

## بررسی اثر الیاف ماکروسنتتیک بر پارامتر انرژی شکست بتن

اویس افزلی<sup>۱</sup>، علیرضا دوست محمدی<sup>۲</sup>، رامبد صفایان<sup>۳</sup>

۱- دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

۲- کارشناسی ارشد زلزله، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

۳- کارشناس فنی شرکت نانوخ و گرانول سیرجان

Oveys.afzali@sru.ac.ir

### چکیده

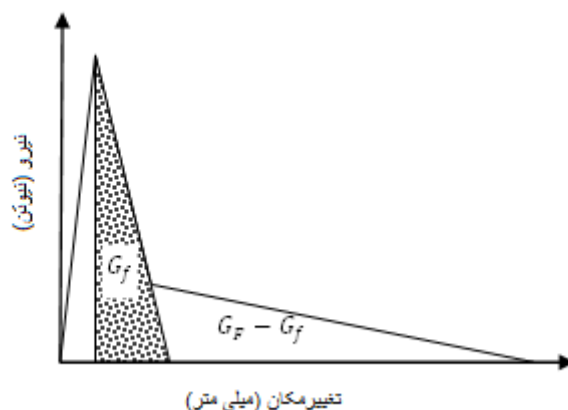
از جمله مهمترین دلایل شکست و انهدام سازه‌های بتنی گسترش ترک و نقص‌های اولیه موجود در آن‌ها است. مکانیک شکست علم بررسی نحوه ایجاد ترک در اجسام، محاسبه پاسخ سازه ترک‌خورده تحت بارهای وارده و پیش‌بینی رفتار سازه در نتیجه رشد و توسعه ترک‌های اولیه است. این مقاله به بررسی اثر مقادیر مختلف الیاف ماکروسنتتیک بر یکی از پارامترهای مهم علم مکانیک شکست یعنی انرژی شکست بتن می‌پردازد. بدین منظور چهار طرح مخلوط با افزودن الیاف ماکروسنتتیک به مقدار ۰، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد حجمی در نظر گرفته شد. از دو روش اثر اندازه و روش کار شکست براساس دستورالعمل RILEM به منظور تعیین پارامتر انرژی شکست استفاده شده است. آزمایش‌های خمش سه نقطه‌ای بر روی تیرهای دارای شکاف انجام شد و سپس نتایج با استفاده از روش‌های ذکر شده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از الیاف ماکروسنتتیک سبب افزایش انرژی شکست بتن شده است به گونه‌ای که با افزایش میزان الیاف ماکروسنتتیک از ۰ تا ۰/۳ درصد حجمی، انرژی شکست اولیه از ۳۶/۰۴ به ۶۶/۲۹ و انرژی شکست کل از ۱۰۶/۴۴ به ۴۵۶/۶ ژول بر مترمربع افزایش یافته است.

کلمات کلیدی: بتن الیافی، الیاف ماکروسنتتیک، انرژی شکست، روش اثر اندازه، روش کار شکست

### ۱. مقدمه

نقص‌های اولیه موجود و گسترش ترک، یکی از دلایل مهم شکست و انهدام سازه‌هاست. ترک‌ها می‌توانند ناشی از عوامل مختلف از قبیل معایب ساخت، عوامل محیطی و بارهای وارده باشند و در اندازه‌ها و شکل‌های مختلف در سازه ظاهر می‌شوند و تحت بارهای گوناگون رفتار متفاوتی خواهند داشت. بعضی از این ترک‌ها گسترش پیدا کرده و باعث شکست ناگهانی و فاجعه‌بار سازه‌ها می‌شوند. مکانیک شکست علم بررسی نحوه ایجاد ترک در اجسام، محاسبه پاسخ سازه ترک‌خورده تحت بارهای وارده و پیش‌بینی رفتار سازه در نتیجه رشد و توسعه ترک‌های اولیه است [۱]. کاپلان نخستین فردی بود که در مطالعات خود از ایده مکانیک شکست خطی در مواد با پایه سیمانی استفاده نمود [۲]. مفهوم مکانیک شکست الاستیک خطی در طی ۴۰ سال گذشته گسترش یافته و با درجه اطمینان بالایی برای سازه‌های فلزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بتن یک ماده ناهمگن با رفتار غیر خطی است که با توجه به احتمال وجود عیوب متعدد در آن، ممکن 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 [۳]. در تحقیقات گذشته محققین بسیاری اثر فاکتورهای مختلف از قبیل افزایش سن بتن، حداکثر اندازه سنگدانه مصرفی، نسبت آب به سیمان، حجم درشت‌دانه مصرفی، حجم پودر سنگ، مواد مضاف مانند میکروسیلیس، خاکستر بادی و نانوسیلیس را بر پارامترهای شکست بتن بررسی نموده‌اند [۴-۶]. برای تحلیل دقیق رفتار بتن در بسیاری از روش‌های المان محدود، منحنی نرم

شوندگی بتن یا همان مدل دو خطی مورد نیاز است (شکل ۱). 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. لازم به ذکر است که 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 [۳].



شکل ۱- منحنی نرم شوندگی دو خطی بتن [۳].

بتن الیافی نوعی کامپوزیت است که با بکارگیری الیاف تقویت کننده داخل مخلوط بتن منجر به بهبود محسوسی از خواص مقاومتی بتن می‌گردد. استفاده از الیاف مختلف به عنوان یک راهکار مناسب در جهت کنترل ریز ترک‌ها، ترک‌ها و جبران ضعف مقاومت کششی بتن محسوب می‌شود. از گذشته تاکنون انواع مختلفی از الیاف به منظور بهبود خواص مواد با پایه سیمانی استفاده شده است. بسیاری از الیاف از جمله فولادی، سنتتیک یا طبیعی بطور گسترده در بتن استفاده می‌شود [۷]. این الیاف به‌طور قابل توجهی در خصوصیات مکانیکی، هندسه، اثرگذاری روی خواص بتن و هزینه باهم تفاوت دارند. الیاف سنتتیک یکی از گزینه‌هایی است که استفاده از آن در بتن در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در حالت کلی الیاف سنتتیک بسته به طول و قطر الیاف به دو دسته کلی ماکروسنتتیک و میکروسنتتیک تقسیم می‌شوند. قطر الیاف میکرو از ۵ تا ۱۰۰ میکرومتر بوده و این در حالی است که الیاف ماکرو قطری بالای ۰/۳ میلیمتر دارند [۸]. استفاده از الیاف سنتتیک (میکرو و ماکرو) در مواد سیمانی مصالحی تولید می‌کند که از نظر مقاومت، شکل پذیری، سختی و دوام بهبود یافته‌اند. به‌منظور اصلاح رفتار بتن، با پیدایش نخستین ترک‌ها، الیاف با پل زدن بین ترک‌ها به شکل پذیری بعد از ترک خوردگی کمک می‌کنند. مدول الاستیسیته و مقاومت کششی از جمله ویژگی‌های دیگر مهم الیاف است که تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد و رفتار الیاف در بتن دارد.

همان‌طور که اشاره شد عمده تحقیقات انجام گرفته در حوزه مکانیک شکست مربوط به بتن معمولی بوده است. تغییر هر یک از اجزای تشکیل دهنده بتن سبب تغییر در ریزساختار و در نتیجه رفتار بتن می‌گردد. به عبارت دیگر، استفاده از مواد افزودنی همچون الیاف در بتن باعث ایجاد تغییرات در ساختار و رفتار آن نسبت به بتن‌های معمولی گردیده است. از آنجایی که ریزساختار بتن الیافی دارای تفاوت‌های زیادی نسبت به بتن معمولی است، تحقیقات در زمینه پارامترهای شکست بتن خودتراکم الیافی ضروری به نظر می‌رسد. هدف این مقاله بررسی تاثیر مقادیر مختلف الیاف ماکروسنتتیک بر مهمترین پارامتر شکست بتن یعنی انرژی شکست با دو روش کار شکست و اثر اندازه می‌باشد. در علم مکانیک شکست انرژی شکست بدست آمده از روش اثر اندازه با نام انرژی شکست اولیه ( $G_f$ ) و انرژی شکست بدست آمده از روش کار شکست با نام انرژی شکست کل ( $G_F$ ) شناخته می‌شود. همچنین همان‌طور که اشاره شد پیدا کردن نسبت بین این دو پارامتر از اهمیت خاصی در رسم منحنی دوپارامتری نرم شوندگی بتن برخوردار است.

## ۲. برنامه آزمایشگاهی

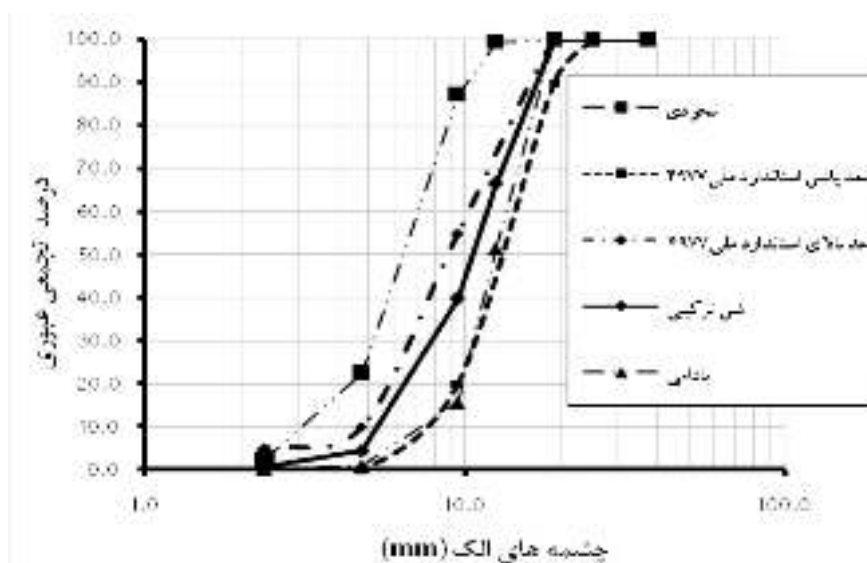
### ۲-۱- مصالح مصرفی

مصالح مورد استفاده در این تحقیق شامل سیمان، شن، ماسه، آب، افزودنی فوق روان کننده و الیاف می‌باشد که در ادامه جزئیات آن آورده شده است. سیمان مصرفی در ساخت کلیه نمونه‌ها، سیمان نوع ۲ تهران می‌باشد. مشخصات شیمیایی سیمان در جدول شماره ۱ آمده است. مصالح سنگی مورد استفاده از

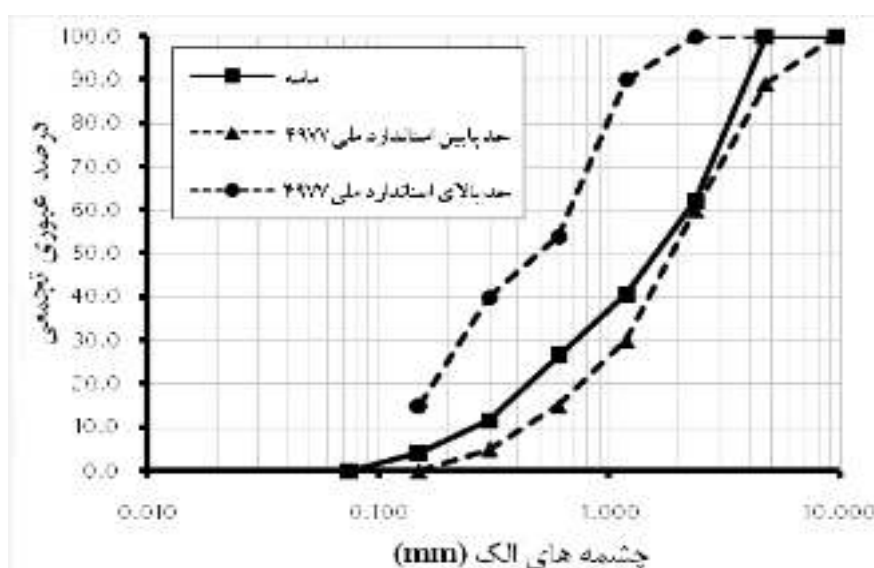
معدنی در غرب تهران تهیه شده است. فوق روان کننده مورد استفاده با پایه پلی کربوکسیلات می باشد. آب مصرفی در ساخت نمونه ها آب شرب شهری است. دانه بندی شن و ماسه مصرفی به ترتیب در شکل های ۲ و ۳ نشان داده شده است. نسبت های دو نوع شن به گونه ای انتخاب شد که دانه بندی ترکیب آن دو نوع شن در محدوده استاندارد ملی ۴۹۷۷ قرار گیرد. همان طور که در شکل ۲ مشخص است دانه بندی شن ترکیبی در محدوده استاندارد قرار دارد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی سیمان مورد استفاده.

| مشخصه شیمیایی | SiO <sub>2</sub> | CaO   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO | SO <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O |
|---------------|------------------|-------|--------------------------------|--------------------------------|-----|-----------------|------------------|-------------------|
| درصد          | ۲۱/۴۲            | ۶۳/۲۵ | ۴/۵۱                           | ۴/۳۸                           | ۱/۴ | ۳/۱۷            | ۰/۹              | ۰/۲               |



شکل ۲- منحنی دانه بندی شن مصرفی در این تحقیق.



شکل ۳- منحنی دانه بندی ماسه مصرفی در این تحقیق.

در این تحقیق به منظور بررسی اثر الیاف ماکروسنتتیک بر پارامتر انرژی شکست بتن از الیاف سنتتیک سینوسی استفاده شده است. این الیاف از شرکت نانوخ و گرانول سیرجان تهیه شده است. مشخصات ظاهری و خواص مقاومتی این الیاف در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- مشخصات الیاف ماکروسنتتیک مورد استفاده.

| ردیف | نوع الیاف                                                   | شکل                                                                               | طول (mm) | چگالی (gr/cm <sup>۳</sup> ) | مقاومت کششی (MPa) | مدول الاستیسیته (GPa) |
|------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------------------------|-------------------|-----------------------|
| ۱    | الیاف سینوسی مدول و مقاومت بالا بر پایه پلی الفین اصلاح شده |  | ۴۰       | ۰/۹۱                        | ۵۸۰               | ۵/۷                   |

## ۲-۲- طرح مخلوط‌ها

طرح مخلوط‌های مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- طرح مخلوط‌های مورد استفاده در این تحقیق

| کد طرح           | w/c | سیمان (Kg/m <sup>۳</sup> ) | شن نخودی وضعیت *SSD (Kg/m <sup>۳</sup> ) | شن بادامی وضعیت *SSD (Kg/m <sup>۳</sup> ) | ماسه وضعیت *SSD (Kg/m <sup>۳</sup> ) | الیاف ماکرو سینوسی (Vol %) |
|------------------|-----|----------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| Control          | ۰/۴ | ۴۲۰                        | ۱۸۰                                      | ۵۹۸                                       | ۹۰۰                                  | ۰                          |
| S <sub>۰,۱</sub> | ۰/۴ | ۴۲۰                        | ۱۸۰                                      | ۵۹۸                                       | ۹۰۰                                  | ۰/۱                        |
| S <sub>۰,۲</sub> | ۰/۴ | ۴۲۰                        | ۱۸۰                                      | ۵۹۸                                       | ۹۰۰                                  | ۰/۲                        |
| S <sub>۰,۳</sub> | ۰/۴ | ۴۲۰                        | ۱۸۰                                      | ۵۹۸                                       | ۹۰۰                                  | ۰/۳                        |

## ۲-۳- روش محاسبه پارامترهای شکست

به منظور تعیین پارامترهای شکست بتن روش‌های مختلفی در استانداردهای بین المللی پیشنهاد شده است. در میان روش‌های پیشنهاد شده سه روش اثراندازه، کارشکست و دو پارامتری از متداول‌ترین روش‌ها برای تعیین پارامترهای شکست بتن محسوب می‌شوند. در این مقاله به منظور تعیین انرژی شکست اولیه ( $G_f$ ) از روش اثر اندازه مطابق RILEM TC-۸۹ [۹] و برای تعیین انرژی شکست کل ( $G_F$ ) از روش کارشکست مطابق دستورالعمل RILEM TC-۵۰ [۱۰] استفاده شده است. در روش کار شکست آزمایش بر روی ۳ تیر شکاف‌دار تحت خمش سه نقطه‌ای انجام شد. این تیرها دارای ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۸۴۰ میلی‌متری بوده و شکاف اولیه در آن‌ها با قرار دادن یک ورق با ضخامت ۳ میلی‌متر در وسط سطح کششی تیر ایجاد شد. در روش اثر اندازه همه تیرها دارای ضخامت یکسان بوده و از نظر هندسی در دو بعد دیگر مشابه بودند. برای انجام آزمایش برای هر ارتفاع مطرح شده، سه نمونه تیر ساخته شد و در مجموع برای هر طرح اختلاط ۱۲ تیر شکاف‌دار ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. مشخصات تیرها در روش اثر اندازه در جدول ۴ آورده شده است. به منظور تعیین انرژی شکست هر یک از طرح‌های مخلوط، علاوه بر داده‌های حاصل از آزمایش‌های روش کارشکست و روش اثر اندازه، به مقادیر مدول الاستیسیته و مقاومت کششی بتن نیز نیاز بود. بنابراین در هر طرح، سه نمونه استوانه‌ای ۱۵×۳۰ سانتی‌متری برای تعیین مدول الاستیسیته و سه نمونه استوانه‌ای

۱۰×۲۰ سانتی متری مقاومت کششی بتن و نیز سه نمونه مکعبی ۱۰ سانتی متری برای تعیین مقاومت فشاری بتن ساخته شد. کلیه آزمایش‌ها در محل آزمایشگاه بتن دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی انجام شده است. شکل ۴ تصویری از نمونه در حال انجام آزمایش و نیز سطح شکست نمونه حاوی الیاف را نشان می‌دهد.

جدول ۴- ابعاد نمونه‌های ساخته شده برای تعیین پارامترهای شکست در روش اثر اندازه

| اندازه اسمی<br>درشت‌دانه (mm) | ارتفاع<br>(mm) | ضخامت<br>(mm) | طول شکاف<br>(mm) | طول دهانه<br>(mm) | طول نمونه<br>(mm) |
|-------------------------------|----------------|---------------|------------------|-------------------|-------------------|
| ۱۲/۵                          | ۳۸/۱           | ۳۸/۱          | ۷/۶              | ۹۵/۲              | ۱۰۲               |
|                               | ۷۶/۲           |               | ۱۵/۲             | ۱۹۰/۵             | ۲۰۳               |
|                               | ۱۵۲/۴          |               | ۳۰/۵             | ۳۸۱               | ۴۰۷               |
|                               | ۳۰۴/۸          |               | ۶۱               | ۷۶۲               | ۸۱۴               |



شکل ۴- تصویری از یک نمونه در حال آزمایش (سمت چپ) و سطح شکست بتن پس از آزمایش (سمت راست).

### ۱-۳-۲- محاسبه پارامترهای شکست با روش آزمایشگاهی اثر اندازه

برای محاسبه پارامترهای شکست بر مبنای روش مذکور، مراحل زیر بایستی انجام شود. ابتدا حداکثر نیروی قابل تحمل توسط تیرها در هر طرح مخلوط باید مشخص گردد. در ادامه برای تعیین ضرایب زیر از رگرسیون خطی مختصات  $Y_j$  در مقابل  $X_j$  استفاده می‌شود.

$$Y_j \quad (1)$$

$$Y_j = \left( \frac{b h_j}{p_f^0} \right)^2 \quad \cdot \quad X_j = h_j \quad (2)$$

مقادیر  $A$  و  $C$  شیب و عرض از مبدأ رابطه (۱) هستند. همچنین در رابطه (۲) مقادیر  $P_j$ ،  $b$  و  $h_j$  به ترتیب بار حداکثر اصلاح شده مطابق دستورالعمل RILEM TC-۸۹، عرض و ارتفاع تیر هستند. مقادیر انرژی شکست اولیه ( $G_f$ ) و نرخ رهاسازی انرژی  $g(\alpha)$  بصورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$G_f = \frac{g(\alpha)}{E_c A} \quad (۳)$$

$$g(\alpha) = 2.25 \left( \frac{s}{h} \right)^2 \pi \alpha [F(\alpha)]^2 \quad (۴)$$

در رابطه بالا پارامترهای  $E_c$ ،  $\alpha$ ،  $s$  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 برون‌یابی نتایج به نمونه‌های بسیار بزرگ مورد استفاده قرار گرفته و بر اساس RILEM TC-۸۹ تعیین می‌شود. سایر پارامترهای شکست نیز می‌تواند براساس روابط ارائه شده در دستورالعمل RILEM TC-۸۹ محاسبه شوند.

### ۲-۳-۲- محاسبه پارامترهای شکست با روش آزمایشگاهی کار شکست

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 [۱۱]:

$$G_F = \frac{W_F}{b(h - a_0)} \quad (۵)$$

در رابطه بالا  $W_F$  انرژی کل لازم برای دو نیم شدن تیر بوده و معادل سطح زیر منحنی بار-جابجایی است،  $b$  عرض تیر،  $h$  ارتفاع تیر و  $a_0$  طول شکاف اولیه تیر است.

## ۳. نتایج آزمایشگاهی

### ۳-۱- خواص مکانیکی

مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته نمونه های ساخته شده در این تحقیق در جدول ۵ آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود افزایش مقدار الیاف ماکروسنتتیک تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر خواص مکانیکی نداشته است.

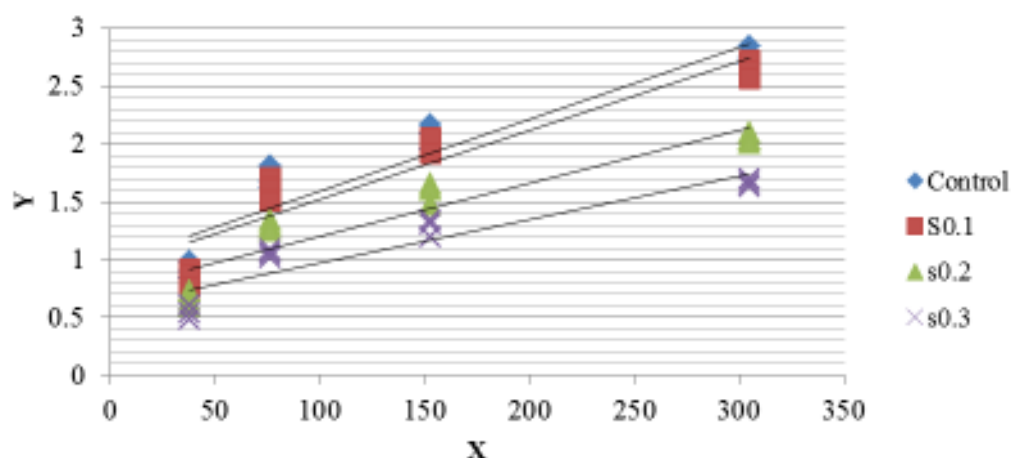
### ۳-۲- انرژی شکست بر مبنای روش اثر اندازه

برای تعیین پارامترهای شکست بر مبنای روش اثر اندازه، بایستی ابتدا با انجام مطالعه آزمایشگاهی بر روی ۱۲ تیر با ابعاد معین حداکثر بار تحمل شده توسط تیرها تعیین گردد. سپس بر طبق توصیه‌نامه‌ی RILEM TC-۸۹، اثرات مرتبط با وزن نمونه بایستی در محاسبات لحاظ شود و بدین منظور مقدار بار بیشینه‌ی اصلاح شده محاسبه گردد. سپس با برون‌یابی نمونه‌هایی با ابعاد معین به نمونه‌ای با ابعاد بسیار بزرگ، می‌توان مدل مکانیک شکست الاستیک خطی را شبیه‌سازی نموده و از روابط آن استفاده نمود. جدول ۵ مقدار بار حداکثر اصلاح شده متناسب با اندازه نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۵- خواص مکانیکی و بارهای حداکثر اصلاح شده

| کد طرح           | مقامت فشاری (MPa) | مقامت کششی (MPa) | مدول الاستیسیته (GPa) | عمق (mm) | بار حداکثر اصلاح شده (N) |       |       |
|------------------|-------------------|------------------|-----------------------|----------|--------------------------|-------|-------|
|                  |                   |                  |                       |          | تیر ۱                    | تیر ۲ | تیر ۳ |
| Control          | ۴۳/۱              | ۳/۱              | ۳۱/۲                  | ۳۸/۱     | ۱۴۶۵                     | ۱۵۳۳  | ۱۵۹۰  |
|                  |                   |                  |                       | ۷۶/۲     | ۲۱۶۰                     | ۲۲۸۰  | ۲۲۴۳  |
|                  |                   |                  |                       | ۱۵۲/۴    | ۳۹۵۴                     | ۴۰۲۰  | ۴۱۵۵  |
|                  |                   |                  |                       | ۳۰۴/۸    | ۶۸۹۰                     | ۷۰۱۰  | ۷۰۹۰  |
| S <sub>0.1</sub> | ۴۴                | ۳/۲۵             | ۳۰/۵                  | ۳۸/۱     | ۱۵۲۰                     | ۱۵۵۶  | ۱۶۷۰  |
|                  |                   |                  |                       | ۷۶/۲     | ۲۲۲۰                     | ۲۲۸۰  | ۲۳۶۴  |
|                  |                   |                  |                       | ۱۵۲/۴    | ۴۰۷۵                     | ۴۰۵۴  | ۴۱۹۵  |
|                  |                   |                  |                       | ۳۰۴/۸    | ۷۰۵۰                     | ۷۱۷۰  | ۷۲۶۰  |
| S <sub>0.2</sub> | ۴۴/۵              | ۳/۴۹             | ۳۰/۱                  | ۱۷۰/۱    | ۱۸۰۳                     | ۱۸۶۸  | ۱۷۰۱  |
|                  |                   |                  |                       | ۲۵۰/۷    | ۲۵۵۳                     | ۲۶۰۱  | ۲۵۰۷  |
|                  |                   |                  |                       | ۴۵۲/۱    | ۴۵۷۹                     | ۴۷۸۱  | ۴۵۲۱  |
|                  |                   |                  |                       | ۸۱۲/۵    | ۸۰۲۸                     | ۸۲۰۱  | ۸۱۲۵  |
| S <sub>0.3</sub> | ۴۴/۵              | ۳/۴۹             | ۳۰/۱                  | ۱۸۷/۲    | ۱۹۸۴                     | ۲۰۹۳  | ۱۸۷۲  |
|                  |                   |                  |                       | ۲۷۸/۳    | ۲۸۳۴                     | ۲۸۸۷  | ۲۷۸۳  |
|                  |                   |                  |                       | ۵۰۱/۹    | ۵۰۸۳                     | ۵۳۰۶  | ۵۰۱۹  |
|                  |                   |                  |                       | ۸۹۹/۶    | ۸۹۱۲                     | ۹۱۰۴  | ۸۹۹۶  |

برای هر کدام از طرح مخلوط‌های تحقیق بایستی فرایند برون‌یابی و برازش به‌صورت جداگانه انجام شود و مقادیر A و C نیز بطور مجزا محاسبه شوند (شکل ۵). جدول ۶ کلیه این مقادیر را برای طرح مخلوط‌های این تحقیق نشان می‌دهد. به عنوان مثال همان‌طور که مشاهده می‌شود با تحلیل رگرسیون خطی برای طرح اختلاط control مقادیر ضرایب شیب (A) و عرض از مبدأ (C) به‌ترتیب برابر برابر  $0.0062 \text{ (} \text{mm}^{-1} \text{MPa}^{-2} \text{)}$  و  $0.974$   $\text{(MPa}^{-2} \text{)}$  به دست آمدند. پارامتر شکست اصلی شامل انرژی شکست اولیه  $G_f$  و چقرمگی شکست ( $K_{IC}$ ) مرتبط با روش اثر اندازه مطابق دستورالعمل RILEM TC-۸۹ به‌دست آمده و در جدول ۶ نشان داده شده است.



شکل ۵- برون‌یابی خطی و برازش خط بر داده‌های آزمایشگاهی

جدول ۶- مقادیر آماری و پارامترهای شکست با روش اثر اندازه در طرح مخلوط‌های این تحقیق.

| کد طرح           | $A (mm^{-1} MPa^{-2})$ | $C (MPa^{-2})$ | $G_f (N/m)$ | $K_{IC} (MPa mm^{0.5})$ |
|------------------|------------------------|----------------|-------------|-------------------------|
| Control          | ۰/۰۰۶۲                 | ۰/۹۷۴          | ۳۶/۰۴       | ۳۴/۲۷                   |
| S <sub>۰,۱</sub> | ۰/۰۰۶                  | ۰/۹۲           | ۳۹/۸        | ۳۴/۸۴                   |
| S <sub>۰,۲</sub> | ۰/۰۰۴۶                 | ۰/۷۴           | ۵۲/۶        | ۳۹/۸                    |
| S <sub>۰,۳</sub> | ۰/۰۰۳۷                 | ۰/۶۰۲          | ۶۶/۲۹       | ۴۴/۳۷                   |

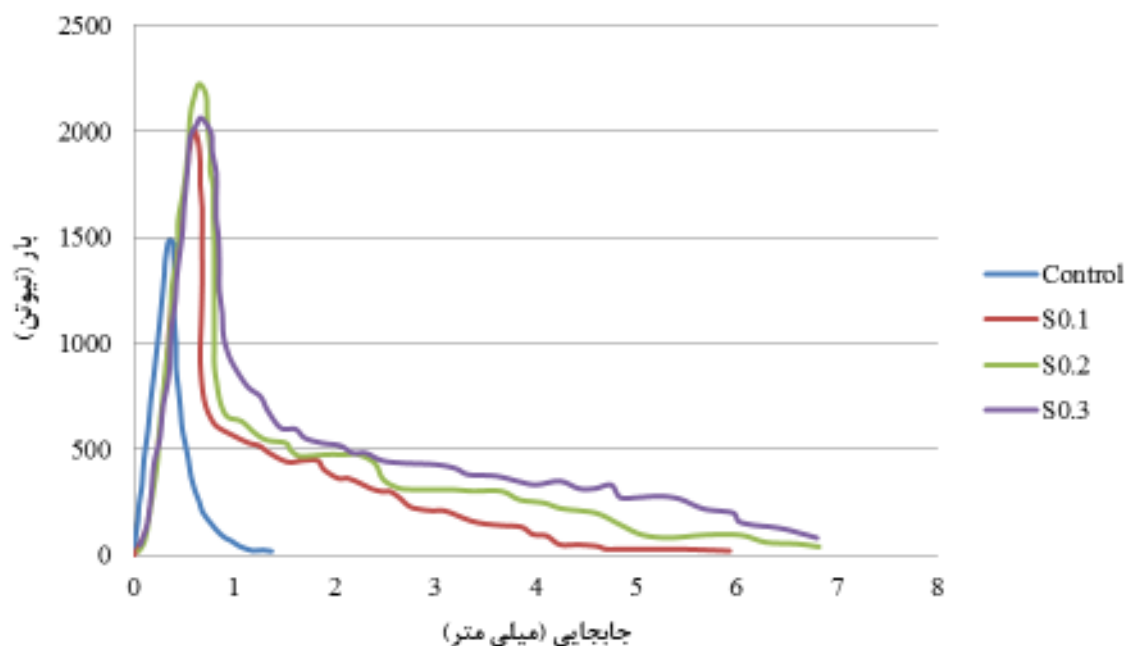
یکی از مباحث مهم مورد بررسی در این تحقیق بررسی تاثیر استفاده از الیاف ماکروسنتتیک بر پارامترهای شکست بتن است. همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، استفاده از الیاف سبب افزایش انرژی شکست اولیه ( $G_f$ ) شده به‌طوری که استفاده از ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد حجمی الیاف ماکروسنتتیک به ترتیب سبب افزایش ۱۰/۴٪، ۴۵/۹٪ و ۸۳/۸٪ انرژی شکست اولیه شده است. این افزایش در مقدار انرژی شکست اولیه می‌تواند ناشی از این مورد باشد که حضور الیاف سبب به تاخیر افتادن شروع و گسترش میکروترک‌ها در بتن شده، بنابراین ظرفیت تحمل بار تیر افزایش پیدا کرده و متعاقباً سبب افزایش انرژی شکست شده است [۱۲]. براساس داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده از این تحقیق رابطه خطی بین انرژی شکست اولیه ( $G_f$ ) و الیاف مصرفی ( $V_f$ ) به شرح زیر بدست آمد:

$$G_f = 103.55V_f + 33.15 \quad (R^2 = 0.95)$$

### ۳-۳- پارامترهای شکست بر مبنای روش کار شکست

در این روش مقدار انرژی شکست از تقسیم سطح زیر نمودار بار-جابجایی بدست آمده از آزمایش خمش سه نقطه‌ای (شکل ۶) بر مساحت سطح شکست بتن محاسبه می‌گردد و به انرژی شکست کل معروف می‌باشد. مقادیر انرژی شکست کل حاصل از این پژوهش در جدول ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، نتایج به دست آمده برای انرژی شکست کل ( $G_F$ ) نیز به درصد جایگزینی الیاف وابسته بوده است به طوری که به‌طوری که استفاده از ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد حجمی الیاف ماکروسنتتیک به ترتیب سبب افزایش ۱۲۳٪، ۲۴۵٪ و ۳۵۰٪ انرژی شکست کل ( $G_F$ ) شده است. این افزایش به علت طول بلند و نیز شکل سینوسی شکل الیاف است که سبب درگیری بهتر با بتن در محل شروع ترک شده و پس از ترک خوردگی‌های بزرگ بر روی ترک‌ها پل زده و مانع از گسترش ترک‌ها و در نتیجه سبب افزایش سطح زیر نمودار بار-جابجایی می‌شود.





شکل ۶- منحنی نیرو-تغییر مکان برای نمونه های حاوی مقادیر مختلف الیاف ماکروسنتتیک

جدول ۷- مقادیر  $G_F$  بدست آمده از آزمایش WFM

| کد طرح  | انرژی شکست کل<br>(N/m) |
|---------|------------------------|
| Control | ۱۰۶/۴                  |
| S۰,۱    | ۲۲۹/۶                  |
| S۰,۲    | ۳۵۱/۸                  |
| S۰,۳    | ۴۵۶/۵                  |

#### ۴-۳- نسبت انرژی شکست کل به انرژی شکست اولیه

از آنجایی که برای تعیین مقدار انرژی شکست اولیه ( $G_F$ ) تنها به پیشینه بار قابل تحمل توسط تیرها تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای نیاز است از این رو محاسبه  $G_F$  از  $G_F$  آسان‌تر بوده و نتایج حاصل از آن نیز دقیق‌تر خواهد بود. در رابطه با بتن‌های معمولی و نیز بتن خودتراکم محققین مختلفی به تعیین نسبت  $G_F$  به  $G_F$  پرداخته‌اند. بیگی و همکاران [۵] در مطالعاتشان به تعیین این نسبت در بتن خودتراکم پرداختند و مقادیر در محدوده ۲/۷ تا ۳/۱۱ برای نسبت انرژی شکست کل ( $G_F$ ) به انرژی شکست اولیه ( $G_F$ ) ذکر کردند. نیک بین و همکاران [۱۳] در مطالعاتشان به بررسی اثر بکارگیری مقادیر مختلف ریزدانه معدنی بر رفتار شکست بتن خودتراکم پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد نسبت انرژی شکست کل ( $G_F$ ) به انرژی شکست اولیه ( $G_F$ ) در محدوده عدد ۳ تغییر خواهد کرد. این نسبت برای بتن‌های پرمقاومت برابر با ۲/۸ تخمین زده شده است [۱۴]. در این تحقیق نسبت انرژی شکست کل به انرژی شکست اولیه در نمونه بدون الیاف برابر با ۲/۹۵ و برای بتن حاوی الیاف ماکروسنتتیک در حدود ۵/۶۷ تا ۶/۸۸ بدست آمده است.

جدول ۸- نسبت انرژی شکست کل به انرژی شکست اولیه در هر طرح مخلوط.

| کد طرح           | $G_F$<br>(N/m) | $G_F$<br>(N/m) | $G_F/G_f$ |
|------------------|----------------|----------------|-----------|
| Control          | ۳۶/۰۴          | ۱۰۶/۴          | ۲/۹۵      |
| S <sub>۰,۱</sub> | ۳۹/۸           | ۲۲۹/۶          | ۵/۷۶      |
| S <sub>۰,۲</sub> | ۵۲/۶           | ۳۵۱/۸          | ۶/۶۸      |
| S <sub>۰,۳</sub> | ۶۶/۲۹          | ۴۵۶/۵          | ۶/۸۸      |

#### ۴. نتیجه‌گیری

- نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی بر روی پارامترهای شکست در بتن حاوی الیاف ماکروسنتتیک را می‌توان به‌طور خلاصه بصورت زیر بیان نمود:
- ۱- حضور الیاف ماکروسنتتیک در طرح مخلوط تاثیر چندانی بر خواص مکانیکی نداشته است.
  - ۲- مقدار انرژی شکست در هر دو روش اثر اندازه و کارشکست به شدت به مقدار الیاف مصرفی وابسته است.
  - ۳- استفاده ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد حجمی الیاف ماکروسنتتیک به ترتیب سبب افزایش ۱۰/۴٪، ۴۵/۹٪ و ۸۳/۸٪ انرژی شکست اولیه ( $G_F$ ) است.
  - ۴- با افزایش درصد جایگزینی الیاف سطح زیر منحنی بار جابجایی افزایش پیدا کرده است به گونه ای که استفاده از ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد حجمی الیاف ماکروسنتتیک به ترتیب سبب افزایش ۱۲۳٪، ۲۴۵٪ و ۳۵۰٪ انرژی شکست کل ( $G_F$ ) شده است.
  - ۵- نسبت انرژی شکست کل به اولیه ( $G_F/G_f$ ) برای بتن معمولی برابر ۲/۹۵ و برای بتن حاوی الیاف ماکروسنتتیک در حدود ۵/۶۷ تا ۶/۸۸ بدست آمده است.

#### ۵. مراجع

- [۱] Broujerdian, V., Karimpour, H., & Alavikia, S. (۲۰۱۸). "Predicting the Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams Using Non-linear Fracture Mechanics". International Journal of Civil Engineering, Vol. ۱۷ (۵), pp ۱-۹.
- [۲] Kaplan, M. F. (۱۹۶۱). "Crack propagation and the fracture of concrete". In Journal Proceedings, Vol. ۵۸(۱۱), pp ۵۹۱-۶۱۰.
- [۳] صالحی، ح.، مظلوم، م. (۱۳۹۷). "مطالعه های آزمایشگاهی و عددی گسترش ترک در بتن خودتراکم سبک". مهندسی مکانیک مدرس، شماره ۶.
- [۴] Karamloo, M., Mazloom, M., & Payganeh, G. (۲۰۱۶). "Influences of water to cement ratio on brittleness and fracture parameters of self-compacting lightweight concrete". Engineering Fracture Mechanics, Vol. ۱۶۸, pp ۲۲۷-۲۴۱.
- [۵] Beygi, M. H., Kazemi, M. T., Amiri, J. V., Nikbin, I. M., Rabbanifar, S., & Rahmani, E. (۲۰۱۴). "Evaluation of the effect of maximum aggregate size on fracture behavior of self-compacting concrete". Construction and Building Materials, Vol. ۵۵, pp ۲۰۲-۲۱۱.
- [۶] Afzali-Naniz, O., & Mazloom, M. (۲۰۱۹). "Fracture behavior of self-compacting semi-lightweight concrete containing nano-silica". Advances in Structural Engineering, Vol. ۲۲(۱۰), pp ۲۲۶۴-۲۲۷۷.
- [۷] Bentur, A., & Mindess, S. (۲۰۰۶). Fibre reinforced cementitious composites. Crc Press.

- [۸] Fallah, S., & Nematzadeh, M. (۲۰۱۷). Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume. *Construction and building materials*, Vol. ۱۳۲, pp ۱۷۰-۱۸۷.
- [۹] RILEM FMT-۸۹, Size-effect method for determining fracture energy and process zone size of concrete, *Materials and Structures*, Vol. ۲۳ (۶), pp ۴۶۱-۴۶۵, ۱۹۹۰.
- [۱۰] RILEM FMC-۵۰. Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams, *Materials and Structures*, Vol. ۱۸, (۴), pp ۲۸۷-۲۹۰, 1985.
- [۱۱] M. Elices, G. Guinea, J. Planas, Measurement of the fracture energy using three-point bend tests: Part ۳—Influence of cutting the P-δ tail, *Materials and Structures*, Vol. ۲۵ (۶), pp ۳۲۷-۳۳۴, ۱۹۹۲.
- [۱۲] Kazemi, M. T., Golsorkhtabar, H., Beygi, M. H. A., & Gholamitabar, M. (۲۰۱۷). Fracture properties of steel fiber reinforced high strength concrete using work of fracture and size effect methods. *Construction and Building Materials*, Vol. (۱۴۲), pp ۴۸۲-۴۸۹.
- [۱۳] Nikbin, I. M., Davoodi, M. R., Fallahnejad, H., Rahimi, S., & Farahbod, F. (۲۰۱۵). Influence of mineral powder content on the fracture behaviors and ductility of self-compacting concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. ۲۸(۳), pp ۰۴۰۱۵۱۴۷.
- [۱۴] Einsfeld, R. A., & Velasco, M. S. L. (۲۰۰۶). Measurement of the ratio GF/Gf for numerical analysis of concrete structures. *Latin American Journal of Solids and Structures*, Vol. ۳(۴), ۳۶۱-376.

$$Gf = 103.55 Vf + 33.15 \quad (R_{(F)})$$