

A study on compressive strength, static and dynamic elastic modulus of self-compacted concrete contained nanomaterials

Rahmat Madandoust¹, Saber Deilami Poshtjoui^{2*}

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 study, the influence of different kinds of nanomaterials such as Nano oxides of Silica (NS), Aluminum (NA) and Copper (NC) on compressive strength ($f'c$), static elastic modulus (Ee), relationship between $f'c$ and Ee and the relationship between static and dynamic elastic modulus (Ed) of self-compacted concrete are examined. The nanomaterials are used as the binder in replacement of Portland cement. For this purpose, standard cylindrical samples containing NS, NA and NC with amounts of 1.5, 0.25 and 0.25%, respectively, were tested between 3 and 90 days. The $f'c$, Ee and Ed are evaluated according to ASTM C39/39M-16b, ASTM C469/C469M-14 and ASTM C597-16, respectively. Results indicate that adding Nanomaterials lead to improvement of $f'c$ and elasticity module. New relations between $f'c$ and Ee and, also, linear relation between Ee and Ed defined for this kind of self-compacted concretes, and it was observed that type and quantity of the Nanomaterials have impact on these relations. The experimental data of Ee at early ages are smaller than the calculated values of Ee from recommended equations by ACI 318-14, ACI 363-10, and CSA A23.3-14. The difference between experimental data and calculated values of Ee is decreased when $f'c$ increases. when the $f'c$ is higher than 45 MPa, the experimental data of Ee are higher than the calculated values of ACI 363-10. The study indicate that the Ed is always greater than the Ee and the difference between Ed and Ee is decreased when $f'c$ increases. It was found that the differences between Ed and Ee in this study are greater than the differences between Ed and Ee in BS 8110: 2 and the other studies.

ARTICLE INFO

Receive Date: 05 November 2018

Revise Date: 03 March 2019

Accept Date: 19 April 2019

Keywords:

Nano materials
Compressive Strength
Self-compacted concrete static elastic modulus
dynamic elastic modulus

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.155039.1700

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

مطالعه‌ای بر مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی بتن‌های

خودتراکم حاوی نانو مواد

رحمت مدن دوست^{۱*}، صابر دیلمی پشتجوئی^۲

۱- دانشیار گروه عمران دانشکده فنی دانشگاه گیلان، ایران

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

چکیده

در این مطالعه تأثیر انواع نانو مواد نظیر نانو اکسیدهای سیلیس (NS)، آلومینیوم (NA) و مس (NC) بر مقاومت فشاری ($f'c$)، مدول الاستیسیته استاتیکی (Ee)، رابطه $f'c - Ee$ و رابطه مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی (Ed) در بتن‌های خودتراکم بررسی گردید. نانو مواد مذکور به عنوان ماده چسباننده جایگزین بخشی از وزن سیمان استفاده شدند. برای این منظور نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد حاوی NS، NA و NC به ترتیب با مقادیر ۱/۵، ۰/۲۵ و ۰/۲۵ درصد، در سنین بین ۳ تا ۹۰ روز تحت آزمایش‌های $f'c$ مطابق ASTM C39/39M-16b، Ee مطابق ASTM C469/c469M-14 و Ed مطابق ASTM C597-16 قرار گرفتند. نتایج نشان داد که افزودن نانو مواد باعث بهبود مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته گردید. روابط جدید بین مقاومت فشاری و Ee و همچنین روابط خطی میان Ee و Ed برای این نوع بتن‌های خودتراکم تعریف شد و مشاهده شد که نوع و مقدار نانو مواد، فارق از نوع آن، بر این روابط اثر گذار است. در سنین اولیه Ee اندازه گیری شده کمتر از Ee محاسبه شده از آیین‌نامه‌های ACI 318-14، ACI 363-10 و CSA A23.3-14 است اما با افزایش مقاومت اختلاف میان این دو کاهش یافت و به نظر می‌رسد که در مقاومت‌های بالاتر از ۴۵ مگاپاسکال Ee تخمین زده شده در این مطالعه بیشتر از Ee محاسبه شده از رابطه ACI 363-10 است. همواره Ed از Ee بیشتر است و با افزایش مقاومت اختلاف آن‌ها کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده گردید که اختلاف میان Ee و Ed در بتن‌های خودتراکم این مطالعه بیشتر از اختلاف آن‌ها در روابط پیشنهادی آیین‌نامه BS 8110: Part ۲ و مطالعات گذشته است.

کلمات کلیدی: مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته استاتیکی، مدول الاستیسیته دینامیکی، نانو مواد، بتن خودتراکم

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2019.155039.1700	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.155039.1700	۱۴۰۰/۰۱/۳۰	۱۳۹۸/۰۱/۳۰	۱۳۹۸/۰۱/۳۰	۱۳۹۷/۱۲/۱۲	۱۳۹۷/۰۸/۱۴
رحمت مدن دوست rmdandoust@guilan.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

امروزه بتن خودتراکم به طور گسترده‌ای توسعه یافته است و به نوعی طراحی شده است تا دارای خواص مفیدی برای بتن‌های سازه‌ای باشد. در این نوع بتن برای بهبود خواص مکانیکی و خواص بتن تازه علاوه بر مواد تشکیل دهنده بتن‌های نرمال از مواد دیگری نظیر نانو مواد استفاده می‌شود [۴-۱]. ساخت و ساز سازه‌های 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 قالب‌ها از بتن و اعمال تنش اولیه به اعضای بتنی توسط این دو خواص تعیین می‌شود. قبل از این که بتن به خواص مکانیکی مناسب برسد، هر گونه عملیات غیر مناسب ممکن است باعث ایجاد تغییر شکل‌های 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 می‌یابد [۷-۵]. آیین‌نامه‌های طراحی، مدول الاستیسیته را بر اساس مقاومت فشاری ۲۸ روزه تخمین می‌زنند [۱۰-۸]. این روابط پیشنهادی [۱۰-۸] ممکن است برای سنین اولیه بتن و بتن‌های خودتراکم به خصوص حاوی نانو مواد مناسب نباشند.

فاکتورهای موثر بسیاری بر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته وجود دارد. استوک و همکاران [۱۱] اعلام کرده‌اند که مدول الاستیسیته با مقدار حجم سنگدانه متناسب است. رانچرو [۱۲] دریافت که مقدار حجم سنگدانه، نوع سنگدانه و نسبت آب به سیمان مهم‌ترین فاکتورهای 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 می‌یابد. یلدریم و سنگول [۱۴] اشاره کردند که با استفاده از سنگدانه‌های ریزتر مدول الاستیسیته ممکن است کمتر شود. تمام تحقیقات بالا بر بتن با سن ۲۸ روز یا بیشتر متمرکز هستند و تاثیر این فاکتورها در کوتاه مدت بر بتن‌ها مشخص نیست. همچنین تاثیر نانو مواد بر خواص مکانیکی بتن‌های خودتراکم به نظر به طور محدود بررسی شده است.

سازه‌های بتنی بر اساس مقاومت فشاری (f^c) و مدول الاستیسیته استاتیکی (Ee) که توسط آیین‌نامه‌ها پیشنهاد شده‌اند طراحی می‌شوند. اما برای بررسی Ee و f^c اعضای بتنی در سازه ساخته شده و اندازه‌گیری‌های میدانی کیفیت بتن از روش‌های غیر مخرب استفاده می‌شود. در این بین می‌توان از روش‌هایی چون سرعت امواج اولتراسونیک (UPV)^۱، انعکاس موج و روش پژواک ضربه نام برد [۱۸-۱۵] که در این مطالعه روش سرعت امواج اولتراسونیک مورد توجه است. این روش‌ها دینامیکی هستند و مدول الاستیسیته دینامیکی (Ed) بتن را اندازه می‌گیرند. بنابراین به یک رابطه مناسب بین مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی نیاز است تا ارتباط بین طراحی سازه و اندازه‌گیری‌های میدانی مشخص شود. البته محققان زیادی روابطی میان مدول استاتیکی و دینامیکی ارائه نمودند [۱۲ و ۱۹-۲۱] اما در این زمینه برای بتن‌های خودتراکم حاوی نانو مواد مطالعات محدود است. برای این منظور مقاومت فشاری و مدول استاتیکی و دینامیکی نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد با قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر و حاوی نانو اکسیدهای سیلیس (NS)^۲، آلومینیوم (NA)^۳ و مس (NC)^۴ 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 بتن‌ها بررسی شد.

۲- برنامه آزمایشگاهی و مصالح

۲-۱- مصالح مصرفی

در این مطالعه از شن و ماسه رودخانه‌ای اشباع با سطح خشک به عنوان سنگدانه‌های بتن خودتراکم استفاده شده است و دانه بندی آنها متناسب با دانه‌بندی مجاز استاندارد ASTM C33/C33M [۲۲] تعیین شده است. مدول نرمی ماسه ۲/۷ است و حداکثر اندازه

¹ Ultrasonic Pulse Velocity

² Nano SiO₂

³ Nano Al₂O₃

⁴ Nano CuO

سنگدانه طبق EFNARC [۲۳] 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. در این مطالعه از سیمان پرتلند نایین نوع ۱-۳۲۵ استفاده شده است. وزن مخصوص این سیمان ۳۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و سطح ویژه آن ۲۸۵۰ سانتیمتر مربع بر گرم می‌باشد. در جدول ۱ مشخصات شیمیایی سیمان آمده است.

جدول ۱: مشخصات شیمیایی سیمان^۵

%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	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	۰/۶۰-۰/۰۷	۱/۵-۱/۰

آب مصرفی در این مطالعه آب شرب شهرستان رشت می‌باشد و از فوق‌روان کننده ۲۸۰ Civil Flow با بنیان شیمیایی پلی کروکسیلات استفاده شده است. از پودر سنگ آهک به عنوان پرکننده استفاده گردید. در این مطالعه از نانو موادهای NS، NA و NC تولید شده 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^۶

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

جدول ۳: مشخصات شیمیایی نانو مواد^۷

	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 خودتراکم

در این مطالعه، ۱۳ طرح مخلوط بتن خودتراکم که ضوابط توصیه شده توسط EFNARC [۲۳] را پوشش بدهد مورد توجه قرار گرفته است. نانو موادهای NS، NA و NC به ترتیب با مقادیر 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 تمامی مخلوط‌ها در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳: طرح مخلوط‌ها

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

^۵ شرکت سیمان نایین، تهران، www.naencement.com

^۶ US Research Nanomaterials, Inc, www.us-nano.com

^۷ US Research Nanomaterials, Inc, www.us-nano.com

۲-۳- آماده سازی نمونه‌ها

مطابق استاندارد ASTM C192/C192M-16a [۲۴] نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد با قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر برای آزمایش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته ساخته شدند. نمونه‌ها درون قالب با یک گونی مرطوب و یه کارگیری روش غیر قابل نفوذ نایلون پوشانده شد و در آزمایشگاه با دمای ۲۵ درجه سانتیگراد نگهداری شدند و پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج و تا زمان آزمایش در مخزن آبی با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند.

۲-۴- روش آزمایش

جهت ارزیابی خصوصیات بتن خودتراکم تازه از آزمایشات جریان اسلامپ^۸ و T₅₀ برای ارزیابی قابلیت جریان و پرکنندگی و همچنین کنترل جداسازی به صورت چشمی استفاده گردید. در آزمایش اسلامپ میانگین قطر پهن شدگی بتن خودتراکم اندازه‌گیری شد و در آزمایش T₅₀ زمان رسیدن قطر پهن شدگی بتن خودتراکم به ۵۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری گردید. از آزمایش شاخص جعبه L^۹ برای ارزیابی قابلیت عبور و پرکنندگی 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^{۱۰} به عنوان معیاری برای تعیین قابلیت پرکنندگی 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 مدول الاستیسیته دینامیکی از دستگاه پاندیت (PUNDIT) با فرکانس انتقال ۵۴ کیلو هرتز و با دقت اندازه‌گیری ۰/۱ میکروثانیه، به روش انتقال مستقیم برای اندازه‌گیری UPV استفاده گردید و با استفاده از رابطه ۱ موجود در استاندارد ASTM C597-16 [۲۵]، UPV و چگالی اندازه‌گیری شده نمونه‌ها مدول دینامیکی محاسبه گردید.

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

Ed مدول الاستیسیته دینامیکی، ρ وزن مخصوص، μ ضریب پواسون دینامیکی هستند. سپس طبق استاندارد ASTM C469/c469M-14 [۲۶] نمونه‌های استوانه‌ای با سرعت ۰/۲۵ مگا پاسکال بر ثانیه تحت آزمایش مدول الاستیسیته قرار گرفتند. همچنین طبق استاندارد ASTM C39/39M-16b [۲۷] مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های استوانه‌ای را نیز بدست آوردیم. با استفاده از رابطه ۲ مدول الاستیسیته استاتیکی نمونه‌ها محاسبه شد. نمونه‌ها در سنین ۰،۳، ۰،۷، ۲،۸ و ۹۰ روز آزمایش شدند و میانگین نتایج ۳ نمونه به عنوان نتایج نهایی در محاسبات استفاده گردید.

$$Ee = (S_2 - S_1) / (e_2 - 0.00005) \quad (2)$$

در این فرمول Ee مدول الاستیسیته استاتیکی بر حسب مگا پاسکال، S₂ تنش مربوط به ۴۰ درصد مقاومت نهایی، S₁ تنش مربوط به کرنش اولیه ۰/۰۰۰۰۵ و e₂ کرنش مربوط به تنش S₂ 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 EFNARC [۲۳] در جدول ۴ آورده شده است. در جدول ۵ نیز حدود رده‌بندی مجاز EFNARC [۲۳] نشان داده شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴ مشاهده می‌شود که تمام طرح‌های

⁸ Slump Flow

⁹ L Box

¹⁰ V Funnel

اختلاط در محدوده مجاز EFNARC [۲۳] قرار دارند. افزودن نانو مواد به مخلوطها باعث کاهش جریان اسلامپ و شاخص جعبه L و افزایش زمان قیف V و T50 شده است. به طور کلی مشاهده می شود که افزودن نانو مواد به مخلوطها باعث کاهش کارایی شده است. در این میان مشاهده می شود که بیشترین کاهش کارایی مربوط به مخلوط حاوی ۱/۵ درصد NS است، سپس به ترتیب مخلوط های حاوی ۰/۲۵ درصد NA و NC دارای کارایی بیشتری نسبت به مخلوط حاوی ۱/۵ درصد NS هستند.

جدول ۴: نتایج آزمایش های بتن خودتراکم تازه

شماره مخلوط	نوع مخلوط	درصد نانو مواد %	Slump Flow(mm)	T50 (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) > ۲ s	(VF2) ۹ - ۲۵ s	(PA2) ≥ ۰/۸۰

جدول ۵: حدود رده بندی EFNARC [۲۳]

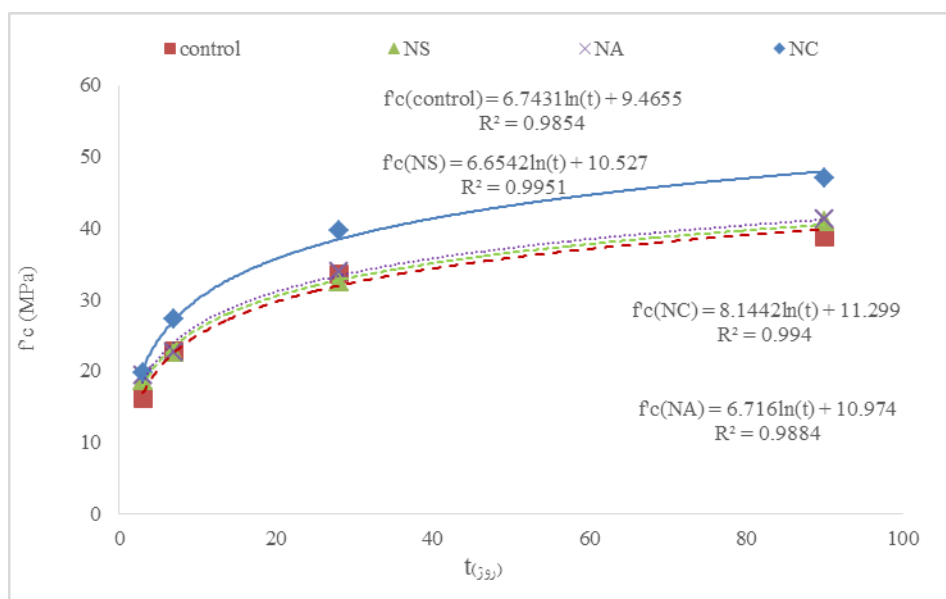
رده SF1	جریان اسلامپ 550 – 650mm
رده SF2	جریان اسلامپ ۶۶۰ – ۷۵۰mm
رده SF3	جریان اسلامپ ۷۶۰ – ۸۵۰mm
رده VS1/VF1	$T50 \leq 2$ و $V\text{-funnel} \leq 8$
رده VS2/VF2	$T50 > 2$ و $9 < V\text{-funnel} < 25$
رده VF1	$V\text{-funnel} \leq 8$
رده VF2	$9 < V\text{-funnel} < 25$
رده PA1	L Box دارای ۲ میلگرد $\geq 0/8$
رده PA1	L Box دارای ۳ میلگرد $\geq 0/8$

۳-۲- بررسی روند افزایش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته استاتیکی در طول زمان

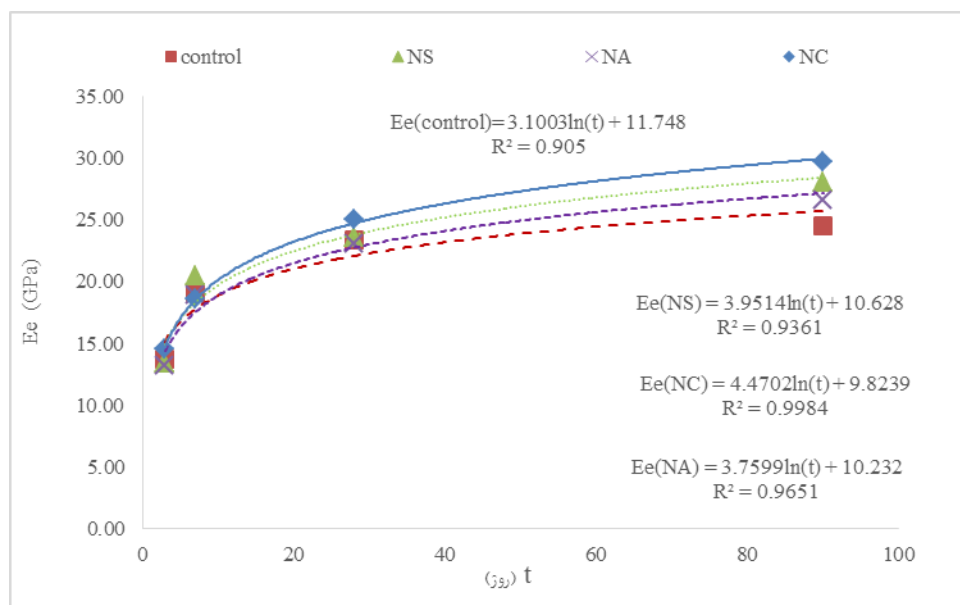
رابطه های Ee و مقاومت فشاری نمونه ها نسبت به سن (t) را می توان با فرمول لگاریتمی تخمین زد که در شکل های ۱ و ۲ نشان داده شده است؛ تخمین این روابط جهت درک بهتر روند افزایش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته استاتیکی بتن های خودتراکم در این مطالعه می باشد و صرفاً جهت مقایسه و مشاهده تفاوت های آنها با هم و همچنین با سایر تحقیقات می باشد. درصد روند افزایش Ee در سنین مختلف نسبت به Ee در سن ۲۸ روز برای بتن های خودتراکم شاهد و حاوی نانو مواد در جدول ۶ نشان داده شده است. مشاهده گردید که 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. در سنین اولیه تا ۳ روز، روند افزایش مدول الاستیکی و مقاومت فشاری سرعت قابل توجهی دارد. مدول الاستیسیته استاتیکی و مقاومت فشاری نمونه های حاوی نانو مواد در سنین بالاتر با شدت بیشتری افزایش یافتند و مشاهده می شود که در سنین اولیه تا ۳ روز روند افزایش مدول الاستیکی سریع تر از مقاومت فشاری است. یانگ ژو و همکارانش [۲۸] و همچنین ریچارد [۲۹] نیز برای بتن نرمال به همین نتیجه رسیدند.

جدول ۶: روند افزایش Ee در سنین مختلف نسبت به سن ۲۸ روزه برای بتن های خودتراکم حاوی NS، NA و NC (درصد)

نوع	۳ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	۹۰ روزه
control	۵۹	۸۲	۱۰۰	۱۰۵
NS	۵۷	۸۷	۱۰۰	۱۱۹
NA	۵۷	۸۲	۱۰۰	۱۱۵
NC	۵۸	۷۴	۱۰۰	۱۱۸



شکل ۱: روند رشد مقاومت فشاری در سنین مختلف برای بتن‌های خودتراکم حاوی NS، NA و NC



شکل ۲: روند رشد E_e در سنین مختلف برای بتن‌های خودتراکم حاوی NS، NA و NC

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 خودتراکم حاوی نانو مواد بیشتر از بتن خودتراکم 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 خودتراکم شاهد افزایش داشته‌اند.

۳-۳- بررسی ارتباط بین مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته استاتیکی

تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که مقاومت فشاری بتن در سنین اولیه به مقاومت خمیر سیمان، اندازه ترک‌ها و مشخصات ناحیه انتقال بستگی دارد. همچنین مدول الاستیسیته بتن تحت تأثیر مقدار و مشخصات سنگدانه‌های آن است [۳۰]. 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 تأثیرگذاری 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 مقایسه آن با روابط آیین‌نامه‌های (۳) ACI 318-14، (۴) ACI 363-10 و (۵) CSA A23.3-14 [۸ - ۱۰] در جدول ۷ و شکل ۳ نشان داده شده است.

$$E_e = 4700\sqrt{f'c} \quad (۳)$$

$$E_e = 3300\sqrt{f'c} + 6900 \quad (۴)$$

$$E_e = 4500\sqrt{f'c} \quad (۵)$$

رابطه E_e نسبت به $f'c$ در سنین مختلف را می‌توان با رابطه ۶ با دقت خوبی تخمین زد که در شکل ۴ نشان داده شده است.

$$E_e = a(f'c)^b \quad (۶)$$

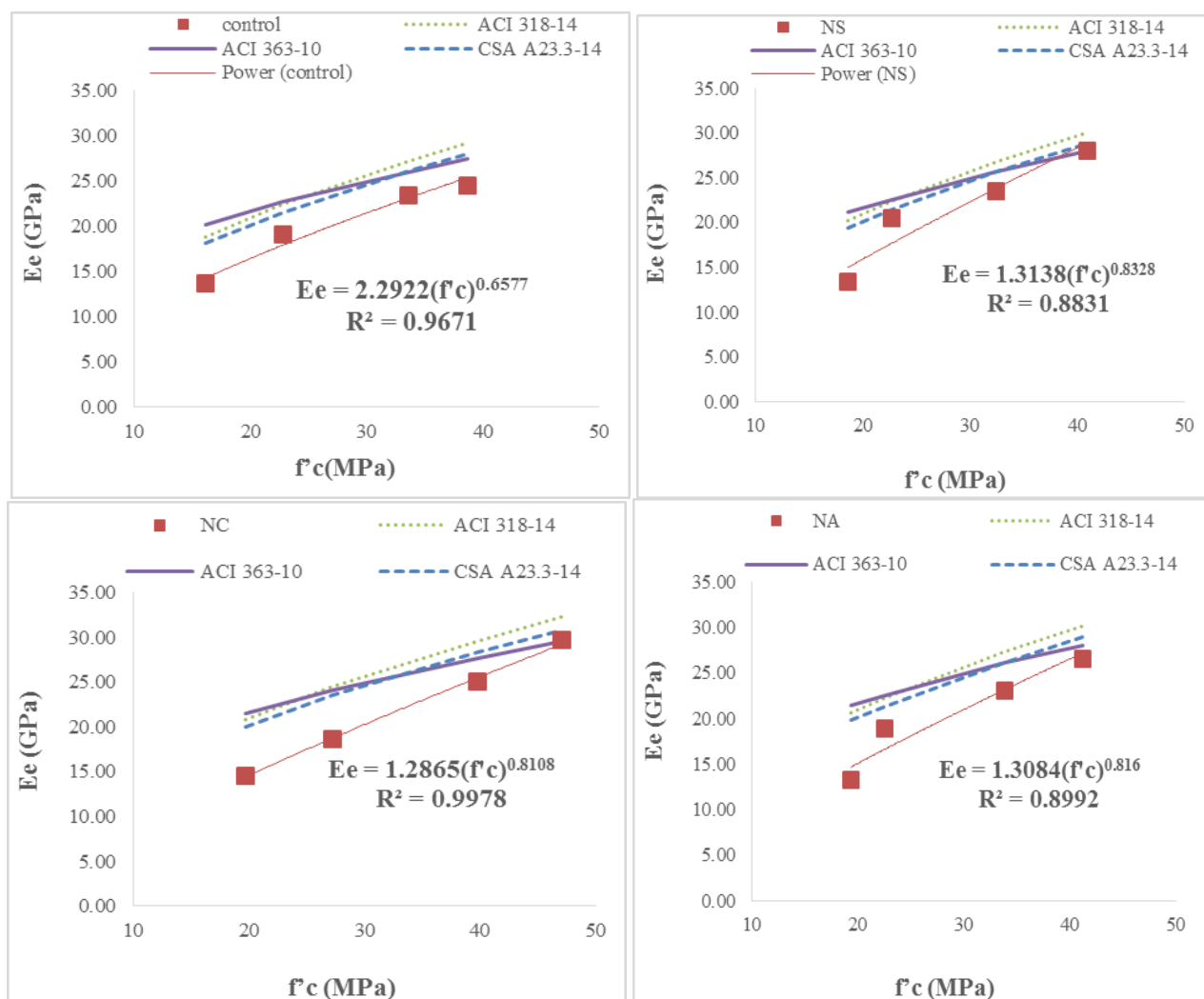
a و b در این رابطه ضرایب ثابت هستند.

جدول ۷: 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	۲۱/۵۰
	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	۲۲/۶۰	۲۱/۴۱
	۲۸	۳۲/۴۱	۲۳/۵۳	۲۶/۷۶	۲۵/۶۹	۲۵/۶۲
	۹۰	۴۰/۸۷	۲۸/۰۵	۳۰/۰۵	۲۸/۰۰	۲۸/۷۷
NA	۳	۱۹/۳۳	۱۳/۲۴	۲۰/۶۷	۲۱/۴۱	۱۹/۷۹
	۷	۲۲/۵۱	۱۸/۹۰	۲۲/۳۰	۲۲/۵۶	۲۱/۳۵
	۲۸	۳۳/۸۶	۲۳/۰۷	۲۷/۳۵	۲۶/۱۰	۲۶/۱۸
	۹۰	۴۱/۲۵	۲۶/۶۱	۳۰/۱۹	۲۸/۰۹	۲۸/۹۰
NC	۳	۱۹/۷۲	۱۴/۵۵	۲۰/۸۷	۲۱/۵۵	۱۹/۹۸
	۷	۲۷/۲۶	۱۸/۶۱	۲۴/۵۴	۲۴/۱۳	۲۳/۵۰
	۲۸	۳۹/۷۲	۲۵/۰۵	۲۹/۶۲	۲۷/۷۰	۲۸/۳۶
	۹۰	۴۷/۰۷	۲۹/۷۰	۳۲/۲۵	۲۹/۵۴	۳۰/۸۷

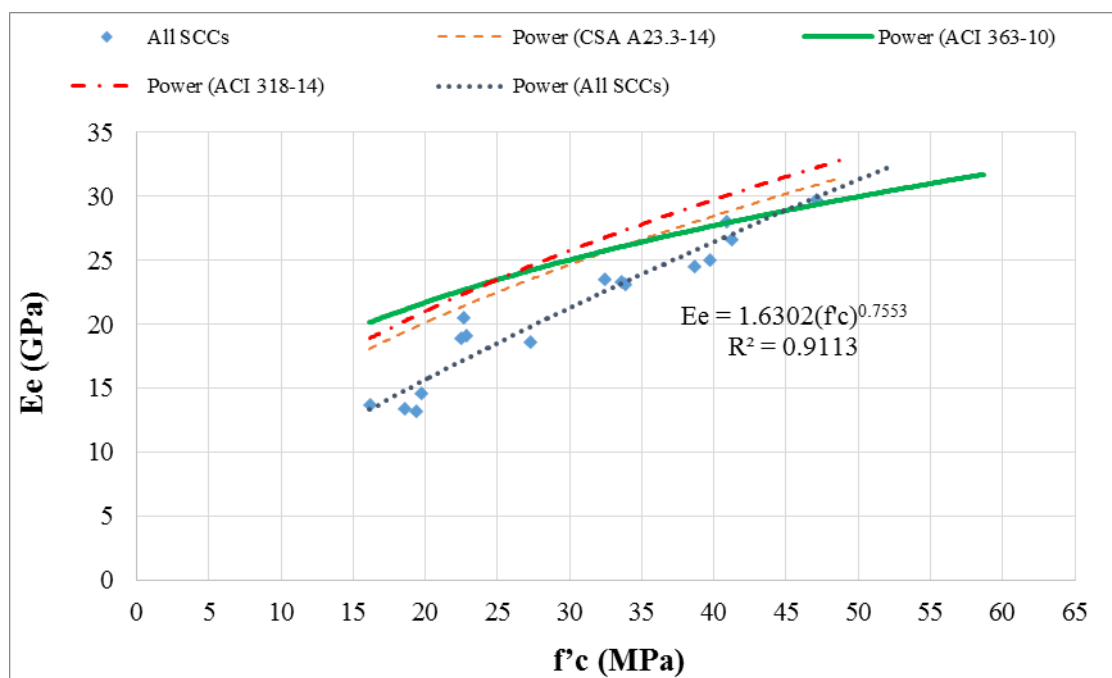
با توجه به شکل ۳ می‌توان مشاهده کرد که نتایج آزمایشگاهی E_e برای نمونه‌های شاهد و حاوی نانو مواد کمتر از نتایج E_e محاسبه شده است. در سنین اولیه نتایج محاسبه شده از رابطه ۵ و در سن ۹۰ روز نتایج محاسبه شده از رابطه ۴ نسبت به سایر روابط کمترین اختلاف را با نتایج E_e آزمایشگاهی دارند. به طوری که نتایج محاسبه شده از رابطه ۴ نسبت به نتایج آزمایشگاهی، برای نمونه‌های شاهد و حاوی NS، NA و NC در سن ۹۰ روز به ترتیب ۱۱، ۰، ۵، ۰ درصد اختلاف دارند. با توجه به رابطه E_e نسبت به $f'c$ در شکل ۳، مشاهده می‌شود که ضریب a برای نمونه‌های حاوی مواد نانو کمتر از نمونه شاهد است. اما ضریب b برای نمونه‌های حاوی مواد نانو بیشتر نمونه شاهد است. با مقایسه ضریب a در نمونه‌های حاوی نانو مواد به نظر می‌رسد که کاهش ضریب a می‌تواند با کاهش مقدار نانو ذرات رابطه مستقیم داشته باشد زیرا مشاهده می‌شود که این ضریب با کاهش مقدار نانو مواد از ۱/۵ درصد برای NS به ۰/۲۵ درصد برای NA و NC به ترتیب از ۷۹۲/۶۴ به ۵۰۵/۴۹ و ۳۹۵/۵۹ کاهش یافت. ضریب b هم می‌تواند با کاهش مقدار نانو ذرات رابطه عکس داشته باشد، به طوری که این ضریب با کاهش مقدار نانو مواد از ۱/۵ درصد برای NS به ۰/۲۵ درصد برای NA و NC به ترتیب از ۰/۸۹ به ۱/۰۱ و ۱/۱۱

افزایش یافت. علاوه بر این انتظار می‌رود که سایر عوامل مانند متوسط اندازه ذرات نانو، جنس ذرات نانو و سطح ویژه ذرات نانو نیز در این روابط تأثیرگذار باشند؛ زیرا این روابط، برای بتن‌های خودتراکم حاوی نانو مواد NA و NC که به یک مقدار در بتن خودتراکم استفاده شده‌اند، نیز دارای ضرایب متفاوتی هستند. برای بررسی سایر عوامل مذکور نیاز به تحقیقات بیشتر می‌باشد که می‌توان در مطالعات آینده به طور دقیق به این مسائل پرداخت.



شکل ۳: مقایسه رابطه E_e و f_c نمونه‌های آزمایشگاهی با روابط آیین‌نامه‌ها

با توجه به نزدیک بودن پراکندگی داده‌های مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته استاتیکی در تمام طرح‌های اختلاط، رابطه مدول الاستیسیته استاتیکی نسبت به مقاومت فشاری برای تمام بتن‌های خودتراکم با دقت بسیار مناسب و ضریب همبستگی 0.9113 تخمین زده شد که در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴ مشاهده می‌شود که شیب نمودار رابطه تخمین زده شده از نمونه‌های آزمایشگاهی بیشتر از شیب نمودار روابط آیین‌نامه‌ها است و با افزایش مقاومت بتن‌ها در سنین بالاتر مدول الاستیسیته استاتیکی تخمین زده شده در حال نزدیک شدن به مدول الاستیسیته استاتیکی محاسبه شده از روابط آیین‌نامه‌ها [۸-۱۰]، به ویژه رابطه ACI 363-10 [۹]، که برای بتن‌های با مقاومت زیاد پیشنهاد شده است، می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که در مقاومت‌های بالاتر از ۴۵ مگاپاسکال مدول الاستیسیته تخمین زده شده آزمایشگاهی بیشتر از مدول الاستیسیته محاسبه شده از رابطه ACI 363-10 [۹] است.



شکل ۴: رابطه E_e و f_c تخمین زده شده برای تمام نمونه‌های آزمایشگاهی و مقایسه آن با روابط آیین‌نامه‌ها

۳-۳- بررسی مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی

مدول الاستیسیته دینامیکی به عنوان مدول مماسی اولیه^{۱۱} در تنش صفر فرض شده است، زیرا تنها تنش ناچیزی در زمان اندازه‌گیری سرعت امواج اولتراسونیک و آزمون فرکانس تشدید^{۱۲} [۳۱] بر نمونه‌ها وارد می‌گردد [۳۲]. جهت محاسبه مدول الاستیسیته دینامیکی نمونه‌ها مطابق رابطه ۱ ارائه شده در آیین‌نامه سرعت امواج اولتراسونیک و چگالی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. ویواواری و همکاران [۳۳] جهت محاسبه مدول الاستیسیته دینامیکی بتن‌های خودتراکم مختلف از طریق رابطه ۱ ضریب پواسون دینامیکی را بین ۰/۱۵ برای بتن‌های با مقاومت زیاد و ۰/۳ برای بتن‌های با مقاومت کم پیشنهاد کرده‌اند. محققانی همچون شریق و همکاران [۳۴] و همچنین راثو و همکاران [۳۵] به ترتیب جهت محاسبه مدول الاستیسیته دینامیکی بتن حاوی GGBFS و بتن RCC به استناد مطالعات نویل [۳۶] ضریب پواسون دینامیکی را ۰/۲ اختیار نمودند. هچ و همکاران [۳۷] نیز جهت محاسبه مدول الاستیسیته دینامیکی برای بتن‌های تولید شده با سیمان پرتلند نوع ۳ دارای مقاومت بالا در سنین اولیه، ضریب پواسون دینامیکی را ۰/۲ اختیار نمودند. در این مطالعه ضریب پواسون دینامیکی را با توجه به مطالعات گذشته برای تمام طرح‌های اختلاط ۰/۲ اختیار کردیم [۳۳-۳۷].

در جدول ۸، چگالی، UPV، E_d و E_e نمونه‌های مذکور نشان داده شده است. تغییرات E_e نسبت به E_d را می‌توان با رابطه خطی مانند رابطه ۷ با دقت بسیار بالا تخمین زد که این نمودارها و روابط در شکل ۵ نشان داده شده‌اند.

$$E_e = c (E_d) - d \quad (7)$$

در این رابطه c و d ضرایب ثابت هستند.

همچنین رابطه بین مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی توسط یانگ ژو [۲۸] و آیین‌نامه BS 8110: Part 2 [۳۸] برای بتن‌های دارای وزن نرمال^{۱۳} پیشنهاد شده است که می‌توان این روابط را جهت مقایسه با روابط بدست آمده، در شکل ۶ مشاهده نمود.

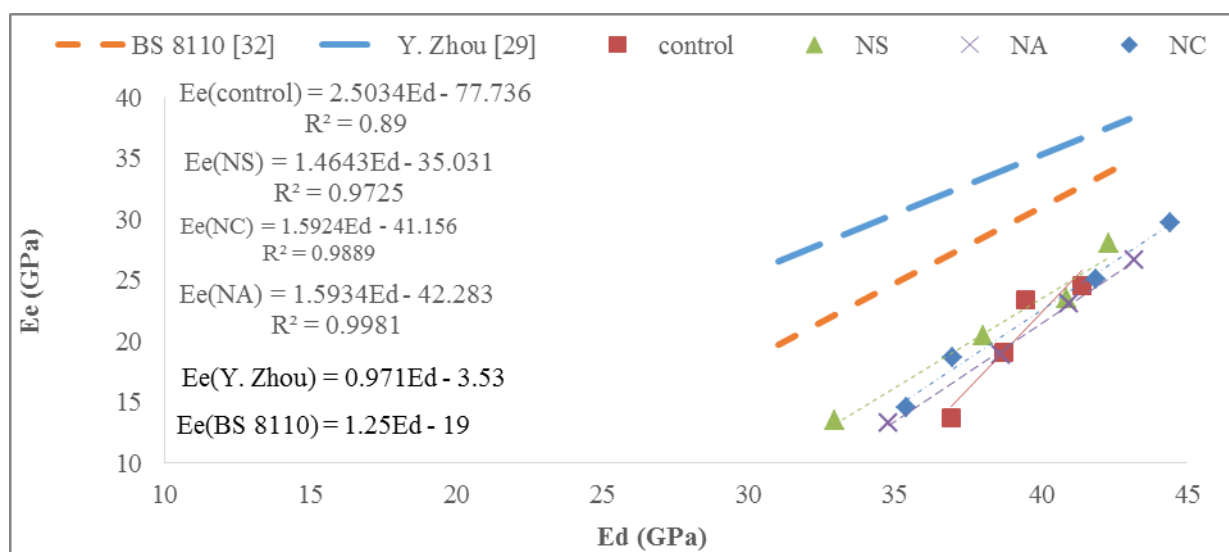
¹¹ Initial tangent modulus

¹² Resonance frequency tests

¹³ Normal weight concrete

جدول ۸: نتایج E_e و E_d

نوع	سن (روز)	ρ (ton/m ³)	UPV (km/s)	E_d (GPa)	E_e (GPa)
control	۳	۲/۳۸	۴/۱۴	۳۶/۹۱	۱۳/۷۱
	۷	۲/۳۶	۴/۲۶	۳۸/۷۱	۱۹/۱۱
	۲۸	۲/۳۷	۴/۲۹	۳۹/۴۵	۲۲/۳۵
	۹۰	۲/۴۵	۴/۳۲	۴۱/۳۶	۲۴/۵۳
NS	۳	۲/۳۵	۲/۹۴	۳۲/۹۲	۱۳/۴۳
	۷	۲/۳۹	۴/۱۹	۳۷/۹۹	۲۰/۴۷
	۲۸	۲/۴۱	۴/۳۳	۴۰/۸۷	۲۳/۵۲
	۹۰	۲/۴۰	۴/۴۱	۴۲/۲۸	۲۸/۰۴
NA	۳	۲/۴۵	۲/۹۶	۳۴/۷۴	۱۳/۲۴
	۷	۲/۴۶	۴/۱۷	۳۸/۶۲	۱۸/۸۹
	۲۸	۲/۴۴	۴/۳۱	۴۰/۹۴	۲۳/۰۷
	۹۰	۲/۵۳	۴/۳۵	۴۳/۱۸	۲۶/۶۰
NC	۳	۲/۴۵	۴/۰۰	۳۵/۳۹	۱۴/۵۵
	۷	۲/۴۵	۴/۰۹	۳۶/۹۴	۱۸/۶۱
	۲۸	۲/۴۸	۴/۳۲	۴۱/۸۴	۲۵/۰۵
	۹۰	۲/۴۹	۴/۴۴	۴۴/۴۰	۲۹/۶۹

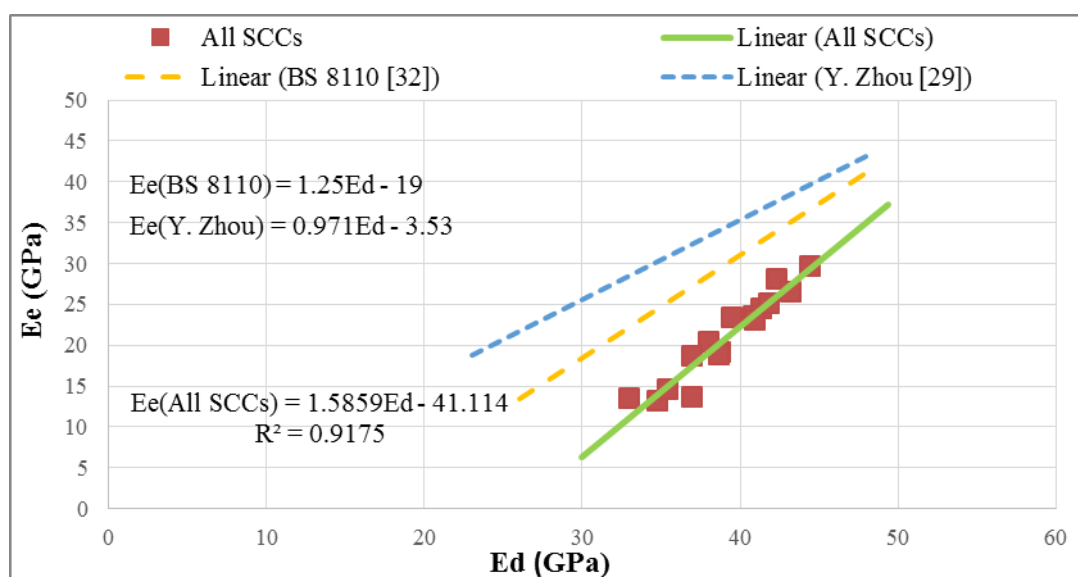
شکل ۵: رابطه E_e نسبت به E_d

با دقت در نمودار شکل ۵ مشاهده می‌شود که همواره E_d از E_e بیشتر است. تفاوت بین مدول الاستیسیته دینامیکی و استاتیکی به این دلیل است که ویژگی ناهمگنی بتن مدول الاستیسیته دینامیکی و استاتیکی را به روش‌های متفاوت تحت تأثیر قرار می‌دهد [۳۹] و [۴۰]. علاوه بر این، اختلاف بین این دو مدول الاستیسیته با افزایش مقاومت بتن، کاهش می‌یابد [۳۹]. با توجه به روابط بدست آمده در شکل ۵ می‌توان دریافت که افزودن مواد نانو به بتن خودتراکم باعث افزایش دامنه E_d و E_e شده است و همچنین شیب این نمودار برای بتن‌های خودتراکم حاوی نانو مواد نسبت به بتن خودتراکم شاهد کاهش یافته است. مشاهده می‌شود که با افزایش درصد پودر نانو، فارق از نوع آن ضرایب c و d کاهش می‌یابند. همچنین بر اساس نوع ذرات نانو می‌توان دریافت که به ترتیب با استفاده از NC ، NA و سپس NS ضرایب c و d کاهش می‌یابند. البته بنظر می‌رسد که این کاهش بیشتر تحت تأثیر افزایش مقدار نانو مواد استفاده شده است. با مقایسه این

ضرایب در بتن‌های خودتراکم حاوی NC و NA، که به یک مقدار در بتن استفاده شده‌اند، می‌توان یافت که نوع ذرات تأثیر ناچیزی بر کاهش ضرایب c و d دارد.

همچنین مشاهده می‌شود که ضرایب ثابت رابطه بین مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی در این مطالعه نسبت به مطالعه یانگ ژو و همکارانشان [۲۸] و رابطه پیشنهادی آیین‌نامه BS 8110: Part 2 [۳۸] برای بتن‌های معمولی بیشتر است. در واقع مدول الاستیسیته دینامیکی در بتن‌های خودتراکم این مطالعه نسبت به سایر بتن‌ها در مطالعات گذشته اختلاف بیشتری با مدول الاستیسیته استاتیکی دارد. عوامل زیادی از جمله نسبت‌های اختلاط، نوع مصالح، استفاده از نانو مواد و حتی روش اندازه‌گیری مدول الاستیسیته دینامیکی ممکن است علت این پدیده باشد. یانگ ژو و همکارانشان [۲۸] گزارش کرده‌اند که مقدار حجم سنگدانه، نسبت آب به سیمان و دمای عمل‌آوری در توسعه مدول الاستیسیته دینامیکی و استاتیکی تأثیر دارند. اگرچه، نسبت آب به سیمان و دمای عمل‌آوری بر رابطه بین مدول استاتیکی و دینامیکی تأثیری ندارند. مقدار حجم سنگدانه و اندازه بزرگترین سنگدانه دو فاکتور تأثیرگذار بر این رابطه و ضرایب ثابت آن هستند. اکنون در این مطالعه نیز مشاهده می‌شود که مقدار و نوع نانو مواد نیز بر رابطه بین مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی تأثیر می‌گذارد. همچنین، به طور معمول، مدول الاستیسیته دینامیکی که بر اساس سرعت امواج اولتراسونیک اندازه‌گیری شده است بیشتر از مدول الاستیسیته دینامیکی اندازه‌گیری شده از آزمون فرکانس تشدید^{۱۴} [۳۱] است، حتی زمانی که مقدار ضریب پواسون شناخته شده است [۳۹].

با توجه به نزدیک بودن پراکندگی داده‌های مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی در تمام طرح‌های اختلاط، رابطه کلی مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی برای تمام بتن‌های خودتراکم با دقت بسیار مناسب و ضریب همبستگی ۰/۹۱۷۵ تخمین زده شد که در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: رابطه کلی برای Ee نسبت به Ed

با توجه به داشتن رابطه کلی بین f^c و Ee و رابطه کلی بین Ee و Ed که برای بتن‌های خودتراکم حاوی نانو مواد این مطالعه تخمین زده شده است و به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۶ نشان داده شده است می‌توان رابطه کلی بین f^c و Ed را تخمین زد (رابطه ۸).

$$Ed = 1.0279(f^c)^{0.7553} + 25.9247 \quad (8)$$

¹⁴ Resonance frequency tests

با جاگذاری رابطه ۸ در رابطه ۱ و اختیار نمودن ضریب پواسون دینامیکی برابر با 0.2 [۳۳-۳۷] می توان مقاومت فشاری بتن های خودتراکم حاوی نانو مواد این مطالعه را بر حسب UPV و چگالی به صورت رابطه ۹ تخمین زد.

$$f'c = 0.8386 \rho^{3.2239} (UPV)^{2.6479} - 71.7632 \quad (9)$$

۴- نتایج

آزمایش های مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی بر روی بتن های خودتراکم حاوی نانو مواد در سنین بین ۳ تا ۹۰ روز انجام گرفت. روند افزایش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته استاتیکی در کوتاه مدت و بلند مدت و رابطه مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته استاتیکی و همچنین رابطه مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی بررسی گردید و نتایج زیر حاصل شد.

۱- روابط لگاریتمی مناسبی برای مدول الاستیسیته استاتیکی و مقاومت فشاری بتن های خودتراکم شاهد و حاوی نانو مواد این مطالعه، نسبت به سن تعیین گردید.

۲- با توجه به نتایج آزمایش های مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته مشاهده می گردد که روند افزایش مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی در سنین اولیه سریع تر از روند افزایش مقاومت فشاری است. مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته استاتیکی 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 مدول الاستیسیته استاتیکی و مقاومت فشاری برای هر یک از بتن های خودتراکم شاهد و حاوی نانو مواد تعیین گردید. همچنین یک رابطه کلی جهت محاسبه مدول الاستیسیته استاتیکی بر حسب مقاومت فشاری برای تمام بتن های خودتراکم این مطالعه و با ضریب همبستگی 0.9113 تخمین زده شد. مشاهده گردید که نتایج آزمایشگاهی مدول الاستیسیته استاتیکی برای این نمونه ها کمتر از مدول های الاستیسیته استاتیکی محاسبه شده از فرمول های آیین نامه های ACI 318-14، ACI 363-10 و CSA A23.3-14 هستند اما با افزایش مقاومت، مدول الاستیسیته استاتیکی اندازه گیری شده به مدول الاستیسیته استاتیکی محاسبه شده از آیین نامه های مذکور نزدیک گردید. مدول الاستیسیته تخمین زده شده از رابطه کلی آزمایشگاهی در مقاومت های بالاتر از ۴۵ مگاپاسکال بیشتر از مدول الاستیسیته محاسبه شده از رابطه ACI 363-10 گردید.

۴- روابط خطی مناسب بین مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی برای هر یک از بتن های خودتراکم شاهد و حاوی نانو مواد بدست آمد. همچنین یک رابطه کلی بین مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی برای تمام بتن های خودتراکم این مطالعه و با ضریب همبستگی 0.9175 تخمین زده شد. همواره مدول الاستیسیته دینامیکی از مدول الاستیسیته استاتیکی بیشتر است و با توجه به روابط پیشنهادی آیین نامه BS 8110: Part 2 و مطالعات گذشته، مشاهده گردید که اختلاف میان مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی در بتن های خودتراکم این مطالعه بیشتر است.

۵- با توجه به نتایج آزمایش های مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته و روابط بین آنها مشاهده می گردد که نوع نانو مواد و همچنین مقدار نانو مواد، فارق از نوع آن، بر رابطه بین مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی و همچنین رابطه بین مدول الاستیسیته استاتیکی و مقاومت فشاری اثر گذار است.

۶- با توجه به رابطه کلی بدست آمده بین مدول الاستیسیته استاتیکی و مقاومت فشاری و رابطه کلی بین مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی و همچنین با استفاده از رابطه پیشنهادی استاندارد ASTM C597-16 جهت تخمین مدول الاستیسیته دینامیکی، یک رابطه کلی برای تخمین مقاومت فشاری بتن های خودتراکم این مطالعه بر حسب UPV و چگالی بدست آمد.

۵- مراجع

- [1] 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.
- [2] Nazari, A., Riahi, S. (2011). Effects of CuO nanoparticles on compressive strength of self-compacting 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] Ranchoero, 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 Urbana-Champaign, 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*.

- [24] 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.
- [25] American Society for Testing Material, ASTM C597–16. (2016). Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. 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] 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.
- [29] Reichard, T.W., Lew, H.S. (1978). Mechanical properties of concrete at early ages. *ACI J. Proc.* 75 (10), pp 533 542.
- [30] Venkateela, 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.
- [31] ASTM C215-14, Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens, West Conshohoken, Pa, USA, 2016.
- [32] Neville A.M. (1997). *Properties of concrete*. John Wiley & Sons, 4th edition, New York, NY, USA.
- [33] Vyawahare, R.M., Chavhan, P.P. (2015). Correlation of Compressive strength and Dynamic modulus of Elasticity for high strength SCC Mixes. *International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)*, pp 2454-4698.
- [34] Shariq, M., Prasad, J., Masood, A. (2013). Studies in ultrasonic pulse velocity of concrete containing GGBFS. *Construction and Building Materials* 40, pp 944–950.
- [35] Rao, S.K., Sravana, P., Rao, T.Ch. (2016). Experimental studies in Ultrasonic Pulse Velocity of Roller compacted concrete pavement containing Fly Ash and M-sand. *International Journal of Pavement Research and Technology*, pp 289-301.
- [36] Neville A.M. (2005). *Properties of concrete*. Pearson Education Pte. Ltd., Singapore.
- [37] Haach, G.V., Juliani, M.L., Da Roz, R.M. (2015). Ultrasonic evaluation of mechanical properties of concretes produced with high early strength cement. *Construction and Building Materials* 96, pp 1–10.
- [38] BS 8110, Part 2. (1985). Code of practice for special circumstances. British Standards Institution, London.
- [39] R. E. Philleo, "Comparison of results of three methods for determining Young's modulus of elasticity of concrete," *Journal of the Americal Concrete Institute*, vol. 26, no. 5, pp. 461–469, 1955.
- [40] Khalil, H., and Gilles, P., "Influence of Porosity on Fracture Characteristics in Mortar Structures", 15th ASCE Engineering Mechanics, Columbia University, June, 2002.