

رفتار برش منگنه‌یی دال‌های تخت تقویت شده با بتن ECC

بهداد هاشمی سالانقوج (دانشجوی کارشناسی ارشد)

محمدرضا اصفهانی* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

مهندسی عمران شریف، زمستان (۱۳۹۹)
دوری ۲ - ۳۶، شماره ۲/۴، ص. ۱۳۳-۱۴۲، (پادداشت شی)

در این پژوهش، ساخت و تقویت دال‌های تخت با استفاده از بتن ECC و تأثیر آن بر روی برش منگنه‌یی دال‌ها بررسی می‌شود. نه عدد دال بتن مسلح به ابعاد 1000×1000 میلی‌متر با ضخامت‌های متفاوت و درصد فولاد یکسان ساخته و آزمایش شدند. سایر پارامترهای متغیر در نمونه‌ها شامل وجود برش‌گیر در اتصال لایه‌ی تقویتی به دال، نوع بتن و نوع آب مصرفی هستند. بارگذاری بر روی سکوی بتنی دال با استفاده از یک جک فشاری انجام شده است و تکیه‌گاه‌ها به صورت ساده‌اند. نتیجه‌های آزمایش‌ها به صورت نمودارهای بار- تغییر مکان هستند که نشان می‌دهند استفاده از بتن ECC در ساخت و تقویت دال‌ها موجب افزایش سختی خمشی و برشی و مقاومت برش منگنه‌یی دال‌ها می‌شود. از طرفی استفاده از آب مغناطیسی باعث بهبود روانی بتن ECC شده است.

behdad4100@yahoo.com
esfahani@um.ac.ir

واژگان کلیدی: برش منگنه‌یی، دال بتنی، تقویت، آب مغناطیسی، ECC.

۱. مقدمه

بعد از اتمام ساخت دال به‌عنوان تقویت برشی استفاده شود. با توجه به این‌که بتن ECC فاقد درشت‌دانه است و نسبت به بتن معمولی نیاز به ضخامت کمتری دارد، می‌توان این قسمت اضافی را شامل کف‌سازی در نظر گرفت (شکل ۲).

تیان و همکاران^[۱] عوامل مؤثر بر مقاومت برش سطحی بین بتن معمولی و بتن ECC ساخته شده از الیاف پلی‌وینیل‌الکل (PVA) را مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که میزان ناهمواری سطح بتن معمولی تأثیر چشم‌گیری بر مقاومت برش سطحی دارد. جئو و همکاران^[۵] بر روی تأثیر دما بر چسبندگی بتن معمولی و بتن ECC تحقیق کردند. آن‌ها ۶۶ نمونه‌ی استوانه‌یی با برش ۴۵ درجه و ۶۶ نمونه کشش مستقیم ساختند. نتایج آن‌ها نشان داد که تا دمای ۲۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد چسبندگی افزایش اما بعد از آن کاهش می‌یابد. حسین و همکاران^[۶] مقاومت برشی تیرهای ساخته از بتن خودمتراکم، بتن ECC و تیرهای ساخته شده به صورت ترکیب لایه‌هایی از این دو نوع بتن را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که تیرهای ساخته شده از ترکیب بتن خودمتراکم و بتن ECC بدون میل‌گرد برشی بیشترین شکل‌پذیری و جذب انرژی را دارد. همچنین، تیرهای ساخته شده از ترکیب این دو نوع بتن و استفاده از میل‌گرد برشی بیشترین مقاومت برشی را نشان داد. جی و همکاران^[۱۱] فرمول‌ها و روش‌های عددی را برای محاسبه‌ی مقاومت خمشی، انحنای تیر و جذب انرژی ارائه کردند. آن‌ها بر روی یازده عدد تیر مسلح، که ترکیب بتن معمولی و بتن ECC بود که در قسمت کششی تیر قرار داشت، آزمایش کردند. بر اساس نتایج آن‌ها، با افزایش درصد میل‌گرد یا مقاومت میل‌گرد، شکل‌پذیری و جذب انرژی در تیرکاهش می‌یابد؛ همچنین ارتفاع لایه‌ی بتن ECC بر مقاومت خمشی تأثیر مثبت داشته اما

مصلح مرکب سیمانی مهندسی شده ECC^۱ بتن انعطاف‌پذیری است که نسبت به بتن معمولی دارای شکل‌پذیری بالاست. در بافت این بتن، درشت‌دانه حذف شده و برای جلوگیری از کاهش مقاومت بتن از موادی مانند میکروسیلیس، سرباره‌ی کوره‌ی زغال سنگ، ماسه‌ی بادی و الیاف مصنوعی استفاده شده است. در جدول ۱ مشخصات فیزیکی بتن ECC آورده شده است.^[۱] در گذشته از بتن ECC برای ساخت و تقویت تیرها و اتصالات تیر به ستون استفاده شده و تحقیقات بسیاری در این زمینه انجام شده است.^[۲] با توجه به نتیجه بخش بودن استفاده از ECC در ساخت و تقویت تیرها، می‌توان از این بتن در ساخت و تقویت دال‌ها نیز استفاده کرد.

از سوی دیگر مطالعات محدودی در زمینه‌ی تقویت دال‌های تخت بتن مسلح با بتن ECC انجام شده است.^[۳] استفاده از بتن ECC در ساخت و تقویت دال منجر به افزایش ظرفیت خمشی در ناحیه‌ی کشش و همچنین افزایش شکل‌پذیری تا نقطه‌ی شکست می‌شود. بنابراین ظرفیت برش منگنه‌یی دال نیز افزایش می‌یابد. در دال‌های تخت به‌منظور افزایش ظرفیت برش منگنه‌یی از پهنه یا سرستون استفاده می‌شود. استفاده از پهنه به صورت زائده‌یی در سقف ایجاد می‌شود (شکل ۱). هدف از این پژوهش امکان حذف این زائده و افزایش ظرفیت برش منگنه‌یی از طریق استفاده از بتن ECC در قسمت بالای دال است (شکل ۲). اضافه کردن این قسمت می‌تواند هم در ساخت دال و هم

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۱۰/۵، اصلاحیه ۱۳۹۸/۱۱/۳۰، پذیرش ۱۳۹۸/۱۲/۲۱

DOI:10.24200/J30.2020.55003.2692

جدول ۱. مشخصات فیزیکی اصلی بتن ECC.

مقاومت فشاری (MPa)	۲۰-۹۵
مقاومت نهایی کششی (MPa)	۴-۱۲
کرنش نهایی کششی (%)	۱-۸
مدول کشسانی (GPa)	۱۸-۳۴
مقاومت خمشی (MPa)	۱۰-۳۰
وزن مخصوص (gr/cc)	۰/۹۵-۲/۳

جدول ۲. طرح اختلاط بتن معمولی در ۱ متر مکعب بتن.

میزان مصرفی در تهیه بتن ECC	میزان مصرفی	وزن مخصوص	قطر بزرگترین ذره (mm)
(kg)	(kg)	(gr/cm ³)	(mm)
سیمان (تیپ دو)	۴۹۶	۳/۱۶	۵-۲۰
میکروسیلیس	۲۶۴	۲/۵	۰/۰۰۱
پودرسنگ (کربنات کلسیم)	۵۹۶	۲/۷	۰/۰۰۵
سرباره‌ی کوره آهن (غبار)	۱۳۲	۴	۰/۰۰۶
الیاف پروپیلن (۱۲ mm)	۱۵	۰/۹۳	-
آب	۴۵۲	۱	-
فوق روان‌کننده (پلی‌کر بوسیلیات)	۱۸	۱/۲	-
وزن کل بتن	۱۹۶۳	۱/۹۶۳	-

شامل نسبت درشت‌دانه، نسبت آب به سیمان، مقدار سیمان و میزان مغناطیسی شدن آب بود. بر اساس نتایج آنها آب مغناطیسی باعث افزایش ۴۰ تا ۹۰ درصدی روانی بتن می‌شود. آنها نشان دادند که شدت مغناطیسی شدن آب باعث افزایش ۱۶ درصدی روانی بتن می‌شود. آب مغناطیسی موجب افزایش ۱۰ الی ۱۹ درصدی مقاومت فشاری بتن می‌شود. با توجه به تحقیقات صورت گرفته در گذشته بر روی بتن ECC و شکل‌پذیری بالای این نوع بتن و مقاومت مناسب، در این پژوهش سعی شده است تا با استفاده از این بتن در ساخت و تقویت دال‌های تخت، ظرفیت برش منگنه‌بی افزایش داده شود. بتن ECC به این دلیل که فاقد درشت‌دانه است، در ضخامت کم، در قسمت بالای دال قابل استفاده است تا به جای استفاده از بتن معمولی به صورت پهنه یا سرستون که باعث ایجاد زائده‌بی در سقف می‌شود، به صورت بخشی از کف‌سازی در نظر گرفته شود.

۲. کار آزمایشگاهی

۱.۲. مشخصات مصالح

۱.۱.۲. بتن معمولی

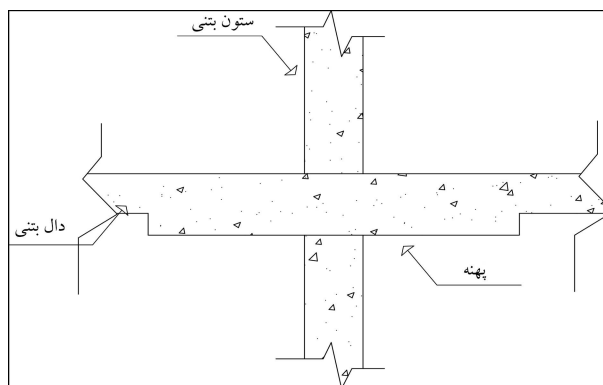
برای یکسان بودن مقاومت بتن مورد استفاده در دال‌ها، بتن مصرفی از بیرون و به صورت یک‌جا تهیه شد. برای تعیین مقاومت فشاری بتن مورد استفاده ۳ عدد نمونه‌ی استوانه‌یی استاندارد ۳۰ × ۱۵۰ میلی‌متر از بتن نمونه‌گیری شد. مشخصات و نسبت وزنی مصالح مورد استفاده در ۱ متر مکعب از بتن معمولی مصرفی در دال‌های ساخته شده در جدول ۲ آورده شده است. نمونه‌های فشاری استوانه‌یی استاندارد در شرایط عمل‌آوری یکسان با شرایط عمل‌آوری دال‌ها به مدت ۲۸ روز نگهداری شدند و سپس تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند که مقاومت آن‌ها به طور میانگین ۲۷ مگاپاسکال به دست آمد.

۲.۱.۲. میل‌گردهای فولادی مصرفی

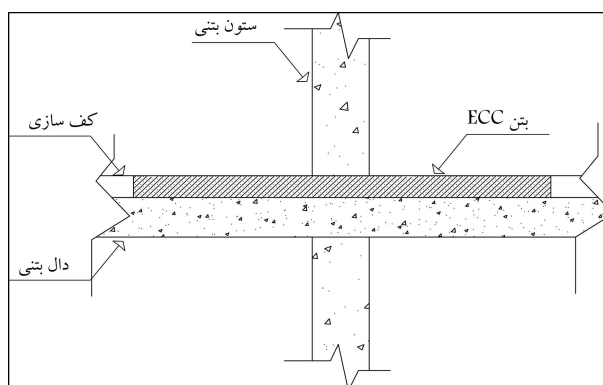
برای مسلح کردن بتن از میل‌گردهای فولادی نوع ۳ با تنش تسلیم ۴۰۰ مگاپاسکال استفاده شد. میل‌گردهای فولادی از شبکه با ۷ عدد میل‌گرد در هر طرف به قطر ۱۲ استفاده شده است. درصد میل‌گرد در مقطع ۸۴۲/۰٪ است.

۳.۱.۲. بتن ECC

با توجه به این‌که برخی از مواد مانند سرباره‌ی کوره‌ی زغال‌سنگ در ایران به‌سختی یافت می‌شود، سرباره‌ی کوره‌ی آهن به‌عنوان جایگزین استفاده شده است. در



شکل ۱. برشی از دال با پهنه.

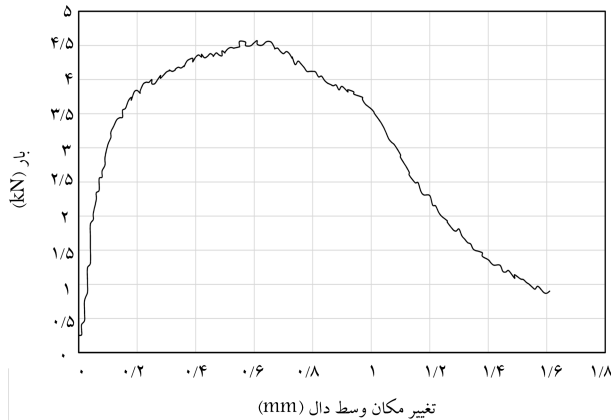


شکل ۲. برشی از دال با لایه‌ی بتن ECC.

بر شکل‌پذیری و جذب انرژی تأثیر قابل توجهی نداشته است. چوی و همکاران^[۷] بر روی تقویت و ترمیم دیوارهای بنایی با بتن ECC تحقیق کردند. نوع بارگذاری در این پژوهش به صورت رفت و برگشتی بوده است. در این تحقیق بتن ECC بر روی دیوارهای بنایی پاشیده شده است تا تأثیر این بتن بر روی مقاومت و شکل‌پذیری دیوار بررسی شود. آن‌ها بر روی نمونه‌های تقویت شده با بتن ECC و تقویت شده با ترکیب بتن ECC و شبکه‌ی سیمی تحقیق کردند. نتایج نشان داد که استفاده از این بتن به تنهایی باعث افزایش ۱/۸ برابری و به صورت ترکیب با شبکه‌ی سیمی باعث افزایش ۳ برابری ظرفیت باربری خمشی خواهد شد. همچنین این محققان نشان دادند که استفاده از بتن ECC باعث افزایش شکل‌پذیری و جذب انرژی می‌شود. افنی و همکاران^[۴] بر روی دال‌های یک‌طرفه‌ی بتنی تقویت شده با بتن ECC مطالعه کردند. بررسی‌های آن‌ها نشان داد که تقویت دال‌ها با بتن ECC باعث افزایش ظرفیت باربری و شکل‌پذیری آن‌ها می‌شود. فریس و همکاران^[۸] بر روی ۱۷ نوع طرح اختلاط شامل آب معمولی و مغناطیسی مطالعه کردند. پارامترهای متغیر



شکل ۴. دستگاه نرم‌ساز آب برای تولید آب مغناطیسی.



شکل ۵. نمودار بار - تغییر مکان نمونه خمشی بتن ECC ساخته شده با آب مغناطیسی.

ساختن بتن ECC با آب مغناطیسی برای دال‌ها، از بتن ساخته شده عدد نمونه‌ی استوانه‌یی استاندارد $150 \times 300 \times 150$ و ۳ عدد نمونه‌ی خمشی $50 \times 100 \times 300$ (ابعاد بر حسب میلی‌متر است) گرفته شد تا مقاومت فشاری و خمشی بتن ساخته شده با آب مغناطیسی ارزیابی شود. مقاومت فشاری بتن ECC ساخته شده از آب مغناطیسی به‌طور میانگین ۳۰٪ به دست آمده است و نمودار بار - تغییر مکان نمونه‌ی خمشی در شکل ۵ نشان داده شده است.

در آزمایش جریان روانی بتن ECC ساخته شده با آب مغناطیسی، قطر پخش‌شدگی بتن ۴۲۰ میلی‌متر به دست آمد.

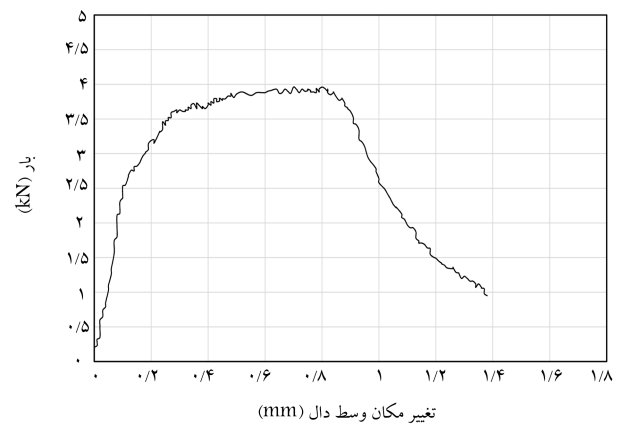
۳. مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی

در این پژوهش ۹ عدد دال بتنی به ابعاد 1000 در 1000 میلی‌متر به ضخامت‌های مختلف 100 و 130 میلی‌متر ساخته شده است. به‌منظور مدل‌سازی اتصال دال - ستون، در وسط تمام دال‌ها یک سکوی بتنی 150 میلی‌متر در 150 میلی‌متر به ارتفاع 150 میلی‌متر (به‌جای ستون) ساخته شد (شکل ۶). جدول‌های ۴ و ۵ به مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهند.

برای نام‌گذاری نمونه‌های آزمایشگاهی از حروف و علائم زیر استفاده شده است. حرف PC (plane concrete) نشان‌دهنده‌ی بتن معمولی و ECC نشان‌دهنده‌ی مصالح ترکیب سیمانی شده است. حرف R نشان‌دهنده‌ی میل‌گرد مصرفی است که اگر قبل از PC باشد یعنی قفسه‌ی میل‌گرد درون بتن معمولی و اگر قبل از ECC باشد به معنای استفاده از قفسه‌ی میل‌گرد درون بتن ECC است. اعداد نوشته شده پس از حروف PC و ECC نشان‌دهنده‌ی ضخامت بتن هستند. حروف SH به معنای استفاده از برش‌گیر U شکل برای اتصال ۲ لایه بتن به یکدیگر است. حرف

جدول ۳. وزن مخصوص مصالح مصرفی و طرح اختلاط بتن ECC برای ۱ متر مکعب بتن.

وزن مخصوص (k)	مواد مصرفی در تهیه‌ی بتن
۳۵۰	سیمان
۵۸۰	سنگ‌دانه‌ی درشت (بادامی)
۱۵۰	سنگ‌دانه‌ی متوسط (نخودی)
۱۱۰۰	سنگ‌دانه‌ی ریز (ماسه)
۱۷۲	آب
۲۳۵۲	وزن کل بتن



شکل ۳. نمودار بار - تغییر مکان نمونه‌ی خمشی بتن ECC ساخته‌شده با آب معمولی.

جدول ۳، وزن مخصوص مصالح مصرفی و نسبت‌های وزنی مواد مورد استفاده در ۱ مترمکعب از بتن ECC آورده شده است. نسبت اختلاط بتن ECC پس از آزمون و خطا طوری تعیین شد که مقاومت فشاری آن به مقاومت فشاری بتن معمولی نزدیک باشد. در هنگام ساختن بتن ECC برای دال‌ها، از بتن ساخته شده ۳ عدد نمونه‌ی فشاری استوانه‌یی استاندارد $150 \times 300 \times 150$ و ۳ عدد نمونه‌ی خمشی $50 \times 100 \times 300$ (ابعاد بر حسب میلی‌متر است) تهیه شد تا مقاومت فشاری و خمشی بتن ساخته شده ارزیابی شود. مقاومت فشاری بتن ECC ساخته شده به‌طور میانگین ۲۸٪ مگاپاسکال و نمودار بار - تغییر مکان نمونه‌ی خمشی در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به این‌که بتن ECC از دسته‌ی بتن‌های روان است، جریان روانی آن به‌صورت قطر پخش‌شدگی اندازه‌گیری می‌شود. برای بتن ECC تولید شده با آب معمولی، این میزان در حدود ۳۲۰ میلی‌متر است.

۴.۱.۲. بتن ECC با آب مغناطیسی

هنگامی که آب از درون میدان مغناطیسی عبور می‌کند، مولکول‌های آن آرایش منظمی به خود می‌گیرند که باعث نرم شدن آب می‌شود. همین ویژگی باعث می‌شود تا مقاومت فشاری و روانی بتن افزایش یابد. محققان بسیاری بر روی تأثیر آب مغناطیسی بر روی ساختار بتن تحقیق کرده‌اند و متوجه نتایج سودمند آب مغناطیسی بر روی بتن شدند. به همین منظور در این پژوهش نیز سعی شد تا تأثیر آب مغناطیسی بر روی بتن ECC بررسی شود. برای تولید آب مغناطیسی، آب از درون دستگاه نرم‌ساز آب (شکل ۴) در ۱۰ دور عبور داده شد تا آب مغناطیسی تولید شود. در هنگام



شکل ۷. قالب‌های آماده برای بتن ریزی.

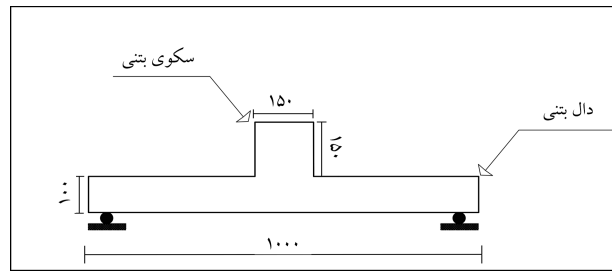


شکل ۸. دستگاه بارگذاری.

سازه‌ها صورت گرفته است. این سیستم اعمال بار در شکل ۸ نشان داده شده است. در این سیستم نمونه‌های آزمایشگاهی در درون قاب دستگاه قرار می‌گیرد و نیروی فشاری از بالا (در خلاف جهت بارگذاری دال روی ستون) و از طریق یک جک فشاری به ظرفیت ۲۰۰ تن، به نمونه‌ی آزمایشگاهی وارد می‌شود. مدت زمان بارگذاری برای هر نمونه بین ۱۵ دقیقه تا ۲۵ دقیقه به طول انجامیده است.

۵. دستگاه آزمایش، تجهیزات اندازه‌گیری

برای اندازه‌گیری میزان نیروی وارده از دستگاه به نمونه، از یک عدد نیروسنج ۵۰ تنی استفاده شد. همچنین برای اندازه‌گیری تغییرشکل‌های ناشی از بارگذاری بر روی نمونه، از یک عدد تغییرمکان‌سنج لیزری در زیر نمونه‌ی دال استفاده شد (شکل ۹). این تغییرمکان‌سنج طوری تنظیم شد که تغییرشکل‌های وسط دال را اندازه‌گیری و ثبت کند. داده‌ها از این ۲ عدد دستگاه نیروسنج و تغییرمکان‌سنج به دستگاه انتقال و ثبت داده وارد شد. دال بر روی یک تکیه‌گاه فولادی قوی قرار داده شد. برای توزیع یکنواخت بار، در سرتاسر پیرامون تماس بتن با تکیه‌گاه فولادی، از نوارهای لاستیکی پیرامونی استفاده شد. همچنین به منظور ایجاد شرایط بار متمرکز از یک صفحه‌ی فولادی انتقال بار به ابعاد 100×100 میلی‌متر روی سکوی بتنی دال استفاده شد. (شکل ۹) سکوی بتنی در نمونه‌ی آزمایشگاهی جایگزین ستون بتنی سازه است که به صورت برعکس بارگذاری می‌شود. در نمونه‌های واقعی قسمت کششی دال در بالا و در نمونه‌های آزمایشگاهی در پایین دال واقع است.



شکل ۶. سکوی بتنی.

جدول ۴. ضخامت‌های نمونه‌های آزمایشگاهی.

گروه	نام نمونه	ضخامت بتن معمولی (mm)	ضخامت بتن ECC (mm)
مرجع	RPC۱۰	۱۰۰	-
گروه اول	PCV - RECC۳	۷۰	۳۰
	PCV - RECC۳ - SH	۷۰	۳۰
	RECC۱۰	-	۱۰۰
	RECC۱۰ - M	-	۱۰۰
گروه دوم	RPC۱۰ - ECC۳	۱۰۰	۳۰
	RPC۱۰ - ECC۳ - SH	۱۰۰	۳۰
	RPC۱۰ - RECC۳ - SH	۱۰۰	۳۰
	RPC۱۰ - ECC۳ - SH - M	۱۰۰	۳۰
	RPC۱۰ - ECC۳ - SH - M	۱۰۰	۳۰

M نشان‌دهنده‌ی استفاده از آب مغناطیسی برای ساخت بتن ECC نمونه است. بتن مصرفی معمولی دارای مقاومت ۲۷ مگاپاسکال در تمام نمونه‌ها و بتن ECC با آب معمولی دارای مقاومت ۲۸ مگاپاسکال و با آب مغناطیسی دارای مقاومت ۳۰ مگاپاسکال است. پوشش بتنی میل‌گرد برای تمام نمونه‌ها ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. به غیر از نمونه‌ی مرجع RPC۱۰ سایر نمونه‌های آزمایشگاهی به دو گروه تقسیم می‌شوند. گروه اول شامل نمونه‌هایی است که در زمان ساخت دال از ۲ لایه بتن معمولی و بتن ECC تشکیل می‌شوند. در این گروه، میل‌گرد خمشی در بخش کششی دال (در بتن ECC) قرار داده شده است. به همین دلیل در نام‌گذاری نمونه‌ها از علامت RECC استفاده شده است. ضخامت کلی دال نمونه‌های این گروه ۱۰۰ میلی‌متر است. گروه دوم شامل نمونه‌هایی است که دال ساخته شده از بتن معمولی است و میل‌گرد خمشی در آن قرار دارد. اما پس از ساخت دال و خشک شدن آن، توسط یک لایه بتن (ECC بدون میل‌گرد) تقویت شده است. ضخامت کلی دال نمونه‌های این گروه ۱۳۰ میلی‌متر است.

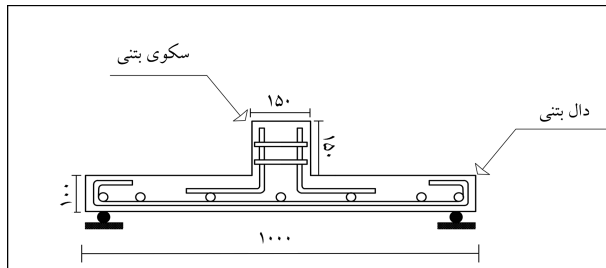
در ساخت نمونه‌ها از قالب‌های فلزی استفاده شد. بتن ریزی به‌طور هم‌زمان انجام شد تا در مقاومت فشاری بتن نمونه‌ها اختلافی به‌وجود نیاید، ۹ قالب فلزی به‌طور هم‌زمان تهیه شد (شکل ۷). همچنین برای جلوگیری از هدر رفت آب بتن، تمام درزها با چسب آکواریم چسب‌کاری شد.

۴. نحوه‌ی بارگذاری نمونه‌ها

اعمال بار فشاری به دال‌ها با استفاده از جک فشاری موجود در آزمایشگاه دینامیک

جدول ۵. مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی.

گروه	نام نمونه	میل‌گرد در لایه بتنی	برش‌گیر	نوع آب مصرفی
مرجع	RPC۱۰	بتن معمولی	ندارد	معمولی
گروه اول	PCV – RECC۳	بتن ECC	ندارد	معمولی
	PCV – RECC۳ – SH	بتن ECC	دارد	معمولی
	RECC۱۰	بتن ECC	ندارد	معمولی
	RECC۱۰ – M	بتن ECC	ندارد	مغناطیسی
گروه دوم	RPC۱۰ – ECC۳	بتن معمولی	ندارد	معمولی
	RPC۱۰ – ECC۳ – SH	بتن معمولی	دارد	معمولی
	RPC۱۰ – RECC۳ – SH	بتن معمولی و بتن ECC	دارد	معمولی
	RPC۱۰ – ECC۳ – SH – M	بتن معمولی	دارد	مغناطیسی



شکل ۱. مشخصات هندسی نمونه‌ی RPC۱۰.

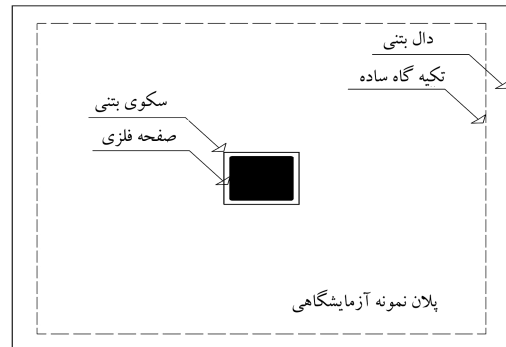
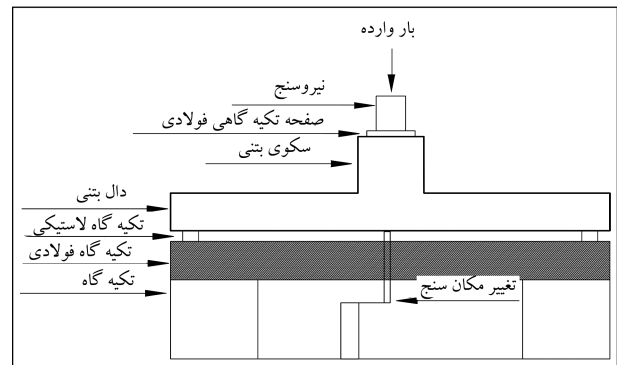
به این معنا که ضخامت مورد نظر دال از یک لایه بتن معمولی و یک لایه بتن ECC در قسمت کششی دال تشکیل شده است. در تمام نمونه‌های ساخته شده در این گروه، میل‌گرد خمشی در بتن ECC در زمان ساخت قرار داده شده است.

• مقایسه ۲ نمونه RPC۱۰ و PCV – RECC۳

نمونه RPC۱۰ از بتن معمولی به ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر ساخته شده است (شکل ۱). نمونه PCV – RECC۳ به ضخامت ۷۰ میلی‌متر از بتن معمولی و ۳۰ میلی‌متر از بتن ECC ساخته شده و شبکه‌ی میل‌گرد درون بتن ECC قرار داده شده است (شکل ۱۱). در شکل ۱۲ رابطه‌ی بار- تغییرمکان برای این دو نمونه مقایسه شده است. بیشینه‌ی ظرفیت باربری برای نمونه RPC۱۰ برابر ۲۳ کیلو نیوتن و برای نمونه PCV – RECC۳ برابر ۳۶۴ کیلو نیوتن است. بنابراین ظرفیت نمونه دارای لایه‌ی ۳۰ میلی‌متری بتن ECC نسبت به نمونه‌ی ساخته شده از بتن معمولی ۶۰ درصد افزایش داشته است. تغییر مکان ۲ نمونه تا لحظه‌ی شکست منگنه‌پی برابر است. همچنین در لحظه‌ی انهدام نمونه RPC۱۰ از میل‌گرد جدا شده است؛ اما در نمونه PCV – RECC۳، بتن ECC از میل‌گرد جدا نشده است.

• مقایسه‌ی ۲ نمونه PCV – RECC۳ – SH و PCV – RECC۳

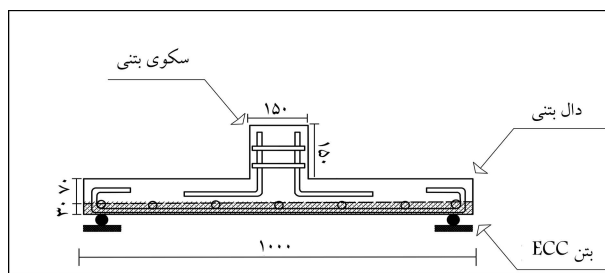
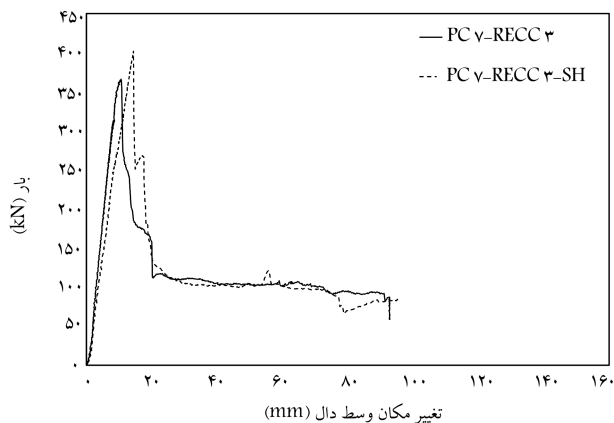
نمونه PCV – RECC۳ از بتن معمولی به ضخامت ۷۰ میلی‌متر و بتن ECC به ضخامت ۳۰ میلی‌متر ساخته شده است و میل‌گرد درون بتن ECC قرار دارد (شکل ۱۱). نمونه PCV – RECC۳ – SH مشابه نمونه PCV – RECC۳ است با این تفاوت که بین ۲ لایه‌ی بتنی از برش‌گیر U شکل استفاده شده



شکل ۹. نحوه‌ی بارگذاری و پلان نمونه.

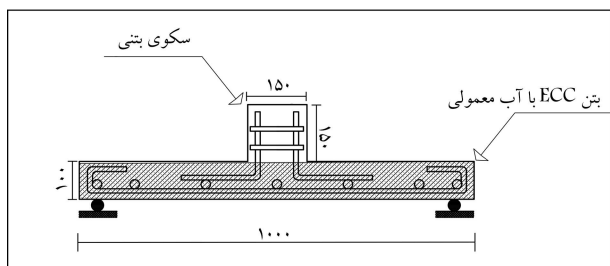
۶. تحلیل و بررسی نتایج آزمایشگاهی

در این پژوهش ۲ گروه نمونه‌ی دال بتنی وجود دارد. گروه اول شامل نمونه‌هایی است که از بتن ECC در ساخت دال استفاده شده است و گروه دوم شامل نمونه‌هایی است که از بتن ECC به عنوان تقویت دال استفاده شده است. در گروه اول، میل‌گرد خمشی در بتن ECC در زمان ساخت دال قرار داده شده است. در گروه دوم، دال ساخته شده از بتن معمولی که مسلح شده، توسط یک لایه بتن ECC تقویت شده است. گروه اول شامل نمونه‌هایی است که از بتن ECC در ساخت دال استفاده شده است.

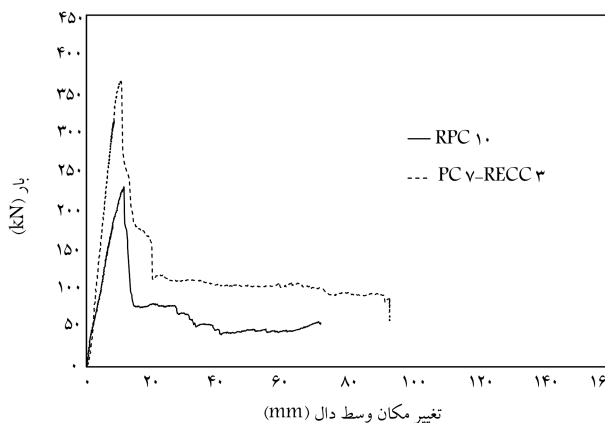


شکل ۱۱. مشخصات هندسی نمونه‌ی PCV - RECC3.

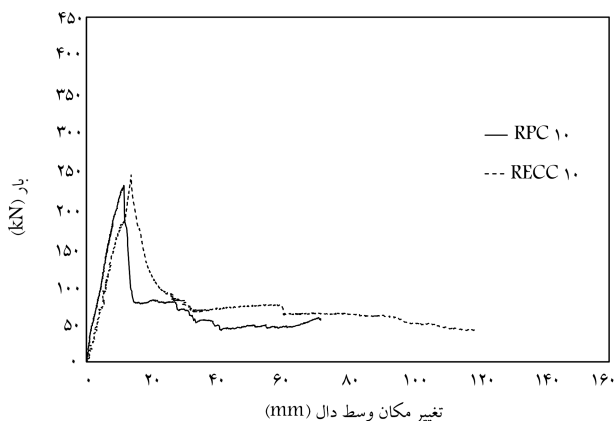
شکل ۱۴. رابطه‌ی بار - تغییر مکان نمونه‌های PCV - RECC3 و PCV - RECC3 - SH.



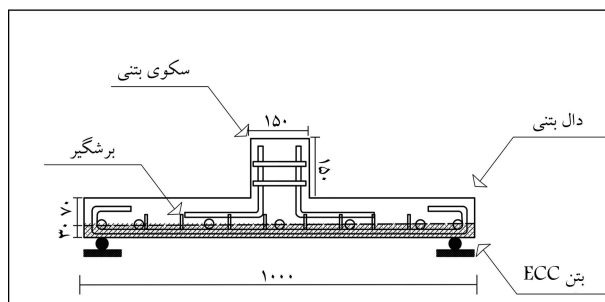
شکل ۱۵. مشخصات هندسی نمونه‌ی RECC10.



شکل ۱۲. رابطه‌ی بار - تغییر مکان نمونه‌های PCV - RECC3 و RPC10.



شکل ۱۶. رابطه‌ی بار - تغییر مکان نمونه‌های RECC10 و RPC10.



شکل ۱۳. مشخصات هندسی نمونه‌ی PCV - RECC3 - SH.

است (شکل ۱۳). نمونه‌های PCV - RECC3 - SH و PCV - RECC3 در شکل ۱۴ مقایسه شده‌اند. نمونه‌ی PCV - RECC3 دارای بیشینه‌ی ظرفیت باربری ۳۵۷ کیلونیوتن و نمونه‌ی PCV - RECC3 - SH دارای بیشینه‌ی باربری ۴۰۲ کیلونیوتن است. مشاهده می‌شود که به علت استفاده از برشگیر U شکل ظرفیت باربری نمونه‌ی PCV - RECC3 - SH به مقدار ۱۳ درصد نسبت به نمونه‌ی PCV - RECC3 افزایش یافته است.

• مقایسه‌ی ۲ نمونه‌ی RECC10 و RPC10

نمونه‌ی RPC10 از بتن معمولی به ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر ساخته شده است (شکل ۱۰). نمونه‌ی RECC10 از ۱۰۰ میلی‌متر بتن ECC ساخته شده است (شکل ۱۵). در شکل ۱۶ رفتار دو نمونه مقایسه شده است. بیشینه‌ی ظرفیت باربری برای نمونه‌ی RPC10 برابر ۲۳۰ کیلونیوتن و برای نمونه‌ی RECC10 برابر ۲۴۴ کیلونیوتن است. همچنین در نمونه‌ی RPC10 جدا شدن بتن معمولی از میل‌گرد اتفاق می‌افتد؛ اما در نمونه‌ی RECC10 بتن از میل‌گرد جدا نشده است.

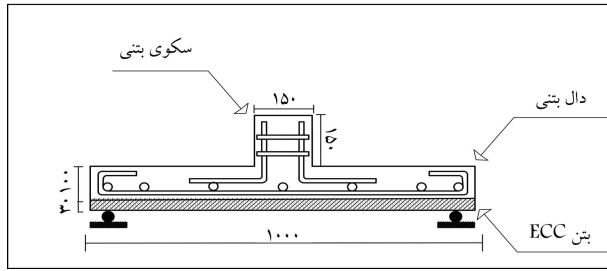
• مقایسه‌ی ۲ نمونه RECC10 - M و RECC10 - M

نمونه‌ی RECC10 - M به ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر مشابه نمونه‌ی RECC10 است با این تفاوت که بتن ECC آن با آب مغناطیسی، ساخته شده است (شکل ۱۷). در شکل ۱۸ رابطه‌ی بار - تغییر مکان این دو نمونه با یکدیگر مقایسه شده است. برای نمونه‌ی RECC10 بیشینه‌ی ظرفیت باربری ۲۴۴ کیلونیوتن و برای نمونه‌ی RECC10 - M برابر ۲۷۱ کیلونیوتن است. بنابراین، استفاده از آب مغناطیسی باعث افزایش ۱۰ درصدی ظرفیت باربری شده است.

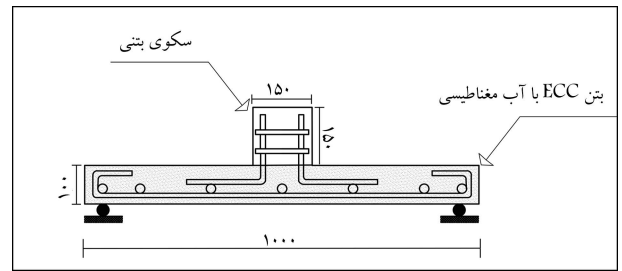
خلاصه‌ی نتایج به دست آمده از آزمایش نمونه‌های آزمایشگاهی گروه اول در جدول ۶ آورده شده است.

گروه دوم

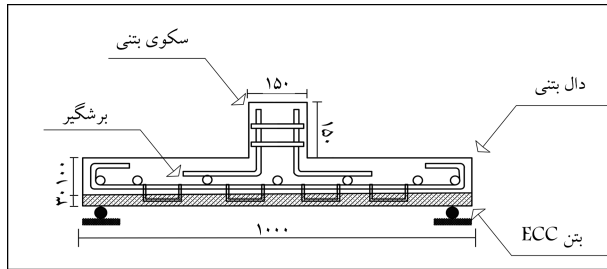
گروه دوم شامل نمونه‌هایی است که دال با ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر از بتن معمولی



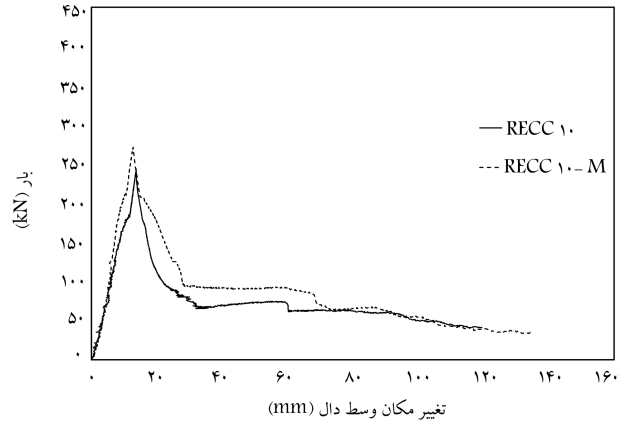
شکل ۱۹. مشخصات هندسی نمونه‌ی $RPC_{10} - ECC_3$.



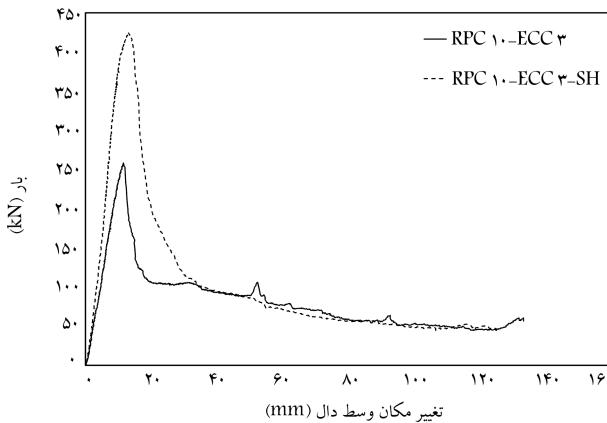
شکل ۱۷. مشخصات هندسی نمونه‌ی $RECC_{10} - M$.



شکل ۲۰. مشخصات هندسی نمونه‌ی $RPC_{10} - ECC_3 - SH$.



شکل ۱۸. رابطی بار - تغییر مکان نمونه‌های $RECC_{10} - M$ و $RECC_{10}$.



شکل ۲۱. رابطی بار - تغییر مکان نمونه‌های $RPC_{10} - ECC_3$ و $RPC_{10} - ECC_3 - SH$.

جدول ۶. خلاصه‌ی نتایج به دست آمده از تحلیل و بررسی نمودارهای دال‌های گروه اول.

نمونه	بیشینه‌ی ظرفیت باربری در لحظه شکست (kN)	بیشینه‌ی تغییر مکان در لحظه شکست (mm)
RPC_{10}	۲۳۰	۱۱
$PCV - RECC_3$	۳۶۴	۱۱
$PCV - RECC_3 - SH$	۴۰۲	۱۴
$RECC_{10}$	۲۴۴	۱۴
$RECC_{10} - M$	۲۷۱	۱۳

• مقایسه‌ی ۲ نمونه‌ی $RPC_{10} - ECC_3 - SH$ و $RPC_{10} - RECC_3 - SH$

نمونه‌ی $RPC_{10} - RECC_3 - SH$ مشابه نمونه‌ی $RPC_{10} - ECC_3 - SH$ است با این تفاوت که در هر دو لایه‌ی بتن، میل‌گرد قرار داده شده است (شکل ۲۲). در شکل ۲۳ دو نمونه با یکدیگر مقایسه شده‌اند. حداکثر ظرفیت باربری برای نمونه‌ی $RPC_{10} - ECC_3 - SH$ برابر ۴۲۱ کیلونیوتن و برای نمونه‌ی $RPC_{10} - RECC_3 - SH$ برابر ۴۲۸ کیلونیوتن است.

• مقایسه‌ی ۲ نمونه‌ی $RPC_{10} - ECC_3 - SH$ و $RPC_{10} - ECC_3 - SH - M$

نمونه‌ی $RPC_{10} - ECC_3 - SH - M$ مشابه نمونه‌ی $RPC_{10} - ECC_3 - SH$ است با این تفاوت که بتن ECC با آب مغناطیسی ساخته شده است (شکل ۲۴). در شکل ۲۵ دو نمونه مقایسه شده‌اند. برای نمونه‌ی $RPC_{10} - ECC_3 - SH - M$ بیشینه‌ی ظرفیت باربری ۴۲۴ کیلونیوتن و برای نمونه‌ی $RPC_{10} - ECC_3 - SH$ ۴۲۱ کیلونیوتن است.

ساخته شده و پس از خشک شدن آن با ۳۰ میلی‌متر بتن ECC در قسمت کششی تقویت شده است.

• مقایسه‌ی ۲ نمونه‌ی $RPC_{10} - ECC_3$ و $RPC_{10} - ECC_3 - SH$

نمونه‌ی $RPC_{10} - ECC_3$ از ۱۰۰ میلی‌متر بتن معمولی و ۳۰ میلی‌متر بتن ECC ساخته شده است (شکل ۱۹). نمونه‌ی $RPC_{10} - ECC_3 - SH$ مشابه نمونه‌ی $RPC_{10} - ECC_3$ است با این تفاوت که از برشگیر U شکل بین ۲ لایه‌ی بتنی استفاده است (شکل ۲۰). شکل ۲۱ مقایسه‌ی رابطی بار - تغییر مکان دو نمونه را نشان می‌دهد. بیشینه‌ی ظرفیت باربری برای نمونه‌ی $RPC_{10} - ECC_3$ ۲۵۸ کیلونیوتن و برای نمونه‌ی $RPC_{10} - ECC_3 - SH$ برابر ۴۲۱ کیلونیوتن است. استفاده از برشگیر بین ۲ لایه‌ی بتنی باعث افزایش ۶۰ درصدی ظرفیت باربری نمونه‌ی $RPC_{10} - ECC_3 - SH$ شده است.

جدول ۷. خلاصه‌ی نتایج به دست آمده از تحلیل و بررسی نمودارهای دال‌های گروه دوم.

نمونه	بیشینه‌ی ظرفیت	
	باربری در لحظه شکست (kN)	بیشینه‌ی تغییر مکان در لحظه شکست (mm)
RPC۱۰ - ECC۳	۲۵۸	۱۲
RPC۱۰ - ECC۳ - SH	۴۲۱	۱۴
RPC۱۰ - RECC۳ - SH	۴۲۸	۱۰
RPC۱۰ - ECC۳ - SH - M	۲۴۲	۱۷

خلاصه‌ی نتایج به دست آمده از آزمایش نمونه‌های آزمایشگاهی گروه دوم در جدول ۷ آورده شده است.

۷. مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌ها و نتایج حاصل از روابط آیین‌نامه‌ها

بر اساس ضوابط آیین‌نامه‌ی ۱۴ - ACI ۳۱۸^[۹] مقاومت برش منگنه‌یی نهایی دال‌های تخت برابر کوچک‌ترین مقدار حاصل از روابط زیر است.

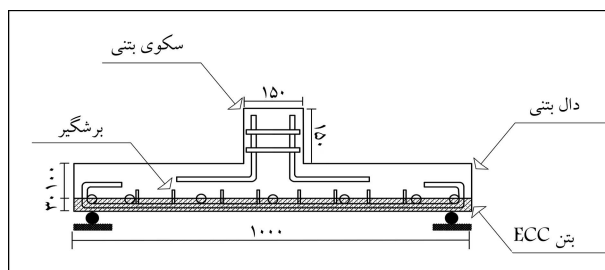
$$V_u = 0.83 \left(2 + \frac{f_c'}{\beta_c} \right) \sqrt{f_c'} b_o d \quad (1)$$

$$V_u = 0.83 \left(2 + \frac{\alpha_s d}{b_o} \right) \sqrt{f_c'} b_o d \quad (2)$$

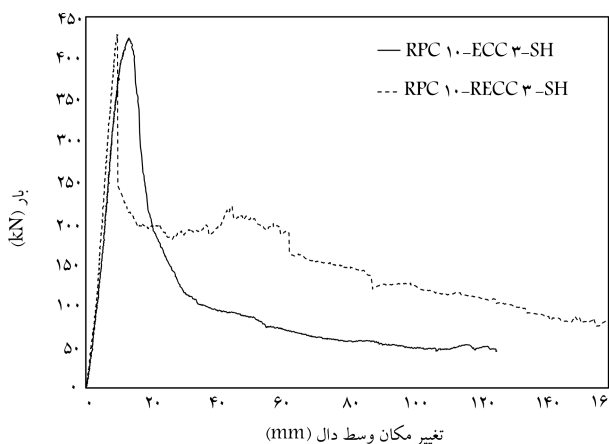
$$V_u = 0.83 \sqrt{f_c'} b_o d \quad (3)$$

در این رابطه‌ها f_c' مقاومت فشاری نمونه‌ی استوانه‌یی بتن بر حسب مگاپاسکال است که در این آزمایش ۲۷ مگاپاسکال است. d ارتفاع مؤثر دال است. در نمونه‌های گروه دوم اگر چه ضخامت دال ۱۳۰ میلی‌متر است، به علت وجود میل‌گرد در بتن معمولی عملاً مقدار d برابر ۹۰ میلی‌متر مشابه دال‌های گروه اول است. بنابراین ظرفیت محاسباتی آیین‌نامه‌یی تغییر نمی‌کند. b_o برابر محیط مستطیلی است که اضلاع آن در فاصله‌ی $0.5d$ از وجه ستون قرار دارد. مقدار این پارامتر برای دال با ستون مربعی برابر $4(c+d)$ 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. در این بخش نتایج حاصل از آزمایش‌ها با مقادیر محاسباتی ظرفیت منگنه‌یی آیین‌نامه‌ی ۱۴ - ACI ۳۱۸ مقایسه می‌شود.

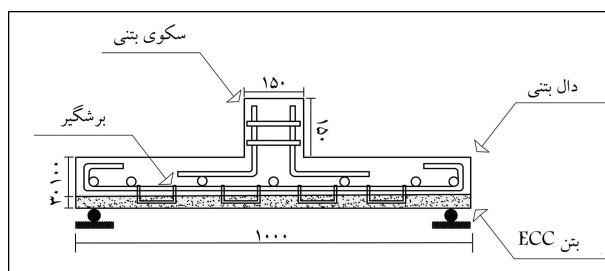
در جدول ۸ مقادیر نسبت ظرفیت برشی آزمایش‌ها به ظرفیت محاسباتی آیین‌نامه‌ی ۱۴ - ACI ۳۱۸ ارائه شده است. مقاومت فشاری بتن‌های معمولی و ECC تفاوت کمی دارد. در نمونه‌هایی که از لایه بتن معمولی و ECC ساخته شده است، برای محاسبه‌ی مقاومت برش منگنه‌یی آیین‌نامه‌یی، از بتن با مقاومت کمتر استفاده شده است. نسبت ظرفیت برشی آزمایشگاهی به ظرفیت برشی آیین‌نامه‌یی برای نمونه‌ی RPC۱۰ از بتن معمولی ۱/۵۴ و برای سایر نمونه‌ها که شامل دو بخش بتن معمولی و بتن ECC است، بیشتر از مقدار ۱/۵۴ است. بیشترین مقدار مربوط به نمونه‌ی RPC۱۰ - ECC۳ - SH است که این مقدار ۲/۸۷ است. بنابراین، استفاده از تقویت دال با یک لایه از بتن ECC یا ساخت دال از دو بخش بتن معمولی و بتن ECC می‌تواند ظرفیت برش منگنه‌یی دال تخت را به مقدار زیادی افزایش دهد.



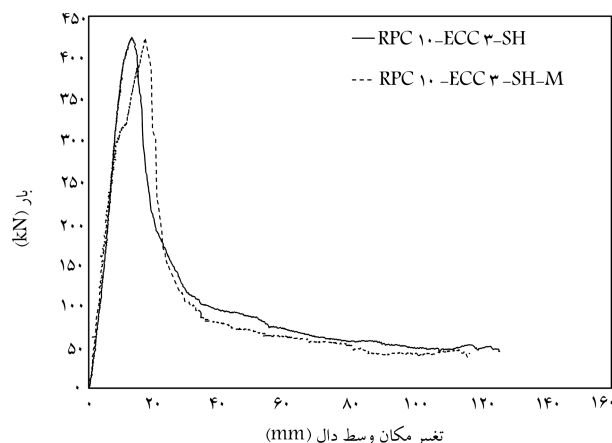
شکل ۲۲. مشخصات هندسی نمونه‌ی RPC۱۰ - RECC۳ - SH.



شکل ۲۳. رابطه‌ی بار - تغییر مکان نمونه‌های RPC۱۰ - ECC۳ - SH و RPC۱۰ - RECC۳ - SH.



شکل ۲۴. مشخصات هندسی نمونه‌ی RPC۱۰ - ECC۳ - SH - M.



شکل ۲۵. رابطه‌ی بار - تغییر مکان نمونه‌های RPC۱۰ - ECC۳ - SH و RPC۱۰ - ECC۳ - SH - M.

جدول ۸. مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از نمونه‌های آزمایشگاهی با مقادیر محاسباتی آیین‌نامه‌ی ۱۴ - ACI 318.

گروه	نمونه	V_{test} (kN)	V_{ACI} (kN)	$\frac{V_{test}}{V_{ACI}}$
مرجع	RPC ^{۱۰}	۲۳۰	۱۴۹	۱/۵۴
گروه اول	PCV - RECC ^۳	۳۶۴	۱۴۹	۲/۴۴
	PCV - RECC ^۳ - SH	۴۰۲	۱۴۹	۲/۷۰
	RECC ^{۱۰}	۲۴۴	۱۴۹	۱/۶۴
	RECC ^{۱۰} - M	۲۷۱	۱۴۹	۱/۸۲
گروه دوم	RPC ^{۱۰} - ECC ^۳	۲۵۸	۱۴۹	۱/۷۳
	RPC ^{۱۰} - ECC ^۳ - SH	۴۲۱	۱۴۹	۲/۸۲
	RPC ^{۱۰} - RECC ^۳ - SH	۴۲۸	۱۴۹	۲/۸۷
	RPC ^{۱۰} - ECC ^۳ - SH - M	۴۲۴	۱۴۹	۲/۸۴

۸. نتیجه‌گیری

در این مقاله استفاده از بتن ECC در ساخت و تقویت برش منگنه‌ی دال‌های تخت مطالعه شده است. پارامترهای بررسی شده شامل ضخامت بتن ECC در دال بتنی، استفاده از برش‌گیر بین ۲ لایه‌ی بتن معمولی و بتن ECC و استفاده از آب مغناطیسی است.

بر اساس نتایج آزمایشگاهی پژوهش نتایج زیر حاصل شده است:

۱. استفاده از یک لایه‌ی ۳۰ میلی‌متری بتن ECC در قسمت کششی در ساخت دال باعث افزایش ۶۰ درصدی ظرفیت باربری و استفاده از همین لایه به‌عنوان تقویت پس از ساخت دال باعث افزایش ۱۲ درصدی ظرفیت برش منگنه‌ی شد؛

۲. استفاده از برش‌گیر بین ۲ لایه‌ی بتن معمولی و بتن ECC، در حالتی که از بتن ECC در ساخت دال استفاده شود، باعث افزایش ۱۰ درصدی ظرفیت باربری نسبت به نمونه‌ی بدون برش‌گیر می‌شود. ظرفیت این نمونه نسبت به نمونه‌ی ساخته شده از بتن معمولی و بدون ECC (نمونه‌ی مرجع RPC^{۱۰}) ۷۵ درصد افزایش داشته است. برای حالتی که از بتن ECC پس از ساخت به‌عنوان تقویت استفاده شود، استفاده از برش‌گیر باعث افزایش ۶۳ درصدی ظرفیت برش منگنه‌ی نسبت به نمونه‌ی بدون برش‌گیر شده است. در نمونه‌ی که از بتن ECC در ساخت دال استفاده شده است، میل‌گرد سکوی بتنی به میل‌گرد خمشی درون لایه‌ی بتن ECC متصل شده که باعث پیوستگی بین ۲ لایه بتن معمولی و بتن ECC شده است. به‌همین دلیل استفاده از برش‌گیر تأثیر

چشم‌گیری در ظرفیت برش منگنه‌ی نداشته است. زیرا بخشی از پیوستگی دو نوع بتن توسط میل‌گردهای سکوی بتنی تأمین می‌شود. اما در نمونه‌ی که بتن ECC در تقویت دال استفاده شده است، میل‌گرد سکوی بتنی و میل‌گرد خمشی فقط درون لایه‌ی بتن معمولی قرار دارند و پیوستگی بین لایه‌ی بتن معمولی و لایه‌ی بتن ECC ضعیف‌تر است. به‌همین علت استفاده از برش‌گیر تأثیر زیادی در ظرفیت برش منگنه‌ی داشته است؛

۳. استفاده از آب مغناطیسی در ساخت بتن ECC باعث افزایش ۴۰ درصدی جریان روانی بتن ECC شد و ظرفیت برش منگنه‌ی را ۱۱ درصد اضافه کرد؛

۴. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی با مقادیر محاسباتی آیین‌نامه‌ی بتن ACI نشان داد که برای دال ساخته شده از بتن معمولی، نسبت V_{test}/V_{ACI} برابر ۱/۵۴ است. این مسئله نشان می‌دهد که آیین‌نامه با ضرایب اطمینان مناسبی ظرفیت برش منگنه‌ی را محاسبه می‌کند. برای نمونه‌هایی که قسمتی از بتن معمولی توسط بتن ECC جایگزین شده است، نسبت V_{test}/V_{ACI} به مقدار قابل توجهی بیشتر از ۱/۵۴ است. بنابراین با جایگزین کردن قسمتی از بتن معمولی توسط بتن ECC چه در ساخت دال و چه پس از ساخت دال به‌عنوان تقویت، ضریب اطمینان آیین‌نامه‌ی به مقدار چشم‌گیری افزایش می‌یابد؛

۵. استفاده از بتن ECC در قسمت بالای دال برای افزایش ظرفیت منگنه‌ی می‌تواند جایگزین مناسبی به‌جای استفاده از پهنه در قسمت پایین دال باشد. در این حالت زائده‌ی پهنه در دال قابل حذف است. البته در صورتی که از یک لایه بتن ECC برای تقویت دال استفاده شود، لازم است برای اتصال لایه‌ی ECC به بتن دال از برش‌گیرهای مناسبی استفاده شود.

پانویس

منابع (References)

1. engineered cementation composites (ECC)

1. Li, V.C., *Engineered Cementitious Composite (ECC) Material, Structural, and Durability Performance*, Concrete Construction Engineering Handbook, Second Edition. pp. 1001-1048 (2008).

2. Ge, W.J., Ashour, A.F., Ji, X. and et al. "Flexural behavior of ECC-concrete composite beams reinforced with steel bars", *Construction and Building Materials*, **159**, pp. 157-188 (2018).
3. Afefy, H.D. and Mahmoud, M.H. "Structural performance of RC slabs provided by pre-cast ECC strips in tension cover zone", *Construction and Building Materials*. **65**, pp. 103-113 (2014).
4. Tian, J., Wu, X., Zheng, Y. and et al. "Investigation of interface shear properties and mechanical model between ECC and concrete", *Construction and Building Materials*, **223**, pp. 12-27 (2019).
5. Gao, S., Zhao, X., Qiao, J. and et al. "Study on the bonding properties of engineered cementitious composites (ECC) and existing concrete exposed to high temperature", *Construction and Building Materials*, **196**, pp. 330-344 (2019).
6. Hossain, K.M.A., Hasib, S. and Manzur, T. "Shear behavior of novel hybrid composite beams made of self-consolidating concrete and engineered cementitious composites", *Engineering Structures*, **202**, p. 109856 (2019).
7. Choi, H.K., Bae, B. and Choi, C.S. "Lateral resistance of unreinforced masonry walls strengthened with engineered cementitious composite", *International Journal of Civil Engineering*, **14**, pp. 411-424 (2016).
8. Faris, A.S., Al-Mahaidi, R. and Jadooe, A. "Implementation of magnetized water to improve the properties of concrete", *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, **5**, pp. 43-57 (2014).
9. ACI Committee 318. "Building code requirements for structural concrete (ACI 318-14) and commentary (318R-14)", American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 433 (2014).