

بررسی مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی بتن های خود تراکم حاوی نانو مواد

رحمت مدن دوست^۱، صابر دیلمی^۲

۱- دانشیار گروه عمران دانشکده فنی دانشگاه گیلان، ایران

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

Rmadandoust@yahoo.com, saber.deilamie@gmail.com

چکیده

در این مطالعه رابطه مقاومت فشاری (f^c) و مدول الاستیسیته استاتیکی (Ee) و رابطه مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی (Ed) بتن های خودتراکم حاوی نانو اکسید های سیلیس (NS)، آلومینیوم (NA) و مس (NC) بررسی شد. برای این منظور نمونه های استاندارد حاوی NS، NA و NC به ترتیب با مقادیر ۱/۵، ۰/۲۵ و ۰/۲۵ درصد نسبت به وزن سیمان، در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز آزمایش شدند. افزودن نانو مواد باعث بهبود مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته شد. روابط جدید بین مقاومت فشاری و Ee و همچنین روابطی خطی میان Ee و Ed برای این نوع بتن های خود تراکم تعریف شد و مشاهده شد که مقدار و نوع نانو مواد بر این روابط اثر گذار است.

مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته استاتیکی، مدول الاستیسیته دینامیکی، نانو مواد، بتن خود تراکم

E

۱. مقدمه

امروزه بتن خودتراکم به طور گسترده ای توسعه یافته است و به نوعی طراحی شده است تا دارای خواص مفیدی برای بتن های سازه ای باشد. در این نوع بتن 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 [۱-۴]. ساخت و ساز سازه های بتنی به طور گسترده به خواص مکانیکی بتن به خصوص مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بستگی دارد. به عنوان مثال مناسب ترین زمان برای جدا کردن قالب ها از بتن و اعمال تنش اولیه به اعضای بتنی توسط این دو خواص تعیین می شود. قبل از این که بتن به خواص مکانیکی مناسب برسد، هر گونه عملیات غیر مناسب ممکن است باعث ایجاد تغییر شکل های زیاد، تخریب بتن یا فروپاشی سازه شود. از این نظر دانستن مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته در سنین اولیه برای تضمین عملکرد سازه در طول زمان ضروری است.

در بتن مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته در سنین اولیه به سرعت افزایش می یابد [۵-۷]. آیین نامه های طراحی مدول الاستیسیته را بر اساس مقاومت فشاری ۲۸ روزه تخمین می زنند [۸-۱۰]. این روابط پیشنهادی ممکن است برای سنین اولیه بتن و بتن های خود تراکم به خصوص حاوی نانو مواد مناسب نباشند.

فاکتور های موثر بسیاری بر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته وجود دارد. استوک و همکاران [۱۱] اعلام کرده اند که مدول الاستیسیته با مقدار حجم سنگدانه متناسب است. رانچرو [۱۲] دریافت که مقدار حجم سنگدانه، نوع سنگدانه و نسبت آب به سیمان مهمترین فاکتور های تاثیر گذار هستند. جانسون و باوا [۱۳] دریافتند که مدول الاستیسیته با افزایش مقدار حجم سنگدانه افزایش و با افزایش نسبت آب به سیمان کاهش می یابد. یلدریم و سنگول [۱۴] اشاره کردند که با استفاده از سنگدانه های ریزتر مدول الاستیسیته ممکن است کمتر شود. تمام تحقیقات بالا بر بتن با سن ۲۸ روز یا بیشتر متمرکز هستند و تاثیر این فاکتور ها در کوتاه مدت بر بتن ها مشخص نیست. همچنین تاثیر نانو مواد بر خواص مکانیکی بتن های خود تراکم به نظر به طور محدود بررسی شده است.

برای طراحی یک سازه بتنی از مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته استاتیکی پیشنهاد شده آیین نامه ها استفاده می شود. اما برای اندازه گیری های میدانی کیفیت بتن از روش های معمول غیر مخرب استفاده می شود. در این بین می توان از روش هایی چون سرعت امواج فراصوتی (UPV)، انعکاس موج و روش پژواک ضربه نام برد [۱۵-۱۸] که در این مطالعه روش سرعت امواج فراصوتی مورد توجه است. این روش ها دینامیکی هستند و مدول الاستیسیته دینامیکی بتن را اندازه میگیرند. بنابراین به یک رابطه مناسب بین مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی نیاز است تا ارتباط بین طراحی سازه و اندازه گیری های میدانی مشخص شود. البته محققان زیادی روابطی میان مدول استاتیکی و دینامیکی ارائه نمودند [۱۲ و ۱۹-۲۱] اما در این زمینه برای بتن های خود تراکم حاوی نانو مواد مطالعات محدود است.

برای این منظور مقاومت فشاری و مدول استاتیکی و دینامیکی نمونه های استوانه ای استاندارد با قطر ۱۵۰ میلیمتر و ارتفاع ۳۰۰ میلیمتر و حاوی نانو اکسید های سیلیس، آلومینیوم و مس به ترتیب با مقادیر ۱/۵، ۰/۲۵ و ۰/۲۵ درصد نسبت به وزن سیمان، در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز آزمایش شدند. رابطه مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته استاتیکی و رابطه مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی این نوع بتن ها بررسی شد.

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. 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 ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	CaCO ₃	Cl	I.R	L.O.I
سیمان	۲۱/۸	۵/۳	۳/۳	۵۳/۲۵	۴/۵-۲/۵	۲/۰-۱/۶		۰/۰۲-۰/۰۰۵	۰/۶۰-۰/۰۷	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 [۲۲] استفاده شد. مدول نرمی ماسه ۲/۷ است که طبق حدود استاندارد ASTM C33/C33M [۲۲] (۳/۱ - ۲/۲)، مناسب می باشد. حداکثر اندازه سنگدانه طبق EFNARC [۲۳] 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 ۲۸۰ Civil Flow 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 [۲۴] 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.

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 ₂ O ₃ (ppm)			≤۲			≤۸۰				≤۲۵		≤۳	≤۴	≤۷۰	
SiO ₂ (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 [۲۳] را دارد. NA، NS و NC به ترتیب ۱/۵، ۰/۲۵ و ۰/۲۵ درصد نسبت به وزن سیمان به صورت جایگزین بخشی از سیمان مصرفی به مخلوط افزوده شدند. طرح مخلوط، مخلوط های شاهد (control) و حاوی نانو مواد در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳ طرح مخلوط ها

شماره مخلوط	نوع مخلوط	درصد نانو مواد %	شن (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	پودر سنگ (kg/m ³)	سیمان (kg/m ³)	nano SiO ₂ (kg/m ³)	nano CuO (kg/m ³)	nano Al ₂ O ₃ (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	فوق روان کننده (kg/m ³)
۱	Control	۰	۷۵۰	۸۲۸	۲۳۰	۳۷۰/۰	۰	۰	۰	۱۴۸	۷
۲	NS	۱/۵	۷۵۰	۸۲۸	۲۳۰	۳۶۴/۴	۵/۵۵۰	۰	۰	۱۴۸	۷
۳	NC	۰/۲۵	۷۵۰	۸۲۸	۲۳۰	۳۶۹/۰	۰	۰/۹۲۵	۰	۱۴۸	۷
۴	NA	۰/۲۵	۷۵۰	۸۲۸	۲۳۰	۳۶۹/۰	۰	۰	۰/۹۲۵	۱۴۸	۷

۲.۳. آزمایش های انجام شده

آزمایش جریان اسلامپ، T₅₀، آزمایش قیف V و آزمایش جعبه L برای ارزیابی خواص بتن خود تراکم تازه انجام شد. آزمایش های مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته استاتیکی و UPV برای محاسبه Ed انجام شد. قابل ذکر است که تمامی آزمایش ها در آزمایشگاه بتن دانشکده مهندسی عمران دانشگاه گیلان انجام شده است.

۲.۳.۱. آزمایشات بتن خود تراکم تازه

برای ارزیابی توانایی جریان و چسبندگی بتن خود تراکم از آزمایش جریان اسلامپ و T₅₀ استفاده شد. همچنین برای تعیین توانایی پرکنندگی و جریان و عبور از آزمایش قیف V و جعبه L شکل دارای ۳ میله گرد استفاده شد.

۲.۳.۲. آماده سازی نمونه ها

مطابق استاندارد ASTM C192/C192M-16a [۲۵] نمونه های استوانه ای استاندارد با قطر ۱۵۰ میلیمتر و ارتفاع ۳۰۰ میلیمتر ساخته شد. نمونه ها درون قالب با یک پارچه مرطوب و یک ورقه پلاستیکی پوشانده شد و در یک محل خشک با دمای ۲۵ درجه سانتیگراد نگهداری شد و پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج و تا زمان آزمایش در مخزن آبی 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 نتایج نهایی در محاسبات استفاده شد.

۲.۳.۳. آزمایش مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری نمونه های استوانه ای

طبق استاندارد ASTM C469/c469M-14 [۲۶] نمونه های استوانه ای با سرعت ۰/۲۵ مگاپاسکال بر ثانیه تحت آزمایش مدول الاستیسیته قرار گرفتند. همچنین طبق استاندارد ASTM C39/39M-16b [۲۷] مقاومت فشاری نهایی نمونه های استوانه ای را نیز بدست آوردیم. با استفاده از رابطه ۱ مدول الاستیسیته استاتیکی نمونه ها محاسبه شد.

$$Ee = (S_2 - S_1) / (e_2 - 0.00005) \quad (1)$$

در این فرمول Ee مدول الاستیسیته استاتیکی بر حسب مگاپاسکال، S₂ تنش مربوط به ۴۰ درصد مقاومت نهایی، S₁ تنش مربوط به کرنش اولیه ۰/۰۰۰۰۵ و e₂ کرنش مربوط به تنش S₂ است.

۲.۳.۴. محاسبه مدول الاستیسیته دینامیکی

با استفاده از رابطه ۲ موجود در استاندارد ASTM C597-16 [۲۸]، UPV و چگالی اندازه گیری شده نمونه ها مدول دینامیکی محاسبه شده است.

$$V = \sqrt{\frac{Ed(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (2)$$

Ed مدول الاستیسیته دینامیکی، ρ وزن مخصوص، μ ضریب پواسون دینامیکی و V، UPV هستند. ضریب پواسون دینامیکی را 0.2 اختیار کردیم [۲۹].

از دستگاه پاندیت (pundit) با فرکانس انتقال ۵۴ کیلو هرتز و با دقت اندازه گیری 0.1 میکروثانیه، به روش انتقال مستقیم برای اندازه گیری UPV استفاده گردید. با استفاده از رابطه ۳، UPV محاسبه شد.

$$V=L/T \quad (3)$$

در این رابطه (T) زمان انتقال موج، (L) مسافت بین دو مبدل و (V) سرعت امواج فراصوتی است. میانگین نتایج سه نمونه به عنوان نتایج نهایی در محاسبات استفاده 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.

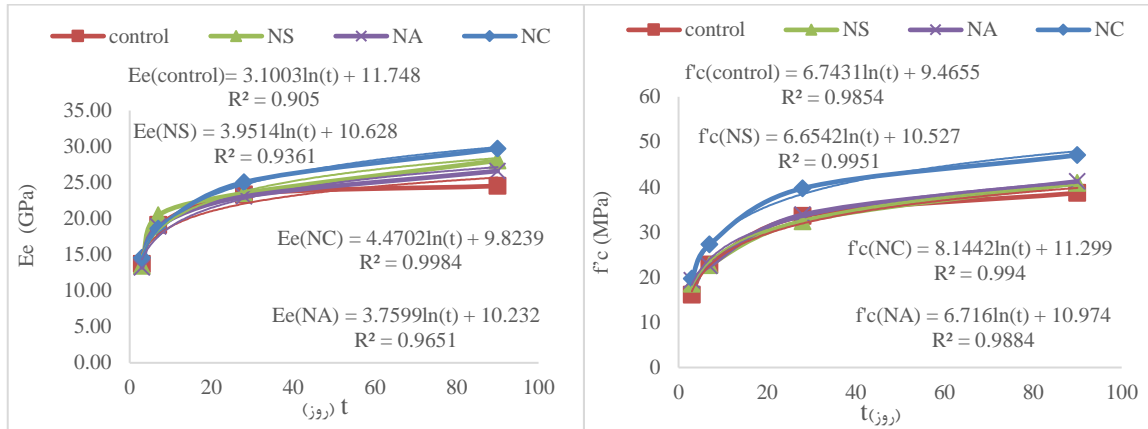
جدول ۴ نتایج آزمایش های بتن خودتراکم تازه

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	۱/۵	۸۱۵	۳/۰۹	۱۰/۸۱	۰/۸۶
۳	NC	۰/۲۵	۸۳۲/۵	۲/۲۵	۹/۳۱	۰/۹۶
۴	NA	۰/۲۵	۸۲۱/۵	۳/۰۷	۹/۵۱	۰/۹۲
حدود EFNARC			۷۶۰ - ۸۵۰ mm (SF3)	$(VS2/ VF2) > 2 s$	$(VF2) 9 - 25 s$	$(PA2) \geq 0.180$

مطابق EFNARC [۲۳] 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 می یابد. با این حال تمام محدودیت های توصیه شده توسط EFNARC [۲۳] برای بتن خود تراکم در تمام طرح های اختلاط رعایت شده است.

۳.۲. بررسی مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته استاتیکی

در سن ۳ روز مقاومت فشاری بتن های شاهد و حاوی NS، NA و NC به ترتیب ۴۸، ۵۷، ۵۷ و ۴۹ درصد و در سن ۷ روز به ترتیب ۶۸، ۶۶، ۶۹، ۶۸ و ۶۸ درصد مقاومت ۲۸ روزه خود رسیدند. مقاومت فشاری نمونه های حاوی نانو مواد در سنین بالاتر با شدت بیشتری افزایش یافت به طوری که بتن های شاهد و حاوی NS، NA و NC در سن ۹۰ روز به ترتیب ۱۵، ۲۶، ۲۱ و ۱۸ درصد نسبت به مقاومت ۲۸ روزه افزایش مقاومت دارند. همچنین در سن ۳ روز Ee بتن شاهد و حاوی NS، NA و NC به ترتیب ۵۹، ۵۷، ۵۷ و ۵۸ درصد و در سن ۷ روز به ترتیب ۸۲، ۸۷، ۸۲ و ۷۴ درصد مدول ۲۸ روزه خود رسیدند. مشاهده می شود که در سنین اولیه تا ۳ روز روند افزایش مدول استاتیکی سریع تر از مقاومت فشاری است. یانگ ژو و همکارانش [۳۰] و همچنین ریچارد [۳۱] نیز به همین نتیجه رسیدند. Ee نمونه های حاوی نانو مواد در سنین بالاتر با شدت بیشتری افزایش یافتند به طوری که Ee بتن های شاهد و حاوی NS، NA و NC در سن ۹۰ روز به ترتیب ۵، ۱۹، ۱۵ و ۱۸ درصد نسبت به مدول ۲۸ روزه افزایش یافتند. رابطه های Ee و مقاومت فشاری نمونه ها نسبت به سن (t) را می توان با فرمول لگاریتمی تخمین زد که در شکل های ۱ و ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲ رابطه E_e نمونه‌ها نسبت به سن

شکل ۱ رابطه f_c نمونه‌ها نسبت به سن

با توجه به تغییرات E_e به طور کلی می‌توان مشاهده کرد که در کوتاه مدت (۳ تا ۷ روز) E_e با شدت زیاد و در سنین بالاتر با شدت کمتری افزایش می‌یابد. اما شدت افزایش E_e برای بتن‌های خود تراکم حاوی نانو مواد بیشتر از بتن خود تراکم شاهد است. به طوری که در سن ۹۰ روز E_e نمونه‌های حاوی NS، NA و NC به ترتیب ۱۴، ۸ و ۲۱ درصد نسبت به بتن خود تراکم شاهد افزایش داشته‌اند.

تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که مقاومت فشاری بتن در سنین اولیه به مقاومت خمیر سیمان، اندازه ی ترک‌ها و مشخصات ناحیه انتقال بستگی دارد. همچنین مدول الاستیسیته بتن تحت تاثیر مقدار و مشخصات سنگدانه‌های آن است [۳۲]. از این رو استفاده از یک منحنی و رابطه برای توجیه ارتباط مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن‌های مختلف مناسب نمی‌باشد و نتایج واقعی بدست نمی‌آید. فاکتورهای تأثیر گذاری مانند اصطکاک حجم سنگدانه‌ها، حداکثر اندازه سنگدانه که تأثیر مستقیم بر ناحیه انتقال دارد، نسبت آب به سیمان، سن هیدراتاسیون، همچنین با توجه به این مطالعه، نوع و مقدار نانو مواد استفاده شده نیز باید مدنظر قرار گیرند. نتایج E_e نسبت به f_c نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد و روابط آیین نامه‌های ACI 318-14 (۴)، ACI 363-10 (۵) و CSA A23.3-14 (۶) در جدول ۵ نشان داده شده است.

$$E_e = 4700\sqrt{f_c} \quad (۴)$$

$$E_e = 3300\sqrt{f_c} + 6900 \quad (۵)$$

$$E_e = 4500\sqrt{f_c} \quad (۶)$$

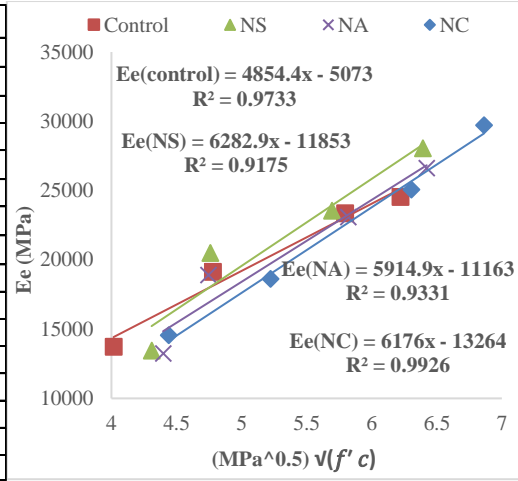
رابطه E_e نسبت به $\sqrt{f_c}$ در سنین مختلف را می‌توان با رابطه خطی مانند رابطه ۷ با دقت خوبی تخمین زد که در شکل ۳ نشان داده شده است.

$$E_e = ax - b \quad (۷)$$

در این رابطه x ، $\sqrt{f_c}$ است. a و b نیز ضرایب ثابت هستند.

جدول ۵ نتایج مدول الاستیسیته استاتیکی و مقاومت فشاری

نوع بتن	Age(day)	f'c(MPa)	E (GPa)	ACI 318(GPa)	ACI 363(GPa)	CSA A23.3(GPa)
Control	۳	۱۶/۱۳	۱۳/۷۲	۱۸/۸۸	۲۰/۱۵	۱۸/۰۷
	۷	۲۲/۸۳	۱۹/۱۱	۲۲/۴۶	۲۲/۶۷	۲۱/۵
	۲۸	۳۳/۵۷	۲۳/۳۵	۲۷/۲۳	۲۶/۰۲	۲۶/۰۷
	۹۰	۳۸/۶۸	۲۴/۵۳	۲۹/۲۳	۲۷/۴۲	۲۷/۹۹
NS	۳	۱۸/۵۶	۱۳/۴۴	۲۰/۲۵	۲۱/۱۲	۱۹/۳۹
	۷	۲۲/۶۴	۲۰/۴۸	۲۲/۳۶	۲۲/۶	۲۱/۴۱
	۲۸	۳۲/۴۱	۲۳/۵۳	۲۶/۷۶	۲۵/۶۹	۲۵/۶۲
	۹۰	۴۰/۸۷	۲۸/۰۵	۳۰/۰۵	۲۸	۲۸/۷۷
NA	۳	۱۹/۳۳	۱۳/۲۴	۲۰/۶۷	۲۱/۴۱	۱۹/۷۹
	۷	۲۲/۵۱	۱۸/۹	۲۲/۳	۲۲/۵۶	۲۱/۳۵
	۲۸	۳۳/۸۶	۲۳/۰۷	۲۷/۳۵	۲۶/۱	۲۶/۱۸
	۹۰	۴۱/۲۵	۲۶/۶۱	۳۰/۱۹	۲۸/۰۹	۲۸/۹
NC	۳	۱۹/۷۲	۱۴/۵۵	۲۰/۸۷	۲۱/۵۵	۱۹/۹۸
	۷	۲۷/۲۶	۱۸/۶۱	۲۴/۵۴	۲۴/۱۳	۲۳/۵
	۲۸	۳۹/۷۲	۲۵/۰۵	۲۹/۶۲	۲۷/۷	۲۸/۳۶
	۹۰	۴۷/۰۷	۲۹/۷	۳۲/۲۵	۲۹/۵۴	۳۰/۸۷



شکل ۳ رابطه Ee نسبت به $\sqrt{f'c}$

مقاومت فشاری نمونه های استوانه ای استاندارد حاوی NS، NA و NC در سن ۹۰ روز به ترتیب ۵، ۶ و ۲۱ درصد نسبت به بتن خود تراکم شاهد افزایش داشته اند. نتایج آزمایشگاهی Ee برای نمونه های شاهد و حاوی نانو مواد کمتر از نتایج Ee محاسبه شده است. در سنین اولیه نتایج محاسبه شده از رابطه ۶ و در سن ۹۰ روز نتایج محاسبه شده از رابطه ۵ نسبت به سایر روابط کمترین اختلاف را با نتایج Ee آزمایشگاهی دارند. به طوری که نتایج محاسبه شده از رابطه ۵ نسبت به نتایج آزمایشگاهی، برای نمونه های شاهد و حاوی NS، NA و NC در سن ۹۰ روز به ترتیب ۱۱، ۰، ۵، ۰ درصد اختلاف دارند. با توجه به ضرایب ثابت رابطه Ee نسبت به $\sqrt{f'c}$ ، برای نمونه های حاوی مواد نانو بیشتر از نمونه شاهد است. با مقایسه ضریب a در نمونه های حاوی نانو مواد می توان بیان کرد که کاهش ضریب a ممکن است با کاهش مقدار و نوع نانو ذرات رابطه مستقیم داشته باشد زیرا مشاهده می شود که این ضریب با کاهش مقدار نانو مواد از ۱/۵ درصد برای NS به ۰/۲۵ درصد برای NC و NA به ترتیب از ۶۲۸۲/۹ به ۶۱۷۶ و ۵۹۱۴/۹ کاهش می یابد. ضریب b هم ممکن است علاوه بر سایر فاکتورهای تأثیرگذار و متوسط اندازه ذرات، تحت تأثیر جنس، مساحت سطح و مقدار نانو مواد به کار رفته در بتن خودتراکم باشد.

۳.۳ بررسی مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی

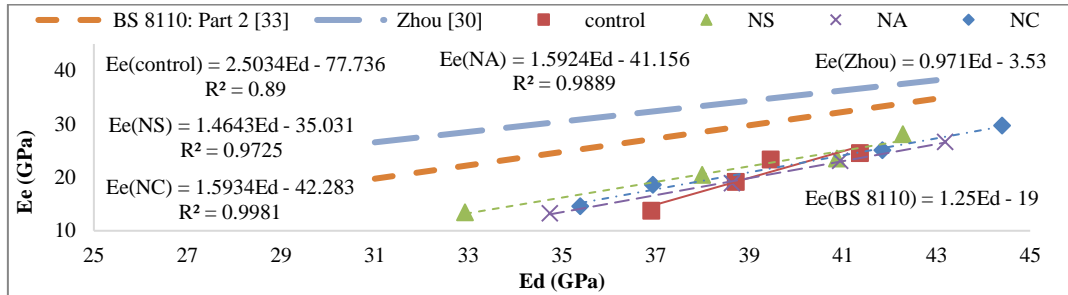
در جدول ۶، Ee و Ed نمونه های مذکور نشان داده شده است. تغییرات Ee نسبت به Ed را می توان با رابطه خطی مانند رابطه ۸ با دقت بسیار بالا تخمین زد که این نمودار و روابط در شکل ۴ نشان داده شده اند.

$$E_e = cE_d - d \quad (۸)$$

در این رابطه c و d ضرایب ثابت هستند.

جدول ۶ نتایج Ed و Ee

سن	Ed (GPa)				Ee (GPa)			
	control	NS	NA	NC	control	NS	NA	NC
۳	۳۶/۹۱	۳۲/۹۳	۳۴/۷۴	۳۵/۳۹	۱۳/۷۲	۱۳/۴۴	۱۳/۲۴	۱۴/۵۵
۷	۳۸/۷۱	۳۸	۳۸/۶۳	۳۷	۱۹/۱۱	۲۰/۴۸	۱۸/۹	۱۸/۶۱
۲۸	۳۹/۴۶	۴۰/۸۷	۴۰/۹۴	۴۱/۸۵	۲۳/۳۵	۲۳/۵۳	۲۳/۰۷	۲۵/۰۵
۹۰	۴۱/۳۷	۴۲/۲۸	۴۳/۱۹	۴۴/۴	۲۴/۵۳	۲۸/۰۵	۲۶/۶۱	۲۹/۷



شکل ۴ رابطه Ee نسبت به Ed

با دقت در نمودار شکل ۴ مشاهده می شود که همواره Ed از Ee بیشتر است و می توان دریافت که افزودن مواد نانو به بتن خود تراکم باعث افزایش دامنه Ed و Ee شده است و همچنین شیب این نمودار برای بتن های خودتراکم حاوی مواد نانو نسبت به بتن خودتراکم شاهد کاهش یافته است. مشاهده می شود که با افزایش درصد پودر نانو، فارق از نوع آن ضرایب c و d کاهش می یابند. همچنین بر اساس نوع ذرات نانو می توان دریافت که به ترتیب با استفاده از NA، NC و سپس NS ضرایب c و d کاهش می یابند. البته این کاهش بیشتر تحت تأثیر افزایش مقدار نانو مواد استفاده شده است. با مقایسه این ضرایب در بتن های خودتراکم حاوی NC و NA، که به یک مقدار در بتن استفاده شده اند، می توان یافت که نوع ذرات تأثیر ناچیزی بر کاهش ضرایب c و d دارد. همچنین مشاهده می شود که ضرایب ثابت این رابطه نسبت به مطالعه یانگ ژو [۳۰] و رابطه پیشنهادی آیین نامه BS 8110: Part 2 [۳۳] برای بتن های معمولی بیشتر است. قابل ذکر است که نتایج بدست آمده در این مطالعه فقط با بتن های خودتراکم مذکور متناسب است و برای سایر بتن ها، با طرح اختلاط مختلف و حتی نمونه های با ابعاد مختلف، ممکن است متفاوت باشد.

۴. نتایج

آزمایش هایی جهت ارزیابی f^c ، Ee و Ed بتن های خودتراکم حاوی نانو مواد در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز انجام گرفت. روند افزایش f^c و Ee در کوتاه مدت و بلند مدت و رابطه f^c و Ee و همچنین رابطه Ee و Ed بررسی و نتایج زیر حاصل شد.

- ۱- روابط لگاریتمی مناسبی برای Ee و f^c بتن های خود تراکم شاهد و حاوی نانو مواد، نسبت به سن تعیین شد.
- ۲- روند افزایش Ee و Ed در سنین اولیه سریع تر از روند افزایش مقاومت فشاری است. Ee و f^c نمونه های حاوی نانو مواد در سنین بالاتر با شدت بیشتری افزایش یافت و نمونه حاوی نانو مس با ۲۱ درصد افزایش نسبت به نمونه شاهد بیشترین مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته در سن ۹۰ روز را دارد.
- ۳- روابطی جدید بین Ee و f^c بتن های خودتراکم شاهد و حاوی نانو مواد تعیین شد.
- ۴- همواره Ed از Ee بیشتر است و روابط خطی مناسب بین Ee و Ed بتن های خودتراکم شاهد و حاوی نانو مواد بدست آمد که ضرایب ثابت آن نسبت رابطه پیشنهادی آیین نامه BS 8110: Part 2 برای بتن های معمولی بیشتر است.
- ۵- مقدار و نوع نانو مواد بر رابطه بین Ee و Ed و همچنین رابطه بین Ee و f^c اثر گذار است.

۵. مراجع

- [1] Nazari, A., Rafeipour, 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.
- [2] Nazari, A., Riahi, S. (2011). "Effects of CuO nanoparticles on compressive strength of selfcompacting concrete". Indian Acad. Sci. 36, pp 371–391.
- [3] 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.
- [4] Barluenga, G., Palomar, I., Puentes, J. (2015). "Hardened properties and microstructure of SCC with mineral additions". Construction and Building Materials 94, pp 728–736.

- [5] Abd elaty, M.a.a. (2014). "Compressive strength prediction of Portland cement concrete with age using a new model". HBRC J. 10 (2), pp 145–155.
- [6] Kim, J.K., Moon, Y.H., Eo, S.H. (1998). "Compressive strength development of concrete with different curing time and temperature". Cem. Concr. Res. 28 (12), pp 1761–1773.
- [7] Madandoust, R., Bungey, J.H., Ghayidel, R. (2012). "Prediction of the concrete compressive strength by means of core testing using GMDH-type neural network and ANFIS models". Comput. Mater. Sci. 51 (1), pp 261–272.
- [8] American Concrete Institute, ACI 318-14. (2014). "Building Code for Structural Concrete". Detroit, USA.
- [9] American Concrete Institute, ACI 363R-10. (2010). "State of the Art Report on High Strength Concrete". Detroit, USA.
- [10] CSA Technical Committee, Reinforced Concrete Design, A23.3-14. (2014). "Design of Concrete Structures". Rexdale, Ontario, Canada.
- [11] Stock, A.F., Hannant, D.J., Williams, R.I.T. (1979). "The effect of aggregate concentration upon the strength and modulus of elasticity of concrete". Mag. Concr. Res. 31 (109), pp 225–234.
- [12] Ranhero, J.L. (2005). "Analyzing and determining relationships in elastic properties of concrete using wave propagation and vibration and uniaxial compression". A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Civil Engineering, University of Illinois at UrbanaChampaign, Urbana, Illinois.
- [13] De Graft-Johnson, J.W.S., Bawa, N.S. (1969). "Effect of mix proportion, water-cement ratio, age and curing conditions on the dynamic modulus of elasticity of concrete". Build. Sci. 3 (3), pp 171–177.
- [14] Yıldırım, H., Sengul, O. (2011). "Modulus of elasticity of substandard and normal concretes". Constr. Build. Mater. 25 (4), pp 1645–1652.
- [15] Trtnik, G., Kavcic, F., Turk, G. (2009). "Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks". Ultrasonics 49 (1), pp 53–60.
- [16] Kolluru, S.V., Popovics, J.S., Shah, S.P. (2000). "Determining elastic properties of concrete using vibrational resonance frequencies of standard test cylinders". Cem. Concr. Aggr. 22 (2), Pp 81–89.
- [17] Sun, Z., Voigt, T., Shah, S.P. (2005). "Temperature effects on strength evaluation of cement-based materials with ultrasonic wave reflection technique". ACI Mater. J. 102 (4), pp 272–278.
- [18] Voigt, T., Sun, Z., Shah, S.P. (2006). "Comparison of ultrasonic wave reflection method and maturity method in evaluating early-age compressive strength of mortar". Cem. Concr. Compos. 28 (4), pp 307–316.
- [19] Neville, A.M. (1981). "Properties of Concrete". Pitman Books Limited, New York.
- [20] Han, S.H., Kim, J.K. (2004). "Effect of temperature and age on the relationship between dynamic and static elastic modulus of concrete". Cem. Concr. Res. 34 (7), pp 1219–1227.
- [21] Lydon, F.D., Balendran, R.V. (1986). "Some observations on elastic properties of plain concrete". Cem. Concr. Res. 16 (3), pp 314–324.
- [22] American Society for Testing Material, ASTM C33/C33M–16. (2016). "Standard Specification for Concrete Aggregates". West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- [23] EFNARC. (2005). The European Specification and guidelines for self-compacting concrete, May.
- [24] US Research Nanomaterials, Inc, 3302 Twig LeafLane, Houston, TX77084, USA, www.us-nano.com.
- [25] American Society for Testing Material, ASTM C192/C192M –16a. (2016). "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory". West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- [26] American Society for Testing Material, ASTM C469/C469M–14. (2014). "Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression". West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- [27] American Society for Testing Material, ASTM C39/C39M–16b. (2016). "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens". West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- [28] American Society for Testing Material, ASTM C597–16. (2016). "Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete". West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- [29] Neville A.M. (2005). "Properties of concrete". Pearson Education Pte. Ltd., Singapore.
- [30] Zhou, Y., Gao, J., Sun, Z., Qu, W. (2015). "A fundamental study on compressive strength, static and dynamic elastic moduli of young concrete". Construction and Building Materials 98, pp 137–145.
- [31] Lew, H.S., Reichard, T.W. (1978). "Mechanical properties of concrete at early ages". ACI J. Proc. 75 (10), pp 533–542.
- [32] Venkiteela, G., Sun, Z., Najm, H. (2013). "Prediction of early age normal concrete compressive strength based on dynamic shear modulus measurements". J. Mater. Civ. Eng. 25 (1), pp 30–38.
- [33] BS 8110, Part 2. (1985). "Code of practice for special circumstances". British Standards Institution, London.