

ارزیابی تأثیر اندازه و شکل بازشو در ظرفیت برش دوطرفه سقف وافل

ادیب یگانه^۱، بهزاد افتخار^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد عمران - سازه، دانشکده فنی و مهندسی، موسسه آموزش عالی زند شیراز.

۲. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاداسلامی واحد لارستان.

* رایانامه نویسنده مسئول: Behzad.Eftekhari@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۸ - تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۱

چکیده

یکی از عوامل مهم و تعیین کننده در عملکرد و طراحی سازه‌های مختلف وزن آن‌هاست. از راهکارهای موجود برای کاهش وزن سازه‌ها می‌توان به استفاده از سقف‌های وافل اشاره کرد. استفاده از سقف وافل به صورت تخت می‌تواند سقف را تحت نیروی شدید برش دوطرفه قرار داده و قرارگیری بازشو در نزدیکی ستون می‌تواند باعث کاهش ظرفیت برش دوطرفه سقف شود. در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر اندازه و شکل بازشو در رفتار برش دوطرفه سقف‌های وافل، ۹ نمونه سقف در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی و به روش اجزاء محدود تحلیل شده است. مدل‌ها به دو گروه تقسیم شده‌اند به شکلی که گروه اول بازشوه‌های مستطیلی و گروه دوم بازشوه‌های مربعی شکل را مورد بررسی قرار داده است. نتایج تحلیل و بررسی‌ها نشان‌دهنده آن است که استفاده از بازشوه‌های مربعی می‌تواند ظرفیت برش دوطرفه را ۹ درصد بیشتر از بازشوه‌های مستطیلی کاهش دهد. همچنین هندسه بازشو در تغییر شکل سقف وافل بسیار مؤثر است. به شکلی که در صورت استفاده از بازشوه‌های مربعی، با افزایش مساحت، مقدار تغییر شکل سقف افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: سقف وافل، بهینه‌سازی ابعاد و هندسه بازشو، برش دوطرفه، الگوی ترک‌خوردگی.

۱- مقدمه

مقابل بارهای جانبی چشم‌پوشی می‌شود. در این حالت برش دوطرفه اطراف ستون برای سقف حاکم نخواهد بود ولی باید برش یک‌طرفه دال و برش تیر به‌دقت بررسی شود [4].

حذف تیرها از سازه و اعمال بار جانبی به ستون می‌تواند باعث بروز اتفاقاتی مانند شکست برش دوطرفه در محدوده تکیه‌گاهی شود. با توجه به این که پایداری کل دال توسط ستون‌ها تامین می‌شود، باید در محدوده اتصال دال به ستون، دال به‌صورت توپر طراحی شود تا از مقاومت آن در برابر برش در محدوده تکیه‌گاهی اطمینان حاصل شود [5].

مقاومت کافی در برابر برش دوطرفه در اطراف ستون یکی از عوامل تعیین‌کننده در طراحی سقف‌های وافل است. شکست برشی دو طرفه در سقف‌های وافل که به دلیل ایجاد ترک‌هایی در تارهای بالایی تار خنثی حاصل شده، به دلیل وجود پوشش کف

طراحان، سیستم‌های مختلف سقف را بر اساس نوع ساختمان و کاربری آنها انتخاب می‌کنند. تنوع وزنی سقف‌ها موجب تغییر در عملکرد لرزهای ساختمان‌ها شده که این امر باعث تغییر در ضریب رفتار آنها می‌شوند [1]. سقف‌های وافل به دلیل مزایای اقتصادی و سازه‌ای، یکی از سیستم‌های نوین سقفی بوده که از آن‌ها بسیار استفاده می‌شود [2]. این نوع سقف‌ها شامل یک شبکه از تیرچه‌های منظم و متعامد در جهت‌های عمودی و افقی نسبت به هم بوده و یک دال نازک بتنی روی آن قرار می‌گیرد [3]. این نوع سقف می‌تواند به دو صورت سیستم دال تخت و یا همراه با تیر بتنی در سقف مورد استفاده قرار بگیرد. در صورتی که از تیرهای بتنی با ارتفاع بزرگ‌تر از ضخامت سقف استفاده شود، سقف فقط به عنوان یک سیستم انتقال بار ثقلی عمل کرده و از ظرفیت آن در

فاصله بازشو از لبه ستون است [13]. الشافی⁴ و همکارانش دریافتند که استفاده از بازشوه‌های دایروی می‌تواند باعث بهبود عملکرد برش دوطرفه سقف نسبت به بازشوه‌های مربع شکل شود [7]. الروسان⁵ و النمراوی⁶ نشان دادند که محل بازشوها با توجه به موقعیت خروج از مرکزیت نیروی وارده به طور قابل توجهی بر رفتار دال مسطح تأثیر گذاشته، در حالی که تمام آیین‌نامه‌های معتبر این موضوع را نادیده گرفته‌اند [14]. نتایج آزمایش‌ها و مدل‌سازی‌های آگویار⁷ و همکارانش نشان داد که در صورت استفاده از ستون‌های مربعی، وجود بازشو می‌تواند تأثیر بسیار زیادتری بر روی ظرفیت برش دوطرفه سقف وافل داشته‌باشد. همچنین آن‌ها بیان نمودند که نتایج بدست آمده از آیین‌نامه Eurocode 2 به نتایج آن‌ها بسیار نزدیک می‌باشد. در این تحقیق تمامی بازشوه‌های ایجاد شده در سقف به شکل مستطیل بوده و در محدوده توپر اطراف ستون قرار گرفته‌اند [9]. ابراهیم⁸ و همکارانش به بررسی رابطه ظرفیت خمشی سقف‌های وافل با اندازه بازشوها پرداخته و مشاهده کردند که در صورت قرارگیری بازشو در محل برخورد دو نوار ستونی، چنانچه مساحت بازشو کمتر از ۲۰ درصد مساحت کل سقف باشد، تأثیر چندانی بر ظرفیت خمشی این نوع سقف‌ها ندارد [15]. نتایج تجربی آنیل⁹ و همکارانش روی دال‌های بتن مسلح نشان داد که مقاومت برشی دوطرفه با افزایش اندازه بازشو و افزایش فاصله بازشو از لبه ستون کاهش پیدا می‌یابد [16].

استفاده زیاد از سقف‌های وافل توسط طراحان مختلف بر هیچ‌کس پوشیده نیست. با این حال مطالعاتی که روی اثر اندازه بازشو بر ظرفیت برش دوطرفه دال‌های بتنی صورت گرفته است بیشتر بر دال‌های بتنی دوطرفه ساده متمرکز بوده و از چنین نتایجی برای پیش‌بینی رفتار برش دوطرفه سقف‌های وافل نیز استفاده شده است. ضعف مطالعات موجود در عملکرد برش دوطرفه سقف‌های وافل به موارد ذکر شده در بالا منتهی نمی‌شود. امروزه برای بررسی تأثیر بازشو بر روی مقاومت برشی دوطرفه در سقف‌های وافل از نتایج تحلیل دال‌های تخت استفاده می‌شود. تأثیر بازشو بر روی عملکرد

قابل مشاهده نمی‌باشد [6, 7]. پدیده برش دوطرفه در سازه‌های دارای دال تخت به معنای حذف یک عضو باربر مهم در آن بوده و موجب بروز پدیده تخریب پیش‌رونده می‌شود [8]. بنابراین، برش دوطرفه در این نوع سقف‌ها باید به‌دقت مورد بررسی قرار بگیرد. اگرچه مطالعه‌ها و آزمایش‌های متعددی در مورد برش دوطرفه در دال‌های مسطح انجام گرفته، اما بررسی‌های کمتری در مورد تأثیر آن‌ها بر سقف‌های وافل صورت پذیرفته‌است. نتایج این مطالعه‌ها در آیین‌نامه‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته و روابطی برای محاسبه ظرفیت برش دوطرفه از آن‌ها استخراج شده است. با توجه به این نتایج به روشنی معلوم می‌شود که ضخامت دال، محیط بحرانی اطراف ستون، مقاومت فشاری بتن و مقدار آرماتور برشی دوطرفه (در صورت وجود) مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در ظرفیت برش دوطرفه می‌باشد [9]. البیاتی¹ و همکارانش نشان دادند که سازوکار شکست دوطرفه سقف وافل بسیار نزدیک به دال‌های توپر بوده و روش‌های پیشنهادی محاسبه ظرفیت برش دوطرفه توسط آیین‌نامه‌ها عموماً محافظه‌کارانه می‌باشد [5]. میلیگان² و همکارانش با مدل‌سازی ۸ دال بتنی در نرم‌افزار ABAQUS نشان دادند که تأثیر ابعاد ستون بر روی مقاومت دوطرفه نه تنها به نسبت اندازه ابعاد بستگی دارد، بلکه به نسبت بعد ستون به عمق موثر دال نیز وابسته است [10]. ویلما³ و همکارانش با بررسی چند ساختمان مختلف نتیجه گرفتند که بهبود خواص مکانیکی مصالح مورد استفاده در سقف وافل و یا افزایش محصورشدگی میلگردها، کمک چندانی به بهبود مقاومت برشی دوطرفه این نوع دال‌ها نمی‌کند. در این راستا یکی از روش‌های ممکن برای بهبود عملکرد سازه‌های دارای سقف وافل، استفاده از تیرهای با ارتفاع بیشتر از ضخامت سقف می‌باشد [11].

از بازشوها برای عبور انشعابات تأسیسات برقی و مکانیکی به طبقات مختلف یک ساختمان استفاده می‌شود. با این حال قرارگیری بازشوها در سقف‌های بتنی، تأثیر قابل توجهی بر رفتار سازه‌ای آن‌ها داشته، به طوری که این بازشوها می‌توانند به طور مستقیم بر ظرفیت برش دوطرفه آن‌ها تأثیر گذاشته و توانایی باربری و عملکرد آن‌ها را تغییر دهند [12]. وجود بازشو در اطراف ستون، ظرفیت برش دوطرفه سقف را کاهش می‌دهد و این کاهش ظرفیت وابسته به

⁴ El-Shafiey

⁵ Alroushan

⁶ Alnemrawi

⁷ Aguiar

⁸ Ibrahim

⁹ Anil

¹ Al-Bayati

² Milligan

³ Vielma

(۱) قابل مشاهده می‌باشد. نمونه‌های یادشده به دو گروه تقسیم می‌شوند که از هرکدام از آن‌ها نتایج مشخصی استخراج می‌شود. در گروه اول تأثیر اندازه بازشو روی عملکرد برش دوطرفه در سقف‌های وافل مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا به ازای یک فاصله ثابت از لبه ستون تا لبه بازشو، چهار اندازه مختلف از بازشو در سقف ایجادشده که مقدار ظرفیت برش دوطرفه و تغییر شکل سقف نسبت به مساحت بازشو محاسبه شده است. تفاوت بین گروه اول و دوم سقف‌ها در هندسه بازشو و نحوه افزایش مساحت آن‌ها می‌باشد. در گروه اول فقط یک بعد بازشو افزایش می‌یابد و شکل هندسی بازشو به صورت مستطیلی است. در این حالت، مقدار محیط مقطع بحرانی (b_0) معرفی شده در آیین‌نامه ACI 318-19 ثابت می‌ماند که در این صورت ظرفیت برش دوطرفه به دست آمده از روابط آیین‌نامه نیز تغییر نمی‌کند [17]. در گروه دوم، شکل بازشوها به صورت مربعی بوده و مساحت بازشوها با گروه اول مساوی است. تصاویری از این دال‌ها در شکل (۱) آورده شده است. نیروهای استاتیکی از طریق ستون به این دال‌ها وارد می‌شوند تا زمانی که نمونه دیگر مقاومتی از خود نشان ندهد. از ۱۶ ورق فولادی به ابعاد ۱۵۰ در ۱۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۲/۵ میلی‌متر بر روی سطح دال برای ایجاد رفتار مفصلی در تکیه‌گاه‌ها استفاده شده است. مقدار عمق موثر (d) برابر با ۱۲۵ میلی‌متر بوده و سایر جزییات میلگرد گذاری و همچنین چگونگی قرارگیری ورق‌های فولادی به ترتیب در شکل‌های (۲ و ۳) ارائه شده است.

جدول ۱. نام‌گذاری و مشخصات دال‌های شبیه‌سازی شده

* این دو نمونه دارای عنوان متفاوت اما ویژگی‌های یکسان هستند.

| Group | Sample Name | Opening Dimensions [mm] | Opening Area [mm ²] | Column Dimension [mm] | Slabs Height [mm] |
|-------|-------------|----------------------------|------------------------------------|--------------------------|----------------------|
| - | S0 | - | 0 | 120×120 | 125 |
| 1 | SR1* | 120×120 | 14400 | 120×120 | 125 |
| 1 | SR2 | 240×120 | 28800 | 120×120 | 125 |
| 1 | SR3 | 360×120 | 43200 | 120×120 | 125 |
| 1 | SR4 | 480×120 | 57600 | 120×120 | 125 |
| 2 | SS1* | 120×120 | 14400 | 120×120 | 125 |
| 2 | SS2 | 170×170 | 28900 | 120×120 | 125 |
| 2 | SS3 | 208×208 | 43264 | 120×120 | 125 |
| 2 | SS4 | 240×240 | 57600 | 120×120 | 125 |

Table 1. Specification of simulated slabs

* These two samples have different titles but the same features.

برش دوطرفه به کاهش ظرفیت و یا شکل پذیری دال محدود نشده و عواملی مانند مساحت بازشو و حتی شکل هندسی آن نیز بر عملکرد برش دوطرفه دال تأثیر می‌گذارد. از طرفی با توجه به وجود محدوده توپر در اطراف محل اتصال دال به ستون در این نوع سقف‌ها و تفاوت هندسی زیاد بین دو مقطع توپر و مشبک، باعث می‌شود وجود بازشو در هرکدام از این دو محدوده آثار کاملاً متفاوتی را روی عملکرد برش دوطرفه این نوع سقف‌ها بگذارد. از این رو بررسی این عوامل روی سقف وافل لازم به نظر می‌رسد. پژوهش‌های گذشته نشان داده‌اند که روش‌های عددی محاسبه نیروهای وارده به قطعات بتنی با روش اجزاء محدود، بسیار به نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی نزدیک می‌باشد. به همین دلیل در این پژوهش به بررسی اثر اندازه و شکل بازشوها بر سقف وافل از طریق مدل‌سازی با نرم‌افزار ABAQUS پرداخته شده است. ابتدا نتایج مدل با نمونه آزمایشگاهی مورد درستی آزمایشی قرار گرفته و در نهایت نتایج مدل‌سازی با ضوابط آیین‌نامه ACI 318-19 مقایسه شده تا درک کاملی از این موضوع به وجود آید.

۲- مدل‌سازی

۲-۱- مدل‌های مورد بررسی

در این پژوهش ۸ سقف وافل با بازشو و ۱ سقف وافل بدون بازشو برای بررسی برش دوطرفه در این نوع سقف‌ها در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شده است. مشخصات این دال‌ها در جدول

شکل ۱. ابعاد دو نمونه از دال‌های شبیه‌سازی شده: الف) SR3، ب) SS2

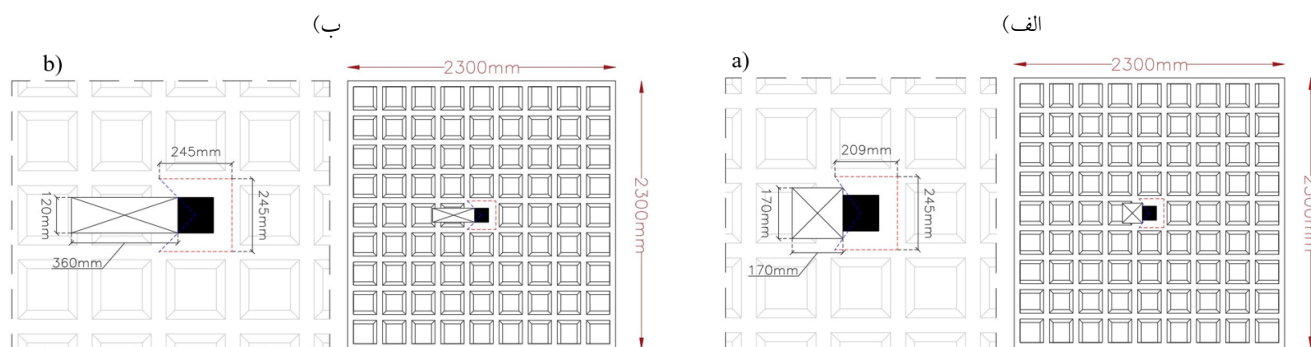


Fig. 1. Dimensions of two samples of simulated slabs: a) SR3; b) SS2

شکل ۲. ابعاد و جزئیات میلگرد گذاری مدل‌ها: الف) ستون، ب) دال

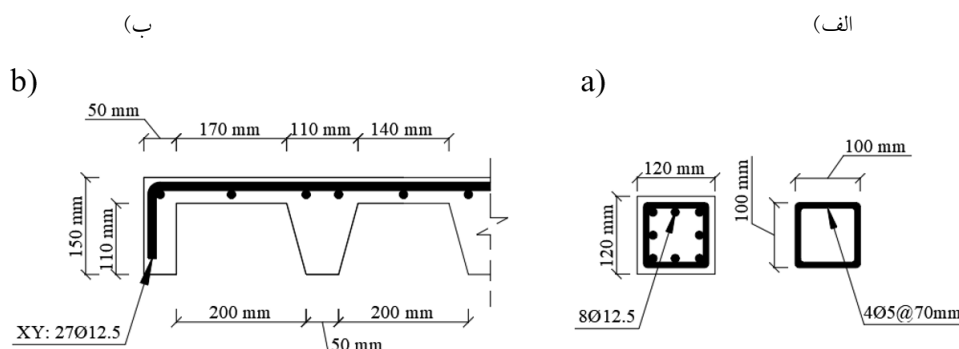


Fig. 2. Dimensions and reinforcement details of the models: a) Column; b) Slab

که در این تحقیق از مدل مطرح شده توسط هوگنستاد^۱ استفاده شده است [18]. در این مدل، منحنی تنش-کرنش به سه قسمت تقسیم می‌شود. در شرایط σ_{c1} رفتار بتن به صورت خطی الاستیک است. با وارد شدن تنش به محدوده σ_{c2} ، بتن وارد ناحیه غیرخطی می‌شود. بخش سوم منحنی تنش-کرنش پس از رسیدن تنش به مقدار حداکثر اتفاق می‌افتد. در این قسمت پس از رسیدن تنش به مقدار حداکثر، مقاومت فشاری بتن به صورت غیرخطی کاهش می‌یابد. نمودار تنش-کرنش فشاری مفروض در شکل (۴) ارائه شده است. روابط تنش-کرنش در مدل مورد نظر به صورت زیر می‌باشد:

$$\text{if } \varepsilon_c \leq 0.4f'_c E_0 \quad \sigma_{c1} = E_0 \varepsilon_c \quad (1)$$

$$\text{if } \varepsilon_c > 0.4f'_c E_0 \quad \sigma_{c2} = f'_c \left(2 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right) \quad (2)$$

در روابط بالا و شکل (۴)، f'_c مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن (مگاپاسکال)، σ_c تنش فشاری (مگاپاسکال)، E_0 مدول الاستیسیته بتن (مگاپاسکال)، ε_c کرنش فشاری، ε_{el} حداکثر کرنش الاستیک بتن، ε_0 کرنش متناظر با f'_c و ε_{max} کرنش نهایی نظیر شکست فشاری بتن است.

شکل ۳. موقعیت قرارگیری ورق‌های فولادی

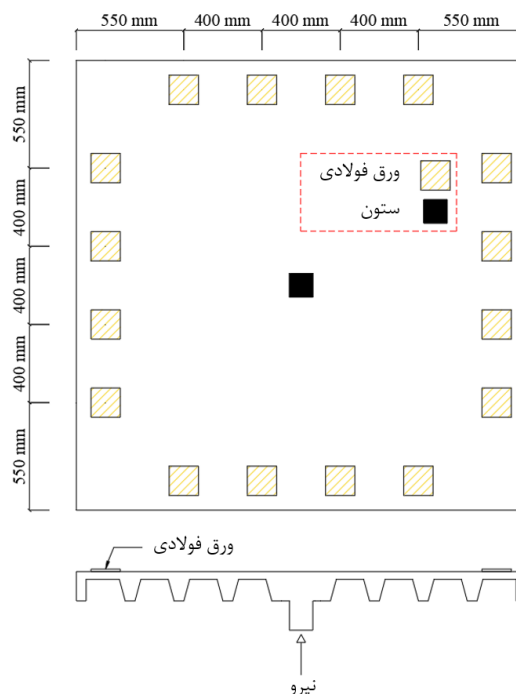


Fig. 3. Placement of steel plates

۲-۲- ویژگی‌های مصالح

مدل‌های زیادی برای شبیه‌سازی رفتار بتن در فشار وجود دارد

¹ Hognestad

(میلی متر) است. خواص فیزیکی کامل بتن و میلگرد در جدول (۲) قابل مشاهده است. همچنین سایر پارامترهای موجود در این جدول عبارتند از حداکثر تنش تسلیم میلگرد (F_y)، مدول الاستیسیته میلگرد (E_r) و ضریب پواسون (ν). در هنگام اعمال بارگذاری استاتیکی (چرخه‌ای) یا دینامیکی بر مدل‌های مواد شبه شکننده مانند بتن، باید علاوه بر پدیده ترک خوردگی، اثر بسته شدن ترک را نیز در نظر گرفت. مدل پلاستیسیته آسیب بتن (CDP^۱)، یکی از روش‌های متداول مدل‌سازی رفتار بتن هست. در این مدل ترک‌های کششی و خرد شدن فشاری بتن به‌عنوان دو فرایند اصلی شکست در نظر گرفته شده است. این روش توسط لابلینر^۲ [20] ارائه و به وسیله لی^۳ و فنوز^۴ [21] بهبود داده شده است.

جدول ۲. خواص فیزیکی بتن و میلگرد

| G_f (N/mm) | G_{fo}^* (N/mm) | E_0 (MPa) | f'_c (MPa) | ν | E_R (GPa) | F_y (MPa) |
|-----------------|----------------------|----------------|-----------------|-------|----------------|----------------|
| 0.086 | 0.035 | 24870 | 28 | 0.2 | 200 | 565 |

Table 2. Physical properties of concrete and rebar

*بر اساس استاندارد CEB-FIB-MODEL CODE 1990 برای حداکثر اندازه سنگ‌دانه ۱۹ میلی‌متر انتخاب شده است [22].

*Selected for the maximum aggregate size of 19 mm based on CEB-FIB-MODEL CODE 1990 [22].

۲-۳- مدل اجزاء محدود

در این تحقیق از نسخه ۲۰۲۲ نرم‌افزار ABAQUS استفاده شده است. این نرم‌افزار یکی از دقیق‌ترین نرم‌افزارهای المان محدود می‌باشد که برای شبیه‌سازی مسائل مهندسی استفاده می‌شود [23]. مدل دال‌های بتنی مورد مطالعه در این تحقیق از به هم پیوستن ۶

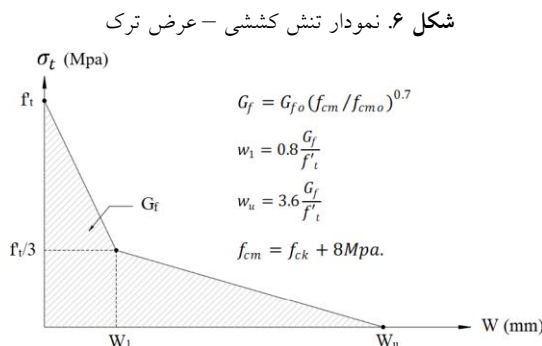


Fig. 6. Tensile stress - crack width diagram

شکل ۴. نمودار رفتار بتن در فشار

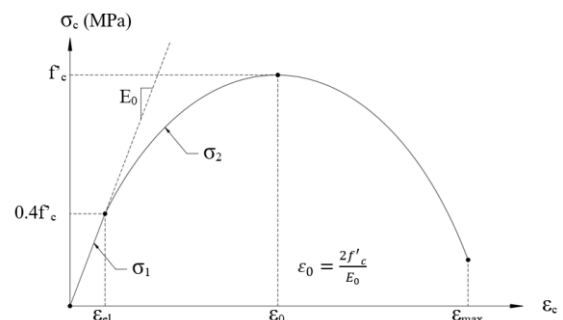


Fig. 4. Diagram of concrete behavior under pressure

مطابق شکل (۵) پاسخ تنش-کرنش تک‌محوری بتن در کشش نیز مانند رفتار فشاری به سه قسمت تقسیم می‌شود، با این تفاوت که رفتار کششی کاملاً خطی است [19]. در این نوع رفتار، مقدار تنش از صفر تا حداکثر مقاومت کششی بتن (f'_t) به صورت الاستیک خطی است که پس از ترک خوردگی، شاخه نزولی با فرآیند نرم شدن مدل‌سازی می‌شود. در نهایت با رسیدن کرنش به مقدار بیشینه ϵ_{II} ، مقدار تنش به صفر می‌رسد. رفتار شکننده بتن از طریق روابط موجود در شکل‌های (۵) و (۶) در مدل تعریف شده است. در این روابط σ_t تنش کششی، ϵ_t کرنش کششی، f'_t حداکثر مقاومت کششی بتن (مگاپاسکال)، G_f انرژی شکست بتن (مگاپاسکال)، G_{fo} انرژی پایه شکست بتن (مترمیلی)، l_c طول مشخصه المان و برابر با ۲۰ میلی‌متر، ϵ_{cr} کرنش متناظر با f'_{ct} میانگین مقاومت فشاری بتن و برابر ۱۰ مگاپاسکال، f_{ck} مقاومت فشاری مشخصه بتن (مگاپاسکال)، W_l عرض ترک بتن به ازای تنش $f'_t/3$ (میلی‌متر) و W_u نشان‌دهنده حداکثر عرض ترک بتن

شکل ۵. نمودار رفتار بتن در کشش

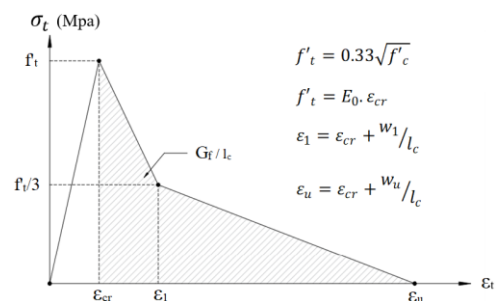


Fig. 5. Diagram of concrete behavior in tension

¹ Concrete Damage Plasticity

² Lubliner

³ Lee

⁴ Fenves

شده تا نتایج ارزیابی و کارایی و دقت مدل‌ها مشخص گردد. نتایج حاصل از تحلیل با مقادیر بدست آمده از روابط آیین‌نامه‌ای (ACI 318-19) برای هر کدام از نمونه‌ها به صورت جداگانه مقایسه می‌شود. آگویار و همکارانش ۱۵ دال بتنی وافل (۱) دال بدون بازشو و ۱۴ دال دارای بازشو) به صورت آزمایشگاهی مطابق شکل (۸) مورد ارزیابی قرار داده‌اند که از بین آن‌ها، دال بتنی L1A1 برای صحت‌سنجی مدل‌سازی در این تحقیق بکار گرفته شده است [9]. نتایج صحت‌سنجی در شکل (۹) ارائه شده است. اختلاف نتایج مدل عددی با نمونه آزمایشگاهی برای مقادیر مختلف جابه‌جایی، کم بوده و همواره حل عددی نیرویی بیشتر از واقعیت را محاسبه می‌کند.

شکل ۸. مدل آزمایشگاهی آگویار و همکاران [9]

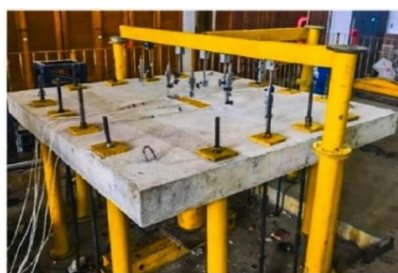


Fig. 8. Aguiar's experimental model [9]

شکل ۹. نتایج درستی آزمایشی

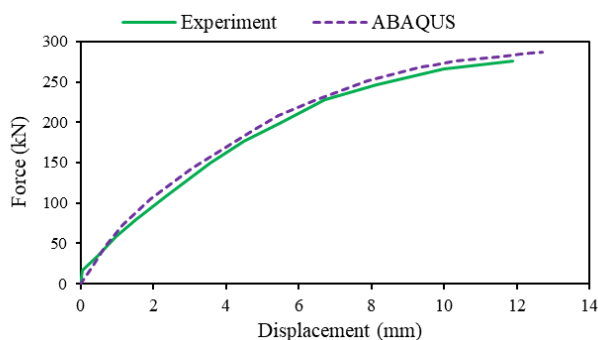


Fig. 9. Validation results

۴- نتایج

خلاصه نتایج به دست آمده از تحلیل نرم‌افزاری و روابط ACI 318-19 در جدول (۲) ارائه شده است. همچنین در شکل (۱۰) چگونگی تغییر شکل دال در مرکز سطح آن تا لحظه رسیدن به شکست برشی دوطرفه در شرایط مختلف نشان داده شده است. به منظور اطمینان از بروز شکست برشی دوطرفه در مدل‌ها، مقدار نیروی مورد نیاز برای شکست خمشی سقف بر اساس نظریه خط تسلیم

نوع از اجزاء شامل ستون، دال، میلگردهای طولی دال، میلگردهای طولی ستون، میلگردهای عرضی ستون و ورق‌های فولادی تشکیل شده است. مدل نهایی دال در شکل (۷) قابل مشاهده است. المان مورد استفاده برای اجزاء بتنی و ورق‌های فولادی از نوع Solid هستند و برای مدل‌سازی آن‌ها از روش Extrusion استفاده شده است. همچنین برای میلگردها، المان نوع Wire مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به مقارن بودن تمامی نمونه‌ها، به منظور کاهش حجم و زمان محاسبات، تنها نیمی از سطح سقف‌های وافل مدل‌سازی شده است که این روش تغییری در نتیجه نهایی نرم افزار ایجاد نمی‌کند [19]. در این مدل مقدار زاویه اتساع (Ψ) برابر با ۳۶ درجه در نظر گرفته شده است [24]. مقدار خروج از مرکزیت (ε) بر اساس نسبت بین مقاومت کششی و فشاری تک‌محوری در بتن برابر ۰/۱ تعریف شده است [25]. عامل دیگر برای مدل‌سازی آسیب پلاستیک، نسبت بین حداکثر تنش‌ها در آزمون فشاری دو محوره و در آزمون فشاری تک‌محوری (σ_{b0}/σ_c) است که می‌توان مقدار ۱/۱۶ را برای آن در نظر گرفت [10]. همچنین برای ضریب K_c مقدار ۰/۶۷ و پارامتر ویسکوزیته (μ) مقدار ۰/۰۵ لحاظ شده است [9]. در مدل‌سازی نمونه‌ها از دو نوع المان اجزا محدود استفاده شده است. برای بتن و ورق فولادی از المان هشت گرهی شش‌وجهی (C3D8) با ابعاد حداکثر ۲۵ میلی‌متر و برای میلگردها از المان خربایی دو گره‌ای (T3D2) با حداکثر ابعاد ۱۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده تا دقت لازم برای مش‌بندی و تحلیل دقیق‌تر را فراهم نماید.

شکل ۷. شکل نهایی نمونه دال بتنی S0

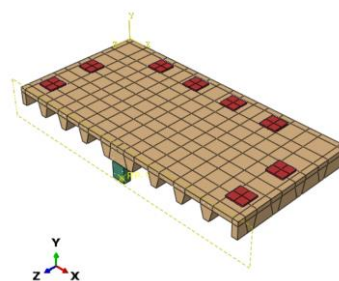


Fig. 7. The final view of the S0 slab sample

۳- صحت‌سنجی نتایج

به منظور ارزیابی رفتار نمونه‌های مدل شده در نرم‌افزار، ابتدا نتایج آزمایشگاهی یکی از دال‌ها در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی

توجه است. کمترین اختلاف میان این دو مقدار نسبت به V_{flex} برابر با ۶۵ درصد بوده و مربوط به نمونه S0 هست. بنابراین می توان از بروز شکست برشی دوطرفه در تمامی مدل های نرم افزاری اطمینان حاصل نمود.

جدول ۳. خلاصه نتایج نرم افزاری و آیین نامه ای

| Sample Name | ACI 318-19 | | ABAQUS | | V_c (ABAQUS) V_{flex} | V_c (ACI) V_c (ABAQUS) |
|-------------|-------------|-------------|--------------------|--|------------------------------|-------------------------------|
| | V_c kN | V_c kN | Displacement mm | | | |
| S0 | 213.91 | 230.60 | 16.23 | | 0.351 | 0.928 |
| SR1 | 160.43 | 194.06 | 15.60 | | 0.295 | 0.827 |
| SR2 | 160.43 | 201.24 | 15.17 | | 0.306 | 0.797 |
| SR3 | 160.43 | 191.33 | 15.53 | | 0.291 | 0.838 |
| SR4 | 160.43 | 189.95 | 15.17 | | 0.302 | 0.845 |
| SS1 | 160.43 | 194.06 | 15.60 | | 0.295 | 0.827 |
| SS2 | 144.71 | 194.72 | 15.21 | | 0.296 | 0.743 |
| SS3 | 137.73 | 183.82 | 16.00 | | 0.279 | 0.749 |
| SS4 | 133.36 | 174.66 | 17.25 | | 0.265 | 0.764 |

Table 3. Summary of software and ACI code results

شکل ۱۰. نمودار نیرو-جابجایی مدل ها تا لحظه شکست برشی دوطرفه: الف) گروه یک، ب) گروه دو

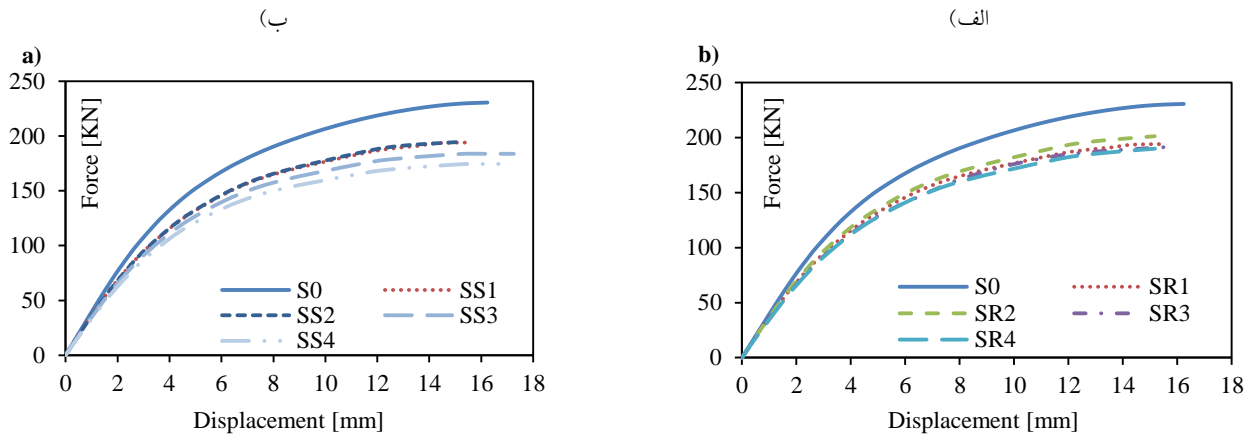


Fig. 10. Force-displacement diagram of the models until the moment of punching failure: a) group 2; b) group 1

غیریکنواخت سطح مقطع و یا چگونگی خاص میلگرد گذاری در این تحقیق باشد. با توجه به نتایج بدست آمده می توان به وضوح مشاهده کرد که کاهش ملایم ظرفیت برش دوطرفه دال با افزایش مساحت بازشو انجام پذیرفته که در فرضیات آیین نامه ACI 318-19 این مسئله لحاظ نشده است. در گروه دو کاهش ناگهانی ظرفیت برش دوطرفه پس از ایجاد بازشو رخ داده که در نمودار شکل (۱۱) نیز قابل مشاهده است. اما با توجه به مربعی بودن بازشوها و افزایش ابعاد آن، روند کاهش ظرفیت برش دوطرفه شکل منظم تری به خود گرفته و به صورت خطی کاهش پیدا می کند. نکته حائز اهمیت در نمودار فوق، ثابت ماندن مقدار ظرفیت برش دوطرفه با توجه به افزایش مساحت بازشو در دو نمونه SS1 و SS2 است که برخلاف انتظارات قبلی و رفتار برش

۴-۱- بررسی ظرفیت برش دوطرفه

آثار بازشوها مستطیلی در گروه اول و تأثیر بازشوها مربعی در گروه دوم در شرایطی که مساحت متناظر میان دو گروه برابر باشد، مورد بررسی قرار می گیرد. روند تغییر ظرفیت برش دوطرفه در دو گروه ۱ و ۲ در شکل (۱۱) ارائه شده است. در گروه یک مقاومت برش دوطرفه دال پس از ایجاد بازشو، به طور محسوسی کاهش می یابد. به شکلی که در نمونه بدون بازشو، مقدار ظرفیت برش دوطرفه برابر با $230/6$ کیلونیوتن بوده که پس از ایجاد بازشو روی مدل، این مقدار با 16% کاهش به $194/06$ کیلونیوتن رسیده است. اما پس از افزایش مساحت بازشو، مقدار مقاومت برش دوطرفه در نمونه SR2 به $201/24$ کیلونیوتن رسیده که به میزان $3/7\%$ درصد افزایش می یابد. این نامنظمی می تواند ناشی از هندسه

مساحت بازشو ۱۴۴۰۰ میلی‌متر مربع می‌باشد، نسبت به نمونه هم‌نظیر با بازشو مربعی، ۳/۳٪ اختلاف داشته که این مقدار اختلاف در نمونه SR4 با مساحت بازشو ۵۷۶۰۰ میلی‌متر مربع به ۹٪ رسیده است. بنابراین می‌توان گفت با افزایش مساحت بازشو و همچنین افزایش اختلاف ابعاد بازشوه‌های مربعی و مستطیلی به ازای مساحت یکسان، عملکرد برشی دوطرفه مدل نیز متفاوت می‌شود. علاوه بر اختلاف مقاومت برش دوطرفه در دو گروه ۱ و ۲، می‌توان مشاهده کرد که روند کاهش مقاومت در گروه ۲ بسیار منظم‌تر و قابل پیش‌بینی‌تر نسبت به گروه ۱ است.

دوطرفه دال ساده توپر می‌باشد. بیشترین ظرفیت برش دوطرفه در این گروه متعلق به نمونه بدون بازشو S0 است. همچنین کمترین ظرفیت برش دوطرفه با ۲۴٪ کاهش نسبت به نمونه بدون بازشو، برابر است با ۱۷۴/۶۶ کیلونیوتن که متعلق به نمونه SS4 است. به‌طورکلی می‌توان نتیجه گرفت که شکل هندسی بازشو می‌تواند بر ظرفیت برش دوطرفه سقف وافل تأثیرگذار باشد. همچنین با افزایش مساحت بازشو، اختلاف بین ظرفیت برش دوطرفه در دو حالت بازشو مربعی و مستطیلی افزایش می‌یابد. این افزایش به شکلی است که در نمونه با بازشو مستطیلی SR2 که دارای

شکل ۱۱. روند تغییر ظرفیت برش دوطرفه با افزایش مساحت بازشو

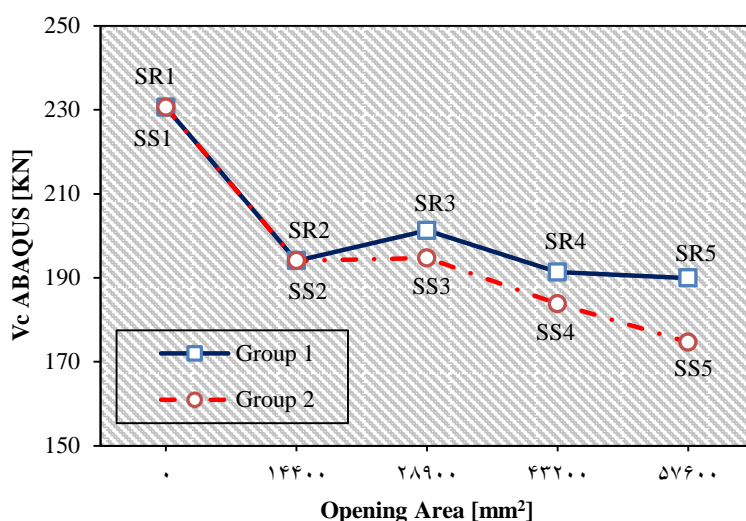


Fig. 11. Variation of punching shear capacities according to the opening area

جابه‌جایی در گروه ۲ از مدل S0 تا SS2 به صورت خطی رو به کاهش بوده، اما پس از آن با شیب قابل‌ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند. مطابق با شکل (۱۲) به خوبی مشاهده می‌شود که در نمونه SS4، جابه‌جایی مرکز دال از نمونه بدون بازشو S0 بیشتر است. با بررسی مدل‌های SS3 و SS4، می‌توان دریافت که پس از عبور بازشو از تیرچه‌های سقف، مقدار تغییر شکل مرکز دال روند افزایشی به خود گرفته و با بزرگ شدن ابعاد بازشو، این مقدار نیز افزایش پیدا می‌کند. بیشترین و کمترین مقدار جابه‌جایی به ترتیب مربوط به نمونه‌های SS4 و SS2 بوده که مقدار آن به ترتیب برابر با ۱۷/۲۵ میلی‌متر و ۱۵/۲۱ میلی‌متر می‌باشد. به عبارت دیگر میزان اختلاف حداکثر جابه‌جایی در این گروه برابر با ۲/۰۴ میلی‌متر است. به‌طورکلی شکل هندسی بازشو تأثیر زیادی در حداکثر تغییر شکل مرکز دال دارد. در گروه ۱، مقدار این تغییر شکل پس از

۲-۴- بررسی تغییر شکل

تغییرات حداکثر جابه‌جایی مرکز دال با افزایش مساحت بازشو در لحظه شکست برشی دوطرفه برای گروه‌های یک و دو در شکل (۱۲) مشخص شده است. در گروه یک روند تغییر در سه نمونه اول به صورت خطی و یکنواخت بوده و در نمونه SR4 این مقدار افزایش می‌یابد. در نمونه SR4، بازشو وارد محدوده یکی از تیرچه‌های دال می‌شود و تیرچه را قطع می‌کند. این امر می‌تواند باعث کاهش سختی شده و تغییر شکل دال را افزایش دهد. بیشترین مقدار جابه‌جایی مربوط به نمونه بدون بازشو S0 است. در این نمونه مقدار جابه‌جایی حداکثر برابر با ۱۶/۲۳ میلی‌متر و کمترین میزان این پارامتر متعلق به نمونه SR2 بوده که مقدار آن برابر با ۱۵/۱۷ میلی‌متر می‌باشد. به عبارت دیگر میزان اختلاف حداکثر جابه‌جایی در این گروه ۱/۰۷ میلی‌متر است. میزان حداکثر

گروه ۱ و ۲ برای نمونه‌های دارای مساحت ۲۸۹۰۰، ۴۳۲۰۰ و ۵۷۶۰۰ میلی‌متر مربع به ترتیب برابر با ۰/۰۴، ۰/۴۶۵ و ۲/۰۸ میلی‌متر است.

کاهش، روندی تقریباً ثابت را در پیش می‌گیرد. اما در گروه ۲ پس از رسیدن مساحت بازشوها به ۲۸۹۰۰ میلی‌متر مربع، حداکثر جابه‌جایی آن‌ها روند افزایشی می‌یابد. اختلاف تغییر شکل بین

شکل ۱۲. روند تغییر جابه‌جایی مرکز دال با افزایش مساحت بازشو

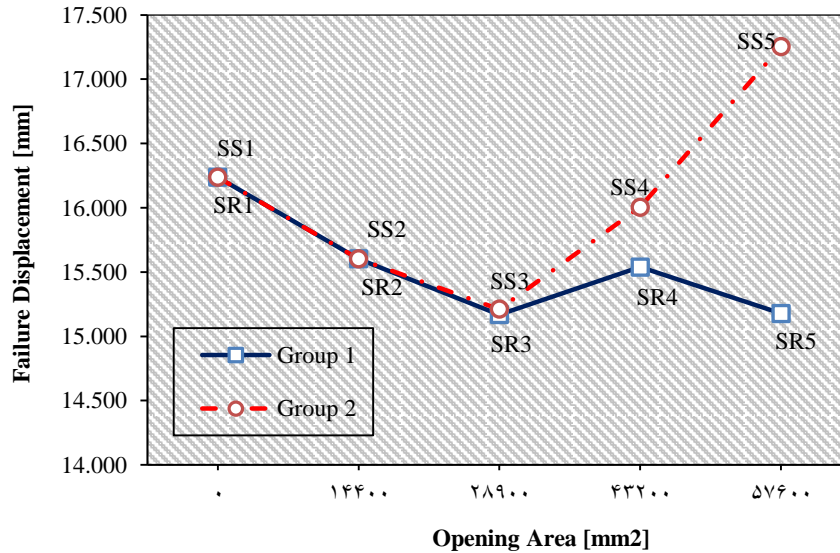


Fig. 12. Variation of slab center displacements according to the opening area

در نظر گرفت. در هر دو گروه، با افزایش مساحت بازشو تشابه میان مقدار آیین‌نامه‌ای و تحلیلی کاهش پیدا می‌کند. اما در گروه ۲ کاهش این تشابه نه تنها بیشتر است بلکه دارای یکنواختی و نظم بیشتری نیز می‌باشد. علاوه بر این می‌توان دریافت که تشابه میان مقدار آیین‌نامه‌ای و تحلیلی ظرفیت برش دوطرفه برای نمونه دارای بازشو مستطیلی بیشتر از نمونه دارای بازشو مربعی است.

۴-۴- بررسی الگوهای ترک خوردگی

الگوهای ترک خوردگی در لحظه شکست برش دوطرفه برای نمونه‌های SR1، SS1، SR4 و SS4 (در شکل ۱۴) نشان داده شده است. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که در تمام نمونه‌ها، ترک خوردگی از نزدیک‌ترین گوشه بازشو به ستون شروع شده و به سمت سایر نقاط دال گسترش می‌یابد. این الگو به الگوهای ترک خوردگی دال‌های ساده بتنی دارای بازشو بسیار شبیه است [13]. با افزایش مساحت بازشو مربع شکل، مساحت ترک خوردگی دال نیز افزایش می‌یابد. علاوه بر این، تمرکز ترک در نقاط گوشه بازشو به ویژه گوشه نزدیک‌تر به ستون افزایش می‌یابد. این در حالی است که در نمونه‌های دارای بازشو مستطیلی با مساحت یکسان، سطح کمتری از سقف در معرض ترک خوردگی قرار

۳-۴- مقایسه نتایج نرم‌افزار و آیین‌نامه

تشابه مقدار آیین‌نامه‌ای با مقادیر تحلیلی ظرفیت برش دوطرفه در شکل (۱۳) قابل مشاهده است. این مقدار در نمونه بدون بازشو، بیش از ۹۰ درصد است. اما با ایجاد بازشو این مقدار کاهش یافته و با افزایش مساحت بازشو تا نمونه SR2، این مقدار همواره در حال کاهش است. از نمونه SR2 تا SR4، مقدار آیین‌نامه‌ای به مقدار تحلیلی نزدیک شده که از دلایل این امر، ثابت ماندن مقدار ظرفیت برش دوطرفه آیین‌نامه‌ای در مقایسه با کاهش مقدار تحلیلی و نیز هندسه غیریکنواخت مقطع سقف وافل می‌باشد. تشابه مقدار آیین‌نامه‌ای و تحلیلی در گروه دو پس از ایجاد بازشو روی مدل روند کاهشی دارد. این روند تا نمونه SS2 ادامه یافته و پس از آن تقریباً ثابت می‌ماند. بیشترین و کمترین تشابه میان مقدار آیین‌نامه‌ای و تحلیلی ظرفیت برش دوطرفه به ترتیب متعلق به نمونه S0 و SS2 با درصدهای تشابه ۹۳ درصد و ۷۴ درصد می‌باشد. لازم به ذکر است که پس از نمونه SS2 مقدار تشابه اندکی افزایش می‌یابد که برای SS3 و SS4 به ترتیب برابر با ۷۵ درصد و ۷۶ درصد بوده و اختلاف آن‌ها نسبت به نمونه SS2 قابل چشم‌پوشی است و می‌توان پس از نمونه SS2 روند را ثابت

شکل ۱۳. تشابه مقدار آیین‌نامه‌ای با مقدار تحلیلی در گروه ۱ و ۲

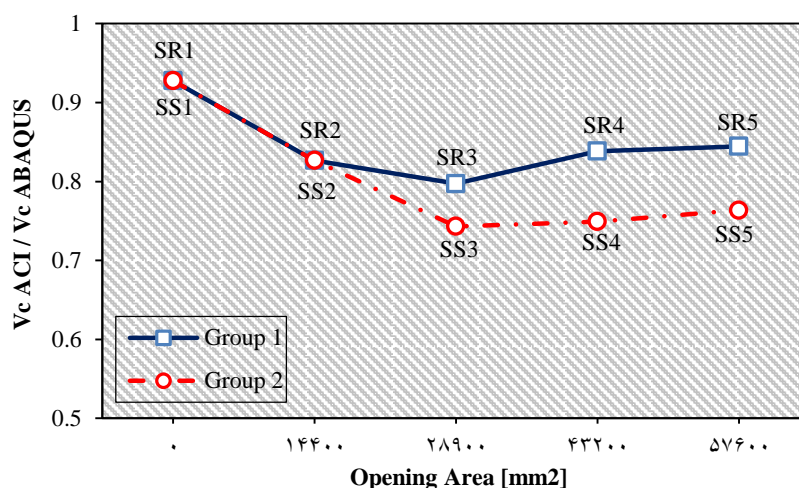


Fig. 13. The similarity of ACI code value with the analytical value in groups 1 and 2

شکل ۱۴. الگوی ترک خوردگی در لحظه شکست برشی دوطرفه برای نمونه‌های: الف) SS4، ب) SS1 و SR1، ج) SR4

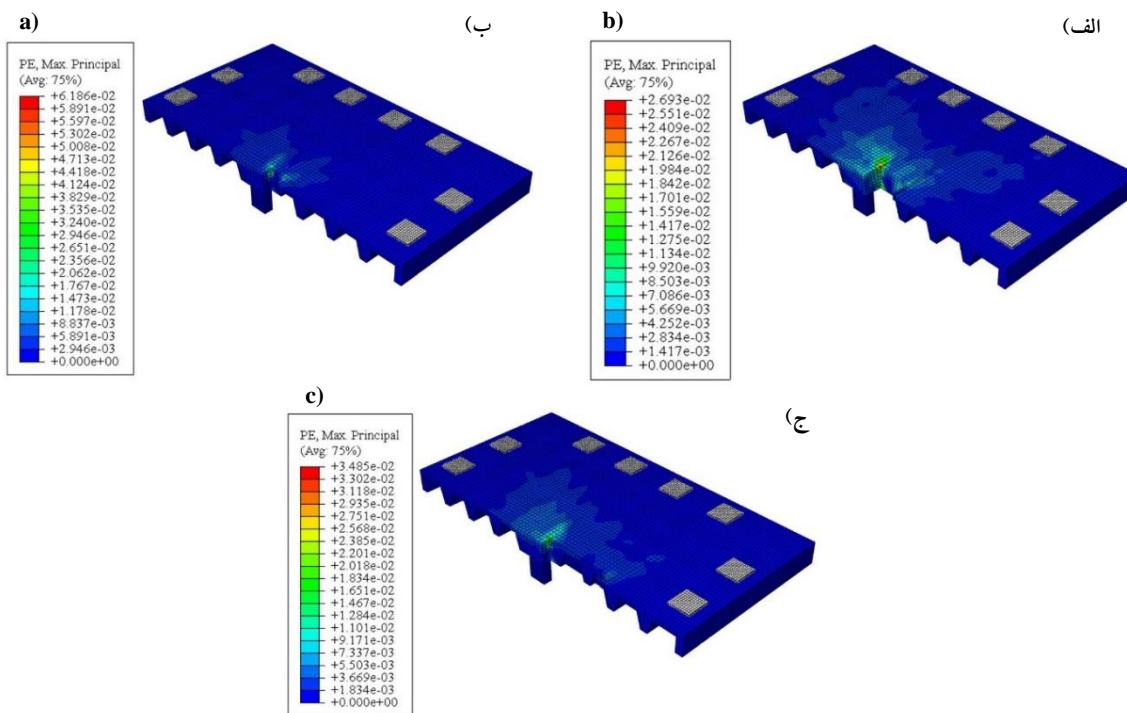


Fig. 14. Cracking pattern at punching failure moment for specimens: a) SS1 and SR1; b) SS4; c) SR4

آن‌ها با آیین‌نامه ACI 318-19، موارد به شرح زیر بیان می‌شود:

۱- در سقف‌های وافل به دلیل غیریکنواخت بودن مقطع سقف، روند تغییرات ظرفیت برش دوطرفه و جابه‌جایی مرکز دال تا حدی نامنظم و غیرقابل پیش‌بینی است.

۲- پس از ایجاد بازشو روی سقف وافل، ظرفیت برش دوطرفه به طور محسوسی کاهش می‌یابد. در صورت استفاده از بازشوی مستطیلی در لبه ستون، به شرط ثابت ماندن اندازه بعد مماسی

گرفته است. همچنین تمرکز ترک در گوشه‌های دال به شدت کاهش یافته به شکلی که در گوشه دورتر از ستون اثری از ترک خوردگی مشاهده نمی‌شود. بنابراین نمونه دارای بازشو مستطیلی عملکرد مناسب‌تری در ترک خوردگی از خود نشان می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

با بررسی رفتار و نتایج سقف‌های وافل دارای بازشو و مقایسه

- algorithm. *Scientia Iranica*, 19(3), pp.410-416.
- [3] Maheri, M.R., 2005. Performance of building roofs in the 2003 Bam, Iran, earthquake. *Earthquake Spectra*, 21(1_suppl), pp.411-424.
- [4] BECK, H. and KÖNIG, G., 1967. Restraining forces (Festhaltekräfte) in the analysis of tall buildings. In *Tall Buildings*, pp. 513-536.
- [5] Al-Bayati, A.F., Lau, T.L. and Clark, L.A., 2023. Edge punching shear of waffle slabs subjected to moment parallel to the slab's free edge. *Magazine of Concrete Research*, 75(2), pp.55-65.
- [6] Sarvari, S. and Esfahani, M.R., 2020, October. An experimental study on post-punching behavior of flat slabs. In *Structures*, 27, pp. 894-902.
- [7] El-Shafiey, T.F., Atta, A.M., Hassan, A. and Elnasharty, M., 2022, October. Effect of opening shape, size and location on the punching shear behaviour of RC flat slabs. In *Structures*, 44, pp. 1138-1151.
- [8] Panahi, S. and Zahrai, S.M., 2021, June. Performance of typical plan concrete buildings under progressive collapse. In *Structures*, 31, pp. 1163-1172.
- [9] Aguiar, A., Oliveira, D., Reis, L. and Nzambi, A., 2021. Punching shear strength of waffle flat slabs with opening adjacent to elongated columns. *Engineering Structures*, 243, p.112641.
- [10] Milligan, G.J., Polak, M.A. and Zurell, C., 2020. Finite element analysis of punching shear behaviour of concrete slabs supported on rectangular columns. *Engineering Structures*, 224, p.111189.
- [11] Vielma, J., Barbat, A.H. and Oller, S., 2009. Seismic performance of waffled-slab floor buildings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 162(3), pp.169-182.
- [12] Balomenos, G.P., Genikomsou, A.S. and Polak, M.A., 2018. Investigation of the effect of openings of interior reinforced concrete flat slabs. *Structural Concrete*, 19(6), pp.1672-1681.
- [13] Genikomsou, A.S. and Polak, M.A., 2017. Effect of openings on punching shear strength of reinforced concrete slabs-finite element investigation. *ACI Structural Journal*, 114(5), p.1249.
- [14] Alrousan, R.Z. and Bara'a, R.A., 2022, October. The influence of concrete compressive strength on the punching shear capacity of reinforced concrete flat slabs under different opening configurations and loading conditions. In *Structures*, 44, pp. 101-119.
- [15] Ibrahim, A., Salim, H. and El-Din, H.S., 2011. Moment coefficients for design of waffle slabs with and without openings. *Engineering structures*, 33(9), pp.2644-2652.
- [16] Ibrahim, A., Salim, H. and El-Din, H.S., 2011. Moment coefficients for design of waffle slabs with and without openings. *Engineering structures*, 33(9), pp.2644-2652.
- بازشو بر لبه ستون، با افزایش مساحت بازشو، ظرفیت برش دوطرفه به آرامی کاهش پیدا می‌کند. این نتیجه حاصل شده انطباق زیادی با نتایج آیین‌نامه‌ای ندارد. در صورت استفاده از بازشوی مربعی، با افزایش مساحت بازشو، روند کاهش ظرفیت برش دوطرفه تقریباً یکنواخت و خطی است. در این شرایط نتایج آیین‌نامه‌ای و تحلیلی حداکثر تا ۲۵٪ اختلاف دارد.
- ۳- هندسه بازشو در تغییر شکل سقف وافل بسیار مؤثر است. بازشوی مربعی با افزایش مساحت، مقدار تغییر شکل سقف را افزایش می‌دهند. این در حالی است که بازشوی مستطیلی با افزایش مساحت، پس از مقدار اندکی کاهش اولیه، تغییر چندانی در تغییر شکل سقف به وجود نمی‌آورند. به طور کلی در صورت استفاده از بازشوی مستطیلی در محل لبه ستون، به شرط ثابت ماندن اندازه بعد مماسی بازشو بر لبه ستون، با افزایش مساحت بازشو، جابه‌جایی مرکز دال روندی کاهشی دارد.
- ۴- روابط آیین‌نامه ACI 318-19 برای محاسبه ظرفیت برش دوطرفه در صورت عدم وجود بازشو تشابه بیشتری با مقادیر تحلیلی دارند. همچنین کمترین تشابه میان مقدار آیین‌نامه‌ای و تحلیلی ظرفیت برش دوطرفه در سقف‌های وافل دارای بازشو مستطیلی حدوداً به ۸۰ درصد می‌رسد.
- ۵- کاهش ظرفیت برش دوطرفه ناشی از بازشوی مربعی نسبت به بازشوی مستطیلی هم مساحت با آن‌ها بیشتر بوده که این میزان کاهش با روابط ارائه‌شده در ACI 318-19 همخوانی دارد. همچنین با افزایش مساحت بازشو، اختلاف ظرفیت برش دوطرفه بین گروه ۱ و ۲ زیادتر می‌شود.
- ۶- الگوی ترک‌خوردگی در سقف‌های وافل دارای بازشو، به الگوی موجود در دال‌های بتنی ساده بسیار نزدیک می‌باشد. استفاده از بازشوی مستطیلی، می‌تواند الگوی ترک‌خوردگی سقف‌های وافل را بهبود بخشد.

۶- مراجع

- [1] Annan, C.D., Youssef, M.A. and El Naggar, M.H., 2009. Seismic vulnerability assessment of modular steel buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, 13(8), pp.1065-1088.
- [2] Kaveh, A. and Behnam, A.F., 2012. Cost optimization of a composite floor system, one-way waffle slab, and concrete slab formwork using a charged system search

- [22] Comité Euro-International du Béton. 1990. CEB-FIB-model Code 1990. *Design code*. pp.2644-2652.
- [23] Franus, A., Jemioło, S. and Antoni, M., 2020. A slightly compressible hyperelastic material model implementation in ABAQUS. *Engineering Solid Mechanics*, 8(4), pp.365-380.
- [24] Malm, R., 2009. *Predicting shear type crack initiation and growth in concrete with non-linear finite element method* (Doctoral dissertation, KTH).
- [25] Jankowiak, I., Kakol, W. and Madaj, A., 2005. Identification of a continuous composite beam numerical model, based on experimental tests. In *7th conference on composite structures, Zielona Góra*, pp. 163-178.
- [26] Oliveira, D.R.C., Regan, P.E. and Melo, G.S.S.A., 2004. Punching resistance of RC slabs with rectangular columns. *Magazine of Concrete Research*, 56(3), pp.123-138.
- [17] ACI Committee, 3., 2008. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary. American Concrete Institute.
- [18] Hognestad, E., Hanson, N.W. and McHenry, D., 1955, December. Concrete stress distribution in ultimate strength design. In *Journal Proceedings*, 52(12), pp. 455-480.
- [19] Genikomsou, A.S. and Polak, M.A., 2015. Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS. *Engineering structures*, 98, pp.38-48.
- [20] Lubliner J, Oliver J, Oller S, Oñate E. A plastic-damage model for concrete. *International Journal of Solids and Structures*. 1989;25(3):299-326.
- [21] Lee, J. and Fenves, G.L., 1998. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. *Journal of engineering mechanics*, 124(8), pp.892-900.

Evaluation of the effect of the size and shape of the opening on the punching shear capacity of the waffle panel

Adib Yeganeh¹, Behzad Eftekhari^{2*}

1. Master student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Zand Institute of Higher Education, Shiraz.
2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University of Larestan branch.

* Corresponding Author Email: behzad.eftekhari@iau.ac.ir

Received: 2024/01/08- Accepted: 2024/12/01

Abstract

An essential and decisive factor in the performance and design of various structures is their weight. One of the available solutions to reduce the weight of structures is using waffle panels. This slab consists of a grid of ribs regularly distributed in orthogonal directions and a thin concrete slab placed on the ribs. Using a flat waffle slab can put the roof under severe punching shear force. Also, placing the opening near the column can reduce the punching shear capacity of the slab. By reviewing the articles used in the codes, such as ACI 318-19 and also other valid articles about the punching shear capacity, it can be seen that most of the research done on this issue was done for simple concrete slabs and from such results the behavior of waffle panels are predicted. Past research has shown that the numerical methods of calculating the forces applied to concrete with the finite element method are very close to the results obtained from laboratory experiments. For this reason, in this research, to investigate the behavior of waffle panels against punching shear, nine samples of waffle panels have been modeled in ABAQUS software and analyzed using the finite element method. In both groups, for a fixed distance from the edge of the column to the opening, four different sizes of the opening on the slab were considered, and the changes made in the punching shear capacity and the ductility of the slab were calculated. The difference between the first and second group of slabs is in the opening geometry and how to increase their area. In the first group, only one dimension of the opening is increased, and the geometrical shape of the opening is rectangular. Considering the opening to this form, the b_0 value introduced in the ACI Code remains constant. In this case, the punching shear capacity obtained from the equations of the code does not change. In the second group, the shape of the openings is square, but the area of the openings is equal to the first group.

A two-dimensional 2-node truss T3D2 finite element is used for the steel, and a three-dimensional 8-node hexahedral C3D8 finite element is used for the concrete. Also, to simulate the concrete compressive behavior, the Hognestad model is used in this research. The model results have been validated with the laboratory sample, and to provide a complete understanding of this issue, the modeling results have been compared with those obtained from the ACI 318-19 code. The punching capacity is noticeably reduced after placing an opening on the waffle slab. In case of using a rectangular opening at the edge of the column, the punching shear capacity decreases slowly with the increase of the opening area. This result is contrary to the assumption of the code. By using a square opening, with the increase of the area of the opening, the process of decreasing the punching shear capacity is almost uniform and linear. ACI code relations can have up to 25% error in this situation. These relations are more accurate for calculating the punching shear capacity in waffle panels with rectangular openings and slabs without openings. The reduction of punching shear capacity due to square openings is more than rectangular openings of the same area. This result is consistent with the relationships presented in ACI 318-19. Also, with the increase of the opening area, the difference in this value between groups 1 and 2 increases.

Keywords: Waffle panels, Optimization of opening dimensions and geometry, Punching shear, Cracking pattern.