

بررسی آزمایشگاهی پارامترهای شکست، خواص مکانیکی و جمع‌شدگی بتن سبک دانه

علیرضا حسینی محراب

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

محمدرضا اصفهانی*

استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

چکیده

استفاده از سبک دانه‌ها به دلیل کاهش وزن بتن روزبه‌روز افزایش یافته است. از طرفی سبک دانه‌ها منجر به تغییر در رفتار شکست بتن در مقایسه با سنگ‌دانه معمولی می‌شوند. با توجه به ضعف روش‌های مقاومتی در طراحی اعضای بتنی، پژوهشگران و آیین‌نامه‌های طراحی، تحلیل سازه‌های بتنی و تعیین خواص و مشخصه‌های بتن به روش مکانیک شکست را ضروری می‌دانند. در این پژوهش آزمایشگاهی و تحلیلی، رفتار شکست اعضای بتنی ساخته‌شده از بتن سبک با استفاده از روش کار شکست و روش اثر اندازه بر روی تیرهای شکافدار بررسی می‌شوند. همچنین، خواص مکانیکی و جمع‌شدگی بتن سبک مورد مطالعه قرار می‌گیرند. در مجموع ۳۰ عدد نمونه منشوری خمشی و ۴۲ عدد نمونه جهت تعیین پارامترهای شکست، خواص مکانیکی و جمع‌شدگی از بتن سبک ساخته و آزمایش شدند. نتایج آزمایش‌ها و تحلیل‌ها نشان می‌دهند که نظریه اثر اندازه بازانت رفتار شکست اعضای بتنی سبک را به خوبی ارزیابی می‌کند. در نمونه‌های آزمایش‌شده، انرژی شکست کل G_F در بتن سبک نسبت به بتن معمولی به دلیل کمتر بودن ظرفیت نهایی آن، به میزان ۶۸/۱٪ کمتر شده است. این در حالی است که انرژی شکست اولیه G_{F1} حاصل از روش اثر اندازه در بتن سبک در مقایسه با بتن معمولی قدری بیشتر است. مطابق نمودارهای حاصل از روش اثر اندازه، بتن سبک در مقایسه با بتن معمولی شکل‌پذیری بیشتر و تندی کمتری داشته است. همچنین، روش اثر اندازه دارای دقت مناسب‌تری نسبت به روش کار شکست جهت مطالعه رفتار شکست بتن سبک است. استفاده از سبک دانه بجای سنگ‌دانه معمولی در بتن باعث کاهش جمع‌شدگی بتن می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بتن سبک، انرژی شکست، اثر اندازه، جمع‌شدگی، چقرمگی.

* نویسنده مسئول: esfahani@um.ac.ir

۱- مقدمه

مکانیکی و پارامترهای شکست نظیر انرژی شکست اولیه و منطقه صدمه دیده نوک ترک تیرهای شکافدار در بتن سبک حاوی سنگدانه سبک پت (PET^۵) نسبت به بتن معمولی بیشتر شدند. کرم‌لو و همکاران^۶ [۷] نشان دادند که خواص مکانیکی و انرژی شکست بتن سبک به سبک دانه وابسته است و در صورت پایین بودن مقاومت سبک دانه‌ها، خاصیت مکانیزم پلی^۷ در بتن کاهش می‌یابد و قفل و بست روی نخواهد داد. در زمینه مکانیک شکست، ساهو و همکاران^۸ [۱۱] و صدرممتازی و همکاران^۹ [۱۲] نیز به بررسی اثرگذاری نوع سنگدانه بر جذب انرژی، چقرمگی و شکل‌پذیری بتن در روش‌های کار شکست و اثر اندازه پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند که نوع سنگدانه و مقاومت آن منجر به افزایش جذب انرژی، انرژی شکست و شکل‌پذیری بتن می‌شود. علاوه بر این، تانگ و همکاران^{۱۰} [۱۳] مشاهده کردند که انرژی شکست و طول مشخصه بتن حاوی سبک دانه خاکستر بادی منبسط^{۱۱} برابر با بتن حاوی سنگدانه معمولی است. آن‌ها مشاهده کردند که تفاوت چندانی بین رفتار شکست بتن سبک دانه و بتن معمولی وجود ندارد. همچنین، شکل‌پذیری بتن سبک دانه نسبت به بتن معمولی بیشتر است. با توجه به تفاوت در نتایج و رفتار شکست بتن سبک در مقایسه با بتن معمولی و عدم وجود مطالعه‌های کافی در زمینه بررسی پارامتر اثر اندازه و مکانیک شکست بتن سبک، در این پژوهش چقرمگی، اثر اندازه و پارامترهای شکست بتن حاوی سبک دانه صنعتی مشهد با استفاده از روش کار شکست (WFM^{۱۲}) و روش اثر اندازه (SEM^{۱۳}) بررسی شد و با بتن حاوی سنگدانه معمولی مقایسه شد. همچنین، خواص مکانیکی و جمع‌شدگی بتن سبک و بتن معمولی بررسی شدند.

۲- طراحی و ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

۲-۱- مشخصات مصالح

سیمان مصرفی در این پژوهش از نوع سیمان پرتلند تیپ ۲ سیمان مشهد است. نرمی آن بر طبق مشخصات شرکت سیمان مشهد برابر

با توجه به پژوهش‌ها و مطالعه‌های انجام شده، استفاده از سبک دانه‌ها در بتن منجر به سبک شدن آن می‌شود. این در حالی است که استفاده از سبک دانه‌ها در بتن منجر به تولید بتنی با مقاومت پایین‌تر نسبت به بتن معمولی می‌شود. همچنین استفاده از سبک دانه‌ها به جای سنگ‌دانه‌های معمولی، رفتار شکست بتن را تغییر می‌دهد [۱]. بنابراین استفاده از علم مکانیک شکست برای بتن سبک دانه با توجه به خواص متفاوت آن و مقاومت پایین‌تر آن بسیار مهم است. علم مکانیک شکست به بررسی نحوه ترک خوردن سازه‌ها، پاسخ سازه ترک خورده تحت بارهای وارده و خرابی سازه در نتیجه رشد و توسعه ترک اولیه، می‌پردازد [۲] و بهتر می‌تواند رفتار بتن سبک دانه و جذب انرژی آن را مورد بررسی قرار دهد. از آنجا که در اغلب بتن‌های سبک دانه، به‌خصوص در بتن‌های حاوی نسبت‌های آب به سیمان پایین، مقاومت سبک دانه‌ها نسبت به خمیر سیمان و ناحیه انتقال داخلی^۱ بین خمیر سیمان و سنگدانه ضعیف‌تر و متخلخل‌تر است، محل رشد و گسترش ترک‌ها از ناحیه سبک دانه است [۳-۸]. همچنین، مقاومت فشاری، کششی، خمشی و ضریب ارتجاعی بتن سبک دانه نسبت به بتن با سنگدانه معمولی کمتر است [۴-۸]. علی و همکاران [۹] گزارش کردند که شکل‌پذیری و انرژی شکست در بتن سبک حاوی سبک دانه نسبت به بتن معمولی کمتر است [۹]. کویی و همکاران^۲ [۶] در پژوهشی به مقایسه بتن سبک دانه شیل منبسط^۳ و بتن معمولی با مقاومت فشاری یکسان بر روی تیرهای خمشی سه نقطه‌ای شکافدار در زمینه انرژی شکست و چقرمگی پرداختند و مشاهده کردند که ضعیف‌ترین بخش در بتن سبک دانه، سبک دانه‌ها هستند که مقاومت کمتری نسبت به ناحیه انتقال داخلی بین خمیر سیمان و سنگدانه، و خمیر سیمان دارند. به همین دلیل انرژی شکست بتن معمولی نسبت به بتن سبک دانه شیل منبسط با یک مقاومت فشاری یکسان به مقدار ۸۰٪ بیشتر است. در حالی که در پژوهش نیک بین و همکاران^۴ [۱۰]. مشاهده می‌شود که خواص

⁸ Sahoo et al
⁹ Sadrmomtazi et al

¹⁰ Tang et al

¹¹ High strength sintered fly ash lightweight aggregate

¹² Work of fracture method

¹³ Size effect method

¹ Internal transition zone

² Cui et al

³ Shale

⁴ Nikbin et al

⁵ Polyethylene terephthalate

⁶ Karamloo et al

⁷ Bridging mechanism

آن آب و فوق روان کننده به صورت تدریجی در مدت ۲ دقیقه به مخلوط اضافه شدند. در آخر اختلاط به مدت ۲ دقیقه ادامه یافت. در بتن سبک دانه قبل از اختلاط، سبک دانه‌ها به مدت یک ساعت در آب مستغرق شدند تا جذب آب سبک دانه‌ها کاهش یابد و اسلامپ و کارایی بتن کاهش نیابد. پس از ریختن بتن در قالب‌ها، نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از قالب‌ها خارج گشته و بنا به حفظ شرایط کارگاهی، کلیه نمونه‌های آزمایشگاهی ۲۸ روز عمل‌آوری شدند.

جدول ۱- ترکیب‌های شیمیایی مصالح مصرفی (%)

سبک دانه	میکروسیلیس	سیمان	نوع اکسید
۵۸/۴۸	۹۳/۶	۲۱/۰	SiO_2
۱۶/۵۷	۱/۳	۴/۶	Al_2O_3
۶/۶۵	۰/۳	۳/۹	Fe_2O_3
۲/۳۳	۰/۴۹	۶۲/۵	CaO
۲/۳	۰/۹۷	۲/۹	MgO
۰/۴	۰/۱	۲/۰	SO_3
۱/۴	۰/۳۱	۰/۵	Na_2O
۲/۹۱	۱/۰۱	۰/۴۵	K_2O
۷/۳۷	....	۱/۴	$L.O.I$
....	۰/۵	....	SiC
....	۰/۳	....	C
۰/۱۶	۰/۱۶	....	P_2O_5
۰/۷۷	....	....	TiO_2

۳۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب است و مقاومت نهایی ۳، ۷ و ۲۸ روزه ملات سیمان به ترتیب برابر ۱۹/۵، ۳۱ و ۴۹/۵ مگاپاسکال است [۱۴]. زمان گیرش اولیه تقریباً ۲۰۰ دقیقه و زمان گیرش نهایی آن تقریباً ۲۴۰ دقیقه است [۱۴]. سنگ‌دانه‌های مصرفی در این پژوهش، سنگدانه معمولی، سبک دانه و ماسه هستند. سنگدانه درشت استفاده شده از نوع سنگدانه معمولی با اندازه دانه‌بندی ۴/۷۵ الی ۱۹ میلی‌متر بوده است. سبک دانه مصرفی در این پژوهش از نوع سبک دانه شکسته پوک‌ه صنعتی مشهد با اندازه دانه‌بندی ۴/۷۵ الی ۱۹ میلی‌متر و چگالی معادل ۱۰۶ کیلوگرم بر متر مکعب است. مطابق استاندارد ASTM C127 [۱۵]، جذب آب یک ساعت آن ۱۱/۶٪ و ۲۴ ساعت آن به مقدار ۱۳/۱٪ است. ماسه مورد استفاده در این پژوهش از نوع ماسه رودخانه دو بار شور با حداکثر اندازه ۴/۷۵ میلی‌متر است و مطابق استاندارد ASTM C136 [۱۶]، ضریب نرمی ماسه برابر ۲/۷۹ بدست آمد. میکروسیلیس مورد استفاده در این پژوهش از شرکت ژیکواوا بوده است [۱۷]. سطح ویژه ذرات آن ۲۰ متر بر گرم است. اندازه ذرات آن بین ۰/۵ الی ۰/۵ میکرون است. مشخصات شیمیایی سیمان، سبک دانه و میکروسیلیس در جدول ۱ شرح داده شد [۱۴، ۱۷ و ۱۸]. دانه‌بندی کلیه سنگ‌دانه‌های ریز و درشت در جدول ۲ بنا به دو استاندارد ASTM C33 [۱۹] و ASTM C330 [۲۰] آورده شده است. در این پژوهش از فوق روان کننده بر پایه کربوکسیلات شرکت آرشیا اورنگ مدل کریزو با وزن مخصوص ۱/۰۸ گرم بر سانتیمتر مکعب استفاده شد.

۲-۲- طرح اختلاط‌های بتن

در این پژوهش طرح اختلاط بتن حاوی سبک دانه پوک‌ه صنعتی مشهد (M1-LWAC) جهت مطالعه اثر سبک دانه صنعتی مشهد بر خواص مکانیکی و پارامترهای مکانیک شکست ارائه شد. طرح اختلاط بتن حاوی سنگدانه معمولی (M2-NWC) جهت مقایسه فراهم گردید. دو طرح اختلاط بتن در جدول ۳ نشان داده شدند.

۳-۲- ساخت، آماده‌سازی و نگهداری نمونه‌های بتنی

روش ساخت بتن بدین صورت است که ابتدا سنگ‌دانه‌های ریز و درشت در مخلوط کن به مدت ۵ دقیقه مخلوط شدند. سپس سیمان و میکروسیلیس به مخلوط اضافه و ۲ دقیقه مخلوط شدند. پس از

۴-۲- روش آزمایش

در این پژوهش، آزمایش‌های لازم جهت بررسی چقرمگی، مکانیک شکست و خواص مکانیکی بتن سبک دانه و بتن معمولی بررسی شدند. ضریب گسیختگی f_r و چقرمگی T_{150}^D بر تیرهای بدون شکاف با ابعاد $100 \times 100 \times 350$ (طول \times ارتفاع \times عرض) میلی‌متر تحت آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای مطابق استانداردهای ASTM C78 [۲۱] و ASTM C1609 [۲۲] مطالعه شدند. چقرمگی بتن T_{150}^D مطابق استاندارد ASTM C1609 [۲۲] با بدست آوردن مساحت زیر منحنی بار- تغییر مکان تیرهای خمشی تا تغییر مکان $S/150$ بدست می‌آید. S در اینجا طول دهانه تیر (۳۰۰ میلی‌متر) است. جهت بررسی پارامترهای مکانیک شکست از

روش کار شکست (WFM) و اثر اندازه (SEM) استفاده شده

است. روش کار شکست (WFM) بر حسب استاندارد RILEM

TC 50 FMC [۲۳] بر روی تیرهایی با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۳۵۰

میلیمتر (طول×ارتفاع×عرض) مطابق استاندارد ASTM C1609

[۲۲] صورت گرفته است. در این تیرها پهنای شکاف ۳ میلیمتر و

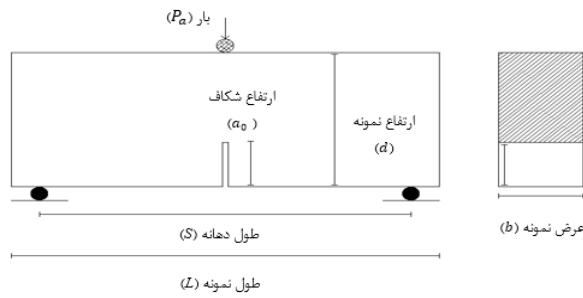
ارتفاع شکاف، ۳۳٪ عمق تیرها است. طول دهانه تحت آزمایش ۳۰۰

میلیمتر است. در این روش، هیلبرگ^۱ [۲۳] از آزمایش تیرهای

شکافدار تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای (شکل ۱) جهت محاسبه

انرژی شکست کل G_F و طول مشخصه بتن l_{ch} استفاده کرد. در این

روش انرژی شکست کل G_F ، به کمک منحنی بار-تغییر مکان وسط



شکل ۱- تیر خمشی شکافدار تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای

$$G_F = \frac{w_t}{(d-a_0)b} = \frac{w_0+2P_w\delta_0}{(d-a_0)b} \quad (1)$$

جدول ۲- دانه بندی سنگدانه‌ها (درصد وزنی رد شده)

ریزدانه		درشت دانه				اندازه الک
ماسه	سبک دانه	سنگدانه معمولی				
بنا به آزمایش	بنا به ASTM C33	بنا به آزمایش	بنا به ASTM C330	بنا به آزمایش	بنا به ASTM C33	
۱۰۰	.....	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۲۵ میلیمتر
۱۰۰	.....	۹۰/۴	۱۰۰-۹۰	۸۰/۵	۱۰۰-۹۰	۱۹ میلیمتر
۱۰۰	.....	.....	.....	.....	.....	۱۲/۵ میلیمتر
۱۰۰	۱۰۰	۱۸/۵	۵۰-۱۰	۶/۳	۵۵-۲۰	۹/۵ میلیمتر
۹۸/۵	۱۰۰-۹۵	۵	۱۵-۰	۰	۱۰-۰	۴/۷۵ میلیمتر
۹۶	۱۰۰-۸۰	۲/۶	.....	۰	۵-۰	۲/۳۶ میلیمتر
۸۰/۳	۸۵-۵۰	۰	.....	۰	.....	۱/۱۸ میلیمتر
۳۹/۲	۶۰-۲۵	۰	.....	۰	.....	۶۰۰ میکرومتر
۶/۵	۳۰-۵	۰	.....	۰	.....	۳۰۰ میکرومتر
۰/۶۶	۱۰-۰	۰	۱۰-۰	۰	.....	۱۵۰ میکرومتر

جدول ۳- طرح‌های اختلاط بتن بر حسب (kg/m^3)

آب	نسبت آب به مواد سیمانی (سیمان و میکروسیلیس)	فوق روان کننده	ماسه	سنگدانه درشت		سیمان	میکروسیلیس	طرح اختلاط
				سبک دانه	معمولی			
۱۸۸/۲	۰/۳۷۵	۱/۸	۷۶۵	۳۵۰	...	۴۵۰	۵۰	M1-LWAC
۱۸۸/۲	۰/۳۷۵	۳/۵	۷۶۵	...	۸۷۵	۴۵۰	۵۰	M2-NWC

در شکل ۲ و رابطه (۱)، w_1 کار نیروی وزن بتن است. این کار w_2 در نظر معادل نیروی P_w در جابه‌جایی δ_0 است. w_2 کار وزن لوازم وصل می‌گیرند. w_0 کار ناشی از بار اعمال شده P_a توسط دستگاه بر

¹ Hillerborg

بتن شکل پذیر، زمانی که $10 \leq \beta \leq 0.1$ باشد، رفتار بتن غیر خطی و زمانی که $\beta > 10$ باشد، رفتار بتن خطی است. با استفاده از پارامترهای رابطه (۴) می‌توان برازش خطی $Y = AX + C$ را جهت بدست آوردن شیب خط A و عرض از مبدأ C استفاده کرد.

$$Y = AX + C \quad (4)$$

$$X = d, Y = \left(\frac{1}{\sigma_N}\right)^2, d_0 = \frac{C}{A}, B = \frac{1}{\sqrt{C}}$$

در ادامه بازانت و کاظمی [۲۵] نشان دادند که انرژی شکست اولیه G_f و منطقه صدمه دیده نوک ترک C_f با استفاده از رابطه (۵) قابل محاسبه هستند.

$$G_f = \frac{g(\alpha_0)}{E \times A}, C_f = \frac{g(\alpha_0)}{g'(\alpha_0)} \left(\frac{C}{A}\right) \quad (5)$$

در رابطه (۵)، E ضریب ارتجاعی، $g(\alpha_0)$ ضریب هندسه عضو و $g'(\alpha_0)$ مشتق اول ضریب هندسه عضو هستند که بر حسب $\alpha_0 = \frac{a_0}{d}$ مطابق روابط موجود در استاندارد RILEM TC-89 [۲۴] قابل محاسبه هستند. ضریب شدت تنش از رابطه (۶) نیز بدست می‌آید.

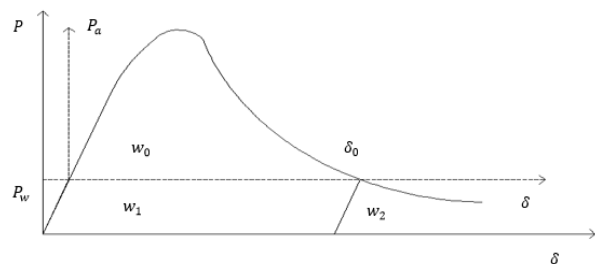
$$K_I = \sqrt{E G_f} \quad (6)$$

آزمایش‌های خواص مکانیکی نظیر مقاومت فشاری مطابق استاندارد ASTM C39 [۲۶] بر نمونه‌های مکعبی $150 \times 150 \times 150$ میلیمتر، مقاومت شکافت کششی^۲ مطابق استاندارد ASTM C469 [۲۷] بر نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد قطر ۱۰۰ میلیمتر و ارتفاع ۲۰۰ میلیمتر، ضریب ارتجاعی مطابق استاندارد ASTM C496 [۲۸] بر روی نمونه‌های استوانه با قطر ۱۵۰ میلیمتر و ارتفاع ۳۰۰ میلیمتر صورت گرفته است. وزن مخصوص خشک بتن بر نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰۰ میلیمتر در گرمخانه بادمای ۱۱۰ درجه سلسیوس بدست آمد. آزمایش جذب آب مطابق استاندارد ASTM C642 [۲۹] بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰۰ میلیمتر صورت گرفته است. آزمایش جمع شدگی خشک شدن^۳ و خطی^۴ مطابق استاندارد ASTM C157 [۳۰] و ASTM C426 [۳۱] بر روی نمونه‌های منشوری با ابعاد $75 \times 75 \times 285$ میلیمتر (طول \times ارتفاع \times عرض) بررسی شده است. در شکل ۳ برخی از این آزمایش‌ها نشان داده شدند. برای هر آزمایش سه نمونه مشابه ساخته شد و نتیجه‌ها میانگین گیری شدند.

نمونه بتنی است. باید دقت کرد از آنجا که در ساخت نمونه‌ها از ابعاد مطابق استاندارد ASTM C1609 [۲۲] استفاده شده است، لازم است تا مساحت زیر نمودار بار- تغییر مکان وسط دهانه تیر شکافدار تا مقدار تغییر مکان $S/150$ بدست آید.

از نظر هیلبرورگ [۲۳] طول مشخصه بتن l_{ch} ، شکل پذیری بتن را نشان می‌دهد. با استفاده از رابطه (۲) می‌توان این طول مشخصه بتن l_{ch} را محاسبه کرد.

$$l_{ch} = \frac{E \times G_f}{f_t^2} \quad (2)$$



شکل ۲- منحنی بار- تغییر مکان وسط دهانه تیر شکافدار

در روش اثر اندازه مکانیک شکست (SEM) مطابق با استاندارد RILEM TC-89 [۲۴] از تیرهای شکافدار با هندسه مشابه و اندازه‌های متفاوت با اندازه مشخصه D استفاده شده است. این اندازه مشخصه D همان ارتفاع تیر d است. مطابق استاندارد RILEM TC-89 [۲۴] ارتفاع تیر d باید سه برابر حداکثر اندازه سنگدانه [۲۴] باشد. بر طبق این استاندارد حداقل سه ارتفاع متفاوت باید استفاده شود که در اینجا سه ارتفاع d برابر ۷۰، ۱۴۰ و ۲۸۰ میلیمتر استفاده شده است. کلیه تیرهای شکافدار دارای عرض b به اندازه ۷۰ میلیمتراند. مطابق با استاندارد RILEM TC-89 [۲۴]، نسبت طول کل تیر به ارتفاع تیر L/d ، نسبت طول دهانه به ارتفاع تیر S/d و نسبت ارتفاع شکاف به ارتفاع تیر a_0/d به ترتیب برابر با $2/5$ ، $2/15$ و 0.2 هستند. در این تیرها نیز پهنای شکاف ۳ میلیمتر گرفته شده است. در روش اثر اندازه مقاومت اسمی σ_N برای تیرهای شکافدار با هندسه مشابه از رابطه‌ی (۳) به دست می‌آید.

$$\sigma_N = \frac{B f_t'}{\sqrt{1+\beta}} \quad \beta = \frac{d}{d_0} \quad (3)$$

در این رابطه β عدد تردی [۲۵] است. زمانی که $\beta < 0.1$ ، رفتار

³ Drying Shrinkage
⁴ Linear Shrinkage

¹ Linear Regression
² Splitting Tensile Strength

۳- نتیجه‌های آزمایش

۳-۱- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری نمونه‌های بتی در جدول ۴ نشان داده شد. مقاومت فشاری M1-LWAC نسبت به M2-NWC به میزان ۳۱/۵٪ کمتر شده است. این نکته اشاره به مقاومت بیشتر سنگدانه معمولی نسبت به سبک دانه صنعتی مورد استفاده دارد [۶ و ۹]. این مقاومت کمتر در سبک دانه‌ها نسبت به سنگ‌دانه‌های معمولی، منجر به کاهش ظرفیت باربری بتن شده و بتن با تحمل بار کمتری شکسته است.

۳-۲- مقاومت کششی

مطابق جدول ۴، مقاومت شکافت کششی M1-LWAC نسبت به M2-NWC به مقدار ۲۹٪ کمتر شده است. ترک در بتن معمولی از ناحیه انتقال داخلی بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها رشد می‌کند و مسیر رشد آن از اطراف سنگدانه‌ها است [۹]. در این صورت، ترک مسیر پر پیچ و خم تری را عبور کرده و احتمال قفل و بست سنگدانه‌ها نیز وجود دارد [۶ و ۹]. این قفل و بست سنگدانه‌ها منجر به افزایش ظرفیت تحمل بار و ظرفیت کششی بتن معمولی شده است. رشد و

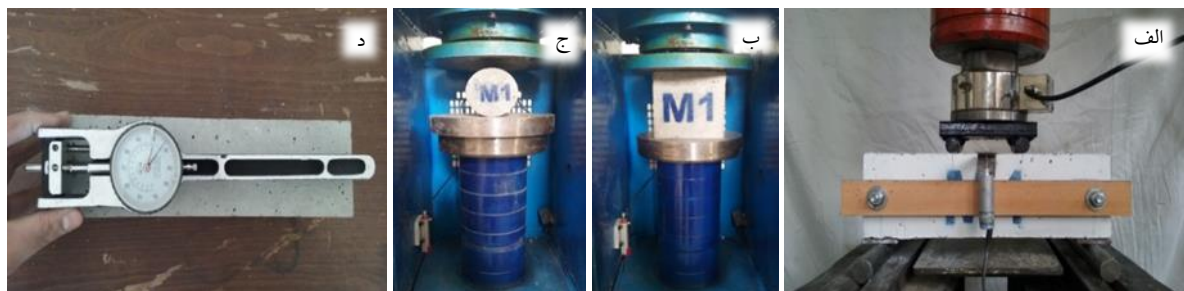
گسترش ترک در بتن سبک دانه از سبک دانه‌ها بوده و هیچ گونه قفل و بستی روی نداده است [۱۳]. بنابراین، مقاومت کششی بتن سبک دانه نسبت به بتن معمولی کمتر است.

۳-۳- ضریب ارتجاعی

ضریب ارتجاعی M2-NWC بنا به وجود سنگ‌دانه‌های مقاوم‌تر نسبت به سبک دانه‌ها، دو برابر M1-LWAC شده است (جدول ۴). در مقایسه با بتن سبک، ظرفیت باربری بتن معمولی به علت مقاومت بیشتر سنگدانه معمولی نسبت به سبک دانه بیشتر است. بنابراین، ضریب ارتجاعی بتن معمولی از سبک دانه بیشتر شده است [۶ و ۹].

۳-۴- جذب آب

بنا به جدول ۴، جذب آب M2-NWC تقریباً نصف M1-LWAC است. دلیل آن وجود میکروسیلیس است که ساختار ناحیه انتقال M2-NWC را متراکم کرده است. در ضمن سنگ‌دانه‌های معمولی هیچگونه تخلخلی جهت جذب آب ندارند.



شکل ۳- بخشی از آزمایش‌های صورت گرفته به ترتیب: (الف) ضریب گسیختگی و چقرمگی، (ب) مقاومت فشاری، (ج) مقاومت شکافت کششی و (د) آزمایش جمع شدگی

جدول ۴- نتیجه‌های خواص مکانیکی بتن

اسلامپ (mm)	جذب آب (%)	وزن مخصوص خشک گرمخانه (kg/m^3)	ضریب ارتجاعی E_c (GPa)	ضریب گسیختگی f_r (MPa)	مقاومت کششی f_t' (MPa)	مقاومت فشاری f_c' (MPa)	طرح اختلاط
۷۰	۹/۱	۱۷۴۴/۵	۱۸/۵	۳/۶	۲/۲	۴۰/۲	M1-LWAC
۹۰	۴/۵	۲۳۲۸/۱	۳۶/۶	۶/۳	۳/۱	۵۸/۷	M2-NWC

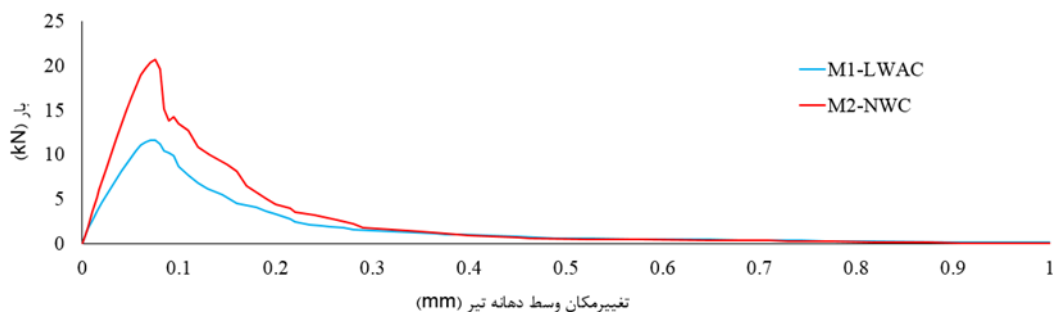
$$f_i = \frac{P_i S}{bh^2} \quad (7)$$

$$R_{150}^D = \frac{150T_{150}^D}{f_1 bh^2} \times 100\% \quad (8)$$

نتیجه‌های حاصل از هر یک از این تیرها در جدول ۵ نشان داده شده است. مطابق جدول ۵، M1-LWAC نسبت به M2-NWC، چقرمگی خمشی T_{150}^D کمتری به میزان ۲۸/۶٪ را نشان داده است، اما مقاومت خمشی معادل R_{150}^D مخلوط M1-LWAC، به علت تنش پسماند اولیه f_1 به مقدار ۱۸٪ بیشتر از M2-NWC است. همچنین مطابق منحنی شکل ۴ می‌توان نتیجه گرفت که منحنی M1-LWAC پس از بار حداکثر با نرمی بیشتری آفت داشته است

۳-۵- ضریب گسیختگی و چقرمگی

بر طبق جدول ۴، ضریب گسیختگی f_r مخلوط M2-NWC از M1-LWAC به میزان ۷۵٪ بیشتر شده است و دلیل آن مقاومت بیشتر سنگدانه معمولی نسبت به سبک دانه است. مطابق با استاندارد ASTM C1609 [۲۲]، جهت بدست آوردن چقرمگی خمشی T_{150}^D نیاز به مساحت زیر نمودار بار- تغییرمکان وسط دهانه تیر است. این مساحت بر طبق استاندارد ASTM C1609 [۲۲] تا مقدار تغییرمکان $S/150$ محاسبه شده است. در شکل ۴ نمودار بار- تغییرمکان وسط دهانه هر طرح نشان داده شد. سپس تنش‌های پسماند f_i و نرخ مقاومت خمشی معادل R_{150}^D با استفاده از دو رابطه‌ی (۷) و (۸) بدست می‌آید [۲۲].



شکل ۴- منحنی بار- تغییرمکان وسط دهانه تیرهای خمشی دو طرح اختلاط

جدول ۵- مشخصات تنش پسماند، چقرمگی و نرخ خمش معادل

نرخ مقاومت خمشی	چقرمگی خمشی	مساحت زیر نمودار	تنش پسماند	تنش پسماند	تنش پسماند	تنش پسماند	طرح اختلاط
معادل R_{150}^D (%)	T_{150}^D (kN.mm)	(kN.mm)	f_{150}^D (MPa)	f_{600}^D (MPa)	بار حداکثر f_p (MPa)	اولیه f_1 (MPa)	
۸/۰	۲	۲	۰	۰	۳/۶	۳/۴	M1-LWAC
۶/۸	۲/۸	۲/۸	۰	۰	۶/۳	۶/۳	M2-NWC

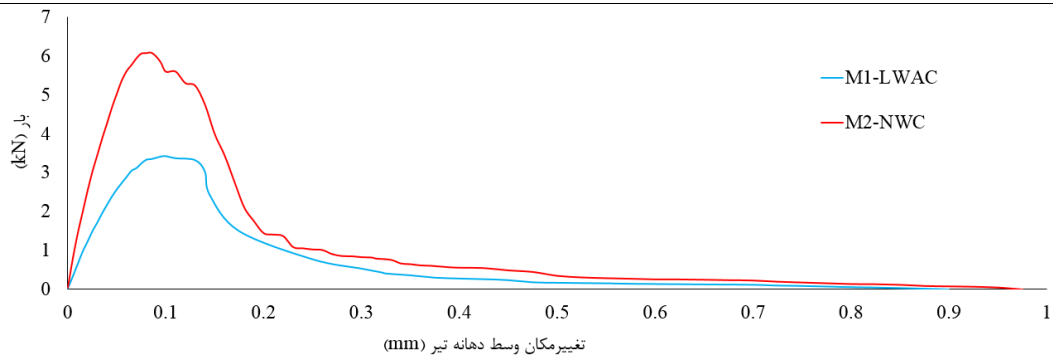
۳-۶- جمع‌شدگی خشک شدن

از اختلاط بتن سبک دانه به مدت یک ساعت پیش‌خیس شدند. این پیش‌خیس کردن بدلیل وجود فضاهای خالی در سبک دانه‌ها است که منجر به جذب آب بتن می‌شوند. پس از گیرش بتن سبک دانه، این آب جذب شده در سبک دانه‌ها، به تدریج از سبک دانه‌ها خارج شده و آب تبخیر شده از بتن سبک دانه را تأمین کرده است [۳۲ و ۳۳]. در نتیجه، در مقایسه با بتن معمولی، جمع‌شدگی بتن سبک دانه به علت پیش‌خیس کردن سبک دانه‌ها کاهش یافته است.

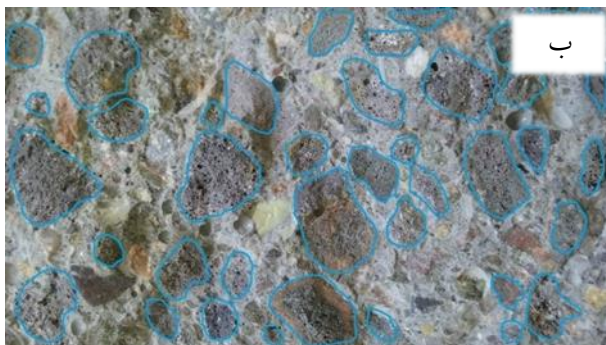
جمع‌شدگی خشک شدن دو طرح بتن در سن اولیه پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، ۲ روز در اتاق، ۷ روز در اتاق، ۱۴ روز در اتاق، ۲۸ روز در اتاق، ۵۶ روز در اتاق، ۹۰ روز در اتاق و ۱۸۰ روز در اتاق در دمای ۲۳ درجه سلسیوس با استفاده از کرنش‌سنج محاسبه شده است و در شکل ۵ نشان داده شد. مطابق شکل ۵، جمع‌شدگی خشک شدن M2-NWC نسبت به M1-LWAC بیشتر است. همانطور که ذکر شد، سبک دانه‌ها پیش

جدول ۶- نتیجه‌های انرژی شکست به روش کار شکست (WFM)

طول مشخصه بتن	انرژی شکست کل	ضریب ارتجاعی	مقاومت کششی	مقاومت فشاری	طرح اختلاط
l_{ch} (mm)	G_F (N/m)	E_c (GPa)	f_t' (MPa)	f_c' (MPa)	
۴۰۶/۱	۱۰۶/۳	۱۸/۵	۲/۲	۴۰/۲	M1-LWAC
۶۹۴/۷	۱۷۸/۷	۳۶/۶	۳/۱	۵۸/۷	M2-NWC



شکل ۸- منحنی بار- تغییر مکان وسط دهانه تیرهای شکافدار روش کار شکست



شکل ۹- نحوه‌ی شکست تیر شکافدار M1-LWAC، (الف) مسیر شکست M1-LWAC و (ب) سطح شکست M1-LWAC



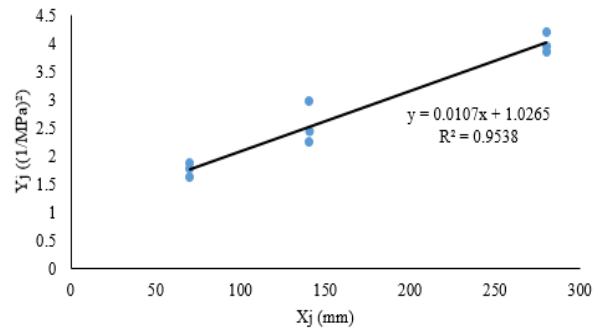
شکل ۱۰- نحوه‌ی شکست تیر شکافدار M2-NWC، (الف) مسیر شکست M2-NWC و (ب) سطح شکست M2-NWC (شکست از سنگدانه (قرمز) و شکست از ناحیه انتقال (آبی))

آوردن بار حداکثر است و رفتار بتن بعد از بار نهایی در نظر گرفته نمی‌شود. در این روش پس از بدست آوردن بار حداکثر، نیاز به بدست آوردن برازش خطی با استفاده از رابطه (۴) است. برای نمونه برازش خطی مخلوط M1-LWAC در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

۹-۳- بررسی روش اثر اندازه (SEM)

مهم‌ترین دلیل استفاده از مکانیک شکست در طراحی سازه‌های بتنی، توانایی مکانیک شکست در وارد کردن اثر اندازه در طراحی است. مهم‌ترین نوع اثر اندازه، کاهش مقاومت عضو به دلیل افزایش اندازه آن است [۲]. در روش اثر اندازه تنها نیاز به بدست

نتیجه‌های حاصل از آزمایش هر دو طرح اختلاط در جدول ۷ نشان داده شده است. پارامترهای شکست نظیر انرژی شکست اولیه G_f و منطقه‌ی صدمه دیده نوک ترک c_f مطابق رابطه (۵) محاسبه شدند و نتیجه‌های حاصل در جدول ۸ آورده شدند. عدد تردی β هر یک از تیرها در شکل ۱۲ نشان داده شده است. نمودار اثر اندازه بازانت و نتیجه‌های نمونه‌ها در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در شکل ۱۴، تیر شکافدار آزمایش اثر اندازه با عمق ۲۸۰ میلی‌متر نشان داده شد.



شکل ۱۱- برازش خطی مخلوط M1-LWAC

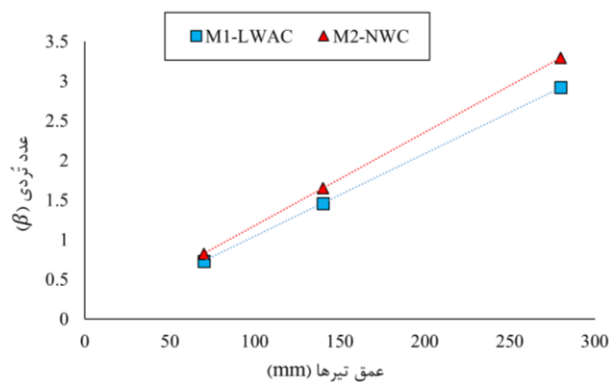
جدول ۷- نتیجه‌های بارحداکثر اصلاح شده برای تیرهای مختلف در آزمایش اثر اندازه

نیروی وارد بر تیر سوم (N)	نیروی وارد بر تیر دوم (N)	نیروی وارد بر تیر اول (N)	ارتفاع تیرها (d) (mm)	نسبت ارتفاع شکاف به ارتفاع تیر (a_0/d)	مقاومت فشاری f'_c (MPa)	طرح اختلاط
۳۵۸۸	۳۸۵۸/۱	۳۶۷۷/۹	۷۰			
۶۰۷۱/۹	۵۶۹۲/۲	۶۵۲۱/۶	۱۴۰	۰/۲	۴۰/۲	M1-LWAC
۹۵۴۷/۵	۹۸۵۸/۸	۹۹۹۶/۷	۲۸۰			
۵۰۱۹/۹	۵۳۸۰/۲	۵۸۶۰/۵	۷۰			
۹۰۸۹/۴	۸۹۱۰/۷	۸۶۷۲/۱	۱۴۰	۰/۲	۵۸/۷	M2-NWC
۱۴۳۸۷/۷	۱۳۴۱۲/۸	۱۳۶۲۸/۴	۲۸۰			

جدول ۸- پارامترهای شکست روش اثر اندازه

m	ω_c	ω_A	K_{IC} (MPa \cdot mm ^{0.5})	d_0 (mm)	Bf'_t (MPa)	c_f (mm)	G_f ($\frac{N}{m}$)	$g(\alpha_0)$	a_0/d	E (GPa)	f'_c (MPa)	طرح اختلاط
۰/۱۴	۰/۱۵	۰/۰۸	۲۶/۱	۹۵/۹	۱	۱۸/۳	۳۶/۹	۷/۳	۰/۲	۱۸/۵	۴۰/۲	M1-LWAC
۰/۱۹	۰/۲۲	۰/۱	۳۶/۱	۸۵/۰	۱/۵	۱۶/۲	۳۵/۶	۷/۳	۰/۲	۳۶/۶	۵۸/۷	M2-NWC

مقاومت بیشتر بتن معمولی را در برابر رشد و گسترش نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۲ کلیه طرح‌های بتن در این پژوهش به علت قرار گرفتن عدد تردی β ما بین ۰/۱ و ۱۰ دارای رفتار غیر خطی می‌باشند.



شکل ۱۲- عدد تردی β دو طرح اختلاط بتن

انرژی شکست اولیه G_f و منطقه صدمه دیده نوک ترک c_f مخلوط M2-NWC نسبت M1-LWAC به مقدار ۳/۵٪ و ۱۱/۵٪ کمتر شده است. اگرچه مطابق جدول ۷ ظرفیت نهایی طرح M2-NWC نسبت به M1-LWAC بیشتر است، اما در جدول ۸ مشاهده می‌شود که ضریب ارتجاعی طرح M2-NWC دو برابر طرح M1-LWAC است. بنابراین، انرژی شکست اولیه G_f و منطقه صدمه دیده نوک ترک c_f در مخلوط M2-NWC نسبت به M1-LWAC، کمتر شدند. شکست در M1-LWAC در این نمونه‌ها از سبک دانه‌ها بوده است. بنا به جدول ۹، ضریب شدت تنش بحرانی K_{IC} در مخلوط M2-NWC نسبت به مخلوط M1-LWAC به میزان ۳۸٪ بیشتر است. دلیل آن را می‌توان در بار حداکثری دید که مخلوط M2-NWC نسبت به M1-LWAC تحمل کرده است. افزایش ضریب شدت تنش K_{IC} در M2-NWC

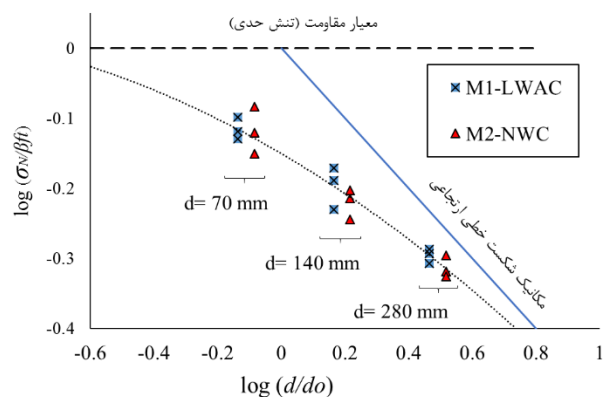
نسبت به بتن حاوی سبک دانه بیشتر است، اما حداکثر تغییر مکان بتن حاوی سبک دانه صنعتی برابر با بتن معمولی بوده است. همچنین اُفت بار پس از بار حداکثر در بتن سبک دانه نسبت به بتن معمولی کمتر است. این بدین معنا است که سبک دانه صنعتی، اگرچه بتن را در برابر بارگذاری کششی ضعیف‌تر می‌کند، اما شکل‌پذیری بیشتر بتن را به همراه دارد.

مطابق روش کار شکست (WFM) با در نظر گرفتن مساحت زیر منحنی بار- تغییر مکان وسط دهانه تیر، بتن حاوی سنگدانه معمولی به علت استحکام بیشتر و ظرفیت تحمل بار بیشتر، دارای انرژی شکست کل G_F و طول مشخصه بتن l_{ch} بیشتری نسبت به بتن حاوی سبک دانه صنعتی است. این در حالی است که در روش اثر اندازه (SEM)، جهت بدست آوردن انرژی شکست اولیه G_f و منطقه‌ی صدمه دیده نوک ترک C_f ، مساحت زیر منحنی بار- تغییر مکان وسط دهانه تیر در نظر گرفته نمی‌شود و ضریب ارتجاعی بتن در محاسبه انرژی شکست G_F دخالت دارد. بنابراین بتن حاوی سبک دانه دارای مقدار انرژی شکست اولیه G_f و منطقه صدمه دیده نوک ترک C_f بیشتری نسبت به بتن حاوی سنگدانه معمولی است و در مقایسه با روش کار شکست (WFM)، روش اثر اندازه (SEM) با دقت بیشتری رفتار شکست بتن سبک دانه را مطالعه کرده است.

جمع‌شدگی خشک شدن و خطی بتن حاوی سبک دانه صنعتی نسبت به بتن حاوی سنگدانه معمولی کمتر است. این کاهش جمع‌شدگی به علت آب جذب شده در سبک دانه‌ها است که سبک دانه‌ها این آب جذب شده را به تدریج در بتن پخش می‌کنند و مقداری از آب تبخیر شده از بتن را تأمین می‌کنند.

چقرمگی شکست K_{IC} در تیرهای شکافدار و چقرمگی T_{150}^D در تیرهای خمشی بدون شکاف بتن حاوی سنگدانه معمولی نسبت به بتن حاوی سبک دانه صنعتی، به علت بیشتر بودن استحکام و ظرفیت نهایی آن بیشتر است. این بیشتر بودن در چقرمگی شکست K_{IC} و چقرمگی T_{150}^D بتن حاوی سنگدانه معمولی به علت شکل‌پذیرتر بودن آن نسبت به بتن حاوی سبک دانه صنعتی نیست. مطابق منحنی بار- تغییر مکان وسط دهانه تیر، شکل‌پذیری بتن حاوی سبک دانه صنعتی نسبت به بتن حاوی سنگدانه معمولی بیشتر است. سایر خواص مکانیکی نظیر مقاومت فشاری، کششی، ضریب گسیختگی، ضریب ارتجاعی و جذب آب بتن حاوی سبک دانه نسبت به بتن حاوی سنگدانه معمولی، به علت وجود سبک‌دانه‌های متخلخل و ضعیف‌تر نسبت به سنگدانه معمولی، کمتر است.

مطابق جدول ۴ به علت دو برابر بودن ضریب ارتجاعی M2-NWC نسبت به M1-LWAC و ظرفیت بار نهایی بیشتر آن نسبت به M1-LWAC مطابق جدول ۷، دارای عدد تردی بیشتر و رفتار تردتری نسبت به M1-LWAC است. همچنین مطابق منحنی اثر اندازه بازانت در شکل ۱۳، مخلوط M2-NWC به خط مکانیک شکست خطی ارتجاعی نزدیک‌تر است و نشان دهنده‌ی تردتر بودن آن نسبت به M1-LWAC است و مخلوط M1-LWAC به معیار مقاومت نزدیک‌تر است و نشان‌دهنده شکل‌پذیرتر بودن آن نسبت به M2-NWC است.



شکل ۱۳- نتیجه‌های کلیه داده‌های آزمایشگاهی بر روی منحنی اثر اندازه بازانت



شکل ۱۴- نمونه‌ای از تیر شکافدار اثر اندازه مخلوط M1-LWAC با عمق ۲۸۰ میلی‌متر

۴- نتایج

در این پژوهش به بررسی خواص مکانیکی، انرژی شکست و پارامترهای شکست بتن با سبک دانه و سنگدانه معمولی پرداخته شد. در ادامه نتیجه‌های خواص مکانیکی و مکانیک شکست بتن‌ها آورده شده است.

بنا به منحنی‌های بار- تغییر مکان وسط دهانه تیرها چه شکافدار و چه بدون شکاف، اگرچه ظرفیت نهایی بتن حاوی سنگدانه معمولی

۵- مراجع

- [12] Sadrmomtazi A., Lotfi-Omran O. and Nikbin I.M. Influence of Cement Content and Maximum Aggregate Size on the Fracture Parameters of Magnetite Concrete Using WFM, SEM and BEM. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 2020.
- [13] Tang W.C., Lo T.Y. and Chan W.K. Fracture Properties of Normal and Lightweight High-Strength Concrete. *Magazine of Concrete Research* 2008; 60: 237–244.
- [14] Shargh Cement Company; <https://www.sharghcement.ir>. 2019.
- [15] ASTM C127. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate; 2007.
- [16] ASTM C136. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates; 2006.
- [17] Zhikava Chemical Industries; <https://www.zhikava.com>. 2019.
- [18] شرکت پوکه صنعتی مشهد. آزمایشگاه زمین شناسی دانشگاه فردوسی مشهد. ۱۳۹۸.
- [19] ASTM C33. Standard Specification of Concrete Aggregates; 2003.
- [20] ASTM C330. Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete; 2014.
- [21] ASTM C78. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading); 2010.
- [22] ASTM C1609. Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading); 2010.
- [23] RILEM FMC-50. Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-Point Bend Tests on Notched Beams. *Mater Struct* 1985.
- [24] RILEM TC-89. Size-Effect Method for Determining Fracture Energy and Process Zone Size of Concrete. *Mater Struct* 1990.
- [25] Bazant Z.P. and Kazemi M.T. Determination of Fracture Energy, Process Zone Length and Brittleness Number from Size Effect, with Application to Rock and Concrete. *International Journal of Fracture* 1990; 44: 111–131.
- [26] ASTM C39. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens; 2014.
- [27] ASTM C469. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. *American Society of Testing and Materials*; 2004.
- [28] ASTM C 496. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. *American Standards for Testing and Materials*; 2011.
- [1] Elfgren L. and Shah S.P. Analysis of Concrete Structures by Fracture Mechanics. *Proceeding of International RILEM Workshop: Chapman and Hall*, 1989.
- [۲] اصفهانی، محمدرضا. مکانیک شکست بتن. چاپ دوم. تهران: انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۹۶.
- [3] Karamloo M., Mazloom M. and Payganeh G. Influences of Water to Cement Ratio on Brittleness and Fracture Parameters of Self-Compacting Lightweight Concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, 2016.
- [4] Balendran R.V., Zhou F.P., Nadeem A. and Leung A.Y.T. Influence of Steel Fibres on Strength and Ductility of Normal and Lightweight High Strength Concrete. *Building and Environment* 2002; 37:1361-1367.
- [5] Zhou F.P., Balendran R.V. and Jeary A.P. Size Effect on Flexural, Splitting Tensile, and Torsional Strengths of High-Strength Concrete. *Cement and Concrete Research* 1998; 28: 1725–1736.
- [6] Cui H.Z., Yiu Lo T., Memon S.A. and Xu W. Effect of Lightweight Aggregates on the Mechanical Properties and Brittleness of Lightweight Aggregate Concrete. *Construction and Building Materials* 2012; 35: 149-158.
- [7] Karamloo M., Mazloom M. and Payganeh G. Effects of Maximum Aggregate Size on Fracture Behaviors of Self-Compacting Lightweight Concrete. *Construction and Building Materials* 2016; 123: 508–515.
- [8] Guneyisi E., Gesoglu M., Ozturan T. and Ipek S. Fracture Behavior and Mechanical Properties of Concrete with Artificial Lightweight Aggregate and Steel Fiber. *Construction and Building Materials* 2015; 84: 156-168.
- [9] Ali A., Soomro Z., Iqbal S., Bhatti N.K. and Abro A.F. Comparison of Mechanical Properties of Lightweight and Normal Weight Concretes Reinforced with Steel Fibers. *Engineering, Technology & Applied Science Research*; 2018; 8: 2741-2744.
- [10] Nikbin I.M., Farshamizadeh M., Jafarzadeh G.A. and Shamsi S. Fracture Parameters Assessment of Lightweight Concrete Containing Waste Polyethylene Terephthalate by Means of SEM and BEM Methods. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*; 107 (2020) 102518.
- [11] Sahoo S., Kumar S.A. and Suriya Prakash S. Mechanical Characterization of Structural Lightweight Aggregate Concrete Made with Sintered Fly Ash Aggregates and Synthetic Fibres. *Cement and Concrete Composites* 2020.

[29] ASTM C642. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete; 2013.

[30] ASTM C157. Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete; 2008.

[31] ASTM C 426. Standard Test Method for Linear Drying Shrinkage of Concrete Masonry Units; 2005.

[32] Ji T., Zheng D.D., Chen X.F., Lin X.J. and Wu H.C. Effect of Prewetting Degree of Ceramsite on the Early-Age Autogenous Shrinkage of Lightweight Aggregate Concrete. *Construction and Building Materials* 2015; 98: 102-111. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.102>.

[33] Byard E. Early-Age Behavior of Lightweight Aggregate Concrete. Doctor of Philosophy. Auburn University. Auburn. Alabama 2011.

An Experimental Study on Fracture Parameters, Mechanical Properties and Shrinkage of Lightweight Aggregate Concrete

Alireza Hosseini Mehrab

M.Sc., Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Mohammad Reza Esfahani *

Professor, Faculty of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Abstract

The use of lightweight aggregates in concrete has been widely increased to reduce the weight of concrete members. On the other hand, the fracture behavior of lightweight concrete is different with that in normal concrete. Due to the limitations of conventional designing methods for concrete members, researchers and design codes have led to consider the analysis of fracture mechanics in predicting the behavior of concrete structures. In this experimental and analytical study, the fracture behavior of lightweight aggregate concrete (LWAC) is investigated on notched beams using the work of fracture method (WFM) and size effect method (SEM). Also, the mechanical properties and shrinkage of LWAC are studied. A total of 30 bending prismatic specimens and 42 compressive samples were constructed and tested to determine the fracture parameters, mechanical properties and shrinkage of LWAC. The results of experiments and analyses show that the Bazant's size effect theory can evaluate the fracture behavior of lightweight concrete members, appropriately. The total fracture energy G_F of LWAC is by 68.1% less than that of normal concrete due to its lower load-bearing capacity. However, the initial fracture energy G_f obtained from the SEM in LWAC is approximately higher than that in normal concrete. According to the diagrams obtained from the SEM, the LWAC has more ductility and less brittleness than normal concrete. Additionally, the SEM is more accurate than the WFM to study the fracture behavior of LWAC. The use of lightweight aggregates instead of normal aggregates reduced the concrete shrinkage.

Keywords: Lightweight aggregate concrete, Fracture energy, Size effect, Shrinkage, Toughness.

* Corresponding Author: esfahani@um.ac.ir