



مطالعه های آزمایشگاهی و عددی گسترش ترک در بتن خودتراکم سبک

حسن صالحی¹، موسی مظلوم^{2*}

1- دانشجوی دکترا، مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

2- دانشیار، مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

* mazloom@srutu.edu, 16785-136، صندوق پستی

چکیده

به منظور تعیین پارامترهای شکست بتن خودتراکم سبک دو روش مختلف اثر اندازه و کار شکست مورد استفاده قرار گرفت. برای لحاظ نمودن رفتار بتن در مقاومت های متفاوت، دو طرح اختلاط با نسبت های آب به سیمان 0.42 و 0.47 در نظر گرفته شد. در ابتدا خصوصیات روانی بتن مورد بررسی قرار گرفت و بعد از اطمینان از خودتراکم بودن آن ها خصوصیات مکانیکی بتن سخت شده تعیین گردید. سپس با بهره گیری از دو روش فوق و با انجام آزمایش خمش سه نقطه ای بر روی 30 تیر با ابعاد مختلف، پارامترهای شکست بتن و بازشدگی نوک ترک محاسبه شدند. با افزایش نسبت آب به سیمان از 0.42 به 0.47، انرژی های شکست اولیه، کل و چقرمگی شکست بتن خودتراکم سبک به ترتیب 39.4٪، 33.4٪ و 25.3٪ کاهش یافتند. به این ترتیب ضمن مشخص شدن تاثیر مثبت کاهش نسبت آب به سیمان بر پارامترهای شکست این نوع بتن، دلایل تغییر رفتار بتن هم بررسی شد. همچنین چند رابطه تجربی ارائه گردید که با استفاده از آن ها می توان تنها با محاسبه مقاومت فشاری بتن انرژی شکست اولیه، انرژی کل، نسبت انرژی ها به یکدیگر و چقرمگی شکست بتن را تعیین نمود. سپس با بهره گیری از روش المان محدود بسط یافته و پارامترهای آزمایشگاهی تعیین شده به مدل سازی معکوس پرداخته شد. نتایج بیانگر دقت بالای روش المان محدود بسط یافته در حل عددی مسائل شکست و نیز کارایی بالای پارامترهای محاسبه شده برای تعیین رفتار بتن های خودتراکم سبک در هنگام گسترش ترک است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 18 بهمن 1396

پذیرش: 26 اسفند 1396

ارائه در سایت: 30 فروردین 1397

کلید واژگان:

بتن خودتراکم سبک

چقرمگی شکست

المان محدود بسط یافته

پارامترهای شکست

روش کار شکست

Experimental and numerical studies of crack propagation in self-compacting lightweight concrete

Hasan Salehi, Moosa Mazloom*

Department of Civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.

* P.O.B. 16785-136, Tehran, Iran, mazloom@srutu.edu

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 07 February 2018
Accepted 17 March 2018
Available Online 19 April 2018

Keywords:

Self-compacting lightweight concrete
Fracture toughness
Extended finite element method
Fracture parameters
Work of fracture method

ABSTRACT

To determine the fracture parameters of self-compacting lightweight concrete (SCLC) size effect and work of fracture methods were used. For considering the behavior of concrete in different strengths, two mixes with water to cement (W/C) ratios of 0.42 and 0.47 were used. At first, the workability of the concrete was investigated and after ensuring their self-compacting specifications, the mechanical properties of the hardened concrete were determined. Then, by using the methods above and conducting three-point bending tests on 30 beams, concrete fracture parameters and crack-tip opening displacement were achieved. The results showed that with increasing water to cement ratio from 0.42 to 0.47, the initial and total fracture energies, and fracture toughness decreased by 39.4%, 33.4% and 25.3%, respectively. Then, the effect of the water to cement ratio on the fracture parameters of this type of concrete was discussed. Furthermore, several empirical relations have been proposed using them and only by the determination of the compressive strength, the initial fracture energy, total fracture energy, the ratio of energies to each other, and fracture toughness can be determined. Afterwards, by using the fracture parameters, the mechanical properties of the concrete and the extended finite-element method, the crack propagation was modeled. The results showed that this method has high accuracy in the numerical solution of the fracture problems as well as the efficiency of the obtained parameters for determining the behavior of self-compacting lightweight concrete.

در مجاورت نوک ترک می پردازد. در این علم، رشد ترک و اثر آن بر مقاومت و رفتار سازه ها مورد بررسی قرار می گیرد. مفهوم مکانیک شکست الاستیک خطی¹ در طول بیش از 40 سال گذشته بسط یافته و با درجه اطمینان بالایی برای سازه های فلزی مورد استفاده قرار می گیرد. ولی بتن یک ماده ناهمگن با رفتار غیر خطی است که با توجه به احتمال وجود عیوب متعدد در آن، ممکن

1- مقدمه

مسئله شکست یکی از موضوعاتی است که بشر از ابتدای ساخت سازه با آن روبرو بوده است. البته در عصر حاضر با توجه به پیشرفت تکنولوژی و ساخت سازه هایی با ابعاد بزرگ و مشخصه های خاص این مسئله بیشتر مورد توجه قرار گرفته و مطالعات فراوانی به این موضوع اختصاص یافته است. مکانیک شکست شاخه ای از مکانیک جامدات است که به مطالعه رفتار و شرایط مواد

¹ Linear elastic fracture mechanics (LEFM)

خطی [13]، سه خطی [14] و نمایی [15] معرفی شده است. از میان روابط نرم‌شوندگی متفاوتی که در این حوزه وجود دارد منحنی دو خطی که توسط پترسون [11] ارائه شده بطور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. ونگ و همکاران [16] با تعیین انرژی شکست بتن‌های حاوی لاستیک و استفاده از مدل ترک مجازی⁴ با منحنی نرم‌شوندگی دوخطی به شبیه‌سازی انتشار ترک پرداخته و به مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی پرداختند. بروجردیان و همکاران [17] با استفاده از مدل‌های آسیب-پلاستیک و مکانیک شکست بتن به مطالعه تأثیر تنش‌های چسبیده بر رفتار تیرهای بتن مسلح پرداختند. علاوه بر روش‌ها و مدل‌هایی که پیش‌تر به آن‌ها اشاره شد در دو دهه اخیر روش غنی شده و قدرتمند المان محدود بسط یافته نیز ارائه شده است که در آن سازه تحت مطالعه در خصوص گسترش ترک بصورت یکپارچه مورد تحلیل قرار می‌گیرد. این روش اولین بار توسط بلیتچکو و بلاک [18] برای بررسی گسترش ترک معرفی شد و در آن با غنی نمودن المان‌های نزدیک نوک و امتداد ترک از حساسیت‌های مش بندی کاسته می‌شود. روش المان محدود بسط یافته ضمن اینکه امکان تحلیل شروع و گسترش ترک در مسیر دلخواه را فراهم می‌آورد به مش بندی مجدد نیز نیازی ندارد.

برای تحلیل دقیق بتن در بسیاری از روش‌های المان محدود، منحنی نرم‌شوندگی بتن یا همان مدل دو خطی مورد نیاز است (شکل 1). برای تعیین این منحنی، نیاز به در اختیار داشتن سه ویژگی مهم بتن یعنی مقاومت کششی (f_t)، انرژی شکست اولیه (G_F) و انرژی شکست کل (G_F) آن است. البته انرژی شکست کل و اولیه دو ویژگی کاملاً متفاوت بتن بوده که هر یک از آن‌ها از روش آزمایش خاصی بدست آمده و مطابق مطالعات محققین، این مقادیر با نسبت‌های خاصی به یکدیگر مرتبط هستند [19]. مقدار انرژی شکست کل که از روش کار شکست بدست می‌آید با تقسیم سطح زیر نمودار بار-جابجایی به مساحت شکست نمونه بتنی بدست می‌آید. مقدار انرژی شکست اولیه بتن نیز علاوه بر اینکه مستقل از شکل و ابعاد نمونه است، بلکه آزمایش آن نیز به مراتب ساده‌تر و دارای حساسیت کمتری نسبت به روش کارشکست بوده و برای تعیین آن فقط به حداکثر بار قابل تحمل توسط تیرها نیاز است [20].

مقالات متعددی به مطالعه رابطه بین انرژی شکست اولیه و کل در بتن‌های معمولی و خودتراکم پرداخته‌اند. بعنوان مثال مطابق مطالعات صورت گرفته ثابت شده است که در بتن معمولی نسبت G_F به G_F بین 2 تا 2.5 است [21]. بیگی و همکاران [22-24] در سه مطالعه مجزا به بررسی اثر نسبت آب به سیمان، سن بتن و بزرگترین سنگ‌دانه موجود در بتن خودتراکم بر پارامترهای شکست آن پرداختند و مقادیر 2.92، 2.7 و 3.11 را برای نسبت G_F/G_F ذکر کردند که در آن با تعیین هر یک از انواع انرژی با دقت بالایی می‌توان انرژی شکست دیگر را بدون انجام آزمایش بدست آورد. همچنین نیک بین و همکاران [25] نیز با بررسی تأثیر میزان بکارگیری پودر ریزدانه معدنی در ساختار بتن دریافتند که با افزایش حجم پودر مصرفی در ساخت بتن خودتراکم، نسبت G_F/G_F در محدوده عدد 3 تغییر خواهد کرد.

با توجه به نقش مهم بتن در صنعت ساختمان، تکنولوژی آن نیز همیشه در حال پیشرفت و بهینه شدن است. لازم به ذکر است که پیشرفت در تکنولوژی بتن‌های جدید منجر به اختراع بتن خودتراکم سبک شده است. در این نوع بتن، ریزدانه و سنگ‌دانه‌ها با خمیری روان از سیمان و پودرهای معدنی مخلوط می‌شوند [26، 27]. این نوع بتن قادر است بدون انجام ویریه و

است در هنگام بروز تنش گسترش ترک نیز در آن صورت بگیرد. وجود ترک در سازه‌های بتنی امری اجتناب ناپذیر است و در نظر نگرفتن اثرات این ترک‌ها سبب کاهش قابل توجه عمر مفید سازه و در نتیجه به خطر افتادن ایمنی آن می‌شود. شکست بتن همراه با گسترش ترک‌های متعدد در آن است و به طور معمول قبل از رسیدن یک سازه به حداکثر بار خود در آن ترک‌های بزرگی ایجاد می‌گردد. بنابراین مطالعه و شناخت رفتار شکست بتن برای مقابله با گسترش ترک در آن امری ضروری است.

محققین متعددی اثر فاکتورهای مختلف از قبیل افزایش سن بتن، حداکثر اندازه سنگدانه مصرفی، نسبت آب به سیمان و مقدار استفاده از سنگدانه و پودر سنگ را بر پارامترهای شکست بتن معمولی، بتن پرمقاومت و بتن خودتراکم بررسی نموده‌اند [1-4]. برخی مطالعات با اشاره به اینکه مقاومت خمیر سیمان الزاماً در آب به سیمان پایین‌تر بهتر نیست، گزارش نموده‌اند که رابطه بین نسبت آب به سیمان و انرژی شکست کاملاً منظم نیست [5]. در این راستا کارپینتری و براینتی [5] با بررسی بتن عادی و مسلح در نسبت آب به سیمان‌های 0.45 تا 0.75 بیان کردند که حداکثر مقدار انرژی شکست در نسبت آب به سیمان 0.55 رخ می‌دهد. این در حالی است که بیشتر مطالعات گویای این مطلب هستند که پارامترهای شکست بشدت به نسبت آب به سیمان و نوع مصالح بکار رفته در ساخت بتن حساس هستند، به نحوی که با کاهش نسبت آب به سیمان و یا استفاده از سنگ‌دانه‌های قوی‌تر در طرح اختلاط بتن، انرژی شکست آن افزایش می‌یابد [6، 7]. اینک و آلیامک [8] با انجام مطالعه آزمایشگاهی گزارش نمودند که با افزایش نسبت آب به سیمان، علاوه بر کاهش خصوصیات مکانیکی بتن از قبیل مقاومت فشاری و کششی آن، مقدار باز شدگی بحرانی نوک ترک و نیز چقرمگی شکست آن نیز کاهش می‌یابد. آن‌ها همچنین مجموعه‌ای از روابط را پیشنهاد نمودند که با کمک آن‌ها می‌توان بدون انجام آزمایش‌های شکست، با تقریب خوبی برخی پارامترهای شکست را پیش‌بینی نمود. بنابراین بیشتر مطالعات صورت گرفته در این حوزه، بیان‌کننده رابطه مستقیم میان مقاومت فشاری، نسبت آب به سیمان و پارامترهای شکست بتن هستند.

از طرف دیگر مدل‌سازی عددی ترک در بتن یکی از دغدغه‌های اساسی محققان است، بطوری که شبیه‌سازی‌های عددی بتن در صورتی که دقیق و قابل اعتماد باشند می‌توانند برای طراحی سازه‌های جدید و نیز ارزیابی ایمنی سازه‌های موجود بسیار مورد استفاده قرار بگیرند. همانطور که پیشتر ذکر شد بتن یک ماده شبه ترد است یعنی ناحیه غیرخطی آن که در نوک ترک تشکیل می‌شود و ناحیه پردازش ترک (FPZ^1) نامیده می‌شود در مقایسه با ابعاد سازه نسبتاً بزرگ است. بدلیل وجود این منطقه پردازش غیرخطی بزرگ، مکانیک شکست الاستیک خطی قادر به پیش‌بینی انتشار ترک در نمونه‌های بتنی نبوده و باید برای آن از مکانیک شکست غیرخطی² استفاده نمود [9]. به منظور غلبه بر محدودیت‌های مکانیک شکست خطی، هیلبرگ و همکاران [10] اولین مدل مکانیک شکست غیرخطی بتن یعنی مدل ترک چسبیده³ را بسط دادند تا بتواند شکست بتن را با روش المان محدود مدل‌سازی نماید. محققان بسیاری از جمله پترسون [11] و مالمال و دمپسی [12] به بررسی رفتار شکست مصالح شبه ترد با استفاده از مدل ترک مجازی پرداخته‌اند. در ادامه در طول سالیان گذشته برای پیش‌بینی رفتار شکست مصالح بتنی روابط متفاوتی از جمله منحنی‌های نرم‌شوندگی خطی [10]، دو

¹ Fracture Process Zone² Non-Linear Fracture Mechanics³ Cohesive crack model⁴ Fictitious crack model

آن نیز متفاوت از بتن های نرمال و یا خودتراکم معمولی خواهد بود. بنابراین هدف نخست این مطالعه، بررسی تاثیر نسبت آب به سیمان بر پارامترهای شکست حاصل از هر دو روش کار شکست و اثر اندازه است. با توجه به پیچیدگی روند محاسبه پارامترهای شکست بتن و نیاز به تجهیزات خاص برای انجام این کار، ارزیابی رفتار شکست این بتن و تعیین رابطه بین برخی پارامترهای شکست با مقاومت فشاری آن که به نسبت بسیار ساده تر بدست می آید کاری سودمند خواهد بود. هدف دیگر این مطالعه نیز این است که رابطه ای بین انرژی شکست کل (G_F) و اولیه (G_f) استخراج شود تا برای تعیین منحنی نرم شوندگی بتن خودتراکم سبک و کالیبره نمودن تحلیل های المان محدود مورد استفاده قرار گرفته و الزامی به انجام آزمایش با هر دو روش نباشد. به این منظور دو طرح اختلاط متفاوت با نسبت های آب به سیمان 0.42 و 0.47 مد نظر قرار گرفته و پارامترهای شکست از دو روش مختلف کار شکست و اثر اندازه با آزمایش خمش سه نقطه ای بر روی 30 تیر شکاف دار بدست آمدند.

از طرف دیگر با توجه به وابستگی روش های عددی به رایانه و نیز پیشرفت روز افزون در سرعت رایانه ها، این روش ها می توانند با بهره گیری از پارامترهای حاصل از آزمایش و پس از انجام صحت سنجی با نتایج آزمایشگاهی، به عنوان ابزاری کارآمد برای تحلیل مسائل با ابعاد و اشکال مختلف مورد استفاده قرار بگیرند. در این پژوهش برای مدل سازی تیرها از روش المان محدود بسط یافته استفاده شده است. این روش توانمندی بالایی در مدل نمودن ترک ها داشته و فقط بایستی کارایی آن با مطالعات آزمایشگاهی مورد تایید قرار گرفته و داده های اولیه آن که همان خصوصیات ذاتی مواد هستند مشخص شود. به این ترتیب نتایج این پژوهش می تواند بعنوان اولین مطالعه در این زمینه، ضمن فراهم نمودن مجموعه اطلاعاتی جامع از رفتار شکست بتن خودتراکم سبک، در سایر مطالعات عددی نیز به عنوان مرجع صحت سنجی، کالیبره نمودن و طراحی بتن در مقابل شکست مورد استفاده قرار بگیرد.

2- روش المان محدود بسط یافته ($XFEM^1$)

روش المان محدود بسط یافته یکی از جدیدترین روش های ارائه شده برای مدل سازی مسائل شکست است که نسبت به روش های قبلی دارای مزایای متعددی است. در استفاده از روش های پیشین برای این که میل نمودن تنش به بی نهایت در نوک ترک به خوبی مدل شود باید از مش بسیار ریز و یا المان های تکین در نوک ترک استفاده شود و همچنین در ترک های در حال رشد نیز همان طور که ترک رشد می کند مش باید بتواند در هر گام خود را با هندسه جدید ترک مطابقت دهد. بنابراین استفاده مستقیم از روش المان محدود برای مدل کردن ترک، به دلیل تمرکز تنش شدید در نوک آن با خطای غیرقابل اغمازی همراه خواهد بود.

روش المان محدود بسط یافته روشی نوین است که علاوه بر دارا بودن مزایای المان محدود کلاسیک، مشکلات آن را نیز در مدل سازی ترک و ناپیوستگی ها تا حد زیادی رفع نموده است. عدم نیاز به استفاده از المان های تکین در نوک و اطراف ترک، عدم نیاز به تطبیق مش با ترک، امکان استفاده از المان هایی با ابعاد بزرگتر در اطراف ترک و نیز عدم نیاز به تطابق و ایجاد مش جدید در هر مرحله از گسترش ترک، از مزایای این روش است. این روش که اولین بار در سال 1999 توسط بلیتچکو و بلک [18] مطرح شده است، برای تحلیل ترک ها در بتن عملکرد بسیار مناسبی دارد [36]. در این روش

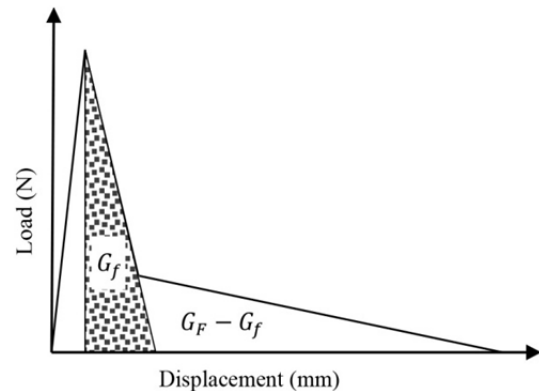


Fig. 1 Softening curve of concrete in bilinear form

شکل 1 منحنی نرم شوندگی بتن در حالت دو خطی

تحت اثر وزن خود درون قالب ها جریان یافته و فضاهای محدود و حتی انباشته از آرماتور را به درستی و بدون بروز هرگونه پدیده جداشدگی و آب انداختگی پر کند [28]. همچنین می تواند به ارتفاع زیاد و مسافت های طولانی به راحتی پمپ شود [29, 30]. کاهش وزن، حذف سر و صدای ناشی از ویبره، سادگی بتن ریزی، سرعت بالای ساخت و ساز و نیز تراکم پذیری خودبخودی بتن، برخی از مزایای بتن خودتراکم سبک هستند [31]. با توجه به موارد فوق در سالیان اخیر استفاده از بتن خودتراکم سبک به سرعت در سراسر جهان گسترش یافته است و بنابراین نیاز به مطالعه در حوزه های مختلف این نوع بتن بطور جدی احساس می شود. البته در این سال ها، خواص مکانیکی آن از دیدگاه های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است، اما در میان ویژگی های بتن سخت شده، رفتار شکست یک پدیده اساسی در طراحی و ارزیابی ایمنی سازه ها به ویژه سازه های بزرگ بتنی است که متأسفانه کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از محدود مطالعات صورت گرفته در خصوص انرژی شکست این نوع بتن می توان به مطالعات کرملو و همکاران [32, 33] اشاره نمود که در آن ها فقط با بهره گیری از روش اثر اندازه به بررسی تاثیر نسبت آب به سیمان و بزرگترین اندازه سنگدانه بر پارامترهای شکست حاصل از این روش پرداخته شده است. نتایج مطالعات حاکی از این بودند که با کاهش نسبت آب به سیمان و افزایش اندازه بزرگترین سنگدانه انرژی شکست اولیه و سایر پارامترهای شکست بهبود می یابند. در همین راستا صالحی و مظلوم [34] به بررسی تاثیر استفاده از آب مغناطیسی بر رفتار شکست بتن خودتراکم سبک پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که با افزایش شدت میدان مغناطیسی، تأثیر مطلوب آب مغناطیسی بر خواص مکانیکی و پارامترهای شکست این نوع بتن افزایش می یابد. همچنین آن ها گزارش نمودند که با کاهش نسبت آب به سیمان و افزایش شدت میدان مغناطیسی، مکانیسم خرابی بتن به سمت معیار مقاومت تمایل پیدا کرده و به این ترتیب مکانیک شکست الاستیک خطی در آن ها از عملکرد ضعیف تری برخوردار خواهد بود. در پژوهشی دیگر الگوریتمی برای مطالعه اثر اندازه در بتن های خودتراکم و خودتراکم سبک ارائه شد که قادر است بار حداکثر قابل تحمل توسط اعضای بتنی را با دقت مناسبی پیش بینی نماید [35].

حال با توجه به اینکه در بتن خودتراکم سبک از مقدار کمتری درشت دانه و مقدار بسیار بیشتری ذرات ریز مانند پودر سنگ استفاده می شود و نیز اینکه مقاومت سنگدانه های سبک به کار رفته در این نوع بتن به مراتب پایین تر از سنگدانه های بتن معمولی است بنابراین علاوه بر اینکه ریسک ایجاد ترک و رخدادن شکست در این نوع بتن بیشتر است بلکه رفتار شکست

¹ Extended finite element method

خشک اشباع لیکها به مدت 24 ساعت در آب خیسانده شده و سپس قبل از استفاده سطح آن‌ها خشک گردید. برای دستیابی به کارایی مناسب، از افزودنی فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات استفاده شد که بر اساس استاندارد ASTM C494 [38] از گروه G است. همچنین برای افزایش لزجت بتن تولیدی از پودر سنگ بسیار ریز تهیه شده از کارخانه ساوه و با وزن مخصوص 2.67 تن بر مترمکعب استفاده شد.

در این پژوهش برای تعیین پارامترهای شکست بتن، از طرح مخلوط‌هایی با دو نسبت آب به سیمان مختلف 0.42 و 0.47 استفاده شده است که با نام‌های Mix1 و Mix2 نام‌گذاری شدند. نسبت‌های طرح اختلاط مربوطه در جدول 2 نمایش داده شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود بیشتر ترکیبات بتن خودتراکم سبک ثابت نگهداشته شد تا امکان مقایسه درست نتایج فراهم گردد. برای اطمینان از میزان کارایی و روانی بتن و همچنین برای اطمینان از خودتراکم بودن بتن، آزمایش‌های جریان اسلامپ، حلقه J و جعبه U بر اساس دستورالعمل EFNARC [39] صورت پذیرفت.

3-2- روش انجام آزمایش

در آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مربوطه برای تعیین پارامترهای شکست بتن، روش‌ها و آزمایش‌های مختلفی مطرح شده است. اما با توجه به اینکه مود یک یعنی مود بازشونده مهمترین و معمول‌ترین حالت برای وقوع ترک است بنابراین در این پژوهش از این مود جهت تعیین پارامترهای شکست بتن خودتراکم سبک و مدل‌سازی آن‌ها استفاده شده است. به‌منظور تعیین انرژی شکست کل (G_F) مطابق دستورالعمل رایلم-50 [40] از روش کار شکست (WFM^2) استفاده شده است. در این روش در هر طرح اختلاط بر روی 3 تیر شکاف‌دار آزمایش خمش سه نقطه‌ای انجام شد. این تیرها دارای ابعاد $84 \times 10 \times 10$ سانتی‌متری (ارتفاع×عرض×طول) بوده و شکاف اولیه در آن‌ها با وارد نمودن یک ورق اکریلیک با ضخامت 3 میلی‌متر در وسط سطح کششی تیر ایجاد شد. اندازه دهانه تیر و نسبت شکاف اولیه به ارتفاع تیر به‌ترتیب برابر 800 میلی‌متر و 0.5 در نظر گرفته شدند.

جدول 1 خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سیمان پرتلند 425-1

Table 1 Physical and Chemical Properties of type I-425 Portland cement

مشخصات فیزیکی		ترکیبات شیمیایی	
مقاومت فشاری (MPa)		C ₃ S (%)	
2 روزه		21.9	
28 روزه		48.4	
زمان گیرش		10.4	
گیرش اولیه (min)		3.2	
گیرش نهایی (hr.)		0.8	

جدول 2 طرح اختلاط بتن خودتراکم سبک

Table 2 Mix proportions of SCLC mixes

نام ترکیب	سیمان	آب	آب به سیمان	سنگ‌دانه	ماسه	پودر سنگ	روان کننده
Mix1	360	151.2	0.42	230	780	210	4.8
Mix2	335	157.4	0.47	230	780	210	3.7

² Work of fracture method

بجای اینکه ترک صریحاً به صورت هندسی مدل شود از توابع غنی شده مخصوص به همراه درجات آزادی اضافی برای مدل‌سازی ترک استفاده می‌گردد. در روش المان محدود بسط یافته، توابع غنی‌سازی معمولاً از یک تابع غیر پیوسته که ناپیوستگی در میدان جابه‌جایی نوک ترک را مدل می‌کند و یک تابع مجانب نوک ترک که بی‌نهایت شدن تنش در نوک ترک را مدل می‌نماید تشکیل گردیده است. برای استفاده از این روش به پارامترهای مدول الاستیسیته، مقاومت‌های کششی و فشاری و نیز انرژی شکست مربوط به هر طرح اختلاط بتن نیاز است. این پارامترها برای تحلیل خرابی و انتشار ترک در بتن به‌کار گرفته می‌شوند. در ابتدای این روش، تحلیل خرابی از نوع الاستیک بوده و بعد از اینکه شرایط شروع ترک فراهم شد، ترک ایجاد شده و تحلیل گسترش ترک بسط یافته انجام خواهد گرفت. بر اساس روش المان محدود بسط یافته، میدان جابجایی برای یک نقطه بخصوص روی عضو مانند x این‌گونه تقریب زده می‌شود [36]:

$$u = \sum_l N_l(x) u_l + \sum_k N_k(x) H_k(x) a_l \quad (1)$$

که u_l بردار جابجایی‌های گره‌ای، a_l درجات آزادی اضافی مربوط به ناپیوستگی جابجایی و $N_l(x)$ تابع شکل است. با توجه به اینکه در این مطالعه تحلیل شکست در تیر مد نظر است، بنابراین باید از تکین شدن تنش در نوک ترک اجتناب نموده و ناپیوستگی ناشی از ترک به‌صورت خاص بررسی شود. تابعی که برای مدل‌کردن ناپیوستگی میدان جابجایی در عرض ترک مورد استفاده قرار می‌گیرد ($H(x)$)، به صورت زیر تعریف می‌گردد [37]:

$$H(x) = \begin{cases} +1 & \text{اگر } (x - x^*) \cdot n \geq 0 \\ -1 & \text{اگر } (x - x^*) \cdot n < 0 \end{cases} \quad (2)$$

که x یک نقطه گوسی، x^* نقطه‌ای روی ترک و نزدیک‌ترین نقطه به نقطه x در منطقه Γ بوده و n بردار نرمال عمود بر ترک در نقطه x^* است. با معرفی رابطه (2)، معادله (1) می‌تواند به‌صورت زیر بازنویسی شود [36]:

$$u = \sum_l N_l(x) \left[u_l + H(x) a_l + \sum_{a=1}^n F^a(x) b_l^a \right] \quad (3)$$

که $H(x)$ تابع مربوط به ناپیوستگی جابجایی در عرض ترک، $F^a(x)$ تابع مجانب نوک ترک و b_l^a درجات آزادی مربوط به آن است. در معادله 3 بخش اول سمت راست معادله به تمام گره‌ها و بخش دوم به گره‌هایی که روی المان‌های قطع شده توسط ترک قرار دارند اختصاص می‌یابد و همچنین بخش سوم به گره‌های مربوط به المانی که نوک ترک داخل آن قرار گرفته است، اعمال می‌گردد.

3- خصوصیات مصالح، طرح اختلاط و روش انجام

3-1- خصوصیات مصالح و طرح اختلاط

مصالح مورد استفاده در این مطالعه شامل سیمان، سنگدانه رس منبسط شده سبک (لیکا)، ماسه، پودر سنگ و فوق روان کننده بود. سیمان مورد استفاده از نوع پرتلند 425-1 بوده و از کارخانه سیمان تهران تهیه گردید. ترکیبات شیمیایی و خصوصیات فیزیکی این سیمان در جدول 1 نمایش داده شده است. ریزدانه مورد استفاده از نوع ماسه رودخانه‌ای بوده که از الک 4.75 میلی‌متر عبور داده شده و به‌ترتیب دارای جذب آب و وزن مخصوص 1.2% و 2.66 تن بر مترمکعب بود. درشت‌دانه از نوع لیکا بود که از شرکت لیکا¹ تهیه شده و حداکثر اندازه دشت‌دانه آن به 12.5 میلی‌متر محدود گردید. برای اجتناب از کم شدن میزان روانی بتن و نیز برای داشتن درشت‌دانه با سطح

¹ Lightweight expanded clay aggregate (LECA)

نام روش هیلبرگ نیز شناخته می‌شود. این روش بر مبنای مدل ترک مجازی² استوار بوده و در آن انرژی شکست با انجام تست خمش سه نقطه‌ای بر روی تیرهای شکافدار به دست می‌آید. مقدار انرژی شکست حاصل از این روش که به انرژی شکست کل نیز معروف است به صورت مقدار انرژی مورد نیاز برای ایجاد ترک با سطح واحد تعریف شده و با استفاده از رابطه زیر از تقسیم سطح زیر نمودار بار-جابجایی بر مساحت سطح شکست بتن محاسبه می‌شود [45]:

$$G_F = \frac{W_F}{t(h - n_0)} \quad (4)$$

که W_F انرژی کل لازم برای دو نیم شدن تیر بوده و معادل سطح زیر منحنی بار جابجایی است، t عرض تیر، h ارتفاع تیر و n_0 طول شکاف اولیه تیر است. برخی محققان بیان نموده‌اند که گاهی در مقادیر به دست آمده برای G_F کمی پراکندگی وجود دارد [21, 44]. در این زمینه مالوار و وارن [46] عنوان نموده‌اند که مقدار انرژی شکست با افزایش ابعاد نمونه افزایش می‌یابد، در حالی که برخی دیگر از محققان بیان کرده‌اند که انرژی شکست مربوطه مستقل از ابعاد نمونه بوده و عدم اطمینان در نتایج حاصله به دلیل کم بودن دقت در اندازه‌گیری جابجایی‌ها است [47]. بنابراین در سال‌های گذشته مطالعات متعددی در این زمینه صورت گرفت تا دلیل وابستگی انرژی شکست کل به شکل و اندازه نمونه مشخص شود. در این مطالعات مشخص شد که منابع اصلی ایجاد خطا در روش کار شکست، به تأثیرات ناشی از وزن نمونه، جذب انرژی در خارج از منطقه شکست و بطور خلاصه به عدم محاسبه بخش انتهایی نمودار بار-جابجایی مربوط می‌شود [45, 47].

آن‌ها با مطالعه فراوان در این زمینه روشی برای حذف منبع اصلی خطاهای آزمایشگاهی یا دلایل وابستگی G_F به اندازه نمونه ارائه دادند [47]. مورسی و همکاران [48] نیز ثابت نمودند که با استفاده از روش پیشنهاد شده توسط الیسس و همکاران [47] برای آزمایش کار شکست، نتایج مستقل از نسبت شکاف و اندازه نمونه خواهد شد. همچنین آن‌ها بیان نمودند که در این حالت نتایج بدست آمده از این روش و روش اثر مرزی³ که توسط ویتمان و همکاران [49] ارائه شده است بسیار به هم نزدیک خواهند بود.

همانطور که در شکل 3 دیده می‌شود قبل از اینکه تیر بطور کامل بشکند معمولاً در نقطه‌ای مثل B در انتهای منحنی نرم‌شوندگی، آزمایش متوقف شده و مقداری بار پسماند (باقیمانده) در انتهای نمودار بار-جابجایی رایت می‌شود. مقدار بار در نقطه توقف آزمایش (P_B) تا حدی بزرگتر از صفر بوده و به این ترتیب مقدار کار اندازه‌گیری شده بیانگر مقدار واقعی انرژی شکست نخواهد بود [11]. برای محاسبه مقدار کار اصلاح شده، تأثیر بار اضافی باید به درستی در نظر گرفته شود. بدین منظور الیسس و همکاران [47] با معرفی ضریب اصلاح انتهای نمودار بار (A) روشی برای تعیین نمودار بار-جابجایی ایده‌آل و انرژی شکست صحیح از نمودار حاصل از آزمایش پیشنهاد نمودند. ضریب اصلاح بار یک ضریب تجربی است که در واقع ضریب رابطه (5-الف) بوده و اطلاعات آن از نمودار بار-جابجایی حاصل از آزمایش خمش سه نقطه‌ای تعیین می‌شود [47].

$$P - P_B = A \left[\frac{1}{(u - u_A)^2} - \frac{1}{(u_B - u_A)^2} \right] \quad (5-الف)$$

$$W_F = W_i + 2 \left(\frac{A}{u_B - u_A} \right) \quad (5-ب)$$

برای تعیین انرژی شکست اولیه بتن نیز با استفاده از روش اثر اندازه¹ (SEM)، مطابق دستورالعمل رایلم-89 [4] در هر طرح اختلاط متناسب با بزرگترین اندازه سنگدانه (D_{max})، چهار اندازه متفاوت تیر مورد استفاده قرار گرفت. تیرها دارای ضخامت (t) 38.1 میلی‌متر، ارتفاع‌های (D) 38.1، 76.2، 152.4 و 304.8 میلی‌متر و طول‌های (L) 102، 203، 407 و 814 میلی‌متر بودند. بنابراین همان‌طور که مشخص است، همه تیرها دارای ضخامت یکسان بوده و از نظر هندسی در دو بعد دیگر مشابه بودند. برای انجام آزمایش هر ارتفاع مطرح شده، سه نمونه تیر ساخته شد و در مجموع برای هر طرح اختلاط 12 تیر شکافدار ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. در همه تیرها نسبت دهانه و طول تیرها به ارتفاع آن‌ها به‌طور ثابت برابر 2.5 و 2.67 و ارتفاع شکاف‌ها (a_0) 0.2 برابر ارتفاع تیر در نظر گرفته شد. از دستگاه یونیورسال الکتروکنترل با ظرفیت 150 کیلو نیوتن برای آزمایش خمش سه نقطه‌ای استفاده شد. پیکربندی دستگاه یونیورسال و نمونه‌های تحت آزمایش در شکل 2 نمایش داده شده است. آزمایش WFM بر اساس دستورالعمل رایلم-50 [40] به صورت تغییر مکان کنترل انجام شد. نرخ‌های بارگذاری و جابجایی به گونه‌ای تنظیم شدند که حداکثر بار در SEM و WFM به ترتیب در حدود پنج و یک دقیقه اتفاق بیفتند.

برای تعیین انرژی شکست هر یک از طرح‌های اختلاط، علاوه بر داده‌های حاصل از آزمایش‌های WFM و SEM، به مقادیر مدول الاستیسیته و مقاومت کششی بتن نیز نیاز بود. بنابراین در هر طرح، شش نمونه استوانه‌ای 15x30 سانتی‌متری برای تعیین مدول الاستیسیته و مقاومت کششی بتن و نیز سه نمونه مکعبی 10 سانتی‌متری برای تعیین مقاومت فشاری بتن ساخته شد. برای تعیین مقاومت کششی، فشاری و مدول الاستیسیته بتن به ترتیب از آیین‌نامه‌های ASTM C496 [41]، BS EN 12390 [42] و ASTM C469 [43] استفاده گردید. تمام نمونه‌ها در دمای 20 ± 2 درجه سانتی‌گراد در داخل حوضچه آب اشباع نگهداری شده و در سن 28 روز مورد آزمایش قرار گرفتند.

3-3- محاسبه پارامترهای شکست با روش آزمایشگاهی کار شکست

برای تعیین پارامترهای شکست بتن روش‌های متعددی توسط استانداردهای بین‌المللی و محققین مختلف [44] ارائه شده است. در میان روش‌های مختلف روش کار شکست و اثر اندازه از متداول‌ترین روش‌ها برای تعیین انرژی شکست بتن محسوب می‌شوند. این روش‌ها به ترتیب در دستورالعمل‌های رایلم-50 [40] و رایلم-89 [4] مطرح شده‌اند. از آنجایی که روش کار شکست به وسیله هیلبرگ و همکاران [10] پیشنهاد شده است در بسیاری از منابع به



Fig. 2 Test setup configuration for three-point bending tests

شکل 2 نمایی از دستگاه آزمایش خمش سه نقطه‌ای

² Fictitious crack model (FCM)

³ Boundary effect method

¹ Size effect method

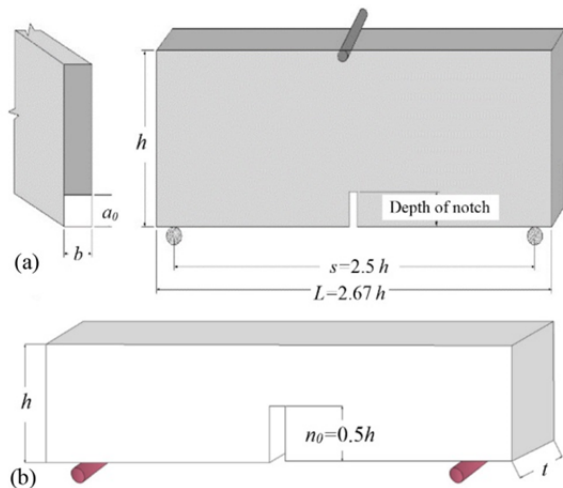


Fig. 4 Formation of test beam samples (a) SEM (b) WFM

شکل 4 نمایی از نمونه تیرهای آزمایش (a) روش اثر اندازه (b) روش کار شکست

4- نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی

4-1- خواص بتن خودتراکم سبک تازه

پس از مخلوط کردن ترکیبات بتن خودتراکم سبک، بر اساس دستورالعمل EFNARC [39] کارایی بتن تازه با اندازه گیری جریان اسلامپ، آزمایش جعبه U شکل و حلقه J ارزیابی شد. خواص بتن تازه در جدول 3 نشان داده شده است. با انجام آزمایش اسلامپ، مشخص شد که بتن حاصل مقاومت مناسبی در مقابل جداسازی و آب انداختگی دارد. البته این روانی و کارایی مناسب با توزیع همگن سنگدانه ها در خمیر نیز قابل تشخیص بود به شکلی که در نمونه های کششی شکسته شده دانه های سنگدانه کاملاً یکنواخت پخش شده بودند.

حداکثر زمان جریان اسلامپ برای مخلوط های مورد آزمایش 3.9 ثانیه بدست آمد که مقدار مناسبی از لحاظ آیین نامه است. نتایج حاصل از آزمایش های اختلاف ارتفاع جعبه U و شعاع حلقه J نیز مطابق جدول 3 است که نشان می دهد هر دو طرح اختلاط ملزومات لازم برای خودتراکم بودن را مطابق دستورالعمل های مربوطه دارا هستند [39]. ذکر این نکته لازم است که با توجه به هدف اصلی این مطالعه که بررسی پارامترهای شکست بتن خودتراکم سبک است، در این مرحله فقط به اطمینان از خودتراکم بودن بتن بسنده شده و از تحلیل هر یک از نتایج اجتناب شده است.

4-2- پارامترهای شکست بر اساس روش WFM

بر اساس دستورالعمل رایلم 50-FMC [40] مقدار انرژی شکست می تواند از جایگذاری مساحت زیر نمودار بار-جابجایی در رابطه (5-ب) تعیین شود. مقادیر انرژی شکست بتن خودتراکم سبک حاصل از این پژوهش در جدول 4 نشان داده شده است.

جدول 3 نتایج آزمون کارایی برای طرح های اختلاط بتن خودتراکم سبک
Table 3 Results of workability test for SCLC mixes

Mix2	Mix1	نوع آزمایش
3.8	3.9	(Sec) T50
695	686	جریان اسلامپ (mm)
24	28	اختلاف ارتفاع جعبه U (mm)
596	574	شعاع حلقه J (mm)

که u_B ، P_B به ترتیب تغییر مکان در نقاط A و B و نیز نیروی انتهای نمودار می باشند. W_i برابر سطح زیر نمودار AMBA بوده و مقدار P نیز در هر مرحله مطابق روابط ارائه شده در مطالعه الیسی و همکاران [45, 47] محاسبه می شود.

4-3- محاسبه پارامترهای شکست با روش آزمایشگاهی اثر اندازه

با بسط و تکامل قانون اثر اندازه به وسیله بازانت [50]، روش اثر اندازه حاصل شد و سپس با انجام مطالعات تکمیلی توسط محققان متعدد، در نهایت این روش در دستورالعمل رایلم-89 [4] درج گردید. در این روش برای تعیین پارامترهای شکست مراحل زیر می بایست دنبال شود.

در هر طرح مخلوط ابتدا باید با انجام مطالعه آزمایشگاهی بر روی 12 تیر با ابعاد مشخص که در بخش قبل بطور کامل توضیح داده شد، حداکثر نیروی قابل تحمل توسط تیرها مشخص گردد. سپس برای تعیین ضرایب زیر از رگرسیون خطی مختص Y_j در مقابل X_j استفاده می شود.

$$Y = AX + C \quad (6-الف)$$

$$Y_j = \left(\frac{bh_j}{P_j^0} \right)^2 \quad X_j = h_j \quad (6-ب)$$

مقادیر A و C شیب و عرض از مبدأ رابطه (6-الف) هستند. همچنین در رابطه (6-ب) مقادیر P_j^0 و b و h_j به ترتیب بار حداکثر اصلاح شده، عرض و ارتفاع تیر هستند که در شکل 4 نشان داده شده اند. مقادیر انرژی شکست اولیه (G_f) و نرخ رهاسازی انرژی (بی بعد) $(g(\alpha_0))$ بصورت زیر محاسبه می شوند.

$$G_f = \frac{g(\alpha_0)}{E_c A} \quad (7-الف)$$

$$g(\alpha) = 2.25 \left(\frac{s}{h} \right)^2 \pi \alpha [F(\alpha)]^2 \quad (7-ب)$$

در رابطه بالا E_c ، α_0 و s و h به ترتیب مدول الاستیسیته بتن، طول ترک اولیه نسبی، طول دهانه و ارتفاع تیرهای مورد آزمایش هستند. همچنین پارامتر $F(\alpha)$ نیز تابعی کمکی است که برای برون یابی نتایج به نمونه های بسیار بزرگ مورد استفاده قرار گرفته و بر اساس رایلم-89 [4] تعیین می شود. پارامترهای شکست بعدی چقرمگی شکست مود یک K_{Ic} و بازشدگی بحرانی نوک ترک ($CTOD_C$) هستند.

$$K_{Ic} = \sqrt{G_f E} \quad (8-الف)$$

$$CTOD_C = \frac{8K_{Ic}}{E} \times \sqrt{\frac{g(\alpha_0)}{g'(\alpha_0)} \left(\frac{C}{2\pi A} \right)} \quad (8-ب)$$

که $g'(\alpha_0)$ مشتق تابع $g(\alpha_0)$ است.

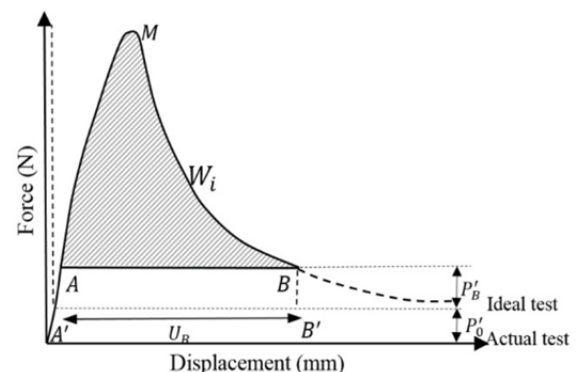


Fig. 3 Load-displacement curve and necessary corrections for WFM

شکل 3 منحنی بار-جابجایی و اصلاحات لازم در روش کار شکست

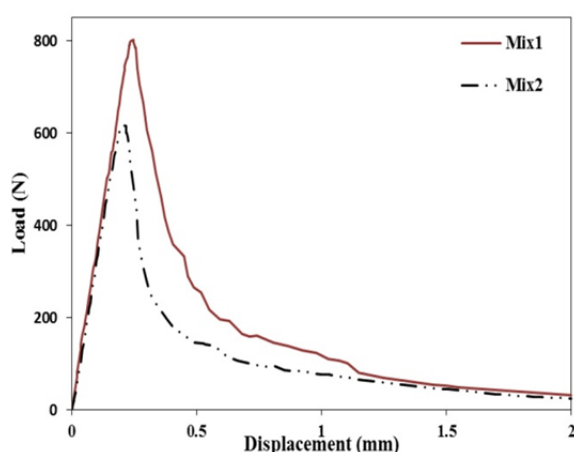


Fig. 5 Load-displacement curves achieved for SCLC mixes

شکل 5 منحنی بار-جابجایی بدست آمده برای بتن خودتراکم سبک

[4] به دست آمده و در جدول 5 و شکل 6 نشان داده شده است. همان طور که در شکل 6 دیده می شود با تحلیل رگرسیون خطی برای طرح اختلاط Mix1 مقادیر ضرایب شیب (A) و عرض از مبدأ (C) به ترتیب برابر $\text{mm}^{-1}\text{MPa}^{-2}$ 0.0134 و MPa^{-2} 1.1872 به دست آمدند. بر اساس توصیه دستورالعمل رایلم-50 به منظور افزایش دقت تحلیل، ضریب تغییر شیب (ω_A)، ضریب تغییر عرض از مبدأ (ω_C)، عرض باند پراکندگی (m) باید به ترتیب کمتر از 10، 20 و 20٪ باشند. همان گونه که در جدول 5 ذکر شده است همه پاسخ ها معیارهای بالا را ارضا نموده اند و می توان آزمایش های انجام شده را از لحاظ دقت قابل قبول دانست. بعنوان نمونه برای Mix1، ضرایب تغییر عرض از مبدأ، شیب خط رگرسیون و نیز عرض باند پراکندگی به ترتیب برابر 13.5٪، 6.8٪ و 13.9٪ به دست آمده است که نشان از دقت و صحت انجام آزمایش ها دارد.

شکل 7 تغییرات G_f را در مقابل نسبت آب به سیمان بتن نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود با افزایش نسبت آب به سیمان مقدار انرژی شکست اولیه (G_f) به شدت کاهش می یابد. همان طور که در جدول 4 نشان

جدول 5 پارامترهای شکست و مقادیر آماری آزمایش اثر اندازه

نام	انرژی	چقرمگی	بازشدگی	عرض باند	ضریب ضریب تغییر
طرح شکست اولیه	شکست	نوک ترک	پراکندگی	تغییر عرض از مبدأ	شیب
Mix1	27.86	23.36	0.0157	0.139	0.068
Mix2	16.88	17.43	0.0107	0.106	0.046

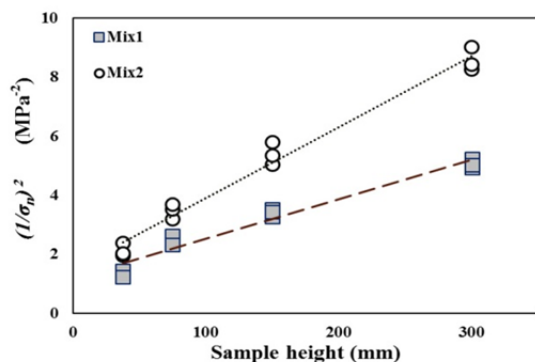


Fig. 6 Linear regression for two mixes

شکل 6 رگرسیون خطی برای دو طرح اختلاط بتن

جدول 4 مقادیر G_f بدست آمده از آزمایش WFMTable 4 G_f values obtained from WFM

نام طرح	مدول الاستیسیته	مقاومت فشاری	مقاومت کششی	انرژی شکست کل
	(GPa)	(MPa)	(MPa)	(N/m)
Mix1	19.58	30.20	2.58	69.76
Mix2	18.00	24.78	2.02	46.41

همان طور که در این جدول مشاهده می شود مقدار G_f بسیار به نسبت آب به سیمان وابسته بوده و با افزایش این نسبت از 0.42 به 0.47 مقدار G_f تا 33.4٪ کاهش می یابد. دلیل این کاهش را می توان این گونه بیان نمود که با افزایش نسبت آب به سیمان، اندازه و تعداد حفرات موجود در خمیر سیمان و ناحیه انتقال¹ افزایش پیدا کرده و در نتیجه به همان نسبت نیز بتن ضعیف تر می گردد. به این ترتیب شکست بتن بگونه ای رخ می دهد که مسیر شکست بتن، از داخل خمیر سیمان که مقاومت کمتری دارند عبور می کند. در انواع دیگر بتن نیز چنین روندی توسط محققان مختلف مشاهده شده است. به عنوان نمونه بیگی و همکاران [22] برای بتن خودتراکم، پترسون [6] و بهاراتکومار و همکاران [51] برای بتن معمولی و پرمقاومت به چنین روندی در خصوص کاهش مقاومت و انرژی شکست با افزایش نسبت آب به سیمان دست یافتند.

شکل 5 نمودار بار-جابجایی تیرهای شکافدار مربوط به آزمایش کار شکست را برای هر طرح اختلاط نشان می دهد. از روی این شکل و نتایج مندرج در جدول 3 می توان نتیجه گرفت که با افزایش نسبت آب به سیمان مقدار مقاومت کششی بتن نیز کاهش می یابد و به دنبال آن سبب پایین آمدن آستانه ترک خوردگی بتن می گردد. با ترک سریع تر بتن مقدار نیروی حداکثر قابل تحمل توسط تیر کاهش یافته و در نهایت کاهش انرژی شکست کل را در بر خواهد داشت. بهاراتکومار و همکاران [51] ثابت نمودند که برای نسبت آب به سیمان های 0.5 و 0.36، انرژی شکست برابر 67 و 132 نیوتن بر متر خواهد بود. در همین راستا حسن زاده و همکاران [52] بر اساس مطالعاتی آزمایشگاهی بیان نمودند که با کاهش نسبت آب به سیمان از 0.55 به 0.3 مقدار G_f از 125 به 201 نیوتن بر متر افزایش خواهد یافت. در خصوص بتن های خودتراکم نیز بیگی و همکاران [22] گزارش دادند که با تغییر نسبت آب به سیمان از 0.7 تا 0.35، مقادیر انرژی شکست بین 88.6 تا 147.1 نیوتن بر متر تغییر نموده و بالاترین مقدار G_f در نسبت آب به سیمان 0.4 رخ داد. بنابراین روند نتایج حاصل از این پژوهش با روند حاکم بر سایر بتن ها سازگار بوده ولی از لحاظ مقدار می توان عنوان نمود که انرژی شکست این نوع بتن از سایر انواع کمتر است و به همان نسبت نیز مقاومت آن در برابر گسترش ترک کمتر است.

3-4- پارامترهای شکست بر اساس روش SEM

بر اساس روش SEM، انرژی شکست اولیه با استفاده از تعیین حداکثر بار قابل تحمل توسط تیرهایی با مشخصات هندسی معین محاسبه می شود. این بار حداکثر باید در نظر گرفتن وزن نمونه و مطابق فرمول (9) اصلاح شود.

$$P_j^0 = P_j + \frac{2s_j - L_j}{2s_j} m_j g \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (9)$$

که در آن s و L مطابق شکل 4 به ترتیب طول دهانه و طول نمونه و نیز m و g جرم نمونه و شتاب گرانشی زمین هستند. پارامترهای شکست اصلی هر طرح اختلاط با استفاده از رگرسیون خطی و مطابق دستورالعمل رایلم-89

¹ Interfacial transition zone

البته لازم به ذکر است برای تعیین یک رابطه جامع برای انرژی شکست کل که در همه محدوده های مقاومتی بتن به درستی پاسخگو باشد نیاز به انجام مطالعات جامع تر و بررسی نسبت های بیشتری از آب به سیمان است. ولی رابطه 10 نیز می تواند با دقت قابل قبولی در محدوده مقاومت فشاری 24 تا 30 مگاپاسکال و کمی فراتر از آن ها مورد استفاده قرار بگیرد. در خصوص پارامترهای شکست حاصل از روش اثر اندازه این محدودیت کمی برداشته شده و می توان با استفاده از مجموعه داده های حاصل از این پژوهش و مطالعه کرملو و همکاران [33] روابط دقیق تری را برای تعیین پارامترهای شکست به کمک مقاومت فشاری ارائه نمود. همچنین لازم به ذکر است که در مطالعه کرملو و همکاران [33] روابطی برای تعیین انرژی شکست اولیه و چقرمگی ارائه شده است ولی بنا به دلایل زیر نیاز است که اصلاحاتی در آن ها صورت بگیرد تا به درستی و با دقت بالایی بتوان مقادیر پارامترهای مربوطه را پیش بینی نمود. نکته نخست این است که رابطه انرژی شکست اولیه ارائه شده در مطالعه مربوطه بر اساس مقاومت فشاری نمونه استوانه ای ذکر شده است؛ این در حالی است که در بسیاری از کشورها و نیز استانداردهای بتن، تعیین مقاومت فشاری از نمونه های مکعبی مرسوم بوده و نمونه های استوانه ای بدلیل پاره ای محدودیت ها مورد استفاده قرار نمی گیرند. دیگر اینکه با توجه به تعیین معادلات مربوطه از رگرسیون داده های موجود، بدیهی است که با افزایش تعداد داده ها دقت معادله حاصل نیز افزایش پیدا خواهد کرد.

همچنین علاوه بر انرژی شکست اولیه، برای چقرمگی شکست نیز دو رابطه ذکر شده است که در یکی از آن ها چقرمگی تنها تابعی از نسبت آب به سیمان است و این موضوع در زمانی که در یک آب به سیمان ثابت بنا به دلایلی مانند استفاده از برخی افزودنی ها در تولید بتن، مقاومت آن تغییر کند کارائی مناسبی ندارد. در رابطه دیگر نیز چقرمگی با نسبت آب به سیمان رابطه مستقیم و با مقاومت فشاری نسبت معکوس دارد. این رابطه نیز زمانی که در یک نسبت آب به سیمان ثابت شرایطی فراهم آید که خصوصیات مقاومتی بتن تغییر کند، نمی تواند به درستی مقدار چقرمگی را محاسبه کند. نقض کننده این رابطه نیز مطالعه دیگر کرملو و همکاران [32] است که در آن با بررسی اثر بزرگترین اندازه سنگدانه بر پارامترهای شکست بتن مشاهده شد که در یک آب به سیمان ثابت با افزایش اندازه سنگدانه ها، چقرمگی و مقاومت فشاری هر دو افزایش یافتند. حال با توجه به موارد بالا دو رابطه (11-الف) و (11-ب) که حاصل تحلیل نتایج این پژوهش و مطالعه کرملو و همکاران [33] است ارائه می شود که علاوه بر دارا بودن دقت لازم، قادر است در شرایط مختلفی که مقاومت بتن تغییر می کند انرژی شکست اولیه و چقرمگی آن را پیش بینی نماید.

$$G_f = 1.372 f_c - 16.72 \quad R^2 = 0.87 \quad (11-الف)$$

$$K_{IC} = 0.818 f_c - 2.81 \quad R^2 = 0.91 \quad (11-ب)$$

که K_{IC} چقرمگی شکست بر حسب $\text{MPa mm}^{0.5}$ است.

همان طور که پیش تر ذکر شد از آنجایی که برای تعیین مقدار G_f تنها به حداکثر بار قابل تحمل توسط تیرها تحت آزمایش خمشی سه نقطه ای نیاز است بنابراین محاسبه G_f از G_F آسان تر بوده و نتایج حاصل از آن نیز دقیق تر خواهد بود. با توجه به موارد فوق و مطابق اطلاعات مندرج در جدول های 4 و 5 می توان نسبت انرژی شکست کل به اولیه (G_F/G_f) را برای بتن خودتراکم سبک بدست آورد. مقدار نسبت انرژی شکست کل به انرژی شکست اولیه در نسبت های آب به سیمان 0.42 و 0.47 به ترتیب برابر 2.50 و 2.74 بدست می آید و بطور میانگین می توان عدد 2.63 را با ضریب تغییرات 6.6% برای این

داده شده است در این مطالعه با افزایش نسبت آب به سیمان از 0.42 به 0.47 مقدار G_F از 27.86 به 16.88 نیوتن بر متر کاهش می یابد. در مطالعات پیشین نیز چنین روندی توسط محققین متعددی برای بتن معمولی [8]، بتن خودتراکم [22] و بتن خودتراکم سبک [33] بیان شده است. بیگی و همکاران [22] در مطالعه خود بیان کرده اند که، در بتن خودتراکم با افزایش نسبت آب به سیمان از 0.35 به 0.7 مقدار G_F از 52.3 به 29.5 نیوتن بر متر کاهش می یابد. کرملو و همکاران [33] نیز بیان نموده اند، همان طور که نسبت آب به سیمان از 0.35 به 0.5 افزایش می یابد، مقدار G_F به اندازه 65.9% کاهش می یابد. همچنین لازم به ذکر است که این روند با آنچه توسط بهاراتکومار و همکاران [51] و ویتمان و همکاران [7] برای بتن پرمقاومت و صالحی و مظلوم [34] برای بتن خودتراکم سبک ذکر شده است سازگار است. همان طور که در بخش های پیشین ذکر شد تعیین پارامترهای شکست بتن با استفاده از روش های خصوصی صورت می گیرد که نیاز به تجهیزات خاص با دقت بالا داشته، حجم نمونه های مورد آزمایش در آن به نسبت زیاد بوده و فرآیند محاسبه آن ها از روی نتایج نیز بسیار پیچیده است. بنابراین در صورتیکه بتوان به گونه ای پارامترهای شکست را به خصوصیات مکانیکی بتن مرتبط نمود آنگاه می توان با انجام آزمایش مرسوم تعیین مقاومت فشاری بتن به سادگی و با تقریب خوبی پارامترهای شکست را محاسبه نمود.

بر اساس CEB-FIB [53] انرژی شکست تابعی از مقاومت فشاری بتن است و بدین ترتیب بسیاری از محققان روابطی را بین انرژی شکست و مقاومت فشاری بتن های مختلف ارائه نموده اند. از جمله آن ها می توان به روابط ارائه شده توسط بیگی و همکاران [22] برای بتن خودتراکم و بازانت و بک-گیرادون [20] برای بتن معمولی اشاره نمود. همان گونه که در مقدمه ذکر شد بدلیل وجود تفاوت های عمده میان بتن خودتراکم و خودتراکم سبک، امکان استفاده از روابط یکی از آن ها برای دیگری وجود نداشته و با خطاهای خیلی زیاد همراه خواهد بود. همان طور که در جدول 4 نیز مشاهده می شود رابطه مستقیمی بین مقادیر مقاومت فشاری و انرژی شکست کل بتن خودتراکم سبک وجود دارد و با کاهش نسبت آب به سیمان هر دو افزایش می یابند. بنابراین با توجه به اطلاعات محدود حاصل از مطالعه آزمایشگاهی و انجام رگرسیون، یک رابطه تجربی برای تعیین انرژی شکست کل بر اساس مقاومت فشاری آن ارائه می گردد:

$$G_F = 0.0623 (f_c)^{2.06} \quad (10)$$

که در این رابطه f_c مقاومت فشاری و G_F انرژی شکست کل بتن هستند.

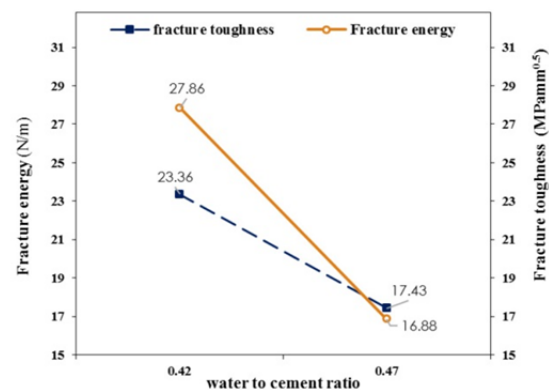


Fig. 7 Variation of G_f and K_{IC} versus w/c ratio for SCLC

شکل 7 تغییرات انرژی شکست اولیه و چقرمگی در برابر نسبت آب به سیمان

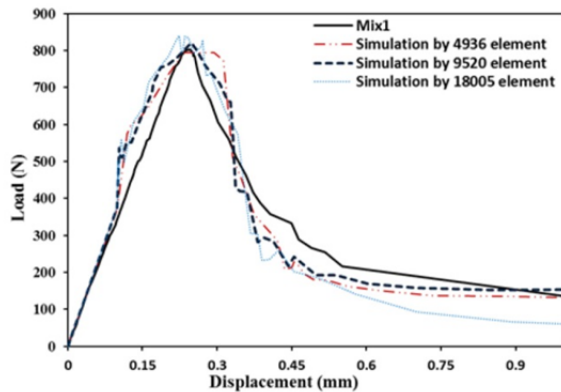


Fig. 8 Comparison of load-displacement curves of numerical modeling with test results for $w/c=0.42$

شکل 8 مقایسه منحنی بار-تغییرمکان مدل سازی عددی با نتایج حاصل از آزمایش برای $w/c=0.42$

مطابق شکل های 8 و 9 برای هر طرح اختلاط، منحنی های بار-تغییرمکان حاصل از روش کار شکست و مطابق جدول 6 مقادیر حداکثر نیروی قابل تحمل توسط تیرهای آزمایش اثر اندازه با نتایج حاصل از مدل سازی عددی مقایسه شده اند. همان طور که در شکل های 8 و 9 مشخص است به دلیل وقوع ناپایداری عددی در بازشدگی های بزرگ، مدل سازی عددی قادر به مدل نمودن جدایی کامل و صفر نمودن نیروها نیست. البته وقوع چنین پدیده ای در زمان آزمایش عملی نیز محتمل بوده و در بخش 3-3 در این خصوص بطور کامل توضیح داده شد. پیچیدگی آزمایش های تعیین پارامترهای شکست و وجود اصطکاک در تکیه گاه ها و محل وقوع ترک در نمونه های آزمایشگاهی از عواملی هستند که در بروز این اختلاف میان نتایج تأثیرگذار هستند. مطابق شکل های 8 و 9 پس از آن که بار وارد به تیر به حدی برسد که تنش کششی ایجاد شده در مقطع شکست تیر از آستانه مقاومت کشش بتن بالاتر رود، مرحله نرم شوندگی بتن در نمونه ها آغاز می شود. در واقع اینجا نقطه ای است که اولین ترک عمقی در تیر شکل گرفته و گسترش ترک آغاز شده است، پس از آن نیز برای گسترش ترک در هر مرحله به مراتب به نیروی کمتری نیاز خواهد بود. مطابقت رفتار مدل های عددی با نتایج آزمایشگاهی تأیید کننده این واقعیت هستند که مدل سازی صورت گرفته با استفاده از داده های آزمایشگاهی می تواند به درستی رفتار شکست تیرها را تحلیل نماید.

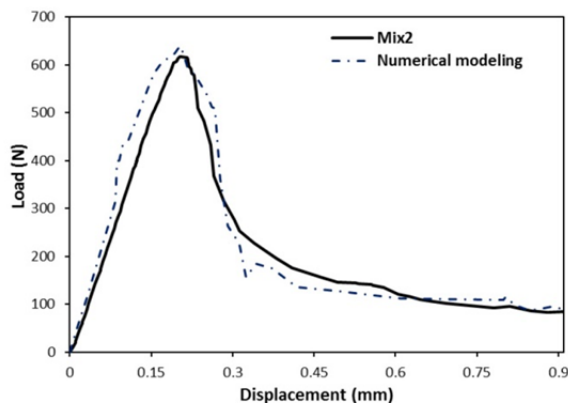


Fig. 9 Comparison of load-displacement curves of numerical modeling with test results for $w/c=0.47$

شکل 9 مقایسه منحنی بار-تغییرمکان مدل سازی عددی با نتایج حاصل از آزمایش برای $w/c=0.47$

نسبت در نظر گرفت.

5- مدل سازی عددی

در این بخش بر اساس مطالعات آزمایشگاهی و مطابق پارامترهای شکست بدست آمده از روش کار شکست و اثر اندازه، تیرهای هر دو مجموعه آزمایش ها مدل سازی شده اند. در مدل اول از انرژی شکست کل و در مدل دوم از انرژی شکست اولیه استفاده شده است تا آزمایش خمش سه نقطه ای را مدل نماییم. انرژی شکست اولیه یا G_f برای تعیین حداکثر بار قابل تحمل توسط سازه کاربرد دارد (نمودار بار-جابجایی را تا نقطه حداکثر بار می دهد)، در حالی که استفاده از G_f برای محاسبه اتلاف انرژی در کل فرآیند شکست و تعیین نمودار بار-جابجایی و منحنی نرم شوندگی است [54].

هندسه و شرایط مرزی مدل های ساخته شده مطابق شکل 4 و ابعاد نمونه ها مطابق بخش 2-3 هستند. برای شبیه سازی رفتار غیرخطی بتن و مسئله بروز ترک و گسترش آن، از روش المان محدود بسط یافته بر مبنای رفتار چسبنده کشش-جدایش¹ استفاده شد. در رفتار پیش گفته برای پیش بینی مسیر شکست، از مدل آسیب تنش اصلی بیشینه² که در نرم افزار آباکوس پیاده سازی شده، بهره برده شد. در این روش مکانیزم گسیختگی متشکل از شروع ترک و گسترش آن بوده و در واقع ترک هنگامی شروع می شود که نسبت تنش اصلی بیشینه به مقدار یک برسد. خصوصیات و پارامترهای بکار رفته در ساخت مدل ها شامل مقاومت کششی، مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و انرژی های شکست برای هر ترکیب بتن مطابق جدول های 4 و 5 بوده و ضریب پواسون بتن نیز برابر 0.2 در نظر گرفته شد.

همه تیرها به صورت سه بعدی در نرم افزار آباکوس مدل سازی شدند. علی رغم اینکه با توجه به وجود شرایط تقارن در تیرها امکان مدل سازی تنها نیمی از آن ها وجود داشت ولی برای رویت بهتر نحوه ترک خوردگی و شکست در تیر، همه آن ها به صورت کامل مدل سازی شدند. با اعمال تغییرمکان در بالا و وسط وجه فشاری تیر، روند افزایش نیرو، بازشدگی ترک و تغییر شکل ها در مدل عددی بررسی شد. دلیل استفاده از اعمال تغییر مکان به جای تغییر بار، کاهش مدول مقطع تیر، تشدید بازشدگی ترک و در نتیجه کاهش بار در نمودار نیرو-تغییر مکان است که در این شکل بارگذاری، امکان رویت منحنی نرم شوندگی بتن امکان پذیر می شود. مدل سازی عددی با روش المان محدود بسط یافته انجام شد. در این مطالعه برای مدل سازی تیرها از المان های C3D8R (المان های هشت گرهی خطی با انتگرال گیری کاهش یافته) استفاده شده است. در انجام مدل سازی، اندازه المان ها به اندازه کافی کوچک در نظر گرفته شد تا ارزیابی رشد ترک با دقت کافی صورت پذیرد. برای اطمینان از مناسب بودن اندازه المان ها و انجام تحلیل حساسیت، در تیر مربوط به آزمایش کار شکست از مش بندی با سه تعداد متفاوت 4936، 9520 و 18005 المان استفاده شد. همان طور که در شکل 8 مشاهده می شود با تقریباً دو برابر و نیز نصف کردن تعداد مش ها تغییرات پاسخ نمودار بار-تغییر مکان ناچیز بوده و در حد قابل قبولی است. البته از میان پاسخ های حاصل شده، بیشترین تطابق با نتایج آزمایشگاهی در تعداد المان 9520 مشاهده شد. بنابراین با مبنا قرار دادن همین تعداد المان، ابعاد مش بندی سایر تیرها نیز متناسب با آن تعیین شده و تحلیل مجدد صورت گرفت که نتایج مناسبی حاصل شد. لازم به ذکر است که تغییر جزئی در خروجی نمودار بار-تغییر مکان در اثر تغییر تعداد المان ها با مدل های ارائه شده در کتاب خوئی [37] همخوانی دارد.

¹ Traction separation cohesive behavior

² Maximum principle stress (MAXPS)

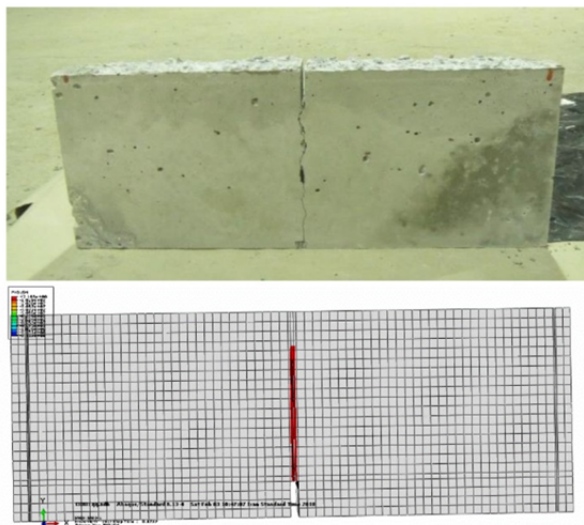


Fig. 10 Comparison of fracture path between experimental and modeled beams

شکل 10 مقایسه مسیر شکست بین نمونه تیرهای آزمایشگاهی و مدل شده

همچنین رابطه بین انرژی شکست کل و اولیه در بتن خودتراکم سبک تعیین گردید. نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی و مدل سازی عددی گسترش ترک در بتن خودتراکم سبک را می توان به طور خلاصه بصورت زیر بیان نمود:

1- نسبت انرژی شکست کل به اولیه (G_F/G_F) برای بتن خودتراکم سبک به طور متوسط برابر 2.63 و ضریب تغییرات آن 6.6% است. این بدان معنی است که تنها با استفاده از یک روش آزمایش می توان انرژی شکست روش دیگر را با تقریب خوبی تعیین نموده و منحنی نرم شوندگی را بدست آورد.

2- مقادیر انرژی شکست کل و انرژی شکست اولیه بتن خودتراکم سبک کمتر از بتن معمولی و بتن خودتراکم است. دلیل آن نیز مقاومت کمتر ذرات درشت دانه سبک در مقایسه با سنگ دانه طبیعی و وجود مقدار بسیار زیادی پودر معدنی و ریزدانه در این نوع بتن است.

3- در بتن خودتراکم سبک مقادیر پارامترهای شکست در هر دو روش به شدت به نسبت آب به سیمان وابسته هستند. با کاهش نسبت آب به سیمان از 0.47 به 0.42، انرژی های شکست اولیه، کل و چقرمگی شکست بتن خودتراکم سبک به ترتیب حدود 65%، 50% و 34% افزایش یافتند. همچنین با این کاهش نسبت آب به سیمان مقدار باز شدگی بحرانی نوک ترک 46% افزایش می یابد.

4- با استفاده از مقدار انرژی شکست اولیه و نیز روش المان محدود بسط یافته، با دقت بسیار بالایی می توان مقدار حداکثر نیروی قابل تحمل توسط تیرهای ساخته شده از بتن خودتراکم سبک را بدست آورد.

5- با استفاده از مقدار انرژی شکست کل در روش المان محدود بسط یافته می توان با دقت قابل قبولی منحنی نرم شوندگی بتن را که مربوط به تغییرات بار در مقابل تغییر شکل تیر است بدست آورد.

6- مسیر شکست و گسترش ترک در نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی تطابق بسیار خوبی با هم دارند. از آنجائی که پیش بینی مسیر ترک موضوع مهمی است که مطالعات بسیاری را به خود اختصاص داده است بنابراین می توان عنوان کرد از جمله قابلیت های مهم روش المان محدود بسط یافته با بکارگیری پارامترهای شکست، توانایی مطلوب آن در نشان دادن مسیر ترک و خرابی المان ها است.

همان طور که در بخش های قبل مطرح شد برای تعیین G_F به غیر از خصوصیات مکانیکی بتن تنها به مقادیر حداکثر بار قابل تحمل توسط تیرهای بتنی نیاز است. حال با استفاده از مقادیر انرژی شکست اولیه در مدل سازی تیرها می توان مقدار حداکثر بار قابل تحمل توسط آن ها را به دست آورد. در جدول 6 مقادیر ماکزیمم بار قابل تحمل توسط تیرها در دو حالت آزمایشگاهی و مدل سازی عددی نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود در Mix1 مقدار خطای حاصل از پیش بینی بار در مقایسه با بار متوسط برای تیرهایی با ارتفاع 38.1، 76.2، 152.4 و 304.8 میلی متر به ترتیب برابر 6.79، 0.1 و 1.5 درصد بوده و برای Mix2 مقادیر خطا برای ابعاد مورد نظر به ترتیب برابر 7.5، 4.9، 2.9 و 0.9 است. همچنین مقادیر خطا در تعیین بار حداکثر توسط نرم افزار برای Mix1 و Mix2 به طور متوسط برابر 3.9 و 4.1 درصد است که با دقت بسیار مطلوبی قابل قبول است.

نتایج حاصل از شبیه سازی عددی نشان دهنده مطابقت مناسب آن ها با نتایج تجربی است. این تطابق از این جهت دارای اهمیت کلیدی است که نشان می دهد نمودار بار-تغییر مکان و نیز حداکثر بار قابل تحمل توسط عضو ترک خورده و یا سالم در سایر سازه ها می تواند با استفاده از روش المان محدود بسط یافته و بر اساس پارامترهای شکست به دست آمده از آزمون استاندارد به شکل مناسبی مدل سازی شود.

در شکل 10 الگوی ترک خوردگی و شکست یکی از تیرهای به کار گرفته شده در آزمایش اثر اندازه نشان داده شده است. با مقایسه مسیر شکست تیر بتنی ساخته شده در آزمایشگاه با نمونه تیر مدل سازی شده در نرم افزار آباکوس می توان نتیجه گرفت که علاوه بر حداکثر بار قابل تحمل توسط سازه (که در جدول 6 نشان داده شد)، در خصوص مسیر وقوع ترک نیز مدل سازی عددی می تواند به درستی مسیر گسترش ترک را پیش بینی نماید و این مسئله ای است که موضوع مطالعه بسیاری از محققان در حوزه شکست بتن بوده است.

6- نتیجه گیری

به طور کلی مهم ترین اهداف طراحی سازه، تأمین امنیت در مقابل فروریختگی و تضمین عملکرد مناسب در زمان بهره برداری است. بدین ترتیب می توان به ضرورت مدل سازی اعضای بتنی برای تعیین میزان بار قابل تحمل و رفتار شکست آن ها پی برد. در این پژوهش اثر تغییر نسبت آب به سیمان بر پارامترهای شکست حاصل از دو روش کار شکست و اثر اندازه بررسی شد.

جدول 6 حداکثر بار قابل تحمل توسط تیرها در روش اثر اندازه

Table 6 Maximum beams load from SEM

نام طرح	طرح اختلاط 1	طرح اختلاط 2	ارتفاع تیر
آزمایش	مدل سازی	آزمایش	مدل سازی
38.1	1246	910	1171
76.2	1264	1007	1129
152.4	1785	986	1736
304.8	1849	1578	2995
	3112	1497	3044
	3032	1464	3112
	4919	2504	3032
	5071	2431	4919
	5019	2336	5071
		3915	5019
		3878	
		3744	

- [23] M. H. A. Beygi, M. T. Kazemi, I. M. Nikbin, J. Vaseghi Amiri, The effect of aging on the fracture characteristics and ductility of self-compacting concrete, *Materials & Design*, Vol. 55, pp. 937-948, 2014.
- [24] M. H. A. Beygi, M. T. Kazemi, J. Vaseghi Amiri, I. M. Nikbin, S. Rabbaniifar, E. Rahmani, Evaluation of the effect of maximum aggregate size on fracture behavior of self compacting concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 55, No. 1, pp. 202-211, 2014.
- [25] I. M. Nikbin, M. R. Davoodi, H. Fallahnejad, S. Rahimi, F. Farahbod, Influence of mineral powder content on the fracture behaviors and ductility of self-compacting concrete, *Materials in Civil Engineering*, Vol. 28, No. 3, pp. 1-14, 2016.
- [26] B. Vakhshouri, S. Nejadi, Mix design of light-weight self-compacting concrete, *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 4, No. 1, pp. 1-14, 2016.
- [27] M. Mazloom, F. Mahboubi, Evaluating the settlement of lightweight coarse aggregate in self-compacting lightweight concrete, *Computer and Concrete*, Vol. 19, No. 2, pp. 203-210, 2017.
- [28] M. Jalal, E. Mansouri, M. Sharifpour, A. R. Pouladkhan, Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO₂ micro and nanoparticles, *Materials and Design*, Vol. 34, No. 1, pp. 389-400, 2012.
- [29] J. Khatib, Performance of self-compacting concrete containing fly ash, *Construction and Building Materials*, Vol. 22, No. 9, pp. 1963-1971, 2008.
- [30] R. Siddique, P. Aggarwal, Y. Aggarwal, Influence of water/powder ratio on strength properties of self-compacting concrete containing coal fly ash and bottom ash, *Construction and Building Materials*, Vol. 29, No. 1, pp. 73-81, 2012.
- [31] J. A. Bogas, A. Gomes, M. Pereira, Self-compacting lightweight concrete produced with expanded clay aggregate, *Construction and Building Materials*, Vol. 35, No. 1, pp. 1013-1022, 2012.
- [32] M. Karamloo, M. Mazloom, G. Payganeh, Effects of maximum aggregate size on fracture behaviors of self-compacting lightweight concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 123, No. 1, pp. 508-515, 2016.
- [33] M. Karamloo, M. Mazloom, G. Payganeh, Influences of water to cement ratio on brittleness and fracture parameters of self-compacting lightweight concrete, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 168, No. 1, pp. 227-241, 2016.
- [34] H. Salehi, M. Mazloom, Effect of magnetic-field intensity on fracture behaviors of self-compacting lightweight concrete, *Magazine of Concrete Research*, <https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00418>, 2018.
- [35] M. Karamloo, M. Mazloom, M. Payganeh, Effect of size on nominal strength of self-compacting lightweight concrete and self-compacting normal weight concrete: A stress-based approach, *Materials Today Communications*, Vol. 13, No. 1, pp. 36-45, 2017.
- [36] S. Mohammadi, *Extended Finite Element Method: for fracture Analysis of Structures*, pp. 61-90, New York: Wiley-Blackwell, 2008.
- [37] A. R. Khoei, *Extended Finite Element Method: Theory and Applications*, pp. 317-350, New York: John Wiley & Sons, 2015.
- [38] ASTM-C494, *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*, pp. 1-9, West Conshohocken: American Society of Testing Materials, 2001.
- [39] EFNARC, *The European Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*, pp. 43-60, Farnham: European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, 2002.
- [40] RILEM FMC-50, determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams, *Materials and Structures*, Vol. 18, No. 4, pp. 287-290, 1985.
- [41] ASTM-C496, *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, pp. 1-5, West Conshohocken: American Society of Testing Materials, 2002.
- [42] BS-EN-12390, *Testing Hardened Concrete, Method of Determination of Compressive Strength of Concrete cubes, part 3*, pp. 1-15, London: British Standards Institution, 2000.
- [43] ASTM-C469, *Standard Test Methods for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*, pp. 1-5, West Conshohocken: American Society of Testing Materials, 2002.
- [44] Z. Bazant, J. Planas, *Fracture and Size effect in Concrete and other Quasibrittle Structures*, pp. 40-60, Boston: CRC Press, 1998.
- [45] M. Elices, G. Guinea, J. Planas, Measurement of the fracture energy using three-point bend tests: Part 3—Influence of cutting the P- δ tail, *Materials and Structures*, Vol. 25, No. 6, pp. 327-334, 1992.
- [46] L. J. Malvar, G. Warren, Fracture energy for three-point-bend tests on single-edge-notched beams, *Experimental Mechanics*, Vol. 28, No. 3, pp. 266-272, 1988.
- [47] M. Elices, G. Guinea, J. Planas, On the measurement of concrete fracture energy using three-point bend tests, *Materials and Structures*, Vol. 30, No. 6, pp. 375-376, 1997.
- [48] A. R. Murthy, B. Karihaloo, N. R. Iyer, B. R. Prasad, Determination of size-independent specific fracture energy of concrete mixes by two methods, *Cement and Concrete Research*, Vol. 50, No. 1, pp. 19-25, 2013.
- [49] X. Hu, F. Wittmann, Size effect on toughness induced by crack close to free surface, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 65, No. 2, pp. 209-221, 2000.
- [50] Z. P. Bazant, P. A. Pfeiffer, Determination of fracture energy from size effect and brittleness number, *ACI Materials Journal*, Vol. 84, No. 6, pp. 463-480, 1987.

اولیه و چقرمگی شکست آن رابطه مستقیم وجود دارد. بدین ترتیب فرمول‌هایی برای تعیین پارامترهای شکست ارائه شد که قادر هستند این پارامترها را با دقت قابل قبولی و فقط با داشتن مقاومت فشاری تعیین کنند.

8- با کاهش نسبت آب به سیمان از 0.47 به 0.42، مقادیر مقاومت فشاری، کششی و مدول الاستیسیته بتن خودتراکم سبک به ترتیب حدود 21.9%، 27.7% و 8.8% افزایش یافتند.

7- مراجع

- [1] G. Prokopski, B. Langier, Effect of water/cement ratio and silica fume addition on the fracture toughness and morphology of fractured surfaces of gravel concretes, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 9, pp. 1427-1433, 2000.
- [2] B. Chen, J. Liu, Effect of aggregate on the fracture behavior of high strength concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 18, No. 8, pp. 585-590, 2004.
- [3] M. H. A. Beygi, M. T. Kazemi, I. M. Nikbin, J. Vaseghi Amiri, S. Rabbaniifar, E. Rahmani, The influence of coarse aggregate size and volume on the fracture behavior and brittleness of self-compacting concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 66, No. 1, pp. 75-90, 2014.
- [4] RILEM FMT-89, Size-effect method for determining fracture energy and process zone size of concrete, *Materials and Structures*, Vol. 23, No. 6, pp. 461-465, 1990.
- [5] A. Carpinteri, R. Brighenti, Fracture behaviour of plain and fiber-reinforced concrete with different water content under mixed mode loading, *Materials & Design*, Vol. 31, No. 4, pp. 2032-2042, 2010.
- [6] P. E. Petersson, Fracture energy of concrete: Practical performance and experimental results, *Cement and Concrete Research*, Vol. 10, No. 1, pp. 91-101, 1980.
- [7] F. H. Wittmann, P. E. Roelfstra, H. Mihashi, Y. Y. Huang, X. H. Zhang, N. Nomura, Influence of age of loading, water-cement ratio and rate of loading on fracture energy of concrete, *Materials and Structures*, Vol. 20, No. 2, pp. 103-110, 1987.
- [8] R. Ince, K. E. Alyamac, Determination of fracture parameters of concrete based on water-cement ratio, *Engineering and Materials Sciences*, Vol. 15, No. 1, pp. 14-22, 2008.
- [9] Z. P. Bazant, Size effect, *Solids and Structures*, Vol. 37, No. 1, pp. 69-80, 2000.
- [10] A. Hillerborg, M. Modeer, P. E. Petersson, Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, *Cement and Concrete Research*, Vol. 6, No. 6, pp. 773-781, 1976.
- [11] P. E. Petersson, *Crack Growth and Development of Fracture Zones in Plain Concrete and similar Materials*, PhD Thesis, Lund university, Sweden, 1981.
- [12] S. Mulmule, J. Dempsey, Stress-separation curves for saline ice using fictitious crack model, *Engineering Mechanics*, Vol. 123, No. 8, pp. 870-877, 1997.
- [13] K. Park, G. H. Paulino, J. R. Roesler, Determination of the kink point in the bilinear softening model for concrete, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 75, No. 13, pp. 3806-3818, 2008.
- [14] K. Z. Cho, A. S. Kobayashi, N. M. Hawkins, D. B. Barker, F. L. Jeang, Fracture process zone of concrete cracks, *Engineering Mechanics*, Vol. 110, No. 8, pp. 1174-1184, 1984.
- [15] V. Gopalratnam, S. P. Shah, Softening response of plain concrete in direct tension, *Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 82, No. 3, pp. 310-323, 1985.
- [16] C. Wang, Y. Zhang, Z. Zhao, Fracture process of rubberized concrete by fictitious crack model and AE monitoring, *Computers & Concrete*, Vol. 9, No. 1, pp. 51-61, 2012.
- [17] V. Broujerdian, A. Sherafati, H. Karimpour, The effect of cohesive stress of crack edges on the behavior of the load - deformation of reinforced concrete beams, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, <https://doi.org/10.22060/CEEJ.2017.11366.5012>, 2018. (in Persian)
- [18] T. Belytschko, T. Black, Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing, *Numerical Methods in Engineering*, Vol. 45, No. 5, pp. 601-620, 1999.
- [19] Z. P. Bazant, M. T. Kazemi, Determination of fracture energy, process zone length and brittleness number from size effect, with application to rock and concrete, *Fracture*, Vol. 44, No. 2, pp. 111-131, 1990.
- [20] Z. P. Bazant, E. Becq-Giraudon, Statistical prediction of fracture parameters of concrete and implications for choice of testing standard, *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 4, pp. 529-556, 2002.
- [21] J. Planas, M. Elices, G. Guinea, Measurement of the fracture energy using three-point bend tests: Part 2-Influence of bulk energy dissipation, *Materials and Structures*, Vol. 25, No. 5, pp. 305-312, 1992.
- [22] M. H. A. Beygi, M. T. Kazemi, I. M. Nikbin, J. Vaseghi Amiri, The effect of water to cement ratio on fracture parameters and brittleness of self-compacting concrete, *Materials & Design*, Vol. 50, No. 1, pp. 267-276, 2013.

- thirth *Fracture Mechanics of Concrete Structures*, Freiburg, Germany, Aedificatio Publishers, pp. 161-170, 1998.
- [53] Fib bulletin No. 70, *model code for concrete structures 2010*, International Federation for Structural Concrete, Lausanne, pp. 120-132, 2013.
- [54] Z. P. Bazant, Concrete fracture models: testing and practice, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 69, No. 2, pp. 165-205, 2002.
- [51] B. H. Bharatkumar, B. K. Raghuprasad, D. S. Ramachandramurthy, R. Narayanan, S. Gopalakrishnan, Effect of fly ash and slag on the fracture characteristics of high performance concrete, *Materials and Structures*, Vol. 38, No. 1, pp. 63-72, 2005.
- [52] M. Hassanzadeh, The influence of the type of coarse aggregates on the fracture mechanical properties of high-strength concrete, *Proceedings of the*