

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

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

۱- دانشیار گروه عمران دانشکده فنی دانشگاه گیلان، ایران

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

[Rmadandoust@yahoo.com](mailto:Rmadandoust@yahoo.com), [saber.deilamie@gmail.com](mailto:saber.deilamie@gmail.com)

### چکیده

در این مطالعه، مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی نانو مواد با استفاده از روش غیر مخرب امواج فراصوتی ارزیابی شد. برای تعیین خواص بتن خود تراکم تازه از آزمایش جریان اسلامپ،  $T_{50}$ ، آزمایش قیف V و آزمایش جعبه L استفاده شد. بتن های خودتراکم با ۱۳ طرح اختلاط مختلف حاوی مقادیر بین ۰/۲۵ و ۲ درصد نانو اکسید های سیلیس (NS)، آلومینیوم (NA) و مس (NC) که به عنوان ماده چسبنده جایگزین وزن سیمان شده است، در سنین بین ۳ تا ۹۰ روز و دارای مقاومت های فشاری بین ۲۰ و ۵۴ مگاپاسکال، آزمایش شدند. تأثیر عواملی چون نوع و مقدار نانو مواد، شرایط عمل آوری مرطوب و خشک بر رابطه سرعت امواج فراصوتی (UPV) و مقاومت فشاری بررسی شد. نتایج آزمایش ها نشان می دهد که نمونه های حاوی NS، NA و NC به ترتیب با مقادیر ۱/۵، ۰/۲۵ و ۰/۲۵ درصد وزن سیمان (درصد بهینه)، بیشترین UPV و مقاومت فشاری را دارند. UPV در نمونه های حاوی درصد بهینه در سنین اول کمتر و در سنین بالا بیشتر از نمونه شاهد شد. رابطه UPV و مقاومت فشاری نمایی است که ضرایب ثابت این روابط نمایی برای هر نانو مواد و مقادیر مختلف آن ها متفاوت می باشد و همچنین اختلاف UPV و نمودار این روابط در دو شرایط عمل آوری، برای نمونه های حاوی نانو مواد کمتر از نمونه شاهد شد. تغییرات مقاومت بتن های خودتراکم حاوی نانو مواد حساسیت کمتری نسبت به تغییرات UPV داشت.

سرعت امواج فراصوتی، مقاومت فشاری، نانو مواد، بتن خود تراکم

E

### ۱- مقدمه

با توجه به رشد صنعت، ساخت ساختمان ها در تعداد طبقات زیاد انجام میگیرد و تراکم میله گرد را به همراه دارد. بعضاً مشکل اجرا از نظر ویبره کردن بتن های معمولی کاملاً مشهود است. تحقیقات نوین استفاده از بتن خود تراکم را مطرح کرده است که دارای تراکم مناسب و آسان، کیفیت و دوام بهتر می باشد. در بتن های خود تراکم، برای بهبود خواص مکانیکی و خواص بتن تازه علاوه بر مواد تشکیل دهنده بتن های نرمال از مواد دیگری نظیر نانو مواد استفاده می شود. ذرات نانو بر خصوصیات بتن خودتراکم تازه و سخت شده اثرات متفاوت و منحصر به فردی از خود نشان می دهند. در این خصوص مطالعاتی هم انجام شده و از نانو مواد هایی نظیر نانو سیلیس [۱-۵]، نانو آلومینیوم [۵ و ۶]، نانو آهن [۵]، نانو مس [۷ و ۸] و ... استفاده شده است.

ارزیابی مقاومت بتن همواره مورد توجه کاربران و محققان بوده است که طبق آیین نامه ها با استفاده از نمونه های استاندارد از بتن تهیه شده، گرفته می شود که البته بیانگر مقاومت واقعی بتن در محل نیستند. لذا در این خصوص مطالعاتی بر روی سازه های موجود به روش های غیر مخرب نظیر چکش اشmitt، امواج فراصوتی و روش های نیمه مخرب نظیر مغزه گیری، نفوذ میله، pull out و pull off صورت گرفته است که روش غیر مخرب امواج فراصوتی مورد توجه در این مقاله است. در این آزمایش هیچگونه خرابی ایجاد نمی شود و علاوه بر آن کم هزینه و به سرعت قابل انجام است. عوامل مختلفی مانند شرایط نگهداری و مقدار رطوبت، ماکزیمم سائز سنگدانه، شکل و اندازه نمونه، نوع سیمان، سن بتن، اثر آرماتور و نسبت های اختلاط

بر روی سرعت امواج فراصوتی در بتن موثر می باشد. این روش به طور گسترده روی بتن معمولی انجام شده است که بانگی [۹] مطالعات فراوانی در این زمینه انجام داده است، اما این آزمایش روی بتن خود تراکم به ویژه بتن های حاوی نانو مواد بنظر بطور محدود انجام شده است.

در این مطالعه بتن خود تراکم حاوی سه نوع نانو مواد شامل NS، NA و NC مد نظر می باشد و بررسی ارسال امواج از بتن های یاد شده مورد توجه می باشد. مقدار بهینه این نانو مواد تعیین می شود و با توجه به اهداف این مطالعه تعیین رابطه مقاومت فشاری و UPV و عوامل مؤثر بر این روابط مورد توجه می باشد.

دمیربوگا [۱۰] با جایگزین نمودن درصدی از مواد پوزولانی شامل خاکستر بادی و سرباره کوره آهن در سیمان پرتلند تیپ یک به تاثیر هر یک و ترکیب آنها بر UPV و مقاومت فشاری بتن پرداخته است و رابطه مقاومت فشاری و UPV، برای مقادیر و نوع های مختلف افزودنی را نمایی توصیف کرد. پونتس و همکاران [۱۱] نیز برای بررسی تاثیر افزودنی های میکرو و نانو سیلیس بر بتن خودتراکم در سنین اولیه و تخلخل سخت شده از روش UPV استفاده کردند. بارلونگا و همکاران [۱۲] خواص بتن خودتراکم سخت شده حاوی افزودنی های 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، سوبولوف و همکاران [۱] گزارش کرده اند که با افزودن ۰/۲۵ درصد NS موجب افزایش ۱۰ درصد مقاومت ۲۸ روزه می شود. زکی و رجب [۲] بیان کرده اند که استفاده از ۰/۵ درصد NS در تمام سنین بیشترین مقاومت فشاری را دارد. نظری و همکاران [۷ و ۸] دریافتند که با افزایش NC تا ۳ درصد باعث افزایش ژل سیلیکات کلسیم هیدراته، کاهش کریستال های کلسیم هیدراکسید، بهبود مقاومت و جذب آب بتن می شود. همچنین دریافتند که افزودن بیش از ۴ درصد NC باعث کاهش مقاومت فشاری بتن خود تراکم می شود. راشاد [۶] 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 می یابد.

## ۲- برنامه ی 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. از پودر سنگ معدنی به عنوان پر کننده استفاده شده است. در جدول ۱ مشخصات شیمیایی سیمان و پودر سنگ آهک آمده است.

جدول ۱ مشخصات شیمیایی سیمان و پودر سنگ آهک

%	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>	CaCO <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		۰/۰۲-۰/۰۰۵	۰/۶-۰/۰۷	۱/۵-۱/۰
پودر سنگ	۰/۴۵	۰/۳۳	۰/۰۲	۵۲/۳۵	۰/۰۲	۵۲/۳۵	۹۹/۳			

شن و ماسه رودخانه ای اشباع با سطح خشک متناسب با دانه بندی مجاز استاندارد ASTM C33/C33M [۱۳] استفاده شد. مدول نرمی ماسه ۲/۷ است که طبق حدود استاندارد ASTM C33/C33M [۱۳] (۳/۱ - ۲/۲)، مناسب می باشد. حداکثر اندازه سنگدانه طبق EFNARC [۱۴] برای بتن های خود تراکم ۱۲-۲۰ میلیمتر 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 Civil Flow ۲۸۰ با بنیان شیمیایی پلی کربوکسیلات استفاده شده است. آب مصرفی در این پروژه آب شرب شهرستان رشت می باشد. در این مطالعه از NS، NA و NC تولید شده توسط شرکت US Research Nanomaterials, Inc [۱۵] استفاده شده است. NS دارای خلوص ۹۸ درصد، میانگین اندازه ذرات ۶۰-۷۰ نانومتر، سطح ویژه ۱۶۰ متر مربع بر گرم و چگالی واقعی ۲/۴ گرم بر سانتیمتر مکعب است. NA دارای خلوص ۹۹ درصد،

میانگین اندازه ذرات ۲۰ نانومتر، سطح ویژه ۱۳۸ متر مربع بر گرم و چگالی واقعی ۳/۸۹ گرم بر سانتیمتر مکعب است. NC دارای خلوص ۹۹ درصد، میانگین اندازه ذرات ۴۰ نانومتر، سطح ویژه ۲۰ متر مربع بر گرم و چگالی واقعی ۶/۴ گرم بر سانتیمتر مکعب است. مشخصات شیمیایی نانو مواد در جدول ۲ آمده است [۱۵].

جدول ۲ مشخصات شیمیایی نانو مواد

نوع نانو	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 خود تراکم

در این مطالعه، طرح مخلوط بتن های خود تراکم به گونه ای اتخاذ شده است که کارایی مناسب توصیه شده EFNARC [۱۴] را دارد. 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 مخلوط ها در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳ طرح مخلوط ها

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

## ۲-۳- آزمایش های انجام شده

آزمایش جریان اسلامپ، T<sub>50</sub>، آزمایش قیف V و آزمایش جعبه L برای ارزیابی خواص بتن خود تراکم تازه انجام شد. برای ارزیابی خواص بتن خودتراکم سخت شده از آزمایش های مقاومت فشاری و UPV استفاده شد. قابل ذکر است که تمامی آزمایش ها در آزمایشگاه بتن دانشکده مهندسی عمران دانشگاه گیلان انجام شده است.

## ۲-۳-۱- آماده سازی نمونه ها

برای ارزیابی توانایی جریان و چسبندگی بتن خود تراکم از آزمایش جریان اسلامپ و T<sub>50</sub> استفاده شد. همچنین برای تعیین توانایی پرکنندگی و جریان و توانایی عبور از آزمایش قیف V و جعبه L شکل دارای ۳ میله گرد استفاده شد. پس از انجام آزمایش های بتن خودتراکم تازه و اطمینان از مناسب بودن آن مطابق استاندارد BS EN 12390-2:2009 [۱۶] بتن

خودتراکم درون قالب های مکعبی با ضلع ۱۰۰ میلیمتر ریخته شد و با یک پارچه مرطوب و یک ورقه پلاستیکی پوشانده شد و در یک محل خشک با دمای ۲۵ درجه سانتیگراد نگهداری شد. نمونه ها پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج و تا زمان آزمایش در مخزن آبی با دمای ۲۰ درجه سانتی گراد نگهداری شدند. برای حالت خشک نیز نمونه ها تا زمان آزمایش در محیط خشک آزمایشگاه با دمای ۲۵ درجه سانتی گراد نگهداری شدند. نمونه ها در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز آزمایش شدند و میانگین نتایج ۳ نمونه به عنوان نتیجه نهایی در تحلیل ها استفاده شد.

### ۲-۳-۲- آزمایش سرعت امواج فراصوتی و مقاومت فشاری

مطابق استاندارد ASTM C597-16 [۱۷] آزمایش UPV، به وسیله دستگاه پاندیت (pundit) با دقت ۰/۱ میکروتانیه و فرکانس انتقال ۵۴ کیلو هرتز به روش انتقال مستقیم بر روی نمونه ها انجام شد. قبل از آزمایش سطح نمونه ها صاف و هموار شد و از گریس برای ارتباط بین مبدل ها و سطح نمونه استفاده شد. با اندازه گیری زمان انتقال موج و استفاده از رابطه ۱، UPV محاسبه شد.

$$V=L/T \quad (1)$$

در این رابطه (T) زمان انتقال موج، (L) بعد نمونه و (V) سرعت امواج فراصوتی است. پس از انجام آزمایش امواج فراصوتی، طبق استاندارد BS EN 12390-3:2009 [۱۸] آزمایش مقاومت فشاری با سرعت بارگذاری ۰/۴ مگاپاسکال بر ثانیه نیز بر روی همین نمونه ها به وسیله ی دستگاه جک هیدرولیکی انجام شد.

### ۳- نتایج آزمایش ها و تحلیل آن ها

#### ۳-۱- نتایج آزمایش های بتن خودتراکم تازه

نتایج آزمایش های بتن خودتراکم تازه و رده آن ها طبق حدود مجاز در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴ نتایج آزمایش های بتن خودتراکم تازه

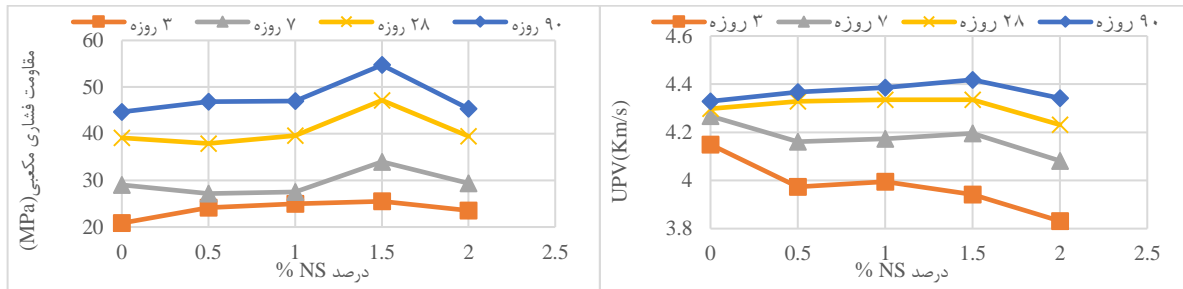
شماره مخلوط	نوع مخلوط	درصد نانو مواد %	Slump Flow(mm)	T500 (s)	V Funnel (s)	L box
۱	Control	۰	۸۴۰	۲/۰۳	۹/۱۱	۰/۹۸
۲	NS	۰/۵	۸۲۵	۲/۱۲	۹/۴۶	۰/۹۵
۳		۱	۸۲۰	۲/۳۶	۱۰/۲۱	۰/۹۱
۴		۱/۵	۸۱۵	۳/۰۹	۱۰/۸۱	۰/۸۶
۵		۲	۸۰۵	۳/۱۶	۱۱/۳۴	۰/۸۳
۶	NC	۰/۲۵	۸۳۲/۵	۲/۲۵	۹/۳۱	۰/۹۶
۷		۰/۵	۸۲۳	۲/۴۲	۹/۹۲	۰/۹۳
۸		۰/۷۵	۸۲۱/۵	۳/۱	۱۰/۲۲	۰/۹۰
۹		۱/۵	۷۹۵/۵	۳/۴۳	۱۱/۴۶	۰/۸۴
۱۰	NA	۰/۲۵	۸۲۱/۵	۳/۰۷	۹/۵۱	۰/۹۲
۱۱		۰/۵	۸۰۷/۵	۳/۲۴	۱۰/۲۱	۰/۸۷
۱۲		۰/۷۵	۷۸۸	۳/۳۲	۱۰/۹۸	۰/۸۵
۱۳		۱/۵	۷۶۲/۵	۳/۹۷	۱۱/۹۲	۰/۸۱
حدود EFNARC			۷۶۰ - ۸۵۰ mm (SF3)	(VS2/VF2) > 2 s	(VF2) ۹ - ۲۵ s	(PA2) ≥ ۰/۸۰

مطابق EFNARC [۱۴] رده SF3 برای بتن ریزی های قائم مانند ستون های لاغر و سازه های دارای اشکال پیچیده و پر کردن قالب هایی که تراکم میلگرد بالایی دارند، مناسب می باشد و در پایان، سطح بهتری را نسبت به رده های دیگر به وجود می آورد. در رده (VS2/VF2) مقاومت در برابر جدا شدگی بهبود می یابد و برای محدود کردن فشار قالب مفید است. رده PA2 نیز برای سازه های مهندسی مناسب است. نتایج نشان می دهند که با افزودن مواد نانو کارایی بتن خود تراکم کاهش

یافت. با این حال تمام محدودیت های توصیه شده توسط EFNARC [۱۴] برای بتن خود تراکم در تمام طرح های اختلاط رعایت شده است.

### ۳-۲- ارزیابی مقاومت فشاری و سرعت امواج فراصوتی

نتایج آزمایش مقاومت فشاری ( $f^c$ ) و UPV در حالت نگهداری خشک (dry) و مرطوب (wet) در جدول ۵ نشان داده شده است. همچنین به عنوان نمونه تغییرات آن ها برای نمونه های حاوی NS در شرایط مرطوب در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ تغییرات مقاومت فشاری و UPV برای نانو سیلیس در شرایط مرطوب

### جدول ۵ نتایج آزمایش مقاومت فشاری و UPV در حالت نگهداری خشک و مرطوب

نوع نانو	نگهداری خشک $f^c$ (Mpa)				نگهداری خشک UPV(Km/s)				نگهداری مرطوب $f^c$ (Mpa)				نگهداری مرطوب UPV(Km/s)				
	درصد نانو	روزه ۳	روزه ۷	روزه ۲۸	روزه ۹۰	روزه ۳	روزه ۷	روزه ۲۸	روزه ۹۰	روزه ۳	روزه ۷	روزه ۲۸	روزه ۹۰	روزه ۳	روزه ۷	روزه ۲۸	روزه ۹۰
NS	۰	۲۳/۸	۲۹	۳۸/۵۸	۴۱/۵۱	۳/۹۸	۴/۰۳	۴/۱	۴/۱۲	۲۰/۸	۲۹	۳۹/۰۹	۴۴/۶۸	۴/۱۵	۴/۲۷	۴/۳	۴/۳۳
	۰/۵	۲۴/۵	۲۸/۵۱	۴۰/۶۸	۴۸/۸۴	۳/۷۶	۳/۸۷	۴/۱	۴/۱۴	۲۴/۲	۲۷/۱۷	۳۷/۹	۴۶/۸۴	۳/۹۷	۴/۱۶	۴/۳۳	۴/۳۷
	۱	۲۴/۸	۳۰/۵۹	۴۳/۳۴	۴۹/۳۴	۳/۸۴	۳/۹۲	۴/۱۱	۴/۱۵	۲۵	۲۷/۵۱	۳۹/۶	۴۷/۰۱	۳/۹۹	۴/۱۷	۴/۳۴	۴/۳۹
	۱/۵	۲۶/۵	۳۲/۲۹	۴۶/۰۱	۵۲/۳۵	۳/۸۷	۳/۹۵	۴/۱۹	۴/۲۶	۲۵/۵	۳۳/۹۹	۴۷/۱۸	۵۴/۷۳	۳/۹۴	۴/۲	۴/۳۴	۴/۴۲
	۲	۲۳/۵	۳۱/۱	۴۱/۵۱	۴۵	۳/۶۹	۳/۸۸	۴/۰۵	۴/۲۳	۲۳/۵	۲۹/۳۴	۳۹/۴۳	۴۵/۳۴	۳/۸۴	۴/۰۸	۴/۲۳	۴/۳۴
NA	۰	۲۳/۸	۲۹	۳۸/۵۸	۴۱/۵۱	۳/۹۸	۴/۰۳	۴/۱	۴/۱۲	۲۰/۸	۲۹/۰۱	۳۹/۰۹	۴۴/۶۸	۴/۱۵	۴/۲۷	۴/۳	۴/۳۳
	۰/۲۵	۲۷/۸	۳۵/۵۲	۴۵/۵۱	۴۹/۱۸	۳/۸۳	۴/۰۳	۴/۱۵	۴/۳۲	۲۶/۸	۳۲/۴۶	۴۱/۶۸	۵۲/۰۱	۳/۹۶	۴/۱۷	۴/۳۱	۴/۳۵
	۰/۵	۲۷/۵	۳۳/۱۴	۴۲/۸۴	۴۳/۱۸	۳/۸۱	۳/۹۹	۴/۰۲	۴/۰۸	۲۶/۲	۳۱/۱	۴۱/۳۴	۴۵/۸۴	۳/۹	۴/۰۹	۴/۱۸	۴/۳۲
	۰/۷۵	۲۴/۵	۳۲/۶۳	۴۰/۶۸	۴۲/۱۸	۳/۷۴	۳/۹۸	۴/۰۱	۴/۰۳	۲۴/۲	۲۶/۸۴	۳۸/۹۲	۴۱/۰۱	۳/۸۶	۳/۹۶	۴/۱۷	۴/۳
	۱/۵	۲۴/۳	۲۶/۳۴	۳۹/۹۴	۴۰/۶۸	۳/۶۷	۳/۸۴	۳/۹۸	۴	۲۲	۲۶/۰۱	۳۹/۲۶	۴۰/۶۸	۳/۷۹	۳/۹۵	۴/۱۸	۴/۲۱
NC	۰	۲۳/۸	۲۹	۳۸/۵۸	۴۱/۵۱	۳/۹۸	۴/۰۳	۴/۱	۴/۱۲	۲۰/۸	۲۹	۳۹/۰۹	۴۴/۶۸	۴/۱۵	۴/۲۷	۴/۳	۴/۳۳
	۰/۲۵	۲۳/۷	۳۱/۱	۴۰/۱۸	۴۶/۵۱	۳/۸	۴/۰۲	۴/۱	۴/۳	۲۵/۷	۳۲/۱۲	۴۲/۱۸	۴۸/۶۸	۴/۰۱	۴/۰۹	۴/۳۳	۴/۴۴
	۰/۵	۲۱	۲۷/۵۱	۳۹/۶	۴۵/۳۴	۳/۵۸	۳/۸۳	۳/۹۸	۴/۰۵	۲۰/۲	۳۰/۵۹	۳۷/۹	۴۱/۰۱	۳/۷۵	۳/۹۸	۴/۲۱	۴/۲۶
	۰/۷۵	۲۰/۳	۲۶/۵۱	۳۹/۰۹	۴۰/۲۸	۳/۵۴	۳/۶۹	۳/۹۶	۳/۹۹	۱۹/۸	۲۸/۵۱	۳۶/۰۳	۴۰/۶۲	۳/۷۴	۳/۹۷	۴/۰۹	۴/۲۳
	۱/۵	۱۸/۵	۲۴/۵۱	۳۴/۶۷	۳۷/۹	۳/۴۸	۳/۶۲	۳/۸۸	۳/۹	۱۷	۲۵/۶۷	۳۳/۸۲	۳۸/۵۸	۳/۶۶	۳/۹۳	۴/۰۹	۴/۱

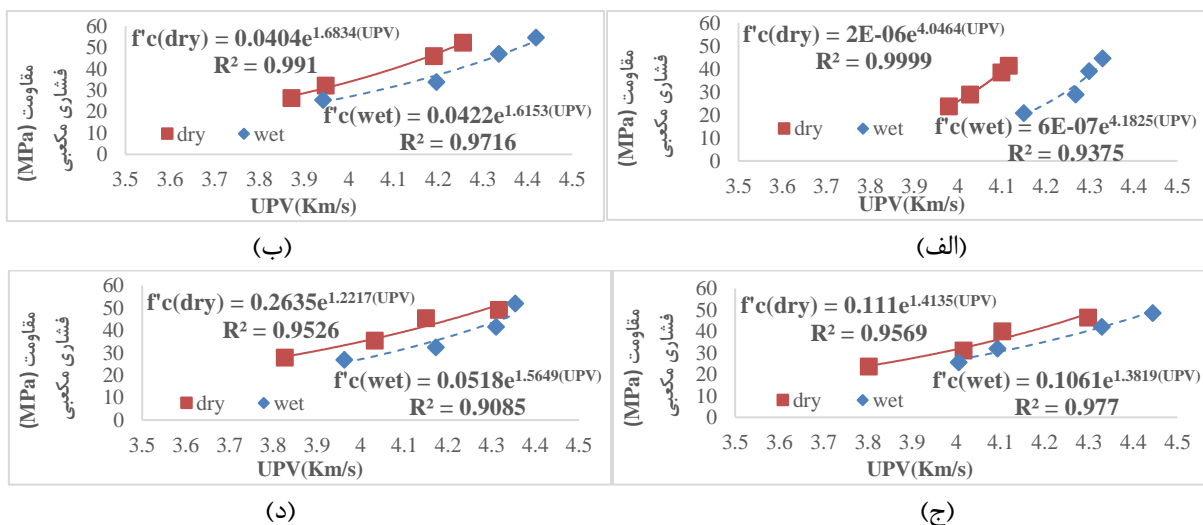
مقدار بهینه NS، NA و NC برای بتن خود تراکم سخت شده به ترتیب ۱/۵، ۰/۲۵ و ۰/۲۵ درصد وزن سیمان است. مقاومت فشاری ۹۰ روزه نمونه ها حاوی این مقادیر NS، NA و NC در نگهداری خشک به ترتیب ۲۶، ۱۸ و ۱۲ درصد و در نگهداری مرطوب ۲۲، ۱۶ و ۹ درصد نسبت به نمونه های شاهد افزایش یافت. از این پس مقادیر بهینه نانو مواد نام برده شده در این مطالعه مد نظر می باشد. از دلایل این بهبود مقاومت می توان گفت که ذرات نانو به علت فعالیت بالایشان باعث تسریع هیدراتاسیون سیمان و مانع از رشد کریستال های هیدرواکسید کلسیم در میان تولیدات هیدراتاسیون می شوند و همچنین حفرات سیمانی را پر می کنند و موجب افزایش مقاومت و بهبود خواص فیزیکی، مکانیکی و دوام بتن می شوند [۱۹-۲۲].

در جدول ۶، درصد اختلاف UPV نمونه های حاوی نانو مواد مذکور نسبت به نمونه شاهد در سنین مختلف آمده است.

جدول ۶ مقدار اختلاف UPV نمونه های حاوی نانو مواد نسبت به نمونه شاهد (درصد)

سن (روز)	عمل آوری خشک			عمل آوری 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 ۶، UPV در سنین اولیه کمتر از نمونه های شاهد است. علت این پدیده ممکن است این باشد که نانو ذرات با داشتن مساحت سطح بالا توانایی جذب بیشتر ملکول های آب را در اطراف خود دارد و باعث ایجاد تخلخل های بسیار ریز می شود که تأثیر چندانی بر مقاومت ندارند اما باعث کاهش UPV می شوند. با افزایش سن و پیشرفت واکنش هیراتاسیون این تخلخل ها از فرآورده های هیدراتاسیون پر شده و UPV افزایش می یابد. این پدیده در مطالعات گذشته برای بتن های حاوی دوده سیلیس نیز مشاهده شد. دمیربوگا [۱۰] دریافت که استفاده از مقادیر بالای خاکستر بادی به جای سیمان در کوتاه مدت موجب کاهش شدید مقاومت بتن و UPV می شود که این افت با گذشت زمان در بازه زمانی ۱۲۰ روز که نهایت زمان آزمایش نمونه هایش 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. با افزایش درصد نانو مواد بیشتر از مقدار بهینه، مقاومت فشاری و UPV کاهش می یابد. این اتفاق ممکن است به این دلیل باشد که افزایش میزان پودر نانو از حد بهینه آن باعث می شود که ذرات نانو به خوبی و یکنواخت پخش نشوند. جمع شدن نانو ذرات باعث ایجاد یک ناحیه ضعف به شکل حفره می شود [۲۳] و به تبع آن میکرو ساختار هیدرات سیمان نمی تواند شکل بگیرد که در نتیجه باعث کاهش مقاومت فشاری می شود. به نظر می رسد که این پدیده تأثیر چشمگیری بر کاهش UPV دارد که نشان دهنده تأثیر زیاد نانو مواد در UPV است. نمودار مقاومت فشاری نسبت به UPV برای نمونه های شاهد و حاوی درصد های بهینه نانو مواد با رابطه نمایی با دقت بسیار خوبی تخمین زده شد و در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲ رابطه مقاومت فشاری و UPV برای نمونه های 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.



UPV در شرایط مرطوب نسبت به خشک در تمام سنین به طور متوسط برای نمونه های شاهد، حاوی NS، NA و NC به ترتیب ۵، ۳/۸، ۳ و ۴ درصد بیشتر است. علت این امر وجود آب در تخلخل های بتن است که باعث می شود امواج فراصوتی سریع تر انتقال یابند [۲۴]. با توجه به این مقادیر و شکل ۳ اختلاف UPV و نمودارهای دو شرایط نگهداری برای نمونه های حاوی نانو مواد کمتر از نمونه های شاهد است. علت این پدیده ممکن است این باشد که پودر های نانو به دلیل نرمی بسیار بالا، ملکول های آب بیشتری را اطراف خود جذب می کنند. در شرایط نگهداری خشک از این ذخیره آب برای انجام واکنش های شیمیایی و هیدراتاسیون استفاده می شود و تا حدودی کاستی های شرایط نگهداری خشک جبران می شود و در نتیجه اختلاف آن ها به حداقل می رسد. همچنین وجود نانو مواد در نمونه ها تخلخل را کاهش میدهد و به تبع آن در شرایط مرطوب آب کمتری نسبت به نمونه های شاهد در منافذ وجود دارد، از این رو در مقایسه با نمونه های شاهد، UPV نسبت به حالت خشک آن کمتر افزایش می یابد.

با مقایسه ی نمودار شکل ۳ بتن های خودتراکم حاوی نانو مواد نسبت به بتن خودتراکم شاهد می بینیم که دامنه مقاومت فشاری و UPV افزایش یافته است و شیب این نمودار کاهش یافته است. یعنی تغییرات مقاومت نمونه های حاوی نانو مواد حساسیت کمتری نسبت به تغییرات UPV آن ها دارد.

قابل ذکر است که تفاوت در ساخت نمونه ها، اختلاف در ساختار بتن خود تراکم و عیار سیمان و مواد پر کننده و ممکن است استفاده از نانو ذرات با مشخصه های متفاوت، علت اختلاف در مقاومت ها و درصد بهینه ذرات نانو در این پژوهش و مطالعات مشابه دیگر باشد. بنابراین برای سایر بتن ها نتایج ممکن است متفاوت باشد.

#### ۴- نتایج

در این مطالعه برای ارزیابی مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی نانو مواد از روش امواج فراصوتی استفاده شد. بتن های 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 آزمایش های امواج فراصوتی و مقاومت فشاری قرار گرفتند و تأثیر عواملی چون نوع و مقدار نانو مواد، شرایط عمل آوری مرطوب و خشک بر سرعت امواج فراصوتی بررسی شد. برای ارزیابی خواص بتن خودتراکم تازه نیز آزمایش های جریان اسلامپ، T50، کیف V، جعبه L انجام شد. بر اساس بررسی اطلاعات حاصل از این آزمایش ها می توان نتیجه گرفت که:

۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری نشان می دهد 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 نمونه های 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. بتن خودتراکم حاوی ۱/۵ درصد NS عمل آوری شده در شرایط مرطوب با مقاومت فشاری ۵۴/۷۳ مگاپاسکال بیشترین مقاومت فشاری را بین سایر بتن های خودتراکم دارد.

۲- نتایج آزمایش امواج فراصوتی نشان می دهد که UPV ۹۰ روزه نمونه های حاوی مقادیر بهینه NS، NA و NC در عمل آوری خشک به ترتیب ۳، ۴ و ۴ درصد و در عمل آوری مرطوب ۲، ۰/۵ و ۲ درصد نسبت به نمونه های شاهد افزایش یافت. همچنین UPV در نمونه های حاوی درصد بهینه در سنین اول، کمتر و در سنین بالاتر بیشتر از نمونه شاهد است.

۳- با افزایش درصد نانو مواد بیشتر از مقدار بهینه بتن سخت شده، مقاومت فشاری و UPV کاهش می یابد، به طوری که نمونه های حاوی درصد های بالا تر NA و NC در برخی سنین مقاومت فشاری و UPV کمتری نسبت به نمونه شاهد دارند.

۴- با توجه به رابطه مقاومت فشاری و UPV، مشاهده گردید که تغییرات مقاومت بتن های خودتراکم حاوی نانو مواد حساسیت کمتری نسبت به UPV دارد. همچنین UPV در عمل آوری مرطوب نسبت به خشک در تمام سنین به طور متوسط برای نمونه های شاهد، حاوی NS، NA و NC به ترتیب ۵، ۳/۸، ۳ و ۴ درصد بیشتر است، اما اختلاف UPV و نمودارهای دو شرایط عمل آوری برای نمونه های حاوی نانو مواد، کمتر از نمونه شاهد است.

۵- بر اساس آزمایش های بتن خودتراکم تازه مشاهده شد که با افزایش مقدار نانو مواد کارایی بتن خودتراکم تازه کم می شود.

## ۵- مراجع

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Nazari, A., Rafieipour, 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.
- [8] Nazari, A., Riahi, S. (2011). "Effects of CuO nanoparticles on compressive strength of selfcompacting concrete". Indian Acad. Sci. 36, pp 371–391.
- [9] Bungey, J. H., Grantham, M. G., Millard, S. (2006). "Testing of concrete in structures". Crc Press.
- [10] Demirboğa, R., Türkmen, İ., Karakoc, M. B. (2004). "Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixtured concrete". Cement and Concrete Research, 34(12), pp 2329-2336.
- [11] 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.
- [12] Barluenga, G., Palomar, I., Puentes, J. (2015). "Hardened properties and microstructure of SCC with mineral additions". Construction and Building Materials 94, pp 728–736.
- [13] American Society for Testing Material, ASTM C33/C33M–16. (2016). "Standard Specification for Concrete Aggregates", West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- [14] EFNARC. (2005). The European Specification and guidelines for self-compacting concrete, May.
- [15] US Research Nanomaterials, Inc. 3302 Twig Leaf Lane, Houston, TX77084, USA, [www.us-nano.com](http://www.us-nano.com).
- [16] British Standards Institution, BS EN 12390-2. (2009). Testing hardened concrete. Making and curing specimens for strength tests.
- [17] American Society for Testing Material, ASTM C597–16. (2016). "Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete". West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- [18] British Standards Institution, BS EN 12390-3. (2009). Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens.
- [19] 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.
- [20] Du, H., Du, S., Liu, X. (2014). "Durability performances of concrete with nano-silica", Constr. Build. Mater. 73, pp 705–712.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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):435–8.
- [24] 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, Vo1. 1(2), pp 87-95.