

مطالعه اثر دوده سیلیسی بر روی چقرمگی و انرژی شکست بتن خود تراکم سبک

حسن صالحی^۱، موسی مظلوم^{۲*}

^۱ استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء (ع)، تهران

^۲ استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۶، بازنگری: ۱۴۰۰/۷/۱۹، پذیرش: ۱۴۰۰/۷/۲۴، نشر آنلاین: ۱۴۰۰/۷/۲۴

چکیده

این مطالعه به بررسی چقرمگی و انرژی شکست بتن خود تراکم سبک می‌پردازد. بدین منظور چهار طرح مخلوط با نسبت آب به سیمان‌های ۰/۳۷ تا ۰/۵۲ ساخته شد. همچنین برای بررسی تأثیر استفاده از دوده سیلیسی بر خواص شکست بتن خود تراکم سبک، نسبت جایگزینی سیمان با دوده سیلیسی برابر صفر، ۵ و ۱۰ درصد در نظر گرفته شد. برای تعیین پارامترهای شکست بتن از روش اثر اندازه استفاده شد. در این روش برای هر طرح مخلوط، آزمایش خمش سه نقطه‌ای بر روی ۱۲ نمونه تیر شکافدار انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در بتن خود تراکم سبک، با کاهش نسبت آب به سیمان از ۰/۵۲ به ۰/۳۷، انرژی شکست (G_f) حدود ۲/۷ برابر شد و چقرمگی شکست (K_{IC}) حدود ۸۸٪ افزایش یافت. همچنین در این حالت مقاومت‌های فشاری، کششی و مدول الاستیسیته (Modulus of Elasticity) بتن به ترتیب حدود ۶۸٪، ۵۷٪ و ۲۸٪ بهبود یافتند. از سوی دیگر، افزودن دوده سیلیسی به بتن خود تراکم سبک سبب کاهش کارایی آن شد؛ برای حفظ این کارایی، نیاز به استفاده از فوق روان‌کننده افزایش یافت. زمانی که نسبت جایگزینی وزن سیمان با دوده سیلیسی از صفر به ۵ و ۱۰ درصد افزایش داده شد، انرژی شکست به ترتیب ۱۹/۴٪ و ۲۴/۲٪ و چقرمگی آن ۱۴٪ و ۱۸/۳٪ بهبود یافت. در این حالت، بهبود کیفیت مشابهی برای کلیه خواص مکانیکی بتن خود تراکم سبک رخ داد. از طرفی با افزایش نسبت جایگزینی دوده سیلیسی در ساخت بتن، مشاهده شد که پیوند میان سنگ‌دانه‌ها و خمیر بتن بهبود یافته و در تیرها سطح شکسته شده بتن بسیار نرم‌تر و صاف‌تر گردید.

کلیدواژه‌ها: بتن خود تراکم سبک، دوده سیلیسی، ویژگی‌های مکانیکی، انرژی شکست، چقرمگی شکست.

۱- مقدمه

تازه و سخت شده مانند کارایی، دوام و مقاومت آن را بهبود بخشد. پژوهش‌های متعددی تأثیر مواد جایگزین سیمان بر خواص مکانیکی بتن را مورد بررسی قرار داده‌اند.

Sabet و همکاران (۲۰۱۳) گزارش نمودند که در بتن خود تراکم، با جایگزینی ۱۰٪ و ۲۰٪ از وزن سیمان با دوده سیلیسی، مقاومت فشاری آن به ترتیب حدود ۲۲٪ و ۲۸٪ افزایش یافته و جذب آب آن حدود ۳۹٪ و ۴۳٪ کاهش می‌یابد. در همین راستا، Mazloom و همکاران (۲۰۰۴) اثر استفاده از دوده سیلیسی بر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن پرمقاومت را بررسی نمودند. آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش نسبت جایگزینی دوده سیلیسی، کارایی بتن کاهش می‌یابد. همچنین مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن حاوی ۱۵٪ دوده سیلیسی به ترتیب حدود ۲۱٪ و ۱۱٪ بیش از بتن شاهد به دست آمد.

Lam و همکاران (۱۹۹۸) بیان کردند که استفاده از خاکستر بادی در مخلوط‌های بتنی، باعث کاهش مقاومت کششی و افزایش

در سال‌های اخیر استفاده از بتن خود تراکم سبک و مطالعه بر روی آن به‌طور گسترده‌ای افزایش یافته است. این بتن می‌تواند به راحتی تحت اثر وزن خود به قسمت‌های عمیق و باریک قالب و در بخش‌های که دارای آرماتورهای فشرده هستند، جریان یابد و بدون جداشدگی، آب انداختگی یا انسداد، قالب را پر نماید. علاوه بر خواص فوق، این نوع بتن نسبت به بتن‌های معمولی و خود تراکم دارای وزن کم‌تری است (Salehi و Mazloom, ۲۰۱۸).

به دلیل ویژگی‌های خاص بتن خود تراکم، حجم خمیر مورد نیاز در آن به مراتب بیش از بتن معمولی است. بدین ترتیب برای ایجاد انسجام و همگنی لازم در این نوع بتن، مقدار سیمان بیشتری مصرف می‌شود که این موضوع یکی از معایب آن است. استفاده از برخی مواد افزودنی معدنی مانند سرباره، خاکستر بادی، پوزولان‌های طبیعی و پودر سنگ‌آهک در تولید بتن خود تراکم سبک، می‌تواند هم هزینه را کاهش دهد و هم برخی از خواص بتن

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۲۱-۲۲۹۷۰۰۲۱

نسبت آب به سیمان، اندازه سنگدانه‌ها، حجم پودر سنگ، افزایش سن بتن و نیز استفاده از افزودنی‌های مختلف مورد بررسی قرار داده‌اند. در این راستا، Petersson (۱۹۸۰) نشان داد که نسبت آب به سیمان بر پارامترهای شکست بتن بسیار تأثیرگذار است. به‌طوری‌که با کاهش نسبت آب به سیمان یا استفاده از سنگدانه‌های قوی‌تر در طرح مخلوط بتن معمولی، مقدار انرژی شکست آن افزایش می‌یابد.

Beygi و همکاران (۲۰۱۳) با مطالعه بر بتن خود تراکم و Jenq و Shah (۱۹۸۵) نیز با مطالعه بر بتن معمولی، بر تأثیرگذاری نسبت آب به سیمان بر مقاومت و پارامترهای شکست این نوع بتن‌ها تأکید نمودند. این در حالی است که برخی مطالعات بیان نموده‌اند که هیچ‌گونه ارتباطی بین چقرمگی بتن معمولی و نسبت آب به سیمان وجود ندارد و این وابستگی فقط در نمونه‌های خمیر سیمان رؤیت می‌شود (Naus و همکاران، ۱۹۷۴).

معمولاً در بتن خود تراکم از مقدار پودر معدنی بیشتری نسبت به بتن معمولی استفاده می‌شود. براین اساس مطالعات انجام‌شده بر این نوع بتن نشان داده است که در نسبت آب به سیمان ثابت، استفاده از پودر سنگ بیشتر می‌تواند سبب بهبود خواص مکانیکی و نیز مقاومت بتن در مقابل گسترش ترک شود (Nikbin و همکاران، ۲۰۱۴). استفاده از سنگدانه سبک در تولید بتن خود تراکم، سبب کاهش شکل‌پذیری بتن شده و آن را تبدیل به ماده‌ای شکننده‌تر می‌کند. این رفتار سبب کاهش چقرمگی و ظرفیت کرنشی بتن می‌شود. در چنین حالتی استفاده از خاکستر بادی و پودر سنگ می‌تواند تا حد زیادی ریز ساختار و مقاومت بتن را بهبود ببخشد (Khan و همکاران، ۲۰۱۹).

Bharatkumar و همکاران (۲۰۰۵) دریافتند که انرژی شکست بتن‌های فوق‌توانمند با افزودن خاکستر بادی و سرباره کاهش می‌یابد. همچنین به این نتیجه رسیدند که بین مقاومت فشاری و خصوصیات شکست بتن رابطه مستقیمی وجود دارد، به‌گونه‌ای که با افزایش مقاومت فشاری، انرژی شکست و چقرمگی شکست نیز افزایش می‌یابند. Karamloo و همکاران (۲۰۲۰) تأثیر افزودن الیاف ماکروپلی‌الفین^۱ به بتن خود تراکم سبک را بر پارامترهای شکست و خواص مکانیکی آن مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش این الیاف از صفر به ۰/۵ درصد حجم بتن، مقاومت کششی حدود ۱۶٪ افزایش می‌یابد، درحالی‌که این عامل تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن ندارد. همچنین با افزودن همان حجم الیاف به بتن، انرژی شکست آن حدود ۳۳٪ افزایش می‌یابد.

بررسی مطالعات انجام‌گرفته نشان می‌دهد که در خصوص تأثیر نسبت‌های مختلف آب به سیمان و دوده سیلیسی بر بتن‌های

مقدار بازشدگی نوک ترک نمونه‌ها می‌شود. همچنین مشاهده شد که به‌کارگیری دوده سیلیسی در بتن‌های معمولی سبب بهبود پیوند بین سنگدانه و خمیر می‌شود و تأثیر مثبتی بر چقرمگی شکست، مقاومت فشاری و مقاومت کششی آن دارد.

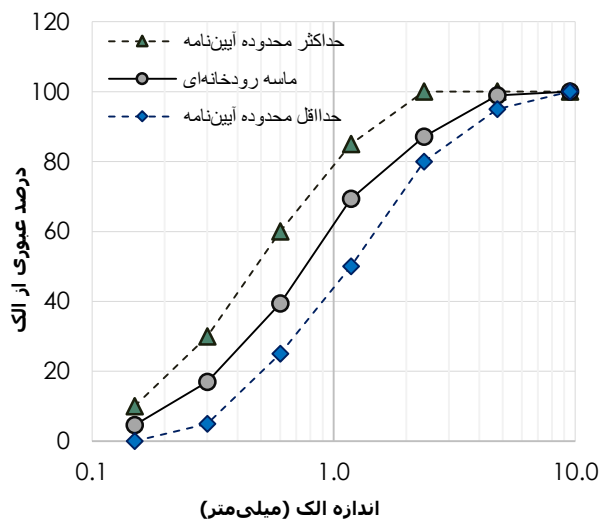
در صورتی‌که نسبت جایگزینی دوده سیلیسی کم‌تر از ۲۰٪ وزن سیمان باشد، غالباً تأثیر مثبتی بر خواص بتن سخت شده خواهد داشت. برخی مطالعات نیز مقدار جایگزینی ۱۵٪ را برای این ماده بهینه دانسته‌اند. این در حالی است که برخی از پژوهش‌ها از تأثیر منفی استفاده از دوده سیلیسی بر مقاومت فشاری و مقاومت خمشی بتن خود تراکم یاد می‌کنند (Agwa و همکاران، ۲۰۲۰).

Jalal و همکاران (۲۰۱۲) ثابت نمودند که استفاده از دوده سیلیسی در بتن خود تراکم می‌تواند مقاومت الکتریکی و خصوصیت‌های مکانیکی آن را بهبود بخشد و جذب آب بتن را کاهش دهد. همچنین آن‌ها مشاهده نمودند که افزودن نانوسیلیس، باعث کاهش قدرت نفوذ یون‌های کلراید به عمق نمونه‌ها شده و احتمال جداسازی و آب‌انداختگی بتن تازه را کاهش می‌دهد. استفاده از دوده سیلیسی در بتن خود تراکم، علاوه بر بهبود خواص مکانیکی، می‌تواند مقاومت در برابر نفوذ مواد اسیدی، قلیایی و کلر را نیز افزایش دهد (Mohammadi و همکاران، ۲۰۱۵). برخی محققان نیز برای بهبود مقاومت بتن خود تراکم سبک از مصالح دیگری همچون خاکستر کاه برنج و خاکستر ساقه پنبه به‌عنوان جایگزین سیمان استفاده نمودند. آن‌ها دریافتند که جایگزینی این مواد کارایی بتن را کاهش می‌دهد و در مقابل در صورت استفاده از مقدار جایگزینی بهینه، مقاومت بتن افزایش می‌یابد (Agwa و همکاران، ۲۰۲۰).

وقوع ترک و گسترش آن در سازه‌های بتنی یکی از عمده‌ترین نقص‌های این نوع سازه‌ها محسوب می‌شود. تحلیل ترک دارای پیچیدگی‌های بسیاری است که کنترل آن می‌تواند خرابی‌های ناشی از شکست را تا حد زیادی کاهش دهد (Beygi و همکاران، ۲۰۱۳). برای شبیه‌سازی رفتار شکست بتن در مدل‌های عددی ترک‌خوردگی، برخی از پارامترها از قبیل انرژی شکست، چقرمگی شکست و بازشدگی بحرانی نوک ترک که در مجموع پارامترهای شکست نامیده می‌شوند، می‌بایست تعیین شوند (Salehi و Mazloom، ۲۰۱۸).

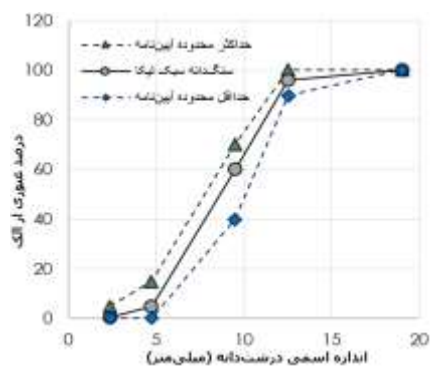
پارامترهای شکست یک ماده برای معرفی نحوه شروع و رشد ترک در آن استفاده می‌شوند. به‌واسطه بروز ترک در بتن، ظرفیت باربری و سختی سازه کاهش می‌یابد. این امر سبب خرابی بسیاری از سازه‌های بتنی شده است. بنابراین محققان متعددی بهبود مقاومت بتن در مقابل ترک را با استفاده از عواملی از قبیل تغییرات

میلی‌متر در نظر گرفته شد و منحنی دانه‌بندی آن براساس استاندارد ASTM C33 (۲۰۰۳) در نمودار شکل (۱) ارائه شده است.



شکل ۱- محدوده دانه‌بندی مجاز و موجود ماسه رودخانه‌ای

همچنین در این مطالعه سنگ‌دانه سبک رسی (لیکا^۳) با وزن مخصوص خشک ۰/۵۸۳ و چگالی توده‌ای ۰/۳۹۱ گرم بر سانتی‌مترمکعب به‌عنوان درشت‌دانه مورد استفاده قرار گرفت. معمولاً میزان تخلخل در سبک‌دانه‌های بزرگ‌تر بیشتر است و به‌این‌ترتیب مقدار جذب آب آن‌ها نیز بیشتر است. جذب آب سنگ‌دانه‌های سبک مورد استفاده در این مطالعه بر اساس استاندارد ASTM C127 (۱۹۹۳) برابر ۱۴٪ تعیین شد. به‌دلیل جذب آب زیاد دانه‌های لیکا، آن‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آب غوطه‌ور شدند. سپس با خروج آن‌ها از آب و طی مراحل، سنگ‌دانه اشباع با سطح خشک به دست آمد که از آن در طرح مخلوط بتن استفاده شد. منحنی دانه‌بندی مصرفی درشت‌دانه‌ها در نمودار شکل (۲) نشان داده شده است (ASTM C330، ۲۰۱۷).



شکل ۲- محدوده دانه‌بندی مجاز و موجود سنگ‌دانه سبک با اندازه اسمی ۱۲/۵ میلی‌متر

معمولی و خود تراکم مطالعات متعددی صورت گرفته است. در بتن خود تراکم سبک استفاده از سنگ‌دانه سبک با مقاومت کم‌تر به‌جای سنگ‌دانه‌های معمولی می‌تواند سبب ایجاد اختلاف در رفتار شکست این نوع بتن در مقایسه با بتن‌های معمولی و خود تراکم شود. همچنین استفاده از فوق روان‌کننده و مقدار زیادی پودرهای معدنی، سبب افزایش حفرات و تغییر الگوی بروز ترک در این نوع بتن می‌شود. بدین ترتیب استفاده از روابطی که برای پیش‌بینی پارامترهای شکست و خواص مکانیکی بتن‌های دیگر ذکر شده است، قابل استفاده برای این نوع بتن نیست. بنابراین بررسی پارامترهای شکست و رفتار این نوع بتن‌ها در مقابل شکست بسیار مهم است. از طرف دیگر در بحث تأثیر نسبت آب به سیمان و استفاده از دوده سیلیسی، تحقیقات صورت گرفته بر بتن خود تراکم سبک بسیار محدود بوده و بیشتر بر خواص مکانیکی بتن تأکید دارند.

در این راستا، هدف اصلی این مطالعه بررسی تأثیر نسبت آب به سیمان بر پارامترهای شکست بتن خود تراکم سبک است. همچنین تأثیر افزودن دوده سیلیسی به این نوع بتن بر مقاومت آن در برابر انتشار ترک مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. از طرف دیگر با توجه به این‌که مراحل انجام کار و تجهیزات مورد استفاده هم‌مورد استفاده برای تعیین پارامترهای شکست بتن، نسبت به مقاومت فشاری آن بسیار پیچیده است، بنابراین روابطی برای تعیین پارامترهای شکست بتن خود تراکم سبک براساس مقاومت فشاری آن ارائه می‌شود. بدین ترتیب، با ساخت شش طرح مخلوط و ۱۲۶ نمونه بتنی، پارامترهای شکست، خصوصیت‌های مکانیکی و کارایی بتن تازه به‌دقت مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا چهار طرح با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۳۷، ۰/۴۲، ۰/۴۷ و ۰/۵۲ ساخته شد. پس از تعیین نسبت مناسب آب به سیمان، با جایگزینی نسبت‌های صفر، ۵ و ۱۰ درصد از وزن سیمان با دوده سیلیسی، تأثیر تغییرات این پارامتر نیز مورد مطالعه قرار گرفت. در این مطالعه ارزیابی خصوصیت‌های بتن تازه با استفاده از آزمایش‌های جریان اسلامپ^۴، حلقه I و جعبه U انجام شده است. در مورد بتن سخت شده نیز مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بتن مورد بررسی قرار گرفت. سپس با انجام آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای بر روی ۷۲ نمونه تیر، انرژی شکست (G_f) و چقرمگی شکست (K_{IC}) تعیین شد.

۲- خصوصیات مصالح

در این مطالعه از ماسه طبیعی رودخانه‌ای با وزن مخصوص ۲/۶۶ گرم بر سانتی‌مترمکعب به‌عنوان ریزدانه استفاده شد. جذب آب ماسه برابر ۱/۲ درصد بود که در طرح مخلوط مورد توجه قرار گرفت. حداکثر اندازه مورد استفاده برای ریزدانه‌ها برابر ۴/۷۵

باشد. بنابراین مطابق آیین‌نامه، بر روی بتن تازه لایه‌ای از خمیر سیمان با ضخامت کم‌تر از ۳ میلی‌متر قرار داده شد. نرخ مجاز بارگذاری این آزمایش در محدوده ۰/۲ تا ۱ مگاپاسکال بر ثانیه است که در این مطالعه این نرخ به‌صورت ثابت برابر ۰/۳ مگاپاسکال بر ثانیه در نظر گرفته شد (BSI-12390، ۲۰۰۱). برای آزمایش تعیین مقاومت‌های فشاری، کششی و مدول الاستیسیته بتن، مطابق شکل (۳) از دستگاه ADR ساخت کشور انگلستان استفاده شد. آزمایش مقاومت کششی مطابق استاندارد ASTM-C496 (۲۰۰۲) بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵ و به ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر انجام پذیرفت. در این روش باید بار به‌طور پیوسته و بدون اعمال ضربه با نرخ ثابت ۰/۷ تا ۱/۴ مگاپاسکال بر دقیقه به نمونه وارد شود. بدین منظور، نمونه استوانه‌ای به‌صورت افقی در داخل دستگاه جک بتن‌شکن قرار داده شد و بارگذاری با نرخ ثابت ۱/۲ مگاپاسکال بر دقیقه (۰/۰۲ مگاپاسکال بر ثانیه) تا خراب شدن نمونه ادامه یافت. حداکثر نیروی فشاری (P) اعمال‌شده توسط دستگاه دست آمد. سپس با استفاده از رابطه زیر مقدار مقاومت کششی بتن محاسبه شد:

$$f_t = \frac{2P}{\pi LD} \quad (1)$$

که در آن L و D به‌ترتیب طول و قطر نمونه استوانه‌ای هستند. برای تعیین مدول الاستیسیته از دستگاه مدل CO-280 شرکت آزمون‌ساز مبنا استفاده شد. این آزمون بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵ و به ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر و مطابق استاندارد ASTM-C469 (۲۰۰۲) انجام گرفت. برای انجام این آزمایش از جک فشاری هیدرولیکی استفاده شد و نرخ افزایش فشار وارده بر نمونه معادل ۲۵۰ کیلوپاسکال بر ثانیه در نظر گرفته شد. اساس انجام این آزمایش، تعیین نسبت تنش به کرنش بتن سخت شده یا همان مدول الاستیسیته است. در این آزمایش، مقدار بار وارده و تغییر طول نسبی به‌ترتیب در حالتی که تغییر طول نسبی ۰/۰۰۰۰۵ و بار وارده معادل ۴۰ درصد بار نهایی است محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از رابطه (۲) مدول الاستیسیته بتن با دقت یک‌هزارم کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع تعیین می‌گردد:

$$E = (S_2 - S_1) / (E_2 - 0.00005) \quad (2)$$

که در آن E مدول الاستیسیته بتن، S_2 تنش متناظر با ۴۰ درصد بار نهایی وارده، S_1 تنش وارده به ازای تغییر طول نسبی ۰/۰۰۰۰۵ برحسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و E_2 تغییر طول نسبی به‌ازای تنش S_2 است.

در این مطالعه حداکثر اندازه اسمی مورد استفاده برای آن‌ها برابر ۱۲/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. سیمان پرتلند نوع ۱-۴۲۵ و دوده سیلیسی به‌عنوان مصالح سیمانی مورد استفاده قرار گرفتند. ذرات بسیار ریز دوده سیلیسی دارای خاصیت پوزولانی هستند. در این مطالعه اندازه آن‌ها در محدوده ۰/۱۵ تا ۰/۶ میکرومتر قرار داشت. شش طرح مخلوط مورد استفاده در این مطالعه در جدول (۱) نمایش داده شده‌اند. برای حصول کارایی و لزجت مناسب بتن تازه، از پودر سنگ با وزن مخصوص ۲/۶۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب و افزودنی فوق روان‌کننده برپایه پلی‌کربوکسیلات^۴ در تولید بتن استفاده شد. براساس ASTM C494 (۲۰۰۱) این نوع روان‌کننده از نوع G است. همچنین برای آن‌که میزان کارایی بتن خود تراکم سبک ساخته‌شده در محدوده مجاز آیین‌نامه‌ای قرار بگیرد، متناسب با نیاز، میزان استفاده از فوق روان‌کننده متفاوت انتخاب شد.

جدول ۱- طرح مخلوط‌های بتن خود تراکم سبک

نام طرح	وزن (kg/m ³)					
	C37	C42	C47	C52	C37SF5	C37SF10
سیمان	۳۹۵	۳۶۰	۳۲۵	۳۱۵	۳۷۵/۲	۳۵۵/۵
دوده سیلیسی	-	-	-	-	۱۹/۸	۳۹/۵
آب	۱۴۶/۲	۱۵۱/۲	۱۵۷/۴	۱۶۳/۸	۱۴۶/۲	۱۴۶/۲
ماسه	۷۸۰	۷۸۰	۷۸۰	۷۸۰	۷۸۰	۷۸۰
سنگ‌دانه لیکا	۲۳۰	۲۳۰	۲۳۰	۲۳۰	۲۳۰	۲۳۰
پودر سنگ	۲۱۰	۲۱۰	۲۱۰	۲۱۰	۲۱۰	۲۱۰
روان‌کننده	۶/۷	۴/۸	۳/۷	۲/۸	۷/۱	۸
نسبت آب به مواد سیمانی	۰/۳۷	۰/۴۲	۰/۴۷	۰/۵۲	۰/۳۷	۰/۳۷
نسبت وزنی آب به پودر	۰/۲۴	۰/۲۷	۰/۲۹	۰/۳۱	۰/۲۴	۰/۲۴

همان‌طور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود، برای آن‌که مقایسه طرح‌ها به‌درستی امکان‌پذیر شود، بیشتر خصوصیت‌های طرح‌های مخلوط از قبیل ریزدانه، درشت‌دانه و پودر سنگ ثابت در نظر گرفته شدند. برای دست‌یابی به یکنواختی مناسب، تمام طرح‌ها به مدت شش دقیقه در درون مخلوط‌کن، مورد اختلاط قرار گرفتند. بر روی هر یک از طرح مخلوط‌ها، آزمایش‌های مختلفی به‌منظور تعیین مقاومت‌های فشاری، کششی، مدول الاستیسیته و پارامترهای شکست انجام شد.

آزمایش مقاومت فشاری براساس استاندارد BS-EN-12390 (۲۰۰۱) روی نمونه‌های مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ cm³ انجام گرفت. برای انجام آزمایش مقاومت فشاری، سطوح بالا و پایین نمونه باید کاملاً صاف و یکنواخت و دارای تغییرات کم‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر

(۱۹۸۷) صورت گرفته است. مراحل انجام آزمایش و نحوه تعیین پارامترهای شکست، در دستورالعمل RILEM FMT-89 (۱۹۹۰) به عنوان یک روش مبنا درج شده است. برای تعیین پارامترهای شکست با استفاده از روش اثر اندازه، آزمایش خمش سه نقطه‌ای بر روی تیرهای شکافدار انجام می‌شود. در هنگام ساخت نمونه‌های شکست، شیارهایی به ضخامت ۳ میلی‌متر در وسط تیرها قرار داده شد. تمام نمونه‌ها بعد از یک روز از قالب بیرون آورده شدند و در آب آهک اشباع با دمای حدود ۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۷ روز نگهداری شدند. در این آزمایش، نرخ بارگذاری به گونه‌ای بود که حداکثر بار وارد بر تیرها در حدود ۵ دقیقه اعمال شد (RILEM_FMT-89، ۱۹۹۰).

در هر یک از طرح مخلوط‌ها، از تیرهای متشابه با چهار بعد مختلف استفاده شد. در این مطالعه بزرگ‌ترین اندازه سنگ‌دانه (لیکا) برابر ۱۲/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد و متناسب با آن بر اساس دستورالعمل RILEM FMT-89 (۱۹۹۰)، ضخامت همه نمونه‌ها برابر ۳۸/۱ میلی‌متر اختیار شد. برای تعیین پارامترهای شکست، از تیرهایی با ابعاد زیر استفاده شد: ضخامت (b) برابر ۳۸/۱ میلی‌متر، ارتفاع (D) برابر ۳۸/۱، ۷۶/۲، ۱۵۲/۴ و ۳۰۴/۸ میلی‌متر و طول (l) برابر ۱۰۲، ۲۰۳، ۴۰۷ و ۸۱۴ میلی‌متر. نسبت‌های طول و دهانه به ارتفاع، در تمامی تیرها برابر ۲/۶۷ و ۲/۵ بود و نسبت شیار به ارتفاع تیرها نیز برابر مقدار ثابت ۰/۲ در نظر گرفته شد. از هر یک از ابعاد تیر موردنظر سه نمونه و در مجموع برای شش طرح مخلوط، ۷۲ نمونه تیر برای تعیین پارامترهای شکست ساخته شد.

در روش اثر اندازه، پارامترهای شکست هر طرح با انجام آزمایش خمش سه نقطه‌ای بر روی ۱۲ تیر شکافدار و تعیین بار حداکثر آن‌ها به دست می‌آید. حداکثر بارها باید براساس معادله زیر با در نظر گرفتن اثر وزن نمونه‌ها اصلاح شوند (RILEM_FMT-89، ۱۹۹۰):

$$F_i^c = F_i + \frac{2S_i - L_i}{2S_i} g \times m_i \quad (3)$$

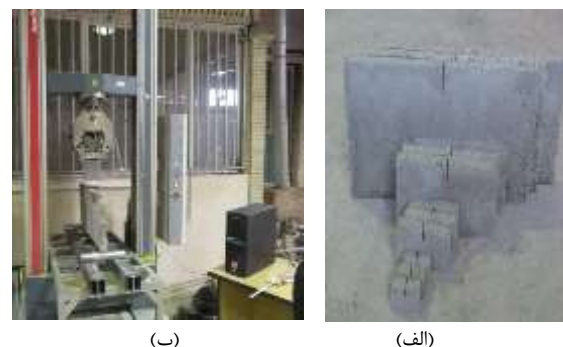
که F_i^c بار حداکثر اصلاح‌شده، F_i بار حداکثر به دست آمده از آزمایش، S اندازه دهانه و L طول نمونه است. این پارامترها در شکل (۵) نشان داده شده‌اند. g شتاب گرانشی زمین، m جرم نمونه و i تعداد آزمایش‌های انجام شده است. بدین ترتیب حداکثر نیروی قابل تحمل توسط تیرها تعیین شده و با جایگذاری در رابطه زیر مقادیر X_i و Y_i به دست می‌آیند (RILEM_FMT-89، ۱۹۹۰):

$$Y_i = \left(\frac{bD_i}{F_i^c} \right)^2 \quad X_i = D_i \quad (4)$$



شکل ۳- الف) نمونه آزمایش فشاری، ب) نمونه آزمایش مدول الاستیسیته زیر جک فشاری هیدرولیکی

لازم به ذکر است که در هر یک از آزمایش‌های فوق برای تعیین مقاومت‌های فشاری، کششی و مدول الاستیسیته هر طرح مخلوط، حداقل سه نمونه با ابعاد پیش‌گفته مورد آزمایش قرار گرفت. همچنین برای تعیین پارامترهای شکست هر طرح مخلوط، دوازده تیر با ابعاد مشخص شده در دستورالعمل RILEM FMT-89 (۱۹۹۰) ساخته شد. برای آزمایش اثر اندازه و تعیین حداکثر ظرفیت تیرهای شکافدار، مطابق شکل (۴) از دستگاه الکتروکنترل یونیورسال^۵ با حداکثر ظرفیت ۱۵۰ کیلونیوتن استفاده شد.



شکل ۴- الف) تیرهای مورد استفاده در آزمایش، ب) نمونه تحت اثر خمش سه نقطه‌ای

۳- استفاده از روش آزمایشگاهی اثر اندازه برای محاسبه پارامترهای شکست بتن

پارامترهای شکست بتن مانند خصوصیات مکانیکی آن، برای هر طرح مخلوط ثابت است و مستقل از ابعاد و اندازه نمونه‌ها است. روش‌های متعددی برای تعیین پارامترهای شکست بتن پیشنهاد شده است. یکی از معتبرترین آن‌ها روش اثر اندازه است. اساس این روش مطالعات گسترده‌ای است که توسط Bazant و Pfeiffer

خود ($CTOD_c$) برسد. با توجه به مطالب فوق، چقرمگی شکست مود یک (K_{Ic}) و بازشدگی نوک ترک بحرانی ($CTOD_c$) از دیگر پارامترهای مهم شکست بتن هستند که از روابط زیر تعیین می‌شوند (RILEM_FMT-89، ۱۹۹۰):

$$K_{Ic} = \sqrt{G_f E} \quad (۹)$$

$$CTOD_c = \frac{8K_{Ic}}{E} \times \sqrt{\frac{c_f}{2\pi}} \quad (۱۰)$$

۴- نتایج آزمایشگاهی

۴-۱- کارایی و خواص مکانیکی بتن خود تراکم سبک

بعد از اختلاط بتن خود تراکم سبک، کارایی بتن تازه توسط آزمایش‌های جریان اسلامپ، جعبه U و حلقه I مورد ارزیابی قرار گرفت (EFNARC، ۲۰۰۲). مشخصات بتن تازه در جدول (۲) نمایش داده شده است. با بررسی این نتایج مشاهده می‌شود که خصوصیت‌های رئولوژی^۶ تمامی مخلوط‌های بتن تازه، محدودیت‌های دستورالعمل EFNARC (۲۰۰۲) را برآورده می‌نمایند. آزمون جریان اسلامپ برای ارزیابی توانایی بتن خود تراکم در پر نمودن قالب تحت اثر وزن خود به کار می‌رود. برخی مطالعات، جریان اسلامپ بتن خود تراکم را در بازه ۵۰۰ تا ۷۰۰ میلی‌متر مناسب ارزیابی نموده‌اند (Fujiwara و Nagataki، ۱۹۹۵). بر اساس آیین‌نامه، مقدار جریان اسلامپ برای بتن خود تراکم باید بیشتر از ۵۵۰ میلی‌متر باشد (EFNARC، ۲۰۰۲). در این مطالعه، مقدار فوق روان‌کننده به‌گونه‌ای تغییر داده شد که جریان اسلامپ تمام نمونه‌ها در حد قابل قبول باقی بماند. مطابق جدول (۲)، عدد جریان اسلامپ تمام نمونه‌ها در محدوده مجاز ۶۳۲ تا ۷۰۱ میلی‌متر حاصل شد. بدین ترتیب برخی از نمونه‌ها که داری اسلامپ مجاز ۵۵۰-۶۵۰ میلی‌متر هستند در طبقه‌بندی SF1 و برخی دیگر با محدوده مجاز اسلامپ ۶۶۰-۷۵۰ میلی‌متر، در طبقه‌بندی SF2 قرار می‌گیرند (EFNARC، ۲۰۰۲). همچنین در این آزمایش با نگاه بصری به لبه‌های بتن، مشخص شد که کلیه مخلوط‌های بتن مقاومت مناسبی در مقابل تهنشینی و جداشدگی سنگ‌دانه‌ها دارند. از طرف دیگر پس از انجام آزمایش مقاومت کششی، با مشاهده توزیع یکنواخت خمیر و سنگ‌دانه‌ها در نمونه‌های شکسته شده، مناسب بودن شرایط بتن تازه مشخص گردید. با افزودن دوده سیلیسی به مخلوط، جریان اسلامپ آن قدری کاهش یافت. بنابراین، همان‌طور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود، مخلوط‌های حاوی دوده سیلیسی نیاز به روان‌کننده بیشتری داشتند تا بتوانند کارایی خود را در حد قابل قبول حفظ نمایند. دلیل این موضوع آن است که با توجه به سطح مخصوص بیشتر ذرات دوده سیلیسی، مقدار بیشتری از آب و

در رابطه (۴)، پارامترهای b و D_i به ترتیب ضخامت و ارتفاع تیر هستند. در ادامه با استفاده از رابطه (۵)، نقاط Y_i متناظر با نقاط X_i تعیین می‌شوند:

$$Y = AX + C \quad (۵)$$

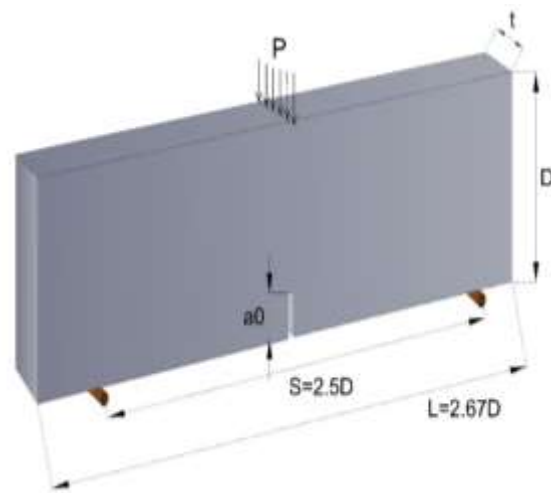
با انجام رگرسیون خطی، مقادیر A و C که به ترتیب شیب و عرض از مبدأ رابطه (۵) هستند، تعیین می‌گردند. بر اساس مقادیر به‌دست آمده، انرژی شکست اولیه (G_f) مطابق RILEM_FMT-89 (۱۹۹۰)، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$G_f = \frac{g(\alpha_0)}{E_c A} \quad (۶)$$

$$\alpha_0 = a_0 / D \quad (۷)$$

در رابطه بالا $g(\alpha_0)$ نرخ رهاسازی انرژی، E مدول الاستیسیته بتن، a_0 طول ترک اولیه ایجاد شده و α_0 نسبت طول ترک اولیه به ارتفاع تیرها است. تابع نرخ رهاسازی انرژی در تیرهایی با نسبت دهانه به ارتفاع ۲/۵ برابر است با (RILEM_FMT-89، ۱۹۹۰):

$$g_{2.5}(\alpha_0) = 2.25 \left(\frac{S}{D} \right)^2 \pi \alpha_0 \times \left[\frac{1 - 2.5\alpha + 4.49\alpha^2 - 3.98\alpha^3 + 1.33\alpha^4}{(1 - \alpha)^{1.5}} \right]^2 \quad (۸)$$



شکل ۵- هندسه و مشخصات نمونه تیر

در سازه‌هایی که دارای ترک هستند، با افزایش میزان بار وارده، ترک به آرامی گسترش می‌یابد تا این‌که در نهایت بازشدگی ترک به حد بحرانی خود برسد. در این حالت بار قابل تحمل سازه نیز به حداکثر مقدار خود می‌رسد. این شرایط بحرانی زمانی رخ می‌دهد که ضریب شدت تنش در نوک ترک به مقدار بحرانی خود (K_{Ic}) رسیده، هم‌زمان بازشدگی ترک در نوک آن نیز به مقدار بحرانی

به دست آمده است که با اختلافی ناچیز الزامات بتن خود تراکم را برآورده می نماید. در ضمن سبک دانه بودن سنگ دانه های مورد استفاده در این نوع بتن نیز خود می تواند سبب افزایش میزان اختلاف ارتفاع در دو محفظه مجاور شود.

مقادیر مقاومت های فشاری، کششی، مدول الاستیسیته و وزن مخصوص خشک طرح های مختلف بتن خود تراکم سبک در جدول (۲) نمایش داده شده است. مطابق آیین نامه ACI-213 (۲۰۰۳) بتن سبک سازه ای باید دارای حداقل مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۲۱ مگاپاسکال و وزن مخصوص ۱۹۲۰ تا ۱۹۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب باشد. همچنین چگالی توده درشت دانه سبک آن از ۸۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب تجاوز نکند. همان گونه که در جدول (۲) مشاهده می شود وزن مخصوص نمونه ها، در بازه ۱۷۱۸ تا ۱۷۷۷ کیلوگرم بر مترمکعب قرار دارد و طبق آیین نامه ACI-213 (۲۰۰۳) تمامی نمونه ها سبک محسوب می شوند. بنابراین با توجه به مطالب فوق و نتایج حاصل از آزمایش بتن تازه تمامی طرح مخلوط های ارائه شده در این مطالعه از نوع خود تراکم سبک هستند.

جدول ۲- نتایج آزمایش کارایی، خواص مکانیکی و وزن

مخصوص خشک برای تمام مخلوط های بتن									
مقاومت فشاری	مقاومت کششی	مدول الاستیسیته	جریان حلقه J	جعبه U	وزن مخصوص	طرح	مقاومت فشاری	مقاومت کششی	مدول الاستیسیته
(MPa)	(MPa)	(GPa)	(mm)	(mm)	(kg/m ³)		(MPa)	(MPa)	(GPa)
۳۷/۷۱	۲/۸۸	۲۲/۱۸	۶۶۱	۵۷۸	۳۱	C37	۱۷۷۷	۲۴	۵۹۶
۳۰/۲۰	۲/۵۸	۱۹/۵۸	۶۸۶	۵۷۴	۲۸	C42	۱۷۱۸	۲۴	۵۹۶
۲۴/۷۸	۲/۰۲	۱۸/۰۰	۶۹۵	۵۹۶	۲۴	C47	۱۷۴۲	۲۴	۵۹۶
۲۲/۳۸	۱/۸۳	۱۷/۳۸	۷۰۱	۵۸۷	۲۶	C52	۱۷۲۵	۲۴	۵۹۶
۴۴/۶۳	۳/۲۴	۲۴/۰۶	۶۴۷	۵۵۲	۲۹	C37SF5	۱۷۵۱	۲۴	۵۹۶
۴۹/۰۱	۳/۴۶	۲۴/۹۷	۶۳۲	۵۳۶	۳۲	C37SF10	۱۷۵۶	۲۴	۵۳۶

درصد تغییر مقاومت های فشاری، کششی و مدول الاستیسیته هر یک از طرح ها نسبت به مقدار متناظر خود از طرح C37 در شکل (۶) نمایش داده شده است. همان گونه که در این شکل مشاهده می شود، خصوصیت های مکانیکی بتن خود تراکم سبک کاملاً به نسبت آب به سیمان وابسته است. با افزایش نسبت آب به سیمان از ۰/۳۷ به ۰/۵۲، مقدار مقاومت فشاری بتن در حدود ۴۱٪ کاهش می یابد.

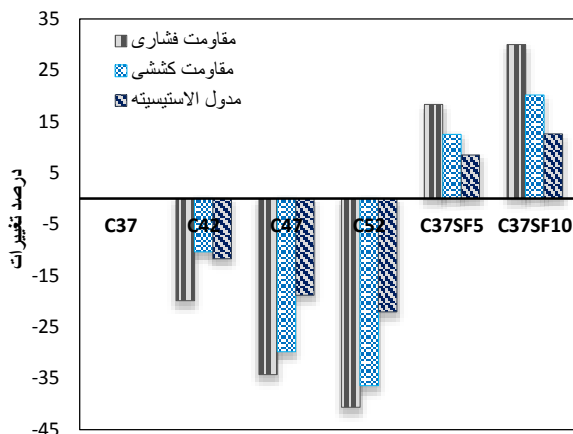
Akcaoglu و همکاران (۲۰۰۴) با انجام آزمایش بر بتن معمولی به این نتیجه رسیدند که نسبت آب به سیمان نقش بسیار مهمی در کیفیت ITZ و خمیر سیمان دارد. به طوری که با افزایش این نسبت، میزان تخلخل در ITZ افزایش یافته و میکرو ترک ها در بتن گسترش می یابند. بنابراین دلیل کاهش مقاومت فشاری با افزایش نسبت آب به سیمان می تواند مربوط به افزایش تخلخل موجود در خمیر سیمان و ITZ در نسبت های زیاد آب به سیمان

روان کننده به سطح ذرات بسیار ریز دوده سیلیسی می چسبد. این پدیده سبب می شود که نیاز به فوق روان کننده افزایش یابد. لازم به ذکر است که در مجموع، مخلوط های بتنی حاوی دوده سیلیسی، دارای چسبندگی و انسجام بیشتری بودند. این موضوع با نتایج مطالعه Khatri و همکاران (۱۹۹۵) نیز مطابقت دارد.

مقدار قطر بتن در آزمایش حلقه J بیان گر توانایی عبور بتن از میان میلگردها است. هر مقدار این قطر بیشتر باشد، بتن خود تراکم می تواند تحت اثر وزن خود تا فاصله بیشتری از بین میلگردها عبور کند و زودتر قالب بتن با میلگردهای متراکم را پر نماید. تفاوت بین قطر حاصل از آزمایش های جریان اسلامپ و حلقه J نشان دهنده درجه عبور بتن از میان آرماتورها است و می تواند هم زمان قابلیت پرکنندگی و روانی بتن را به نمایش بگذارد. به طوری که در بتن های خود تراکم اگر این مقدار بین ۰-۲۵ میلی متر باشد توانایی عبور بتن زیاد، بین ۵۰-۲۵ میلی متر توانایی عبور متوسط و اگر بیش از ۵۰ میلی متر باشد توانایی عبور بتن کم خواهد بود (EFNARC, ۲۰۰۲). با توجه به آزمایش های صورت گرفته مشاهده شد که تفاوت میان قطر بتن حاصل از دو آزمایش در محدوده بیش از ۵۰ میلی متر قرار داد که بیان کننده قابلیت عبور کم طرح های بتن خود تراکم سبک تولید شده است. البته ذکر این نکته لازم است که محدوده های ارائه شده فوق برای بتن خود تراکم معمولی است که از سنگ دانه های معمولی برای تولید آن ها استفاده می شود و در واقع به ازای کارایی برابر، بتن های حاوی سبک دانه به علت وزن کم تر دارای اسلامپ و توانایی عبور پایین تری نسبت به بتن معمولی هستند.

با توجه به این که حتی در بتن های با میزان جریان اسلامپ برابر، مقادیر متفاوتی در آزمایش حلقه J مشاهده شده است، بنابراین آزمایش حلقه جی به تنهایی برای تعیین مشخصات اساسی بتن تازه یعنی تنش تسلیم و لزجت خمیری قابل استفاده نیست. بدین ترتیب برای بررسی توانایی عبور بتن از خروجی های تنگ و باریک، آزمایش جعبه U شکل نیز انجام پذیرفت. این آزمایش سخت گیرانه ترین آزمایش بتن خود تراکم است و قابلیت عبور، پرشدگی و توانایی شکل پذیری بتن را مدل سازی می کند. در صورتی که بتن ملزومات تعیین شده در این آزمایش را برآورده سازد از نظر مشخصات بتن تازه می توان از آن به عنوان بتن خود تراکم نام برد. در این آزمایش هر مقدار اختلاف ارتفاع بتن در دو محفظه مجاور هم به صفر نزدیک باشد، نشان دهنده روانی و قابلیت عبور بیشتر بتن است و هرچه این مقدار بیشتر باشد، بیان گر بیشتر بودن لزجت و تنش تسلیم بتن است، که امکان بروز پدیده انسداد را افزایش می دهد. میزان اختلاف ارتفاع بتن خود تراکم در دو محفظه مجاور هم باید کمتر از ۳۰ میلی متر باشد. بر اساس اطلاعات مندرج در جدول (۲)، مقدار اختلاف ارتفاع جعبه U شکل برای طرح های مختلف بتن، بین ۲۴ تا ۳۲ میلی متر

مدول الاستیسیته بتن به ترتیب ۱۲/۵ و ۸/۵ درصد، و با جایگزینی ۱۰ درصد از سیمان با دوده سیلیسی، این مقادیر ۲۰/۱ و ۱۲/۶ درصد افزایش می‌یابند.



شکل ۶- درصد تغییر مقاومت‌های فشاری، کششی و مدول الاستیسیته هر یک از طرح‌ها نسبت به طرح C37

مطابق ACI318-14 (۲۰۱۵)، مقاومت کششی، مقاومت برشی و پیوند میان بتن و میلگرد در بتن سبک، با مقادیر متناظر آن در بتن‌های معمولی با همان مقاومت فشاری متفاوت است. بنابراین پیشنهاد شده است که برای تعیین مقاومت کششی بتن سبک، رابطه میان مقاومت کششی و فشاری بتن معمولی در ضریب اصلاح λ ضرب شود (ACI318-14، ۲۰۱۵). براساس ACI318-14 (۲۰۱۵) رابطه بین مقاومت کششی و مقاومت فشاری به صورت زیر خواهد بود.

$$f_t = \lambda \times 0.56 \times \sqrt{f_c} \quad (11)$$

در رابطه فوق، f_c و f_t به ترتیب مقاومت فشاری و مقاومت کششی نمونه استوانه‌ای برحسب مگاپاسکال هستند. آیین‌نامه برای بتن سبکی که در آن از ماسه معمولی و درشت‌دانه سبک استفاده شده است مقدار λ را برابر ۰/۸۵ پیشنهاد می‌کند. همچنین براساس ACI318-14 (۲۰۱۵)، مدول الاستیسیته بتن با وزن مخصوص در محدوده ۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$E = 0.043 \times w_c^{1.5} \times \sqrt{f_c} \quad (12)$$

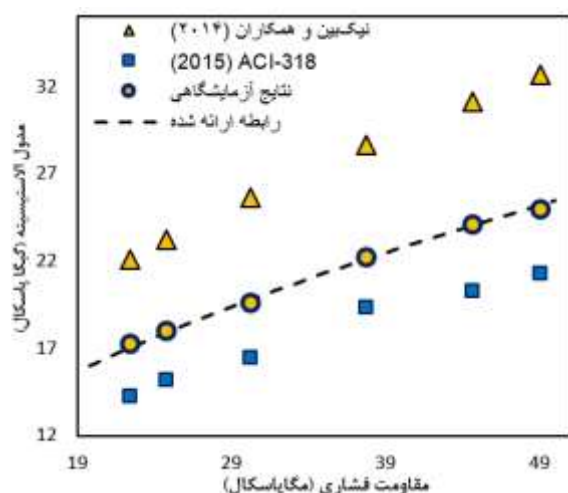
که در آن $w_c^{1.5}$ وزن مخصوص بتن است. Nikbin و همکاران (۲۰۱۴) با انجام مطالعه‌ای جامع بر بتن خود تراکم، روابط زیر را برای تعیین مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بتن خود تراکم از مقاومت فشاری آن پیشنهاد داده‌اند:

باشد. در نتیجه در نسبت‌های بالای آب به سیمان، خمیر سیمان ضعیف می‌شود و در این حالت مسیر شکست بتن از میان خمیر سیمان یا منطقه ITZ عبور می‌کند و شکستی در داخل سنگ‌دانه‌ها رخ نمی‌دهد. این مسیر عبور شکست سبب زبر شدن سطح شکست می‌شود.

زمانی که ۵ و ۱۰ درصد از وزن سیمان با دوده سیلیسی جایگزین می‌شود، مقاومت فشاری بتن خود تراکم سبک به ترتیب حدود ۱۸ و ۳۰ درصد افزایش می‌یابد. دلیل این بهبود کیفیت آن است که با افزودن دوده سیلیسی به مخلوط بتن، این ذرات که بسیار کوچک‌تر از ذرات سیمان هستند با ایجاد پدیده میکرو پرشدگی به‌خوبی در خمیر سیمان و فضای خالی بین ریزدانه‌ها پخش می‌شوند. این موضوع سبب تقسیم حفرات بزرگ به حفرات کوچک‌تر و ایجاد ساختار متراکم‌تر در بتن می‌گردد. از طرف دیگر، یکی از محصولاتی که در هنگام واکنش سیمان پرتلند در بتن ایجاد می‌شود هیدروکسید کلسیم (C-H) است. این محصول مقاومت کمی دارد و وجود آن در ناحیه انتقال بین سنگ‌دانه و خمیر سیمان (ITZ) بر مقاومت بتن به‌شدت تأثیر منفی دارد. با به‌کار گرفتن دوده سیلیسی در طرح مخلوط، محصول ضعیف و ناپایدار هیدروکسید کلسیم^۷ با دوده سیلیسی ترکیب شده، به سیلیکات کلسیم (C-S-H) تبدیل می‌شود، که بسیار قوی و پایدار است (Singh, ۲۰۲۱). کاهش مقدار هیدروکسید کلسیم ضعیف و تشکیل سیلیکات کلسیم مستحکم می‌تواند ناحیه انتقال بین سنگ‌دانه و خمیر سیمان (ITZ) را به‌صورتی متراکم‌تر نماید. به این ترتیب میانگین اندازه منفذهای ریز بتن کاهش و پیوستگی خمیر و سنگ‌دانه‌ها افزایش می‌یابد، در نتیجه مقاومت بتن افزایش و نفوذپذیری آن کاهش می‌یابد. در این حالت مسیر شکست بتن از میان سنگ‌دانه‌ها عبور می‌کند، سطح شکست کمی نرم‌تر شده و دارای پیچ‌وخم کمتری خواهد بود. پیش از این نیز تأثیر مثبت افزودن دوده سیلیسی بر خصوصیات مکانیکی بتن‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته و روند مشابهی مشاهده شده است (Mazloom و همکاران، ۲۰۰۴؛ Salehi و Mazloom، ۲۰۱۹c).

در جدول (۲) مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بتن خود تراکم سبک نیز برای نسبت‌های مختلف آب به سیمان و مقدار جایگزینی سیمان با دوده سیلیسی نمایش داده شده است. با افزایش نسبت آب به سیمان از ۰/۳۷ به ۰/۵۲، مقدار مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بتن خود تراکم سبک به ترتیب حدود ۳۶٪ و ۲۲٪ کاهش می‌یابند. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش درصد جایگزینی دوده سیلیسی، تمامی خواص مکانیکی بتن با نسبت‌های مختلف بهبود می‌یابند. به‌طوری‌که با جایگزینی ۵ درصد از سیمان با دوده سیلیسی، مقادیر مقاومت کششی و

در نمودار شکل (۸) نیز نتایج حاصل از این مطالعه و نتایج پیش‌بینی شده از روابط ACI318-14 (۲۰۱۵)، Nikbin و همکاران (۲۰۱۴) و رابطه پیشنهادی در این مطالعه مقایسه شده است. از روی نمودار کاملاً مشخص است که در مورد مدول الاستیسیته نیز همانند مقاومت کششی، روابط ارائه شده توسط ACI318-14 (۲۰۱۵) و Nikbin و همکاران (۲۰۱۴) به هیچ عنوان دقت لازم در پیش‌بینی مدول الاستیسیته بتن خود تراکم سبک را ندارند. در مقابل همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، رابطه پیشنهادی برای تعیین مدول الاستیسیته، دارای دقت بسیار خوبی بوده و هماهنگی قابل قبولی بین داده‌های آزمایشگاهی و مقادیر پیش‌بینی شده از رابطه (۱۶) وجود دارد.



شکل ۸- مقایسه رابطه بین مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری ارائه شده در این مطالعه با سایر مطالعات

۴-۲- پارامترهای شکست حاصل از روش اثر اندازه

براساس روش اثر اندازه، انرژی شکست اولیه با انجام آزمایش خمش سه نقطه‌ای بر تیرهای شکافدار و تعیین بار حداکثر آن‌ها به دست می‌آید. حداکثر بارها باید مطابق رابطه (۳) اصلاح شوند. بار حداکثر اصلاح شده برای تمامی نمونه‌ها در جدول (۳) نمایش داده شده است.

شکل (۹) نتایج مربوط به تحلیل رگرسیون خطی طرح مخلوط‌های مختلف را نشان می‌دهد. مطابق آیین‌نامه RILEM FMT-89 (۱۹۹۰)، نتایج به دست آمده از روش اثر اندازه زمانی دارای دقت قابل قبول است که پس از رسم خط رگرسیون حاصل از داده‌های آزمایشگاهی، ضریب تغییرات شیب خط رگرسیون (ω_A)، ضریب تغییرات عرض از مبدأ (ω_c) و عرض نسبی باند پراکندگی (m)، به ترتیب از ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۲ تجاوز نمایند. مقادیر عددی مربوط به این ضرایب در جدول (۴) نشان داده شده است. براساس اطلاعات به دست آمده، تمام متغیرهای ω_c ، ω_A و m مقادیر قابل قبولی دارند و به ترتیب کمتر از ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۲

$$f_t = 0.49 \sqrt{f_c} \quad (13)$$

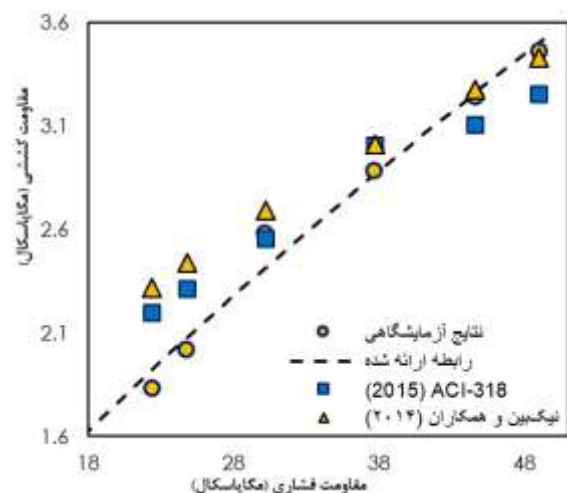
$$E = 4660 \sqrt{f_c} \quad (14)$$

که در آن f_c ، f_t و E به ترتیب مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بتن برحسب مگاپاسکال هستند. در شکل (۷) نتایج حاصل از این مطالعه آزمایشگاهی و نتایج پیش‌بینی شده از روابط ACI318-14 (۲۰۱۵)، Nikbin و همکاران (۲۰۱۴) و رابطه پیشنهادی در این مطالعه نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج پیش‌بینی شده از روابط ACI318-14 (۲۰۱۵) و Nikbin و همکاران (۲۰۱۴) خصوصاً در مقاومت‌های فشاری پایین اختلاف زیادی وجود دارد. بنابراین این نتایج نمی‌توانند بر اساس مقاومت فشاری به دست آمده به پیش‌بینی مقاومت کششی بتن خود تراکم سبک بپردازند و نیاز به رابطه‌ای خاص برای این نوع بتن است. در این مطالعه با استفاده از تجزیه و تحلیل و رگرسیون داده‌های موجود، رابطه‌های زیر برای تعیین مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بتن خود تراکم سبک پیشنهاد شده است:

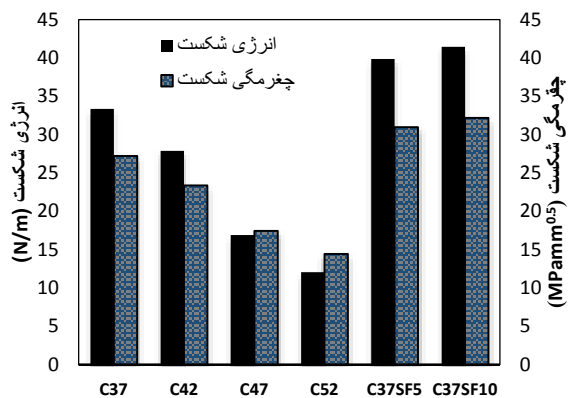
$$f_t = 0.177 (f_c)^{0.767} \quad R^2 = 0.981 \quad (15)$$

$$E = 3.597 \sqrt{f_c} \quad R^2 = 0.997 \quad (16)$$

در رابطه بالا f_t مقاومت کششی، f_c مقاومت فشاری نمونه مکعبی برحسب مگاپاسکال و E مدول الاستیسیته برحسب گیگاپاسکال است. همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، رابطه پیشنهادی توسط این مطالعه با دقت بسیار خوبی قادر به پیش‌بینی مقاومت کششی بتن خود تراکم سبک از مقاومت فشاری آن است.



شکل ۷- مقایسه رابطه بین مقاومت کششی و مقاومت فشاری ارائه شده در این مطالعه با سایر مطالعات



شکل ۱۰- تغییرات انرژی و چقرمگی شکست طرح‌های مختلف بتن خود تراکم سبک

همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، با کاهش نسبت آب به سیمان از ۰/۵۲ به ۰/۳۷، مقدار G_f از ۱۲/۰۵ به ۳۳/۳۵ نیوتن بر متر افزایش می‌یابد و حدود ۲/۷ برابر می‌شود. Beygi و همکاران (۲۰۱۳) با مطالعه بر بتن خود تراکم به این نتیجه رسیدند که با کاهش نسبت آب به سیمان از ۰/۷ به ۰/۳۵، مقدار G_f از ۲۹/۵ به ۵۲/۳ نیوتن بر متر افزایش می‌یابد. چنین روندی نیز توسط Bharatkumar و همکاران (۲۰۰۵) برای بتن توانمند گزارش شده است. همچنین در سایر مطالعات در خصوص رابطه بین انرژی شکست و نسبت آب به سیمان بتن‌های مختلف، روند مشابهی گزارش شده است (Ince و Alyamac، ۲۰۰۸؛ Salehi و Mazloom، ۲۰۱۹b). با آزمایش‌هایی که Akcaoglu و همکاران (۲۰۰۴) بر بتن معمولی انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که نسبت آب به سیمان نقش مهمی در کیفیت ITZ و خمیر سیمان دارد. به‌گونه‌ای که با افزایش نسبت آب به سیمان، تخلخل در ITZ افزایش یافته و ریز ترک‌هایی در بتن ایجاد می‌شود. بنابراین علت کاهش انرژی شکست با افزایش نسبت آب به سیمان می‌تواند این واقعیت باشد که با افزایش نسبت آب به سیمان، اندازه و تعداد منافذ موجود در خمیر سیمان و ITZ افزایش می‌یابد. در این حالت با ضعیف شدن خمیر سیمان، مسیر شکست بتن نیز به‌جای عبور از میان سنگ‌دانه‌ها غالباً از اطراف آن‌ها (از میان خمیر سیمان یا منطقه ITZ) عبور می‌کند.

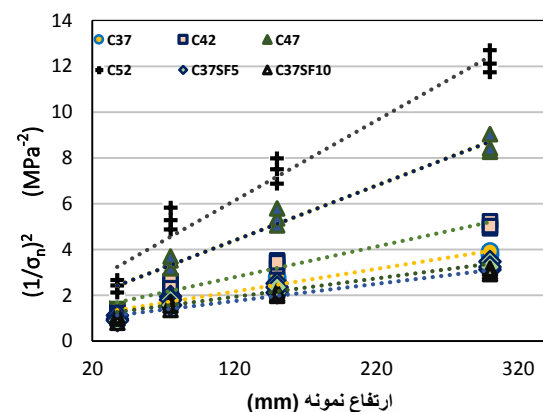
با جایگزینی ۵ و ۱۰ درصد از وزن سیمان با دوده سیلیسی، مقدار انرژی شکست به ترتیب ۱۹/۴ و ۲۴/۲ درصد افزایش می‌یابد. با توجه به مطالب ذکر شده، بیش‌ترین مقدار انرژی شکست، برای مخلوط با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۷ و نسبت جایگزینی دوده سیلیسی ۱۰ درصد به‌دست می‌آید.

چقرمگی شکست (K_{IC})، از دیگر پارامترهای تأثیرگذار در مکانیک شکست بتن است. موضوع تغییرات چقرمگی شکست در بتن‌های مختلف توسط محقق‌های متعددی مورد بررسی قرار

هستند. در این بخش برای هر یک از طرح مخلوط‌ها، پارامترهای اصلی شکست با استفاده از تحلیل رگرسیون خطی محاسبه شده است (RILEM_FMT-89، ۱۹۹۰). در جدول (۴) و شکل (۱۰) تغییرات میزان انرژی شکست (G_f) برای همه طرح مخلوط‌های ساخته‌شده با نسبت‌های مختلف آب به مواد سیمانی و دوده سیلیسی نمایش داده شده است.

جدول ۳- بار حداکثر اصلاح‌شده برای تمام نمونه‌ها برحسب نیوتن

ارتفاع تیر (mm)	شماره نمونه	C37	C42	C47	C52	C37SF5	C37SF10
۳۸/۱	۱	۱۴۱۷	۱۲۴۶	۹۱۰	۹۶۴	۱۳۵۸	۱۶۱۳
	۲	۱۳۱۵	۱۱۷۱	۱۰۰۷	۹۰۳	۱۴۳۱	۱۴۸۷
	۳	۱۳۵۲	۱۲۶۴	۹۸۶	۸۶۲	۱۵۰۸	۱۳۹۱
۷۶/۲	۱	۱۹۸۱	۱۷۸۵	۱۵۷۸	۱۲۷۵	۲۴۳۵	۲۵۰۹
	۲	۲۰۳۶	۱۷۳۶	۱۴۹۷	۱۲۲۵	۲۳۴۵	۲۵۴۵
	۳	۲۰۸۵	۱۸۴۹	۱۴۶۴	۱۱۶۵	۲۵۶۵	۲۶۴۵
۱۵۲/۴	۱	۳۴۹۰	۲۹۹۵	۲۵۰۴	۱۹۹۱	۳۹۶۸	۴۲۳۰
	۲	۳۴۳۴	۳۱۱۲	۲۴۳۱	۲۰۵۴	۴۰۷۰	۴۳۴۱
	۳	۳۳۶۶	۳۰۳۲	۲۳۳۶	۲۱۴۶	۴۰۹۰	۴۱۷۰
۳۰۴/۸	۱	۵۸۱۹	۴۹۱۹	۳۹۱۵	۳۲۸۵	۶۵۱۰	۶۸۸۲
	۲	۵۷۶۵	۵۰۷۱	۳۸۷۸	۳۲۳۲	۶۵۹۳	۶۷۹۳
	۳	۵۶۸۶	۵۰۱۹	۳۷۴۴	۳۱۵۷	۶۴۳۰	۶۶۶۵



شکل ۹- تحلیل رگرسیون خطی مخلوط‌ها

جدول ۴- پارامترهای شکست طرح‌های مختلف بتن خود تراکم سبک

طرح	C37	C42	C47	C52	C37SF5	C37SF10
G_f (N/m)	۳۳/۳۵	۲۷/۸۶	۱۶/۸۸	۱۲/۰۵	۳۹/۸۴	۴۱/۴۵
K_{IC} (MPa ^{۰.۵})	۲۷/۲۰	۲۳/۳۶	۱۷/۴۳	۱۴/۴۳	۳۰/۹۶	۳۲/۱۷
δ_c (mm)	۰/۰۱۷۱	۰/۰۱۵۷	۰/۰۱۰۷	۰/۰۰۸۶	۰/۰۱۸	۰/۰۱۷
d_0 (mm)	۱۰۰/۴۲	۸۸/۸۹	۶۳/۲۵	۵۴/۹۲	۹۶/۷۷	۹۳/۹۸
m	۰/۱۴۰	۰/۱۳۹	۰/۱۰۶	۰/۱۵۲	۰/۰۷۱	۰/۰۷۲
ω_A	۰/۰۷۳	۰/۰۶۸	۰/۰۴۶	۰/۰۶۴	۰/۰۳۶	۰/۰۳۶
ω_C	۰/۱۲۷	۰/۱۳۵	۰/۱۲۸	۰/۳۰۳	۰/۰۶۵	۰/۰۶۷

بهینه‌سازی شوند. در این تحقیق براساس مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته بر بتن خود تراکم سبک، رابطه‌ای بین انرژی شکست و مقاومت فشاری با ضریب تعیین 0.93 و رابطه‌ای نیز بین K_{IC} و f_c با ضریب تعیین 0.96 بیان شده است:

$$G_f = 3.47(f_c)^{0.69} \quad (17)$$

$$K_{IC} = 1.22(f_c)^{1.05} \quad (18)$$

که G_f ، K_{IC} و f_c به ترتیب برحسب نیوتن بر متر، $MPa \cdot mm^{0.5}$ و مگاپاسکال هستند. با استفاده از روابط بالا می‌توان با دقت قابل قبولی مقادیر انرژی و چقرمگی شکست بتن خودتراکم سبک را تنها با تعیین مقدار مقاومت فشاری آن تخمین زد.

۵- نتیجه‌گیری

این تحقیق به بررسی تأثیر تغییر نسبت آب به مواد سیمانی و نسبت جایگزینی سیمان با دوده سیلیسی بر خواص مکانیکی و پارامترهای شکست بتن خود تراکم سبک پرداخته است. در این راستا، با در نظر گرفتن نسبت‌های آب به سیمان 0.37 ، 0.42 ، 0.47 و 0.52 و همچنین تغییر نسبت جایگزینی سیمان از صفر به 5 و 10 درصد، نتیجه‌های زیر به دست آمده است:

۱- با کاهش نسبت آب به سیمان از 0.52 به 0.37 ، مقدار مقاومت‌های فشاری، کششی و مدول الاستیسیته بتن خود تراکم سبک به ترتیب حدود 68% ، 57% و 28% بهبود می‌یابند.

۲- زمانی که نسبت جایگزینی وزن سیمان با دوده سیلیسی از صفر به 5% و 10% افزایش می‌یابد، مقاومت فشاری (f_c) به ترتیب $18/3\%$ و 30% ، مقاومت کششی (f_t) $12/5\%$ و $20/1\%$ و مدول الاستیسیته (E) آن $8/5\%$ و $12/6\%$ افزایش می‌یابند.

۳- نتایج حاصل از آزمایش نشان می‌دهد که مقادیر انرژی و چقرمگی شکست بتن خود تراکم سبک به شدت متأثر از نسبت آب به سیمان است و حداقل و حداکثر مقادیر آن‌ها به ترتیب در بیش‌ترین و کم‌ترین نسبت آب به سیمان استفاده شده در آزمایش رخ می‌دهند. دلیل این موضوع آن است که هراندازه نسبت آب به سیمان افزایش می‌یابد، ناحیه انتقال بتن (ITZ) ضعیف‌تر می‌شود و میکرو ترک‌ها به‌طور گسترده‌ای در این ناحیه گسترش می‌یابند. بنابراین حداکثر بار قابل تحمل توسط بتن و در نتیجه انرژی شکست آن کاهش می‌یابد. در این مطالعه با کاهش نسبت آب به سیمان از 0.52 به 0.37 ، مقدار انرژی شکست (G_f) حدود $2/7$ برابر شده و مقدار چقرمگی شکست (K_{IC}) نیز 88% افزایش می‌یابد.

گرفته است. با توجه به جدول (۴) می‌توان مشاهده نمود که چقرمگی شکست بتن خود تراکم سبک بین $32/17$ تا $14/43$ $MPa \cdot mm^{0.5}$ تغییر می‌نماید. این مقادیر قابل مقایسه با مطالعات قبلی صورت گرفته بر روی بتن‌های سبک معمولی و خود تراکم است (Salehi و Mazloom، ۲۰۱۹a؛ Shieh و Chang، ۱۹۹۶).

در شکل (۱۰)، اثر تغییرات نسبت آب به مواد سیمانی بر چقرمگی شکست (K_{IC}) بتن خود تراکم سبک نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با کاهش نسبت آب به سیمان، K_{IC} افزایش می‌یابد. برای طرح مخلوط‌های مختلف، با تغییر نسبت آب به سیمان از 0.52 به 0.37 ، مقدار K_{IC} حدود 88 درصد افزایش یافته، از $14/43$ به $27/2$ $MPa \cdot mm^{0.5}$ می‌رسد. دلیل این افزایش، مشابه دلایلی است که در بخش قبل برای تغییرات انرژی شکست بیان شد. افزایش چقرمگی شکست با کاهش نسبت آب به سیمان، پیش‌تر توسط محققین متعددی برای بتن‌های معمولی، خودتراکم و خودتراکم سبک به اثبات رسیده است (Ince و Alyamac، ۲۰۰۸؛ Eskandari و همکاران، ۲۰۱۰؛ Salehi و Mazloom، ۲۰۱۹a).

نتایج نشان می‌دهد که چقرمگی شکست بتن خود تراکم سبک با استفاده از دوده سیلیسی افزایش می‌یابد. مقدار چقرمگی شکست بتن خود تراکم سبک در مخلوط کنترل (آب به سیمان 0.37) برابر $27/2$ $MPa \cdot mm^{0.5}$ است که با جایگزینی 5 درصد از وزن سیمان با دوده سیلیسی، مقدار آن حدود 14 درصد افزایش یافته، به $30/96$ می‌رسد. همچنین با جایگزینی 10 درصد از وزن سیمان با دوده سیلیسی، مقدار چقرمگی شکست $18/3$ درصد افزایش یافته، به $32/17$ $MPa \cdot mm^{0.5}$ می‌رسد.

همان‌طور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود، با افزایش مقاومت فشاری، مقادیر G_f و K_{IC} افزایش می‌یابند. همین روند توسط Petersson (۱۹۸۰) برای بتن معمولی و نیز Beygi و همکاران (۲۰۱۳) برای بتن خود تراکم مشاهده شده است. از آنجایی که ارتباط مناسبی بین G_f و K_{IC} با مقاومت فشاری وجود دارد، محققان مختلف در بتن‌های مختلف روابط تجربی متعددی بیان نموده‌اند (Bharatkumar و همکاران، ۲۰۰۵؛ Beygi و همکاران، ۲۰۱۳).

Bentz (۲۰۰۹) و Ji و همکاران (۲۰۱۵) بیان نموده‌اند که استفاده از سنگ‌دانه سبک در طرح مخلوط بتن عمل‌آوری داخلی بتن را بهبود می‌بخشد و ITZ متراکم‌تری ایجاد می‌کند. بنابراین در بتن خود تراکم سبک، استفاده از سنگ‌دانه سبک از یک‌طرف و استفاده از مقدار زیادی پودرهای معدنی و فوق روان‌کننده از طرف دیگر می‌تواند سبب شود که رفتار شکست و الگوی ترک‌خوردگی آن با بتن‌های معمولی و خود تراکم متفاوت باشد. بدین ترتیب لازم است که روابط مربوط به انرژی و چقرمگی شکست بتن معمولی و خود تراکم برای استفاده در بتن خود تراکم سبک

- Cement and Concrete Composites, 2009, 31, 285-289.
- Beygi MHA, Kazemi MT, Nikbin IM, Vaseghi Amiri J, "The effect of water to cement ratio on fracture parameters and brittleness of self-compacting concrete", *Materials and Design*, 2013, 50, 267-276.
- Bharatkumar BH, Raghuprasad BK, Ramachandramurthy DS, Narayanan R, Gopalakrishnan S, "Effect of fly ash and slag on the fracture characteristics of high performance concrete", *Materials and Structures*, 2005, 38, 63-72.
- BS-EN-12390-Part3, "Testing hardened concrete: Compressive strength of test specimens. part 3", London, UK: BSI. 2001.
- Chang TP, Shieh MM, "Fracture properties of lightweight concrete", *Cement and concrete research*, 1996, 26, 181-188.
- EFNARC, "Specification & Guidelines for Self-Compacting Concrete", Farnham, UK, European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, 2002.
- Eskandari H, Muralidhara S, Raghuprasad B, Reddy BV, "Size effect in self consolidating concrete beams with and without notches", *Sadhana*, 2010, 35, 303-317.
- Ince R, Alyamac KE, "Determination of fracture parameters of concrete based on water-cement ratio", *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 2008, 15 14-22.
- Jalal M, Mansouri E, Sharifipour M, Pouladkhan AR, "Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO₂ micro and nanoparticles", *Materials and Design*, 2012, 34, 389-400.
- Jenq Y, Shah SP, "Two parameter fracture model for concrete", *Journal of Engineering Mechanics*, 1985, 111, 1227-1241.
- Ji T, Zhang BB, Zhuang YZ, Wu HC, "Effect of lightweight aggregate on early-age autogenous shrinkage of concrete", *ACI Materials Journal*, 2015, 112, 355-363.
- Karamloo M, Afzali-Naniz O, Doostmohamadi A, "Impact of using different amounts of polyolefin macro fibers on fracture behavior, size effect, and mechanical properties of self-compacting lightweight concrete", *Construction and Building Materials*, 2020, 250, 118856.
- Khan MI, Usman M, Rizwan SA, Hanif A, "Self-consolidating lightweight concrete incorporating limestone powder and fly ash as supplementary cementing material", *Materials*, 2019, 12, 3050.
- Khatri R, Sirivivatnanon V, Gross W, "Effect of different supplementary cementitious materials on mechanical properties of high performance concrete", *Cement and Concrete Research*, 1995, 25, 209-220.
- Lam L, Wong Y, Poon C-S, "Effect of fly ash and silica fume on compressive and fracture behaviors of concrete", *Cement and Concrete research*, 1998, 28, 271-283.
- Mazloom M, Ramezani pour A, Brooks J, "Effect of silica fume on mechanical properties of high-
۴- استفاده از دوده سیلیسی سبب بهبود پارامترهای شکست بتن خود تراکم سبک می‌گردد. در نمونه‌های حاوی ۵٪ و ۱۰٪ دوده سیلیسی، مقدار انرژی شکست بتن خود تراکم سبک به ترتیب برابر ۱۹/۴٪ و ۲۴/۲٪ و چقرمگی شکست آن ۱۴٪ و ۱۸/۳٪ نسبت به نمونه‌های شاهد بهبود می‌یابد.
- ۵- استفاده از دوده سیلیسی در بتن خود تراکم سبک، سبب کاهش کارایی آن می‌شود. در این حالت، برای حفظ محدودیت‌های بتن تازه در محدوده مجاز آیین‌نامه، مقدار فوق روان‌کننده بیشتری مورد نیاز است.
- ۶- تنها با تعیین مقدار مقاومت فشاری و استفاده از روابط ارائه شده در این مطالعه می‌توان با دقت بسیار خوبی مقادیر مقاومت کششی، مدول الاستیسیته، انرژی شکست و چقرمگی شکست بتن خود تراکم سبک را پیش‌بینی نمود.
- ۶- مراجع
- ACI-318-14, "Building code requirements for structural concrete and commentary on building code requirements for structural concrete", American Concrete Institute, 2015.
- ACI-213R-03, "Guide for structural lightweight-aggregate concrete", Farmington Mills, MI, USA: ACI, 2003.
- Agwa IS, Omar OM, Tayeh BA, Abdelsalam BA, "Effects of using rice straw and cotton stalk ashes on the properties of lightweight self-compacting concrete", *Construction and Building Materials*, 2020, 235, 117541.
- Akcaoglu T, Tokyay M, Celik T, "Effect of coarse aggregate size and matrix quality on ITZ and failure behavior of concrete under uniaxial compression", *Cement and Concrete Composites*, 2004, 26, 633-638.
- ASTM-C469, "Standard test methods for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression", American Society of Testing Materials, 2002.
- ASTM-C494, "Standard specification for chemical admixtures for concrete", American Society of Testing Materials, 2001.
- ASTM-C496, "Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens", West Conshohocken, PA, USA, ASTM International, 2002.
- ASTM-C127 A, "Standard test method for specific gravity and absorption of coarse aggregate", American Society for Testing and Material, 1993.
- ASTM-C330, "Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete", ASTM International, 2017.
- ASTM-C33, "Standard specification for concrete aggregates", Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 2003.
- Bazant ZP, Pfeiffer PA, "Determination of fracture energy from size effect and brittleness number", *ACI Materials Journal*, 1987, 84, 463-480.
- Bentz DP, "Influence of internal curing using lightweight aggregates on interfacial transition zone percolation and chloride ingress in mortars",

- strength concrete", *Cement and Concrete Composites*, 2004, 26, 347-357.
- Mazloom M, Salehi H, "The relationship between fracture toughness and compressive strength of self-compacting lightweight concrete", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2018, 062007.
- Mohammadi Y, Mousavi SS, Rostami F, Danesh A, Sarand NI, "The Effect of Silica Fume on the Properties of Self-Compacted Light weight Concrete", *Special Issue of Current World Environment*, 2015, 10.
- Nagataki S, Fujiwara H, "Self-compacting property of highly flowable concrete", *Special Publication*, 1995, 154, 301-314.
- Naus DJ, Batson GB, Lott JL, "Fracture mechanics of concrete", *Fracture Mechanics of Ceramics*, Springer, 1974, 469-482.
- Nikbin IM, Beygi MHA, Kazemi MT, Vaseghi Amiri J, Rabbaniifar S, Rahmani E, Rahimi S, "A comprehensive investigation into the effect of water to cement ratio and powder content on mechanical properties of self-compacting concrete", *Construction and Building Materials*, 2014, 57, 69-80.
- Petersson PE, "Fracture energy of concrete: practical performance and experimental results", *Cement and Concrete research*, 1980, 10 (1), 91-101.
- RILEM FTM-89, "Size-effect method for determining fracture energy and process zone size of concrete", 1990, 23, 461-465.
- Sabet FA, Libre NA, Shekarchi M, "Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash", *Construction and Building Materials*, 2013, 44, 175-184.
- Salehi H, Mazloom M, "Experimental and numerical studies of crack propagation in self-compacting lightweight concrete", *Modares Mechanical Engineering*, 2018, 18, 144-155.
- Salehi H, Mazloom M, "Effect of magnetic-field intensity on fracture behaviors of self-compacting lightweight concrete", *Magazine of Concrete Research*, 2019a, 71, 665-679.
- Salehi H, Mazloom M, "An experimental investigation on fracture parameters and brittleness of self-compacting lightweight concrete containing magnetic field treated water", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2019b, 19, 803-819.
- Salehi H, Mazloom M, "Opposite effects of ground granulated blast-furnace slag and silica fume on the fracture behavior of self-compacting lightweight concrete", *Construction and Building Materials*, 2019c, 222, 622-632.
- Singh G, "Study on collective effect of silica fume and steel fiber on strength and durability properties of concrete", *Materials Today: Proceedings*, 2021, 37, 2256-2265.

EXTENDED ABSTRACTS

Studying the Effect of Silica Fume on the Fracture Toughness and Fracture Energy of Self-Compacting Lightweight Concrete

Hasan Salehi^a, Moosa Mazloom^{b,*}

^a Department of Mechanical Engineering, Khatam Ol Anbia University, Tehran, Iran

^b Department of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Lavizan, Tehran, Iran

Received: 26 December 2020; **Review:** 11 October 2021; **Accepted:** 16 October 2021

Keywords:

Self-compacting lightweight concrete, Silica fume, Mechanical properties, Fracture energy, Fracture toughness.

1. Introduction

Self-compacting lightweight concrete (SCLC) is one type of concrete that its usage has widely increased. The use of some additives in the production of SCLC can both reduce its costs and improve its properties. The effects of different cement replacement materials have been studied by several researchers. Jalal et al. (2012) claimed that the use of silica fume could improve the electrical resistance and mechanical properties of self-compacting concrete, and reduce its water absorption. Moreover, the use of silica fume in normal concrete improves the bond between aggregate and paste surfaces, and it has positive effects on fracture toughness, compressive strength and tensile strength (Lam et al., 1998).

To simulate the fracture behavior of concrete in numerical models of concrete, depending on the model, some parameters such as fracture energy, fracture toughness and critical effective crack-tip opening displacement ($CTOD_c$ or δ_c), which generally are known as fracture parameters, must be determined. In this regard, Peterson (1980) showed that the fracture parameters are significantly affected by water to cement ratio (w/c) and the quality of aggregate. In other words, by reducing w/c or using stronger aggregate, the fracture energy of concrete increases.

In this study, the effect of w/c and silica fume on the fracture toughness and fracture energy of SCLC has been investigated. Therefore, by making six mix designs and 126 concrete specimens, fracture parameters, mechanical properties and the workability of fresh concrete were carefully studied. Initially, four mix designs with the w/c of 0.37, 0.42, 0.47 and 0.52 were made. Afterwards, by replacing 0, 5% and 10% of the weight of cement with silica fume, the effects of changing this parameter on the fracture parameters of SCLC were studied.

2. Properties of materials and test method

In this experimental study, natural river sand with the maximum size of 4.75 mm was used as fine-aggregate and lightweight expanded clay aggregate (LECA) with the maximum size of 12.5 mm was used as coarse aggregate. Portland cement type 1-425 and silica fume were used as cementations materials. To achieve appropriate workability and viscosity in fresh concrete, limestone powder and poly-carboxylate based superplasticizer (SP) were used in concrete production.

In this study, the size effect method has been used to determine the fracture toughness and fracture energy of SCLC. In this method, the fracture parameters of each mix design were obtained by performing three-point bending tests on 12 notched beams. For each of the mixes, beams with four different dimensions were used; each of them was geometrically similar in two dimensions. Three specimens were made from each of the dimensions of the beam, and totally for six mix designs, 72 beam samples were made to determine the failure

* Corresponding Author

E-mail addresses: hsalehi1362@yahoo.com (Hasan Salehi), mazloom@sru.ac.ir (Moosa Mazloom).

parameters. According to RILEM FMT-89 Recommendations (1990), in this study, the largest aggregate size (LECA) was considered to be 12.5 mm; therefore, the thickness of all specimens was 38.1 mm. The ratios of length and span to depth were equal to 2.67 and 2.5 in all the beams. Furthermore, the notches to depths ratios of the beams were considered to be 0.2.

3. Experimental results

3.1. Workability and mechanical properties

After mixing SCLC, the workability of fresh concrete was evaluated according to EFNARC guidelines by slump flow tests, U-box and J-ring (EFNARC, 2002). According to the results, the rheological properties of all fresh concrete mixtures satisfied the requirements of the EFNARC guidelines (2002). However, with the addition of silica fume to each mixture, its slump flow diameter was reduced. Therefore, the mixtures containing silica fume needed more SP to maintain their acceptable workability.

Then, the effect of changes in w/c and the use of different percentages of silica fume on the compressive strength, tensile strength and modulus of elasticity of concrete were investigated.

By reducing w/c from 0.52 to 0.37, the compressive strength (f_c) of SCLC increased up to about 68%. Moreover, when 5 and 10% of the cement weight was replaced with silica fume, f_c of SCLC increased by about 18% and 30%, respectively. By decreasing the w/c from 0.52 to 0.37, the tensile strength and modulus of elasticity of self-compacting lightweight concrete increased by about 57% and 28%, respectively. It is also observed that by increasing the percentage of silica fume, all the mechanical properties of concrete improved.

3.2. Fracture parameters resulting from size effect method

Table (1) and Fig. (1) show the changes in fracture energy and fracture toughness of all mix designs. As can be seen in the figure, by decreasing w/c from 0.52 to 0.37, the G_f value increased from 12.05 to 33.35 N/m; in other words, with this decrease in w/c, the G_f value increased about 176%. By replacing 5 and 10% of the cement weight with silica fume, the amount of fracture energy increased by 19.4% and 24.2%, respectively. Therefore, the maximum fracture energy of this research was obtained in w/c of 0.37 and silica fume replacement level of 10%.

Table 1: Fracture parameters of different SCLC mix designs.

Mix ID	C37	C42	C47	C52	C37SF5	C37SF10
G_f (N/m)	33.35	27.86	16.88	12.05	39.84	41.45
K_{Ic} (MPa $\text{mm}^{0.5}$)	27.20	23.36	17.43	14.43	30.96	32.17
f_c (MPa)	37.71	30.20	24.78	22.38	44.63	49.01
f_t (MPa)	2.88	2.58	2.02	1.83	3.24	3.46

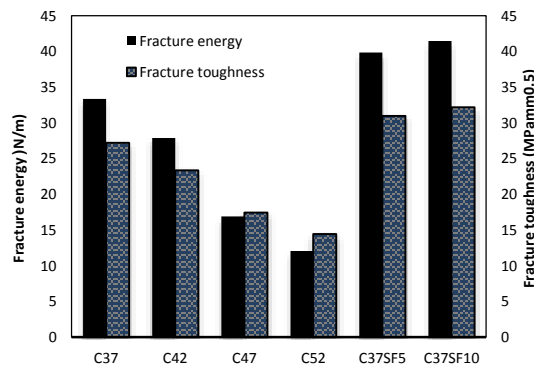


Fig. 1. Fracture energy and fracture toughness of various SCLC mixes

Fracture toughness (K_{Ic}) is another significant parameter in concrete fracture mechanics. In this study, the fracture toughness of SCLC changed between 14.43 to 32.17 MPa $\text{mm}^{0.5}$. The results showed that K_{Ic} increased with decreasing w/c. For different mix designs, by changing w/c from 0.52 to 0.37, the K_{Ic} value increased by 88% and reached from 14.43 to 27.2 MPa $\text{mm}^{0.5}$. As the results show, the fracture toughness of SCLC increased by using silica fume. The amount of K_{Ic} in the control mixture (w/c= 0.37) was equal to 27.2. By replacing 5% of the cement weight with silica fume, this parameter increased by about 14% and reached 30.96 MPa $\text{mm}^{0.5}$.

By replacing 10% of the cement weight with silica fume, the fracture toughness increased by 18.3% and reached 32.17 MPa.mm^{0.5}.

In this research, based on experimental studies performed on SCLC, a relationship between the fracture energy and compressive strength with a determination coefficient of 0.93 and a very suitable relationship between K_{Ic} and f_c with a determination coefficient of 0.96 have been expressed.

$$G_f = 3.47(f_c)^{0.69} \quad (1)$$

$$K_{Ic} = 1.22(f_c)^{1.05} \quad (2)$$

That G_f , K_{Ic} and f_c are based on N/m, MPa.mm^{0.5} and MPa, respectively.

4. Conclusions

This study investigates the effects of water to cement ratio (w/c) and silica fume on the fracture parameters and mechanical properties of self-compacting lightweight concrete (SCLC), and the following main results have been obtained:

- 1) By reducing w/c from 0.52 to 0.37, the compressive strength, tensile strength and elastic modulus of SCLC improved about 68%, 57% and 28%, respectively.
- 2) By decreasing the w/c from 0.52 to 0.37, the value of fracture energy (G_f) increased about 2.7 times, and the amount of fracture toughness (K_{Ic}) increased by 88%.
- 3) The fracture energy of the samples containing 5% and 10% silica fume were 19.4% and 24.2% higher than the control samples, respectively. Furthermore, in these cases, the fracture toughness of SCLC improved by 14% and 18.3%, respectively.

5. References

- Efnarc, "Specification and guidelines for self-compacting concrete", UK. English, European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems Norfolk, 2002.
- Jalal M, Mansouri E, Sharifipour M, Pouladkhan AR, "Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO₂ micro and nanoparticles", *Materials & Design*, 2012, 34, 389-400.
- Lam L, Wong Y, Poon C-S, "Effect of fly ash and silica fume on compressive and fracture behaviors of concrete", *Cement and Concrete research*, 1998, 28, 271-283.
- Petersson PE, "Fracture energy of concrete: practical performance and experimental results", *Cement and Concrete research*, 1980b, 10 (1), 91-101.
- Rilem_Fmt-89, "Size-effect method for determining fracture energy and process zone size of concrete", 1990, 23, 461-465.