

made with Lightweight of Fracture Energy of Structural Concrete Investigation Aggregate

A. Entezari^{1*}, J. Esmacili²

1- Assistant professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

2. Professor, Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

ABSTRACT

In this study, total fracture energy of Lightweight aggregate concrete as one of the parameters of fracture mechanics will be investigated experimentally. In the preparation of concrete, pumice and scoria aggregates from Azerbaijan-Iran region were used and according to the type of aggregates, four mix designs concrete have been considered for testing. For all the mix designs, the amount of cement, concrete plasticizer and curing conditions of the concrete samples are the same and only the type of aggregates is variable. To determine the fracture energy, 12 concrete prisms (500 x 100 x 100 mm in dimensions) with 40 mm notch depth (at the center of tensile side) for three-point flexural strength test were fabricated. This study research, the fracture energy of concrete was determined according to the RILEM (load-displacement curves) and Japan Concrete Institute Standard (crack mouth opening displacement curves). The fracture energy of concrete prepared from scoria aggregate for the compressive strength of 27.2-36.9 MPa in the limit of 70.9-110.3 N/m and pumice aggregate for the compressive strength of 23-24.4 MPa in the limit of 58-75.5 N/m is variable, which has a lower value compared to normal concrete with the same resistance conditions, this subject expresses the brittle behavior of lightweight aggregate concrete prepared with scoria and pumice compared to normal concrete.

ARTICLE INFO

Receive Date: 05 February 2024

Revise Date: 31 July 2024

Accept Date: 26 August 2024

Keywords:

Aggregate

Fracture energy

Lightweight concrete Pumice

Scoria

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.440542.3345](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.440542.3345)

*Corresponding author: Alireza Entezari.

Email address: a.entezari@azaruniv.ac.ir

بررسی تجربی انرژی شکست بتن سازه‌ای تهیه شده با سنگدانه‌های سبک

علی‌رضا انتظاری^{۱*}، جمشید اسماعیلی^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

در این تحقیق انرژی شکست کل (G^F) بتن سبک‌دانه به عنوان یکی از پارامترهای مکانیک شکست بصورت تجربی بررسی شده است. در تهیه بتن از سنگدانه‌های سبک پومیس و اسکوریا منطقه آذربایجان - ایران استفاده شده و با توجه به نوع سنگدانه‌ها، چهار طرح مخلوط برای انجام آزمایش در نظر گرفته شده است. برای تمامی طرح‌های مخلوط مقدار مواد سیمانی، روان کننده و شرایط نگهداری نمونه‌های بتن یکسان بوده و متغیر فقط نوع سنگدانه‌ها می‌باشد. برای تعیین انرژی شکست، ۱۲ نمونه بتنی به ابعاد $100 \times 100 \times 500$ میلی‌متر که در مرکز وجه کششی خود دارای شکافی به عمق ۴۰ میلی‌متر می‌باشند؛ تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای قرار گرفتند. در این تحقیق انرژی شکست بتن مطابق آیین‌نامه RILEM و از روی منحنی بار - تغییر مکان و آیین‌نامه بتن ژاپن با استفاده از منحنی بار - باز شدگی دهانه ترک تعیین گردید. انرژی شکست بتن تهیه شده از سنگدانه اسکوریا برای مقاومت فشاری $27/2 - 36/9$ MPa در محدود N/m $110/3 - 70/9$ و از سنگدانه پومیس برای مقاومت فشاری $23 - 24/4$ MPa در محدود $58 - 75/5$ N/m متغیر بوده که در مقایسه با بتن معمولی با شرایط مقاومتی یکسان مقدار کمتری را دارد؛ این موضوع ترد بودن رفتار بتن سبک‌دانه تهیه شده با اسکوریا و پومیس نسبت به بتن معمولی را بیان می‌کند.

کلمات کلیدی: اسکوریا، انرژی شکست، بتن سبک، پومیس، سنگدانه

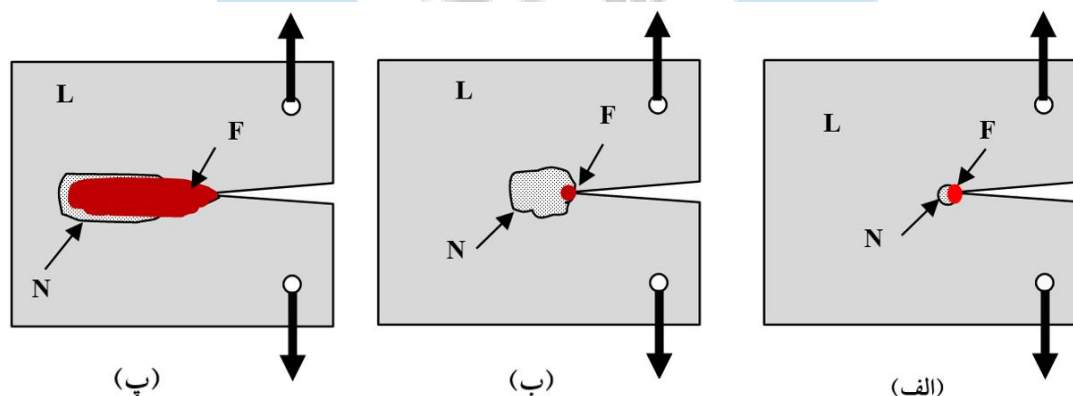
شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	شناسه دیجیتال:	دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ
10.22065/jsce.2024.440542.3345	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.440542.3345	۱۴۰۲/۱۱/۱۶	۱۴۰۲/۰۵/۱۰	۱۴۰۳/۰۶/۰۵	۱۴۰۳/۰۶/۰۵	۱۴۰۴/۰۱/۳۱
		*نویسنده مسئول:		علی‌رضا انتظاری		
		پست الکترونیکی:		a.entezari@azaruniv.ac.ir		

۱- مقدمه

وجود ترک در قطعات بتنی و سازه‌های بتن آرمه بدلیل ماهیت بتن اجتناب ناپذیر است. در مصالح بتنی از اول و قبل از آنکه هرگونه بار خارجی به سازه‌ی بتنی وارد شود، بصورت ذاتی ترک‌ها وجود دارند. ترک‌های ذاتی بتن ناشی از ماهیت غیرهمگنی مصالح بتن، تنش‌های حرارتی بوجود آمده حین عمل‌آوری بتن، عامل افت و جمع شدگی بتن می‌باشند. همچنین در حین بارگذاری بر روی سازه‌های بتنی، بعلت مقاومت پایین بتن در کشش، ترک‌های سازه‌ای در ترازهای پایین بارگذاری ایجاد می‌گردد و با ادامه روند بارگذاری، ترک‌ها گسترش می‌یابند. با رشد و گسترش ترک در اثر بارگذاری امکان کاهش قابل توجه عمر مفید سازه وجود دارد و بایستی اثرات آن در طراحی لحاظ شود. مکانیک شکست علمی است که به بررسی رشد و گسترش ترک و اثرات آن بر رفتار و مقاومت سازه می‌پردازد.

بررسی مکانیک شکست مواد با توجه به شرایط رفتار ماده در فرایند تسلیم و شکست به دو صورت مکانیک شکست ارتجاعی خطی (LEFM) و مکانیک شکست ارتجاعی غیر خطی (NLFM) صورت می‌گیرد. مکانیک شکست الاستیک خطی توسط کاپلان [۱] در سال ۱۹۶۱ برای مواد مبتنی بر سیمان اعمال شد. گروه دوم از محققان به این نتیجه رسیدند که LEFM برای بتن پاسخگو نمی‌باشد. عدم کاربرد LEFM در بتن در نتیجه بروز ناحیه غیر ارتجاعی بزرگ در نوک ترک می‌باشد. بنابراین، چندین محقق مدل‌های مکانیک شکست ارتجاعی غیرخطی را برای توصیف مکانیک شکست در سازه‌های بتنی بیان کرده‌اند. این رویکردها شامل مدل ترک ساختگی (FCM) [۲]، مدل نوار ترک [۳]، مدل دو پارامتری (TPM) [۴]، مدل ترک مؤثر [۵]، مدل اثر اندازه (SEM) [۶] و مدل K دوتایی (double-K) [۷] می‌باشند.

علم مکانیک شکست خطی به شرطی قابلیت کاربرد دارد که اندازه ناحیه آسیب دیده که شامل مجموع ناحیه سخت شونده‌ی پلاستیکی غیرخطی (N) و ناحیه نرم شونده‌ی یا شکست (F) می‌باشد در مقایسه با ابعاد سازه کوچک باشد. مصالح ترد پس از رسیدن به مقاومت نهایی به یکباره می‌شکنند اما مصالح نیمه ترد و شکل‌پذیر بعد از رسیدن به مقاومت نهایی به یکباره نمی‌شکنند و بعد از تغییر شکل زیاد، که در مصالح شکل‌پذیر بصورت جاری شدن و در مصالح شبه‌ترد بصورت نرم‌شوندگی ظاهر می‌گردد، دچار شکست می‌گردند. از دیدگاه مکانیک شکست این دسته‌بندی بر اساس اندازه نسبی سه ناحیه‌ی در حوالی نوک ترک، صورت می‌پذیرد [۸ و ۹]. در شکل‌های (۱) و (۲) ناحیه الاستیک خطی L، ناحیه غیرخطی N و ناحیه فرایند شکست F نشان داده شده است.



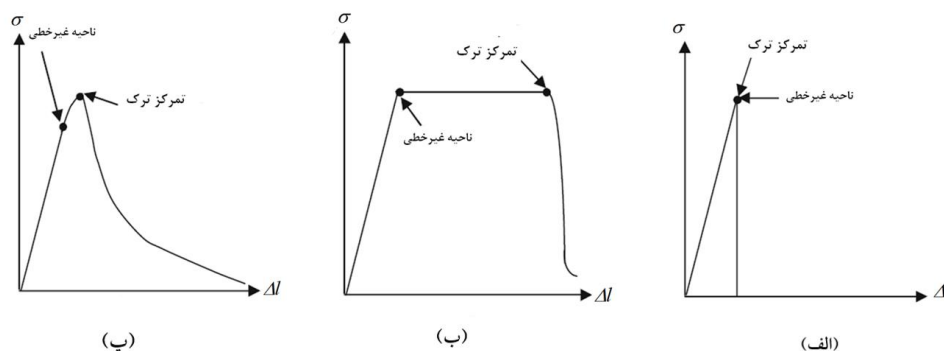
شکل ۱ - نواحی خطی، غیرخطی و فرایند شکست مواد ترد، انعطاف‌پذیر (فولاد) و شبه ترد (بتن) [۹]

(الف) الاستیک خطی (ب) پلاستیک غیر خطی (پ) شبه ترد (بتن)

در رفتار الاستیک خطی، ناحیه نرم شونده‌ی یا شکست (F) و سخت شونده‌ی غیرخطی (N) مواد در مقایسه با ابعاد سازه خیلی کوچک است (شکل ۱-الف). مدل شکل (۱-ب) در ماده‌ای که دارای رفتار سخت شونده‌ی غیرخطی (N) بزرگ و ناحیه شکست (F) کوچک است کاربرد دارد، این نوع رفتار در مواد انعطاف‌پذیر نظیر فولاد مشاهده می‌شود. سرانجام در شکل (۱-۱)

پ) شرایطی از ماده شبه ترد نظیر بتن را نشان می‌دهد که در این شرایط در حالی که ناحیه شکست (F) بزرگ می‌باشد منطقه با رفتار غیرخطی (N) کوچک است.

آنچه باعث تفاوت در این دسته‌بندی می‌گردد، رفتار بعد از بار حداکثر مصالح است (شکل ۲). در مواد با رفتار شکست شبه ترد که ناحیه سخت شوندهگی پلاستیکی (غیرخطی) کوچک دارند می‌توان در بررسی فرایند شکست از آن صرف‌نظر کرد [۹].



شکل ۲ - رفتار تنش - تغییرشکل تحت کشش تک محوری مواد [۹]

(الف) ترد (ب) انعطاف پذیر (فولاد) (پ) شبه ترد (بتن)

تفاوت این نوع مواد با مواد ترد در اندازه ناحیه شکست (منطقه آسیب دیده) است که در مواد شبه ترد بسیار بزرگ است و به هیچ وجه نمی‌توان در تحلیل شکست نادیده گرفت. مواد انعطاف پذیر در مقایسه با مواد شبه ترد ناحیه سخت شوندهگی پلاستیکی بزرگی را دارند، ولی در ماده شبه ترد اندازه ناحیه آسیب دیده نوک ترک در مقایسه با ابعاد سازه بزرگ بوده و از همین رو، تئوری LEFM برای چنین موادی معتبر نمی‌باشد [۱۰].

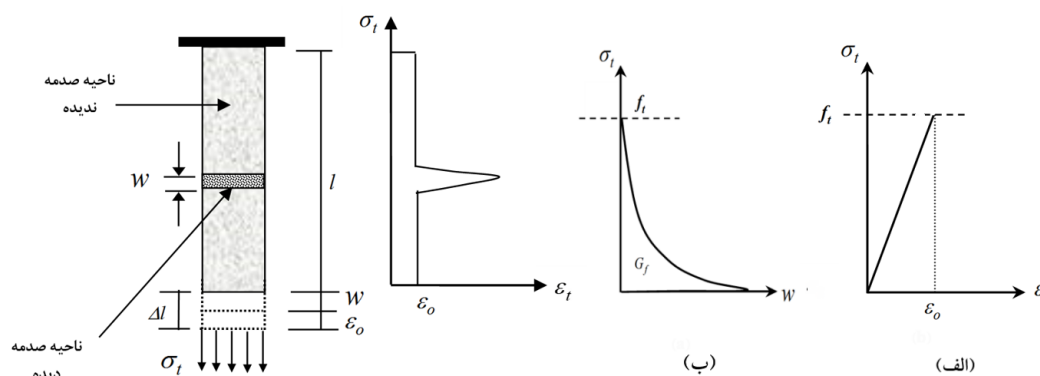
در شکل (۳) رفتار نمونه بتنی تحت کشش تک محوری با دو مجموعه منحنی؛ منحنی تنش - کرنش تا بار حداکثر (شکل ۳-الف) و منحنی تنش - تغییرشکل بعد از بار حداکثر نشان داده می‌شود (شکل ۳-ب). بعد از بار حداکثر افزایش طول نمونه برابر است با:

$$\Delta l = \varepsilon_o l + w \quad (1)$$

اگر کرنش یکنواخت ε_o در خارج از ناحیه شکست و w عرض ناحیه شکست باشد، آنگاه میانگین کرنش ε_m برابر است با:

$$\varepsilon_m = \frac{\Delta l}{l} = \varepsilon_o + \frac{w}{l} \quad (2)$$

بطور واضح معادله (۲) نشان می‌دهد که بعد از تنش حداکثر، کرنش متوسط (ε_m) به طول نمونه وابسته است، بنابراین نتیجه گرفته می‌شود که منحنی تنش - کرنش مشخصه ماده نخواهد بود. این پدیده به عنوان اثر کرنش موضعی نامیده می‌شود [۱۰].



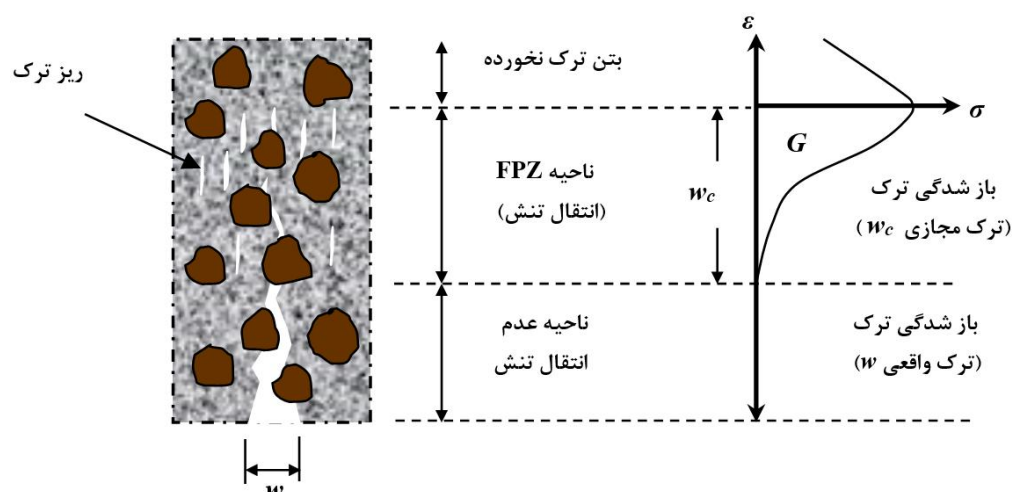
شکل ۳- تمرکز کرنش در نمونه بتن تحت آزمایش کشش مستقیم [۱۰]

الف) رابطه تنش - کرنش خطی بتن در ناحیه صدمه ندیده
ب) رابطه تنش - تغییر شکل بتن در ناحیه صدمه دیده (ناحیه شکست)

موقعی که به نمونه بار اعمال می شود در جلو ترک واقعی ناحیه آسیب دیده با اندازه متغیر و بزرگ؛ ناحیه فرایند شکست یا ناحیه صدمه دیده نوک ترک (FPZ) ایجاد می شود. جهت اندازه گیری شکل و اندازه FPZ از روش های مستقیم (میکروسکوپ نوری و الکترونی) و غیر مستقیم (لیزر و التراسونیک) مورد استفاده قرار می گیرد. ناحیه صدمه دیده در مصالح فولادی فقط به صورت منطقه ی جاری شده بوجود می آید (چون معمولاً فولاد به صورت مصالح پلاستیک ایده آل در نظر گرفته می شود). در مصالح بتنی، منطقه ی FPZ دارای دو ناحیه عمده نرم شوندگی و سخت شوندگی می باشد. ناحیه نرم شوندگی (ناحیه F در شکل ۱- پ) ناحیه ای بوده که در آن با وجود کاهش تنش، تغییر شکل ها زیاد می شوند. در ناحیه سخت شوندگی (ناحیه N در شکل ۱- پ) که ناحیه نرم شوندگی را احاطه نموده است، با بزرگ شدن تغییر شکل ها، تنش ها افزایش می یابد یا ثابت باقی می ماند. در بتن براساس فرضیات تمرکز تنش، هیچ گونه تنشی نبایستی وجود داشته باشد ولی قسمتی از سطوح ترک بعد از بار حداکثر دوباره در یکدیگر قفل و بست می شوند و شکست ناگهانی رخ نمی دهد و تنش بتدریج صفر می گردد. همچنین این منطقه به دلیل ماهیت غیر همگنی اش و داشتن فازهای مختلف مصالح مقدار زیادی از انرژی را جذب می کند [۱۱]. بنابراین در بتن (ماده شبه ترد) فرضیات LEFM قابل استفاده نمی باشد و بایستی از مکانیک شکست غیرخطی استفاده نمود.

مصالح شبه ترد نظیر بتن تحت انواع مختلفی از بارگذاری در معرض حالات مختلفی از آسیب؛ مثل ترک خوردگی کششی، شکست فشاری و تغییر در میزان سختی قرار می گیرند. شکست کامل مصالح بتنی با از دست رفتن کامل مقاومت بعد از بروز رفتار نرم-شوندگی اتفاق می افتد. نرم شوندگی کرنشی در بتن بسته به نوع بارگذاری هم در فشار و هم در کشش می تواند اتفاق بیافتد.

ریز ساختار بتن ترک خورده به صورت شکل (۴) مدل می گردد. این مدل دارای سه ناحیه می باشد: الف) ناحیه ترک بزرگ یا واقعی که توانایی انتقال تنش را ندارد ب) ناحیه متشکل از ریز ترک ها که قابلیت انتقال تنش را دارند (ناحیه فرایند شکست FPZ) ج) ناحیه ترک نخورده [۱۲ و ۱۳]. انتقال تنش در ناحیه FPZ در نوک ترک بتن به شکل های مختلف انجام می یابد که مکانیک شکست آنها را مدل می کند.



شکل ۴ - ریز ساختار بتن ترک خورده [۱۲ و ۱۳]

تانگ و همکاران [۱۴] خصوصیات مکانیک شکست بتن با مقاومت بالا (HSC) با سنگدانه‌های سبک و سنگدانه‌های معمولی را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، HSC با سنگدانه‌های معمولی دارای مقاومت فشاری ۱۱۵ MPa و مدول الاستیسیته ۳۹ GPa و سنگدانه‌های سبک مقاومت فشاری ۹۵ MPa و مدول الاستیسیته ۱۹ GPa بود. برای تعیین انرژی مکانیک شکست، روی تیرهای بتنی شکا-فدار با اندازه‌های مختلف آزمایش خمش تحت بار سه نقطه‌ای انجام دادند. با انجام آزمایش روی تیر شکافدار با اندازه mm ۱۰۰×۱۰۰×۵۰۰ با نسبت عمق شکاف (a₀) به ارتفاع تیر ۰/۳۳، مقدار G_F را با استفاده از منحنی بار - تغییر مکان و بار - باز شدگی دهانه ترک برای HSC با سنگدانه‌های معمولی برابر ۶۷ N/m و سنگدانه‌های سبک ۶۹ N/m تعیین کردند. آنها با انجام آزمایش روی نمونه‌ها با اندازه‌های دیگر به این نتیجه رسیدند که با افزایش اندازه نمونه میزان انرژی شکست نیز افزایش می‌یابد.

جدول ۱ - بخشی از نتایج آزمایشگاهی چن و همکاران [۱۵]

Results	20 °C	100 °C	200 °C	300 °C
Natural aggregate concrete (NAC)				
$f'_c (MPa)$	51.10	46.30	38.80	36.70
$f_{ct} (MPa)$	2.70	2.10	1.40	1.40
$P_{max} (kN)$	2.11	1.97	1.26	1.01
$G_F (N/m)$	118.46	138.13	191.04	256.40
Recycle concrete with the 30% replacement of recycled coarse aggregate (RAC30)				
$f'_c (MPa)$	51.20	44.00	39.30	38.20
$f_{ct} (MPa)$	3.10	2.20	1.30	1.60
$P_{max} (kN)$	2.49	1.77	1.30	1.47
$G_F (N/m)$	113.00	148.20	165.78	193.93
Recycle concrete with the 70% replacement of recycled coarse aggregate (RAC70)				
$f'_c (MPa)$	53.30	50.40	41.20	40.30
$f_{ct} (MPa)$	3.10	2.20	2.10	1.40
$P_{max} (kN)$	2.28	1.60	1.84	1.35
$G_F (N/m)$	116.60	130.22	151.00	159.69
Recycle concrete with the 100% replacement of recycled coarse aggregate (RAC100)				
$f'_c (MPa)$	52.10	47.10	45.90	44.10
$f_{ct} (MPa)$	2.70	2.00	2.10	2.10
$P_{max} (kN)$	2.42	1.69	1.74	1.90
$G_F (N/m)$	123.60	136.48	130.99	150.3

چن و همکاران [۱۵] خصوصیات مکانیک شکست بتن با سنگدانه‌های درشت بازیافتی (RAC) که جایگزین سنگدانه معمولی شده بودند را در درجه حرارت‌های مختلف (۲۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد) بررسی کردند. آزمایش‌ها روی تیرهای شکاف‌دار به ابعاد $100 \times 100 \times 510$ mm با نسبت عمق شکاف (a_0) به ارتفاع تیر؛ $0/5$ انجام دادند. بخشی از نتایج این تحقیق در جدول (۱) نشان داده شده است.

نتایج آزمایش نشان می‌دهد بار نهایی و G_F تابع میزان سنگدانه بازیافتی (RA) جایگزین سنگدانه معمولی و درجه حرارت می‌باشد. وقتی دما کمتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد، نسبت جایگزینی RA اثر کمی بر G_F دارد. در درجه حرارت محیط (۲۰ درجه سانتی‌گراد) بیشترین مقدار انرژی شکست مربوط به RAC۱۰۰ و کمترین مقدار مربوط به RAC۳۰ می‌باشد [۱۵].

کرملو و همکاران [۱۶] اثر حداکثر اندازه سنگدانه (d_{max}) را روی پارامترهای مکانیک شکست بتن خود تراکم با سنگدانه‌های سبک (SCLC) مطالعه کردند. آزمایش‌ها را روی تیرهای خمشی شکاف‌دار (نسبت عمق شکاف a_0 به ارتفاع تیر؛ $0/2$) با بارگذاری سه نقطه‌ای و با حداکثر اندازه‌های سنگدانه ۹/۵، ۱۲/۵ و ۱۹ mm انجام دادند. نمونه‌های مورد آزمایش جهت تعیین انرژی شکست (G_F) دارای مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های مکعبی $100 \times 100 \times 100$ mm در محدوده $48/8$ - $27/0$ MPa و مدول الاستیسیته نمونه‌های استوانه‌ای 150×300 mm در محدوده $25/1$ - $19/2$ GPa بودند. مقدار انرژی شکست نمونه‌های مورد آزمایش در محدود $36/3$ N/m - $16/9$ قرار داشت. آنها به این نتیجه رسیدند با افزایش d_{max} ، انرژی شکست افزایش می‌یابد. همچنین برای بتن با سنگدانه‌های معمولی (NWC) گزارش شده است که با افزایش d_{max} از $4/75$ تا 19 mm مقدار انرژی شکست از $21/1$ N/m به $35/4$ N/m افزایش یافته است.

تانگ و همکاران [۱۷] نسبت به بررسی تجربی پارامتر مکانیک شکست بتن معمولی (NAC) و بتن دارای سنگدانه پلی‌استایرن (PAC) با درصد حجمی ۲۵ و ۵۰ درصد جایگزین سنگدانه‌های معمولی که در معرض دماهای بالا تا 800 درجه سانتی‌گراد قرار داشتند اقدام کردند. نتایج نشان می‌دهد برای هر سه بتن (NWC، PAC۲۵ و PAC۵۰) با افزایش دما (۲۵ تا 500 درجه سانتی‌گراد) باعث کاهش تقریباً ۵۰ درصدی انرژی شکست کل برای همه نمونه‌ها شده در حالی که ۳۰ درصد افزایش در انرژی شکست زمانی رخ داد که دما از 500 به 800 درجه سانتی‌گراد افزایش داشت (جدول ۲).

جدول ۲ - بخشی از نتایج آزمایشگاهی تانگ و همکاران [۱۷]

Concrete Mix	Peak Temp	f'_c (MPa)	f_{ct} (MPa)	E_c (GPa)	G_F (N/m)
NAC	25 °C	56.8	4.3	37.3	122.2
	150 °C	57.7	4.9	36.7	102.1
	400 °C	45.2	3.3	21.7	70.1
	500 °C	34.3	2.5	17.7	51.9
	800 °C	25.4	1.3	7.4	90.0
PAC25	25 °C	26.4	2.9	25.1	76.0
	150 °C	30.1	2.8	20.4	72.6
	400 °C	20.4	1.9	14.2	57.5
	500 °C	15.2	1.3	8.9	34.5
	800 °C	9.9	0.7	5.0	72.6
PAC50	25 °C	13.3	1.5	17.4	54.9
	150 °C	14.8	1.4	13.5	42.6
	400 °C	9.2	0.9	8.8	43.8
	500 °C	6.9	0.7	6.1	28.5
	800 °C	3.7	0.5	3.5	45.8

روزلر و همکاران [۱۸] به صورت تجربی و با روش منحنی بار - بازشدگی دهانه ترک پارامترهای مکانیک شکست بتن معمولی را بررسی کردند. برای تعیین خواص مکانیک شکست روی تیرهای بتنی شکاف‌دار با نسبت عمق شکاف (a_0) به ارتفاع تیر؛ $0/33$ و با اندازه‌های مختلف نمونه ($80 \times 250 \times 1100$ mm، $80 \times 150 \times 700$ mm و $80 \times 63 \times 350$ mm) آزمایش خمشی تحت بار سه نقطه‌ای انجام دادند. در موقع آزمایش تیرهای بتنی شکاف‌دار (روز ۱۱۹)؛ مقاومت فشاری نمونه بتن استوانه‌ای 15×300 mm $58/3$ MPa و مدول الاستیسیته

۳۲/۰ GPa بودند. میانگین مقدار G_F برای نمونه‌های با ارتفاع تیر؛ ۲۵۰، ۱۵۰ و ۶۳ mm به ترتیب ۱۶۷، ۱۶۴ و ۱۱۹ N/m بود. انرژی شکست برای نمونه‌ها با عمق ۲۵۰ و ۱۵۰ mm تقریباً ثابت بوده، اما با کاهش ارتفاع تیر (۶۳ mm) مقدار انرژی شکست کاهش می‌یابد. میانگین بار نهایی (P_{max}) برای نمونه‌های با ارتفاع تیر؛ ۲۵۰، ۱۵۰ و ۶۳ mm به ترتیب ۶/۶، ۴/۱ و ۲/۱ kN بود.

خلیلی و همکاران [۱۹] به صورت تجربی تأثیر دماهای بالا بر عملکرد بتن سبک پلاستیک حاوی الیاف‌های فولادی (SF)، پلی‌پروپیلین (PPF) و شیشه (SF) را بررسی کردند. پس از انتخاب طرح شاهد و انجام عملیات حرارتی بر روی نمونه‌ها در دماهای ۲۵، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد و انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی بر روی نمونه‌ها، نتیجه گرفتند که الیاف فولادی در افزایش مقاومت فشاری و کششی بتن سبک پلاستیک بسیار مفید بوده به طوری که در بعضی از مراحل آزمایش مقاومت فشاری و کششی بتن پس از حرارت، بیش از ۴۱٪ افزایش نشان می‌دهد اما الیاف پلی‌پروپیلین و شیشه به خاطر خصوصیات فیزیکی و ظاهری که دارند در مقایسه با الیاف فولادی تأثیر اندکی در مقاومت فشاری و کششی بتن پس از حرارت داشته‌اند تا جایی که در دماهای ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، الیاف شیشه هیچگونه تأثیری در افزایش مقاومت فشاری و کششی بتن سبک پلاستیک نداشته‌اند.

پاچیده و توفیق [۲۰] با تحقیق روی خصوصیات مکانیکی (مقاومت فشاری، کششی و خمشی) بتن سبک‌دانه خود تراکم (SCLC) دارای الیاف فولادی (SF)، الیاف پلی‌پروپیلین (PPF) و فنر فولادی (SP) بازیافتی با نسبت حجمی ۰/۴ درصد در دماهای ۲۵، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد به این نتیجه رسیدند مقاومت فشاری بتن دارای الیاف و فنرهای فولادی در مقایسه با بتن کنترل (بدون الیاف) ۲۰٪ افزایش داشته و مقاومت کششی بتن دارای الیاف پلی‌پروپیلین در معرض دماهای بالا در مقایسه با بتن کنترل تا ۷۰٪ افزایش نشان می‌دهد. نتایج آزمایش نشان می‌دهد در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت خمشی بتن در تمامی نمونه‌ها به طور چشمگیری کاهش یافته است و در تمامی مخلوط‌های بتن، دمای آستانه برای از دست دادن شدید مقاومت فشاری، کششی و خمشی ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد بوده است.

هدف از این تحقیق؛ تعیین و بررسی G_F بتن سبک‌دانه (LWAC) تهیه شده با سنگدانه‌های سبک پومیس و اسکوریا می‌باشد. برای این منظور چهار طرح مخلوط تعریف شده و جهت تعیین خصوصیات مکانیکی بتن ۳۶ نمونه‌ی استاندارد و برای تعیین G_F بتن سبک‌دانه ۱۲ نمونه‌ی منشوری در نظر گرفته شده است. در این تحقیق مقدار G_F با انجام آزمایش روی نمونه‌های منشوری به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۵۰ میلی‌متر دارای شکافی به عمق ۴۰ میلی‌متر در مرکز وجه کششی و با استفاده از آیین‌نامه RILEM و از روی منحنی بار - تغییر مکان ($P-\delta$) و همچنین آیین‌نامه بتن ژاپن (JCI) با استفاده از منحنی بار - باز شدگی دهانه ترک (P-CMOD) تعیین می‌شود.

۲- مواد و روش‌های آزمایشگاهی

۲-۱- مواد

در کلیه نمونه‌های مورد آزمایش از سیمان پرتلند نوع II (PC) با چگالی $3/15 \text{ g/m}^3$ و نرمی $293 \text{ m}^2/\text{kg}$ استفاده شده است. مقاومت ۲۸ روزه ملات مکعبی ساخته شده با PC-II، $39/3 \text{ MPa}$ و زمان گیرش اولیه ۷۰ دقیقه و نهایی ۴/۰۵ ساعت تعیین شده‌اند. ترکیبات شیمیایی سیمان در جدول (۳) آورده شده است. افزودنی‌های معدنی، نظیر میکروسیلیس (SF)، تخلخل بتن را کاهش داده و موجب بهبود ناحیه مرزی می‌شود. SF خاصیت جذب آب دارد، بنابراین باید به همراه مواد کاهنده آب مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق از SF که با ASTM C۱۲۴۰ [۲۱] مطابقت دارد استفاده شد. چگالی و وزن مخصوص SF به ترتیب $2/32 \text{ g/m}^3$ و 245 kg/m^3 بودند. ترکیبات شیمیایی SF که در این تحقیق استفاده شده در جدول (۳) درج شده است. در این تحقیق از فوق روان کننده مطابق با استاندارد ASTM C۴۹۴ [۲۲] به میزان ۱/۵ - ۰/۸ درصد وزن سیمان استفاده شد. چگالی ویژه فوق روان کننده توسط سازنده آن g/m^3 ۱/۲۱ اعلام شده است. سنگدانه پومیس (PA) از معدن طبیعی اسکندان در نزدیکی تبریز (آذربایجان شرقی - ایران) و سنگدانه اسکوریا

(SA) از معدن طبیعی آجواج در نزدیکی سلماس (آذربایجان غربی - ایران) تهیه شدند. در این تحقیق اندازه بزرگترین سنگدانه سبک که در تهیه بتن استفاده شد ۱۲/۵ mm بود.

تحلیل شیمیایی PA و SA توسط شرکت‌های تولید کننده محصول انجام شده بود. نتایج مشخصات شیمیایی PA و SA و مقایسه آن با PC-II و SF در جدول (۳) ارائه شده است. تحلیل شیمیایی نشان می‌دهد که PA و SA عمدتاً از سیلیس (SiO_2) تشکیل شده است، در حالی که ماده اصلی PC اکسید کلسیم (CaO) است. در PA و SA حدود ۲۸-۲۳ درصد اکسید کلسیم (CaO)، آلومین (Al_2O_3) و اکسید آهن (Fe_2O_3) وجود دارد. مقدار اکسیدهای سدیم (Na_2O) و پتاسیم (K_2O)، که خاصیت قلیایی دارند، در PA و SA (۴-۷ درصد) بیش از PC (۱/۳۲ درصد) می‌باشد.

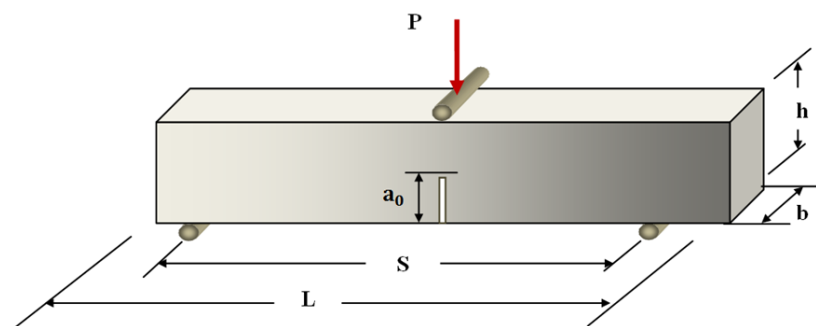
جدول ۳ - تجزیه شیمیایی مواد (درصد اکسیدها)

نوع اکسید	سیمان (PC)	میکروسیلیس (SF)	سنگدانه اسکوریا (SA)		سنگدانه پومیس (PA)	
			سیاه	قرمز	درشت	ریز
SiO_2	21.45	95.5	59.14	60.95	62.77	58.90
Al_2O_3	4.88	1.32	15.57	13.9	17.12	17.13
Fe_2O_3	3.58	0.87	6.68	7.09	4.88	4.48
CaO	64.33	0.49	5.47	6.47	4.90	1.35
Na_2O	0.41	0.31	3.65	2.29	3.32	3.12
MgO	1.75	0.97	2.97	2.76	1.11	1.11
K_2O	0.91	1.01	2.92	2.23	1.36	1.44
SO_3	1.94	0.1	-	-	-	-
TiO_2	-	-	0.97	1.07	-	-
MnO	-	-	0.11	0.12	-	-
L.O.I	0.62	-	1.79	2.37	1.88	2.10

۲-۲- روش‌های اندازه‌گیری انرژی شکست کل (G_F)

۲-۲-۱- روش RILEM [۲۳]

در روش RILEM برای تعیین انرژی شکست کل بتن از تیر خمشی شکاف‌دار با بارگذاری سه نقطه‌ای (شکل ۵) استفاده می‌شود. ابعاد این تیر بر اساس حداکثر اندازه سنگدانه‌های موجود در بتن مشخص می‌شود.



شکل ۵ - مشخصات نمونه تیر خمشی شکاف‌دار تحت بار سه نقطه‌ای

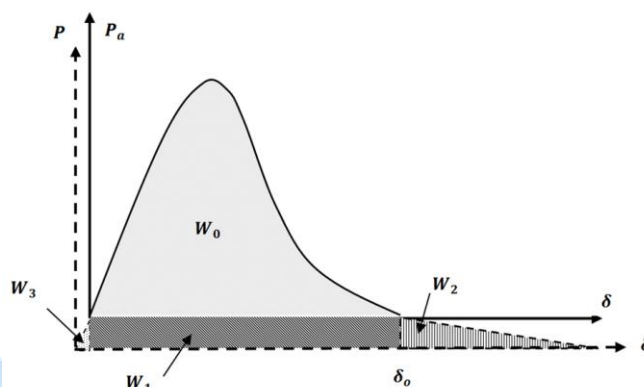
در حین آزمایش باید مقدار بار و جابجایی محل اعمال بار ($P_a - \delta$) با دقت ثبت گردد [۲۴]. در این روش اثر وزن نمونه در تعیین پارامتر G_F مورد توجه قرار گرفته می‌شود. تنش خمشی (σ_s) ایجاد شده در نوک شکاف تحت اثر وزن خود نمونه به طول S (رابطه ۴) برابر است با:

$$P_s = Shb\rho g \quad (3)$$

$$\sigma_s = \frac{3SP_s}{2b(h-a_o)^2} \quad (4)$$

P_s بار مربوط به تیر شکافدار به طول S دهانه بارگذاری (N) ، S دهانه بارگذاری تیر (mm) ، h ارتفاع مقطع تیر (mm) ، b عرض مقطع تیر (mm) ، a_o عمق شکاف (mm) ، ρ وزن مخصوص بتن و g شتاب جاذبه زمین برابر 9.81 m/s^2 می باشد. اثر وزن تیر باید به منحنی $P_a - \delta$ که از آزمایش تعیین شده اضافه شود. بنابراین کل بار وارده بر تیر برابر است با:

$$P = P_a + P_s \quad (5)$$



شکل ۶ - منحنی بار - تغییر مکان توصیه شده RILEM [۲۳]

مساحت زیر نمودار بار - جابجایی که در تعیین G_F استفاده می شود به طور کلی از چهار قسمت تشکیل می شود. W_0 کار انجام یافته توسط بار اعمال شده در حین آزمایش بوده و برابر با سطح زیر منحنی $P_a - \delta$ که از آزمایش بدست می آید می باشد. مجموع W_1 ، W_2 و W_3 که در شکل (۶) نشان داده شده است کار مربوط به جرم موثر تیر به طول S (m_1) و جرم تجهیزات آزمایش (m_2) که برای اعمال بار روی تیر نصب می شود و هیچگونه اتصالی با دستگاه اعمال بار ندارد می باشد. پس کار انجام یافته کل برابر است با:

$$W_t = W_0 + W_1 + W_2 + W_3 \quad (6)$$

$$W_0 = \int_0^{\delta_0} P_a d\delta \quad (7)$$

آیین نامه RILEM [۲۳] برای تعیین مجموع W_1 ، W_2 و W_3 که اثر جرم تیر شکافدار و جرم تجهیزات متصل به تیر می باشد رابطه (۸) را پیشنهاد داده است:

$$mg = (m_1 + 2m_2)g \quad , \quad m_1 = m_o \frac{S}{L} \quad (8)$$

m_o جرم نمونه (تیر به طول L) بوده که قبل از شروع آزمایش اندازه گیری می شود.

در معادله (۶) از کار W_3 به علت ناچیز بودن می توان صرف نظر کرد و کار W_2 را نمی توان به صورت مستقیم از منحنی $P_a - \delta$ تعیین کرد. طبق آزمایش [۲۵]، W_2 تقریباً برابر W_1 می باشد. بنابراین کار انجام یافته کل برابر است با:

$$W_t = W_0 + 2W_1 = W_0 + 2P_w \delta_0 \quad (9)$$

در رابطه (۹)، P_w بار مربوط به جرم تیر شکافدار به طول S و تجهیزات متصل به تیر بوده و برابر است با:

$$P_w = \left(m_o \frac{S}{2L} + m_2 \right) g \quad (10)$$

میزان انرژی جذب شده در واحد سطح ترک برابر است با:

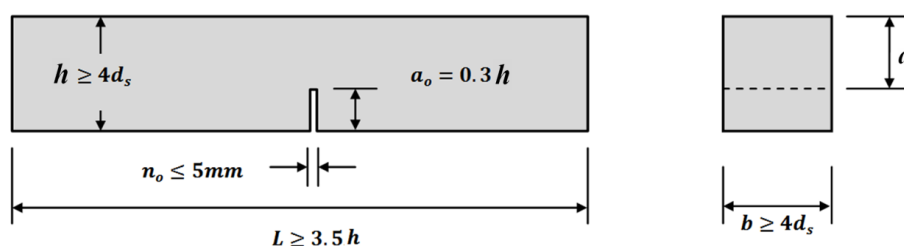
$$G_F = \frac{W_t}{(h - a_o)b} = \frac{W_o + 2P_w \delta_o}{(h - a_o)b} \quad (11)$$

حداکثر تنش در مقطع خالص تیر (موقعیت شکاف) به ازای بار نهایی حاصل از آزمایش برابر است با:

$$f_{fl} = \frac{3P_{max}S}{2b(h - a_o)^2} \quad (12)$$

۲-۲-۲- آیین نامه بتن ژاپن (JCI) [۲۶]

براساس آیین نامه ژاپن انرژی شکست کل بتن از روی منحنی بار - باز شدگی دهانه ترک (P-CMOD) که از آزمایش تیر خمشی شکاف دار تحت بارگذاری سه نقطه ای بدست می آید تعیین می شود. در این روش باید مقدار بار و تغییر مکان باز شدگی دهانه ترک به دقت اندازه گیری شوند. بنا به توصیه JCI مشخصات هندسی تیر که در آزمایش مورد استفاده قرار می گیرند مطابق شکل (۷) تابع بزرگترین اندازه سنگدانه (d_s) است.



شکل ۷ - ابعاد توصیه شده توسط JCI [۲۶]

انرژی شکست کل بتن با استفاده از رابطه (۱۳) تعیین می شود:

$$G_F = \frac{W_t}{(h - a_o)b} = \frac{0.75W_o + W_1}{A_{lig}} \quad (13)$$

$$W_o = \int_0^{w_c} f(CMOD) d(CMOD) \quad (14)$$

$$W_1 = 0.75(m_1 + 2m_2)g.w_c, \quad m_1 = m_o \frac{S}{L} \quad (15)$$

در رابطه (۱۳) W_o سطح زیر منحنی P-CMOD تا مرحله خرابی نمونه به عنوان کار انجام یافته نمونه منشوری بتن (N.mm)، W_1 کار انجام یافته مربوط به جرم نمونه و تجهیزات اتصالی به تیر (N.mm) و A_{lig} سطح قسمت پیوندی در امتداد شکاف (mm^2) می باشد. در رابطه (۱۵) m_1 و m_2 به ترتیب جرم موثر تیر به طول S (دهانه بارگذاری) و جرم تجهیزات اتصالی به تیر جهت اعمال بار (Kg)، S دهانه بارگذاری تیر (mm)، L طول کل تیر (mm)، w_c تغییر مکان باز شدگی دهانه ترک در لحظه خرابی (mm) و g شتاب جاذبه زمین برابر $9.81 m/s^2$ می باشد و m_o جرم نمونه (تیر به طول L) بوده که قبل از شروع آزمایش اندازه گیری می شود.

۲-۳- برنامه های آزمایشگاهی

برای نمونه برداری، دانه بندی و تعیین وزن مخصوص سنگدانه ها از استانداردهای ASTM D75 [۲۷]، ASTM C136 [۲۸] و ASTM C29 [۲۹] استفاده گردید و در تهیه بتن با ریزدانه سبک اسکوریا، بزرگترین اندازه ۴/۷۵ میلی متر انتخاب شد. برای تعیین جذب

آب سنگدانه‌های سبک و معمولی از استاندارد ASTM C127 [۳۰] استفاده شد. دانه‌بندی، چگالی و میزان جذب آب سنگدانه‌هایی که در این تحقیق استفاده شده در جدول‌های (۴) و (۵) ارائه شده است.

جدول ۴ - دانه‌بندی سنگدانه‌های سبک و معمولی (درصد وزنی عبوری)

سنگدانه ریز		سنگدانه درشت		معمولی		سبک‌دانه		اندازه دانه (mm)
معمولی	سبک‌دانه	معمولی	سبک‌دانه	سبک‌دانه	معمولی	سبک‌دانه	سبک‌دانه	
مسه	ASTM	اسکوریا (SA)	ASTM	سبک‌دانه	سبک‌دانه	اسکوریا (SA)	پومیس (PA)	ASTM
-	-	-	-	100	95-100	-	-	-
-	-	-	-	61	68-80	100	100	100
-	-	-	-	26	25-60	99	81	90-100
100	100	100	100	7	47-57	76	50	40-80
89	95-100	100	85-100	0	0-10	7	5	0-20
74	80-100	66	-	-	-	0	0	-
55	50-85	33	40-80	-	-	-	-	-
-	-	19	-	-	-	-	-	-
35	25-60	15	10-35	-	-	-	-	-
14	10-30	10	5-25	-	-	-	-	-
3	2-10	0	0-10	-	-	-	-	-

جدول ۵ - مشخصات سنگدانه‌ها

مصالح	چگالی توده ای (Kg/m ³)		چگالی ویژه		جذب آب (%)
	متراکم	غیر متراکم	اشباع با سطح خشک (SSD)	خشک (OD)	
سنگدانه درشت:					
اسکوریا (PA)	829	768	1.84	1.60	14.84
پومیس (SA)	995	895	1.38	1.17	27.84
شن	-	-	2.38	2.29	1.20
سنگدانه ریز:					
اسکوریا (PA)	-	-	1.72	1.52	13.65
ماسه	-	-	2.48	2.35	3.44

در طرح مخلوط بتن با سنگدانه سبک (LWAC) از توصیه‌های مندرج در آیین‌نامه ۴R-۰۸-۲۱۱-۳۱ ACI [۳۱] استفاده شده و برای تمامی مخلوط‌ها بزرگترین اندازه سنگدانه ۱۲/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده بود. برای ارزیابی خصوصیات مکانیکی و انرژی شکست چهار طرح مخلوط S۱ (درشت‌دانه اسکوریا و ریزدانه ماسه معمولی)، S۲ (درشت‌دانه اسکوریا و ریزدانه اسکوریا)، P۱ (درشت‌دانه پومیس و ریزدانه ماسه معمولی) و P۲ (درشت‌دانه پومیس و ریزدانه اسکوریا) طبق جدول (۶) در نظر گرفته شد.

ب

جدول ۶- مقادیر اجزای تشکیل دهنده مخلوط‌های بتن سبک (Kg/m^3)

اسلامپ (mm)	نسبت آب به مواد سیمانی	فوق روان کننده	سنگدانه ریز			سنگدانه درشت		میکروسیلیس	سیمان	طرح مخلوط
			ماسه	سبک		سبک				
				پومیس	اسکوریا	پومیس	اسکوریا			
71	0.35	7.5	653	-	-	-	700	50	450	S1
85	0.32	7.5	-	-	603	-	685	50	450	S2
52	0.33	7.5	610	-	-	584	-	50	450	P1
50	0.33	7.5	-	-	548	585	-	50	450	P2

وزن سنگدانه‌های سبک و معمولی به صورت اشباع با سطح خشک (SSD) می باشند.

توجه به اینکه مطالعات روی بتن سبک سازه‌ای بوده میزان سیمان در طرح مخلوط ۵۰۰ کیلوگرم در مترمکعب تعیین گردید. بر اساس تحقیقات دیگران، مناسب‌ترین مقدار مورد استفاده میکروسیلیس در بتن‌های سبک‌دانه ۵ تا ۲۵ درصد وزن سیمان بوده لذا در این تحقیق ۱۰٪ وزن سیمان میکروسیلیس لحاظ شد. از آنجایی که مقدار ۱۰٪ وزن سیمان میکروسیلیس به صورت جایگزین سیمان استفاده شد، مقدار سیمان استفاده شده در بتن ۴۵۰ کیلوگرم در مترمکعب گردید.

برای تعیین مشخصات مکانیکی LWAC پس از ریختن بتن در قالب‌های فلزی استاندارد، جهت تراکم کامل نمونه بتنی از میز ارتعاشی (ویبره) استفاده شد. پس از ۲۴ ساعت قالب‌ها باز و نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در داخل حوض پر از آب با دمای 23 ± 2 درجه سانتی‌گراد جهت عمل‌آوری قرار داده شدند. در این تحقیق از هر طرح مخلوط S1، S2، P1 و P2 سه نمونه برای انجام هر کدام از آزمایش‌ها تهیه شده بود. مقاومت فشاری (f'_c) روی نمونه‌های استوانه‌ای 150×300 میلی‌متر با آهنگ بارگذاری 0.32 MPa/sec (0.32 kN/sec) طبق استاندارد ASTM C39 [۳۲] و مدول گسیختگی (f_r) روی نمونه‌های منشوری $100 \times 100 \times 500$ mm با بارگذاری سه نقطه‌ای و با آهنگ بارگذاری 0.09 MPa/min (0.09 N/sec) مطابق با ASTM C293 [۳۳] آزمایش شد. با رعایت استاندارد توصیه شده توسط ASTM C496 [۳۴] مقاومت کششی (f_{ct}) روی نمونه‌های استوانه‌ای 150×300 mm با آهنگ بارگذاری 1000 kPa/min (1.0 kN/sec) و مدول الاستیسیته (E_c) روی نمونه‌های استوانه‌ای 150×300 mm با آهنگ بارگذاری 255 kPa/sec (0.255 kN/sec) مطابق با ASTM C469 [۳۵] آزمایش شد (جدول ۷). موقع تعیین مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته برای از بین بردن اثر ناصافی و تمرکز تنش روی بدنه بتن، ابتدا و انتهای همه نمونه‌ها طبق توصیه‌های ASTM C617 [۳۶] با ماده گوگردی کلاهدک گذاری شدند.

جدول ۷- خصوصیات مکانیکی LWAC

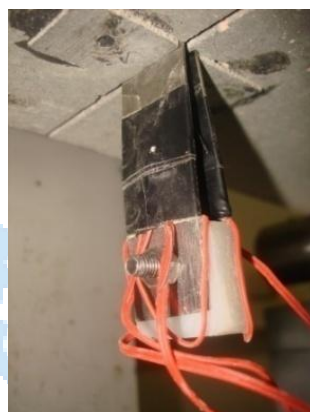
مدول الاستیسیته E_c (GPa)	مدول گسیختگی f_r (MPa)	مقاومت کششی f_{ct} (MPa)	مقاومت فشاری f'_c (MPa)	شماره نمونه	طرح مخلوط
14.90	3.45	2.95	36.90	S1-1	S1
14.87	3.44	2.95	36.75	S1-2	
14.74	3.42	2.92	36.16	S1-3	
13.40	3.12	2.67	30.25	S2-1	S2
12.67	2.96	2.54	27.23	S2-2	
12.99	3.03	2.60	28.54	S2-3	
11.85	2.79	2.38	24.06	P1-1	P1
11.96	2.81	2.40	24.46	P1-2	
11.86	2.79	2.39	24.10	P1-3	
11.60	2.73	2.34	23.10	P2-1	P2
11.57	2.72	2.33	23.00	P2-2	
11.61	2.73	2.34	23.16	P2-3	

برای تعیین انرژی شکست LWAC ساخته شده با اسکوریا و پومیس از نمونه‌های بتنی به ابعاد $500 \times 100 \times 100$ میلی‌متر استفاده شد. نمونه‌ها پس از باز کردن قالب‌ها به مدت ۲۸ روز در داخل حوض پر از آب با دمای 23 ± 2 درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. نمونه‌ها در مرکز وجه کششی خود دارای شکافی به عمق ۴۰ میلی‌متر بوده و تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای قرار گرفتند.

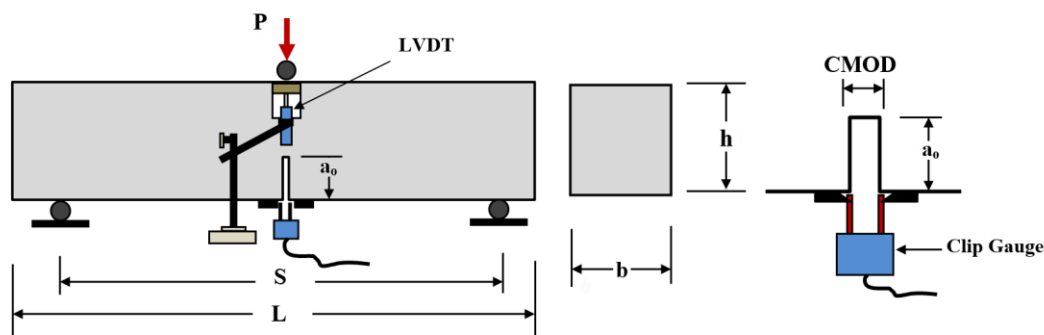
در تمام مراحل آزمایش و برای کلیه نمونه‌ها، دهانه بارگذاری نمونه‌های تیر شکاف‌دار (S) و عمق شکاف (a_0) به ترتیب ۳۶۰ و ۴۰ میلی‌متر انتخاب شده بود و در هر مرحله بارگذاری تغییر مکان در وسط منشور توسط حسگر جابجایی (LVDT) و بازشدگی دهانه ترک نیز توسط شکاف‌سنج (کلیپ گیج) اندازه‌گیری می‌شد (شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰).



شکل ۹ - آزمایش تیر خمشی شکاف‌دار تحت بار سه نقطه‌ای



شکل ۸ - نصب شکاف‌سنج



شکل ۱۰ - مشخصات و نحوه آزمایش تیر خمشی شکاف‌دار تحت بار سه نقطه‌ای

در جدول (۸) مشخصات تیرهای منشوری شکاف‌دار که تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای قرار گرفته‌اند ارائه شده است.

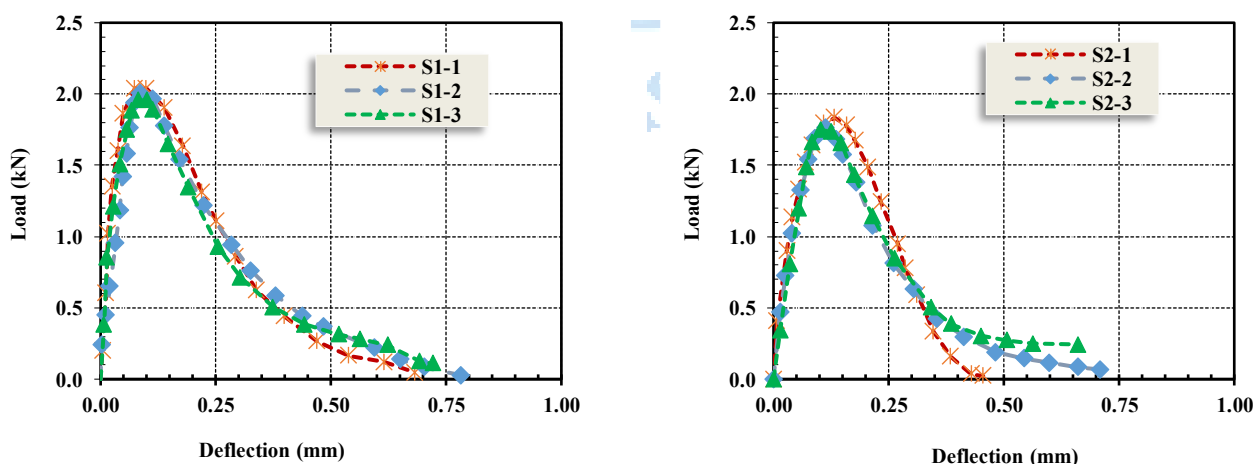
جدول ۸ - اندازه نمونه‌های آزمایش تیر خمشی شکاف دار تحت بار سه نقطه‌ای

شماره نمونه	ارتفاع تیر h (mm)	عرض تیر b (mm)	عمق شکاف a _o (mm)	ارتفاع خالص (h-a _o) (mm)	سطح خالص A _{rig} (mm ²)	دهانه بارگذاری S (mm)	طول تیر L (mm)	جرم نمونه M _o (kg)
S1-1	100.50	100.00	40	60.50	6050.00	360	500	9.09
S1-2	100.60	100.00	40	60.60	6060.00	360	500	9.00
S1-3	100.60	100.00	40	60.60	6060.00	360	500	9.08
S2-1	100.50	100.00	40	60.50	6050.00	360	500	8.26
S2-2	100.50	100.70	40	60.50	6092.35	360	500	8.25
S2-3	100.00	100.50	40	60.00	6030.00	360	500	8.22
P1-1	100.00	100.20	40	60.00	6012.00	360	500	9.09
P1-2	100.90	100.50	40	60.90	6120.45	360	500	9.05
P1-3	100.50	99.70	40	60.50	6031.85	360	500	9.01
P2-1	100.00	101.00	40	60.00	6060.00	360	500	8.41
P2-2	100.50	100.30	40	60.50	6068.15	360	500	8.53
P2-3	100.00	99.60	40	60.00	5976.00	360	500	8.63

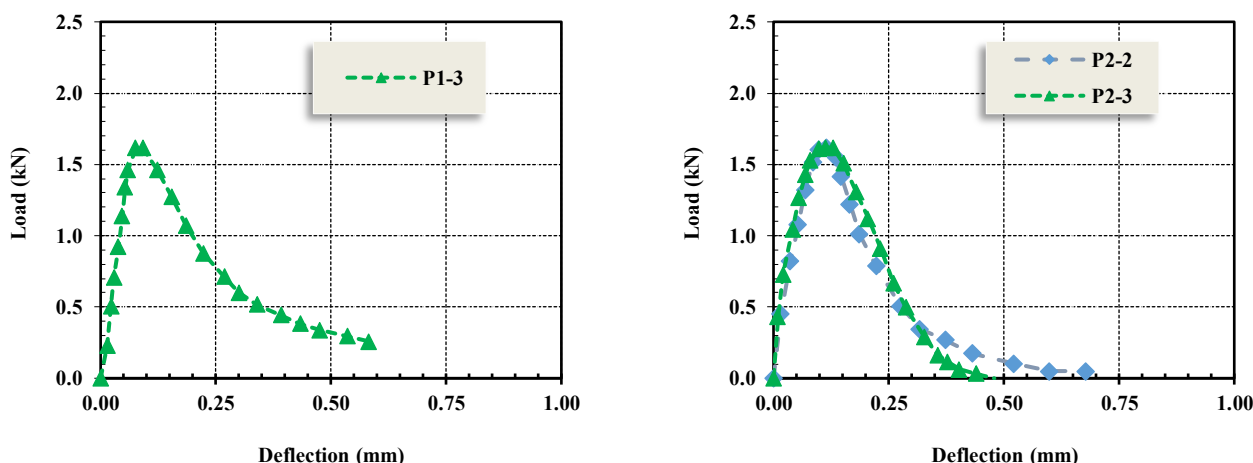
۳- بررسی نتایج

۳-۱- نتایج حاصل از روش RILEM

شکل‌های (۱۱) و (۱۲) منحنی P-δ تیر خمشی شکاف دار تحت بار سه نقطه‌ای که از LWAC تهیه شده است را نشان می‌دهند. خلاصه نتایج حاصل از آزمایش و محاسبات انجام شده بر اساس اطلاعات منحنی‌های P-δ به روش RILEM در جدول (۹) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که با کاهش مقاومت فشاری، بار نهایی قرائت شده از آزمایش و G_F تعیین شده از روش RILEM نیز کاهش می‌یابد. مقدار G_F برای LWAC ساخته شده با اسکوریا با مقاومت فشاری ۲۷/۲-۳۶/۹ MPa در حدود ۱۰۰/۷-۷۵/۵ N/m است و برای LWAC ساخته شده با پومیس با مقاومت فشاری ۲۴/۴-۲۳/۰ MPa این مقدار در حدود ۷۵/۵-۶۵/۱ N/m می‌باشد. میانگین انرژی شکست کل برای LWAC ساخته شده با اسکوریا و پومیس که در این تحقیق مطالعه شد در حدود ۹۸/۱-۶۵/۷ N/m متغیر بود.



شکل ۱۱- منحنی P-δ تیر خمشی شکاف دار تحت بار سه نقطه‌ای (LWAC تهیه شده با اسکوریا)

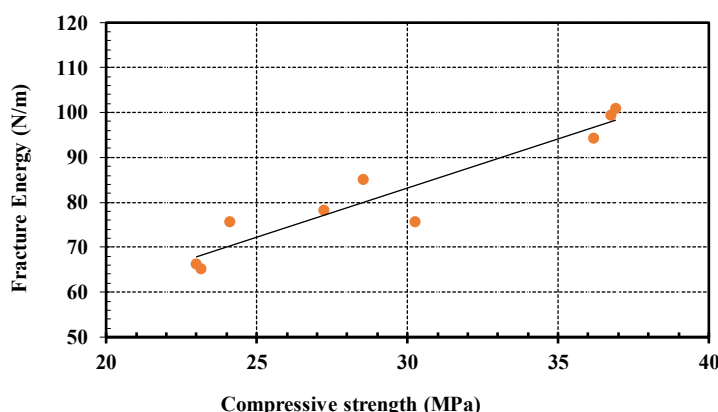


شکل ۱۲- منحنی $P-\delta$ تیر خمشی شکاف دار تحت بار سه نقطه‌ای (LWAC تهیه شده با پومیس)

جدول ۹ - اطلاعات تعیین انرژی شکست کل به روش RILEM (منحنی $P-\delta$)

شماره نمونه	جرم تیر	جرم موثر تیر	حداکثر تغییر مکان	کار انجام یافته توسط جرم نمونه	سطح زیر منحنی بار-تغییر مکان	انرژی شکست کل	میانگین انرژی شکست کل	بار نهایی بدست آمده از آزمایش	تنش در موقعیت شکاف
	M_0 (kg)	M_1 (kg)	$\delta_0 = \delta_{max}$ (mm)	W_1 (N.mm)	W_0 (N.mm)	G_F (N/m)	G_F (N/m)	P_{max} (kN)	f_n (MPa)
S1-1	9.09	6.54	0.682	21.89	566	100.79	98.12	2.07	3.05
S1-2	9.00	6.48	0.780	24.79	553	99.44	98.12	2.01	2.95
S1-3	9.08	6.54	0.600	19.24	532	94.14	98.12	1.97	2.90
S2-1	8.26	5.95	0.430	12.54	432	75.55	75.58	1.81	2.67
S2-2	8.25	5.94	0.705	20.54	435	78.14	75.58	1.73	2.54
S2-3	8.22	5.92	0.663	19.25	474	84.99	75.58	1.76	2.63
P1-1	9.09	6.54	0.765	24.56	N	N	75.58	1.60	2.40
P1-2	9.05	6.52	0.779	24.90	N	N	75.58	1.62	2.35
P1-3	9.01	6.49	0.580	18.46	405	75.58	75.58	1.61	2.38
P2-1	8.41	6.06	0.795	23.61	N	N	65.75	N	N
P2-2	8.53	6.14	0.689	20.76	361	66.33	65.75	1.65	2.43
P2-3	8.63	6.21	0.500	15.24	359	65.17	65.75	1.58	2.38

شکل (۱۳) رابطه مقاومت فشاری LWAC با انرژی شکست کل را نشان می‌دهد. آنچه از شکل می‌توان نتیجه گرفت این است که با افزایش مقاومت فشاری LWAC مقدار G_F نیز افزایش می‌یابد. به طور کلی میانگین مقدار G_F برای LWAC ساخته شده با اسکوریا و پومیس که در این تحقیق مطالعه شد در حدود $65/7-98/1$ N/m متغیر بوده است. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که نوع سنگدانه‌ها در میزان انرژی شکست بتن نقش اساسی دارد.

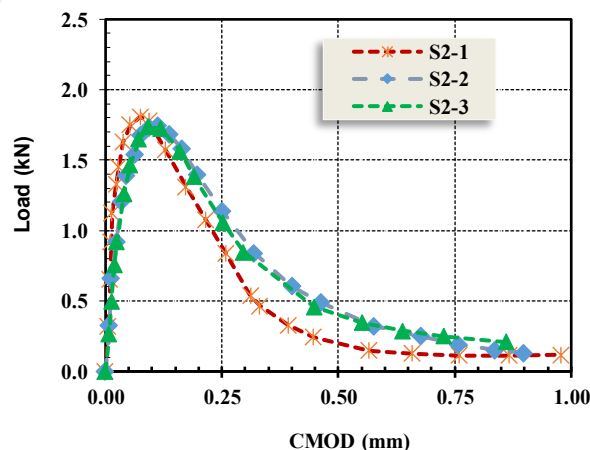
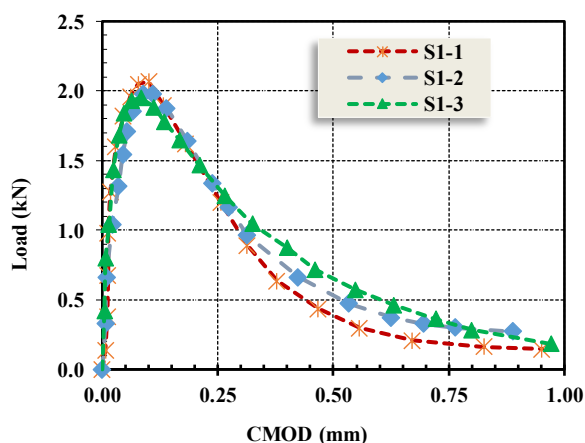


شکل ۱۳- رابطه مقاومت فشاری با انرژی شکست کل LWAC تعیین شده با روش RILEM

در نمونه‌های بتن با جایگزینی ماسه معمولی بجای ریزدانه سبک اسکوریا، مشخصات مکانیکی و انرژی شکست بتن افزایش داشته است. با این جایگزینی انرژی شکست تعیین شده به روش RILEM در مورد بتن تهیه شده با اسکوریا حدود ۲۳٪ و در مورد بتن تهیه شده با پومیس حدود ۱۵٪ افزایش داشت.

۳-۲- نتایج حاصل از روش آیین نامه بتن ژاپن (JCI)

شکل‌های (۱۴) و (۱۵) منحنی P - CMOD تیر شکاف‌دار تحت بار سه نقطه‌ای که از LWAC تهیه شده است را نشان می‌دهند. خلاصه نتایج حاصل از آزمایش و محاسبات انجام شده از روی اطلاعات منحنی‌های P - CMOD در جدول (۱۰) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که با کاهش مقاومت فشاری بتن، بار نهایی بدست آمده از آزمایش و G_F که با استفاده از روش JCI تعیین شده نیز کاهش

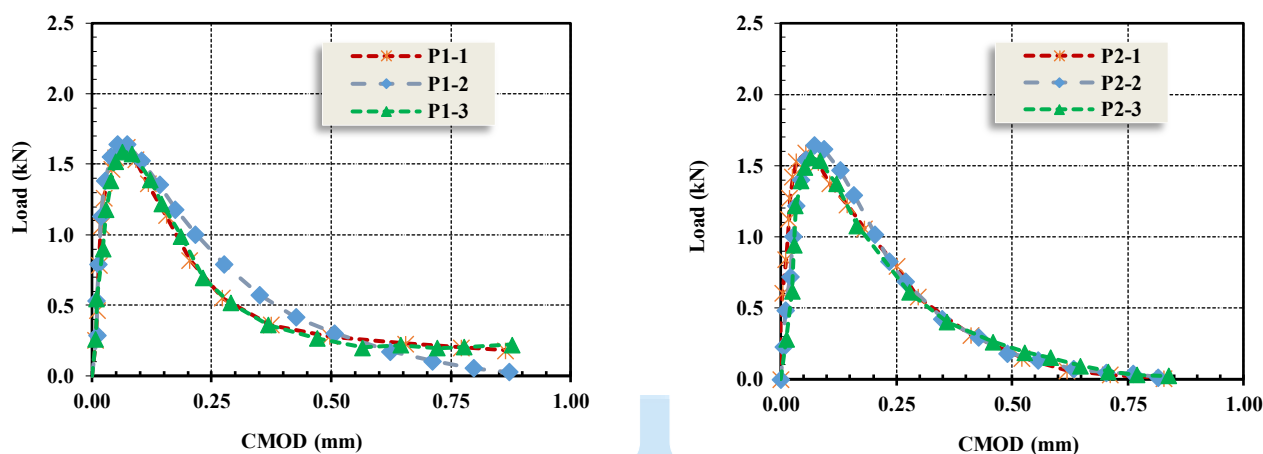


می‌یابد.

شکل ۱۴- منحنی P-CMOD تیر خمشی شکاف‌دار تحت بار سه نقطه‌ای (LWAC تهیه شده با اسکوریا)

مقدار G_F برای LWAC ساخته شده با اسکوریا با مقاومت فشاری ۳۶/۹-۲۷/۲ MPa در حدود ۱۱۰/۳-۸۲/۵ N/m است و برای LWAC ساخته شده با پومیس با مقاومت فشاری ۲۴/۴-۲۳/۰ MPa این مقدار در حدود ۶۶/۹-۵۸/۰ N/m می‌باشد. میانگین مقدار G_F

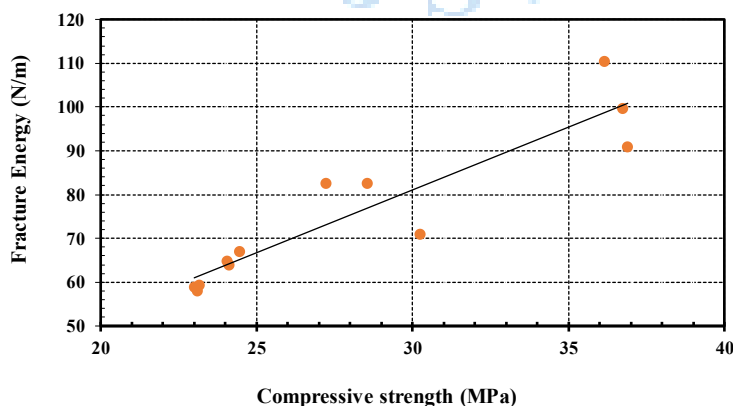
برای LWAC ساخته شده با اسکوریا و پومیس که در این تحقیق و با روش JCI مطالعه شد در حدود $3/100 - 7/58$ متغیر بود (جدول ۱۰).



شکل ۱۵- منحنی P-CMOD تیر خمشی شکاف دار تحت بار سه نقطه‌ای (LWAC تهیه شده با پومیس)

جدول ۱۰- اطلاعات تعیین انرژی شکست کل به روش JCI (منحنی P-CMOD)

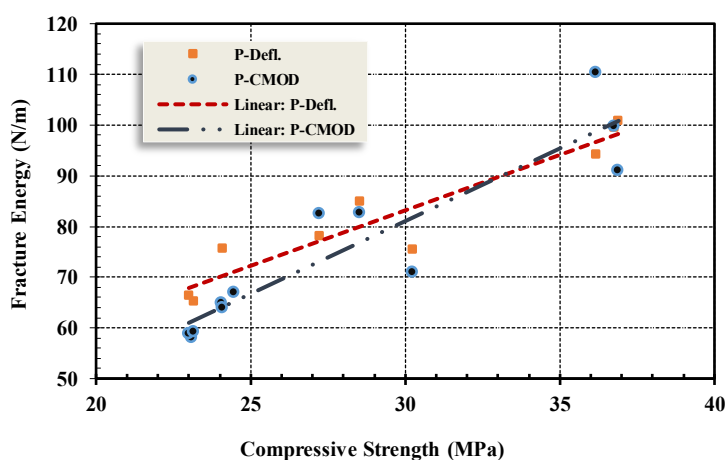
شماره نمونه	جرم تیر (kg)	جرم موثر تیر (kg)	باز شدگی ترک در موقع خرابی (CMOD)	کار انجام یافته توسط جرم نمونه (N.mm)	سطح زیر منحنی P-CMOD (N.mm)	انرژی شکست کل (N/m)	میانگین انرژی شکست کل (N/m)	بار نهایی بدست آمده از آزمایش (P _{max}) (kN)	تنش در موقعیت شکاف (f _n) (MPa)
S1-1	9.09	6.54	0.96	45.99	672	90.91	100.32	2.07	3.05
S1-2	9.00	6.48	0.89	42.48	749	99.71	100.32	2.01	2.95
S1-3	9.08	6.54	0.98	46.95	829	110.35	100.32	1.97	2.90
S2-1	8.26	5.95	0.99	43.49	514	70.91	78.66	1.81	2.67
S2-2	8.25	5.94	0.90	39.25	618	82.52	78.66	1.73	2.54
S2-3	8.22	5.92	0.86	37.36	614	82.56	78.66	1.76	2.63
P1-1	9.09	6.54	0.87	41.80	464	64.84	65.26	1.60	2.40
P1-2	9.05	6.52	0.87	41.66	491	66.97	65.26	1.62	2.35
P1-3	9.01	6.49	0.87	41.57	459	63.96	65.26	1.61	2.38
P2-1	8.41	6.06	0.76	33.90	424	58.07	58.72	1.60	2.38
P2-2	8.53	6.14	0.81	36.78	427	58.84	58.72	1.65	2.43
P2-3	8.63	6.21	0.87	39.91	419	59.26	58.72	1.58	2.38



شکل ۱۶- رابطه مقاومت فشاری با انرژی شکست کل LWAC تعیین شده با روش JCI

شکل (۱۶) رابطه بین مقاومت فشاری LWAC با انرژی شکست کل که با روش JCI تعیین شده است را نشان می‌دهد. آنچه از شکل می‌توان نتیجه گرفت این است که با افزایش مقاومت فشاری LWAC مقدار G_F نیز افزایش می‌یابد. میانگین مقدار G_F برای LWAC ساخته شده با اسکوریا و پومیس در حدود $۵۸/۷ - ۱۰۰/۳ \text{ N/m}$ متغیر می‌باشد. با جایگزینی ماسه معمولی بجای ریزدانه سبک اسکوریا، در روش JCI انرژی شکست بتن تهیه شده با اسکوریا حدود ۲۸% و در مورد بتن تهیه شده با پومیس حدود ۱۱% بیشتر شده است. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که نوع سنگدانه‌ها در میزان انرژی شکست بتن نقش اساسی دارد.

هر دو روش RILEM و JCI نشان می‌دهند که با افزایش مقاومت فشاری LWAC مقدار G_F نیز افزایش دارد (شکل ۱۷). در کل مقدار تغییرات G_F که از دو روش RILEM و JCI و با آزمایش روی LWAC بر روی کل نمونه‌ها تعیین شد در محدوده $۵۸/۰ - ۱۱۰/۳ \text{ N/m}$ قرار دارد و نتایج حاصل از این دو آیین‌نامه تطابق خوبی با هم دارند.



شکل ۱۷- مقایسه انرژی شکست کل LWAC تعیین شده با دو روش RILEM و JCI

انرژی شکست کل نمونه‌های LWAC با سنگدانه‌های اسکوریا و پومیس که بر اساس دو روش RILEM و JCI تعیین گردید برای بازه مقاومت فشاری $۲۳/۰ - ۳۶/۹ \text{ MPa}$ در محدوده $۵۸/۰ - ۱۱۰/۳ \text{ N/m}$ قرار دارد. کم بودن انرژی شکست کل LWAC نسبت به NWC بیانگر رفتار ترد LWAC نسبت به NWC می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور تعیین خصوصیات مکانیکی بتن سبکدانه (LWAC) ۳۶ نمونه و انرژی شکست کل (G_F)، ۱۲ نمونه‌ای استاندارد تهیه و مورد آزمایش قرار گرفت. برای تمامی طرح‌های مخلوط مقدار مواد سیمانی، روان کننده و شرایط نگهداری یکسان بوده و متغیر فقط نوع سنگدانه‌های ریز و درشت بوده است. خصوصیات مکانیکی LWAC با استفاده از استانداردهای ASTM و G_F با دو روش RILEM و JCI تعیین و نتایج زیر حاصل گردید:

۱- با مقایسه خصوصیات مکانیکی LWAC ساخته شده با اسکوریا و پومیس که با آزمایش روی نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد تعیین شده است مشخص می‌شود در تمامی نمونه‌ها با جایگزینی ماسه معمولی بجای ریزدانه سبک مشخصات مکانیکی بتن افزایش داشته است. با این جایگزینی، افزایش مقاومت فشاری در مورد بتن تهیه شده با اسکوریا حدود ۲۸% و پومیس ۵% بوده است.

- ۲ - میانگین انرژی شکست کل اندازه‌گیری شده با هر دو روش RILEM و JCI برای LWAC ساخته شده با اسکوریا $89/2 \text{ N/m}$ و با پومیس در حدود $66/3 \text{ N/m}$ می‌باشد. با مقایسه نسبت میانگین انرژی شکست کل به مقاومت فشاری بتن نتیجه گرفته می‌شود رفتار بتن تهیه شده با اسکوریا در مقایسه با پومیس ترد می‌باشد.
- ۳ - در نمونه‌های بتنی با جایگزینی ماسه معمولی بجای ریزدانه سبک، G_F بتن افزایش داشته است. با این جایگزینی، افزایش انرژی شکست در مورد LWAC تهیه شده با سنگدانه اسکوریا در روش RILEM حدود 23% و روش JCI حدود 28% بوده و LWAC تهیه شده با سنگدانه پومیس، میزان افزایش در دو روش به ترتیب حدود 15% و 11% بوده است.
- ۴ - با مقایسه مقادیر G_F مشخص می‌شود روش RILEM نسبت به روش JCI بطور متوسط حدود 5% انرژی شکست کل بیشتری را برآورد کرده است.
- ۵ - نتایج این تحقیق نشان می‌دهد نوع سنگدانه‌های سبک اسکوریا و پومیس در میزان G_F نقش اساسی داشته و با افزایش مقاومت فشاری LWAC میزان انرژی نیز افزایش می‌یابد. سهم نوع ریزدانه استفاده شده در تهیه بتن (ماسه معمولی یا سبکدانه) در این افزایش بیشتر می‌باشد.
- ۶ - در شرایط مقاومت فشاری یکسان، نتایج نشان می‌دهد انرژی شکست LWAC کمتر از NWC بوده و این موضوع ترد بودن رفتار LWAC نسبت NWC را بیان می‌کند.

۵ - مراجع

- [1] Kaplan, M. F. (1961). Crack propagation and the fracture of concrete. *ACI Journal*, Vol 58, pp. 591-610.
- [2] Hillerborg, A. Modeer, M. and Petersson, P. E. (1976). Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cement and Concrete Research*, Vol 6, pp. 773-781.
- [3] Bazant, Z. P. and Oh, B. H. (1983). Crack band theory for fracture concrete. *Materials and Structures*, Vol 16, pp. 155-177.
- [4] Jenq, Y. S. and Shah, S. P. (1985). Two-parameter fracture model for concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol 111, pp 1227-1241.
- [5] Nallathambi, P. and Karihaloo, B. L. (1986). Determination of the specimen size independent fracture toughness of plain concrete. *Magazine of Concrete Research*, Vol 38, pp. 67-76.
- [6] Bazant, Z. P. and Kazemi, M. T. (1990). Determination of fracture energy, process zone length, and brittleness number from size effect with application to rock and concrete. *International Journal of Fracture*, Vol 44, pp. 111-131.
- [7] Xu, S. and Reinhardt, H. W. (1999). Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part III: Compact tension specimens and wedge splitting specimens. *International Journal of Fracture*, Vol 98, pp. 179-193.
- [8] Bazant, Z. P. (2002). Concrete fracture models testing and practice. *Engineering Fracture Mechanics Journal*, Vol 69, pp. 165-205.
- [9] Shailendra Kumar, S. and Barai, S. V. (2011). *Concrete Fracture Models and Applications*. Springer.
- [10] Bazant, Z. P. and Planas, j. (1998). *Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials*. CRC Press, New York.
- [11] Gdoutos, E. E. (2020). *Fracture Mechanics an Introduction*. Third Edition, Springer.
- [12] Shi, Z. (2009). *Crack Analysis in Structural Concrete Theory and Applications*. Butterworth-Heinemann publications.
- [13] Galvez, J.C. Cervenka, J.C. Cendon, D.A. and Saouma, V. (2002). A discrete crack approach to normal/shear cracking of concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol 32, pp. 1567-1585.
- [14] Tang, W. C. Lo, C. T. and Chan, W. K. (2008). Fracture properties of normal and lightweight high-strength concrete, *Magazine of Concrete Research*, Vol 60, pp. 237-244.
- [15] Chen, W. Peng, L. and Yang, H. (2021). Fracture behaviors of concrete incorporating different levels of recycled coarse aggregate after exposure to elevated temperatures. *Journal of Building Engineering*, Vol 35.
- [16] Karamloo, M. Mazloom, and M. Payganeh, G. (2016). Effects of maximum aggregate size on fracture behaviors of self-compacting lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, Vol 123, pp. 508-515
- [17] Tang, W. Cui, H. and Tahmasbi, S. (2016). Fracture Properties of Polystyrene Aggregate Concrete after Exposure to High Temperatures, *Materials*, MDPI.

- [18] Roesler, J. Paulino, G.H. Park, K. and Gaedicke, C. (2007). Concrete fracture prediction using bilinear softening. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 29, pp. 300–312.
- [19] Khalily, M. Saberi, V. Saberi, H. Mansouri, V. Sadeghi, A. and Pachideh, G. (2022). An Experimental Study on the Effect of High Temperatures on Performance of the Plastic Lightweight Concrete Containing Steel, Polypropylene and Glass Fibers. *Journal of Structural and Construction Engineering*, Vol. 8(12), pp.284-307.
- [20] Pachideh, G. and Toufigh, V. (2022). Strength of SCLC Recycle Springs and Fibers Concrete Subject to High Temperatures. *Structural Concrete*, Vol. 23 (1), pp. 285-299.
- [21] ASTM C1240. (2005). *Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures*. Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, USA.
- [22] ASTM C494. (2008). *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*. Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, USA.
- [23] RILEM Committee on Fracture Mechanics of Concrete-Test Methods, (1985). *Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of the Three-Point Bend Tests on Notched Beams*. In Materials and Structures.
- [24] Shah, S. P. Swartz, S. E. and Ouyang, C. (1995). *Fracture Mechanics of Concrete: Applications of Fracture Mechanics to Concrete, Rock and Other Quasi-Brittle Materials*. Wiley, New York.
- [25] Guo, X. H. and Gilbert, R. I. (2000). The Effect of Specimen Size on the Fracture Energy and Softening Function of Concrete. *Materials and Structures*, Vol 33, pp. 309-316.
- [26] JCI. (2003). *Method of Test for Fracture Energy of Concrete by Use of Notched Beam*. Japan Concrete Institute Standard.
- [27] ASTM D75. (2003). *Standard Practice for Sampling Aggregates*. Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, USA.
- [28] ASTM C136. (2001). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, USA.
- [29] ASTM C 29. (1997). *Standard Test Method for Bulk Density and Voids in Aggregate*. Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, USA.
- [30] ASTM C127. (2007). *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate*. Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, USA.
- [31] ACI Committee 211.4R-08. (2008). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*. ACI Manual of Concrete Practice.
- [32] ASTM C39. (2001). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, USA.
- [33] ASTM C293. (2002). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading)*. Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, USA.
- [34] ASTM C496. (2005). *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, USA.
- [35] ASTM C469. (2002). *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*. Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, USA.
- [36] ASTM C617. (2003). *Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens*. Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, USA.