

استفاده از آرماتورهای ویژه برای بهبود رفتار پس از گسیختگی پانچینگ دال‌های تخت

سعید سروری (دانشجوی دکتری)

محمدرضا اصفهانی* (استاد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

مهندسی عمران شریف، زمستان (۱۳۹۹)
دوری ۲ - ۳۶، شماره ۱/۴، ص. ۸۰-۷۱

چنانچه دال تخت، تحت بارهای غیرقابل پیش‌بینی قرار گیرد و گسیختگی پانچینگ دال تخت اتفاق بیفتد، پس از بازتوزیع نیروها، بارهای اتصال دال تخت به اتصال‌های مجاور منتقل می‌شود و اتصال‌های دیگر نیز دچار گسیختگی خواهند شد. جهت ایجاد برقراری یک سازوکار پشتیبان پس از گسیختگی پانچینگ در پژوهش حاضر، ۱۰ نمونه دال مربعی با مقیاس ۰/۵ و با ابعاد ۱۶۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۲۵ میلی‌متر با جزئیات متفاوت در آرماتورگذاری بر روی تکیه‌گاه‌های ساده آزمایش شدند، و سپس آثار آرماتورهای یکپارچگی، آرماتورهای فشاری، آرماتورهای یکپارچگی خم شده به بالا و آرماتورهای برشی در مقاومت پس پانچینگ بررسی شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان‌گر آن است که با افزودن آرماتور یکپارچگی، مقاومت پس پانچینگ افزایش می‌یابد. آرماتورهای فشاری مقاومت‌های یاد شده را تغییر نمی‌دهند. خم کردن آرماتور یکپارچگی به سمت ناحیه‌ی کششی دال، باعث افزایش مقاومت پانچینگ و پس پانچینگ اولیه خواهد شد. آرماتورهای برشی می‌توانند مقاومت پانچینگ و شکل‌پذیری اتصال را افزایش می‌دهند.

واژگان کلیدی: مقاومت پس پانچینگ، دال تخت، آرماتور یکپارچگی، گسیختگی پانچینگ.

sarvari@mail.um.ac.ir
esfahani@um.ac.ir

۱. مقدمه و پیشینه‌ی تحقیقات

دال‌های بتنی تحت یک گسیختگی موضعی را بررسی کردند و دریافتند که سازوکار پشتیبان از طریق آرماتورهای فشاری به‌طور مناسب مقید شده در ستون گسترش خواهد یافت. مطالعات آزمایشگاهی ملو و رگان^[۸] (۱۹۹۸)، نیز نشان می‌دهد که آرماتورهای یکپارچگی در مرحله‌ی قبل از برش پانچینگ، تأثیری در ظرفیت باربری دال نخواهند داشت؛ ولی آرماتورهای یکپارچگی در مرحله‌ی پس از گسیختگی پانچینگ، ظرفیت باربری بیشتری به همراه خواهند داشت. ملو و رگان (۱۹۹۸)،^[۸] در آزمایش‌ها سری دوم، طول کمینه‌ی آرماتورهای یکپارچگی را پیشنهاد و گزارش کردند که زاویه‌ی انحراف آرماتورها در زمان گسیختگی، در مجاورت ستون از ۲۴ درجه تا ۲۶ درجه متغیر است.^[۸] مطابق با مطالعات آزمایشگاهی فرناندز^۵ و همکاران (۲۰۱۳)،^[۵] افزایش مقاومت پس پانچینگ ناشی از افزایش میزان آرماتورکشی کمی است و با افزایش میزان آرماتورکشی بیش از یک حد معین، نسبت مقاومت پس پانچینگ به مقاومت پانچینگ تغییر فراروانی نخواهد کرد. آن‌ها همچنین دریافتند که آرماتور یکپارچگی با فولاد گرم نورد شده، مقاومت برشی پس پانچینگ نسبت به آرماتورهای سرد نورد شده خواهند داشت.^[۵] مطالعات آزمایشگاهی حبیبی^۶ (۲۰۱۲)،^[۹] نشان داد که افزودن کتیبه^۷ به اتصال (افزایش ارتفاع در بتن پائین آرماتورهای یکپارچگی)، منجر به رسیدن فولاد به کرنش‌های بالاتر خواهد شد. مطابق با پژوهش حاضر، با افزایش طول آرماتور یکپارچگی، تغییرات اندکی در مقاومت پس پانچینگ مشاهده شده است. همچنین برای مشخص شدن اثر هندسه‌ی ستون، دو

اتصال دال تخت به ستون در رده‌ی اتصال‌های تَرِد سازه‌های بتن‌آرمه محسوب می‌شود و گسیختگی اتصال دال اغلب بدون هیچ هشدار رخ می‌دهد. این موضوع بزرگ‌ترین ضعف اتصال دال تخت به ستون است.^[۱] چنانچه دال تخت، تحت اثر بار پیش‌بینی نشده در طراحی قرار گیرد، در بیشتر موارد اتصال دال تخت به ستون دچار گسیختگی برشی پانچینگ می‌شود؛ بنابراین باید تمهیداتی ارائه کرد تا از انتقال بار به اتصال‌های دیگر پیشگیری شود. به سخن دیگر، اتصال دال تخت به ستون پس از گسیختگی پانچینگ باید از طریق یک سازوکار مؤثر قابلیت باربری داشته باشد.^[۲] در طول دهه‌های گذشته، چندین گسیختگی در دال‌های تخت رخ داده است، که اتصال‌های دیگر را تحت تأثیر قرار داده است.^[۱-۵]

هاوکینگز و میچل^۱ (۱۹۷۹)،^[۶] ساختارهای حمایتی پس از گسیختگی پانچینگ، شامل: در نظر گرفتن ضریب بارهای بیشتر در طراحی، استفاده از آرماتور برشی در اطراف اتصال دال تخت به ستون، و الزاماتی برای آرماتورهای یکپارچگی^۲ (آرماتورهای عبوری از ستون در ناحیه‌ی فشاری دال) ارائه کردند و در نهایت، الزامات آرماتورهای یکپارچگی به‌عنوان یک راهکار کاربردی پیشنهاد شد. میچل و کوک^۳ (۱۹۸۴)،^[۷] امکان ایجاد یک سازوکار پشتیبان در حالت‌های مختلف

* نویسنده مسئول

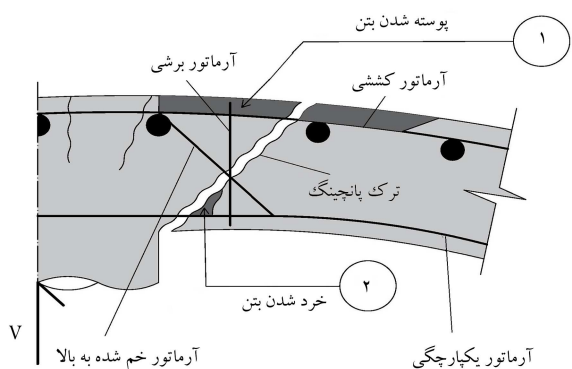
تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۶/۲۴، اصلاحیه ۱۳۹۸/۱۰/۰۷، پذیرش ۱۳۹۸/۱۰/۱۴.

DOI:10.24200/J30.2020.54241.2622

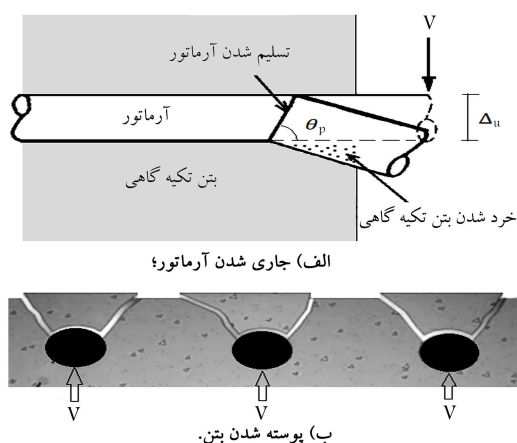
نمونه با ستون‌های مستطیلی و مربعی آزمایش شدند، که تغییر محسوس مشاهده نشد.^[۹]

جهت دستیابی به یک سازوکار مناسب جهت باربری اتصال دال - ستون پس از گسیختگی پانچینگ، باید شیوه‌های انتقال برش در اتصال بررسی شوند. در اتصال دال - ستون با افزایش بارگذاری، ترک‌های خمشی در اطراف ستون تشکیل می‌شوند و با گسترش ترک‌های خمشی و ترکیب آن‌ها با ریزترک‌های برشی، یک ترک قطری به نام ترک پانچینگ مطابق با شکل ۱ تشکیل می‌شود.^[۱۰] در اتصال‌های دال - ستون با آرماتور خمشی (بدون آرماتورهای برشی و سایر آرماتورها)، پس از شکل‌گیری میکروتک‌های برشی و خمشی و قبل از گسیختگی برش پانچینگ، عمده‌ترین سازوکارهای انتقال برش، مقاومت برشی بتن (قفل و بست سنگ‌دانه‌ها) و عملکرد شاخه‌ی آرماتور کششی هستند.^[۱۰] با شکل‌گیری ترک پانچینگ در اتصال دال - ستون، سازوکار تحمل بار برشی از طریق قفل و بست سنگ‌دانه‌ها از بین می‌رود و برش فقط می‌تواند از طریق آرماتورهای کششی و عملکرد شاخه‌ی تحمل شود.^[۱۲] مطابق با پژوهش‌های عملکرد شاخه‌ی، دو حالت گسیختگی در عملکرد شاخه‌ی وجود دارد: حالت اول، جاری شدن آرماتور و خرد شدن^۸ هم‌زمان بتن تکیه‌گاهی آرماتور (شکل ۲- الف) و حالت دوم، شکاف خوردن^۹ یا پوسته شدن^{۱۰} بتن است (شکل ۲- ب).^[۱۳-۱۵] ضخامت بتن بالای آرماتور، مؤثرترین پارامتر تعیین‌کننده‌ی حالت گسیختگی است.^[۱۴] نتایج آزمایشگاهی بیانگر آن است که اگر ضخامت پوشش بتن بالای آرماتور (ارتفاع بتن در جهت اعمال نیروی برشی) بزرگ‌تر از ۶ تا ۷ برابر قطر آرماتور باشد، حالت اول (تحمل تنش تا جاری شدن آرماتور و خرد شدن بتن تکیه‌گاهی) رخ می‌دهد و حالت دوم در ضخامت‌های کمتر بتن اتفاق می‌افتد.^[۱۴] می‌توان نتیجه گرفت، چنانچه در اتصال دال به ستون فقط آرماتور کششی وجود داشته باشد، با توجه به ارتفاع کم بتن بالای آن (به‌اندازه‌ی پوشش بتن)، حالت دوم (پوسته شدن بتن) اتفاق می‌افتد (ناحیه‌ی ۱ در شکل ۱). بنابراین دال‌هایی که فقط آرماتور کششی دارند، مقاومت پس پانچینگ بسیار کمی خواهند داشت.^[۱۳] چنانچه در اتصال دال - ستون، آرماتور یکپارچگی وجود داشته باشد، با توجه به ارتفاع قابل توجه بتن بالای آن (به‌اندازه‌ی ارتفاع مؤثر دال)، حالت اول گسیختگی عملکرد شاخه‌ی (جاری شدن آرماتور و خرد شدن^{۱۱} هم‌زمان بتن تکیه‌گاهی (آرماتور در ناحیه‌ی ۲ در شکل ۱) رخ می‌دهد؛ بنابراین مقاومت برشی پس از پانچینگ اتصال دال - ستون، دست‌کم به‌اندازه‌ی مقاومت جاری شدن آرماتورهای یکپارچگی خواهد بود. از این رو آرماتورهای یکپارچگی به‌صورت یک بستر تکیه‌گاهی جهت جلوگیری از رویداد تخریب پیش‌رونده عمل خواهند کرد.^[۱۷] چنانچه در اتصال دال تخت به ستون به اندازه‌ی کافی آرماتورهای یکپارچگی تعبیه شود، پس از گسیختگی پانچینگ، اتصال توانایی بهبود در مقاومت پس پانچینگ به‌صورت عملکرد غشایی کششی را دارد.^[۱۸] باید دانست که گسیختگی و خرد شدن بتن در ناحیه‌ی ۲ در شکل ۱ در حد معینی متوقف می‌شود.^[۵]

در پژوهش‌های پیشین، اغلب در مورد مقاومت برش پس پانچینگ، مطالعات با هدف پژوهش بر روی آرماتورهای یکپارچگی صورت پذیرفته است. با توجه گسیختگی مطرح شده در مورد دال تخت پس از گسیختگی پانچینگ می‌توان نتیجه‌گیری کرد که آرماتورهای عبوری از ترک مخروط پانچینگ می‌توانند مقاومت پس پانچینگ را افزایش دهند. دلیل این اثر مثبت، ایجاد یک پل ارتباطی بین مخروط پانچینگ و دال جهت جلوگیری از فروریزش است. آرماتورهای عبوری ذکر شده مطابق شکل ۱ می‌توانند شامل آرماتورهای کششی، یکپارچگی، یکپارچگی خم شده به بالا و همچنین آرماتورهای برشی باشند؛ بنابراین در پژوهش حاضر، علاوه بر آرماتورهای



شکل ۱. تحمل برش توسط آرماتورهای یکپارچگی و خمشی و بتن پس از گسیختگی برش پانچینگ.



شکل ۲. حالت‌های گسیختگی عملکرد شاخه‌ی.

جدول ۱. وزن مصالح مصرفی در یک مترمکعب بتن (وزن به کیلوگرم).

مصالح مصرفی	درشت‌دانه	ریزدانه	سیمان	آب	فوق روان‌کننده
بتن C ^{۳۰}	۷۲۰	۱۰۸۰	۴۰۰	۱۸۰	۰٫۷

کششی و یکپارچگی، اثر آرماتورهای یکپارچگی خم شده به بالا، آرماتورهای خم اضافی علاوه بر آرماتورهای یکپارچگی (آرماتورهای اضافی کششی خم شده به پائین) و آرماتورهای برشی در مقاومت پس پانچینگ دال‌های تخت بررسی شده است.

۲. طراحی و ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

۱.۲. مشخصات مصالح

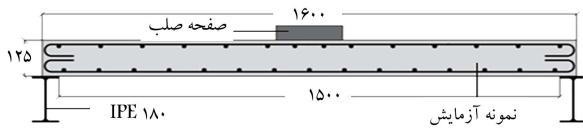
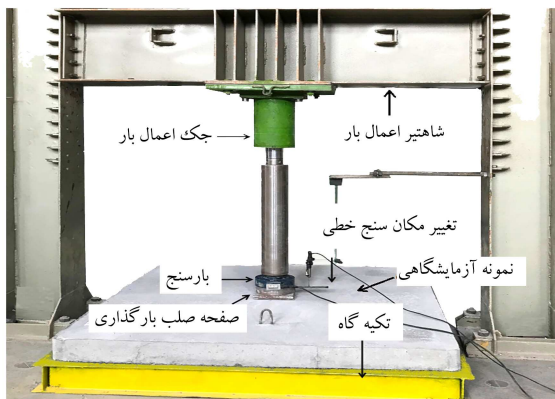
در مطالعه‌ی آزمایشگاهی حاضر، بتن با رده‌ی مقاومتی C^{۳۰} (بتن معمولی) استفاده شده است. سیمان مصرفی از نوع تیپ I، بزرگ‌ترین اندازه‌ی سنگ‌دانه ۲۵ میلی‌متر، نسبت آب به سیمان ۰٫۴۵ و عیار سیمان ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است. در ساخت نمونه‌ها از آرماتور با تنش تسلیم و تنش نهایی به ترتیب ۴۰۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال استفاده شده است. طرح اختلاط بتن و مشخصات مصالح بر طبق آزمایش‌های صورت گرفته (شکل ۳) در جدول‌های ۱ الی ۳ ارائه شده است.

جدول ۲. خواص آرماتورهای مصرفی.

شماره‌ی نمونه	قطر آرماتور (mm)	سطح مقطع (mm ²)	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	کرنش نهایی (%)
۱	۸	۴۲۰	۴۵۶	۶۹۶	۲۹٫۵۸
۲	۱۰	۷۸۵	۴۵۶	۶۸۸	۳۰٫۹۴
۳	۱۲	۱۱۴۰	۴۴۵	۶۷۸	۳۰٫۰۶

جدول ۳. خواص بتن نمونه‌ها.

نمونه‌ها	وزن مخصوص (kN/m ³)	مقاومت فشاری (MPa)	بتن ریزی
SP - ۱, SP - ۲, SP - ۳	۲۴٫۶	۳۳	سری ۱
SS - ۱, SS - ۲, SS - ۳, SB - ۱, SB - ۲, SB - ۳, SB - ۴	۲۴٫۱	۳۳	سری ۲



شکل ۴. دستگاه آزمایش استفاده شده در پژوهش حاضر.

نیروسنج^{۱۴} اندازه‌گیری شده است. نیروسنج و تغییرمکان‌سنج به دستگاه ثبت داده‌ها^{۱۵} متصل بودند و نمونه‌ها بر روی تکیه‌گاه ساده‌ی فولادی (IPE ۱۸۰) قرار گرفتند (شکل ۴).

۳. مشخصات نمونه‌ها

۱۰ نمونه‌ی دال تخت در سه گروه ساخته و ویژگی‌های کلی آن‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. گروه ۱ نمونه‌ها، نمونه‌های مرجع (نمونه‌های SP) هستند و جهت مقایسه‌ی نتایج با گروه‌های بعدی و اثر آرماتور یکپارچگی و آرماتورهای فشاری ساخته شده‌اند. گروه ۲، جهت بررسی اثر آرماتورهای یکپارچگی خم شده به بالا و آرماتورهای خم شده به بالا علاوه بر آرماتورهای یکپارچگی (نمونه‌های SB) و گروه ۳ جهت بررسی اثر آرماتورهای برشی (SS) بودند. خلاصه‌ی مشخصات نمونه‌های اخیر در جدول ۴ ارائه شده است. باید افزود در کلیه‌ی نمونه‌ها، نسبت آرماتورکششی در مقطع ۰٫۶۲٪ (ثابت) بوده و در نمونه‌های شامل آرماتور یکپارچگی، ۲ آرماتور با قطر ۱۰ میلی‌متر در هر جهت قرار داشته است. در همه‌ی نمونه‌ها، پوشش خالص بتن در ناحیه‌ی فشاری ۱۵ میلی‌متر بوده است.



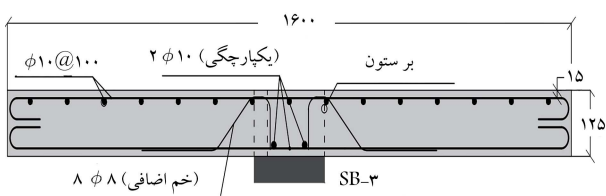
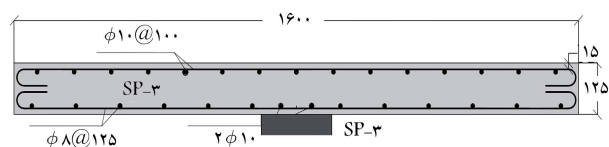
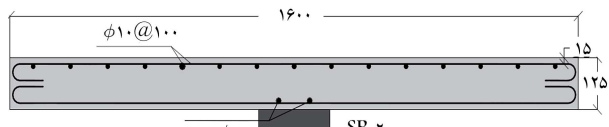
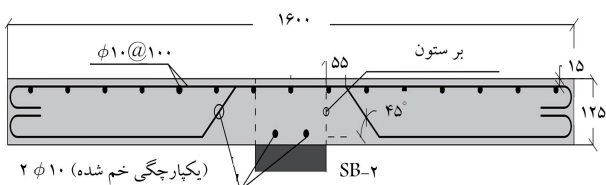
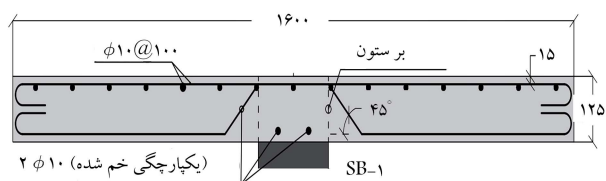
شکل ۳. آزمایش کشش آرماتور و مقاومت فشاری بتن.

۲.۲. برپایی آزمایش‌ها

جهت طراحی آرماتورهای کششی و یکپارچگی، ابتدا یک دال با دهانه‌ی ۶٫۸ متر و بارهای مرده و زنده به ترتیب مساوی با ۱٫۵ و ۲٫۵ کیلوپاسکال با استفاده از آیین‌نامه‌ی ۲۰۱۱ - ACI ۳۱۸ طراحی شده است، که در فرضیات آن ابعاد ستون مربعی، ۴۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. تکیه‌گاه‌های ساده در نقطه‌ی عطف خمش قرار دارند. نقطه‌ی عطف خمش در پژوهش حاضر مطابق با پژوهش موتونی^{۱۲} (۲۰۰۸)^[۱۰] در فاصله‌ی ۰٫۲۲ طول دهانه از برستون فرض شده است. با توجه به طراحی انجام شده و مقیاس ۰٫۵ برابر ابعاد واقعی، فاصله‌ی تکیه‌گاه‌ها ۱۵۰۰ میلی‌متر و ضخامت دال ۱۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است (شکل ۳). پوشش خالص بتن ۱۵ میلی‌متر (در وجه‌های فشاری و کششی) بوده است. در آزمایش حاضر از صفحه‌ی صلب مربعی با ابعاد ۲۰۰ میلی‌متر جهت بارگذاری (ستون) استفاده شده است. بارگذاری با جک هیدرولیکی با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلو نیوتن بوده است، که از طریق شاه‌تیر قاب دروازه‌ی متصل به زمین به دال نیرو وارد می‌گردد. اعمال بار به صورت استاتیکی (با نرخ حدود ۵۰ نیوتن در ثانیه) انجام شده است. لازم به ذکر است که جهت بارگذاری روی نمونه‌ها از بالا بوده و با توجه به بارهای واقعی وارده به دال (ستون از پائین به دال نیرو اعمال می‌کند)، نمونه‌ها به طور معکوس نسبت به حالت واقعی قرار گرفتند. به بیان ساده‌تر، در حین آزمایش‌ها، آرماتورهای کششی در پائین دال قرار داشتند. تغییرمکان وسط دال توسط تغییرمکان‌سنج خطی (LVDT)^{۱۳} اندازه‌گیری شده است (تغییرمکان‌سنج مذکور مستقیماً تغییرمکان صفحه‌ی صلب را اندازه‌گیری می‌کند) و نیرو توسط برداشت

جدول ۴. جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی.

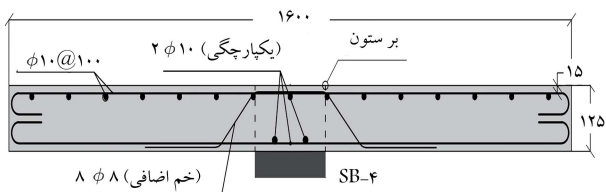
مشخصه‌ی گروه	نمونه	آرماتور کششی	یکپارچگی (mm)	آرماتور فشاری (mm)	آرماتور برشی (mm)	آرماتور خم شده‌ی اضافی (mm)
گروه ۱	SP-۱	$\phi 10 @ 100$	-	-	-	-
	SP-۲	$\phi 10 @ 100$	$4\phi 10$	-	-	-
	SP-۳	$\phi 10 @ 100$	$4\phi 10$	$\phi 8 @ 125$	-	-
گروه ۲	SB-۱	$\phi 10 @ 100$	$4\phi 10$	-	-	-
	SB-۲	$\phi 10 @ 100$	$4\phi 10$	-	-	(خم شده از بر ستون)
	SB-۳	$\phi 10 @ 100$	$4\phi 10$	-	-	(خم شده با فاصله‌ی ۵۵ mm از ستون)
	SB-۴	$\phi 10 @ 100$	$4\phi 10$	-	-	$8\phi 8$ $4\phi 8$
گروه ۳	SS-۱	$\phi 10 @ 100$	$4\phi 10$	-	$6\phi 8 @ 50$ (L-shape)	-
	SS-۲	$\phi 10 @ 100$	$4\phi 10$	-	$10\phi 8 @ 50$ (L-shape)	-
	SS-۳	$\phi 10 @ 100$	$4\phi 10$	-	$6\phi 8 @ 50$ (U-shape)	-



شکل ۵. جزئیات نمونه‌های مرجع (گروه ۱).

۱.۳. نمونه‌های مرجع (گروه ۱)

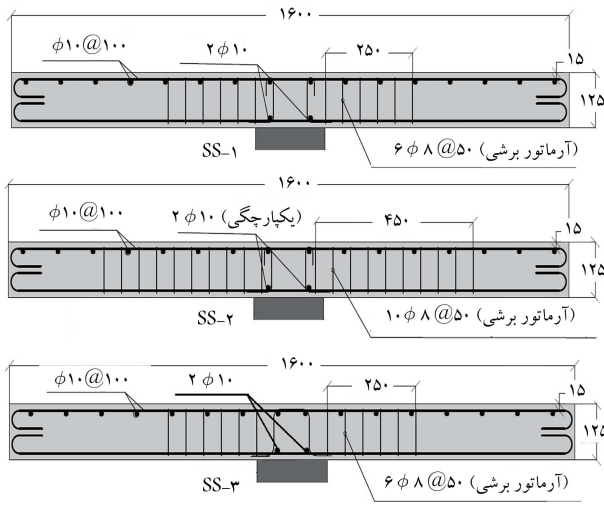
گروه ۱، سه نمونه دارد. نمونه‌ی SP-۱ شامل آرماتور کششی، نمونه‌ی SP-۲ شامل آرماتورهای کششی و یکپارچگی و در نمونه‌ی SP-۳ علاوه بر آرماتورهای کششی و یکپارچگی، آرماتور فشاری اضافی نیز وجود داشت (شکل ۵). باید افزود نمونه‌های گروه‌های بعدی با تغییراتی نسبت به نمونه‌ی SP-۲ ساخته و با آن نیز مقایسه شده‌اند.



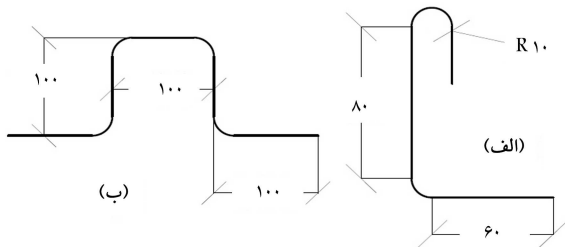
۲.۳. نمونه‌ها با آرماتورهای خم شده به بالا (گروه ۲)

گروه ۲، چهار نمونه دارد. همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است، در نمونه‌ی SB-۱،

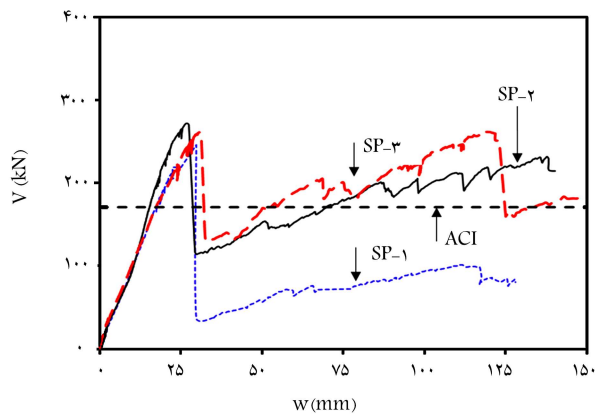
شکل ۶. جزئیات نمونه‌های با آرماتورهای خم شده به بالا (گروه ۲).



شکل ۹. جزئیات نمونه‌ها با آرماتور برشی (گروه ۳).

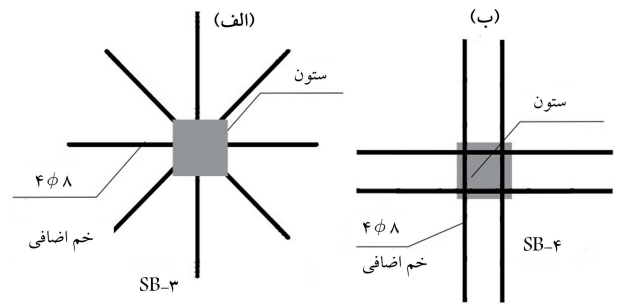


شکل ۱۰. جزئیات آرماتورهای برشی در نمونه‌های گروه ۳.

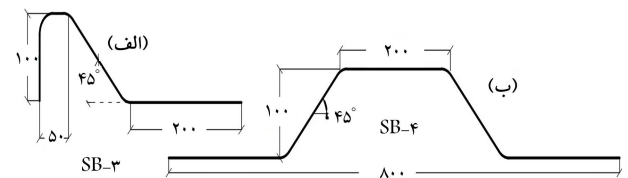


شکل ۱۱. نمودار برش - تغییرمکان نمونه‌های مرجع (گروه ۱).

یافته است. از سوی دیگر، مقاومت پس پانچینگ بیشینه در نمونه‌های SP-1 و SP-2 به ترتیب ۱۰۱ و ۲۳۲ کیلو نیوتن بوده و این موضوع نشان‌دهنده افزایش ۲۲۹ درصدی مقاومت پس پانچینگ به علت وجود آرماتور یکپارچگی است. در شکل ۱۲، آسیب بتن در مخروط پانچینگ در نمونه‌های SP-1 و SP-2 در ناحیه کششی مقایسه شده است. مقاومت پس پانچینگ بیشینه در نمونه‌های SP-2 و SP-3 به ترتیب ۲۳۲ و ۲۶۱ کیلو نیوتن بوده است (افزایش ۱۳ درصدی در نمونه SP-3)، ولیکن در نمونه SP-3 پس از مقاومت پس پانچینگ بیشینه، یک پله‌افت نسبت به نمونه SP-2 وجود دارد. از این موضوع می‌توان دریافت که آرماتورهای فشاری تأثیر چندانی در مقاومت پس پانچینگ ندارند.



شکل ۷. چیدمان آرماتورهای خم اضافی در نمونه‌های SB-3 و SB-4.



شکل ۸. جزئیات آرماتورهای خم اضافی در نمونه‌های SB-3 و SB-4.

آرماتورهای یکپارچگی با زاویه ۴۵ درجه به سمت بالا (ناحیه کششی) و تا مجاورت ستون خم شده‌اند. در نمونه SB-2 نیز همانند نمونه SB-1، آرماتور یکپارچگی به سمت بالا خم شده و فقط فاصله‌ی انتهای خم‌شدگی تا بر ستون، ۵۵ میلی‌متر (نصف ارتفاع مؤثر دال) بوده است.

همچنین نمونه‌های SB-3 و SB-4 مشابه با نمونه SP-2 هستند و تفاوت آن‌ها با نمونه SP-2، فقط اضافه شدن به ترتیب ۸ و ۴ آرماتور اضافی خم شده از ناحیه کششی به سمت پائین علاوه بر آرماتورهای یکپارچگی (آرماتور خم اضافی) مطابق با چیدمان شکل ۷ و جزئیات ارائه شده در شکل ۸ است.

۳.۳. نمونه‌ها با آرماتورهای برشی (گروه ۳)

نمونه‌های گروه ۳، همانند نمونه SP-2 هستند، با این تفاوت که در گروه مذکور از آرماتورهای برشی با جزئیات ساده و کاربردی در اجرا استفاده شده است. آرماتورهای برشی در ۴ وجه ستون قرار داشته و آرماتورهای در نمونه‌های SS-1 و SS-3 تا فاصله ۲۵۰ میلی‌متر (۲ برابر ارتفاع دال) و در نمونه SP-2 تا فاصله ۴۵۰ میلی‌متر از بر ستون ادامه یافته‌اند (شکل ۹). جزئیات آرماتورهای برشی نمونه‌های SS-1 و SS-2 در شکل ۱۰ - الف و جزئیات آرماتورهای برشی در نمونه SS-3 در شکل ۱۰ - ب مشاهده می‌شود.

۴. نتایج آزمایشگاهی

در بخش کنونی، نتایج آزمایش‌های ۱۰ نمونه بررسی و خلاصه‌ی آن‌ها در جدول ۵ ارائه شده است. خاطرنشان می‌سازد که تغییرمکان‌های یاد شده در جدول ۵، تغییرمکان وسط دهانه‌ی دال هستند.

۱.۴. نمونه‌های مرجع (گروه ۱)

در شکل ۱۱، نمودار برش - تغییرمکان نمونه‌های گروه ۱ مشاهده می‌شود، که مطابق آن و جدول ۵ ملاحظه می‌شود که در نمونه SP-1، نسبت مقاومت پس پانچینگ به پانچینگ ۴۱٪ بوده و در نمونه SP-2 نسبت یاد شده به ۸۵٪ افزایش

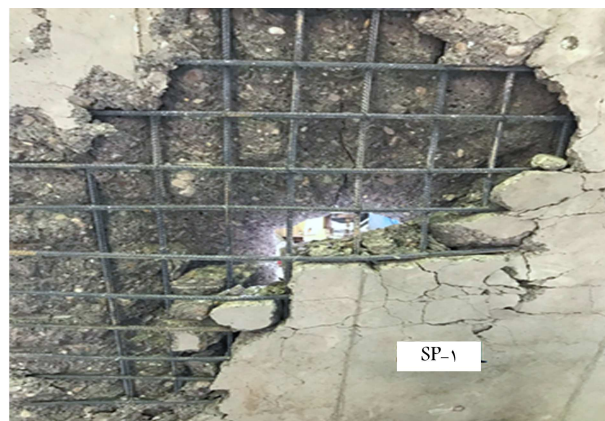
جدول ۵. خلاصه‌ی ویژگی‌های نمونه‌ها و نتایج پژوهش.

مشخصه‌ی گروه	نمونه	مقاومت		تغییر مکان		نسبت مقاومت	
		برش پانچینگ (کیلو نیوتن)	برش پانچینگ (میلی متر)	مقاومت پس پانچینگ نهایی (میلی متر)	تغییر مکان نهایی (میلی متر)	نسبت مقاومت پس پانچینگ به مقاومت ACI (%)	نسبت مقاومت پس پانچینگ به مقاومت (%)
گروه ۱	SP - ۱	۲۴۶	۳۰	۱۱۱	۸۰	۱۰۱	۵۹
	SP - ۲	۲۷۱	۲۷	۱۳۸	۲۱۴	۲۳۲	۱۳۶
	SP - ۳	۲۶۱	۳۱	۱۲۰	۱۸۲	۲۶۱	۱۵۳
گروه ۲	SS - ۱	۲۸۴	۳۵	۱۴۹	۲۴۹	۲۵۷	۱۵۱
	SS - ۲	۲۷۸	۳۴	-	۱۳۳	-	۷۸
	SS - ۳	۳۲۷	۳۷	۱۰۱	-	۲۱۳	۱۲۵
گروه ۳	SB - ۱	۳۷۵	۲۸	۶۶	۷۷	۲۶۵	۱۵۵
	SB - ۲	۳۰۸	۲۷	۷۸	۱۱۲	۲۳۵	۱۳۸
	SB - ۳	۳۰۱	۳۲	۱۰۵	۱۶۰	۱۷۹	۱۰۵
	SB - ۴	۲۹۲	۲۵	۱۲۰	۲۳۰	۲۳۵	۱۳۸

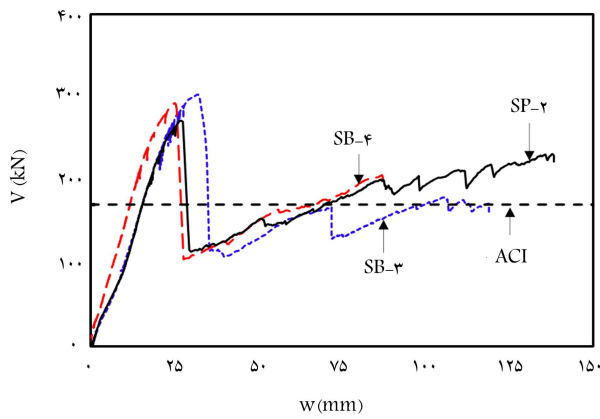
عدم کارایی آرماتورهای فشاری می‌تواند به علت قرار نگرفتن آرماتورهای فشاری در مخروط پانچینگ باشد. همان‌طور که در جدول ۵ مشخص است، نسبت مقاومت پس پانچینگ در نمونه‌های ۱ - SP، ۲ - SP، ۳ - SP نسبت به مقاومت پانچینگ پیش‌بینی شده در آیین‌نامه‌ی ۲۰۱۱ - ACI ۳۱۸ (برش پانچینگ محاسبه شده بر اساس ضوابط آیین‌نامه)، به ترتیب ۰/۵۹، ۱/۳۶ و ۱/۵۳ است و این موضوع نشان از کارایی آرماتور یکپارچگی جهت جلوگیری از تخریب پیش‌رونده دارد. باید افزود که با عنایت به نتایج، آرماتورهای یکپارچگی و فشاری تأثیر چندانی در افزایش مقاومت پانچینگ دال تخت ندارند.

۲.۴. نمونه‌ها با آرماتورهای خم شده به بالا (گروه ۲)

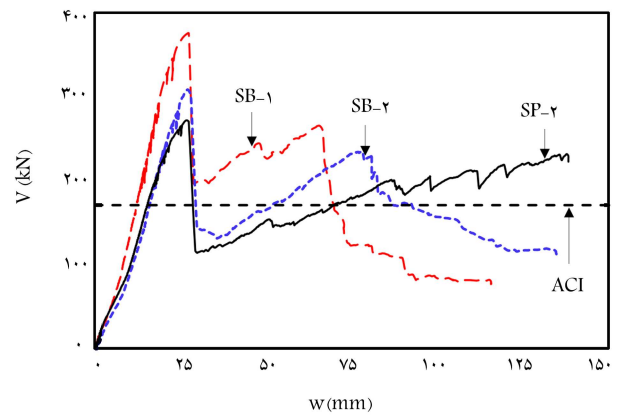
نتایج نمودار برش - تغییر مکان نمونه‌ها با آرماتور یکپارچگی خم شده به بالا در شکل ۱۳ مشخص است. با توجه به جدول ۵، مقاومت پانچینگ در نمونه‌های ۱ - SB و ۲ - SB (نمونه‌های مشابه با ۲ - SP و دارای آرماتورهای یکپارچگی خم شده به بالا به ترتیب به فاصله‌ی صفر و ۵۵ میلی‌متر از بر ستون) نسبت به نمونه‌ی ۲ - SP به ترتیب ۳۸ و ۱۴ درصد افزایش یافته و این نسبت افزایش برای مقاومت پس پانچینگ، ۱۴ و ۱ درصد بوده است. در نمونه‌ی ۱ - SB، در انتهای آزمایش گسیختگی، دو آرماتور یکپارچگی خم شده رؤیت شد. در شکل ۱۴، تصاویر وجه فشاری و کششی نمونه‌ی ۱ - SB در انتهای آزمایش مشاهده می‌شود. نتایج نمودار برش - تغییر مکان در نمونه‌ها با آرماتور خم اضافی (علاوه بر آرماتور یکپارچگی) در شکل ۱۵ مشخص است. با توجه به جدول ۵، مقاومت پانچینگ در نمونه‌های ۳ - SB و ۴ - SB نسبت به نمونه‌ی ۲ - SP به ترتیب ۱۱ و ۷ درصد افزایش یافته است. در نمونه‌های اخیر، افزایش محسوس در مقاومت پس



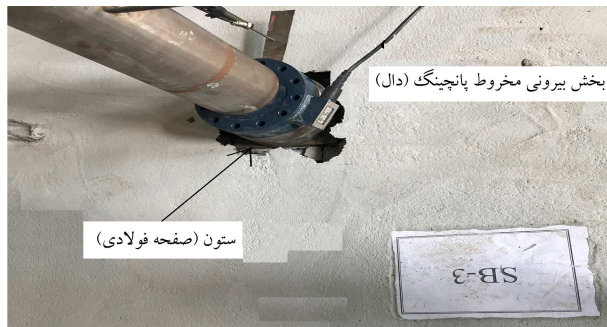
شکل ۱۲. مقایسه‌ی آسیب بتن در مخروط پانچینگ در نمونه‌های ۱ - SP و ۲ - SP در ناحیه‌ی کششی.



شکل ۱۵. رفتار برش - تغییرمکان نمونه‌ها با آرماتور خم اضافی.



شکل ۱۳. نمودار برش - تغییرمکان نمونه‌ها با آرماتور یکپارچگی خم شده به بالا.

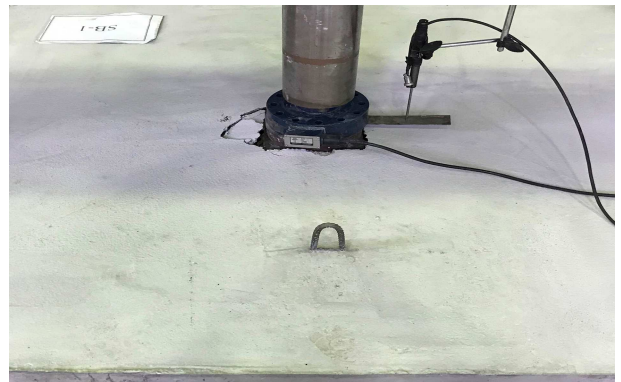


الف) بخش های تقسیم بندی شده در روی دال؛



ب) جزئیات قسمت مرکزی بخش الف.

شکل ۱۶. انتهای آزمایش نمونه‌ی SB - ۳.

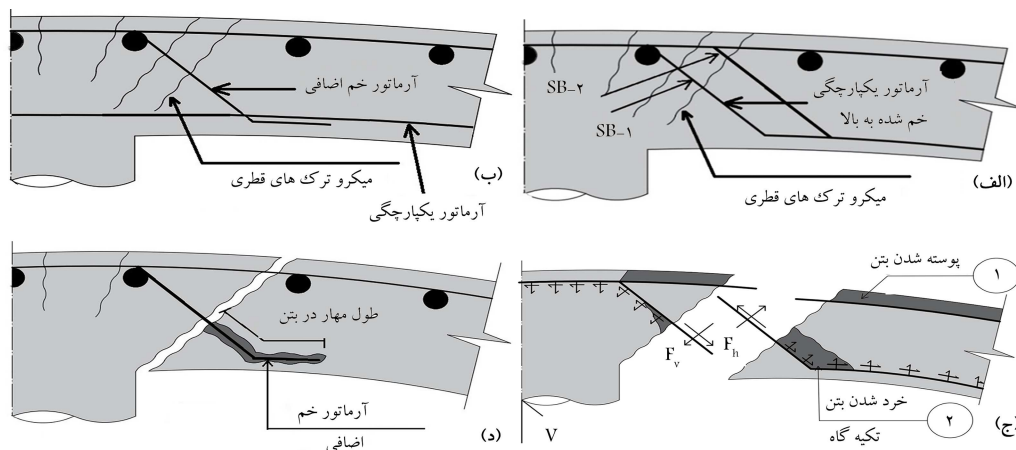


شکل ۱۴. وجه‌های فشاری و کششی نمونه‌ی SB - ۱ در انتهای باربری.

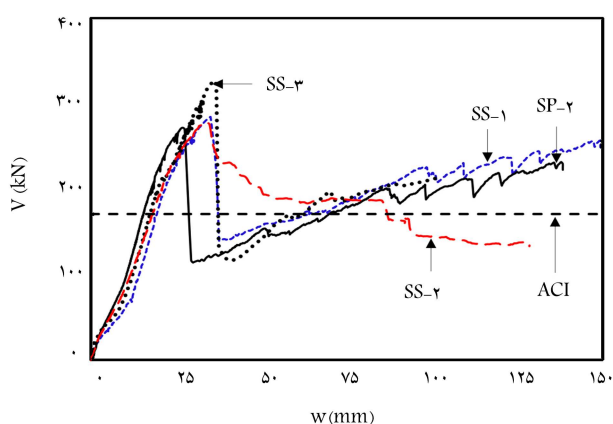
برشی بوده و تنش در آرماتور خم شده به بالا تا حد تسلیم افزایش یافته است. پس از رسیدن آرماتور به حد تسلیم، به دلیل تغییرمکان قابل توجه در آرماتور، ترک قطری پانچینگ ایجاد می‌شود. این موضوع می‌تواند منجر به افزایش مقاومت پانچینگ نمونه‌های SB - ۱ و SB - ۲ نسبت به نمونه‌ی SP - ۲ (دارای آرماتور یکپارچگی افقی) شود. با توجه به فاصله‌ی خم از ستون در نمونه‌ی SB - ۲، سودمندی آرماتور یکپارچگی افقی در جلوگیری از گسترش میکروتکرها کمتر از نمونه‌ی SB - ۱ است. از سوی دیگر، در نمونه‌ها با آرماتورهای خم اضافی SB - ۳ و SB - ۴، طول مهار آرماتورهای خم اضافی (طول مهار شده در بتن) در بیرون از مخروط پانچینگ به اندازه‌ی کافی نیست (شکل ۱۷ - ب)، از این جهت در نمونه‌های اخیر، آرماتورهای خم اضافی توانایی انتقال برش تا حد تسلیم آرماتورهای یکپارچگی خم شده را ندارند؛ بنابراین آرماتورهای یکپارچگی خم شده، توانایی تحمل

پانچینگ مشاهده نمی‌شود. در انتهای آزمایش نمونه‌ی SB - ۳، همان‌طور که در شکل ۱۶ مشخص است، آرماتور خم شده‌ی اضافی به بخش مرکزی دال (ستون) متصل بوده، ولی از دال جدا شده است و این موضوع عدم کارایی آرماتور ذکر شده را در مرحله‌ی پس از گسیختگی برشی پانچینگ مشخص می‌کند، که در بخش بعدی به علت جداشدگی اشاره شده پرداخته شده است. باید افزود که نمونه‌ی SB - ۴ دچار خرد شدن بتن در تکیه‌گاه شده و با این مود گسیختگی غیرقابل پیش‌بینی، امکان ادامه‌ی آزمایش تا جابه‌جایی‌های بیشتر نبوده است.

در شکل ۱۷ - الف، اتصال دال تخت با آرماتورهای کششی و یکپارچگی خم شده به بالا (نمونه‌های SB - ۱ و SB - ۲) به همراه ترک‌های خمشی و ریزترک‌های برشی مشخص است. با افزایش بارگذاری در نمونه‌های مذکور (بعد از ایجاد ریزترک‌ها)، آرماتور یکپارچگی خم شده به بالا تقریباً عمود بر میکروتکرها



شکل ۱۷. رفتار نمونه‌ها با آرماتور خم شده.



شکل ۱۸. نمودار برش-تغییرمکان نمونه‌ها با آرماتور برشی.

برش پانچینگ بیشتری را نسبت به آرماتورهای خم اضافی دارند. در نمونه‌های SB-۲ و SB-۱، با ایجاد ترک برشی پانچینگ، مشارکت مقاومت برشی بتن از مقاومت برشی اتصال حذف شده و فقط آرماتور یکپارچگی خم شده از طریق عملکرد کششی و شاخه‌یی (به آرماتور خم شده نیروی برشی و کششی وارد می‌شود) و آرماتور کششی از طریق عملکرد شاخه‌یی در سازوکار انتقال برش مشارکت می‌کنند (دیاگرام نیروها در شکل ۱۷ - ج مشخص است). با توجه به عملکرد دوگانه‌ی آرماتور یکپارچگی خم شده به بالا (کششی و شاخه‌یی)، مقاومت پس پانچینگ در نمونه‌های SB-۲ و SB-۱ بیش از نمونه‌ی SP-۲ (با آرماتور یکپارچگی افقی با عملکرد شاخه‌یی) است. همان‌طور که در دیاگرام نیروها در شکل ۱۷ - ج مشخص است، با افزایش نیروی برشی در مرحله‌ی پس پانچینگ، آرماتور یکپارچگی خم شده به بتن نیروی فشاری وارد کرده و این موضوع منجر به خرد شدن بتن تکیه‌گاهی (ناحیه‌ی ۲) شده و با تخریب پیش‌رونده‌ی ناحیه‌ی ۲ و پیوستن به ناحیه‌ی ۱ و در نتیجه از بین رفتن تکیه‌گاه آرماتور یکپارچگی خم شده، مقاومت پس پانچینگ افت می‌کند (منحنی شکل ۱۳). همان‌طور که ذکر شد، در نمونه‌های SB-۳ و SB-۴، آرماتورهای خم اضافی به علت عدم تأمین طول مهار در بتن در مرحله‌ی پانچینگ، توانایی تحمل تنش‌ها تا تنش تسلیم را ندارند؛ از این جهت در مرحله‌ی پس پانچینگ مؤثر نخواهند بود (شکل‌های ۱۷ - د و ۱۶). باید افزود که نسبت مقاومت‌های پس پانچینگ بیشینه در نمونه‌های SB-۱، SB-۲، SB-۳، SB-۴ به مقاومت پانچینگ پیش‌بینی شده در آیین‌نامه‌ی ACI، به ترتیب ۱۵۵، ۱۳۸، ۱۰۵ و ۱۳۸ درصد بوده است.



شکل ۱۹. سازوکار گسیختگی وجه‌های فشاری و کششی نمونه‌ی SS-۲.

۳.۴. نمونه‌ها با آرماتورهای برشی (گروه ۳)

نتایج نمودار برش-تغییرمکان نمونه‌ها با آرماتور برشی، در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود. مطابق جدول ۵، مقاومت پانچینگ در نمونه‌های SS-۱، SS-۲، SS-۳ و SS-۴ نسبت به مقاومت پانچینگ در نمونه‌ی SP-۲ به ترتیب به میزان ۳، ۲۱ و ۲۱ درصد افزایش یافته است. باید افزود که در نمونه‌ی SS-۳، مود ناخواسته‌ی شکست تکیه‌گاه رخ داده است. از نتایج این‌گونه استنباط می‌شود که آرماتورهای برشی با شکل (نمونه‌های SS-۱ و SS-۲) کارایی چندانی حتی در برش پانچینگ ندارند و کارایی آرماتورهای U شکل، در خصوص مقاومت پانچینگ قابل ملاحظه

است. منحنی برش-تغییرمکان نمونه‌ی SS-۲ (شکل ۱۸) نشان می‌دهد که افت ناگهانی مقاومت پس از پانچینگ رخ نمی‌دهد. از این رو، چنانچه آرماتورهای برشی به فاصله‌ی بیشتری از بر ستون ادامه یابند (نمونه‌ی SS-۲) شکل‌پذیری اتصال دال تخت به ستون افزایش می‌یابد. در شکل ۱۹، سازوکار گسیختگی وجه‌های فشاری

۲. وجود آرماتورهای فشاری (به غیر از آرماتور یکپارچگی) در محدوده نوار ستونی، در مقاومت های پانچینگ و برشی پس از پانچینگ تأثیر چندانی نخواهد داشت؛
۳. خم کردن آرماتورهای یکپارچگی به سمت بالا (ناحیه کششی) می تواند مقاومت های برش پانچینگ و برش پس پانچینگ بیشینه را افزایش دهد؛
۴. آرماتورهای خم اضافی می توانند در افزایش مقاومت پانچینگ تأثیر به سزایی داشته باشند؛ ولیکن این آرماتورها در مقاومت پس پانچینگ تأثیری ندارند؛
۵. آرماتورهای برشی U شکل می توانند مقاومت پانچینگ اتصال را افزایش دهند. امتداد یافتن آرماتورهای برشی در طول نوار ستونی می تواند شکل پذیری دال را افزایش دهند. باید دانست آرماتورهای برشی توانایی افزایش قابل ملاحظه در مقاومت پس پانچینگ را ندارند؛
۶. مطابق با نتایج آزمایشگاهی پژوهش حاضر، چنانچه اتصال دال تخت - ستون مطابق با آئین نامه ی ۱۱ - ACI ۳۱۸ طراحی شود، اتصال یاد شده (اتصال بدون آرماتور یکپارچگی و نهیدات دیگر) می تواند حدود ۰/۶ مقاومت پانچینگ پیش بینی شده در آئین نامه را در مرحله ی پس از گسیختگی پانچینگ تحمل کند و این در حالی است که وقتی در اتصال آرماتور یکپارچگی، آرماتور یکپارچگی خم شده به بالا و آرماتور خم اضافی (علاوه بر آرماتور یکپارچگی) لحاظ شده است، نسبت مقاومت پس از پانچینگ به مقاومت پانچینگ پیش بینی شده در آئین نامه ی ACI به ترتیب ۱/۳۶، ۱/۵۵ و ۱/۳۸ بوده است.

و کششی نمونه ی ۲ - SS در انتهای آزمایش مشخص است. با توجه به شکل ۱۸ می توان نتیجه گرفت که نمونه ها با آرماتورهای برشی، تأثیری قابل ملاحظه یی در مقاومت پس پانچینگ نخواهند داشت. این موضوع می تواند به علت عدم طولی مهاری کافی آرماتورهای برشی در بتن پس از گسیختگی پانچینگ (مشابه با توضیحات آرماتورهای خم اضافی) باشد.

۵. نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، ۱۰ نمونه ی دال با مقیاس ۰/۵ با هدف بهبود مقاومت اتصال دال تخت به ستون پس از گسیختگی پانچینگ آزمایش شده است. در نمونه ها آثار آرماتورهای یکپارچگی (آرماتورهای عبوری از ستون در بخش فشاری)، آرماتورهای فشاری، آرماتورهای خم شده به بالا، و آرماتورهای برشی در مقاومت پس پانچینگ بررسی شده و بر اساس آزمایش ها، این نتایج به دست آمده است:

۱. وجود دو آرماتور فشاری عبوری از ستون در اتصال دال تخت به ستون (آرماتور یکپارچگی) می تواند مقاومت برشی دال - ستون پس از گسیختگی پانچینگ را به طور مؤثری بهبود بخشد؛

پانویس ها

1. Hawkins and Mitchell
2. integrity reinforcement
3. Mitchel and Cook
4. Melo and Regan
5. Fernández
6. Habibi
7. drop panel
8. crushing
9. splitting
10. breakout
11. Crushing
12. Muttoni
13. linear variable displacement transducer
14. load cell
15. logger-data

منابع (References)

1. King, S. and Delatte, N.J. "Collapse of 2000 commonwealth avenue: punching shear case study", *Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE*, **18**(1), pp. 54-61 (Feb 2004).
2. Leyendecker, E.V. and Fattal, S.G. "Investigation of the skyline plaza collapse in fairfax county, Virginia", Centre for Building Technology Report BSS 94, Institute

for Applied Technology, National Bureau of Standards, Washington, D.C. p. 57 (1973).

3. Lew, H.S, Carino, N.J. and Fattal, S.G. "Cause of the condominium collapse in cocoa beach, Florida", *Concrete International, American Concrete Institute*, **4**(8), pp. 64-73 (1982).
4. Mitchell, D., Adams, J., DeVall, R.H. and et al. "Lessons from the 1985 Mexican Earthquake", *Canadian Journal of Civil Engineering*, **13**(5), pp. 535-557 (Aug 1986).
5. Fernández, R.M., Mirzaei, Y. and Muttoni, A. "Post-punching behavior of flat slabs", *ACI Structural Journal*, **110**, pp. 801-812 (Oct 2013).
6. Hawkins, N.M. and Mitchell, D. "Progressive collapse of flat plate structures", *ACI Journal, USA*, **76**(10), pp. 775-808 (July 1979).
7. Mitchell, D. and Cook, W.D. "Preventing progressive collapse of slab structures", *Journal of Structural Engineering, USA*, **110**(7), pp. 1513-1532 (July 1984).
8. Melo, G.S. and Regan, P.E. "Post-punching resistance of connections between flat slabs and interior columns", *Magazine of Concrete Research, UK*, **50**(4), pp. 319-327 (Dec 1998).
9. Habibi, F., Redl, E., Egberts, M. and et al. "Assessment of CSA A23.3 structural integrity requirements for two-way slabs", *Canadian Journal Civil Engineering*, **39**(4), pp. 351-361 (Mar 2012).

10. Muttoni, A. "Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement", *ACI Structural Journal, USA*, **105**(4), pp. 440-450 (July-Aug 2008).
11. ACI-ASCE Committee 426. "Shear strength of reinforced concrete members slabs", In: Proc, ASCE, 100(ST8), pp. 543-1591 (1974).
12. Mitchell, D. "Controversial issues in the seismic design of reinforced concrete frames", Recent Developments in Lateral Force Transfer in Buildings, Thomas Paulay Symposium, American Concrete Institute, La Jolla, CA, pp.73-93 (1993).
13. Dei Poli, S., di Prisco, M. and Gambarova, P. "Cover and stirrup effects on the shear response of dowel bar embedded in concrete", *ACI Structural Journal*, **90**(4), pp. 441-450 (July-Aug 1993).
14. Vintzeleou, E. and Tassios, T.P. "Mathematical models for dowel action under monotonic and cyclic conditions", *Magazine of Concrete Research*, **38**(134), pp. 13-22 (Mar 1986).
15. Jelic, I., Pavlovic, M.N. and Kotsovov, M.D. "A study of dowel action in reinforced concrete beams", *Magazine of Concrete Research*, **2**(2), pp. 131-141 (Apr 1999).
16. Soroushian, P., Obaseki, K., Rojas, M. and et al. "Analysis of dowel bars acting against concrete core", *ACI Structural Journal*, **83**(4), pp. 642-649 (July 1986).
17. Knoll, F. and Vogel, T. "Design for robustness", *Structural Engineering Documents*, **11**, p. 99 (2009).
18. Mirzaei, Y. and Muttoni, A. "Tests of the post punching behavior of the reinforced concrete flat slabs", Switzerland: IBETON (2008).