

## ارزیابی عملی استفاده از بتن های سبک خودتراکم در احداث سازه های بتن آرمه

حامد پوراحمدی صفت عربانی<sup>۱\*</sup>، علی صدرممتازی<sup>۲</sup>، میرعلیمحمد میرگذار لنگرودی<sup>۳</sup>، مرتضی عمویی<sup>۴</sup>، رضا کهنی خشکبیجاری<sup>۵</sup>

۱- گروه مهندسی عمران، واحد فومن و شفت، دانشگاه آزاد اسلامی، فومن، ایران

۲- دانشیار گروه عمران، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۳- باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد فومن و شفت، دانشگاه آزاد اسلامی، فومن، ایران

۴- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران

۵- دکترای مهندسی سازه، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

### چکیده

به عقیده بسیاری، بتن خود تراکم یا **SCC** را می توان بتن آینده دانست. مهمترین قابلیت بتن خودتراکم، توانایی جریان یافتن تحت وزن خود، پرکردن فضای موردنیاز و یا قالب به طور کامل، و ایجاد یک مخلوط چگال و به مقدار کافی همگن در بین میلگردهای اعضای بتن آرمه، بدون نیاز به ویبره می باشد. اما روانی بیش از حد این بتن، فشار وارد بر قالب بندی را افزایش می دهد، به طوری که در لحظات اول بتن ریزی، فشار قابل توجهی بصورت هیدرواستاتیکی بر جدار قالب وارد می شود. لذا کاهش وزن بتن های خودتراکم می تواند یکی از روش های کاهش فشار وارد بر قالب بندی باشد. همچنین واضح است که کاهش چگالی بتن، اثر محسوسی بر کاهش وزن سازه داشته و به کاهش ابعاد اعضای سازه ای خواهد انجامید. اما از سوی دیگر همواره نگرانی هایی در خصوص جداسدگی سبک دانه ها در هنگام حمل و یا بتن ریزی وجود دارد. در این پژوهش، قابلیت حفظ همگن بودن مخلوط و مشخصات مکانیکی بتن سبک خودتراکم **LWSCC** ساخته شده با سبک دانه های رایج در کشور شامل اسکوریا، لیکا و پومیس در صورت استفاده کاربردی از آن در ستون های بتن آرمه، به کمک روش های نیمه مخرب و غیرمخرب بررسی می شود. برای رسیدن به این هدف، ستون های بتن مسلح ساخته شده با بتن سبک خودتراکم، به کمک آزمایش نیمه مخرب مغزه گیری به منظور تعیین مقاومت فشاری و نفوذناپذیری و آزمایش غیر مخرب التراسونیک در ارتفاع های مختلف ستون ها، مورد بررسی قرار گرفته اند. نتایج نشان داد که سبکدانه اسکوریا در مقایسه با سایر سبکدانه های مورد بررسی در این تحقیق، در مجموع عملکرد بهتری در بتن سبک خودتراکم داشته است.

کلمات کلیدی: ستون بتن مسلح، بتن سبک خودتراکم، مقاومت فشاری، اولتراسونیک، مغزه گیری، نفوذناپذیری

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2018.104048.1376	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2018.104048.1376	۱۳۹۸/۰۶/۱۰	۱۳۹۷/۰۲/۱۴	۱۳۹۷/۰۲/۱۴	۱۳۹۶/۱۲/۱۹	۱۳۹۶/۰۸/۱۵

\*نویسنده مسئول: حامد پوراحمدی صفت عربانی

# Practical Evaluation of Using Lightweight Self-Compacting Concrete in Reinforced Concrete Constructions

Hamed Pourahmadi Sefat Arabani<sup>1\*</sup>, Ali Sadrmomtazi<sup>2</sup>, Mir Alimohammad Mirgozar Langaroudi<sup>3</sup>, Morteza Amooie<sup>4</sup>, Reza Kohani Khoshkbijari<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Department of civil Engineering, Fouman and Shaft Branch, Islamic Azad University, Fouman, Iran

<sup>2</sup>Associate Professor, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

<sup>3</sup>Young Researchers and Elite Club, Fouman and Shaft Branch, Islamic Azad University, Fouman, Iran

<sup>4</sup>M.Sc. in Structural Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>5</sup> PhD in Structural Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

## ABSTRACT

Self-compacting concrete or SCC can be considered as the concrete of the future. The most important feature of self-compacting concrete is flowing under its own weight to fill the mould or framework completely, and also to create a dense and sufficiently homogeneous mix between the bars, without any need for vibration. But the excessive Liquidity of this concrete increases the hydrostatic pressure on the frameworks. So, decrease in the weight of self-compacting concrete could be lead to reducing the pressure on frameworks. It is also clear that decreasing the density of concrete has a significant effect on the reduction of the structure's weight and will lead to decrease in the size of structural elements. On the other hand, there are general concerns about the segregation of lightweight aggregates during transportation or placing. In this research, the ability of maintaining the homogeneity of the mixture and the mechanical properties of lightweight self-compacting concrete (LWSCC) made with common lightweight aggregates in the country including Scoria, Leca and Pumice, has been investigated on concrete columns, using the Semi-destructive and non-destructive methods. To do this, reinforced concrete columns made by self-compacting concrete were investigated using a semi-destructive core test to determine the compressive strength and impermeability. Non-destructive ultrasonic test at different heights of the columns was also conducted. The results showed that Scoria aggregate had generally better performance in self-compacting concrete compared to other lightweight aggregates.

## ARTICLE INFO

**Receive Date:** 06 November 2017

**Revise Date:** 10 March 2018

**Accept Date:** 04 May 2018

### Keywords:

Reinforced concrete column,  
Lightweight self-compacting concrete,  
Compressive strength,  
Ultrasonic test,  
Core test,  
Impermeability test

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.104048.1376

\*Corresponding author: Hamed Pourahmadi Sefat Arabani

Email address: hamed.pourahmadi@fshiau.ac.ir

## ۱- مقدمه

بتن خودتراکم در سال ۱۹۸۶ در دانشگاه توکیو، ژاپن، به منظور بهبود کیفیت ساخت و ساز و غلبه بر مشکلات موجود در استفاده از بتن معمولی ساخته شد [۱]. از بتن خودتراکم برای تسهیل و تضمین پر شدن مناسب قالب و عملکرد سازه‌های مناسب در نقاط با تراکم بالای آرماتور و دارای محدودیت برای بتن ریزی، استفاده شده [۲] و بکارگیری این نوع بتن مزایای زیادی از جمله افزایش بهره‌وری در ساخت و ساز، کاهش هزینه تمام شده و توسعه پایدار و سازگار با محیط زیست را به همراه داشته است [۳].

بتن سبک خودتراکم، نوعی بتن با عملکرد بالا است که از توسعه بتن خودتراکم حاصل شده است. بتن سبک خودتراکم، ترکیبی ایده‌آل از خصوصیات بتن سبک و بتن خودتراکم می‌باشد [۴-۶]. بتن سبک خودتراکم، به تغییرات خواص اجزای مخلوط و نسبت اختلاط آنها حساسیت زیادی نشان می‌دهد. مشخصات رایج طرح اختلاط بتن سبک خودتراکم که برای اطمینان از خواص بتن تازه الزامی هستند، می‌توانند تاثیر زیادی بر خواص بتن سخت شده -مانند مقاومت فشاری، پایداری ابعادی و دوام- داشته باشند [۷]. به عنوان مثال، مقاومت فشاری بتن سبک خودتراکم، تحت تاثیر نوع سنگدانه‌ها، نسبت آب به سیمان و نسبت آب به کل مواد پودری قرار دارد [۸-۱۰].

علیرغم مزایای استفاده عملی از بتن خودتراکم از جمله جریان‌پذیری بالا و طبیعت خودترازشوندگی این بتن، همواره نگرانی‌هایی در خصوص احتمال رخ داد پدیده‌هایی همچون جداشدگی و ته‌نشین شدن درشت‌دانه‌ها در هنگام حمل و یا بتن‌ریزی وجود دارد [۳]. همچنین، به رغم وجود مطالعات زیاد در خصوص مزایای بتن سبک خودتراکم و عملکرد ارزشمند آن در حالت تازه، مطالعات کمتری درباره خصوصیات پس از سخت شدگی این نوع بتن برای پاسخ مکانیکی و دوام آن در دسترس می‌باشد [۵، ۱۱-۱۳]. مطالعات انجام شده توسط محققین مختلف نشان داده است که تغییرات مقاومت بتن درجا در ارتفاع دیوارها و ستون‌ها و همچنین در طول تیرها، در اعضای ساخته شده از بتن خودتراکم (با سنگدانه‌های معمولی) مشابه مقاطع ساخته شده از بتن معمولی بوده و بتن خودتراکم از نظر یکنواختی خصوصیات در نقاط مختلف مقطع، اندکی بهتر بوده است [۳، ۱۴-۱۶]. مشابهت تغییرات مقاومت در نقاط مختلف مقطع تیر نیز در خصوص مقاطع ساخته شده از بتن سبک و بتن معمولی گزارش شده است [۱۷، ۱۸].

در این پژوهش به منظور ارزیابی چگونگی توزیع خصوصیات مکانیکی در مقاطع بتن آرمه ساخته شده از بتن سبک خودتراکم، تعدادی ستون با مقیاس واقعی، با استفاده از سنگدانه‌های معمولی و همچنین سبکدانه‌های لیکا، پومیس و اسکوریا ساخته شد و با استفاده از مغزه-گیری، مقاومت فشاری در نقاط مختلف اعضا تعیین و نتایج حاصله با یکدیگر و نیز با نمونه‌های شاهد مقایسه گردید و بر روی مغزه‌های گرفته شده در ارتفاع ستون‌های ساخته شده از سنگدانه‌های مختلف، آزمایش نفوذپذیری انجام گرفت. همچنین در سنین مختلف در نقاط مختلف ستون‌های ساخته شده، آزمایش غیرمخرب اولتراسونیک، برای بررسی بیشتر مشخصات صورت گرفت.

## ۲- مواد و روش‌ها

## ۲-۱- مصالح و طرح‌های اختلاط به کار رفته

در این پژوهش از شن رودخانه‌ای با حداکثر بعد ۱۲٫۵ میلی‌متر، چگالی  $2,64 \text{ gr/cm}^3$  و جذب آب ۱٫۵ درصد ستفاده شد و دانه بندی آن بر اساس استاندارد ASTM C33 [۱۹] انجام گرفت. ماسه رودخانه‌ای گردگوشه با چگالی  $2,6 \text{ gr/cm}^3$  و جذب آب ۲٫۵ درصد مورد استفاده قرار گرفت و سیمان پرتلند تیپ ۱ ساخت کارخانه سیمان هگمتان همدان جهت مصرف انتخاب گردید. میکروسیلیس مصرفی ساخت کارخانه فروسیلیس ایران و دارای چگالی  $2200 \text{ Kg/m}^3$  می‌باشد. فوق روان کننده مورد استفاده با نام تجاری FARCO PLAST P103R (با پایه پلی‌کربوکسیلات) و تولید کارخانه شیمی ساختمان ایران می‌باشد. سبک‌دانه‌های مورد استفاده عبارتند از لیکا (Light

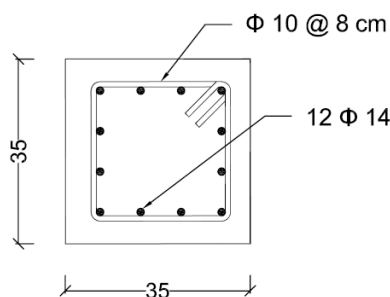
(Expanded Clay Aggregate) ، اسکوریا و پومیس. لیکای مصرفی از کارخانه لیکای ایران با چگالی  $1250 \text{ Kg/m}^3$  تهیه گردید، اسکوریا از معدن قروه در استان کردستان با چگالی  $1600 \text{ Kg/m}^3$  و پومیس مورد استفاده از اسکندان تبریز با چگالی  $1450 \text{ Kg/m}^3$  خریداری شد. مقدار درصد جذب آب سبکدانه‌های مصرفی، ۱۰ درصد برای لیکا، ۱۵ درصد برای اسکوریا و ۱۷ درصد برای پومیس بوده است. طرح اختلاط‌های به کار رفته در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: جزئیات طرح اختلاط‌های بکار رفته

ردیف	نام طرح	سیمان ( $\text{Kg/m}^3$ )	میکروسیلیس (%)	سنگ آهک ( $\text{Kg/m}^3$ )	ماسه (۰-۶) ( $\text{Kg/m}^3$ )	شن (۶-۱۲,۵) ( $\text{Kg/m}^3$ )	پومیس (۶-۱۲,۵) ( $\text{Kg/m}^3$ )	اسکوریا (۶-۱۲,۵) ( $\text{Kg/m}^3$ )	لیکا (۶-۱۲,۵) ( $\text{Kg/m}^3$ )	آب ( $\text{Kg/m}^3$ )	آب به سیمان کننده (%)	فوق روان کننده (%)
۱	Ctrl	۴۵۰	۱۰	۲۵۰	۷۵۰	۷۵۰	۰	۰	۰	۱۷۵	۰,۳۵	۰,۸
۲	P	۴۵۰	۱۰	۲۵۰	۶۵۰	۰	۴۹۰	۰	۰	۱۷۵	۰,۳۵	۱
۳	S	۴۵۰	۱۰	۲۵۰	۶۵۰	۰	۰	۵۱۰	۰	۱۷۵	۰,۳۵	۱,۱
۴	L	۴۵۰	۱۰	۲۵۰	۶۵۰	۰	۰	۰	۴۰۰	۱۷۵	۰,۳۵	۰,۹

## ۲-۲- اعضای ساخته شده

در این پژوهش چهار عدد ستون به ابعاد  $350 \times 350 \times 2700 \text{ mm}^3$  ساخته شد. شکل مقطع عرضی ستون‌ها و آرماتور گذاری آنها در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱: جزئیات مقاطع ستون‌ها

هریک از ستون‌های ساخته شده با یکی از طرح‌های فوق‌الذکر به روش ترمی پر شدند که حداکثر ارتفاع سقوط بتن در آنها به ۹۰ سانتیمتر محدود گردید. در هیچیک از ستون‌ها از هیچگونه ویبراتوری جهت متراکم نمودن بتن استفاده نشد. قالب کلیه ستون‌ها در سن ۶ روزگی باز شد.

## ۲-۳- مغزه گیری، آزمایش فشاری و آزمایش نفوذ ناپذیری

برای تعیین مقاومت فشاری بتن ستون‌های مورد بررسی و همچنین بررسی نفوذ ناپذیری بتن‌ها، از اعضای ساخته شده بر اساس استاندارد ASTM C 42/C 42M - 03 مغزه‌گیری انجام گرفت [۲۰]. در تمامی ستون‌ها، در سن ۹۰ روزگی در ترازهای ارتفاعی ۴۵، ۱۳۵ و ۲۲۵ سانتیمتر از پای ستون، یک مغزه افقی به قطر ۱۰۰ mm برای آزمایش نفوذ آب و یک مغزه افقی به قطر ۵۰ mm برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری تهیه گردید. سپس مغزه‌های مورد استفاده برای تعیین مقاومت فشاری، به طول دوبرابر قطر، بریده و کلاhek گذاری شدند تا نیازی به ضریب اصلاح مقاومت نباشد [۲۰]. مغزه‌ها در سن تقریباً ۹۵ روزگی تحت آزمایش فشاری قرار گرفتند.

مغزه‌های تهیه شده برای آزمایش نفوذ ناپذیری بر اساس استاندارد DIN 1048 به مدت ۷۲ ساعت تحت فشار ۵ بار قرار داده شدند [۲۱]. دستگاه تست نفوذ ناپذیری و نمونه‌های مورد آزمایش در شکل شماره ۲ نشان داده شده است. پس از گذشت زمان لازم، نمونه‌ها از دستگاه باز شده و یک به یک در راستای قطر شکسته شدند و بلافاصله عمق نفوذ آب در آنها علامت‌گذاری گردید.



شکل ۲: دستگاه آزمایش نفوذ ناپذیری

## ۲-۴- آزمایش اولتراسونیک

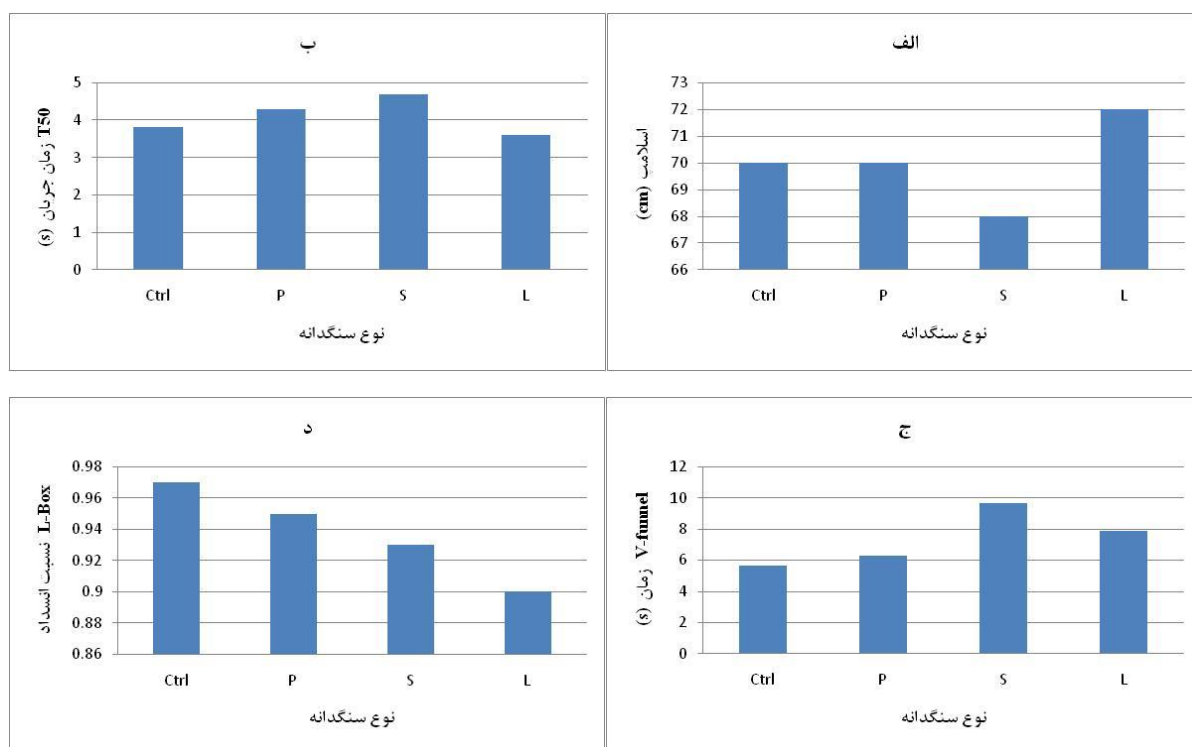
در تمامی ستون‌ها آزمایش اولتراسونیک در سن ۹۰ روز در بالا، وسط و پایین ستون با در نظر گرفتن محل میلگردهای طولی و عرضی و با استفاده از دستگاه Proceq انجام گرفت.

## ۳- نتایج و بحث

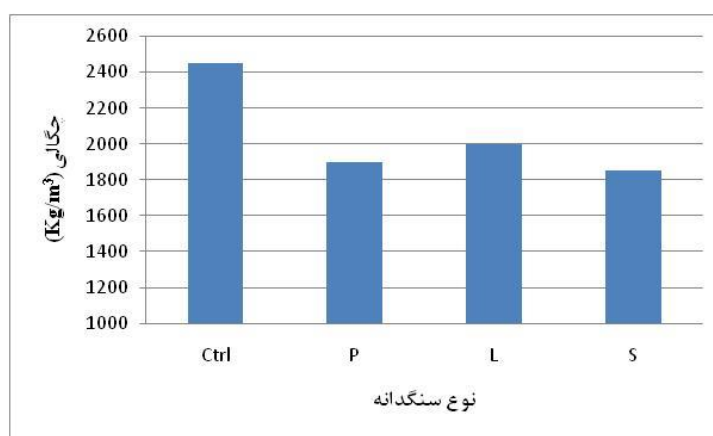
### ۱-۳- خواص رئولوژیکی و چگالی

خواص رئولوژیکی طرح اختلاط‌های مورد استفاده در حالت بتن تازه، شامل آزمایش اسلامپ، میز جریان T50، اندازه‌گیری زمان در آزمایش V-funnel و نسبت انسداد آزمایش L-Box در شکل شماره ۳ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همچنین چگالی طرح‌های اختلاط مورد استفاده نیز در شکل شماره ۴ نشان داده شده است. در این شکل‌ها، Ctrl معرف طرح کنترل (با سنگدانه‌های معمولی) می‌باشد و L، P و S نیز به ترتیب نشان دهنده طرح‌های حاوی سبکدانه‌های پومیس، لیکا و اسکوریا می‌باشند. مقادیر بدست آمده از آزمایشات رئولوژیکی

انطباق مناسبی با محدوده‌های مجاز ارائه شده توسط کمیته EFNARC دارد [۲۲]. همچنین این نتایج محدوده‌های رئولوژیکی بدست آمده توسط سایر محققین را تایید می‌نماید [۱۰، ۲۳].



شکل شماره ۳: خواص رئولوژیکی؛ الف) اسلامپ ب) میز جریان T50 ج) زمان V-funnel د) نسبت انسداد L-Box

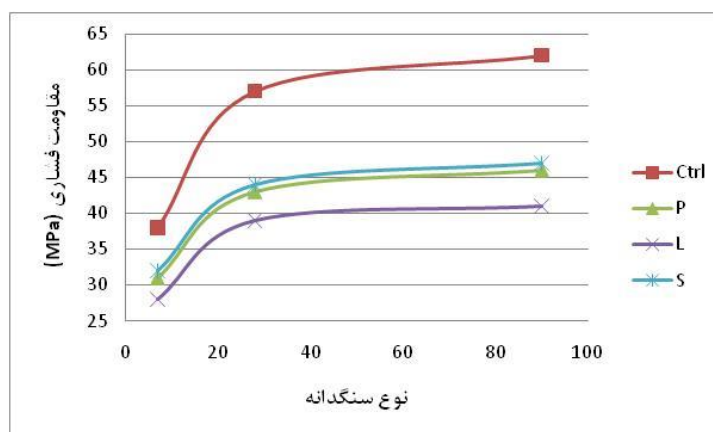


شکل شماره ۴: چگالی مخلوطها

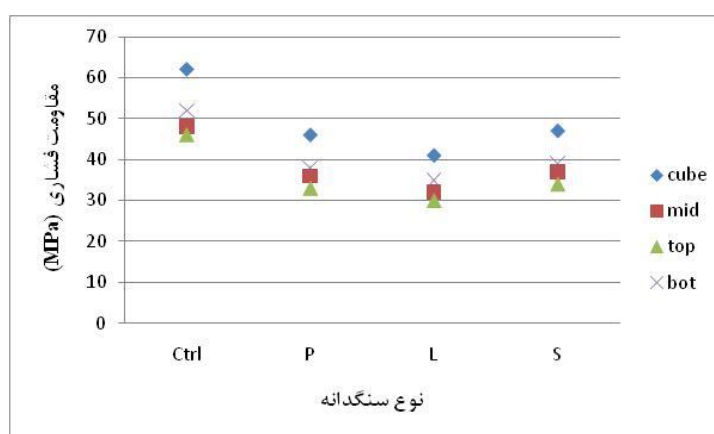
## ۳-۲- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری نمونه‌های شاهد طرح اختلاط‌های مورد استفاده در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه در شکل شماره ۵ نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که بطور کلی استفاده از سبکدانه‌ها باعث کاهش مقاومت فشاری بتن شده است. نتایج حاصل شده در محدوده مشابهی با مقاله شناگ [۲۴] قرار دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که روند افزایش مقاومت با گذشت زمان در بتن‌های سبک خودتراکم حاوی پومیس و اسکوریا مشابه هم بوده است. کمترین مقاومت فشاری در بین طرح اختلاط‌های مورد استفاده، مربوط به بتن سبک خودتراکم حاوی لیکا می‌باشد.

در شکل شماره ۶ مقاومت فشاری بتن درجا حاصل از مغزه‌گیری‌ها با نمونه شاهد در سن ۹۰ روزگی مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد تغییرات مقاومت فشاری بدست آمده از مغزه‌ها مشابه نمونه‌های شاهد بوده است. همچنین در تمامی مغزه‌ها، مقاومت فشاری بتن درجا، هم در طرح حاوی سنگدانه معمولی و هم در طرح‌های حاوی سبکدانه، در پایین ستون، اندکی بیشتر از وسط ارتفاع ستون بود و در بالای ستون کمترین مقدار را نشان داد؛ که می‌توان نتیجه گرفت تغییرات مقاومت فشاری در ارتفاع ستون‌های ساخته شده از بتن خودتراکم حاوی سنگدانه‌های معمولی و سبکدانه‌های لیکا، پومیس و اسکوریا مشابه هم می‌باشد.



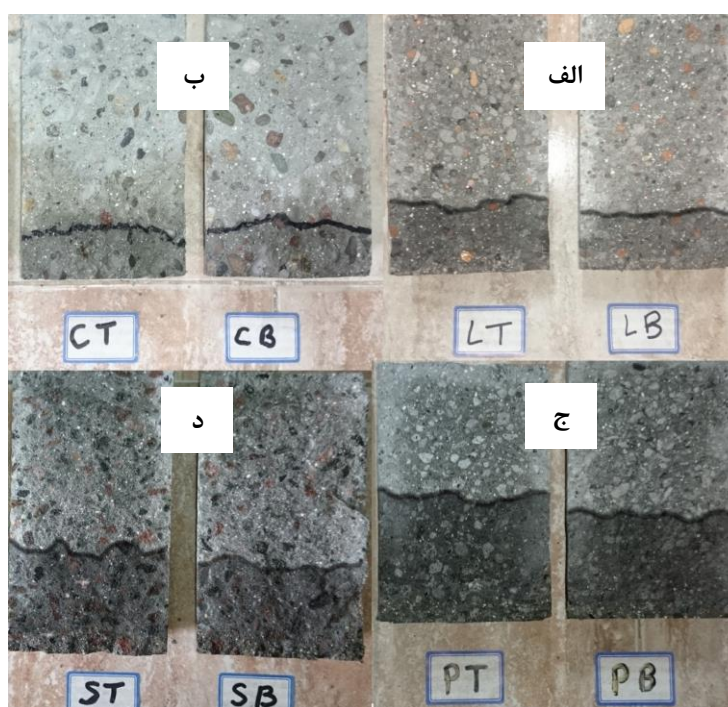
شکل شماره ۵: تغییرات مقاومت فشاری طرح اختلاط‌های مورد استفاده، در سنین مختلف



شکل شماره ۶: مقایسه مقاومت فشاری مغزه‌ها با نمونه شاهد

## ۳-۳- آزمایش نفوذ ناپذیری

نمونه‌های تحت آزمایش نفوذ ناپذیری پس از شکسته شدن و علامتگذاری عمق نفوذ آب در آنها، در شکل شماره ۷ نشان داده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که بطور کلی عمق نفوذ آب در بتن‌های خودتراکم حاوی سبکدانه بیشتر از بتن خودتراکم حاوی سنگدانه‌های معمولی بوده است. علاوه بر این، با مقایسه نمونه‌ها می‌توان دید که در بتن خودتراکم با سنگدانه‌های معمولی میزان نفوذ ناپذیری در قسمت‌های مختلف ستون با یکدیگر تفاوت قابل توجهی نداشته‌اند، اما در بتن‌های خودتراکم حاوی سبکدانه میزان نفوذ پذیری در بالای ستون‌ها به مقدار جزئی بیشتر از بخش پایینی ستون بوده است. در میان بتن‌های حاوی سبکدانه نیز بیشترین و کمترین عمق نفوذ آب به ترتیب مربوط به پومیس و لیکا می‌باشد که مشابه این روند، پیشتر در آزمایش نفوذ یون کلر نیز مشاهده شده است [۱۱]. در میان سبکدانه‌های مورد بررسی کمترین مقدار تخلخل مربوط به لیکا می‌باشد (بر اساس نتایج آزمایش جذب آب)، و نفوذ ناپذیرتر بودن بتن خودتراکم حاوی این سبکدانه در مقایسه با سایر سبکدانه‌ها را می‌توان به این دلیل دانست.



شکل شماره ۷: علامتگذاری عمق نفوذ آب در نمونه‌های تحت آزمایش نفوذ ناپذیری؛ بتن خود تراکم حاوی الف) لیکا ب) سنگدانه معمولی ج) پومیس د) اسکوریا

## ۳-۴- آزمایش اولتراسونیک

برای آزمایش اولتراسونیک بر روی ستون‌های مورد بررسی، یکبار، پروب‌ها در دو وجه مقابل هم و بار دیگر در دو وجه عمود بر هم ستون‌ها قرارداده شد که نتایج حاصله در جدول شماره ۲ نشان داده شده‌اند. همانگونه که مشاهده می‌شود، در تمامی ستون‌ها با افزایش ارتفاع، سرعت امواج کاهش می‌یابد. همچنین سرعت امواج در بتن کنترل بیشتر از بتن‌های خودتراکم حاوی سبکدانه بوده است و در بتن‌های خودتراکم حاوی سبکدانه نیز بیشترین سرعت موج مربوط به اسکوریا و کمترین سرعت موج مربوط به لیکا می‌باشد. از مقایسه روند فوق با



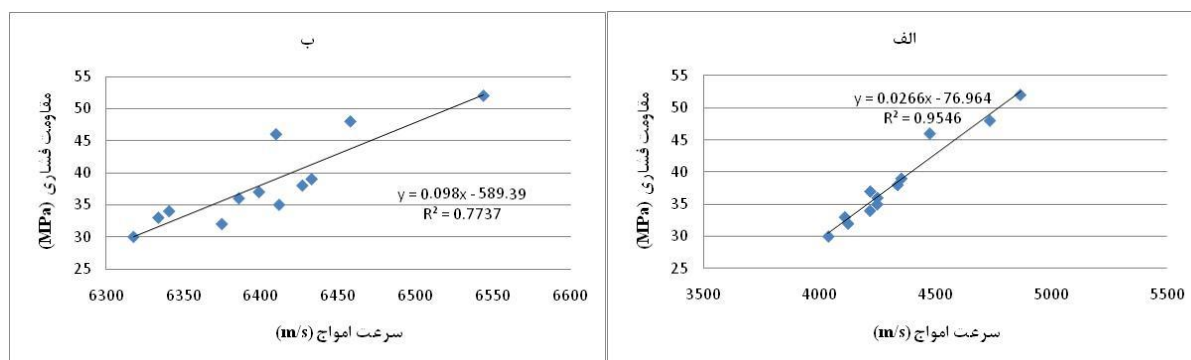
نتایج حاصل از مقاومت فشاری نمونه‌ها، می‌توان دید که روند تغییر سرعت امواج با تغییرات مقاومت فشاری مطابقت می‌نماید. این نتایج با تحقیقات کرت و همکاران [۲۳] مطابقت دارد.

در شکل شماره ۸ ارتباط بین مقاومت فشاری و سرعت امواج مورد بررسی قرار گرفته است که نشان دهنده ارتباطی معنادار ( $R^2 = 0.95$ ) در حالتی است که آزمایش با قرار دادن پروب‌ها در دو وجه مقابل هم ستون انجام گرفت. در حالت عمود بر هم، مقدار کم  $R^2$  نشان دهنده پراکندگی زیاد در نتایج این حالت از آزمایش می‌باشد.

جدول شماره ۲: نتایج آزمایش اولتراسونیک

نام ستون	نحوه قرارگیری پروب‌ها	محل آزمایش	سرعت امواج (m/s)	زمان ( $\mu$ s)
Ctrl	دو وجه مقابل هم	پایین ستون	۴۸۶۸	۷۱٫۹
		وسط ستون	۴۷۳۶	۷۳٫۹
		بالای ستون	۴۴۷۶	۷۸٫۲
L	دو وجه عمود بر هم	پایین ستون	۶۵۴۴	۵۳٫۵
		وسط ستون	۶۴۵۸	۵۴٫۲
		بالای ستون	۶۴۱۰	۵۴٫۶
S	دو وجه مقابل هم	پایین ستون	۴۲۴۸	۸۲٫۴
		وسط ستون	۴۱۲۲	۸۴٫۹
		بالای ستون	۴۰۳۷	۸۶٫۷
S	دو وجه عمود بر هم	پایین ستون	۶۴۱۲	۵۴٫۶
		وسط ستون	۶۳۷۵	۵۴٫۹
		بالای ستون	۶۳۱۸	۵۵٫۴
S	دو وجه مقابل هم	پایین ستون	۴۲۵۳	۸۰٫۴
		وسط ستون	۴۲۴۹	۸۲٫۴
		بالای ستون	۴۲۱۷	۸۳٫۱
S	دو وجه عمود بر هم	پایین ستون	۶۴۳۳	۵۴٫۴
		وسط ستون	۶۳۹۹	۵۴٫۷
		بالای ستون	۶۳۴۱	۵۵٫۲

۸۰٫۷	۴۳۳۷	پایین ستون	دو وجه مقابل هم	p
۸۲٫۹	۴۲۱۸	وسط ستون		
۸۵٫۲	۴۱۰۸	بالای ستون		
۵۴٫۵	۶۴۲۷	پایین ستون	دو وجه عمود بر هم	
۵۴٫۸	۶۳۸۶	وسط ستون		
۵۵٫۳	۶۳۳۴	بالای ستون		



شکل شماره ۸: ارتباط مقاومت فشاری و سرعت امواج اولتراسونیک؛ الف) دو وجه مقابل ستون ب) دو وجه عمود بر هم ستون

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش با ساخت ستون‌هایی در مقیاس واقعی، نحوه توزیع مشخصات مکانیکی و نفوذ ناپذیری در اعضای ساخته شده از بتن خودتراکم با سنگدانه‌های معمولی و سه نوع سبکدانه لیکا، پومیس و اسکوریا مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله در ذیل ارائه می‌گردد:

۱- افزایش مقاومت فشاری با گذشت زمان در طرح اختلاط بتن‌های خودتراکم حاوی سبکدانه اسکوریا مشابه بتن حاوی پومیس بوده و بتن خودتراکم حاوی لیکا کمترین مقاومت فشاری را نشان داد. مقاومت فشاری اختلاط‌های حاوی سبکدانه کمتر از اختلاط حاوی سنگدانه‌های معمولی بود.

۲- تغییرات مقاومت فشاری بتن درجا بدست آمده از مغزه‌ها، مشابه نمونه‌های شاهد (که در نتیجه گیری قبل ذکر گردید) می‌باشد.

۳- مقاومت فشاری بتن درجا در همه ستون‌ها، در پای ستون اندکی بیشتر از بالای ستون بوده است که نشان می‌دهد روند تغییرات مقاومت بتن درجا در ارتفاع ستون‌های ساخته شده از بتن خودتراکم حاوی سنگدانه‌های معمولی و سبکدانه‌های لیکا، پومیس و اسکوریا مشابه هم می‌باشد.

۴- در بتن خودتراکم با سنگدانه‌های معمولی میزان نفوذ ناپذیری در بالا و پایین ستون تفاوت قابل توجهی نشان نداد، اما در بتن‌های خودتراکم حاوی سبکدانه میزان نفوذ پذیری در بالای ستون‌ها به مقدار جزیی بیشتر از بخش پایینی ستون بود. همچنین میزان نفوذ آب

در بتن‌های خودتراکم حاوی سبکدانه بیشتر از بتن خودتراکم حاوی سنگدانه‌های معمولی بوده است. در میان بتن‌ها خودتراکم حاوی سبکدانه، بیشترین و کمترین عمق نفوذ آب به ترتیب مربوط به بتن‌های خودتراکم حاوی پومیس و لیکا بوده‌اند.

۵- در تمامی ستون‌ها با افزایش ارتفاع، سرعت امواج اولتراسونیک کاهش یافت. سرعت امواج در بتن‌های خودتراکم حاوی سبکدانه کمتر از بتن خودتراکم حاوی سنگدانه‌های معمولی بوده و همچنین در بتن‌های خودتراکم حاوی سبکدانه بیشترین سرعت موج مربوط به اسکوریا و کمترین سرعت موج مربوط به لیکا می‌باشد که با تغییرات مقاومت فشاری ستون‌ها مطابقت می‌نماید.

۶- رابطه بین مقاومت فشاری و سرعت امواج در حالتی که آزمایش با قرار دادن پروب‌ها در دو وجه مقابل هم ستون انجام گرفت، در مقایسه با دو وجه عمود بر هم، دارای رابطه دقیق‌تری می‌باشد.

۷- به عنوان جمع‌بندی نهایی در خصوص استفاده از سبکدانه در بتن خودتراکم، با توجه به مقاومت فشاری و نفوذ ناپذیری بتن‌های مورد بررسی، می‌توان گفت که از میان سبکدانه‌های مورد بررسی استفاده از سبکدانه اسکوریا نتایج قابل قبول‌تری خواهد داشت.

### سپاسگزاری

مولفین مراتب تقدیر و تشکر خود را از حمایت مالی و فنی دانشگاه آزاد اسلامی واحد فومن و شفت در انجام این پژوهش اعلام می‌دارند.

### مراجع

- [1] Sukumar, B., Nagamani, K., Srinivasa Raghavan, R., (2008), Evaluation of strength at early ages of self-compacting concrete with high volume fly ash, *Construction and Building Materials*, Vol. 22, No. 7, pp. 1394-1401, 2008/07/01/.
- [2] Siddique, R., (2011), Properties of self-compacting concrete containing class F fly ash, *Materials & Design*, Vol. 32, No. 3, pp. 1501-1507, 2011/03/01/.
- [3] Zhu, W., Gibbs, J. C., Bartos, P. J. M., (2001), Uniformity of in situ properties of self-compacting concrete in full-scale structural elements, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 23, No. 1, pp. 57-64, 2001/02/01/.
- [4] Wu, Z., Zhang, Y., Zheng, J., Ding, Y., (2009), An experimental study on the workability of self-compacting lightweight concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 5, pp. 2087-2092, 2009/05/01/.
- [5] Kurt, M., Aydin, A. C., Gül, M. S., Gül, R., Kotan, T., (2015), The effect of fly ash to self-compactability of pumice aggregate lightweight concrete, *Sadhana*, Vol. 40, No. 4.
- [6] Hossain, K. M., (2014), Lightweight SCC with volcanic and other natural materials, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, Vol. 168, No. 1, pp. 35-44.
- [7] Vakhshouri, B., Nejadi, S., (2016), Mix design of light-weight self-compacting concrete, *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 4, pp. 1-14, 2016/06/01/.
- [8] Andiç-Çakır, Ö., Hızal, S., (2012), Influence of elevated temperatures on the mechanical properties and microstructure of self consolidating lightweight aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 34, pp. 575-583, 2012/09/01/.
- [9] Iqbal, S., Ali, A., Holschemacher, K., Bier, T. A., Shah, A. A., (2016), Strengthening of RC beams using steel fiber reinforced high strength lightweight self-compacting concrete (SHLSCC) and their strength predictions, *Materials & Design*, Vol. 100, pp. 37-46.
- [10] Grabis, T. M., Cordeiro, G. C., Toledo Filho, R. D., (2016), Fresh and hardened-state properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with steel fibers, *Construction and Building Materials*, Vol. 104, pp. 284-292.

- [11] Pourahmadi Sefat Arabani, H., SadrMomtazi, A., Mirgozar Langaroudi, M. A., Kohani Khoshkbijari, R., Amooie, M., (2017), Durability of Self-compacting Lightweight Aggregate Concretes (LWSCC) as Repair Overlays, *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, Vol. 5, No. 2, pp. 99-111.
- [12] Kaffetzakis, M. I., Papanicolaou, C. G., (2016), Bond behavior of reinforcement in lightweight aggregate self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 113, pp. 641-652.
- [13] Kaffetzakis, M., Papanicolaou, C. C., (2016), Lightweight aggregate self-compacting concrete (LWASCC) semi-automated mix design methodology, *Construction and Building Materials*, Vol. 123, pp. 254-260.
- [14] Khayat, K., Manai, K., Trudel, A., (1997), In situ mechanical properties of wall elements cast using self-consolidating concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 94, pp. 491-500.
- [15] Khayat, K., Tremblay, S., Paultre, P., (1999), Structural response of self-consolidating concrete columns, in *Proceeding of*, 291-306.
- [16] MalakDoust, J., Madandoust, R., Ranjbar, M. M., (2016), Study on Concrete Strength Homogeneity in Walls with Self-Compacting Concrete Containing Silica Fume - Nano SiO<sub>2</sub> and Zeolite, *Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol. 1, pp. 41-58.
- [17] Bungey, J. H., Madandoust, R., (1994), Strength variations in lightweight concrete beams, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 16, No. 1, pp. 49-55, 1994/01/01/.
- [18] Nepomuceno, M. C., Pereira-de-Oliveira, L., Pereira, S. F., (2018), Mix design of structural lightweight self-compacting concrete incorporating coarse lightweight expanded clay aggregates, *Construction and Building Materials*, Vol. 166, pp. 373-385.
- [19] ASTM, C33/C33M-16e1, (2016), *Standard Specification for Concrete Aggregates*: ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [20] ASTM, C42/C42M-03, (2003), *Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete*: ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [21] DIN1048, (part-5), *German Standard for determination of Permeability of Concrete*.
- [22] EFNARC, S., (2002), Guidelines for self-compacting concrete, *London, UK: Association House*, Vol. 32, pp. 34.
- [23] Kurt, M., Gül, M. S., Gül, R., Aydin, A. C., Kotan, T., (2016), The effect of pumice powder on the self-compactability of pumice aggregate lightweight concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 103, pp. 36-46.
- [24] Shannag, M. J., (2011), Characteristics of lightweight concrete containing mineral admixtures, *Construction and Building Materials*, Vol. 25, No. 2, pp. 658-662, 2011/02/01/.