

## Impact performance optimization of fiber reinforced geopolymer concretes based on agricultural wastes using the Taguchi method

A. Sahraei Moghadam<sup>1</sup>, A. Mirza Goltabar Roshan<sup>2\*</sup>, F. Omidinasab<sup>3</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.  
3- Associate Professor, Faculty of Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran.

### ABSTRACT

Using the Taguchi method, this study deals with the optimization of the impact performance of fiber reinforced geopolymer concretes based on agricultural wastes, under repeating impact according to the method proposed by ACI C544. In the construction of geopolymer concretes, rice husk ash was used as binder and corn stalk was used as aggregate. Moreover, mixtures were reinforced by wheat straw, barley straw, and sugarcane. The factors of curing method, the concentration of sodium hydroxide solution, the mass ratio of sodium silicate to sodium hydroxide, the mass ratio of the alkaline activator to binder, the mass ratio of aggregate to binder, the type of fiber, and the fiber volume were considered as the inputs of the Taguchi analysis. Given the number and levels of considered factors, 18 mix designs were used in construction of specimens, on the basis of the  $L_{18}(6^3 \times 1^2)$  orthogonal array proposed by Taguchi. Moreover, the present study determined the optimal levels of factors using the signal-to-noise ratio analysis, and determined the percentage of participation of each factor in the test results by means of the delta method. In addition, by making and testing the optimal mixtures proposed by the Taguchi method, the present study validated the method. Based on the experimental results, the fiber volume factor, with an optimal level of 8%, was recognized as the most influential factor with a participation of 55.4% in the first crack resistance and 63.9% in the ultimate resistance. On the other hand, the difference between the predictions of the Taguchi method and the experimental results was less than 10%, which indicates the validity of Taguchi method in this field. Finally, statistical analysis on the results of impact tests showed that two-parameter Weibull distribution is a suitable statistical distribution for the statistical investigation of the impact resistance of geopolymer concretes.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 07 March 2023  
**Revise Date:** 07 August 2023  
**Accept Date:** 03 February 2024

### Keywords:

Impact resistance  
Geopolymer concrete  
Agricultural waste  
Taguchi method  
Weibull distribution

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2024.386806.3048>

\*Corresponding author: Alireza Mirza Goltabar Roshan  
Email address: ar-goltabar@nit.ac.ir

## بهینه‌سازی خصوصیات ضربه‌ای بتن‌های ژئوپلیمری الیافی مبتنی بر پسماندهای کشاورزی با استفاده از روش تاگوچی

امیرحسین صحرائی مقدم<sup>۱</sup>، علیرضا میرزا گلتبار روشن<sup>۲\*</sup>، فریدون امیدي نسب<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

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

۳- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

### چکیده

این تحقیق با استفاده از روش تاگوچی به بهینه‌سازی خصوصیات ضربه‌ای بتن‌های ژئوپلیمری مبتنی بر پسماندهای کشاورزی تحت اثر ضربه وزنه افتان تکرار شونده مطابق با روش پیشنهادی ACI C544 پرداخت. در ساخت بتن‌های ژئوپلیمری از خاکستر پوسته برنج بعنوان چسب و از ساقه ذرت بعنوان سنگدانه استفاده گردید. همچنین، مخلوط‌ها با استفاده از سه نوع الیاف گیاهی شامل کاه گندم، کاه جو و باگاس مسلح شدند. در این تحقیق، عامل‌های غلظت محلول سدیم هیدروکسید، نسبت جرمی سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید، نسبت جرمی فعال‌کننده‌ی قلیایی به چسب، نسبت جرمی سنگدانه به چسب، نوع الیاف و مقدار الیاف هرکدام در ۳ سطح مختلف و روش عمل‌آوری در ۲ سطح مختلف بعنوان ورودی‌های تحلیل تاگوچی در نظر گرفته شدند. با توجه به تعداد و سطوح عامل‌های در نظر گرفته شده، ۱۸ طرح اختلاط بر اساس آرایه متعامد  $L_{18}(6^3 \times 1^2)$  پیشنهادی توسط تاگوچی در ساخت نمونه‌ها بکار رفت. همچنین، با استفاده از تحلیل نسبت سیگنال به نویز به تعیین سطوح بهینه عامل‌ها و با استفاده از روش دلتا به تعیین درصد مشارکت هر عامل در نتایج آزمایش‌ها پرداخته شد. علاوه بر این، با ساخت و آزمایش طرح‌های اختلاط بهینه پیشنهادی توسط روش تاگوچی به اعتبارسنجی تجربی این روش پرداخته شد. بر اساس نتایج آزمایشگاهی، عامل درصد الیاف با مشارکت ۵۵/۴ درصدی در مقاومت اولین ترک و ۶۳/۹ درصدی در مقاومت نهایی، با سطح بهینه ۸ درصد بعنوان تاثیرگذارترین عامل شناخته شد. از طرفی، اختلاف بین پیش‌بینی‌های روش تاگوچی و نتایج تجربی بدست آمده برای خصوصیات ضربه‌ای کمتر از ۱۰ درصد بدست آمد که نشان دهنده‌ی اعتبار روش تاگوچی در این زمینه می‌باشد. در نهایت، با انجام تحلیل آماری بر روی نتایج آزمایش مقاومت ضربه‌ای، توزیع دو پارامتری Weibull بعنوان یک توزیع آماری مناسب به منظور تجزیه و تحلیل مقاومت ضربه‌ای بتن‌های ژئوپلیمری مبتنی بر پسماندهای کشاورزی شناخته شد.

کلمات کلیدی: مقاومت ضربه‌ای، بتن ژئوپلیمری، پسماند کشاورزی، روش تاگوچی، توزیع ویبول.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2024.386806.3048">https://doi.org/10.22065/jsce.2024.386806.3048</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2024.386806.3048">10.22065/jsce.2024.386806.3048</a>	۱۴۰۳/۰۷/۳۰	۱۴۰۲/۱۱/۱۴	۱۴۰۲/۱۱/۱۴	۱۴۰۲/۰۹/۱۶	۱۴۰۲/۰۵/۱۶
علیرضا میرزا گلتبار روشن ar-goltabar@nit.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

بعد از آب، بتن ساخته شده با سیمان پرتلند معمولی ( $OPC^1$ ) پرکاربردترین ماده در سرتاسر جهان می‌باشد [۱]. تولید سیمان در فعالیت‌های عمرانی نقش اساسی ایفا می‌کند و ارتباط تنگاتنگی با اقتصاد جهانی دارد. تولید این ماده سالانه ۲/۵ درصد افزایش می‌یابد و بر اساس پیش‌بینی‌ها، در سال ۲۰۵۰ به ۴/۴ - ۳/۷ میلیارد تن در سال می‌رسد [۲]. این در حالی است که کارخانه‌های تولید سیمان بعد از نیروگاه‌های تولید برق بیشترین گاز گلخانه‌ای را تولید می‌کنند. حدود ۷ درصد از  $CO_2$  تولیدی در سرتاسر جهان مربوط به فرآیند تولید سیمان می‌باشد، لذا کاهش آن یک مسئله جهانی است [۳]. از این رو، تحقیقات بسیاری به منظور بررسی مواد جایگزین سیمان انجام شده است [۴-۶]. یکی از موادی که بعنوان جایگزین سیمان مورد توجه قرار گرفته است، خاکستر پوسته برنج ( $RHA^2$ ) است [۷-۹]. پوسته برنج یک پسماند مهم در عمل آسیاب دانه‌های برنج می‌باشد که در حجم بالایی تولید می‌گردد. در سرتاسر جهان سالانه حدود ۷۴۲ میلیون تن برنج تولید می‌شود که در نتیجه آن، حدوداً ۱۴۸ میلیون تن پوسته برنج حاصل می‌گردد [۱۰]. تحقیقات گذشته حاکی از آن است که ترکیبات این پوسته حاوی حدوداً ۵۰ درصد سلولز، ۲۵ تا ۳۰ درصد لیگنین و ۱۵ تا ۲۰ درصد سیلیکا است. در حین سوختن پوسته برنج، سلولز و لیگنین از بین رفته و سیلیکا باقی می‌ماند [۱۱]. دلیل اصلی جلب توجه محققین حوزه تکنولوژی بتن به  $RHA$ ، درصد بالای سیلیس موجود در این ماده است که چنانچه در کوره‌های استاندارد سوزانده شود، حجم آن به ۸۰ تا ۹۰ درصد از کل  $RHA$  می‌رسد [۱۲]. رشد روز افزون استفاده از بتن در پروژه‌های عمرانی موجب تسریع روند کاهش معادن طبیعی جهت تولید سنگدانه‌ها شده است [۱۳-۱۶]. این در حالی است که استفاده از پسماندهای کشاورزی بعنوان سنگدانه‌های گیاهی در ساخت بتن می‌تواند علاوه بر کاهش مواد زائد، به حفظ منابع طبیعی نیز کمک کند [۱۷]. ساقه ذرت یکی از پسماندهای کشاورزی می‌باشد که می‌تواند جایگزین مناسبی برای سنگدانه‌های طبیعی در ساخت بتن باشد [۱۸]. تحقیقات نشان می‌دهد که ساقه ذرت علی‌رغم وزن مخصوص پایین که این پسماند کشاورزی را به یک مصالح مناسب برای ساخت سازه‌های سبک تبدیل می‌کند، می‌تواند مقاومت مورد نیاز برای یک المان ساختمانی را نیز ایجاد نماید [۱۹].

علاوه بر این، بتن تحت بارهای کششی و ضربه‌ای دچار ضعف در عملکرد است [۲۰-۲۴]. امروزه، محققان به منظور رفع این نقص بتن، به مسلح نمودن آن با استفاده از الیاف‌های مختلف روی آورده‌اند. از متداول‌ترین الیاف‌های مورد استفاده به جهت بهبود عملکرد بتن، الیاف فولادی می‌باشد [۲۵ و ۲۶]. سالانه بیش از ۳۰۰ هزار تن الیاف فولادی در سرتاسر دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد که بیش از ۹۰ درصد آن به صورت صنعتی تولید می‌گردد [۲۷]. این در صورتی است که تولید صنعتی این الیاف‌ها علاوه بر پرهزینه بودن، موجب تولید مقدار قابل توجهی  $CO_2$  نیز می‌شود [۲۸]. به همین دلیل، محققین در چند سال گذشته به دنبال جایگزین مناسبی برای الیاف‌های صنعتی در بتن می‌باشند که الیاف‌های طبیعی بدست آمده از پسماندهای کشاورزی یکی از این گزینه‌هاست [۲۹]. برخی از پسماندهای کشاورزی همانند کاه گندم و کاه جو و باگاس قابلیت استفاده بعنوان جایگزین الیاف‌های صنعتی در بتن را دارند [۳۰-۳۲].

از طرف دیگر، توسعه مخلوط‌های ژئوپلیمر مبتنی بر پسماندهای کشاورزی نیازمند در نظر گرفتن عامل‌های متعددی می‌باشد. ازدیاد عامل‌های تاثیرگذار بر خصوصیات مخلوط‌های ژئوپلیمری، موجب می‌شود که تحقیقات آزمایشگاهی در این زمینه بسیار زمان‌بر و پرهزینه باشد [۳۳]. بنابراین، نیاز به یک روش کارآمد به منظور تعیین طرح‌های اختلاط، مدیریت عامل‌های تاثیرگذار و دستیابی به بهینه‌ترین سطوح از متغیرها برای ایجاد بهترین عملکرد در مخلوط‌های ژئوپلیمری احساس می‌شود [۳۴]. روش تاگوچی یک روش بهینه‌یابی است که حتی در صورت وجود عدم قطعیت‌هایی که تاثیر نامشخصی بر پاسخ دارند، به انتخاب بهترین سطوح عامل‌ها می‌پردازد [۳۵]. روش تاگوچی در بهینه‌سازی را می‌توان به ۴ مرحله تقسیم کرد: (۱) برنامه‌ریزی، (۲) انجام، (۳) تحلیل و (۴) اعتبار سنجی. هر کدام از مراحل با اتخاذ یک هدف جداگانه به فرآیند کلی بهینه‌سازی منجر می‌شوند. بر خلاف بسیاری از روش‌های بهینه‌سازی که مبتنی بر روش‌های آماری پیشرفته می‌باشند، روش تاگوچی در بهینه‌سازی یک مسئله، بر کاربرد موثر استراتژی مهندسی تمرکز دارد [۳۶]. با توجه

<sup>1</sup> Ordinary Portland cement

<sup>2</sup> Rice husk ash

به تائید دقت این روش در تحقیقات گذشته، می توان از آن در بهینه سازی مسائل مهندسی با صرف زمان و هزینه کمتر استفاده کرد [۳۷] و [۳۸].

Zabihi و همکاران [۳۹] امکان ساخت بتن ژئوپلیمری مبتنی بر RHA را بعنوان یک محصول زائد کشاورزی بررسی کردند. آن ها به منظور تولید RHA از یک کوره برقی با دمای °C ۷۰۰-۵۰۰ استفاده کردند. در این تحقیق، RHA به میزان ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد جایگزین سیمان شد. نتایج تحقیق آن ها نشان داد که با افزایش جایگزینی سیمان با RHA، مقاومت های فشاری و کششی مخلوط ها افزایش می یابد، در صورتی که بیشترین مقاومت خمشی در مخلوط های با نسبت جایگزینی ۸۰ درصد بدست آمده است. علاوه بر این، این تحقیق حاکی از کاهش قابل ملاحظه ای انتشار دی اکسید کربن در فرآیند تولید بتن در اثر جایگزینی سیمان با RHA بود. در تحقیق دیگری، Rattanachu و همکاران [۴۰] از RHA بعنوان یک ماده مکمل سیمانی در بتن های بازیافتی استفاده کردند. در این تحقیق، RHA جایگزین ۲۰ تا ۵۰ درصد سیمان مصرفی در مخلوط شد. بررسی مقاومت فشاری و خصوصیات دوام در این تحقیق نشان داد که بهترین مقاومت فشاری در جایگزینی ۲۰ درصدی سیمان با RHA بدست آمده است، در صورتی که با افزایش این مقدار جایگزینی تا ۵۰ درصد، خصوصیات دوام مخلوط بهبود یافته است. نتایج تحقیقات Ozturk و همکاران [۴۱] نیز نشان داد که کاربرد RHA همراه با سایر مواد پوزولانی می تواند ضمن افزایش ۶۵ درصدی بهره وری اقتصادی، دی اکسید کربن منتشر شده در حین فرآیند تولید بتن را به میزان ۲۵ درصد کاهش دهد.

Bing و Ning [۴۲] در تحقیقی به بررسی رفتار یک کامپوزیت گیاهی جدید پرداختند. این کامپوزیت از سیمان فسفات منیزیم، خاکستر بادی و ساقه ذرت بعنوان سنگدانه های گیاهی تشکیل شده است. هدف از انجام تحقیق مذکور، بررسی امکان سنجی کاربرد این کامپوزیت در موارد عایق و سازه ای بود. آن ها در ساخت مخلوط ها، سنگدانه های گیاهی را به میزان ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد جایگزین سنگدانه های طبیعی کردند. نتایج بررسی های آن ها نشان داد که با افزایش مقدار سنگدانه های گیاهی، مقاومت فشاری و ضریب رسانایی حرارتی مخلوط ها کاهش می یابد. Ahmad و Chenab [۴۳] به بررسی نقش ساقه ذرت بعنوان سنگدانه گیاهی در سه اندازه ی مختلف (بزرگ با طول ۱۴ mm، کوچک با طول ۹ mm و بصورت پودر) بر رفتار بتن های معمولی و بتن های مبتنی بر سیمان فسفات منیزیم پرداختند. نتایج تحقیقات آن ها نشان داد که کاربرد ساقه ذرت بعنوان سنگدانه ی گیاهی در هر دو نوع بتن خصوصیات حرارتی بسیار مناسبی را ایجاد می کند. مخلوط های حاوی سنگدانه های گیاهی بزرگتر به دلیل چگالی کمتر و تخلخل بیشتر، عملکرد حرارتی مطلوب تری را به خود اختصاص دادند، در صورتی که مخلوط های حاوی سنگدانه های گیاهی با سایز کوچک بهترین مقاومت فشاری را از خود نشان دادند. در تحقیقی دیگر، Shao و همکاران [۴۴] با بررسی اثرات جایگزینی سنگدانه های ریز با ذرات حاصل از ساقه ذرت، کاربرد این پسماند کشاورزی را در ساخت بتن های سبک سازه ای توصیه کردند.

Wongsa و همکاران [۴۵] تاثیر الیاف های طبیعی و مصنوعی بر رفتار ملات های ژئوپلیمری مبتنی بر خاکستر بادی را بررسی کردند. الیاف های طبیعی مورد استفاده شامل الیاف های سیسال و نارگیل و الیاف مصنوعی شامل الیاف شیشه بود. آن ها در ساخت نمونه ها، ۱۰ طرح اختلاط مختلف حاوی ۰، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد حجمی از الیاف های مذکور را مورد استفاده قرار دادند. نتایج تحقیق مذکور بیانگر آن بود که مقاومت کششی و خمشی مخلوط های حاوی الیاف افزایش می یابد که این افزایش برای مخلوط های حاوی الیاف های طبیعی قابل توجه تر بود. Alomayri و همکاران [۴۶] تاثیر ۰، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۱ درصد وزنی از الیاف کتان را بر خصوصیات شکست مخلوط های ژئوپلیمری مبتنی بر خاکستر بادی بررسی کردند. نتایج بررسی ها نشان داد که افزودن ۰/۵ درصد الیاف کتان موجب بهبود خصوصیات شکست مخلوط های ژئوپلیمری می شود. تحقیقات دیگری نیز اثرات مثبت الیاف های طبیعی را بر خصوصیات مخلوط ها گزارش کرده اند [۴۷-۴۹].

این تحقیق با استفاده از روش تاگوچی به تعیین طرح های اختلاط، بهینه سازی عامل ها و پیش بینی خصوصیات ضربه ای بتن های ژئوپلیمری مبتنی بر چسب و سنگدانه های گیاهی پرداخته است. در ساخت مخلوط های ژئوپلیمری این تحقیق، خاکستر پوسته برنج بعنوان چسب، ساقه ذرت بعنوان سنگدانه و کاه گندم، کاه جو و باگاس نیز بعنوان الیاف استفاده شد. ورودی ها شامل ۱ عامل در ۲ سطح مختلف و ۶ عامل در ۳ سطح مختلف بودند که بر اساس آن، روش تاگوچی آرایه متعامد  $L_{18}(6^3 \times 12^2)$  را برای تعیین طرح های اختلاط پیشنهاد داد. آزمایش ضربه وزنه افتان مطابق با روش پیشنهادی توسط ACI C544 بر روی نمونه ها انجام شد. در این تحقیق، سطوح بهینه عامل ها با

استفاده از تحلیل نسبت سیگنال به نویز، درصد مشارکت هر عامل در نتایج آزمایش‌ها با استفاده از روش دلتا و اعتبار سنجی تجربی روش تاگوچی نیز انجام شد علاوه بر این، کاربرد توزیع دو پارامتری Weibull در تحلیل آماری خصوصیات ضربه‌ای بتن‌های ژئوپلیمری مبتنی بر پسماندهای کشاورزی بررسی شد.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مصالح

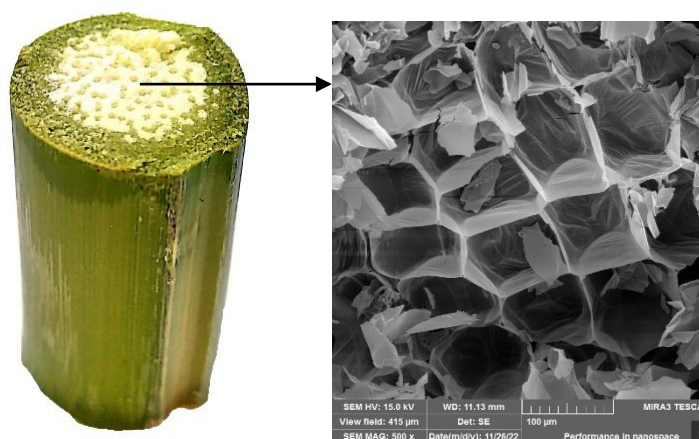
مطابق [۵۰] ASTM C311 می‌توان از RHA بعنوان یک ماده پوزولانی استفاده کرد. مطابق گزارشات پیشین، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی RHA به دما و مدت سوختن آن بستگی دارد [۵۱]. تحقیقات نشان داده است در صورتی که دمای سوختن RHA به  $700^{\circ}\text{C}$  برسد، سیلیس آمورف ایجاد می‌شود [۵۲]، بنابراین، دما و زمان سوختن RHA در تحقیق حاضر به ترتیب  $700^{\circ}\text{C}$  و ۶ ساعت در نظر گرفته شد. ترکیبات شیمیایی و خصوصیات فیزیکی RHA در جدول (۱) نشان داده شده است. علاوه بر این، در این تحقیق از ساقه ذرت بعنوان سنگدانه گیاهی استفاده شد. ساقه‌های ذرت پس از خشک شدن، با استفاده از یک آسیاب چکشی خورده شدند. در نهایت، سنگدانه‌های گیاهی با گذشتن از الک نمره ۱۶، به منظور استفاده در ساخت مخلوط‌ها آماده شدند. تصویر SEM از ریزساختار این سنگدانه‌های گیاهی در شکل (۱) نشان داده شده است. مشاهدات نشان داد که تقریباً ۷۰ درصد این سنگدانه‌ها را مغز و ۳۰ درصد باقیمانده را پوسته تشکیل داده است. مغز این سنگدانه‌ها یک ماده متخلخل است که دارای دو نوع تخلخل شامل تخلخل بین ذره‌ای و تخلخل درون ذره‌ای می‌باشد. این سنگدانه‌ها با ساختار لانه‌زنبوری خود می‌توانند گزینه‌ی مناسبی برای ساخت المان‌های سبک باشند (به شکل (۱) نگاه کنید) [۵۳]. از سه نوع الیاف گیاهی شامل کاه گندم، کاه جو و باگاس نیز بعنوان الیاف‌های سازگار با محیط‌زیست در راستای افزایش مقاومت ضربه‌ای مخلوط‌ها در این تحقیق استفاده شد. این الیاف‌ها با طول ۲ سانتی‌متر آماده استفاده در مخلوط‌ها شدند. تصویر این الیاف‌ها در شکل (۲) نشان داده شده است. مشاهدات نشان دهنده‌ی سطح زمخت الیاف‌ها می‌باشد که به واسطه‌ی آن می‌توانند با ایجاد درگیری مناسب با ماتریس، موجب بهبود عملکرد ضربه‌ای مخلوط‌ها شوند [۵۴]. این الیاف‌ها عمدتاً از سلولز، همی سلولز و لیگنین تشکیل شده‌اند [۵۵ و ۵۶]. خصوصیات الیاف‌های گیاهی در جدول (۲) نشان داده است. محلول فعال کننده‌ی قلیایی در این تحقیق از ترکیب سدیم سیلیکات مایع ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) (با ترکیب شیمیایی وزنی:  $\text{Na}_2\text{O} = 14.7\%$ ،  $\text{SiO}_2 = 29.4\%$ ،  $\text{H}_2\text{O} = 55.9\%$ ) و سدیم هیدروکسید ( $\text{NaOH}$ ) بود. روش آماده‌سازی محلول سدیم هیدروکسید بدین شرح بود: (۱) مقدار مشخصی از پرک‌های سدیم هیدروکسید در آب مقطر در یک ظرف پلاستیکی حل شد، (۲) ظرف پلاستیکی به مدت ۲۴ ساعت در شرایط محیطی اتاق (دمای  $20^{\circ}\text{C}$ ) و رطوبت نسبی ۶۰ درصد) قرار داده شد و (۳) به منظور بدست آوردن محلول سدیم هیدروکسید با غلظت مورد نظر، آب مقطر به اندازه‌ی کافی به مخلوط اضافه شد [۵۹]. بدین ترتیب، محلول سدیم هیدروکسید با غلظت‌های ۶، ۹ و ۱۲ M تهیه گردید.

جدول ۱: ترکیبات شیمیایی و خصوصیات فیزیکی RHA مورد استفاده.

RHA	خصوصیات شیمیایی (درصد وزنی)
۹۱/۲۰	SiO <sub>2</sub>
۰/۴۱	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۰/۲۲	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۰/۳۸	CaO
۰/۴۸	MgO
۰/۵۶	SO <sub>3</sub>
۶/۳۱	K <sub>2</sub> O
۰/۰۶	Na <sub>2</sub> O
۰/۴۱	افت احتراق
GGBFS	خصوصیات فیزیکی
۲/۱۴	وزن مخصوص (g/cm <sup>3</sup> )
۳/۹۴	سطح مخصوص (g/cm <sup>2</sup> )

جدول ۲: خصوصیات الیاف‌های گیاهی مورد استفاده [۵۵-۵۸].

خصوصیات	کاه گندم	کاه جو	باگاس
سلولوز (درصد وزنی)	۴۵	۳۷/۶	۵۵/۲
همی سلولوز (درصد وزنی)	۳۱	۳۴/۹	۱۶/۸
لیگنین (درصد وزنی)	۲۰	۱۵/۸	۲۵/۳
چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	۱۲۰۰	۱۱۰۰	۱۵۰۰
مقاومت کششی (MPa)	۲۰	۱۳/۰۴	۳۲
مدول یانگ (MPa)	۶/۶	۶/۵	۱۷



شکل ۱: ریزساختار سنگدانه‌های گیاهی مورد استفاده.



شکل ۲: الیاف‌های گیاهی مورد استفاده: (الف) کاه گندم، (ب) کاه جو و (ج) باگاس.

## ۲-۲- تعیین طرح‌های اختلاط با روش تاگوچی

در این تحقیق، یک عامل در دو سطح مختلف و شش عامل هرکدام در سه سطح مختلف بعنوان ورودی‌های تحلیل تاگوچی در نظر گرفته شدند. این عامل‌ها شامل روش عمل‌آوری (عمل‌آوری حرارتی و عمل‌آوری محیطی)، غلظت محلول سدیم هیدروکسید (۶، ۹ و ۱۲ M)، نسبت جرمی سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید (۲، ۲/۵ و ۳)، نسبت جرمی فعال کننده‌ی قلیایی به چسب (۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵)، نسبت جرمی سنگدانه به چسب (۱، ۲ و ۳)، نوع الیاف (کاه گندم، کاه جو و باگاس) و مقدار الیاف (۰، ۴ و ۸ درصد وزنی چسب) بودند. عامل‌ها و سطوح آن‌ها در جدول (۳) نشان داده شده است. سطوح عامل‌ها با توجه به تحقیقات پیشین [۵۱ و ۶۰ و ۶۱] و محدودیت‌های عملی در ساخت انتخاب شدند. با توجه به تعداد و سطوح عامل‌ها، روش تاگوچی آرایه متعامد  $L_{18}(6^3 \times 1^2)$  را پیشنهاد کرد که مطابق آن، ۱۸ طرح اختلاط در این تحقیق در نظر گرفته شد. آرایه متعامد  $L_{16}(6^3 \times 1^2)$  به همراه ۱۸ طرح اختلاط مورد بررسی در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول ۳: عوامل تاثیرگذار و سطوح مربوط به آن‌ها.

عامل‌ها	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
A: روش عمل‌آوری	حرارتی	محیطی	-
B: نسبت جرمی سنگدانه به چسب [Agg/B]	۱	۲	۳
C: غلظت محلول سدیم هیدروکسید [NaOH (M)]	۶	۹	۱۲
D: نسبت جرمی سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید [SS/SH]	۲	۲/۵	۳
E: نسبت جرمی فعال کننده‌ی قلیایی به چسب [Al/B]	۰/۳	۰/۴	۰/۵
F: نوع الیاف	کاه گندم	کاه جو	باگاس
G: مقدار الیاف (درصد وزنی چسب)	۰	۴	۸

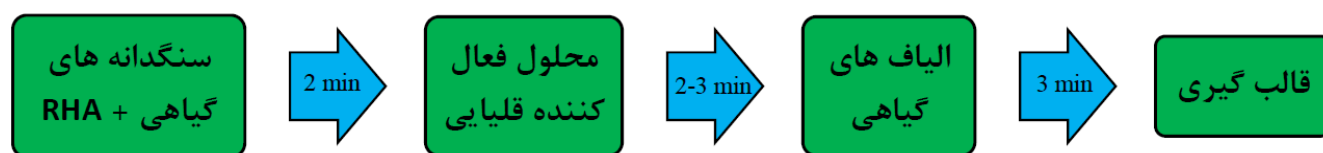
جدول ۴: آرایه متعامد  $L_{18}(6^3 \times 1^2)$  پیشنهادی توسط روش تاگوچی به منظور تعیین طرح‌های مخلوط.

طرح اختلاط	سطوح عوامل تاثیرگذار							طرح‌های اختلاط
	A	B	C	D	E	F	G	
T1	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	حرارتی
T2	۱	۱	۲	۲	۲	۲	۲	حرارتی
T3	۱	۱	۳	۳	۳	۳	۳	حرارتی
T4	۱	۲	۱	۱	۲	۲	۲	حرارتی
T5	۱	۲	۲	۲	۳	۳	۳	حرارتی
T6	۱	۲	۳	۳	۱	۱	۲	حرارتی
T7	۱	۳	۱	۲	۱	۳	۳	حرارتی
T8	۱	۳	۲	۳	۲	۳	۳	حرارتی

۰	جو	۰/۵	۳	۱۲	۳	حرارتی	۱	۲	۳	۱	۳	۳	۱	T9
۴	جو	۰/۵	۲	۶	۱	محیطی	۲	۲	۳	۳	۱	۱	۲	T10
۸	باگاس	۰/۳	۲/۵	۹	۱	محیطی	۳	۳	۱	۱	۲	۱	۲	T11
۰	گندم	۰/۴	۳	۱۲	۱	محیطی	۱	۱	۲	۲	۳	۱	۲	T12
۸	گندم	۰/۵	۲	۶	۲	محیطی	۳	۱	۳	۲	۱	۲	۲	T13
۰	جو	۰/۳	۲/۵	۹	۲	محیطی	۱	۲	۱	۳	۲	۲	۲	T14
۴	باگاس	۰/۴	۳	۱۲	۲	محیطی	۲	۳	۲	۱	۳	۲	۲	T15
۰	باگاس	۰/۴	۲	۶	۳	محیطی	۱	۳	۲	۳	۱	۳	۲	T16
۴	گندم	۰/۵	۲/۵	۹	۳	محیطی	۲	۱	۳	۱	۲	۳	۲	T17
۸	جو	۰/۳	۳	۱۲	۳	محیطی	۳	۲	۱	۲	۳	۳	۲	T18

## ۲-۳- ساخت و عمل آوری نمونه‌ها

ساخت مخلوط‌ها با ترکیب خشک سنگدانه‌های گیاهی و RHA به مدت ۲ دقیقه آغاز شد. سپس، به منظور انجام واکنش پلیمریزاسیون، محلول فعال کننده‌ی قلیایی به تدریج و بصورت پیوسته به مخلوط اضافه شد و ترکیب مرطوب مواد به مدت ۲ تا ۳ دقیقه، تا مشاهده بصری یک مخلوط همگن، ادامه یافت. در مخلوط‌های مسلح، الیاف‌های طبیعی در مرحله آخر بصورت تدریجی به مخلوط اضافه شدند و عملیات اختلاط ۳ دقیقه دیگر ادامه یافت. در شکل (۳) روند اختلاط مصالح نشان داده شده است. به منظور جلوگیری از هدر رفتن رطوبت مخلوط‌ها، نمونه‌ها بلافاصله پس از قالب‌گیری با یک غشای پلاستیکی پوشانده شدند [۶۲]. نمونه‌های ساخته شده برای آزمایش مقاومت ضربه‌ای نمونه‌های دیسکی به قطر ۱۵ و ارتفاع ۶/۴ سانتی متر بودند. نیمی از نمونه‌ها در یک اوون با دمای ۸۰ °C به مدت ۲۴ ساعت عمل آوری شدند و نیم دیگر در دمای محیط به مدت ۷۲ ساعت، به دلیل طولانی‌تر بود زمان گیرش، عمل آوری شدند. پس از زمان مذکور (۲۴ ساعت برای عمل آوری حرارتی و ۷۲ ساعت برای عمل آوری محیطی) نمونه‌ها قالب‌برداری و تا زمان آزمایش در شرایط اتاق نگهداری شدند [۶۳].



شکل ۳: روند اختلاط مصالح.

## ۳- روش انجام آزمایش

آزمایش مقاومت ضربه‌ای بصورت ضربه وزن افتان تکرار شونده و بر اساس روش پیشنهادی توسط ACI C544 [۶۴] انجام گرفت. شکل (۴) جزئیات دستگاه مورد استفاده در انجام این آزمایش را نشان می‌دهد. در این آزمایش نمونه‌های دیسکی داخل دستگاه قرار داده شده و سپس، یک چکش به وزن ۴/۴۵ کیلوگرم به طور مکرر از ارتفاع ۴۵۷ میلی‌متری بر روی یک گوی فولادی به قطر ۶۳/۵ میلی‌متر که بر روی نمونه قرار داشت، رها شد. نتایج این آزمایش شامل تعداد ضربات برای ایجاد اولین ترک قابل رویت، تعداد ضربات برای ایجاد گسیختگی نهایی و انرژی جذب شده توسط نمونه می‌باشد. انرژی وارده در هر ضربه با استفاده از روابط (۱-۳) محاسبه شد.

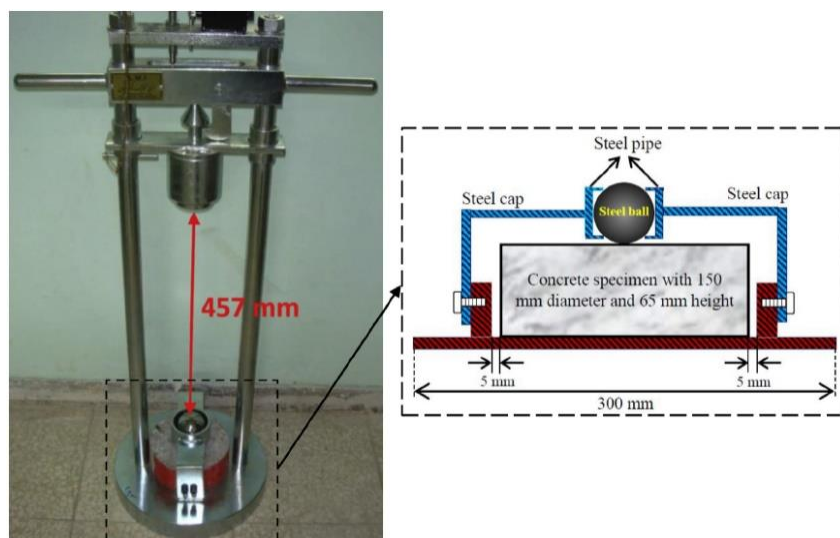
$$H = \frac{gt^2}{2} \quad (1)$$

$$V = gt \quad (2)$$

$$U = \frac{WV^2}{2g} \quad (3)$$

در رابطه (۱)، H ارتفاع سقوط چکش و برابر با ۴۵۷ mm، g شتاب گرانش زمین و برابر با ۹۸۲۰ mm/sec<sup>2</sup> و t زمان سقوط چکش در هر ضربه می‌باشد. در رابطه (۲)، V سرعت چکش در زمان برخورد با نمونه می‌باشد. در رابطه (۳) نیز، U انرژی وارده بر نمونه در

هر ضربه و W وزن چکش مورد استفاده می‌باشد. با توجه به اطلاعات موجود، زمان سقوط چکش در هر ضربه  $0.3052 \text{ sec}$  بدست آمد. بر اساس رابطه (۲)، سرعت چکش در زمان برخورد به نمونه برابر با  $2994/01 \text{ mm/sec}$  می‌باشد. با توجه به اطلاعات بدست آمده و بر اساس رابطه (۳)، انرژی وارده در هر ضربه چکش  $20/345 \text{ J}$  بدست آمد که با ضرب تعداد دفعات ضربه در این عدد، انرژی جذب شده توسط نمونه حاصل گردید. این آزمایش بر روی دیسک‌های بتنی ساخته شده از ۱۸ طرح اختلاط بدست آمده از روش تاگوچی انجام شد.



شکل ۴: جزئیات دستگاه مورد استفاده در آزمایش ضربه وزنه افتان.

#### ۴- تجزیه و تحلیل نتایج

##### ۴-۱- مقاومت اولین ترک

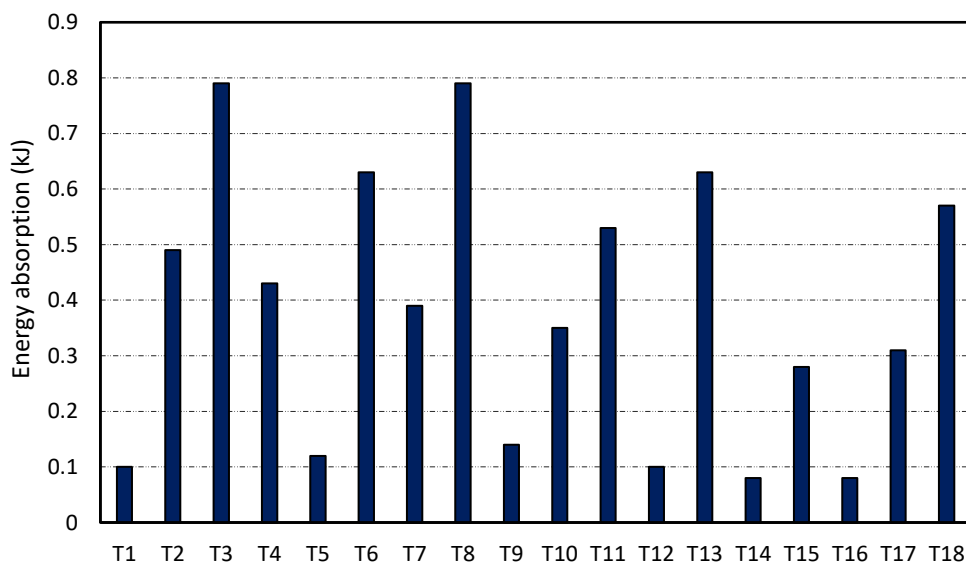
تعداد ضربه برای ایجاد اولین ترک قابل رویت در نمونه‌ها ثبت و با ضرب این تعداد در انرژی وارده به ازای یک ضربه ( $20/345 \text{ J}$ )، انرژی جذب شده توسط نمونه‌ها بدست آمد. نتایج مربوط به این پارامتر برای ۱۸ مخلوط در نظر گرفته شده در این تحقیق بر حسب کیلو ژول (kJ) در شکل (۵) نشان داده شده است. تحلیل نسبت سیگنال به نویز با معیار "بیشتر، بهتر" انجام و نتایج آن در شکل (۶) نشان داده شده است. همچنین، درصد مشارکت هر عامل در نتایج پارامتر مقاومت اولین ترک مخلوط‌ها در جدول (۵) نشان داده شده است که مقدار بیشتر این پارامتر برای هر عامل نشان دهنده‌ی تاثیر بیشتر آن بر نتایج است و بالعکس. همانطوری که در نتایج مشاهده می‌شود، عامل مقدار الیاف بیشترین تاثیر را در مقاومت اولین ترک مخلوط‌ها داشته است. نتایج حاکی از آن است که عامل درصد الیاف با مشارکت  $55/4$  درصدی، موثرترین عامل در مقاومت اولین ترک مخلوط‌ها می‌باشد، بطوری که با افزایش مقدار الیاف از ۰ تا ۸ درصد، شاهد افزایش قابل توجه مقاومت اولین ترک مخلوط‌ها بودیم. مشاهدات نشان داد که الیاف‌های طبیعی با ایجاد پل بر روی ترک‌های ایجاد شده در نمونه‌های دیسکی از شکست ترد آن‌ها که در نمونه‌های ساخته شده با مخلوط‌های غیر مسلح رایج است، جلوگیری می‌کند. در مطالعات گذشته [۶۵-۶۷] نیز تاثیر الیاف‌های گیاهی در بهبود عملکرد بتن گزارش شده است که از جمله عوامل تاثیرگذار بر شدت این تاثیر می‌توان به مقاومت کششی الیاف، طول تعبیه الیاف در ماتریس و زبری سطوح الیاف برای درگیری بیشتر با ماتریس اشاره کرد. بعد از عامل مقدار الیاف، عامل غلظت محلول NaOH با مشارکت  $13/2$  درصدی مهمترین عامل‌های تاثیرگذار بر مقاومت اولین ترک مخلوط‌ها بوده است. نتایج نشان داد که افزایش مولاریته محلول NaOH از  $6 \text{ M}$  به  $12 \text{ M}$  موجب افزایش مقاومت اولین ترک مخلوط‌ها شده است. در تحقیقات پیشین نیز تاثیر افزایش مولاریته محلول NaOH در بهبود مقاومت بتن گزارش شده است [۶۸ و ۶۹]. افزایش محتوای مولی محلول NaOH به دلیل آزادسازی بیشتر یون  $\text{OH}^-$  که به سرعت واکنش می‌دهد و ژل پلیمری تولید می‌کند، موجب افزایش مقاومت مخلوط شده است [۷۰]. از طرفی، عامل روش عمل‌آوری با مشارکت  $9/3$  درصدی در نتایج، بعنوان سومین عامل تاثیرگذار در پارامتر

مقاومت اولین ترک شناخته شده است. سطح بهینه برای این عامل، عمل آوری حرارتی بود. با توجه به تاثیر دمای بالا در تکمیل فرآیند پلیمریزاسیون، عمل آوری حرارتی در مقایسه با عمل آوری محیطی که نمی تواند منجر به تشکیل ژل هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) به اندازه کافی شود، عملکرد مطلوب تری را در مخلوطها ایجاد کرده است [۷۱]. برخلاف عوامل مذکور، چهار عامل SS/SH، Agg/B، AI/B و نوع الیاف تاثیر بخصوصی بر نتایج پارامتر مقاومت اولین ترک نداشته اند. مشارکت عوامل مذکور در نتایج مقاومت اولین ترک به ترتیب برابر با ۷/۲، ۶/۲، ۴/۴ و ۴/۳ درصد بوده است که نشان دهنده ی تاثیر کم این عوامل است. با توجه به ماهیت گیاهی و خصوصیات تقریباً مشابه الیافهای مورد استفاده، عامل نوع الیاف تاثیر بخصوصی بر مقاومت اولین ترک مخلوطها نداشته است و استفاده از تمام الیافهای گیاهی مورد استفاده توانست به اندازه ی تقریباً یکسانی مقاومت اولین ترک مخلوطها را افزایش دهد. جدول (۵) سطوح بهینه تمام عاملهای تاثیرگذار را نشان می دهد. سطوح بهینه برای عاملهای Agg/B، NaOH (M)، SS/SH، AI/B و به ترتیب برابر با ۲، ۱۲، ۲/۵ و ۰/۵ بدست آمد. همچنین، استفاده از ۸ درصد الیاف باگاس بعنوان شرایط تسلیح بهینه و عمل آوری حرارتی نیز بعنوان روش عمل آوری بهینه تعیین شد. به منظور اعتبارسنجی آزمایشگاهی روش تاگوچی، سه نمونه دیسکی با مخلوط حاوی سطوح بهینه ی عاملها ساخته و بعد از ۲۸ روز عمل آوری حرارتی آزمایش شدند. میانگین جذب تا لحظه ایجاد اولین ترک قابل رویت برای این نمونهها برابر با ۰/۸۷ kJ بدست آمد، در حالی که روش تاگوچی مقدار ۰/۸۰ kJ را برای این پارامتر پیش بینی کرده است که با مقدار تجربی بدست آمده ۸/۱ درصد اختلاف دارد. این نتیجه نشان دهنده ی توانایی مطلوب روش تاگوچی در پیش بینی مقاومت اولین ترک مخلوطهای ژئوپلیمری مبتنی بر پسماندهای کشاورزی می باشد.

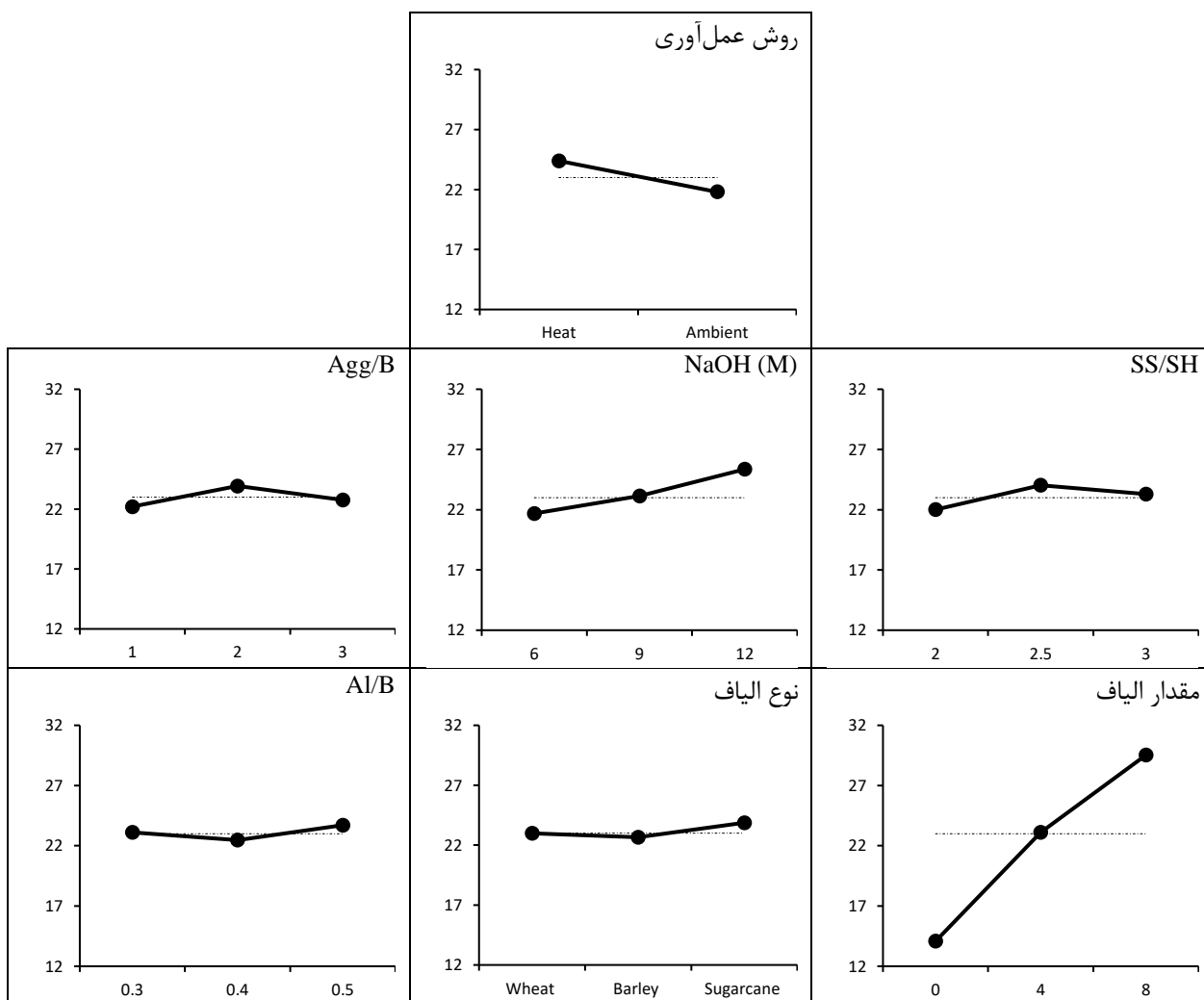
#### ۴-۲- مقاومت نهایی

عمل ضربه زدن به نمونهها تا ایجاد گسیختگی در آنها ادامه پیدا کرد. همچنین، با ضرب تعداد ضربات ثبت شده در انرژی وارده به ازای یک ضربه (۲۰/۳۴۵ J)، انرژی جذب شده توسط نمونهها تا لحظه ی ایجاد گسیختگی بدست آمد و نتایج مربوط به آن بر حسب کیلو ژول (kJ) در شکل (۷) نشان داده شده است. نسبت سیگنال به نویز با در نظر گرفتن معیار "بیشتر، بهتر" محاسبه و برای تمام عاملهای تاثیرگذار در شکل (۸) نشان داده شده است. درصد مشارکت هر عامل در نتایج پارامتر مقاومت نهایی مخلوطها نیز در جدول (۶) نشان داده شده است. از این نتایج استنباط می شود که در این پارامتر نیز مشابه پارامتر مقاومت اولین ترک، عامل نوع الیاف موثرترین عامل بوده است. این عامل با مشارکت ۶۳/۹ درصدی بیشترین تاثیر را بر پارامتر مقاومت نهایی نمونهها داشته است. سطح بهینه برای این عامل برابر با ۸ درصد بدست آمده است که نشان دهنده ی آن است که هرچقدر الیاف مصرفی در مخلوط افزایش یابد، مقاومت نهایی نیز به میزان قابل توجهی افزایش می یابد. الیافهای گیاهی توانستند با ایجاد دوختگی در طرفین ترکها از گسترش بیشتر آنها جلوگیری کرده و از این طریق، انسجام و مقاومت ضربه ای نمونهها را به میزان قابل توجهی افزایش دهند [۳ و ۲۰]. بعد از عامل مقدار الیاف، عامل روش عمل آوری با مشارکت ۹ درصدی از عوامل تاثیرگذار بر مقاومت نهایی مخلوطها بوده است. عمل آوری حرارتی در مقایسه با عمل آوری محیطی توانسته است مقاومت نهایی مطلوب تری را در مخلوطها ایجاد کند. می توان اشاره کرد که عمل آوری حرارتی با تسریع واکنش بین فعال کننده ی قلیایی و RHA که نیازمند حرارت است، بر فرآیند پلیمریزاسیون و در نتیجه، مقاومت نهایی مخلوطها تاثیر مثبت می گذارد [۷۲ و ۷۳]. از طرفی نتایج نشان می دهد که دو عامل SS/SH و AI/B به ترتیب با مشارکت ۴/۴ و ۴/۲ درصدی تاثیر نسبتاً کمی را بر مقاومت نهایی مخلوطها داشته اند. سطح بهینه برای SS/SH برابر با ۲/۵ و برای AI/B برابر با ۰/۵ تعیین شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، می توان اشاره کرد که با افزایش نسبت SS/SH، نسبت Si/Al بطور قابل توجهی افزایش می یابد. از طرفی، افزایش نسبت Si/Al می تواند پیوندهای Si—O—Si را در ماتریس افزایش دهد و از آنجایی که این پیوندها از پیوندهای Si—O—Al و Al—O—Al قوی ترند، تاثیر مثبت افزایش نسبت SS/SH بر نتایج این آزمایش منطقی است. همچنین، افزایش مقدار فعال کننده ی قلیایی منجر به انحلال بیشتر سیلیس موجود در RHA و همچنین، تجزیه سریع تر محلول سدیم هیدروکسید و در نتیجه، تشکیل ژل هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) می شود که می تواند نقش موثری در افزایش مقاومت مخلوطهای ژئوپلیمری داشته باشد. بنابراین، نتایج بدست آمده برای سطوح بهینه عاملهای SS/SH و AI/B منطقی است. نوع الیاف بکار رفته در تسلیح مخلوطها با مشارکت برابر با ۱/۶ درصد بعنوان کم اثرترین عامل در مقاومت نهایی مخلوطها شناخته شده است. با توجه به نوع و خصوصیات مشابه الیافهای بکار رفته در تحقیق، تاثیر کم عامل نوع الیاف بر نتایج

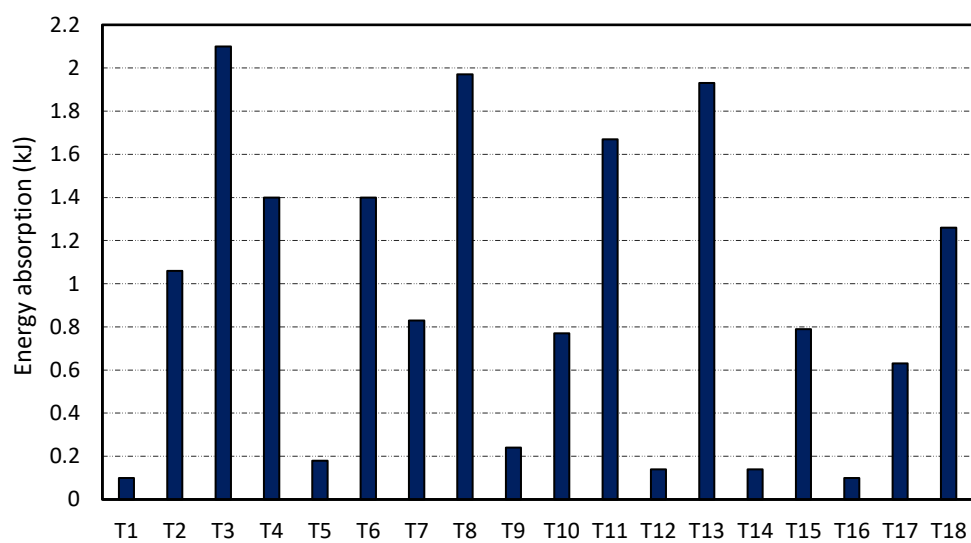
پارامتر مقاومت نهایی منطقی می‌باشد. از طرفی، سطح بهینه برای عامل مولاریته محلول NaOH برابر با ۱۲ M بدست آمده است که نشان می‌دهد افزایش مولاریته محلول NaOH می‌تواند در بهبود مقاومت نهایی مخلوط‌ها نقش مثبت داشته باشد. این در صورتی است که سطح بهینه عامل Agg/B برابر با ۲ بدست آمده است. در توجیه نتایج بدست آمده، می‌توان اشاره کرد که افزایش مولاریته محلول NaOH موجب افزایش واکنش‌های شیمیایی و افزایش نسبت Agg/B، با توجه به ساختار لانه زنبوری سنگدانه‌های گیاهی، موجب افزایش تخلخل می‌شود. بهترین مقاومت نهایی در مخلوط‌های حاوی محلول NaOH با غلظت برابر با ۱۲ M و نسبت Agg/B برابر با ۲ بدست آمده است که این نتیجه را می‌توان تعاملی بین واکنش‌های شیمیایی و پر کردن منافذ ماتریس دانست. در تعامل بین افزایش مولاریته محلول NaOH و نسبت Agg/B می‌توان دو فرضیه را متصور شد: (۱) حفرات کافی در مخلوط وجود داشته باشد و افزایش واکنش‌های شیمیایی ناشی از افزایش مولاریته محلول NaOH با پر کردن آن‌ها موجب بهبود عملکرد مخلوط شود. (۲) ماتریس به اندازه‌ای متراکم باشد که حفرات کافی برای پر شدن توسط واکنش‌های شیمیایی بیشتر وجود نداشته باشد. در چنین حالتی، افزایش واکنش‌های شیمیایی موجب ایجاد تنش‌های خارجی و ریزترک‌ها در ماتریس و در نتیجه، کاهش مقاومت مخلوط می‌شود [۷۱]. در این تحقیق، افزایش مولاریته محلول NaOH، با توجه به تخلخل بالای سنگدانه‌های گیاهی که حفرات کافی برای پر شدن توسط واکنش‌های شیمیایی بیشتر را فراهم می‌کنند، موجب بهبود مقاومت نهایی نمونه‌ها شده است. جدول (۶) نشان دهنده‌ی سطوح بهینه عامل‌ها می‌باشد. سطوح بهینه برای عامل‌های Agg/B، NaOH، (M)، SS/SH و Al/B به ترتیب ۲، ۱۲، ۲/۵ و ۰/۵ بدست آمده است. علاوه بر این، شرایط تسلیح بهینه، استفاده از ۸ درصد الیاف باگاس و شرایط عمل‌آوری بهینه، عمل‌آوری حرارتی تعیین شده است. سه نمونه دیسکی از مخلوط بهینه ساخته و بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری حرارتی، مقاومت نهایی آن‌ها ارزیابی شد. نتایج نشان دهنده‌ی مقاومت نهایی برابر با ۲/۳۹ kJ برای مخلوط بهینه بود. این در حالی است که روش تاگوچی مقاومت نهایی برابر با ۲/۱۶ kJ را برای مخلوط بهینه پیش‌بینی کرده است که ۹/۶ درصد با مقدار تجربی آن اختلاف دارد. بنابراین، روش تاگوچی می‌تواند پیش‌بینی معقولانه‌ای از مقاومت نهایی مخلوط‌های ژئوپلیمری مبتنی بر پسماندهای کشاورزی داشته باشد.



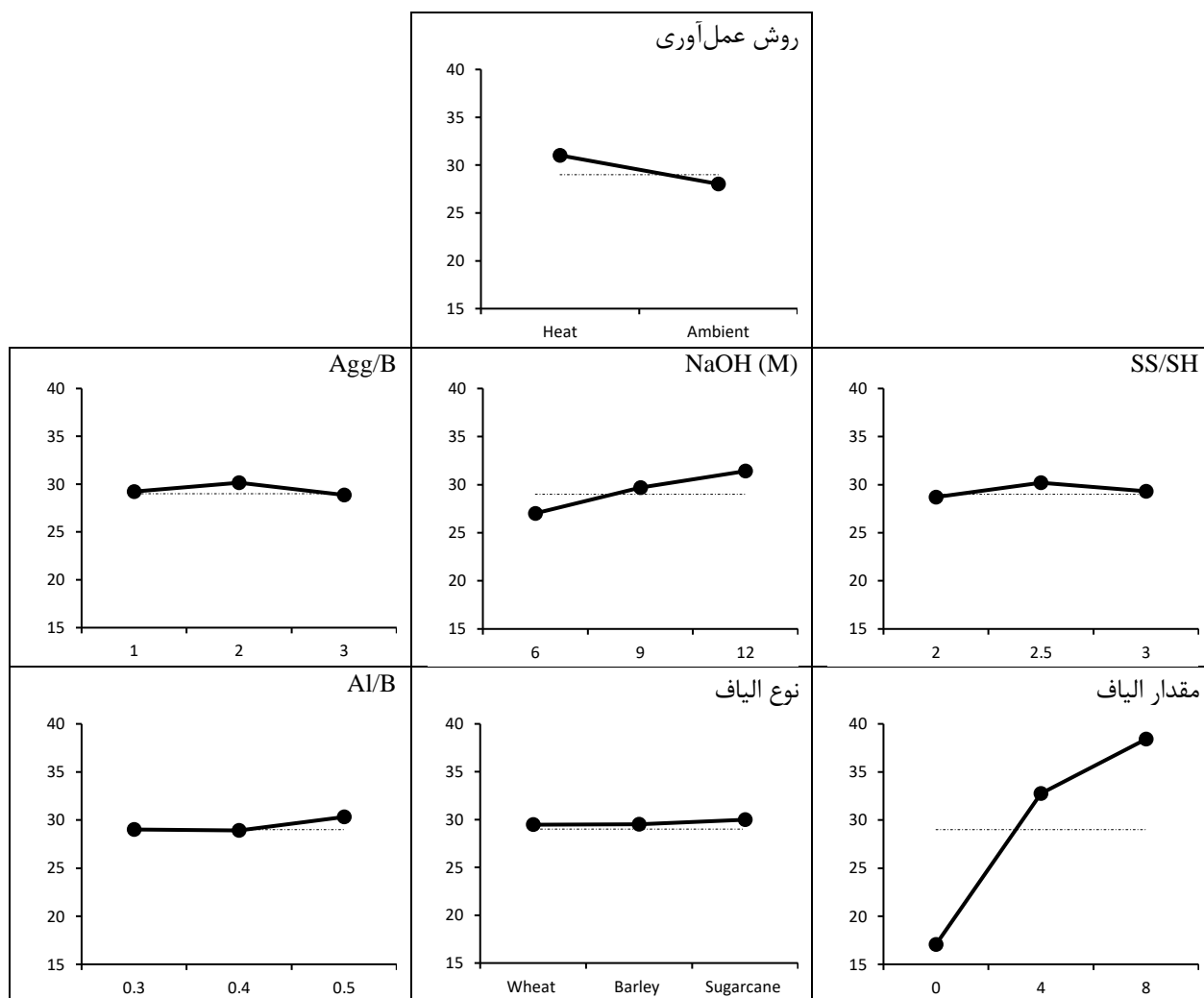
شکل ۵: جذب انرژی مخلوط‌ها تا لحظه ایجاد اولین ترک.



شکل ۶: نمودار سیگنال به نویز برای مقاومت اولین ترک.



شکل ۷: جذب انرژی مخلوطها تا لحظه گسیختگی نهایی.



شکل ۸: نمودار سیگنال به نویز برای مقاومت نهایی.

جدول ۵: درصد مشارکت و سطوح بهینه عامل‌ها برای پارامتر مقاومت اولین ترک.

عامل	روش عمل آوری	Agg/B	NaOH (M)	SS/SH	Al/B	نوع الیاف	مقدار الیاف (%)
درصد مشارکت	۹/۳	۶/۲	۱۳/۲	۷/۲	۴/۴	۴/۳	۵۵/۴
سطح بهینه	حرارتی	۲	۱۲	۲/۵	۰/۵	باگاس	۸

جدول ۶: درصد مشارکت و سطوح بهینه عامل‌ها برای پارامتر مقاومت نهایی.

عامل	روش عمل آوری	Agg/B	NaOH (M)	SS/SH	Al/B	نوع الیاف	مقدار الیاف (%)
درصد مشارکت	۹	۳/۸	۱۳/۱	۴/۵	۴/۲	۱/۶	۶۳/۹
سطح بهینه	حرارتی	۲	۱۲	۲/۵	۰/۵	باگاس	۸

### ۴-۳- تحلیل آماری نتایج

در چند دهه‌ی گذشته مدل‌های احتمالاتی متنوعی برای آنالیز آماری مقاومت ضربه‌ای بتن ارائه شده است. کارایی روش توزیع دو پارامتری Weibull در این زمینه توسط برخی محققین ثابت شده است [۷۴ و ۷۵]. بنابراین، در این تحقیق به منظور انجام آنالیز آماری بر

روی نتایج آزمایش ضربه وزنه افتان، توزیع دو پارامتری Weibull از طریق روش گرافیکی مورد استفاده قرار گرفته است [۷۶]. تابع توزیع تجمعی  $F(n)$  مربوط به قانون احتمال دو پارامتری Weibull به صورت تابع چگالی احتمال، مطابق رابطه (۴) بیان می‌شود [۷۷].

$$F(n) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{n}{u} \right)^\alpha \right] \quad (۴)$$

که در آن،  $n$  دوام ضربه‌ای بتن،  $\alpha$  شیب Weibull و  $u$  پارامتر مقیاس است. تابع  $F(n)$  بیان کننده‌ی احتمال شکست است. بنابراین، تابع احتمال بقا توسط رابطه (۵) ارائه می‌شود.

$$L(n) = 1 - F(n) = \exp \left[ - \left( \frac{n}{u} \right)^\alpha \right] \quad (۵)$$

رابطه (۶) با گرفتن دو بار لگاریتم طبیعی از طرفین رابطه (۵) حاصل شد.

$$\ln \ln \left( \frac{1}{L(n)} \right) = \alpha \ln(n) - \alpha \ln(u) \quad (۶)$$

همانطور که در روابط (۷ و ۸) نشان داده شده است، رابطه (۶) بیان کننده‌ی یک رابطه خطی میان  $\ln \ln \left( \frac{1}{L(n)} \right)$  و  $\ln(n)$  می‌باشد.

$$Y = \ln \ln \left( \frac{1}{L(n)} \right), \quad X = \ln(n), \quad \beta = \alpha \ln(u) \quad (۷)$$

$$Y = \alpha X - \beta \quad (۸)$$

تابع بقای تجربی  $L(n)$  برای داده‌های آزمایش ضربه مطابق با رابطه (۹) بدست آمد [۷۸-۸۰].

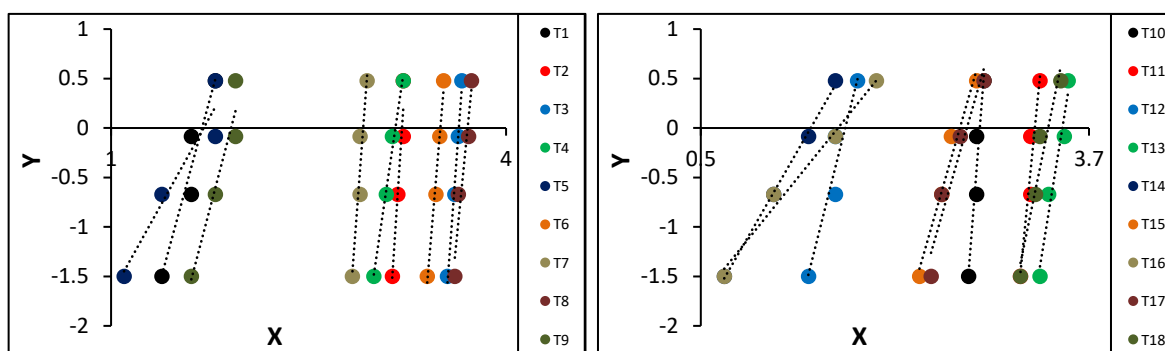
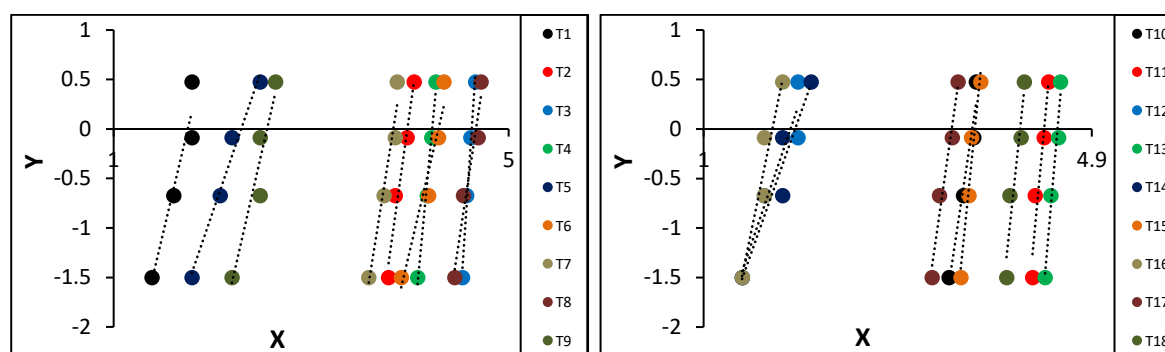
$$L(n) = 1 - \frac{i}{1+k} \quad (۹)$$

که در آن،  $i$  ترتیب شماره نمونه‌های آزمایش شده ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) و  $k$  تعداد کل نمونه‌های ضربه‌ای برای یک گروه خاص است. در این روش، نمودار بین  $X$  و  $Y$  بر اساس رابطه (۸) ترسیم شد. چنانچه بین  $X$  و  $Y$  رابطه‌ای خطی حاصل شود، این روش بعنوان یک روش آماری مناسب برای بیان مقاومت اولین ترک ( $N_1$ ) و مقاومت نهایی ( $N_2$ ) تلقی می‌شود. با توجه به معادلات بدست آمده از طریق رگرسیون خطی بین  $X$  و  $Y$ ، ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  در رابطه (۷) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) بدست آمد. آنالیز داده‌های تجربی برای مقاومت اولین ترک ( $N_1$ ) و مقاومت نهایی ( $N_2$ ) برای تمام طرح‌های مخلوط در نمودارهای اشکال (۹ و ۱۰) نشان داده شده است. علاوه بر این، ضرایب  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $R^2$  بدست آمده برای پارامترهای  $N_1$  و  $N_2$  در جدول (۷) نشان داده شده است. تمامی نتایج بدست آمده برای ضریب تعیین ( $R^2$ ) بیشتر از ۰/۹ هستند، که این موضوع نشان دهنده‌ی آن است که توزیع دو پارامتری Weibull یک روش مناسب برای تجزیه و تحلیل آماری مقاومت ضربه‌ای بتن‌های ژئوپلیمری مبتنی بر پسماندهای کشاورزی می‌باشد.

جدول ۷: رگرسیون خطی نتایج آزمایش مقاومت ضربه‌ای در توزیع آماری Weibull.

شاخص	طرح اختلاط	$\alpha$	$\beta$	$R^2$	شاخص	طرح اختلاط	$\alpha$	$\beta$	$R^2$
T1	T1	۴/۸۸	-۸/۲۵	۰/۹۱۹	T1	T1	۴/۲۱	-۷/۳۷	۰/۹۲۲
T2	T2	۲۰/۳۹	-۶۵/۴۶	۰/۹۲۵	T2	T2	۷/۱۳	-۲۸/۳۳	۰/۹۶۷
T3	T3	۱۸/۱۴	-۶۶/۰۷	۰/۹۸۹	T3	T3	۱۴/۹۹	-۶۹/۳۳	۰/۹۸۵
T4	T4	۹/۰۴	-۲۸/۵۵	۰/۹۸۹	T4	T4	۱۰/۵۸	-۴۴/۶۹	۰/۹۸۷
T5	T5	۲/۴۰	-۴/۰۸	۰/۹۲۱	T5	T5	۲/۹۱	-۶/۶۷	۰/۹۷۸
T6	T6	۱۵/۶۸	-۵۴/۸۹	۰/۹۸۸	T6	T6	۴/۲۵	-۱۸/۲۲	۰/۹۳۴
T7	T7	۱۷/۷۹	-۵۱/۸۵	۰/۹۱۵	T7	T7	۶/۲۵	-۲۳/۹۵	۰/۹۵۲
T8	T8	۱۳/۵۴	-۵۰/۱۱	۰/۹۳۲	T8	T8	۶/۵۹	-۳۰/۷۶	۰/۹۴۵
T9	T9	۵/۰۷	-۹/۶۹	۰/۹۲۳	T9	T9	۴/۳۶	-۱۱/۱۴	۰/۹۰۸
T10	T10	۱۵/۸۱	-۴۴/۲۷	۰/۹۱۵	T10	T10	۶/۶۸	-۲۴/۷۱	۰/۹۵۷
T11	T11	۱۲/۳۵	-۴۰/۱۷	۰/۹۱۶	T11	T11	۱۰/۷۹	-۴۷/۷۰	۰/۹۲۳

۰/۹۱۸	-۵/۵۳	۲/۹۵	T12	۰/۹۲۰	-۸/۲۵	۴/۸۸	T12
۰/۹۶۵	-۵۳/۳۸	۱۱/۷۲	T13	۰/۹۵۱	-۲۶/۴۱	۷/۵۹	T13
۰/۹۲۰	-۵/۴۵	۲/۸۴	T14	۰/۹۹۷	-۳	۲/۱۳	T14
۰/۹۵۴	-۳۷/۱۶	۹/۹۸	T15	۰/۹۷۰	-۱۱/۲۶	۴/۲۷	T15
۰/۹۲۰	-۸/۲۵	۴/۸۸	T16	۰/۹۸۷	-۲/۴۸	۱/۵۲	T16
۰/۹۶۷	-۲۴/۴۹	۷/۰۱	T17	۰/۹۳۵	-۱۱/۵۱	۴/۲۷	T17
۰/۹۱۹	-۳۹/۶۵	۹/۴۹	T18	۰/۹۳۴	-۲۰/۱۴	۵/۹۹	T18

شکل ۹: رگرسیون خطی مقاومت اولین ترک ( $N_1$ ) در توزیع Weibull.شکل ۱۰: رگرسیون خطی مقاومت نهایی ( $N_2$ ) در توزیع Weibull.

## ۵- نتیجه گیری

این تحقیق به بهینه‌سازی خصوصیات ضربه‌ای بتن‌های ژئوپلیمری مبتنی بر پسماندهای کشاورزی با استفاده از روش تاگوچی پرداخت. عامل‌های ورودی شامل روش عمل‌آوری (حرارتی و محیطی)، غلظت محلول سدیم هیدروکسید (۶، ۹ و ۱۲ M)، نسبت جرمی سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید (۲، ۵/۲ و ۳)، نسبت جرمی فعال کننده‌ی قلیایی به چسب (۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵)، نسبت جرمی سنگدانه به چسب (۱، ۲ و ۳)، نوع الیاف (کاه گندم، کاه جو و باگاس) و مقدار الیاف (۰، ۴ و ۸ درصد وزنی چسب) بودند که بر اساس آن، روش تاگوچی آرایه متعامد  $L_{18}(6^3 \times 1^2)$  را به منظور تعیین طرح‌های اختلاط پیشنهاد کرد. آزمایش ضربه وزنه افتان تکرار شونده بر روی نمونه‌ها انجام و نتایج زیر بصورت خلاصه حاصل شد:

(۱) عامل مقدار الیاف تاثیرگذارترین عامل در خصوصیات ضربه‌ای مخلوط‌ها بود. میزان مشارکت این عامل در مقاومت اولین ترک برابر با ۵۵/۴ درصد و در مقاومت نهایی برابر با ۶۳/۹ درصد بدست آمد. سطح بهینه این عامل برای هر دو پارامتر مقاومت اولین ترک و مقاومت نهایی برابر با ۸ درصد تعیین شد.

- (۲) افزایش مولاریته محلول NaOH موجب بهبود عملکرد ضربه‌ای نمونه‌ها شد. افزایش این پارامتر از ۶ M به ۱۲ M توانست بعلت نقش مثبتی که در آزادسازی بیشتر یون  $OH^-$  و در نتیجه تولید ژل پلیمری دارد، تاثیر مثبتی در پارامترهای مقاومت اولین ترک و مقاومت نهایی داشته باشد. سطح مشارکت این عامل در مقاومت اولین ترک و مقاومت نهایی به ترتیب برابر با ۱۳/۲ و ۱۳/۱ درصد بدست آمد.
- (۳) عامل روش عمل‌آوری نیز با سطح مشارکت ۹/۳ درصدی در مقاومت اولین ترک و ۹ درصدی در مقاومت نهایی جز عامل‌های تاثیرگذار بر عملکرد ضربه‌ای نمونه‌ها بود. عمل‌آوری حرارتی در مقایسه با عمل‌آوری محیطی توانست خصوصیات ضربه‌ای مخلوط‌های ژئوپلیمری مبتنی بر پسماندهای کشاورزی را بهبود بخشد. دلیل این امر را می‌توان در تامین حرارت مورد نیاز برای تسریع واکنش بین فعال کننده‌ی قلیایی و RHA جستجو کرد.
- (۴) سایر عامل‌ها (Al/B، SS/SH، Agg/B، و نوع الیاف) تاثیر قابل توجهی بر نتایج آزمایش مقاومت ضربه‌ای نداشتند. سطوح بهینه برای عامل‌های Al/B و SS/SH، Agg/B به ترتیب برابر با ۲، ۲/۵ و ۰/۵ بدست آمد.
- (۵) اعتبار سنجی روش تاگوچی نشان دهنده‌ی دقت قابل قبول این روش در پیش‌بینی خصوصیات ضربه‌ای بتن‌های ژئوپلیمری مبتنی بر پسماندهای کشاورزی بود. خطای پیش‌بینی روش تاگوچی نسبت به مقادیر تجربی برای مقاومت اولین ترک و مقاومت نهایی به ترتیب برابر با ۸/۱ و ۹/۶ درصد بدست آمد.
- (۶) تحلیل آماری انجام گرفته بر روی نتایج نشان داد که توزیع دو پارامتری Weibull یک توزیع آماری مناسب به منظور تجزیه و تحلیل مقاومت ضربه‌ای بتن‌های ژئوپلیمری مبتنی بر پسماندهای کشاورزی می‌باشد.

## مراجع

- [1] Živica, V. Palou, M.T. Krizma, M. (2015). Geopolymer cements and their properties: a review. *Build. Res. J*, 61, 85–100.
- [2] Mohammed, N. Bashdar Omer, S. Salah Jamal, A. Hunar Dheyaldin, M. (2023). Performance of cement mortar modified with GGBFS at elevated temperatures with various w/b ratios and superplasticizer dosages. *Construction and Building Materials*, 368, 130493.
- [3] Sahraei Moghadam, A. Omidinasab, F. Moazami Goodarzi, S. (2021). Characterization of concrete containing RCA and GGBFS: Mechanical, microstructural and environmental properties. *Construction and Building Materials*, 289, 123134.
- [4] Samad, S. Shah, A. (2017). Role of binary cement including Supplementary Cementitious Material (SCM), in production of environmentally sustainable concrete: A critical review. *Int. J. Sust. Built. Env*, 6, 663–674.
- [5] Gursel, A.P. Maryman, H. Ostertag, C. (2016). A life-cycle approach to environmental, mechanical, and durability properties of “green” concrete mixes with rice husk ash. *J. Clean Prod*, 112, 823–836.
- [6] Chang, Zh. Long, G. Xie, Y. Zhou, J.L. (2022). Chemical effect of sewage sludge ash on early-age hydration of cement used as supplementary cementitious material. *Construction and Building Materials*, 322, 126116.
- [7] Chindapasirt, P. Jaturapitakkul, C. Rattanasak, U. (2009). Influence of fineness of rice husk ash and additives on the properties of lightweight aggregate. *Fuel*, 88 (1), 158-162.
- [8] Kumar Dasad, Sh. Adediran, A. Rodrigue Kaze, C. Mustakim, S.M. Lekloue, N. (2022). Production, characteristics, and utilization of rice husk ash in alkali activated materials: An overview of fresh and hardened state properties. *Construction and Building Materials*, 345, 128341.
- [9] Rukzon, S. Chindapasirt, P. Mahachai, R. (2009). Effect of grinding on chemical 424 and physical properties of rice husk ash, *International Journal of Minerals. Metallurgy and Materials*, 16 (2), 242-247.
- [10] Sampaio, D. Tashima, M. Costa, D. Quinteiro, P. Dias, A.C. Akasaki, J. (2022). Evaluation of the environmental performance of rice husk ash and tire rubber residues incorporated in concrete slabs. *Construction and Building Materials*, 357, 129332.
- [11] Uysal, M. Aygörmez, Y. Canpolat, O. Cosgun, T. Kuranlı, F. (2022). Investigation of using waste marble powder, brick powder, ceramic powder, glass powder, and rice husk ash as eco-friendly aggregate in sustainable red mud-metakaolin based geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 361, 129718.
- [12] Bie, R.S. Song, X.F. Liu, Q.Q. Ji, X.Y. Chen, P. (2015). Studies on effects of burning conditions and rice husk ash (RHA) blending amount on the mechanical behavior of cement. *Cement and Concrete Composites*, 55, 162-168.

- [13] Bayraktar, O.Y. Eshtewi, S.S.T. Benli, A. Kaplan, G. Toklu, K. Gunek, F. (2021). The impact of RCA and fly ash on the mechanical and durability properties of polypropylene fibre-reinforced concrete exposed to freeze-thaw cycles and MgSO<sub>4</sub> with ANN modelling. *Construction and Building Materials*, 313, 125508.
- [14] Xiao, J. Xie, H. Zhang, C. (2012). Investigation on building waste and reclaim in Wenchuan earthquake disaster area. *Resour Conserv Recycl*, 61, 109–17.
- [15] Poon, C.S. Chan, D. (2007). The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong. *Resour Conserv Recycl*, 50 (3), 293–305.
- [16] Vazquez, E. Bara, M. (1996). the influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete. *Waste management*, 16 (3), 113- 117.
- [17] Lagouin, M. Magniont, C. Sénéchal, P. Moonen, P. Aubert J.E. Laborel-préneron, A. (2019). Influence of types of binder and plant aggregates on hygrothermal and mechanical properties of vegetal concretes. *Construction and Building Materials*, 222, 852–871.
- [18] Laborel-Préneron, A. Aubert, J.E. Magniont, C. Tribout, C. Bertron, A. (2016). Plant aggregates and fibers in earth construction materials: A review. *Construction and Building Materials*, 111, 719–734.
- [19] Memona, S.A. Javed, U. Arsalan Khushnood, R. (2019). Eco-friendly utilization of corncob ash as partial replacement of sand in concrete. *Construction and Building Materials*, 195, 165–177.
- [20] Sahraei Moghadam, A. Omidinasab, F. Dalvand, A. (2020). Experimental investigation of (FRSC) cementitious composite functionally graded slabs under projectile and drop weight impacts. *Construction and Building Materials*, 237, 117522.
- [21] Sahraei Moghadam, A. Omidinasab, F. (2020). Assessment of hybrid FRSC cementitious composite with emphasis on flexural performance of functionally graded slabs. *Construction and Building Materials*, 250, 118904.
- [22] Sahraei Moghadam, A. Omidinasab, F. Abdalikia, M. (2021). The effect of initial strength of concrete wastes on the fresh and hardened properties of recycled concrete reinforced with recycled steel fibers. *Construction and Building Materials*, 300, 124284.
- [23] Sahraei Moghadam, A. Omidinasab, F. (2021). Flexural and impact performance of functionally graded reinforced cementitious composite (FGRCC) panels. *Structures*, 29, 1723–1733.
- [24] Omidinasab, F. Sahraei Moghadam, A. (2021). Effect of Purposive Distribution of Fibers to Prevent the Penetration of Bullet in Concrete Walls. *KSCE J Civ Eng*, 25, 843–853.
- [25] Mastali, M. Dalvand, A. Sattarifard, A.R. Abdollahnejad, Z. Illikainen, M. (2018). Characterization and optimization of hardened properties of selfconsolidating concrete incorporating recycled steel, industrial steel, polypropylene and hybrid fibers. *Composites Part B*, 151, 186–200.
- [26] Omidinasab, F. Moazami Goodarzi, S. Sahraei Moghadam, A. (2022). Characterization and Optimization of Mechanical and Impact Properties of Steel Fiber Reinforced Recycled Concrete. *International Journal of Civil Engineering*, 20, 41–55.
- [27] Spinella, N. (2013). Shear strength of full-scale steel fibre-reinforced concrete beams without stirrups. *Comput. Concr*, 11, 365–382.
- [28] Lourenco, L. Zamanzadeh, Z. Barros, J.A.O. Rezazadeh, M. (2018). Shear strengthening of RC beams with thin panels of mortar reinforced with recycled steel fibres. *J. Clean.Prod*, 194, 112–126.
- [29] Laborel-Préneron, A. Aubert, J.E. Magniont, C. Tribout, C. Bertron, A. (2016). Plant aggregates and fibers in earth construction materials: a review. *Constr. Build. Mater*, 111, 719–734.
- [30] Giroudon, M. Laborel-Préneron, A. Aubert, J.E. Magniont, C. (2019). Comparison of barley and lavender straws as bioaggregates in earth bricks. *Construction and Building Materials*, 202, 254–265.
- [31] Hernández-Olivares, F. Medina-Alvarado, R.E. Burneo-Valdivieso X.E. Zúñiga-Suárez, A.R. (2020). Short sugarcane bagasse fibers cementitious composites for building construction. *Construction and Building Materials*, 247, 118451.
- [32] Giroudon, M. Laborel-Préneron, A. Aubert, J.E. Magniont, C. (2019). Comparison of barley and lavender straws as bioaggregates in earth bricks. *Construction and Building Materials*, 202, 254–265.
- [33] Rahman, M.A. Muniyandi, R. Albashish, D. Rahman, M.M. Usman, O.L. (2021). Artificial neural network with taguchi method for robust classification model to improve classification accuracy of breast cancer. *Peer. J. Comput. Sci*, 7, 317-344.
- [34] Kelestemur, O. Arıcı, E. Yıldız, S. Gökçer, B. (2014). Performance evaluation of cement mortars containing marble dust and glass fiber exposed to high temperature by using Taguchi method. *Constr. Build. Mater*, 60, 17–24.
- [35] Ying-Yi, H. Manh-Tuan, N. (2020). Optimal allocation of STATCOM for enhancing LVRT capability of wind farms using taguchi method, *IET Gen. Transmission Distrib*, 14 (25), 6371–6381.

- [36] Teimortashlu, E. Dehestani, M. Jalal, M. (2018). Application of Taguchi method for compressive strength optimization of tertiary blended self-compacting mortar. *Construction and Building Materials*, 190, 1182–1191.
- [37] Jelili, B.H. Moruf, O.O. Oluseye, O.A. Quadri, A. (2021). Optimization of processing parameters for drying of tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.var) slices using taguchi technique. *J. Food Process. Preserv*, 45 (2), 15149.
- [38] Shemal, V.D. Ankur, B. (2020). The strength oriented mix design for geopolymer concrete using taguchi method and indian concrete mix design code. *Constr. Build. Mater*, 62, 120853.
- [39] Zabihi, L.M. Tavakoli, H.R. Mohseni, E. (2018). Engineering and Microstructural Properties of Fiber-Reinforced Rice Husk–Ash Based Geopolymer Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 04018183.
- [40] Rattanachu, P. Toolkasikorn, P. Tangchirapat, W. Chindaprasirt, P. Jaturapitakkul, Ch. (2018). Performance of recycled aggregate concrete with rice husk ash as cement binder. *Cement and Concrete Composites*, 108, 103533.
- [41] Ozturk, E. Ince, C. Derogar, Sh. Ball, R. (2022). Factors affecting the CO<sub>2</sub> emissions, cost efficiency and eco-strength efficiency of concrete containing rice husk ash: A database study. *Construction and Building Materials*, 326, 126905.
- [42] Ning, L. Bing, C. (2016). Experimental Investigation Concrete Using Magnesium Phosphate Cement, Fly Ash, and Rape Stalk. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28 (4), 04015163.
- [43] Ahmad. M.R. Chenab, B. (2015). Influence of type of binder and size of plant aggregate on the hygrothermal properties of bio-concrete. *Construction and Building Materials*, 251, 118981.
- [44] Shao, K. Du, Y. Zhou, F. (2021). Feasibility of using treated corn cob aggregates in cement mortars. *Construction and Building Materials*, 271, 121575.
- [45] Wongsu, A. Kunthawatwong, R. Naenudon, S. Sata, V. Chindaprasirt, P. (2020). Natural fiber reinforced high calcium fly ash geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 241, 118143.
- [46] Alomayri, T. Shaikh, F.U.A. Low, I.M. (2013). Characterisation of cotton fibre-reinforced geopolymer composites. *Compos. B Eng*, 50, 1–6.
- [47] Ye, H. Zhang, Y. Yu, Z. Mu, J. (2018). Effects of cellulose, hemicellulose, and lignin on the morphology and mechanical properties of metakaolin-based geopolymer. *Constr. Build. Mater*, 173, 10–16.
- [48] Yan, L. Chouw, N. Huang, L. Kasal, B. (2016). Effect of alkali treatment on microstructure and mechanical properties of coir fibres, coir fibre reinforced-polymer composites and reinforced-cementitious composites. *Constr. Build. Mater*, 112, 168–182.
- [49] Korniejenko, K. Fra, czek, E. Pytlak, E. Adamski, M. (2016). Mechanical Properties of Geopolymer Composites Reinforced with Natural Fibers. *Procedia Eng*, 151, 388–393.
- [50] ASTM. 2011. Standard test methods for sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use in portland-cement concrete. ASTM C311. Philadelphia, PA: ASTM.
- [51] Zabihi, S.M. Tavakoli, H.R. (2019). Evaluation of monomer ratio on performance of GGBFS-RHA alkali-activated concretes. *Construction and Building Materials*, 208, 326–333.
- [52] Tang, Z. Li, G. Lu, S. Wang, J. Chi, L. (2022). Enhance mechanical damping behavior of RHA-cement mortar with bionic inorganic-organic laminated structures. *Construction and Building Materials*, 323, 126521.
- [53] Ning, S. Bing, C. (2015). Ning, L. Bing, C. (2016). Experimental Investigation Concrete Using Magnesium Phosphate Cement, Fly Ash, and Rape Stalk. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28 (4), 04015163.
- [54] Laborel-Préneron, A. Aubert, J.E. Magniont, C. Tribout, C. Bertron, A. (2016). Plant aggregates and fibers in earth construction materials: A review. *Construction and Building Materials*, 111, 719–734.
- [55] Mittal, V. Sinha, Sh. (2018). Mechanical, thermal, and water absorption properties of wheat straw/bagasse-reinforced epoxy blended composites. *Adv Polym Technol*, 37 (7), 2497-2503.
- [56] Ammari, M.S. Belhadj, B. Bederina, M. Ferhat, A. Quéneudec, M. (2020). Contribution of hybrid fibers on the improvement of sand concrete properties: Barley straws treated with hot water and steel fibers. *Construction and Building Materials*, 233, 117374.
- [57] Hernández-Olivares, F. Medina-Alvarado, R.E. Burneo-Valdivieso, X.E. Zúñiga-Suárez, A.R. (2020). Short sugarcane bagasse fibers cementitious composites for building construction. *Construction and Building Materials*, 247, 118451.
- [58] Belhadj, B. Bederina, M. Makhoulfi, Z. Dheilily, R.M. Montrelay, N. Quéneudéc, M. (2016). Contribution to the development of a sand concrete lightened by the addition of barley straws. *Construction and Building Materials*, 113, 513–522.
- [59] Onoue, K. Iwamoto, T. Sagawa, Y. (2019). Optimization of the design parameters of fly ash-based geopolymer using the dynamic approach of the Taguchi method. *Construction and Building Materials*, 219, 1–10.

- [60] Mastali, M. Mohammad Shaad, K. Abdollahnejad, Z. Falah, M. Kinnunen, P. Illikainen, M. (2020). Towards sustainable bricks made with fiber-reinforced alkali-activated bdesulfurization slag mortars incorporating carbonated basic oxygen furnace aggregates. *Construction and Building Materials*, 232, 117258.
- [61] Hadi, M.N.S. Farhan, N.A. Sheikh, M.N. (2017). Design of geopolymer concrete with GGBFS at ambient curing condition using Taguchi method. *Construction and Building Materials*, 140, 424–431.
- [62] Hongen, Z. Feng, J. Qingyuan, W. Ling, T. Xiaoshuang, S. (2017). Influence of Cement on Properties of Fly-Ash-Based Concrete. *ACI Mater. J*, 114 (5) 745-753.
- [63] Zhang, H. Li, L. Yuan, C. Wanga, Q. Sarke, P.K. Shi, X. (2020). Deterioration of ambient-cured and heat-cured fly ash geopolymer concrete by high temperature exposure and prediction of its residual compressive strength. *Construction and Building Materials*, 262, 120924.
- [64] ACI Committee 544, Measurement of properties of fiber reinforced concrete, *ACI Mater. J.* 85 (1988) 583–593.
- [65] Bouhicha, M. Aouissi, F. Kenai, S. (2005). Performance of composite soil reinforced with barley straw. *Cem. Concr. Compos*, 27, 617–621.
- [66] Aymerich, F. Fenu, L. Meloni, P. (2012). Effect of reinforcing wool fibres on fracture and energy absorption properties of an earthen material. *Constr. Build. Mater*, 27, 66–72.
- [67] Galán-Marín, C. Rivera-Gómez, C. Petric, J. (2010). Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre. *Constr. Build. Mater*, 24, 1462–1468.
- [68] Shaikh, F.U.A. Vimonsatit, V. (2015). Compressive strength of fly-ash-based geopolymer concrete at elevated temperatures. *Fire Mater*, 39 (2), 174–188.
- [69] Nuruddin, M.F. Demie, S. Ahmed, M.F. Shafiq, N. (2011). Effect of superplasticizer and NaOH molarity on workability, compressive strength and microstructure properties of self-compacting geopolymer concrete. *International Journal of Geological and Environmental Engineering*, 5 (3), 187-194.
- [70] Dave, M.S.V. Bhogayata, A. Arora, N.K. (2021). Mix design optimization for fresh, strength and durability properties of ambient cured alkali activated composite by Taguchi method. *Construction and Building Materials*, 284, 122822.
- [71] Abdollahnejad, Z. Dalvand, A. Mastali, M. Luukkonen, T. Illikainen, M. (2018). Effects of waste ground glass and lime on the crystallinity and strength of geopolymers. *Magazine of Concrete Research*, 71 (23), 1218-1231.
- [72] Patila, A.A. Chore, H.S. Dodeb, P.A. (2014). Effect of curing condition on strength of geopolymer concrete. *Advances in Concrete Construction*, 20 (1), 29–37.
- [73] Hassan, A. Arif, M. Shariq, M. (2019). Effect of curing condition on the mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete. *SN Applied Sciences*, 1, 1694.
- [74] Li, J. Zhang, K. Deng, Z. (2007). Distribution regularity of flexural impact resistance of synthetic macro-fiber reinforced concrete. *Journal of Architectural Engineering*, 24, 54–59.
- [75] Raif, S. Irfan, A. (2008). Statistical analysis of bending fatigue life data using Weibull distribution in glass-fiber reinforced polyester composites. *Materials & Design*, 29, 1170–1181.
- [76] Goel, S. Singh, S.P. Singh, P. (2012). Fatigue analysis of plain and fiber-reinforced self-consolidating concrete. *ACI Materials Journal*, 109 (5), 573–582.
- [77] Ding, Y. Li, D. Zhang, Y. Azevedo, C. (2017). Experimental investigation on the composite effect of steel rebars and macro fibers on the impact behavior of high performance self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 136, 495–505.
- [78] Mastali, M. Dalvand, A. Sattarifard, A.R. Abdollahnejad, Z. Illikainen, M. (2018). Characterization and optimization of hardened properties of selfconsolidating concrete incorporating recycled steel, industrial steel, polypropylene and hybrid fibers. *Composites Part B*, 151, 186–200.
- [79] Li, H. Zhang, M. Ou, J. (2007). Flexural fatigue performance of concrete containing nanoparticles for pavement. *International Journal of Fatigue*, 29, 1292–1301.
- [80] Wang, L. Wang, H. Jia, J. (2009). Impact resistance of steel-fibre-reinforced lightweight-aggregate concrete. *Magazine of Concrete Research*, 67, 539–547.