

تأثیر استفاده از بتن پرمقاومت در روابط طراحی مقاومت برش سوراخ‌کننده‌ی صفحات تخت بتن آرمه

مروارید حاجیان

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی سازه دانشگاه تهران
hajian.m@ut.ac.ir

سید علیرضا فاطمی

دانشجوی مقطع دکتری مهندسی ژئوتکنیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر
a.fatemi@aut.ac.ir

ایرج محمودزاده‌کنی

استاد دانشکده عمران دانشگاه تهران
imkani@ut.ac.ir

دریافت مقاله: ۱۳۹۶-۳-۳

پذیرش مقاله: ۱۳۹۷-۱-۲۸

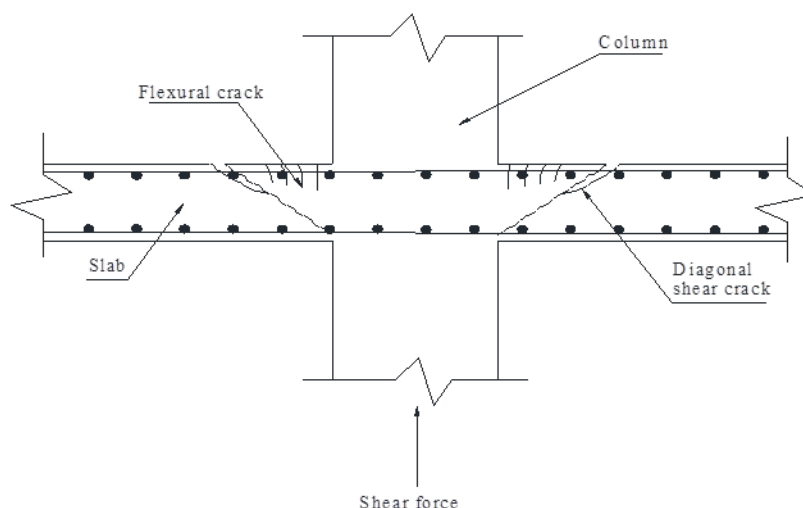
چکیده

بتن پرمقاومت به علت خصوصیات بهبودیافته‌ی خود به طور گسترده‌ای در چند دهه‌ی اخیر مورد استفاده قرار گرفته است. از بتن پرمقاومت در صفحات تخت نیز استفاده می‌شود. صفحات تخت به علت عمق محدودشان مستعد شکست تحت برش سوراخ‌کننده هستند. اکثر آیین‌نامه‌های طراحی بتن، برپایه‌ی آزمایشات روی نمونه‌های ساخته‌شده با بتن معمولی تدوین شده‌اند. حال آن‌که بتن پرمقاومت در مقایسه با بتن معمولی مکانیزم‌های گسیختگی متفاوتی دارد. ازین رو ضروری است تا روابط آیین‌نامه‌ها در خصوص بتن پرمقاومت ارزیابی شوند. هدف این مقاله بررسی اثرات استفاده از بتن پرمقاومت در روابط طراحی و یافتن مناسب‌ترین رابطه برای تخمین مقاومت برش سوراخ‌کننده‌ی صفحات تخت با ستون داخلی می‌باشد. روابط طراحی مورد استفاده در این پژوهش شامل روابط آیین‌نامه‌های طراحی ACI 318، Eurocode2، BS 8110، DIN 1045 و شش رابطه‌ی پیشنهادی توسط محققین برای بتن پرمقاومت می‌باشند. برای بررسی صحت روابط طراحی، از ۵۰ نتیجه‌ی آزمایشگاهی برگرفته از ادبیات فنی روی نمونه‌های دال ساخته‌شده با بتن پرمقاومت استفاده شده است و بهترین رابطه برای تخمین ظرفیت برش سوراخ‌کننده پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بتن پرمقاومت، مقاومت برشی سوراخ‌کننده، صفحات تخت، محل تقاطع دال و ستون داخلی

صفحات تخت دال‌های دوطرفه‌ای با ضخامت یکسان هستند که مستقیماً روی ستون‌ها بدون وجود تیر، سرستون یا کتیبه‌ی ستون قرار دارند. اتصالات دال و ستون به علت تمرکز بالای تنش‌های برشی و لنگرهای خمشی، بحرانی‌ترین بخش دال به حساب می‌آیند. مقاومت نهایی صفحات تخت غالباً توسط بار شکست برش سوراخ‌کننده تعیین می‌شود که به طور قابل ملاحظه‌ای کم‌تر از بار شکست خمشی می‌باشد [۹-۱].

برش سوراخ‌کننده یا برش دوطرفه شامل سطح شکست هرمی شکل یا مخروط ناقص مطابق با شکل ۱ است. زاویه‌ی سطح شکست برای بتن پرمقاومت بین ۳۲ و ۳۸ درجه تغییر می‌کند. لنگرهای حداکثر در صفحات تخت با بارگذاری یکنواخت اطراف ستون‌ها رخ می‌دهند و منجر به ترک دایروی اطراف آن‌ها می‌شوند. با افزایش بارگذاری، ترک‌ها به شکل یک خط تسلیم پروانه‌ای شکل ظاهر می‌شوند و تقریباً در همان زمان ترک‌های برشی یا مایل روی سطح شکست ایجاد می‌شوند. این نوع شکست بسیار خطرناک است و باید از آن جلوگیری شود، زیرا می‌تواند منجر به واژگونی ناگهانی، ترد و پیش‌رونده‌ی سقف ساختمان‌ها شود [۱، ۶، ۹ و ۱۰].



شکل ۱: نمای شماتیک از گسیختگی برش سوراخ‌کننده [۱]

استفاده از بتن پرمقاومت در دال‌های تخت ظرفیت برش پانچ (سوراخ‌کننده) را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد و اجازه می‌دهد نیروهای بالاتری از طریق اتصال دال - ستون منتقل شوند. ولی شکست دال بتن پرمقاومت در مقایسه با دال‌های با بتن معمولی تردتر می‌باشد. بتن پرمقاومت دارای مقاومت‌های بالاتر از ۵۰ MPa می‌باشد [۳، ۵، ۹، ۱۲ و ۱۳]. بدین ترتیب استفاده از روابط طراحی آیین‌نامه‌ها که براساس مطالعات آزمایشگاهی روی بتن معمولی به دست آمده‌اند، موجب طراحی‌های غیرایمن برای اعضای ساخته‌شده با بتن پرمقاومت می‌شوند [۱۴-۱۷]. ازین رو ضروری است که قابلیت اطمینان روندهای طراحی اخیر برای استفاده در دال‌های ساخته‌شده با بتن پرمقاومت ارزیابی شوند. علی‌رغم استفاده‌ی بسیار از بتن پرمقاومت، مطالعات کمی روی مقاومت برش سوراخ‌کننده‌ی دال‌ها صورت گرفته است. در این پژوهش مقاومت برش پانچ در محل اتصال دال با ستون داخلی بررسی می‌شود و هم‌چنین انتقال لنگر از دال به ستون ناچیز فرض می‌شود [۴، ۷، ۸، ۱۰، ۱۱، ۱۸-۲۵]. در ادامه توضیح مختصری از مطالعات پژوهشی آورده شده‌اند.

هالگرِن و کینونِن^۱ ۱۰ دال دایروی با بتن پرمقاومت را آزمایش کردند. مقاومت‌های فشاری نمونه‌های بتنی بین ۸۵ MPa و ۲۵۰ MPa بودند. دال‌ها دارای آرماتورهای خمشی اصلی دوطرفه با درصد فولاد بین ۱٫۲٪ و ۳٪ بودند. قطر ستون‌ها برابر ۲۵۰

^۱ Hallgren and Kinnunen

میلی‌متر، ضخامت دال‌ها برابر ۲۴۰ میلی‌متر و عمق مؤثر آن‌ها برابر ۲۰۰ میلی‌متر بودند. در این پژوهش تنها از دال‌های بدون آرماتور برشی استفاده شده است [۱۹].

رامدین^۱ نه دال دایروی با ضخامت ۱۲۵ میلی‌متر و عمق مؤثر ۹۸ و ۱۰۰ میلی‌متر را آزمایش کرده است. این دال‌ها از بتن پرمقاومت با مقاومت فشاری بین ۵۶ MPa و ۱۰۲ MPa ساخته شده‌اند. درصد آرماتورها از ۰٫۶٪ تا ۱٫۳٪ متغیر است. بارگذاری پانچ توسط یک جک هیدرولیکی ۵۵۰ kN از طریق یک دیسک فولادی به قطر ۱۵۰ mm در وسط دال اعمال شده است [۸].

مردوک و حسین^۲ ۱۵ دال مربعی با مقاومت فشاری بین ۶۵ MPa تا ۸۰ MPa را آزمایش کرده‌اند. این نمونه‌های دارای ستون‌های مربعی شکل در وسط دال‌ها به عرض ۱۵۰ mm بودند. ضخامت دال‌ها برابر ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ میلی‌متر و درصد آرماتورها بین ۰٫۴۹٪ و ۲٫۳۷٪ متغیر بودند [۱۰].

توماسزویچ^۳ ۱۳ دال تخت مربعی با ضخامت‌های مختلف ۱۲۰، ۲۴۰ و ۳۲۰ میلی‌متر را بررسی کرد. ستون‌های مربعی دارای دو عرض متفاوت ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌متر بودند. درصد آرماتورها بین ۱٫۴۹٪ و ۲٫۶۲٪ متغیر بودند [۲۱].

پارامترهای مختلفی روی ظرفیت برشی صفحات تخت اثر دارند، همانند مقاومت فشاری بتن، نسبت عمق مؤثر به محیط بحرانی (d/b_o) ، نسبت مقاومت برشی به مقاومت خمشی، شکل و اندازه‌ی ستون و درصد آرماتور خمشی [۱]. محققین بسیاری روابط جدیدی برای تخمین مقاومت برش سوراخ‌کننده‌ی صفحات تخت ساخته‌شده با بتن پرمقاومت ارائه داده‌اند [۱، ۴، ۲۴-۲۷]. در بخش‌های آتی روابط موجود بیان می‌شوند و با نتایج تجربی مقایسه می‌گردند.

۲- روابط آیین‌نامه‌ای و محققین

در این مقاله تعدادی روابط مطابق با آیین‌نامه‌ی ACI 318 [۱۴]، BS 8110 [۱۵]، Eurocode2 [۱۶]، DIN 1045 [۱۷] و روابط پیشنهادی محققین شامل الساناددی^۴ [۱]، رانکین اصلاح‌شده^۵ [۲۴]، شریف و دیلگر^۶ [۲۵]، گاردنر و شائو^۷ [۲۶]، ال-گامال و بنموکرین^۸ [۲۷] و تئودوراکاپولس و سوامی^۹ [۴] مورد بررسی قرار می‌گیرند.

ضوابط آیین‌نامه‌ی ACI 318 برای برش سوراخ‌کننده روی بتن با مقاومت زیر ۴۱ MPa به دست آمده‌اند. مقاومت برش سوراخ‌کننده‌ی اسمی صفحات تخت بدون آرماتور عرضی توسط ACI 318 کوچک‌ترین مقدار روابط ۱ تا ۳ می‌باشد [۱۴].

$$V_c = \frac{1}{3} \sqrt{f'_c} b_o d \quad (1) \text{ (رابطه‌ی (a) 22.6.5.2 آیین‌نامه‌ی ACI 318-14)}$$

$$V_c = 0.17(1 + 2/\beta_c) \sqrt{f'_c} b_o d \quad (2) \text{ (رابطه‌ی (b) 22.6.5.2 آیین‌نامه‌ی ACI 318-14)}$$

$$V_c = 0.183(2 + \alpha_s d/b_o) \sqrt{f'_c} b_o d \quad (3) \text{ (رابطه‌ی (c) 22.6.5.2 آیین‌نامه‌ی ACI 318-14)}$$

که f'_c مقاومت مشخصه‌ی استوانه‌ای بتن برحسب MPa، d عمق مؤثر متوسط آرماتور خمشی لایه‌ی بالایی برحسب میلی‌متر، β_c نسبت ضلع بزرگ به ضلع کوچک سطح تکیه‌گاهی یا سطح اثر بار متمرکز، α_s برابر ۴۰ برای ستون‌های داخلی، برابر ۳۰ برای ستون‌های لبه‌ای و برابر ۲۰ برای ستون‌های گوشه‌ای است و b_o محیط بحرانی است که در فاصله‌ی $0.5d$ از وجه ستون محاسبه می‌شود. در این تحقیق ستون‌های داخلی بررسی

¹ Ramdane

² Marzouk and Hussein

³ Tomaszewicz

⁴ Elsanadedy

⁵ Modified Rankin

⁶ Sherif and Dilger

⁷ Gardner and Shao

⁸ El-Gamal and Benmokrane

⁹ Theodorakopoulos and Swamy

شده‌اند، بنابراین برای ستون‌های مربعی داخلی $b_o = \xi(c+d)$ و برای ستون‌های دایروی داخلی $b_o = \pi(c+d)$ که c بعد و یا قطر ستون است [۱۴].

برای ستون‌های مربعی مقاومت برشی دوطرفه بتن در دال‌های در معرض با خمش دو طرفه به مقدار رابطه‌ی ۱ محدود می‌شوند. این رابطه برای شرایطی به کار می‌رود که β_c کمتر از ۲، یا در مورد ستون داخلی نسبت b_o/d کمتر از ۲۰ باشد. برای ستون‌های خیلی بزرگ یا ستون‌های مستطیلی با دو لبه بزرگ، تنش برشی مابین گوشه‌ها کاهش می‌یابد که مقدار آن به میزان برش یک طرفه در طراحی نزدیک می‌شود و استفاده از رابطه‌ی ۱ غیرمحافظة کارانه می‌شود. بنابراین در ستون‌های بزرگ (معمولاً مستطیلی) که β_c بزرگتر از ۲ دارد، از رابطه‌ی ۲ استفاده می‌شود. معادله‌ی ۳ برای ستون‌های خیلی بزرگ با نسبت محیط به عمق مؤثر b_o/d بزرگتر از ۲۰ به کار می‌رود. مقاومت برش سوراخ‌کننده‌ی اسمی آیین‌نامه‌ی BS 8110 برای $f_{cu} = 25 \text{ MPa}$ طبق رابطه‌ی ۴ به دست می‌آید [۱۵].

$$V_c = 0.79 \left(\frac{\xi \cdot 0.0}{d} \right)^{\frac{1}{3}} (1.0 \cdot \rho_m)^{\frac{1}{3}} b_o d \quad (4) \quad \text{(جدول ۳,۸ آیین‌نامه‌ی BS 8110-97)}$$

در این رابطه محیط بحرانی b_o در فاصله‌ی $1/5d$ از وجه ستون محاسبه می‌شود. بدین ترتیب برای ستون‌های داخلی مربعی و دایروی برابر $\xi(c+3d)$ می‌باشد که c بعد و یا قطر ستون می‌باشد. ρ_m متوسط درصد فولاد در محدوده‌ی $1/5d$ از وجه ستون می‌باشد و برابر $0.5(\rho_x + \rho_y)$ است که ρ_x درصد آرماتور در امتداد محور x و ρ_y درصد آرماتور در امتداد محور y هستند. برای $f_{cu} > 25 \text{ MPa}$ رابطه‌ی ۴ باید در ترم $\left(\sqrt[3]{f_{cu}/25} \right)$ ضرب شود که f_{cu} مقاومت فشاری مکعبی بتن است. مقدار $\sqrt[3]{\xi \cdot 0.0/d}$ نیز نباید از یک کم‌تر باشد [۱۵]. استاندارد اروپا Eurocode 2 رابطه‌ی ۵ را برای تخمین ظرفیت برش سوراخ‌کننده‌ی صفحات تخت با ستون داخلی پیشنهاد داده است [۱۶].

$$V_c = 0.18 \xi (1.0 \cdot \rho_m f'_c)^{\frac{1}{3}} b_o d \quad (5) \quad \text{(رابطه‌ی ۶,۴۷ آیین‌نامه‌ی Eurocode 2-2004)}$$

محیط بحرانی b_o در فاصله‌ی $2d$ از وجه ستون تعریف می‌شود. برای ستون‌های مربعی برابر $b_o = \xi(c+\pi d)$ و برای ستون‌های دایروی برابر $b_o = \pi(c+\xi d)$ می‌باشد. ξ ضریب تأثیر سایز است که طبق رابطه‌ی ۶ دست می‌آید و باید از مقدار دو کم‌تر باشد.

$$\xi = 1 + \sqrt{\frac{2.0}{d}} \leq 2 \quad (6)$$

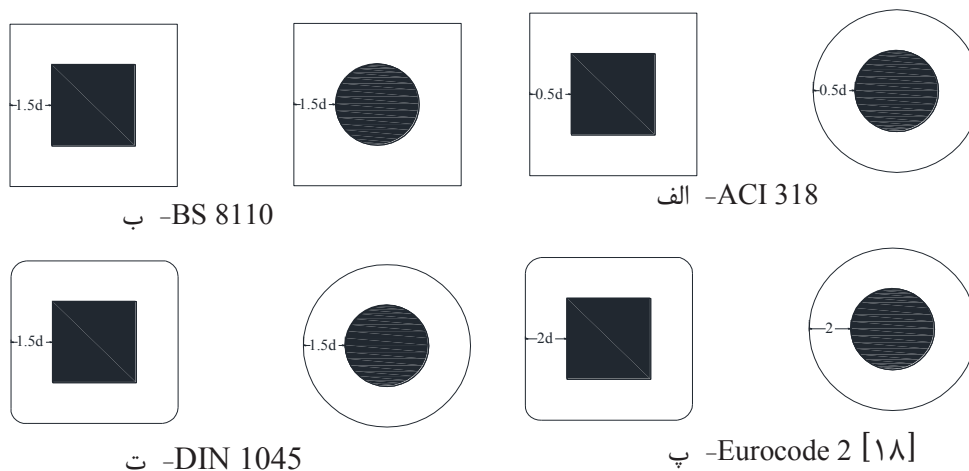
ρ_m درصد آرماتور متوسط است و برابر $\sqrt{\rho_x \rho_y}$ می‌باشد که ρ_x درصد آرماتور در امتداد محور x و ρ_y درصد آرماتور در امتداد محور y می‌باشد [۱۶]. آیین‌نامه‌ی DIN 1045 رابطه‌ی ۷ را برای تخمین مقاومت برشی پنچ اسمی دال‌های تخت با ستون‌های داخلی پیشنهاد داده است [۱۷].

$$V_c = 0.21 \xi (1.0 \cdot \rho_m f'_c)^{\frac{1}{3}} b_o d \quad (7) \quad \text{(رابطه‌ی ۱۰۵ آیین‌نامه‌ی DIN 1045-2001)}$$

محیط بحرانی b_o در فاصله $1/5d$ از وجه ستون تعریف می‌شود. برای ستون‌های مربعی برابر $b_o = \xi c + 3\pi d$ و برای ستون‌های دایروی برابر $b_o = \pi(c + 3d)$ می‌باشد. ضریب تأثیر سایز ξ نیز طبق رابطه‌ی ۶ به دست می‌آید. ρ_m درصد فولاد متوسط از رابطه‌ی ۸ به دست می‌آید:

$$\rho_m = 0.05(\rho_x + \rho_y) < 0.08 f_{cd} / f_y < 0.02 \quad (8)$$

که f_y مقاومت تسلیم فولاد خمشی برحسب MPa است و $f_{cd} = 0.85 f'_c$ [۱۷]. محیط بحرانی آیین‌نامه‌های فوق در شکل ۲ آورده شده‌اند.



شکل ۲: محیط بحرانی مقاطع دایروی و بحرانی در آیین‌نامه‌های طراحی

در ادامه روابط پیشنهادی محققین برای مقاومت برش سوراخ‌کننده‌ی اتصالات دال - ستون داخلی در حالت استفاده از بتن پرمقاومت آورده شده‌اند. الساناددی رابطه‌ی ۹ را برای مقاومت برش سوراخ‌کننده‌ی دال با بتن پرمقاومت ارائه داده است [۱]:

$$V_c = 0.1 \sqrt{f'_c} \sqrt{\rho_m f_y} \left(1 + \frac{1.25d}{b_o}\right) \sqrt{\left(1 + \frac{1.25d}{d}\right)} \times b_o d \quad (9)$$

سایر روابط پیشنهادی توسط محققین برای صفحات تخت با بتن پرمقاومت به صورت زیر هستند.

$$V_c = 0.178 \sqrt{f'_c} \sqrt{100 \rho_m} \times b_o d \quad (10) \text{ رانکین اصلاح شده [۲۴]}$$

$$V_c = 0.17 \sqrt{f'_c} \sqrt{100 \rho_m} \times b_o d \quad (11) \text{ شریف و دیلگر [۲۵]}$$

$$V_c = 0.179 \sqrt{f'_c} \sqrt{\rho_m f_y} \sqrt{1 + \frac{200}{d}} \sqrt{\frac{d}{b_o}} \times b_o d \quad (12) \text{ گاردنر و شائو [۲۶]}$$

$$V_c = 0.133 \sqrt{f'_c} \left[0.05 \sqrt{\rho_m E} \left(1 + \frac{1.25d}{b_o}\right) \right] \times b_o d \quad (13) \text{ ال-گامال و بنموکیرین [۲۷]}$$

مقدار ρ_m در روابط قبل معادل با $0.05(\rho_x + \rho_y)$ است، E مدول الاستیسیته‌ی آرماتور فولادی است و محیط بحرانی b_o مشابه با ضوابط آیین‌نامه‌ی ACI است [۱، ۲۴-۲۷].

رابطه‌ی ۱۴ توسط تیئودورا کاپولوس و سوامی برای ظرفیت برش سوراخ‌کننده‌ی صفحه‌ی تخت پیشنهاد شده است [۴].

$$V_c = f_t X b_o \cot \theta \quad (14)$$

در این رابطه θ زاویه‌ی سطح شکست ترک برشی در سطح اتصال دال - ستون است که برای بتن پرمقاومت حدود ۳۰ تا ۴۰ درجه است. f_t مقاومت کششی بتن مطابق با رابطه‌ی ۱۵ است که تابعی از مقاومت فشاری مکعبی بتن f_{cu} می‌باشد. محیط بحرانی b_o در فاصله‌ی $1,5d$ از وجه ستون حساب می‌شود. b_o برای ستون‌های مربعی و دایروی برابر $\frac{1}{4}(c+3d)$ می‌باشد که در آن c بعد یا قطر ستون و d عمق مؤثر متوسط دال می‌باشند [۴].

$$f_t = 0,27 f_{cu}^{\frac{2}{3}} \quad (15)$$

$$f_{cu} = \frac{f_c'}{0,18} \quad (16)$$

X عمق تار خنثی متوسط منطقه‌ی فشاری است که توسط خطوط ترک خمشی و برشی به دست می‌آید. رابطه‌ی ۱۷ مقدار X را مشخص می‌کند.

$$X = \frac{2X_s X_f}{X_s + X_f} \quad (17)$$

که X_s عمق تار خنثی مقطع بحرانی برش و X_f عمق تار خنثی بلوک تنش مقطع بحرانی خمش هستند و طبق روابط ۱۸ و ۱۹ تعریف می‌شوند.

$$X_f = \frac{\rho f_s - \rho' f_s'}{k_1 f_{cu}} d \quad (18)$$

$$X_s = 0,25d \quad (19)$$

X_f براساس روند معمول طراحی خمشی به دست می‌آید. f_s و f_s' تنش‌های فولاد در ناحیه‌ی کششی و فشاری هستند. ρ درصد فولاد کششی و ρ' درصد فولاد فشاری می‌باشند و سایر پارامترها به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$k_1 = 0,67 \frac{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_o}{\varepsilon_{cu}} \quad (20)$$

$$\varepsilon_o = \frac{\sqrt{f_{cu}}}{4115} \quad (21)$$

در این روابط ε_{cu} کرنش نهایی بتن و ε_o کرنش بتن در تار انتهایی بلوک تنش مستطیلی بتن هستند. اگر درصد آرماتورهای کششی در جهت‌های x و y در دال متفاوت باشد، (ρ_x, ρ_y) مقدار X توسط رابطه‌ی ۲۲ محاسبه می‌شود.

$$\frac{1}{X} = \frac{1}{2X_s} + \frac{1}{X_{fx} + X_{fy}} \quad (22)$$

که در این رابطه X_{fx} و X_{fy} به ترتیب مرتبط به عمق تار خنثی خمشی در جهت‌های x و y می‌باشند.

۳- بررسی پژوهش‌های آزمایشگاهی معتبر

در این مطالعه ۵۰ نتیجه‌ی آزمایشگاهی توسط مَرذوک و حسین^۱ [۱۰]، توماسزویچ^۲ [۲۱]، هالگرن و کینونن^۳ [۱۹]، رامدین^۴ [۸]، قانونم^۵ [۷]، گاردنیر^۱ [۱۱]، مَرذوک و جانگ^۲ [۲۳] و همکاران^۳ [۲۲] مورد استفاده

¹ Marzouk and Hussein

² Tomaszewicz

³ Hallgren and Kinnunen

⁴ Ramdane

⁵ Ghannoum

قرار گرفته‌اند. نمونه‌های دال بدون آرماتور برشی بودند، بدین ترتیب بار برش سوراخ‌کننده تنها توسط بتن تحمل شده است. این نمونه‌ها در معرض بارگذاری محوری در مرکز قرار داشتند. در این مطالعه تنها دال‌هایی که با بتن پرمقاومت ساخته شدند و تحت برش سوراخ‌کننده دچار شکست شدند، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. جدول ۱ جزئیات این نمونه‌های آزمایش شامل مقاومت فشاری بتن (f'_c)، عمق دال (h)، عمق مؤثر دال (d)، مقاومت تسلیم فولاد (f_y)، درصد فولاد خمشی (ρ)، ابعاد ستون (c) و ظرفیت نهایی دال (V_{test}) را نشان می‌دهد. مقاومت فشاری مورد استفاده در این مطالعه بین ۵۴-۱۲۰ MPa هستند که مربوط به اعضای ساخته شده با بتن پرمقاومت می‌باشند.

جدول ۱: جزئیات نمونه‌های آزمایش شده صفحات تخت معادل

V_{test} (kN)	d (mm)	ρ' (%)	ρ (%)	c (mm)	h (mm)	f_{yl} (MPa)	f'_c (MPa)	ستون داخلی	نمونه‌ها
[۱۰] Marzouk and Hussein									
۱۷۸	۹۵	۰,۴۲	۰,۴۹	۱۵۰	۱۲۰	۴۹۰	۶۷,۰۰	مربعی	HS1
۲۴۹	۹۵	۰,۴۲	۰,۸۴	۱۵۰	۱۲۰	۴۹۰	۷۰,۲۰	مربعی	HS2
۳۵۶	۹۵	۰,۴۲	۱,۴۷	۱۵۰	۱۲۰	۴۹۰	۶۹,۱۰	مربعی	HS3
۴۱۸	۹۰	۰,۴۴	۲,۳۷	۱۵۰	۱۲۰	۴۹۰	۶۵,۸۰	مربعی	HS4
۳۶۵	۱۲۵	۰,۳۲	۰,۶۴	۱۵۰	۱۵۰	۴۹۰	۶۸,۱۰	مربعی	HS5
۴۸۹	۱۲۰	۰,۳۳	۰,۹۴	۱۵۰	۱۵۰	۴۹۰	۷۰,۰۰	مربعی	HS6
۳۵۶	۹۵	۰,۴۲	۱,۱۹	۱۵۰	۱۲۰	۴۹۰	۷۳,۸۰	مربعی	HS7
۴۳۶	۱۲۰	۰,۳۳	۱,۱۱	۱۵۰	۱۵۰	۴۹۰	۶۹,۰۰	مربعی	HS8
۵۴۳	۱۲۰	۰,۳۳	۱,۶۱	۱۵۰	۱۵۰	۴۹۰	۷۴,۰۰	مربعی	HS9
۶۴۵	۱۲۰	۰,۳۳	۲,۳۳	۱۵۰	۱۵۰	۴۹۰	۸۰,۰۰	مربعی	HS10
۱۹۶	۷۰	۰,۵۷	۰,۹۵	۱۵۰	۹۰	۴۹۰	۷۰,۰۰	مربعی	HS11
۲۵۸	۷۰	۰,۵۷	۱,۵۲	۱۵۰	۹۰	۴۹۰	۷۵,۰۰	مربعی	HS12
۲۶۷	۷۰	۰,۵۷	۲,۰۰	۱۵۰	۹۰	۴۹۰	۶۸,۰۰	مربعی	HS13
۴۹۸	۹۵	۰,۴۲	۱,۴۷	۲۲۰	۱۲۰	۴۹۰	۷۲,۰۰	مربعی	HS14
۵۶۰	۹۵	۰,۴۲	۱,۴۷	۳۰۰	۱۲۰	۴۹۰	۷۱,۰۰	مربعی	HS15
[۲۱] Tomaszewicz									
۲۰۵۰	۲۷۵	۰,۰۰	۱,۴۹	۲۰۰	۳۲۰	۵۰۰	۶۴,۳۰	مربعی	ND65-1-1
۱۲۰۰	۲۰۰	۰,۰۰	۱,۷۵	۱۵۰	۲۴۰	۵۰۰	۷۰,۲۰	مربعی	ND65-2-1
۲۲۵۰	۲۷۵	۰,۰۰	۱,۴۹	۲۰۰	۳۲۰	۵۰۰	۸۳,۷۰	مربعی	ND95-1-1
۲۴۰۰	۲۷۵	۰,۰۰	۲,۵۵	۲۰۰	۳۲۰	۵۰۰	۸۹,۹۰	مربعی	ND95-1-3
۱۱۰۰	۲۰۰	۰,۰۰	۱,۷۵	۱۵۰	۲۴۰	۵۰۰	۸۸,۲۰	مربعی	ND95-2-1
۱۳۰۰	۲۰۰	۱,۷۵	۱,۷۵	۱۵۰	۲۴۰	۵۰۰	۸۶,۷۰	مربعی	ND95-2-1D
۱۴۵۰	۲۰۰	۰,۰۰	۲,۶۲	۱۵۰	۲۴۰	۵۰۰	۸۹,۵۰	مربعی	ND95-2-3
۱۲۵۰	۲۰۰	۱,۷۵	۲,۶۲	۱۵۰	۲۴۰	۵۰۰	۸۰,۳۰	مربعی	ND95-2-3D
۱۴۵۰	۲۰۰	۱,۷۵	۲,۶۲	۱۵۰	۲۴۰	۵۰۰	۹۸,۰۰	مربعی	ND95-2-3D+
۳۳۰	۸۸	۰,۰۰	۱,۸۴	۱۰۰	۱۲۰	۵۰۰	۸۵,۱۰	مربعی	ND95-3-1
۲۴۵۰	۲۷۵	۰,۰۰	۱,۴۹	۲۰۰	۳۲۰	۵۰۰	۱۱۲,۰۰	مربعی	ND115-1-1

¹ Gardner

² Marzouk and Jiang

³ Marzouk *et al.*

۱۴۰۰	۲۰۰	۰,۰۰	۱,۷۵	۱۵۰	۳۲۰	۵۰۰	۱۱۹,۰۰	مربعی	ND115-2-1
۱۵۵۰	۲۰۰	۰,۰۰	۲,۶۲	۱۵۰	۳۲۰	۵۰۰	۱۰۸,۱۰	مربعی	ND115-2-3
[۱۹] Hallgren and Kinnunen									
۹۶۵	۲۰۰	۰,۰۰	۰,۸۰	۲۵۰	۲۴۰	۶۰۰	۹۰,۳۰	دایروی	HSC0
۱۰۲۱	۲۰۰	۰,۰۰	۰,۸۰	۲۵۰	۲۴۰	۶۰۰	۹۱,۳۰	دایروی	HSC1
۸۸۹	۱۹۴	۰,۰۰	۰,۸۲	۲۵۰	۲۴۰	۶۰۰	۸۵,۷۰	دایروی	HSC2
۱۰۴۱	۲۰۰	۰,۰۰	۱,۱۹	۲۵۰	۲۴۰	۶۰۰	۹۱,۶۰	دایروی	HSC4
۹۶۰	۲۰۱	۰,۰۰	۰,۶۰	۲۵۰	۲۴۰	۶۰۰	۱۰۸,۸۰	دایروی	HSC6
۹۴۴	۱۹۸	۰,۰۰	۰,۸۰	۲۵۰	۲۴۰	۶۰۰	۹۵,۰۰	دایروی	HSC8
۵۶۵	۲۰۲	۰,۰۰	۰,۳۳	۲۵۰	۲۴۰	۶۰۰	۸۴,۱۰	دایروی	HSC9
[۸] Ramdane									
۲۲۴	۹۸	۰,۰۰	۰,۵۸	۱۵۰	۱۲۵	۵۵۰	۸۸,۲۴	دایروی	1
۲۱۲	۹۸	۰,۰۰	۰,۵۸	۱۵۰	۱۲۵	۵۵۰	۵۶,۱۶	دایروی	2
۲۳۳	۹۸	۰,۰۰	۰,۵۸	۱۵۰	۱۲۵	۵۵۰	۵۸,۷۲	دایروی	4
۲۳۳	۹۸	۰,۰۰	۰,۵۸	۱۵۰	۱۲۵	۵۵۰	۱۰۱,۸۴	دایروی	6
۳۱۹	۹۸	۰,۰۰	۱,۲۸	۱۵۰	۱۲۵	۵۵۰	۶۰,۴۰	دایروی	12
۳۴۱	۹۸	۰,۰۰	۱,۲۸	۱۵۰	۱۲۵	۵۵۰	۶۰,۸۰	دایروی	14
۳۶۲	۹۸	۰,۰۰	۱,۲۸	۱۵۰	۱۲۵	۵۵۰	۹۸,۴۰	دایروی	16
۴۰۵	۹۸	۰,۰۰	۱,۲۸	۱۵۰	۱۲۵	۶۵۰	۸۴,۲۴	دایروی	22
۳۴۱	۱۰۰	۰,۰۰	۰,۸۷	۱۵۰	۱۲۵	۶۵۰	۵۶,۴۰	دایروی	23
[۷] Ghannoum									
۴۸۵	۱۱۰	۰,۰۰	۱,۹۲	۲۲۵	۱۲۵	۴۵۰	۶۷,۱۰	مربعی	S1-U
۳۶۳	۱۱۰	۰,۰۰	۰,۹۶	۲۲۵	۱۲۵	۴۵۰	۵۷,۱۰	مربعی	S2-U
[۱۱] Gardner									
۳۰۷	۱۲۲	۰,۰۰	۰,۶۶	۱۸۰	۱۵۰	۴۵۰	۶۶,۸۰	مربعی	25
۲۴۳	۸۱	۰,۰۰	۱,۴۷	۱۳۵	۱۲۰	۴۵۰	۶۶,۸۰	مربعی	27
[۲۳] Marzouk and Jiang									
۵۱۱	۱۲۰	۰,۰۰	۱,۰۰	۲۵۰	۱۵۰	۴۹۰	۶۷,۰۰	مربعی	HS17
[۲۲] Marzouk et al.									
۵۱۲	۱۱۹	۰,۰۰	۱,۲	۲۵۰	۱۵۰	۴۶۰	۶۷,۲۰	مربعی	H.H.Z.S.1.0

۴- مقایسه‌ی روابط تئوری با نتایج آزمایشگاهی

در این بخش مقاومت برش سوراخ‌کننده‌ی نمونه‌های دال توسط ضوابط آیین‌نامه‌ها و روابط محققین محاسبه شدند و تعدادی از این نتایج به عنوان نمونه در جدول ۲ قرار داده شده‌اند. در روابط آیین‌نامه‌ها، محدودیت روی مقادیر مقاومت فشاری بتن و ضرایب کاهش مقاومت برای مصالح صرف‌نظر شده‌اند. برای مقایسه‌ی بهتر روابط ذکر شده با نتایج آزمایشگاهی، نسبت‌های ظرفیت برش سوراخ‌کننده‌ی تجربی به ظرفیت محاسبه‌شده V_{test}/V_{cal} مورد استفاده قرار گرفته‌اند. داده‌های V_{test}/V_{cal} برحسب مقاومت فشاری بتن برای هر رابطه در نمودارهای شکل ۳ رسم شده‌اند. به علاوه بهترین خط همبستگی برای هر دیاگرام نیز رسم شده است. مشخصه‌های آماری برای نسبت‌های V_{test}/V_{cal} شامل میانگین، انحراف معیار و واریانس در جدول ۳ آورده شده‌اند.

مطابق با نمودارهای رسم‌شده برای چهار آیین‌نامه، مشاهده می‌شود که نسبت V_{test}/V_{cal} برای برخی نقاط داده‌ای کم‌تر از مقدار یک است که بدین معنی است که ظرفیت برشی سوراخ‌کننده‌ی محاسبه‌شده بیش‌تر از ظرفیت به دست آمده از آزمایش می‌باشد. این حالت می‌تواند منجر به طراحی‌های غیرمحافظة کارانه شوند. برای ACI 318

حدود ۱۸٪، برای BS 8110 حدود ۳۲٪، برای EC2 حدود ۲۲٪ و برای DIN 1045 حدود ۱۰٪ از نمونه‌ها دارای ظرفیت محاسبه‌شده بیش از مقاومت تجربی هستند. ظرفیت برشی ACI 318، EC2 8110 و DIN 1045 باید به ترتیب حدود ۳۰، ۲۲، ۲۳ و ۱۸ درصد کاهش یابند. قابل ذکر است که برای محاسبه‌ی ظرفیت‌های آیین‌نامه‌ای، ضرایب کاهش مقاومت در نظر گرفته نشده‌اند. ضریب کاهش مقاومت برای ACI 318، BS 8110، EC2 و DIN 1045 به ترتیب برابر ۰،۷۵، ۰،۸، ۰،۶۷ و ۰،۶۷ می‌باشد. با اعمال این ضرایب کاهش مقاومت، آیین‌نامه‌ها می‌توانند محافظه‌کارانه شوند به شرطی که تمامی پارامترهای مؤثر بر ظرفیت برش سوراخ‌کننده‌ی دال‌های تخت بتن پرمقاومت را داشته باشند. داده‌های آیین‌نامه‌ی ACI بالاترین ضریب واریانس را دارد، بنابراین می‌تواند منجر به طراحی‌های غیرایمن برای صفحات تخت بتن پرمقاومت شود. واضح است که ACI ساده‌ترین رابطه را دارد که اثرات تمام پارامترهای مهم مؤثر روی ظرفیت برش سوراخ‌کننده‌ی دال بتن پرمقاومت مانند اثر سایز و درصد آرماتور طولی را اعمال نکرده است و باید برای صفحات تخت ساخته‌شده با بتن پرمقاومت اصلاح شود.

مطابق با جدول ۳، رابطه‌ی BS 8110 کم‌ترین واریانس برابر با ۰،۱۸ را در میان روابط آیین‌نامه‌های طراحی دارد، هرچند این رابطه ظرفیت برش سوراخ‌کننده‌ی صفحات تخت بتن پرمقاومت را برای حدود ۳۲٪ از داده‌ها تخمین بالا می‌زند.

با توجه به نمودار نسبت V_{test}/V_{cal} در مقابل مقاومت فشاری بتن برای سایر روابط، مشاهده می‌شود که رابطه‌ی الساناددی محافظه‌کارانه‌ترین رابطه برای تخمین برش سوراخ‌کننده می‌باشد، زیرا هیچ یک از داده‌ها ظرفیت محاسبه‌شده‌ی بیش از مقاومت تجربی ندارند. در روابط رانکین اصلاح‌شده، شریف و دیلگر، گاردنر و شائو، ال-گامال و بنموکرین و رابطه‌ی تئودوراکیپولس و سوامی، حدود ۲۶، ۱۲، ۱۲، ۵۶، و ۲۲ درصد از نمونه‌ها مقاومت محاسبه‌شده بزرگ‌تر از مقاومت آزمایشگاهی دارند. مطابق با جدول ۳ روابط الساناددی و گاردنر و شائو کم‌ترین مقدار واریانس مساوی با ۰،۱۵ دارند، البته رابطه‌ی گاردنر و شائو دقت کم‌تری نسبت به رابطه‌ی الساناددی دارد.

مطالعات تجربی نشان می‌دهند که استفاده از ریشه‌ی سوم f'_c با داده‌های آزمایشگاهی برای صفحات تخت بتن پرمقاومت تطابق بهتری دارد نسبت به ریشه‌ی دوم f'_c که برای دال‌های بتن معمولی مناسب هستند. اثر مقاومت بتن در آیین‌نامه‌ی ACI 318 و رابطه‌ی ال-گامال و بنموکرین به صورت ریشه‌ی دوم f'_c لحاظ شده است، درحالی‌که در روابط رانکین اصلاح‌شده، شریف و دیلگر، گاردنر و شائو، الساناددی، BS 8110، EC2 و DIN 1045 این اثر به صورت ریشه‌ی سوم f'_c وجود دارد.

میان تمام روابط آیین‌نامه‌ها و محققین، رابطه‌ی BS 8110، الساناددی و گاردنر و شائو به ترتیب دارای کم‌ترین ضریب واریانس برابر با ۰،۱۸، ۰،۱۵ و ۰،۱۵ هستند. رابطه‌ی ACI 318 بالاترین مقدار واریانس مساوی با ۰،۸۲ را دارد. رابطه‌ی پیشنهادی توسط الساناددی، ال-گامال و بنموکرین، گاردنر و شائو شامل اثر پارامتر عمق مؤثر به محیط بحرانی d/b_o می‌باشند. پارامتر هم‌دیگر مؤثر بر ظرفیت برش سوراخ‌کننده‌ی صفحات تخت، به خصوص در دال‌های بتن پرمقاومت اثر سایز می‌باشد. روابط EC2 و DIN-1045 شامل اثر سایز به صورت ترم $\sqrt{200/d} + 1$ هستند. این اثر به صورت $\sqrt{200/d}$ و $\sqrt{125/d} + 1$ به ترتیب در روابط گاردنر و شائو و الساناددی لحاظ شده است.

بنابراین رابطه‌ی زیر به دلیل نتایج محافظه‌کارانه، واریانس داده‌های کم و دارا بودن پارامترهای مؤثر، مناسب‌ترین رابطه برای تخمین مقاومت برش پانچ صفحات تخت ساخته‌شده با بتن پرمقاومت است. عوامل مهم مؤثر روی ظرفیت برش سوراخ‌کننده، مانند عامل اثر سایز $\sqrt{125/d}$ ، فاکتور آرماتور طولی ρf_y ، نسبت عمق مؤثر به محیط بحرانی d/b_o و ریشه‌ی سوم f'_c در این رابطه در نظر گرفته شده‌اند.

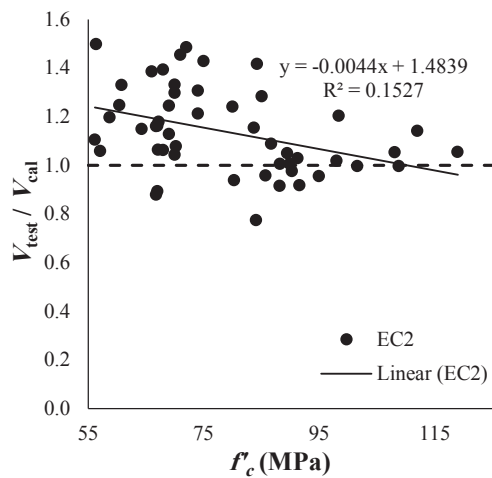
$$V_c = 0.17 \sqrt{f'_c} \sqrt{\rho_m f_y} \left(1 + \frac{\lambda d}{b_o}\right) \sqrt{\left(1 + \frac{125}{d}\right)} \times b_o d \quad (23)$$

Theodorakopoulos and Swamy	Gardner and Shao	El-Gamal and Bemmokrane	Sherif and Dilger	Modified Rankin	ELsanadedy	DIN 1045	BS 8110	EC2	ACI 318	V_{test} (kN)	نمونه‌های آزمایش شده
----------------------------	------------------	-------------------------	-------------------	-----------------	------------	----------	---------	-----	---------	-----------------	----------------------

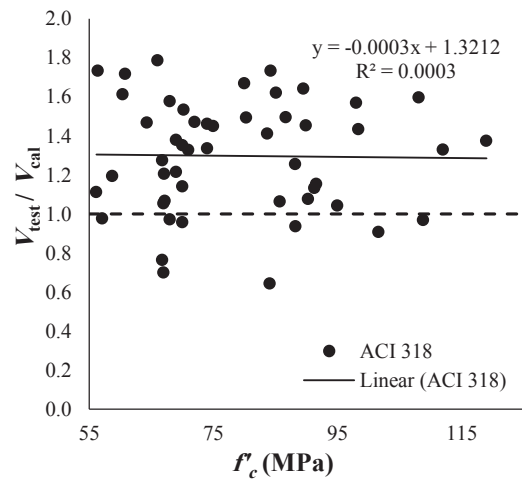
۲۱۲,۶۳	۲۱۹,۴۶	۲۲۱,۷۵	۲۰۸,۶۸	۲۴۶,۷۷	۱۵۸,۳۱	۱۹۱,۰۵	۲۲۰,۶۶	۱۹۹,۴۴	۲۵۴,۰۲	۱۷۸	HS1
۲۶۶,۴۵	۲۶۶,۷۸	۲۷۱,۶۶	۲۵۳,۶۶	۲۸۶,۷۹	۲۱۰,۵۳	۲۳۲,۲۳	۲۶۸,۲۳	۲۳۸,۷۸	۲۶۰,۰۱	۲۴۹	HS2
۳۳۸,۰۳	۳۱۹,۸۰	۳۲۴,۸۰	۳۰۴,۰۷	۳۲۸,۱۲	۲۷۷,۰۴	۲۷۸,۳۹	۳۲۱,۵۴	۲۸۶,۳۴	۲۵۷,۹۷	۳۵۶	HS3
۳۶۳,۴۲	۳۴۲,۹۷	۳۳۹,۹۴	۳۳۵,۵۴	۳۳۷,۵۸	۳۲۱,۵۱	۲۷۸,۴۵	۳۴۳,۹۱	۳۰۱,۸۷	۳۳۳,۹۷	۴۱۸	HS4
۳۵۱,۰۱	۳۵۲,۹۳	۳۸۸,۰۸	۳۳۸,۷۲	۳۹۱,۷۳	۲۶۸,۴۶	۳۲۸,۵۲	۳۵۹,۵۹	۳۴۳,۷۷	۳۷۵,۲۳	۳۶۵	HS5
۳۹۶,۵۱	۳۸۲,۱۵	۴۱۷,۰۹	۳۶۶,۲۵	۴۱۰,۲۲	۳۰۹,۳۸	۳۵۲,۲۱	۳۸۸,۶۵	۳۶۷,۶۴	۳۶۱,۴۴	۴۸۹	HS6
۳۱۲,۷۴	۳۰۴,۶۵	۳۱۲,۸۳	۲۸۹,۶۸	۳۱۸,۱۴	۲۵۴,۷۹	۲۶۵,۲۱	۳۰۶,۳۲	۲۷۲,۶۹	۲۶۶,۶۰	۳۵۶	HS7
۴۲۸,۵۶	۴۰۱,۹۹	۴۳۷,۶۹	۳۸۵,۲۷	۴۲۵,۵۸	۳۳۴,۵۹	۳۷۰,۴۹	۴۰۸,۸۳	۳۸۶,۷۳	۳۵۸,۸۵	۴۳۶	HS8
۵۱۴,۰۷	۴۶۵,۷۸	۵۱۳,۰۹	۴۴۶,۴۰	۴۷۸,۰۶	۴۱۲,۴۷	۴۲۹,۲۹	۴۳۷,۷۰	۴۴۸,۱۰	۳۷۱,۶۲	۵۴۳	HS9
۶۰۲,۵۰	۵۴۰,۷۲	۶۰۳,۴۴	۵۱۸,۲۲	۵۳۸,۱۵	۵۰۹,۲۶	۴۷۳,۶۱	۵۴۹,۹۲	۵۲۰,۱۹	۳۸۶,۳۹	۶۴۵	HS10
۱۸۲,۷۶	۱۸۵,۴۹	۱۷۲,۳۵	۱۷۴,۷۰	۱۹۵,۵۰	۱۴۹,۶۰	۱۵۰,۰۵	۱۸۳,۷۶	۱۵۱,۰۷	۱۷۱,۷۹	۱۹۶	HS11
۲۲۲,۱۳	۲۲۲,۰۰	۲۰۸,۶۶	۲۰۹,۰۸	۲۲۴,۹۹	۱۹۳,۶۳	۱۷۹,۵۸	۲۱۹,۹۳	۱۸۰,۸۰	۱۷۷,۸۲	۲۵۸	HS12
۲۳۱,۰۸	۲۳۵,۴۵	۲۱۷,۷۱	۲۲۱,۷۵	۲۳۳,۲۲	۲۱۴,۹۷	۱۹۰,۴۶	۲۳۳,۲۶	۱۹۱,۷۵	۱۶۹,۳۲	۲۶۷	HS13

جدول ۳: شاخص‌های آماری برای نسبت ظرفیت برش سوراخ‌کننده‌ی تجربی به ظرفیت تنوری

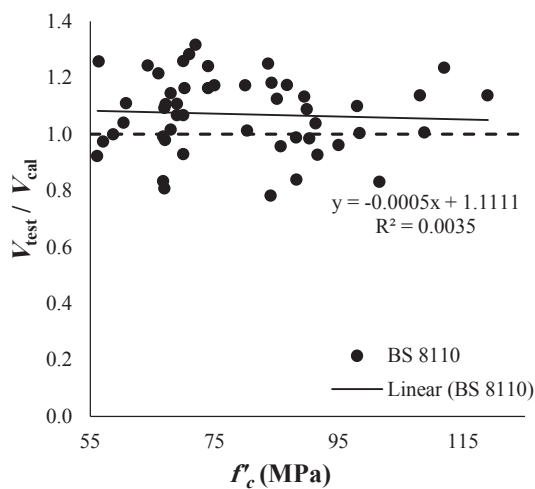
Theodorakopoulos and Swamy	Gardner and Shao	El-Gamal and Bemmokrane	Sherif and Dilger	Modified Rankin	ELsanadedy	DIN 1045	BS 8110	EC2	ACI 318	شاخص‌های آماری برای V_{test}/V_{cal}
۱,۰۸۶	۱,۱۲۱	۰,۹۵۴	۱,۱۹۸	۱,۰۸۶	۱,۲۸۵	۱,۱۸۸	۱,۰۰۹	۱,۱۱۶	۱,۳۳۲	میانگ
۰,۱۴۶	۰,۱۲۳	۰,۱۶۹	۰,۱۶۴	۰,۱۶۲	۰,۱۲۲	۰,۱۶۸	۰,۱۳۳	۰,۱۷۴	۰,۲۸۶	انحراف معیار
۰,۰۲۱	۰,۰۱۵	۰,۰۲۸	۰,۰۳۷	۰,۰۲۶	۰,۰۱۵	۰,۰۲۸	۰,۰۱۸	۰,۰۳۰	۰,۰۸۲	واریانس



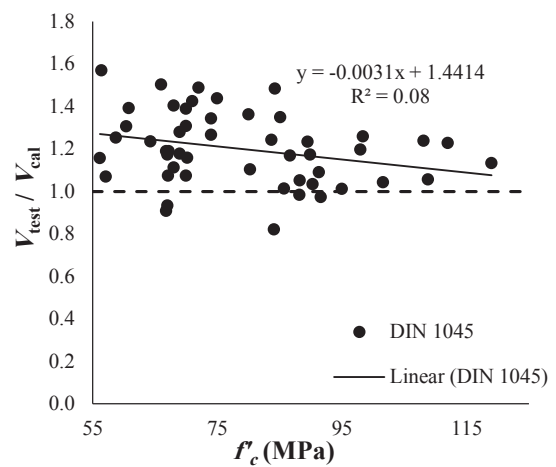
شکل ۳-ب: رابطه‌ی مقاومت برش پانچ استاندارد EC2



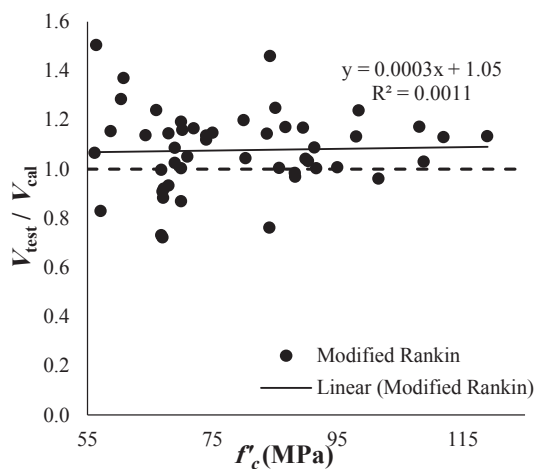
شکل ۳-الف: رابطه‌ی مقاومت برش پانچ ACI 318



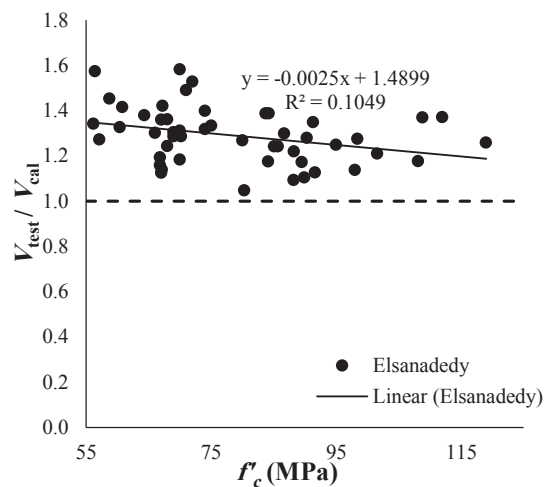
شکل ۳-ت: رابطه‌ی مقاومت برش پانچ استاندارد BS



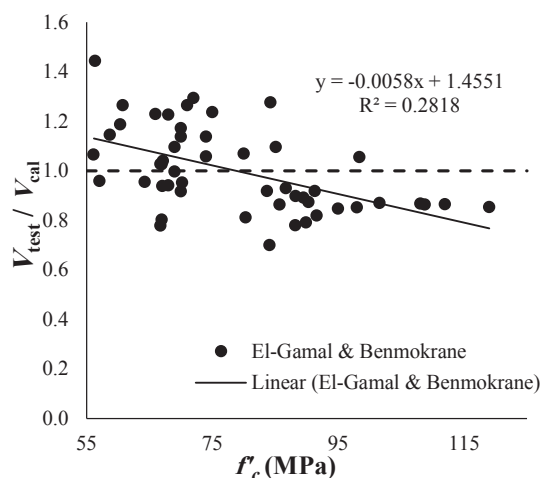
شکل ۳-پ: رابطه‌ی مقاومت برش پانچ استاندارد DIN



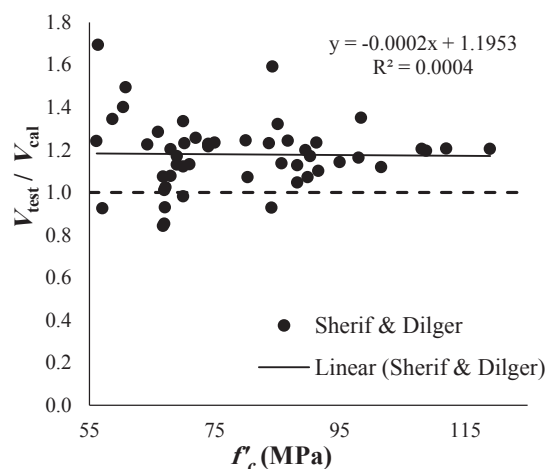
شکل ۳-ج: رابطه‌ی مقاومت برش پانچ رانکین اصلاح شده



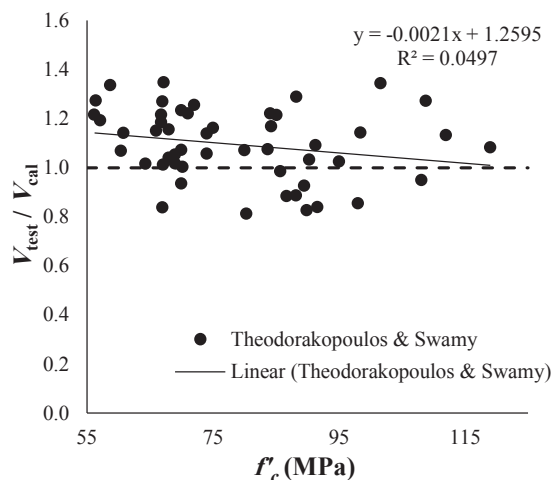
شکل ۳-ث: رابطه‌ی مقاومت برش پانچ الساناددی



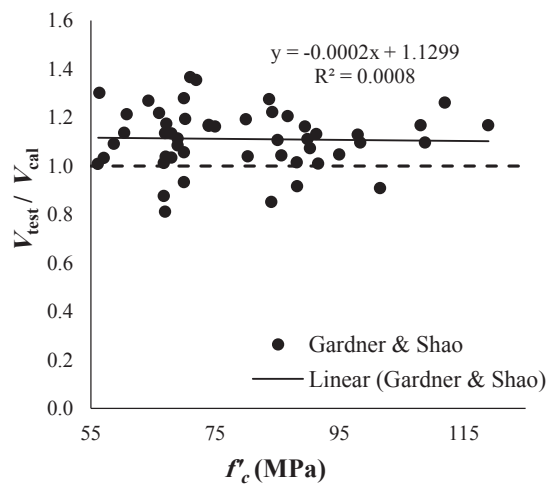
شکل ۳-ح: رابطه‌ی مقاومت برش پانچ ال - گامال و بنموکرین



شکل ۳-ج: رابطه‌ی مقاومت برش پانچ شریف و دیلگر



شکل ۳-د: رابطه‌ی مقاومت برش پانچ تئودوراکوپولس و سوامی



شکل ۳-خ: رابطه‌ی مقاومت برش پانچ گاردنر و شائو

شکل ۳: نمودارهای نسبت ظرفیت برش سوراخ‌کننده‌ی تجربی در صفحه‌ی تخت به ظرفیت محاسباتی برحسب مقاومت فشاری بتن برای روابط مقاومت برش پانچ ارائه شده

۵- بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش روابط مقاومت برش سوراخ‌کننده‌ی صفحات تخت بررسی شده‌اند. مقاومت فشاری اثرات قابل ملاحظه‌ای روی رفتار برش سوراخ‌کننده‌ی صفحات تخت دارد و استفاده از بتن پرمقاومت ظرفیت برش پانچ را افزایش می‌دهد. بدین ترتیب نیروهای بیش‌تری می‌توانند از طریق مقاطع اتصال دال - ستون منتقل شوند. در این مقاله نمونه‌های بتن پرمقاومت با مقاومت فشاری زیر ۱۲۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده‌اند و برای دال‌ها با مقاومت بالاتر، مطالعات بیش‌تری موردنیاز است.

ضوابط آیین‌نامه‌های طراحی براساس مطالعات تجربی انجام‌شده روی بتن با مقاومت معمولی به دست آمده‌اند. ازین‌رو استفاده از روابط طراحی برای اعضای ساخته‌شده با بتن پرمقاومت می‌تواند منجر به طراحی‌های غیرایمن شوند. محققین مختلف روابط متفاوتی برای تخمین برش پانچ صفحات تخت بتن پرمقاومت پیشنهاد داده‌اند. مقاومت برش سوراخ‌کننده معمولاً متناسب با f'_c در آیین‌نامه‌های مختلف بیان می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از ریشه‌ی سوم f'_c مقادیر بهتری برای صفحات تخت ساخته‌شده با بتن پرمقاومت ارائه می‌دهند. ریشه‌ی دوم f'_c مورد استفاده در رابطه‌ی ACI ظرفیت برش پانچ را بیش‌تر از واقعیت تخمین می‌زند.

از میان روابط آیین‌نامه‌ها، رابطه‌ی ACI 318-14 غیرمحافظه‌ترین نتایج را برای صفحات تخت ساخته‌شده با بتن پرمقاومت ارائه می‌دهد. این رابطه باید حدود ۳۰٪ کاهش باید تا نتایج قابل اعتمادی داشته باشد. روابط EC2-2204، BS 8110-97 و DIN 1045-1 باید به ترتیب حدود ۲۳٪، ۲۲٪ و ۱۸٪ کاهش یابند. به علاوه از میان تمام روابط پیشنهادی رابطه‌ی ACI بیش‌ترین مقدار واریانس و پراکندگی داده‌ها را دارد و نمی‌توان ازین رابطه به صورت مستقیم برای بتن پرمقاومت استفاده کرد.

مطالعات در این مقاله نشان می‌دهند که رابطه‌ی زیر محافظه‌ترین رابطه برای بتن پرمقاومت است، زیرا برای هیچ نمونه‌ی آزمایشی ظرفیت برش سوراخ‌کننده از مقاومت تجربی بیش‌تر نشده است.

$$V_c = 0.17 \sqrt{f'_c} \sqrt{\rho_m f_y} \left(1 + \frac{1.25d}{b_o}\right) \sqrt{\left(1 + \frac{1.25}{d}\right)} \times b_o d \quad (24)$$

در این رابطه مؤثرین عوامل بر مقاومت برش پانچ صفحات تخت ساخته‌شده با بتن پرمقاومت حضور دارند. این عبارات شامل ضریب اثر سازه $\sqrt{1+1.25/d}$ ، فاکتور آرماتور ρf_y ، نسبت عمق مؤثر به محیط بحرانی d/b_o و ریشه‌ی سوم f'_c هستند. این پارامترها در آیین‌نامه‌ی ACI لحاظ نشده‌اند و بدین ترتیب ACI نتوانسته است نتایج مطلوبی برای ظرفیت برش پانچ دال‌ها ارائه دهد. بنابراین این رابطه می‌تواند بهترین رابطه برای تخمین ظرفیت برش سوراخ‌کننده در صفحات تخت ساخته‌شده با بتن پرمقاومت باشد.

منابع

- [1] Elsanadedy, H.M., Al-Salloum, Y.A. and Alsayed, S.H. (2013). "Prediction of punching shear strength of HSC interior slab-column connections", *KSCE J. Civ. Eng.*, 17(2): 473-485.
- [2] Ngo, D.T. (2001). "Punching shear resistance of high-strength concrete slabs", *Electron. J. Struct. Eng.*, 1(1): 52-59.
- [3] Inácio, M.M., Almeida, A.F., Faria, D.M., Lúcio, V.J. and Ramos, A.P. (2015). "Punching of high strength concrete flat slabs without shear reinforcement", *Eng. Struct.*, 103: 275-284.
- [4] Theodorakopoulos, D.D. and Swamy, R.N. (2002). "Ultimate punching shear strength analysis of slab-column connections", *Cem. Concr. Compos.*, 24(6): 509-521.
- [5] Ramana, N.V., Gnaneswar, K., Sashidhar, C. and Kumar, T.N. (2012). "Behavior of High Performance Concrete Two Way Slabs in Punching Shear", *Int. j. sci. adv. technol.*, 2(3): 122-126.

- [6] Wight, J.K, and MacGregor, J.G. (2012). *Reinforced Concrete Mechanics and Design, 6th Edition*, Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey.
- [7] Ghannoum, C.M. (1998). *Effect of High-strength Concrete on the Performance of Slab-column Specimens*. MSc. Thesis, McGill University Montréal, Canada.
- [8] Ramdane, K. E. (1996). "Punching shear of high performance concrete slabs", *4th Int. Symposium on Utilization of High-strength/High-Performance Concrete, Paris*, pp.: 1015-1026.
- [9] Subramanian, N. (2005). "Evaluation and enhancing the punching shear resistance of flat slabs using HSC", *Indian Concr. J.*, 79(4): 31-37.
- [10] Marzouk, H. and Hussein, A. (1992). "Experimental investigation on the behavior of high-strength concrete slabs", *ACI Struct. J.*, 88(6): 701-713.
- [11] Gardner, N.J. (1990). "Relationship of the punching shear capacity of reinforced concrete slab with concrete strength", *ACI Struct. J.*, 87(1): 66-71.
- [12] Nawy, E.G. (2001). *Fundamentals of High-Performance Concrete, 2th Edition*, John Wiley and Sons, Inc., Toronto, Canada.
- [13] Regan, P.E., Al-Hussaini, A., Ramdane, K.E. and Xue, H.Y. (1993). "Behaviour of high strength concrete slabs", *In Concrete 2000. Proceedings of International Conference, University of Dundee, Scotland, UK, September, 1*: 761-773.
- [14] ACI Committee 318. (2014). "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, ACI 318-14 and 318R-14", American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
- [15] British Standard. (1997). "Structural Use of Concrete, Part 1: Code of Practice for Design and Construction, BS 8110", British Standards Institution, London, UK
- [16] Eurocode 2. (2004). "Eurocode 2: Design of Concrete Structures- part 1-1: General Rules and Rules for Buildings", European Committee for Standardization.
- [17] DIN 1045. (2001). "German Standard: Concrete Reinforced and Prestressed Concrete Structures Part 1: Design", Deutsche Institut fur Normung e.v., Beuth Verl, Berlin.
- [18] Subramanian, N. (2003). "Shear strength of high strength concrete beams: Review of codas provisions", *Indian Concr. J.*, 77(5): 1090-1094.
- [19] Hallgren, M. and Kinnunen, S. (1996). "Increase of punching shear capacity by using high-strength concrete", *In 4th International. Symposium on Utilization of High-strength/High-performance Concrete, Paris*, pp.: 1037-1046.
- [20] Hallgren M. (1996). *Punching shear capacity of reinforced high strength concrete slabs*, Bulletin No 23. Department of Structural Engineering, KTH, Stockholm.
- [21] Tomaszewicz, A. (1993). *High-strength concrete SP2-plates and shells. Report 2.3, Punching Shear Capacity of Reinforced Concrete Slabs*, Report No. STF70A93082, SINTEF, Trondheim.
- [22] Marzouk, H., Emam, M. and Hilal, M.S. (1998). "Effect of high-strength concrete slab on the behavior of slab-column connections", *ACI Struct. J.*, 95(3): 227-237.
- [23] Marzouk, H. and Jiang, D. (1997). "Experimental investigation on shear enhancement types for high-strength concrete plates", *ACI Struct. J.*, 94(1): 49-58.
- [24] Rankin, G.I.B. and Long, A.E. (1987). "Predicting the punching strength of conventional slab-column specimens", *Proc. Inst. Civ. Eng. (London)*, 82(2): 327-346.
- [25] Sherif, A.G. and Dilger, W.H. (1996). "Critical review of the CSA A23.3-94 punching shear strength provisions for interior columns", *Can. J. Civil. Eng.*, 23(5): 998-1011.
- [26] Gardner, N.J. and Shao, X. (1996). "Punching shear of continuous flat reinforced concrete slabs", *ACI Struct. J.*, 93(2): 218-228.
- [27] El-Gamal, S. and Benmokrane, B. (2004). *A new punching shear equation for two way concrete slabs reinforced with FRP bars*, Research Study, American Concrete Institute, *Advancing Concrete Knowledge*, SP-230-50.

Evaluation of Relationships for Effect of High-Strength Concrete on Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Flat Plates

Morvarid Hajian

PhD Student, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran (hajian.m@ut.ac.ir)

Seyed Alireza Fatemi

PhD. Student, Department of Civil Engineering, Amirkabir University of Technology
(a.fatemi@aut.ac.ir)

Iraj Mahmoudzadeh kani

Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran
(imkani@ut.ac.ir)

Abstract

High strength concrete (HSC) has been used widely over the last decade due to its improved characteristics. HSC has also been widely used in flat plates. Flat plates due to their limited depth are sensitive to punching shear. Most of the current design codes are based on empirical researches conducted on normal strength concrete (NSC) specimens. HSC has different fracture mechanisms compared to NSC. Therefore, it is essential to re-examine codes equations in order to be proper for HSC members. The aim of this paper is to investigate the effect of using HSC on current design relationships and find the most convenient formula for predicting the punching shear capacity of interior slab-column connections. Design formulas used in this research consist of four design codes, ACI 318, Eurocode2, BS 8110, DIN 1045 and six proposed formulas by other researchers for HSC flat plates. For checking the accuracy of these design methods, 50 test results from the literature conducted on HSC slab specimens are selected to compare with formulas.

Keywords: high strength concrete, punching shear strength, flat plates, interior slab-column connections