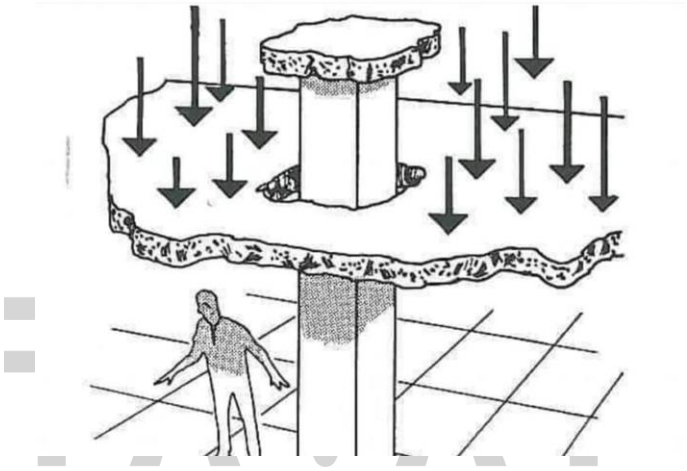
برش پانچ چیست، بررسی مفهوم، عوامل مؤثر و روش‌های کنترل در دال و فونداسیون

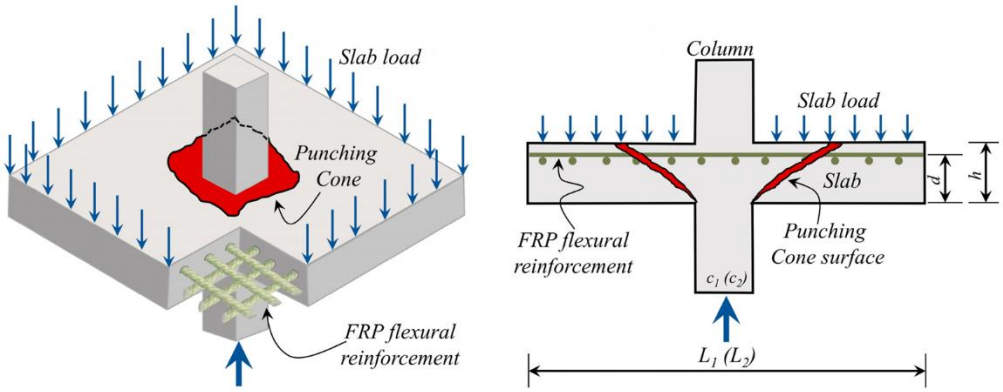
برش پانچ یا **"Punching Shear"** یکی از مهم‌ترین کنترل‌های طراحی در سازه‌های بتن‌آرمه، به‌خصوص در دال‌های تخت و فونداسیون‌هاست. این پدیده زمانی رخ می‌دهد که یک بار متمرکز، معمولاً نیروی محوری ستون، به یک عضو صفحه‌ای مانند دال یا پی منتقل می‌شود و در اطراف ستون، تنش‌های برشی شدیدی ایجاد می‌کند. اگر مقاومت بتن یا آرماتورهای برشی برای تحمل این تنش‌ها کافی نباشد، شکست به‌صورت مخروطی یا منشوری در اطراف ستون اتفاق می‌افتد؛ شکستی که معمولاً ناگهانی، ترد و بسیار خطرناک است.

اهمیت برش پانچ از آنجا بیشتر می‌شود که برخلاف خمش، معمولاً قبل از شکست هشدارهای ظاهری زیادی ایجاد نمی‌کند. در خمش، ترک‌ها و تغییرشکل‌ها می‌توانند تا حدی رفتار عضو را نشان دهند، اما در برش پانچ، اگر طراحی درست انجام نشده باشد، گسیختگی ممکن است با سرعت بالا و بدون فرصت کافی برای اصلاح یا تخلیه سازه رخ دهد. به همین دلیل، کنترل دقیق آن برای دانشجویان و مهندسین عمران یک موضوع کاملاً ضروری است.



برش پانچ چگونه به وجود می‌آید؟

وقتی ستون بار ثقلی طبقات را به فونداسیون یا دال منتقل می‌کند، این بار از یک سطح نسبتاً کوچک وارد عضو بتنی می‌شود. در نتیجه، بتن اطراف ستون تحت تنش‌های برشی قابل توجهی قرار می‌گیرد. اگر این تنش‌ها از ظرفیت برشی بتن و آرماتورهای موجود بیشتر شوند، یک سطح شکست در اطراف ستون شکل می‌گیرد. این سطح شکست معمولاً با فاصله‌ای مشخص از وجه ستون بررسی می‌شود و به آن "مقطع بحرانی برش پانچ" می‌گویند.



در فونداسیون‌ها، واکنش خاک از پایین به پی وارد می‌شود و نیروی ستون از بالا به آن منتقل می‌گردد. این وضعیت باعث می‌شود اطراف ستون ناحیه‌ای بحرانی ایجاد شود که مستعد گسیختگی پانچ است. در دال‌های تخت نیز چون تیر وجود ندارد و بار مستقیماً از دال به ستون منتقل می‌شود، احتمال تمرکز تنش در اطراف ستون افزایش پیدا می‌کند.

محل‌های رایج وقوع برش پانچ

برش پانچ بیشتر در محل‌هایی دیده می‌شود که انتقال بار متمرکز به یک عضو صفحه‌ای انجام می‌گیرد. از مهم‌ترین این محل‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

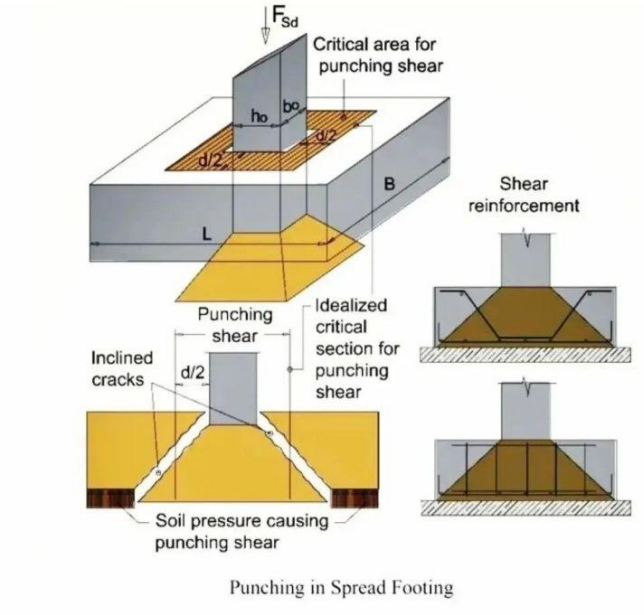
- اطراف ستون‌ها در دال‌های تخت بدون تیر؛
- اطراف ستون‌های داخلی، کناری و گوشه‌ای در فونداسیون‌ها؛
- محل اتصال ستون به پی‌های منفرد، نواری یا گسترده؛

- نواحی دارای بار متمرکز یا تکیه‌گاه‌های موضعی؛

- محل‌هایی که ضخامت دال یا فونداسیون تغییر می‌کند؛

- اطراف بازشوها یا نواحی با ضعف موضعی در بتن‌ریزی و آرماتورگذاری.

در ستون‌های داخلی، معمولاً محیط بحرانی به‌صورت کامل در اطراف ستون تشکیل می‌شود، اما در ستون‌های کناری و گوشه‌ای، به دلیل ناقص بودن محیط پیرامونی، شرایط کنترل برش پانچ پیچیده‌تر است. به همین دلیل در طراحی باید وضعیت ستون از نظر داخلی، کناری یا گوشه‌ای بودن به‌درستی تشخیص داده شود.



Punching in Spread Footing

مقطع بحرانی در برش پانچ

کنترل برش پانچ معمولاً روی یک محیط بحرانی در اطراف ستون انجام می‌شود. این محیط در فاصله‌ای مشخص از وجه ستون در نظر گرفته می‌شود و تنش برشی متوسط روی آن محاسبه می‌گردد. در طراحی بر اساس ضوابط آیین‌نامه‌ای، محیط بحرانی با نمادهایی مانند b_0 و عمق مؤثر عضو با d شناخته می‌شود. بنابراین ظرفیت برشی مقطع، به محیط بحرانی و عمق مؤثر وابسته است.

۹-۸-۵-۲ مقاطع بحرانی برای برش دو طرفه

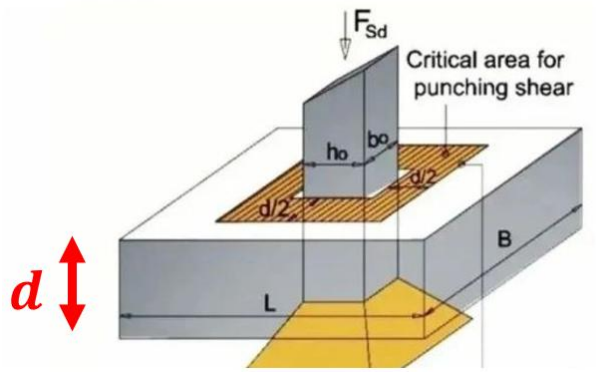
۹-۸-۵-۲-۱ مقطع بحرانی برای برش دو طرفه، سطح جانبی منشوری است که وجوه آن موازی با نیروی برشی بوده و محل آن‌ها باید طوری در نظر گرفته شود که محیط قاعده‌ی آن، b_0، حداقل باشد؛ ولی لازم نیست فاصله‌ی وجوه منشور از هر یک از موارد زیر کم‌تر از $0.5d$ در نظر گرفته شود.

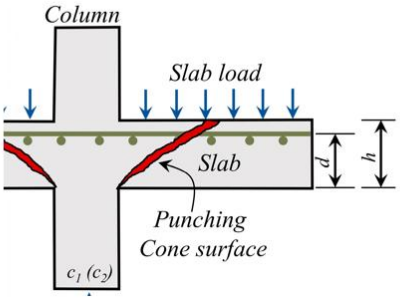
الف- لبه‌ها و یا گوشه‌های ستون‌ها، بارهای متمرکز یا نواحی تکیه گاهی؛

ب- محل تغییر در ضخامت دال یا پی نظیر لبه‌های سر ستون، کتیبه یا کلاهک‌های برشی.

عمق منشور در مقطع بحرانی برابر d است که برابر با متوسط عمق موثر دو جهت متعامد در نظر گرفته می‌شود.

به زبان ساده، هرچه محیط بحرانی بزرگ‌تر باشد یا عمق مؤثر دال و فونداسیون افزایش پیدا کند، سطح مقاوم در برابر برش بیشتر می‌شود و احتمال وقوع پانچ کاهش می‌یابد. به همین دلیل، افزایش ضخامت فونداسیون یا دال یکی از رایج‌ترین راهکارهای کنترل برش پانچ است.





عوامل مؤثر بر برش پانچ

برش پانچ تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار دارد. یکی از اصلی‌ترین عوامل، "مقدار نیروی محوری ستون" است. هرچه بار وارد بر ستون بیشتر باشد، نیروی برشی منتقل‌شده به دال یا فونداسیون نیز بیشتر می‌شود. عامل دوم، "ضخامت مؤثر عضو" است. دال یا فونداسیون نازک‌تر، ظرفیت برشی کمتری دارد و زودتر دچار مشکل پانچ می‌شود.

عامل مهم دیگر، "مقاومت فشاری بتن" است. افزایش مقاومت فشاری بتن باعث افزایش ظرفیت برشی بتن می‌شود، هرچند این افزایش همیشه به‌تنهایی کافی نیست. ابعاد ستون نیز اهمیت زیادی دارد؛ ستون بزرگ‌تر باعث افزایش محیط بحرانی و کاهش تمرکز تنش می‌شود. همچنین وجود لنگر منتقل‌شده از ستون به دال یا فونداسیون، توزیع تنش برشی را از حالت یکنواخت خارج می‌کند و ممکن است در یک سمت ستون تنش‌های بسیار بیشتری ایجاد شود.

۹-۸-۵-۳ مقاومت برشی دو طرفه‌ی تامین شده توسط بتن

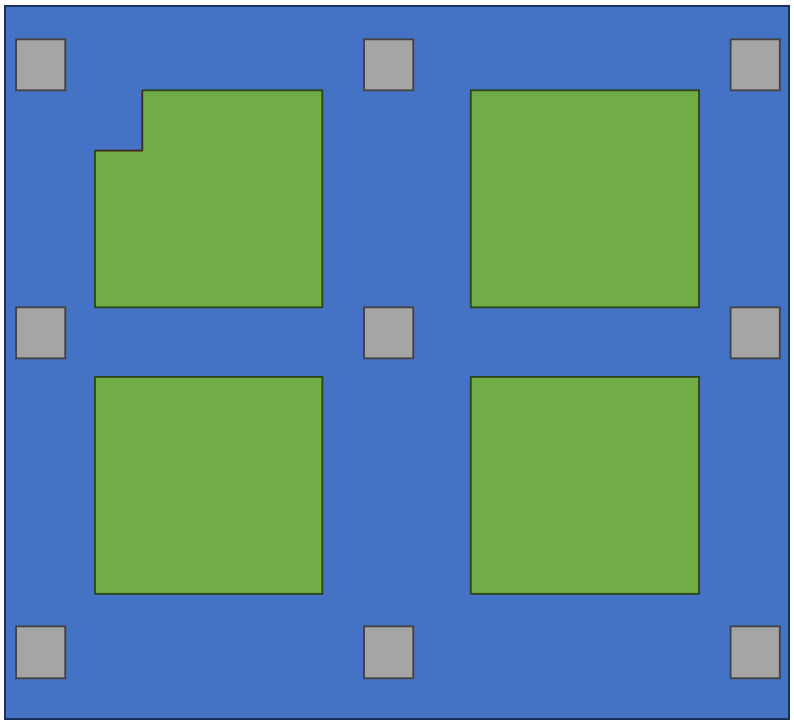
۹-۸-۵-۳-۱ مقاومت برشی بتن برای اعضای دو طرفه‌ی که در آن‌ها از آرماتور برشی استفاده نشده باشد، کم‌ترین مقداری است که از سه رابطه‌ی زیر تعیین می‌شود.

$$v_c = 0.33\lambda_s\lambda\sqrt{f'_c} \qquad \text{(۹-۸-۲۰-الف)}$$

$$v_c = 0.17\left(1+\frac{2}{\beta}\right)\lambda_s\lambda\sqrt{f'_c} \qquad \text{(۹-۸-۲۰-ب)}$$

$$v_c = 0.083\left(2+\frac{\alpha_s d}{b_0}\right)\lambda_s\lambda\sqrt{f'_c} \qquad \text{(۹-۸-۲۰-پ)}$$

در رابطه‌های فوق، β نسبت وجه بزرگ به وجه کوچک مقطع ستون است. هم‌چنین مقدار α_s برای ستون‌های میانی، کناری و گوشه به ترتیب برابر با ۴۰، ۳۰ و ۲۰ منظور می‌شود. به علاوه λ_s ضریب اصلاح تاثیر اندازه بوده و بر اساس رابطه‌ی (۹-۸-۱۴) تعیین می‌شود.



بنابراین در کنترل حرفه‌ای برش پانچ، فقط نیروی محوری ستون کافی نیست؛ بلکه باید اثر لنگر، خروج از مرکزیت، موقعیت ستون، ابعاد ستون، ضخامت پی یا دال و مقاومت بتن نیز بررسی شود.

اثر لنگر و خروج از مرکزیت در برش پانچ

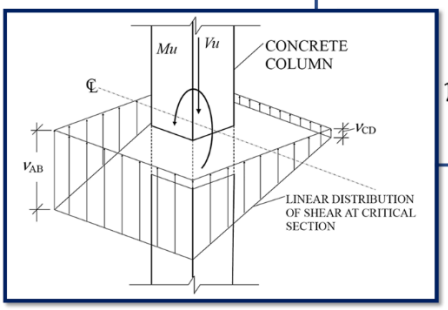
در بسیاری از پروژه‌ها، اتصال ستون به دال یا فونداسیون فقط نیروی محوری منتقل نمی‌کند، بلکه لنگر نیز در محل اتصال وجود دارد. این لنگر می‌تواند ناشی از بارهای جانبی، نامتقارن بودن بارگذاری، ستون‌های کناری، ستون‌های گوشه‌ای یا اختلاف سختی اعضا باشد. وقتی لنگر در اتصال وجود داشته باشد، تنش برشی اطراف ستون یکنواخت نخواهد بود. در یک سمت مقطع بحرانی، تنش افزایش می‌یابد و در سمت دیگر کاهش پیدا می‌کند.

۹-۱۰-۶-۴-۳ انتقال لنگر خمشی ضریبدار در اتصالات دال به ستون

الف- در مواردی که بارهای ثقلی، باد یا زلزله موجب میشوند که در اتصال دال به ستون بدون تیر، لنگر ضریب دار نامتعادل، M_{sc}، ایجاد شود، باید بخشی از این لنگر معادل $\gamma_f M_{sc}$ با عملکرد خمشی، و باقی‌مانده‌ی آن از طریق اثر نیروی برشی که اطراف ستون در دال ایجاد می‌شود با اثر خروج از مرکزیت آن به ستون منتقل می‌گردد.

مقدار γ_f از رابطه‌ی (۹-۱۰-۱) محاسبه می‌شود:

$$\gamma_f = \frac{1}{1+\left(\frac{2}{3}\right)\sqrt{\frac{b_1}{b_2}}} \qquad (۹-۱۰-۱)$$



$$\gamma_v = 1 - \gamma_f \qquad \gamma_v . M_{sc}$$

به همین دلیل، آیین‌نامه‌ها بخشی از لنگر نامتعادل را از طریق عملکرد خمشی و بخشی دیگر را از طریق برش به ستون منتقل می‌کنند. این موضوع به‌خصوص در دال‌های تخت و پی‌های گسترده اهمیت زیادی دارد، چون ممکن است کنترل ساده تنش متوسط کافی نباشد و نواحی بحرانی موضعی در اطراف ستون به وجود آید.

مقاومت برشی بتن و آرماتور برشی

در اعضایی که آرماتور برشی مخصوص پانچ ندارند، مقاومت برشی عمدتاً توسط بتن تأمین می‌شود. اما اگر ظرفیت بتن کافی نباشد، باید از روش‌های تقویتی استفاده کرد. یکی از این روش‌ها، استفاده از "آرماتورهای برشی" مانند خاموت‌های بسته، سنجاقی‌ها، میلگردهای برشی یا سیستم‌های خاص کلاهک و سرستون است.

۹-۸-۵-۳ مقاومت برشی دو طرفه‌ی تامین شده توسط بتن

۹-۸-۵-۳-۱ مقاومت برشی بتن برای اعضای دو طرفه‌ی که در آن‌ها از آرماتور برشی استفاده نشده باشد، کم‌ترین مقداری است که از سه رابطه‌ی زیر تعیین می‌شود.

$$v_c = 0.33\lambda_s\lambda\sqrt{f'_c} \qquad \text{(۹-۸-۲۰-الف)}$$

$$v_c = 0.17\left(1+\frac{2}{\beta}\right)\lambda_s\lambda\sqrt{f'_c} \qquad \text{(۹-۸-۲۰-ب)}$$

$$v_c = 0.083\left(2+\frac{\alpha_s d}{b_0}\right)\lambda_s\lambda\sqrt{f'_c} \qquad \text{(۹-۸-۲۰-پ)}$$

در رابطه‌های فوق، β نسبت وجه بزرگ به وجه کوچک مقطع ستون است. هم‌چنین مقدار α_s برای ستون‌های میانی، کناری و گوشه به ترتیب برابر با ۴۰، ۳۰ و ۲۰ منظور می‌شود. به علاوه λ_s ضریب اصلاح تاثیر اندازه بوده و بر اساس رابطه‌ی (۹-۸-۱۴) تعیین می‌شود.

در طراحی، مقاومت اسمی برشی می‌تواند شامل سهم بتن و سهم فولاد برشی باشد. در حالت بدون فولاد برشی، ظرفیت فقط برابر سهم بتن در نظر گرفته می‌شود، اما در صورت استفاده از آرماتور برشی، سهم فولاد نیز به ظرفیت اضافه می‌شود. البته جانمایی، فاصله‌گذاری و محدوده امتداد آرماتورهای برشی باید کاملاً مطابق ضوابط آیین‌نامه‌ای انجام شود، زیرا اجرای نامناسب آن می‌تواند تأثیر مورد انتظار را ایجاد نکند.

۹-۸-۵-۱-۲ مقاومت برشی اسمی در اعضای دو طرفه بدون و با فولاد برشی (شامل کلاهک برشی نمی‌شود)، بر اساس رابطه‌های زیر تعیین می‌شود.

- بدون فولاد برشی:

$$v_n = v_c \qquad \text{(۹-۸-۱۹-الف)}$$

- با فولاد برشی:

$$v_n = v_c + v_s \qquad \text{(۹-۸-۱۹-ب)}$$

به طوری که v_c و v_s تنش معادل متناظر با مقاومت برشی دو طرفه‌ی اسمی می‌باشند که به ترتیب توسط بتن و فولادها فراهم می‌شود. مقدار v_c بر اساس رابطه‌های (۹-۸-۲۰) ارزیابی می‌شود؛ ولی نباید از مقدار رابطه‌های (۹-۸-۲۱) و (۹-۸-۲۲) بر اساس شرایط مندرج در بند ۹-۸-۵-۳-۲ بیش‌تر شود. هم‌چنین مقدار v_s برای اعضای دو طرفه‌ی مسلح شده با خاموت‌های یک شاخه یا چند شاخه، و نیز برای اعضای دو طرفه‌ی مسلح شده با گل میخ‌های برشی سَر دار بر اساس رابطه‌ی (۹-۸-۲۴) ارزیابی میگردد.

۹-۸-۵-۳-۲ برای اعضای دو طرفه با فولاد گذاری برشی، مقدار v_c که در مقاطع بحرانی محاسبه می‌شود نباید از حدود زیر بیش‌تر باشد:

الف- اگر از خاموت استفاده شده باشد:

$$v_c \le 0.17\lambda_s\lambda\sqrt{f'_c} \qquad (۹-۸-۲۱)$$

ب- اگر از گل‌میخ برشی سَر دار استفاده شده باشد:

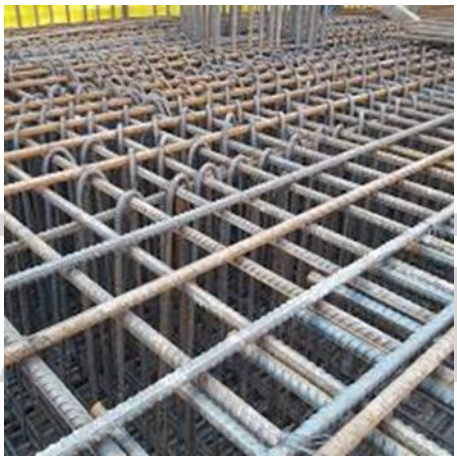
- برای مقطع بحرانی در اطراف ستون، بار متمرکز، و یا محل تغییر ضخامت در دال (طبق بند ۹-۸-۵-۲-۱): حداقل مقادیر رابطه‌های (۹-۸-۲۲)، (۹-۸-۲۰-ب)، و (۹-۸-۲۰-پ) منظور می‌شود.

$$v_c \le 0.25\lambda_s\lambda\sqrt{f'_c} \qquad (۹-۸-۲۲)$$

- برای مقطع بحرانی در مرز بیرونی محیط تقویت شده با فولاد گذاری برشی (طبق بند ۹-۸-۵-۲-۳): مقدار رابطه‌ی (۹-۸-۲۱) منظور می‌شود.

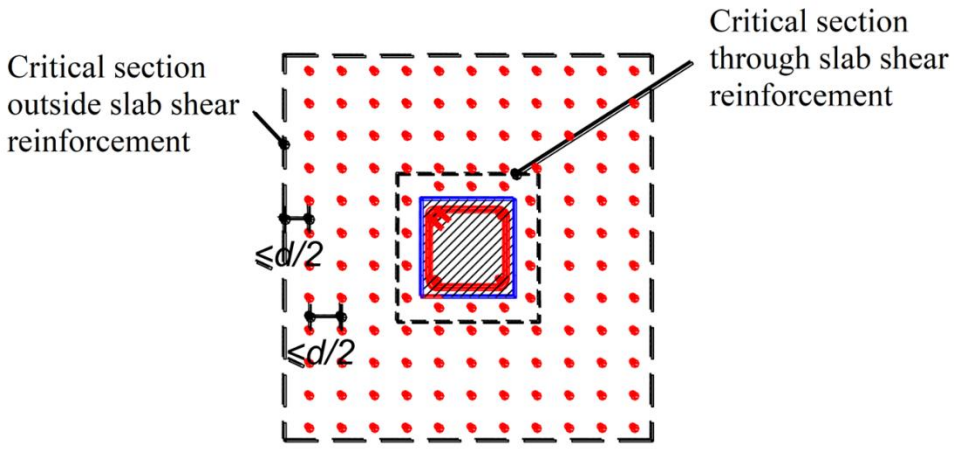
روش‌های کنترل و کاهش برش پانچ

برای کاهش خطر برش پانچ، راهکارهای مختلفی وجود دارد. اولین و رایج‌ترین روش، "افزایش ضخامت دال یا فونداسیون" است. با افزایش ضخامت، عمق مؤثر افزایش یافته و ظرفیت برشی بیشتر می‌شود. روش دوم، "افزایش مقاومت فشاری بتن" است که می‌تواند ظرفیت برشی بتن را بالا ببرد.

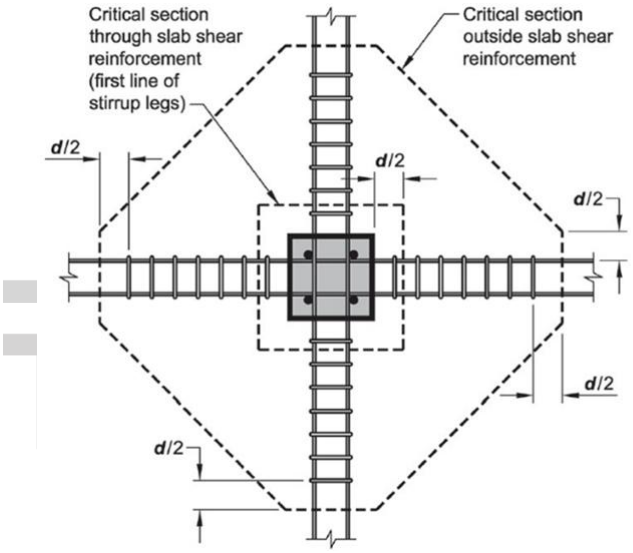


روش دیگر، "افزایش محیط پانچ" است. این کار می‌تواند با افزایش ابعاد ستون، استفاده از سرستون، کتیبه یا کلاهک برشی انجام شود. در فونداسیون‌ها نیز گاهی با اصلاح ابعاد پی یا افزایش ضخامت

موضعی اطراف ستون، تنش برشی کنترل می‌شود. استفاده از "میلگردهای برشی" و "کلاهک‌های برشی" نیز از راهکارهای مؤثر در پروژه‌هایی است که افزایش ضخامت یا تغییر ابعاد ستون امکان‌پذیر نیست.



در عمل، انتخاب راهکار مناسب به شرایط پروژه بستگی دارد. برای مثال، در یک پروژه ممکن است افزایش ضخامت فونداسیون اقتصادی‌تر باشد، اما در پروژه‌ای دیگر به دلیل محدودیت معماری یا اجرایی، استفاده از آرماتور برشی گزینه مناسب‌تری محسوب شود.



اهمیت کنترل برش پانچ در نرم‌افزار SAFE

در پروژه‌های واقعی، کنترل برش پانچ به‌صورت دستی برای تعداد زیادی ستون و ترکیبات بارگذاری مختلف زمان‌بر و مستعد خطاست. نرم‌افزارهایی مانند **SAFE** این امکان را فراهم می‌کنند که تنش‌های پانچ در اطراف ستون‌ها، اثر لنگرهای نامتعادل، موقعیت ستون‌ها، ضخامت دال یا فونداسیون و ترکیبات بارگذاری به‌صورت دقیق‌تر بررسی شود.

با این حال، خروجی نرم‌افزار زمانی قابل اعتماد است که مهندس طراح مفهوم برش پانچ، مقطع بحرانی، ضرایب آیین‌نامه‌ای و نحوه تفسیر نتایج را به‌خوبی بداند. صرفاً سبز یا قرمز شدن یک ستون در نرم‌افزار کافی نیست؛ مهندس باید بداند علت عدم کفایت چیست و بهترین راهکار اصلاحی کدام است.

جمع‌بندی

برش پانچ یکی از کنترل‌های حیاتی در طراحی دال‌ها و فونداسیون‌های بتن‌آرمه است. این پدیده در اثر انتقال بار متمرکز ستون به عضو صفحه‌ای ایجاد می‌شود و در صورت بی‌توجهی می‌تواند منجر به شکست ناگهانی و خطرناک شود. کنترل دقیق مقطع بحرانی، بررسی اثر نیروی محوری و لنگر، توجه به ضخامت مؤثر، مقاومت بتن، موقعیت ستون و استفاده صحیح از آرماتورهای برشی، از مهم‌ترین نکات طراحی در این زمینه است.

اگر می‌خواهید نحوه کنترل برش پانچ را به‌صورت کامل، کاربردی و با جزئیات نرم‌افزاری یاد بگیرید، آموزش کنترل برش پانچ در **"SAFE22"** به‌طور کامل در "پک پی تاو از فول پک طراحی سازه تاوات" ارائه شده است. در این آموزش، روند مدل‌سازی، کنترل نتایج، تفسیر خطاها و راهکارهای اصلاحی به‌صورت پروژه‌محور توضیح داده شده است.