



رفتار برش منگنه‌ای دال تخت مرکب از بتن‌های معمولی و مواد مرکب سیمانی مهندسی تحت لنگر نامتعادل

محمد امیری، محمدرضا اصفهانی*

دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۲۱

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۵/۲۳

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۲۴

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۷/۰۳

کلمات کلیدی:

مواد مرکب سیمانی مهندسی

دال تخت

انتقال لنگر

اتصال دال - ستون

برش منگنه ای

خلاصه: ظرفیت باربری و شکل‌پذیری دو خصوصیت مهم اتصال دال تخت - ستون در مناطق لرزه‌خیز است. برای تقویت اتصال در برابر برش منگنه‌ای راهکارهای مختلفی شامل استفاده از سرستون، پهنه، بتن با مقاومت بالا و میلگردگذاری‌های برشی مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش آزمایشگاهی اثر استفاده از مواد مرکب سیمانی مهندسی (ECC) با خصوصیتی نظیر توانایی گسترش انبوه ترک‌ها در اثر بارگذاری، سخت‌شوندگی کرنشی، مقاومت در برابر نیروی برشی، مقاومت در برابر لایه لایه شدن، قابلیت تغییر شکل زیاد، برای بهبود رفتار مقاومت برشی منگنه‌ای دال‌های تخت تحت لنگر نامتعادل بررسی شد. ۷ نمونه آزمایشگاهی دال تخت بتن مسلح با ابعاد $1000 \times 1000 \times 100$ میلی‌مترمکعب تحت بار با خروج از مرکزیت ۱۵۰ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. دال‌ها از دو لایه بتن معمولی و ECC در ضخامت آن‌ها ساخته شدند. پارامترهای متغیر شامل اثر لنگر نامتعادل، بهبود سطح تماس دو ماده و ضخامت ECC بودند. مشاهده شد که بهبود سطح تماس بتن معمولی و ECC سبب افزایش ظرفیت برشی می‌شود. همچنین جایگزینی بتن دال با ECC سبب افزایش ظرفیت برش منگنه‌ای و بهبود رفتار پس‌پانچینگ دال بدون افت زیاد و ناگهانی در بار می‌گردد. تغییر مکانیزم شکست از یک شکست ترد و ناگهانی به سمت شکست شکل‌پذیر با جذب انرژی بالا در هنگام استفاده از ضخامت‌های بیشتر لایه ECC مشاهده شد.

۱- مقدمه

طبق آئین‌نامه ACI-318-14 استفاده از این سیستم در مناطق با خطر لرزه‌خیزی زیاد تنها در صورتی که در سیستم دوگانه و به عنوان عنصر باربر ثقلی به کار برده شود، مجاز می‌باشد [۳ و ۴]. بنابراین مقاومت و شکل‌پذیری دو خصوصیت مهم اتصال دال-ستون در مناطق لرزه‌خیز است.

وجود لنگر نامتعادل در اتصال دال - ستون، لزوم ایجاد تمهیداتی برای تامین مقاومت و شکل‌پذیری در محل اتصال را انکار ناپذیر کرده است. استفاده از سرستون^۱ و پهنه^۲ سبب افزایش ظرفیت برشی اتصال دال - ستون می‌شوند اما شکل‌پذیری را در محل اتصال تغییر نمی‌دهند. استفاده از بتن با مقاومت بالا در محل اتصال سبب افزایش مقاومت برشی و ظرفیت خمشی اتصال می‌شود اما این نوع بتن به

بزرگ‌ترین ضعف سیستم دال تخت، خطر گسیختگی برش منگنه‌ای ناشی از انتقال برش و لنگر نامتعادل در اتصال دال-ستون می‌باشد. شکست برش منگنه‌ای در یک اتصال سبب از دست دادن ظرفیت باربری ثقلی و باز توزیع بار روی اتصالات مجاور می‌گردد به طوری که احتمال شکست برش منگنه‌ای در اتصالات مجاور نیز افزایش می‌یابد. لنگر نامتعادل به علت بارهای قائم نامساوی در دهانه‌های مجاور اتصال و نیروی جانبی ناشی از باد یا زلزله در اتصال ایجاد می‌شود [۲ و ۱]. تحت بارگذاری چرخه‌ای مقاومت برشی اتصال، سختی بتن و ظرفیت تغییر شکل اتصال کاهش می‌یابد و این کاهش در بار محوری و نسبت میلگرد کم بیشتر است، به طوری که

1 Shear Capital

2 Drop Panel

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: esfahani@ferdowsi.um.ac.ir

در ستون‌های کوتاه سبب افزایش مقاومت برشی، جابجایی نسبی و اتلاف انرژی در مقایسه با ستون‌های با بتن معمولی شده است [۱۷]. همچنین به دلیل خاصیت ترک خوردگی متعدد و پل‌بندی الیاف، عرض ترک‌های برشی در ستون‌های ECC کمتر شد [۱۸]. استفاده از ECC در لایه بیرونی ستون‌های CFST³ مانع از خرد شدن و جدایی لایه بیرونی ستون شده و تحت بار چرخه‌ای شکل‌پذیری و اتلاف انرژی این ستون‌های تقریباً دو برابر ستون‌های با بتن معمولی است. همچنین وجود ECC در لایه بیرونی ستون استفاده از خاموت‌های برشی را کاهش می‌دهد [۱۹].

استفاده از ECC در ناحیه اتصال تیر به ستون سبب افزایش ظرفیت باربری، شکل‌پذیری و اتلاف انرژی در اتصالات و حتی تغییر شکست ترد برشی به شکست انعطاف‌پذیری خمشی می‌شود. همچنین به دلیل مقاومت برشی بالای ECC می‌توان مقدار آرماتورهای برشی را کاهش داد [۲۰-۲۲]. مقاوم‌سازی دیوارها از طریق پاشیدن ECC بر روی دیوار و تشکیل لایه‌ای از مواد ECC در اطراف دیوار با مصالح بنایی سبب بهبود رفتار دیوار و افزایش مقاومت جانبی و ظرفیت اتلاف انرژی نسبت به حالت بدون مقاوم‌سازی دیوار می‌شود [۲۴] و [۲۳]. از جمله معایب اصلی ECC قیمت بالای این ماده مرکب است لیکن در صورت استفاده برای مرمت و تقویت در حجم کم، هزینه قابل توجه نخواهد بود. در کشورهای ژاپن، کره، استرالیا، نیوزلند و آمریکا از این مواد استفاده شده است ولی هنوز کاهش هزینه و بهینه کردن هزینه ساخت این کامپوزیت پارامتر مهمی است [۲۵]. عمده قیمت مربوط به الیاف PVA-REC و ریزدانه سیلیسی می‌باشد که در این پژوهش با جایگزینی الیاف PVA با PP و ریزدانه سیلیسی با پودر سنگ که قیمت به مراتب کمتری دارند این مشکل تا حدودی می‌تواند رفع شود.

در این پژوهش بر اساس کارهای گذشته، ابتدا طرح مناسبی برای اختلاط ECC تهیه کرده و خواص مکانیکی آن تعیین می‌شود. سپس به بررسی اثر استفاده از ECC در رفتار برش منگنه‌ای دال‌های تخت تحت اثر لنگر نامتعادل پرداخته می‌شود.

۲- خصوصیات طرح اختلاط ماده مرکب

مواد مرکب سیمانی مهندسی (ECC)، یک نوع خاص از

شدت دارای شکست ترد در زلزله‌های شدید است [۶ و ۵]. کلاهیک برشی تنها مقاومت برشی را افزایش می‌دهند و شکل‌پذیری را افزایش نمی‌دهند در حالی که استفاده از خاموت‌گذاری بسته با زاویه ۱۳۵ درجه همزمان مقاومت برشی و شکل‌پذیری را تحت بار چرخه‌ای افزایش می‌دهند ولی استفاده از آن در ضخامت کم دال دشوار است [۸ و ۷]. در پژوهشی استفاده از خاموت‌های CFRP در محل اتصال سبب افزایش ۴ برابری جابه‌جایی در نقطه شکست، افزایش دو برابری شکل‌پذیری و افزایش ۳/۵ برابری شکل‌پذیری چرخه‌ای شده است [۹]. اگر چه میلگردگذاری برشی اطراف ستون در اتصال دال-ستون سبب بهبود رفتار اتصال می‌شود ولی وجود ترک‌های شدید در دال تخت تحت بارگذاری چرخه‌ای اجتناب ناپذیر است. برای محافظت از اتصال در گذشته از تزریق اپوکسی در ترک‌ها استفاده می‌شد که ظرفیت خمشی را افزایش ولی سختی اولیه را تغییر نمی‌دهد [۱۰]. استفاده از صفحات فلزی در اتصال دال - ستون هم ظرفیت خمشی و هم سختی افزایش می‌دهد اما به دلیل هزینه بالای این روش زیاد استفاده از آن فراگیر نشده است [۱۱]. با وجود روش‌های مختلف تقویت اتصال دال - ستون، روشی که همزمان بتواند مقاومت و شکل‌پذیری اتصال را با در نظر گرفتن جنبه اجرای و اقتصادی برآورده کند مورد توجه پژوهشگران است.

تولید و توسعه مواد مرکب سیمانی مسلح شده به الیاف^۱ با خصوصیات نظیر توانایی گسترش انبوه ترک‌ها در اثر بارگذاری ایجاد تغییر شکل‌های یکنواخت، سخت شوندگی کرنشی، توانایی جذب انرژی بالا، کاهش آرماتور در محل تراکم آرماتور، مقاومت در برابر لایه لایه شدن، قابلیت تغییر شکل زیاد و کنترل عرض ترک، سبب کاربرد این ماده مرکب در ساخت و تقویت اعضای سازه‌ای شده است. در پژوهشی روی تیرهای بتن مسلح، با استفاده از مواد مرکب سیمانی مهندسی^۲ (ECC) به جای بتن معمولی در تیر، رفتار شکست تیر به یک شکست انعطاف‌پذیر تغییر یافت [۱۳ و ۱۲]. همچنین پژوهشگران دیگری با جایگزینی بتن ناحیه کششی تیرهای بتن مسلح با ECC، بهبود رفتار خمشی و افزایش ظرفیت جذب انرژی و تغییر الگوی شکست تیر بتن مسلح از یک شکست ترد به یک شکست انعطاف‌پذیر گزارش کردند [۱۶-۱۴].

بر اساس نتایج آزمایشگاهی روی ستون‌ها، استفاده از ECC

1 Fiber Reinforced Cementitious Composite (FRCC)

2 Engineering Cementitious Composites (ECC)

3 Concrete Filled Steel Tube (CFST)

جدول ۱. خصوصیات الیاف PP
Table 1. Properties of PP fibers

الیاف	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	درصد تغییر طول (%)	چگالی (Kg/m ³)	طول (mm)	قطر (μm)
PP	۴۸۰	۸/۸۴	۲۵	۹۱۰	۱۲	۱۲

جدول ۲. نسبت اجزا تشکیل دهنده ماده مرکب (ECC)
Table 2. Mix proportion of ECC

سیمان	آب	میکروسیلیس	پودر سنگ معدنی	غبار کوره آهن	فوق روان کننده	الیاف (درصد حجمی)
۱	۰/۹	۰/۵۳	۱/۲	۰/۲۷	۰/۰۳	۰/۰۱۵

پلی‌وینیل الکل^۵ (PVA) و فوق روان کننده است، الیاف PVA به دلیل پرداخت سطحی قیمت بالایی دارند بنابراین در این مقاله از الیاف پلی‌پروپیلن^۶ (PP) به طول ۱۲ میلی متر و قطر ۱۲ میکرومتر استفاده شد و همچنین به دلیل تولید محدود و زیان بار بودن خاکستر بادی، از پودر سنگ، میکروسیلیس و غبار کوره ذوب آهن به جای خاکستر بادی و ماسه سیلیسی استفاده شده است. خصوصیات الیاف PP در جدول ۱ آورده شده است. نسبت اجزا تشکیل دهنده ماده مرکب تولید شده در جدول ۲ بر حسب وزن سیمان آمده است. سیمان مصرفی از نوع تیپ یک و فوق روان کننده از نوع بر پایه کربوهیدروکسیکات است، مواد ریزدانه (پودر سنگ، میکروسیلیس، غبار) با حداکثر اندازه ۰/۲ میلی‌متر برای ساخت مورد استفاده قرار گرفت. الیاف قبل از مصرف به وسیله فشار باد از هم جدا شده و فرآوری شد. ابتدا مواد سیمانی و ریزدانه به صورت خشک با هم ترکیب تا کاملاً با یکدیگر مخلوط شوند سپس فوق روان کننده همراه با ۹۰ درصد آب به مخلوط اضافه می‌شود، پس از دستیابی به یک مخلوط همگن الیاف فرآوری شده به تدریج به مخلوط اضافه شده و مابقی آب اضافه می‌گردد، سپس کل مخلوط به مدت ۳ دقیقه با دور تند اختلاط و ماده مرکب لزج خود متراکم حاصل شد.

۲-۲- خصوصیات فشاری و خمشی ماده مرکب تولید شده

به منظور بررسی خواص مکانیکی ماده مرکب، آزمایش فشار و خمش انجام شد. برای ارزیابی مقاومت فشاری ماده مرکب ساخته

HPFRCC^۱ است که با قوانین ریزساختاری^۲ طراحی می‌شود. در ساخت HPFRCC مقدار مقاومت از درجه اهمیت بالاتری نسبت به دوام و شکل‌پذیری برخوردار است هر چند در ساخت ECC شکل‌پذیری از درجه اهمیت بیشتری نسبت به مقاومت برخوردار است. ECC از سیمان، آب، الیاف با درصد حجمی کم و سنگدانه‌های ریز با بزرگ‌ترین اندازه ۰/۲ میلی‌متر و مواد روان کننده ساخته می‌شوند که بر خلاف مواد متعارف پایه سیمانی دارای رفتار سخت شونده‌گی کششی بعد از اولین ترک خوردگی مانند فلزات است. ECC تحت بارگذاری، ترک خوردگی‌های متعدد همراه با کنترل عرض ترک و ظرفیت کرنش کششی بین ۳ تا ۷ درصد (۳۰۰ تا ۵۰۰ برابر ظرفیت کرنش کششی بتن معمولی) دارند، با وجود درصد کم الیاف (کمتر از ۰/۲٪) شکل‌پذیری بسیار زیادی را از این مواد می‌توان به دست آورد، محاسبات میکرومکانیکی قطر الیاف کمتر از ۵۰ میکرومتر (μm) را برای دستیابی به شکل‌پذیری بالا با وجود درصد کم الیاف نشان می‌دهد. بنابراین الیاف پلیمری که با چنین قطری ساخته می‌شوند مقدم‌تر از الیاف فولادی هستند که قطر آن‌ها بین ۱۵۰ تا ۵۰۰ میکرومتر است [۱۷-۱۵].

۲-۱- مشخصات مصالح ماده مرکب تولید شده

طرح اختلاط اولیه‌ای که توسط لی^۳ [۲۶]، برای ECC گزارش شده است شامل سیمان، آب، خاکستر بادی^۴، ماسه سیلیسی، الیاف

1 High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite (HPFRCC)

2 Micromechanical

3 Li

4 Fly Ash (FA)

5 Polyvinyl Alcohol (PVA)

6 Polypropylene (PP)



شکل ۱. آزمایش خمش چهار نقطه ای
Fig. 1. Four-point bending test

جدول ۳. خصوصیات مکانیکی ماده مرکب (ECC)

Table 3. Mechanical properties of composite material (ECC)

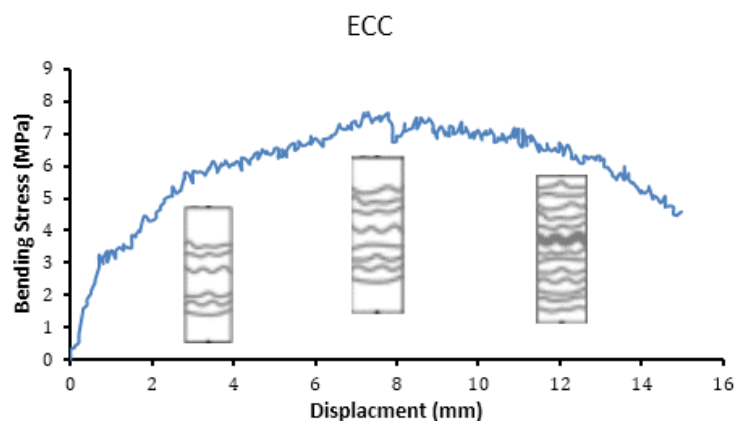
چگالی (kg/m ³)	مقاومت خمشی (MPa)	مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای (MPa)	ماده مرکب
۱۷۴۸	۸	۳۱	ECC

کرنشی^۱ در مواد مرکب مسلح به الیاف غیر ممتد با توزیع تصادفی لازم است حالت پایدار ترک خوردگی (حالتی که با افزایش طول و تعداد ترک‌ها، تنش کششی و عرض ترک هر دو تقریباً ثابت بمانند) رخ دهد. بدین منظور باید حداکثر مقدار تنش پل‌بندی الیاف بزرگ‌تر از مقاومت ترک خوردگی ماتریس باشد. در ECC شکست به صورت گسیختگی الیاف، لغزش یا بیرون کشیدگی الیاف صورت می‌گیرد. در شکل ۲ نمودار تنش - جابجایی وسط دهانه نمونه خمشی ماده مرکب ساخته شده تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که با افزایش بار ترک خوردگی در نمونه گسترش یافته و پس از توزیع و توسعه ریزترک‌ها نهایتاً با افزایش بار و گسیختگی الیاف نمونه دچار شکست می‌شود. توزیع و گستردگی ترک خوردگی و همچنین گسیختگی و بیرون کشیدگی الیاف PP در شکل ۳ نشان داده شده است. مقاومت مناسب، رفتار سخت شونده‌گی و قابلیت ترک خوردگی متعدد ماده مرکب ساخته شده (ECC) می‌تواند سبب افزایش مقاومت و ظرفیت شکل‌پذیری اتصال دال تخت - ستون شود بدین منظور در بخش بعدی اثر استفاده از این ماده مرکب در بهبود رفتار برش منگنه‌ای دال‌های تخت تحت اثر لنگر نامتعادل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

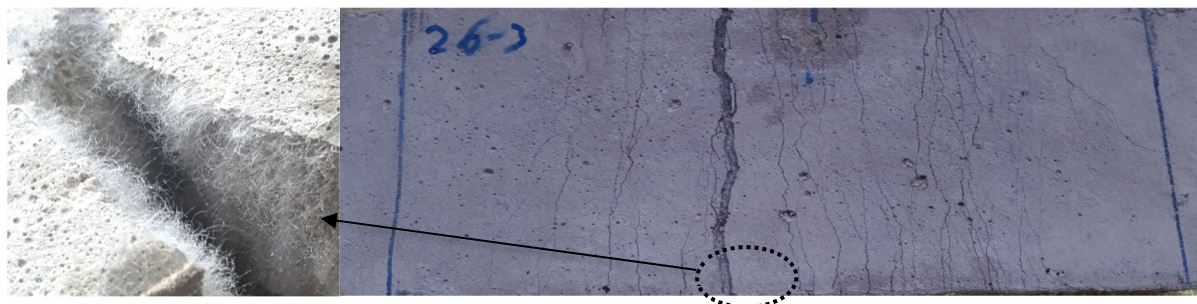
شده، مطابق ASTM سه نمونه مکعبی با ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر تهیه شد و پس از عمل‌آوری ۲۸ روزه در حوضچه آب سرد، تحت آزمایش فشاری قرار گرفتند. میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی ۳۸ مگاپاسکال معادل ۳۱ مگاپاسکال نمونه استوانه‌ای استاندارد، به دست آمد. همچنین مشاهده شد که با وجود مقاومت فشاری مناسب، نوع شکست بدون خرد شدگی نمونه و با ایجاد ریزترک‌هایی در راستای بارگذاری نیرو در نمونه اتفاق افتاد. همچنین مطابق با استاندارد ASTM C78، برای آزمایش خمش چهار نقطه‌ای، سه نمونه منشوری با ابعاد ۵۰×۱۰۰×۳۰۰ میلی‌مترمکعب تهیه و پس از عمل‌آوری ۲۸ روزه در حوضچه آب تحت آزمایش خمش مطابق شکل ۱ قرار گرفتند. نتایج آزمایش فشاری و خمشی ماده مرکب ساخته شده در جدول ۳ آمده است.

در مواد مرکب سیمانی مهندسی پس از شروع ترک خوردگی، دو طرف ترک توسط فرآیند پل زدن به هم دوخته می‌شود، سه عامل سنگدانه‌ها، الیاف و تنش پیش‌تنیدگی در الیاف از عوامل تاثیرگذار در فرآیند پل زدن هستند که از این میان تاثیر تنش پل زدن سنگدانه و پیش‌تنیدگی در مقایسه با تنش پل زدن الیاف، با افزایش عرض ترک کمتر و ناچیز می‌شود. به منظور ایجاد رفتار سخت شونده‌گی

1 Strain hardening



شکل ۲. نمودار تنش خمشی و تغییر مکان وسط دهانه برای آزمایش خمش چهارنقطه ای
 Fig. 2. Bending stress – Midspan displacement curve for the four-point bending test



شکل ۳. گسترش و توزیع ترک خوردگی ماده مرکب و گسیختگی الیاف بعد از آزمایش خمش
 Fig. 3. Propagation and distribution of composite cracking and fibers rupture after bending test

جدول ۴. نسبت اجزا بتن معمولی و ECC
 Table 4. Mix proportion of ECC and normal concrete

مقاومت فشاری (MPa)	الیاف	فوق روان کننده	غبار	پودرسنگ	میکروسیلیس	شن	ماسه	آب	سیمان	مصالح
۳۰	-	۰/۰۰۱۷	-	-	-	۱/۸	۲/۷	۰/۴۵	۱	بتن معمولی
۳۱	۰/۰۱۵	۰/۰۳	۰/۲۷	۱/۲	۰/۵۳	-	-	۰/۹	۱	ECC

AIII با تنش تسلیم و تنش نهایی به ترتیب ۴۰۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال استفاده شده است. طرح اختلاط بتن و ECC و همچنین خصوصیات میلگردهای مورد استفاده در جدول ۴ و ۵ آورده شده است.

۳-۲- مشخصات نمونه‌ها و آزمایش

به منظور بررسی تاثیر ECC بر رفتار برش منگنه‌ای دال‌های تخت تحت اثر لنگر نامتعادل، در این قسمت ۷ دال بتن‌آرمه مورد

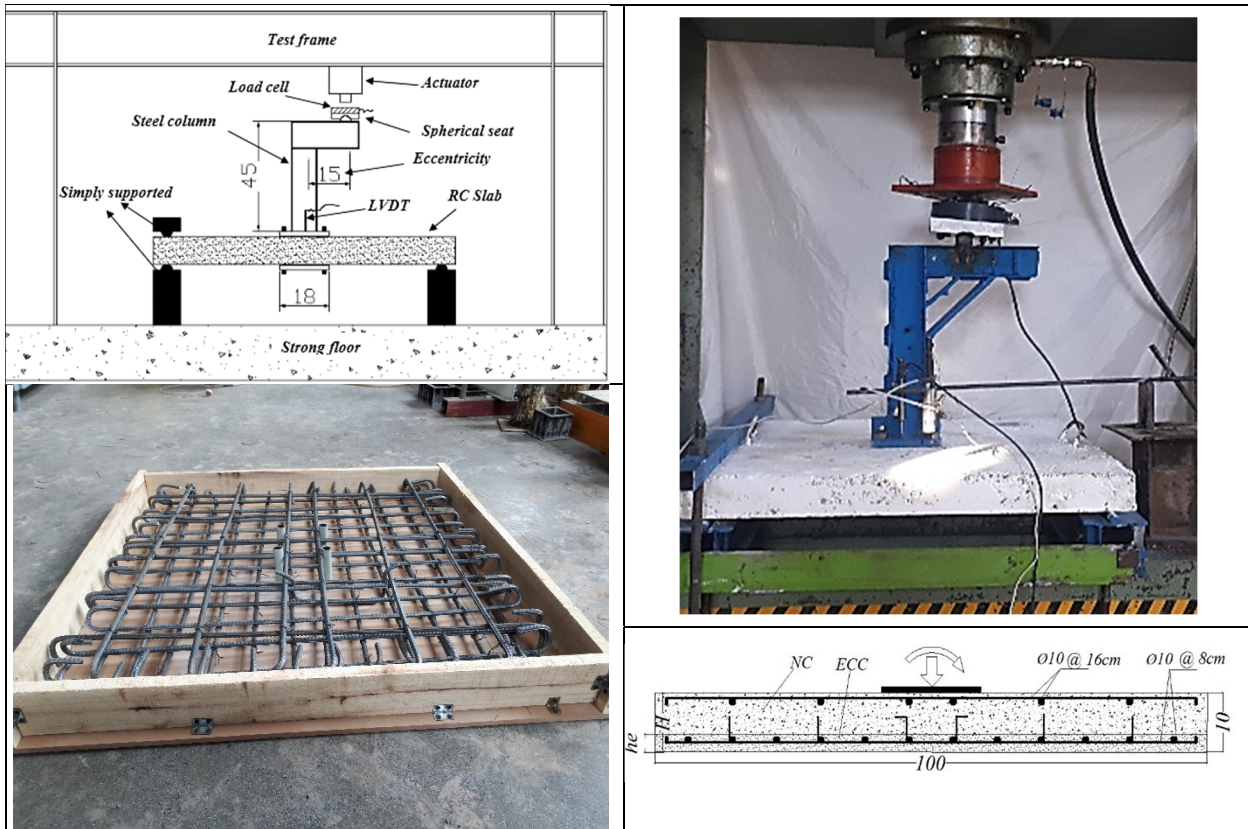
۳-تهیه نمونه آزمایشگاهی اتصال دال تخت - ستون

۳-۱- مشخصات مصالح

برای ساخت دال بتن مسلح از بتن معمولی با مقاومت مشخصه ۳۰ مگاپاسکال و ECC معرفی شده در بخش پیشین استفاده شده است. برای بتن معمولی سیمان مصرفی تپ ۱، بزرگ‌ترین اندازه سنگدانه ۲۵ میلی‌متر، نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ و غبار سیمان ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است. در ساخت نمونه‌ها از آرماتور نوع

جدول ۵. خصوصیات میلگرد مصرفی
Table 5. The properties of steel reinforcement

قطر میلگرد (mm)	سطح مقطع (mm ²)	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	کرنش نهایی (%)
۸	۴۲/۰	۴۵۶	۶۹۶	۲۹/۵۸
۱۰	۷۸/۵	۴۵۶	۶۸۸	۳۰/۹۴



شکل ۴. پیکربندی مورد استفاده و جزئیات میلگرد گذاری و هندسه نمونه‌ها
Fig. 4. Test setup and details of specimens

عددی بین ۰/۵ تا ۱/۲ درصد است. ابعاد دال و درصد میلگرد بالا و پایین در تمامی نمونه‌ها ثابت است. جزئیات میلگرد گذاری دال و مشخصات نمونه‌ها در شکل ۴ و جدول ۶ آمده است.

افزایش یا کاهش خروج از مرکزیت تاثیر مستقیم بر میزان تغییر پارامترهای وابسته خواهد داشت بطوریکه ماهیت رفتاری دال تغییر نکرده و تنها مقدار عددی پارامترها تغییر می‌کند [۲۸]. همچنین با توجه به اینکه نسبت لنگر نامتعادل به برش گرانشی (خروج از مرکزیت) زمانی که برابر با بعد ستون باشد بیانگر تقاضا واقعی اتصال میانی دال - ستون تحت بارهای سنگین برشی است [۲۷]، بنابراین

ارزیابی قرار می‌گیرد. دال‌ها در مقیاس یک دوم و مطابق پژوهش بینایی و بایراک^۱ [۲۷]، طبق آئین‌نامه 14-318-ACI طراحی و ساخته شده‌اند. دال‌ها مربعی به بعد ۱۰۰۰ و ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر که به صورت شبکه‌ای با میلگردهای به قطر ۱۰ میلی‌متر با پوشش بتن ۱۵ میلی‌متر در بالا و پایین مسلح شده‌اند، درصد میلگردهای وجه کششی دال (سطح زیرین) ۰/۹۴ و به صورت شبکه میلگرد ۸ cm @ ۱۰ Ø و میلگردهای وجه بالایی دال ۰/۴۷ و به صورت شبکه میلگرد ۱۶ cm @ ۱۰ Ø می‌باشد، شایان ذکر است که درصد انتخاب میلگرد در کارهای رایج دال ساختمانی

1 Biniici and Bayrak

جدول ۶. نمونه‌های مورد آزمایش
Table 6. Experimental specimens

نمونه	خروج از مرکزیت (mm)	نسبت ارتفاع جایگزینی ECC به ضخامت دال ($\frac{h_g}{H}$)	اتصال دو ماده
C1	۰	۰	-
C2	۱۵۰	۰	-
EC1	۱۵۰	۰/۱۵	بدون برش‌گیر
EC2	۱۵۰	۰/۳	بدون برش‌گیر
EC3	۱۵۰	۰/۳	برش‌گیر
EC4	۱۵۰	۰/۵	برش‌گیر
EC5	۱۵۰	۱	-

شده که از طریق شاه‌تیر قاب دروازه‌ای به دال نیرو وارد می‌کند. اعمال بار که توسط نیروسنج^۱ اندازه‌گیری می‌گردد، به صورت استاتیکی (با نرخ حدود ۴ کیلو نیوتن در دقیقه) با خروج از مرکزیت ۱۵۰ میلی‌متر به ستون فولادی انجام می‌گردد. تغییر مکان وسط دال (تغییر مکان وسط صفحه صلب در محل اتصال ستون فولادی به دال بتن‌آرمه) توسط تغییر مکان سنج خطی (LVDT^۲) اندازه‌گیری می‌گردد. نیروسنج و تغییر مکان سنج به دستگاه ثبت داده‌ها متصل هستند.

۴- نتایج آزمایشگاهی

در این بخش ۷ دال ساخته شده بررسی می‌شوند. به منظور بررسی اثر لنگر نامتعادل بر رفتار برش منگنه‌ای دال‌های تخت، یک دال بتن‌آرمه بدون لنگر نامتعادل (C1) با یک دال بتن‌آرمه با لنگر نامتعادل (C2) مورد مقایسه قرار می‌گیرد. تمام شرایط تکیه‌گاهی و هندسی ثابت و تنها متغییر مورد بررسی خروج از مرکزیت نیرو است. همچنین به منظور بررسی چسبندگی و اندرکنش سطح تماس دو ماده متفاوت (بتن معمولی با ماده مرکب) با ثابت ماندن سایر شرایط آزمایش، دال تخت مرکب EC2 و EC3 با جایگزینی ۳۰ میلی‌متر از ضخامت دال در وجه کششی با ECC، آزمایش شد. مطابق جدول ۶ در نمونه EC2 سطح تماس دو ماده بدون هیچ تقویتی و در نمونه EC3 سطح تماس دو ماده متفاوت (بتن معمولی با ماده مرکب) با استفاده از برش‌گیرهای U شکل تقویت شد. در انتها به منظور بررسی تاثیر نسبت ارتفاع جایگزینی ECC (h_g) به ضخامت دال (H) بر رفتار برش منگنه‌ای دال‌های تخت مرکب از بتن‌های معمولی

لنگر با خروج از مرکزیت ۱۵۰ میلی‌متری بار محوری، توسط ستونک فلزی که با یک صفحه صلب فولادی به ابعاد ۱۸۰ میلی‌متر در بالا و پایین دال و توسط چهار پیچ پرمقاومت به دال تخت بتن مسلح وصل است، اعمال می‌شود (شکل ۴). به منظور ایجاد سوراخ‌های عبور پیچ‌های متصل‌کننده صفحات فلزی بالا و پایین دال تخت به ستون فلزی، لوله‌های پلاستیکی به قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر قبل از بتن‌ریزی دال، در محل اتصال تعبیه شد. به دلیل اینکه برش منگنه‌ای در ناحیه بحرانی شکست و دور از صفحه فلزی رخ می‌دهد، سختی اتصال تأثیری بر نتیجه نهایی ندارد و به همین دلیل برای تمام نمونه‌ها از یک ستون فلزی و صفحه فلزی سخت استفاده شد. برای جلوگیری از تمرکز تنش و یکنواختی نیرو وارده به دال در حد فاصل بین دال و صفحات فلزی از پلاستیک فشرده استفاده شد. در اتصال دال تخت - ستون زمانی که تنها بار محوری وجود دارد، به دلیل امتداد دال در آن سوی نقاط عطف انحنای دال به صورت دو طرفه رفتار می‌کند. اما زمانی که لنگر نامتعادل به اتصال اعمال می‌شود به دلیل تغییر شکل دال در راستای عمود بر راستای لنگر اعمالی و در جهت توصیف رفتار واقعی اتصال، قیده‌های مانع تغییر شکل در این راستای باید برداشته شوند [۲۷]. بنابراین از نظر تکیه‌گاهی، دال‌های مورد آزمایش تنها در راستاهای موازی لنگر اعمالی مقید شده‌اند و در دو راستای دیگر روی تکیه‌گاه ساده قرار دارند. در عمل، ستون از پائین به دال نیرو اعمال می‌کند در حالی که در این برنامه آزمایشگاهی، نمونه‌ها از بالا به پایین بارگذاری شده و آرماتورهای کششی در پایین دال هستند. پیکربندی آزمایش در شکل ۴ آورده شده است.

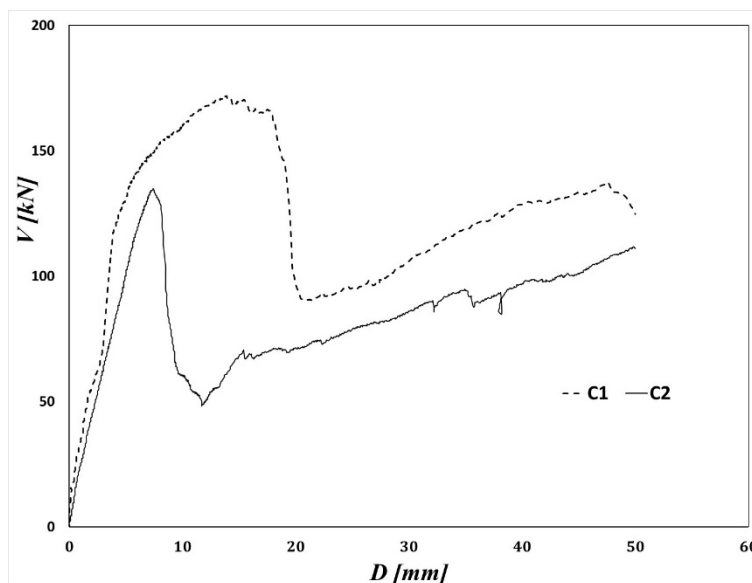
بارگذاری با جک هیدرولیکی با ظرفیت ۱۰۰۰ کیلو نیوتن انجام

1 Load Cell

2 Linear Variable Differential Transformer

جدول ۷. خلاصه نتایج پژوهش
Table 7. Summary of results

نمونه	ظرفیت برش مگنه‌ای V [kN]	تغییر مکان برش مگنه‌ای D [mm]	ظرفیت پس پانچینگ در جابجایی ۵۰ میلی‌متر V _P [kN]	$\frac{V_P}{V}$	حالت شکست
C1	۱۷۲	۱۴	۱۳۶	۷۹٪	برشی
C2	۱۳۵	۷/۵	۱۱۰	۸۱٪	برشی
EC1	۱۳۵	۸	۱۱۸	۸۷٪	برشی
EC2	۱۴۰	۸	۱۴۴	۱۰۳٪	برشی
EC3	۱۳۵	۷/۸	۱۵۹	۱۱۷٪	خمشی
EC۴	۱۳۱	۹	۱۶۰	۱۲۲٪	خمشی
EC۵	۱۳۰	۱۱	۱۶۹	۱۳۰٪	خمشی



شکل ۵. نمودار نیرو جابجایی اتصال در حالت با و بدون لنگر نامتعادل

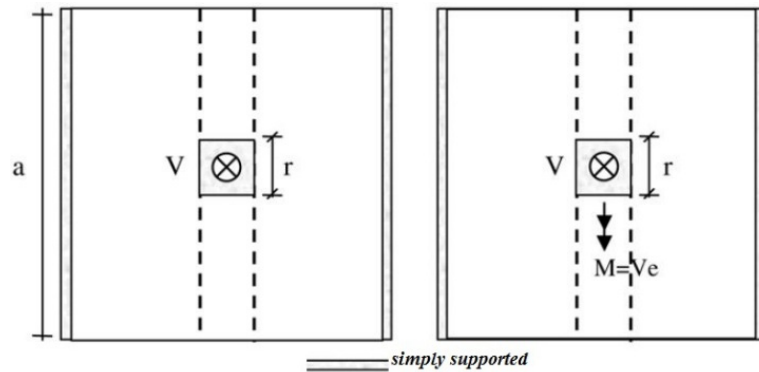
Fig. 5. Load - displacement relationship for connections with and without unbalanced moment

مشاهده می‌گردد که در شروع بارگذاری سختی هر دو دال یکسان است و با افزایش نیرو و تشکیل ریزترک‌ها به تدریج از سختی دال کاسته شده و نهایتاً دال به دلیل از دست دادن ظرفیت برشی دچار شکست مگنه‌ای می‌شود و افت ناگهانی در ظرفیت باربری اتفاق می‌افتد. ظرفیت بار نهایی نمونه با لنگر نامتعادل در محل اتصال (C2) در مقایسه با نمونه‌ای که برش خالص (C1) دارد، ۲۱ درصد کاهش یافته است. به دلیل وجود آرماتورهای یکپارچگی در وجه فشاری (آرماتور فشاری که از محل اتصال عبور می‌کند)، دال پس از شکست مگنه‌ای همچنان قادر به تحمل بار یا رفتار پس پانچینگ

و ECC تحت لنگر نامتعادل، با ثابت بودن سایر شرایط آزمایش، ۵ دال تخت مرکب در نسبت‌های $\frac{h_e}{H}$ صفر، ۰/۱۵، ۰/۳، ۰/۵ و ۱ مورد بررسی قرار گرفت. خلاصه نتایج آزمایش‌ها در جدول ۷ آورده شده است.

۱-۴- اثر لنگر نامتعادل بر ظرفیت برش مگنه‌ای

در شکل ۵ نمودار نیرو - جابجایی وسط دال با شرایط هندسی و تکیه‌گاهی یکسان برای هر دو نمونه با و بدون لنگر نامتعادل در محل اتصال آورده شده است.



شکل ۶. خطوط تسلیم فرضی برای دال C1 و C2
Fig. 6. Assumed yield line for slabs C1 and C2

تنش تسلیم میلگردهای دال، f'_c مقاومت مشخصه بتن دال، d و d' فاصله مرکز میلگردهای پایین و بالای دال تا سطح بالایی دال است. با قرار دادن مقادیر پارامترها در رابطه (۱) و (۲)، ظرفیت خمشی دال C1 و C2 بر طبق روش آنالیز خطوط تسلیم به ترتیب ۱۱۴ و ۸۴ کیلونیوتن به دست آمد. در دال C1 و C2 اگر چه ظرفیت خمشی ۲۵ و ۸ درصد کمتر از ظرفیت برشی محاسبه شده طبق ACI-14-318 است ولی تسلیم زیادی در میلگردها رخ نداد (قسمت نسبتا صاف نمودار نیرو - جابجایی دال C1) و شکست منگنه ای اتفاق افتاد. دلیل این امر مطابق پژوهش کریسول [۲۹]، نبود مقاومت بیشتر و شکل پذیری مورد نیاز برای تشکیل مکانیزم خمشی است. مقایسه نتایج به دست آمده با روابط آئین نامه های ACI-14-318، Eurocode2004 E و روش آنالیز خطوط تسلیم در شکل ۷ آمده است. مشاهده می گردد که Eurocode2004 برآورد واقع بینانه تری از ظرفیت اتصال دال تخت-ستون را ارائه می دهد.

۲-۴- اثر سطح تماس بین بتن معمولی و ECC

به منظور بررسی سطح تماس دو ماده با ویژگی های مکانیکی و اجزا تشکیل دهنده متفاوت مطابق جدول ۴، دو دال با سطح تماس متفاوت مورد آزمایش قرار گرفت. در نمونه EC2، تماس بین دو بخش دال بدون استفاده از برش گیر انجام شد و در نمونه EC3 با تعبیه میلگردهای U شکل به قطر ۸ میلی متر و فاصله ۱۶ سانتی متری از هم و مطابق شکل ۴، پیوستگی سطح تماس بین دو بخش دال

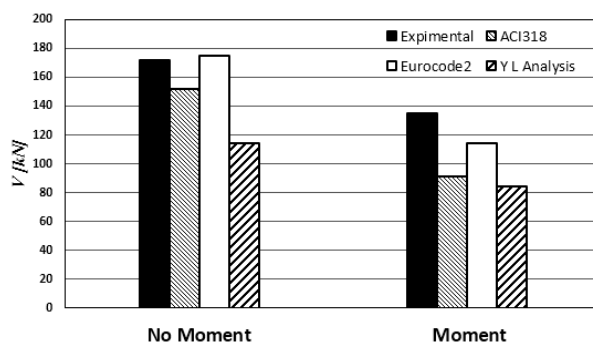
که برای جلوگیری از تخریب پیش رونده موثر است، می باشد و نتایج آن در جدول ۷ آمده است. آئین نامه های مختلف به منظور در نظر گرفتن اثر لنگر نامتعادل بر ظرفیت شکست منگنه ای دال های تخت روابط نیمه تجربی ارائه داده اند. بر طبق روابط ACI-14-318 برای دال تخت مشابه نمونه C1 ظرفیت شکست منگنه ای برای حالت با و بدون لنگر نامتعادل به ترتیب ۹۱ و ۱۵۲ برآورد می شود که در مقایسه با نمونه مورد آزمایش ۳۳ و ۱۲ درصد کمتر برآورد شده است. طبق روابط Eurocode2004 مقدار ظرفیت شکست منگنه ای برای حالت با و بدون لنگر نامتعادل به ترتیب ۱۱۴ و ۱۷۵ برآورد می شود که در مقایسه با نمونه مورد آزمایش ۱۵ و ۲ درصد اختلاف دارد. در نمودار نیرو - جابجایی دال C1 مقداری تسلیم در میلگردها مشاهده شد بدین منظور برای بررسی نمودار و نوع شکست دال های C1 و C2، ظرفیت خمشی (v_{flex}) بر طبق روش آنالیز خطوط تسلیم و خطوط تسلیم فرضی شکل ۶ مطابق پژوهش بینسی و بایراک [۲۷]، از رابطه (۱) محاسبه شد.

$$v_{flex} = 4m \frac{a}{a - r + 2e} \quad (1)$$

در این رابطه a طول دال، r عرض ستون، e خروج از مرکزیت و m لنگر پلاستیک واحد طول است که طبق رابطه (۲) به دست می آید.

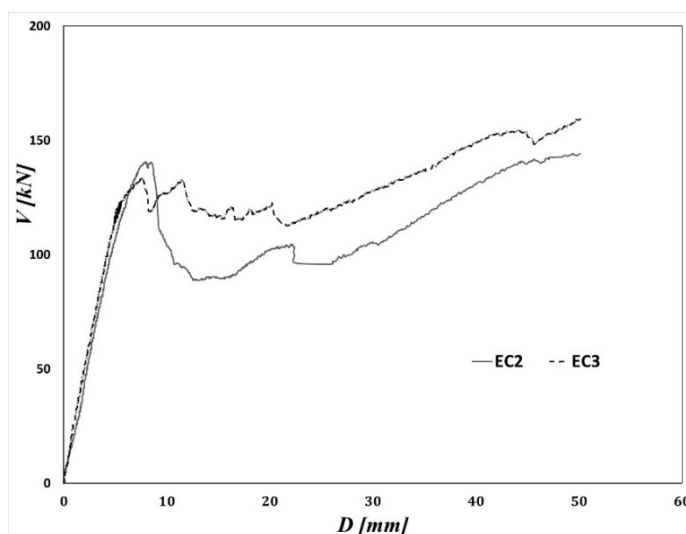
$$m = (\rho - \rho') f_y d^2 \left(1 - 0.59 \frac{f_y}{f'_c} (\rho - \rho') \right) + \rho' f_y d^2 \left(1 - \frac{d'}{d} \right) \quad (2)$$

در رابطه (۲)، ρ و ρ' درصد میلگرد پایین و بالای دال، f_y



شکل ۷. مقایسه ظرفیت برش منگنه ای در حالت با و بدون لنگر نامتعادل

Fig. 7. Comparison of punching shear capacities of specimens with and without unbalanced moment



شکل ۸. نمودار نیرو جابجایی اتصال در حالت با و بدون بهبود سطح تماس دو ماده

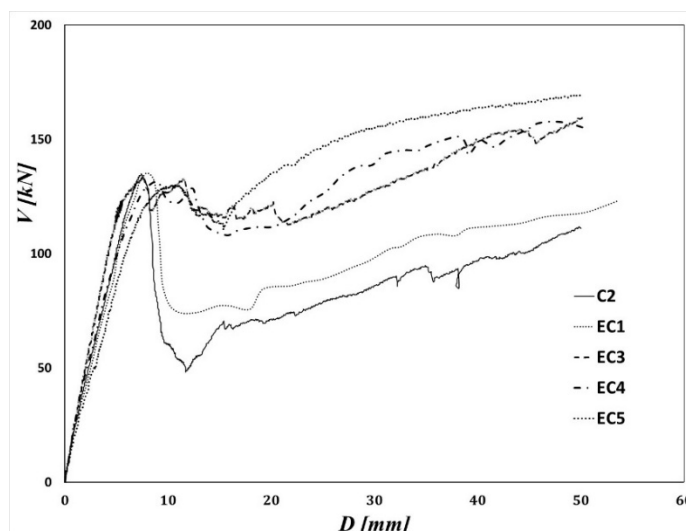
Fig. 8. Load - displacement relationship for connections with and without interface improved

استفاده از برش گیرهای U شکل در اتصال بتن معمولی و ECC سبب افزایش ظرفیت باربری و تغییر مکانیسم شکست ترد به شکست نرم در دال مرکب می‌شود.

۳-۴- اثر جایگزینی بتن معمولی دال با ECC

به منظور بررسی اثر استفاده از ECC بر رفتار برش منگنه‌ای دال‌های تخت با انتقال لنگر نامتعادل در این بخش ۵ دال تخت با نسبت ارتفاع جایگزینی ECC (h_e) به ضخامت دال (H) مطابق شکل ۴، در نسبت‌های صفر (C2)، 0.15 (EC1)، 0.3 (EC3)، 0.5 (EC4) و 1 (EC5) مورد بررسی قرار گرفت. نمودار نیرو جابجایی وسط دال با ثابت بودن سایر شرایط هندسی و تکیه‌گاهی برای هر ۵ نمونه مورد آزمایش، در شکل ۹ آورده شده است.

تقویت یافت. مقاومت فشاری ۲۸ روزه برای بتن معمولی و ECC تقریباً یکسان و برابر ۳۰ مگاپاسکال است اما به دلیل حذف مصالح درشت‌دانه در طرح اختلاط ECC این ماده مرکب دارای مدول الاستیسیته و سختی کمتری نسبت به بتن معمولی است. نمودار نیرو جابجایی وسط دال با شرایط هندسی و تکیه‌گاهی یکسان برای هر دو نمونه در شکل ۸ آورده شده است. مشاهده می‌شود که سختی هر دو نمونه در ابتدا یکسان است و ظرفیت باربری نمونه EC3 افزایش یافته است. پس از شکست دال میزان افت ظرفیت در نمونه بدون برش گیر EC2، ۳۶ درصد و در نمونه با برش گیر EC3، ۱۱ درصد است. در نمونه بدون تقویت سطح تماس، رفتار اتصال بصورت شکست برشی است ولی نمونه با برش گیر، رفتار برشی-خمشی از خود نشان می‌دهد. بنابراین تقویت سطح تماس دو بخش دال با



شکل ۹. نمودار نیرو و جابجایی اتصال در نسبت‌های مختلف جایگزینی بتن معمولی دال با ECC
Fig. 9. Load - displacement relationship for connections with different h/H

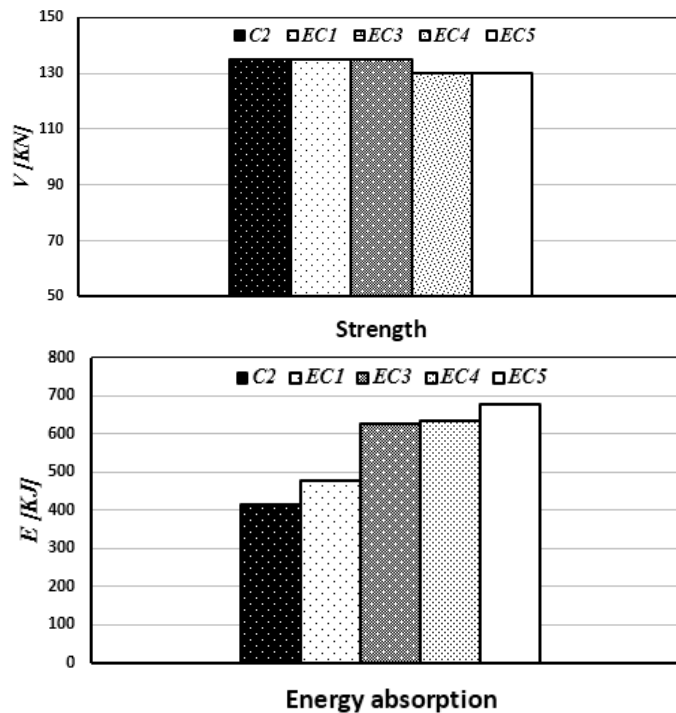
شده است. مطابق شکل ۹ با افزایش نسبت جایگزینی بتن معمولی دال با ECC، به دلیل عدم پوسته شدن و جدایی پوشش میلگردها و همچنین درگیری میلگردهای طولی در فرآیند باربری، دال تخت از یک شکست ترد برشی به سمت شکست شکل‌پذیر خمشی با خاصیت سخت شونده‌گی سوق پیدا می‌کند.

انرژی جذب شده کل برابر سطح زیر نمودار نیرو - جابجایی است. با داشتن داده‌های نمودار نیرو - جابجایی برای هر کدام از نمونه‌ها در شکل ۹ و استفاده از روش‌های عددی برای تخمین سطح زیر نمودار، ظرفیت جذب انرژی هر کدام از نمونه‌ها به دست آمد. در شکل ۱۰ ظرفیت باربری و جذب انرژی برای دال C2 و دال‌های با سطح مقطع مرکب آمده است. مشاهده می‌گردد که ECC ظرفیت باربری را زیاد تحت تاثیر قرار نمی‌دهد اما ظرفیت جذب انرژی با افزایش ضخامت لایه ECC افزایش می‌یابد. به طوری که میزان جذب انرژی برای نمونه‌های با نسبت ارتفاع جایگزینی ECC به ضخامت دال (h_e/H) برابر 0.15 (EC1)، 0.3 (EC3)، 0.5 (EC4) و 1 (EC5) به ترتیب 14 ، 50 ، 52 و 63 درصد بیشتر است از میزان جذب انرژی در نمونه C2 که به طور کامل از بتن معمولی ساخته شده است.

در شکل ۱۱ میزان خرابی سطح بالایی و زیرین نمونه‌های مورد آزمایش آمده است. با توجه به طبیعت بارگذاری و اعمال لنگر در یک جهت، مشاهده می‌گردد که عمده ترک خوردگی و خرابی سطح زیرین دال در راستای اعمال لنگر است. خرابی در نمونه C2 به صورت

مطابق شکل ۹ در شروع بارگذاری با وجود اینکه مقاومت فشاری بتن و ECC تقریباً برابر است و به دلیل مدول الاستیسیته کمتر ECC، شیب نمودار نیرو و جابجایی برای دال‌های با لایه ECC کمتر است. با افزایش نیرو و لنگر نامتعادل به تدریج ریزترک‌ها شکل گرفته و سختی کاهش می‌یابد به طوری که این کاهش سختی با افزایش ضخامت لایه ECC، بیشتر می‌شود. به دلیل قرار گرفتن برش‌گیر در سطح تماس دو ماده در نمونه‌ها با لایه ECC و همگن شدن مقطع، مقدار ظرفیت باربری در نمونه C2، EC1 و EC3 یکسان و برابر 135 کیلونیوتن است اما در نمونه EC4 و EC5 که درصد بیشتری از مقطع از ECC ساخته شده است ظرفیت باربری به میزان 4 درصد کمتر است.

نمونه C2 به صورت ناگهانی و به صورت ترد با کاهش شدید ظرفیت باربری 63 درصدی دچار شکست شد. در نمونه EC1 تنها 15 درصد ضخامت دال (پوشش میلگردها) با ECC جایگزین شد که تاثیری بر رفتار دال نداشت اما با افزایش مقدار جایگزینی ECC در نمونه‌های EC3، EC4 و EC5 با وجود تغییر شکل‌های زیاد اتصال دال-ستون، به دلیل گسترش ریزترک‌های متعدد و خاصیت سخت شونده‌گی کششی ECC، افت ظرفیت باربری بسیار کمتر و در حدود 11 ، 15 و 15 درصد به ترتیب است. مطابق جدول ۷ جایگزینی بتن معمولی دال با ECC سبب افزایش 44 ، 45 و 54 درصدی ظرفیت پس پانچینگ نمونه‌های EC3، EC4، EC5 و EC4 در مقایسه با نمونه C2



شکل ۱۰. مقایسه ظرفیت باربری و جذب انرژی در دال های مرکب از بتن معمولی و مواد مرکب سیمانی مهندسی
Fig. 10. Comparison of load capacity and energy absorption in slabs composed of NC and ECC

در این پژوهش در گام اول با مصالح و الیاف بومی تولید شده در کشور ایران، طرح اختلاط مناسب ماده مرکب با خصوصیات مکانیکی همانند ECC به دست آورده شد و در گام بعدی اثر استفاده از این نوع ECC بر رفتار برش منگنه‌ای دال‌های تخت با انتقال لنگر نامتعادل به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. در نمونه‌ها اثرات لنگر نامتعادل، بهبود سطح تماس بتن و ECC و جایگزینی بتن دال با ECC بررسی گردید. بر اساس آزمایش‌ها، نتایج زیر حاصل گردید:

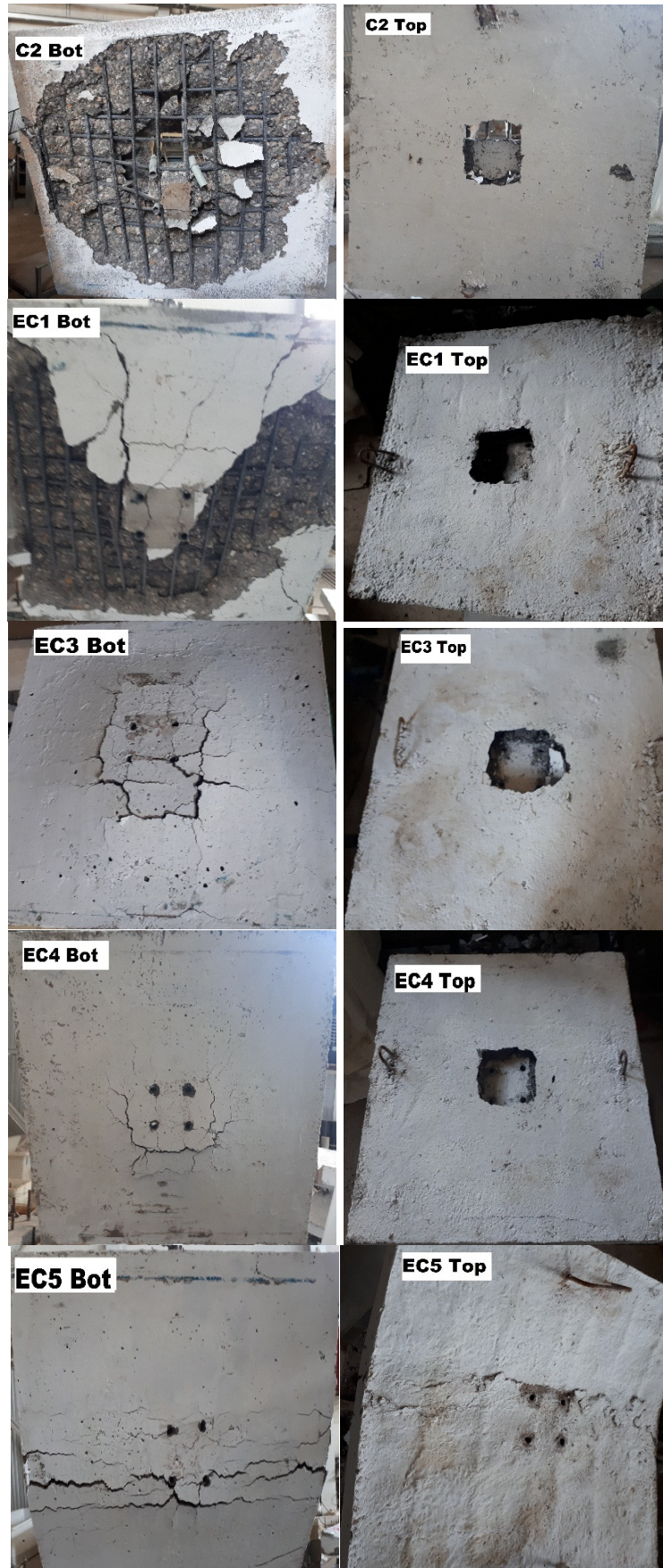
۱- استفاده از الیاف کوتاه PP همراه با طرح اختلاط مهندسی از پودر سنگ معدنی و میکروسلیس و غبار کوره آهن سبب تولید ماده مرکب سیمانی (ECC) با خصوصیات سخت شونده‌گی و جذب انرژی بالایی می‌شود.

۲- روابط آئین‌نامه Eurocode2004 برآورد واقع‌بینانه‌تری از ظرفیت برشی اتصال دال-ستون نسبت به 14-ACI-318 ارائه می‌دهد.

۳- بهبود سطح تماس بین بتن معمولی و ECC به وسیله میلگردهای U شکل به تولید مقطع همگن کمک کرده و سبب افزایش ظرفیت باربری و قابلیت جذب انرژی به میزان ۱۱ درصد در

خرد شدگی کامل بتن در مخروط پانچینگ دال و جدا شدن پوشش بتنی در اطراف ناحیه بحرانی برش منگنه‌ای است. در نمونه‌های EC3، EC4 و EC5 خرابی به صورت ترک خوردگی و بدون خرد و جدا شدن ECC از سطح میلگردهای دال است. در نمونه‌های EC3 و EC4 با وجود ترک خوردگی اتصال هنوز ظرفیت تحمل بار مطابق شکل ۹ را دارد. برخلاف دو نمونه دیگر در نمونه EC5 شکست منگنه‌ای رخ نداد و شکست با افزایش عرض ترک سطح زیرین در راستای لنگر و تسلیم میلگردهای طولی اتصال، اتفاق افتاد. بنابراین با توجه به نوع شکست نمونه‌های آزمایشگاهی (که بدون خرد شدگی و جدا شدن بتن روی میلگردها اتفاق می‌افتد) و همچنین نمودار نیرو جابجایی دال در شکل ۹، پس از شکست پانچ ظرفیت تحمل بار تا مقداری زیادی برای اتصال وجود دارد که می‌تواند به عنوان به پشتیبان برای اتصال دال ستون برای جلوگیری از تخریب پیش‌رونده مورد استفاده قرار گیرد. وجود ECC در ناحیه کششی اتصال علاوه بر افزایش ظرفیت باربری اتصال از شکست شدن همراه با خرد شدگی و جدا شدن تکه‌های خرده شده از سطح دال جلوگیری کرده و سبب ایجاد حس امنیت و آرامش بیشتری در ساختمان خواهد شد.

۵- نتیجه‌گیری



شکل ۱۱. خرابی سطح رویی و زیرین نمونه‌های مورد آزمایش
Fig. 11. Top and bottom damage in tested specimens

- of the Structural Division 102, no. 9 (1976): 1879-1901.
- [8] Hawkins, Neil Middleton, Denis Mitchell, and Maw Shyong Sheu. "Cyclic behavior of six reinforced concrete slab-column specimens transferring moment and shear". Division of Structures and Mechanics, Department of Civil Engineering, University of Washington, 1974.
- [9] Park, Robert, and Shafiqul Islam. "Strength of slab-column connections with shear and unbalanced flexure". Journal of the Structural Division 102, no. 9 (1976): 1879-1901.
- [10] Stark, Andrew, Baris Binici, and Oguzhan Bayrak. "Seismic upgrade of reinforced concrete slab-column connections using carbon fiber-reinforced polymers". ACI Structural Journal 102, no. 2 (2005): 324.
- [11] Pan, Austin D., and Jack P. Moehle. "An experimental study of slab-column connections". Structural Journal 89, no. 6 (1992): 626-638.
- [12] Cheng, Min-Yuan, Gustavo J. Parra-Montesinos, and Carol K. Shield. "Shear strength and drift capacity of fiber-reinforced concrete slab-column connections subjected to biaxial displacements". Journal of structural engineering 136, no. 9 (2010): 1078-1088.
- [13] Zhang, Rui, Koji Matsumoto, Takayoshi Hirata, Yoshikazu Ishizeki, and Junichiro Niwa. "Shear behavior of polypropylene fiber reinforced ECC beams with varying shear reinforcement ratios". Journal of JSCE 2, no. 1 (2014): 39-53.
- [14] Meng, Dan, C. K. Lee, and Y. X. Zhang. "Flexural and shear behaviors of plain and reinforced polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite beams". Engineering Structures 151 (2017): 261-272.
- [15] Ge, Wen-Jie, Ashraf F. Ashour, Xiang Ji, Chen Cai, and Da-Fu Cao. "Flexural behavior of ECC-concrete composite beams reinforced with steel bars". Construction and Building Materials 159 (2018): 175-188.
- [16] Kim, Sun-Woo, and Hyun-Do Yun. "Crack-damage mitigation and flexural behavior of flexure-dominant reinforced concrete beams repaired with strain-hardening cement-based composite". Composites Part B: Engineering 42, no. 4 (2011): 645-656.
- [17] Ge, Wenjie, Ashraf F. Ashour, Dafu Cao, Weigang Lu, Peiqi

دال مختلط می‌شود.

- ۴- استفاده از ECC در محل اتصال دال ستون ظرفیت برشی را ثابت نگه می‌دارد ولی رفتار پس از شکست اتصال به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد. به طوری که ظرفیت جذب انرژی با جایگزینی کامل بتن دال با ECC، ۶۳ درصد افزایش می‌یابد.
- ۵- با افزایش جایگزینی بتن دال با ECC، رفتار دال تخت از یک شکست ترد و ناگهانی با خرد و جدا شدن تکه‌های بتن به سمت یک شکست شکل‌پذیر بدون خرد شدگی و جدا شدن پوشش روی میلگردها سوق داده می‌شود.
- ۶- با افزایش جایگزینی بتن دال با ECC، رفتار پس پانچینگ که برای جلوگیری از خرابی پیش‌رونده موثر است به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. به طوری که جایگزینی کامل بتن دال با ECC سبب افزایش ۵۳ درصدی مقاومت پست پانچینگ می‌شود.

مراجع

- [1] Pan, Austin, and Jack P. Moehle. "Lateral displacement ductility of reinforced concrete flat plates". Structural Journal 86, no. 3 (1989): 250-258.
- [2] Farhey, Daniel N., Moshe A. Adin, and David Z. Yankelevsky. "RC flat slab-column sub-assemblages under lateral loading". Journal of Structural Engineering 119, no. 6 (1993): 1903-1916.
- [3] I. Robertson, G. Johnson. "Cyclic lateral loading of nonductile slab-column connections". ACI Structural Journal, 103(3) (2006) 356.
- [4] Tian, Ying, James O. Jirsa, Oguzhan Bayrak, and Jaime F. Argudo. "Behavior of slab-column connections of existing flat-plate structures". ACI Structural Journal 105, no. 5 (2008): 561.
- [5] Megally, Sami, and Amin Ghali. "Punching shear design of earthquake-resistant slab-column connections". Structural Journal 97, no. 5 (2000): 720-730.
- [6] Marzouk, H., Mohamed Emam, and M. Sameh Hilal. "Effect of high-strength concrete columns on the behavior of slab-column connections". ACI Structural Journal 93 (1996): 545-554.
- [7] Park, Robert, and Shafiqul Islam. "Strength of slab-column connections with shear and unbalanced flexure". Journal

- of engineered cementitious composites beam-column-slab subassemblies with various column-to-beam flexural strength ratios". *Structural Concrete* 19, no. 3 (2018): 735-746.
- [24] Choi, Hyun-Ki, Baek-Il Bae, and Chang-Sik Choi. "Lateral resistance of unreinforced masonry walls strengthened with engineered cementitious composite". *International Journal of Civil Engineering* 14, no. 6 (2016): 411-424.
- [25] Deng, Mingke, and Shuo Yang. "Cyclic testing of unreinforced masonry walls retrofitted with engineered cementitious composites". *Construction and Building Materials* 177 (2018): 395-408.
- [26] Li, Victor C. "Engineered cementitious composites (ECC) material, structural, and durability performance". (2008).
- [27] Binici, Baris, and Oguzhan Bayrak. "Upgrading of slab-column connections using fiber reinforced polymers". *Engineering structures* 27, no. 1 (2005): 97-107.
- [28] Halabi, Ziad, Faouzi Ghrib, Amr El-Ragaby, and Khaled Sennah. "Behavior of RC slab-column connections strengthened with external CFRP sheets and subjected to eccentric loading". *Journal of Composites for Construction* 17, no. 4 (2013): 488-496.
- [29] Criswell, M. E. "Static and dynamic response of reinforced concrete slab-column connections". *Special Publication* 42 (1974): 721-746.
- Gao, Jiamin Yu, Xiang Ji, and Chen Cai. "Experimental study on flexural behavior of ECC-concrete composite beams reinforced with FRP bars". *Composite Structures* 208 (2019): 454-465.
- [18] Deng, Mingke, and Yangxi Zhang. "Seismic performance of high-ductile fiber-reinforced concrete short columns". *Advances in Civil Engineering* 2018 (2018).
- [19] Wu, Chang, Zuanfeng Pan, Ray Kai Leung Su, Christopher KY Leung, and Shaoping Meng. "Seismic behavior of steel reinforced ECC columns under constant axial loading and reversed cyclic lateral loading". *Materials and Structures* 50, no. 1 (2017): 78.
- [20] Cai, Jingming, Jinlong Pan, Hao Su, and Cong Lu. "Experimental study on the hysteretic behavior of ECC-encased CFST columns". *Engineering Structures* 173 (2018): 107-121.
- [21] Hung, Chung-Chan, Wei-Ming Yen, and Kun-Hao Yu. "Vulnerability and improvement of reinforced ECC flexural members under displacement reversals: Experimental investigation and computational analysis". *Construction and Building Materials* 107 (2016): 287-298.
- [22] Hosseini, Farshid, Bora Gencturk, Hadi Aryan, and Gustavo Cadaval. "Seismic behavior of 3-D ECC beam-column connections subjected to bidirectional bending and torsion". *Engineering Structures* 172 (2018): 751-763.
- [23] Liang, Xingwen, and Tingting Lu. "Seismic evaluation

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Amiri, M. R. Esfahani, *Punching shear behavior of flat slabs composed of normal concrete and ECC under the unbalanced moment*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(10) (2022) 4519-4534.

DOI: [10.22060/ceej.2020.18378.6865](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18378.6865)



