

## Experimental study of the effect of silicate modulus and alkali concentration on the mechanical and fracture properties of alkali activated slag concrete at ambient temperature

Mohamad Hasan Khalilpasha<sup>1</sup>, Alireza Mirzagoltabar Roshan<sup>2\*</sup>

1- Ph. D. Candidate, Faculty of civil engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

2- Associate Professor, Faculty of civil engineering, Babol Noshirvani University of technology, Babol, Iran.

### ABSTRACT

Alkali activated slag concrete, as a new type of concrete in which, conventional Portland cement is not used, due to various advantages such as reducing the amount of CO<sub>2</sub> produced, the use of by-products and recycled steel industry and mechanical characteristics comparable to ordinary concrete, in The last decades have been welcomed by various researchers. On the other hand, due to the nature of concrete cracking, it seems necessary to study its fracture characteristics. Two parameters of silicate modulus and alkali concentration are the most important factors affecting the mechanical and fracture properties of this type of concrete. In this experimental study, their effect was studied. For this purpose, 16 different mixes of Alkali activated slag concrete in 4 classes of silicate modulus and 4 classes of alkali concentration and 3 ordinary Portland concrete mixes were selected for comparison. In order to obtain the fracture characteristics of the work-fracture method, a total of 95 three-point bending notched beams were prepared and tested after storage at ambient temperature at the age of 28 days. According to the results, in all values of alkali concentration, with increasing silicate modulus, the specific fracture energy increased and the characteristic length of crack decreased, and with increasing alkali concentration from 4.5 to 6.5%, in all values of silicate modulus, the specific fracture energy increased and the characteristic length of crack decreased. which indicates an increase in the brittleness of concrete. However, by increasing the concentration of alkali from 6.5 to 7.5%, an inverse trend was observed in the fracture parameters. The results showed that at similar values of compressive strength, the fracture energy of alkali activated slag concrete was higher than ordinary portland concrete and the crack characteristic length was lower.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 15 June 2021

**Revise Date:** 30 September 2021

**Accept Date:** 09 November 2021

**Keywords:** Alkali Activated Slag (AAS) Fracture energy characteristic length silicate modulus Alkali concentration

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2021.290821.2474

\*Corresponding author: Alireza Mirzagoltabar Roshan

Email address: [ar-goltabar@nit.ac.ir](mailto:ar-goltabar@nit.ac.ir)

## تاثیر مدول سیلیکات و غلظت قلیا بر مشخصات مکانیکی و شکست بتن های قلیا فعال سرباره ای

محمد حسن خلیل پاشا، علیرضا میرزاگل تبار روشن\*

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران- سازه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران  
۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران

### چکیده

بتن قلیا فعال سرباره ای به عنوان نوع جدیدی از بتن که در آن از سیمان پرتلند معمولی استفاده نشده است، بدلیل مزایای مختلفی از قبیل کاهش میزان  $CO_2$  تولید شده و استفاده از محصول فرعی و بازیافتی صنعت فولاد و مشخصات مکانیکی قابل مقایسه با بتن معمولی، در دهه اخیر مورد استقبال پژوهشگران مختلفی قرار گرفته است. از طرفی به دلیل ماهیت سرشار از ترک بتن بررسی خصوصیات شکست آن ضروری به نظر می رسد. دو پارامتر مدول سیلیکات و غلظت قلیا از مهمترین فاکتورهای تاثیرگذار بر مشخصات مکانیکی و شکست این نوع از بتن ها هستند که در این مطالعه آزمایشگاهی تاثیر آن ها مورد بررسی قرار گرفت. برای این کار، ۱۶ طرح مختلف از بتن قلیا فعال سرباره ای در ۴ رده مدول سیلیکات و ۴ رده غلظت قلیا و سه طرح بتن معمولی جهت مقایسه انتخاب گردید. جهت به دست آوردن مشخصات شکست به روش کار-شکست، مجموعاً ۹۵ عدد تیر خمشی سه نقطه ای ترک دار آماده و بعد از نگهداری در دمای محیط در سن ۲۸ روزه مورد آزمایش قرار گرفت. بر اساس نتایج بدست آمده، در حالت های بررسی شده وقتی غلظت قلیا ثابت نگه داشته شود، با افزایش مدول سیلیکات، انرژی مخصوص شکست افزایش و طول مشخصه ترک کاهش می یابد. وقتی مدول سیلیکات ثابت باشد، با افزایش غلظت قلیا از ۴/۵٪ تا ۶/۵٪، انرژی مخصوص شکست افزایش و طول مشخصه ترک کاهش یافت که نشان دهنده افزایش تردی بتن است. البته در حالت های بررسی شده با مدول سیلیکات برابر، با افزایش غلظت قلیا از ۶/۵٪ به ۷/۵٪ روند معکوسی در پارامترهای شکست مشاهده می گردد. نتایج نشان می دهد که در مقادیر مشابه مقاومت فشاری، انرژی شکست بتن قلیا فعال سرباره ای از بتن معمولی بیشتر و طول مشخصه ترک در آن کمتر بوده است.

کلمات کلیدی: بتن قلیا فعال سرباره ای، انرژی شکست، طول مشخصه، مدول سیلیکات، غلظت قلیا فعال کننده ها.

| شناسه دیجیتال:                 |  | سابقه مقاله: |               |           |                 |           |
|--------------------------------|--|--------------|---------------|-----------|-----------------|-----------|
| doi:                           | https://doi.org/10.22065/JSCE.2021.290821.2474 | چاپ          | انتشار آنلاین | پذیرش     | بازنگری         | دریافت    |
| 10.22065/JSCE.2021.290821.2474 |  | ۱۴۰۱/۴/۰۱    | ۱۴۰۰/۸/۱۸     | ۱۴۰۰/۸/۱۸ | ۱۴۰۰/۷/۰۸       | ۱۴۰۰/۳/۲۵ |
| علیرضا میرزاگل تبار روشن       |  |              |               |           | *نویسنده مسئول: |           |
| ar-goltabar@nit.ac.ir          |  |              |               |           | پست الکترونیکی: |           |

## ۱- مقدمه

با توجه به معضلات زیست محیطی سیمان پرتلند، ضرورت بازنگری در روش تولید و به کارگیری فن آوری های نوین جهت ساخت بتن، با مصالح سازگار با محیط زیست، توسط محققین مختلف پیشنهاد شده است. مواد سیمانی مکمل نظیر پوزولانهای طبیعی یا محصولات جانبی صنایع و تولید سیمانهای خاص مثل سیمان کلسیم آلومیناتی، سیمان سوپر سولفات و سیمان سرباره‌ای در همین راستا، توسط پژوهشگران در حال تحقیق هستند. این اقدامات در راستای توسعه پایدار در صنعت ساختمان است [۱]. و یکی از مهمترین اقدامات لازم گاز CO<sub>2</sub> به دلیل نقش گلخانه‌ای خود اصلی‌ترین آلاینده هوا و بدترین آلاینده آب و هوا شناخته می‌شود [۲ و ۳]. یکی از چالش‌های مهم جهان امروز، کاهش تولید آن به دلیل اثرات مخرب در تولید گازهای گلخانه‌ای و در نتیجه نقش کلیدی در روند تغییرات آب و هوایی و پدیده گرمایش جهانی است. بر اساس آمارهای جهانی در سال ۲۰۱۶ حدود ۸ درصد کل CO<sub>2</sub> تولید شده در دنیا به‌خاطر تولید و مصرف سیمان پرتلند معمولی بوده که این میزان مصرف، هر ساله در حال افزایش است (۴/۳۸-۳/۶۸ گیگا تن تا سال ۲۰۵۰) [۴]. تولید و مصرف هر تن سیمان حدود ۰/۹۵ تن CO<sub>2</sub> در هوا منتشر می‌کند [۵]. علاوه بر این، تولید سیمان رتبه سوم مصرف انرژی (حدود ۵ درصد) در دنیا، بعد از آلومینیوم و فولاد، را دارا می‌باشد [۶ و ۷]. یکی از روش‌های جایگزین که در دو دهه اخیر توسط پژوهشگران مختلف پیشنهاد شده است، بتن‌های قلیا فعال سرباره‌ای (AAS) است که استفاده از آن بر اساس برآوردهای اولیه تا ۷۵ درصد تولید CO<sub>2</sub> را کاهش می‌دهد [۸]. سرباره کوره بلند آهن گدازی (GGBFS) محصول جانبی کارخانه تولید فولاد است. تولید سرباره حدود ۱۰٪ از کل تولید فولاد است. از سرباره‌های کوره بلند در صنعت ساخت و ساز در تولید سیمان و بتن استفاده می‌شود. آمار تولید سرباره در جهان ۳۲۰ میلیون تن تخمین زده می‌شود. با این حال، فقط مقادیر کمی (۲۰-۲۰٪) سرباره استفاده شده و بقیه به عنوان زباله‌های صنعتی دفن می‌شوند [۹ و ۱۰]. استفاده از GGBFS در این زمینه از نظر زیست محیطی و اقتصادی دارای مزایای قابل توجهی است؛ چرا که تولید آن به انرژی کمتری نسبت به تولید سیمان پرتلند نیاز دارد و در طی این فرآیند CO<sub>2</sub> کمتری در هوا منتشر می‌شود [۱۰]. تولید بتن با سرباره به عنوان روشی موثر برای بازیافت ضایعات صنایع با محصولات سازگار با محیط زیست مطرح است. بر اساس نظریه داویدوویتز، یک محلول قلیائی می‌تواند با سیلیس موجود در یک ماده آلومینیو سیلیکاتی (ماده‌ای با ترکیبات سیلیسیوم و آلومینیوم) واکنش و یک ماده چسباننده را به‌وجود آورد [۱۱]. این واکنش از نوع پلیمریزاسیون و مواد پایه می‌تواند با منشا طبیعی مثل متاکائولین [۱۲]، زئولیت، سرباره مواد آتش فشانی [۱۳]، پوزولانهای طبیعی [۱۴] یا یک محصول جانبی کارخانه های صنعتی مثل خاکستر بادی [۱۵]، سرباره کوره بلند آهن گدازی [۱۶ و ۱۷] گل قرمز [۱۸]، دوده سیلیس، خاکستر پوسته برنج [۱۹] باشد. ژئوپلیمر دارای فرمول شیمیایی  $Mn[-(SiO_2)_z-Al_2O_3]_n \cdot wH_2O$  بوده که در آن M کاتیون سدیم یا پتاسیم، n درجه پلیمریزاسیون، z دارای مقدار ۱، ۲ یا ۳ و w تعداد مولکول‌های آب موجود در ساختار ژئوپلیمر است [۱۱]. بین همه مواد پایه فوق، خاکستر بادی و سرباره کوره آهن‌گدازی دارای بالاترین پتانسیل به عنوان ماده پایه بتن‌های ژئوپلیمری هستند [۱۴]. البته تفاوت‌هایی بین بتن قلیا فعال تولیدی با ماده پایه سرباره یا خاکستر بادی وجود دارد. معمولاً بتن ژئوپلیمری تولید شده با ماده پایه خاکستر بادی به عمل‌آوری در دمای نسبتاً بالا نیازمند بوده و شکل اصلی محصول تولید شده نیز به صورت N-A-S-H<sup>۲</sup> است، در حالی که شکل اصلی محصول تولید شده در مورد سرباره حاصل از هیدراسیون، C-A-S-H<sup>۲</sup> بوده و معمولاً به دمای بالا برای عمل‌آوری نیاز نیست [۱۷].

در صورتی که سرباره در یک محلول قلیائی با pH بالا فعال شود، می‌تواند جایگزین سیمان گردد. در تولید بتن‌های قلیا فعال سرباره‌ای، محلول قلیائی معمولاً یک هیدروکسید فلز قلیایی مثل سدیم هیدروکسید یا محلول سدیم سیلیکات است. هر دو ماده نقش مهمی در واکنش ژئوپلیمریزاسیون دارند. سدیم هیدروکسید دویبخش آنیون هیدروکسید (OH<sup>-</sup>)، که برای حل شدن آلومینیو سیلیکات در مرحله اول و کاتیون (Na<sup>+</sup>)، که برای تعادل شبکه آلومینیوسیلیکات تشکیل شده در مرحله آخر مهم است، دارد. انحلال پذیری آلومینیوسیلیکات با افزایش غلظت OH<sup>-</sup> افزایش می‌یابد ولی افزایش خیلی زیاد مفید نیست. سدیم سیلیکات پیوند خوبی بین ذرات ایجاد

<sup>۱</sup> Grand Granulated Blast Furnace Slag

<sup>۲</sup> aluminosilicate hydrate sodium

<sup>۳</sup> calcium - aluminosilicate hydrate

می کند که باعث بهبود مشخصات مکانیکی بتن حاصل به وسیله سنتز کردن ژل آلومینیوسیلیکات می گردد [۱۹]. بتن قلیا فعال سرباره-ای (AAS) در مقایسه با بتن معمولی، مزایای متعددی از قبیل کاهش انتشار گاز CO<sub>2</sub>، تخلخل کمتر، حلالیت کم هیدرات ها، رابط سنگدانه-ماتریس قوی تر، مقاومت فشاری اولیه و نهائی بالاتر، حرارت هیدراسیون کمتر، دوام بالا، مقاومت بالا در برابر حملات شیمیائی، سیکل ذوب و یخبندان مناسب، مقاومت مناسب در برابر نفوذ یون کلر دارد. با وجود این مزایا، بتن های قلیا فعال سرباره ای (AAS) معایبی از جمله جمع شدگی زیاد، نرخ کرناسیون بالا، کارائی کم و گیرش سریع و تشکیل ریز ترک ها دارد [۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳]. جهت گسترش استفاده از بتن های قلیا فعال سرباره ای (AAS) شناخت ویژگی های آن و عوامل اصلی تاثیرگذار در مشخصات مکانیکی و سازه ای آن بسیار مهم و حیاتی است. مهمترین فاکتورهای که بر شکل گیری ساختار ژل و مشخصات مکانیکی و دوام بتن های قلیا فعال سرباره ای (AAS) تاثیر می گذارد، ترکیب شیمیائی سرباره، مدت و دمای عمل آوری، نسبت وزنی محلول قلیائی به سرباره، غلظت و مدول سیلیکات قلیا، نوع فعال کننده های قلیائی، سن بتن، نسبت آب به سرباره، و عیار سرباره است [۲۰، ۲۱، ۲۲]. بر اساس مطالعات پیشین، غلظت و مدول سیلیکات فعال کنند های قلیائی اهمیت حیاتی در گیرش اولیه، کارائی، مشخصات مکانیکی و ریز ساختار ملات AAS دارد. افزایش مقدار قلیا در خمیر AAS نرخ و مقدار کل حرارت آزاد شده را افزایش می دهد که این فاکتور باعث افزایش درجه هیدراسیون می گردد [۱۰]. همچنین مشخصات مکانیکی و دوام بتن های قلیا فعال سرباره ای، بیشتر مواقع متأثر از مقدار محلول های قلیائی بوده که رشد و توسعه این خصوصیات مخصوصا با افزایش مقدار محلول های قلیائی از حد خاصی، کند می شود. در این پژوهش ها مشخص شده است با افزایش غلظت قلیا مقاومت فشاری افزایش می یابد. ولی غلظت خیلی بالای قلیا باعث ضعیف شدن ساختار ژل و چسبانده می شود. همچنین با افزایش مدول سیلیکات محلول قلیائی مشخصات مکانیکی بهبود یافته ولی وقتی مقدار آن از مقدار مشخصی بیشتر گردد تاثیر چندانی بر روی بتن حاصل ندارد [۲۵-۱۰، ۲۰]. نکته مهم در طرح اختلاط در نظر گرفتن همزمان ویژگی های بتن تازه (کارائی و گیرش اولیه)، با ویژگی های بتن سخت شده (مقاومت فشاری و کششی و مدول الاستیسیته بتن) است که بر اساس پژوهش های محققین قبلی برای فعال کردن سرباره با در نظر گرفتن کارائی و جلوگیری از گیرش سریع و رسیدن به مقاومت فشاری قابل قبول، رنج مناسب غلظت قلیا (n) ۳/۵ الی ۷/۵٪ و رنج مناسب مدول سیلیکات (M<sub>s</sub>) از ۰/۴۵ الی ۱/۰۵ پیشنهاد شده است [۲۲]. نکته دیگر در مورد بتن های ژئوپلیمری، اثر عمل آوری بتن با حرارت است که در عمل محدودیت های زیادی برای کاربردی کردن این بتن ها بوجود می آورد. در این تحقیق عمل آوری در دمای محیطی مورد مطالعه قرار گرفته است که در مقایسه با عمل آوری با حرارت باعث کاهش قیمت و مصرف انرژی در این نوع بتن ها می گردد.

بر مبنای تئوری مکانیک شکست، برای بیان نحوه شکل گیری و پیشرفت ترک و پاسخ سازه ترک خورده تحت بار وارده در مواد، از پارامترهای کمی مثل انرژی و چقرمگی شکست استفاده می شود. در طراحی سازه های بتنی تا کنون دو انقلاب (تحلیل الاستیک غیر کششی و تئوری حدی پلاستیک) اتفاق افتاده که با توجه به ماهیت ترد و سرشار از ترک بتن، وارد کردن پارامترهای شکست در طراحی سازه های بتنی به نظر بسیاری از پژوهشگران می تواند انقلاب سوم و ضروری در طراحی سازه های بتنی قلمداد گردد [۲۶]. پژوهش های انجام شده در خصوص بتن نشان داده است در نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه های بتنی بعد از نقطه پیک بار، نرم شوندگی وجود دارد. لذا در مکانیک شکست مدرن، بتن به عنوان مصالح نیمه ترد (حالتی بین مواد ترد و شکل پذیر) به شمار می رود و مشخصات شکست بتن به عوامل مختلفی از قبیل تابع نرم شدگی بتن، مقاومت بتن، نوع سنگدانه ها، اندازه و هندسه نمونه ها، سن بتن، طول ترک و موقعیت بار وارده وابسته است [۲۷]. داروین و همکاران [۲۸] معتقدند اصولاً انرژی شکست بتن (G<sub>F</sub>) به مشخصات سنگدانه ها وابسته بوده به گونه ای که بتن با سنگدانه های با مقاومت بالاتر (بازالت) انرژی شکست بیشتری دارد. در مقابل، گتو و همکاران [۲۹] دریافته اند انرژی و چقرمگی شکست بتن مستقیماً به مقاومت فشاری بتن ارتباط دارد. سارکر و همکاران [۳۰] با بررسی رفتار شکست بتن ژئوپلیمری عمل آوری شده با حرارت با ماده پایه خاکستر بادی به این نتیجه رسیده اند که مود شکست بتن های ژئوپلیمری (GPC) در حالت کلی تردتر از بتن های معمولی (OPC) هم رده، انرژی شکست بتن های GPC از نمونه های هم رده OPC بیشتر، چقرمگی شکست (K<sub>IC</sub>) بتن های GPC از نمونه های مشابه OPC با همان مقاومت فشاری بیشتر و به نظر ایشان علت تفاوت رفتار شکست بتن های GPC و OPC با مقاوت فشاری یکسان مقاومت کششی و پیوستگی بیشتر بتن های GPC در مقایسه با بتن های OPC است. به علت ناحیه انتقال سطحی متراکم تر، بتن های GPC فاکتور چقرمگی شکست بزرگتر و شکست تردتر با سطح شکست صاف تر را در مقایسه با بتن های OPC نتیجه می دهد. گنسان و همکاران [۳۱] در مطالعه مقایسه ای بین مشخصات شکست بتن های GPC (ماده پایه خاکستر بادی و عمل آوری شده با حرارت) با بتن های OPC هم مقاومت با رده

M30، به این نتیجه رسیده‌اند مقدار انرژی شکست و چقرمگی شکست محاسبه شده برای بتن GPC بیشتر از OPC بوده‌است. این آزمایشات نشان داده است بتن‌های GPC در مقایسه با بتن‌های OPC هم‌رده عملکرد شکست بهتری دارند. ناث و همکاران [۳۲] در مطالعه بر روی مشخصات شکست بتن ژئوپلیمری عمل آمده دردمای محیط با ماده پایه خاکستر بادی و در ترکیب با سرباره و مقایسه با بتن معمولی به این نتیجه رسیده است که طرح اختلاط بر روی مشخصات شکست تاثیرگذار و اضافه کردن آب بر روی مشخصات شکست تاثیر معکوس و معمولاً مقاومت کششی بر انرژی شکست تاثیرگذار است. نمودار نیرو-تغییر مکان بتن ژئوپلیمری مشابه بتن معمولی OPC بوده و بتن ژئوپلیمری عمل آوری شده در محیط، شکل پذیری بیشتری نسبت به بتن ژئوپلیمری عمل آوری شده با حرارت دارد. بتن ژئوپلیمری با پایه خاکستر بادی GPC در مقایسه با بتن معمولی OPC هم رده مقاومتی  $G_f$  بیشتر و مقدار  $K_{IC}$  مشابه داشته است. بنابراین بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی عمل آوری شده در شرایط محیطی می‌تواند به مشخصات شکست مشابه بتن‌های معمولی OPC برسد. دینگ و همکاران [۳۳] در مقایسه بین مشخصات شکست بتن‌های AAS و OPC هم رده با مقاومت‌های فشاری  $C_{30}$ ،  $C_{50}$  و  $C_{70}$  مشاهده نموده‌اند انرژی شکست  $G_f$  بتن‌های AAS، بزرگتر از بتن‌های OPC با مقاومت‌های فشاری یکسان بوده است و طول مشخصه  $L_{ch}$  بتن‌های OPC و AAS با افزایش مقاومت فشاری کاهش یافته که نشان دهنده تردتر شدن این بتن‌ها با افزایش مقاومت فشاری آن‌ها است ولی در مقاومت فشاری یکسان، طول مشخصه  $L_{ch}$  بتن‌های AAS از OPC کمتر بوده، که این موضوع نشان دهنده تردتر بودن بتن‌های AAS نسبت به بتن‌های OPC هم رده است.

طبق بررسی‌های به عمل آمده، تا کنون مطالعات بسیار اندکی بر روی مشخصات شکست و مکانیکی بتن‌های قلیا فعال سرباره‌ای و فاکتورهای موثر بر آنها انجام گرفته و این نشان‌دهنده نیاز به مطالعات بیشتر در خصوص پارامترهای موثر بر روی مشخصات شکست بتن‌های قلیا فعال سرباره‌ای می‌باشد. در این مقاله تاثیر غلظت و مدول سیلیکات قلیا، که پیش‌تر اهمیت آن در مقاومت فشاری بتن قلیا فعال سرباره‌ای به اثبات رسیده است [۲۲، ۱۰]، بر مشخصات مکانیکی و شکست این نوع بتن مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی مشخصات شکست از آزمایش تیر خمشی سه نقطه ای TPBT با روش کار-شکست (WFM) [۳۴] استفاده شده است.

## ۲- مبانی محاسباتی و روش آزمایش:

### ۲-۱- تعیین مشخصات مکانیکی:

برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری نمونه‌ها از استاندارد BS EN 12390 [۳۵] و با نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۰۰ در ۱۰۰ در ۱۰۰ میلی‌متر استفاده شده که در سن ۲۸ روز نمونه‌ها با جک هیدرولیکی بتن شکن با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلونیوتن مورد آزمایش قرار گرفت.

آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم یا برزیلی برای تعیین مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای بتنی به طور غیر مستقیم با استاندارد ASTM C 496 [۳۶] به کار رفته است. نمونه استوانه‌ای مورد استفاده در این آزمایش به قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر بود. با بدست آوردن بار گسیختگی، مقاومت کششی از رابطه (۱) بدست آمده است:

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

که در آن  $f_t$  مقاومت کششی غیر مستقیم بر حسب کیلو پاسکال،  $P$  بار نهایی بر حسب کیلو نیوتن،  $D$  قطر نمونه بر حسب متر و  $L$  طول نمونه بر حسب متر می‌باشد.

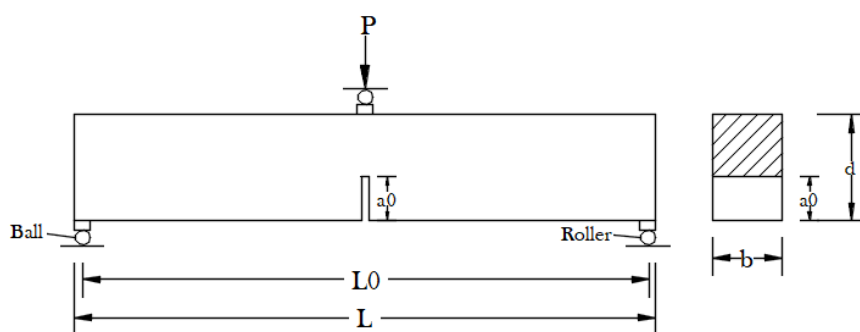
در این پژوهش، جهت تعیین مدول الاستیسیته بتن از استاندارد ASTM C469 [۳۷] استفاده شده است. طبق تعریف مدول الاستیسیته به صورت نسبت تنش عمودی به کرنش متناظر آن تعریف می‌شود. برای این کار از نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متری استفاده شد. با استفاده از رابطه (۲) مدول الاستیسیته بتن محاسبه شده است:

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (2)$$

که در آن  $E$  مدول الاستیسیته،  $S_2$  تنش معادل ۴۰ درصد مقاومت فشاری،  $S_1$  تنش معادل کرنش ۵۰ میکرو استرین،  $\varepsilon_2$  کرنش معادل تنش ۴۰ درصد مقاومت فشاری و  $\varepsilon_1$  کرنش برابر ۵۰ میکرو استرین می‌باشند.

## ۲-۲ محاسبه پارامترهای شکست، روش کار-شکست هیلبرگ WFM

مهمترین و پرکاربردترین روش برای اندازه‌گیری پارامترهای شکست بتن، آزمایش تیر خمشی سه نقطه‌ای TPBT می‌باشد که توسط پژوهشگران مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش آزمایش، خمش سه نقطه‌ای در یک چرخه در وضعیت کنترل جابه‌جایی تا رسیدن ظرفیت باربری نمونه به صفر انجام می‌شود. در این حالت با وارد کردن بار، ترکی در تیر گسترش یافته و در لحظه شکست، ترک به وجه بالایی تیر می‌رسد. با توجه به این‌که انرژی الاستیک ذخیره شده در تیر تابعی از نیروی وارد بر تیر است، در خاتمه آزمایش و با رسیدن مقدار بار وارده به صفر (لحظه شکست تیر) انرژی الاستیک ذخیره شده در تیر صفر خواهد بود و با فرض ناچیز بودن تغییرشکل‌های پلاستیک در اطراف ترک گسترش یافته در تیر، می‌توان نتیجه گرفت که تمام کار انجام شده توسط نیروی خارجی (سطح زیر منحنی نیرو-جابه‌جایی) در قسمت ترک خورده ذخیره می‌شود. در این حالت با تقسیم کار انجام شده توسط نیروهای وارد بر تیر به سطح مقطع اولیه تیر، مقدار انرژی شکست به دست می‌آید. مطابق شکل ۱ ترکی در وسط دهانه تیر تعبیه می‌شود که در این تحقیق نسبت ارتفاع ترک به ارتفاع تیر ( $a_0/d$ ) در روش کار-شکست WFM بنا به توصیه استاندارد RILEM TC50-FMC [۳۴]، برابر با ۰.۵ (بدلیل بالا بودن مقاومت فشاری بتن‌های مورد آزمایش، اطمینان از ذخیره شدن تمام کار نیروهای خارجی در قسمت ترک خورده و کاهش خطا در محاسبات انرژی) در نظر گرفته شده است.



شکل ۱- شکل آزمایش تیر خمشی سه نقطه‌ای

برای انجام تست، دستگاه یونیورسال مدل STM150 شرکت سنتام مورد استفاده قرار گرفت که در آن بار وارده با سیستم کنترل تغییر مکان وارد می‌شود. که در روش WFM بنا به دستورالعمل راهنمای RILEM باید مدت زمان بارگذاری ۶۰-۳۰ ثانیه طول بکشد که با سعی و خطا سرعت دستگاه بر روی ۰/۴ mm/min تنظیم گردید. کامپیوتر متصل به دستگاه یونیورسال اطلاعات را بصورت دیجیتالی ثبت و مستقیماً نمودار نیرو-تغییر مکان را ترسیم می‌نماید.

در این مقاله برای محاسبه پارامترهای شکست از روش کار-شکست (WFM) استفاده شده است. این روش توسط هیلبرگ [۳۸] پیشنهاد گردید که اولین بار مدل ترک مجازی را برای بتن ارائه نموده است و بر مبنای آن پارامترهای انرژی مخصوص شکست  $G_F$  که عبارتست از میزان انرژی جذب شده در واحد سطح ترک و طول مشخصه بتن  $L_{ch}$  که میزان تردی بتن را نشان می‌دهد، از آزمایش تیر خمشی سه نقطه‌ای TPBT و مدول الاستیسیته و مقاومت کششی بتن بدست می‌آید. طبق دستورالعمل راهنمای RILEM [۳۴] و با در نظر گرفتن پارامترهای شکل ۱ انرژی شکست بر اساس داده‌های نمودار نیرو-تغییر مکان که مستقیماً از روی داده‌های کامپیوتر متصل به دستگاه یونیورسال استفاده می‌نماید، از رابطه (۳) بدست می‌آید:

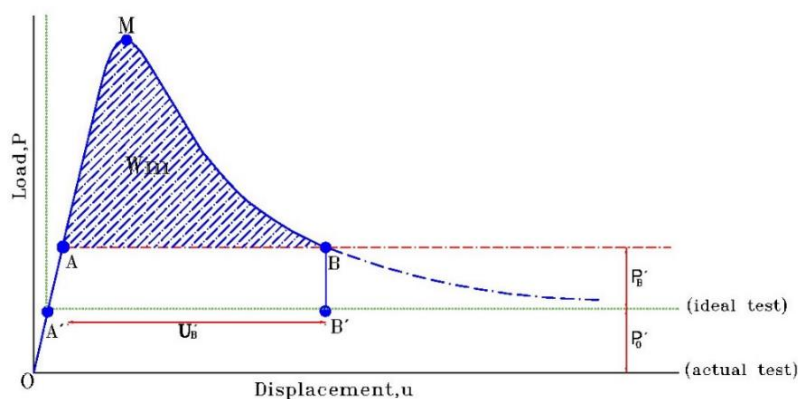
$$G_F = \frac{W_F}{(d-a_0)b} \quad (3)$$

که در این رابطه  $W_F$  سطح زیر نمودار نیرو-تغییر مکان (N-m) و  $(d-a_0).b$  سطح مقطع ناحیه بدون شکاف در تیر ( $m^2$ ) است.

برای حصول نتایج مستقل از اندازه برای  $G_F$  و از بین بردن منابع خطا از روش جبران وزن، که توسط الیسس و همکاران [۳۹،۴۰] پیشنهاد گردیده است، استفاده می‌شود. در این روش باید اطمینان حاصل نمود که کار نیروی خارجی تنها صرف غلبه بر ترک چسبنده می‌شود، که با قرار دادن وزنه‌هایی که نقش کاهش‌دهنده ممان وسط دهانه را داراست اثر وزن تیر از بین برده می‌شود. این روش در RILEM

معرفی شده و در مطالعه حاضر نیز استفاده شده است. لازم به ذکر است که در عمل جبران کامل وزن امکان پذیر نیست. بنابراین، یک بار باقیمانده ( $P_0$ ) در انتهای دم منحنی بار-تغییر مکان یافت می شود (شکل ۲) همانطور که در شکل ۲ مشاهده می گردد، آزمایش قبل از شکسته شدن کامل نمونه، اغلب در نقطه B متوقف می شود. با توجه به این واقعیت که باید زیر منحنی ایده آل بار-جابجایی محاسبه شود و تأثیر  $P_0$  باید حذف شود، الیسیس و همکاران [۴۰] رابطه (۴) را برای محاسبه  $W_F$  پیشنهاد کرد:

$$W_F = W_m + 2\left(\frac{A}{u_B - u_A}\right) \quad (4)$$



شکل ۲ منحنی بار-تغییر مکان برای غلبه بر اثر وزن در شرایط واقعی

که در آن پارامتر  $W_m$  کار اندازه گیری شده است که معادل منطقه AMBA در شکل ۲ و A یک ضریب ثابت، پیشنهاد شده توسط الیسیس و همکاران [۴۰] به شرح رابطه (۵) است:

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

در این روش صرفاً با بیان  $G_F$  خصوصیات شکست کامل تعریف نشده است و جهت تعیین میزان تردی بتن و طول ناحیه صدمه دیده نوک ترک از پارامتر دیگری بنام طول مشخصه  $L_{ch}$  استفاده می شود که از رابطه ۶ بدست می آید:

$$L_{ch} = E \cdot G_F / f_t^2 \quad (6)$$

در این رابطه E مدول الاستیسیته بتن،  $G_F$  انرژی مخصوص شکست و  $f_t$  مقاومت کششی بتن است.

طول مشخصه ماده از خصوصیات آن ماده بوده و مستقل از ابعاد و هندسه سازه است  $L_{ch}$  متناسب با طول ناحیه صدمه دیده نوک ترک در مدل ترک مجازی بوده که در بتن معمولاً بین ۱۰۰ تا ۴۰۰ میلیمتر است و طول منطقه صدمه دیده نوک ترک بین  $L_{ch}/3$  و  $L_{ch}/5$  بر آورد می شود. از طرفی هر چه مقدار  $L_{ch}$  بزرگتر باشد به این معنی است که بتن تردتر است [۴۱].

### ۳- برنامه آزمایشگاهی:

#### ۳-۱- مواد اولیه

#### ۳-۱-۱- ماده پایه:

در این پژوهش، سرباره کوره بلند کارخانه ذوب آهن اصفهان و آسیاب شده در کارخانه سیمان سپاهان، به عنوان ماده پایه مورد استفاده قرار گرفته است. ترکیب شیمیایی اصلی آن حاوی سیلیکات، کلسیم، آلومینیوم، منیزیم آمورف با خاصیت هیدرولیکی و سایر

ترکیبات چندتایی اکسیدهای اصلی می باشد. ترکیب شیمیایی سرباره با استفاده از روش XRF، مورد استفاده در این پژوهش در جدول شماره ۱ ارائه شده است که وزن مخصوص، سطح مخصوص و درصد عبور از الک ۴۵ میکرون آن به ترتیب  $2.78 \text{ gr/cm}^3$ ،  $3312 \text{ cm}^2/\text{gr}$ ،  $82\%/4$ ، ضریب پایه  $k_p = (\text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$  و مدول هیدراتاسیون  $\text{HM} = (\text{CaO} + \text{MgO}) / \text{SiO}_2$  آن به ترتیب برابر با ۱ و  $1/38$  است.

جدول شماره ۱: مشخصات سرباره مصرفی در تحقیق

| ترکیب شیمیایی | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SO <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | TiO <sub>2</sub> | MnO   | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | BaO   |
|---------------|------------------|--------------------------------|------|------|--------------------------------|-----------------|------------------|-------------------------------|------------------|-------|--------------------------------|-------|
| (%) درصد وزنی | 0/15             | 0/12                           | 1/73 | 1/17 | 0/51                           | 0/97            | 2/32             | 0/93                          | 6/36             | 39/11 | 7/31                           | 38/22 |

جهت ساخت بتن معمولی برای مقایسه با بتن قلیا فعال سرباره ای از سیمان تپ ۲ کارخانه نکا استفاده شده است که ترکیب شیمیایی آن در جدول شماره ۲ با استفاده از روش XRF اندازه گیری و گزارش شده است. ضمناً وزن مخصوص آن  $3.02 \text{ gr/cm}^3$ ، بلین  $3035 \text{ cm}^2/\text{gr}$ ، عبور از الک ۴۵ میکرون  $86/28\%$  است.

جدول شماره ۲: مشخصات سیمان مصرفی جهت مقایسه

| ترکیب شیمیایی | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SO <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | LOI  | IR   | Free CaO |
|---------------|------------------|--------------------------------|------|------|--------------------------------|-----------------|------------------|-------------------|------|------|----------|
| (%) درصد وزنی | 1/2              | 0/47                           | 0/94 | 0/53 | 0/3                            | 1/35            | 1/89             | 63/78             | 3/72 | 5/89 | 21/55    |

### ۳-۱-۲ - فعال سازها:

در این پژوهش برای فعال سازی سرباره از محلول هیدروکسید سدیم (NaOH) که از اضافه کردن آب شرب معمولی به هیدروکسید سدیم پر شده شرکت پتروگوهر پارس با خلوص ۹۷ درصد و سیلیکات سدیم (آب شیشه  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) با مدول ۲/۶۰ (نسبت  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ) و ترکیب شیمیایی مطابق جدول شماره ۳ شرکت مهران سیلیکات قزوین طبق گزارش آزمایشگاه شیمی شرکت تولید کننده، استفاده شده است.

جدول ۳ - مشخصات شیمیایی محلول سیلیکات سدیم

| ترکیب شیمیایی | SiO <sub>2</sub> | Na <sub>2</sub> O | H <sub>2</sub> O |
|---------------|------------------|-------------------|------------------|
| (%) درصد وزنی | 38/35            | 12/91             | 31/55            |

### ۳-۱-۳ - آب:

در این پژوهش از آب شرب شهر بابل برای تهیه نمونه های طرح اختلاط بتن استفاده شده است.

### ۳-۱-۴ - سنگ دانه ها:

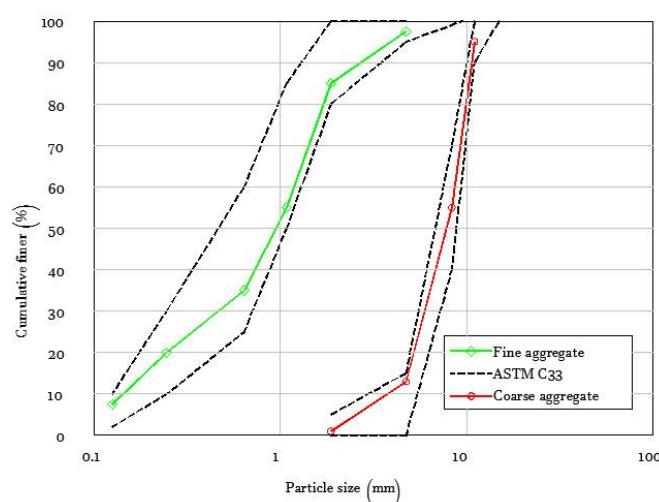
در این تحقیق از شن شکسته شده دولومیتی از معادن هراز به عنوان سنگدانه های درشت با جذب آب، حداکثر اندازه سنگدانه و وزن مخصوص به ترتیب  $2.4\%$ ،  $12/5$  میلی متر،  $2/54$  استفاده گردیده است. ماسه طبیعی به عنوان سنگدانه های ریز دارای جذب آب، وزن مخصوص، ارزش ماسه ای و مدول نرمی به ترتیب  $1/9\%$ ،  $2/57$ ،  $86/5$  و  $1/3$  به کار رفته است. مشخصات سنگدانه ها در جدول شماره ۴ و



منحنی دانه بندی آنها نیز در شکل ۳ نمایش داده شده است. انتخاب قطر حداکثر ۱۲/۵ میلی-متر برای شن با در نظر گرفتن ابعاد قالب طبق استاندارد RILEM صورت گرفته است.

جدول ۴- مشخصات سنگدانه های مصرفی در بتن

| نوع  | وزن مخصوص (gr/cm <sup>3</sup> ) | آزمایش لس آنجلس (%) | ارزش ماسه ای (%) | مدول نرمی | جذب آب (%) |
|------|---------------------------------|---------------------|------------------|-----------|------------|
| ماسه | ۲/۵۷                            | -                   | ۶/۸۵             | ۳/۱       | ۱/۹        |
| شن   | ۲/۵۴                            | ۲۱/۶                | -                | -         | ۲/۴        |



شکل ۳: منحنی نمودار دانه بندی شن و ماسه

### ۳-۲ طرح اختلاط:

بر اساس مطالعات قبلی عیار  $400 \text{ Kg/m}^3$  برای سرباره و نسبت  $\text{NaOH}$  به  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  برابر با ۲/۵ از نظر ویژگی های بتن تازه، خواص مکانیکی مورد انتظار و دوام بهتر در برابر نفوذ یون کلر مناسب تر از بقیه است [۱۵]. تقوایی و همکاران [۲۲] به این نتیجه رسیدند در بتن-های AAS برای رسیدن به بتن های با مقاومت بالا و کارایی مناسب، بهترین رنج غلظت قلیا ۰/۶۵-۰/۳۵٪ و بهترین رنج برای مدول سیلیکات نیز ۰/۸۵-۰/۶۵ است. در این تحقیق جهت بررسی اثر غلظت و مدول سیلیکات قلیا بر روی مشخصات مکانیکی و شکست بتن، ۱۶ طرح بتن AAS با غلظت ۰/۴۵٪، ۰/۵۵٪، ۰/۶۵٪، ۰/۷۵٪ و مدول سیلیکات ۰/۴۵، ۰/۶۵، ۰/۸۵، ۱/۰۵ با فعال کننده از نوع محلول سیلیکات سدیم و سدیم هیدروکسید، مجموعاً ۱۶ طرح استفاده شده است که در تمامی موارد، عیار سرباره ثابت  $400 \text{ Kg/m}^3$ ، نسبت آب به چسباننده (سرباره به اضافه قسمت جامد قلیا و قسمت جامد آب شیشه) ثابت و برابر با ۰/۴۵، و نیز وزن و نسبت یکسان سنگدانه ها مورد استفاده قرار گرفت. همچنین جهت مقایسه با بتن OPC، سه طرح بتن معمولی با رده های مقاومتی C ۴۰، C ۵۰ و C ۶۰ مطابق با جدول شماره ۵ استفاده گردید.

طرح های اختلاط با مطالعه تحقیقات پژوهشگران قبلی، سعی و خطاهای متعدد و با توجه به مقاومت، کارایی، گیرش اولیه و سایر عوامل مناسب برای ساخت بدست آمده اند و هدف ساخت بتنی بوده است که قابلیت ساخت و اجرا داشته و دارای مشخصات مکانیکی مناسب باشد.

## ۳-۳ تهیه بتن و ریختن در قالب و نگهداری از نمونه های بتنی:

در این پژوهش برای تهیه بتن AAS، ابتدا طبق طرح، محلول قلیائی حدوداً ۴ ساعت قبل از ساخت بتن آماده نموده و به علت گرمازا بودن فرآیند تهیه محلول NaOH، جهت جلوگیری از تبخیر بخشی از آب با بستن درب آن در محلی نگهداری می‌شد. سپس به ترتیب شن، ماسه و سرباره بصورت خشک در داخل میکسر و به مدت حدود ۳ دقیقه مخلوط گردید، به گونه‌ای که مصالح اولیه بصورت یکنواخت با یکدیگر مخلوط گردند (جهت جلوگیری از خروج ذرات ریز سرباره با درپوش مخصوص ورودی مخلوط کن پوشیده شده تا ذرات در هنگام مخلوط شدن خارج نشوند سپس محلول‌های قلیائی (محلول سدیم هیدروکسید و محلول سدیم سیلیکات) به آرامی به میکسر در حال چرخش اضافه نموده و در انتها آب به ترکیب اضافه گردید تا بتن به کارائی مناسب برسد. پس از مخلوط کردن مصالح خشک، کل فرآیند

جدول ۵: طرح اختلاط بتن

| طرح        | مخلوط آب شیشه (kg/m <sup>3</sup> ) | NaOH (kg/m <sup>3</sup> ) | آب اضافه (kg/m <sup>3</sup> ) | چسباننده (kg/m <sup>3</sup> ) | کل آب (kg/m <sup>3</sup> ) | n(Na <sub>2</sub> O/slag) | Ms   | چسباننده/آب |
|------------|------------------------------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------------------|------|-------------|
| N4,5Ms0,45 | ۲۴/۱۵                              | ۱۹/۲۰                     | ۱۸۰/۸۰                        | ۴۳۰/۴۳                        | ۱۹۳/۷۲                     | ۴/۱۵۰                     | ۰/۴۵ | ۰/۴۵        |
| N4,5Ms0,65 | ۳۴/۹۵                              | ۱۷/۴۰                     | ۱۷۶/۵۰                        | ۴۳۳/۶۵                        | ۱۹۵/۲۰                     | ۴/۱۵۰                     | ۰/۶۵ | ۰/۴۵        |
| N4,5Ms0,85 | ۴۵/۶۵                              | ۱۵/۶۰                     | ۱۷۲                           | ۴۳۶/۸۲                        | ۱۹۶/۴۳                     | ۴/۱۵۰                     | ۰/۸۵ | ۰/۴۵        |
| N4,5Ms1,05 | ۵۶/۳۰                              | ۱۳/۸۵                     | ۱۶۸                           | ۴۴۰/۰۲                        | ۱۹۸/۱۳                     | ۴/۱۵۰                     | ۰/۴۵ | ۰/۴۵        |
| N5,5Ms0,45 | ۲۹/۵۰                              | ۲۲/۵۰                     | ۱۸۱                           | ۴۳۷/۲۱                        | ۱۹۶/۷۹                     | ٪ ۵/۵۰                    | ۰/۴۵ | ۰/۴۵        |
| N5,5Ms0,65 | ۴۲/۶۰                              | ۲۱/۳۰                     | ۱۷۵/۵۰                        | ۴۴۱/۱۰                        | ۱۹۸/۳۰                     | ٪ ۵/۵۰                    | ۰/۶۵ | ۰/۴۵        |
| N5,5Ms0,85 | ۵۵/۷۰                              | ۱۹/۱۰                     | ۱۷۰/۵۰                        | ۴۴۴/۹۹                        | ۲۰۰/۳۱                     | ٪ ۵/۵۰                    | ۰/۸۵ | ۰/۴۵        |
| N5,5Ms1,05 | ۶۸/۸۰                              | ۱۶/۹۰                     | ۱۶۵                           | ۴۴۸/۸۹                        | ۲۰۱/۸۱                     | ٪ ۵/۵۰                    | ۰/۴۵ | ۰/۴۵        |
| N6,5Ms0,45 | ۳۴/۸۰                              | ۲۷/۷۰                     | ۱۸۱                           | ۴۴۳/۸۸                        | ۱۹۹/۶۲                     | ٪ ۶/۵۰                    | ۰/۴۵ | ۰/۴۵        |
| N6,5Ms0,65 | ۵۰/۳۰                              | ۲۵/۱۵                     | ۱۷۵                           | ۴۴۸/۵۳                        | ۲۰۱/۹۲                     | ٪ ۶/۵۰                    | ۰/۶۵ | ۰/۴۵        |
| N6,5Ms0,85 | ۶۵/۸۰                              | ۲۲/۶۰                     | ۱۶۸/۵۰                        | ۴۵۳/۱۹                        | ۲۰۳/۷۱                     | ٪ ۶/۵۰                    | ۰/۸۵ | ۰/۴۵        |
| N6,5Ms1,05 | ۸۱/۳۰                              | ۲۰                        | ۱۶۲/۵۰                        | ۴۵۷/۸۰                        | ۲۰۶/۰۰                     | ٪ ۶/۵۰                    | ۰/۴۵ | ۰/۴۵        |
| N7,5Ms0,45 | ۴۰                                 | ۳۱/۹۵                     | ۱۸۱/۵۰                        | ۴۵۰/۵۵                        | ۲۰۲/۹۰                     | ٪ ۷/۵۰                    | ۰/۴۵ | ۰/۴۵        |
| N7,5Ms0,65 | ۵۸/۴۰                              | ۲۸/۹۵                     | ۱۷۴                           | ۴۵۶/۱۰                        | ۲۰۵/۲۵                     | ٪ ۷/۵۰                    | ۰/۶۵ | ۰/۴۵        |
| N7,5Ms0,85 | ۷۵/۸۰                              | ۲۶                        | ۱۶۷                           | ۴۶۱/۲۴                        | ۲۰۷/۵۶                     | ٪ ۷/۵۰                    | ۰/۸۵ | ۰/۴۵        |
| N7,5Ms1,05 | ۹۳/۸۰                              | ۲۳/۱۰                     | ۱۶۰                           | ۴۶۶/۷۱                        | ۲۱۰/۱۹                     | ٪ ۷/۵۰                    | ۰/۴۵ | ۰/۴۵        |
| OPC(C40)   | .                                  | .                         | .                             | ۴۰۰                           | ۲۰۰                        | .                         | .    | ۰/۵۰        |
| OPC(C50)   | .                                  | .                         | .                             | ۴۲۰                           | ۱۶۸                        | .                         | .    | ۰/۴۰        |
| OPC(C60)   | .                                  | .                         | .                             | ۴۵۰                           | ۱۵۷/۵۰                     | .                         | .    | ۰/۳۵        |

$n=(\text{Na}_2\text{O})/\text{slag}$     $\text{Ms}=\text{SiO}_2/(\text{Na}_2\text{O})$     $S=400\text{Kg/m}^3$     $\text{Coarse aggregate(AAS)}=720\text{Kg/m}^3$     $\text{Fine aggregate(AAS)}=1080\text{Kg/m}^3$

ترکیب حدوداً ۵ دقیقه طول کشید. در انتها بتن آماده را در قالب‌هایی، که قبلاً روغن کاری و آماده شده بود، ریخته و با میز لرزه مترکم گردید. بعد از ۲۴ ساعت نمونه‌ها را از قالب جدا و تا زمان تست در شرایط محیطی (دمای ۲۱-۳۵ درجه در طول شبانه‌روز و رطوبت حدود ۸۰ درصد) نگهداری گردید. بتن معمولی با سیمان پرتلند جهت مقایسه با بتن AAS مطابق راهنمای ACI تهیه و به مدت ۲۸ روز در داخل آب عمل آوری و سپس آماده تست شده بود. شکل شماره ۴ نمونه های آماده شده قبل و بعد از خارج کردن از قالبها را جهت آزمایش نمایش می دهد.

قالبهای مورد استفاده جهت آزمایش مقاومت فشاری (سه سری قالب مکعبی ۱۰۰ در ۱۰۰ در ۱۰۰ میلی‌متر) و جهت آزمایش مقاومت کششی (سه سری نمونه استوانه (ارتفاع) ۲۰۰ mm در (قطر) ۱۵۰ mm) و تست مدول الاستیسیته (سه سری استوانه (ارتفاع)

۲۰۰mm در (قطر)  $100\text{mm}$  و جهت تست شکست طبق استاندارد RILEM ابعاد قالب تیر در روش کار-شکست WFM (با حداکثر اندازه سنگدانه  $12/5$  میلیمتر، سه سری قالب تیری ۸۴ در ۱۰ در ۱۰ سانتی متر با شکافی به عمق ۵ سانتی متر در وسط تیر و با عرض ۳mm، در این روش باید عمق تیر حداقل ۶ برابر اندازه سنگدانه و نسبت دهانه به عمق تیر نیز از ۴ تا ۸ متغیر باشد که رعایت شده است) برای هر طرح مجموعاً ۵ تیر و برای ۱۹ طرح مجموعاً ۹۵ تیر برای آزمایش تیر خمشی سه نقطه ای و ۵۷ قالب مکعبی برای آزمایش مقاومت فشاری و ۱۱۴ قالب استوانه ای جهت آزمایشات کششی و مدول الاستیسیته ساخته شده است.

#### ۴- نتایج و بحث ها:

#### ۴-۱- مشخصات مکانیکی بتن:



تست تیر خمشی سه نقطه ای



بعد از باز کردن قالب

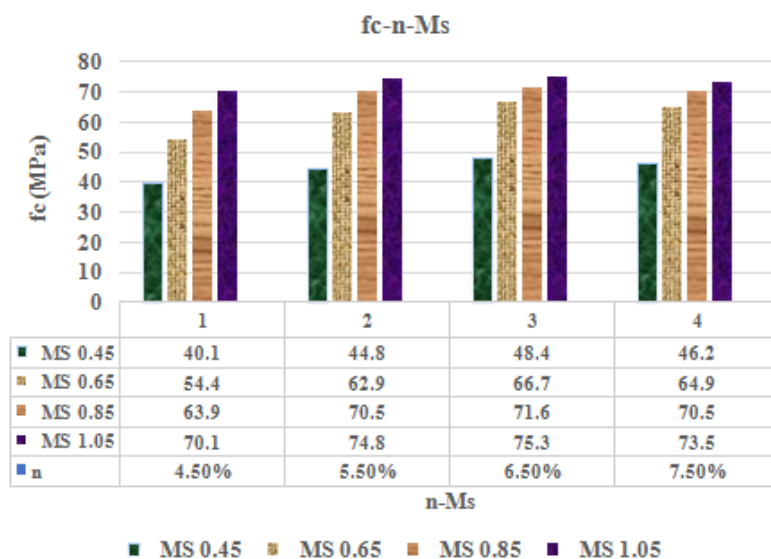


قبل از باز کردن قالب

شکل شماره ۴: نمونه های بتنی قبل و بعد از قالب گیری و نمونه تیر در حال انجام آزمایش تیر خمشی سه نقطه ای با دستگاه یونیورسال

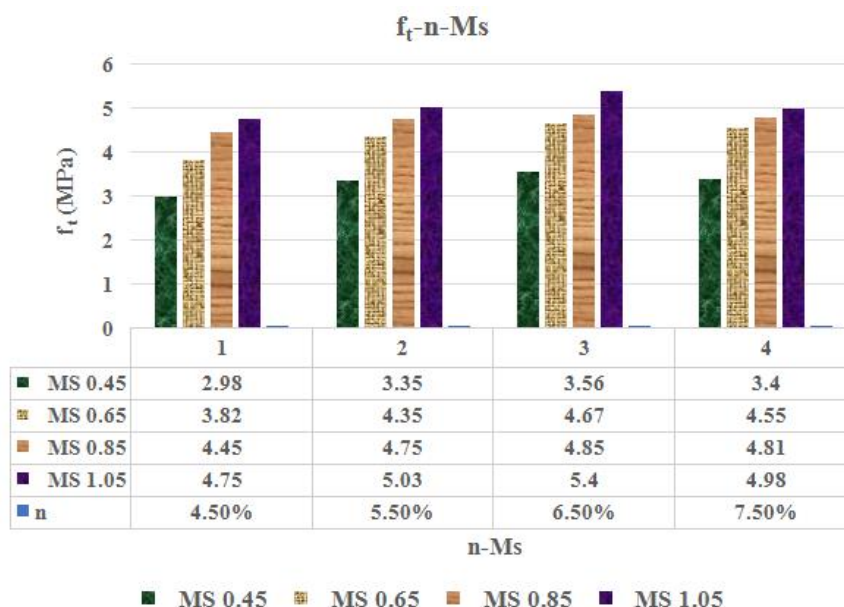
در این بخش نتایج آزمایشات مشخصات مکانیکی بتن شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بتن‌ها ارائه می شود. طبیعتاً نمونه های مورد استفاده در آزمایشات مشخصات مکانیکی از همان بتنی تهیه شده بود که برای ساخت نمونه ها (تیرها) در آزمایشات شکست مورد استفاده قرار گرفت. آزمایشات مشخصات مکانیکی و شکست در یک روز انجام تا بتوان نتایج آنها را بدرستی به یکدیگر ربط داد. شکل شماره ۵ نمودار مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن‌های ساخته شده را نشان می دهد. این نمودار نشان می دهد با افزایش غلظت قلیا (n) از  $4/5$  تا  $6/5$ ٪ با هر نسبت مدول سیلیکات (از  $0/45$  تا  $1/05$ ) مقاومت فشاری بتن افزایش یافته است به گونه ای که وقتی مدول سیلیکات  $0/45$ ،  $0/65$ ،  $0/85$  و  $1/05$  است، مقاومت فشاری به ترتیب  $20/7$ ،  $22/6$ ،  $12$ ،  $7/4$ ٪ افزایش می یابد. روند افزایش مقاومت فشاری با افزایش مدول سیلیکات کاهشی است. سپس وقتی غلظت قلیا (n) به  $7/5$ ٪ می رسد، مقاومت فشاری به ترتیب  $4/5$ ،  $2/7$ ،  $1/5$  و  $2/4$ ٪ نسبت به حالتی که n برابر با  $6/5$ ٪ بود، کاهش می یابد. این موضوع نشان می دهد مقاومت فشاری بتن با افزایش غلظت قلیا ابتدا افزایش و وقتی غلظت آن از حدی بیشتر می شود، روند کاهشی می گردد. این موضوع با نتایج کار پژوهشگران قبلی هم مطابقت دارد [۲۲].

همچنین مقاومت فشاری بتن‌ها با افزایش مدول سیلیکات از  $0/45$  تا  $1/05$  با هر درصد قلیا افزایش می یابد، به گونه ای که در این پژوهش، وقتی غلظت قلیا (n)  $4/5$ ،  $5/5$ ،  $6/5$ ،  $7/5$  باشد مقاومت فشاری به ترتیب  $74/8$ ،  $70$ ،  $55/6$ ،  $59$ ٪ افزایش پیدا می کند. نتایج نشان می دهد در غلظت ثابت قلیا و با افزایش مدول سیلیکات، روند افزایش مقاومت فشاری ابتدا خیلی زیاد (وقتی  $M_s$  از  $0/45$  به  $0/65$  رسید) ولی وقتی مدول سیلیکات بالا می رود (از  $0/65$  به  $1/05$  می رسد) روند افزایش کند می گردد. این نشان می دهد که افزایش مدول سیلیکات بیشتر از حد خاص، تاثیر کمی بر مقاومت فشاری دارد. نتایج این تحقیق با کار پژوهشگران قبلی مطابقت دارد [۲۲، ۱۰].



شکل شماره ۵: نمودار تغییرات مقاومت فشاری بتن با غلظت ومدول سیلیکات فعال کننده های قلیائی

روند تغییرات مقاومت کششی در شکل شماره ۶ نشان داده شده است. نتایج بدست آمده نشان می دهد نسبت مقاومت کششی بتن AAS به مقاومت فشاری آن بین ۶/۷۲ تا ۷/۴۲٪ است. در نتایج پژوهش نظریور و همکار [۲۳] این نسبت، بین ۶٪ تا ۱۳٪ بدست آمده است که با افزایش مقاومت فشاری این نسبت به ۶٪ نزدیک شده و با توجه به بالابودن مقاومت فشاری نمونه ها در این تحقیق با نتایج ذکر شده قابل راستی آزمائی است. نتایج نشان می دهد بیشترین مقاومت کششی مربوط به طرح N6.5%Ms1.05 با مقاومت کششی ۵/۴ MPa و کمترین مقاومت کششی مربوط به طرح N4.5%Ms0.45 با مقاومت کششی ۲/۹۸ MPa بوده است. در این آزمایشات مقاومت کششی با افزایش مدول سیلیکات، در همه درصد های غلظت قلیائی افزایش یافته است به گونه ای که با افزایش مدول سیلیکات از ۰/۴۵ به ۱/۰۵ زمانیکه که غلظت قلیا (n) ۴/۵ ، ۵/۵ ، ۶/۵ ، ۷/۵٪ است، مقاومت کششی به ترتیب ۵۹/۴ ، ۵۰/۱ ، ۵۱/۷ ، ۶/۴۵٪ افزایش می یابد.



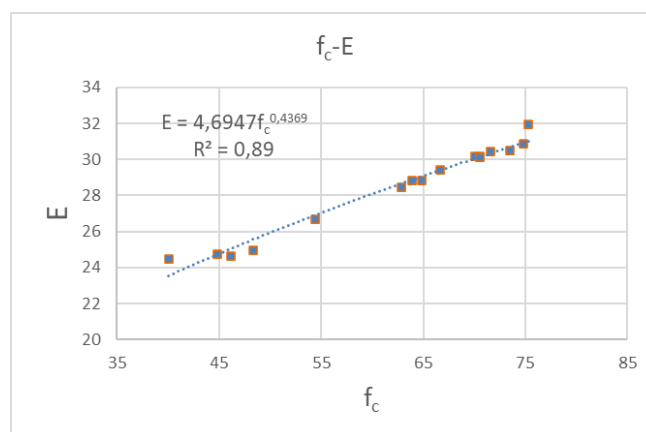
شکل شماره ۶: نمودار تغییرات کششی بتن با غلظت ومدول سیلیکات فعال کننده های قلیائی

مقاومت کششی نیز با افزایش غلظت قلیا (n) از ۴/۵ به ۶/۵٪، وقتی Ms ۰/۴۵ ، ۰/۵۵ ، ۰/۸۵ ، ۱/۰۵ است به ترتیب ۱۹/۵ ، ۲۲/۲ ، ۹ ، ۱۳/۷٪ افزایش و سپس با رسیدن n به ۷/۵٪ روند معکوس شده و مقاومت کششی نمونه ها به ترتیب ۴/۵ ، ۲/۶ ، ۰/۸ ، ۷/۷٪ کاهش یافته است. نتایج نشان دهنده حساسیت بیشتر مقاومت کششی به تغییرات مدول سیلیکات در قیاس با تغییرات غلظت قلیا بوده

است. شکل ۷، نمودار تغییرات مدول الاستیسیته بتن قلیا فعال سرباره‌ای را نسبت به مقاومت فشاری بتن نمایش می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد مدول الاستیسیته این نوع بتن با مقاومت فشاری رابطه‌ای نمائی دارد که از نتایج این تحقیق رابطه شماره (۷) بدست آمده است:

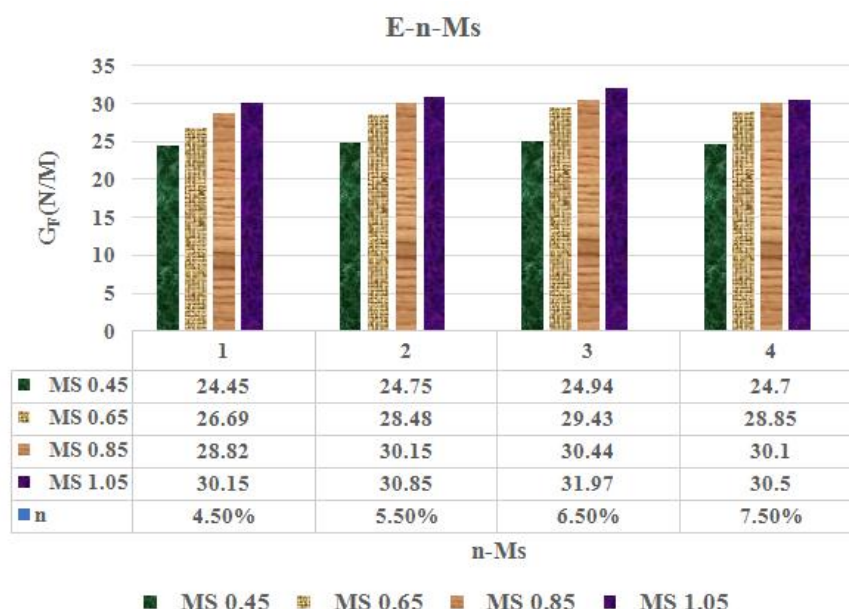
$$E = 4.6947 f_c^{0.4369} \quad R^2 = 0.89 \quad (7)$$

که در آن  $E$  مدول الاستیسیته بتن بر اساس GPa و  $f_c$  مقاومت فشاری بتن بر اساس MPa است. این نتایج با تحقیق علی‌عبدو و همکاران [۴۲] مطابقت قابل قبولی دارد.



شکل شماره ۷: نمودار تغییرات مدول الاستیسیته بتن AAS نسبت به مقاومت فشاری

شکل ۸، تاثیر مدول سیلیکات (Ms) و غلظت قلیا (n) بر مدول الاستیسیته بتن AAS در حالت‌های مختلف را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از آزمایش مدول الاستیسیته بتن نشان می‌دهد با افزایش غلظت قلیا (n) از ۴/۵ تا ۶/۵٪ مدول الاستیسیته در کلیه نسبت‌های مدول سیلیکات افزایش و با افزایش n تا ۷/۵٪ مدول الاستیسیته اندکی کاهش می‌یابد. کمترین مدول الاستیسیته متعلق به طرح ۰.۴۵Ms تا ۴.۵٪ N4.5% برابر با ۳۹/۲۵ GPa و بیشترین مقدار مدول الاستیسیته در طرح ۱.۰۵Ms تا ۶.۵٪ N6.5% برابر با ۳۹/۲۵ GPa بدست آمده است.

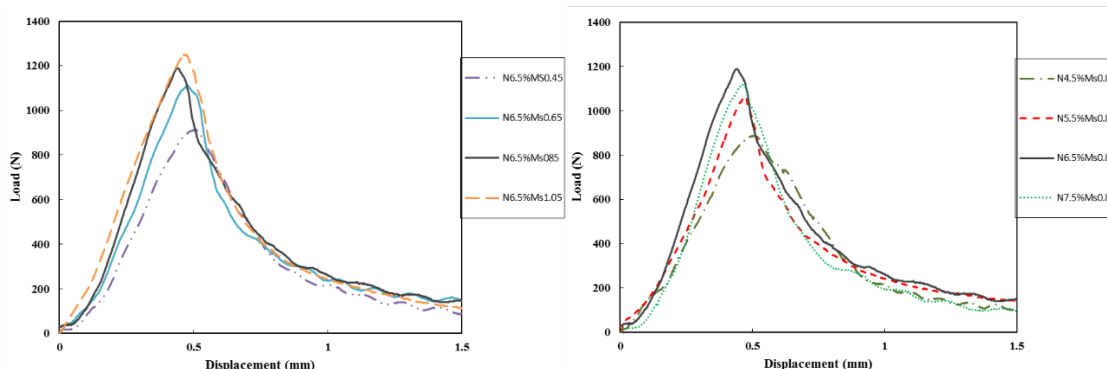


شکل شماره ۸: نمودار تغییرات مدول الاستیسیته بتن AAS با غلظت و مدول سیلیکات فعال کننده‌ها

مطابق نتایج بدست آمده با افزایش مدول سیلیکات فعال کننده‌ها، مدول الاستیسیته بتن AAS کلیه حالت‌های غلظت قلیا زیاد شده است به گونه‌ای که با افزایش Ms از ۰/۴۵ به ۱/۰۵ مقدار مدول الاستیسیته در n معادل ۴/۵٪، ۵/۵، ۶/۵، ۷/۵ به ترتیب ۳/۲۳٪ و ۴/۲۴٪ و ۲۸/۲ و ۲۳/۵٪ افزایش می‌یابد.

## ۴-۲ مشخصات شکست، آنالیز پارامترهای شکست به روش WFM:

نمودار نیرو-تغییر مکان طرح‌های مختلف این پژوهش در آزمایش تیر خمشی سه نقطه ای TPBT در شکل ۹ نشان داده شده است. قسمت اول این نمودار بدلیل تغییر شکل نمونه‌ها و تنظیم شدن در سطح تماس تکیه گاه‌ها، جهت حذف اعوجاج تخمین‌ها اصلاح شده است [۳۴]. نمودارها نشان می‌دهد همه منحنی‌ها پس از نقطه پیک دارای نرم‌شدگی می‌باشند که نشان‌دهنده نیمه ترد بودن این نوع بتن است. شیب ناحیه قبل از بار پیک، نقطه بار پیک و شکل پذیری مختلف طرح‌ها است. در این نمودارها شیب قسمت قبل از بار پیک، مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته، مقاومت کششی و شکل‌پذیری مختلف طرح‌ها است. در این نمودارها شیب قسمت قبل از بار پیک، صعودی و با افزایش مقاومت فشاری افزایش و شیب قسمت بعد از بار پیک؛ نزولی (نشان‌دهنده ویژگی نمونه ترک خورده تا شکست نهایی و شکل‌پذیری ماده است) با افزایش مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. با افزایش مقاومت فشاری طرح‌ها مقدار بار پیک افزایش یافته به گونه‌ای که حداقل آن ۷۸۷ نیوتن در طرح N4.5%Ms0.45 و حداکثر آن ۱۲۵۱ نیوتن در طرح N6.5%Ms1.05 بوده است. در این آزمایشات وقتی مقاومت فشاری بتن ۸۷٪ افزایش پیدا کرد، بار پیک نمودار نیرو-تغییر مکان نیز حدوداً ۶۰٪ افزایش یافته است. شیب نمودار در قسمت قبل از بار پیک در بیشتر نمودار نزدیک به هم بوده که نشان می‌دهد مدول الاستیسیته این بتن‌ها به هم نزدیک هستند و شکل نمودار بعد از بار پیک هم شکل‌پذیری نمونه‌ها را نشان می‌دهد که بتنی که مقاومت فشاری کمتری دارد نرم‌شدگی بیشتری دارد. طرح N4.5%Ms0.45 که کمترین مقاومت فشاری دارد بیشترین نرم‌شدگی را دارد. و شکل نمودار در طرح N6.5%Ms1.05 که بیشترین مقاومت فشاری در بین طرح‌ها را دارد شیب قسمت قبل از بار پیک بیشتر داشته که نشان‌دهنده مدول الاستیسیته در این طرح از بقیه بیشتر است.



شکل شماره ۹: نمودار نیرو-تغییر مکان قائم نقطه اثر بار بتن AAS (تأثیر غلظت و مدول سیلیکات)

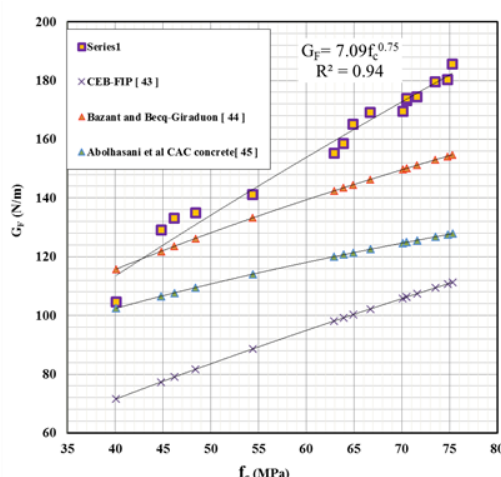
نمودار شماره ۱۰ رابطه بین مقاومت فشاری نمونه‌ها و انرژی (مخصوص) شکست  $G_F$  را نشان می‌دهد. همانطور که در نمودار مشخص شده است با افزایش مقاومت فشاری انرژی شکست نیز افزایش می‌یابد که در منابع مختلف نیز به آن اشاره شده است در این نمودار نتایج این تحقیق در مقایسه با چند مرجع نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد انرژی شکست بتن‌های قلیا فعال سرباره ای از نمونه‌های هم‌رده از نظر مقاومت فشاری بتن‌های معمولی با روابط CEB-FIP [۴۳] و روابط Bazant and Besq-Giarduon [۴۴]، بتن‌های Calcium Aluminate Cement [۴۵] بیشتر است. نتایج این پژوهش به روابط Bazant and Besq-Giarduon [۴۴] نزدیکی قابل قبولی دارد.

رابطه ۸ بین مقاومت فشاری و انرژی شکست بتن AAS را از نتایج این پژوهش می‌توان پیشنهاد داد:

$$G_F = 7.09 f_c^{0.75}, \quad R^2 = 0.94 \quad (8)$$

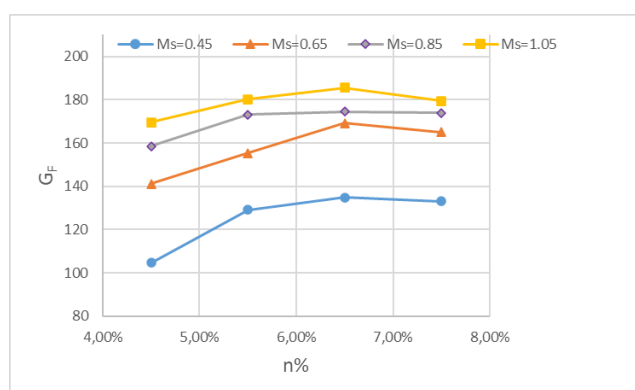
در این رابطه  $G_F$  انرژی شکست بتن به روش WFM با واحد N/m و  $f_c$  مقاومت فشاری بتن بر اساس MPa است.





شکل شماره ۱۰: نمودار تغییرات انرژی شکست بتن AAS با مقاومت فشاری و مقایسه با مراجع مختلف

شکل شماره ۱۱ تاثیر مدول سیلیکات Ms و غلظت قلیا n بر انرژی شکست بتن AAS را به نمایش می‌گذارد. بر اساس نتایج این پژوهش با افزایش Ms انرژی شکست افزایش یافته ولی میزان تغییرات آن وقتی Ms از ۰.۸۵ بیشتر می‌شود اندک است. بر اساس نتایج بدست آمده، در حالتی که n، ۴/۵، ۵/۵، ۶/۵، ۷/۵ باشد، انرژی شکست بتن با افزایش Ms از ۰/۴۵ به ۱/۰۵ به ترتیب ۶۲٪، ۳۹٪، ۳۷٪، ۳۴٪ زیاد شده و از طرفی با افزایش n از ۴/۵ به ۶/۵ انرژی شکست بتن در حالتی که Ms، ۰/۴۵، ۰/۶۵، ۰/۸۵، ۱/۰۵ باشد به ترتیب ۲۹٪، ۲۰٪، ۱۰٪، ۹/۴٪ افزایش و سپس با رسیدن n به ۷/۵ انرژی شکست به ترتیب ۱/۴٪، ۲/۴٪، ۰/۳٪، ۳/۲٪ کاهش یافته است. بیشترین مقدار انرژی شکست به طرح N6.5%Ms1.05 و کمترین انرژی شکست به طرح N4.5%Ms0.45 مربوط می‌باشد.

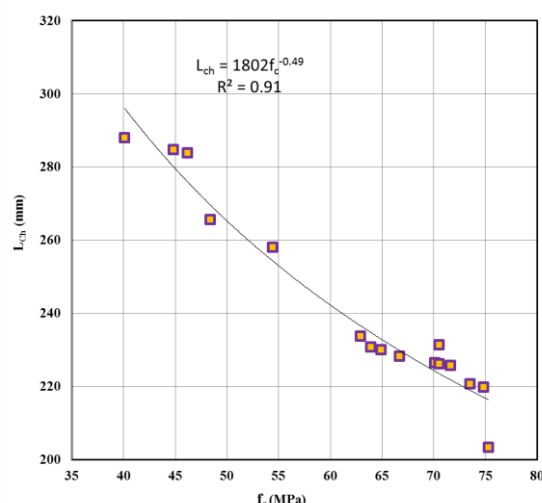


شکل شماره ۱۱: نمودار تغییرات انرژی شکست بتن AAS با مدول سیلیکات و غلظت قلیا

شکل شماره (۱۲) تغییرات مقاومت فشاری را با طول مشخصه  $L_{ch}$  نشان می‌دهد. همانطور که قبلاً اشاره شد این پارامتر میزان تردی بتن را نشان می‌دهد که با انرژی شکست و مدول الاستیسیته رابطه مستقیم و با مجذور مقاومت کششی بتن رابطه عکس دارد. نمودار نشان می‌دهد با افزایش مقاومت فشاری  $L_{ch}$  کاهش می‌یابد که به این معنی است که با افزایش مقاومت فشاری بتن تردتر می‌شود. در مقایسه با بتن‌های معمولی  $L_{ch}$  بتن AAS کمتر است که این نشان دهنده تردتر بودن این بتن در مقایسه با بتن معمولی است که با نتایج دینگ و همکاران [۳۳] نیز در یک راستا قرار دارد. در مقایسه با بتن با سیمان کلسیم آلومینات، [۴۵] بتن AAS طول  $L_{ch}$  بزرگتری دارد که نشان دهنده شکل پذیر تر بودن بتن های AAS نسبت به بتن سیمان کلسیم آلومینات است. رابطه ۹ بین  $L_{ch}$  و  $f_c$  بدست آمده است که از نتایج این پژوهش برآورد گردید.

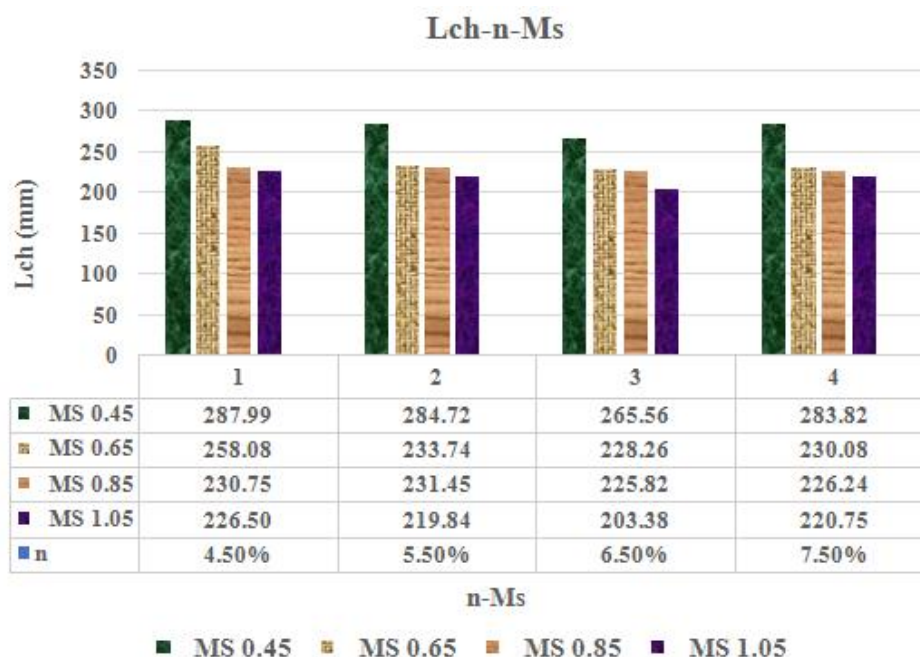
$$L_{ch} = 1802 f_c^{-0.49}, \quad R^2 = 0.91 \quad (8)$$

در این رابطه  $L_{ch}$  طول مشخصه با واحد mm و  $f_c$  مقاومت فشاری بتن بر اساس MPa است



شکل شماره ۱۲: نمودار تغییرات طول مشخصه بتن AAS با مقاومت فشاری

شکل شماره ۱۳ تاثیر غلظت قلیا و مدول سیلیکات فعال کننده ها بر طول مشخصه بتن AAS را نشان می دهد. همانطور که در نمودار مشخص است با افزایش غلظت قلیا از ۰/۴/۵ تا ۰/۶/۵ طول مشخصه ابتدا با در نظر گرفتن مدول سیلیکات معادل ۰/۴۵ ، ۰/۶۵ ، ۰/۸۵ و ۱/۰۵ به ترتیب ۰/۷/۸ ، ۰/۱۱/۶ ، ۰/۲/۱ و ۰/۱۰/۲ کاهش یافت و وقتی درصد قلیا (n) به ۰/۷/۵ می رسد روند آن تغییر یافته و طول مشخصه به ترتیب نسبت ۰/۶/۹ ، ۰/۰/۸ ، ۰/۰/۲ و ۰/۸/۵ افزایش یافت. همچنین با افزایش مدول سیلیکات ، طول مشخصه در همه غلظت های قلیا کاهشی بوده به گونه ای که با افزایش  $M_s$  از ۰/۴۵ به ۱/۰۵ ،  $L_{ch}$  در حالتی که n معادل ۰/۴/۵ ، ۰/۵/۵ ، ۰/۶/۵ و ۰/۷/۵ بود به ترتیب ۰/۲۱/۴ ، ۰/۲۲/۸ ، ۰/۲۳/۴ و ۰/۲۲/۲ کاهش یافت.



شکل شماره ۱۳: نمودار تغییرات طول مشخصه بتن AAS با مدول سیلیکات و غلظت قلیا

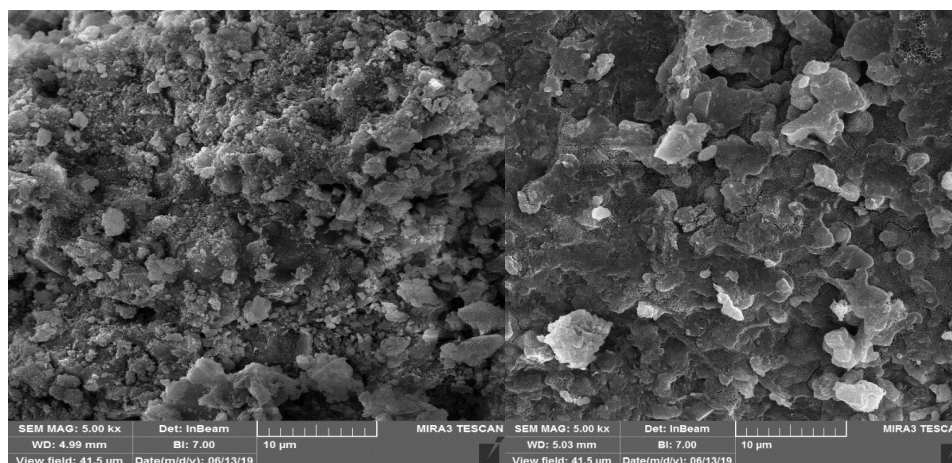
### ۳-۴ تفسیر نتایج آزمایشات

نتایج این تحقیق نشان می دهد هر دو عامل مدول سیلیکات و غلظت قلیای فعال کننده ها تاثیر قابل ملاحظه ای بر مشخصات مهندسی (مشخصات مکانیکی و شکست) بتن قلیا فعال سرباره دارند. هنگامی که سرباره به تنهایی با آب ترکیب می شود، بصورت ذرات ریز

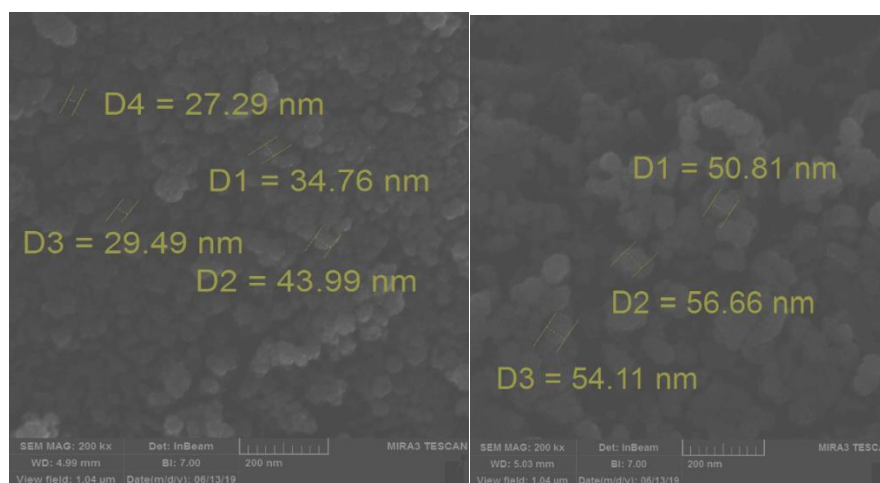


تجزیه می شده ولی تشکیل یک لایه محافظ ناکارآمد از جنس  $Ca^{2+}$  مانع از ادامه واکنش بعدی می شود و بر اثر واکنش آن هیدروکسید کلسیم تولید نمی شود. در واقع؛ در صورتی که سرباره با یک محلول قلیائی با pH بالا فعال شود، این لایه محافظ شکسته شده و واکنش ها ادامه می یابد و می تواند به عنوان یک چسباننده خوب جایگزین سیمان گردد. نقش قلیا در بتن های AAS خود را به صورت بالا نگه داشتن یون های  $OH^-$  در مخلوط نشان می دهد. آنیون فعال کننده با  $Ca^{2+}$  ذرات سرباره واکنش نشان داده و هیدرات آلومینو سیلیکاتی کلسیمی تشکیل می دهد. با افزایش مدول سیلیکات و غلظت قلیا، درجه هیدراسیون افزایش و ژل C-S-H بیشتری تولید می شود. تحقیقات دیگر هم نشان داده است که افزایش میزان pH فعال کننده ها، باعث افزایش میزان هیدراسیون خمیر AAS با حل کردن بیشتر یون های سیلیکات و آلومینیوم به علت مقاومت ضعیف تر Si-O و Al-O می گردد. در واقع مقاومت بیشتر چسباننده ها وقتی اتفاق می افتد که ژل C-S-H بیشتری، که نتیجه هیدراسیون بیشتر است، تولید و ژل آلومینیو سیلیکات کمتری باقی بماند [۴۶]. البته وقتی n ( غلظت قلیا) بیشتر از ۶/۵ درصد می شود، روند افزایش مقاومت تغییر یافته و کمی کاهش می یابد. علت کاهش مقاومت در غلظت های بالای قلیا، تشکیل  $Ca(OH)_2$  اطراف سطح سرباره است که از هیدراسیون بیشتر ذرات سرباره جلوگیری نموده و کلسیم مورد نیاز برای تشکیل ژل C-S-H را کاهش می دهد. البته بعضی از پژوهشگران کاهش مقاومت فشاری را، برای حالتی که n ( غلظت قلیا) بیش از ۷ درصد باشد، مشاهده نموده اند که این موضوع نمایانگر کاهش هیدراسیون ذرات سرباره می باشد [۴۷]. همچنین پژوهشگران دیگری گزارش نموده اند که واکنش هیدراسیون، اگر منجر به محصول زیاد در مدت زمان کم گردد، نیاز به فضای بیشتری دارد که باعث بوجود آوردن یک ترکیب ناهمجنس گردیده و کاهش مقاومت را در پی خواهد داشت [۴۸]. مشخصات مکانیکی و شکست بتن AAS با افزایش مدول سیلیکات (Ms) بصورت واضح و قابل ملاحظه ای افزایش می یابد؛ چرا که با افزایش Ms، ساختار ژل چسباننده متراکم تر و فشرده تر شده و نسبت Ca/Si ژل C-S-H کاهش یافته که این موضوع منجر به افزایش مقاومت ژل می گردد. همچنین با افزایش Ms میزان تخلخل ناحیه ITZ نیز کاهش می یابد [۱۰]. در بررسی ریز ساختار بتن AAS و در عکس های XRD از خمیرهای AAS در تحقیقات دیگر مشاهده گردید که الگوی ژیزماندین  $(CaAl_2Si_2O_8 \cdot 4H_2O)$ ، کلسیت  $(CaCO_3)$ ، کوارتز  $(SiO_2)$  و فاز C-S-H وجود دارد [۴۶]. در حالتی که غلظت قلیا (n) کوچک باشد، شدت فاز سیلیکو-آلومین در ژیزماندین در این ترکیبات کاهش می یابد که این باعث تشکیل فاز شدید کلسیت گردیده و می تواند عامل ترکهای سطحی باشد. در این حالت، چسبندگی داخلی بین ترکیبات قسمت های مختلف ژل چسباننده ضعیف تر هستند که یکی از عوامل کاهش مقاومت می باشد [۲۲]. در حالتی که غلظت قلیا و مدول سیلیکات پائین باشد، کوارتز بیشتری تشکیل می شود که باعث حل شدن ناکافی و هیدراسیون کم ذرات سرباره می شود. در واقع می توان گفت که تشکیل کوارتز بیشتر به معنی تشکیل کمتر فاز C-A-S-H و مقاومت کمتر نمونه ها و افزایش حفره ها در ریزساختار است [۱۰]. جهت بررسی و تفسیر نتایج آزمایشات و آگاهی از ریز ساختار نمونه های بتن، از تکنیک تصویر برداری SEM استفاده شده است. شکل ۱۴ تصویر SEM در مقیاس ۱۰ میکرومتر را برای دو طرح  $N6.5\%Ms1.05$  و  $N4.5\%Ms0.45$ ، که به ترتیب کمترین و بیشترین مقاومت و انرژی شکست را دارند، نمایش می دهد. همانطور که در این تصاویر دیده می شود، در طرح  $N4.5\%Ms0.45$  ذرات تشکیل دهنده بتن طوری به هم چسبیده اند که حفره های کوچکی در ابعاد کسری از میکرومتر داخل بتن وجود دارد. در طرح  $N6.5\%Ms1.05$  بین ذرات بتن حفره های ریزی وجود دارد که این حفره ها از حفره های تصویر قبلی کوچکتر است. برای مطالعه دقیق تر ساختار و مورفولوژی این نمونه، مقیاس تصویر برداری با بزرگنمایی بالاتر حد ۲۰۰ نانومتر انجام گرفته و شکل های ۱۵ مقیاس ۲۰۰ نانومتری همان طرح ها است. همانطور که از این شکل ها دیده می شود، اندازه واقعی ذرات بسیار کوچک و در حد چند نانومتر است و دارای توزیع یکنواختی هستند. همچنین با توجه به این تصاویر اندازه حفره ها نیز بسیار کوچک و در حدود ۴۰ نانومتر است. در این شکل مشاهده می شود که اندازه ذرات در طرح  $N6.5\%Ms1.05$  کوچکتر از اندازه ذرات موجود در طرح  $N4.5\%Ms0.45$  و اندازه حفره ها هم در طرح  $N6.5\%Ms1.05$  کوچکتر است. به دلیل کوچک بودن اندازه ذرات، تعداد ذرات بیشتر بوده و موجب افزایش چسبندگی بین آنها می شود و در نتیجه مقاومت بتن را افزایش و انرژی شکست بتن بیشتر شده است. از نظر ریز ساختاری، وقتی که اندازه ذرات کوچکتر می شود و به سمت حوزه نانو برود، درصد اتمهای سطحی افزایش می یابد. به عبارت دیگر، وقتی اندازه ذرات از حالت توده ای به حالت نانومتری تبدیل می شود نسبت سطح به حجم افزایش می یابد. از آنجا که اتمهای سطحی در واکنش ها نقش اساسی دارند، در نتیجه هر چه تعداد اتم های سطحی بیشتر باشد مقاومت نمونه بیشتر خواهد بود. هر چه ذرات ریزساختار متراکم تر باشند مقاومت بتن نیز بیشتر خواهد بود که در بررسی عکس ها SEM نمونه ها مختلف، مشاهده شده است نمونه های با غلظت و مدول

سیلیکات بالاتر، نمونه‌ها مترکم تر، فاصله آزاد بین ذرات حاصل از هیدراسیون کمتر، سایز حفره‌ها کوچکتر و تخلخل کمتر بوده است. با مقایسه نمونه‌ها مشاهده شده است در طرح  $N6.5\%Ms1.05$  نسبت به طرح  $N4.5\%Ms0.45$  تراکم نمونه‌ها بیشتر، قطر سوراخ‌ها کمتر و فضای خالی کمتر می‌گردد. دلیل آن می‌تواند هیدراسیون بیشتر سرباره باشد. به همین دلیل مشخصات شکست بتن با طرح  $N6.5\%Ms1.05$  بهتر از  $N4.5\%Ms0.45$  است.

الف) بتن طرح  $N6.5\%Ms1.05$ ب) بتن طرح  $N4.5\%Ms0.45$ 

شکل ۱۴: تصویر SEM با مقیاس ۱۰ میکرومتر از دو نمونه بتن

الف) بتن طرح  $N6.5\%Ms1.05$ ب) بتن طرح  $N4.5\%Ms0.45$ 

شکل ۱۵: تصویر SEM با مقیاس ۲۰۰ نانومتر طرح (الف)  $N4.5\%Ms0.45$  و (ب)  $N6.5\%Ms1.05$

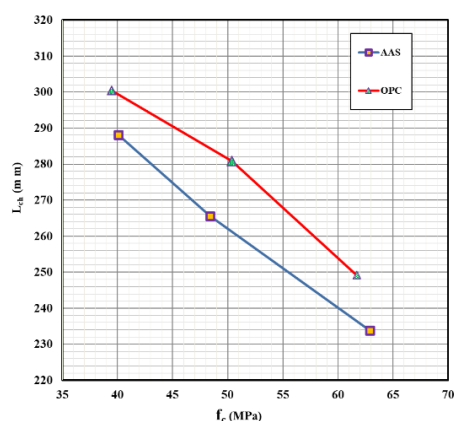
#### ۴-۴ مقایسه مشخصات مکانیکی و شکست بتن AAS و بتن‌های معمولی (OPC)

جهت مقایسه بتن‌های قلیا فعال سرباره ای (AAS) با بتن معمولی تولید شده با سیمان پرتلند (OPC) سه طرح مختلف از رده  $C40$ ،  $C50$  و  $C60$  تهیه و آزمایشات مشخصات مکانیکی و شکست بر روی آن انجام شده است که نتایج آن در جدول شماره ۶ درج شده است. جنس سنگدانه‌های مورد استفاده برای هر دو نوع بتن قلیا فعال سرباره ای و معمولی یکسان بوده است. این بتن‌ها از نظر مقاومت فشاری تقریباً مشابه طرح‌های  $N4.5\%Ms0.45$  و  $N6.5\%Ms0.45$  و  $N5.5\%Ms0.65$  هستند. نتایج نشان می‌دهد با مقاومت فشاری یکسان، مقاومت کششی بتن AAS تقریباً با بتن OPC برابر و مدول الاستیسیته آن کمتر است (در رده‌های  $C40$ ،  $C50$  و  $C60$  مدول الاستیسیته بتن AAS به ترتیب  $15/6\%$ ،  $9/33\%$  و  $2/23\%$  از بتن OPC کمتر است). علت آن است که مدول الاستیسیته بتن علاوه بر

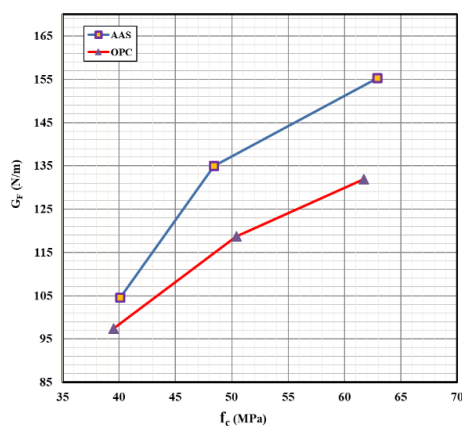
میزان هیدراسیون و مقاومت ITZ، به مقدار سنگ دانه های موجود در بتن نیز بستگی دارد. از آنجائیکه معمولاً در بتن های با مقاومت فشاری یکسان، وزن و حجم سنگدانه ها در بتن های OPC از بتن های AAS بیشتر است لذا غالباً مدول الاستیسیته این نوع بتن ها نیز از بتن های قلیا سرباره ای هم مقاومت فشاری، بیشتر است. نتایج حاصل از آزمایشات شکست بروش WFM که در جدول شماره ۶ و شکل ۱۶ مقایسه انرژی شکست و طول مشخصه بتن AAS و OPC در یک رده مقاومت فشاری را نشان می دهد. انرژی شکست بتن AAS در رده های C۴۰، C۵۰، و C۶۰ به ترتیب ۷/۴٪، ۱۳/۷٪ و ۱۷/۷٪ نسبت به بتن OPC بیشتر و طول مشخصه بتن AAS به ترتیب ۴/۳٪، ۵/۷٪ و ۶/۶٪ نسبت به بتن OPC کمتر است که نشان می دهد بتن AAS تردتر از بتن OPC هم رده خود است. دلیل بیشتر بودن انرژی شکست و ترد تر بودن بتن AAS نسبت به بتن OPC با مقاومت فشاری یکسان، متراکم تر و قوی تر و یکنواخت تر بودن ناحیه واسطه انتقال (ITZ) است. ناحیه ITZ در بتن های AAS نسبت به بتن های OPC به دلیل وجود آب در این ناحیه جهت واکنش شیمیائی، سیمان پرتلند و لخته شدن دانه های سیمان، تخلخل کمتری دارد. ولی بدلیل اینکه خمیر بتن AAS با سدیم سیلیکات و قلیا فعال می شود. این محلول عمل لخته شدن ذرات سرباره را کمتر نموده لذا میزان تخلخل در ناحیه ITZ اطراف سنگدانه ها در بتن AAS از بتن OPC کمتر و انرژی شکست آن بیشتر است.

جدول شماره ۶: نتایج مشخصات مکانیکی کل طرح ها:

| طرح        | مقاومت فشاری (MPa) | مقاومت کششی (MPa) | مدول الاستیسیته (GPa) | انرژی شکست (N/m) | طول مشخصه (mm) |
|------------|--------------------|-------------------|-----------------------|------------------|----------------|
| N4,5Ms0,45 | ۴۰/۱               | ۲/۹۸              | ۲۴/۴۵                 | ۱۰۴/۶            | ۲۸۷/۹۹         |
| N5/6Ms0,45 | ۴۸/۴               | ۳/۵۶              | ۲۴/۹۴                 | ۱۳۴/۹۵           | ۲۶۵/۵۶         |
| N5,5Ms0,65 | ۶۲/۹               | ۴/۳۵              | ۲۸/۴۸                 | ۱۵۵/۳            | ۲۳۳/۷۴         |
| OPC(C40)   | ۳۹/۵               | ۳/۰۴              | ۲۸/۵                  | ۹۷/۴             | ۳۰۰/۳۷         |
| OPC(C50)   | 5/4۰               | ۳/۷۴              | ۳۳/۴                  | ۱۱۸/۷            | ۲۸۰/۸۱         |
| OPC(C50)   | ۶۱/۷               | ۴/۳۱              | ۳۵/۱                  | ۱۳۱/۹            | ۲۴۹/۲۳         |



ب) طول مشخصه



الف) انرژی شکست

شکل ۱۶: مقایسه الف) انرژی شکست، ب) طول مشخصه بتن های AAS و OPC

## ۵- نتیجه گیری:

در این تحقیق به بررسی تاثیر مدول سیلیکات و غلظت فعال کننده های قلیائی بر روی مشخصات مکانیکی و شکست بتن های قلیا فعال سرباره ای و مقایسه این نوع بتن با بتن های پرداخته شده است. بدین منظور، طرح مختلف از بتن قلیا فعال سرباره ای با ۴ رده مدول سیلیکات (۰/۴۵، ۰/۶۵، ۰/۸۵ و ۱/۰۵) و ۴ رده غلظت قلیا (۰/۴/۵، ۰/۵/۵، ۰/۶/۵ و ۰/۷/۵) و ۳ طرح از بتن معمولی (C۴۰، C۵۰، و C۶۰) مورد آزمایش قرار گرفته است. مهمترین نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر می باشد.

- ۱- هر دو پارامتر مدول سیلیکات و غلظت قلیا تاثیر قابل ملاحظه ای بر روی مشخصات مکانیکی بتن قلیا فعال سرباره ای شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بتن داشتند، به گونه ای که با افزایش مدول سیلیکات بتن قلیا فعال سرباره ای از ۰/۴۵ تا ۱/۰۵، مشخصات مکانیکی آن افزایش و با افزایش غلظت قلیا n از ۰/۴/۵ تا ۰/۶/۵ مشخصات مکانیکی بتن AAS افزایش و با رسیدن n از ۰/۶/۵ به ۰/۷/۵ این پارامترها کاهش پیدا می کنند.
- ۲- انرژی شکست بتن قلیا فعال سرباره ای با مدول سیلیکات فعال کننده ها رابطه مستقیم داشته و میزان تغییرات آن به غلظت فعال کننده ها وابسته است، به گونه ای که با افزایش مدول سیلیکات از ۰/۴۵ به ۱/۰۵ انرژی شکست در غلظت های ۰/۴/۵، ۰/۵/۵، ۰/۶/۵ و ۰/۷/۵ به ترتیب به ترتیب به میزان ۰/۶۲٪، ۰/۳۹٪، ۰/۳۷٪ و ۰/۳۴/۸٪ افزایش می یابد. این مسئله ناشی از آن است که با افزایش Ms، ساختار ژل چسباننده متراکم تر و فشرده تر شده و نسبت Ca/Si ژل C-S-H کاهش یافته که این موضوع منجر به افزایش مقاومت ژل می گردد. همچنین با افزایش Ms میزان تخلخل ناحیه ITZ نیز کاهش می یابد.
- ۳- با افزایش غلظت قلیا از ۰/۴/۵ تا ۰/۶/۵، انرژی شکست بتن قلیا فعال سرباره ای در حالتی که مدول سیلیکات فعال کننده ها ۰/۴۵، ۰/۶۵، ۰/۸۵ و ۱/۰۵ است به ترتیب ۰/۲۹٪، ۰/۲۰٪، ۰/۱۰٪ و ۰/۹/۴٪ افزایش و سپس با رسیدن n به ۰/۷/۵ انرژی شکست به ترتیب ۰/۱/۴٪، ۰/۲/۴٪، ۰/۳/۳٪ و ۰/۳/۲٪ کاهش می یابد.
- ۴- وقتی غلظت قلیا از ۰/۴/۵ تا ۰/۶/۵ افزایش می یابد، تراکم نمونه ها به مرور بیشتر، فاصله آزاد بین ذرات حاصل از هیدراسیون کمتر، سایز حفره ها کوچکتر و تخلخل کمتر می گردد که نتیجه آن حصول به بتنی قویتر بوده و بنابراین مشخصات شکست بتن AAS بالاتر است. در طرف مقابل، وقتی مقدار n به ۰/۷/۵ می رسد، مجدداً تراکم ریزساختار نمونه ها کاهش یافته و فضای خالی بیشتر می شود که می تواند بخاطر هیدراسیون کمتر سرباره باشد.
- ۵- با افزایش غلظت قلیا از ۰/۴/۵ به ۰/۶/۵ در کلیه مقادیر مدول سیلیکات آزمایش شده در این تحقیق، بتن قلیا فعال سرباره ای تردتر شده و طول مشخصه آن با مدول سیلیکات های ۰/۴۵، ۰/۶۵، ۰/۸۵ و ۱/۰۵ به ترتیب به ترتیب ۰/۷/۸٪، ۰/۱۱/۶٪، ۰/۱۱/۱٪ و ۰/۱۰/۲٪ کاهش می یابد. ولی وقتی درصد قلیا (n) به ۰/۷/۵ رسید روند تغییر کرده و بتن شکل پذیرتر و طول مشخصه به ترتیب نسبت ۰/۶/۹٪، ۰/۰/۸٪، ۰/۰/۲٪ و ۰/۸/۵٪ افزایش می یابد. همچنین با افزایش مدول سیلیکات، طول مشخصه در کلیه مقادیر غلظت های قلیا آزمایش شده کاهشی بوده به گونه ای که با افزایش Ms از ۰/۴۵ به ۱/۰۵، L<sub>ch</sub> در حالتی که n معادل ۰/۴/۵، ۰/۵/۵، ۰/۶/۵ و ۰/۷/۵ باشد به ترتیب ۰/۲۱/۴٪، ۰/۲۲/۸٪، ۰/۲۳/۴٪ و ۰/۲۲/۲٪ کاهش می یابد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که با افزایش مدول سیلیکات بتن قلیا فعال سرباره ای، بتن تردتر می شود.
- ۶- در کلیه حالت های بررسی شده در بتن های AAS و با افزایش مقاومت فشاری، GF انرژی مخصوص شکست افزایش و طول مشخصه L<sub>ch</sub> کاهش پیدا می کند.
- ۷- در مقایسه بین مشخصات شکست بتن های AAS و OPC هم رده مشاهده شده است که انرژی شکست بتن های AAS بزرگتر از بتن های OPC در شرایط مقاومت های فشاری برابر، ولی طول مشخصه آن کوچکتر می باشد که به معنی تردتر بودن بتن AAS نسبت به بتن OPC است. دلیل این مسئله، تراکم بیشتر و نیز قویتر و یکنواخت تر بودن ناحیه واسطه انتقال (ITZ) بوده و ناحیه ITZ در بتن های AAS نسبت به بتن های OPC تخلخل کمتری دارد.

## ۶- مراجع

- [1] Juenger, MCG. and Winnefeld, F. and Provis, JL. Ideker, JH. (2011). Advances in alternative cementitious binders. *Cem Concr Res*, 41, 1232-1243.
- [2] National Geographic, (2016). *Air Pollution Causes, Effects and Solutions*. 9 October 2016.
- [3] Vaidyanathan, G. (2014). *The Worst Climate Pollution Is Carbon Dioxide*. Sci American. Climate Wire.
- [4] Luukkonena, T. Abdollahnejada, Z. Yliniemi, J. Kinnunen, P. Illikainen, M. (2018) One-part alkali-activated materials: A review. *Cem Concr Res*. 103: 21-34.
- [5] Gartner, E. (2004). Industrially interesting approaches to low-CO<sub>2</sub> cements. *Cem Concr Res*, 34, 1489-1498.
- [6] Hendriks, CA. Worrell, E. De Jager, D. Blok, K. Riemer, P. (1998) Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry. *Proceedings of the Fourth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*, 939-944.
- [7] Sakulich, AR. Miller, S. Barsoum, MW. (2010). Chemical and microstructural characterization of 20-month-old alkali-activated slag cements, *J Am Ceram Soc*, 93: 1741-1748.
- [8] Yang, KH. Song, JK. Song, KI. (2013). Assessment of CO<sub>2</sub> reduction of alkali-activated concrete. *J Clean Prod*, 39: 265-272.
- [9] Miller, SA. John, VM. Pacca, SA. Horvath, A. (2018). Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. *Cem Concr Res*. 114, 115-124.
- [10] Aydin, S. Baradan, B. (2014). Effect of activator type and content on properties of alkali-activated slag mortars. *J Composites: Part B*. 57, 166-172.
- [11] Davidovits, J. (1991). Geopolymers -inorganic polymeric new materials. *J Therm Anal Calorim*. 37, 1633-1656.
- [12] Palomo, A. Blanco, M. Granizo, M. Puertas, F. Vazquez, T. Grutzeck, M. (1999). Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin. *Cem Concr Res*. 29(7), 997-1004.
- [13] Djobo, JNY. Tchadjié, LN. Tchakoute, HK. Kenne, BBD. Elimbi, A. Njopwouo, D. (2014). Synthesis of geopolymer composites from a mixture of volcanic scoria and metakaolin. *J Asian Ceram Soc*. 2, 387-398.
- [14] Xu, H. Van Deventer, JSJ. (2003) Effect of source materials on geopolymerization. *Ind Eng Chem Res*. 42, 1698-1706.
- [15] Hardijito, D. (2005). *Studies of fly ash-based geopolymer concrete*. PhD Thesis. Curtin university of Technology, Perth, Australia.
- [16] Tanzer, R. Buchwald, A. Stephan, D. (2015). Effect of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag. *Mater Struct*, 48, 629-641.
- [17] Awoyera, P. Adesina, A. (2019). A critical review on application of alkali activated slag as a sustainable composite binder. *Case Stud Constr Mater*. 11, e00268.
- [18] He, J. Zhang, J. Yu, Y. Zhang, G. (2012). The strength and microstructure of two geopolymers derived from metakaolin and red mud-fly ash admixture: A comparative study. *Constr Build Mater*. 30, 80-91.
- [19] Allahverdi, A. Najafi Kani, E. Esmailpoor, E. (2008). EFFECTS OF SILICA MODULUS AND ALKALI CONCENTRATION ON ACTIVATION OF BLAST-FURNACE SLAG, *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*, Vol. 5, Number 2.
- [20] Ramezani-pour, A. Bahmanzadeh, F. Zolfagharnasab, A. Ramezani-pour, AM. (2018). Mechanical properties and chloride ion penetration of alkali activated slag concrete. *In High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet*, Springer, 2203-2212.
- [21] Wang, WC. Wang, HY. Lo, MH. (2015). The fresh and engineering properties of alkali activated slag as a function of fly ash replacement and alkali concentration. *Constr Build Mater*. 84, 224-229.
- [22] Taghvayi, H. Behfarnia, K. Khalili, M. (2018). The effect of alkali concentration and sodium silicate modulus on the properties of alkali-activated slag concrete. *J Adv Concr Technol* 16, 293-305.
- [23] Nazarpour, H. Jamali, M. (2019). Mechanical and freezing cycles properties of geopolymer concrete with recycled aggregate. *Struct Concr*. 21(2), 1-9. DOI:10.1002/suco.201900317.
- [24] Behfarnia, K. Taghvayi Yazeli, H. Khalili Khasraghi, MB. (2017) The effect of alkaline activator on workability and compressive strength of alkali-activated slag concrete. *AUT J Civil Eng*. 1(1), 55-60. DOI: 10.22060/ceej.2017.12375/5190.
- [25] Mohebi, R. Behfarnia, K. Shojaei, M. (2015) Abrasion resistance of alkali-activated slag concrete designed by Taguchi method. *Constr Build Mater*. 98, 792-798.
- [26] Bazant, ZP. (1992) Fracture mechanics of concrete structures. *Proceeding of First International Conference on Fracture Mechanics of Concrete Structures*, Bereckenridge, Colorado, U.S.A.
- [27] Kumar, S. Barai, SV. (2011) *Concrete fracture models and applications*. Springer Heidelberg Dordrecht London New York, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, DOI: 10.1007/978-3-642-16764-5.
- [28] Darwin, D. Barham, S. Kozul, R. Luan, S. (2001) Fracture energy of high-strength concrete. *ACI Mater J*. 98(5), 411-417.

- [29] Gettu, R. Bazant, ZP. Karr, KE.(1990) Fracture properties and brittleness of high-strength concrete. *ACI Mater J.* 87(6), 608-618.
- [30] Sarker, PK. Haque, R. Ramgolam, KV.(2013) Fracture behaviour of heat cured fly ash based geopolymer concrete. *Mater Des.* 44, 580-586.
- [31] Ganesan, N. Abraham, R. Deepa Raj, S. Sasi, D.(2015) Fracture properties of geopolymer concrete. *Asian J Civ Eng.* 16(1), 127-134.
- [32] Nath, P. Sarker, PK.(2017). Fracture properties of GGBFS-blended fly ash geopolymer concrete cured in ambient temperature. *Mater Struct.* 50 (1),32. DOI: 10.1617/s11527-016-0893-6.
- [33] Ding, Y. Dai, J. Shi, C.(2018) Fracture properties of alkali-activated slag and ordinary Portland cement concrete and mortar. *Constr Build Mater.* 165, 310-320.
- [34] RILEM Draft Recommendation (TC50-FMC)(1985). Determination of fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend test on notched beams. *Mater Struct.* 18 (4), 287-290.
- [35] BS EN 12390. Part 3: Testing hardened concrete. Method of determination of compressive strength of concrete cubes. British Standards Institution; 2000.
- [36] ASTM C 496. Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. American Society of Testing Materials; 2002.
- [37] ASTM C 469. Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression. American Society of Testing Materials; 2002.
- [38] Hillerborg, A. Modeer, M. Petersson, PE.(1976). Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cem Concr Res.* 6,773-782.
- [39] Elices, M. Guinea, GV. Planas, J.(1992). Measurement of the fracture energy using three-point bend tests: part 3— influence of cutting the P- $\delta$  tail. *Mater Struct.* 25, 137-163.
- [40] Elices, M. Guinea. GV, Planas J.(1997) On the measurement of concrete fracture energy using three-point bend tests. *Mater Struct.* 30,375-376.
- [41] Shah, SP. Swartz, SE. Ouyang, C.(1995). Fracture Mechanics of Concrete: Applications of Fracture Mechanics to Concrete, Roch and other Quasi-Brittle Materials, *John Wiley and Sons Inc.*
- [42] Aliabdo, A. Abd Elmoaty, A. Emam, M.(2019). Factors affecting the mechanical properties of alkali activated ground granulated blast furnace slag concrete, *Constr Build Mater.* 197, 339-355.
- [43] CEB-FIP, Final draft CEB-FIP model code 2010,(2010) *Bulletin Information Committee Euro-Int.* Beton203,
- [44] Bazant, ZP. Becq-Giraudon, E.(2002) Statistical prediction of fracture parameters of concrete and implications for choice of testing standards. *Cem Concr Res.* 32 (4): 529-556.
- [45] Abolhasani, A. Nazarpour, H. Dehestani, M.(2020) The fracture behavior and microstructure of calcium aluminate cement with various water-cement ratios. *Theor Appl Fract Mech.* 109:102690. doi: 10.1016/j.tafmec. 2020.102690.
- [46] Rashed, AM. Zeedan, SR. Hasan, AA.(2016) Influence of the activator concentration of sodium silicate on the thermal properties of alkali -activated slag paste , *Construction and Building Materials* ,102,811-820.
- [47] Marjanovic, N. Komljenovic, M. Bascarevic, Z. Nikolic, V. Petrovic, R. (2015).Physical-mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash-blast furnace slag blends. *Ceram Int.* 41, 1421-1435.
- [48] Caijun, S. Yinyu. L.(1989). Investigation on some factors affecting the characteristics of alkali-phosphorus slag cement. *Cem Concr Res.* 19, 527-533.