

ظرفیت برش دوطرفه دال‌های تخت ساخته شده از بتن خودمتراکم شونده سبک

علی مهندسی، محمدرضا اصفهانی*، امیرمحمد خواجه محمودآبادی

دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۵ آذر ۱۳۹۵
بازنگری: ۱۴ دی ۱۳۹۵
پذیرش: ۲ اسفند ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۱۱ اسفند ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

بتن خودمتراکم شونده سبک
بتن سبک
دال تخت
سبکدانه لیکا
ظرفیت برش دوطرفه

چکیده: هدف از این تحقیق بررسی ظرفیت برش دوطرفه در دال‌های بتن خود متراکم شونده سبک و بتن سبک ساخته شده از سبکدانه لیکا و مقایسه آن‌ها با بتن معمولی است. از آنجا که بیشتر ضوابط بیان شده در آیین‌نامه‌ها در مورد برش دوطرفه دال‌ها بر اساس اطلاعات تجربی به دست آمده از نمونه دال‌های بتن معمولی می‌باشد، بنابراین ضروری است که میزان دقت این روابط را برای دال‌های بتن خودمتراکم شونده سبک و بتن سبک مورد ارزیابی و بررسی قرارداد. در این پژوهش ۹ نمونه دال مربعی با ابعاد $1000 \times 1000 \times 150$ و $1000 \times 1000 \times 150$ میلی‌متر ساخته شده است. پارامترهای متغیر در این دال‌ها نوع بتن، مقاومت بتن، درصد آرماتور کششی و ضخامت دال است. نمونه‌های فوق مورد آزمایش قرار گرفته و مقدار برش دوطرفه و تغییر مکان نهایی برای هر یک از آن‌ها اندازه‌گیری شده است. در این پژوهش نتایج آزمایش‌ها با روابط آیین‌نامه‌های ACI، ایران (مبحث ۹) و BS-8110 مقایسه شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در دال‌های بتن خودمتراکم شونده سبک و بتن سبک نیز همانند بتن معمولی با افزایش نسبت آرماتور خمشی ظرفیت برش دوطرفه افزایش و تغییر مکان نهایی کاهش می‌یابد که منجر به افزایش سختی دال می‌شود. همچنین در نمونه‌های آزمایشگاهی این پژوهش با ۵۰٪ افزایش در ضخامت دال به طور میانگین ظرفیت برش دوطرفه ۶۵٪ افزوده و تغییر مکان نهایی ۲۶٪ کاهش یافت. نتایج آزمایش‌ها همچنین نشان داد که آیین‌نامه‌های ACI و ایران (مبحث ۹) در محاسبه ظرفیت برش دوطرفه دارای محافظه‌کاری و پراکندگی زیادتری نسبت به آیین‌نامه BS-8110 می‌باشند. آیین‌نامه ایران (مبحث ۹) با انحراف معیار ۰/۱۸۸ و آیین‌نامه BS با انحراف معیار ۰/۱۰۸ دارای بیشترین و کمترین انحراف معیار بودند.

۱- مقدمه

بیشتر نتایج پژوهش‌های گذشته و ضوابط آیین‌نامه‌ها در مورد برش دوطرفه دال‌ها بر اساس اطلاعات تجربی روی دال‌های بتن معمولی می‌باشد. از طرفی با توجه به وزن کم بتن‌های سبک و کاهش وزن سازه ساخته شده از این نوع بتن، استفاده از بتن سبک در دال‌ها افزایش یافته است. همچنین استفاده از بتن خودمتراکم شونده سبک به دلیل کیفیت مناسب‌تر و اجرای مطلوب‌تر رو به افزایش است.

ترکیب خواص بتن سبک و بتن خودمتراکم برای اولین بار در دانشگاه صنعتی کالرو آلمان با عنوان بتن سبک خودمتراکم ابداع گردید و به ثبت رسید [۱].

اگرچه تاکنون تحقیقات بسیاری در زمینه انواع بتن سبک و بتن خود تراکم در دنیا انجام شده ولی با توجه به جدید بودن بتن سبک خود تراکم تحقیقات کمی در دنیا و خصوصاً در ایران بر روی این نوع بتن انجام گرفته است.

یانای و همکاران [۲] تأثیر عواملی همچون نوع و میزان سبکدانه و نسبت آب به مواد پودری (حجمی) بر روی ویژگی‌های خودتراکمی،

مقاومت فشاری و دوام (مقاومت در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان) در بتن خودمتراکم شونده سبک را بررسی نمودند. آنها نتیجه گرفتند که استفاده از سبکدانه‌های متراکم‌تر سبب افزایش قابلیت جریان، پراکندگی و مقاومت فشاری مخلوط‌ها می‌شود.

هابرتووا^۲ و هالا^۳ [۳] پژوهش‌هایی بر روی مخلوط‌های بتن خودمتراکم شونده با کمک سبکدانه و مقایسه عملکرد دو پوزولان متاکائولن و دوده سیلیسی انجام دادند. آنها ضریب راندمان سازه‌ای (نسبت مقاومت فشاری به چگالی) را به‌عنوان مبنای مقایسه مخلوط‌های بتن خودمتراکم شونده سبک انتخاب نمودند و نتیجه گرفتند که مخلوط حاوی دوده سیلیسی دارای بهترین عملکرد می‌باشد.

رهایی و همکاران [۴] نیز پژوهش‌هایی بر روی بتن خود تراکم سبک انجام دادند. آنها ابتدا با سعی و خطا طرح اختلاط‌های مختلفی از بتن سبک خودمتراکم شونده با استفاده از سنگ‌دانه سبک لیکا ساختند. آنها آزمایش‌های استاندارد بتن خودمتراکم شونده در فاز بتن تازه از قبیل آزمایش‌های جریان اسلامپ، جعبه U، قیف V و در فاز بتن سخت شده برای بررسی خصوصیات مکانیکی بتن سبک خودمتراکم شونده از جمله مقاومت فشاری و کششی، مدول الاستیسیته و چگالی که میزان آن‌ها در طراحی سازه‌ها الزامی است،

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

• ابعاد نمونه‌های آزمایشگاهی و طرح اختلاط آنها

در این پژوهش ۹ نمونه دال بتنی ساخته شده که شامل ۲ دال بتن معمولی، پنج دال بتن خودتراکم شونده سبک و دو دال بتن سبک می‌باشد. نام‌گذاری نمونه‌ها بر مبنای سه متغیر اصلی در دال‌ها انجام پذیرفته است. حرف R نشان‌دهنده نسبت آرماتور خمشی دال می‌باشد. R0.8، به معنای نسبت آرماتور ۰/۸٪ و R1.6 به معنای نسبت آرماتور ۱/۶٪ است. متغیر دوم نوع بتن است که عبارت N به معنای بتن معمولی، عبارت LWSCC به معنای بتن خودتراکم شونده سبک و عبارت LW به معنای بتن سبک است. متغیر سوم ضخامت دال‌ها می‌باشد که عدد ۱۰ بیانگر دال به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر و عدد ۱۵ بیانگر دال به ضخامت ۱۵ سانتی‌متر است. به‌منظور بررسی اثر افزایش مقاومت بتن در برش دوطرفه بتن خودتراکم شونده سبک، دو دال با درصد آرماتور و ضخامت یکسان و با مقاومت بتن مختلف ساخته شد که در نام‌گذاری این دال‌ها از اعداد ۱ و ۲ در انتهای نام آن‌ها استفاده شده است. مشخصات نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات دال‌های ساخته شده

Table 1. Details of slabs

نام نمونه	نوع بتن	چگالی (kg/m ³)	f _c (MPa)
R0.8-N-10	معمولی	۲۳۵۰	۴۲
R1.6-N-10	معمولی	۲۳۵۰	۴۳
R0.8-LWSCC-10	خودتراکم سبک	۱۹۲۵	۴۵
R1.6-LWSCC-10-1	خودتراکم سبک	۱۹۰۵	۳۵
R1.6-LWSCC-10-2	خودتراکم سبک	۱۹۲۳	۴۵
R0.8-LWSCC-15	خودتراکم سبک	۱۹۲۰	۴۴
R1.6-LWSCC-15	خودتراکم سبک	۱۹۲۰	۴۵
R0.8-LW-10	سبک	۱۷۲۰	۴۱/۵
R1.6-LW-10	سبک	۱۷۲۲	۴۳

نمونه‌های آزمایش شده در این تحقیق، دال‌های مربعی با ابعاد ۱۰۰۰×۱۰۰۰ میلی‌متر و به ضخامت‌های ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌متر می‌باشند. به‌منظور شبیه‌سازی اتصال دال-ستون، یک ستون مربعی با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر در وسط دال ساخته شده است (شکل ۱).

را انجام دادند. آنها نتیجه گرفتند که استفاده از لیکا به‌عنوان سنگ‌دانه در بتن همراه با مقادیر ۳۰۰ تا ۴۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب سیمان می‌توان بتن سبک خودتراکم شونده با چگالی کمتر از ۲۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب با مقاومت فشاری بالا تولید نمود که به‌عنوان بتن سازه‌ای برای سازه‌های بتنی مسلح بخصوص سازه‌هایی با تراکم میلگرد بالا و اشکال پیچیده به خوبی قابل استفاده است.

رفتار دال‌های بتن سبک توسط پژوهشگران مختلفی انجام شده است [۵-۷]. مرزوک^۱ و همکاران [۵] مشاهده کردند که رفتار دال‌های بتن سبک با مقاومت بالا در زمینه‌های مقاومت برشی و مقاومت خمشی مشابه بتن سبک با مقاومت معمولی است. در عین حال مقاومت در برش و خمش بتن سبک نسبت به بتن معمولی قدری کمتر است.

در پژوهشی دیگر که توسط مرزوک و همکاران [۶] انجام شد، پیشنهاد گردید که برای رفتار خمشی دال‌های ساخته شده از بتن سبک با مقاومت بالا ضریب کاهش ۰/۹ بجای ۰/۸۵ که در آیین‌نامه ACI پیشنهاد شده است، استفاده گردد.

عثمان^۲ و همکاران [۷] رفتار برش دو طرفه دال‌های تخت ساخته شده از بتن سبک با مقاومت بالا را مطالعه کردند. بر اساس آزمایش‌های انجام شده نتیجه‌گیری شد که ضریب کاهش مقاومت ۰/۸۵ برش دوطرفه آیین‌نامه ACI برای بتن سبک دست بالا می‌باشد. آنها ضریب ۰/۹۵ را برای بتن سبک مقاومت بالا پیشنهاد کردند.

با توجه به فقدان نتایج آزمایشگاهی برای مقاومت برش دو طرفه بتن سبک خود تراکم شونده، ضروری به نظر می‌رسد که ظرفیت برش دوطرفه دال‌های بتن خودتراکم شونده سبک و بتن سبک مورد ارزیابی قرار گیرد. در این پژوهش ۹ نمونه دال مربعی ساخته شد که در آن‌ها از سبکدانه لیکا برای کاهش وزن بتن استفاده گردید. پارامترهای متغیر در این دال‌ها نوع بتن، مقاومت بتن، درصد آرماتور کششی و ضخامت دال است. ابعاد و درصد آرماتور دال طوری انتخاب شده است که انهدام در آن‌ها به صورت برش دوطرفه باشد. نمونه‌های ساخته شده مورد آزمایش قرار گرفته و ظرفیت برش دوطرفه و تغییر مکان نهایی برای هر یک از آن‌ها اندازه‌گیری شده است. با توجه به داده‌های به دست آمده، در مورد شکل انهدام و نوع ترک‌ها، روابط بار- تغییر مکان و سختی هر یک از نمونه‌ها ارائه شده و در پایان نتایج آزمایش‌ها با روابط آیین‌نامه‌های ACI [۸]، ایران (مبحث ۹) [۹] و BS-8110 [۱۰] مقایسه شده است.

۲- کار آزمایشگاهی

در این قسمت به معرفی نمونه‌ها و همچنین ارائه ابعاد، طرح اختلاط نمونه‌های بتنی و به شرح جزئیات انجام آزمایش پرداخته خواهد شد.

1 Marzouk
2 Osman

• نحوه انجام آزمایش

پس از باز کردن قالب‌ها، نمونه‌های آزمایشگاهی با چتایی مرطوب و پلاستیک پوشانده شده و پس از گذشت ۲۸ روز از آغاز عمل‌آوری، آزمایش‌ها انجام شد. اعمال بار فشاری به دال‌ها با استفاده از جک فشاری موجود در آزمایشگاه بتن صورت پذیرفته است. این سیستم اعمال بار در شکل ۲ دیده می‌شود. جهت ایجاد تکیه‌گاه چهار طرف ساده برای دال از یک قاب فولادی ساخته‌شده از پروفیل IPE20 با ابعاد محور تا محور ۹۰۰×۹۰۰ میلی‌متر، استفاده گردیده است. در مرکز بال‌های وجه بالایی این قاب میلگردهای فولادی جوش داده شده است تا بصورت تکیه‌گاه غلطکی عمل کند. در این سیستم دال‌ها روی قاب قرار گرفته و نیروی فشاری از بالا و از طریق یک جک فشاری به ظرفیت ۲۰۰ تن، به دال وارد می‌آید. جهت اندازه‌گیری مقدار بار وارد شده در هر لحظه به نمونه از یک نیروسنج به ظرفیت ۵۰ تن استفاده شده است که بین جک و نمونه قرار گرفته است (شکل ۲).

جهت قرائت و ثبت خیز در طول آزمایش از یک دستگاه تغییر مکان‌سنج لیزری در زیر دال به‌گونه‌ای استفاده شده است که قادر به ثبت تغییر مکان مرکز دال در هر لحظه باشد. شکل ۳ نحوه قرارگیری دستگاه تغییر مکان‌سنج در زیر دال را نشان می‌دهد.



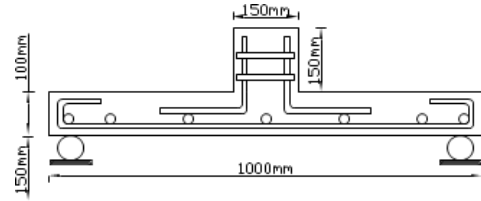
شکل ۲: دستگاه اعمال بار

Fig. 2. Test setup



شکل ۳: نحوه قرارگیری دستگاه تغییر مکان‌سنج زیر نمونه

Fig. 3. LVDT position under specimen



شکل ۱: مشخصات هندسی نمونه‌های آزمایشگاهی

Fig. 1. Properties of specimens

برای ساخت دال‌های بتن سبک از طرح شماره ۱ جدول ۲ استفاده گردید. برای ساخت دال‌های بتن خودتراکم شونده به دلیل اینکه دو رده مقاومتی برای این دال‌ها مورد نظر بود، در آن‌ها از دو طرح اختلاط متفاوت استفاده شد. در ساخت دال‌های با ضخامت ۱۵۰ میلی‌متر و دو دال به ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر که برای آن‌ها مقاومت ۴۵ MPa مورد نظر بود از طرح شماره ۲ جدول ۲ و برای یکی از دال‌های به ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر که مقاومت حدود ۳۵ MPa برای آن مورد نظر بود از طرح شماره ۳ جدول ۲ استفاده شد. مقدار سیمان و میکروسلیس استفاده شده در تمامی طرح‌ها به ترتیب برابر 450 kg/m^3 و 50 kg/m^3 می‌باشد. مقاومت فشاری نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM (C39/39m) [۱۱] و بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد 150×300 میلیمتر و چگالی نمونه‌های بتن سخت شده نیز بر اساس استاندارد ASTM (C642-13) [۱۲] اندازه‌گیری شد.

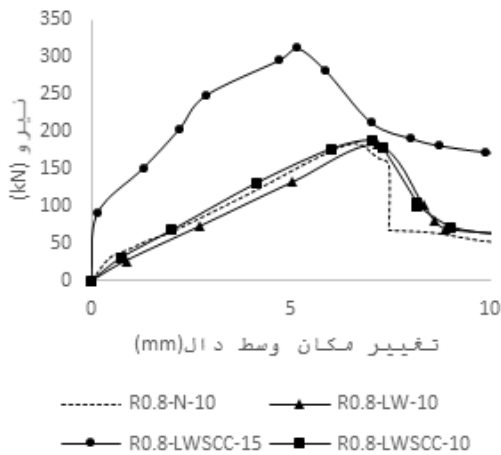
جدول ۲: طرح‌های اختلاط بتن

Table 2. Concrete mixtures

شماره طرح	فوق روان‌کننده kg/m^3	ماسه kg/m^3	لیکا kg/m^3	w/c
۱	۲/۹۲	۷۶۵	۳۰۰/۰	۰/۳۰
۲	۵/۰۰	۸۰۵	۲۹۰/۴	۰/۳۹
۳	۴/۰۰	۸۰۵	۲۹۰/۴	۰/۳۸

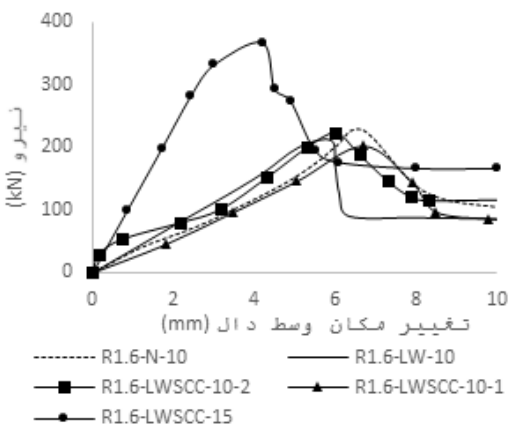
فوق روان‌کننده در طرح‌های اختلاط بتن سبک PC 386 و در طرح اختلاط بتن خودتراکم شونده، PC 5000 می‌باشد. درصد آرماتور کششی دال‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شده که انهدام در آن‌ها تحت بار ثقلی به صورت برش دوطرفه بوده و انهدام خمشی در آن‌ها اتفاق نیفتد. از این رو نسبت آرماتور مورد استفاده در دال‌ها 0.8% و 1.6% انتخاب شدند. برای تأمین این نسبت‌ها در دال‌های با ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر از ۷ آرماتور ۱۲۰ و برای نسبت 0.8% و از ۸ آرماتور ۱۶۰ برای نسبت 1.6% در هر راستا استفاده شد. در دال‌های با ضخامت ۱۵۰ میلی‌متر برای تأمین نسبت 0.8% از ۱۱ آرماتور ۱۲۰ و برای نسبت 1.6% از ۱۲ آرماتور ۱۶۰ در هر راستا استفاده شده است.

از بتن خودمتراکم شونده سبک با وزن مخصوص 1920 kg/m^3 و بدون نیاز به ویریه و یا از بتن سبک با وزن مخصوص 1720 kg/m^3 استفاده کرد. همچنین شکل‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهد که با افزایش ۵۰ درصد ضخامت دال ظرفیت برش دوطرفه بطور میانگین ۶۵ درصد افزایش و تغییر مکان نهایی ۲۶ درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۴: منحنی‌های بار-تغییر مکان برای دال‌های با نسبت آرماتور ۰/۸

Fig. 4. Load-Displacement relationships for slabs with 0.8% reinforcement ratio



شکل ۵: منحنی‌های بار-تغییر مکان برای دال‌های با نسبت آرماتور ۱/۶

Fig. 5. Load-Displacement relationships for slabs with 1.6% reinforcement ratio

• تأثیر آرماتور خمشی بر ظرفیت پانچینگ دال‌های تخت

برای مقایسه به بررسی نمودارهای بار تغییر مکان نمونه‌هایی که فقط از نظر میزان آرماتور خمشی متفاوت هستند پرداخته می‌شود. در شکل ۶ مقایسه میان نمودار بار تغییر مکان نمونه‌ها با میزان آرماتور خمشی متغیر انجام شده

پس از قرارگیری نمونه‌ها در محل مربوطه بارگذاری آن‌ها آغاز گردید. برای شبیه‌سازی بار استاتیکی سرعت بارگذاری به طور متوسط 10 kg/sec در نظر گرفته شد. میانگین زمان آزمایش برای هر یک از دال‌ها حدود ۵۰ دقیقه بود.

۳- نتایج آزمایشگاهی

در این قسمت به نتایج حاصل از آزمایش‌ها و همچنین به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر ظرفیت برش دوطرفه دال‌ها پرداخته می‌شود. جدول ۳ نتایج حاصل از شکست نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۳: نتایج حاصل از شکست نمونه‌ها
Table 3. Test results

نام نمونه	بار kN	تغییر مکان mm
R0.8-N-10	۱۸۴/۶	۶/۶
R1.6-N-10	۲۲۵/۰	۶/۷
R0.8-LWSSC-10	۱۸۹/۰	۷/۰
R1.6-LWSSC-10-1	۲۰۲/۶	۶/۷
R1.6-LWSSC-10-2	۲۲۳/۷	۶/۰
R0.8-LWSSC-15	۳۱۱/۴	۵/۲
R1.6-LWSSC-15	۳۶۸/۴	۴/۲
R0.8-LW-10	۱۸۲/۰	۷/۰
R1.6-LW-10	۲۱۰/۹	۵/۹

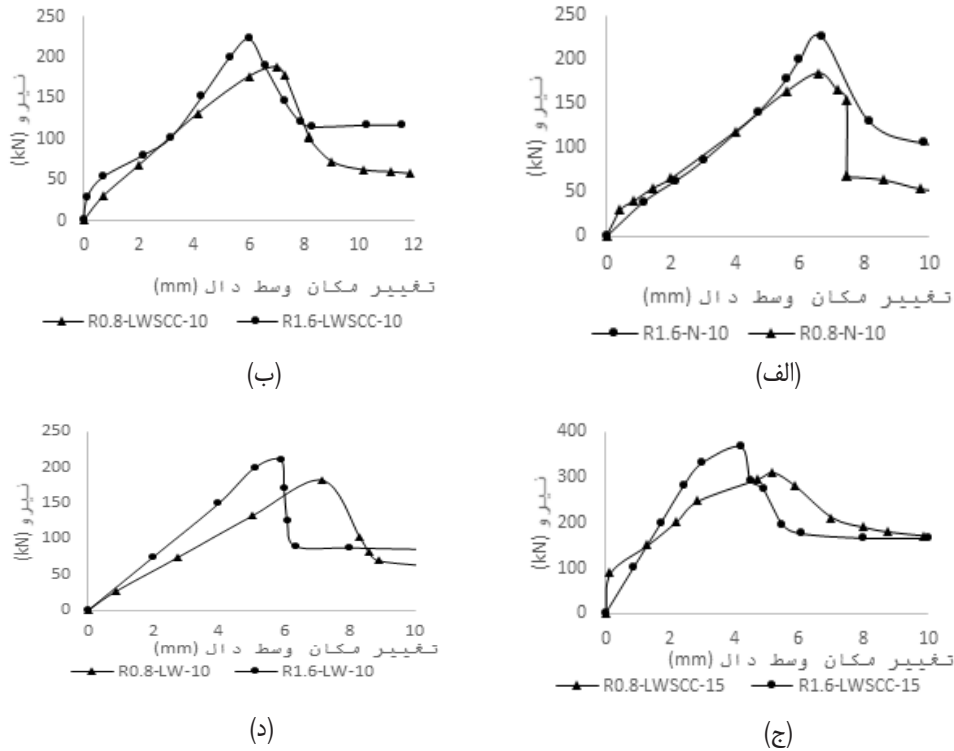
۳-۱- بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر ظرفیت برش دوطرفه دال‌ها

در این قسمت پارامترهای مختلف بر ظرفیت برش دوطرفه دال‌ها از جمله نوع بتن، مقاومت فشاری، درصد فولاد و ضخامت دال پرداخته می‌شود. به منظور مقایسه بهتر رفتار دال‌های ساخته شده از بتن خودمتراکم شونده سبک و بتن سبک با نمونه‌های ساخته شده از بتن معمولی منحنی‌های بار تغییر مکان برای نمونه‌های با نسبت فولاد ۰/۸٪ در شکل ۴ و برای نمونه‌های با نسبت فولاد ۱/۶٪ در شکل ۵ ارائه شده است.

با توجه به شکل‌های ۴ و ۵ ملاحظه می‌گردد که در دال‌های با ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر از نظر مقدار نیروی مقاوم در برابر برش دو طرفه، تغییر مکان نهایی دال، مقدار سختی، جذب انرژی و خودمتراکم شونده سبک، بتن سبک و دال‌های ساخته شده از بتن معمولی که دارای بتنی با مقاومت فشاری نزدیک به هم می‌باشند، نیست. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که به‌جای استفاده از دال ساخته شده از بتن معمولی که دارای وزن مخصوص 2350 kg/m^3 است و نیاز به ویریه دارد می‌توان با همان مشخصات سازه‌ای

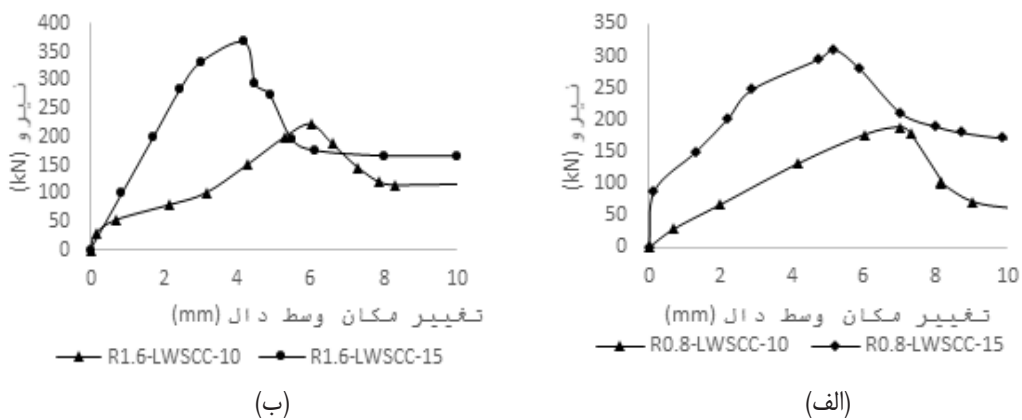
دال‌های با ضخامت ۱۵۰ میلی‌متر افزایش درصد آرماتور کششی منجر به ۱۸٪ افزایش در ظرفیت برش دوطرفه و ۱۷٪ کاهش در تغییر مکان نهایی شده است (شکل ۶-ج). در آیین‌نامه ACI اثر آرماتور خمشی در ظرفیت برش دوطرفه در نظر گرفته نشده است.

است. همان‌گونه که در شکل ۶ دیده می‌شود، افزایش آرماتور خمشی منجر به افزایش ظرفیت برش دوطرفه و سختی دال‌ها شده است. به‌طور مثال در دال‌های بتن سبک خودمترکم شونده با ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر افزایش درصد آرماتور کششی منجر به افزایش ظرفیت برش دوطرفه به میزان ۱۸٪ و کاهش تغییر مکان نهایی به مقدار ۱۴٪ شده است (شکل ۶-ب). در



شکل ۶: تأثیر آرماتور خمشی بر ظرفیت پانچینگ دال‌های تخت

Fig. 6. Effect of flexural reinforcement on punching strength of slabs



شکل ۷: تأثیر افزایش ضخامت دال بر ظرفیت برش دوطرفه دال‌های خودمترکم شونده سبک

Fig. 7. Effect of slab thickness on punching strength of self-consolidating lightweight slabs

$$V_c = (1 + 2/\beta_c) 0.2 \phi_c \sqrt{f_c} b_0 d \quad (5)$$

$$V_c = ((\alpha_s d)/b_0 + 1) 0.2 \phi_c \sqrt{f_c} b_0 \quad (6)$$

$$V_c = 2 \times 0.2 \phi_c \sqrt{f_c} b_0 d \quad (7)$$

که در آن:

$$\phi_c: 0.65$$

سایر پارامترهای روابط فوق همانند آیین‌نامه ACI محاسبه می‌شوند. مقاومت برشی نهایی دال برابر کوچک‌ترین مقدار حاصل از روابط فوق است. رابطه ارائه شده در آیین‌نامه انگلستان BS 8110 - 1997 به صورت زیر می‌باشد.

$$V_c = 0.29 (0.2/d)^{1/4} (100 \rho_f' c)^{1/3} U d / \gamma_m \quad (8)$$

که در آن:

f_c' : مقاومت فشاری بتن (مگاپاسکال)

ρ : درصد آرماتور نمونه

$$\gamma_m: 1.25$$

U : برابر محیط بحرانی است که مقدار آن به شرح زیر می‌باشد:

$$U = 4(c + 3d) \quad (9)$$

که در آن:

c : عرض ستون (متر)

d : عمق مؤثر دال (متر)

جدول ۴ نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها و مقادیر محاسباتی آیین‌نامه‌های ACI، ایران و BS را نشان می‌دهد. همچنین مقایسه نسبت مقادیر آزمایشگاهی به مقادیر محاسباتی در جدول ۵ ارائه شده است. مقایسه میانگین و انحراف معیار نسبت‌های ظرفیت برشی آزمایشگاهی به آیین‌نامه‌ای جدول ۵ نشان می‌دهد که آیین‌نامه BS با میانگین ۱/۳۱ و انحراف معیار ۰/۱۰۸ ظرفیت برش دو طرفه را بهتر از سایر آیین‌نامه‌ها محاسبه می‌کند. همچنین نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که ظرفیت برش دو طرفه دال‌های بتن سبک و بتن سبک خودمترکم شونده تفاوت قابل ملاحظه‌ای با ظرفیت برش دو طرفه بتن معمولی ندارد. شکل ۸ چگونگی شکست برش دو طرفه نمونه‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، در نمونه‌هایی که دارای نسبت آرماتور خمشی کمتری بوده‌اند (R0.8) شکست برشی عموماً همراه با گسترش ترک‌های شعاعی بیشتری بوده است. این موضوع نشان می‌دهد که شکست برشی به دنبال تغییر شکل‌های خمشی گسترده‌تری صورت گرفته است.

• تأثیر افزایش ضخامت دال بر ظرفیت برش دوطرفه دال‌های خودمترکم شونده سبک

برای نشان دادن این اثر به بررسی نمودارهای بار تغییر مکان نمونه‌هایی که فقط در ضخامت دال متفاوت هستند در شکل ۷ پرداخته شده است. در این شکل منحنی‌های بار تغییر مکان برای نمونه‌های با نسبت فولاد ۰/۸٪ و ۰/۱۶٪ درصد ترسیم شده است. با توجه به شکل ۷ با افزایش ضخامت دال تغییر مکان نهایی دال کاهش و ظرفیت برش دوطرفه افزایش می‌یابد. با ۵۰٪ افزایش در ضخامت دال در دال‌های با نسبت آرماتور ۰/۸٪، ظرفیت برش دوطرفه به میزان ۶۵٪ افزوده و تغییر مکان نهایی ۲۶٪ کاهش می‌یابد و در دال‌های با نسبت آرماتور ۰/۱۶٪ ظرفیت برش دوطرفه ۶۴٪ افزوده و تغییر مکان نهایی ۲۸٪ کاهش می‌یابد. با مقایسه تأثیر افزایش ضخامت دال نسبت به تأثیر افزایش آرماتور کششی و افزایش مقاومت فشاری نتیجه می‌شود که افزایش ضخامت دال بیشترین تأثیر را در افزایش ظرفیت برش دوطرفه دال داشته است.

• مقایسه بین روابط آیین‌نامه‌ها به منظور محاسبه ظرفیت برش دوطرفه

روابط ارائه‌شده در آیین‌نامه بتن آمریکا ACI 318-11 به شرح زیر می‌باشد.

$$V_c = 0.17 (1 + 2/\beta) \lambda \sqrt{f_c'} b_0 d \quad (1)$$

$$V_c = 0.083 ((\alpha_s d)/b_0 + 2) \lambda \sqrt{f_c'} b_0 d \quad (2)$$

$$V_c = 0.33 \lambda \sqrt{f_c'} b_0 d \quad (3)$$

که در این روابط:

f_c' : مقاومت فشاری بتن (مگاپاسکال)

β : نسبت طول به عرض ستون

α_s : برای ستون‌های داخلی، لبه و ستون‌های گوشه به ترتیب برابر ۴۰، ۳۰ و ۲۰ است.

λ : ضریب اصلاحی برای در نظر گرفتن اثرات بتن سبک که مقدار آن برای بتن معمولی ۱، بتن ماسه سبک ۰/۸۵ و بتن تماماً سبک ۰/۷۵ است.

d : عمق مؤثر دال (متر)

b_0 : برابر محیط بحرانی است که مقدار آن به شرح زیر می‌باشد.

$$b_0 = 4(c + d) \quad (4)$$

که در آن:

c : عرض ستون (متر)

d : عمق مؤثر دال (متر)

روابط ارائه‌شده در آیین‌نامه ایران (مبحث ۹) نیز به شرح زیر می‌باشد

۲ دال بتن معمولی، ۵ دال بتن خودمتراکم شونده سبک و ۲ دال بتن سبک بود با استفاده از سبکدانه لیکا ساخته شد. پارامترهای متغیر در این دال‌ها نوع بتن، مقاومت فشاری بتن، درصد آرماتور دال و ضخامت دال است. درصد آرماتور دال طوری انتخاب شده است که انهدام دال‌ها به صورت برش دوطرفه بوده و انهدام خمشی در آن‌ها روی ندهد. نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر ارائه می‌شود:

۱. در دال‌های ساخته شده از نظر ظرفیت برش دو طرفه، تغییر مکان نهایی دال، مقدار سختی و شکل‌پذیری تفاوت چندانی میان دال‌های ساخته شده از بتن خودمتراکم شونده سبک، بتن سبک و دال‌های بتن معمولی نیست. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بجای استفاده از دال ساخته شده از بتن معمولی می‌توان با همان مشخصات سازه‌ای از بتن خودمتراکم شونده سبک و بدون نیاز به ویبره و یا از بتن سبک استفاده کرد.
۲. همانند بتن‌های معمولی با افزایش مقاومت فشاری بتن در دال‌های بتن خودمتراکم شونده سبک نیز ظرفیت برش دوطرفه افزایش و تغییر مکان نهایی دال کاهش می‌یابد.
۳. در دال‌های بتن خودمتراکم شونده سبک و بتن سبک نیز همانند بتن معمولی با افزایش نسبت آرماتور خمشی ظرفیت برش دوطرفه افزایش و تغییر مکان نهایی کاهش می‌یابد.
۴. در نمونه‌های آزمایشگاهی این پژوهش با ۵۰٪ افزایش در ضخامت دال به طور میانگین ظرفیت برش دوطرفه به میزان ۶۵٪ افزوده شده و تغییر مکان نهایی ۲۶٪ کاهش یافت.
۵. آیین‌نامه‌های ACI و ایران در محاسبه ظرفیت برش دوطرفه دارای محافظه‌کاری و پراکندگی زیادتری نسبت به آیین‌نامه BS-8110 میباشند. آیین‌نامه ایران با انحراف معیار ۰/۱۸۸ و آیین‌نامه BS با انحراف معیار ۰/۱۰۸ دارای بیشترین و کمترین انحراف معیار بودند.

۵- فهرست علائم

- b_0 محیط بحرانی، m
 c عرض دال مربعی، m
 d عمق مؤثر دال، m
 f'_c مقاومت فشاری بتن، MPa
 U محیط بحرانی
 α_s ضریب بر اساس موقعیت ستون
 β نسبت طول به عرض ستون
 ϕ_c ضریب کاهش مقاومت
 γ_m ضریب کاهش مقاومت
 λ ضریب اصلاحی بر اساس نوع بتن
 ρ درصد آرماتور نمونه

جدول ۴: نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها و آیین‌نامه‌های ACI، ایران و BS

Table 4. Tests results and calculated values by ACI, ABA and BS Codes

نمونه	V _{test} (KN)	V _{ACI} (KN)	V _{IRAN} (KN)	V _{BS} (KN)
R0.8-N-10	۱۸۴/۶	۱۵۷/۲	۱۲۳/۹	۱۳۰/۱
R1.6-N-10	۲۲۵/۰	۱۵۹/۳	۱۲۵/۴	۱۶۵/۲
R0.8-LWSCC-10	۱۸۹/۰	۱۳۹/۰	۱۲۸/۸	۱۳۳/۴
R1.6-LWSCC-10-1	۲۰۲/۶	۱۲۲/۱	۱۱۳/۲	۱۵۴/۲
R1.6-LWSCC-10-2	۲۲۳/۷	۱۳۸/۵	۱۲۸/۴	۱۶۷/۷
R0.8-LWSCC-15	۳۱۱/۴	۲۷۰/۹	۲۵۱/۱	۲۶۳/۴
R1.6-LWSCC-15	۳۶۸/۴	۲۷۴/۰	۲۵۴/۰	۳۳۴/۳
R0.8-LW-10	۱۸۲/۰	۱۳۳/۰	۱۲۳/۳	۱۲۹/۶
R1.6-LW-10	۲۱۰/۹	۱۳۵/۴	۱۲۵/۴	۱۶۵/۲

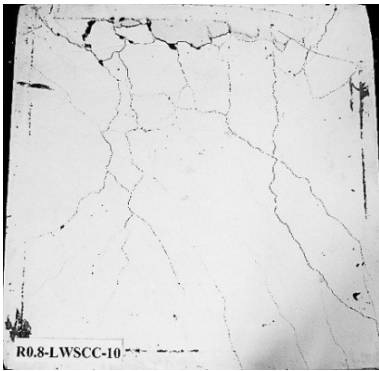
جدول ۵: مقایسه نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها و آیین‌نامه‌های ACI، ایران و BS

Table 5. Comparison between test results and calculated values by ACI, ABA and BS Codes

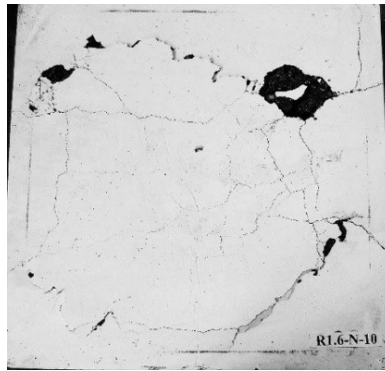
عنوان	V_{test}/V_{ACI}	V_{test}/V_{IRAN}	V_{test}/V_{BS}
R0.8-N-10	۱/۱۷	۱/۴۹	۱/۴۱
R1.6-N-10	۱/۴۱	۱/۷۹	۱/۳۶
R0.8-LWSCC-10	۱/۳۶	۱/۴۷	۱/۴۱
R1.6-LWSCC-10-1	۱/۶۶	۱/۷۸	۱/۳۱
R1.6-LWSCC-10-2	۱/۶۲	۱/۷۴	۱/۳۳
R0.8-LWSCC-15	۱/۱۵	۱/۲۴	۱/۱۸
R1.6-LWSCC-15	۱/۳۴	۱/۴۵	۱/۱۰
R0.8-LW-10	۱/۳۷	۱/۴۷	۱/۴۰
R1.6-LW-10	۱/۵۶	۱/۶۸	۱/۲۷
میانگین ضرایب مقاومت	۱/۴۰	۱/۵۷	۱/۳۱
انحراف معیار	۰/۱۸۱	۰/۱۸۸	۰/۱۰۸

۴- نتیجه‌گیری

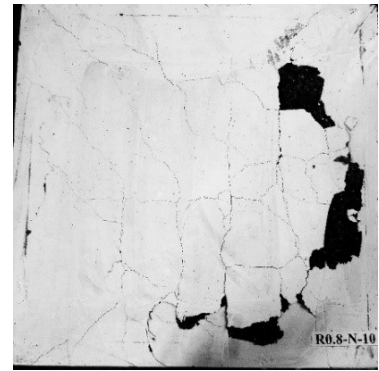
در این پژوهش مقاومت برش دوطرفه دال‌های بتن خودمتراکم شونده سبک و بتن سبک مطالعه شده است. بدین منظور ۹ نمونه دال که شامل



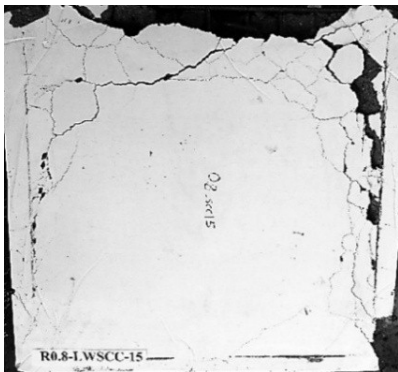
R0.8-LWSCC-10



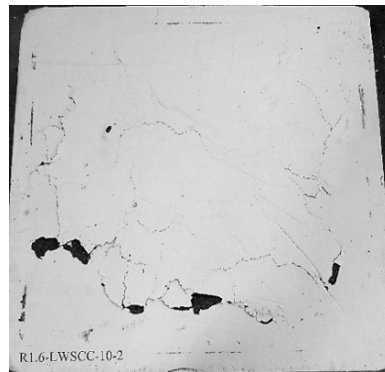
R1.6-N-10



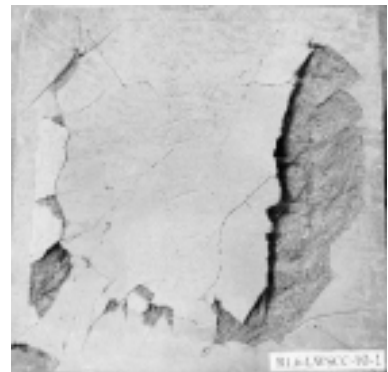
R0.8-N-10



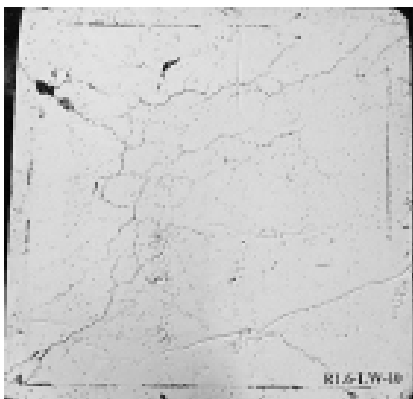
R0.8-LWSCC-15



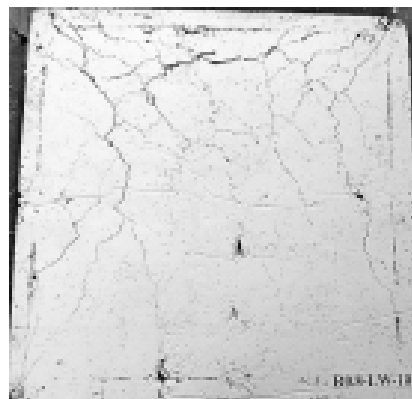
R1.6-LWSCC-10-2



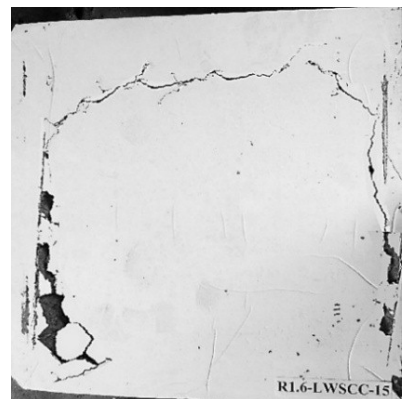
R1.6-LWSCC-10-1



R1.6-LW-10



R0.8-LW-10



R1.6-LWSCC-15

شکل ۸: چگونگی شکست نمونه‌ها

Fig. 8. Failure of specimens

مراجع

- Performance Lightweight Aggregate Concrete, in: 2nd International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Norwegian Concrete Association, Kristiansand, 2000, pp. 705-716.
- [3] M. Hubertova, R. Hela, The Effect of Metakaolin and Silica Fume on the Properties of Lightweight Self Consolidating Concrete, in: V. M. Malhotra Ed. 9th

- [1] E. Yasar, C.D. Atis, A. Kilic, H. Gulsen, Strength Properties of lightweight concrete made with basaltic pumice and fly-ash, *Materials Letters*, 57(15) (2003) 2267-2270.
- [2] S. Yanai, N. Sakata, Y. Npbuta, T. Okamoto, Study on Mix Proportion For Self Compacting High

- [7] M. Osman, H. Marzouk, Behavior of High Strength Lightweight Concrete Slabs under Punching Loads, *ACI Structural Journal*, 97(3) (2000) 492-498.
- [8] Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-11) and Commentary, ACI Committee 318, American Concrete Institute, 2011.
- [9] Design and Construction of Steel Structures, Ministry of Road and Urbanization, 1392. (In Persian)
- [10] B.S. Institution, Structural Use of Concrete, Standard BS-8110, 1997.
- [11] ASTM C39 / C39M-16b, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, in, ASTM International, West Conshohocken, 2016.
- [12] ASTM C642-13, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, in: ASTM International, West Conshohocken, 2013.
- Canmet/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, American Concrete Institute, 2007, pp. 35-48.
- [4] A. Rahayi, M.R. Nejati, A.H. Karamoziyan, A. Shabestanipour, Investigation of mixture and properties of self consolidating concrete, in: First national self consolidating concrete conference, University of Tehran , 1390. (In Persian)
- [5] H. Marzouk, M. Osman, S. Helmy, Behavior of High Strength Lightweight Aggregate Concrete Slabs under Column Load and Unbalanced Moment, *ACI Structural Journal*, 97(6) (2000) 860-866.
- [6] H. Marzouk, M. Osman, A. Hussein, Cyclic Loading of High Strength Lightweight Concrete Slabs, *ACI Structural Journal*, 98(2) (2001) 207-214.

Please cite this article using:

A. Mohandesi, M. R. Esfahani, A. M. Khajemahmoudabadi, Punching Shear Strength of Lightweight Self-Consolidating Flat Slabs, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(3) (2018) 461-470.

DOI: 10.22060/ceej.2017.12226.5153



