



University Of Qom



## Investigating the Static and Dynamic Behavior of Structural Lightweight Concrete Containing Nano-Silica and Steel Fibers

Fatimah Altalib<sup>1</sup>, Hamid Reza Tavakoli<sup>2✉</sup>, Seyed Komail Hashemi<sup>3</sup>

1. Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran. E-mail: [fatima.altalib@mail.ru](mailto:fatima.altalib@mail.ru)
2. Corresponding author, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran. E-mail: [tavakoli@nit.ac.ir](mailto:tavakoli@nit.ac.ir)
3. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran. E-mail: [k.hashemi@nit.ac.ir](mailto:k.hashemi@nit.ac.ir)

### Article Info

#### Article type:

Research Article

#### Article history:

Received 20 May 2023

Revised 29 Oct 2023

Accepted 29 Oct 2023

#### Keywords:

Structural Lightweight Concrete,  
Metal Reinforcing Fibers,  
Nano Silica,  
Dynamic Behavior,  
Static Behavior.

### ABSTRACT

*The primary goal of engineering design of buildings is to reduce the weight of the structure and its resistance to earthquakes and explosions because the occurrence of these events is inevitable. In this research, lightweight concrete has been used due to its unique advantages in weight reduction, and attention has also been paid to increasing the resistance and behavior of this concrete in the face of any type of accident and investigating its static and dynamic behavior. The dynamic behavior of concrete has been studied by using Hopkinson compression machine at three strain rates of 100, 200 and 300/s. Static and dynamic properties of concrete include compressive strength, modulus of elasticity, and dynamic increase modulus. For this purpose, a study has been conducted on 8 mixing designs for samples without metal fibers and nanosilica and samples containing different percentages of nanosilica and metal fibers. The results have shown that nanosilica and metal fibers play a role in improving compressive strength and the best results are obtained by adding 3% nanosilica and 1% metal fibers. Nanoparticles are more effective in static loads because the pozzolanic interactions of nanosilica improves the microstructure, and in dynamic loads, nanoparticles are less efficient due to nano's sensitivity to high loads, and also metal fibers prevent cracks in concrete. In this study, a mathematical relationship for the dynamic increase coefficient has also been extracted and compared with the experimental results.*

**Cite this article:** Altalib F, Tavakoli H, Hashemi SK. Investigating the Static and Dynamic Behavior of Structural Lightweight Concrete Containing Nano-Silica and Steel Fibers. Civil Infrastructure Researches. 2024; 10(1): 85-107. <https://doi.org/10.22091/cer.2023.9673.1497>



## بررسی رفتار استاتیکی و دینامیکی بتن سبک سازه ای حاوی نانو سیلیس و الیاف فلزی

فاطمه الطالب<sup>۱</sup>، حمیدرضا توکلی<sup>۲</sup>، سید کمیل هاشمی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری، گروه سازه و زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران. رایانامه: [fatima.altalib@mail.ru](mailto:fatima.altalib@mail.ru)
۲. نویسنده مسئول، دانشیار، گروه سازه و زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران. رایانامه: [tavakoli@nit.ac.ir](mailto:tavakoli@nit.ac.ir)
۳. استادیار، گروه سازه و زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران. رایانامه: [k.hashemi@nit.ac.ir](mailto:k.hashemi@nit.ac.ir)

### چکیده

هدف اولیه طراحی مهندسی ساختمان‌ها کاهش وزن سازه و مقاومت آن در برابر زلزله و انفجار است، زیرا وقوع این حوادث اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. در این تحقیق از بتن سبک به دلیل مزایای منحصر به فرد آن در کاهش وزن استفاده شده و همچنین به افزایش مقاومت و رفتار این بتن در مواجهه با هر نوع حادثه و بررسی رفتار استاتیکی و دینامیکی آن توجه شده است. رفتار دینامیکی بتن با استفاده از دستگاه هایپکینسون فشاری در سه نرخ کرنش ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ بر ثانیه مورد مطالعه قرار گرفته است. خواص استاتیکی و دینامیکی بتن شامل مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و مدول افزایش دینامیکی است. برای این منظور، مطالعه‌ای بر روی هشت طرح اختلاط برای نمونه‌های فاقد الیاف فلزی و نانوسیلیس و نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف نانوسیلیس و الیاف فلزی انجام شده است. نتایج نشان داد که نانوسیلیس و الیاف فلزی در بهبود مقاومت فشاری نقش دارند و بهترین نتایج با افزودن ۳ درصد نانوسیلیس و ۱ درصد الیاف فلزی به دست آمده است. نانوذرات در بارهای استاتیکی مؤثرتر می‌باشند، زیرا فعل و انفعالات پوزولانی نانوسیلیس باعث بهبود ریزساختار می‌شود و در بارهای دینامیکی، نانوذرات به دلیل حساسیت نانو به بارهای زیاد کارایی کمتری دارند و همچنین الیاف فلزی از ایجاد ترک در بتن جلوگیری می‌کنند. در این مطالعه نیز یک رابطه ریاضی برای ضریب افزایش دینامیکی، استخراج و با نتایج تجربی مقایسه شده است.

### اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۰۷

### کلیدواژه‌ها:

بتن سبک سازه ای،  
الیاف تقویت کننده فلزی،  
نانوسیلیس،  
رفتار دینامیکی،  
رفتار استاتیکی.

استناد: الطالب فاطمه، توکلی حمیدرضا، هاشمی سید کمیل. بررسی رفتار استاتیکی و دینامیکی بتن سبک سازه‌ای حاوی نانوسیلیس و الیاف فلزی. پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی. ۱۴۰۳؛ ۱۰(۱): ۸۵-۱۰۷. <https://doi.org/10.22091/cer.2023.9673.1497>

## ۱- مقدمه

پرداختند. آن‌ها در پژوهش خود بیان نمودند که بتن دارای شکنندگی بالا و مقاومت کششی و کرنش کششی پایین است. چنین عملکرد نامطلوبی را می‌توان با افزودن الیاف فولادی در بتن بهبود بخشید. نتایج نشان داد که افزودن محتویات و طول‌های مختلف الیاف فولادی با افزایش نسبت آب به سیمان باعث تغییر قابل توجهی در خواص مکانیکی بتن می‌شود. نتایج افزایش حدود ۱۰ تا ۲۵ درصدی مقاومت فشاری و حدود ۳۱ تا ۴۷ درصدی در استحکام کششی را تأیید می‌نماید [۳].

آلتون<sup>۲</sup> و همکاران، به بررسی رفتار تیر بتن مسلح ساخته شده از بتن سبک که در آن الیاف فلزی اضافه شده پرداختند و تأثیر آن بر رفتار تیرهای بتن آرمه مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج به دست آمده از این پژوهش مشخص گردید که افزودن الیاف فولادی باعث افزایش ظرفیت چقرمگی تیرهای بتنی منشوری و شکل‌پذیری آن‌ها می‌شود و همچنین مقاومت باربری و شکل‌پذیری تیرهای بتن مسلح را افزایش می‌دهد [۴].

محققان به انجام آزمایش‌های تجربی بر روی چهار تیر بتنی سبک با و بدون الیاف فولادی تقویت‌کننده، تحت بارهای یکنواخت و چرخه معکوس، به منظور بررسی تأثیر تقویت‌کننده الیاف بر مقاومت، شکل‌پذیری و انرژی اتلاف شده پرداختند [۵].

چیو<sup>۳</sup> و همکاران، به بررسی تأثیر الیاف‌های تقویت‌کننده بر روی مقاومت و چقرمگی بتن سبک پرداختند. سه نوع الیاف مختلف از نظر مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی، استحکام برشی و چقرمگی مقایسه شدند. استفاده از ۱/۵ درصد الیاف وینیلون به طور قابل توجهی مقاومت خمشی بتن سبک را بهبود بخشید و استفاده از الیاف فولادی به مقدار ۱/۲ درصد، چقرمگی شکست بتن سبک را بیش از ۱۲ برابر افزایش داد [۶].

بتن به دلیل سهولت استفاده و هزینه کم، پرمصرف‌ترین ماده در ساخت‌وساز در سراسر جهان است. مقاومت فشاری آن یکی از مهمترین دلایل استقبال از این ماده است. بتن مورد استفاده در این تحقیق بتن سبک (LWC<sup>۱</sup>) است که استفاده از آن توسط مهندسان در سال‌های اخیر افزایش یافته است، زیرا سازه سنگین و مصالح سنتی عواقب زیادی بر سازه دارند. در صورت استفاده از بتن سبک با کاهش وزن باعث افزایش ایمنی سازه و مقاومت آن در برابر زلزله می‌شود بدون اینکه تأثیری بر استحکام آن داشته باشد.

همچنین LWC مزایای دیگری نیز دارد. حجم ضایعات این نوع بتن از بتن معمولی کمتر است، چراکه اخیراً به موضوع محیط‌زیست و آلودگی آن توجه زیادی شده است و مواد طبیعی که باعث تخریب محیط‌زیست نمی‌شوند مورد توجه ویژه قرار گرفته‌اند. این نوع بتن حاوی هوا است، به همین دلیل حجم ضایعات آن در هنگام تخریب کمتر از بتن معمولی است. بنابراین استفاده از LWC به دلیل مزایای اساسی آن از جمله سبکی، عایق حرارتی، کاهش هزینه‌های تولید و حمل‌ونقل و مقاومت کافی در برابر زلزله بسیار اهمیت دارد.

محققین همواره مشتاق تقویت بتن با برخی مواد افزودنی و جایگزین کردن آن با سیمان بوده‌اند [۱ و ۲]. این مواد افزودنی به بهبود مقاومت بتن کمک کرده‌اند. با توجه به اینکه LWC به دلیل وزن مخصوص کمتر، از مقاومت کمتری برخوردار است، محققان همواره سعی در بهبود خواص مکانیکی آن با افزودن مواد افزودنی داشته‌اند. از جمله این افزودنی‌ها می‌توان به الیاف فولادی و نانوسیلیس اشاره کرد.

عباس و همکاران، به ارزیابی خواص مکانیکی بتن مسلح با مقاومت‌های متفاوت به همراه الیاف مختلف

<sup>2</sup>- Altun

<sup>3</sup>- Choi

<sup>1</sup>-Light Weight Concrete

و همکاران در مطالعه خود دریافتند که افزودن نانوسیلیس به عنوان جایگزین سیمان در ۱، ۳ و ۵ درصد باعث بهبود ریزساختار سیمان و افزایش مقاومت فشاری آن می‌شود [۱۸].

عامل مؤثر در رفتار مواد پایه سیمانی مانند بتن، نرخ بارگذاری است [۱۹]. به این معنی که خواص مکانیکی بتن به نرخ بارگذاری اعمال شده بستگی دارد [۲۰]. مطالعات متعددی برای بررسی اثر سرعت بارگذاری بر رفتار دینامیکی بتن انجام شده است که در برخی از آنها مشاهده شده است که مقاومت فشاری بتن به صورت خطی با افزایش نرخ کرنش افزایش می‌یابد [۲۱-۲۳].

در نرخ کرنش بالا، توافق کمتری بین مطالعات مختلف وجود دارد. برخی مشاهده کرده‌اند که تا نرخ کرنش ۸۰۰ بر ثانیه، رابطه خطی بین مقاومت فشاری و نرخ کرنش حفظ می‌شود [۲۴]. در حالی که برخی از محققان رابطه بین مقاومت فشاری و نرخ کرنش را به صورت منحنی دارای تقعر در نظر می‌گیرند [۲۵ و ۲۶]. بنابراین هدف بهبود مقاومت بتن سبک در برابر بارهای استاتیکی و بارهای دینامیکی ناشی از زلزله و بلایای طبیعی با استفاده از افزودن نانوذرات و الیاف است. پس از آن، رفتار استاتیکی بتن مانند مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و منحنی تنش-کرنش با استفاده از دستگاه آزمون استاتیکی بررسی شد. همچنین رفتار دینامیکی نمونه‌ها مانند مقاومت فشاری دینامیکی با دستگاه هاپکینسون<sup>۶</sup> بررسی شد. منحنی تنش-کرنش دینامیکی و ضریب افزایش دینامیکی با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش هاپکینسون برای سه نرخ کرنش ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ بر ثانیه به دست آمده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

حسن‌پور و همکاران، به بررسی مقالات مروری در زمینه تقویت بتن سبک با تقویت‌کننده‌های الیافی پرداختند. در این پژوهش تأثیر افزودن الیاف بر مقاومت فشاری، رفتار تنش-کرنش، استحکام کششی، مدول الاستیسیته و چقرمگی فشاری و خمشی بررسی شده است [۷]. براساس نتایج ارائه شده توسط برخی از محققان الیاف، تأثیر قابل توجهی بر مقاومت فشاری بتن ندارد [۸-۱۰]. طبق مطالعات انجام شده می‌توان گفت که استفاده از الیاف نمی‌تواند بهبود کاملی در شرایط LWC ایجاد کند.

وانگ<sup>۴</sup> و همکاران، به بررسی تجربی اثر نانوسیلیس بر مقاومت فشاری و حساسیت به ترک‌خوردگی اولیه بتن سنگدانه سبک پرداختند. نتایج نشان داد که اضافه کردن ۳ درصد نانوسیلیس، استحکام فشاری بتن را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد [۱۱].

آتماکا<sup>۵</sup> و همکاران، به بررسی اثرات نانوسیلیس بر نفوذپذیری، دوام و خواص مکانیکی بتن سبک با مقاومت بالا پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش جایگزینی سنگدانه‌های درشت با نانوسیلیس بر خواص استحکام و نفوذپذیری تأثیر منفی می‌گذارد [۱۲].

بسطامی و همکاران در پژوهشی، تغییرات مقاومت فشاری و کششی بتن را با تقویت‌کننده نانوسیلیس مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه شش نمونه با درصد‌های مختلف نانوسیلیس و دو نمونه بدون نانوسیلیس مورد آزمایش قرار گرفتند که نتایج نشان داد افزودن نانوسیلیس باعث افزایش استحکام فشاری و کششی، نفوذپذیری و کاهش جرم می‌شود [۱۳].

محققان دریافتند که افزودن ۴ درصد نانوسیلیس با جایگزینی آن با سیمان منجر به بهبود مقاومت فشاری می‌شود و هرچه میزان نانوسیلیس افزوده شده از ۴ درصد فراتر رود، اثر مثبت آن کاهش می‌یابد [۱۴-۱۷]. احمدی

<sup>4</sup>- Wang

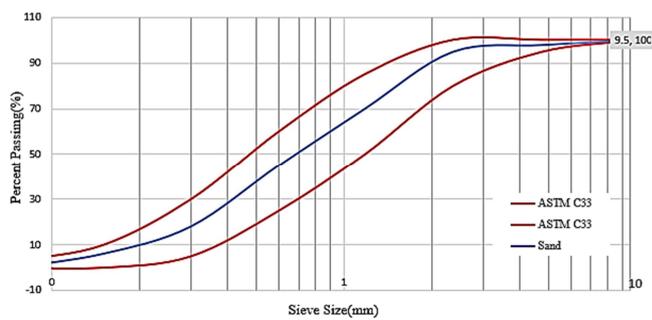
<sup>5</sup>- Atmaca

<sup>6</sup>- Hopkinson

ریزدانه مورد استفاده، ماسه بوده است که بزرگ‌ترین بعد آن ۴/۷۵ میلیمتر می‌باشد. آزمایش دانه‌بندی برحسب استاندارد ASTM C33 انجام شد که نتایج این آزمایش برای ریزدانه ماسه در شکل ۱-ب، ارائه شده است [۲۸].

### ۳-۲- سیمان

سیمان به‌کار رفته در این پژوهش سیمان مازندران و از نوع تیپ ۲ می‌باشد که مشخصات آن در جدول ۲، ارائه شده است. این سیمان به‌عنوان سیمان پرتلند اصلاح‌شده، مصرف ویژه آن در ساخت بتن‌هایی است که حرارت هیدراتاسیون متوسط برای آن‌ها ضرورت داشته و حمله سولفات‌ها به آن در حد متوسط باشد. این سیمان در مقایسه با سیمان تیپ یک حرارت کمتری تولید می‌کند و به دلیل سرعت پایین هیدراتاسیون سرعت گیرش سیمان پرتلند تیپ ۲ کندتر از سیمان تیپ ۱ می‌باشد. بنابراین می‌توان در ساخت سازه‌های نسبتاً حجیم، پایه پل‌ها، دیوارهای حائل سنگین و بتن‌ریزی در هوای گرم از این نوع سیمان استفاده نمود.



(ب)

در این بخش مواد و دستگاه‌های به‌کار رفته برای انجام این پژوهش به‌طور کامل ارائه شده است.

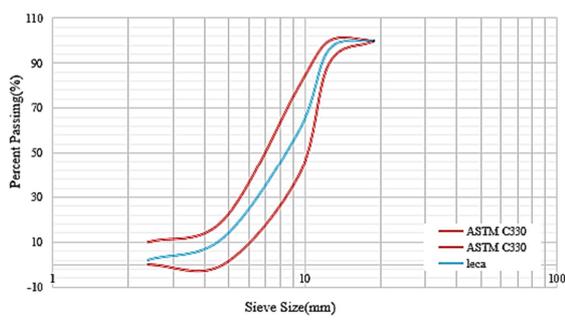
### ۱-۲- درشت‌دانه (لیکا)

درشت‌دانه مورد استفاده برای ساخت بتن سبک موردنظر از نوع لیکا بوده است که تولید شرکت لیکا می‌باشد. این ماده از نوع لیکا سازه‌ای با بزرگ‌ترین اندازه ۱۲ میلی‌متر بوده است. آزمایش دانه‌بندی برحسب استاندارد ASTM C330، برای تعیین بزرگ‌ترین مقدار این نمونه‌ها، انجام شد [۲۷]. خواص مکانیکی و فیزیکی این مواد در جدول ۱، ارائه شده است. نمودار دانه‌بندی درشت‌دانه لیکای به‌کار رفته در این پژوهش نیز در شکل ۱-الف، ارائه شده است.

جدول ۱- خواص مکانیکی و فیزیکی ماده درشت‌دانه لیکا

لیکا	نوع مصالح
۷۰۰	چگالی (متراکم) (کیلوگرم بر مترمکعب)
۶۵۰	چگالی (غیرمتراکم) (کیلوگرم بر مترمکعب)
۶/۹ درصد	درصد جذب آب

### ۲-۲- ریزدانه به‌کار رفته برای تهیه بتن سبک



(الف)

شکل ۱- دانه‌بندی (الف) درشت‌دانه (لیکا) و (ب) ریزدانه (ماسه)

جدول ۲- مشخصات سیمان

MgO	Pb	Zr	CaO	K <sub>2</sub> O	Cl	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	Elements
۳/۸۶۹	۰/۰۱۴	۰/۰۱۷	۴/۱۵۹	۳/۱۱۴	۰/۰۹۸	۰/۳۳۱	۰/۲۰۱	۶۳/۲۵۹	۱۶/۳۵۳	۱/۷۳۵	wL%
Cr	LOI	Ba	Sr	Rb	Zn	MnO	TiO <sub>2</sub>	Cu	Ni	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Elements
۰/۰۱۴	۰/۵	۰/۰۴۷	۰/۰۴۳	۰/۰۰۹	۰/۰۱۵	۰/۱۱۲	۰/۵۳۲	۰/۰۰۶	۰/۰۰۶	۵/۵۶۶	wL%

فوق روان‌کننده مورد استفاده از نوع نسل سوم بر

پایه کربوکسیلات محصول شرکت صنایع شیمی

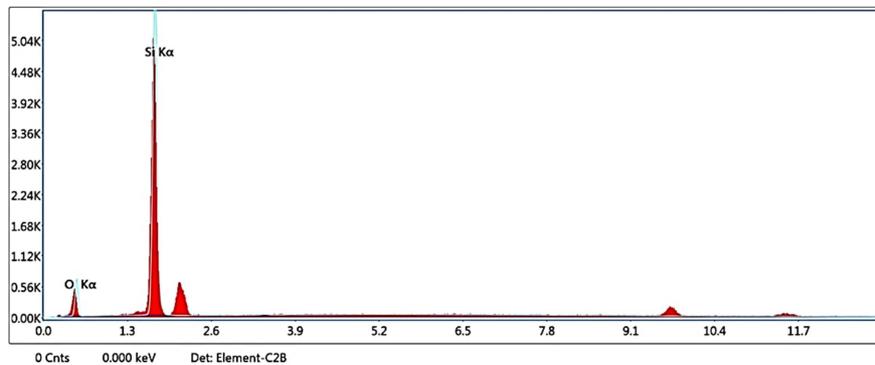
### ۴-۲- فوق روان‌کننده

بزرگنمایی فوق‌العاده برای توصیف ریزساختار مواد است. آنالیز پراش اشعه ایکس، نام دیگر طیف‌سنجی اشعه ایکس، فناوری است که برای یادگیری ساختار شیمیایی و ساختار کریستالی اجسام طبیعی و مصنوعی بدون تخریب آن‌ها استفاده می‌شود. الگوهای اشعه ایکس مانند اثر انگشت هستند که می‌توانند ساختارهای کریستالی خاصی را شناسایی کنند. عکس TEM با دقت‌های مختلف (a) ۰/۱ نانومتر، (b) ۱۵۰ نانومتر، (c) ۴۰ نانومتر و (d) ۳۰۰ نانومتر و نمودار XRD اشعه ایکس در شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. مدل دستگاه TEM، EM10C-100KV، زیس آلمان، در شکل ۴ نشان شده است.

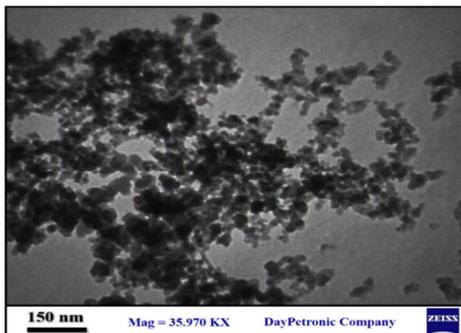
ساختمان آبادگران، با نام تجاری P8-3R با رنگ سبز و جرم مخصوص ۱۰۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است [۲۹].

## ۲-۵- نانوسیلیس

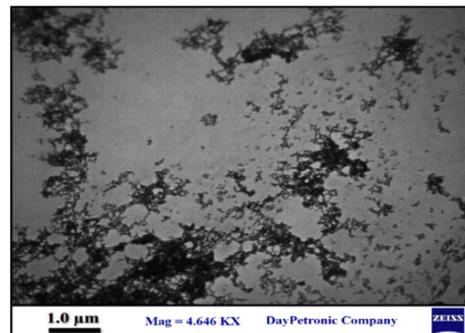
این مطالعه بر نانو  $\text{SiO}_2$ ، نانوصدرا تکیه داشت. این پودر نانو  $\text{SiO}_2$  خالص ۹۹ درصد دارای اندازه ذرات ۱۱-۱۳ نانومتر و به رنگ سفید است [۳۰]. ریزساختار با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) و تصاویر پراش اشعه ایکس (XRD) تأیید شده است. میکروسکوپ الکترونی عبوری ابزاری با وضوح بالا و



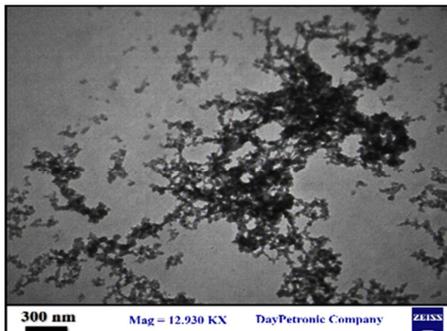
شکل ۲- نمودار XRD برای نانوسیلیس



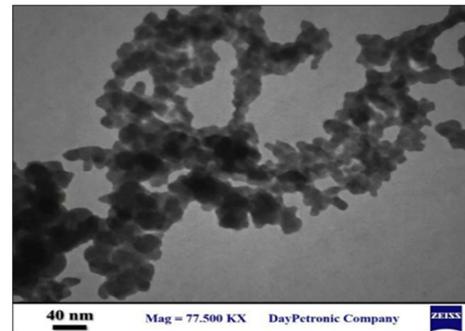
۱۵۰ nm (ب)



0.1 nm (الف)



300 nm (ت)



40 nm (پ)

شکل ۳- تصاویر نانوسیلیس با دستگاه TEM با دقت‌های مختلف



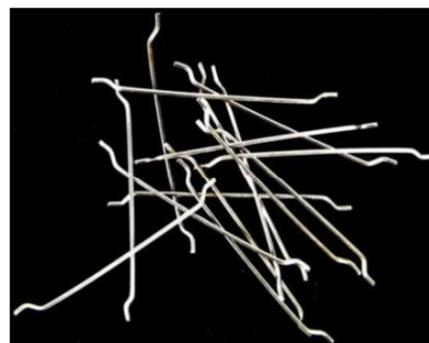
شکل ۴- دستگاه TEM

شد و سپس طرح چندین بار اصلاح شد تا طرح اختلاط با اسلامپ مناسب بین ۵۰ تا ۸۰ میلی‌متر به دست آمد (جدول ۴). نانوسیلیس جایگزین سیمان در سه نسبت وزنی ۱، ۳ و ۵ به بتن افزوده شده است.

برای توزیع یکنواخت، پودر نانوسیلیس به مدت ۲ دقیقه به خوبی با سیمان مخلوط می‌شود تا مخلوطی همگن برای استفاده به عنوان افزودنی بتن به دست آید. تمام مواد خشک به مدت دو دقیقه در مخلوط‌کن ترکیب می‌شوند و سپس آب حاوی نرم‌کننده به تدریج به مخلوط اضافه می‌شود. سپس الیاف فولادی به مخلوط اضافه می‌شود. پس از مخلوط شدن کامل مواد در میکسر، بتن تازه در سه لایه در قالب‌های مورد نیاز که از قبل چیده شده‌اند ریخته می‌شود. مخلوط‌های بتنی روی میز ارتعاشی متراکم می‌گردند. قالب‌ها بعد از ۲۴ ساعت باز می‌شوند. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، نمونه‌های قالب گرفته شده و با پوشاندن آن‌ها با نایلون و پارچه مرطوب به مدت ۲۸ روز، عمل‌آوری شدند. سپس در معرض هوای آزاد قرار گرفتند. ۹۰ روز پس از آماده‌سازی، نمونه‌ها برای آزمایش استاتیکی و دینامیکی آماده شدند. نمونه‌های مورد استفاده در این مقاله، نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد ۵×۵ سانتی‌متر بوده که برای هر روش اختلاط سه نمونه وجود دارد. در این مقاله، چهار سری بتن در هشت طرح اختلاط ساخته شده است که در جدول ۵ نشان داده شده است.

## ۲-۶- الیاف فولادی

الیاف فولادی مورد استفاده محصول شرکت Kimix بوده است که دارای شکل مستقیم با انتهای قلاب‌دار می‌باشد و شماتیکی از آن در شکل ۵، نشان داده شده است. همچنین مشخصات مکانیکی و فیزیکی آن نیز در جدول ۳، ارائه شده است [۳۱].



شکل ۵- شماتیکی از الیاف فولادی به صورت صاف با انتهای قلاب‌دار

جدول ۳- مشخصات مکانیکی و فیزیکی الیاف فولادی

شکل ظاهری	صاف
شکل مقطع	دایره
طول (میلی‌متر)	۳
قطر (میلی‌متر)	۰/۸
L/D	۶۲/۵
مقاومت کششی (مگاپاسکال)	۱۲۰۰
کارخانه سازنده	Ki mix

## ۲-۷- طرح اختلاط بتن سبک به کار رفته در این پژوهش

در این تحقیق از طرح اختلاط براساس استاندارد ACI 211.2 در ساختن نمونه‌های اولیه استفاده

جدول ۴- طرح اختلاط بتن سبک به کار رفته در این مقاله در نمونه‌های مرجع

سیمان ( $\text{kg/m}^3$ )	درشت‌دانه لیکا ( $\text{kg/m}^3$ )	ریزدانه ماسه ( $\text{kg/m}^3$ )	نسبت آب به سیمان
۴۵۰	۳۵۰	۸۵۰	۰/۳۸
فوق روان‌کننده		مقاومت فشاری ۲۸ روز ( $\text{MPa}$ ) $f_c$	وزن مخصوص ( $\text{kg/m}^3$ ) $\gamma$
٪۱		۳۰	۱۹۱۰



شکل ۶- عمل‌آوری نمونه‌ها

جدول ۵- طرح اختلاط‌های به کار رفته در این مقاله

طرح	درصد حجمی الیاف فلزی (٪)	درصد وزنی نانوسیلیس (٪)
سری اول (طرح مینا)	-	-
سری دوم (الیاف فلزی)	۰/۵	-
	۱	-
	۱/۵	-
	۲	-
سری سوم (نانوسیلیس)	-	۱
	-	۳
	-	۵
سری چهارم (طرح ترکیبی)	۱	۳

## ۲-۸- روش انجام کار

در این مقاله به بررسی اثر الیاف فلزی و نانوسیلیس بر مقاومت فشاری و مدول الاستیک بتن سازه‌ای سبک در نرخ‌کرنش‌های دینامیکی و شبه‌استاتیکی پرداخته شده است. در ادامه، شرایط ساخت نمونه‌ها و دستگاه‌ها و نحوه انجام آزمایشات استاتیکی و دینامیکی شرح داده شده است.

## ۸-۲-۱- نمونه‌سازی

نمونه‌ها در سه دسته کلی آماده شده‌اند. در دسته اول، نمونه بتن شاهد بدون الیاف و نانوسیلیس تهیه شد. در دسته دوم، ۰/۵، ۱/۵ و ۲ درصد الیاف فولادی به بتن سبک اضافه شد. در دسته سوم، سه مقدار نانوسیلیس با درصدهای ۱، ۳ و ۵ درصد به نمونه بتن سبک اضافه شد. هدف از این کار، تعیین درصد بهینه الیاف فولادی و



شکل ۸- دستگاه تست مقاومت فشاری

### ۳-۲- آزمایش دینامیکی (دستگاه میله هاپکینسون)

این آزمایش براساس تئوری انتشار امواج الاستیک یک‌بعدی پایه‌گذاری شده است. از هنگامی که کلسکی<sup>۷</sup> این میله را در سال ۱۹۴۹ اختراع کرد، این آزمایش در بسیاری از موارد برای مطالعه رفتار دینامیکی مواد مورد استفاده قرار گرفته است [۳۵ و ۳۶]. کاربرد مهم این آزمایش، به‌دست آوردن منحنی تنش- کرنش دینامیکی مواد در نرخ‌های کرنش بالا می‌باشد که می‌توان با تغییر سرعت میله ضربه‌زننده، در نرخ‌های کرنش گوناگون نمودارهای تنش- کرنش را به‌دست آورد.

در شکل ۹، نمونه‌ای از دستگاه هاپکینسون فشاری<sup>۸</sup> نشان داده شده است که در آزمایشگاه مقاومت مصالح دانشگاه بوعلی سینای همدان موجود می‌باشد. در این دستگاه، یک نمونه استوانه‌ای کوتاه به وسیله یک ضربه‌زننده بین دو میله الاستیک بلند فشرده می‌گردد که میله‌ها عموماً از فولاد پراستحکام ساخته شده‌اند. کرنش‌ها به وسیله دو کرنش‌سنج که بر روی میله‌های ورودی و خروجی قرار دارند ثبت می‌شود. برای محاسبه تنش و کرنش نمونه تنها دو موج کرنش باید شناسایی شوند، که به ترتیب موج عبوری در میله خروجی و منعکس شده از قطعه در میله ورودی می‌باشند.

کلسکی برای محاسبه تنش نمونه از رابطه (۱) استفاده کرده است:

نانوسیلیس بوده است. در شکل ۷، برخی نمونه‌های ساخته شده نشان داده شده است.



شکل ۷- نمونه‌های ساخته شده

### ۳- آزمایش‌ها

در این مقاله، آزمایش‌ها در دو حالت استاتیکی و دینامیکی انجام شده است که در ادامه به آنها پرداخته شده است.

#### ۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری (استاتیکی)

براساس طرح اختلاط از پیش تعیین شده، نمونه‌ها برای آزمایش‌های مختلف تهیه شده‌اند. در این مطالعه از آزمون فشار تک‌محوری و منحنی تنش- کرنش فشاری برای بررسی خواص مکانیکی نمونه‌ها استفاده شده است. آزمایش مقاومت فشاری استاتیکی براساس استاندارد ASTM C39 انجام شد [۳۳]. مدول الاستیک نمونه‌ها نیز براساس استاندارد ASTM C469 تعیین شده است [۳۴]. در این تحقیق از دستگاهی با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلونیوتن و دقت یک کیلونیوتن برای اندازه‌گیری منحنی‌های تنش- کرنش استفاده شده است (شکل ۸). آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های استوانه‌های به ابعاد ۵×۵ سانتی‌متر و براساس استاندارد ASTM C39، انجام شده است. در این آزمایش، نمونه‌ها بعد از ۹۰ روز به دستگاه تست فشاری جهت انجام آزمایش منتقل شده و آزمایش مقاومت فشاری بر روی آن‌ها انجام شده است.

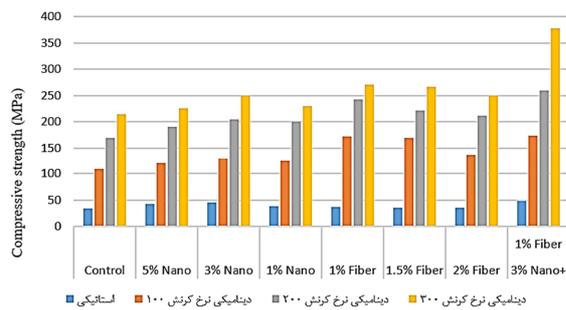
<sup>7</sup>- Kolsky

<sup>8</sup>- Hopkinson bar apparatus

در این مقاله، نانوسیلیس با درصدهای ۱ و ۳ و ۵ درصد به صورت نسبت وزنی سیمان ضمن کاهش وزن سیمان به بتن افزوده شد و الیاف فولادی با درصد حجمی ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد به عنوان نسبت حجمی حجم کل بتن به طرح اختلاط بتن سبک اضافه شد. برای یافتن درصد بهینه الیاف و نانوذرات، ابتدا برای تمامی درصدهای مواد تقویت کننده نمونه برداری شد و آزمایشات مقاومت فشاری روی آن‌ها در دمای اتاق در دو حالت دینامیکی و استاتیکی انجام شد. نمونه‌ها به صورت استوانه‌ای و با ابعاد ۵×۵ ساخته شده‌اند.

#### ۴-۱- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری برای درصدهای مختلف الیاف فولادی و نانوسیلیس در بتن سبک برای نمونه با ابعاد ۵×۵ در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰- مقاومت فشاری بتن با درصدهای مختلف نانو و الیاف

همانطور که از نتایج مشاهده می‌شود، با افزودن نانوسیلیس به بتن، حداکثر مقدار مقاومت فشاری مربوط به ۳ درصد نانوسیلیس و حداقل مقاومت فشاری مربوط به ۵ درصد نانوسیلیس است. با توجه به نمودار شکل ۱۰ می‌توان گفت که با افزودن نانوسیلیس به بتن سبک در حالت دینامیکی، میزان مقاومت فشاری افزایش یافته است، اما با افزایش بیش از ۳ درصد نانوسیلیس، این روند معکوس می‌شود و منجر به کاهش مقاومت فشاری می‌شود. در مورد نانوسیلیس نیز با افزایش نانوسیلیس به نمونه بتن سبک و تقویت فرآیند هیدراتاسیون، مقاومت فشاری در همه نمونه‌ها با درصدهای مختلف نانو نسبت به

$$\sigma_s(t) = E \frac{A_b}{A_s} \varepsilon_T(t) \quad (1)$$

که در آن، E مدول الاستیسیته میله فشاری،  $A_s$  سطح مقطع نمونه،  $A_b$  سطح مقطع میله و  $\varepsilon_T(t)$  کرنش منتقل شده در میله خروجی می‌باشد [۳۷].



شکل ۹- نمایی از دستگاه آزمایش میله هاپکینسون فشاری

همچنین نرخ کرنش و کرنش با استفاده از روابط زیر

به دست می‌آیند:

$$\frac{d\varepsilon_s(t)}{dt} = -\frac{2C_0}{L} \varepsilon_R(t) \quad (2)$$

$$\varepsilon_s(t) = -\frac{2C_0}{L} \int_0^t \varepsilon_R(t) dt \quad (3)$$

که در آن،  $C_0$  سرعت موج طولی در میله ورودی، L طول نمونه و  $\varepsilon_R$  کرنش منعکس شده می‌باشد. تشکیل موج ضربه در میله ورودی یکی از نکات ضروری در آزمایش می‌باشد که تأثیر زیادی در نتایج خواهد داشت. این موج به وسیله یک میله ضربه‌زننده<sup>۹</sup> به میله ورودی منتقل می‌شود. آزمایش میله هاپکینسون در نرخ‌های کرنش بالا، که معمولاً در محدوده  $10^2 s^{-1}$  تا  $10^4 s^{-1}$  می‌باشد، انجام می‌گیرد.

#### ۴- نتایج و بحث

<sup>۹</sup>- Striker bar

یکنواخت‌تر و متراکم‌تر می‌گردد. با افزودن نانوسیلیس به نمونه دارای الیاف به دلیل افزایش تراکم مخلوط و سطح تماس بیشتر بین الیاف و خمیر سیمان، مقاومت بتن افزایش می‌یابد. نمونه‌های حاوی ۵ درصد نانوسیلیس دارای مقاومت کم‌تری نسبت به نمونه‌های حاوی ۳ درصد نانوسیلیس می‌باشند. به این علت که با توجه به عیار سیمان مصرفی در ساخت بتن، مقدار مشخصی کریستال هیدروکسیدکلسیم طی واکنش آب با سیمان تولید می‌شود که در اثر ترکیب با نانوسیلیس، ژل متراکم و پرمقاومت ژل کلسیم-سیلیکات-هیدرات را تولید می‌کند. با افزودن نانوسیلیس بیش از حد موردنیاز برای ترکیب با هیدروکسیدکلسیم، اضافه نانوسیلیس مصرفی دچار بیرون‌روی شده و با جایگزین شدن با سیمان مصرفی باعث کاهش مقاومت خمیر سیمان و کاهش چسبندگی مابین سبک‌دانه و الیاف با خمیر سیمان می‌شود. دلیل دیگر این کاهش مقاومت می‌تواند عدم توزیع یکنواخت نانوسیلیس در درصدهای بالاتر باشد که در تحقیقات دیگر نیز مشاهده شده است [۳۸ و ۳۹].

بار دینامیکی به عنوان باری که با سرعت و به طور ناگهانی وارد سازه می‌شود تعریف می‌شود. نانوسیلیس در بارگذاری‌های دینامیکی نسبت به الیاف اثر کمتری دارد و اگر درصد آن در بارهای بالا بیش از ۳ درصد افزایش یابد، کارایی آن بیشتر کاهش می‌یابد. دلیل این امر این است که نانوسیلیس نسبت به نرخ کرنش حساسیت کمتری دارد. به عبارت دیگر، نانوذرات سیلیکا به دلیل اثرات نرخ کرنش، حساسیت نرخ کرنش پایینی دارند و کامپوزیت‌های سیمان عمدتاً تحت تأثیر مکانیسم ویسکوزیته (اثر استفان)، اثر ترک‌خوردگی و اثر اینرسی هستند [۴۰ و ۴۱]. دلیل کاهش حساسیت نانوذرات سیلیکا به نرخ کرنش را می‌توان به شرح زیر توضیح داد.

نانوذرات قابلیت جذب آب زیادی را دارند و هرچه دوز نانوذرات سیلیس بیشتر باشد درصد جذب آب آزاد بیشتر است و همانطور که مشخص است وجود آب آزاد

بتن سبک افزایش یافته است، ولی درصدهای بالای نانوسیلیس به دلیل افزایش بیش از حد حجم انواع محصولات هیدراتاسیون در سطح مشترک سنگدانه و خمیر سیمان، مقاومت فشاری درصدهای بالاتر (۵ درصد) نسبت به نمونه ۳ درصد، کاهش یافته است. افزایش مقاومت فشاری در اثر افزایش نانوسیلیس را می‌توان با مکانیزمی که سبب بهبود ریزساختار و در نتیجه افزایش ویژگی‌های مکانیکی بتن می‌شود، به این صورت بیان نمود:

(الف) واکنش پوزولانی: مقدار زیادی کریستال هیدروکسیدکلسیم در طی واکنش سیمان و آب تولید می‌شود. کریستال  $\text{Ca(OH)}_2$  کریستالی شش‌گوشه است و در میان ناحیه انتقالی بین سنگدانه‌ها و ماتریس خمیر سیمان قرار دارد و این امر برای مقاومت بتن مضر می‌باشد. نانوسیلیس به دلیل سطح ویژه بسیار بالای خود بسیار واکنش‌پذیر است. در نتیجه با  $\text{Ca(OH)}_2$  به سرعت واکنش داده و ژل کلسیم-سیلیکات-هیدرات را تولید می‌کند. پس در این واکنش پوزولانی اندازه و مقدار کریستال‌های هیدروکسیدکلسیم کاهش می‌یابد و ژل متراکم و پرمقاومت H-S-C که حاصل واکنش پوزولانی است، با پرکردن فضاهای خالی باعث افزایش چگالی ناحیه انتقالی می‌شود و در نتیجه، مقاومت و دوام بتن افزایش می‌یابد.

(ب) خاصیت ریزپرکنندگی: قطر میانگین ذرات ژل H-S-C تقریباً برابر ۷۲ نانومتر می‌باشد. بنابراین با خاصیت پرکنندگی خلل‌و فرج موجود، باعث ایجاد یک ماتریس خمیر چسبنده متراکم‌تر می‌شود.

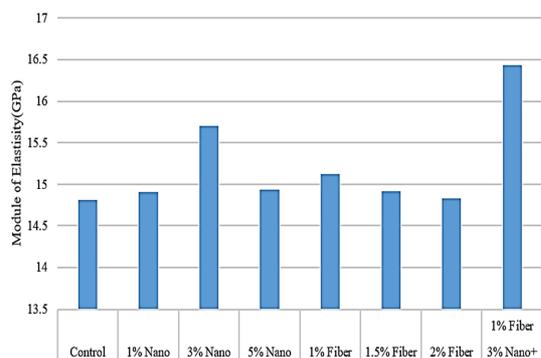
(پ) کنترل کریستال‌سازی: در صورتی که مقدار نانو ذرات و فواصل بین آن‌ها مناسب باشد، روند کریستال‌سازی  $\text{Ca(OH)}_2$  در ناحیه انتقالی کاهش یافته و در نتیجه، ماتریس خمیر سیمان

بیشترین افزایش مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌های با یک درصد الیاف فولادی بوده است و با افزایش بیشتر درصد الیاف مقاومت فشاری نسبت به نمونه یک درصد کاهش یافته است که دلیل این موضوع این است که نقش اصلی الیاف مقاومت در برابر رشد ترک‌ها می‌باشد و استفاده از الیاف بیشتر در بتن به علت پدیده گلوبی شدن باعث می‌شود که عمل مکانیزم دوختن ترک‌ها و کندشدن سرعت پیشروی ترک‌ها به خوبی صورت نگرفته و مقاومت فشاری کاهش یابد.

نمونه‌های حاوی ترکیب نانوسیلیس و الیاف فولادی، با افزایش درصد نانوسیلیس دارای رشد صعودی در مقاومت فشاری می‌باشند. بهترین نمونه به دست آمده ترکیبی از ۱ درصد الیاف و ۳ درصد نانوسیلیس می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش نرخ کرنش در تمام طرح اختلاط‌ها با افزایش مقاومت فشاری روبرو هستیم.

#### ۴-۲- مدول الاستیسیته

مدول الاستیسیته برای درصد‌های مختلف الیاف فولادی و نانوسیلیکا در بتن سبک برای نمونه با ابعاد ۵×۵ در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱- مدول الاستیسیته بتن با درصد‌های مختلف نانو و الیاف

باتوجه به نتایج مشاهده می‌شود در کلیه طرح‌ها با افزودن نانوسیلیس روند افزایشی در مدول الاستیسیته بتن سبک ایجاد شده است. همچنین نمونه‌های حاوی ۵ درصد نانوسیلیس، دارای مدول الاستیسیته کم‌تری نسبت

نیروی چسبندگی بالایی بین سطوح سیمانی ایجاد می‌کند. می‌توان گفت که آب آزاد موجود در منافذ، باعث تأخیر در ایجاد ترک‌های بیش از حد در دوغاب سیمان تحت بارگذاری بالا می‌شود. بنابراین جذب آب توسط نانوذرات ممکن است یکی از دلایل حساسیت کم نانوذرات به نرخ کرنش باشد. همچنین استفاده از نانوذرات باعث کاهش مقدار سیمان می‌گردد. در نتیجه، جایگزینی آن‌ها با نانوذرات، استحکام و انسجام بتن در ضربات زیاد را تضعیف می‌کند. بنابراین نانوذرات حساسیت نرخ کرنش دوغاب سیمان را کاهش می‌دهند. مطالعات قبلی، نشان داد که نانوسیلیس ساختار مولکولی شیمیایی متوسطی از سیمان و شکلی همگن ایجاد می‌کند. همچنین برهم‌کنش شیمیایی نانو با هیدروکسید کلسیم و تولید ژل، که به طور قابل توجهی به بهبود فشار کمک می‌کند و این روند در شرایط به بهبود مقاومت بتن منجر می‌شود؛ اما وقتی درصد نانوذرات از ۱ به ۵ درصد افزایش یافت، سطح تنش و استحکام بتن دچار کاهش شد [۴۲ و ۴۳]. اگر ترکی در بارگذاری استاتیکی در ملات ITZ<sup>۱۰</sup> و سیمان رخ دهد و با استفاده از نانو قابل بهبود باشد. با این حال، در بارگذاری بالاتر به دلیل حساسیت پایین نرخ‌کرنش در نانو، استحکام دینامیکی را نمی‌توان بهبود بخشید، و این امر DIF<sup>۱۱</sup> پایین‌تر برای نمونه‌های حاوی نانوسیلیس را توجیه می‌کند. همچنین الیاف، مقاومت در برابر تراکم دینامیکی را بهبود می‌بخشد، زیرا الیاف تحت بارهای زیاد، سریع و متغیر به عنوان پلی عمل می‌کنند که از ایجاد ترک در هنگام ضربه‌های زیاد جلوگیری می‌کند و الیاف اضافه شده مقاومت بتن را در برابر ضربه‌های مکرر افزایش می‌دهد. به همین دلیل است که الیاف تحت تأثیر بارها و ضربه‌های زیاد مؤثرتر از نانوسیلیس هستند. با افزودن الیاف فولادی به بتن سبک در همه درصد‌های الیاف، مقاومت فشاری نسبت به بتن سبک افزایش یافته است و

<sup>10</sup>- Inter-Transition-Zone

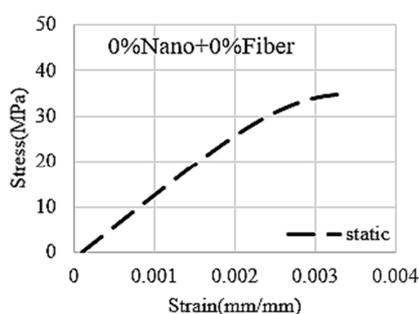
<sup>11</sup>- Dynamic Increase Factor

افزایش مقاومت فشاری همراه است، بدیهی می‌باشد و به علت ایجاد بتن متراکم‌تر، سختی بتن و در نتیجه مدول الاستیسیته افزایش یافته است. همانطور که مشاهده می‌شود در حالت استاتیکی ذرات نانو تأثیر بیشتری در بهبود مدول الاستیسیته دارند.

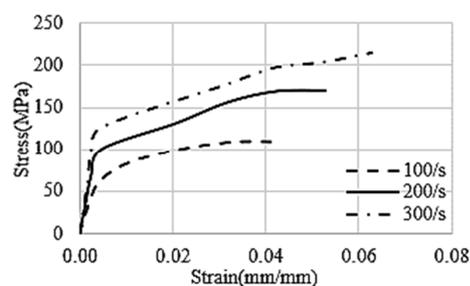
#### ۳-۴- نمودار تنش- کرنش

نمودار تنش- کرنش برای درصدهای مختلف الیاف فولادی و نانوسیلیس در بتن سبک برای نمونه با ابعاد  $5 \times 5$  در شکل‌های ۱۲ تا ۱۷ برای شرایط استاتیکی و دینامیکی نشان داده شده است.

به نمونه‌های حاوی ۳ درصد نانوسیلیس می‌باشند. با توجه به شکل ۱۱، افزودن ۲ درصد الیاف فولادی کم‌ترین تأثیر و افزودن ۳ درصد نانوسیلیس به همراه ۱ درصد الیاف بیشترین تأثیر را بر بهبود مدول الاستیسیته بتن سبک داشته‌اند. با توجه به نتایج به دست آمده افزودن الیاف به تنهایی در بتن سبک راه‌حل مناسبی به منظور افزایش مدول الاستیسیته تحت بارهای استاتیکی نیست. با توجه به اینکه مدول الاستیسیته بتن تحت تأثیر مدول الاستیسیته اجزای تشکیل‌دهنده آن از جمله خمیر سیمان قرار دارد، بنابراین افزایش مدول الاستیسیته با افزایش نانوسیلیس که با کاهش تخلخل خمیر سیمان و

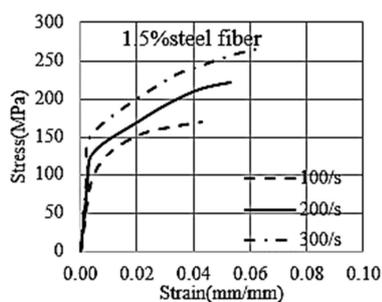


(ب)

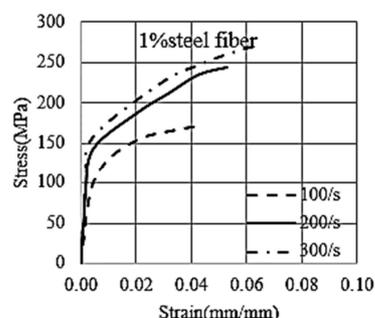


(الف)

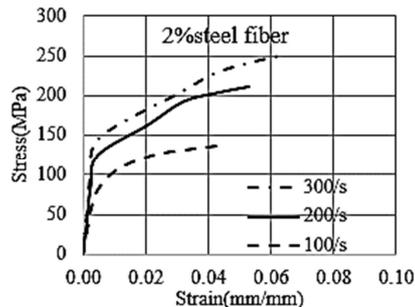
شکل ۱۲- نمودار تنش- کرنش (الف) دینامیکی و (ب) استاتیکی بتن مرجع بدون نانوسیلیس و الیاف فلزی



(ب) ۱/۵ درصد الیاف فلزی



(الف) ۱ درصد الیاف فلزی



(پ) ۲ درصد الیاف فلزی

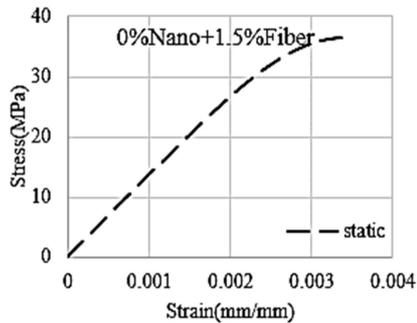
شکل ۱۳- نمودار تنش- کرنش دینامیکی بتن با درصدهای مختلف الیاف فلزی

می‌باشد در تمامی طرح‌ها با افزایش نرخ کرنش، سطح

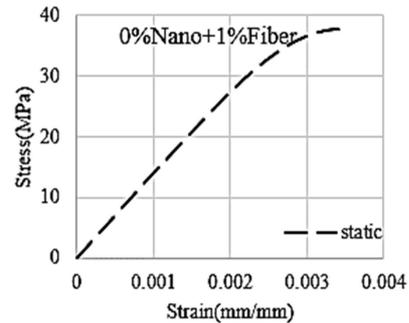
همان‌طور که از شکل‌های ۱۲ تا ۱۷ مشخص

ضربه نمونه ترجیح می‌دهد خاصیت ارتجاعی داشته باشد؛ این به معنای افزایش چگالی و افزایش سختی برای مقاومت در برابر ضربه‌ها است

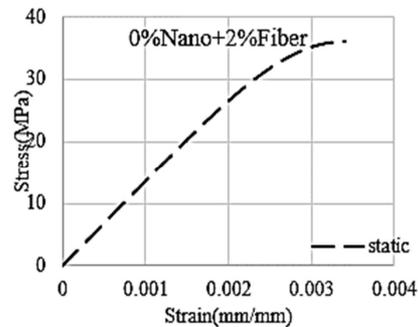
تنش افزایش یافته و میزان تغییر شکل و کرنش بیشینه نیز افزایش داشته است. علت این امر را می‌توان اینگونه توضیح داد که هنگامی که بار در نرخ کرنش بالا اعمال می‌شود (در مدت زمان کوتاه) برای مقاومت در برابر این



(ب) ۱/۵ درصد الیاف فلزی

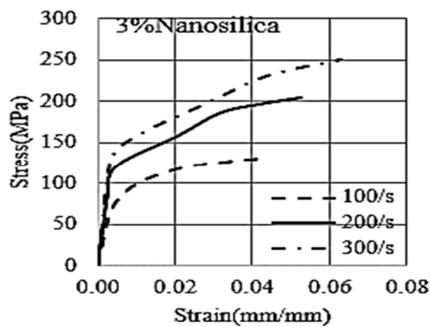


(الف) ۱ درصد الیاف فلزی

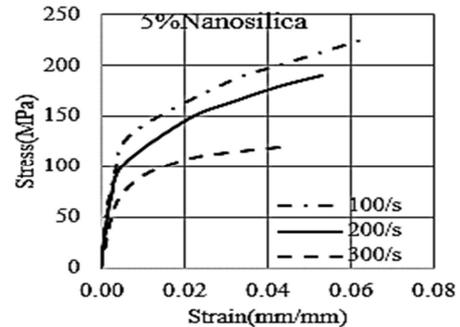


(پ) ۲ درصد الیاف فلزی

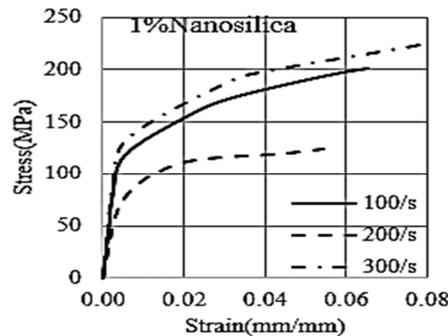
شکل ۱۴- نمودار تنش- کرنش استاتیکی بتن با درصد‌های مختلف الیاف فلزی



(ب) ۳ درصد نانوسیلیس



(الف) ۵ درصد نانوسیلیس

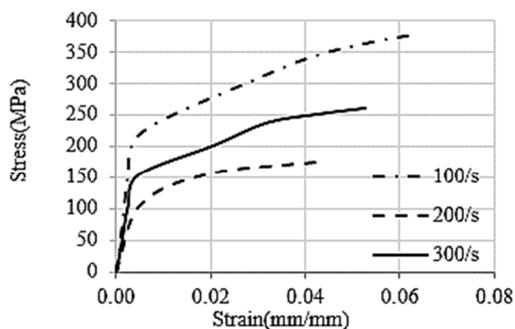


(پ) ۱ درصد نانوسیلیس

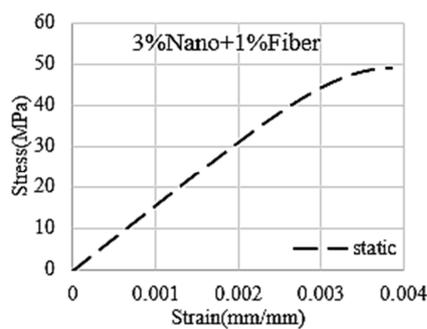
شکل ۱۵- نمودار تنش- کرنش دینامیکی بتن با درصد‌های مختلف نانوسیلیس

بتن، هرچه تعداد ترک‌ها کمتر باشد، تأثیر بیشتری در افزایش مقاومت دارد. با این توجیه می‌توان افزایش مقاومت فشاری را با افزایش نرخ کرنش تقریباً خطی برای همه طرح‌های اختلاط توضیح داد.

همچنین بر اثر اعمال بار با سرعت زیاد ماده منقبض می‌شود که ناشی از انقباض منافذ است؛ چراکه افزایش مقاومت دینامیکی در نرخ کرنش بالا، معمولاً به تخلخل مربوط می‌شود (یعنی تعداد شکاف‌های خمیر

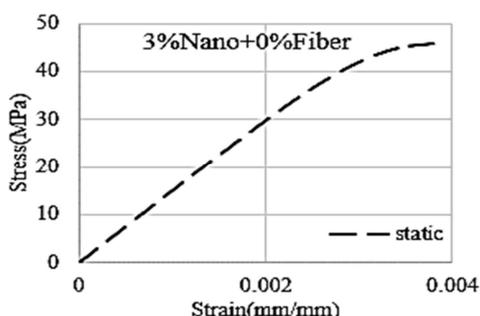


(ب)

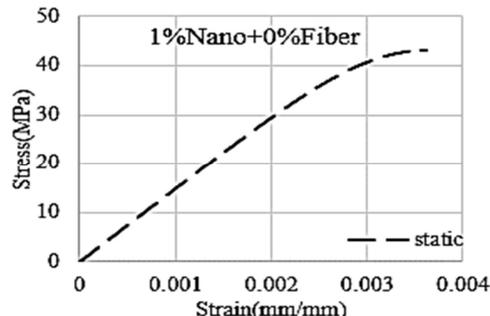


(الف)

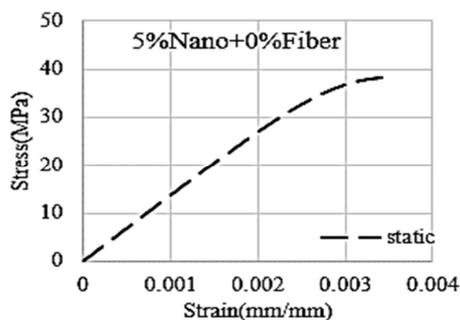
شکل ۱۶- نمودار تنش- کرنش (الف) استاتیکی و (ب) دینامیکی بتن با ۳ درصد نانوسیلیس و ۱ درصد الیاف فلزی



(ب) ۳ درصد نانو



(الف) ۱ درصد نانو



(پ) ۵ درصد نانو

شکل ۱۷- نمودار تنش- کرنش استاتیکی بتن با درصد‌های مختلف نانوسیلیس

است. مقاومت فشاری در بتن معمولی برحسب ضریب افزایش دینامیکی با استفاده از معادله (۴) توسط فدراسیون بین‌المللی بتن سازه<sup>۱۳</sup> مشخص شده است:

$$DIF = f_d / f_s \quad (۴)$$

#### ۴-۴- ضریب افزایش دینامیکی

ضریب افزایش دینامیکی یا  $DIF^{12}$  یک مقایسه ساده از تغییرات خواص مکانیکی دینامیکی (مقاومت فشاری) یک ماده در مقایسه با حالت شبه‌استاتیک آن

<sup>13</sup>- Fédération International du béton-FIB

<sup>12</sup>- Dynamic Increase Factor

یک رابطه جامع برای ضریب اثر دینامیکی با در نظر گرفتن طرح اختلاط بتن بوده است.

#### ۴-۴-۱- رابطه ضریب افزایش دینامیکی در این پژوهش

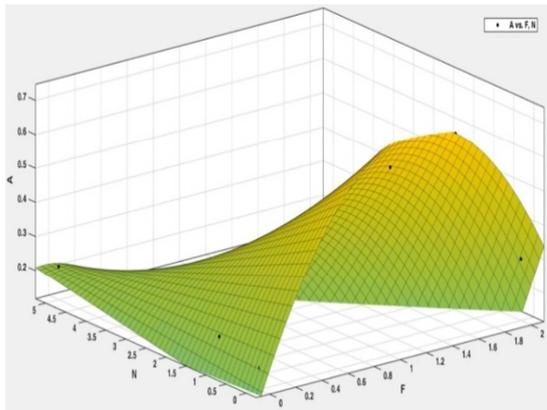
در این بخش یک رابطه ریاضی برای نتایج حاصل از آزمایش‌های دینامیکی در این پژوهش در تمام طرح اختلاط‌ها ارائه شده است. این رابطه ریاضی برحسب تابعی از درصد نانوسیلیکا و الیاف فلزی برای تعمیم دادن رابطه ارائه شده است. فرمول ریاضی ضریب تأثیر دینامیکی این پژوهش به شکل رابطه (۵) است:

$$\frac{f_d}{f_s} = AR^B \quad (5)$$

$$A = a_0 + a_1 \times N + a_2 \times F + a_4 \times N \times F + a_3 \times F^2$$

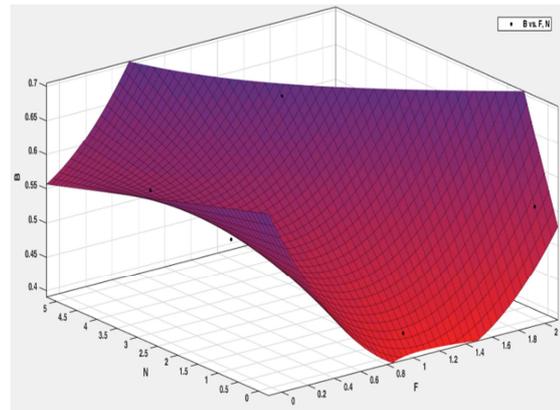
$$B = b_0 + b_1 \times N + b_2 \times F + b_4 \times N \times F + b_3 \times F^2$$

که در آن،  $F_d$  مقاومت فشاری دینامیکی،  $F_s$  مقاومت فشاری استاتیکی،  $R$  نرخ کرنش،  $N$  درصد نانوسیلیس،  $F$  درصد الیاف فولادی. منحنی‌های برازش سه‌بعدی دو پارامتر  $A$  و  $B$  به صورت توابعی از درصد نانو و الیاف در شکل ۱۸ نشان داده شده است.



(ب)

در برخی از مطالعات، فرمول DIF به عنوان یک تابع لگاریتمی از نرخ کرنش ارائه شده است. محققان با انجام تست‌های دینامیکی رابطه‌ای را برای DIF ارائه کردند. ضریب DIF مربوطه از حدود ۲/۵ تا ۶ متغیر بود. برای این محدوده از نرخ کرنش، انتظار می‌رفت که DIF با یک خط مستقیم شیب ۳/۱ در نمودار ورود به سیستم مطابقت داشته باشد. در این نتیجه، ۳۳ آزمایش از ۴۶ آزمایش با موفقیت انجام شد [۴۵]. در مقاله دیگری پژوهشگران، شش مجموعه آزمایش فشار دینامیکی با دستگاه هاپکینسون انجام داده‌اند و سپس مقدار DIF را محاسبه کرده‌اند. مقادیر DIF اندازه‌گیری شده به ۴/۸ رسید [۴۶]. نکته مهمی که در اینجا باید به آن اشاره کرد این است که تمام داده‌های بالاتر از نرخ کرنش ۱ بر ثانیه که از دستگاه‌ها و روش‌های مختلف آزمایش به دست آمده‌اند، روند یکسانی را نشان می‌دهند [۴۷ و ۴۸]. در این مطالعه، تلاش شده است تا رابطه DIF به عنوان تابعی از درصد مواد تقویت‌کننده (نانوسیلیس و الیاف فولادی) و نرخ کرنش ارائه شود. هدف از این کار، ارائه



(الف)

شکل ۱۸- برازش منحنی پارامتر B (الف) و A (ب)

در شکل ۱۹ تا ۲۱ برای تمامی طرح‌های اختلاط نشان داده شده است.

#### ۴-۵- شکل پذیری

شکل‌پذیری در سازه به عنوان خاصیت ذاتی اعضای سازه، نقش تعیین‌کننده در رفتار مصالح را دارد. این

مقادیر ثابت‌ها در رابطه (۵) از طریق برازش منحنی در نرم افزار MATLAB به دست آمده است و نتایج در جدول ۶ نشان داده شده است. در ادامه، نتایج به دست آمده از ترسیم رابطه ریاضی DIF و نتایج مقادیر آزمایشگاهی ضریب افزایش دینامیکی برحسب نرخ کرنش

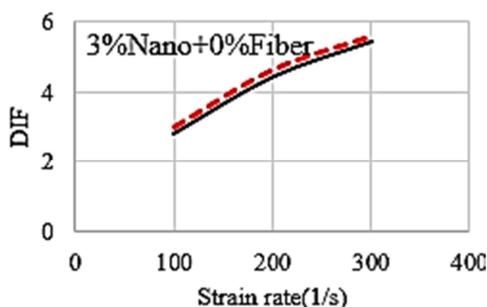
جدول ۶- مقدار ثابت‌های رابطه ریاضی برای دو پارامتر A و B

	B		A
-۹/۴۵۲	$b_1$	۲/۷۵۲۰	$a_1$
۶/۷۰۲	$b_2$	-۰/۸۹۹۹	$a_2$
۰/۷۴۷۶	$b_3$	-۰/۲۵۳۸	$a_3$
-۳/۲۸۵	$b_4$	۰/۴۶۹۷	$a_4$
-۲/۹۹۱	$b_5$	۰/۵۷۲۱	$a_5$
-۰/۰۷۰۴۹	$b_6$	۰/۰۳۹۹	$a_6$

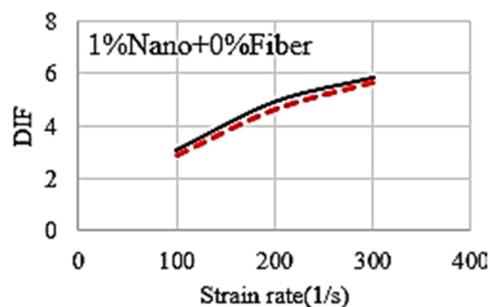
دلیل این امر را می‌توان کاهش تخلخل سیمان بر اثر افزودن نانوسیلیس دانست که خود باعث افزایش تراکم بتن و میل بیشتر به شکل پذیری است.

خاصیت در اعضا باعث می‌شود تغییر شکل‌های بزرگ قبل از شکست کامل در مصالح قابل نمایش باشند.

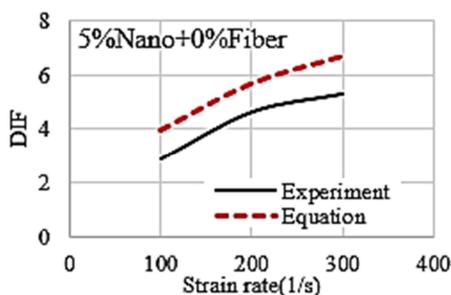
در این مقاله از مقدار بیشینه کرنش به عنوان معیار شکل‌پذیری استفاده شده است و مقادیر کرنش بیشینه برای کلیه طرح اختلاط‌ها در جدول ۷ نشان داده شده است. همانطور که از نتایج ارائه شده در جدول ۷ مشاهده می‌شود بیشترین شکل‌پذیری مربوط به درصد‌های بالای نانوسیلیس می‌باشد؛ یعنی برای طرح اختلاط با ۵ درصد نانو در نرخ کرنش ۳۰۰ بر ثانیه میزان کرنش ۰/۰۸ بوده و کمترین مقدار آن مربوط به افزودن الیاف به بتن می‌باشد که برای ۲ درصد الیاف در نرخ کرنش استاتیکی میزان کرنش ۰/۰۳۴ بوده است.



(ب) ۳ درصد نانو

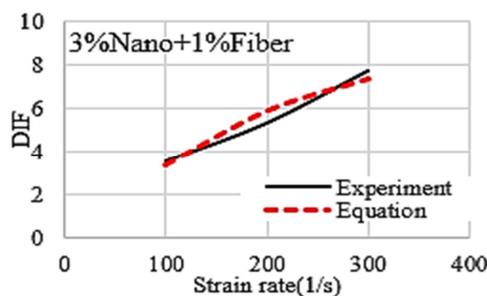


(الف) ۱ درصد نانو

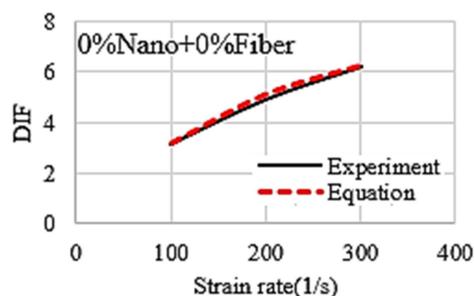


(پ) ۵ درصد نانو

شکل ۱۹- مقایسه مقادیر عددی و آزمایشگاهی DIF برای بتن با افزودن درصد‌های مختلف نانوسیلیس

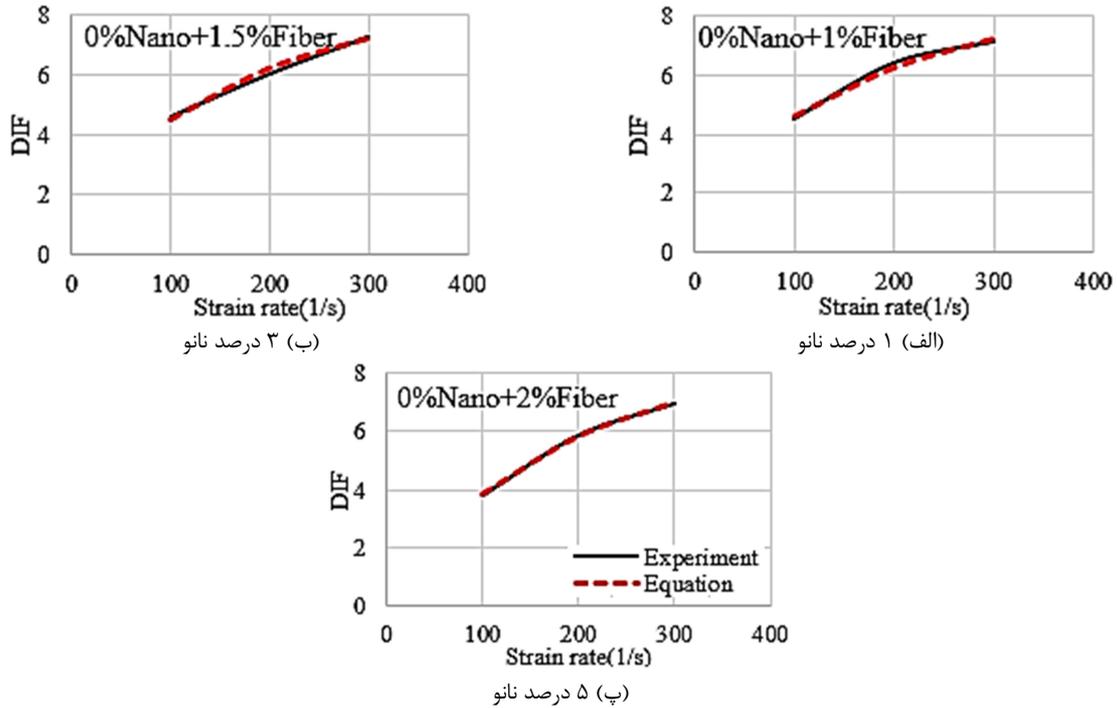


(ب)



(الف)

شکل ۲۰- مقایسه مقادیر عددی و آزمایشگاهی DIF برای (الف) بتن مرجع فاقد نانوسیلیس و الیاف فلزی و (ب) بتن با ۳٪ نانوسیلیس و ۱٪ الیاف فلزی



شکل ۲۱- مقایسه مقادیر عددی و آزمایشگاهی DIF برای بتن با افزودن درصدهای مختلف الیاف فلزی

جدول ۷- ماکزیمم کرنش برای تمامی طرح اختلاطها در نرخ کرنشهای مختلف

Strain Rate 1/s	max strain	Plan
Static	۰/۰۰۳۳	0% N+0% F
۱۰۰/۰۰	۰/۰۴۲۸	0% N+0% F
۲۰۰/۰۰	۰/۰۵۲۸	0% N+0% F
۳۰۰/۰۰	۰/۰۶۲۸	0% N+0% F
Static	۰/۰۰۳۵	1% N+0% F
۱۰۰/۰۰	۰/۰۴۲۸	1% N+0% F
۲۰۰/۰۰	۰/۰۵۲۸	1% N+0% F
۳۰۰/۰۰	۰/۰۶۲۸	1% N+0% F
Static	۰/۰۰۳۸	3% N+0% F
۱۰۰/۰۰	۰/۰۴۲۸	3% N+0% F
۲۰۰/۰۰	۰/۰۵۲۸	3% N+0% F
۳۰۰/۰۰	۰/۰۶۲۸	3% N+0% F
Static	۰/۰۰۳۶	5% N+0% F
۱۰۰/۰۰	۰/۰۵۴۳	5% N+0% F
۲۰۰/۰۰	۰/۰۶۵۳	5% N+0% F
۳۰۰/۰۰	۰/۰۸۶۳	5% N+0% F
Static	۰/۰۰۳۵	0% N+1% F
۱۰۰/۰۰	۰/۰۴۲۸	0% N+1% F
۲۰۰/۰۰	۰/۰۵۲۸	0% N+1% F
۳۰۰/۰۰	۰/۰۶۲۸	0% N+1% F

جدول ۷- ادامه

Strain Rate 1/s	max strain	Plan
Static	۰/۰۰۳۴	0%N+1.5%F
۱۰۰	۰/۰۴۲۸	0%N+1.5%F
۲۰۰	۰/۰۵۲۸	0%N+1.5%F
۳۰۰	۰/۰۶۲۸	0%N+1.5%F
Static	۰/۰۰۳۴	0%N+2%F
۱۰۰	۰/۰۴۲۸	0%N+2%F
۲۰۰	۰/۰۵۲۸	0%N+2%F
۳۰۰	۰/۰۶۲۸	0%N+2%F
Static	۰/۰۰۳۹	3%N+1%F
۱۰۰	۰/۰۴۲۸	3%N+1%F
۲۰۰	۰/۰۵۲۸	3%N+1%F
۳۰۰	۰/۰۶۲۸	3%N+1%F

از نتایج ارائه شده در جدول ۸ مشخص است بیشترین مساحت محصور منحنی تنش- کرنش یا انرژی جذب شده مربوط به طرح اختلاط ترکیبی با یک درصد الیاف و سه درصد نانو است. با توجه به نتیجه حاصل از این بخش می‌توان به لزوم استفاده از طرح اختلاط‌های ترکیبی با استفاده از چند تقویت‌کننده بتن پی برد.

از طرفی، معیار دیگری برای بیان میزان شکل‌پذیری مواد وجود دارد. می‌توان سطح زیر منحنی تنش- کرنش را با امکان جذب انرژی و میزان شکل‌پذیری ماده مرتبط دانست. به همین دلیل از معیار سطح محصور زیر منحنی برای مقایسه تمامی طرح اختلاط‌ها در تمام نرخ کرنش‌ها در جدول ۸ استفاده شده است. همانطور که

جدول ۸- سطح محصور منحنی تنش- کرنش برای تمامی طرح اختلاط‌ها در نرخ کرنش‌های مختلف

Strain Rate 1/s	Area	Plan
Static	۰/۰۷	0%N+0%F
۱۰۰/۰۰	۳/۸۸	0%N+0%F
۲۰۰/۰۰	۷/۲۰	0%N+0%F
۳۰۰/۰۰	۱۰/۶۷	0%N+0%F
Static	۰/۰۷	1%N+0%F
۱۰۰/۰۰	۴/۲۲	1%N+0%F
۲۰۰/۰۰	۷/۷۱	1%N+0%F
۳۰۰/۰۰	۱۰/۸۸	1%N+0%F
Static	۰/۰۸	3%N+0%F
۱۰۰/۰۰	۴/۵۷	3%N+0%F
۲۰۰/۰۰	۸/۵۵	3%N+0%F
۳۰۰/۰۰	۱۲/۲۸	3%N+0%F
Static	۰/۰۸	5%N+0%F
۱۰۰/۰۰	۵/۷۴	5%N+0%F
۲۰۰/۰۰	۱۰/۵۹	5%N+0%F
۳۰۰/۰۰	۱۶/۱۶	5%N+0%F

جدول ۸- ادامه

Strain Rate 1/s	Area	Plan
Static	۰/۰۷	0%N+1%F
۱۰۰/۰۰	۶/۰۴	0%N+1%F
۲۰۰/۰۰	۱۰/۱۱	0%N+1%F
۳۰۰/۰۰	۱۳/۵۶	0%N+1%F
Static	۰/۰۷	0%N+1.5%F
۱۰۰	۵/۹۷	0%N+1.5%F
۲۰۰	۹/۲۳	0%N+1.5%F
۳۰۰	۱۳/۳۶	0%N+1.5%F
Static	۰/۰۷	0%N+2%F
۱۰۰	۴/۸۱	0%N+2%F
۲۰۰	۸/۸۵	0%N+2%F
۳۰۰	۱۲/۳۳	0%N+2%F
Static	۰/۰۸	3%N+1%F
۱۰۰	۶/۱۱	3%N+1%F
۲۰۰	۱۰/۹۰	3%N+1%F
۳۰۰	۱۸/۶۷	3%N+1%F

است. به منظور بررسی دقیق‌تر میزان صحت رابطه ارائه شده، از معیار رگرسیون کمترین مربعات انحراف نتایج استفاده شده است که مقدار آن در ستون آخر جدول ۹ برای هر نرخ کرنش بیان شده است.

جدول ۹- ثابت‌های رابطه (۶) برای نرخ کرنش‌های مختلف

نرخ کرنش (1/s)	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰
$a_0$	۱۰۸/۹	۱۷۲/۲	۲۱۲/۱
$a_1$	۱۱۴/۷	۱۰۸/۱	۹۴/۰
$a_2$	۱۲/۹	۱۸/۸	۲۲/۶
$a_3$	-۵۰/۱	-۴۵/۴	-۳۷/۷
$a_4$	-۶/۹	-۲/۶	۲۴/۸
$a_5$	-۶/۹	-۲/۶	۲۴/۸
$R^2$	۰/۹۹	۰/۹۶	۰/۹۹

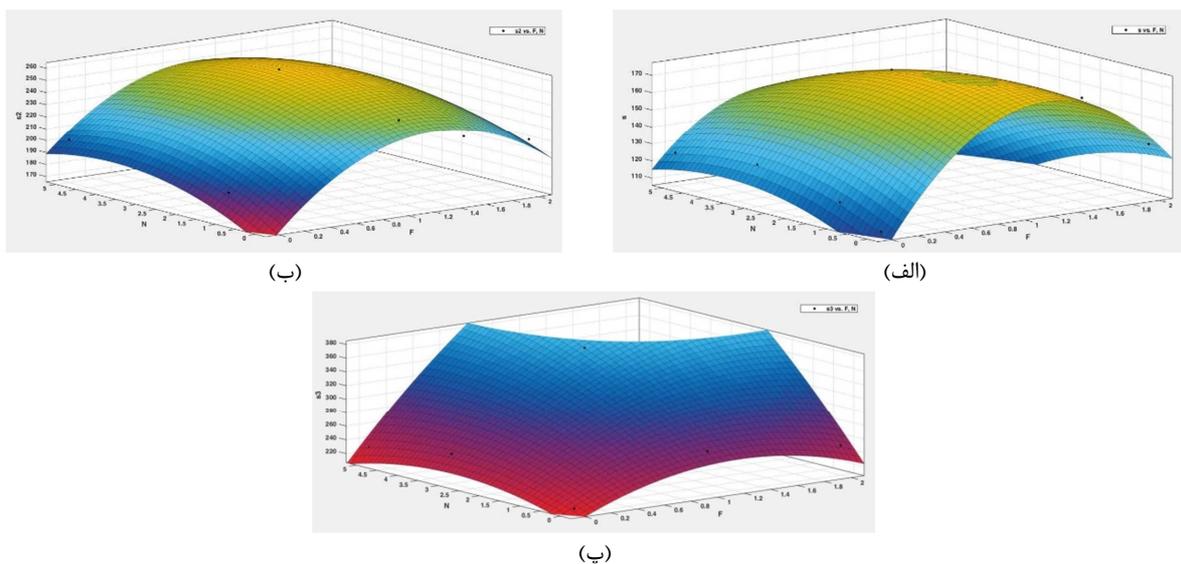
نمودارهای حاصل از ترسیم رابطه (۶) در شکل ۲۲ نشان داده شده است.

#### ۴-۶- ارائه رابطه ریاضی برای تعیین مقاومت فشاری برحسب درصد نانو ذرات و الیاف فلزی

از آنجاکه بر اثر افزودن ذرات نانوسیلیس و الیاف فلزی به بتن با بهبود مقاومت فشاری روبرو هستیم تلاش شده تا این افزایش مقاومت در قالب یک رابطه ریاضی بیان شود. در این بخش یک رابطه ریاضی برای محاسبه مقاومت فشاری بتن برحسب درصد نانو ذرات سیلیس و الیاف فلزی ارائه شده است.

$$f_d = a_0 + a_1.F + a_2.N + a_3.F^2 + a_4.N.F + a_5.N^2 \quad (6)$$

در رابطه (۶)،  $f_d$  مقاومت فشاری دینامیکی،  $N$  درصد نانوسیلیس و  $F$  درصد الیاف فولادی است. از آنجا که علاوه بر درصد تقویت‌کننده‌ها نرخ کرنش انجام آزمایش هم در میزان مقاومت فشاری مؤثر است، ثابت‌های رابطه (۶) برحسب نرخ کرنش بارگذاری در جدول ۹ ارائه شده



شکل ۲۲- ترسیم رابطه (۶) برای نرخ کرنش (الف) ۱۰۰، (ب) ۲۰۰ و (پ) ۳۰۰

## ۵- بحث و نتیجه‌گیری

که طرح اختلاط ارائه شده با ترکیب الیاف و نانو بهترین نتایج را دارا می‌باشد.

(ب) افزودن ۱ درصد الیاف فولادی به بتن سبک، مقاومت فشاری بتن سبک را بهبود بخشیده است. اما مشاهده شد که با افزودن بیش از یک درصد الیاف، مقاومت فشاری بتن کاهش یافت؛ زیرا درصد بالای الیاف منجر به تجمع الیاف، ناهمگونی مصالح و افزایش فضاهای خالی بتن می‌شود.

(پ) مقاومت فشاری دینامیکی به نرخ کرنش حساس بوده و با افزایش آن در تمامی طرح‌های اختلاط افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر می‌توان گفت که مقاومت فشاری بتن وابستگی شدیدی به نرخ کرنش داراست.

(ت) ضریب افزایش دینامیکی DIF تقریباً به صورت خطی با نرخ کرنش در تمام طرح‌های مخلوط افزایش می‌یابد.

(ث) حساسیت بتن به نرخ کرنش مشاهده می‌شود، زیرا میزان تنش در نمودارهای تنش-کرنش با افزایش نرخ کرنش افزایش می‌یابد و الیاف تأثیر بسزایی در افزایش سطح منحنی تنش-کرنش

این مقاله رفتار LWC را پس از قرار گرفتن در معرض بارهای استاتیکی و دینامیکی در نرخ‌های کرنش مختلف ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ بر ثانیه مورد مطالعه قرار داد. همچنین رفتار آن را هنگام افزودن نانوذرات سیلیکا، الیاف فلزی یا هر ترکیبی از هر دو، مورد بررسی قرار داد. این مطالعه همچنین به شناخت ضریب افزایش دینامیکی (DIF)، استخراج معادلات ریاضی و مقایسه آن‌ها با کار آزمایشگاهی پرداخته است. بنابراین، چهار طرح اختلاط در ۹ گروه ساخته شد که هرکدام شامل تعداد نمونه‌های کافی بود. نمونه‌های مورد استفاده در این آزمایش‌ها استوانه‌ای به ابعاد ۵×۵ سانتی‌متر بوده که رفتار آن‌ها با تجزیه و تحلیل مقاومت فشاری، کرنش و مدول الاستیسیته تأیید شد. نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر است:

(الف) افزودن الیاف و نانوسیلیس تأثیر بسزایی در بهبود مقاومت فشاری بتن داشته‌اند که بهترین درصد برای الیاف فلزی ۱ درصد و برای نانوسیلیس ۳ درصد بوده است. بر این اساس از ترکیب ذرات و الیاف تقویت‌کننده برای بتن استفاده شده است و پس از بررسی مشاهده شد

نانوسیلیس به بالاترین حد می‌رسد. دلیل این امر می‌تواند حساسیت نانوسیلیس‌ها به نرخ کرنش بالا باشد.

این پژوهش، یک مطالعه اولیه از رفتار LWC با نانوسیلیس و الیاف تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی بود. پیشنهاد می‌گردد رفتار آن با نانوسیلیس و الیاف در هنگام قرار گرفتن در معرض دماهای بالا مطالعه شود تا میزان مقاومت این نوع بتن در برابر آتش‌سوزی مشخص شود.

### قدردانی

این تحقیق تحت حمایت دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل با شماره گزنت BUT/388011/1401 قرار گرفت.

داشته‌اند و بهترین عملکرد مربوط به افزودن ۱٪ الیاف است.

(ج) مقدار DIF برای کلیه طرح‌های اختلاط در بازه ۳ تا ۸ متغیر بوده است. افزودن الیاف فولادی به بتن باعث افزایش قابل‌توجه مقدار ضریب اثر دینامیکی شده است. از سوی دیگر، اگرچه افزودن ذرات نانو تأثیر بسیار کمی بر افزایش DIF داشته است، اما بیشترین مقدار DIF در طرح ترکیبی با ۱ درصد الیاف و ۳ درصد نانوسیلیس بوده است.

(چ) ضریب افزایش دینامیکی با افزایش درصد الیاف فولادی تا ۱ درصد افزایش می‌یابد و پس از ۱ درصد الیاف فولادی، روند آن کاهش می‌یابد.

(ح) ضریب افزایش دینامیکی با افزودن نانوسیلیس کاهش می‌یابد و این فرآیند کاهش در ۳ درصد

### References

- [1] Khosravi S, Rezaifar O, Gholhaki M, Qiyami Taklymi SM. Investigation Experimental Of the Concrete Properties Containing Bentonite and Zeolite as Natural Pozzolan. Civil Infrastructure Researches. 2021 Feb 19; 6(2): 79-93. doi: 10.22091/CER.2021.6931.1248 [In Persian]
- [2] Eskandari A, Omidinasab F, Dalvand A. Experimental Study to Improve the Flexural Behavior of Recycled Reinforced Concrete Beams Using Separate and Hybrid Fibers of Steel and Kortta. Civil Infrastructure Researches. 2022 Feb 20; 7(2): 1-19. doi: 10.22091/cer.2021.7119.1266 [In Persian]
- [3] Abbass W, Khan MI, Mourad S. Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete. Construction and building materials. 2018 Apr 20; 168: 556-569. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.164
- [4] Altun F, Aktaş B. Investigation of reinforced concrete beams behavior of steel fiber added lightweight concrete. Construction and Building Materials. 2013 Jan 1; 38: 575-581. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.022
- [5] Caratelli A, Meda A, Rinaldi Z. Monotonic and cyclic behaviour of lightweight concrete beams with and without steel fiber reinforcement. Construction and building materials. 2016 Sep 30; 122: 23-35. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.045
- [6] Choi J, Zi G, Hino S, Yamaguchi K, Kim S. Influence of fiber reinforcement on strength and toughness of all-lightweight concrete. Construction and Building Materials. 2014 Oct 30; 69: 381-389. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.074
- [7] Goiaz HA, Jabir HA, Abdulrehman MA, Al-Gasham TS. Evaluation of lightweight concrete core test including steel bars. International Journal of Engineering. 2023 Jun 1; 36(6): 1121-1128. doi: 10.5829/ije.2023.36.06c.10
- [8] Grabois TM, Cordeiro GC, Toledo Filho RD. Fresh and hardened-state properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with steel fibers. Construction and Building Materials. 2016 Feb 1; 104: 284-292. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.060.
- [9] Balendran RV, Zhou FP, Nadeem A, Leung AY. Influence of steel fibres on strength and ductility of normal and lightweight high strength concrete. Building and environment. 2002 Dec 1; 37(12): 1361-1367. doi: 10.1016/S0360-1323(01)00109-3.

- [10] Almasabha G, Murad Y, Alghossoon A, Saleh E, Tarawneh A. Sustainability of using steel fibers in reinforced concrete deep beams without stirrups. *Sustainability*. 2023 Mar 7; 15(6): 4721. **doi: 10.3390/su15064721**
- [11] Wang XF, Huang YJ, Wu GY, Fang C, Li DW, Han NX, Xing F. Effect of nano-SiO<sub>2</sub> on strength, shrinkage and cracking sensitivity of lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 2018 Jun 30; 175: 115-125. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.113**
- [12] Atmaca N, Abbas ML, Atmaca A. Effects of nano-silica on the gas permeability, durability and mechanical properties of high-strength lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 2017 Aug 30; 147: 17-26. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.156**
- [13] Bastami M, Baghbadrani M, Aslani F. Performance of nano-Silica modified high strength concrete at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*. 2014 Oct 15; 68: 402-408. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.026**
- [14] Beigi MH, Berenjian J, Omran OL, Nik AS, Nikbin IM. An experimental survey on combined effects of fibers and nanosilica on the mechanical, rheological, and durability properties of self-compacting concrete. *Materials & Design*. 2013 Sep 1; 50: 1019-1029. **doi: 10.1016/j.matdes.2013.03.046**
- [15] Yu R, Spiesz P, Brouwers HJ. Effect of nano-silica on the hydration and microstructure development of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with a low binder amount. *Construction and Building Materials*. 2014 Aug 29; 65: 140-150. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.063**
- [16] Mohamed AM. Influence of nano materials on flexural behavior and compressive strength of concrete. *HBRC journal*. 2016 Aug 1; 12(2): 212-225. **doi: 10.1016/j.hbrcej.2014.11.006**
- [17] Wang XF, Huang YJ, Wu GY, Fang C, Li DW, Han NX, Xing F. Effect of nano-SiO<sub>2</sub> on strength, shrinkage and cracking sensitivity of lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 2018 Jun 30; 175: 115-125. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.113**
- [18] Ahmadi SM, Honarbaksh A, Zhiani R, Tavakoli D. Effects of kcc-1/ag nanoparticles on the mechanical properties of concrete. *International Journal of Engineering*. 2022 Jul 1; 35(7): 1388-1397. **doi: 10.5829/ije.2022.35.07a.17**
- [19] Cotsovovs DM, Pavlović MN. Numerical investigation of concrete subjected to compressive impact loading. Part 2: Parametric investigation of factors affecting behaviour at high loading rates. *Computers & structures*. 2008 Jan 1; 86(1-2): 164-180. **doi: 10.1016/j.compstruc.2007.05.015**
- [20] Zhou JK, Ge LM. Effect of strain rate and water-to-cement ratio on compressive mechanical behavior of cement mortar. *Journal of Central South University*. 2015 Mar; 22(3): 1087-1095. **doi: 10.1007/s11771-015-2620-9**
- [21] Wang ZL, Wu J, Wang JG. Experimental and numerical analysis on effect of fibre aspect ratio on mechanical properties of SRFC. *Construction and Building Materials*. 2010 Apr 1; 24(4): 559-565. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.09.009**
- [22] Suaris W, Shah SP. Properties of concrete subjected to impact. *Journal of structural engineering*. 1983 Jul; 109(7): 1727-1741. **doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1983)109:7(1727)**
- [23] Harsh S, Shen Z, Darwin D. Strain-Rate Sensitive Behavior of Cement Paste and Mortar in Compression. *ACI Materials Journal*. 1990; 87(55): 508-516.
- [24] Zhou ZL, Zou Y, Li XB, Jiang YH. Stress evolution and failure process of Brazilian disc under impact. *Journal of Central South University*. 2013 Jan; 20(1): 172-177. **doi: 10.1007/s11771-013-1473-3**
- [25] Suaris W, Shah SP. Rate-sensitive damage theory for brittle solids. *Journal of Engineering Mechanics*. 1984 Jun; 110(6): 985-997. **doi: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1984)110:6(985)**
- [26] Atchley BL, Furr HL. Strength and energy absorption capabilities of plain concrete under dynamic and static loadings. *InJournal Proceedings* 1967 Nov 1; 64(11): 745-756.
- [27] ASTM C330. Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete, American Society for Testing and Materials. West Conshohocken. 2017.
- [28] ASTM C33 Method for Standard Specification for Concrete Aggregates. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken. 2009.
- [29] Main Page [Internet]. Shimi Sakhteman co. [cited 2024]. Available from: <http://www.shimisakhteman.com>
- [30] Elvin G. Building green with nanotechnology. *InTechnical Proceedings of the 2007 Cleantech Conference and Trade Show* 2019 Aug 22; 167-170. CRC Press.
- [31] Carnovale DJ. *Behaviour and analysis of steel and macro-synthetic fibre reinforced concrete subjected to reversed cyclic loading: a pilot investigation*. Doctoral dissertation, University of Toronto. 2013.
- [32] ACI 211.2-04. Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete. Farmington Hills. American Concrete Institute. 2004.
- [33] ASTM C39 Concrete Cylinder Compression Testing [Internet]. ADMET. [cited 2024 May 29]. Available from: <https://www.admet.com/testing-applications/testing-standards/astm-c39-concrete-cylinder-compression-testing>

- [34] ASTM C469. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and 769 Poisson's Ratio of Concrete in Compression. West Conshohocken, American Society for Testing and Materials. 2014.
- [35] Chen X, Wu S, Zhou J. Experimental and modeling study of dynamic mechanical properties of cement paste, mortar and concrete. *Construction and Building Materials*. 2013 Oct 1; 47: 419-430. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.063**
- [36] Zhang M, Wu HJ, Li QM, Huang FL. Further investigation on the dynamic compressive strength enhancement of concrete-like materials based on split Hopkinson pressure bar tests. Part I: Experiments. *International journal of impact engineering*. 2009 Dec 1; 36(12): 1327-1334. **doi: 10.1016/j.ijimpeng.2009.04.010**
- [37] Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading. *Proceedings of the physical society. Section B*. 1949 Nov 1; 62(11): 676. **doi: 10.1088/0370-1301/62/11/302**
- [38] Ramírez H, Rubio-Gonzalez C. Finite-element simulation of wave propagation and dispersion in Hopkinson bar test. *Materials & design*. 2006 Jan 1; 27(1): 36-44. **doi: 10.1016/j.matdes.2004.08.021**
- [39] Pourolajal S, Majzoubi GH. Determination of stress-strain curves of materials at high strain rates using dynamic indentation technique. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2021 Jul; 56(5): 327-336. **doi: 10.1177/030932472094864**
- [40] Li LG, Zheng JY, Zhu J, Kwan AK. Combined usage of micro-silica and nano-silica in concrete: SP demand, cementing efficiencies and synergistic effect. *Construction and Building Materials*. 2018 Apr 20; 168: 622-632. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.181**
- [41] Haruehansapong S, Pulngern T, Chucheepsakul S. Effect of the particle size of nanosilica on the compressive strength and the optimum replacement content of cement mortar containing nano-SiO<sub>2</sub>. *Construction and Building Materials*. 2014 Jan 15; 50: 471-477. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.002**
- [42] Li QM, Meng H. About the dynamic strength enhancement of concrete-like materials in a split Hopkinson pressure bar test. *International Journal of solids and structures*. 2003 Jan 1; 40(2): 343-360. **doi: 10.1016/S0020-7683(02)00526-7**
- [43] John R, Shah SP. Mixed-mode fracture of concrete subjected to impact loading. *Journal of Structural Engineering*. 1990 Mar; 116(3): 585-602. **doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1990)116:3(585)**
- [44] Li W, Huang Z, Cao F, Sun Z, Shah SP. Effects of nano-silica and nano-limestone on flowability and mechanical properties of ultra-high-performance concrete matrix. *Construction and Building Materials*. 2015 Oct 1; 95: 366-374. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.137**
- [45] Li W, Huang Z, Zu T, Shi C, Duan WH, Shah SP. Influence of nanolimestone on the hydration, mechanical strength, and autogenous shrinkage of ultrahigh-performance concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2016 Jan 1; 28(1): 04015068. **doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001327**
- [46] Hughes BP, Fattuhi NI. The workability of steel-fibre-reinforced concrete. *Magazine of concrete research*. 1976 Sep; 28(96): 157-161. **doi: 10.1680/mac.1976.28.96.157**
- [47] Mellinger FM, Birkimer DL. Measurements of stress and strain on cylindrical test specimens of rock and concrete under impact loading. Department of the Army, Ohio River Division Laboratories, Corps of Engineers; 1966 Apr 1.
- [48] John R, Antoun T, Rajendran AM. Effect of strain rate and size on tensile strength of concrete. In *Shock compression of condensed matter-1991* 1992 Jan 1; 501-504. **doi: 10.1016/B978-0-444-89732-9.50115-1**