

## بررسی کفایت دال‌های تخت بتنی مجوف مکعبی (یوبوت) در برش یک- طرفه و دوطرفه

پرویز عبادی<sup>۱</sup>، حسام محمدی<sup>۲\*</sup>

۱- استادیار، مهندسی عمران، مؤسسه آموزش عالی صدرالمتألهین (صدرا)، تهران  
Email: [Ebadi@sadra.ac.ir](mailto:Ebadi@sadra.ac.ir), [Parviz.Ebadi@gmail.com](mailto:Parviz.Ebadi@gmail.com)

۲- دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، گرایش زلزله، مؤسسه آموزش عالی  
صدرالمتألهین (صدرا)، تهران  
Email: [Mohamady.Hessam@gmail.com](mailto:Mohamady.Hessam@gmail.com)

### چکیده:

سقف‌های دال تخت بتنی مجوف مکعبی به تازگی وارد صنعت ساخت و ساز کشور شده‌اند. از این رو لازم است تحقیقات جامعی بر روی رفتار و روش طراحی این سقف‌ها انجام گیرد. یکی از پارامترهای مهم در تحلیل دال‌های تخت مجوف مکعبی، کنترل برش دوطرفه (منگنه‌ای، سوراخ-کننده یا پانچ) در مجاورت ستون‌ها و تحت بارهای متمرکز می‌باشد. در این مقاله کفایت یک نمونه دال تخت بتنی مجوف مکعبی ابتدا برای برش یک‌طرفه و سپس برای برش دوطرفه بررسی شده و مشاهده می‌گردد این نوع دال در برش یک‌طرفه در مقاطع مجوف و همچنین در برش دوطرفه دارای ضعف می‌باشد. با تأکید بر لزوم طراحی ویژه برای کنترل برش دوطرفه سپس راهکارهای مناسبی از قبیل افزایش ضخامت موضعی با تعبیه کتیبه بر روی ستون‌ها، استفاده از میلگردهای برشی، و کلاهدک برشی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند.

**واژه‌های کلیدی:** دال تخت بتنی مجوف مکعبی، سقف یوبوت، برش دوطرفه، میلگرد تقویتی برشی، کتیبه، کلاهدک برشی

## ۱. مقدمه

دال در بتن آرمه به یک عضو سازه‌ای اطلاق می‌شود که ضخامت آن در مقایسه با دو بُعد دیگر آن کوچک بوده و برای انتقال بار در بام، کف‌های ساختمانی و پی‌ها به کار می‌رود [۱].

بطور معمول دال تنها به منظور تحمل بارهای قائم طراحی می‌شود مگر اینکه جزئی از سیستم باربر جانبی سازه باشد. ضمن اینکه وظیفه مقابله با بارهای جانبی را سیستم باربر جانبی بر عهده دارند. با افزایش طول دهانه، توجه به تغییرشکل و ارتعاش سقف از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. این موضوع از نظر معماری از جذابیت بسیاری برخوردار بوده ولی از نظر سازه‌ای افزایش ابعاد دهانه دال‌ها منجر به افزایش ضخامت سقف و در نتیجه افزایش بار مرده می‌گردد که به نوبه خود سبب افزایش ابعاد ستون‌ها و ضخامت شالوده شده که این امر به افزایش مصرف بتن و فولاد در ساختمان می‌انجامد. به منظور رفع این مشکل که ناشی از افزایش وزن دال می‌باشد، سیستم دال مجوف دوطرفه، که همچنین به‌عنوان دال مجوف شناخته می‌شود ابداع و مورد استفاده قرار گرفت [۲].

سقف دال بتنی مجوف با قالب‌های مکعبی، که در ایران با عنوان سقف یوبوت شناخته می‌شود، نوع جدیدی از دال‌های بتنی مجوف با باربری دوطرفه است. مشکل اصلی در ساختمان‌های بتنی با سقف‌های دال بتنی توپر، وزن بالای آن‌ها است که سبب سنگینی سقف و افزایش مصرف بتن در پروژه می‌گردد. مجوف‌سازی در این نوع سقف‌ها به‌وسیله قراردادن قالب‌های مکعبی در میان مقطع دال بتنی و به صورت ماندگار انجام شده که سبب کاهش مقدار بتن مصرفی در پروژه می‌گردد. از آنجا که این قالب‌ها درون دال مدفون بوده و در حدفاصل ستون‌ها تیرهای میانی وجود ندارند، سطح زیرین دال به‌صورت مسطح می‌باشد. با استفاده از این نوع سقف می‌توان دهانه‌های بلند را بدون استفاده از فناوری ویژه‌ای مانند پیش‌تنیدگی اجرا نمود.

کاهش تعداد ستون‌ها، امکان ستون‌گذاری نامنظم، امکان ایجاد بازشوهای بزرگ و نامنظم در سقف به دلیل عدم وجود تیر، و بازیافت زباله‌های پلاستیکی در فرایند تولید قالب‌های مکعبی از دیگر مزایای این نوع سقف‌ها به شمار می‌آیند. از آنجا که دال‌های بتنی مجوف با حفره‌های کروی پیش از انواع با حفره‌های مکعبی به صنعت ساختمان دنیا عرضه گردیده است، بیشتر مطالعات بر روی این نوع از دال‌های مجوف انجام پذیرفته شده است. در سال ۲۰۰۲ آزمایش‌هایی بر روی نمونه‌هایی از دال تخت مجوف کروی انجام شد. هدف از انجام این آزمایش‌ها بررسی تأثیر حفره‌ها بر ظرفیت برش دوطرفه بوده است و ضرابی برای مقادیر آیین‌نامه‌ای موجود پیشنهاد گردید [۳].

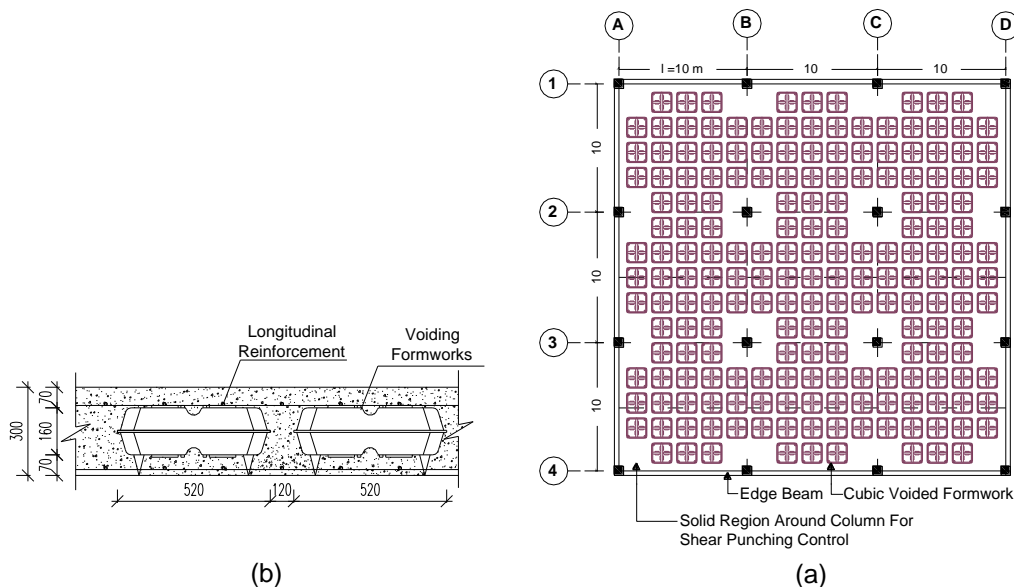
در سال ۲۰۱۱ بررسی‌های آزمایشگاهی و نرم‌افزاری بر روی چند نمونه اتصال دال-ستون انجام پذیرفت. برای میلگرد طولی یکسان، دو سیستم تقویتی گلمیخ برشی و تیر با خاموت در نظر گرفته شد و مشخص گردید که قرار دادن میلگرد برشی در اتصال، سبب شکل‌پذیری بیشتر و افزایش مقاومت برشی دوطرفه می‌شود. از دیدگاه کارآمد بودن، سیستم تقویتی گلمیخ از نظر شکل‌پذیری و فنی، مطمئن‌تر عمل کرده و در نهایت مشاهده شد که ظرفیت برش دوطرفه متناسب با مقاومت بتن افزایش می‌یابد. شکست دوطرفه صفحات تخت بدون هیچ هشدار رخ می‌دهد. به‌عنوان یک راه‌حل می‌توان از میلگرد برشی در محیط بحرانی استفاده کرد. در طراحی سازه‌ای اتصالات دال-ستون در دال‌های تخت بتنی، ایده اصلی حصول اطمینان از ظرفیت دورانی کافی در ناحیه اتصال برای هر دو بارگذاری یکنواخت و چرخه‌ای<sup>۱</sup> می‌باشد. این اقدام به منظور جلوگیری از خرابی غیرشکل‌پذیر برشی ترد است. با تأمین میلگردهای برشی کافی، خرابی بصورت خمشی قابل پیش‌بینی است [۴].

به دلیل ماهیت دال‌های تخت در برش بسیار زیادی که در محل اتصال دال با تکیه‌گاه‌ها در دال‌های بتنی تخت مجوف وجود دارد، بررسی کیفیت برشی دوطرفه بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در این مطالعه ظرفیت برش دوطرفه برای یک نمونه دال بتنی تخت مجوف مکعبی مورد بررسی قرار گرفته و با توجه به ضعف‌های موجود راه‌حل‌هایی برای مقابله با این نوع برش ارائه گردیده است. یک دال سه دهانه‌ای برای بارهای ثقلی طراحی شده و بررسی‌های لازم جهت برش دوطرفه برای یک ستون خارجی انجام گردیده است. نتایج به‌دست آمده بیانگر آن است که در طراحی دال‌های بتنی مجوف مکعبی نیز همانند دال‌های بتنی توپر باید تمهیدات لازم برای کنترل برش دوطرفه در نظر گرفته شود.

## ۲. مشخصات نمونه‌ها

مدل مورد بررسی یک دال تخت مجوف مکعبی با سه دهانه ده متری و با کاربری مسکونی، متعلق به یک سازه بتنی ده طبقه می‌باشد. پلان و مقطع عرضی دال مجوف در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. بارهای لرزه‌ای توسط مجموعه‌ای از دیوارهای برشی در دو راستای اصلی تحمل شده و دال بتنی مجوف صرفاً جهت تحمل بارهای ثقلی تحلیل و طراحی می‌شود. در طرح اولیه هیچگونه میلگرد تقویتی برشی برای دال بتنی در نظر گرفته نشده است.

<sup>1</sup> Monotonic and cyclic loadings



شکل ۱- (a) پلان دال بتنی تخت مجوف مکعبی، (b) مقطع عرضی دال بتنی مجوف

مطابق مقطع نشان داده شده در شکل ۱- (b)، وزن بتن دال مجوف ۴/۸۶، وزن کفسازی ۱/۷۱، وزن سربار معادل تیغه بندی ۰/۷۲، و بار زنده وارد بر کف برابر با ۱/۹۲ کیلونیوتن بر متر مربع می باشد. بنابراین بار مرده و زنده کف به ترتیب برابر با ۶/۵۷ و ۲/۶۴ کیلونیوتن بر متر مربع به دست می آیند. ضخامت سقف برابر با ۳۰۰ میلی متر شامل ارتفاع قالب های مکعبی برابر با ۱۶۰ و ضخامت لایه های بتنی بالا و پایین برابر با ۷۰ میلی متر می باشد. کلاف پیرامونی که در شکل ۱- (a) نشان داده شده است به ابعاد ۳۰۰ در ۳۰۰ میلی متر، ابعاد ستون ها ۳۵۰ در ۳۵۰ میلی متر، پوشش بتن برابر با ۴۰ میلی متر، عرض قالب های مکعبی برابر با ۵۲۰ میلی - متر، فاصله بین قالب ها برابر با ۱۲۰ میلی متر و میلگردهای طولی به قطر ۱۲ میلی متر در فواصل ۲۱۰ میلی متر، مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه استوانه ای بتن ( $f'_c$ ) برابر با ۲۵ و تنش تسلیم میلگردهای فولادی ( $f_y$ ) برابر با ۴۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده اند. آیین نامه بارگذاری و طراحی مورد استفاده، به ترتیب ASCE7-10 و ACI318-14 می باشند.

### ۳. تحلیل دال برای خمشی

با استفاده از روش طراحی مستقیم<sup>۱</sup>، دال مجوف نشان داده شده در شکل ۱ برای انتقال بارهای ثقلی تحلیل و طراحی می شود. با توجه به پوشش بتنی ۴۰ میلی متری و فرض اولیه ۱۲ و ۱۰ میلی متر به ترتیب برای قطر میلگرد اصلی و میلگرد برشی، فاصله دورترین تار فشاری تا مرکز سطح میلگردهای کششی طولی، ارتفاع مؤثر دال بتنی (d) برابر با ۲۵۴ میلی متر به دست می آید. برای یک متر از عرض دال، می توان مقدار لنگر خمشی را مشابه یک دال یک طرفه محاسبه نمود. مجموع لنگرهای مثبت و منفی در عرض واحد دال با استفاده از روش تحلیل مستقیم از رابطه ۸-۱۰-۳-۲ آیین نامه ACI 318-14 بر اساس رابطه ۱ برابر با  $M_0 = 141 \text{ kN.m/m}$  محاسبه می گردد.

$$M_0 = \frac{w_u l_2 l_n^2}{8} \quad (1)$$

که  $l_n$  طول دهانه خالص در راستایی است که لنگرهای خمشی در آن راستا محاسبه می گردند،  $l_2$  راستای عمود بر  $l_n$  بوده که همانگونه که گفته شد برابر با یک متر در نظر گرفته می شود. مقدار بار کل ثقلی نهایی ضریب دار است که مطابق ترکیب بارهای آیین نامه ACI 318 بوده که به صورت زیر تعیین می گردد.

$$DL_u = 1.2 \times 6.57 = 7.88 \text{ kN/m}^2$$

$$LL_u = 1.6 \times 2.64 = 4.22 \text{ kN/m}^2$$

$$w_u = 7.88 + 4.22 = 12.1 \text{ kN/m}^2$$

<sup>1</sup> Direct Design Method

$$M_0 = \frac{12.1 \times 1 \times (10 - 0.35)^2}{8} = 141 \text{ kN.m/m}$$

بدین ترتیب لنگر خمشی نهایی مثبت برای دهانه داخلی ۵۰، برای دهانه‌های خارجی ۷۱ و لنگر خمشی نهایی منفی برای دهانه داخلی ۹۲، برای دهانه‌های خارجی در وجه خارجی ۴۲ و در وجه داخلی ۹۹ کیلونیوتن متر بر متر مطابق بند ۸-۱۰-۴ آیین‌نامه ACI 318-14 محاسبه می‌گردند. مطابق جداول ارائه شده در بند ۸-۱۰-۵ و الزامات بند ۸-۱۰-۶ از آیین‌نامه ACI 318-14 توزیع لنگرهای نوار پوششی بین نوار ستونی و میانی در جدول ۱ ارائه شده است. مقادیر ارائه شده برای یک متر عرض از نوار طراحی می‌باشند.

جدول ۱- توزیع لنگرهای نهایی بین نوارهای ستونی و میانی (واحد: kN.m/m)

دهانه	لنگر خمشی	لنگر نهایی	نوار ستونی		دو نیم نوار میانی
			لنگر خمشی	%	
دهانه خارجی	$M_{External}^-$	۴۲	۴۲	۱۰۰	۰
	$M^+$	۷۱	۴۲/۶	۶۰	۲۸/۴
	$M_{Internal}^-$	۹۹	۷۴/۲	۷۵	۲۴/۸
دهانه داخلی	$M^-$	۹۲	۶۹	۷۵	۲۳
	$M^+$	۵۰	۳۰	۶۰	۲۰

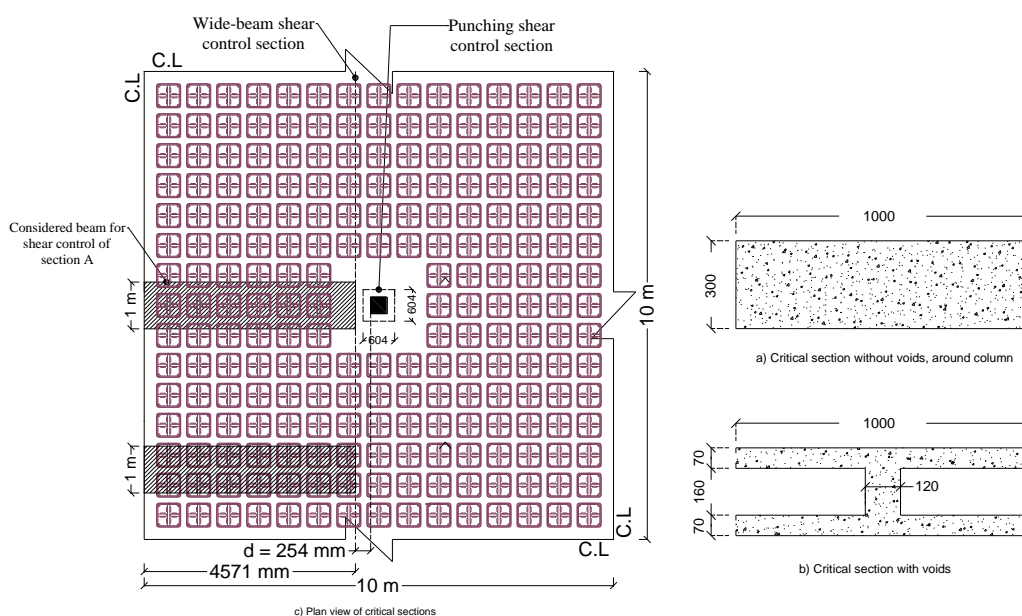
با توجه به قرارگیری یک میلگرد طولی در وسط فاصله میان هر دو قالب مکعبی مجاور و همچنین دو میلگرد بر روی هر قالب مکعبی، میلگردگذاری برای نوار ستونی و میانی به صورت  $\phi 12 @ 210$  طراحی می‌گردد.

#### ۴. کنترل کفایت برشی دال

دال بتنی مجوف مکعبی به شرح ذیل برای برش یک‌طرفه و دوطرفه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### ۱,۴ کنترل برش یک‌طرفه

دال بتنی تحت برش خمشی، به‌عنوان یک تیر پهن با مقطعی که از بین عرض دال عبور می‌کند ممکن است دچار آسیب شود. در این حالت بایستی دال همانند یک تیر پهن در نظر گرفته شده و روابط مقاومت برشی برای تیرها مطابق آیین‌نامه ACI اعمال گردد. مطابق این آیین‌نامه، مقطع بحرانی برای کنترل برش یک‌طرفه به فاصله  $d$  از بر تکیه‌گاه می‌باشد (شکل ۲) [۵].



شکل ۲- مقاطع بحرانی برای کنترل برش خمشی، (a) بدون فضاهای خالی، (b) با فضاهای خالی

با توجه به برش دوطرفه بسیار زیادی که در نواحی تکیه‌گاهی در دال‌های تخت وجود دارد، در عمل هنگام چیدن قالب‌های مکعبی پیش از عملیات بتن‌ریزی، به فاصله‌ای که طراح تعیین کرده است در نواحی اطراف ستون‌ها هیچ قالبی قرار نگرفته و آن نواحی به صورت توپر اجرا می‌شوند. از این رو کنترل برش یک‌طرفه برای دو ناحیه توپر اطراف ستون‌ها و ناحیه مجوف برای مقاطع نشان داده شده در شکل ۲ انجام شده و نتایج این بررسی در جدول ۲ ارائه گردیده است. در این جدول،  $\phi$  ضریب کاهش مقاومت در برش بوده که مطابق آیین‌نامه ACI 318-14 برابر با ۰/۷۵ می‌باشد.  $V_u$  برش وارده به یک نوار از دال به عرض یک متر عمود بر راستای محاسبه لنگر خمشی و به طول  $(l/2 - d)$  می‌باشد.

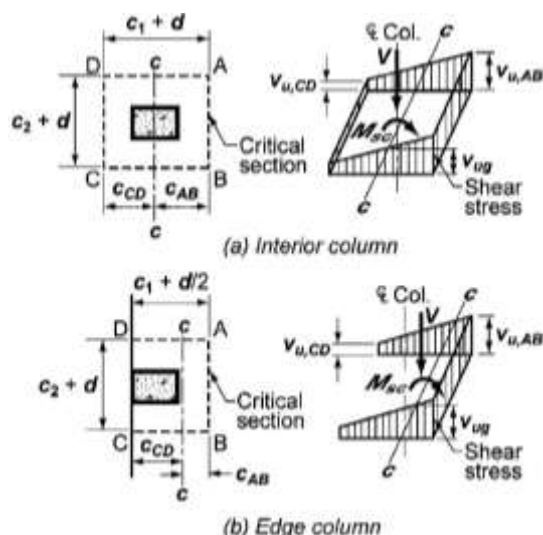
جدول ۲- نتایج کنترل برش یک‌طرفه (واحد: kN)

۳۵/۴	$V_u$	در ناحیه توپر	میان یک ستون و یک طرفه برای ستون
۱۰۳/۶	$\phi V_c$		
۰/۳۴ (O.K.)	$V_u / \phi V_c$		
۳۵/۴	$V_u$	در ناحیه مجوف	
۱۹/۴	$\phi V_c$		
۱/۸۲ (N.G.)	$V_u / \phi V_c$		

همانگونه که در جدول ۲ نشان داده شده است، دال مجوف از نظر برش یک‌طرفه در مقاطع توپر از مقاومت کافی برخوردار می‌باشد ولی در مقاطع مجوف دارای ضعف بوده و نیازمند تقویت می‌باشد.

#### ۲,۴ کنترل برش دوطرفه

برش دوطرفه از موارد کلیدی در تحلیل و طراحی دال‌های بتنی تخت محسوب می‌گردد. چرا که این نوع دال که در آن از تیر و کتیبه<sup>۱</sup> در محل ستون‌ها استفاده نمی‌شود، به لحاظ ماهیت از نظر مقاومت برشی دوطرفه دارای ضعف می‌باشد. محیط بحرانی جهت کنترل برش دوطرفه به فاصله  $d/2$  از هر ضلع ستون در نظر گرفته می‌شود (شکل ۳). همانگونه که بیشتر اشاره گردید، نواحی اطراف تکیه‌گاه‌ها به صورت دال بتنی توپر اجرا می‌گردد.



شکل ۳ - توزیع مفروض تنش برشی [۶]

<sup>1</sup> Drop-panel

مطابق بند ۸-۴-۲-۳ از ACI 318-14 تنش برشی ترکیبی با توجه به شکل ۳ توسط روابط زیر محاسبه می‌شود.

$$v_u = \frac{V_u}{A_c} + \frac{M_{uv}}{J/C} \quad (2)$$

$$M_{uv} = \gamma_v M_{sc} \quad (3)$$

که  $V_u$  نیروی برشی نهایی که در ستون خارجی منتقل می‌شود،  $A_c$  مساحت مقطع بحرانی،  $J/C$  مدول مقطع بحرانی،  $M_{sc}$  لنگر ضربیدار دال که توسط ستون در محل اتصال تحمل می‌شود، و  $\gamma_v$  ضریبی برای تعیین بخشی از لنگر  $M_{sc}$  که به واسطه برون مرکزی برش در اتصالات دال-ستون منتقل می‌شود می‌باشند.

مطابق بند ۲۲-۶-۵ از آیین‌نامه ACI 318-14 تنش برشی مجاز از رابطه  $v_n = 0.33\lambda\sqrt{f'_c}$  محاسبه می‌گردد. تنش برشی دوطرفه وارده به محیط بحرانی یک ستون لبه‌ای برابر با  $1/22$  مگاپاسکال، و تنش مقاوم دوطرفه ضربیدار برابر با  $1/24$  مگاپاسکال می‌باشند. بنابراین دال مجوف در محل تکیه‌گاه مورد نظر دارای مقاومت کافی برای تحمل برش دوطرفه نبوده و بایستی با استفاده از راهکارهایی به شرح زیر اقدام به تقویت دال مجوف مکعبی نمود.

### ۵. راهکارهای مقابله با ضعف دال در برش دوطرفه

ظرفیت برشی مقطع را به یکی از روش‌های زیر می‌توان افزایش داد:

- الف- استفاده از فولاد برشی در اطراف ستون
- ب- افزایش ضخامت موضعی دال در اطراف ستون به کمک کتیبه
- ج- افزایش ضخامت کلی دال
- د- افزایش محیط مقطع بحرانی برش دوطرفه،  $b_0$ ، با افزایش ابعاد ستون و یا استفاده از سرستون
- ه- استفاده از بتن با مقاومت فشاری بیشتر

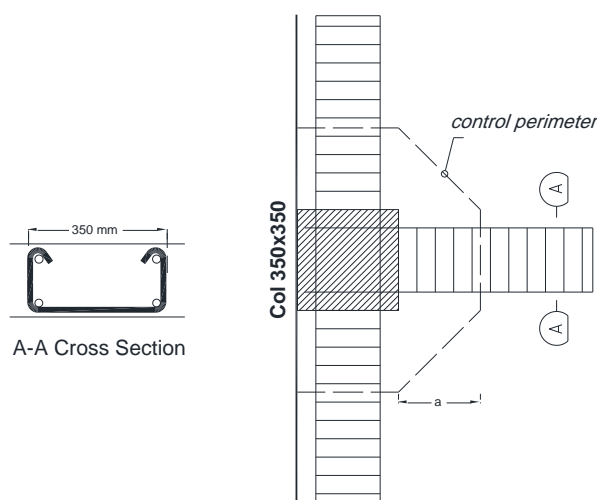
### ۱.۵ استفاده از فولاد برشی در اطراف ستون

یکی از روش‌های عملی و کم‌هزینه برای افزایش ظرفیت برش دوطرفه در اطراف ستون استفاده از فولاد برشی در اطراف ستون می‌باشد [۱]. انواع مرسوم فولاد برشی که در دال‌های تخت جهت افزایش ظرفیت برشی به کار می‌روند، شامل استفاده از میلگردها یا خاموت‌های یک یا چند شاخه، و همچنین استفاده از کلاک برشی می‌باشد. مساحت میلگرد برشی مورد نیاز ( $A_v$ ) توسط رابطه ۴ محاسبه می‌گردد.

$$A_v = \frac{(V_u - \phi V_c) s}{\phi f_y d} \quad (4)$$

که  $s$  فاصله گام‌های میلگردهای برشی می‌باشد.

با در نظر گرفتن فاصله ۱۰۰ میلی‌متری برای گام‌های میلگردهای برشی ( $s$ ) برای قرارگیری در سه طرف ستون لبه‌ای، آرایش میلگردهای تقویتی مطابق شکل ۴ در نظر گرفته می‌شود.

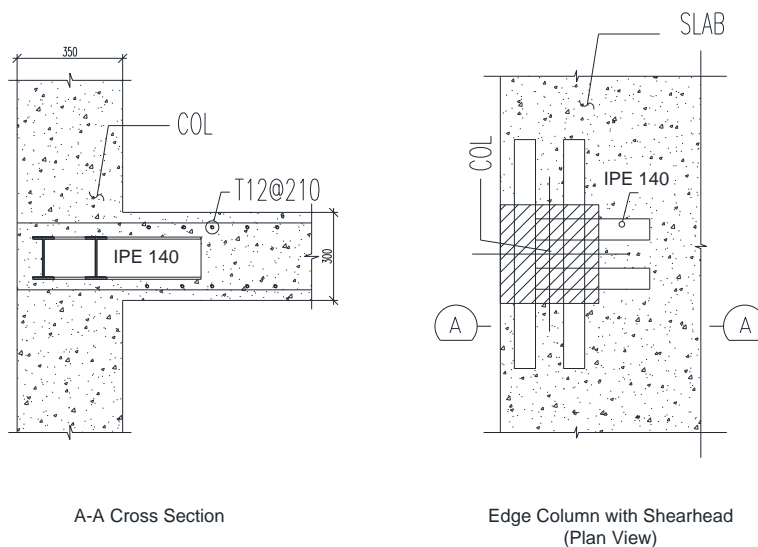


شکل ۴ - جزئیات خاموت‌گذاری برای غلبه بر برش دوطرفه در ستون لبه‌ای

مساحت مورد نیاز برای هر ساق خاموت ( $A_{v,req}$ ) برای هر بازو برابر با ۷۷ میلی‌متر مربع و مساحت تأمین شده توسط میلگردهای به قطر ۱۰ میلی‌متر برابر با ۷۸ میلی‌متر مربع می‌باشد که قابل قبول است. با استفاده از رابطه  $V_u \leq \phi V_c$ ، حداقل فاصله  $a$  برابر با ۹۴۳ میلی‌متر به دست می‌آید که ۱۰۰۰ میلی‌متر انتخاب می‌شود.

### ۲.۵ کلاhek برشی

به‌عنوان گزینه بعدی برای مقابله با شکست برشی دوطرفه در محل تکیه‌گاه‌ها در دال‌های تخت مجوف، اجرای کلاhek برشی<sup>۱</sup> می‌باشد. کلاhek برشی متشکل است از پروفیل‌های فولادی نظیر I شکل یا ناودانی که در امتداد خط واصل ستون‌ها در یک فاصله مشخص در اطراف ستون‌ها به کار می‌روند تا ظرفیت برشی دوطرفه دال بدون تیر در اطراف ستون را افزایش دهد [۱]. ستون مورد بررسی یک ستون لبه‌ای می‌باشد، بنابراین کلاhek برشی با سه بازو طراحی می‌گردد.  $Z_{x,req}$  اساس پلاستیک مورد نیاز مقطع برابر با ۸۹۷۳۳ میلی‌متر مکعب،  $M_p$  لنگر مقاوم پلاستیک مورد نیاز برای هر بازوی کلاhek برشی برابر با ۲۱/۵۴ کیلونیوتن متر،  $Z_x$  اساس پلاستیک تأمین شده توسط دو پروفیل IPE 140 برابر با ۱۷۶۰۰۰ میلی‌متر مکعب، و  $\alpha_v$  نسبت سختی خمشی کلاhek به مقطع مرکب برابر با ۰/۱۵۲ می‌باشند. نتایج طراحی و کنترل‌های آیین‌نامه‌ای، قابل قبول بوده و از دو مقطع IPE140 از نوع فولاد st37 و به طول ۴۰۰ میلی‌متر برای هر بازوی کلاhek برشی استفاده می‌گردد (شکل ۵).



شکل ۵- جزئیات کلاhek برشی

### ۳.۵ کتیبه

افزایش ضخامت دال توسط کتیبه (پهنه) در نواحی اطراف ستون‌ها که دال تخت از نظر مقاومت برشی دوطرفه دچار ضعف می‌باشد از روش‌های مقابله با شکست برشی دوطرفه می‌باشد. مطابق آیین‌نامه ACI 318-14 حداقل ضخامت کتیبه بایستی برابر با  $1.25h$  باشد که  $h$  ضخامت دال تخت می‌باشد. بنابراین حداقل ضخامت کتیبه برابر با ۴۰۰ میلی‌متر انتخاب می‌شود. طول و عرض کتیبه بایستی به گونه‌ای انتخاب شوند که رابطه  $l/3$  برقرار گردد.  $l$  فاصله محور تا محور ستون‌های مجاور از یکدیگر در دهانه مورد بررسی می‌باشد. بنابراین ۳۴۰۰ میلی‌متر به‌عنوان ابعاد کتیبه مربعی انتخاب می‌شود. مقاومت برشی دوطرفه دال تخت مجوف در دو حالت، نخست در مقطع بحرانی به فاصله  $d/2$  از بر ستون و حالت دوم در مقطع بحرانی به فاصله  $d/2$  از بر کتیبه بررسی می‌گردد. کتیبه از زیر دال به میزان ۱۰۰ میلی‌متر بیرون‌زدگی دارد. در حالت اول،  $d$  ارتفاع مؤثر دال با کتیبه برابر با ۳۵۴ میلی‌متر،  $W_d$  وزن بتن مسلح قسمت بیرون‌زدگی کتیبه از زیر دال به‌صورت ضریب‌دار با

<sup>1</sup> Shear head

فرض بتن مسلح به وزن ۲۵ کیلونیوتن بر متر مکعب برابر با ۳ کیلونیوتن بر متر مربع،  $V_{II}$  برش دوطرفه ناشی از بار ثقلی نهایی ضریبدار در محل مقطع بحرانی برابر با ۶۱۷ کیلونیوتن،  $M$  بخشی از لنگر خمشی نامتوازن منتقل شده به واسطه برون‌محوری برش برابر با ۴۲/۳ کیلونیوتن متر در هر متر،  $V_{II}$  تنش برشی دوطرفه در مقطع بحرانی برابر با ۱/۱۰ نیوتن بر میلی‌متر مربع، و  $\Phi V_{II}$  تنش برشی مقاوم دوطرفه کاهش‌یافته در مقطع بحرانی برابر با ۱/۲۴ نیوتن بر میلی‌متر مربع می‌باشند. با توجه به نتایج به‌دست آمده در این حالت مشاهده می‌گردد که در مقطع بحرانی به فاصله  $d/2$  از بر ستون، دال تخت با کتیبه از مقاومت برشی دوطرفه کافی برخوردار است. در حالت دوم، مقطع بحرانی جهت کنترل برش دوطرفه به فاصله  $d/2$  از بر کتیبه در نظر گرفته می‌شود. در این حالت،  $d$  ارتفاع مؤثر دال با کتیبه برابر با ۲۵۴ میلی‌متر،  $V_{II}$  برش دوطرفه ناشی از بار ثقلی نهایی ضریبدار در محل مقطع بحرانی برابر با ۴۴۹ کیلونیوتن،  $M$  بخشی از لنگر خمشی نامتوازن منتقل شده به واسطه برون‌محوری برش برابر با ۴۲/۳ کیلونیوتن متر در هر متر،  $V_{II}$  تنش برشی دوطرفه در مقطع بحرانی برابر با ۰/۱۷ نیوتن بر میلی‌متر مربع، و  $\Phi V_{II}$  تنش برشی مقاوم دوطرفه کاهش‌یافته در مقطع بحرانی برابر با ۱/۲۴ نیوتن بر میلی‌متر مربع می‌باشند. با توجه به نتایج به‌دست آمده در این حالت مشاهده می‌گردد که می‌توان از دال تخت با کتیبه، مقاومت برشی دوطرفه مورد نیاز را تأمین نمود.

#### ۴.۵ افزایش ضخامت کلی دال

به منظور مقابله با خرابی ناشی از برش دوطرفه می‌توان ضخامت کلی دال تخت را تا حدی که خود مقطع دال بتواند برش دوطرفه را تحمل کند افزایش داد. طی بررسی‌های مبتنی بر آزمون و خطا این نتیجه حاصل گردید که در صورتی که ضخامت دال تخت مجوف، حداقل برابر با ۴۴۰ میلی‌متر باشد، مقاومت کافی برای تحمل برش دوطرفه حاصل می‌شود. باید توجه نمود که در این حالت، وزن سقف به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. بنابراین این راهکار روشی اقتصادی برای رفع مشکل شکست برشی دوطرفه نمی‌باشد.

#### ۵.۵ افزایش محیط مقطع بحرانی برش دوطرفه

با افزایش ابعاد ستون و یا با استفاده از سرستون می‌توان محیط مقطع بحرانی برای برش دوطرفه ( $b_0$ ) را افزایش داد. مشاهده گردید در صورتی که حداقل ابعاد ستون دقیقاً دو برابر گردند (یعنی از ۳۵۰ میلی‌متر به ۷۰۰ میلی‌متر افزایش یابد)، مقاومت برشی دوطرفه کافی در مجاورت ستون‌ها تأمین می‌گردد.

#### ۶.۵ استفاده از بتن با مقاومت فشاری بیشتر

با افزایش مقاومت فشاری بتن ( $f'_c$ ) می‌توان ظرفیت برشی دوطرفه بیشتری در محل ستون‌ها تأمین نمود. در صورتی که مقاومت فشاری بتن، حداقل برابر با ۶۴ مگاپاسکال باشد، در محل اتصال دال به ستون خرابی برشی دوطرفه اتفاق نخواهد افتاد. البته باید توجه نمود که تأمین این مقاومت برای بتن معمولاً نیازمند تجهیزات خاص و کنترل‌های دقیق و نیروهای متخصص می‌باشد. ضمن اینکه با افزایش مقاومت بتن می‌توان دال اقتصادی‌تری طراحی نموده و ضخامت را کاهش داد که در این صورت نیز مقاومت برشی مورد نیاز تأمین نخواهد شد. بنابراین این روش نیز اقتصادی نمی‌باشد.

#### ۶. نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی‌های انجام گرفته بر روی نمونه دال بتنی تخت مجوف مکعبی (یوبوت) ملاحظه می‌گردد که این نوع دال از نظر برش یک‌طرفه در مقاطع مجوف و برش دوطرفه در محل تکیه‌گاه‌های ستونی دارای ضعف می‌باشد که بایستی در طراحی به آن توجه نمود. با توجه به نظر طراح، هر یک از روش‌های تقویت مانند افزایش ضخامت کلی دال، افزایش ضخامت دال در محل ستون‌ها توسط کتیبه، افزایش محیط مقطع بحرانی برش دوطرفه با افزایش ابعاد ستون، استفاده از بتن با مقاومت فشاری بیشتر، و استفاده از فولاد برشی در اطراف ستون قابل استفاده است. پرواضح است که افزایش ضخامت کلی دال از نظر اقتصادی به صرفه نیست. افزایش ضخامت دال توسط کتیبه و افزایش ابعاد ستون‌ها ملاحظات معماری را دچار اشکال کرده و استفاده از بتن با مقاومت بیشتر ممکن است امکان‌پذیر نباشد. متداول‌ترین و اقتصادی‌ترین روش مقابله با برش دوطرفه با در نظر گرفتن مسائل اجرایی، معماری و اقتصادی می‌تواند استفاده از فولاد برشی در محل تکیه‌گاه‌ها باشد.

#### فهرست مراجع

۱. مستوفی نژاد، داود، سازه‌های بتن آرمه، انتشارات ارکان دانش، جلد دوم، چاپ ۲۵، ۱۳۹۴.
۲. J. H. Chung; J. H. Park; H. K. Choi; S. C. LEE; C. S. CHOI; "An analytical study on the impact of hollow shapes in bi-axial hollow slabs", 2010.
۳. Martina Schnellenbach-Held; Karsten Pfeffer; "Punching behavior of biaxial hollow slabs", 2002.



- Ing. Dan-Vasile Bompa; “behaviour of Column – Flat Slab Connections”, Doctorate Thesis, 2011. .۴
- Robert Park, William L. Gamble; Reinforced Concrete Slabs, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2000. .۵
- ACI 318M-14, Building Code Requirements for Structural Concrete, American Concrete Institute, Farming Hills, 2014. .۶