

تقویت برش پانچینگ دال‌های تخت با استفاده از صفحات پلیمری - الیافی (CFRP)

وحید مرادی مرنی^۱ و محمدرضا اصفهانی^{۲*}

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد

^۲ استاد گروه عمران دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد

(تاریخ دریافت ۸۵/۹/۸، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۸/۶/۹، تاریخ تصویب ۸۹/۶/۳۰)

چکیده

در این تحقیق تقویت برش پانچینگ دال‌های تخت با استفاده از صفحات پلیمری - الیافی CFRP مورد بررسی قرار می‌گیرد. ده نمونه دال بتن مسلح به ابعاد $1000 \times 1000 \times 100$ میلی‌متر و با درصد‌های مختلف فولاد کششی و دو نوع بتن با مقاومت‌های فشاری مختلف ساخته شد. هشت نمونه با استفاده از صفحات CFRP تقویت شدند و دو نمونه دیگر به عنوان نمونه‌های کنترلی تقویت نشده مورد آزمایش قرار گرفتند. پهنای صفحات CFRP در نمونه‌های مختلف متفاوت بود. صفحات CFRP در وجه کششی تحتانی دال و در اطراف ستون در دو راستای عمود برهم چسبانده شدند. بارگذاری دال‌ها از بالا به پایین و با استفاده از جک فشاری انجام شد. در آزمایش‌ها بار و تغییر مکان وسط نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج آزمایشات نشان می‌دهند که استفاده از تقویت CFRP موجب افزایش سختی خمشی و مقاومت برشی پانچینگ دال‌ها می‌گردد. به منظور استفاده از آیین‌نامه‌های طراحی برای پیش‌بینی مقاومت برشی پانچینگ دال‌های تقویت شده، از یک روش تحلیلی جهت محاسبه نسبت آرماتور خمشی معادل و عمق مؤثر معادل استفاده گردید و براساس آن مقاومت برشی پانچینگ نمونه‌های آزمایشگاهی با نتایج به دست آمده از روابط طراحی سه آیین‌نامه ACI 318-05 و BS 8110-85 و JSCE-86 و یک رابطه تئوری مقایسه شد. بر اساس مقایسه نتایج آزمایشگاهی و روابط آیین‌نامه‌ها، روابط جدیدی پیشنهاد گردید. مقادیر محاسبه شده از روابط پیشنهادی نشان می‌دهد که این روابط با دقت خوبی مقاومت برشی پانچینگ دال‌های تقویت شده را پیش‌بینی می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: برش پانچینگ، تقویت، صفحات پلیمری CFRP، دال بتن مسلح، آرماتور خمشی معادل، عمق مؤثر معادل

مقدمه

هراچلی و سودکی [۳]، ۱۶ دال مربعی بتن مسلح را مورد آزمایش قرار دادند. در یک دسته بندی کلی نمونه‌ها به ۴ دسته تقسیم شدند که این تقسیم بندی براساس ضخامت دال و میزان درصد آرماتور تقویتی بود. از ورق‌های FRP در عرض‌های مختلف که به وجه کششی دال چسبانده شده بودند استفاده گردید. ورق‌ها به صورت ۱ و ۲ لایه بر سطوح دال چسبانده شدند. جهت اجتناب از گسیختگی ناشی از جداشدگی FRP از سطح بتن، ورق‌های چسبانده شده در هر جهت تا لبه آزاد دال امتداد یافتند. دال‌ها دارای ضخامت ۵۵ و ۵۷ میلی‌متر و درصد فولاد کششی آنها ۱٪ و ۱/۵٪ بود. طرح اختلاط بتن به گونه‌ای بود که مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه استوانه‌ای آن به ۳۴/۵ مگاپاسکال برسد. گسیختگی نمونه‌های تقویت شده با استفاده از ۲ لایه CFRP از نوع گسیختگی مهاری ورق‌های CFRP بود. استفاده از CFRP منجر به افزایش سختی خمشی و مقاومت برشی

از دو دهه گذشته استفاده از مصالح پلیمری برای ترمیم و تقویت سازه‌ها بسیار رایج شده است. پلیمرهای تقویت شده با الیاف FRP یکی از این مصالح می‌باشد. معمولاً این مصالح به صورت پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربنی CFRP و یا پلیمرهای تقویت شده با الیاف شیشه‌ای GFRP می‌باشند. در سال‌های اخیر روش‌هایی جهت تقویت اتصال دال - ستون در دال‌های تخت ارائه گردیده است [۱]. در اغلب روش‌های ارائه شده جهت تقویت یا از فولاد و یا از پلیمرهای تقویت شده با الیاف که به اختصار FRP نامیده می‌شود به عنوان مصالح اصلی تقویتی استفاده شده است. به خصوص در سال‌های اخیر گرایش به استفاده از FRP در تقویت دال‌ها افزایش یافته که این امر به دلیل سهولت کار کردن با این ماده، وزن کم، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بالا، مقاومت شیمیایی زیاد در برابر خوردگی، پوسیدگی و زنگ زدگی می‌باشد [۲].

* نویسنده مسئول : تلفن : ۰۵۱۱ - ۸۷۶۳۳۰۳ ، فاکس : ۰۵۱۱ - ۸۷۶۳۳۰۱ ، Email: Esfahani@ferdowsi.um.ac.ir

پانچینگ دال ها گردید. این افزایش بستگی به مساحت CFRP استفاده شده، ضخامت آن و درصد فولاد دال داشت. در نمونه‌ها با افزایش مقدار CFRP، گرایش به افزایش مقاومت برشی کاهش می‌یافت. در ۴ نمونه از دال‌ها، گسیختگی مهاری در تکیه‌گاه‌ها رخ داد که به علت عدم انتقال برش توسط بتن بین اپوکسی و سطح دال صورت گرفت. استفاده از ۲ لایه تقویت منجر به افزایش نیروی برش افقی بین ورق‌های CFRP و سطح بتن و افزایش تمایل به گسیختگی ناشی از جداسازی الیاف می‌گردید. مکانیزم اصلی تقویت و افزایش مقاومت برشی دال‌های تقویت شده با CFRP وابسته به نقش آن در جلوگیری از گسترش ترک‌های کششی و یا افزایش مقاومت خمشی اتصال می‌باشد.

$$V_u = 0.793 \sqrt{100 \rho_s} \sqrt[4]{\frac{400}{d}} \sqrt[3]{\frac{f_{cu}}{25}} U d \quad (۴)$$

در رابطه فوق U محیط مقطع بحرانی برابر محیط مستطیلی است که اضلاع آن در فاصله $1.5d$ از بر ستون قرار دارد. f_{cu} مقاومت فشاری نمونه مکعبی برحسب مگاپاسکال می‌باشد. ρ نسبت آرماتور خمشی که مقدار حداکثر مجاز آن ۳٪ است. در این رابطه مقدار حداکثر مجاز $\sqrt[4]{\frac{400}{d}}$ برابر ۱ می‌باشد. حداکثر مجاز f_{cu} در رابطه فوق ۴۰ مگاپاسکال است.

رابطه ارایه شده در آیین‌نامه JSCE به قرار زیر است:

$$V_u = 0.188 \beta_d \beta_p \beta_r \sqrt{f'_c} U d \quad (۵)$$

که در این رابطه: $\beta_p = (100\rho)^{\frac{1}{3}}$ و $\beta_r = 1 + \frac{1}{\left(1 + \frac{c}{d}\right)}$

است. $\beta_d = \left(\frac{1000}{d}\right)^{\frac{1}{4}}$

U محیط بحرانی می‌باشد که از رابطه $U = (4c + \pi \cdot d)$ حاصل می‌شود. سطح کنترل، مستطیلی با گوشه‌های گرد در نظر گرفته شده است. حداکثر مجاز آیین‌نامه برای پارامترهای β_d و β_p برابر ۱/۵ می‌باشد. ρ نسبت آرماتور خمشی در مقطع دال می‌باشد.

روابط آیین‌نامه‌های مذکور اثر مقاومت خمشی یا به عبارتی اثر ρ را در مقاومت برش پانچینگ در نظر می‌گیرند. چنگ و یان‌لی [۱] برای در نظر گرفتن مقاومت خمشی دال‌های تقویت شده با FRP پارامترهای نسبت آرماتور خمشی معادل (شامل آرماتور فولادی خمشی و ورق‌های تقویتی FRP) ρ_{eq} و عمق مؤثر معادل d_{eq} را با روابط (۶) و (۷) پیشنهاد کردند.

چنگ و یان‌لی [۱]، ۱۸ دال را مورد آزمایش قرار دادند. ۴ عدد از دال‌ها به عنوان نمونه کنترل و ۱۴ دال دیگر با استفاده از ۱ یا ۲ لایه ورق GFRP تقویت شده بودند. نمونه‌ها دارای میزان فولاد ۰/۵۹٪ و ۱/۳۱٪ مقاومت فشاری بتن دال‌ها ۱۶/۹ و ۳۴/۴ مگاپاسکال بودند. الیاف استفاده شده جهت تقویت از نوع الیاف دو سویه بود. مقایسه نتایج آزمایشات انجام شده توسط چنگ و یان‌لی [۱] و محاسبات نشان می‌دهد که روابط آیین‌نامه ACI [۴] بسیار محافظه‌کارانه است. در رابطه ارایه شده در آیین‌نامه ACI مقاومت برشی نهایی دال برابر کوچک‌ترین مقدار حاصل از روابط زیر می‌باشد.

چنگ و یان‌لی [۱]، ۱۸ دال را مورد آزمایش قرار دادند. ۴ عدد از دال‌ها به عنوان نمونه کنترل و ۱۴ دال دیگر با استفاده از ۱ یا ۲ لایه ورق GFRP تقویت شده بودند. نمونه‌ها دارای میزان فولاد ۰/۵۹٪ و ۱/۳۱٪ مقاومت فشاری بتن دال‌ها ۱۶/۹ و ۳۴/۴ مگاپاسکال بودند. الیاف استفاده شده جهت تقویت از نوع الیاف دو سویه بود. مقایسه نتایج آزمایشات انجام شده توسط چنگ و یان‌لی [۱] و محاسبات نشان می‌دهد که روابط آیین‌نامه ACI [۴] بسیار محافظه‌کارانه است. در رابطه ارایه شده در آیین‌نامه ACI مقاومت برشی نهایی دال برابر کوچک‌ترین مقدار حاصل از روابط زیر می‌باشد.

$$V_u = 0.083 \left(2 + \frac{4}{\beta_c}\right) \sqrt{f'_c} b_0 d \quad (۱)$$

$$V_u = 0.083 \left(2 + \frac{\alpha_s d}{b_0}\right) \sqrt{f'_c} b_0 d \quad (۲)$$

$$V_u = 0.083 \times 4 \sqrt{f'_c} b_0 d \quad (۳)$$

در روابط فوق f'_c مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای بتن بر حسب مگاپاسکال و b_0 محیط مقطع بحرانی در فاصله $0.5d$ از وجه ستون می‌باشد. مقدار این پارامتر برای دال با ستون مربعی به ضلع c برابر $4(c+d)$ است. β_c نسبت طول به عرض ستون و α_s برای ستون‌های داخلی، لبه و ستون‌های گوشه به ترتیب برابر ۴۰، ۳۰ و ۲۰ می‌باشد. روابط آیین‌نامه ACI [۴] توانایی در نظر گرفتن تأثیر تقویت GFRP بر ظرفیت پانچینگ را ندارد زیرا پارامترهای اصلی در رابطه آیین‌نامه ACI، نسبت ابعاد ستون و نسبت محیط بحرانی به ضخامت دال b_0/d می‌باشند و از اثر

جدول ۱: مشخصات مکانیکی آرماتورها.

| قطر اسمی آرماتور | تنش تسلیم | ضریب کشسانی |
|------------------|-----------|-------------|
| ۱۶mm | ۴۸۳/۴MPa | ۲۱۷۶۰۰MPa |
| ۱۲mm | ۴۹۳/۷MPa | ۲۱۸۴۶۵MPa |

برای تقویت نمونه‌ها، از ورق‌های پلیمری الیافی یک جهتی کربنی استفاده شد. الیاف کربنی مورد استفاده در این مطالعه، از نوع C-Sheet 240 و از محصولات شرکت کامپوزیت رپ است. این الیاف در رول‌های به پهنای ۶۰ سانتی‌متر بسته‌بندی شده‌اند و متناسب با ابعاد مورد نیاز به راحتی قابل برش می‌باشند. مشخصات مکانیکی ارایه شده توسط شرکت سازنده برای الیاف مورد نظر عبارت از مقاومت کششی ۳۸۰۰ مگاپاسکال، ضریب کشسانی ۲۴۰ گیگاپاسکال و کرنش نهایی ۱/۵۵ درصد می‌باشد. برای دقت بیشتر ترجیح داده شد تا مشخصات مکانیکی الیاف مجدداً آزمایش شود. بر این اساس نمونه‌هایی بر مبنای استاندارد ASTM D3039 تهیه شد و با استفاده از دستگاه کشش آزمایش گردید. نتایج آزمایش نشان دهنده مقاومت کششی ۲۸۴۵ مگاپاسکال و ضریب کشسانی ۲۳۷ گیگاپاسکال و کرنش نهایی ۱/۲۰ درصد برای ورق‌های FRP بود.

چسب مورد استفاده از ترکیب رزین به رنگ سفید و سخت کننده به رنگ قرمز براساس دستورالعمل کارخانه سازنده به ترتیب به نسبت وزنی ۰/۸۵ به ۰/۱۵ ساخته شد. رزین و سخت کننده باید به مدت ۳ دقیقه با یکدیگر مخلوط شوند تا چسب به صورت یکنواخت به رنگ نارنجی درآید. به منظور آزمایش چسب نمونه‌ای بر اساس استاندارد ASTM D882 تهیه گردید و با استفاده از دستگاه کشش مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج آزمایش نشان دهنده مقاومت کششی ۲۶/۹۴ مگاپاسکال و ضریب کشسانی ۱/۹ گیگاپاسکال و کرنش نهایی ۳/۴۷ درصد بود.

مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی

نمونه‌های آزمایش شده در این تحقیق، دال‌های مربعی با ابعاد ۱۰۰۰*۱۰۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشند. به منظور شبیه‌سازی اتصال دال-

$$d_{eqv} = \frac{M_{nf}}{T_s + T_f} + \frac{a}{2} \quad (۶)$$

$$\rho_{eqv} = \frac{T_s + T_f}{bd_{eqv}.f_s} \quad (۷)$$

در روابط فوق، a عمق بلوک مستطیلی تنش، T_s و T_f به ترتیب نیروی کششی فولاد و FRP، f_s تنش فولاد و M_{nf} ظرفیت خمشی دال تقویت شده با استفاده از مواد FRP می‌باشد که از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$M_{nf} = C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) + T_f (h - d) \quad (۸)$$

در این رابطه C_c برابر نیروی فشاری بتن و h ضخامت دال است.

نتایج مطالعات چنگ و یان لی [۱] نشان می‌دهند که استفاده از پارامترهای d_{eq} و ρ_{eq} در تمام موارد رضایت بخش نیست. در این پژوهش سعی شده است که پارامترهای مذکور مورد ارزیابی مجدد قرار گرفته و در صورت امکان روابط دقیق تری برای پیش‌بینی مقاومت برش پانچینگ ارایه شود. بدین منظور با توجه به کمبود نتایج آزمایشگاهی تعداد ۱۰ دال بتن آرمه ساخته و برای برش پانچینگ آزمایش شدند. در نمونه‌های آزمایشگاهی مقادیر مختلفی برای نسبت $\frac{\rho_{eq}}{\rho_s}$ در نظر گرفته شد تا اثر تقویتی مواد FRP بهتر بررسی گردد.

کار آزمایشگاهی

مشخصات مصالح

برای بتن مورد استفاده از ۲ طرح اختلاط استفاده شد. طرح اختلاط اول برای بتن با مقاومت فشاری ۲۵ مگاپاسکال و طرح اختلاط دوم به منظور دستیابی به مقاومت فشاری ۵۰ مگاپاسکال تهیه گردید. نمونه‌های فشاری در شرایط محیطی یکسان با دال‌ها نگهداری شده و همزمان با آزمایش دال‌ها، تحت بار فشاری قرار گرفتند. مقاومت فشاری استوانه‌ای حاصل از آزمایش فشاری نمونه‌ها برای طرح اختلاط اول ۲۲/۷ و برای طرح اختلاط دوم ۴۵/۳ مگاپاسکال بود. برای تسلیح دال‌ها از آرماتور نوع III استفاده شد. مقدار تنش جاری شدن و ضریب کشسانی این آرماتورها با انجام آزمایش کشش بر روی آنها به دست آمد (جدول ۱).

نیروی وارده از یک دستگاه میدل فشار الکتریکی استفاده شده است. جهت جلوگیری از گسیختگی موضعی در محل تکیه‌گاه‌ها در محل تماس بتن با فولاد از لاستیک‌های نواری استفاده گردید. همچنین به منظور ایجاد شرایط بار متمرکز روی دال از یک صفحه انتقال بار به ابعاد 50×50 میلی‌متر که از جنس PVC بود استفاده گردید.

برای ثبت نتایج آزمایش، از یک تغییرشکل‌سنج الکتریکی و میدل فشار الکتریکی استفاده گردید. وسایل اندازه‌گیری فوق از طریق کابل‌های ویژه‌ای به سیستم ثبت و پردازش اطلاعات متصل شدند.

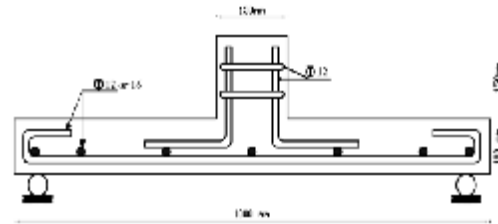


شکل ۲: دستگاه آزمایش.

نمونه‌های آزمایشگاهی

در این پژوهش ۱۰ نمونه آزمایشی ساخته و آزمایش شد. از این ده نمونه ۲ نمونه دال بتنی بدون تقویت مورد آزمایش قرار گرفتند و ۸ نمونه دیگر دارای تقویت CFRP بودند. نامگذاری نمونه‌ها (جدول ۲) بر مبنای ۳ عامل متغیر اصلی در دال‌ها انجام پذیرفت. حرف R نشان‌دهنده نسبت آرماتور دال می‌باشد. $R0.8$ به معنای نسبت آرماتور $0.8/1$ درصد و $R1.6$ به معنای نسبت آرماتور $1.6/1$ درصد می‌باشد. حرف C نشان‌دهنده رده مقاومت فشاری بتن است. طرح‌های اختلاط اولیه به منظور دستیابی به مقاومت‌های فشاری ۲۵ مگاپاسکال و ۵۰ مگاپاسکال بودند. به همین دلیل از ترکیب C25 و C50 در نامگذاری دال‌ها استفاده شده است. متغیر سوم عرض ورق CFRP مورد استفاده به منظور تقویت می‌باشد که واحد آن برحسب سانتی‌متر است. مشخصات نمونه‌ها در جدول (۲) ارائه شده است.

ستون، یک ستون مربعی با ابعاد $150 \times 150 \times 150$ میلی‌متر در وسط دال ساخته شد. نمونه‌ها شامل ۱۰ دال بتن مسلح است. ۲ نمونه بدون تقویت آزمایش شدند. ۸ نمونه دیگر نیز پس از تقویت با CFRP تحت آزمایش قرار گرفتند. در شکل (۱) ابعاد نمونه‌ها و نحوه قرارگیری آرماتورهای آن مشاهده می‌شود. قرار گرفتن ورق‌های CFRP در یکی از نمونه‌ها نیز در شکل (۱) نشان داده شده است.



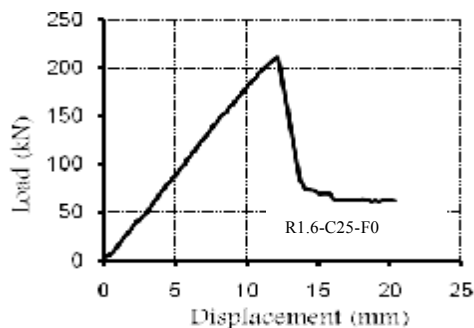
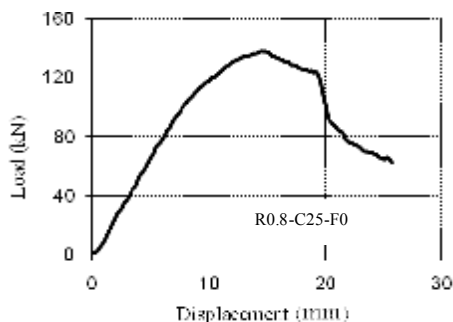
شکل ۱: جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی و ورق‌های CFRP.

قبل از چسباندن صفحات CFRP به سطح بتن، به منظور برداشتن روغن و شیره‌بتن از سطح نمونه‌ها از برس سیمی فلزی استفاده شد. چسب مورد استفاده پس از اختلاط با استفاده از قلم‌مو بر روی سطوح اعمال گردید و سپس ورق‌های پلیمری الیافی به صورت خشک بر روی نمونه‌ها قرار داده شدند و برای خارج نمودن هوای محبوس از غلطک دستی استفاده شد و سپس یک لایه چسب بر روی پلیمرهای الیافی اعمال گردید. حداقل زمان لازم برای عمل‌آوری چسب قبل از بارگذاری یک هفته در نظر گرفته شد.

نحوه بارگذاری نمونه‌ها

اعمال بار فشاری به دال‌ها با استفاده از یک جک فشاری هیدرولیک صورت گرفت. این سیستم اعمال بار در شکل (۲) دیده می‌شود. در این سیستم، نمونه‌های آزمایشگاهی بر روی یک قاب تکیه‌گاهی قرار گرفته و نیروی فشاری از بالا اعمال می‌شود. جهت اندازه‌گیری

تشکیل مخروط پانچینگ و جدا شدن FRP از سطح بتن بود شنیده می‌شد.



شکل ۳: نتایج شکست نمونه‌های کنترل.

در هیچ یک از نمونه‌ها الیاف گسیخته نشدند، به عبارتی در هیچ یک از نمونه‌ها الیاف به ظرفیت نهایی خود نرسیدند. در نمونه‌های R0.8-C25-F10 و R0.8-C50-F10 از الیاف به عرض ۱۰۰ میلی‌متر به منظور تقویت استفاده گردید. افزایش سختی این نمونه‌ها در مقایسه با نمونه کنترل در حدی نبود که منجر به تغییر حالت شکست از نوع برش پانچینگ خمشی به برش پانچینگ خالص گردد. حالت شکست سایر نمونه‌ها از نوع برش پانچینگ خالص بود. به منظور بررسی آزمایشگاهی رفتار دال‌های تقویت شده سه پارامتر به عنوان متغیر در نظر گرفته شده که عبارتند از: مقاومت فشاری بتن،

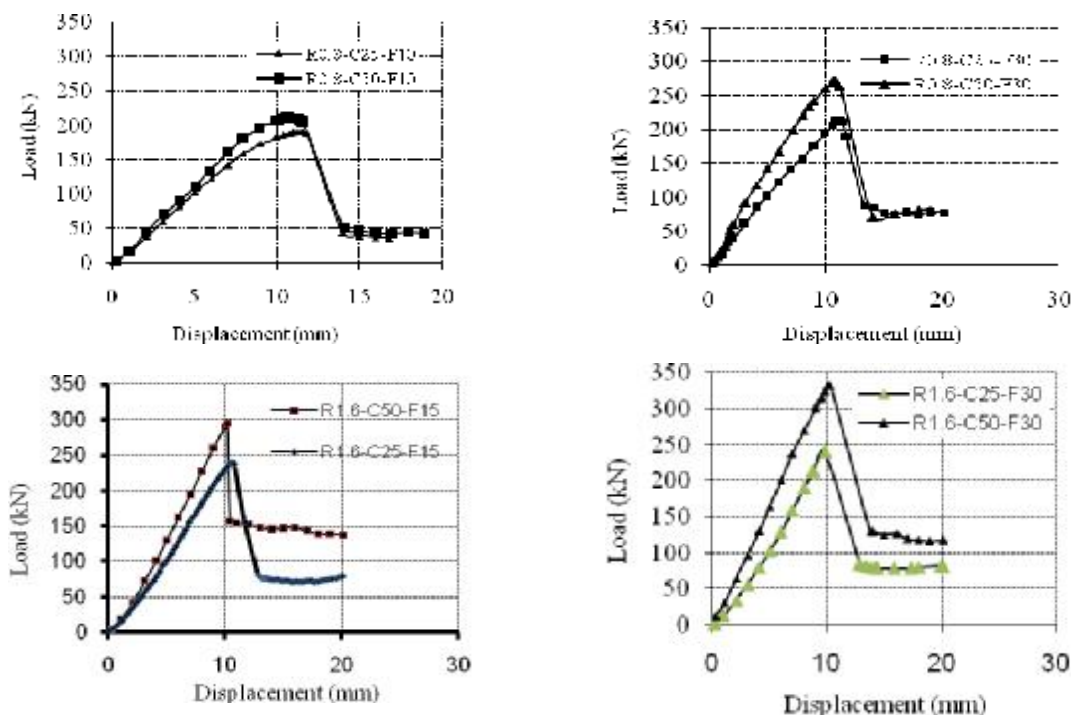
جدول ۲: مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی.

| شماره نمونه | عرض الیاف | f_c^* (MPa) | ρ_s % | ρ_{eq}/ρ_s |
|--------------|-----------|---------------|------------|--------------------|
| R0.8-C25-F0 | - | 22.7 | 0.84 | 1.00 |
| R1.6-C25-F0 | - | 22.7 | 1.59 | 1.00 |
| R0.8-C25-F10 | 100mm | 22.7 | 0.84 | 1.14 |
| R0.8-C25-F30 | 300mm | 22.7 | 0.84 | 1.32 |
| R1.6-C25-F15 | 150mm | 22.7 | 1.59 | 1.05 |
| R1.6-C25-F30 | 300mm | 22.7 | 1.59 | 1.10 |
| R0.8-C50-F10 | 100mm | 45.3 | 0.84 | 1.24 |
| R0.8-C50-F30 | 300mm | 45.3 | 0.84 | 1.53 |
| R1.6-C50-F15 | 150mm | 45.3 | 1.59 | 1.11 |
| R1.6-C50-F30 | 300mm | 45.3 | 1.59 | 1.19 |

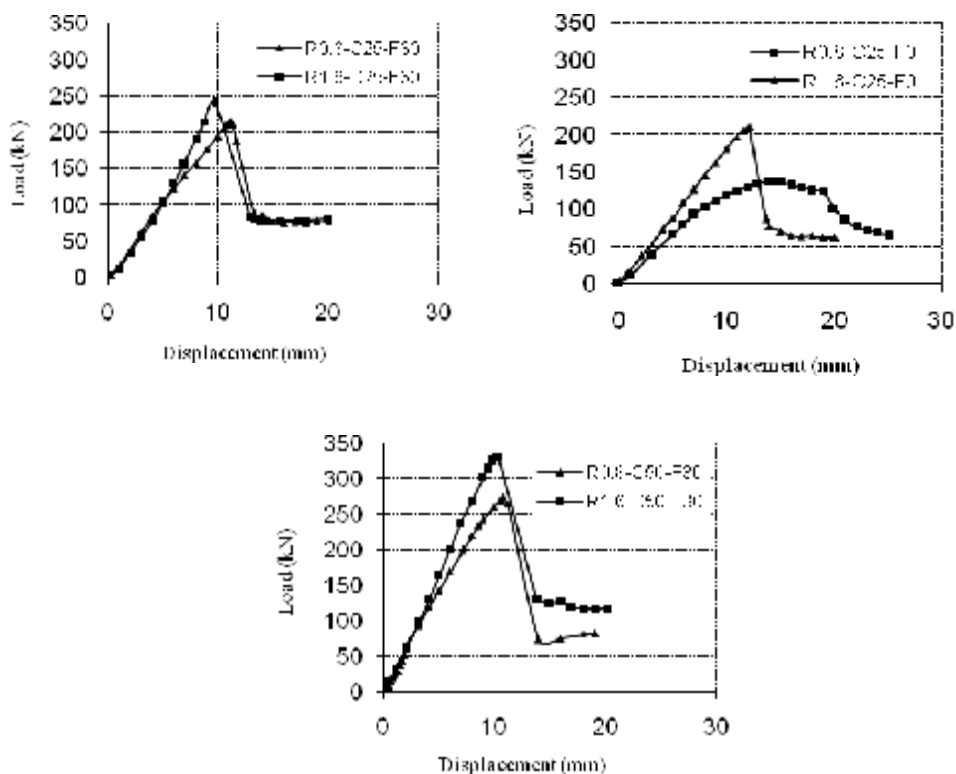
نتایج آزمایش

حالت شکست کلیه نمونه‌ها شامل نمونه‌های کنترل و نمونه‌های تقویت شده از نوع برش پانچینگ بوده است. برحسب مقدار تقویت، حالت شکست از نوع برش پانچینگ خمشی یا برش پانچینگ خالص می‌باشد. در دال‌های با درصد آرماتور خمشی بالا گسیختگی از نوع برش پانچینگ خالص با تغییر مکان کم و در دال‌های با درصد آرماتور کم گسیختگی از نوع خمشی با تغییر مکان زیاد می‌باشد [۷]. منطقه گسیختگی در کلیه دال‌ها در فاصله ۲ تا ۳ برابر ضخامت کل دال قرار داشت.

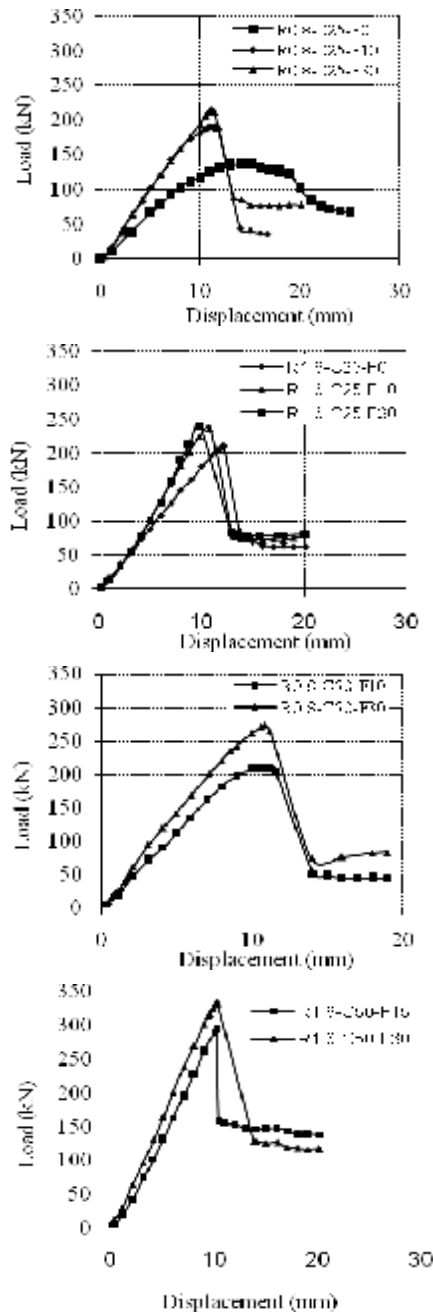
حالت شکست نمونه R0.8-C25-F0 از نوع پانچینگ خمشی بود. وقوع این حالت شکست به دلیل اینست که میزان مقاومت برشی متناظر با گسیختگی پانچینگ خمشی کمتر از ظرفیت پانچینگ خالص می‌باشد. در نمونه R1.6-C25-F0 درصد آرماتور حدوداً ۲ برابر نمونه قبلی بود. در این نمونه شکست از نوع برش پانچینگ خالص بوده و به طور کاملاً ناگهانی رخ داد. در شکل (۳) حالت شکست یکی از نمونه‌های کنترل به همراه رابطه‌های بار تغییر مکان هر دو نمونه دیده می‌شود. در کلیه نمونه‌های تقویت شده زمانی که تغییر مکان وسط دال به حدود ۸۰ درصد تغییر مکان پانچینگ می‌رسید، صداهایی که ناشی از



شکل ۴: تأثیر مقاومت فشاری بتن بر ظرفیت پانچینگ دال‌های تخت.



شکل ۵: تأثیر آرماتورخمشی بر ظرفیت برش پانچینگ دال‌های تخت.



شکل ۶: تأثیر مقدار صفحات CFRP بر ظرفیت برش پانچینگ دال‌های تخت.

د- تأثیر پارامتر ρ_{eq} / ρ_s بر ظرفیت برش پانچینگ دال‌های تخت

به منظور محاسبه پارامتر ρ_{eq} از رابطه (۷) ارایه شده توسط چنگ و یان لی [۱] استفاده شده است. در جدول (۳) مقادیر پارامتر ρ_{eq} / ρ_s و نتایج حاصل از آزمایشات ارایه شده است. همانگونه که در جدول (۳) دیده می‌شود دامنه

میزان آرماتور خمشی و مقدار مصالح FRP. در ادامه به بررسی تأثیر هریک از این پارامترها بر ظرفیت برش پانچینگ پرداخته می‌شود.

الف- تأثیر مقاومت فشاری بر ظرفیت برش پانچینگ دال‌های تخت

در شکل (۴) نمودارهای بار- تغییرمکان نمونه‌های مشابه، با مقاومت فشاری متفاوت مقایسه شده است. همانگونه که در شکل (۴) دیده می‌شود، افزایش مقاومت فشاری بتن در دال‌های قویت شده با صفحات CFRP منجر به افزایش ظرفیت برش پانچینگ به خصوص در نمونه‌های با نسبت تقویتی بالا می‌شود. علاوه بر این شکل (۴) نشان دهنده افزایش سختی دال‌ها در اثر افزایش مقاومت فشاری آنها می‌باشد.

ب- تأثیر آرماتور خمشی بر ظرفیت برش پانچینگ دال‌های تخت

نمودارهای بار- تغییرمکان نمونه‌هایی که فقط از نظر مقدار آرماتور خمشی متفاوت هستند مورد بررسی قرار می‌گیرند. در شکل (۵) مقایسه میان نمودار بار- تغییرمکان نمونه‌های مشابه، با مقدار آرماتور خمشی متفاوت انجام شده است. همان‌گونه که در شکل (۵) دیده می‌شود، افزایش آرماتور خمشی منجر به افزایش ظرفیت برش پانچینگ و سختی دال‌ها شده است. همچنین این افزایش منجر به تغییر حالت شکست در نمونه R0.8-C25-F0 از حالت پانچینگ خمشی به پانچینگ خالص در نمونه R1.6-C25-F0 شده است.

ج- تأثیر مقدار تقویت CFRP بر ظرفیت برش پانچینگ دال‌های تخت

نمودارهای بار- تغییرمکان نمونه‌هایی که فقط از نظر مقدار ورق تقویتی CFRP متفاوت هستند مورد بررسی قرار می‌گیرند. در شکل (۶) مقایسه میان نمودار بار- تغییرمکان نمونه‌های با مقدار CFRP متفاوت انجام شده است.

همان‌طور که در شکل (۶) دیده می‌شود، افزایش مقدار CFRP مورد استفاده برای تقویت دال‌ها منجر به افزایش ظرفیت برش پانچینگ دال‌ها می‌گردد. لازم به ذکر است که این تأثیر رابطه خطی با مقدار CFRP استفاده شده ندارد.

جدول ۳: مقادیر پارامتر ρ_{eq}/ρ_s و نتایج حاصل از آزمایش ها.

| شماره نمونه | $\frac{\rho_{eq}}{\rho_s}$ | $\frac{V_{u,test}}{V_{u,control}}$ |
|--------------|----------------------------|------------------------------------|
| R0.8-C25-F0 | 1.00 | 1.00 |
| R1.6-C25-F0 | 1.00 | 1.00 |
| R0.8-C25-F10 | 1.14 | 1.38 |
| R0.8-C25-F30 | 1.32 | 1.56 |
| R1.6-C25-F15 | 1.05 | 1.14 |
| R1.6-C25-F30 | 1.10 | 1.17 |
| R0.8-C50-F10 | 1.24 | 1.52 |
| R0.8-C50-F30 | 1.53 | 1.98 |
| R1.6-C50-F15 | 1.11 | 1.40 |
| R1.6-C50-F30 | 1.19 | 1.58 |

همان طور که در جدول (۴) دیده می شود، نتایج حاصل از محاسبات بر مبنای روابط آیین نامه ها از دقت کافی برخوردار نیستند. میانگین نسبت $V_{u,test}/V_{u,predict}$ برای روابط آیین نامه های ACI 318 و BS 8110 و JSCE به ترتیب برابر $1/87$ و $1/39$ و $1/59$ با انحراف معیارهای $0/40$ و $0/18$ و $0/24$ می باشد. در میان این روابط، رابطه آیین نامه BS8110 از دقت نسبی بهتری برخوردار است و رابطه ACI 318 دارای کمترین دقت می باشد که این امر به دلیل این است که در رابطه آیین نامه ACI 318 از تأثیر آرماتور خمشی صرف نظر شده است.

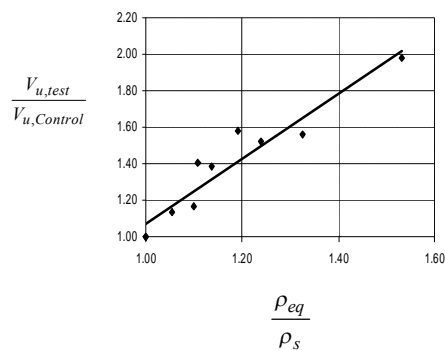
به منظور اصلاح رابطه آیین نامه BS 8110 ابتدا مقادیر محاسباتی $V_{u,normalize}$ با تقسیم V_u آیین نامه ای بر $\sqrt[3]{\rho_{eq}}$ نرمالیزه و محاسبه شده و سپس نمودار $V_{u,test}/V_{u,normalize}$ در مقابل ρ_{eq} برای نتایج آزمایشات این تحقیق و آزمایش های چنگ و یان لی [۱،۸] رسم گردید. نتایج حاصل از این عملیات در نمودار شکل (۸) ارائه شده است. نتایج آزمایش های چنگ و یان لی در جدول (۵) ملاحظه می شود.

تغییرات نسبت ρ_{eq}/ρ_s در محدوده ۱ تا $1/53$ قرار دارد و افزایش مقاومت نمونه های تقویت شده نسبت به نمونه های کنترل در محدوده $1/14$ تا $1/98$ می باشد. حداکثر افزایش ظرفیت برابر $1/98$ مربوط به نسبت ρ_{eq}/ρ_s برابر با $1/53$ می باشد. در شکل (۷) نسبت مقاومت پانچینگ آزمایشگاهی نمونه های مختلف به مقاومت نمونه های کنترل در برابر پارامتر ρ_{eq}/ρ_s ارائه شده است. ملاحظه می شود که با افزایش نسبت ρ_{eq}/ρ_s مقدار مقاومت برش پانچینگ افزایش یافته است.

مقایسه نتایج آزمایشات با مقادیر محاسباتی آیین نامه ها

در این بخش نتایج حاصل از آزمایشات با نتایج حاصل از محاسبه ظرفیت برش پانچینگ بر مبنای روابط آیین نامه ها مقایسه شده است.

روابط مورد استفاده در این بخش بر اساس آیین نامه های آمریکا ACI318-05، انگلستان BS8110-85 و ژاپن JSCE-86 می باشند. لازم به ذکر است که استفاده مستقیم از روابط آیین نامه ها به منظور محاسبه ظرفیت برش پانچینگ دال های تقویت شده با CFRP امکان پذیر نمی باشد. به منظور اصلاح روابط آیین نامه ها و کاربرد آنها جهت محاسبه ظرفیت برش پانچینگ دال های تقویت شده با استفاده از CFRP باید دو متغیر اصلی عمق مؤثر و نسبت آرماتور خمشی مؤثر تعریف شود. به این منظور از روابط (۶) و (۷) ارائه شده توسط چنگ و یان لی [۱] استفاده می شود. نتایج حاصل از محاسبات آیین نامه ای بر مبنای روابط (۶) و (۷) در جدول (۴) ارائه شده است.



شکل ۷: رابطه $\frac{V_{u,test}}{V_{u,control}}$ بر حسب $\left(\frac{\rho_{eq}}{\rho_s}\right)$ برای نمونه های مختلف.

جدول ۴: نتایج حاصل از آزمایش‌ها و مقایسه آن با روابط آیین‌نامه‌ها.

| $V_{u,test} / V_{u,predict}$ | | | $V_{u,predict} kN$ | | | $V_{u,test} kN$ | شماره نمونه | |
|------------------------------|------|------|--------------------------|-------|-------|-----------------|--------------|--|
| JSCE | BS | ACI | JSCE | BS | ACI | | | |
| 1.35 | 1.08 | 1.34 | 102.0 | 128.3 | 103.1 | 138.0 | R0.8-C25-F0 | |
| 1.81 | 1.43 | 2.19 | 116.3 | 147.1 | 95.7 | 210.0 | R1.6-C25-F0 | |
| 1.64 | 1.31 | 1.70 | 116.7 | 145.8 | 112.1 | 191.0 | R0.8-C25-F10 | |
| 1.63 | 1.31 | 1.79 | 132.2 | 164.4 | 120.0 | 215.0 | R0.8-C25-F30 | |
| 1.91 | 1.52 | 2.38 | 125.0 | 157.6 | 100.6 | 239.0 | R1.6-C25-F15 | |
| 1.86 | 1.48 | 2.35 | 131.6 | 165.4 | 104.1 | 245.0 | R1.6-C25-F30 | |
| 1.18 | 1.20 | 1.27 | 177.3 | 175.4 | 165.0 | 210.0 | R0.8-C50-F10 | |
| 1.32 | 1.34 | 1.53 | 207.0 | 203.6 | 178.2 | 273.0 | R0.8-C50-F30 | |
| 1.58 | 1.58 | 2.00 | 187.2 | 186.7 | 147.7 | 295.0 | R1.6-C50-F15 | |
| 1.64 | 1.65 | 2.14 | 202.1 | 200.9 | 155.0 | 332.0 | R1.6-C50-F30 | |
| 1.59 | 1.39 | 1.87 | Mean Value | | | | | |
| 0.24 | 0.18 | 0.40 | Coefficient of Variation | | | | | |

نمونه استوانه‌ای بتن برای نمونه‌های سری C1 و C2 به ترتیب برابر ۱۶/۹ و ۳۴/۴ مگاپاسکال می‌باشد.

همان‌طور که می‌دانیم در رابطه آیین‌نامه ACI 318 از پارامتر ρ صرف‌نظر شده است. بر این اساس به منظور اصلاح این رابطه نمودار $V_{u,test} / V_{u,ACI}$ در برابر مقادیر ρ_{eq} نمونه‌های آزمایشگاهی در شکل (۹) رسم گردید. در ترسیم این نمودار از نتایج آزمایشات این تحقیق و نتایج آزمایش‌های چنگ و یان لی [۱] استفاده شده است.

بنابراین با توجه به رابطه شکل (۹) چنانچه رابطه آیین‌نامه ACI 318 در عبارت $(26.55\rho_{eq}^{0.62})$ ضرب شود، نتایج حاصل از دقت بسیار بیشتری نسبت به نتایج آزمایشات برخوردار خواهند بود. رابطه جدید برای دال با ستون‌های مربعی داخلی به صورت زیر خواهد بود:

$$V_{u,proposed}^{ACI318} = 8.81\sqrt{f'_c b_0 d \rho_{eq}^{0.62}} \quad (11)$$

در جدول (۶) نتایج آزمایشات با مقادیر محاسباتی رابطه پیشنهادی براساس آیین‌نامه ACI 318 مقایسه شده است. مطابق با نتایج حاصل میانگین مقادیر $\frac{V_{u,test}}{V_{u,proposed}^{ACI318}}$ برای رابطه اصلاح شده برابر ۱/۰۱ با انحراف معیار ۰/۱۳ می‌باشد.

با توجه به شکل (۸) می‌توان مقدار V_u اصلاح شده را به صورت زیر به دست آورد.

$$V_u = V_{u,normalize} (9.36 \rho_{eq}^{0.78}) \quad (9)$$

در نتیجه رابطه اصلاح شده آیین‌نامه BS 8110 به صورت زیر خواهد بود:

$$V_{u,proposed}^{BS8110} = 34.32.4 \sqrt{\frac{400}{d}} \sqrt[3]{\frac{f_{cu}}{25}} U_d \rho_{eq}^{0.78} \quad (10)$$

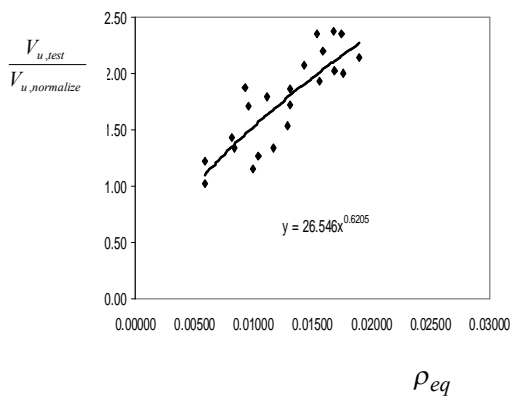
در صورت استفاده از رابطه (۱۰) جهت محاسبه ظرفیت برش پانچینگ نتایج دقیق‌تری حاصل می‌شود. در جدول (۵) مقایسه میان نتایج آزمایش‌ها و محاسبه‌ها بر مبنای رابطه (۱۰) ارائه شده است.

همان‌طور که در جدول (۵) دیده می‌شود استفاده از معادله (۱۰) در محاسبه ظرفیت برش پانچینگ منجر به مقادیر $V_{u,test} / V_{u,proposed}$ با میانگین ۰/۹۹ و انحراف معیار ۰/۱۱ می‌شود.

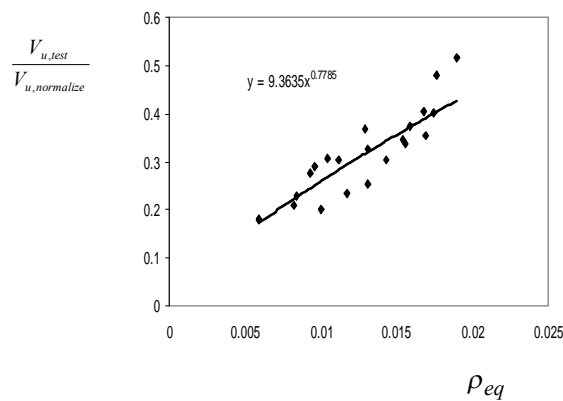
نامگذاری نمونه‌های چنگ و یان لی (جدول ۵) بر اساس ۳ پارامتر اصلی نسبت فولاد و مقاومت فشاری بتن و تعداد لایه‌های GFRP استفاده شده به منظور تقویت است. مقدار ρ_s در نمونه‌های سری SR1 و SR2 به ترتیب برابر ۰/۰۵۹ و ۰/۰۱۳۱ می‌باشد. مقاومت فشاری

جدول ۵: مقایسه نتایج آزمایشات و مقادیر محاسباتی رابطه اصلاح شده BS 8110.

| گروه | شماره نمونه | $V_{u,test}, kN$ | $V_{u,proposed}^{BS8110}, kN$ | $\frac{V_{u,test}}{V_{u,proposed}^{BS8110}}$ |
|--------------------------|--------------|------------------|-------------------------------|--|
| این پژوهش | R0.8-C25-F0 | 138 | 139.17 | 0.96 |
| | R1.6-C25-F0 | 210 | 209.67 | 0.96 |
| | R0.8-C25-F10 | 191 | 167.14 | 1.11 |
| | R0.8-C25-F30 | 215 | 201.22 | 1.03 |
| | R1.6-C15-F15 | 239 | 229.76 | 1.00 |
| | R1.6-C25-F30 | 245 | 245.49 | 0.96 |
| | R0.8-C50-F10 | 210 | 208.51 | 0.98 |
| | R0.8-C50-F30 | 273 | 265.22 | 0.99 |
| | R1.6-C50-F15 | 295 | 278.13 | 1.02 |
| | R1.6-C50-F30 | 332 | 308.70 | 1.03 |
| چنگ و یان لی [1] | SR1-C1-F0 | 103.9 | 97.08 | 1.05 |
| | SR1-C1-F1 | 148.0 | 152.58 | 0.94 |
| | SR1-C1-F2 | 202.1 | 174.64 | 1.12 |
| | SR1-C2-F0 | 123.8 | 116.35 | 1.04 |
| | SR1-C2-F1 | 180.0 | 226.18 | 0.77 |
| | SR1-C2-F2 | 218.8 | 264.83 | 0.80 |
| | SR2-C1-F0 | 146.1 | 178.21 | 0.79 |
| | SR2-C1-F1 | 189.6 | 205.75 | 0.89 |
| | SR2-C1-F2 | 224.2 | 227.17 | 0.95 |
| | SR2-C2-F0 | 225.7 | 213.49 | 1.19 |
| SR2-C2-F1 | 263.9 | 276.78 | 1.07 | |
| SR2-C2-F2 | 289.4 | 306.66 | 1.06 | |
| Mean Value | | | | 0.99 |
| Coefficient of Variation | | | | 0.11 |



شکل ۹: رابطه $V_{u,test}/V_{u,normalized}$ برحسب ρ_{eq} بر مبنای آیین نامه ACI 318



شکل ۸: نمودار $V_{u,test}/V_{u,normalized}$ برحسب ρ_{eq} بر مبنای آیین نامه BS 8110

جدول ۶ مقایسه نتایج آزمایش های و مقادیر محاسباتی رابطه اصلاح شده ACI 318

| گروه | شماره نمونه | $V_{u,test}, kN$ | $V_{u,proposed}^{ACI318}, kN$ | $\frac{V_{u,test}}{V_{u,proposed}^{ACI318}}$ |
|--------------------------|--------------|------------------|-------------------------------|--|
| این پژوهش | R0.8-C25-F0 | 138 | 141.18 | 0.98 |
| | R1.6-C25-F0 | 210 | 194.43 | 1.08 |
| | R0.8-C25-F10 | 191 | 166.29 | 1.15 |
| | R0.8-C25-F30 | 215 | 195.71 | 1.10 |
| | R1.6-C15-F15 | 239 | 211.33 | 1.13 |
| | R1.6-C25-F30 | 245 | 224.37 | 1.09 |
| | R0.8-C50-F10 | 210 | 258.04 | 0.81 |
| | R0.8-C50-F30 | 273 | 318.07 | 0.86 |
| | R1.6-C50-F15 | 295 | 319.85 | 0.92 |
| | R1.6-C50-F30 | 332 | 351.13 | 0.95 |
| چنگ و یان [۱] | SR1-C1-F0 | 103.9 | 93.15 | 1.12 |
| | SR1-C1-F1 | 148.0 | 139.20 | 1.06 |
| | SR1-C1-F2 | 202.1 | 156.91 | 1.29 |
| | SR1-C2-F0 | 123.8 | 132.92 | 0.93 |
| | SR1-C2-F1 | 180.0 | 239.27 | 0.75 |
| | SR1-C2-F2 | 218.8 | 274.01 | 0.80 |
| | SR2-C1-F0 | 146.1 | 152.81 | 0.96 |
| | SR2-C1-F1 | 189.6 | 173.91 | 1.09 |
| | SR2-C1-F2 | 224.2 | 190.26 | 1.18 |
| | SR2-C2-F0 | 225.7 | 218.05 | 1.04 |
| Mean Value | | | | 1.01 |
| Coefficient of Variation | | | | 0.13 |

نتیجه گیری

در این تحقیق تقویت برش پانچینگ دال های تخت با استفاده از صفحات پلیمری-الیافی CFRP بررسی شد. در قسمت آزمایشگاهی ۱۰ نمونه دال ساخته و آزمایش گردید. نتایج آزمایش های سایر محققین نیز جمع آوری و تحلیل شد. سپس نتایج حاصل از آزمایش ها با نتایج حاصل از روابط آیین نامه ها مقایسه گردید. برای محاسبه برش پانچینگ آیین نامه ای از تعاریف عمق مؤثر معادل و نسبت آرماتور خمشی معادل (شامل آرماتور خمشی و صفحات پلیمری CFRP) استفاده شد. براساس نتایج آزمایشگاهی و مقایسه آنها با روابط محاسباتی آیین نامه ای نتایج زیر به دست آمد:

۱- استفاده از صفحات CFRP به عنوان تقویت خمشی منجر به افزایش ظرفیت برش پانچینگ در دال های تخت می گردد. بر اساس نتایج آزمایشگاهی این تحقیق مقاومت برش پانچینگ نمونه های مختلف تقویت شده ۱/۱۴ تا ۱/۹۸ برابر نمونه های کنترلی گردید.

۲- به منظور استفاده از روابط آیین نامه ها جهت محاسبه ظرفیت برش پانچینگ دال های تقویت شده با استفاده از صفحات CFRP از تعاریف نسبت آرماتور خمشی معادل ρ_{eq} به جای ρ_s و عمق مؤثر معادل d_{eq} به جای d استفاده شد. با استفاده از این پارامترها پیشنهادی برای اصلاح روابط آیین نامه های ACI 318 و BS 8110 ارائه گردید.

۳- با استفاده از روابط اصلاح شده آیین نامه BS 8110 مقدار میانگین $V_{u,test}/V_{u,proposed}$ برابر با ۰/۹۹ با انحراف معیار ۰/۱۱ شد. این مقادیر برای رابطه اصلاح شده ACI 318 برابر با مقدار میانگین ۱/۰۱ با انحراف معیار ۰/۱۳ می باشد. با توجه به اعداد فوق ملاحظه می شود که رابطه اصلاح شده مقاومت برش پانچینگ را با دقت بیشتری نسبت به روابط اصلی آیین نامه ای برآورد می کند.

۴- با استفاده از نتایج نمونه های مختلف آزمایشگاهی روابط تئوری ارائه شده توسط سایر محققین برای

۵- در هیچ یک از نمونه‌ها صفحات CFRP دچار گسیختگی کششی نشدند. این امر به دلیل مقاومت کششی زیاد الیاف می‌باشد. در بعضی از نمونه‌ها الیاف در راستای عرضی دچار پارگی موضعی شدند.

دال‌های تقویت شده با تعاریف نسبت آرماتور خمشی معادل و عمق معادل مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه روابط پیشنهادی با نتایج آزمایش نشان می‌دهند که استفاده از تعاریف فوق برای پیش بینی مقاومت برش پانچینگ دال‌های تقویت شده مناسب می‌باشد.

مراجع

- 1 - Cheng, C. C. and Li, C. Y. (2005). "Punching shear strength of reinforced concrete slabs strengthened with glass fiber-reinforced polymer laminates." *ACI Structural Journal*, Vol. 102, No. 4, PP. 535-542.
- 2 - Ebead, U. and Marzouk, H. (2004). "Fiber-reinforced polymer strengthening of Two-way slabs." *ACI Structural Journal*, Vol. 101, No. 5, PP. 650-659.
- 3 - Harajli, M. H. and Soudki, K. A. (2003). "Shear strengthening of interior slab-column connections using carbon fiber-reinforced polymer sheets." *Journal of Composites for Construction ASCE*, Vol. 7, No. 2, PP. 145-153.
- 4 - ACI Committee 318, (2005). "Building code requirements for structural concrete (ACI 318-05) and commentary (318R-05)." *American Concrete Institute*, Farmington Hills, Mich.
- 5 - British Standards Institution, (2002). *Structural use of concrete: Part 1, code of practice for design and construction*. BS 8110, London, England.
- 6 - Japan Society of Civil Engineers, (1986). "Standard specifications for design and construction of concrete structures, Part 1, design." *JSCE*, Tokyo, Japan.
- 7 - Marzouk, H. and Hussein, A. (1991). "Experimental investigation on the behavior of high-strength concrete slabs." *ACI Structural Journal*, Vol. 88, No. 6, PP. 701-713.
- 8 - Esfahani, M. R., Moradi, V. (2006). "Discussion on punching shear strength of reinforced concrete slabs strengthened with glass fiber-reinforced polymer laminates." Paper by Cheng, C. C. and Li, C. Y. (2005). *ACI Structural Journal*, Vol. 103, No. 3, PP. 467-469.
- 9 - Moe, J. (1961). "Shearing strength of reinforced concrete slabs and footings under concentrated loads." *Journal of Portland cement Association*, Research and Development Laboratories, Bulletin, No D47, PP. 130.