

## ارزیابی مقاومت فشاری بتن خود تراکم حاوی نانو مواد با استفاده از روش اولتراسونیک

رحمت مدن دوست<sup>۱\*</sup>، صابر دیلمی پشتجوئی<sup>۲</sup>

۱- دانشیار گروه عمران دانشکده فنی دانشگاه گیلان، ایران

۲- کارشناسی ارشد عمران گرایش سازه، دانشگاه گیلان، ایران

### چکیده

در این مطالعه مقاومت فشاری ( $f'_c$ ) بتن خودتراکم حاوی نانو مواد توسط روش غیر مخرب امواج اولتراسونیک ارزیابی شد. بتن‌های خودتراکم با ۱۳ طرح اختلاط مختلف حاوی مقادیر ۰/۲۵ تا ۲ درصد نانو اکسیدهای سیلیس (NS)، آلومینیوم (NA) و مس (NC) که به عنوان ماده چسباننده جایگزین بخشی از سیمان شده است، در سنین بین ۳ تا ۹۰ روز و دارای مقاومت‌های فشاری بین ۲۰ تا ۵۴ مگاپاسکال، آزمایش شدند. تأثیر عواملی چون نوع نانو مواد، شرایط عمل آوری مرطوب و خشک بر رابطه سرعت امواج اولتراسونیک (UPV) و  $f'_c$  بررسی شد. همچنین تأثیر حضور میلگرد بر UPV در بتن‌های یاد شده نیز ارزیابی شد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی NS، NA و NC به ترتیب با مقادیر ۱/۵، ۰/۲۵ و ۰/۲۵ درصد وزن سیمان (درصد بهینه)، بیشترین UPV و  $f'_c$  را دارند. نمونه حاوی مقدار بهینه NS در عمل‌آوری مرطوب با ۲۲ درصد افزایش  $f'_c$  نسبت به نمونه شاهد دارای بیشترین  $f'_c$  است. UPV در نمونه‌های حاوی درصد بهینه در سنین اولیه کمتر و در سنین بالاتر بیشتر از نمونه شاهد بدست آمد. روابط نمایی بین  $f'_c$  و UPV برای این نوع بتن‌های خودتراکم تعریف شد که ضرایب آن برای هر نانو مواد شیب نمودار کاهش پیدا نموده است. افزودن نانو مواد باعث کاهش UPV بین عمل‌آوری مرطوب و خشک گردید به طوری که این اختلاف از ۵ درصد مربوط به بتن خودتراکم شاهد به ۳/۸، ۳ و ۴ درصد به ترتیب مربوط به بتن‌های خودتراکم حاوی NS، NA و NC کاهش یافت. تأثیر حضور میلگرد بر روی UPV با ضرایب اصلاحی معرفی شده است و مشاهده شد که ضرایب اصلاح بدست آمده با ضرایب اصلاح پیشنهادی توسط آیین‌نامه BS 1881:Part 203 مطابقت دارد.

کلمات کلیدی: سرعت امواج اولتراسونیک، مقاومت فشاری، بتن خودتراکم، نانو اکسید سیلیس، نانو اکسید مس، نانو اکسید آلومینیوم.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/jsce.2018.129504.1548	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/jsce.2018.129504.1548	۱۳۹۹/۰۴/۰۱	۱۳۹۹/۰۴/۰۱	۱۳۹۷/۰۷/۱۰	۱۳۹۷/۰۵/۲۰	۱۳۹۷/۰۲/۱۳
رحمت مدن دوست			*نویسنده مسئول:		
rmadandoust@guilan.ac.ir			پست الکترونیکی:		

## Compressive Strength assessment of self-compacted concrete with Nano materials using ultrasonic pulse velocity method

Rahmat Madandoust<sup>1</sup>, Saber Deilami Poshtjouei<sup>2\*</sup>

1- Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

2- Master of Science, Department of Civil Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

### ABSTRACT

In this paper the compressive strength ( $f'c$ ) of self-compacted concrete (SCC) containing Nanomaterials (NM) is evaluated by non-destructive ultrasonic pulse velocity method. This study involves about 13 different mixtures containing Nano oxides of Silica (NS), Aluminum (NA) and Copper (NC) with amounts ranging from 0.25 to 2 percent, as the binder in replacement of Portland cement, tested between 3 and 90 days for  $f'c$  ranging from about 20 to 54 MPa. The influence of different parameters such as type of NM, wet and dry curing conditions on the relationship between ultrasonic pulse velocity (UPV) and  $f'c$  is examined. Also, the effect of rebar on UPV is evaluated in this type of SCCs. Results show that the specimens containing NS, NA and NC with amounts of 1.5, 0.25 and 0.25% of the cement weight (optimum percentage), respectively, have the highest UPV and  $f'c$ . The specimens containing the optimum amount of NS in wet curing condition with a 22% increase in  $f'c$  compared to the control specimen has the highest  $f'c$ . In the specimen containing the optimum percentage of NM, UPV became less in the first ages and higher in the older ages more than control specimens. Exponential relationships between UPV and  $f'c$  of the specimens were determined whose coefficients are different for each added Nano. The addition of NM reduced the difference in UPV between wet and dry curing conditions so that this difference from 5% for control SCC decreased to 3.8%, 3, and 4% for SCCs containing NS, NA, and NC, respectively. The effect of steel bars on the UPV was introduced by means of correction coefficients (CC) and it was observed that the CC obtained with the proposed CC are consistent with CC recommended by BS 1881: Part 203.

### ARTICLE INFO

Receive Date: 03 May 2018

Revise Date: 11 August 2018

Accept Date: 02 October 2018

### Keywords:

Strength,  
Self-compacted concrete  
Ultrasonic pulse,  
Nano oxides of Silica,  
Nano oxides of Aluminum,  
Nano oxides of Copper

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.129504.1548

\*Corresponding author: Rahmat Madandoust  
Email address: rmadandoust@guilan.ac.ir

## ۱- مقدمه

با توجه به رشد صنعت، ساخت ساختمان‌ها در تعداد طبقات زیاد انجام می‌گیرد و تراکم میلگرد را به همراه دارد. بعضاً مشکل اجرا از نظر ویبره کردن برای بتن‌های معمولی کاملاً مشهود است. تحقیقات نوین استفاده از بتن خودتراکم را مطرح کرده است که دارای تراکم مناسب و آسان، کیفیت و دوام بهتر می‌باشد. در بتن‌های خودتراکم، برای بهبود خواص مکانیکی و خواص بتن تازه علاوه بر مواد تشکیل دهنده بتن‌های معمولی از مواد دیگری نظیر نانو مواد استفاده می‌شود. ذرات نانو بر خصوصیات بتن خودتراکم تازه و سخت شده اثرات متفاوت و منحصر به فردی از خود نشان می‌دهند. در این خصوص مطالعاتی هم انجام شده و از نانو موادهایی نظیر نانو سیلیس (NS)<sup>۱</sup> [۷-۱]، نانو آلومینیوم (NA)<sup>۲</sup> [۷ و ۸]، نانو آهن [۷]، نانو مس (NC)<sup>۳</sup> [۹ و ۱۰] استفاده شده است.

کنترل کیفی بتن از طریق ارزیابی مقاومت آن همواره مورد توجه کاربران و محققان بوده است و طبق آیین‌نامه‌ها مقاومت فشاری بتن با استفاده از نمونه‌های استاندارد انجام می‌شود که البته بیانگر مقاومت واقعی بتن در عضو سازه‌ای نیستند. در مواردی که ضرورت ارزیابی مقاومت بتن در محل مطرح باشد روش‌های غیر مخرب نظیر چکش اشمیت، سرعت امواج اولتراسونیک (UPV)<sup>۴</sup> و روش‌های نیمه مخرب نظیر مغزه گیری، نفوذ میله و کشش سطحی<sup>۵</sup> بر روی اعضای سازه‌ای موجود می‌تواند استفاده شود که توسط استانداردها [۱۱] و [۱۲] هم مورد تایید قرار گرفته است. در این مطالعه روش امواج اولتراسونیک که هیچگونه خرابی بر جای نمی‌گذارد و علاوه بر آن کم هزینه و به سرعت قابل انجام است مورد توجه است. بر اساس مطالعات به عمل آمده نتایج امواج اولتراسونیک متأثر از عوامل مختلفی نظیر شرایط نگهداری، ماکزیمم اندازه سنگدانه، شکل و اندازه نمونه، نوع سیمان، سن بتن، نسبت‌های اختلاط و اثر میلگرد می‌باشد. تأثیر میلگرد بر سرعت امواج اولتراسونیک وابسته به عواملی نظیر قطر، تعداد و راستای میلگردها، کیفیت بتن، فاصله مولدها از میلگرد می‌باشد که در این خصوص ضرایب اصلاحی توسط محققین معرفی شده است. این روش به طور گسترده روی بتن معمولی انجام شده است که بانگی [۱۳] مطالعاتی در این زمینه انجام داده است، اما آزمایش امواج اولتراسونیک روی بتن خودتراکم به ویژه بتن‌های حاوی نانو مواد بنظر بطور محدود انجام شده است. حال این سوال مطرح می‌باشد که روابط بین سرعت امواج اولتراسونیک و مقاومت فشاری و همچنین تأثیر حضور میلگردهای عرضی و طولی در این نوع بتن‌های خودتراکم حاوی نانو مواد و ضرایب اصلاحی حضور میلگرد در مقایسه با ضرایب اصلاحی پیشنهادی برای بتن معمولی در آیین‌نامه BS 1881: part 203 [۱۱] تا چه حد قابل مقایسه می‌باشد؟

در ارتباط با ارزیابی مقاومت بتن به وسیله آزمایش اولتراسونیک، دمیریوگا [۱۴] با جایگزین نمودن درصدی از مواد پوزولانی شامل خاکستر بادی و سرباره کوره آهن در سیمان پرتلند نوع یک به تأثیر هریک و ترکیب آن‌ها بر UPV و مقاومت فشاری بتن پرداخته است و رابطه مقاومت فشاری و UPV، برای مقادیر و نوع‌های مختلف مواد چسباننده را نمایی توصیف کرد. اولوکان و همکاران [۱۵] مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی خاکستر بادی و میکروسیلیس را با روش امواج اولتراسونیک ارزیابی نمودند و تأثیر مقادیر مختلف خاکستر بادی و میکروسیلیس را بر رابطه مقاومت فشاری و سرعت امواج اولتراسونیک بررسی کردند و روابط نمایی بین مقاومت فشاری و سرعت امواج اولتراسونیک بدست آوردند. صادقی و همکاران [۱۶] مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی الیاف و نانو سیلیس را با استفاده از آزمایش اولتراسونیک ارزیابی نمودند و گزارش کردند که با افزایش مقدار نانو سیلیس تا ۴ درصد وزن سیمان ابتدا مقاومت فشاری و UPV افزایش می‌یابد که علت آن خواص پرکنندگی و پوزولانی نانو سیلیس در ملات سیمان است؛ سپس با افزایش مقدار نانو سیلیس بیشتر از ۴ درصد مقاومت فشاری و UPV کاهش می‌یابد زیرا با افزایش مقدار نانو سیلیس به علت سطح ویژه بالای آن، ذرات نانو سیلیس به هم می‌چسبند و توده‌ای ناپایدار به وجود می‌آورد. همچنین روابطی نمایی میان مقاومت فشاری و UPV برای این نوع بتن خودتراکم ارائه نمودند.

<sup>1</sup> Nano SiO<sub>2</sub>

<sup>2</sup> Nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

<sup>3</sup> Nano CuO

<sup>4</sup> Ultrasonic Pulse Velocity

<sup>5</sup> Pull Off

پونتس و همکاران [۱۷] نیز برای بررسی تأثیر مواد چسباننده میکرو و نانو سیلیس بر بتن خودتراکم در سنین اولیه و تخلخل سخت شده از روش UPV استفاده کردند. بارلونگا و همکاران [۱۸] خواص بتن خودتراکم سخت شده حاوی افزودنی‌های معدنی و میکروساختار آن را بررسی کردند و مقاومت فشاری و UPV آن‌ها را در طول زمان ارزیابی کردند.

جهت استفاده از نانو مواد در بتن، دورگون و همکاران [۱] دریافتند که با استفاده از نانو سیلیس می‌توان بر سختی کم بتن‌های خودتراکم که یکی از نگرانی‌های اصلی در این نوع بتن‌ها است، غلبه کرد و می‌توان مقدار و اندازه ذرات نانو سیلیس را برای هر طرح اختلاط خاص بهینه نمود تا بتوان به مقاومت فشاری و خواص الاستیک مناسب دست یافت. همچنین مشاهده نمودند که با کاهش اندازه ذرات نانو سیلیس استفاده شده در بتن خودتراکم، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد. دورگون و همکاران [۲] در مطالعه‌ای دیگر برای نانو سیلیس با اندازه ذرات ۳۵، ۱۷ و ۵ نانومتر مقدار بهینه استفاده از آن‌ها را به ترتیب ۱/۵، ۱ و ۰/۳ درصد وزن سیمان پیشنهاد نمودند و گزارش کردند که استفاده بیش از این مقادیر پیشنهادی از نانو سیلیس باعث کاهش چشمگیری در کارایی و خواص بتن خودتراکم تازه می‌گردد. سوبولوف و همکاران [۳] گزارش کرده‌اند که با افزودن ۰/۲۵ درصد NS موجب افزایش ۱۰ درصد مقاومت ۲۸ روزه می‌شود. زکی و رجب [۴] بیان کرده‌اند که استفاده از ۰/۵ درصد NS در تمام سنین بیشترین مقاومت فشاری را دارد. نظری و همکاران [۹] و [۱۰] دریافتند که با افزایش NC تا ۳ درصد باعث افزایش ژل سیلیکات کلسیم هیدراته، کاهش کریستال‌های کلسیم هیدراکسید، بهبود مقاومت و جذب آب بتن می‌شود. همچنین دریافتند که افزودن بیش از ۴ درصد NC باعث کاهش مقاومت فشاری بتن خودتراکم می‌شود. راشاد [۸] دریافت که با افزودن ۰/۵ تا ۵ درصد NA به ملات و ۰/۵ تا ۳ درصد به بتن، مقاومت فشاری، کششی، خمشی و مدول الاستیسیته افزایش می‌یابد.

در این مطالعه بتن خودتراکم حاوی سه نوع نانو مواد شامل NS، NA و NC مدنظر می‌باشد و بررسی ارسال امواج از بتن‌های یاد شده مورد توجه می‌باشد. مقدار بهینه این نانو مواد تعیین می‌شود و با توجه به اهداف این مطالعه تعیین رابطه مقاومت فشاری و UPV و عوامل مؤثر بر این روابط چون نوع نانو مواد، شرایط عمل آوری و اثر میلگرد، مورد توجه می‌باشد.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی و مصالح

### ۲-۱- مصالح مصرفی

در این مطالعه از سیمان پرتلند نایین نوع ۱-۳۲۵ با وزن مخصوص ۳۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و سطح ویژه ۲۸۵۰ سانتیمتر مربع بر گرم استفاده شده است. در جدول ۱ مشخصات شیمیایی سیمان آمده است.

جدول ۱: مشخصات شیمیایی سیمان<sup>۶</sup>

%	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Cl	I.R	L.O.I
سیمان	۲۱/۸	۵/۳	۳/۳	۵۳/۲۵	۴/۵-۳/۵	۲/۰-۱/۶	۰/۰۲۰-۰/۰۰۵	۰/۶۰-۰/۰۷	۱/۵-۱/۰

شن و ماسه رودخانه‌ای اشباع با سطح خشک متناسب با دانه بندی مجاز استاندارد ASTM C33/C33M [۱۹] استفاده شد و از پودر سنگ آهک به عنوان پرکننده استفاده شده است. مدول نرمی ماسه ۲/۷ است. حداکثر اندازه سنگدانه طبق EFNARC [۲۰] برای بتن‌های خودتراکم در نظر گرفته شد. وزن مخصوص ظاهری برای شن و ماسه به ترتیب ۱۷۰۳ و ۲۰۶۵ کیلوگرم بر متر مکعب است. همچنین درصد جذب آب شن و ماسه نیز به ترتیب ۱/۸ و ۱/۲ درصد تعیین گردید. از فوق روان کننده ۲۸۰ Civil Flow با بنیان شیمیایی پلی کربوکسیلات استفاده شده است. آب مصرفی در این پروژه آب شرب شهرستان رشت می‌باشد. در این مطالعه از NS، NA و NC تولید شده

<sup>۶</sup> شرکت سیمان نایین، تهران، [www.naeencement.com](http://www.naeencement.com)

توسط شرکت US Research Nanomaterials استفاده شده است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی نانو مواد به ترتیب در جدول ۲ و ۳ آمده است.

جدول ۲: مشخصات فیزیکی نانو مواد<sup>۷</sup>

خلوص (%)	میانگین اندازه ذرات (nm)	سطح ویژه (m <sup>2</sup> /gr)	چگالی واقعی (gr/cm <sup>3</sup> )
۹۸	۶۰-۷۰	۱۶۰	۲/۴
۹۹	۲۰	۱۳۸	۳/۸۹
۹۹	۴۰	۲۰	۶/۴

جدول ۳: مشخصات شیمیایی نانو مواد<sup>۸</sup>

	Ba	Cd	Co	Zn	Sr	Ca	K	P	Mg	Fe	Pb	Mn	Cr	Na	Ti
CuO (ppm)	۰/۷۵	۲/۵	۶/۴	۱۹۵	۲/۳	۴۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۷۵	۸۷	۹۰	۳/۵	-	-	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ppm)	-	-	≤۲	-	-	≤۸۰	-	-	-	≤۲۵	-	≤۳	≤۴	≤۷۰	-
SiO <sub>2</sub> (ppm)	-	-	-	-	-	<۱۳۰	-	-	-	<۴۰	-	-	-	<۸۰	<۲۲۰

## ۲-۲- طرح مخلوط بتن خودتراکم

در این مطالعه، ۱۳ طرح مخلوط بتن خودتراکم که ضوابط توصیه شده توسط EFNARC [۲۰] را پوشش بدهد مورد آزمایش قرار گرفته است. نانو مواد NS با مقادیر ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد، NA و NC با مقادیر ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱/۵ درصد نسبت به وزن سیمان به صورت جایگزین بخشی از سیمان مصرفی به مخلوط افزوده شدند. طرح مخلوط تمامی مخلوطها در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴: طرح مخلوطها

شماره مخلوط	نوع مخلوط	درصد نانو مواد %	شن (kg/m <sup>3</sup> )	ماسه (kg/m <sup>3</sup> )	پودر سنگ (kg/m <sup>3</sup> )	سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	nano SiO <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	nano CuO (kg/m <sup>3</sup> )	nano Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	آب (kg/m <sup>3</sup> )	فوق روان کننده (kg/m <sup>3</sup> )
۱	Control	۰	۷۵۰	۸۲۸	۲۳۰	۳۷۰/۰	۰	۰	۰	۱۴۸	۷
۲	NS	۰/۵	۷۵۰	۸۲۸	۲۳۰	۳۶۸/۱	۱/۸۵۰	۰	۰	۱۴۸	۷
۳		۱	۷۵۰	۸۲۸	۲۳۰	۳۶۶/۳	۳/۷۰۰	۰	۰	۱۴۸	۷
۴		۱/۵	۷۵۰	۸۲۸	۲۳۰	۳۶۴/۴	۵/۵۵۰	۰	۰	۱۴۸	۷
۵		۲	۷۵۰	۸۲۸	۲۳۰	۳۶۲/۶	۷/۴۰۰	۰	۰	۱۴۸	۷
۶	NC	۰/۲۵	۷۵۰	۸۲۸	۲۳۰	۳۶۹/۰	۰	۰/۹۲۵	۰	۱۴۸	۷
۷		۰/۵	۷۵۰	۸۲۸	۲۳۰	۳۶۸/۱	۰	۱/۸۵	۰	۱۴۸	۷
۸		۰/۷۵	۷۵۰	۸۲۸	۲۳۰	۳۶۷/۲	۰	۲/۷۷۵	۰	۱۴۸	۷
۹		۱/۵	۷۵۰	۸۲۸	۲۳۰	۳۶۴/۴	۰	۵/۵۵	۰	۱۴۸	۷
۱۰	NA	۰/۲۵	۷۵۰	۸۲۸	۲۳۰	۳۶۹/۰	۰	۰	۰/۹۲۵	۱۴۸	۷
۱۱		۰/۵	۷۵۰	۸۲۸	۲۳۰	۳۶۸/۱	۰	۰	۱/۸۵	۱۴۸	۷
۱۲		۰/۷۵	۷۵۰	۸۲۸	۲۳۰	۳۶۷/۲	۰	۰	۲/۷۷۵	۱۴۸	۷
۱۳		۱/۵	۷۵۰	۸۲۸	۲۳۰	۳۶۴/۴	۰	۰	۵/۵۵	۱۴۸	۷

<sup>۷</sup> US Research Nanomaterials, Inc, [www.us-nano.com](http://www.us-nano.com)

<sup>۸</sup> US Research Nanomaterials, Inc, [www.us-nano.com](http://www.us-nano.com)

## ۲-۳- آماده سازی نمونه‌ها

برای آزمایش مقاومت فشاری و امواج اولتراسونیک از نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر استفاده شد. پس از انجام آزمایش‌های بتن خودتراکم تازه و اطمینان از مناسب بودن آن، مطابق استاندارد BS EN 12390-2:2009 [۲۱] بتن خودتراکم درون قالب‌های مکعبی ریخته شده است و با یک گونی مرطوب و به کارگیری روکش غیر قابل نفوذ نایلون پوشانده شده است و در آزمایشگاه با دمای ۲۵ درجه سانتیگراد نگهداری گردید. نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج و تا زمان آزمایش در مخزن آبی با دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. برای حالت خشک نیز نمونه‌ها تا زمان آزمایش در محیط آزمایشگاه با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. برای بررسی تأثیر میلگرد بر سرعت امواج اولتراسونیک، نمونه‌های منشوری با ابعاد  $100 \times 100 \times 500$  میلی‌متر از طرح مخلوط‌های فاقد نانو مواد و حاوی نانو مواد استفاده شده است. برای هر طرح مخلوط نمونه‌های منشوری فاقد میلگرد، دارای یک میلگرد با قطر ۱۶ میلی‌متر و همچنین دارای یک میلگرد با قطر ۲۵ میلی‌متر ساخته شدند. میلگردها با طول ۴۸۰ میلی‌متر در وسط قالب و با فاصله ۱ سانتی‌متر از کف قالب‌ها جایگذاری شدند. نمونه‌های منشوری پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج و تا زمان آزمایش در محیط خشک آزمایشگاه با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند.

## ۲-۴- روش آزمایش

جهت ارزیابی خصوصیات بتن خودتراکم تازه از آزمایشات جریان اسلامپ<sup>۹</sup> و T<sub>50</sub> برای ارزیابی قابلیت جریان و پرمکنندگی و همچنین کنترل جداشدگی به صورت چشمی استفاده گردید. در آزمایش اسلامپ میانگین قطر پهن شدگی بتن خودتراکم اندازه‌گیری شد و در آزمایش T<sub>50</sub> زمان رسیدن قطر پهن شدگی بتن خودتراکم به ۵۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری گردید. از آزمایش شاخص جعبه L<sup>۱۰</sup> برای ارزیابی قابلیت عبور و پرمکنندگی بتن استفاده گردید که این شاخص نسبت ارتفاع بتن خودتراکم در انتهای قسمت افقی جعبه به ارتفاع بتن مانده در قسمت قائم است. آزمایش قیف V<sup>۱۱</sup> به عنوان معیاری برای تعیین قابلیت پرمکنندگی و لزجت خمیری بتن مورد استفاده قرار گرفت. همچنین نحوه خروج بتن از قیف و یکنواختی بتن خارج شده نیز کنترل گردید. در این آزمایش قیف با حدود ۱۲ لیتر بتن پر گردید و پس از گذشت ۱۰ ثانیه دریچه را باز کرده و بتن تحت اثر وزن خود به بیرون جریان می‌یابد و زمانی که بتن نیاز دارد تا از قیف عبور کند، بلافاصله اندازه‌گیری می‌شود.

جهت ارزیابی خصوصیات بتن خودتراکم سخت شده آزمایش مقاومت فشاری و همچنین UPV بر روی نمونه‌های مکعبی انجام شد. مطابق استاندارد ASTM C597-16 [۲۲] آزمایش UPV، به وسیله دستگاه پاندیت (PUNDIT) با دقت ۰/۱ میکروثانیه و فرکانس انتقال ۵۴ کیلو هرتز به روش انتقال مستقیم بر روی نمونه‌ها انجام شد. به دلیل غیر مخرب بودن آزمایش UPV، نمونه‌های استفاده شده در این آزمایش را می‌توان مجدداً در آزمایش مقاومت فشاری استفاده کرد. لذا پس از انجام آزمایش UPV، طبق استاندارد BS EN 12390-3:2009 [۲۳] آزمایش مقاومت فشاری با سرعت بارگذاری ۰/۴ مگاپاسکال بر ثانیه نیز بر روی همین نمونه‌ها به وسیله دستگاه جک هیدرولیکی انجام شد.

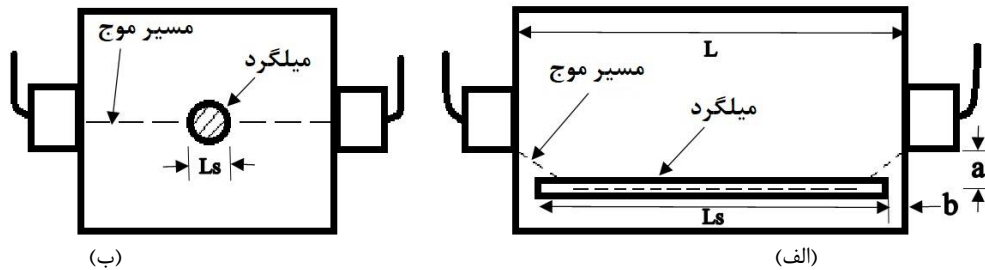
برای بررسی اثر حضور میلگرد بر سرعت امواج اولتراسونیک، سرعت امواج در نمونه‌های منشوری حاوی درصد بهینه نانو مواد و فاقد نانو مواد که دارای میلگرد هستند اندازه‌گیری شد و با نمونه‌های منشوری مشابه که فاقد میلگرد هستند مقایسه گردید. ابتدا سرعت امواج اولتراسونیک در نمونه‌های منشوری فاقد میلگرد اندازه‌گیری شد (V<sub>c</sub>) و سپس سرعت امواج اولتراسونیک در نمونه‌های منشوری حاوی میلگرد، در تراز میلگرد و همچنین با فاصله از تراز میلگرد در دو حالت، راستای موج عمود بر راستای میلگرد و راستای موج موازی راستای

<sup>9</sup> Slump Flow

<sup>10</sup> L Box

<sup>11</sup> V Funnel

میلگرد اندازه گیری شد ( $V_m$ ). با تقسیم  $V_c$  بر  $V_m$  ضرایب اصلاح محاسبه گردید. در شکل ۱ مسیر اندازه گیری UPV نشان داده شده است. نمونه‌ها در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز آزمایش شدند و میانگین نتایج ۳ نمونه در هر سن به عنوان نتیجه نهایی آزمایش تعیین گردید.



شکل ۱: (الف) مسیر اندازه‌گیری UPV موازی بر راستای میلگرد است. (ب) مسیر اندازه‌گیری UPV عمود بر راستای میلگرد است.

### ۳- نتایج آزمایش‌ها و تحلیل آن‌ها

#### ۳-۱- نتایج آزمایش‌های بتن خودتراکم تازه

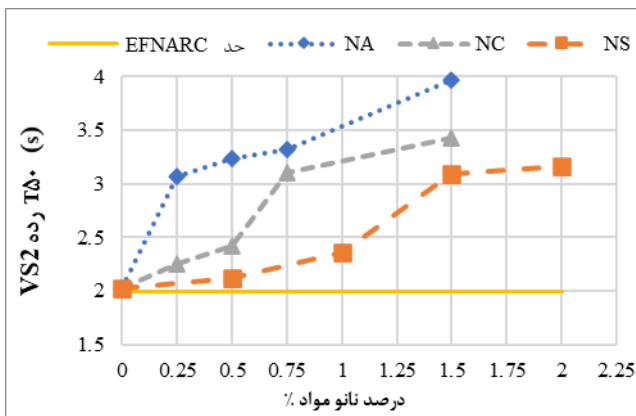
نتایج آزمایش‌های بتن خودتراکم تازه و رده آن‌ها طبق حدود مجاز در شکل ۲ آورده شده است. در جدول ۵ نیز حدود رده‌بندی مجاز EFNARC [۲۰] نشان داده شده است. با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۲ با افزایش درصد پودر نانو ذرات، قطر جریان اسلامپ و شاخص جعبه L کاهش و زمان آزمایش  $T_{50}$  و جریان قیف  $V$  افزایش یافته است. به طور کلی می‌توان بیان کرد که با افزودن مواد نانو کارایی بتن خودتراکم کاهش یافته است. بیشترین تاثیر در کارایی را پودر نانو آلومینوم از خود نشان داده است به طوری که قطر جریان اسلامپ نسبت به بتن خودتراکم شاهد از ۸۴۰ میلی متر به ۷۶۲/۵ میلی‌متر کاهش یافته است. همچنین زمان رسیدن قطر جریان اسلامپ به ۵۰۰ میلی متر و زمان جریان قیف  $V$  به ترتیب از ۲/۰۳ و ۹/۱۱ به ۳/۹۷ و ۱۱/۹۲ ثانیه رسیده است و شاخص جعبه L از ۰/۹۸ به ۰/۸۱ کاهش یافته است. همچنین می‌توان مشاهده کرد که نوع نانو مواد نیز بر کارایی بتن خودتراکم موثر است به طوری که مخلوط های حاوی نانو اکسید های آلومینوم، مس و سیلیس به ترتیب کمترین کارایی را دارند. با توجه به شکل ۲ می‌توان مشاهده کرد که بتن های خودتراکم حاوی NS نسبت به افزایش درصد نانو مواد کمترین تغییرات را در تمامی آزمایش‌ها دارند. سپس به ترتیب بتن‌های خودتراکم حاوی NC و NA نسبت به افزایش درصد نانو مواد تغییرات بیشتری دارند و می‌توان گفت که افزایش درصد این نوع نانو مواد تأثیر بیشتری بر کاهش کارایی دارد. با این حال تمام محدودیت‌های توصیه شده توسط EFNARC [۲۰] برای بتن خودتراکم در تمام طرح‌های اختلاط رعایت شده است.

مطابق EFNARC [۲۰] برای رده طرح‌های اختلاط بدست آمده، می‌توان بیان کرد که رده SF3 برای بتن ریزی های قائم مانند ستون‌های لاغر و سازه‌های دارای اشکال پیچیده و پر کردن قالب‌هایی که تراکم میلگرد بالایی دارند، مناسب می‌باشد و در نهایت، سطح بهتری را نسبت به رده‌های دیگر به وجود می‌آورد. در رده (VS2/VF2) مقاومت در برابر جدا شدگی بهبود می‌یابد و برای محدود کردن فشار قالب مفید است. رده PA2 نیز برای سازه‌های مهندسی مناسب است.

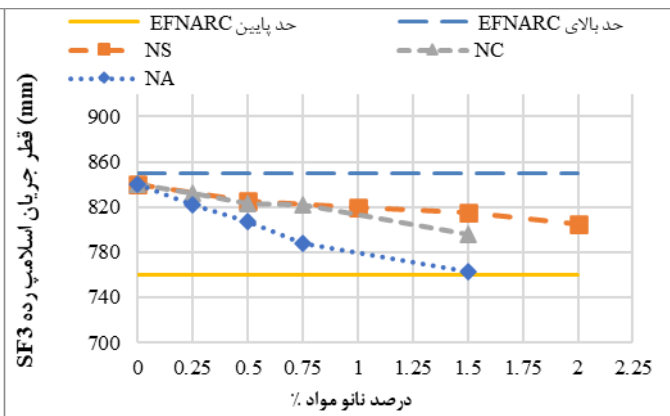
جدول ۵: حدود رده‌بندی EFNARC [۲۰]

رده SF1	جریان اسلامپ ۶۵۰ - ۵۵۰ mm
رده SF2	جریان اسلامپ ۷۵۰ - ۶۶۰ mm
رده SF3	جریان اسلامپ ۸۵۰ - ۷۶۰ mm

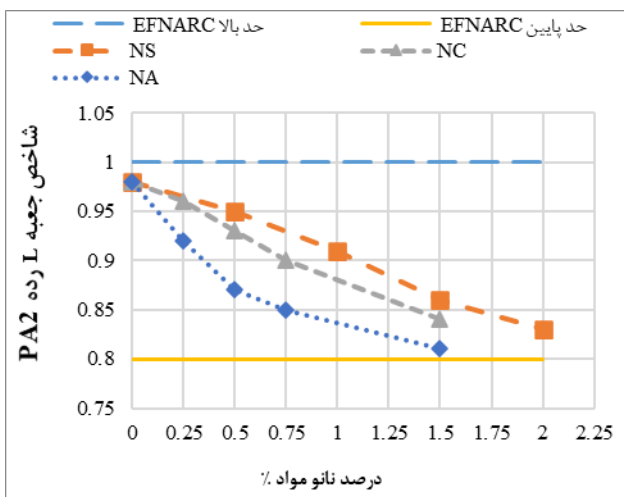
رده VS1/VF1	$T50 \leq 2$ و $V\text{-funnel} \leq 8$
رده VS2/VF2	$T50 > 2$ و $9 < V\text{-funnel} < 25$
رده VF1	$V\text{-funnel} \leq 8$
رده VF2	$9 < V\text{-funnel} < 25$
رده PA1	L Box دارای ۲ میلیگرم $\geq 0/8$
رده PA1	L Box دارای ۳ میلیگرم $\geq 0/8$



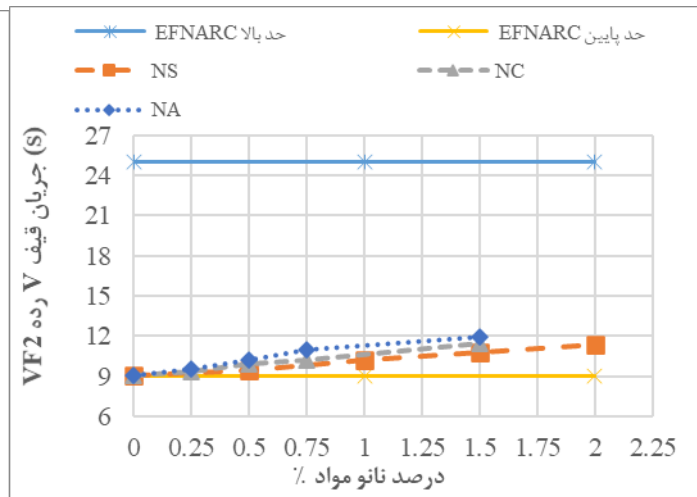
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۲: نمودارهای نتایج آزمایش های بتن خودتراکم تازه.

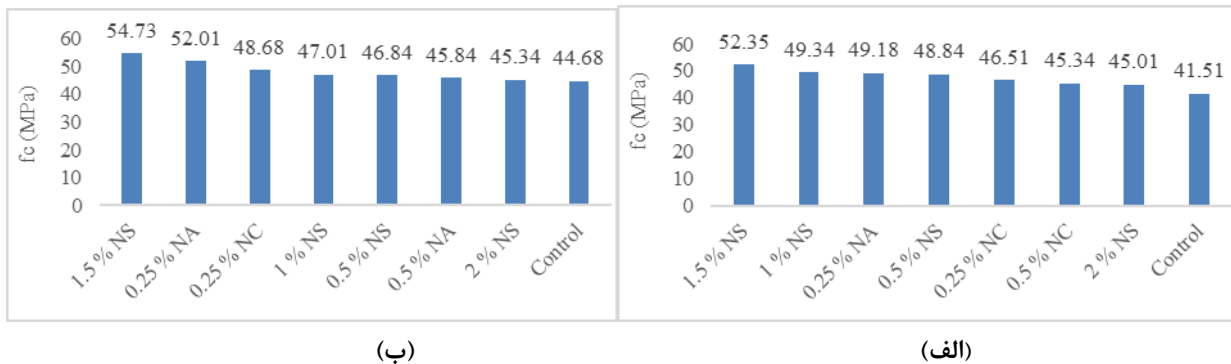
(الف) قطر جریان اسلامپ رده T500. (ب) T500. (ج) جریان قیف V. (د) شاخص جعبه L.

حسینی و همکاران [۲۴] و عباس [۲۵] نیز در مطالعات خود مشاهده کردند که استفاده از درصد های بالای نانو سیلیس تاثیرات منفی بر کارایی بتن به وجود می آورد. در واقع، به ازای هر کیلوگرم نانو سیلیس اضافه شده به مخلوط ۰/۴ کیلوگرم آب نیاز است تا کارایی حفظ شود. همچنین دورگون و همکاران [۲] گزارش کردند که استفاده بیش از حد از نانو سیلیس باعث کاهش چشمگیری در کارایی و خواص بتن خودتراکم تازه می گردد.



### ۳-۲- اثر نوع و مقدار نانو مواد بر مقاومت فشاری و سرعت امواج اولتراسونیک

نتایج آزمایش مقاومت فشاری ( $f_c$ ) و UPV در شرایط عمل آوری خشک (dry) و مرطوب (wet) به ترتیب در جداول ۶ و ۷ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۶ به طور کلی نمونه‌هایی که بیشترین مقاومت فشاری در سن ۹۰ روز را نسبت به نمونه شاهد دارند در شرایط عمل آوری خشک و مرطوب در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده تمام نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف NS، مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه شاهد دارند.



شکل ۳: نمونه‌های دارای بیشترین مقاومت فشاری ۹۰ روزه نسبت به نمونه شاهد در شرایط عمل آوری خشک و مرطوب. (الف) شرایط عمل آوری خشک. (ب) شرایط عمل آوری مرطوب.

جدول ۶: نتایج آزمایش مقاومت فشاری در شرایط عمل آوری خشک و مرطوب

نوع نانو	عمل آوری خشک $f_c$ (MPa)					عمل آوری مرطوب $f_c$ (MPa)			
	درصد نانو	۳روزه	۷روزه	۲۸روزه	۹۰روزه	۳روزه	۷روزه	۲۸روزه	۹۰روزه
NS	۰	۲۳/۸۴	۲۹/۰۱	۳۸/۵۸	۴۱/۵۱	۲۰/۸۴	۲۹/۰۱	۳۹/۰۹	۴۴/۶۸
	۰/۵	۲۴/۵۱	۲۸/۵۱	۴۰/۶۸	۴۸/۸۴	۲۴/۱۷	۲۷/۱۷	۳۷/۹۰	۴۶/۸۴
	۱	۲۴/۸۴	۳۰/۵۹	۴۳/۳۴	۴۹/۳۴	۲۵/۰۱	۲۷/۵۱	۳۹/۶۰	۴۷/۰۱
	۱/۵	۲۶/۵۱	۳۲/۲۹	۴۶/۰۱	۵۲/۳۵	۲۵/۵۱	۳۳/۹۹	۴۷/۱۸	۵۴/۷۳
	۲	۲۳/۵۰	۳۱/۱۰	۴۱/۵۱	۴۵/۰۱	۲۳/۵۰	۲۹/۳۴	۳۹/۴۳	۴۵/۳۴
NA	۰	۲۳/۸۴	۲۹/۰۱	۳۸/۵۸	۴۱/۵۱	۲۰/۸۴	۲۹/۰۱	۳۹/۰۹	۴۴/۶۸
	۰/۲۵	۲۷/۸۴	۳۵/۵۲	۴۵/۵۱	۴۹/۱۸	۲۶/۸۴	۳۲/۴۶	۴۱/۶۸	۵۲/۰۱
	۰/۵	۲۷/۵۱	۳۳/۱۴	۴۲/۸۴	۴۳/۱۸	۲۶/۱۷	۳۱/۱۰	۴۱/۳۴	۴۵/۸۴
	۰/۷۵	۲۴/۵۱	۳۲/۶۳	۴۰/۶۸	۴۲/۱۸	۲۴/۱۷	۲۶/۸۴	۳۸/۹۲	۴۱/۰۱
	۱/۵	۲۴/۳۴	۲۶/۳۴	۳۹/۹۴	۴۰/۶۸	۲۲/۰۰	۲۶/۰۱	۳۹/۲۶	۴۰/۶۸
NC	۰	۲۳/۸۴	۲۹/۰۱	۳۸/۵۸	۴۱/۵۱	۲۰/۸۴	۲۹/۰۱	۳۹/۰۹	۴۴/۶۸
	۰/۲۵	۲۳/۶۷	۳۱/۱۰	۴۰/۱۸	۴۶/۵۱	۲۵/۶۷	۳۲/۱۲	۴۲/۱۸	۴۸/۶۸
	۰/۵	۲۱/۰۰	۲۷/۵۱	۳۹/۶۰	۴۵/۳۴	۲۰/۱۷	۳۰/۵۹	۳۷/۹۰	۴۱/۰۱
	۰/۷۵	۲۰/۳۴	۲۶/۵۱	۳۹/۰۹	۴۰/۲۸	۱۹/۸۴	۲۸/۵۱	۳۶/۰۳	۴۰/۶۲
	۱/۵	۱۸/۵۰	۲۴/۵۱	۳۴/۶۷	۳۷/۹۰	۱۷/۰۰	۲۵/۶۷	۳۳/۸۲	۳۸/۵۸

جدول ۷: نتایج آزمایش UPV در شرایط عمل آوری خشک و مرطوب

نوع نانو	عمل آوری خشک UPV(Km/s)					عمل آوری مرطوب UPV(Km/s)			
	درصد نانو	۳روزه	۷روزه	۲۸روزه	۹۰روزه	۳روزه	۷روزه	۲۸روزه	۹۰روزه
NS	۰	۳/۹۸	۴/۰۳	۴/۱۰	۴/۱۲	۴/۱۵	۴/۲۷	۴/۳۰	۴/۳۳
	۰/۵	۳/۷۶	۳/۸۷	۴/۱۰	۴/۱۴	۳/۹۷	۴/۱۶	۴/۳۳	۴/۳۷
	۱	۳/۸۴	۳/۹۲	۴/۱۱	۴/۱۵	۳/۹۹	۴/۱۷	۴/۳۴	۴/۳۹
	۱/۵	۳/۸۷	۳/۹۵	۴/۱۹	۴/۲۶	۳/۹۴	۴/۲۰	۴/۳۴	۴/۴۲
	۲	۳/۶۹	۳/۸۸	۴/۰۵	۴/۲۳	۳/۸۴	۴/۰۸	۴/۲۳	۴/۳۴
	۰	۳/۹۸	۴/۰۳	۴/۱۰	۴/۱۲	۴/۱۵	۴/۲۷	۴/۳۰	۴/۳۳
NA	۰/۲۵	۳/۸۳	۴/۰۳	۴/۱۵	۴/۳۲	۳/۹۶	۴/۱۷	۴/۳۱	۴/۳۵
	۰/۵	۳/۸۱	۳/۹۹	۴/۰۲	۴/۰۸	۳/۹۰	۴/۰۹	۴/۱۸	۴/۳۲
	۰/۷۵	۳/۷۴	۳/۹۸	۴/۰۱	۴/۰۳	۳/۸۶	۳/۹۶	۴/۱۷	۴/۳۰
	۱/۵	۳/۶۷	۳/۸۴	۳/۹۸	۴/۰۰	۳/۷۹	۳/۹۵	۴/۱۸	۴/۲۱
	۰	۳/۹۸	۴/۰۳	۴/۱۰	۴/۱۲	۴/۱۵	۴/۲۷	۴/۳۰	۴/۳۳
NC	۰/۲۵	۳/۸۰	۴/۰۲	۴/۱۰	۴/۳۰	۴/۰۱	۴/۰۹	۴/۳۳	۴/۴۴
	۰/۵	۳/۵۸	۳/۸۳	۳/۹۸	۴/۰۵	۳/۷۵	۳/۹۸	۴/۲۱	۴/۲۶
	۰/۷۵	۳/۵۴	۳/۶۹	۳/۹۶	۳/۹۹	۳/۷۴	۳/۹۷	۴/۰۹	۴/۲۳
	۱/۵	۳/۴۸	۳/۶۲	۳/۸۸	۳/۹۰	۳/۶۶	۳/۹۳	۴/۰۹	۴/۱۰
	۰	۳/۹۸	۴/۰۳	۴/۱۰	۴/۱۲	۴/۱۵	۴/۲۷	۴/۳۰	۴/۳۳

بررسی جداگانه هر نانو مواد نشان می دهد که، نمونه های حاوی ۱/۵ درصد NS، ۰/۲۵ درصد NA و ۰/۲۵ درصد NC بیشترین افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه های شاهد را دارند که در جدول ۸ درصد افزایش مقاومت این نمونه ها نسبت به نمونه شاهد در سنین مختلف آمده است.

جدول ۸: مقدار افزایش مقاومت نمونه های حاوی مقادیر بهینه نانو مواد نسبت به نمونه شاهد (درصد)

سن (روز)	عمل آوری خشک			عمل آوری مرطوب		
	۱/۵ % NS	۰/۲۵ % NA	۰/۲۵ % NC	۱/۵ % NS	۰/۲۵ % NA	۰/۲۵ % NC
۳	۱۱	۱۶	۷	۲۲	۲۸	۲۳
۷	۱۱	۲۲	۷	۱۷	۱۱	۱۰
۲۸	۱۹	۱۷	۴	۲۰	۶	۷٫۸
۹۰	۲۶	۱۸	۱۲	۲۲	۱۶	۹

بنابراین مقدار بهینه NS، NA و NC برای بتن خودتراکم سخت شده به ترتیب ۱/۵، ۰/۲۵ و ۰/۲۵ درصد وزن سیمان است. همچنین با توجه به نتایج آزمایش های بتن خودتراکم تازه در شکل ۲، این مقادیر نانو مواد را می توان از نظر کارایی مطلوب بتن خودتراکم نیز مناسب دانست. مقاومت فشاری ۹۰ روزه نمونه ها حاوی این مقادیر NS، NA و NC در عمل آوری خشک به ترتیب ۲۶، ۱۸ و ۱۲ درصد و در عمل آوری مرطوب ۲۲، ۱۶ و ۹ درصد نسبت به نمونه های شاهد افزایش یافت. در ادامه مقادیر بهینه نانو مواد در این مطالعه مد نظر

می‌باشد. از دلایل این بهبود مقاومت می‌توان گفت که ذرات نانو به علت فعالیت بالایشان باعث تسریع هیدراتاسیون سیمان و مانع از رشد کریستال‌های هیدرواکسید کلسیم در میان تولیدات هیدراتاسیون می‌شوند و همچنین حفرات سیمانی را پر می‌کنند و موجب افزایش مقاومت و بهبود خواص فیزیکی، مکانیکی و دوام بتن می‌شوند [۲۹-۲۶].

نتایج آزمایش UPV برای درصد‌های بهینه نانو مواد در شرایط عمل‌آوری خشک (dry) و مرطوب (wet) در جدول ۹ نشان داده شده است و در جدول ۱۰، درصد اختلاف UPV نمونه‌های حاوی نانو مواد مذکور نسبت به نمونه شاهد در سنین مختلف آمده است.

جدول ۹: نتایج آزمایش UPV در شرایط عمل‌آوری خشک و مرطوب

نوع نانو	عمل‌آوری خشک UPV(Km/s)					عمل‌آوری مرطوب UPV(Km/s)			
	درصد نانو	۳روزه	۷روزه	۲۸روزه	۹۰روزه	۳روزه	۷روزه	۲۸روزه	۹۰روزه
NS	۰	۳/۹۸	۴/۰۳	۴/۱۰	۴/۱۲	۴/۱۵	۴/۲۷	۴/۳۰	۴/۳۳
	۱/۵	۳/۸۷	۳/۹۵	۴/۱۹	۴/۲۶	۳/۹۴	۴/۲۰	۴/۳۴	۴/۴۲
NA	۰/۲۵	۳/۸۳	۴/۰۳	۴/۱۵	۴/۳۲	۳/۹۶	۴/۱۷	۴/۳۱	۴/۳۵
NC	۰/۲۵	۳/۸۰	۴/۰۲	۴/۱۰	۴/۳۰	۴/۰۱	۴/۰۹	۴/۳۳	۴/۴۴

جدول ۱۰: مقدار اختلاف UPV نمونه‌های حاوی نانو مواد نسبت به نمونه شاهد (درصد)

سن (روز)	عمل‌آوری خشک			عمل‌آوری مرطوب		
	NS	NA	NC	NS	NA	NC
۳	-۲/۵	-۳/۸	-۴/۴	-۵	-۴/۴	-۳
۷	-۲	۰/۱	-۰/۲	-۱/۶	-۲/۲	-۴
۲۸	۲	۱/۲	۰/۱	۰/۸	۰/۲	۰/۷
۹۰	۳	۴/۸	۴/۴	۲	۰/۵	۲/۶

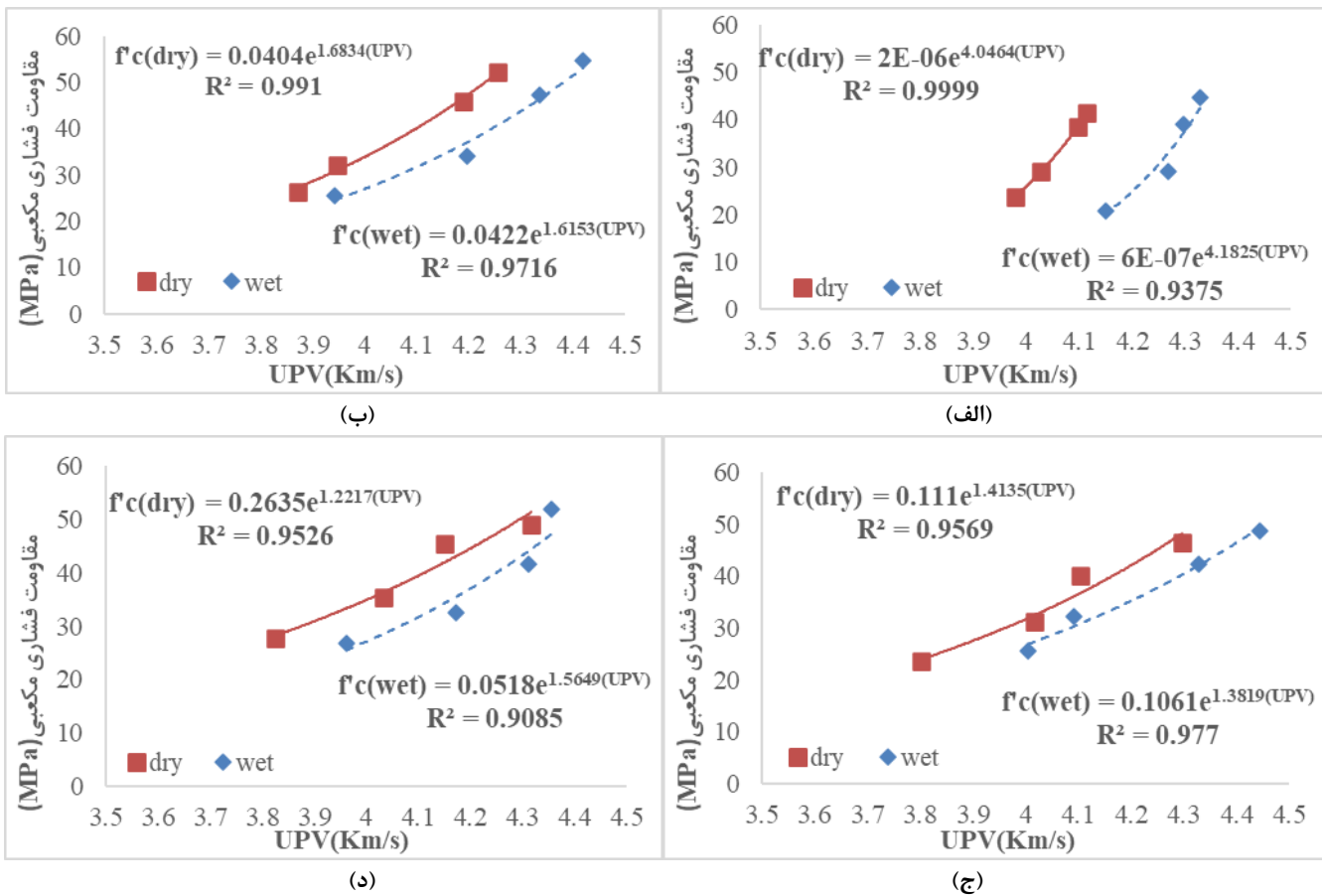
با توجه به نتایج نشان داده شده در جدول ۱۰، UPV در سنین اولیه کمتر از نمونه‌های شاهد است. با توجه به شواهد موجود علت این پدیده را می‌توان اینگونه توجیه کرد که نانو ذرات با داشتن سطح ویژه بالا و پیوند بین ذره‌های بسیار قوی، توانایی جذب بیشتر ملکول‌های آب را در اطراف خود دارد [۳۰ و ۳۱] و در کوتاه مدت باعث ایجاد تخلخل‌های بسیار ریز در اطراف خود می‌شود که شاید تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری ندارند اما به نظر می‌رسد که باعث کاهش UPV شده‌اند ولی با افزایش سن و پیشرفت واکنش هیراتاسیون این تخلخل‌ها از فرآورده‌های هیدراتاسیون پر شده و UPV افزایش می‌یابد.

این پدیده در مطالعات گذشته برای بتن‌های حاوی دوده سیلیس نیز مشاهده شد. دمیربوگا [۱۴] دریافت که استفاده از مقادیر بالای خاکستر بادی به جای سیمان در کوتاه مدت موجب کاهش شدید مقاومت بتن و UPV می‌شود که این افت با گذشت زمان در بازه زمانی ۱۲۰ روز که نهایت زمان آزمایش نمونه‌هایش بود تا حد زیادی جبران شده بود. وی همچنین دریافت که جایگزینی خاکستر بادی به میزان ۷۰٪ بیشترین کاهش در UPV و مقاومت بتن را ایجاد نموده است. الوکان و همکاران [۱۵] نیز این پدیده را در بتن خودتراکم حاوی خاکستر بادی و دوده سیلیس مشاهده کردند.

با افزایش درصد نانو مواد بیشتر از مقدار بهینه، مقاومت فشاری و UPV کاهش می‌یابد. این اتفاق ممکن است به این دلیل باشد که افزایش میزان پودر نانو از حد بهینه آن باعث می‌شود که ذرات نانو به خوبی و یکنواخت پخش نشوند. جمع شدن نانو ذرات باعث ایجاد یک ناحیه ضعف به شکل حفره می‌شود [۳۲] و به تبع آن میکرو ساختار هیدرات سیمان نمی‌تواند شکل بگیرد که در نتیجه باعث کاهش مقاومت فشاری می‌شود. به نظر می‌رسد که این پدیده تأثیر چشمگیری بر کاهش UPV دارد که نشان دهنده تأثیر زیاد نانو مواد در UPV است.

### ۳-۳- اثر نانو مواد و شرایط عمل آوری بر رابطه مقاومت فشاری و سرعت امواج اولتراسونیک

نمودار مقاومت فشاری نسبت به UPV برای نمونه‌های شاهد و حاوی درصد‌های بهینه نانو مواد با رابطه‌ی نمایی با دقت بسیار خوبی تخمین زده شد و در شکل ۴ نشان داده شده است. با مقایسه نمودار شکل ۴ بتن‌های خودتراکم حاوی نانو مواد نسبت به بتن خودتراکم شاهد مشاهده می‌شود که دامنه مقاومت فشاری و UPV افزایش و شیب نمودار آن کاهش یافته است. UPV در شرایط مرطوب نسبت به خشک در تمام سنین به طور متوسط برای نمونه‌های شاهد، حاوی NS، NA و NC به ترتیب ۵، ۳/۸، ۳ و ۴ درصد بیشتر است. علت این امر می‌تواند به دلیل وجود آب در تخلخل سنگدانه‌ها باشد که باعث می‌شود امواج اولتراسونیک سریع‌تر انتقال یابند [۳۳].



شکل ۴: رابطه مقاومت فشاری و UPV برای نمونه‌های شاهد و حاوی درصد بهینه نانو مواد (الف) نمونه شاهد. (ب) نمونه حاوی ۱/۵ درصد NS. (ج) نمونه حاوی ۰/۲۵ درصد NC. (د) نمونه حاوی ۰/۲۵ درصد NA.

با توجه به اختلاف UPV بین دو شرایط عمل‌آوری مختلف و نمودارهای ارائه شده در شکل ۴ مشاهده می‌شود که نمونه‌های حاوی نانو مواد نسبت به نمونه‌های شاهد تأثیرپذیری کمتری از شرایط عمل‌آوری دارند. با توجه به شواهد موجود علت این امر را می‌توان این‌طور بیان کرد که پودرهای نانو به دلیل اندازه ذرات بسیار ریز و سطح ویژه بسیار بالا، دارای نیروی قوی بین ذرات و اندر والس<sup>۱۲</sup> هستند و لذا ملکول‌های آب بیشتری را اطراف خود جذب می‌کنند [۳۰ و ۳۱] و به دلیل واکنش‌پذیری بسیار زیاد آن‌ها [۲۶-۲۹] انتظار می‌رود در شرایط عمل‌آوری خشک از این آب ذخیره شده برای انجام واکنش‌های شیمیایی و پیشرفت فرایند هیدراتاسیون استفاده شود و تا حدودی

<sup>12</sup> van der Waal's forces

کاستی‌های شرایط عمل‌آوری خشک جبران شود. همچنین وجود نانو مواد در نمونه‌ها حفرات سیمانی را پر می‌کنند و تخلخل‌های موجود در بتن را کاهش می‌دهند [۲۹-۳۴] و به تبع آن انتظار می‌رود در شرایط عمل‌آوری مرطوب، آب کمتری نسبت به نمونه‌های شاهد در منافذ وجود داشته باشد و چون افزایش UPV در عمل‌آوری مرطوب به دلیل وجود آب در تخلخل سنگدانه‌ها می‌باشد [۳۳]، از این رو در نمونه‌های حاوی نانو مواد UPV نسبت به حالت خشک کمتر افزایش داشته است. به طور کلی در بتن‌های خودتراکم حاوی نانو مواد اختلاف UPV بین عمل‌آوری مرطوب و خشک از ۵ درصد مربوط به بتن خودتراکم شاهد به ۳/۸، ۳ و ۴ درصد به ترتیب مربوط به بتن‌های خودتراکم حاوی نانو سیلیس، آلومینیوم و مس کاهش یافته است.

### ۳-۴- تاثیر میلگرد بر سرعت امواج اولتراسونیک

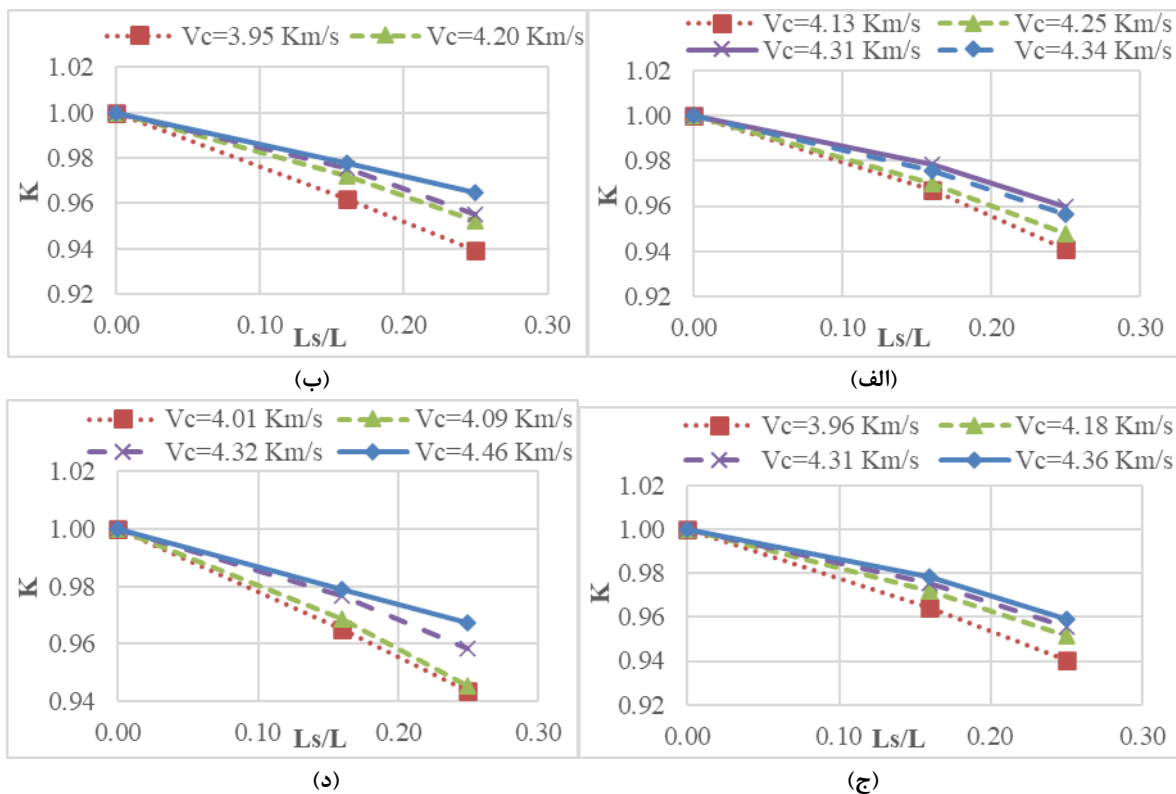
با توجه به شاخصه‌های  $a$ ،  $L$  و  $Ls$  که در شکل ۱ به خوبی معرفی شده است ضرایب اصلاح مربوط به میلگرد طولی نسبت به  $(a/L)$  و میلگرد عرضی نسبت به  $(Ls/L)$  برای بتن‌های خودتراکم در جدول‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. تغییرات این ضرایب اصلاح نسبت به  $Ls/L$  برای میلگردهای عرضی در شکل ۵ نشان داده شده است. به طور کلی ضرایب اصلاح در حالتی که مسیر عبور امواج اولتراسونیک عمود بر راستای میلگردها هستند بیشتر از حالتی است که مسیر عبور امواج اولتراسونیک موازی با راستای میلگردها است. نتایج نشان می‌دهد که هرچقدر  $Ls/L$  افزایش و  $a/L$  کاهش یابد مقدار ضریب اصلاح کاهش می‌یابد. با افزایش قطر میلگرد سرعت امواج اولتراسونیک در فولاد ( $Vs$ ) افزایش می‌یابد که در نتیجه نسبت سرعت امواج اولتراسونیک در بتن ( $Vc$ ) به  $Vs$  که با "Y" معرفی شده است نیز کاهش می‌یابد و باعث کاهش ضریب اصلاح می‌شود [۱۳]. کیفیت بتن خودتراکم و به تناسب آن سرعت امواج اولتراسونیک در میلگرد می‌تواند مهم‌ترین فاکتور تأثیرگذار بر تفاوت ضرایب اصلاح این تحقیق نسبت به سایر تحقیقات باشد. سرعت عبور امواج اولتراسونیک در میلگردهای با قطر ۱۶ و ۲۵ میلیمتر به ترتیب ۵/۱ و ۵/۲ کیلومتر بر ثانیه است بنابراین برای بتن‌های خودتراکمی که سرعت امواج اولتراسونیک در آن‌ها بیشتر از ۵/۱ و ۵/۲ کیلومتر بر ثانیه باشد به ترتیب میلگرد با قطر ۱۶ و ۲۵ میلیمتر تأثیری در  $Vc$  نخواهد داشت. لذا با توجه به نسبت‌های  $a/L$  و  $Ls/L$  جدول‌های ۱۱ و ۱۲ و همچنین حداکثر  $Vc$  که کمتر از  $Vs$  برای میلگرد با قطر ۱۶ میلیمتر (۵/۱ کیلومتر بر ثانیه) است، میلگرد با قطر ۱۶ میلیمتر نیز تا حدودی بر سرعت امواج اولتراسونیک اثرگذار است؛ ولی در حالتی که مسیر امواج اولتراسونیک عمود بر راستای این میلگرد است تأثیر بسیار کمتری دارد، به طوری که ضرایب اصلاح آن نزدیک به ۱ است.

جدول ۱۱: ضرایب اصلاح میلگرد تقویت برای حالتی که مسیر اندازه‌گیری UPV موازی راستای میلگرد است.

control		NS							
قطر میلگرد (mm)	a/L	$Vc=4156$ (m/s)	$Vc=4277$ (m/s)	$Vc=4317$ (m/s)	$Vc=4355$ (m/s)	$Vc=3955$ (m/s)	$Vc=4208$ (m/s)	$Vc=4251$ (m/s)	$Vc=4432$ (m/s)
۱۶	۰	۰/۸۱	۰/۸۴	۰/۸۴	۰/۸۵	۰/۷۷	۰/۸۲	۰/۸۵	۰/۸۷
	۰/۱	۰/۹۲	۰/۹۴	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۰	۰/۹۴	۰/۹۶	۰/۹۷
۲۵	۰	۰/۸۰	۰/۸۲	۰/۸۳	۰/۸۴	۰/۷۶	۰/۸۱	۰/۸۳	۰/۸۵
	۰/۰۸	۰/۸۹	۰/۹۱	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۸۶	۰/۹۱	۰/۹۳	۰/۹۴
NA		NC							
قطر میلگرد (mm)	a/L	$Vc=3965$ (m/s)	$Vc=4187$ (m/s)	$Vc=4302$ (m/s)	$Vc=4374$ (m/s)	$Vc=4019$ (m/s)	$Vc=4105$ (m/s)	$Vc=4344$ (m/s)	$Vc=4468$ (m/s)
۱۶	۰	۰/۷۸	۰/۸۲	۰/۸۴	۰/۸۵	۰/۷۹	۰/۸۰	۰/۸۵	۰/۸۷
	۰/۱	۰/۹۰	۰/۹۴	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۱	۰/۹۲	۰/۹۵	۰/۹۸
۲۵	۰	۰/۷۶	۰/۸۰	۰/۸۳	۰/۸۴	۰/۷۷	۰/۷۹	۰/۸۳	۰/۸۶
	۰/۰۸	۰/۸۷	۰/۹۰	۰/۹۲	۰/۹۳	۰/۸۷	۰/۸۸	۰/۹۲	۰/۹۴

جدول ۱۲: ضرایب اصلاح میلگرد تقویت برای حالتی که مسیر اندازه گیری UPV عمود بر راستای میلگرد است.

control					NS			
Ls/L	Vc=4132 (m/s)	Vc=4255 (m/s)	Vc=4310 (m/s)	Vc=4347 (m/s)	Vc=3952 (m/s)	Vc=4201 (m/s)	Vc=4347 (m/s)	Vc=4424 (m/s)
۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۰/۱۶	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۸
۰/۲۵	۰/۹۴	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۶	۰/۹۴	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۶
NA					NC			
Ls/L	Vc=3968 (m/s)	Vc=4184 (m/s)	Vc=4310 (m/s)	Vc=4366 (m/s)	Vc=4016 (m/s)	Vc=4098 (m/s)	Vc=4329 (m/s)	Vc=4464 (m/s)
۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۰/۱۶	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۸
۰/۲۵	۰/۹۴	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۶	۰/۹۴	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۷



شکل ۵: نمودار های ضرایب اصلاح میلگرد تقویت نسبت به  $Ls/L$  برای حالتی که مسیر اندازه گیری UPV عمود بر راستای میلگرد است. (الف) نمونه شاهد. (ب) نمونه حاوی ۱/۵ درصد NS. (ج) نمونه حاوی ۰/۲۵ درصد NA. (د) نمونه حاوی ۰/۲۵ درصد NC.

از مقایسه ضرایب اصلاح برای چهار نوع بتن خودتراکم نسبت به سن ملاحظه می شود که در سنین اولیه ضرایب اصلاح بتن های خودتراکم حاوی نانو مواد کمتر از بتن خودتراکم شاهد هستند، اما در بلند مدت به خصوص ۹۰ روز ضرایب اصلاح بتن های خودتراکم حاوی نانو مواد بیشتر از بتن خودتراکم شاهد هستند. با توجه به جدول ۸ ملاحظه می شود که سرعت امواج اولتراسونیک در بتن های حاوی

نانو مواد در سنین اولیه کمتر از بتن خودتراکم شاهد است و در سنین بالا بالعکس؛ در نتیجه در سنین اولیه نسبت  $V_c/V_s$  (ضریب گاما) و به تناسب  $K$  (ضریب اصلاح) بتن‌های خودتراکم حاوی نانو مواد کمتر از بتن خودتراکم شاهد است.

مطابق روابط ۱ و ۲ ضرایب اصلاح پیشنهادی استاندارد BS 1881: Part 203 [۱۱] محاسبه شده و با ضرایب اصلاحی از این مطالعه آزمایشگاهی مقایسه گردید.

برای حالت راستای میلگرد موازی بر راستای انتشار امواج اولتراسونیک و  $a > 2b$ :

$$K = \gamma + 2 \left( \frac{a}{L} \right) \sqrt{1 - \gamma^2} \quad \text{and} \quad \gamma = \frac{V_c}{V_s} \quad (1)$$

و برای حالتی که  $a = 0$  و راستای میلگرد عمود بر راستای انتشار امواج اولتراسونیک:

$$K = 1 - \frac{Ls}{L} (1 - \gamma) \quad (2)$$

همان طور که قبلا اشاره شد،  $V_s$  و  $V_c$  به ترتیب سرعت امواج اولتراسونیک در بتن و فولاد است.  $K$  ضریب اصلاح سرعت امواج اولتراسونیک ناشی از حضور میلگرد در بتن است.  $L$ ،  $L_s$  و  $a$  در شکل ۱ نشان داده شده است.

با توجه به رابطه‌های ۱ و ۲، در  $a$  برابر صفر، نسبت  $L_s/L$  تقریبا برابر ۱ است و ضریب اصلاح برابر ضریب  $\gamma$  (نسبت  $V_c$  به  $V_s$ ) است و به این معنی است که سرعت امواج اولتراسونیک محاسبه شده در راستای میلگرد تقریبا برابر  $V_s$  (سرعت امواج در میلگرد) است. نتایج پیش بینی شده از روابط ۱ و ۲ در جداول ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. با مقایسه ضرایب اصلاح در این جداول با جداول ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود که نتایج اندازه‌گیری شده با دقت بسیار زیادی با نتایج تخمین زده شده از روابط آیین‌نامه BS 1881: Part 203 [۱۱] مطابقت دارد. لذا جهت اصلاح سرعت امواج اولتراسونیک اندازه‌گیری شده از بتن‌های خودتراکم این مطالعه که دارای میلگرد تقویت هستند، فارق از نوع نانو مواد به کار برده شده در بتن‌های خودتراکم، می‌توان از ضرایب اصلاح آیین‌نامه BS 1881: Part 203 [۱۱] استفاده نمود. بنابراین با استفاده از نمودارهای بدست آمده در شکل ۷ و اعمال ضرایب اصلاح آیین‌نامه BS 1881: Part 203 [۱۱] می‌توان مقاومت بتن‌های خودتراکم مذکور که دارای میلگرد هستند را ارزیابی نمود.

جدول ۱۳: ضرایب اصلاح پیشنهادی استاندارد BS 1881: Part 203 [۱۱] محاسبه شده برای حالت راستای میلگرد موازی بر راستای انتشار امواج اولتراسونیک.

		control				NS			
قطر میلگرد (mm)	a/L	$V_c=4156$ (m/s)	$V_c=4277$ (m/s)	$V_c=4317$ (m/s)	$V_c=4355$ (m/s)	$V_c=3955$ (m/s)	$V_c=4208$ (m/s)	$V_c=4351$ (m/s)	$V_c=4432$ (m/s)
۱۶	۰	۰/۸۱	۰/۸۴	۰/۸۴	۰/۸۵	۰/۷۷	۰/۸۲	۰/۸۵	۰/۸۷
	۰/۱	۰/۹۳	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۰	۰/۹۴	۰/۹۵	۰/۹۷
۲۵	۰	۰/۸۰	۰/۸۲	۰/۸۳	۰/۸۴	۰/۷۶	۰/۸۱	۰/۸۳	۰/۸۵
	۰/۰۸	۰/۸۹	۰/۹۱	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۸۶	۰/۹۰	۰/۹۲	۰/۹۳
		NA				NC			
قطر میلگرد (mm)	a/L	$V_c=3965$ (m/s)	$V_c=4187$ (m/s)	$V_c=4302$ (m/s)	$V_c=4374$ (m/s)	$V_c=4019$ (m/s)	$V_c=4105$ (m/s)	$V_c=4344$ (m/s)	$V_c=4468$ (m/s)
۱۶	۰	۰/۷۸	۰/۸۲	۰/۸۴	۰/۸۵	۰/۷۹	۰/۸۰	۰/۸۵	۰/۸۷
	۰/۱	۰/۹۰	۰/۹۳	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۱	۰/۹۲	۰/۹۵	۰/۹۷
۲۵	۰	۰/۷۶	۰/۸۰	۰/۸۳	۰/۸۴	۰/۷۷	۰/۷۹	۰/۸۳	۰/۸۶
	۰/۰۸	۰/۸۷	۰/۹۰	۰/۹۲	۰/۹۳	۰/۸۷	۰/۸۹	۰/۹۲	۰/۹۴

جدول ۱۴: ضرایب اصلاح پیشنهادی استاندارد BS 1881: Part 203 [۱۱] محاسبه شده برای حالت راستای میلگرد عمود بر راستای انتشار امواج اولتراسونیک.

control					NS			
Ls/L	Vc=۴۱۳۲ (m/s)	Vc=۴۲۵۵ (m/s)	Vc=۴۳۱۰ (m/s)	Vc=۴۳۴۷ (m/s)	Vc=۳۹۵۲ (m/s)	Vc=۴۲۰۱ (m/s)	Vc=۴۳۴۷ (m/s)	Vc=۴۴۲۴ (m/s)
۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۰/۱۶	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۸
۰/۲۵	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۶	۰/۹۴	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۶
NA					NC			
Ls/L	Vc=۳۹۶۸ (m/s)	Vc=۴۱۸۴ (m/s)	Vc=۴۳۱۰ (m/s)	Vc=۴۳۶۶ (m/s)	Vc=۴۰۱۶ (m/s)	Vc=۴۰۹۸ (m/s)	Vc=۴۳۲۹ (m/s)	Vc=۴۴۶۴ (m/s)
۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۰/۱۶	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۸
۰/۲۵	۰/۹۴	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۶	۰/۹۴	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۶

#### ۴- نتیجه گیری

در این مطالعه برای ارزیابی مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی نانو مواد از روش امواج اولتراسونیک استفاده شد. بتن‌های خودتراکم با ۱۳ طرح اختلاط مختلف حاوی مقادیر بین ۰/۲۵ و ۲ درصد NS، NA و NC، در سنین بین ۳ تا ۹۰ روز تحت آزمایش‌های سرعت امواج اولتراسونیک و مقاومت فشاری قرار گرفتند و تأثیر عواملی چون نوع و مقدار نانو مواد، شرایط عمل‌آوری مرطوب و خشک و تأثیر میلگرد بر سرعت امواج اولتراسونیک بررسی گردید. برای ارزیابی خواص بتن خودتراکم تازه نیز آزمایش‌های جریان اسلامپ، T<sub>50</sub>، قیف V، جعبه L انجام شد. بر اساس بررسی اطلاعات حاصل از این آزمایش‌ها می‌توان نتیجه گرفت که:

- ۱- بر اساس آزمایشات بتن تازه مشاهده شد که با افزایش مقدار نانو مواد کارایی بتن خودتراکم کاهش می‌یابد و میزان تأثیر نانو مواد مذکور در کارایی بتن متفاوت می‌باشد. به طوری که مخلوط‌های حاوی NA بیشترین شدت کاهش کارایی را از خود نشان داده‌اند. سپس روند کاهش کارایی مخلوط‌های حاوی NC شدت کمتری داشته‌اند و مخلوط‌های حاوی NS دارای کمترین شدت کاهش کارایی می‌باشند.
- ۲- نتایج آزمایش مقاومت فشاری نشان می‌دهد که مقدار بهینه NS، NA و NC برای بتن خود تراکم سخت شده به ترتیب ۱/۵، ۰/۲۵ و ۰/۲۵ درصد وزن سیمان است. مقاومت فشاری ۹۰ روزه نمونه‌های حاوی این مقادیر NS، NA و NC در عمل‌آوری خشک به ترتیب ۲۶، ۱۸ و ۱۲ درصد و در عمل‌آوری مرطوب ۲۲، ۱۶ و ۹ درصد نسبت به نمونه‌های شاهد افزایش یافت. بتن خودتراکم حاوی ۱/۵ درصد NS عمل‌آوری شده در شرایط مرطوب با مقاومت فشاری ۵۴/۷۳ مگاپاسکال بیشترین مقاومت فشاری را بین سایر بتن‌های خودتراکم دارد.
- ۳- نتایج آزمایش سرعت امواج اولتراسونیک نشان می‌دهد که UPV ۹۰ روزه نمونه‌های حاوی مقادیر بهینه NS، NA و NC در عمل‌آوری خشک به ترتیب ۳، ۴ و ۴ درصد و در عمل‌آوری مرطوب ۲، ۰/۵ و ۲ درصد نسبت به نمونه‌های شاهد افزایش یافت. همچنین UPV در نمونه‌های حاوی درصد بهینه در سنین اول، کمتر و در سنین بالاتر بیشتر از نمونه شاهد است.
- ۴- با افزایش درصد نانو مواد بیشتر از مقدار بهینه بتن سخت شده، مقاومت فشاری و UPV کاهش یافت، به طوری که نمونه‌های حاوی درصدهای بالا تر NA و NC در برخی سنین مقاومت فشاری و UPV کمتری نسبت به نمونه شاهد دارند.
- ۵- از بررسی رابطه بین UPV و مقاومت فشاری مشاهده گردید که برای بتن‌های خودتراکم حاوی نانو مواد دامنه مقاومت فشاری و UPV افزایش یافته‌است و شیب نمودار آن کاهش پیدا نموده است. همچنین UPV در عمل‌آوری مرطوب نسبت به خشک در تمام سنین به طور متوسط برای نمونه‌های شاهد، حاوی NS، NA و NC به ترتیب ۵، ۳/۸، ۳ و ۴ درصد بیشتر است و مشاهده گردید که در نمونه‌های حاوی نانو مواد نسبت به نمونه‌های شاهد اختلاف UPV بین شرایط عمل‌آوری مرطوب و خشک کاهش یافته است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که بتن‌های خودتراکم حاوی نانو مواد تأثیرپذیری کمتری از شرایط عمل‌آوری دارند.



۶- نتایج ضرایب اصلاح تاثیر حضور میلگرد در بتن‌های خودتراکم بصورت آزمایشگاهی با دقت بسیار زیادی با نتایج تخمین زده شده از روابط آیین‌نامه BS 1881: Part 203 مطابقت دارد. همچنین استفاده از مواد نانو در بتن خودتراکم ضرایب اصلاح حضور میلگرد را در کوتاه مدت و بلند مدت نسبت به بتن خودتراکم شاهد تحت تاثیر قرار می‌دهد.

## ۵- مراجع

- [1] Durgun, M.Y., Atahan, H.N. (2018). Strength, elastic and microstructural properties of SCCs' with colloidal nano silica addition. *Construction and Building Materials* 158, pp 295–307.
- [2] Durgun, M.Y., Atahan, H.N. (2017). Rheological and fresh properties of reduced fine content self-compacting concretes produced with different particle sizes on nano SiO<sub>2</sub>. *Construction and Building Materials* 142, pp 431–443.
- [3] Sobolev, K., Flores, I., Torres-Martinez, L.M., Valdez, P.L., Zarazua, E., Cuellar, E.L. (2009). Engineering of SiO<sub>2</sub> nanoparticles for optimal performance in Nano cement-based materials. *Nanotechnology in Construction Proceedings of the NICOM3 (3rd International Symposium on Nanotechnology in Construction)*. Prague, Czech Republic, pp 139–148.
- [4] Zaki, S.I., Ragab Khaled, S. (2009). How nanotechnology can change concrete industry. *1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries*, ISSN 2170–0095, Oran, Algeria, vol. 1, pp 407–414.
- [5] Du, H., Pang, S.D. (2014). Effect of colloidal Nano-silica on the mechanical and durability performances of mortar. *Key Eng. Mater.* 629, pp 443–448.
- [6] Nazari, A., Riahi, S. (2011). The effects of SiO<sub>2</sub> nanoparticles on physical and mechanical properties of high strength compacting concrete. *Compos. Eng.* 42 (3), pp 570–578.
- [7] Oltulu, M., Sahi, R. (2013). Effect of Nano SiO<sub>2</sub>, Nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Nano Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders on compressive strengths and capillary water absorption of cement mortar containing fly ash. a comparative study. *Energy Build.* 58, pp 292–301.
- [8] Rashad, M.A. (2013). A synopsis about the effect of nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, nano-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and nano-clay on some properties of cementitious materials. A short guide for Civil Engineer, *Mater Des.* 52, pp 143–57.
- [9] Nazari, A., Rafiepour, M.H., Riahi, S. (2011). The effects of CuO nanoparticles on properties of self-compacting concrete with GGBFS as binder. *Mater. Res. J.* 14, pp 307–316.
- [10] Nazari, A., Riahi, S. (2011). Effects of CuO nanoparticles on compressive strength of self-compacting concrete. *Indian Acad. Sci.* 36, pp 371–391.
- [11] BS 1881, Part 203. (1986). Recommendations for Measurement of Velocity of Ultrasonic Pulses in Concrete, British Standards Institution, London.
- [12] RILEM Recommendation NDT 1. (1972). Testing of concrete by the ultrasonic pulse method, Paris.
- [13] Bungey, J. H., Grantham, M. G., Millard, S. (2006). Testing of concrete in structures. Crc Press.
- [14] Demirboğa, R., Türkmen, İ., Karakoc, M. B. (2004). Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixed concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(12), pp 2329-2336.
- [15] Ulucan, Z.Ç., Türk, K., Karata, M. (2008). Effect of mineral admixtures on the correlation between ultrasonic velocity and compressive strength for self-compacting concrete, *Russ. J. Nondestr. Test.* 44 (5), pp. 367–374.
- [16] Sadeghi Nik, A., Lotfi Omran, O. (2013). Estimation of compressive strength of self-compacted concrete with fibers consisting nano-SiO<sub>2</sub> using ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials* 44, pp 654–662.
- [17] Puentes, J., Barluenga, G., Palomar, I. (2015). Effect of silica-based nano and micro additions on SCC at early age and on hardened porosity and permeability. *Construction and Building Materials* 81, pp 154–161.
- [18] Barluenga, G., Palomar, I., Puentes, J. (2015). Hardened properties and microstructure of SCC with mineral additions. *Construction and Building Materials* 94, pp 728–736.
- [19] American Society for Testing Material, ASTM C33/C33M–16. (2016). Standard Specification for Concrete Aggregates, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- [20] EFNARC. (2005). The European Specification and guidelines for self-compacting concrete.
- [21] British Standards Institution, BS EN 12390-2. (2009). Testing hardened concrete. Making and curing specimens for strength tests.
- [22] American Society for Testing Material, ASTM C597–16. (2016). Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- [23] British Standards Institution, BS EN 12390-3. (2009). Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens.
- [24] Hosseini, P., Booshehrian, A., Madari, A. (2011). Developing concrete recycling strategies by utilization of nano SiO<sub>2</sub> particles, *Waste Biomass Valor* 2 (3), pp. 347–355.

- [25] Abbas, R. (2009). Influence of Nano-silica addition on properties of conventional and ultra-high performance concretes, HBRC J 5 (1), pp. 18–30.
- [26] Taheri-Behrooz, F., Memar Maher, B., Shokrieh, M.M. (2015). Mechanical properties modification of a thin film phenolic resin filled with nano silica particles. *Comput. Mater. Sci.* 96, pp 411–415.
- [27] Du, H., Du, S., Liu, X. (2014). Durability performances of concrete with nano-silica, *Constr. Build. Mater.* 73, pp 705–712.
- [28] Aly, M., Hashmi, M.S.J., Olabi, A.G., Messeiry, M., Abadir, E.F., Hussain, A.I. (2012). Effect of colloidal nano-silica on the mechanical and physical behaviour of waste-glass cement mortar. *Mater. Des.* 33, pp 127–135.
- [29] Oltulu, M., Sahin, R. (2014). Pore structure analysis of hardened cement mortars containing silica fume and different nano-powders. *Constr. Build. Mater.* 53, pp 658–664.
- [30] Quercia, G., Hüskén, G., Brouwers, H.J.H. (2012). Water demand of amorphous nano silica and its impact on the workability of cement paste. *Cem. Concr. Res.* 42, pp 344–357.
- [31] Senff, L., Hotza, D., Repette, W.L., Ferreira, V.M., Labrincha, J.A. (2009). Influence of added nanosilica and/or silica fume on fresh and hardened properties of mortars and cement pastes. *Adv. Appl. Ceram* 108 (7), pp 418–428.
- [32] Li, H., Xiao, H.G., Ou, J.P. (2004). A study on mechanical and pressure-sensitive properties of cement mortar with nano phase materials. *Cem. Concr. Re.* 34(3), pp 435–438.
- [33] Safiuddin, M., Raman, S. N., Zain, M. F. M. (2007). Effect of different curing methods on the properties of microsilica concrete. *Australian journal of basic and applied sciences*, Vol. 1(2), pp 87-95.
- [34] Mohseni, E., Mehdizadeh Miandehi, B., Yang, J., Yazdi, M.A. (2015). Single and combined effects of nano-SiO<sub>2</sub>, nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and nano-TiO<sub>2</sub> on the mechanical, rheological and durability properties of self-compacting mortar containing fly ash. *Construction and Building Materials* 84, pp 331–340.