Journal of Structural and Construction Engineering, 8(3), 2021, pp. 205-217

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

Experimental Assessment of Using Micro-Non Air Bubble (MINAB) and Super-Plasticizer on Setting Time and Compressive Strength of Cement Mortar

Jalil Shafaei[*1], Seyed Fazlolah Saghravani[2], Ali Torki[3]

1- Corresponding Author, Assistant Professor, Shahrood University Of Technology, Shahrood, Iran
2- Associate Professor, Shahrood University Of Technology, Shahrood, Iran
3- MSc student, Shahrood University Of Technology, Shahrood, Iran

ABSTRACT

One of the latest innovations in nano-technology is the use of Micro-Nano Air Bubbles (MINAB) as a substitute for water in concrete. Using MINAB as a substitute for water used in concrete can be used to improve the properties of concrete. The use of super- Plasticizer can have an effective role in reducing negative effects MINAB on concrete properties. In this study, to investigate the effects of MINAB with water in concrete in the presence of different super- Plasticizer percentages, the effect of MINAB on the setting time, cement mortar flow and compressive strength of cement mortar is investigated. For this purpose, 16 samples of VICT needles, 48 samples of cement mortar and 16 samples of cement mortar flow were used to check the curing time, compressive strength and cement flow with different percentages of super- Plasticizer (0.5, 0.9 and 1.4) were tested in the presence and absence of MINAB. The results showed that the compressive strength of cement mortar with MINAB increased by 16 and 7%, relative to water at 7 and 28 days respectively. The compressive strength of cement mortar with MINAB has increased in presence of super- Plasticizer in comparison to cement mortar with water in presence of super- Plasticizer at the age of 7 and 28 days, with the highest resistance in 0.5% super- Plasticizer, which increased by 21% at 7 days and increased by 10% at the age of 28.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

ARTICLE INFO

Receive Date: 22 January 2019
Revise Date: 20 May 2021
Accept Date: 23 July 2019

Keywords:
Mortar cement
Micro-nano air bubble (MINAB)
Super-plasticizer
Mortar compressive strength
Setting time

doi: 10.22065/JSCE.2019.169057.1769

*Corresponding author: Jalil Shafaei
Email address: jshafaei@shahroodut.ac.ir

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir

Journal of Structural and Construction Engineering
JSCE
نشریه علمی-پژوهشی مهندسی سازه و ساخت

بررسی آزمایشگاهی تاثیر همزمان آب حاوی میکرو نانو حباب و فوق روان کننده بر مشخصات زمان گیرش و مقاومت فشاری ملات سیمان

جلیل شفائی*[۱]، سید فضل الله ساغروانی[۲]، علی ترکی[۳]

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۳- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

چکیده

یکی از جدیدترین نوآوری های فناوری نانو استفاده از میکرو نانو حباب ها (میناب) به عنوان جایگزین آب در بتن می باشد. استفاده از میناب به عنوان جایگزین آب مصرفی در بتن می تواند در جهت بهبود یا تضعیف خصوصیات بتن سخت شده و بتن در حالت خمیری تاثیرگذار باشد. استفاده از فوق روان کننده ها می تواند نقش موثری در کاهش اثرات بعضا منفی میناب در خصوصیات بتن داشته باشد. در این پژوهش به منظور بررسی اثرات جایگزین میناب با آب در بتن در حضور درصدهای مختلف فوق روان کننده، تاثیر میناب بر زمان گیرش، جریان ملات سیمان و مقاومت فشاری ملات سیمان بررسی می گردد. بدین منظور تعداد ۱۶ نمونه آزمایشگاهی سوزن ویکات، ۴۸ نمونه آزمایشگاهی ملات فشاری سیمان و ۱۶ نمونه جریان ملات سیمان به ترتیب به منظور بررسی زمان گیرش، مقاومت فشاری و جریان سیمان با درصد های مختلف فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات اتر (۰,۵، ۰,۹ و ۱,۴) در حضور و عدم حضور میناب آزمایش شد. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری ملات سیمان با میناب نسبت به آب در سنین ۷ و ۲۸ روز به ترتیب ۱۶ و ۷ درصد افزایش داشت. مقاومت فشاری ملات سیمان با میناب در حضور فوق روان کننده نسبت به ملات سیمان با آب در حضور فوق روان کننده در سنین ۷ و ۲۸ روز افزایش داشته است که بیشترین مقاومت در ۰,۵ درصد فوق روان کننده رخ داد که در سن ۷ روز ۲۱ درصد افزایش و در سن ۲۸ روز ۱۰ درصد افزایش داشته است.

کلمات کلیدی: ملات سیمان، میکرو- نانوحباب (میناب) ، فوق روان کننده، مقاومت فشاری ملات، زمان گیرش

سابقه مقاله:					
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	شناسه دیجیتال:
۱۳۹۷/۱۱/۰۲	۱۴۰۰/۰۲/۳۰	۱۳۹۸/۰۵/۰۱	۱۳۹۸/۰۵/۰۱	۱۴۰۰/۰۳/۳۰	doi: 10.22065/JSCE.2019.169057.1769
					https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.169057.1769

*نویسنده مسئول: جلیل شفائی

پست الکترونیکی: jshafaei@shahroodut.ac.ir ,

۱- مقدمه

نانو تکنولوژی توسط ریچارد فیمن معرفی شد[1]. نانوتکنولوژی یک شاخه نوظهور در علم است که در ارتباط با فهمیدن و کنترل کردن مواد در ابعاد نانو می‌باشد. به موادی یکی از ابعاد آن بین تقریباً ۱ تا ۱۰۰ نانومتر، نانو مواد گفته می‌شود[2]. مطالعه بتن و خمیر سیمان در مقیاس‌های میکروسکوپی و ماکروسکوپی برای توسعه مصالح ساختمانی جدید و کاربرد آن‌ها حائز اهمیت است. استفاده از فناوری نانو در بتن و با افزودنی‌هایی مانند نانو لوله‌های کربنی، نانو تیتانیوم اکسید، نانو الیاف، نانو آلومینا، نانو آهن و .. قبلاً مورد مطالعه قرارگرفته است[3]. افزودن نانو سیلیس به بتن موجب افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی، کاهش زمان‌گیرش و کاهش نفوذپذیری آب درون بتن و همچنین مقاومت بالاتر در برابر حمله‌های شیمیایی می‌شود[4]. مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که نانو سیلیس در بتن معمولی باعث افزایش مقاومت فشاری، مقاومت خمشی[5] و مقاومت کششی [6] خصوصاً در اولین روزهای عمر بتن می‌گردد و روانی را نیز کاهش می‌دهد[7] . طبق آزمایش‌ها نظری و همکارانش، بکار گیری حداکثر 2% نانو اکسید آهن در بتن باعث کاهش زمان‌گیرش اولیه و نهایی بتن و افزایش مقاومت کششی و خمشی آن می‌گردد. درصد بهینه برای افزایش مقاومت خمشی و کششی 1% است که بیشترین مقاومت را باعث می‌شود. افزایش مقاومت خمشی به دلیل مصرف سریع کلسیم هیدروکسید که در طی هیدراتاسیون سیمان پرتلند شکل‌گرفته است[8]. بررسی نتایج مختلف آزمایشگاهی حاصل از افزودن نانو اکسید آلومینیوم به سیمان نشان داده است که کارایی بتن این نوع سیمان‌ها نسبت به سیمان‌های معمولی کمتر است[9]. کشورهای درحال‌توسعه برای استفاده ازین فناوری با مشکلاتی اعم از عدم وجود تکنولوژی تولید مواد در سایز نانو، بالا بودن هزینه‌ی تهیه این مواد روبرو هستند. با توجه به مشکل گران بودن، بحث حمل‌ونقل و اثرات زیست‌محیطی نانو مواد دلایلی هستند که منجر به عدم استفاده یا کاهش سرعت استفاده از این افزودنی‌ها شده‌اند[10].

یکی از نوآوری‌های فناوری نانو، استفاده از آب حاوی میکرو- نانوحباب۱ (میناب یا MNB) به‌عنوان مکمل آب مصرفی در بتن است. میکرو- نانوحباب‌های هوا حفره‌های گازی بسیار ریز پایدار در آب هستند که به روش‌های مختلفی تولید می‌شوند[11]. یکی از روش های تولید این نانو ماده استفاده از پدیده ی کاویتاسیون است که در حضور گاز هسته زایی در آب هسته زایی می شوند. فرآیند هسته‌زایی در مایع سبب چرخش ذرات گاز در میدان داخلی هسته می‌شود که باعث ایجاد میدان الکترواستاتیکی به دور هسته می‌گردد و این میدان الکترواستاتیکی با ذرات باردار دور هسته که تشکیل لایه دوگانه را داده‌اند به‌طور مداوم در تبادل شار الکتریکی ثابتی هستند[12]. اکثر مایعات حاوی کاتیون‌ها و آنیون‌ها یعنی یون های با بارهای مثبت و منفی هستند. موقعی که ذرات باردار در یک مایع معلق شوند، یون‌های با بار مخالف به سمت ذرات معلق جذب می‌شوند. یعنی نمونه با بار منفی، یون‌های مثبت را از مایع به سمت خود جذب کرده و برعکس نمونه با بار مثبت، یون‌های منفی را از مایع به سمت خود جذب می‌کند. یون‌های نزدیک سطح ذره، شدیداً جذب‌شده درحالی‌که یون‌های دورتر، پیوند سستی خواهند داشت که لایه نفوذ نامیده می‌شود. درون لایه نفوذ، مرزی وجود دارد که یون‌های درون این مرز با حرکت ذره در مایع، حرکت خواهند کرد و اما یون‌های بیرون مرز، ساکن باقی می‌مانند. این مرز صفحه برشی۲ نامیده می‌شود. از طرفی، پتانسیلی که بین سطح ذره و مایع وجود دارد، با فاصله از سطح ذره تغییر می‌کند. این پتانسیل در صفحه برشی، زتا پتانسیل نامیده می‌شود. زتا پتانسیل ، یکی از عوامل پیش‌بینی پایداری ذرات در حلال است[13]. از مهم‌ترین ویژگی این نوع نانو می‌توان به هزینه‌های بسیار پایین تولید , سرعت تولید بالا، و در دسترس بودن آن در هر مکان و زمان اشاره کرد[14]. با توجه به ویژگی های این نانو ماده انتظار می رود جایگزین مناسبی برای نانو با حالت جامد باشد. عارفی و همکاران در سال 2016 نشان دادند که در نسبت آب به سیمان 0.6، میکرو- نانوحباب‌های هوا در بتن باعث افزایش مقاومت‌های: فشاری، کششی و خمشی بتن می‌شود. دمای هیدراتاسیون و زمان‌گیرش اولیه و نهایی ترکیب سیمان با آب حاوی MNB نیز کاهش می‌یابد. از دیگر ویژگی‌های بتن حاوی MNB می‌توان به اسلامپ و روانی کمتر نسبت به بتن معمولی اشاره کرد [15]. تحقیقات در مورد تأثیر میکرو- نانوحباب در خمیر سیمان نشان دادند که ویسکوزیته خمیر حاوی MNB کمتر از خمیر سیمان حاوی آب می‌شود و تفاوتی در مقاومت فشاری مشاهده نشد[16]. همین‌طور در مطالعات اخیر معلوم شد که مقاومت فشاری خمیر سیمان حاوی نانوحباب هیدروژن بیشتر از سیمان حاوی آب شده است که در سن 7 روزه، 25.6 درصد و در سن 24 روزه 7.6 درصد افزایش پیدا کرده است. مقاومت فشاری تحت تأثیر غلظت نانوحباب‌ها قرارگرفته است[17] .

[1] Micro-Nano bubble (MNB)
[2] Shear Plane

با توجه به اینکه استفاده از نانو مواد باعث ایجاد ویژگی های بعضا منفی از جمله کاهش کارایی و اسلامپ می شود، استفاده از کاهنده های آب در بهبود ویژگی های بتن حاوی نانو مواد مورد توجه قرار می گیرد. رئوف در سال 2014 نشان دادند که با اضافه کردن 0.4 و 0.8 درصد فوق روان کننده‌ی نسل سوم نسبت به وزن سیمان به ازای 0 تا 3 درصد نانو سیلیکا مقاومت فشاری افزایش می‌یابد[18] . حبشی و همکاران در سال 2014 نشان دادند 4 درصد نانو سیلیکا و 0.8 درصد فوق روان کننده از مقدار سیمان، مقاومت فشاری و خمشی 7، 28 و 42 روزه بتن را افزایش می‌دهد. و بهینه ترین حالت برای تأثیر نانو سیلیکا و فوق روان کننده است[19] . در سال 2015 شیخ و همکاران نشان دادند که حضور فوق روان کننده نسل سوم و نانو رس و نانو سیلیکا مقاومت‌های اولیه ملات سیمان را 26 تا 28 درصد افزایش می‌دهد[20] . با بهبود بخشی دمایی، با افزایش دما از 25 تا 450 درجه سانتی‌گراد، در استفاده‌های 0، 1 و 2 درصد وزنی نانوآلومینا در عدم حضور فوق روان کننده، افزایش مقاومت فشاری 10.89%، 31.03% و 20.33% و افزایش مقاومت فشاری 25.22%، 45.74% و 28.49% در حضور فوق روان کننده به‌دست‌آمده است[21] . در سال 2011 تأثیر نانو اکسید مس بر روی بتن خود تراکم انجام شد. که نتایج نشان می‌دهد نانو اکسید مس به‌عنوان جایگزین بخشی سیمان تا 4 درصد وزنی می‌تواند کلسیم هیدروکسید در سنین اولیه افزایش دهد و تشکیل ژل C-S-H را تسریع ببخشد. که این امر باعث افزایش مقاومت فشاری در سنین اولیه می‌شود. نانو اکسید مس همچنین ساختار منافذ بتن را بهبود می‌بخشد[22] . در سال ۲۰۱۸، Khoshroo et al با استفاده از میکرو نانو حباب و پوزولان های طبیعی زئولیت و چکنه نشان دادند که زئولیت و چکنه به طور قابل ملاحظه ای خواص مکانیکی و دوام بتن را بهبود می بخشد. علاوه بر این استفاده از میکرو نانو حباب خواص مکانیکی بتن مانند مقاومت فشاری و کششی را بهبود می بخشد و میزان جذب آب و نفوذ پذیری کلرید را کاهش می دهد. درصد بهینه در مقاومت فشاری و مقاومت کششی و مقاومت الکتریکی برای مخلوط بتن شامل ترکیبی از 10% زئولیت، 10% چکنه و 100% میکرو نانو حباب است[23].

در این پژوهش به بررسی تاثیر همزمانی حضور آب حاوی میکرو نانو حباب هوا و فوق روان کننده به منظور بهبود کارایی کاهش یافته بتن و ملات سیمان حاوی میکرو نانو حباب هوا با اضافه کردن فوق روان کننده می پردازد. برای این منظور از سه غلظت متفاوت از حد پایین و حد متوسط و حد بالای افزودنی کاهنده ی آب استفاده شده است. همینطور از تمام پتانسیل افزودنی کاهنده آب از جمله افزایش روانی بتن و ملات، کاهش آب مصرفی و کاهش عیار سیمان ملات در این پژوهش استفاده شده است. در بخش اول، تأثیر میناب بر مشخصات مکانیکی ملات سیمان پرداخته شد، سپس در بخش دوم، تأثیر میناب در حضور سه غلظت از فوق روان کننده (,0.5% ,0.9% 1.4%) بر مشخصات مکانیکی ملات سیمان با نسبت های آب به سیمان های قبلی موردمطالعه قرار گرفت. بدین منظور تعداد ۱۶ نمونه آزمایشگاهی خمیر سیمان برای آزمایش زمان‌گیرش، ۱۶ نمونه ملات سیمان برای آزمایش جریان سیمان، ۴۸ نمونه ملات سیمان برای آزمایش مقاومت فشاری ملات ساخته شد و در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه صنعتی شاهرود مورد آزمایش قرار گرفت.

۲- برنامه آزمایشگاهی

به منظور بررسی تاثیر همزمان فوق روان کننده و آب حاوی MNB بر مشخصات مکانیکی ملات سیمان ابتدا تعدادی نمونه ی خمیر و ملات سیمان برای آزمایش زمان گیرش و جریان ملات سیمان و مقاومت فشاری ملات سیمان در حضور سه درصد فوق روان کننده (0.5%، 0.9% و 1.4% وزن سیمان) با آب شهری و آب حاوی میکرو نانو حباب ساخته و باهم مقایسه شد. آزمایش طیف سنج فلورسانس پرتو ایکس۳ بر روی خمیر سفت شده سیمان با آب شهری و آب میکرو نانو حباب ساخته شده است. در جدول ۱ جزئیات کامل از روش آزمایش ها، تعداد نمونه، سنین آزمایش شده نیز آورده شده است. برای هر طرح اختلاط ۲ نمونه جهت کاهش خطا ساخته شد.

جدول ۱: جزئیات برنامه آزمایشگاهی

اسم آزمایش	روش آزمایش	تعداد کل نمونه ها	سن (روز)
زمان گیرش سیمان	ISIRI 392	۱۶	-
جریان ملات سیمان	ASTM C1437	۱۶	-
مقاومت فشاری ملات سیمان	ASTM C109	۴۸	۷- ۲۸
XRF	ASTM E1621	۲	۷

[3] X-Ray Flourence(XRF)

۲-۱- مشخصات مصالح مورد استفاده

سیمان پرتلند تیپ ۲ مطابق استاندارد ۳۸۹ ملی ایران ساخته شده توسط شرکت سیمان شاهرود برای ساخت ملات و خمیر سیمان استفاده شده است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان استفاده شده در جدول ۲ آورده شده است. آب استفاده‌شده در این تحقیق از آب لوله کشی شهری شهرستان شاهرود استفاده شد. آب حاوی MNB توسط مولد T3-2500 ساخت شرکت نوفناوران میناب طوس به کمک فرآیندهای هیدرودینامیکی موجود در آزمایشگاه نانو سیالات در محیط‌های متخلخل دانشگاه صنعتی شاهرود- ایران تولید و استفاده‌شده‌است.

جدول ۲: مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان(بر گرفته از آزمایشگاه کارخانه سیمان شاهرود)

مشخصات شیمیایی								
اجزای تشکیل دهنده(%)								
SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	Na2O	K2O	SO3	Loss on ignition
21.2	4.48	3.96	63.36	1.52	0.37	0.51	2.5	1.18
مشخصات فیزیکی								
نرمی(cm2/gr)	انبساط(%)	وزن مخصوص	مقاومت فشاری(kg/cm2)					
3300	0.039	3.15	۳ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه			
			275	372	469			

افزودنی مورد استفاده فوق روان کننده (Super-Plasticizer یا SP) بر پایه ی پلی کربوکسیلیک اسید اصلاح شده به رنگ سبز تیره و ترکیب یونی آنیونی و حالت فیزیکی مایع، با وزن مخصوص 1.1 کیلوگرم بر لیتر و از افزودنی‌های نوع G مطابق ASTM C494 و استاندارد ملی ایران ISIRI 2930 می‌باشد.

۲-۲- طرح اختلاط و قالب گیری نمونه ها

برای تهیه خمیر سیمان برای زمان گیرش، تهیه ملات سیمان برای جریان ملات سیمان و مقاومت فشاری ملات سیمان در سه غلظت 0.5%، 0.9% و 1.4% وزن سیمان استفاده شد که جزئیات آن در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳: طرح اختلاط خمیر و ملات سیمان

طرح اختلاط خمیر و ملات									
اسم آزمایش	W/C(%)	C(gr)	W or MNB(gr)	S (gr)	SP(gr)				درصد آب کاهش یافته(%)
					0%	0.5%	0.9%	1.4%	
زمان گیرش	0.25	650	162.5	-	0	3.25	5.85	9.1	-
جریان ملات سیمان	0.485	500	242	1275	0	-	-	-	0
	-	500	212.96		-	2.5	-	-	12
	-	500	188.76		-	-	4.5		22
	-	500	157.3		-	-	-	7	35
مقاومت فشاری ملات	0.485	250	121.25	687.5	0	-	-	-	0
		220	106.7	732.1	-	1.25	-	-	12
		195	94.58	769.2	-	-	2.25	-	22
		162.5	78.81	817.4	-	-	-	3.5	35

C= سیمان، W=آب شهری، MNB= آب حاوی میکرو نانو حباب هوا، S= ماسه، SP= فوق روان کننده

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آزمایشات انجام شده بر روی آب و آب حاوی میناب

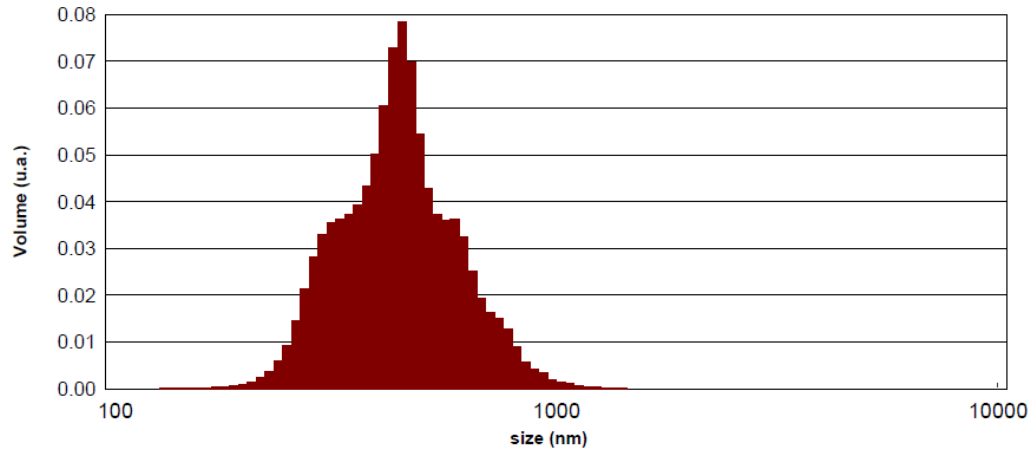
pH برای آب معمولی با ۳ غلظت فوق روان کننده و آب حاوی میکرو نانو حباب هوا با سه غلظت از فوق روان کننده، میانگین زتا پتانسیل نمونه ی ۱ روزه آب حاوی میکرو نانو حباب هوا و همینطور نمونه ی ۱ روزه آب حاوی MNB و 0.9% فوق روان کننده در جدول

۴ نشان داده شده است. توزیع و ابعاد میکرو نانو حباب هوا روی نمونه ی ۱ روزه، براساس ۳ پارامتر حجم، تعداد و شدت نمونه ها به ترتیب در شکل ۱، ۲ و ۳ نشان داده شده است.

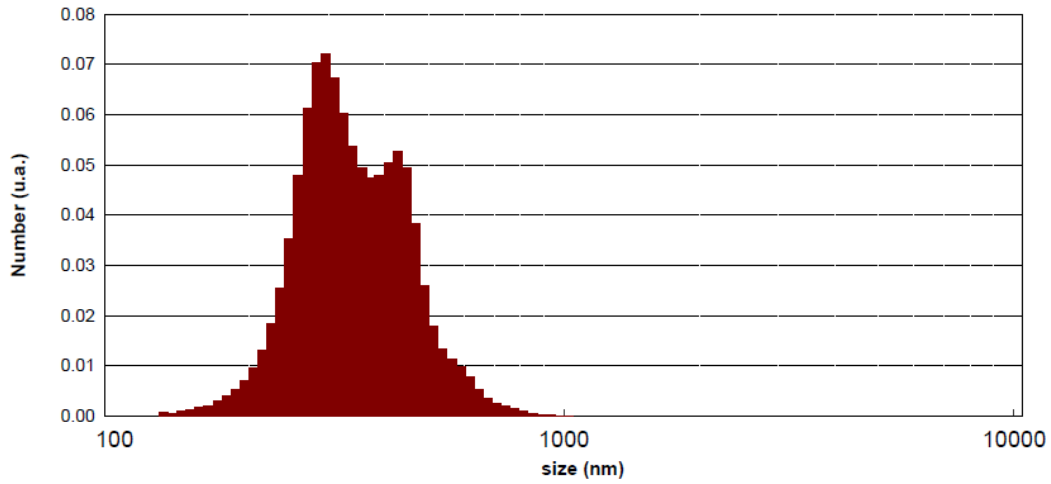
جدول ۴:مشخصات آب شهری و آب حاوی MNB در حضور سه غلظت فوق روان کننده

نوع آب استفاده شده	pH				کدورت(ntu)				میانگین زتا پتانسیل(mV)	
	SP(%)				SP(%)				SP(%)	
	0%	0.5%	0.9%	1.4%	0%	0.5%	0.9%	1.4%	0%	0.9%
آب شهری	8.17	6.3	6.21	6.13	1.54	10	11	12.31	-	-
آب حاوی میکرو نانو حباب هوا	8.34	9.33	9.85	10.2	29.12	8	9.33	11.77	-28.35	-22.21

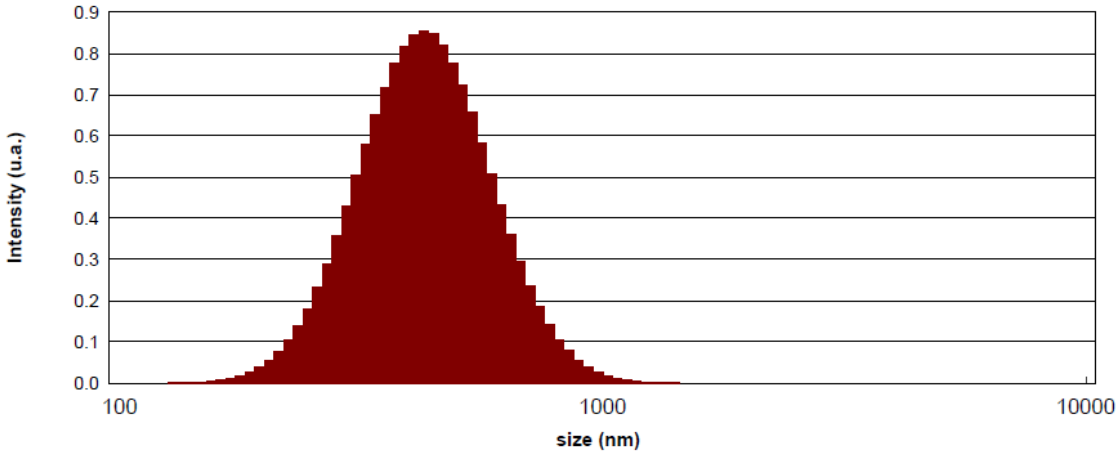
میکرو- نانو حباب هوا، کدورت را افزایش داده است که به این دلیل است در ابتدا امکان حل شدن بیشتر هوا وجود دارد و لذا ذرات، به صورت محلول یا به صورت محدوده ی وسیعی از حباب های با اندازه های متفاوت موجود هستند. چون دستگاه کدورت سنج از نور مرئی برای اندازه گیری تفرق استفاده می کند، لذا کدر بودن به معنی وجود ذرات بزرگتر از طول موج های مرئی در آب است[14]. نتایج بدست آمده با نتایج مظفری نائینی و همکاران شباهت دارد[24]. با اضافه کردن فوق روان کننده به آب حاوی میکرو نانو حباب، کدورت کاهش پیدا کرده است که علت این امر را می توان گفت که میکرو نانو حباب هوا باعث جدا شدن ملکول های فوق روان کننده و در واقع فاصله گرفتن آنها از هم شده اند که این امر باعث جذب نور کمتر و یا عبور نور بیشتر و در واقع کدرت کمتر شده است.



شکل ۱: توزیع آماری قطر حباب ها براساس حجم نمونه ها



شکل ۲: توزیع آماری قطر حباب ها براساس تعداد نمونه ها



شکل ۳: توزیع آماری قطر حباب ها براساس شدت نمونه ها

نتایج زتا پتانسیل نشان می دهد میکرو نانو حباب های هوای موجود در آب شهری و آب شهری بعلاوه فوق روان کننده پایداری چند روزه را تجربه می کنند و مقدار منفی زتا پتانسیل نشان دهنده ی این است که در پوسته‌ی حباب‌های تشکیل شده در آب بارهای منفی وجود دارد. که نتایج در این پژوهش تطابق خوبی با نتایج Ushikubo et al, 2010 در قسمت زتا پتانسیل آب حاوی میکرو نانو حباب هوا دارد[25]. با اضافه کردن فوق روان کننده به آب حاوی میکرو نانو حباب هوا، زتا پتانسیل کاهش پیدا کرده است. دلیل این کاهش به خاطر این است که ماده ی فوق روان کننده ماهیت آنیونی دارد و دارای بار منفی است که ذرات مثبت جذب شده به بار منفی میکرو نانو حباب هوا را به سمت خود می کشد که این امر باعث باز شدن لایه برشی می شود در واقع زتا پتانسیل کاهش می یابد.

میکرو نانو حباب هوا، pH محلول آب را افزایش داده است که به این معنی است محیط بازی تر شده که دلیل این امر را می توان به این پدیده نسبت داد، سطح پوسته ی حباب ها دارای بار منفی است که H^+ موجود در آب را به خود جذب می کند و باعث می شود که محیط محلول باز تر شود.

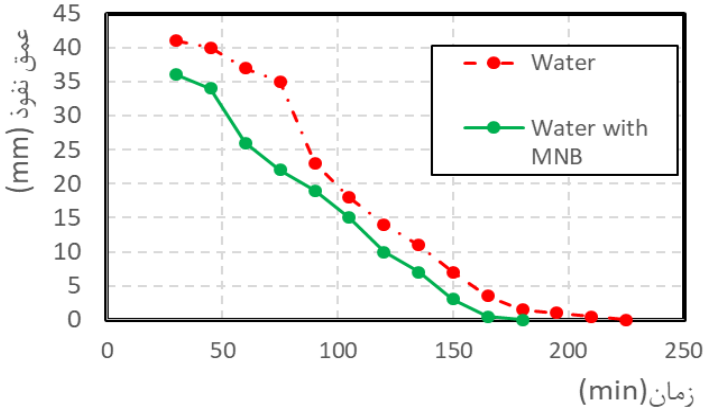
با توجه به نتایج حاصل شده از آزمایش با اضافه کردن فوق روان کننده به آب به دلیل این که ماهیت آن اسیدی است با افزایش غلظت فوق روان کننده محیط محلول اسیدی‌تر می‌شود زیرا با اضافه کردن فوق روان کننده به آب H_3O^+ در محیط آزاد شده که محلول را اسیدی می‌کند. مقدار H_3O^+ با غلظت فوق روان کننده رابطه ی مستقیم دارد و با افزایش غلظت فوق روان کننده، مقدار H_3O^+ نیز افزایش می‌یابد [26].

$$RCOOH + H_2O -> RCOO^- + H_3O^+ \quad \text{(زنجیره ی مولکولی)} \qquad (۱)$$

اما با اضافه کردن فوق روان کننده به آب حاوی MNB محیط محلول بازی شد که با افزایش غلظت فوق روان کننده محیط محلول، بازی‌تر شده است. علت این پدیده این است با توجه به آزمایش زتا پتانسیل میکرو- نانوحباب‌ها دارای بار منفی در پوسته خود هستند و قدرت جذب یون مثبت بالایی دارند، این بار منفی موجود در اطراف حباب، H_3O^+ به وجود آمده از حل شدن فوق روان کننده در آب را جذب می‌کند و باعث می‌شود که خاصیت اسیدی از بین رفته و محیط را بازی کند. با افزایش غلظت فوق روان کننده به دلیل قدرت بالای بار منفی موجود در پوسته‌ی حباب تعداد زیادی H_3O^+ را جذب کرده و بازی‌تر شدن بیشتر محیط محلول را در پی دارد. با توجه به نمودارهای توزیع ابعاد میکرو نانو حباب هوا، نتایج نشان می دهد که این نانو ماده ساختار میکرویی و نانویی دارند که این نتایج با نتایج Arefi et al, 2016 شباهت دارد[15].

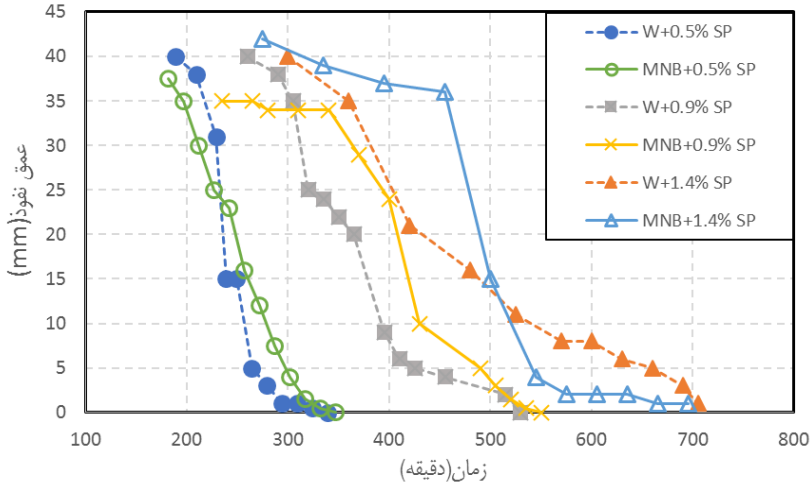
۳-۲- نتایج آزمایشات انجام شده بر روی ملات سیمان

شکل ۴ نتایج آزمایش سوزن ویکات را نشان می دهد که شامل منحنی های خمیر سیمان ساخته شده با آب معمولی و WMNB است. همانطور که از شکل ۵ مشخص است WMNB باعث کاهش زمان گیرش خمیر سیمان در مقایسه با نمونه شاهد می شود. زمان گیرش اولیه در نفوذ ۲۵ میلی متری سوزن ویکات در خمیر سیمان، حدود ۳۰ دقیقه و زمان گیرش ثانویه در نفوذ ۰ میلی متری سوزن ویکات در خمیر سیمان، حدود ۹۰ دقیقه کاهش پیدا کرده است. عارفی و همکاران (۲۰۱۶) نیز، کاهش زمان گیرش را اعلام کردند[15]. در واقع زودگیر کردن فرآیند گیرش اولیه حاکی از این امر است که MNB موجب افزایش فرایند هیدراتاسیون و ساختن سریع تر ساختار، نسبت به آب معمولی شده است. لذا انتظار میرود در سنین اولیه افزایش مقاومت فشاری داشته باشیم. این خاصیت MNB ها مانند سایر نانو مواد، (بطور مثال: نانو سیلیس [27]، نانو تیتانیوم [28] و نانو آلومینا [29]) میباشد.



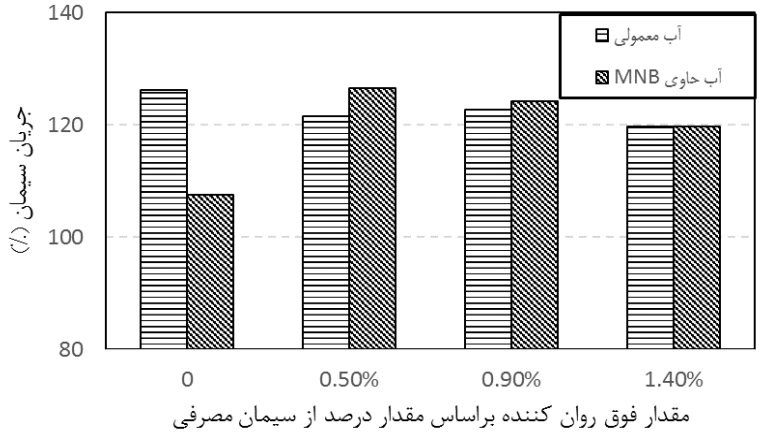
شکل ۴: مقایسه زمان‌گیرش سیمان با آب و میناب

با اضافه کردن فوق روان کننده زمان‌گیرش اولیه و ثانویه خمیر سیمان با آب به ترتیب به‌طور متوسط 288% و 138% افزایش یافت و زمان‌گیرش اولیه و ثانویه خمیر سیمان حاوی میناب به ترتیب به‌طور متوسط 555% و 207% افزایش یافت. در مقایسه میناب و آب در حضور درصدهای مختلف فوق روان کننده می‌توان گفت در درصدهای 0.5 و 0.9 ابتدا اثر زود گیری میناب عمل می‌کند و باعث کاهش زمان‌گیرش سیمان می‌گردد[15, 30] ولی با گذشت زمان این اثر زود گیری از بین رفته و اثر کندگیری فوق روان کننده جایگزین آن می‌شود. اما در غلظت 1.4% فوق روان کننده این قضیه برعکس شده به این صورت که ابتدا اثر کندگیری فوق روان کننده عمل کرد، سپس با گذشت زمان اثر زود گیری میناب اعمال شد که مقایسه زمان‌گیرش سیمان با آب و میناب در حضور درصدهای مختلف فوق روان کننده در شکل ۵ نشان داده شده است.



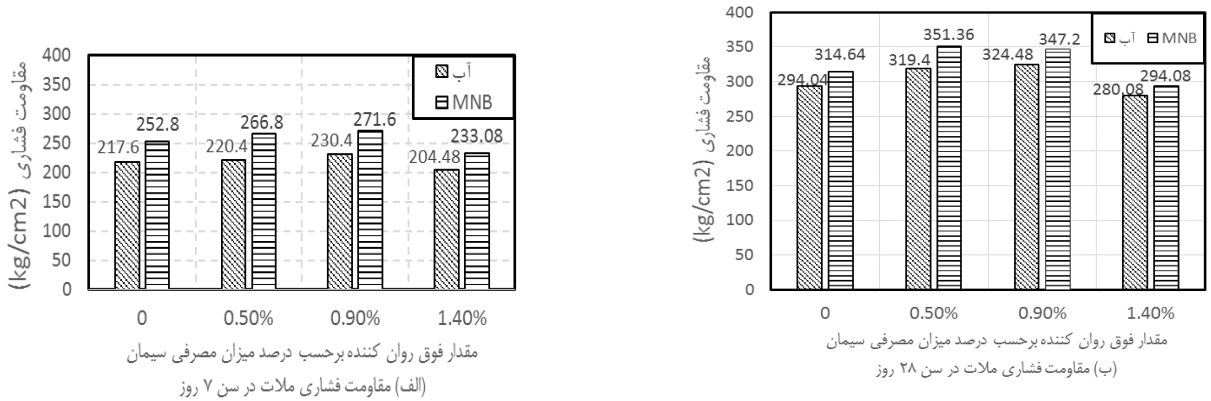
شکل ۵: مقایسه زمان‌گیرش سیمان با آب و میناب در حضور درصدهای مختلف فوق روان کننده

با توجه به زود گیر شدن سیمان انتظار می‌رود آب حاوی MNB جریان ملات سیمان را کاهش دهد که نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش جریان ملات سیمان، نشان می‌دهد آب حاوی MNB جریان ملات سیمان را کاهش داد ازآنجایی‌که جریان ملات سیمان بیانگر کارایی ملات سیمان می‌باشد و کاهش آن، منجر به کاهش کارایی ملات سیمان می‌شود، آب حاوی میکرو- نانوحباب‌ها برخلاف عملکرد حباب‌های معمول در ساخت بتن حباب‌دار که با کمک مواد شیمیایی مضاف ساخته می‌شوند عمل می‌کند[31] . ولی با اضافه کردن فوق روان کننده به ملات سیمان حاوی MNB، باعث افزایش جریان سیمان نسبت به ملات حاوی MNB بدون فوق روان کننده شد. نتایج آزمایش جریان ملات سیمان در شکل ۶ نشان داده شده است. که علت این امر بخاطر عملکرد فوق روان کننده است که ذرات سیمان را جذب می کند و با نیروی دافعه، آب محبوس شده در بین ذرات سیمان را آزاد می کند که این امر به کارایی ملات سیمان کمک می کند و باعث افزایش روانی می شود.



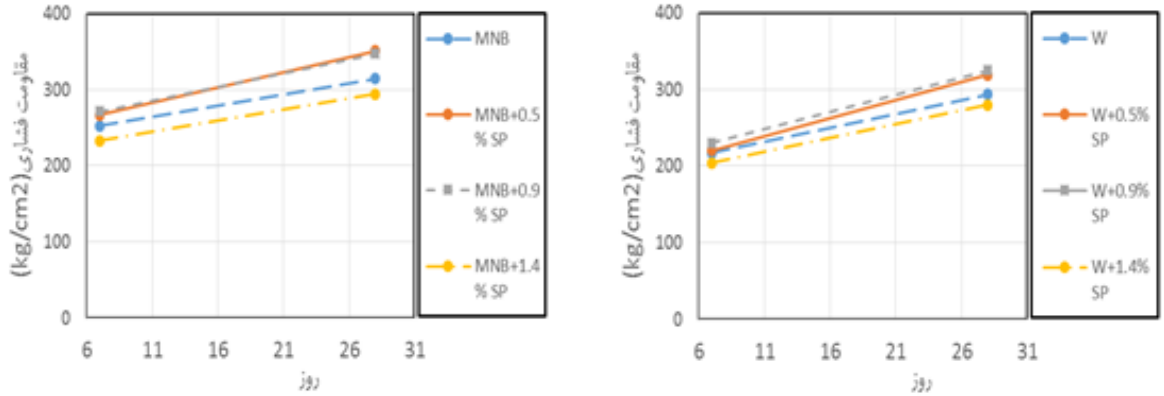
شکل ۶: مقایسه جریان ملات سیمان با آب حاوی میکرو نانو حباب هوا با ملات سیمان با آب شهری در حضور ۳ غلظت از فوق روان کننده

با توجه به طرح مخلوط ملات سیمان برای آزمایش مقاومت فشاری ملات سیمان ارائه‌شده در جدول ۳ نتایج نشان داد که حضور میناب در ملات سیمان باعث افزایش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه ملات سیمان می‌گردد. همین‌طور ملات سیمان با میناب در حضور فوق روان کننده باعث افزایش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه شده است. اما این افزایش مقاومت با گذشت زمان کمتر می‌شود که شکل ۷ این مطلب را نشان می‌دهد. همان‌طور که در نتایج پیداست در سن ۷ روزه، مقاومت فشاری ملات سیمان با میناب ۱۶ درصد افزایش نسبت ملات سیمان با آب معمولی داشت و این افزایش به ۷ درصد در سن ۲۸ روزه رسید. Han و همکاران نیز با اضافه کردن میکرو نانو حباب هیدروژن در سن ۷ روزه، افزایش مقاومت فشاری حدود ۲۵ درصد و در سن ۲۴ روزه افزایش مقاومت فشاری حدودا ۸ درصدی در نسبت آب به سیمان 0.485 گزارش کردند[17]. که در مطالعه حاضر نتایج یکسانی با مطالعه ی Han و همکاران[17] بدست آمد که نتایج نشان می دهد آب حاوی میکرو نانو حباب هوا خاصیت خود را با تغییر گاز درون حباب ها حفظ کرده اند. به دلیل گیرش سریع سیمان با میناب، کارایی و جریان ملات سیمان کاهش پیدا می‌کند که برای برطرف کردن کاهش آن از فوق روان کننده استفاده شد که نتایج نشان داد بیشترین مقاومت فشاری بهینه در 0.5% فوق روان کننده با افزایش ۲۱ درصدی در سن ۷ روزه و افزایش ۱۰ درصدی در سن ۲۸ مشاهده شد. در 0.9% فوق روان کننده مقاومت فشاری ملات سیمان حاوی میناب نسبت به ملات سیمان با آب در سن ۷ روزه ۱۸ درصد افزایش و در ۲۸ روزه ۷ درصد افزایش داشت و همین‌طور در 1.4% فوق روان کننده مقاومت فشاری ملات سیمان به دلیل کاهش شدید سیمان کمتر از حالت بدون فوق روان کننده شد و مقاومت فشاری ملات سیمان با میناب نسبت به ملات سیمان با آب، در سن ۷ روزه ۱۴ درصد افزایش و ۲۸ روزه ۵ درصد افزایش داشت. این سیر نزولی روند کسب مقاومت فشاری ملات سیمان نشان می‌دهد که این افزایش مقاومت فشاری به مقدار سیمان هم بستگی دارد هرچقدر سیمان کم باشد این افزایش کمتر بوده و در طی زمان سریع‌تر این افزایش، کم می‌شود. که نتایج در این پژوهش با نتایج Shaikh, 2015 شباهت دارد[20].



شکل ۱: مقاومت فشاری ملات سیمان با آب و میناب در حضور درصدهای مختلف فوق روان کننده الف) در سن ۷ روزه ب) در سن ۲۸ روزه

روند کسب مقاومت مقاومت فشاری ملات حاوی میناب و آب معمولی در حضور درصدهای مختلف فوق روان کننده در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸: روند کسب مقاومت فشاری ملات سیمان حاوی میناب و آب در حضور درصد های مختلف روان کننده

۳-۳- آزمایش XRF

نتایج در جدول ۵ نشان می‌دهد میکرو- نانوحباب باعث افزایش اکسیدهای SiO2، Al2O3، MgO و TiO2 و کاهش اکسیدهای Fe2O3، CaO شده است و همین‌طور میزان مواد فرار(LOI) را کاهش داده است. وقتی سیمان در آب ریخته می شود برخی از یون های سیمان مانند پتاسیم، منیزیم، آلومینیوم و تیتانیوم در آب حل می شوند اما وقتی در آب حاوی MNB ریخته می شود این یون ها اکسید شده و به بخش مایع بر می گردند و در نتیجه مشاهده می شود اکسید های TiO2، K2O و ... در خمیر سیمان حاوی MNB بیشتر میشود.

جدول ۵: نتایج آنالیز XRF از خمیر سیمان حاوی MNB و آب معمولی

	اکسیدهای سیمان (درصد وزنی ٪)									
آب موجود در خمیر سیمان	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	SO3	Na2O	K2O	TiO2	LOI
W	18.34	2.58	5.54	41.21	4.9	0.82	0.06	0.38	0.39	25.3
MNB	19.73	3.11	5.26	39.13	5.46	0.77	0.04	0.43	0.43	25.14
درصد افزایش ٪	7.6	20.5	-5.1	-5.1	11.4	-6.1	-33.3	13.2	10.3	-0.63

با توجه به آزمایش‌ها زتا پتانسیل و یافته‌های قبل، حباب‌های هوا دارای بار منفی در پوسته‌ی خود هستند [25]، ازآنجاکه این بار منفی اضافی منجر به افزایش توان حلالیت مواد قطبی در آب خواهد شد،[11] لذا انتظار می‌رود حلالیت CaO نیز در آب حاوی MNB افزایش یابد. بنابراین در فاز آلیت (اولین واکنش هیدراتاسیون سیمان که در رابطه ی۱ برای آب معمولی نشان داده شده است) مقدار CaO بیشتری در آب حاوی MNB حل می‌شود و کلسیم اکسید در ژل C-S-H کم شده و به کلسیم هیدروکسید اضافه می‌شود که ضریب کلسیم اکسید در ژل C-S-H کمتر از ۳ شده و برای برقراری تعادل شیمیایی و موازنه واکنش به ضریب کلسیم هیدروکسید اضافه شده و بیشتر از ۳ می‌شود. که با توجه به کاهش CaO و افزایش SiO2 از نتایج XRF و مطالب گفته شده انتظار می‌رود ژل C-S-H سیمان حاوی MNB نسبت به آب معمولی در فاز آلیت افزایش بیابد و مقاومت فشاری اولیه ملات سیمان حاوی MNB افزایش یابد و همچنین با گذشت زمان آب موجود در کلسیم هیدروکسید بخار شده و از بین می‌رود و کلسیم اکسید باقی مانده به ژل C-S-H باز گردد و انتظار می‌رود در سنین بالا مقاومت فشاری ملات سیمان تغییری آن‌چنانی نکند.

$$2C_3S + 6H_2O \rightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3Ca(OH)_2 \quad (۲)$$

$$C = CaO, S = SiO_2, H = H_2O \quad (۳)$$

جدول ۶ نشان می دهد که تاثیر همزمان میکرو نانو حباب و فوق روان کننده انبساط را افزایش می دهد که این انبساط ممکن است باعث افزایش واکنش قلیایی مصالح سنگی شود. دلیل این اتفاق را می توان به این موضوع ربط داد که با اضافه کردن فوق روان کننده به آب حاوی MNB، محیط آب، بازی شد. اکسیدهای قلیایی سیمان در محیط‌های قلیایی تمایل بیشتری به واکنش برخی از مصالح دارند که منجر به واکنش قلیایی- مصالح سنگی می‌شود و احتمال وقوع این واکنش را افزایش می‌دهد[28]. می‌توان گفت با بازی‌تر شدن آب موجود در بتن فعالیت قلیایی افزایش می یابد و که نتیجه‌ی آن واکنش قلیایی- مصالح سنگی است که منجر به خرابی بتن و همچنین تغییر در نرخ کسب مقاومت بتن می‌شود[29]. با توجه به مطالعات گذشته [30, 31] می توان گفت قلیایی های خارجی که به طور ناخواسته در بتن ایجاد می شوند، باعث افزایش واکنش قلیایی مصالح سنگی می شوند. که با نتایج در این پژوهش مطابقت دارد.

جدول ۶: نتایج آزمایش ملات منشوری تسریع شده

ملات سیمان	درصد انبساط(٪)	فعالیت قلیایی
W	0.096	بی‌ضرر
MNB	0.109	نیاز به اطلاعات بیشتر
W+0.9%SP	0.032	بی‌ضرر
MNB+0.9%SP	0.391	مضر

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی تاثیر همزمانی حضور آب حاوی میکرو نانو حباب هوا و فوق روان کننده به منظور بهبود کارایی کاهش یافته بتن و ملات سیمان حاوی میکرو نانو حباب هوا با اضافه کردن فوق روان کننده می پردازد. برای این منظور از سه غلظت متفاوت از حد پایین و حد متوسط و حد بالای افزودنی کاهنده ی آب استفاده شده است. در بخش اول، تأثیر میناب بر مشخصات مکانیکی ملات سیمان پرداخته شد، سپس در بخش دوم، تأثیر میناب در حضور سه غلظت از فوق روان کننده (0.5%, 0.9%, 1.4%) بر مشخصات مکانیکی ملات سیمان با نسبت های آب به سیمان های قبلی موردمطالعه قرار گرفت. بدین منظور تعداد ۱۶ نمونه آزمایشگاهی خمیر سیمان برای آزمایش زمان‌گیرش، ۱۶ نمونه ملات سیمان برای آزمایش جریان سیمان، ۴۸ نمونه ملات سیمان برای آزمایش مقاومت فشاری ملات ساخته شد و در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه صنعتی شاهرود مورد آزمایش قرار گرفت. مشاهدات آزمایشگاهی حاصل از این تحقیق را می توان به صورت زیر خلاصه کرد.

۱- استفاده از آب حاوی میکرو- نانوحباب‌های هوا (MNB) باعث می‌شود زمان‌گیرش اولیه و ثانویه خمیر سیمان کاهش‌یافته، اما حضور درصدهای مختلف فوق روان کننده منجر به کندگیری خمیر سیمان و افزایش چندساعتی زمان‌گیرش می‌شود. در درصدهای 0.5 و 0.9 فوق روان کننده ابتدا میکرو- نانوحباب‌ها عملکرد خود را با زود گیری خمیر سیمان نشان می‌دهند سپس فوق روان کننده اثر زود گیری آب حاوی MNB و کاهش زمان‌گیرش سیمان حاوی MNB را تا حدودی برطرف کرد اما در درصد 1.4 فوق روان کننده به دلیل غلظت بالا و مقدار زیاد فوق روان کننده بر خمیر سیمان، اثر کندگیری فوق روان کننده ابتدا عمل می‌کند.

۲- میکرو- نانوحباب باعث کاهش کارایی و اسلامپ و جریان ملات سیمان می‌شود این امر مشابه رفتار دیگر نانو ذرات در بتن است. این کاهش کارایی با استفاده از فوق روان کننده جبران می شود.

۳- در سن ۷ روزه مقاومت فشاری ملات سیمان با میناب ۱۶ درصد افزایش نسبت ملات سیمان با آب معمولی داشته است و این افزایش به ۷ درصد در سن ۲۸ روزه کاهش پیدا کرده است.

۴- به دلیل گیرش سریع سیمان با میناب، کارایی و جریان ملات سیمان کاهش پیدا می کند که برای بهبود آن از فوق روان کننده استفاده شد که نتایج نشان داد بیشترین مقاومت فشاری بهینه در ۰,۵ درصد فوق روان کننده با افزایش ۲۱ درصدی در سن ۷ روزه و افزایش ۱۰ درصدی در سن ۲۸ مشاهده شد. در ۰,۹ درصد مقاومت فشاری در سن ۷ روزه ۱۸ درصد افزایش و در ۲۸ روزه ۷ درصد افزایش داشت و همینطور در ۱,۴ درصد مقاومت فشاری به دلیل کاهش شدید سیمان کمتر از حالت بدون فوق روان کننده شد و مقاومت فشاری آن ملات سیمان با میناب در سن ۷ روزه ۱۴ درصد افزایش و ۲۸ روزه ۵ درصد افزایش داشت. این کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه نسبت به مقاومت فشاری ۷ روزه نشان می دهد که این افزایش مقاومت فشاری به مقدار سیمان هم بستگی دارد هرچقدر سیمان کم باشد این افزایش کمتر بوده و در طی زمان سریعتر این افزایش، کاهش می یابد.

مراجع

[1]- Feynman R (1960), "There´s plenty of room at the bottom", reprint from the speech given at the annual meeting of the West Coast section of the American Physical Society. Caltech Engineering and Science;23:22–36.

[2]- Birgisson B., Mukhopadhyay A. K., Geary G., Khan M., Sobolev K., (2012), "Nanotechnology in Concrete Materials, A synopsis" Transportation Research Board Technical Activities Council, Transportation Research Board 500 Fifth Street, NW Washington, D.C.

[3]- Pradesh H, (2012), "*Application of Nanotechnology in Building Materials*", International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), 2, 5, pp1077.

[4]- Chong K. P, Garboczi E. J (2002), "Smart And Designer Structural Material Systems", Process in Structural Engineering and Materials, 4(4):417-430.

[5]- Boshehrian A, Hosseini P,(2011), "Effect of nano-SiO2 particles on properties of cement mortar applicable for ferrocement elements",

[6]- Khanzadi M, Tadayon M, Sepehri H and Sepehri M, (2010), "Influence of Nano-Silica Particles on Mechanical Properties and Permeability of Concrete", international conference on sustainable construction material and technologies, ISBN:978-1-4507-1490-7.

[7]- Abd el-baky S, yehia S, khalil I, (2013), "influence of nano-silica addition on properties of fresh and hardened cement mortar".

[8]- Nazari A, Riahi Sh, Riahi Sh, Shamekhi S.F, Khademno A,(2010), "The effects of incorporation Fe2O3 nanoparticles on tensile and flexural strength of concrete", Journal of American Science, 6, 4, pp 90.

[9]- Nazari A, Riahi Sh, Riahi Sh, Shamekhi S.F, Khademno A,(2009), "Mechanical properties of cement mortar with Al2O3 nanoparticles", Journal of American Science, 6, 4, pp94.

[10]- Sanchez F., Sobolev K., (2010), "Nanotechnology in concrete – A review", Construction and Building Materials 24: 2060–2071.

[11]- Tsuge H, (2007), "The Latest Technology on Micro-Nano bubbles", CMC Publishing Co, Ltd, Japan

[12]- Agarwal A, Jem Ng W, Liu Y,(2011), "Principle and application of microbubble and nanobubble technology for water treatment", journal Chemospher

[13]- Hunter R, Ottewill H, Rowell R.L, (1981), " Zeta Potential in Colloid Science" ISBN: 978-0-12-361961-7

[14]- Arefi A., (2013), "Application of micro-nano bubbles and nano material in improvement

mechanical and insulation properties of building material (with emphasize on concrete)" (in Persian), MSc Thesis, Shahrood University of Technology, Iran.

[15]- Arefi A., Saghravani S.F., Mozaffari Naeeni R., (2016), "Mechanical Behavior of Concrete, Made with Micro-Nano Air Bubbles", Civil Engineering Infrastructures Journal, June, 49(1): 139–147.

[16]- Maruyama T., Takahashi N., Hashimoto S., Date S., (2015) "Effect on the Flow Properties of the Mortar using Micro-Nano Bubbles", Advanced Materials Research, Vol. 1110, pp 249-252.

[17]- Han J. G., Lee. S. H., Na J.J., Hong G. G., Lee J. H., Kim J. M., (2012), "Effect of Nano-Bubble Water for the Compressive Strength of Cement Mortar using in Pile Foundation ", Korean Society of Civil Engineers, Vol.2012, NO.10, 1090-1093. (in Korean)

[18]- Rauof, E. Elkady, H. Ragab, M, (2014), "Investigation on Concrete Properties for Nano Silica Concreteby using Different Plasticizers". Civil and Environmental Research, Vol.6, No.9.

[19]- Habashi, S. Ahadiyan, J (2014). "Effects of Nano-material and R-B super plasticizer on the compressive strength of concrete, Type 2 Portland cement". Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences, Vol 3 (4) March: 40-47.

[20]- Shaikh, F. Supit, W, (2015) "Effects of Superplasticizer Types and Mixing Methods of Nanoparticles on Compressive Strengths of Cement Pastes". Journal of Materials in Civil Engineering.

[21]- Heikal M, Ismail M.N, Ibrahim N.S (2015)," Physico-mechanical, microstructure characteristics and fire resistance of cement pastes containing Al2O3 nano-particles" Construction and Building Materials 91 232–242.

[22]- Nazari A, Riahi Sh,(2011), "Effects of CuO nanoparticles on compressive strength of self-compacting concrete", Indian Academy of Sciences, 36, 3, pp 371.

[23]- Khoshroo M., Shirzadi Javid A. K., Katebi A., (2018), "Effects of micro-nano bubble water and binary mineral admixtures on the mechanical and durability properties of concrete", Construction and Building Materials 164 (2018) 371–385.

[25]- Ushikubo F, Enari M, Furukawa T, Nakagawa R, Makino Y, (2010), " Zeta- potential of Micro and Nano- bubble in Water Produced by Some Kinds of Gases", IFAC Proceeding Volumes, Volume 43, Issue 26, Pages 283- 288

[26]- Dhir R, Hewlett P, (1996), " Radical Concrete Technology", Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland

[27]- Qing Y., Zenan Z., Deyu K., Rongshen C, (2007), "Influence of nano-SiO2 addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume", Construction and Building Materials 21: 539–545.

[28]- Sorathiya J., Shah S., Kacha S., (2017), "Effect on Addition of Nano "Titanium Dioxide" (TiO2) on Compressive Strength of Cementitious Concrete", ICRISET2017. International Conference on Re-search and Innovations in Science, Engineering &Technology. Volume 1, Pages 219-225.

[29]- Li Z., Wang H., He S., Lu Y., Wang M., (2006), "Investigations on the preparation and mechanical properties of the nano-alumina reinforced cement composite", Materials Letters 60: 356–359.

[30]- Torki A, Saghravani S,F, Shafaei J. (2017). "Experimental evaluation of effect of Micro Nano bubble in presence of super-plasticizer on setting time and compressive strength of cement mortar". 9TH NATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE, Tehran-Iran.(in Persian)

[31]- Kosmatka, Steven H, Kerkhoff, Beatrix, Panarese, William C. (2003). "Design and Control of Concrete Mixtures", EB001, 14th edition, CHAPTER 8, Air-Entrained Concrete, USA.