

ظرفیت برش پانچینگ دال بتنی دو طرفه با الیاف فولادی

Research Note

امیرمحمد خواجه محمودآبادی (کارشناس ارشد)

محمدرضا اصفهانی* (استاد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی، مشهد

هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی افزایش مقاومت برشی پانچینگ دال‌های تخت دوطرفه با استفاده از الیاف فولادی است. یکی از مشکل‌های موجود در دال‌های تخت، پدیده برش پانچینگ است و این پدیده در دال‌های با ضخامت کم که امکان اجرای خاموت وجود ندارد، جدی‌تر می‌شود. با افزودن الیاف می‌توان این مشکل را برطرف کرد. در نوشتار حاضر، ۸ نمونه دال مربعی با ابعاد $1000 \times 1000 \times 100$ میلی‌متر ساخته و آزمایش شده است. پارامترهای متغیر در این دال‌ها درصد الیاف و درصد آرماتورکشی است. درصد الیاف به کار رفته در پژوهش حاضر شامل $0/5$ ، 1 و $1/5$ درصد و نسبت آرماتورهای خمشی استفاده شده $0/45$ ٪ و $1/2$ ٪ است. از جمله نتایج مهم پژوهش حاضر اینکه افزودن $1/5$ ٪ الیاف بسته به نسبت آرماتور موجب افزایش 34 و 64 درصدی ظرفیت برش پانچینگ می‌شود.

am.mahmoodabadi@gmail.com
esfahani@um.ac.ir

واژگان کلیدی: بتن الیافی، ظرفیت برش پانچینگ، دال تخت.

۱. مقدمه

برش پانچینگ دارد و همچنین ترک‌ها در اطراف ستون‌بیشتر از نواحی دیگر است. مطالعاتی در سال 2011 ،^[۲] نیز بر روی 12 نمونه دال (۹ نمونه با الیاف و ۳ نمونه فاقد الیاف) با تکیه‌گاه ساده انجام شد که شامل متغیرهای: حجم الیاف فولادی، ابعاد دال، نسبت آرماتور برشی و رفتار و مقاومت دال در برابر ترک‌های برش پانچینگ بود. پس از انجام آزمایش‌ها نتیجه گرفته شد که افزایش حجم الیاف از $0/4$ به $0/8$ درصد (در نمونه‌های 900×900 میلی‌متر)، موجب افزایش ظرفیت برش پانچینگ از 16 تا 40 درصد و کاهش 71 درصدی عرض ترک‌ها می‌شود. از کمبودهای پژوهش‌های گذشته می‌توان به در نظر نگرفتن اثر درصد آرماتور خمشی و همچنین نسبت کم الیاف فولادی در بتن دال اشاره کرد. همچنین برخی دیگر از پژوهشگران،^[۳] مدل‌هایی برای تخمین ظرفیت برش پانچینگ دال تخت با الیاف فولادی ارائه کردند. در سال‌های 2008 و 2012 ،^[۴] نیز مطالعاتی بر روی دال‌های بتن‌آرمه فاقد خاموت و همچنین دارای خاموت صورت گرفت، ولی تأثیر الیاف فولادی در آن‌ها بررسی نشد. همچنین گاندالینی^۱ و همکاران (2009)،^[۸] در مطالعات‌شان بر روی ظرفیت برشی پانچینگ دال‌ها با نسبت آرماتورهای کم، از الیاف فولادی استفاده نکردند.

۲. کار آزمایشگاهی

۲.۱. نمونه‌های آزمایشگاهی

در پژوهش حاضر، ۸ نمونه دال بتنی با ضخامت 100 میلی‌متر و ابعاد 1000×1000

برخی از ویژگی‌های بتن ساده، از جمله: مقاومت کششی، شکل‌پذیری و جذب انرژی کم سبب شده است که مطالعاتی روی بتن صورت گیرد تا با اضافه کردن حجم کمی ($0/5$ تا 2 درصد حجم کل) از الیاف، خواص آن‌ها بهبود یابد. جنس الیاف و اندازه‌ی آن‌ها به نوع مصرف بتن و مقاومت کششی موردنظر بستگی دارد. الیاف می‌تواند شیشه‌یی، فلزی و یا پلیمری باشد و اندازه‌ی آن‌ها به طور معمول 30 الی 50 میلی‌متر است. استفاده از بتن الیافی موجب افزایش مقاومت کششی، برشی، خمشی، مقاومت بسیار عالی در برابر ضربه، مقاومت زیاد در برابر خستگی و افزایش شکل‌پذیری بتن می‌شود. وجود الیاف همچنین سبب کاهش ترک‌های انقباضی در زمان اولیه بتن‌ریزی می‌شود.

برخی پژوهشگران (1995)،^[۱] در پژوهشی روی 12 عدد دال تخت، عمق دال، و نسبت آرماتورهای برشی و الیاف را به عنوان متغیر انتخاب کردند. ابعاد نمونه‌ها 860×860 میلی‌متر و ضخامت دال‌ها 50 و 65 میلی‌متر بود. آنها نتیجه گرفتند که افزودن $1/5$ ٪ الیاف موجب افزایش 40 ٪ برش پانچینگ می‌شود. از معایب پژوهش مذکور می‌توان به ابعاد نمونه‌ها و ضخامت کم دال‌ها اشاره کرد. همچنین پژوهشگران دیگری (2006)،^[۲] پژوهش‌هایی روی 12 دال که در آن‌ها از الیاف فولادی استفاده شده بود، انجام دادند و شعاع دال دایره‌یی را 1500 میلی‌متر و ضخامت آن را 120 میلی‌متر در نظر گرفتند. آنها نتیجه گرفتند که مقاومت فشاری بتن نقش عمده‌یی در ظرفیت

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت $1396/2/24$ ، اصلاحیه $1396/7/26$ ، پذیرش $1396/8/1$.

DOI:10.24200/J30.2019.20920

Archive of SID

در شکل ۱، ابعاد دال‌ها و نحوه‌ی آرایش و قرارگیری میلگردها مشاهده می‌شود. طرح اختلاط استفاده شده در ساخت نمونه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. در طرح‌های ساخته شده برای بتن از شن با اندازه‌ی بیشینه‌ی سنگ‌دانه‌ی ۱۲٫۵ میلی‌متر استفاده شده است. بتن ساخته شده بعد از ریخته شدن در قالب‌های استوانه‌یی ۳۰ × ۱۵ سانتی‌متر متراکم و بعد از ۲۴ ساعت قالب‌برداری شدند و تحت عمل‌آوری قرار گرفتند. مقاومت فشاری طرح اختلاط نمونه‌ها ۴۰ MPa و اسلامپ آن ۷۰ mm بود.

فوق روان‌کننده‌ی استفاده شده در طرح اختلاط از نوع P۱۰-۳R و محصول شیمی ساختمان است. در جدول‌های ۳ و ۴، به ترتیب مشخصات مکانیکی آرماتورها و الیاف فولادی ارائه شده‌اند.

۲.۲. نحوه‌ی انجام آزمایش

پس از گذشت زمان ۲۸ روز از ساخت نمونه‌ها، آزمایش‌ها انجام شدند. اعمال بار فشاری به دال‌ها با استفاده از جک فشاری موجود در آزمایشگاه بتن صورت پذیرفته است. سیستم اعمال بار ذکر شده در شکل ۲ مشاهده می‌شود. جهت ایجاد تکیه‌گاه ۴ طرف ساده برای دال، از یک قاب فولادی ساخته شده از پروفیل IPE۲۰ با ابعاد محور تا محور ۹۰۰ × ۹۰۰ میلی‌متر استفاده شد که در شکل ۳ مشاهده می‌شود. در مرکز بال‌های وجه بالایی قاب مذکور، میلگردهای فولادی به‌عنوان تکیه‌گاه غلطکی

میلی‌متر که شامل ۲ دال بتن معمولی و ۶ دال بتن الیافی بودند، ساخته و آزمایش شدند. نام‌گذاری نمونه‌ها بر مبنای دو متغیر اصلی در دال‌ها انجام پذیرفته است. حرف R نشان‌دهنده‌ی درصد آرماتور دال است. پارامتر $R_{\%}$ ، به معنای نسبت آرماتور ۴۵/۰٪ و $R_{\%}$ به معنای نسبت آرماتور ۲/۱٪ است. متغیر دوم، درصد الیاف است. به طور مثال $F_{\%}$ به معنای نمونه با الیاف ۵/۰٪ است. مشخصات نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

اسلامپ نمونه‌های فاقد الیاف مطابق استاندارد ASTM C۱۴۳^[۹] و نمونه‌های دارای الیاف مطابق استاندارد ASTM C۹۹۵^[۱۰] (اسلامپ معکوس) اندازه‌گیری شد که در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به ابعاد نسبتاً کوچک نمونه‌ها و از طرفی تمایل به استفاده از بتن‌های با مقاومت بیش از ۳۰ مگاپاسکال در صنعت روز بتن و پژوهش‌های اخیر، مقاومت فشاری بتن ۴۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. این لازم به ذکر است که اختلاف در مقاومت فشاری نمونه‌ها به دلیل انجام بتن‌ریزی در روزهای مختلف و تفاوت در درصد الیاف در نمونه‌هاست. در پژوهش حاضر، نسبت آرماتورها به نحوه‌ی انتخاب شد که نیمی از نمونه‌ها دچار شکست پانچینگ و نیمی دیگر دچار شکست خمشی شوند. برای تأمین نسبت آرماتور در دال‌ها از ۴ آرماتور $\phi 12$ برای نسبت ۴۵/۰٪ و از ۹ آرماتور $\phi 12$ برای نسبت ۲/۱٪ در هر راستا استفاده شد. به منظور شبیه‌سازی اتصال دال - ستون، یک ستون مربعی با ابعاد ۲۰۰ × ۲۰۰ و به عمق ۱۵۰ میلی‌متر در وسط دال ساخته شد (شکل ۱).

جدول ۱. مشخصات دال‌های ساخته شده.

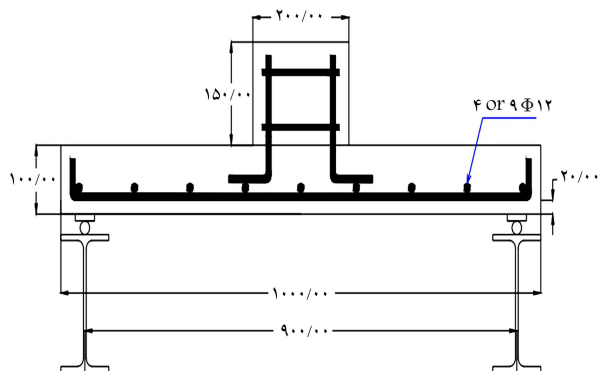
نام نمونه	نسبت آرماتور (%)	نوع بتن اسلامپ (mm/s)	f'_c (MPa)
$R_{\%}F_{\%}$	۴۵/۰	معمولی ۷۰ mm	۴۰
$R_{\%}F_{\%}$	۲/۱	معمولی ۷۰ mm	۳۹
$R_{\%}F_{\%}$	۴۵/۰	الیافی ۲۴°	۴۰
$R_{\%}F_{\%}$	۲/۱	الیافی ۲۶°	۴۵
$R_{\%}F_{\%}$	۴۵/۰	الیافی ۲۶°	۴۶
$R_{\%}F_{\%}$	۲/۱	الیافی ۲۸°	۴۸
$R_{\%}F_{\%}$	۴۵/۰	الیافی ۲۵°	۴۵
$R_{\%}F_{\%}$	۲/۱	الیافی ۲۳°	۳۹



شکل ۲. دستگاه اعمال بار.



شکل ۳. قاب فولادی استفاده شده به‌عنوان تکیه‌گاه دال.



شکل ۱. مشخصات هندسی نمونه‌های آزمایشگاهی.

جدول ۲. طرح اختلاط بتن.

اسلامپ (mm)	چگالی بتن (kg/m^3)	فوق روان (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	شن (kg/m^3)	سیمان (kg/m^3)	w/c
۷۰	۲۴۱۸	۲٫۵	۹۵۰	۸۲۰	۳۸۰	۰٫۴۱

جدول ۵. نتایج حاصل از شکست نمونه‌ها.

چگالی (kg/m^3)	Δu (mm)	P_{test} (kN)	نام نمونه
۲۴۱۴	۱۴٫۷۱	۱۸۸٫۶۷	$R_{0.4F^0}$
۲۴۲۳	۹٫۱۴	۲۶۸٫۲۵	$R1F^0$
۲۴۴۵	۱۵٫۰۰	۲۲۷٫۴۵	$R_{0.4F^0.5}$
۲۴۴۱	۱۰٫۰۳	۳۴۰٫۰۸	$R1F^0.5$
۲۴۹۳	۱۳٫۷۱	۲۷۳٫۲۷	$R_{0.4F1}$
۲۴۴۹	۸٫۸۳	۳۵۵٫۴۱	$R1F1$
۲۴۳۱	۱۵٫۵۶	۲۹۳٫۳۶	$R_{0.4F1.5}$
۲۳۷۹	۷٫۵۷	۳۶۰٫۸۸	$R1F1.5$

نسبت فولاد تقویتی است (رابطه ۱):

$$V_u = \frac{1.25(1 - 0.75 \frac{c}{d}) \sqrt{f'_c}}{1 + \frac{0.44 u_e d \sqrt{f'_c}}{V_{flex}}} u_e d \quad (1)$$

که در آن، f'_c مقاومت فشاری بتن برحسب کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع، d عمق مؤثر دال برحسب سانتی‌متر، c و u_e به ترتیب برابر عرض و محیط ستون مربعی و V_{flex} ظرفیت برش پانچینگ دال در حالتی است که مود گسیختگی به صورت خمشی باشد که از آنالیز خطوط گسیختگی به صورت رابطه ۲ حاصل می‌شود:

$$V_{flex} = \lambda \left(\frac{b}{s - c} - 0.172 \right) M_n \quad (2)$$

که در آن، c عرض ستون مربعی، s فاصله عرضی میان تکیه‌گاه‌های دال مربعی، b عرض دال مربعی و M_n مقاومت خمشی دال است. براساس نظریه موی^[۱۱] در پژوهش حاضر نسبت آرماتورها به گونه‌ی انتخاب شد که نیمی از نمونه‌ها دچار شکست خمشی و نیمی دیگر دچار شکست برش پانچینگ شوند تا با افزودن الیاف تغییر مود شکست نیز بررسی شود. در جدول ۵، نتایج حاصل از شکست نمونه‌ها ارائه شده است. که در آن، Δu بیشترین خیز وسط دال را نشان می‌دهد. همچنین الگوی شکست نمونه‌ها در شکل ۵ مشاهده می‌شود که مطابق آن، نمونه‌هایی که نسبت آرماتور ۰٫۴۵٪ داشتند، ترک‌های شعاعی بیشتر و شکست نرم‌تری داشتند و شکست آن‌ها از نوع خمشی بود و نمونه‌هایی که نسبت آرماتور ۰٫۱٪ داشتند، ترک‌های آن‌ها از نوع پیرامونی بود و شکست پانچینگ داشتند. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها، شکست آن‌ها تردتر و جابه‌جایی نمونه‌ها کمتر شده است.

۲.۳. تأثیر پارامترهای مختلف در ظرفیت برش پانچینگ دال‌ها

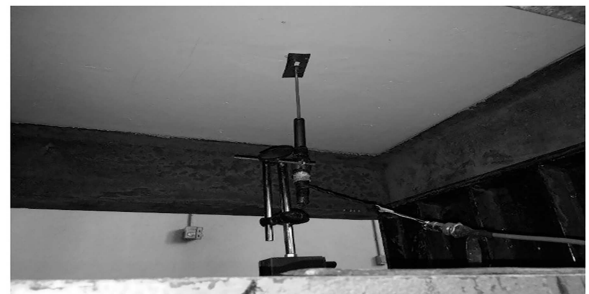
• تأثیر درصد الیاف در ظرفیت برش پانچینگ دال‌های تخت: به منظور مقایسه‌ی بهتر رفتار دال‌های ساخته شده از الیاف با نمونه‌های ساخته شده از بتن معمولی، متحنی‌های بار - تغییرمکان برای نمونه‌های با نسبت فولاد ۰٫۴۵٪ در شکل ۶ و برای نمونه‌های با نسبت فولاد ۰٫۱٪ در شکل ۷ مشاهده می‌شود. مطابق شکل ۶، در نسبت آرماتور ۰٫۴۵٪، افزودن ۱٫۵٪ الیاف موجب افزایش ۶۴ درصدی ظرفیت برش پانچینگ شده است. این مقدار برای درصد الیاف ۱ و ۰٫۵ به ترتیب برابر ۴۵ و ۲۰ درصد بوده است. در شکل ۷، برای نسبت آرماتور ۰٫۱٪ افزودن ۱٫۵ الیاف موجب افزایش ۳۴ درصدی ظرفیت برش پانچینگ شده است. این عدد برای درصد الیاف ۱ و ۰٫۵ به ترتیب ۳۲ و ۲۷ درصد بوده است.

جدول ۳. مشخصات مکانیکی آرماتورها.

ضریب کشسانی (MPa)	تنش تسلیم (Mpa)	قطر اسمی (mm)
۱۷۶۹۷۰	۴۱۵٫۵۸	۱۲

جدول ۴. مشخصات فیزیکی الیاف.

نوع الیاف	فولادی
شکل	انتها قلاب‌دار
طول (mm)	۵۰
قطر (mm)	۰٫۸
وزن مخصوص (kg/m^3)	۷۸۵۰
نسبت ظاهری	۶۲٫۵



شکل ۴. نحوه‌ی قرار گرفتن تغییر مکان سنج زیر نمونه.

جوش داده شدند. در سیستم مطرح شده، دال‌ها روی قاب قرار گرفتند و نیروی فشاری از بالا و از طریق یک جک فشاری به ظرفیت ۲۰۰ تن، به دال وارد شد. جهت اندازه‌گیری مقدار بار وارد شده، از یک نیروسنج به ظرفیت ۵۰ تن استفاده شده است که بین جک و نمونه قرار گرفته است (شکل ۲).

جهت قرائت و ثبت خیز در طول آزمایش از یک دستگاه تغییرمکان‌سنج لیزری در زیر دال به‌گونه‌ی استفاده شده است که قادر به ثبت تغییرمکان مرکز دال در هر لحظه باشد. دقت دستگاه مذکور ۰٫۱ میکرومتر است. شکل ۴، نحوه‌ی قرارگیری دستگاه تغییر مکان‌سنج در زیر دال را نشان می‌دهد.

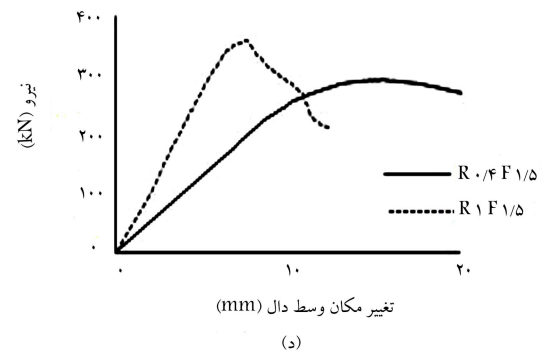
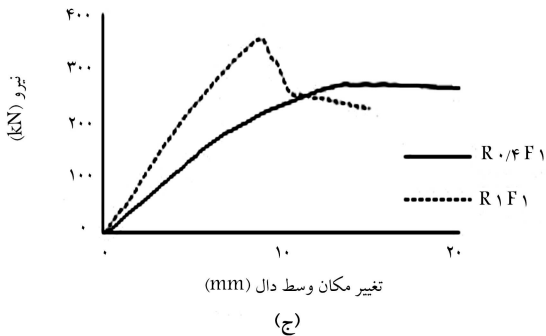
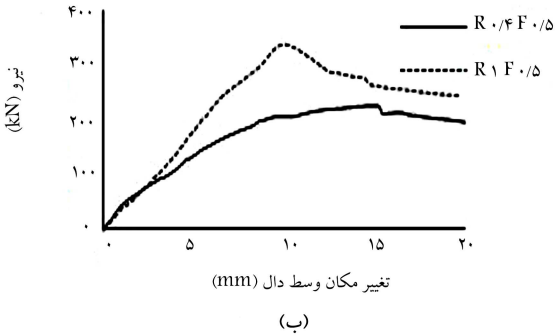
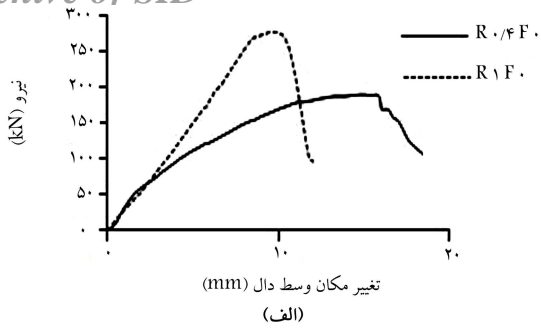
پس از قرار گرفتن نمونه‌ها در محل مشخص شده، بارگذاری آن‌ها آغاز شد. برای شبیه‌سازی بار استاتیکی، سرعت بارگذاری به طور متوسط 10 kg/sec در نظر گرفته شد. هم‌زمان با اعمال بار، در بازه‌های زمانی ۰٫۵ ثانیه، مقادیر بار و تغییرمکان وسط دال توسط رایانه ثبت شد. با افزایش تدریجی بار، در یک لحظه نمونه دچار شکست پانچینگ شد و از آن لحظه به بعد بار کاهش یافت. مدت زمان انجام آزمایش برای هر دال حدود ۴۰ دقیقه بود.

۳. نتایج آزمایشگاهی

در بخش کنونی، به نتایج حاصل از آزمایش‌ها و همچنین به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف در ظرفیت برش پانچینگ دال‌ها پرداخته شده است.

۱.۳. نتایج حاصل از آزمایش‌ها

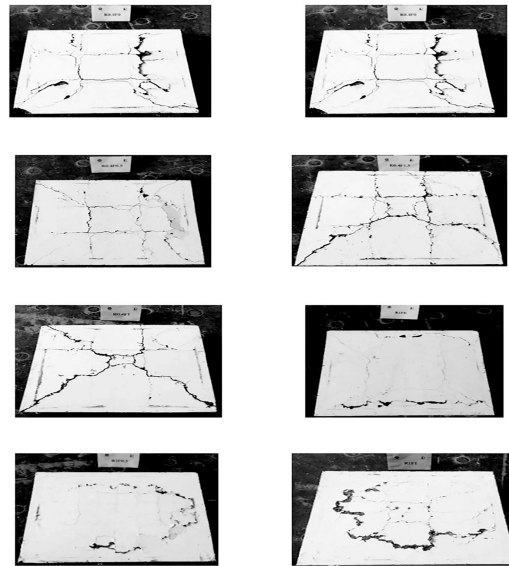
براساس تئوری موی^[۱۱]، ظرفیت برش پانچینگ دال وابسته به مقاومت خمشی و



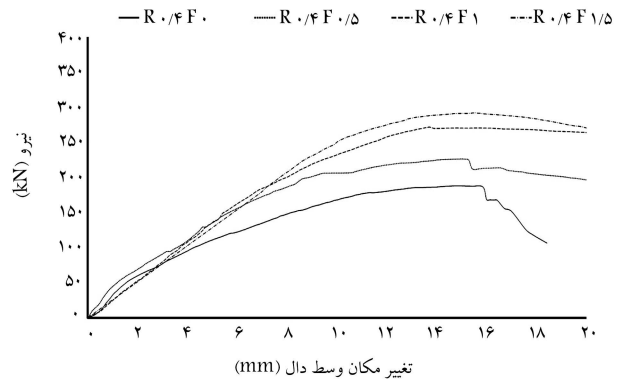
شکل ۸. نمودار بار - تغییر مکان نمونه‌های با درصد الیاف یکسان.

در شکل (الف) در دال‌های با درصد الیاف ۰٪، افزایش درصد آرماتور منجر به افزایش ۴۲ درصدی ظرفیت برش پانچینگ شده است. این امر برای درصد الیاف ۰٫۵٪ و ۱٪ به ترتیب برابر ۴۹، ۳۰ و ۲۳ درصد بوده است (شکل‌های ۸ب، ۸ج و ۸د). شایان ذکر است که افزایش درصد آرماتور در نمونه‌هایی که مقدار الیاف آن‌ها بیشتر است، باعث نرخ افزایش کمتری در ظرفیت برش پانچینگ شده است.

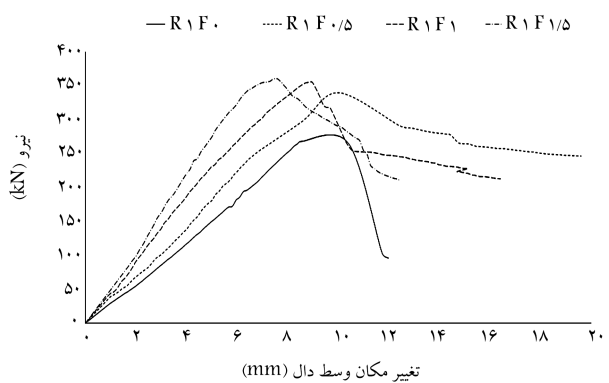
• تأثیر الیاف در شاخص شکل‌پذیری: پسکی ۳ و پیرونی ۴ (۱۹۹۷)، [۱۲] برای محاسبه‌ی شاخص شکل‌پذیری تعریفی به این شرح ارائه داده‌اند: آنها نسبت



شکل ۵. الگوی شکست نمونه‌ها.



شکل ۶. نمودار بار - تغییر مکان نمونه‌های با نسبت آرماتور ۰٫۴٪.



شکل ۷. نمودار بار - تغییر مکان نمونه‌های با نسبت آرماتور ۰٫۱٪.

• تأثیر درصد آرماتور در ظرفیت برش پانچینگ دال‌های تخت: برای مقایسه، به بررسی نمودارهای بار - تغییر مکان نمونه‌هایی که فقط از نظر نسبت آرماتور خمشی متفاوت هستند، پرداخته شده است. در شکل ۸، مقایسه میان نمودار بار - تغییر مکان نمونه‌ها با نسبت آرماتور خمشی متفاوت انجام شده است که مطابق آن، افزایش آرماتور خمشی منجر به افزایش ظرفیت پانچینگ و سختی دال‌ها شده است. به طور مثال

جدول ۷. نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها و آیین‌نامه‌های ACI، ایران و BS.

نام نمونه (kN)	V_{est} (kN)	V_{ACI} (kN)	V_{IRAN} (kN)	V_{BS} (kN)
$R_{0.4F^0}$	۱۸۸٫۶۷	۱۸۷٫۰۰	۲۲۶٫۶۷	۹۴٫۶۶
R_{1F^0}	۲۶۸٫۲۵	۱۸۴٫۶۵	۲۲۳٫۸۲	۱۴۲٫۷۲
$R_{0.4F^0.5}$	۲۲۷٫۴۵	۱۸۷٫۰۰	۲۲۶٫۶۷	۹۴٫۶۶
$R_{1F^0.5}$	۳۴۰٫۰۸	۱۹۸٫۳۵	۲۴۰٫۴۲	۱۴۹٫۷۰
$R_{0.4F^1}$	۲۷۳٫۲۷	۲۰۰٫۵۴	۲۴۳٫۰۸	۹۹٫۱۷
R_{1F^1}	۳۵۵٫۴۱	۲۰۴٫۸۵	۲۴۸٫۳۱	۱۵۲٫۹۵
$R_{0.4F^{1.5}}$	۲۹۳٫۳۶	۱۹۸٫۳۵	۲۴۰٫۴۲	۹۸٫۴۵
$R_{1F^{1.5}}$	۳۶۰٫۸۸	۱۸۴٫۶۵	۲۲۳٫۸۲	۱۴۲٫۷۲

جدول ۸. مقایسه‌ی نسبت نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها و آیین‌نامه‌های ACI، ایران و BS.

نمونه	$\frac{V_{est}}{V_{BS}}$	$\frac{V_{est}}{V_{iran}}$	$\frac{V_{est}}{V_{ACI}}$
$R_{0.4F^0}$	۱٫۹۹	۰٫۸۳	۱٫۰۱
R_{1F^0}	۱٫۸۸	۱٫۲۰	۱٫۴۵
$R_{0.4F^0.5}$	۲٫۴۰	۱٫۰۰	۱٫۲۲
$R_{1F^0.5}$	۲٫۲۷	۱٫۴۱	۱٫۷۱
$R_{0.4F^1}$	۲٫۷۶	۱٫۱۲	۱٫۲۵
R_{1F^1}	۲٫۳۲	۱٫۴۳	۱٫۷۳
$R_{0.4F^{1.5}}$	۲٫۹۸	۱٫۲۲	۱٫۴۸
$R_{1F^{1.5}}$	۲٫۵۳	۱٫۶۱	۱٫۹۵

شده در آیین‌نامه‌ی ایران نیز به صورت روابط ۶ الی ۸ است:

$$V_c = (1 + \frac{2}{\beta_c}) \cdot 0.2 \sqrt{f_c} b \cdot d \quad (6)$$

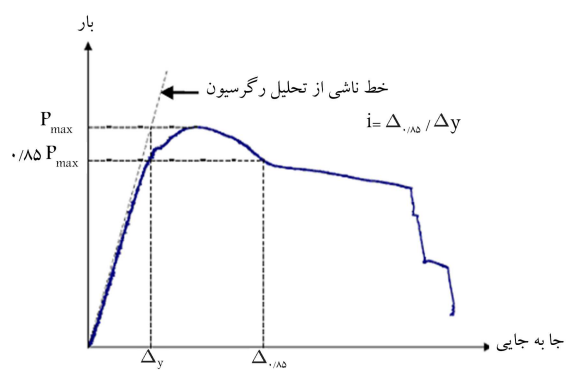
$$V_c = (\frac{\alpha_s d}{b_c} + 1) \cdot 0.2 \sqrt{f_c} b \cdot d \quad (7)$$

$$V_c = 2 \times 0.2 \sqrt{f_c} b \cdot d \quad (8)$$

پارامترها مشابه آیین‌نامه‌ی ACI 318 است. مقاومت برشی نهایی دال برابر کوچک‌ترین مقدار حاصل از روابط اخیر است. رابطه‌ی ارائه شده در آیین‌نامه‌ی انگلستان ۱۹۹۷-BS 8110 به صورت رابطه‌ی ۹ است: [۱۳]

$$V_c = 0.79 \rho^{1/2} (\frac{f_c}{25})^{1/4} (\frac{f_c}{25})^{1/4} U d / \gamma_m \quad (9)$$

که در آن، f_c' مقاومت فشاری بتن، ρ درصد آرماتور نمونه (بدون احتساب آرماتورهای روی تکیه‌گاه که در باربری موثر نیستند در نظر گرفته شد)، ضریب اطمینان آیین‌نامه است که برابر با ۱٫۲۵ است. همچنین U محیط بحرانی است که عبارت از مستطیلی است که اضلاع آن به فاصله‌ی $1.5d$ از بر ستون قرار دارد و مقدارش برابر $U = 4(c + 3d)$ است. جدول ۷، ظرفیت برش پانچینگ آزمایشگاهی نهایی حاصل از پژوهش حاضر است که مقدار محاسباتی آیین‌نامه‌ها را ارائه می‌کند. در جدول ۸، نیز نسبت مقادیر آزمایشگاهی به مقادیر محاسباتی آیین‌نامه‌ها ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۸ مشاهده می‌شود، برای دال‌های بدون الیاف نتایج آیین‌نامه‌ی ACI نسبت به آیین‌نامه‌های دیگر به نتایج آزمایش نزدیک‌تر است. در دال‌های با الیاف، نسبت مقادیر آزمایشگاهی به مقادیر آیین‌نامه‌ی بیشتر است، بنابراین الیاف فولادی توانسته است ظرفیت برش پانچینگ را افزایش دهد.



شکل ۹. چگونگی محاسبه‌ی شاخص شکل‌پذیری.

جدول ۶. مقایسه‌ی شاخص شکل‌پذیری نمونه‌ها.

نام نمونه	شاخص شکل‌پذیری
$R_{0.4F^0}$	$16.45 / 14.71 = 1.12$
R_{1F^0}	$10.9 / 9.14 = 1.19$
$R_{0.4F^0.5}$	$20.45 / 15 = 1.36$
$R_{1F^0.5}$	$12.74 / 10.3 = 1.24$
$R_{0.4F^1}$	$19.21 / 13.71 = 1.40$
R_{1F^1}	$12.09 / 8.83 = 1.37$
$R_{0.4F^{1.5}}$	$23.15 / 15.56 = 1.49$
$R_{1F^{1.5}}$	$11.15 / 7.57 = 1.47$

تغییرمکان متناظر با ۸۵٪ نیروی بیشینه ($\Delta_{y,85}$) (روی شاخه‌ی نزولی منحنی بار - تغییرمکان) به تغییرمکان متناظر با نیروی بیشینه (Δ_y) (حد رفتارکشسان) را شاخص شکل‌پذیری تعریف کرده‌اند. در شکل ۹، چگونگی محاسبه‌ی شاخص مذکور نشان داده شده است.

در جدول ۶، شاخص شکل‌پذیری هر نمونه ($I = \Delta_{y,85} / \Delta_y$) ارائه شده است. در جدول ۶ همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش درصد الیاف، شکل‌پذیری نیز افزایش یافته است.

۳.۳. مقایسه‌ی ظرفیت برش پانچینگ دال‌ها در آیین‌نامه‌های مختلف

روابط ارائه شده برای ظرفیت برش پانچینگ دال‌های تخت در آیین‌نامه‌ی بتن آمریکا ACI 318-11، به صورت روابط ۳ الی ۵ است: [۱۳]

$$V_c = 0.17(1 + \frac{2}{\beta_c}) \lambda \sqrt{f_c} b \cdot d \quad (3)$$

$$V_c = 0.83 (\frac{\alpha_s d}{b_c} + 2) \lambda \sqrt{f_c} b \cdot d \quad (4)$$

$$V_c = 0.33 \lambda \sqrt{f_c} b \cdot d \quad (5)$$

که در آن‌ها، f_c' مقاومت فشاری نمونه‌ی استوانه‌ی بتن برحسب مگاپاسکال و b_c محیط بحرانی بر حسب میلی‌متر است که اضلاع آن در فاصله‌ی $0.5d$ از وجه ستون قرار دارد. مقدار پارامتر برای دال با ستون مربعی برابر $4(c + d)$ است که پارامتر c بعد ستون و d عمق مؤثر مقطع است. β_c برابر نسبت طول به عرض ستون و α_s برای ستون‌های داخلی، لبه و ستون‌های گوشه به ترتیب برابر ۴۰، ۳۰ و ۲۰ است. λ ضریب اصلاحی برای در نظر گرفتن آثار بتن سبک است که مقدار آن برای بتن معمولی ۱، بتن ماسه سبک ۰٫۸۵ و بتن تماماً سبک ۰٫۷۵ است. روابط ارائه

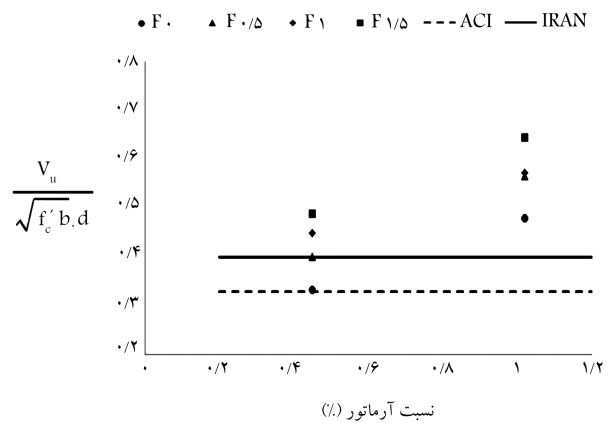
نام نمونه	ظرفیت برش پانچینگ (kN)	ضخامت دال	
		معادل (mm)	کاهش (%)
R _۰ /۴F _۰	۱۸۸٫۶۷	۱۰۰	۰
R _۰ /۴F _{۰٫۵}	۲۲۷٫۴۵	۱۱۷	۱۷
R _۰ /۴F _۱	۲۷۳٫۲۷	۱۲۹	۲۹
R _۰ /۴F _{۱٫۵}	۲۹۳٫۳۶	۱۳۸	۳۸
R _۱ F _۰	۲۶۸٫۲۵	۱۳۶	۰
R _۱ F _{۰٫۵}	۳۴۰٫۰۸	۱۵۷	۲۱
R _۱ F _۱	۳۵۵٫۴۱	۱۵۹	۲۳
R _۱ F _{۱٫۵}	۳۶۰٫۸۸	۱۷۶	۴۰

میلی‌متر را نشان می‌دهد و ستون سوم، ضخامت دال معادل بدون الیاف با ظرفیت بار یکسان براساس آیین‌نامه‌ی ۲۰۱۱-۳۱۸ ACI است. همان‌طور که در جدول ۹ مشاهده می‌شود، افزودن ۰٫۵٪ و ۱٪ و ۱٫۵ درصد الیاف فولادی در نمونه‌هایی که نسبت آرماتورهای خمشی آن‌ها ۰٫۴۵٪ است، به ترتیب معادل با افزایش ضخامت دال به میزان ۱۷، ۲۹، ۳۸ و ۴۵ درصد است. برای نمونه‌هایی که نسبت آرماتورهای خمشی آن‌ها ۰٫۲٪ است، افزودن ۰٫۵٪ و ۱٪ و ۱٫۵ درصد الیاف فولادی به ترتیب معادل با افزایش ضخامت دال به میزان ۰٫۵۷، ۰٫۵۹ و ۰٫۷۶ درصد است.

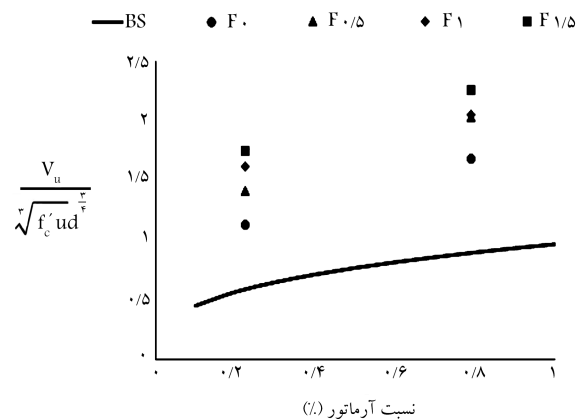
۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، برای بررسی اثر الیاف فولادی در ظرفیت برش پانچینگ دال‌های تخت، ۸ نمونه دال تخت با ابعاد ۱۰۰۰ × ۱۰۰۰ × ۱۰۰ میلی‌متر ساخته و آزمایش شد. در ۶ نمونه از الیاف با نسبت‌های مختلف استفاده شد. متغیرهای آزمایش مذکور، شامل نسبت آرماتور خمشی و درصد الیاف بودند، که با توجه به مطالعات و آزمایش‌های انجام‌شده، این نتایج به‌دست آمده است:

۱. افزودن ۰٫۵٪ و ۱٫۵ درصد الیاف فولادی در نمونه‌هایی که نسبت آرماتورهای خمشی آن‌ها ۰٫۴۵٪ بود، به ترتیب معادل با افزایش ضخامت دال بدون الیاف به میزان ۱۷ و ۳۸ درصد بوده است.
۲. افزودن ۰٫۵٪ و ۱٫۵ درصد الیاف فولادی در نمونه‌هایی که نسبت آرماتورهای خمشی آن‌ها ۰٫۲٪ بود، به ترتیب معادل با افزایش ضخامت دال بدون الیاف به میزان ۲۱ و ۴۰ درصد بوده است.
۳. در نسبت آرماتور ۰٫۴۵٪، افزودن ۱٫۵٪ الیاف موجب افزایش ۶۴ درصدی ظرفیت برش پانچینگ شده است. این مقدار برای درصد الیاف ۱ و ۰٫۵ به ترتیب برابر ۴۵ و ۲۰ درصد بوده است.
۴. در نسبت آرماتور ۰٫۲٪، افزودن ۱٫۵٪ الیاف موجب افزایش ۳۴ درصدی ظرفیت برش پانچینگ شده است. این مقدار برای درصد الیاف ۱ و ۰٫۵ درصد به ترتیب برابر ۳۲ و ۲۷ درصد بوده است.
۵. افزایش آرماتور خمشی از ۰٫۴۵٪ به ۰٫۲٪ منجر به افزایش ظرفیت پانچینگ و سختی دال‌ها شده است. به‌طور مثال، در دال‌های با درصد الیاف صفر، افزایش درصد آرماتور خمشی منجر به افزایش ۴۲ درصدی ظرفیت برش پانچینگ شده است. این افزایش برای درصد الیاف ۰٫۵٪ و ۱٪ به ترتیب برابر با ۳۹، ۳۰ و ۲۳ درصد بوده است.



شکل ۱۰. اثر نسبت آرماتور خمشی و الیاف در ظرفیت برش پانچینگ آیین‌نامه‌های ACI و ایران.



شکل ۱۱. اثر نسبت آرماتور خمشی و الیاف در ظرفیت برش پانچینگ آیین‌نامه‌ی BS.

همچنین در شکل ۱۰، رابطه‌ی $\frac{V_u}{\sqrt{f'_c} b d}$ در آیین‌نامه‌های ACI و ایران رسم شده است که مطابق آن، ظرفیت برش پانچینگ در دال‌های با نسبت آرماتور ۰٫۴۵٪، به‌طور میانگین ۳۹٪ کمتر از دال‌های با نسبت آرماتور ۰٫۲٪ است. آیین‌نامه‌های ACI و ایران، اثر آرماتور دال را در محاسبه‌ی برش پانچینگ در نظر نمی‌گیرند. شکل ۱۰ همچنین نشان می‌دهد که با افزایش الیاف فولادی در بتن، مقاومت برش پانچینگ نسبت به مقادیر آیین‌نامه‌ی افزایش یافته است. آیین‌نامه‌ی BS اثر مقدار آرماتور خمشی را نیز در به‌دست آوردن ظرفیت برش پانچینگ به حساب آورده است. در شکل ۱۱، رابطه‌ی $\frac{V_u}{\sqrt{f'_c} b d}$ با نسبت آرماتور برای آیین‌نامه‌ی BS و نیز اثر الیاف فولادی در افزایش ظرفیت برش پانچینگ نیز مشاهده می‌شود.

۴.۳. تأثیر الیاف در ضخامت دال

هدف از انجام پژوهش حاضر افزودن الیاف به منظور بالا بردن ظرفیت برش پانچینگ و حذف خاموت است، زیرا اجرای خاموت هنگامی که ضخامت دال کم باشد، با مشکل مواجه می‌شود. جدول ۹ نشان می‌دهد که در شرایط یکسان، افزودن الیاف به بتن تا چه حد می‌تواند موجب کاهش ضخامت دال شود. در جدول ۹، ستون دوم ظرفیت برش پانچینگ آزمایشگاهی دال‌های تخت پژوهش حاضر با ضخامت ۱۰۰

پانوشتها

1. Guandalini
2. Moe
3. Pessiki
4. Pieroni

منابع (References)

1. Hughes, B.P. and Xiao, Y. "Flat slab with fiber or link reinforcement at slab-column connection", *Proceedings of Institution of Civil Engineers Structures & Buildings*, **110**(3), pp. 308-321 (1995).
2. Ozden, S., Ersoy, U. and Ozturan, T. "Punching shear tests of normal-and high-strength concrete flat plates", *Canadian Journal of Civil Engineering*, **33**(11), pp. 1389-1400 (2006).
3. Minh, N., Rovnak, L., Tran-Quoc, M. and et al. "Punching shear resistance of steel fiber reinforced concrete flat slabs", *Proceedings of the 12th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, Hong Kong, China (2011).
4. Maya, L.F., Ruiz, M.F., Muttoni, A. and et al. "Punching shear strength of steel fibre reinforced concrete slabs", *Engineering Structures*, **40**, pp. 83-94 (2012).
5. Higashiyama, Hiroshi, Akari Ota, and Mutsumi Mizukoshi. "Design equation for punching shear capacity of SFRC slabs", *International Journal of Concrete Structures and Materials*, **5**(1), pp. 35-42 (2011).
6. Muttoni, A. "Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement", *ACI Structural Journal*, **105**(4), pp. 440-450 (2008).
7. Lips, S., Fernandez Ruiz, M. and Muttoni, A. "Erimental investigation on punching strength and deformation capacity of shear-reinforced slabs", *ACI Structural Journal*, **109**, pp. 889-900 (2012).
8. Guandalini, S., Burdet, O. and Muttoni, A. "Punching tests of slabs with low reinforcement ratios", *ACI Structural Journal*, pp. 87-95 (2009).
9. ASTM C143/ C143M-15a, "Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete", ASTM International, West Conshohocken, PA (2015).
10. ASTM C995-01, "Standard test method for time of flow of fiber-reinforced concrete through inverted slump cone (withdrawn 2008)", ASTM International, West Conshohocken, PA (2001).
11. Moe, J. "Shearing strength of reinforced concrete slabs and footings under concentrated loads", *Journal of Portland cement Association, Research and Development Laboratories*, **D47**(11), 135 p. (1961).
12. Pessiki, S. and Pieroni, A. "Axial load behavior of large-scale spirally-reinforced high strength concrete columns", *ACI Structural Journal*, **94**(3), pp. 304-314 (1997).
13. ACI Committee 318, "Building code requirements for structural concrete (ACI 318M-11) and commentary", American Concrete Institute (2011).
14. British Standard Institution, "Structural use of concrete standard BS-8110" (1997)