱۱ طراحی برای برش

نیروی برش صفحه ستون از سه طریق به بتن منتقل می‌شود.

الف- اصطکاک میان صفحه ستون و سطح گروت

ب- اتکای صفحه ستون و

پ- برش میل‌مهار

۸-۱۱-۱ تامین ظرفیت برشی توسط اصطکاک

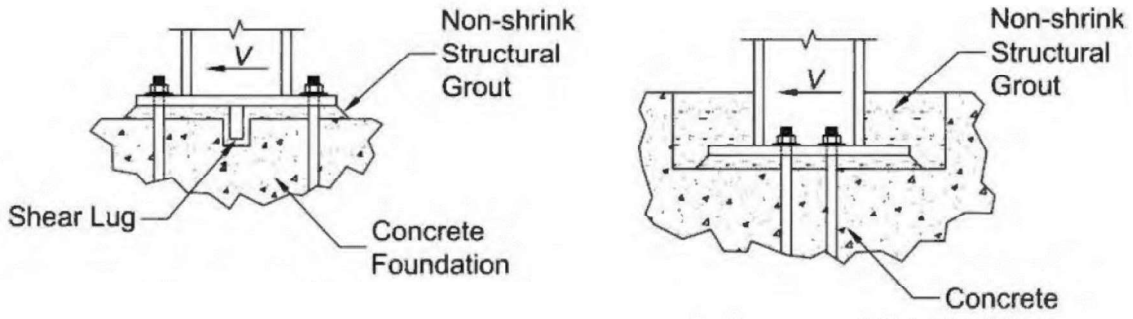
نیروی فشاری اتکایی میان صفحه ستون و بتن ایجاد مقاومت برشی می‌نماید و در وضعیتهای متداول، این نیرو برای تحمل نیروهای جانبی وارد بر ستون کافی است. میزان نیروی برشی، باید بر اساس بحرانی‌ترین مقادیر P_u, V_u ناشی از ترکیبات بارگذاری تعیین شود. مقاومت برشی بر اساس آیین‌نامه، مطابق رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$\phi V_n = \phi \mu P_u \leq 0.2 f'_c A_c$$

ضریب اصطکاک برای صفحه ستون فولادی روی گروت برابر $\mu = 0.55$ و برای فولاد بر روی بتن برابر $\mu = 0.7$ می‌باشد.

۸-۱۱-۲ تامین ظرفیت برشی توسط کلید برشی

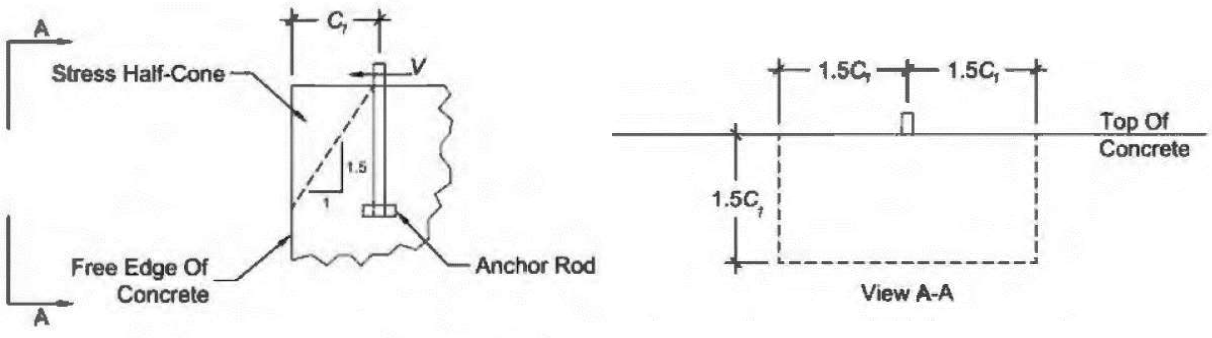
نیروهای برشی از طریق کلید برشی و یا دفن ستون در بتن قابل انتقال است. این دو وضعیت در شکل زیر نشان داده شده‌اند.



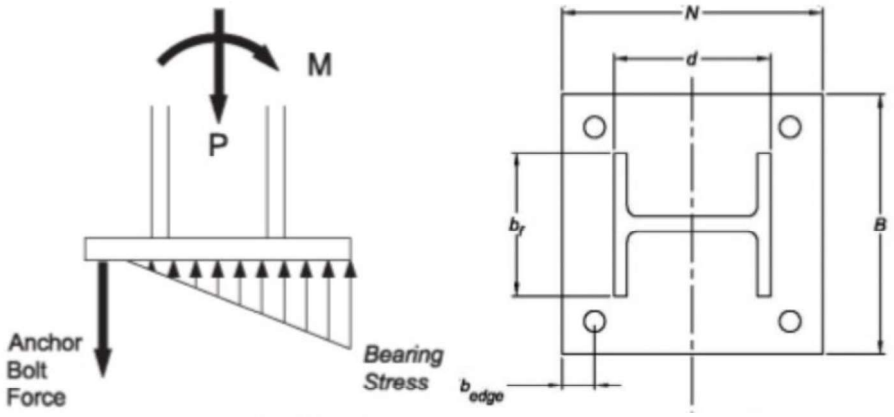
شکل ۸-۲۰ انتقال برش توسط ستون و یا کلید برشی

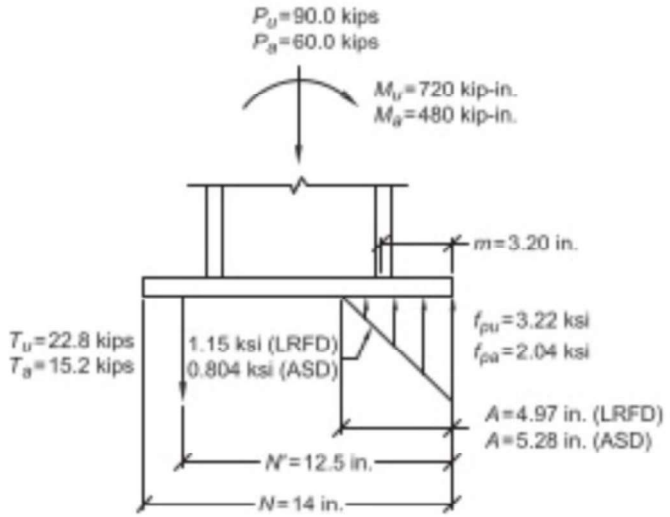
۸-۱۱-۳ تامین ظرفیت برشی توسط میل‌مهار

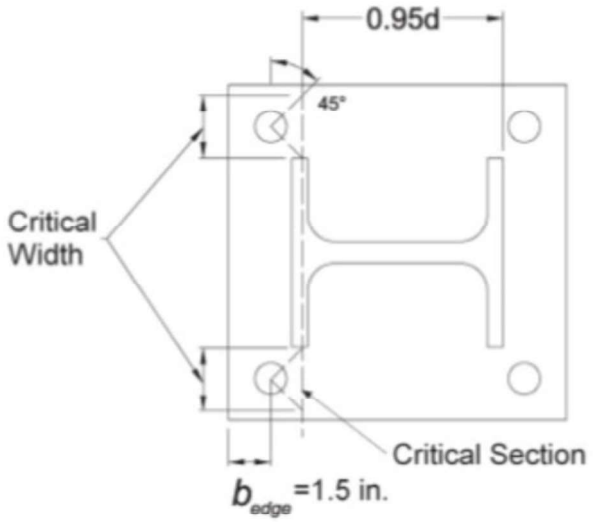
شکل زیر



شکل ۸-۲۱ انتقال برش توسط میل‌مهار


M
P
Anchor
Bolt
Force
Bearing
Stress
N
d
b_f
B
b_{edge}


P_u=90.0 kips
P_a=60.0 kips
M_u=720 kip-in.
M_a=480 kip-in.
m=3.20 in.
T_u=22.8 kips
T_a=15.2 kips
1.15 ksi (LRFD)
0.804 ksi (ASD)
f_{pu}=3.22 ksi
f_{pa}=2.04 ksi
A=4.97 in. (LRFD)
A=5.28 in. (ASD)
N'=12.5 in.
N=14 in.


0.95d
45°
Critical
Width
Critical Section
b_{edge}=1.5 in.

۸-۱۱-۴ نیاز برشی صفحه ستون با خروج از مرکزیت زیاد $\left(e_u > \frac{N}{2}\right)$

نیروی برشی وارده از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$V_u = P_u + T_u \qquad ۱۳-۸$$

ضخامت مورد نیاز برش با قرار دادن نیروی برشی نهایی وارده از رابطه (۸-۳۷) و مقاومت برشی موجود از رابطه (۸-۱۶) در رابطه مقاومت نهایی، بدست می آید:

$$t_p = \frac{(P_u+T_u)}{\phi_v(0.6F_y)B} \qquad ۱۴-۸$$

چنانچه در محل انتهای ستون نیروی برشی موجود باشد لازم است میل‌مهارهای صفحه ستون برای این برش طراحی شوند.

۸-۱۲ طراحی میل‌مهار[4]

طراحی میل‌مهار با توجه به موقعیت آن ممکن است برای موارد زیر صورت گیرد:

۸-۱۲-۱ نیاز تسلیم خمشی صفحه ستون تحت اثر کشش میل‌مهار

نیروی کششی T_u در میل‌مهار ، در صفحه ستون ایجاد خمش خواهد نمود. طول طره (x) به صورت محافظه‌کارانه برابر فاصله مرکز میل‌مهار تا مرکز بال ستون خواهد بود که با توجه به خطوط فرضی خمش در شکل قبل، قابل مشاهده است. مقاومت خمشی مورد نیاز بدین صورت قابل محاسبه است:

$$M_{pl} = T_u x$$

که در آن:

$$x = f - \frac{d}{2} + \frac{t_f}{2}$$

d ارتفاع مقطع ستون t_f ضخامت بال ستون

برای تعیین ضخامت ورق، از رابطه $M_{pl} \le \phi_b R_n$ استفاده می‌شود.

ابعاد و ضخامت ورق صفحه ستون و اتصالات جوشی آن، برای انتقال نیروی بلندشدگی در این مرحله تعیین می‌گردد. ضخامت صفحه ستون معمولا بر اساس خمش ناشی از نیروی فشاری یا کششی محاسبه می‌شود. در وضعیت بارهای کششی، با توجه به فاصله طره‌ای میل‌مهار تا خط فرضی خمش در بال یا جان ستون، در صفحه ستون خمش یک طرفه ایجاد می‌گردد. در این وضعیت چنانچه جان ستون باعث ایجاد کشش در میل‌مهار می‌شود، لازم است کنترل لازم برای جان و اتصالات آن انجام شود.

عرض موثر ناحیه خمش در صفحه، با توزیع ۴۵ درجه از مرکز میل‌مهار تا وجهی از ستون (جان یا بال) مرتبط با وضعیت، مشخص می‌گردد.

---

[4] Anchor Bolt

۸-۱۳ طراحی صفحه ستون تحت بار محوری کششی

بیشترین نیروی بلندشدگی[5] ستون، از تحلیل سازه تحت بارگذاری و ترکیبات بار، تعیین می‌شود. چنانچه نیروی بلندشدگی ناشی از بارهای جانبی سازه، از بارهای ثقلی وارد شده بر آن بیشتر باشد، تعدادی از ستونهای سازه تحت اثر بلندشدگی قرار خواهند گرفت. در ترکیبات مختلف بارگذاری ساختمان، در مواردی که نیروی بلندشدگی در پای ستون ایجاد می گردد، طراحی مجموعه کل میل‌مهارها برای تحمل کشش حاصل از بلندشدگی در پای ستون صورت می گیرد. همچنین ممکن است تحت شرایط واژگونی سازه، تعدادی از ستونها تحت اثر بلندشدگی قرار بگیرند.

۸-۱۳-۱ نیاز کشش میل‌مهار

چنانچه لنگر وارد از طرف ستون به صفحه ستون زیاد باشد، میل‌مهارها باید بتوانند کشش ناشی از لنگر وارده را تحمل کنند. تعداد، قطر و نوع فولاد میل‌مهار در این مرحله تعیین می‌شود. تعداد میل‌مهار ، تابعی از بیشترین نیروی بلندشدگی است که در ستون رخ می‌دهد. مقاومت میل‌مهار و لذا قطر و نوع فولاد آن نیز تابع بلندشدگی خواهد بود. معمولا در محاسبات از نیروی اهرمی ایجاد شده توسط میل‌مهار صرفنظر می‌گردد.

a- ظرفیت کششی میل‌مهار

مقاومت کششی میل‌مهار به مقاومت بتن جهت نگهداری میل‌مهار تحت کشش و مقاومت کششی فولاد میل‌مهار بستگی دارد. روابط دقیق مقاومت کششی میل‌مهار به قطر اسمی، قطر ناحیه رزوه نشده و تعداد رزوه‌ها در واحد طول بستگی دارد ولی رابطه ساده زیر برای تعیین مقاومت کششی میل‌مهار ، قابل استفاده است.

$$\boldsymbol{f_t = \frac{T_u}{A_b} \le \phi F_{nt}} \qquad \text{۱۵-۸}$$

ϕ ضریب کاهش مقاومت برابر $\phi = 0.75$

T_u نیروی کششی ضریبدار وارد به میل‌مهارها در یک طرف صفحه ستون

A_b سطح مقطع میل‌مهارها واقع در سمت کششی صفحه ستون

f_{nt} تنش کششی اسمی که برابر با $0.75F_u$ (چه در حالتی که سطح برش از قسمت دادانه شده می گذرد و چه در حالتی که سطح برش از قسمت دندانه شده نمی گذرد).

f_u تنش نهایی میلگرد رزوه شده که به عنوان بلت استفاده شده است، می‌باشد.

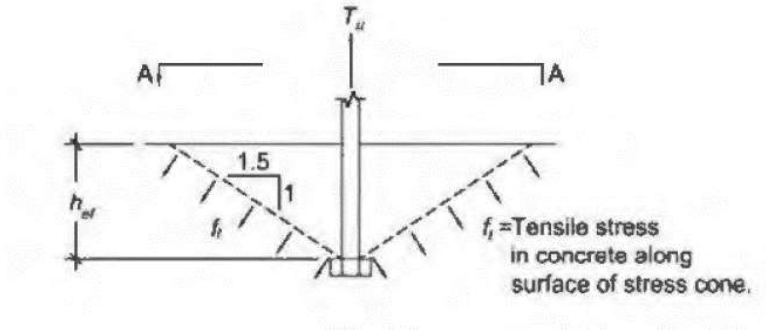
لازم به ذکر است برای طراحی میل‌مهارها از نظر طول و مهار آن می‌بایست به آیین‌نامه[6] مراجعه گردد.

$$\phi R_n = 0.75 \times 0.75\, f_u A_b = 0.5625 f_u A_b$$

[5] Uplift

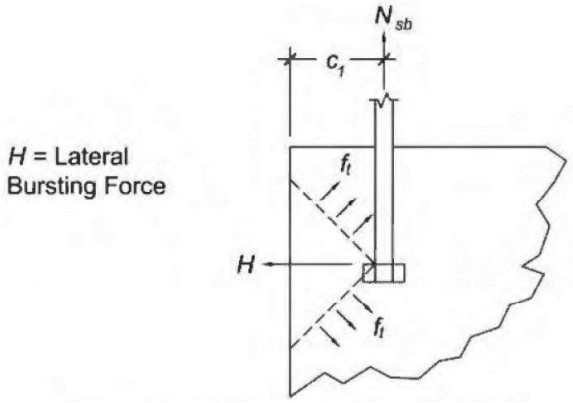
[6] مبحث نهم مقررات ملی فصل ۲۱

بیرون کشیدگی میل‌مهار، در ناحیه‌ای از بتن ایجاد کشش می‌نماید که طرح آن بر اساس ظرفیت بتن[۷] انجام می‌شود. ظرفیت کششی ناحیه بتنی دارای محاسبات پیچیده‌تری می‌باشد. شکل زیر ناحیه کششی بتن را نمایش می‌دهد.



شکل ۸-۲۲ بیرون کشیدگی میل‌مهار میانی و کشش ناحیه بتنی

در میل‌مهارهای نزدیک به لبه پی، کشش میل‌مهار به ایجاد نیروهای جانبی در میل‌مهار میان بتن تنشهای کششی مطابق شکل زیر منجر می‌شود.



شکل ۸-۲۳ بیرون کشیدگی میل‌مهار کناری و کشش ناحیه بتنی

b- نیاز برشی میل‌مهار

با توجه به نتایج تحلیل سازه، معمولاً در پای ستون برش وجود دارد. بنابراین مجموعه کل میل‌مهارها باید بتوانند این برش را تحمل نمایند.

c- ظرفیت برشی میل‌مهار

در میل‌مهارها کنترل برش از رابطهٔ زیر انجام می شود:

[7] CCD: Concrete Capacity Design

$$f_v = \frac{V_u}{A_b} \leq \phi F_{nv} \qquad ۱۶-۸$$

ϕ ضریب کاهش مقاومت برابر $\phi = 0.75$

V_u برش ضریبدار پای ستون در محل صفحه ستون

A_b سطح مقطع مجموعهٔ کل میل‌مهارها در صفحه ستون

چنانچه از میلگرد دندانه شده به عنوان میل‌مهار استفاده شود، و سطح برش از قسمت دندانه شده بگذرد برابر $F_{nv} = 0.45F_u$ است و در حالتی که سطح برش از قسمت دندانه شده نمی گذرد برابر با $F_{nv} = 0.55F_u$ که در آن F_u تنش نهایی میلگردهای رزوه شده استفاده شده به عنوان میل‌مهار می باشد.

توجه: در ستونهایی که در محل مهاربندها قرار دارند، برش پای ستون (ناشی از مؤلفه افقی نیروی مهاربند) مقدار قابل توجهی می‌باشد. به همین دلیل میل‌مهار صفحه ستون محل مهاربند، تعداد بیشتری از صفحه ستون دیگر ستونها می‌باشد. ناگفته نماند که همیشه در پای ستونها برش وجود دارد مگر آنکه تکیه‌گاه پای ستون غلتکی باشد.

d- ظرفیت میل‌مهار برای تحمل برش و کشش

چنانچه صفحه ستون علاوه بر نیروی محوری و لنگر خمشی(کشش حاصل از خمش) نیروی برشی را نیز منتقل نماید، لازم است اثر آن در کاهش تنش مجاز کششی میل‌مهار لحاظ شود (F'_{nt}). مقررات ملی ساختمان ایران، تنشهای مجاز کششی میلگرد های دندانه شده که به عنوان میل‌مهار در صفحات صفحه ستون به کار می رود (که علاوه بر کشش، تحت تاثیر نیروی برشی نیز قرار دارد) به صورت زیر پیشنهاد می‌نماید.

مقاومت طراحی میل‌مهار تحت اثر ترکیب تنشهای کششی و برشی در صفحات صفحه ستون (اتصالات اتکایی) بر اساس حالتهای حدی گسیختگی کششی و برشی به شرح زیر تعیین می‌گردد.

$$\phi R_{nt} = \phi F'_{nt} A_{nb} \qquad ۱۷-۸$$

$$\phi R_{nv} = \phi F'_{nv} A_{nb} \qquad ۱۸-۸$$

ϕ ضریب کاهش مقاومت برابر $\phi = 0.75$

F'_{nt} تنش کششی اسمی اصلاح شده با در نظر گرفتن اثرات تنش برشی که از رابطه زیر بدست می آید:

$$F'_{nt} = F_{nt}\left[1.3 - \frac{f_{uv}}{\phi F_{nv}}\right] \leq F_{nt} \qquad ۱۹-۸$$

$$R_{uv} \leq \phi R_{nv} \qquad ۲۰-۸$$

F'_{nv} تنش برشی اسمی اصلاح شده با در نظر گرفتن اثرات تنش کششی که از رابطه زیر بدست می آید:

$$F'_{nv} = F_{nv}\left[1.3 - \frac{f_{ut}}{\phi F_{nt}}\right] \leq F_{nv} \qquad ۲۱-۸$$

$$R_{ut} \leq \phi R_{nt} \qquad ۲۲-۸$$

F_{nt} تنش کششی اسمی مطابق جدول ۱۰-۸

F_{nv} تنش برشی اسمی مطابق جدول ۱۰-۵

R_{uv} نیروی برشی نهایی در یک پیچ

R_{ut} نیروی کششی نهایی در یک پیچ

$Case\ III$

$f_p = f_p^{allow}$

$F_p = \frac{f_p B x}{2}$

$\Sigma F_y = 0 \rightarrow T = F_p - P_u$

$\Sigma M = 0 \rightarrow P_u\left(e + N' - \frac{N}{2}\right) = F_p\left(N' - \frac{x}{3}\right) = \frac{f_p B x}{2}\left(N' - \frac{x}{3}\right)$

$\rightarrow 6pN\left(e + N' - \frac{N}{2}\right) = x(3N' - x) \rightarrow x^2 - 3N'x + 6pN\left(e + N' - \frac{N}{2}\right) = 0$

$x = \frac{1}{2}\left(3N' \pm \sqrt{(3N')^2 - 4 \times 6pN\left(e + N' - \frac{N}{2}\right)}\right)$

$x = 1.5N' \pm \sqrt{2.25N'^2 - 6pN\left(e + N' - \frac{N}{2}\right)}$

$x = 1.5N\left(\frac{N'}{N}\right) \pm N\sqrt{2.25\left(\frac{N'}{N}\right)^2 - 6p\left(\frac{e}{N} + \frac{N'}{N} - \frac{1}{2}\right)}$

$s = \frac{N'}{N}$

$x = N\left(1.5s \pm \sqrt{2.25s^2 - 6p\left(\frac{e}{N} + s - \frac{1}{2}\right)}\right)$

$\frac{f_m}{x - m} = \frac{f_p}{x} \rightarrow f_m = f_p\left(1 - \frac{m}{x}\right)$

$x > m \rightarrow M_{pl} = f_m\frac{m^2}{2} + (f_p - f_m)\frac{m^2}{3}$

$x < m \rightarrow M_{pl} = \frac{f_p x}{2}\left(m - \frac{x}{3}\right)$

$Case\ III$

$x = 1.5N' - \sqrt{2.25N'^2 - 6pN\left(e + N' - \frac{N}{2}\right)}$

$f_m = f_p\left(1 - \frac{m}{x}\right)$

$$t_{pl} \geq \sqrt{\frac{4M_{u,pl}}{\phi B f_y}}$$

مثال ۴-۸

ستونی از مقطع $2IPE20$ تحت اثر بارهای محوری $P_D = 30ton$ و $P_L = 15ton$ لنگرهای $M_D =$ $3.3ton.m$ و $M_L = 5ton.m$ قرار دارد. ورق صفحه ستون را طراحی نمایید. ترکیب بار $1.2D + 1.6L$ مد نظر است. از میل‌مهار نوع $AIII$ و بتن نوع $C25$ استفاده شده است.

حل:

مشخصات هندسی $2IPE20$ از جدول اشتال تعیین می شود.

$$2IPE20 \rightarrow d = 20cm, b_f = 2 \times 10 = 20cm$$

$$C25 \rightarrow \mathrm{f'_c} = 250\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{cm^2}} = 0.25\frac{\mathrm{ton}}{\mathrm{cm^2}}$$

گام ۱- تعیین بارهای نهایی و خروج از مرکزیت معادل e

$$P_u = 1.2P_D + 1.6P_L = 1.2 \times 30 + 1.6 \times 15 = 60\ ton$$
$$M_u = 1.2M_D + 1.6M_L = 1.2 \times 3.3 + 1.6 \times 5 = 12\ ton.m = 1200\ ton.cm$$

مقدار خروج از مرکزیت از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$e = \frac{M_u}{P_u} = \frac{1200}{60} = 20cm$$

گام ۲- کنترل ضوابط اجرایی و حدس ابعاد صفحه ستون $N \times B$

$$N \geq d + 2 \times 7cm = 20 + 2 \times 7 = 34cm$$
$$B \geq b_f + 2 \times 7cm = 20 + 2 \times 7 = 34cm$$
$$\rightarrow try\ PL\ 40 \times 40cm \rightarrow N = B = 40cm$$

گام ۳- تعیین وضعیت صفحه ستون

$$\frac{e}{N} = \frac{20}{40} = 0.5 > \frac{1}{2} - \frac{2}{3}p$$

$$\mathrm{f_p^{allow}} = \phi_c \times 0.85\mathrm{f'_c} \times min\left(\sqrt{\frac{\mathrm{A_2}}{\mathrm{A_1}}}, 2\right) = 0.85 \times 0.65 \times 0.25 \times 1 = 0.138\frac{\mathrm{ton}}{\mathrm{cm^2}}$$

$$p = \frac{P_u}{f_p^{allow} BN} = \frac{60}{0.138 \times 40 \times 40} = 0.272$$

گام ٤- محاسبه طول اتکاء x

$$N' = 40 - 5 = 35cm$$

$$x = 1.5N' - \sqrt{2.25N'^2 - 6pN\left(e + N' - \frac{N}{2}\right)}$$

$$= 1.5 \times 35 - \sqrt{2.25 \times 35^2 - 6 \times 0.272 \times 40(20 + 35 - 20)} = 30.8cm$$

$$x = 30.8cm < N = 40cm \rightarrow OK$$

از آنجا که مقدار X بدست آمده در محدوده قابل قبول است، ابعاد صفحه ستون مناسب است.

گام ٥- محاسبه نیاز کششی میل‌مهار T

$$T_u = \frac{f_P^{allow} Bx}{2} - P_u = \frac{0.138 \times 40 \times 30.8}{2} - 60 = 25.0\ ton$$

گام ٦- کنترل ظرفیت کششی میل‌مهار

$$T_u \leq \phi_t A_b f_{nt}$$

$$AIII\ OR\ S400 \rightarrow f_u = 6\frac{ton}{cm^2}$$

$$f_{nt} = 0.75 f_u = 0.75 \times 6 = 4.5\frac{ton}{cm^2}$$

$$T_u = 25ton \leq \phi_t f_{nt} A_b = 0.75 \times (0.75 \times 6.0) \times A_b \rightarrow A_b \geq 7.4cm^2$$

$$2\frac{\pi D^2}{4} \geq 7.4\text{cm}^2 \rightarrow \text{D} \geq 2.17\text{cm} \rightarrow \text{use } 2\Phi 22$$

گام ۷- محاسبه نیاز خمشی صفحه ستون $M_{u,pl}$

$$M_{u,pl} \leq \phi_b M_{n,pl}$$

$$m = \frac{N - 0.95d}{2} = \frac{1}{2}(40 - 0.95 \times 20) = 10.5cm$$

$$n = \frac{B - 0.8b_f}{2} = \frac{40 - 0.8 \times 20}{2} = 12cm$$

$$n' = \frac{\sqrt{d\ b_f}}{4} = \frac{\sqrt{20 \times 20}}{4} = 5cm$$

$$x = 30.8 > m = 10.5 \rightarrow f_m = f_p\left(1 - \frac{m}{x}\right) = 0.138\left(1 - \frac{10.5}{30.8}\right) = 0.091$$

$$M_{pl}^{(m)} = \left(\frac{7}{6}f_p - \frac{2}{3}f_m\right)Bm^2\left(\frac{7}{6}\times 0.138 - \frac{2}{3}\times 0.091\right)\times 40\times 10.5^2 = 442\ ton.cm$$

$$c = max(n, n') = max(12,5) = 12cm$$

$$f_{avg} = \frac{P_u}{BN} = \frac{60}{40\times 40} = 0.038\frac{ton}{cm^2}$$

$$\mathrm{M_{pl}^{(c)}} = \frac{\mathrm{f_{avg}Bc^2}}{2} = \frac{0.038\times 40\times 12^2}{2} = 108\ \mathrm{ton.cm}$$

$$M_{pl}^{(T)} = T_u[m - (N - N')] = 25\times(10.5 - 5) = 137.5\ ton.cm$$

$$\mathrm{M_{u,pl}} = \mathrm{max}\left(\mathrm{M_{pl}^{(m)}}, \mathrm{M_{pl}^{(c)}}, \mathrm{M_{pl}^{(T)}}\right) = 442\ \mathrm{ton.cm}$$

گام ۸- کنترل ظرفیت خمشی صفحه ستون

$$M_{u,pl} \le \phi_b M_n = \phi_b f_y Z_{pl} = \phi_b f_y B\frac{t_p^2}{4} \rightarrow t_{pl} \ge \sqrt{\frac{4M_{u,pl}}{\phi_b f_y B}}$$

$$\rightarrow t_p \ge \sqrt{\frac{4\times 442}{0.9\times 2.4\times 40}} = 8.12cm \rightarrow t_{pl} = 8.2cm$$

$$\rightarrow USE\ PL60\times 50\times 5.5cm$$

گام ۹- محاسبه نیاز برشی

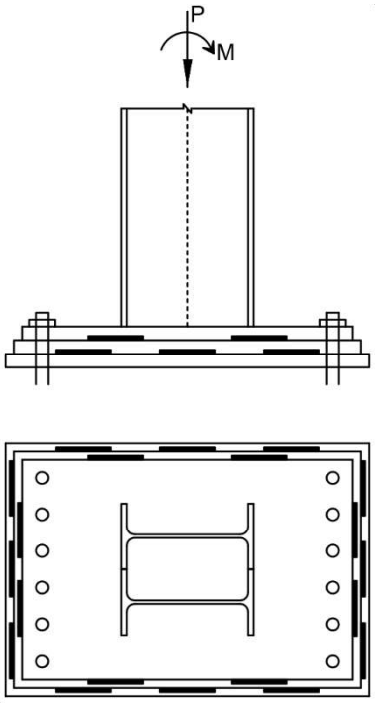
گام ۱۰- کنترل ظرفیت برشی

برای این صفحه ستون از $4\Phi 22$ به عنوان میل‌مهار در چهار گوشه صفحه ستون استفاده می‌شود تا چنانچه در اثر تغییر جهت زلزله، جهت ممان هم تغییر نمود، میل‌مهارهای طرف دیگر تحت تنش قرار گیرند.

گام ۱۱- نتیجه

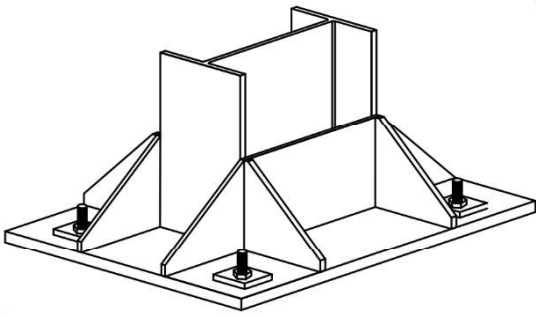
۸-۱۴ طراحی صفحه ستون با استفاده از سخت‌کننده (لچکی)

همانگونه که در مثال های قسمت های قبلی مشاهده شد، معمولاً ضخامت صفحه ستون ها مقادیر بزرگی بدست می‌آید. عملاً چنین صفحه ستون هایی دارای وزن زیاد بوده و جابجایی آن ها در کارگاه با دشواری همراه است. بعلاوه سوراخ نمودن صفحه ستون های با ضخامت زیاد با صعوبت زیادی همراه است. به همین منظور، یکی از روشهای کاهش ضخامت صفحه ستون استفاده از چند صفحه ستون با ضخامت کمتر که روی هم قرار می‌گیرند، می باشد. چنین حالتی در شکل ۸-۱۸ نمایش داده شده است و نحوه جوشکاری دو صفحه روی هم از ضوابط محاسباتی پیروی می‌نماید.



شکل ۸-۲۴ استفاده از چند ورق نازکتر به جای استفاده از یک ورق ضخیم

اما روش رایج جهت کاهش ضخامت کف ستون، استفاده از صفحات "سخت‌کننده" در پای ستون می‌باشد. چنین حالتی هم برای صفحه ستون های مفصلی وهم برای صفحه ستون های گیردار کاربرد دارد. در حالت گیردار که صفحه ستون علاوه بر نیروی محوری، لنگر خمشی بزرگی را نیز به فونداسیون منتقل می‌کند، بهتر است از صفحات سخت کننده که مقاومت مناسبی در مقابل خمش صفحه ستون ایجاد می‌کنند، استفاده نمود. این صفحات توزیع تنش زیر صفحه ستون را تغییر نمی‌دهند، بلکه با افزایش اساس مقطع خمشی صفحه، تنش های خمشی در مقطع بحرانی آنرا کاهش داده و در نتیجه ضخامت کف ستون، کاهش می‌یابد. در شکل ۸-۱۸ چگونگی تقویت صفحه ستون با استفاده از سخت‌کننده‌ها به منظور کاهش ضخامت آن نشان داده شده است.



شکل ۸-۲۵ تقویت صفحه ستون با استفاده از سخت کننده‌ها

اصول طراحی صفحه ستون با سخت‌کننده (چه برای حالت اتصال مفصلی وچه برای حالت اتصال گیردار) با طراحی صفحه ستون در حالت عادی تفاوتی ندارد و به طور کلی مراحل گام به گام طراحی صفحه ستون با سخت کننده به شرح زیر است:

گام ۱: ابتدا ابعاد صفحه ستون با توجه به ابعاد ستون تعیین می‌شود.

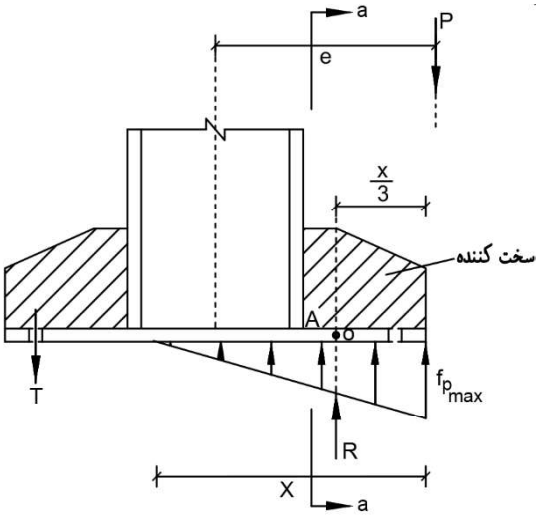
گام ۲: خروج از مرکزیت بار را تعیین کرده، اگر $e_u < \frac{N}{6}$ باشد، توزیع تنش ذوزنقه‌ای است و میل‌مهارها به کشش نمی‌افتند و اگر $\frac{N}{6} < e_u < \frac{N}{2}$ و یا $e_u > \frac{N}{2}$ باشد، توزیع تنش مثلثی است و میل‌مهارها به کشش می‌افتند.

گام ۳: با تعیین نسبت $\frac{e_u}{N}$ ، با استفاده از جدول ۸-۱ مقدار $\frac{x}{N}$ را یافته و طول گسترش تنش (x) تعیین می‌شود. اگر $\frac{e_u}{N}$ مورد نظر دقیقا مقادیر جدول نبود، می‌توان $\frac{x}{N}$ را با درونیابی خطی بدست آورد.

جدول ۸-۱ تعیین طول گسترش تنش(x)

$\frac{e_u}{N}$	0.08	0.3	0.52	0.6	0.615	0.64	0.75	0.87	1.0
$\frac{x}{N}$	1	۱	0.48	0.4	039	0.37	0.35	0.34	0.333

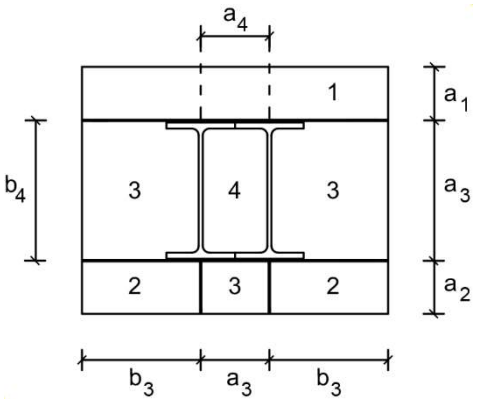
گام ۴: با معادله لنگر حول نقطه Oدر شکل ۸-۱۹ نیروی کششی T_u بدست می‌آید و با نوشتن برآیند نیروها در راستای قائم، نیروی R که مجموع نیروی کششی و بار محوری است، بدست می آید:



شکل ۸-۲۶ توزیع تنش و برآیند نیروها در زیر صفحه ستون همراه با سخت کننده

گام ۵: تنش فشاری بیشینه موجود در زیر صفحه ستون با استفاده از رابطه (۸-۳۴) تعیین و با مقاومت اتکایی طراحی مقایسه می‌شود. در صورتی که رابطه برقرار نباشد، ابعاد صفحه ستون افزایش می‌یابد.

گام ۶: موقعیت فرضی را برای سخت کننده ها برروی صفحه ستون بر طبق شکل ۸-۲۰ در نظر گرفته و نواحی چهارگانه تعیین می‌شود.



شکل ۸-۲۷ موقعیت سخت کننده ها روی صفحه ستون و تعیین نواحی چهارگانه

الف) ناحیه ۱: ناحیه‌ای است که از سه طرف باز و از یک طرف بسته است و مانند یک تیر طره‌ای عمل می‌نماید. لنگر حداکثر بر واحد طول صفحه در این ناحیه برابر است با:

$$m_1 = \frac{q_{u1}a_1^2}{2} \qquad ۸\text{-}۲۳$$

q_{u1}: تنش ماکزیمم ناشی از بارهای ضریبدار زیر صفحه ستون در ناحیه ۱

a_1: بعد کوچک تر ناحیه ۱

ب) ناحیه ۲: ناحیه‌ای است که از دو طرف بسته و از دو طرف باز است. لنگر حداکثر بر واحد طول صفحه در این ناحیه برابر است با:

$$m_2 = \frac{q_{u2}a_2^2}{2} \qquad ۸\text{-}۲۴$$

q_{u2}: تنش ماکزیمم ناشی از بارهای ضریبدار زیر صفحه ستون در ناحیه۲

a_2: بعدکوچک تر ناحیه۲

ج) ناحیه ۳: ناحیه‌ای است که از سه طرف بسته و از یک طرف باز است. نقطه بحرانی در چنین ورقی، وسط لبه آزاد می‌باشد. لنگر مربوط به این نقطه از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$m_3 = \beta_3 q_{u3} a_3^2 \qquad ۸\text{-}۲۵$$

q_{u3}: تنش ماکزیمم ناشی از بارهای ضریبدار زیرصفحه ستون در ناحیه ۳

a_3: طول لبه آزاد ناحیه۳

β_3: ضریبی است که از جدول ۸-۲ برحسب $\frac{b_3}{a_3}$ بدست می‌آید و b_3 طول لبه غیرآزاد ناحیه ۳ است.

جدول ۸-۲ تعیین ضریب β_3 برحسب $\frac{b_3}{a_3}$

$\frac{b_3}{a_3}$	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۰/۹	۱	۱/۲	۱/۴	۲	بالای۲
β_3	۰/۰۶	۰/۰۷۴	۰/۰۸۸	۰/۰۹۷	۰/۱۰۷	۰/۱۱۲	۰/۱۲	۰/۱۲۹	۰/۱۳۲	۰/۱۳۳

این جدول زمانی معتبر است که نسبت $\frac{b_3}{a_3}$ از ۰/۵ بزرگتر باشد. در صورتیکه مقدار $\frac{b_3}{a_3}$ از ۰/۵ کوچکتر باشد، مانند ناحیه ۱ به صورت طره عمل می شود.

د) ناحیه ۴: ناحیه‌ای است که از چهار طرف بسته است. لنگر حداکثر چنین ورقی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$m_4 = \beta_4 \times q_{u4} \times a_4^2 \qquad ۲۶-۸$$

q_{u4}: تنش ماکزیمم ناشی از بارهای ضریبدار زیر صفحه ستون در ناحیه ۴

a_4: طول بعد کوچک‌تر ناحیه ۴

β_4:ضریبی است که از جدول ۸-۳ بر حسب $\frac{b_4}{a_4}$ بدست می‌آید و b_4 طول بعد بزرگ تر ناحیه ۴ است.

جدول ۸-۳ تعیین ضریب β_4 برحسب $\frac{b_4}{a_4}$

$\frac{b_4}{a_4}$	۱	۱/۱	۱/۲	۱/۳	۱/۴	۱/۵	۱/۶	۱/۸	۲	بالای۲
β_4	۰/۰۴۸	۰/۰۵۵	۰/۰۶۳	۰/۰۶۹	۰/۰۷۵	۰/۰۸۱	۰/۰۸۶	۰/۰۹۴	۰/۱	۰/۱۲۵

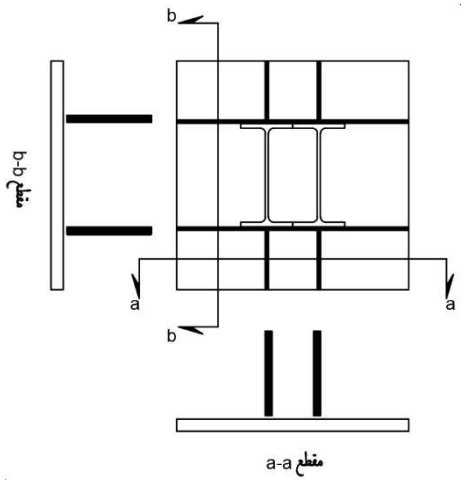
توجه: لنگرهای حاصل از $\{m_1, m_2, m_3, m_4\}$ در روابط بالا، ممان واحد عرض صفحه می‌باشند.

گام ۷: از میان لنگر در نواحی چهارگانه، لنگر بیشینه(که در عرض واحد صفحه ستون وارد می شود) انتخاب و با استفاده از رابطه زیر ضخامت صفحه ستون تعیین می‌شود:

$$M_u \le \phi_m M_n, \phi = 0.9$$
$$M_u = max\{m_1, m_2, m_3, m_4\}$$
$$M_n = Z_p F_y = (\frac{1 t_p^2}{4}) F_y \qquad ۲۷-۸$$

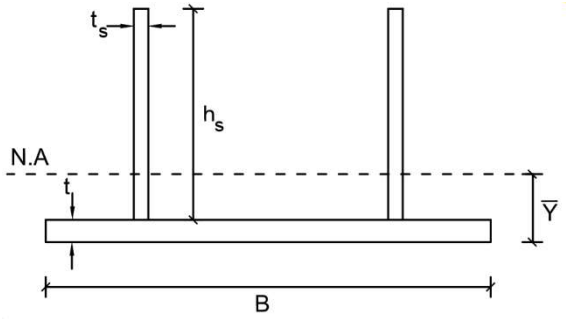
نحوه قرارگیری سخت کننده ها برروی صفحه ستون باید به گونه‌ای باشد که لنگرها در نواحی مختلف تقریباً به یکدیگر نزدیک باشند. اگر ضخامت صفحه از رابطه (۸-۵۹) زیاد بدست آمد، از سخت کننده های بیشتری برروی صفحه ستون استفاده می‌شود تا ضخامت کاهش پیدا کند و باید محاسبات مربوط به تعیین ضخامت مجددا تکرار شود.

گام ۸: ابعاد سخت کننده ها با توجه به نیروهای وارده بر آنها تعیین می‌شود. مقطعی که از بر ستون می‌گذرد بیشترین نیرو را به سخت کننده ها وارد می‌کند و کنترل ابعاد آنها در این مقطع صورت می‌گیرد. مقطع مورد کنترل، دارای اثر توام لنگر خمشی و تلاش برشی می‌باشد. با استفاده از دیاگرام توزیع تنش در زیر صفحه ستون طبق شکل ۸-۱۹ مقادیر لنگر خمشی و تلاش برشی در مقطعی که از بر ستون می‌گذرد به دست می‌آید. شکل ۸-۲۱ یک صفحه ستون و مقاطع آن را نشان می‌دهد.



شکل ۸-۲۸ صفحه ستون و مقاطع آن

برای کنترل تنش و تعیین ابعاد سخت‌کننده‌ها با فرض مناسبی برای ارتفاع و ضخامت سخت کننده ها، ممان اینرسی و اساس مقطع برای شکل ۸-۲۲ از روابط زیر تعیین می گردد.



شکل ۸-۲۹ مقطع مقاوم در برابر خمش (برش $a-a$ از (شکل ۸-۲۲))

$$\bar{Y} = \frac{Bt\frac{t}{2}+n_s h_s t_s\left(\frac{h_s}{2}+t\right)}{Bt+n_s h_s t_s} \qquad ۲۸\text{-}۸$$

$$I_s = \frac{1}{12}Bt^3 + Bt\left(\bar{Y}-\frac{t}{2}\right)^2 + n_s\left[\frac{1}{12}t_s h_s^3 + h_s t_s\left(\frac{h_s}{2}+t-\bar{Y}\right)^2\right] \qquad ۲۹\text{-}۸$$

$$S_{Top} = \frac{I_s}{C} = \frac{I_s}{h_s+t-\bar{Y}} \qquad ۳۰\text{-}۸$$

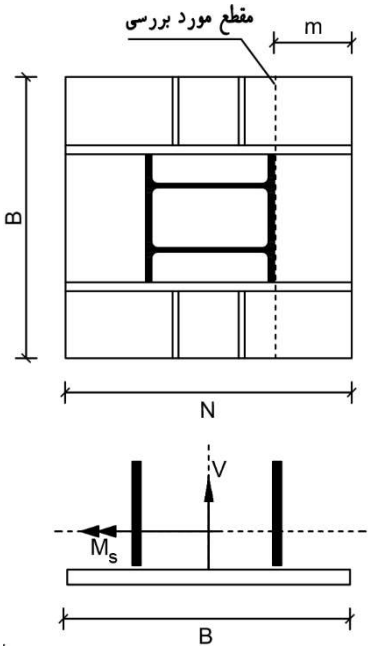
در این روابط B عرض مقطع، t ضخامت صفحه ستون، n_s تعداد سخت کننده های موجود در مقطع، h_s ارتفاع سخت کننده ها و t_s ضخامت سخت کننده ها و S اساس مقطع متشکل از صفحه و سخت کننده ها، نسبت به تار بالا می‌باشد.

برای محاسبه لنگر و برش موجود در مقطع با توجه به شکل ۸-۲۳ از روابط زیر استفاده می گردد:

$$f_p = \frac{P_u}{NB} \qquad ۳۱\text{-}۸$$

$$M_u = f_p B \frac{m^2}{2} \qquad ۳۲-۸$$

$$V_u = f_P B m \qquad ۳۳-۸$$



شکل ۸-۳۰ مقطع صفحه ستون و سخت کننده ها و نیروی وارد بر آنها

توجه: سه رابطهٔ اخیر فقط برا صفحه ستون مفصلی می‌باشد، در صورت اینکه صفحه ستون گیردار باشد باید محاسبه شوند.

بعد از محاسبه لنگر نهایی در مقطع مورد بررسی، طبق رابطه (۸-۶۵) کنترل می شود:

$$M_u \leq \phi_m M_n$$
$$M_u \leq 0.9 S_{Top} F_y \qquad ۳۴-۸$$

اگر کنترل تنش جواب داد، ابعاد سخت کننده ها مناسب است. در غیر این صورت مجددا با تغییر ابعاد سخت کننده ها محاسبات تکرار می گردد.

ضمنا چنانچه اضافه کردن ابعاد، مورد نظر نباشد، می‌توان تعداد سخت کننده ها را اضافه نمود. درصورتیکه مقدار $M_u << \phi_m M_n$ گردید، می‌توان ابعاد یا تعداد سخت کننده ها را کاهش داد. شرط اساسی در محاسبات فوق در انتخاب ابعاد سخت کننده ها و لچکی ها، اتصال صحیح ستون، صفحه ستون و لچکی ها به یکدیگر می باشد. این عمل از طریق جوش دادن قطعات مختلف به یکدیگر انجام می پذیرد. در زمان طرح لچکی ها باید دقت شود که امکان جوشکاری و در دسترس بودن جوش درزها در نظر گرفته شود.

گام ۹: به منظور تعیین مساحت میل‌مهارها برای تحمل کشش از رابطه (۸-۳۷) (اگر میل‌مهار تحت اثر توام برش و کشش بود) استفاده می‌شود.

آرایش سخت‌کننده‌های پای ستون باید به گونه‌ای باشد که ممان های چهارگانه را کاهش دهد، برای این منظور اضافه کردن سخت کننده در ناحیه‌ای که دارای ممان ماکزیمم می‌باشد مفید است (باعث کاهش ممان و در نتیجه کاهش ضخامت صفحه ستون می‌شود).

یک روش معمول برای کاهش ضخامت صفحه ستون در ساختمانهای بلند آن است که علاوه بر سخت‌کننده‌های میانی، یک سخت کننده در محیط صفحه ستون قرار می‌دهند، بدین ترتیب تمام نواحی چهارگانه صفحه ستون تبدیل به ناحیه ۴ می‌شوند. بنابراین ممان صفحه ستون کاهش و در نتیجه ضخامت آن نیز کاهش می‌یابد.

مثال ۵-۸

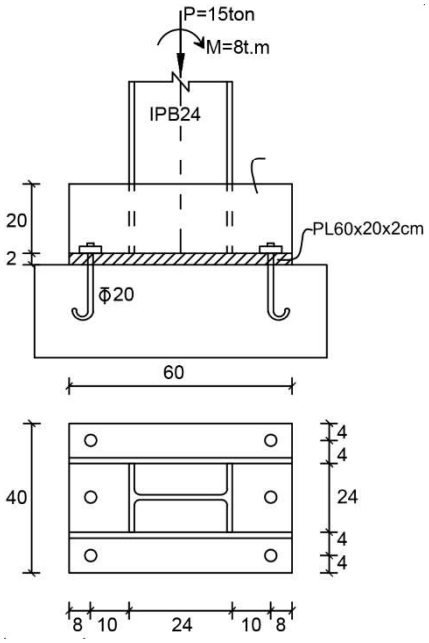
کف ستونی با مشخصات داده شده در شکل ۸-۲۴ تحت بارهای نهایی مورد نظر است. برای این صفحه ستون کنترلهای زیر را انجام دهید.

الف) کنترل تنش در بتن و کنترل ابعاد صفحه ستون و ضخامت آن

ب) کنترل کشش در میل‌مهار و کنترل مشخصات میل‌مهارها براساس تنش نهایی مذکور

ج) کنترل مشخصات سخت کننده ها

$$f'_c = 210\frac{kg}{cm^2}, F_y = 2400\frac{kg}{cm^2}, F_u = 3700\frac{kg}{cm^2}$$



شکل ۸-۳۱ مشخصات صفحه ستون (ابعاد بر حسب سانتیمتر) (مثال ۸-۵)

حل:

$$e_u = \frac{M_u}{P_u} = \frac{8 \times 10^5}{15 \times 10^3} = 53.33 \quad cm$$

$$e_u = 53.33 \quad cm > \frac{N}{2} = \frac{60}{2} = 30 \quad cm$$

در نتیجه توزیع تنش مثلثی است و میل‌مهارها به کشش می‌افتند. با توجه به جدول ۸-۱ طول گسترش تنش بدست می آید.

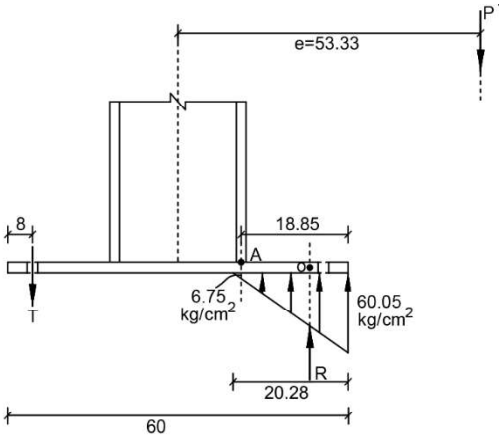
$$\frac{e_u}{N}=\frac{53.33}{60}=0.89\Rightarrow\frac{x}{N}=0.338\Rightarrow x=0.338\times N\rightarrow x=20.28\quad cm$$

با توجه به شکل ۸-۲۶، با معادله لنگر حول نقطه O در محل اعمال R ، نیروی کششی میل‌مهارها بدست می‌آید.

$$\sum M_O=\circ\Rightarrow T_u\left(N-8-\frac{x}{3}\right)=P_u\left(e_u-\frac{N}{2}+\frac{x}{3}\right)$$
$$\Rightarrow T_u\left(60-8-\frac{20.28}{3}\right)=15\times10^3\left(53.33-30+\frac{20.28}{3}\right)\Rightarrow T_u=9976.8\quad kg$$

با مساوی صفر قرار دادن نیروها در راستای قائم، نیروی برآیند R بدست می آید.

$$\sum F_y=\circ\Rightarrow R=T_u+P_u=9976.8+15000=24976.8\quad kg$$



شکل ۸-۳۲ توزیع تنش در زیر صفحه ستون (ابعاد بر حسب سانتیمتر) (مثال ۸-۵)

با محاسبه تنش فشاری بیشینه و مقایسه آن تنشها کفایت ابعاد صفحه ستون کنترل می شود.

$$f_{p(max\ )}=\frac{2R}{xB}=\frac{2\times24976.8}{20.28\times40}=61.58\le\phi_c(0.85f'_c)=0.65(0.85\times210)=116.025\quad\frac{kg}{cm^2}$$

ابعاد صفحه ستون قابل قبول است.

برای تعیین ضخامت، ابتدا لنگر در نواحی مختلف شکل ۸-۲۵ تعیین می‌شود:

$$m_1=\frac{q_{u1}a_1^2}{2}=\frac{61.58\times8^2}{2}=1970.56\quad\frac{kg.cm}{cm}$$
$$\frac{b_3}{a_3}=\frac{18}{24}=0.75\Rightarrow\beta_3=0.0925$$
$$m_3=\beta_3\times q_{u3}\times a_3^2=0.0925\times61.58\times24^2=3281\quad\frac{kg.cm}{cm}$$
$$m=max(m_1,m_3)=max(1970.56,3281)=3281\quad\frac{kg.cm}{cm}$$
$$M_u\le\phi_mM_n$$
$$M_n=Z_pF_y=\frac{1\times t_p^2}{4}F_y$$

$$3281 \le 0.9 \times \frac{t_p^2}{4} \times 2400 \Rightarrow t_p = 2.46 \quad cm$$

ناحیه ۴ با توجه به اینکه ابعاد کوچکی دارد، همچنین ۴ طرف آن گیردار است و نیز تنش حداکثر زیر این ناحیه مقدار کمی است، تعیین کننده نیست.

ضخامت صفحه ستون مناسب نیست و وضعیت قرارگیری سخت کننده ها بایستی تغییر کند به نحوی که لنگر ماکزیمم کاهش یابد.

حل ب)

کنترل کشش در میل‌مهارها:

$$A_b \ge \frac{T_u}{0.75 \times 0.75F_u} \Rightarrow A_b \ge \frac{9976.8}{0.75 \times 0.75 \times 5200} \Rightarrow A_b \ge 3.41 \quad cm^2$$
$$3\bar{\phi}20 \Rightarrow A_b = 3 \times 3.14 = 9.42 \quad cm^2 \ge 3.41 \quad cm^2$$

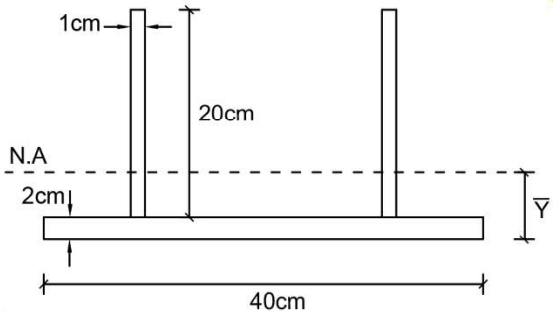
میل‌مهارها برای تحمل کشش جوابگو هستند.

ج) کنترل سخت کننده ها:

با توجه به شکل ۸-۲۶ لنگر در نقطه A به شرح زیر بدست می آید:

$$M_A = \left[\frac{6.75 \times 18.85^2}{2} + \frac{(60.05 - 6.75) \times 18.85}{2} \times \frac{2}{3} \times 18.85\right] \times 40 = 273996 \quad kg.cm$$

مقطع مقاوم در برابر خمش مطابق شکل ۸-۲۶ می باشد:



شکل ۸-۳۳ مقطع مقاوم در برابر خمش

$$\bar{Y} = \frac{Bt\frac{t}{2} + n_s\left(h_s t_s\left(\frac{h_s}{2} + t\right)\right)}{Bt + n_s(h_s t_s)} = \frac{40 \times 2 \times 1 + 2(20 \times 1 \times 12)}{40 \times 2 + 2(20 \times 1)} = 4.7 \quad cm$$

$$I_s = \frac{1}{12}Bt^3 + Bt\left(\bar{Y} - \frac{t}{2}\right)^2 + n_s\left[\frac{1}{12}t_s h_s^3 + h_s t_s\left(\frac{h_s}{2} + t - \bar{Y}\right)^2\right]$$

$$I_s = \frac{1}{12} \times 40 \times 2^3 + 40 \times 2 \times 3.7^2 + 2\left[\frac{1}{12} \times 1 \times 20^3 + 20 \times 7.3^2\right] = 4586.8 \quad cm^4$$

$$S_{Top} = \frac{I_s}{C} = \frac{I_s}{h_s + t - \bar{Y}} = \frac{4586.8}{20 + 2 - 4.7} = 265.13 \quad cm^3$$

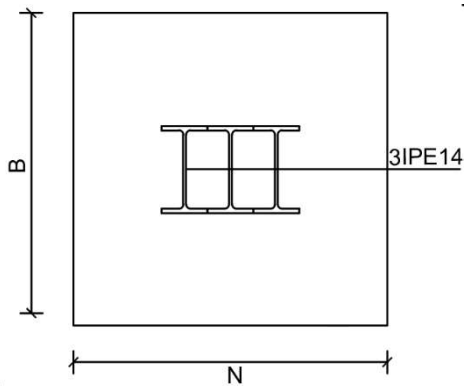
$$M_u \le \phi_m M_n, \phi_m = 0.9$$
$$M_n = S_{Top}F_y$$

$273996 \quad kg.cm \leq 0.9 \times 265.13 \times 2400 = 572680.8 \quad kg.cm$

ابعاد سخت‌کننده‌ها برای تحمل خمش مناسب است.

مثال ۶-۸

صفحه ستونی که دارای نیروی محوری بدون لنگر و خروج از مرکزیت، برابر $200ton$ می باشد را مطابق شکل ۸-۲۷ طراحی نمایید. ابعاد ستون $3IPE14$ و صفحه ستون در لبه یک فونداسیون نواری قرار دارد. بتن مصرفی در فونداسیون دارای مقاومت مشخصه برابر $210\frac{kg}{cm^2}$ می باشد.



شکل ۸-۳۴ مقطع صفحه ستون (مثال ۸-۶)

حل:

ابتدا با توجه به مقطع ستون، صفحه ستون به صورت مربع و به ابعاد $50 \times 50cm$ انتخاب می شود و با مقایسه تنش موجود و مجاز فونداسیون، این ابعاد کنترل می گردد.

تنش فشاری مجاز در فونداسیون با فرض صفحه ستون در کنار آن

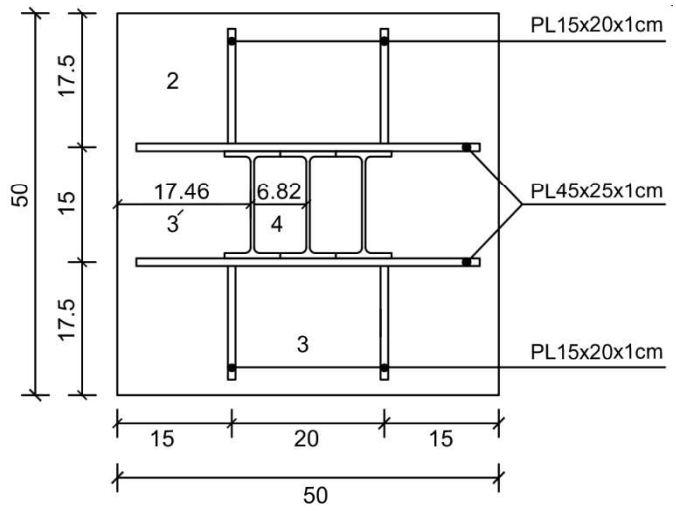
تنش فشاری موجود

$$f_u = \frac{P_u}{A_p} = \frac{200 \times 10^3}{50 \times 50} = 80 \leq 0.65 \times 0.85 \times 210 = 116.025 \quad \frac{kg}{cm^2}$$

ابعاد فونداسیون مناسب می باشد.

گام ۱- ضخامت صفحه ستون

ضخامت صفحه ستون بر اساس نواحی موجود و آرایش سخت کننده ها طبق شکل ۸-۲۹ محاسبه می گردد.



شکل ۸-۳۵ نواحی مختلف و ابعاد فرض شده برای سخت کننده ها(ابعاد بر حسب سانتیمتر)

$$m_2 = \frac{q_{u2}a_2^2}{2} = \frac{80 \times 14.5^2}{2} = 8410 \quad \frac{kg.cm}{cm}$$

$$\frac{b_3}{a_3} = \frac{17}{19} = 0.89 \Rightarrow \beta_3 = 0.106$$

$$m_3 = \beta_3 q_{u3} a_3^2 = 0.106 \times 80 \times 19^2 = 3061.28 \quad \frac{kg.cm}{cm}$$

$$\frac{b_{3'}}{a_{3'}} = \frac{17.46}{14} = 1.25 \Rightarrow \beta_{3'} = 0.122$$

$$m_{3'} = \beta_{3'} q_{u3} a_{3'}^2 = 0.122 \times 80 \times 14^2 = 1912.96 \quad \frac{kg.cm}{cm}$$

$$\frac{b_4}{a_4} = \frac{14}{6.82} = 2.05 \Rightarrow \beta_4 = 0.125$$

$$m_4 = \beta_4 q_{u4} a_4^2 = 0.125 \times 80 \times 6.82^2 = 465.12 \quad \frac{kg.cm}{cm}$$

$$m = max(m_2, m_3, m_{3'}, m_4) = 8410 \quad \frac{kg.cm}{cm}$$

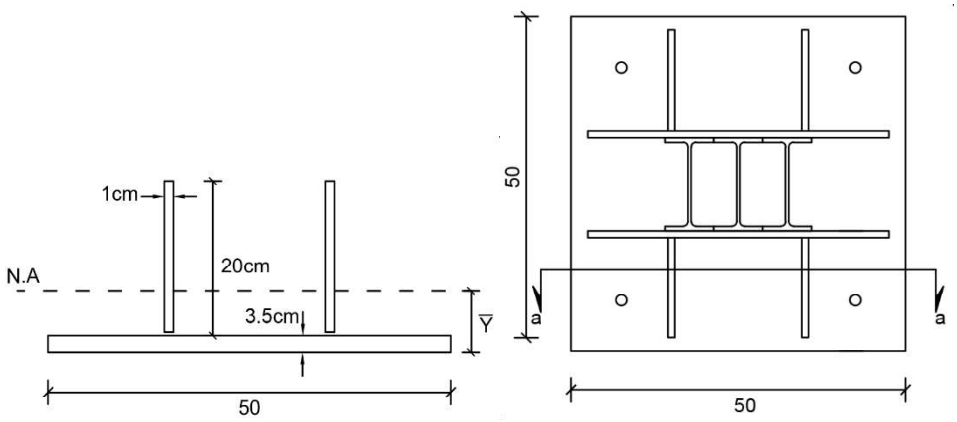
$$M_u \leq \phi_m M_n$$

$$8410 \leq 0.9 \times \frac{t_p^2}{4} \times 2400 \Rightarrow t_p \geq 3.94 \quad cm$$

بنابراین از ورق به ضخامت 4cm استفاده می شود. برای کاهش ضخامت صفحه ستون می توان از ورقهای اطراف صفحه ستون استفاده نمود. با توجه به روابط فوق از صفحه ستون به ابعاد $50 \times 50 \times 4cm$ استفاده می شود.

گام ۲- طراحی سخت کننده ها:

برای طراحی ابعاد لچکی ها دو برش $\text{a} - \text{a}$ و $b - b$ از صفحه ستون زده می‌شود. بر این اساس محاسبات به شرح زیر می‌باشد.



الف) مقطع صفحه ستون ب) برش $a-a$

شکل ۸-۳۶ نمایش مقطع مقاوم در برابر خمش برای طراحی سخت کننده

با توجه به شکل فوق کنترل ابعاد لچکی ها به صورت زیر انجام می شود.

$$\bar{Y}=\frac{Bt\frac{t}{2}+n_s\left(h_s t_s\left(\frac{h_s}{2}+t\right)\right)}{Bt+n_{s(h_s t_s)}}=\frac{50\times 4\times 2+2(20\times 1\times 14)}{50\times 4+2(20\times 1)}=4cm$$

$$I_s=\frac{1}{12}Bt^3+Bt\left(\bar{Y}-\frac{t}{2}\right)^2+n_s\left[\frac{1}{12}t_s h_s^3+h_s t_s\left(\frac{h_s}{2}+t-\bar{Y}\right)^2\right]$$

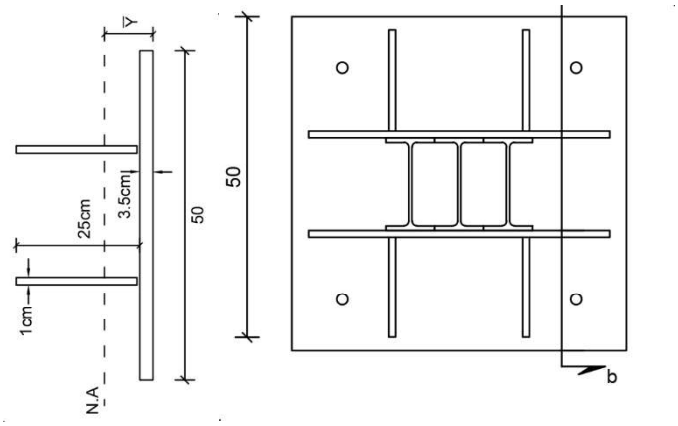
$$I_s=\frac{1}{12}\times 50\times 4^3+50\times 4\times 2^2+2\left[\frac{1}{12}\times 1\times 20^3+20\times(10+4-4)^2\right]=6400\quad cm^4$$

$$S_{Top}=\frac{I_s}{C}=\frac{I_s}{h_s+t-\bar{Y}}=\frac{6400}{20+4-4}=320\quad cm^3$$

$$M_u=f_P B\frac{m^2}{2}=80\times 50\times\frac{15^2}{2}=450000\quad kg.cm$$

$$450000\quad kg.cm\leq 0.9\times 320\times 2400=691200\quad kg.cm$$

بنابراین ابعاد سخت‌کننده‌ها مناسب می‌باشد.



الف) مقطع صفحه ستون ب) برش $b-b$

شکل ۸-۳۷ نمایش مقطع مقاوم در برابر خمش برای طراحی سخت کننده

گام ۳- ابعاد لچکی ها

با توجه به شکل فوق کنترل ابعاد لچکی ها به صورت زیر انجام می شود.

$$\bar{Y} = \frac{Bt\frac{t}{2} + n_s\left(h_s t_s\left(\frac{h_s}{2} + t\right)\right)}{Bt + n_s(h_s t_s)}$$

$$\Rightarrow \bar{Y} = \frac{50 \times 4 \times 2 + 2(25 \times 1 \times 16.5)}{50 \times 4 + 2(25 \times 1)} = 4.9 \quad cm$$

$$I_s = \frac{1}{12}Bt^3 + Bt\left(\bar{Y} - \frac{t}{2}\right)^2 + n_s\left[\frac{1}{12}t_s h_s^3 + h_s t_s\left(\frac{h_s}{2} + t - \bar{Y}\right)^2\right]$$

$$I_s = \frac{1}{12} \times 50 \times 4^3 + 50 \times 4 \times (4.9 - \frac{4}{2})^2 + 2\left[\frac{1}{12} \times 1 \times 25^3 + 25 \times (12.5 + 4 - 4.9)^2\right]$$

$$= 11280.84 \quad cm^4$$

$$S_{Top} = \frac{I_s}{C} = \frac{I_s}{h_s + t - \bar{Y}} = \frac{11280.84}{25 + 4 - 4.9} = 468.08 \quad cm^3$$

$$M_u = f_P B\frac{m^2}{2} = 80 \times 50 \times \frac{17.5^2}{2} = 612500 \quad kg.cm$$

$$612500 \quad kg.cm \leq 0.9 \times 468.08 \times 2400 = 1011052.8 \quad kg.cm$$

بنابر این ابعاد سخت‌کننده‌ها مناسب می‌باشد.

۸-۱۵ موارد ویژه در طراحی صفحه ستون

در این قسمت نکات ویژه در طراحی صفحه ستون، در موارد خاص به شرح زیر مطرح می گردد.

۸-۱۵-۱ اثر خمش دو محوره در طراحی صفحه ستون

تحلیل دقیق مجموعه ورق صفحه ستون و میل‌مهارها، تحت اثر نیروی محوری و لنگرهای خمشی در دو راستا، به طور مستقیم و از روابط معمول مقاومت مصالح ممکن نیست، در نتیجه برای یافتن محل تار خنثی، باید از روش سعی و خطا استفاده نمود.

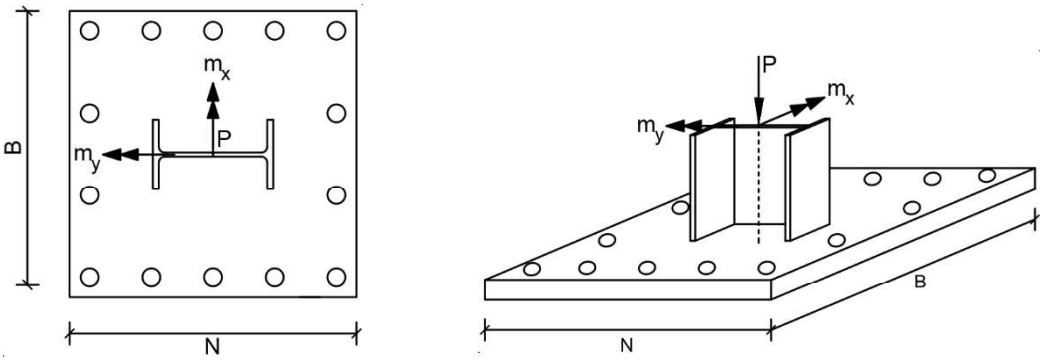
در روش سعی و خطا، ابتدا با توجه به خصوصیات لنگرهای خمشی در دو راستا، محل تار خنثی فرض می شود، سپس بر اساس آن و با توجه به توزیع تنش در زیر صفحه ستون، نیروی فشاری در زیر صفحه ستون(که برابر حجم هرم ناقص تنش های فشاری است) و نیروهای موجود در میل‌مهار محاسبه می شوند. در محاسبه نیروها با استفاده از سازگاری تغییرمکان ها، می توان رابطه بین بیشترین تنش فشاری و بیشترین نیروی میل‌مهار را تعیین نمود و این دو مجهول را با یک مجهول در معادلات تعادل جایگزین نمود.

پس از نوشتن معادلات تعادل نیروها در راستای قائم و لنگرها در دو راستای x و y اگر هر سه معادله برقرار شوند، نتیجه می شود که راستا و وضعیت تار خنثی درست فرض شده است. در صورتی که تعادل برقرار نشود، باید با یک فرض جدید برای تار خنثی کلیه مراحل محاسبات تکرار شود.

۸-۱۵-۱-۱ راه حل ساده برای طراحی صفحه ستون با خمش دو محوره

با توجه به اینکه استفاده از روش دقیق در مسائل کاربردی و عملی وقت گیر می باشد و نیاز به فرضیات و سعی و خطا زیاد دارد، لذا می توان برای طراحی چنین صفحه ستون هایی از راه حل ساده شده زیر استفاده نمود.

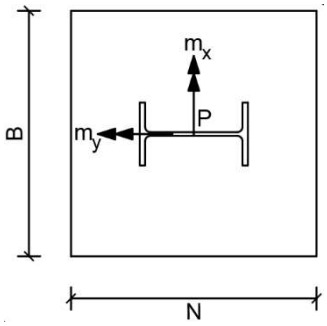
هنگامی که اتصال پای ستون گیردار باشد(مانند قرارگیری ستون در سیستم قاب خمشی در دو جهت) به صفحه ستون همراه نیروی محوری، لنگر خمشی در دو جهت نیز وارد می شود(طبق شکل ۸-۳۱).



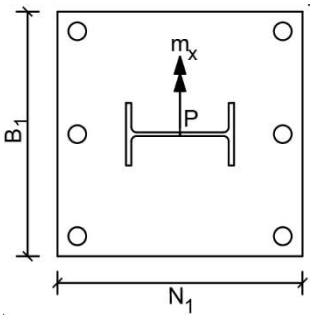
الف) پلان ب) نمای سه بعدی

شکل ۸-۳۸ صفحه ستون تحت اثر نیروی محوری P و خمش دو طرفه M_x و M_y

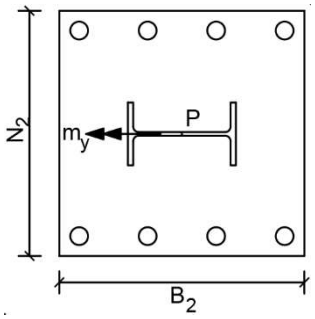
برای طراحی، ابتدا صفحه ستون مورد بررسی به دو صفحه ستون تحت اثر نیروی محوری P و خمش یک محوره مجزا تبدیل می شود، سپس هر یک از صفحه ستونهای مذکور به طور مجزا طراحی و میل‌مهارهای مربوط به هریک به طور مجزا طبق قسمت (۸-۶) محاسبه می گردد، در انتها پوش (اجتماع اجزاء) دو حالت به عنوان طراحی نهایی منظور می گردد.(شکل ۸-۳۲)



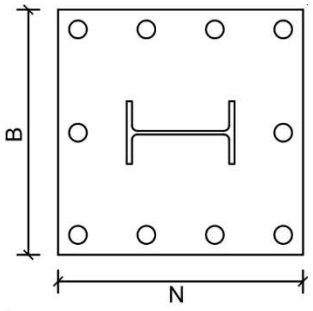
الف) صفحه ستون با خمش دو محوره



ب) صفحه ستون با خمش یک محوره M_x



پ) صفحه ستون با خمش یک محوره M_y



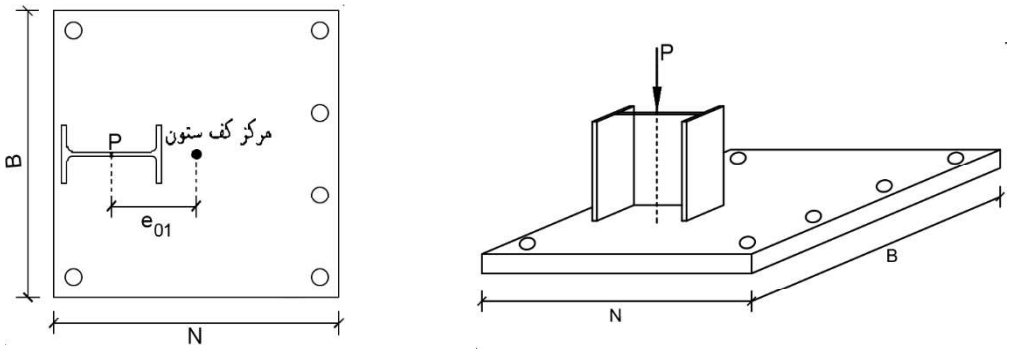
ت) طراحی نهایی صفحه ستون با خمش دو محوره

شکل ۸-۳۹ مراحل طراحی صفحه ستون تحت اثر نیروی P و خمش دومحوره

توجه: در نامگذاری نشان داده شده در شکل ۸-۳۲-ب و ۸-۳۲-پ، N_1, N_2 بعد صفحه ستون در راستای خمش و B_1, B_2 بعد صفحه ستون در راستای عمود بر خمش می باشد.

۸-۱۵-۲ طراحی صفحه ستون با ستون مفصلی کنار

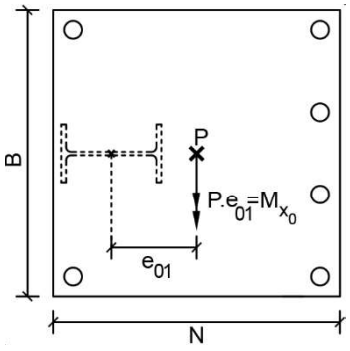
در پلان صفحه گذاری یک ساختمان، معمول آن است که ستون را در مرکز صفحه ستون قرار می دهند. اما در مرز زمین (مجاور همسایه یا خیابان) معمول آن است که ستون را در کنار صفحه ستون قرار می دهند تا از سطح زمین استفاده بهینه گردد. هنگامی که ستون در کنار صفحه ستون با اتصال مفصلی است، به صفحه ستون علاوه بر نیروی محوری، لنگر حاصل از خروج از مرکزیت هندسی (فاصله محور ستون تا محور صفحه ستون) طبق شکل ۸-۵۲ وارد می شود.



الف) پلان ب) نمای سه بعدی

شکل ۸-۴۰ صفحه ستون مفصلی با ستون کنار

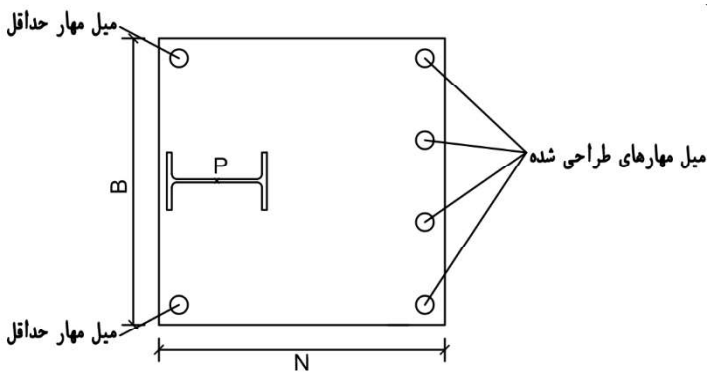
مدل تحلیلی شکل ۸-۳۳-الف مانند شکل ۸-۳۴ می باشد.



شکل ۸-۴۱ مدل تحلیلی صفحه ستون مفصلی با ستون کنار

طراحی این نوع صفحه ستون، همانند طراحی صفحه ستون تحت اثر نیروی محوری P و خمش یک محوره طبق قسمت (۸-۶) می باشد.

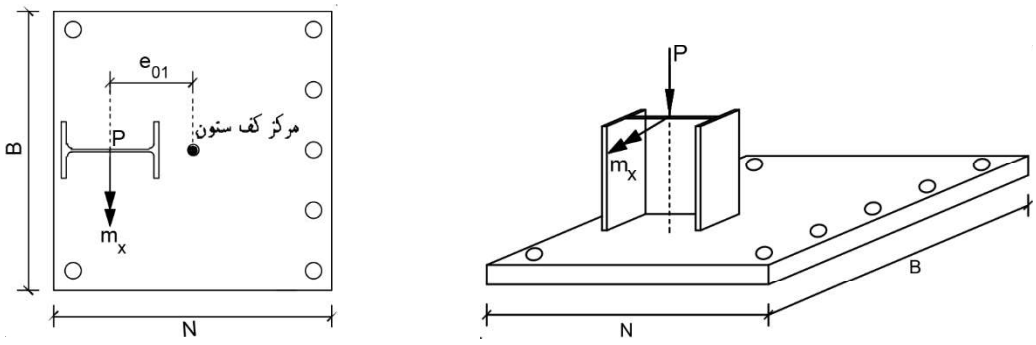
توجه: از آنجایی که نیروی محوری P تمایل دارد سمت راست صفحه ستون را به کشش بیندازد، میل‌مهارهای طراحی شده در وجهی از صفحه ستون قرار می گیرند که تحت کشش می باشد. از آنجایی که جهت لنگر صفحه ستون، عوض نمی شود، نیازی به تأمین میل‌مهار در وجه فشاری نمی باشد (میل‌مهارهای سمت فشاری با حداقل لازم در نظر گرفته می شود).



شکل ۸-۴۲ آرایش میل‌مهارها در صفحه ستون کنار

۸-۱۵-۳ طراحی صفحه ستون با ستون گیردار کنار

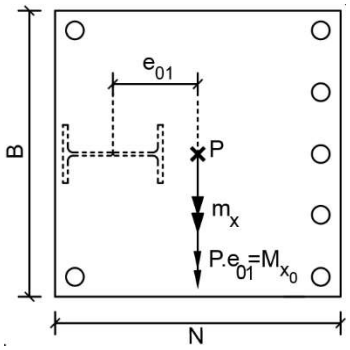
زمانی که ستون به علت قرار گرفتن در مجاورت همسایه یا خیابان در مرز زمین، در کنار صفحه ستون قرار می گیرد(ستون عضوی از قاب خمشی در یک جهت می باشد) به صفحه ستون علاوه بر نیروی محوری و لنگر خمشی (وارده شده از قاب خمشی بر اساس تحلیل سازه) لنگر حاصل از خروج از مرکزیت هندسی (فاصله محور ستون تا محور صفحه ستون) طبق شکل ۸-۳۶ نیز وارد می شود.



الف) پلان **ب) نمای سه بعدی**

شکل ۸-۴۳ صفحه ستون گیردار با ستون کنار

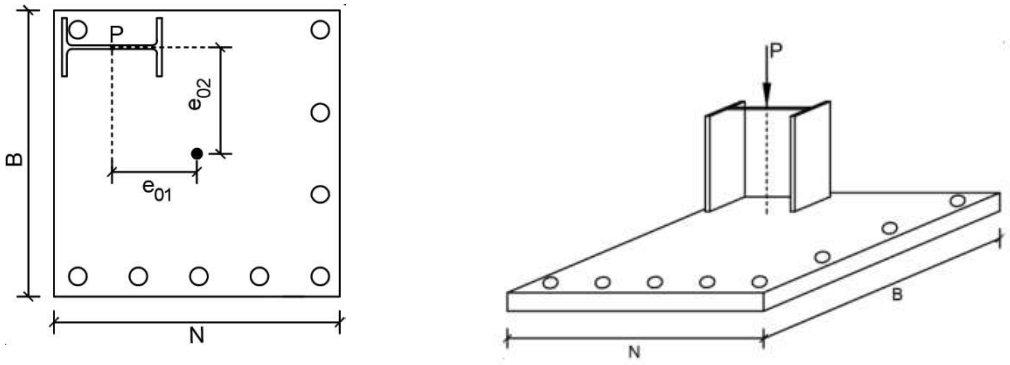
مدل تحلیلی شکل ۸-۳۶-الف طبق شکل ۸-۶۰ می باشد. طراحی این نوع صفحه ستون، مانند طراحی صفحه ستون تحت اثر نیروی محوری Pو خمش یک محوره طبق قسمت(۸-۶) می باشد.



شکل ۸-۴۴ مدل تحلیلی صفحه ستون گیردار با ستون کنار

۸-۱۵-۴ طراحی صفحه ستون با ستون مفصلی گوشه

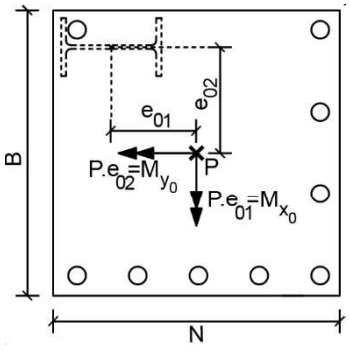
زمانی که ستون به علت مجاورت همسایه یا خیابان در مرز زمین، در گوشه صفحه ستون قرار می گیرد، به صفحه ستون علاوه بر نیروی محوری، لنگرهای ناشی از خروج از مرکزیت های هندسی در دو جهت نیز طبق شکل ۸-۳۸ وارد می شود.



الف) پلان **ب) نمای سه بعدی**

شکل ۸-۴۵ صفحه ستون مفصلی با ستون گوشه

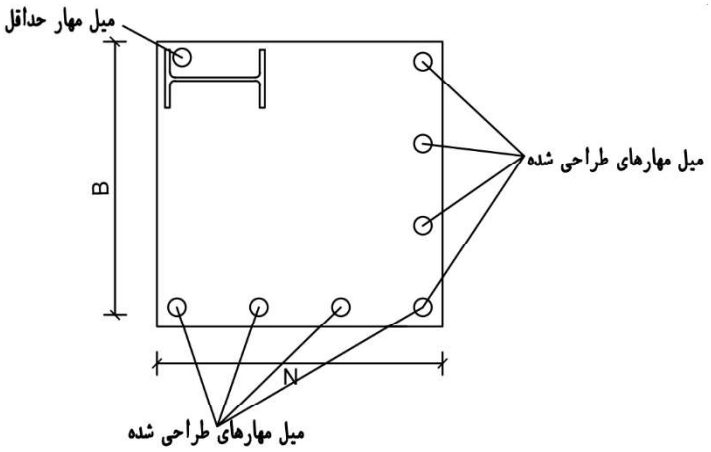
وجود خروج از مرکزیت های هندسی e_{o1} و e_{o2} به صفحه ستون لنگرهای خمشی M_{x_o} و M_{y_o} وارد می کنند. مدل تحلیلی شکل ۸-۳۸-الف طبق شکل ۸-۳۹ می باشد.



شکل ۸-۴۶ مدل تحلیلی صفحه ستون مفصلی با ستون گوشه

طراحی این نوع صفحه ستون، همانند طراحی صفحه ستون با خمش دو محوره طبق قسمت (۸-۸-۱) می باشد.

توجه: از آنجایی که نیروی P تمایل دارد سمت راست و پایین صفحه ستون را به کشش بیندازد، میل‌مهارهای طراحی شده در وجوهی از صفحه ستون قرار می گیرند که تحت کشش می باشند، در وجه دیگر صفحه ستون استفاده از حداقل میل‌مهار کفایت می‌نماید (شکل ۸-۴۰).



شکل ۸-۴۷ آرایش میل‌مهارها در صفحه ستون گوشه

توجه: برای تعیین بحرانی ترین ترکیب بار که در طراحی صفحه ستون می بایست مورد توجه قرار گیرد، توجه به موارد زیر ضروری است:

الف) صفحه ستون برای آن ترکیب باری طراحی می شود که در طراحی ستون بکار رفته است.

ب) صفحه ستون برای ترکیب باری کنترل می شود که در آن مقدار خروج از مرکزیت $\left(e = \frac{M}{P}\right)$ حداکثر باشد.

۸-۱۵-۵ نکات اجرایی

در این قسمت نکات اجرایی جزئیات صفحه ستون و نحوه اتصال آنها ذکر می شود.

۸-۱۵-۵-۱ میل‌مهار

میل‌مهارها تا حصول مقاومت کششی کل باید در بتن شالوده مهار شوند. میل‌مهارها معمولاً از دنده کردن میلگردهای صاف (بدون آج) ساخته می شوند. اگرچه استفاده از میلگرد آج دار پیوستگی بیشتری با بتن دارد لکن از آنجایی که شواهد زیادی از وقوع شکنندگی در ناحیه دنده شده میلگردهای آج دار $AIII$ در کارگاه ها مشاهده شده است، لذا استفاده از این نوع میلگردها به عنوان میل‌مهار توصیه نمی شود مگر آنکه عدم شکنندگی آنها به وسیله آزمایش تایید گردد. در صورت نیاز به مقاومت زیاد، استفاده از میلگردهای $Ck45(F_u = 6000\frac{kg}{cm^2})$ برای میل‌مهار قابل توصیه است که دارای شکل پذیری مناسب می باشد.

برای ایجاد مهار مکانیکی، انتهای میل‌مهار به صورت قلاب و یا مستقیم استفاده می شود. برای محاسبه طول مهاری می توان از روابط فصل هجدهم مبحث نهم مقررات ملی ایران برای میلگردهای قلاب دار در کشش استفاده نمود.

معمولاً قطر میل‌مهارها را بین ۲۰ تا ۶۰ میلیمتر در نظر می‌گیرند و قطر سوراخ صفحه ستون را حدود ۶ میلیمتر بزرگ تر از قطر میل‌مهار انتخاب می‌کنند. تنظیم کف ستونها و تراز کردن آنها توسط مهره‌هایی به نام مهره های تنظیم(دو مهره) انجام می‌شود.

- برای بستن و تنظیم راحت مهره‌ها توصیه می‌شود بین مرکز میل‌مهارها تا کنار صفحات، فاصله‌ای حداقل مساوی ۲ برابر قطر میل‌مهار رعایت گردد.

طول دنده شده انتهای میل‌مهارها بسته به نوع صفحه ستون و بزرگی نیروها معمولاً بین۱۰ تا ۱۵ سانتیمتر در نظر گرفته می‌شود. صفحه ستون ها و میل‌مهارهای داخل فونداسیون ها که ستون به آنها بسته می شوند، باید قبل از بتن ریزی از نظر فواصل و محورها در تمام ارتفاع و تراز در هر مرحله دقیقا کنترل شود.

- صفحه ستون بایستی توسط میل‌مهارهایی که در بتن کار گذاشته شده، در جای خود ثابت و تنظیم گردد. برای اتصال صفحه ستون به فونداسیون، حداقل از ۴ میل‌مهار به قطر ۲۰ میلیمتر $(4\Phi 20)$ در ۴ گوشه صفحه، استفاده می‌شود.

در ستونهایی که فقط تحت اثر نیروی محوری خالص قرار دارند، میل‌مهارها پس از اجرای کف ستون، نقش باربری ایفا نمی‌کنند، ولی در هنگام اجرا و نصب ستون، برای جلوگیری از افتادن ستون و اتصال ستون به صفحه ستون و صفحه ستون به فونداسیون دارای نقش اساسی هستند. در ستونهایی که علاوه بر نیروی محوری، برشی و لنگر خمشی را نیز از طریق صفحه ستون به فونداسیون منتقل می‌کنند، عملکرد میل‌مهارها در تحمل کشش و برش دارای اهمیت است.

۸-۱۵-۵-۲ صفحه ستون

در اجرای صفحه ستون رعایت نکات زیر توصیه می‌شود:

الف) تا حد امکان ابعاد صفحه ستون و محل قرارگیری میل‌مهارها حول هر دو محور متقارن باشند، این کار موجب می‌شود که اگر صفحه ستون ۹۰ درجه دوران یابد، از راستای صحیح خود خارج نشود. در نتیجه هیچ مشکل اجرایی در هنگام نصب به وجود نخواهد آمد.

- برای بستن و تنظیم راحت مهره‌ها توصیه می‌شود بین مرکز میل‌مهارها تا کنار صفحات، فاصله‌ای حداقل مساوی ۲ برابر قطر میل‌مهار رعایت گردد.
- توصیه می‌شود ابعاد صفحه ستون مضربی از ۵ سانتیمتر انتخاب شود.
- ابعاد صفحه ستون به گونه‌ای انتخاب شود که فضای کافی برای قرارگیری مقطع ستون، وسایل اتصال ستون به صفحه، سوراخها و واشرهای مورد نیاز وجود داشته باشد. بنابراین توصیه می‌شود اندازه صفحه ستون از هر طرف، حداقل ۷ سانتیمتر بیش از بعد ستون در همان راستا باشد.

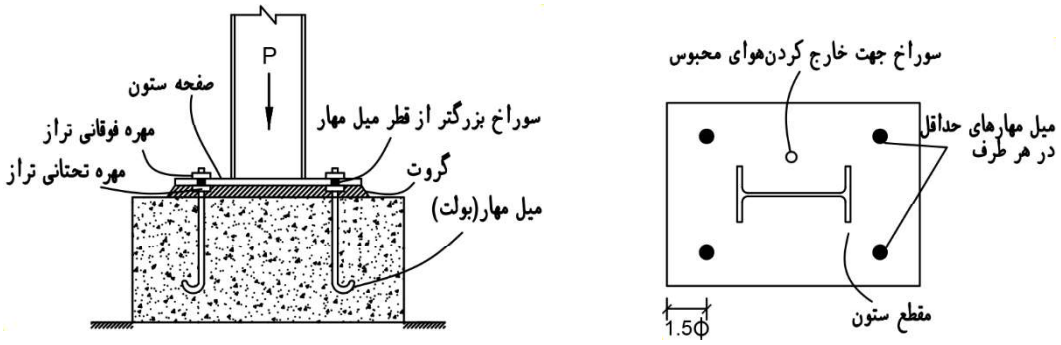
د) تا حد امکان سعی شود از یک قطر میل‌مهار برای تمام کف ستونها استفاده شود تا اولا نیاز به سر مته‌های متفاوت جهت سوراخ کاری نباشد، ثانیاً اشتباه در جا به جا کردن میل‌مهارها به وجود نیاید.

معمولاً اجرای صفحه ستون به دو صورت امکان پذیر است:

الف) ستون و صفحه ستون در محل کارخانه توسط جوش، کاملاً به هم متصل شده و مجموعه آنها از طریق میل‌مهارهایی که قبلاً در فونداسیون کار گذاشته شده‌اند و از سطح آن بیرون آمده است، به فونداسیون متصل می‌شوند. در این حالت و در مرحله اجرای فونداسیون از صفحه ستون فرعی (شابلون) مشابه با صفحه ستون اصلی استفاده می شود که این شابلون دقیقا مشابه صفحه ستون اصلی است، فقط ضخامت آن کوچکتر است.

ب) ستون و صفحه ستون به صورت جداگانه نصب می‌شوند. در این حالت ابتدا صفحه ستون و فونداسیون در تراز مناسب اجرا شده و سپس ستون توسط نبشیهای نگهدارنده و یا ورقهای اتصال به صفحه ستون متصل می‌شود. معمولاً به علت سهولت در اجرا این روش کاربرد بیشتری دارد.

برخی جزئیات اجرایی صفحه ستون در شکل زیر شان داده شده است. بر این اساس رعایت نکات زیر در هنگام اجرا توصیه می‌شود:



شکل ۸-۴۸ جزئیات اجرایی صفحه ستون‌ها

الف) قبل از بتن ریزی فونداسیون، صفحه در محل مورد نظر قرار می گیرد و سپس شروع به بتن ریزی می‌شود، تا قبل از گیرش نهایی بتن، صفحه را جدا کرده و پس از گیرش نهایی بتن و انجام افت کامل آن، صفحه ستون به فاصله حدود $2cm$ از سطح بتن قرار می گیرد و کاملاً تراز می شود و پس از آن فاصله بین صفحه ستون و بتن فونداسیون با ملات غیر انقباضی (گروت) کاملاً پر می‌گردد. این کار به منظور جلوگیری از تمرکز تنش و ایجاد سطح صاف در زیر صفحه ستون انجام می‌گیرد. برای اطمینان بیشتر از خروج کامل هوا از زیر صفحه، قبل از پرکردن گروت، سوراخی اضافی برروی صفحه ستون ایجاد می‌شود تا حباب هوا از آن خارج گردد.

ج) گیرداری صفحه ستون به فونداسیون با حصول دو شرط زیر امکان پذیر می باشد:

گیرداری اتصال پای ستون به صفحه ستون:

هنگامی که جوش کافی برای انتقال نیروی محوری، ممان و برش از پای ستون به صفحه ستون وجود داشته باشد، پای ستون به صفحه ستون، گیردار محسوب می شود. استفاده از جوش نفوذی پای ستون به صفحه، توصیه می شود. در همین ارتباط وجود سخت کننده ها با اضافه کردن طول جوش به انتقال بهتر نیروها از ستون به صفحه ستون، کمک شایانی می نمایند.

گیرداری صفحه ستون به فونداسیون:

نیروهایی که از ستون به صفحه ستون منتقل شده اند باید به فونداسیون انتقال یابند که این انتقال توسط میل‌مهارهای طراحی شده که کشش ناشی از لنگر را تحمل می کنند، صورت می گیرد. در نتیجه اگر تعداد میل‌مهارها به اندازه ای باشد که بتوانند لنگر را به فونداسیون منتقل نمایند، این شرط گیرداری نیز تامین می شود. بخاطر همین موضوع است که باید طول گیرداری میل‌مهارها به اندازه کافی باشد تا در زلزله، لغزش اتفاق نیفتد و بتواند برش، نیروی محوری و لنگر را از صفحه به بتن، انتقال دهد.

به طور مثال اگر یک صفحه ستون دارای تعداد زیادی سخت کننده باشد که شرط گیرداری ستون به صفحه ستون را ارضاء نماید، اما فقط با میل‌مهار حداقل به فونداسیون متصل باشد، از آنجایی که شرط گیرداری صفحه ستون به فونداسیون ارضاء نمی شود، می توان آنرا گیردار در نظر نگرفت.

۸-۱۵-۵-۳ اتصال ستون به صفحه ستون

اتصال ستون به صفحه ستون هم می تواند مفصلی باشد (که لنگر موجود در ستون را به فونداسیون منتقل نکند) و هم می تواند گیردار باشد (که لنگر موجود در ستون را به فونداسیون منتقل می کند).

محل اتصال پای ستون به ورق صفحه ستون (که باید بارهای فشاری، برشی و همچنین لنگرها را به صفحه منتقل کند) پس از پخ زدن، با جوش نفوذی کامل، پر می شود، این جوش نفوذی در اتصال گیردار پای ستون بدون سخت کننده، برش پای ستون و برش ناشی از کشش لنگر را تحمل می کند.

در صورتیکه ستون در تماس کامل با صفحه ستون باشد (که سطح ستون در محل اتصال آن به صورت گونیا بریده شده و سنگ زده شود) می توان از جوش گوشه برای اتصال استفاده نمود. در این حالت، جوش گوشه برش پای ستون و برش ناشی از کشش لنگر (که با هم جمع برداری شده اند) را تحمل می کند.

۸-۱۵-۵-۴ اتصال سخت کننده ها(لچکی ها) به ستون و صفحه ستون

سخت کننده ها (لچکی ها) در صفحه ستون به منظور افزایش مقاومت آن در تحمل لنگر خمشی در هر دو جهت بکار می رود، در نتیجه نحوه اتصال آن به ستون و صفحه ستون مهم می باشد. سخت کننده هایی که عمود بر ورق صفحه ستون هستند، اتصال آنها به ستون در ضخامت بال ستون با جوش نفوذی کامل می باشد. اتصال این ورقها به ستون در عرض بال ستون معمولاً توسط جوش گوشه می باشد. اتصال این سخت کننده ها به صفحه ستون که باید برش ناشی از کشش لنگر را تحمل کنند، توسط دو خط جوش گوشه در دو طرف آن حاصل می شود.

۸-۱۵-۵-۵ گروت

بعد از تراز نمودن ستون، می‌توان فضای خالی بین صفحه ستون و سطح فونداسیون را با ملات مقاومی به نام گروت پر نمود. گروت ماده‌ای بتنی متشکل از سیمان، مواد منبسط شونده و ماسه‌های سیلیسی می‌باشد که مقاومت فشاری بالایی دارد و در زمان گیرش، ازدیاد حجم پیدا می‌کند. بدین منظور باید اطراف صفحه ستون را با تخته و یا یک حلقه لاستیکی محصور نموده و گروت را توسط پمپ به زیر صفحه ستون از یک طرف تزریق نمود تا هوا از سمت دیگر خارج شده و زیر صفحه ستون کاملا پر شود. بعضاً در اجرا، صفحه ستون را باز کرده و گروت را در زیر صفحه ستون پخش نموده و سپس صفحه ستون را کار می‌گذارند که این روش توصیه نمی شود. در خصوص زمان گروت ریزی در مبحث یازدهم مقررات ملی ساختمان ایران تصریح شده است که تکمیل اتصالات سازه ای و پر کردن ملات زیر صفحه ستون نصب شده، نباید تا هنگامی که بخش قابل قبولی از سازه، تراز، شاقول، هم بر و مهاربندی شده باشد، انجام شود.

۸-۱۶ تستهای فصل هشتم

۱. در یک سازه فولادی با سیستم دوگانه ، نیروحای محوری وارد بر کف ستون یک ستون میانی ، ناشی از بارهای مرده، زنده و زلزله (که بر اساس ویرایش سوم استاندارد ۲۸۰۰ و در نظر گرفتن اثر 30% زلزله جهت متعامد محاسبه شده است) ، بدون هرگونه ضریبی به ترتیب 600kN،+470kN+ ، 1250kN+است(علامت مثبت به معنای فشاری بودن نیرو است). با توجه به اینکه اطلاعات دیگری در دسترس نیست، بر اساس این اطلاعات ، حداقل سطح مقطعی اسمی کل میل مهارها به کدام یک از گزینه های زیر نزدیک تر خواهد بود ؟ بتن شالوده از رده C25 و میل مهارها از قطعات دندانه شده از جنس CK45(Ft=600 MPa) فرض شود.

۱)5745mm^2 ۲)11365mm^2

با توجه به اینکه تنها نیروی محوری داده شده است، باید مطابق بند زیر باید از ترکیب بار زلزله تشدید یافته استفاده کنیم. میل مهارهای کف ستون باید بتوانند کل کشش وارد بر کف ستون را تحمل کنند. در رابطه زیر کشش مثبت فرض شده است:

$$T_u = 0.9D - \Omega_0(1.4E) = 0.9 \times (-600) + 2.5(1.4 \times 1250) = +3835\ kN$$

$$T_u < \varphi F_{nt} A_{nb}$$

$$3835000 < 0.75(0.75 \times 600)A_{nb} \rightarrow 11363mm^2 < A_{nb}$$

۸-۱۷ مسائل فصل هشتم

توجه:

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

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

تمرین ۸-۱

ستونی با مقطع $IPB20$ نیروی مرده محوری P_D و نیروی زنده محوری $P_L = 15ton$ را تحمل می‌کند. اگر ابعاد پی $150 \times 150cm$ باشد، ابعاد صفحه ستون را طرح نمایید. مقاومت نهایی بتن $f'_c = 0.21\frac{ton}{cm^2}$ می باشد.

$$P_D = (1.5\kappa)ton$$

تمرین ۸-۲

در آنالیز یک سازه پاسخهای زیر برای واکنشهای تکیه گاهی بدست آمده است:

$$M_{ux} = (\kappa)ton.m, \quad M_{uy} = 22ton.m, \quad P_u = 65ton, \quad V_u = 10ton$$

ابعاد پای ستون $b_c \times h_c = 25cm \times 30cm$ و مقاومت مجاز بتن $f'_c = 0.21\frac{ton}{cm^2}$ می‌باشد.

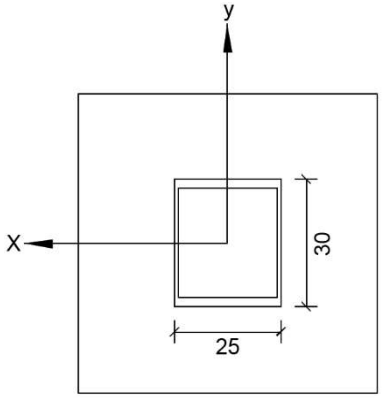
مطلوبست محاسبه صفحه ستون:

الف) اگر برای طراحی صفحه ستون فقط از M_{ux}, V_u, P_u استفاده شود.

ب) اگر برای طراحی صفحه ستون فقط از M_{uy}, V_u, P_u استفاده شود.

ج) برای هر دو حالت الف و ب از سخت‌کننده برای طراحی صفحه ستونها استفاده شود.

د) پاسخهای بدست آمده از حالات الف و ب و ج را با هم مقایسه و بحث کنید.



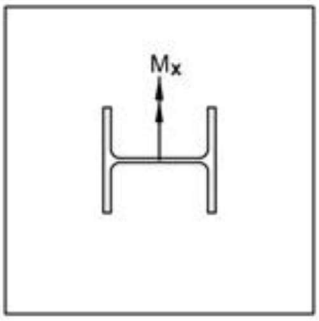
تمرین ۳-۸

ستونی با مقطع $IPB28$ نیروی محوری نهایی P_u و لنگر خمشی نهایی $10ton.m$ را از طریق صفحه ستون به پی انتقال می‌دهد. مقاومت مجاز بتن $f'_c = 0.21 \frac{ton}{cm^2}$ می باشد. مطلوبست:

الف) تعیین ابعاد صفحه ستون بدون سخت‌کننده.

ب) تعیین ابعاد صفحه ستون با سخت‌کننده.

$$P_u = (3\kappa)ton$$



تمرین ۴-۸

ستونی با مقطع قوطی $26cm \times 26cm \times 1.1cm$ بر صفحه ستونی به ابعاد $50 \times 50cm$ قرار دارد. نیروی محوری نهایی ستون P_u و لنگر خمشی نهایی $18ton.m$ می‌باشد. اگر حداکثر ضخامت ورق موجود در بازار $1.0cm$ باشد، صفحه ستون و سپس میل‌مهارها را طراحی نمایید.

$$P_u = (2\kappa)ton$$

تمرین ۵ـ۸

ستونی با مقطع $IPB28$ از طریق صفحه ستون، بر پی به ابعاد $200 \times 200cm$ قرار دارد. نیروی نهایی محوری P_u و لنگر خمشی $8ton.m$ و نیروی برشی $7ton$ می‌باشد. مقاومت مجاز بتن $f'_c = 0.2\frac{ton}{cm^2}$ می باشد. مطلوبست:

الف) ابعاد صفحه ستون را تعیین نمایید.

ب) در صورتی که ورق موجود در بازار دارای ضخامت حداکثر تا $1.0cm$ باشد، ورقهای تقویتی را طراحی کنید.

ج) اگر اتصال پای ستون را بخواهیم از ناودانی طراحی کنیم، ابعاد صفحه ستون را طراحی کنید.

$$P_u = (2\kappa)ton$$