





دانشکده: مهندسی عمران

گروه: مهندسی آب و محیط زیست

کاربرد میکرو نانو حباب و نانو مواد در بهبود رفتارهای مکانیکی و عایق بودن مصالح ساختمانی

(با تاکید بر بتن)

دانشجو: امیر عارفی

استاد راهنما:

دکتر سید فضل الله ساغروانی

استاد مشاور:

مهندس رضا مظفری نائینی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

ماه و سال انتشار:

شهریور ۱۳۹۳

دانشگاه صنعتی شاهرود
پایان نامه کارشناسی ارشد آقای امیر عارفی

تحت عنوان: کاربرد میکرو نانو حباب و نانو مواد در بهبود رفتارهای مکانیکی و عایق بودن مصالح ساختمانی (با تاکید بر بتن) در تاریخ ۹۳/۶/۲۴ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه بسیار خوب (نمره ۱۸,۰۱) مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی : مهندس رضا مظفری نائینی		نام و نام خانوادگی : دکتر سید فضل الله ساغروانی
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی : دکتر مهدی گلی		نام و نام خانوادگی : دکتر فرشید جندقی علائی
			نام و نام خانوادگی : دکتر امیر عباس عابدینی
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تقدیم می‌کنم به :

همسر عزیزم

به آنکه سایبان عشق و آرامش، و برترین آموزگار خوش بینی و امید

من در دوران تحصیل بود؛ و از تمام زحمات، مهربانی‌ها و صبر

بی‌پایانش عاشقانه تشکر می‌کنم.

نخستین سپاس و ستایش از آن خداوندی است که بنده کوچکش را در دریای بیکران اندیشه، قطره ای ساخت تا وسعت آن را از دریچه اندیشه های ناب آموزگارانی بزرگ به تماشا نشیند.

همچنین شایسته است از استاد فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر سید فضل الله ساغروانی که با کرامتی چون خورشید، سرزمین دل را روشنی بخشیدند و گلشن سرای علم و دانش را با راهنمایی های کار ساز و سازنده بارور ساختند؛ تقدیر و تشکر نمایم.

تعهد نامه

اینجانب امیر عارفی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته عمران-سازه‌های هیدرولیکی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه " کاربرد میکرو نانو حباب و نانو مواد در بهبود رفتارهای مکانیکی و عایق بودن مصالح ساختمانی (با تاکید بر بتن)" تحت راهنمایی دکتر سید فضل الله ساغروانی به عنوان استاد راهنمای متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه / رساله توسط اینجانب انجام شده و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه / رساله تا کنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرکی یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام << دانشگاه صنعتی شاهرود >> و یا <<shahrood university of technology>> به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افراد که در به دست آوردن نتایج اصلی پایان نامه / رساله تاثیر گذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه / رساله رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه / رساله ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه / رساله ، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق و نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحوی مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه / رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده:

در این پژوهش تاثیر میکرو-نانو حباب‌های (MNB) هوا بر ویژگی‌های مکانیکی بتن مورد آزمایش قرار گرفت. برای ساخت بتن از طرح اختلات با نسبت آب به سیمان ۰,۶ استفاده گردید. در کلیه آزمایشات از نمونه‌های سه تایی استفاده گردید و هر آزمایش حداقل دوبار انجام شد تا از تکرار پذیری آن اطمینان حاصل شود. طبق آزمایشات انجام شده، میکرو-نانو حباب‌های هوا در بتن باعث افزایش مقاومت‌های: فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی بتن می‌شود. دمای هیدراسیون و زمان گیرش 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. طبق نتایج بدست آمده از این پژوهش، رفتار بتن حاوی MNB مشابه بتن دارای دیگر نانو ذرات می‌باشد و شباهتی به بتن هوادار ساخته شده با مواد افزودنی حباب زا ندارد.

فهرست جداول

- جدول شماره ۱-۲ : خلاصه‌ای از خواص بتن هوادار..... ۱۰
- جدول شماره ۱-۴: نتایج بدست آمده از آزمایش اسلامپ، آزمایش اول..... ۵۱
- جدول شماره ۲-۴: درصد انحراف از میانگین نتایج بدست آمده از آزمایش اسلامپ ۵۱
- جدول شماره ۳-۴: نتایج بدست آمده از آزمایش اسلامپ، آزمایش دوم ۵۱
- جدول شماره ۴-۴: درصد انحراف از میانگین برای نتایج آزمایش اسلامپ، آزمایش دوم ۵۲
- جدول شماره ۵-۴: مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه های ساخته شده با آب حاوی نانو حباب و آب معمولی، آزمایش اول ۵۳
- جدول شماره ۶-۴: انحراف از میانگین نتایج مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه های ساخته شده با آب حاوی نانو حباب و آب معمولی، آزمایش اول ۵۳
- جدول شماره ۷-۴: مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه های ساخته شده با آب حاوی نانو حباب و آب معمولی، آزمایش دوم..... ۵۴
- جدول شماره ۸-۴: انحراف از میانگین نتایج مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه های ساخته شده با آب حاوی نانو حباب و آب معمولی، آزمایش دوم ۵۴
- جدول شماره ۹-۴: مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های ساخته شده با آب حاوی نانو حباب و آب معمولی، آزمایش اول..... ۵۵
- جدول شماره ۱۰-۴: انحراف از میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های ساخته شده با آب حاوی نانو حباب و آب معمولی، آزمایش اول ۵۵
- جدول شماره ۱۱-۴: مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های ساخته شده با آب حاوی نانو حباب و آب معمولی، آزمایش دوم..... ۵۶
- جدول شماره ۱۲-۴: انحراف از میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های ساخته شده با آب حاوی نانو حباب و آب معمولی، آزمایش دوم ۵۶
- جدول شماره ۱۳-۴: مدول گسیختگی و نیروی Max شکست تیر بتنی، آزمایش اول..... ۶۱
- جدول شماره ۱۴-۴: درصد انحراف معیار مدول گسیختگی و نیروی Max شکست تیر بتنی، آزمایش اول ۶۱
- جدول شماره ۱۵-۴: مدول گسیختگی و نیروی Max شکست تیر بتنی، آزمایش دوم ۶۲
- جدول شماره ۱۶-۴: درصد انحراف معیار مدول گسیختگی و نیروی Max شکست تیر بتنی، آزمایش دوم ۶۲
- جدول شماره ۱۷-۴: بیشترین نیروی فشاری نمونه های استوانه ای استاندارد و مقاومت کششی (برزیلی) نمونه‌های استوانه ای استاندارد ۶۴
- جدول شماره ۱۸-۴: انحراف از میانگین نتایج بیشترین نیروی فشاری و مقاومت کششی (برزیلی) نمونه های استوانه ای استاندارد ۶۴
- جدول شماره ۱۹-۴: زمان گیرش اولیه و ثانویه مخلوط سیمان با آب حاوی نانو-میکرو حباب و آب معمولی ۶۶

فهرست مطالب

- فصل اول: مقدمه ۱
- ۱-۱- مقدمه ۲
- ۲-۱- ضرورت انجام تحقیق ۳
- ۳-۱- زمینه نوآوری تحقیق ۴
- فصل دوم: مروری بر تحقیقات گذشته و مبانی تحقیق ۵
- ۱-۲- کلیاتی در مورد نانو مواده و ویژگی های بتن ساخته شده با این نانو مواد ۶
- ۱-۱-۲- nano-SiO₂ ۶
- ۲-۱-۲- Carbon Nanotube (CNT) ۶
- ۳-۱-۲- nano-Al₂O₃ ۷
- ۴-۱-۲- nano-Fe₂O₃ ۷
- ۵-۱-۲- nano-TiO₂ ۸
- ۲-۲- کاربرد مواد افزودنی حبابزا در بتن و ویژگی های بتن حاوی این افزودنی ها ۹
- ۳-۲- میکرو-نانو حباب های هوا ۱۱
- ۱-۳-۲- کلیاتی درباره میکرو نانو حباب ها ۱۱
- ۲-۳-۲- چگونگی تولید و ساخت نانو میکرو حباب ها ۱۳
- ۳-۳-۲- روش اندازه گیری ابعاد نانو میکرو حبابها ۱۴
- ۴-۳-۲- اصول کاویتاسیون هیدرو دینامیکی ۱۶

- ۱۸-۳-۲- تئوری پتانسیل سطحی از نانو - میکرو حباب ها ۱۸
- ۲۱-۳-۲- اثر برخورد ذره با حباب ۲۱
- فصل سوم ۲۳
- ۲۴-۱-۳- طرح اختلاط ۲۴
- ۲۵-۲-۳- تجهیزات مورد استفاده در آزمایشات ۲۵
- ۲۵-۱-۲-۳- آزمایش اسلامپ ۲۵
- ۲۵-۲-۲-۳- آزمایش مقاومت فشاری ۲۵
- ۲۵-۳-۲-۳- آزمایش مقاومت خمشی ۲۵
- ۲۶-۴-۲-۳- آزمایش مقاومت کششی ۲۶
- ۲۶-۵-۲-۳- آزمایش مدت زمان (سرعت) گیرش اولیه و نهایی بتن (سوزن ویکات) ۲۶
- ۲۷-۶-۲-۳- آزمایش تعیین تغییرات دمای هیدراسیون سیمان ۲۷
- ۲۷-۳-۳- نحوه اختلاط و قالب‌گیری: ۲۷
- ۲۷-۴-۳- شرح آزمایش‌ها : ۲۷
- ۲۷-۱-۴-۳- آزمایش اسلامپ ۲۷
- ۲۹-۲-۴-۳- آزمایش مقاومت فشاری ۲۹
- ۳۰-۳-۴-۳- آزمایش مقاومت خمشی ۳۰
- ۳۲-۴-۴-۳- آزمایش مقاومت کششی (برزیلی) ۳۲
- ۳۳-۵-۴-۳- آزمایش مدت زمان (سرعت) گیرش اولیه و نهایی بتن (سوزن ویکات) ۳۳
- ۳۴-۶-۴-۳- آزمایش تعیین تغییرات دمای هیدراسیون سیمان ۳۴

- ۳-۵- اندازه گیری ابعاد نانو - میکرو حبابها ۳۵
- ۳-۵-۱- صحت اندازه گیری ابعاد نانو - میکرو حبابها ۳۶
- ۳-۵-۲- بررسی پایداری نانو - میکرو حبابها ۳۶
- ۳-۵-۳- اندازه گیری خصوصیات شیمیایی ۳۶
- ۳-۵-۴- اندازه گیری کدورت ۳۷
- فصل چهارم ۳۹
- ۴-۱- نتایج آزمایش های صورت گرفته روی آب حاوی میکرو نانو حبابها ۴۰
- ۴-۱-۱- پایداری حباب ها در طول کارکرد دستگاه ۴۰
- ۴-۱-۱-۱- اندازه گیری کدورت در هنگام عملکرد دستگاه ۴۰
- ۴-۱-۱-۲- اندازه گیری اکسیژن حل شده در هنگام عملکرد دستگاه ۴۱
- ۴-۱-۱-۳- اندازه گیری رسانایی در هنگام عملکرد دستگاه ۴۲
- ۴-۱-۲- پایداری اندازه حباب ها از نمونه گرفته شده در طول زمان ۴۳
- ۴-۱-۲-۱- پایداری نانو - میکرو حبابها ۴۳
- ۴-۱-۲-۲- اثر pH در طول زمان نانو - میکرو حبابها ۴۶
- ۴-۱-۲-۳- اثر رسانایی محلول در طول زمان نانو - میکرو حبابها ۴۸
- ۴-۱-۲-۴- اثر دما در طول زمان نانو - میکرو حبابها ۴۸
- ۴-۱-۲-۵- اثر نانو - میکرو حبابها بر کدورت در طول زمان ۴۹
- ۴-۲- آزمایش اسلامپ ۵۰
- ۴-۳- آزمایش مقاومت فشاری ۵۳
- ۴-۴- آزمایش مقاومت خمشی ۵۸

۵۸	..... محاسبات ۱-۴-۴
۶۱	..... نتایج ۲-۴-۴
۶۳	..... آزمایش مقاومت کششی (برزیلی) ۵-۴
۶۳	..... محاسبات ۱-۵-۴
۶۴	..... نتایج ۲-۵-۴
۶۵	..... آزمایش مدت زمان (سرعت) گیرش اولیه و نهایی بتن (سوزن ویکات) ۶-۴
۶۷	..... آزمایش تعیین دمای هیدراتاسیون سیمان ۷-۴
۶۹	..... فصل پنجم
۷۰	..... نتیجه گیری ۱-۵
۷۱	..... پیشنهادهای مرتبط با موضوع تحقیق ۲-۵
۷۲	..... منابع
۷۵	..... پیوست الف

فصل اول

مقدمه

هرچند آزمایش‌ها و تحقیقات پیرامون نانو فناوری از ابتدای دهه ۸۰ قرن بیستم بطور جدی آغاز شد، اما دستاوردهای گران قیمت آن باعث گردید که تا همچنان به عنوان یکی از مهم ترین اولویت‌های تحقیقات و یکی از فناوری‌های راهبردی دهه اول قرن بیست و یکم محسوب شود. در حال حاضر برنامه‌ها و حمایت‌های بسیاری جهت رشد و پیشرفت این فناوری نو ظهور در حال انجام است. در ایران نیز به لحاظ اهمیت موضوع ستاد فناوری نانو در نهاد ریاست جمهوری تشکیل و به حمایت از پژوهش‌های نانو می‌پردازد. امروزه حوزه‌های تحقیقاتی مرتبط با نانو بسیار گسترش پیدا کرده است. یکی از این حوزه‌ها، بررسی خواص بتن حاوی نانو مواد است.

خواص، رفتار و عملکرد بتن بستگی به ساختار ماده زمینه بتن و سیمانی دارد که چسبندگی، پیوستگی و یکپارچگی آن را بوجود می‌آورد. بنابراین، 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 با افزودنی‌هایی مانند نانو لوله‌های کربنی، نانو تیتانیوم اکسید، نانو الیاف، نانو آلومینا، نانو آهن و ... قبلا مورد مطالعه قرار گرفته است

[Pradesh H, 2012].

یکی دیگر از پیشرفت‌های مهندسی در تکنولوژی بتن، توسعه بتن حاوی حباب‌های هوا در اواسط سال ۱۹۳۰ بود. بتن حباب دار به دو صورت تولید می‌شود، یا از سیمان حباب زا استفاده می‌شود و یا با اضافه کردن افزودنی حباب زا در زمان اختلاط مواد ساخته می‌شود. امروزه از افزودنی‌های حباب‌زا بیشتر برای افزایش مقاومت در برابر سیکل یخبندان استفاده می‌شود. علاوه بر این، به مزایای دیگری مانند مقاومت در برابر پوسته شدگی ناشی از مواد یخ زدا، مقاومت در برابر سولفات، مقاومت در برابر واکنش قلیا - سیلیس و بهبود کارایی بتن و ... می‌توان اشاره کرد

[Kosmatka et al, 2003].

میکرو- نانو حباب‌ها حفره‌هایی حاوی گاز در محلول آبی هستند که به روش‌های مختلفی تولید می‌شوند. یکی از این روش‌ها کاویتاسیون هیدرودینامیکی است که در این تحقیق از آن استفاده شد. کاویتاسیون هیدرودینامیکی

زمانی روی می‌دهد که به علت سرعت بالای جریان، فشار در یک نقطه در یک مایع به طور لحظه ای به زیر فشار بخار کاهش یابد.

دستگاه نانو-میکرو حباب ساز براساس پدیده کاویتاسیون هیدرودینامیکی در دانشگاه شاهرود طراحی و ساخته شده است. این دستگاه از سه بخش عمده ورود هوا (گاز)، اعمال فشار بر مخلوط هوا و آب و منطقه کاهش یا افت فشار و آزادسازی بخشی از هوای حل شده تشکیل شده است. هدف از ورود هوا در این دستگاه، افزایش حلالیت میزان هوای حل شده در آب به منظور افزایش کارایی پدیده کاویتاسیون و تولید حباب می‌باشد. بنابراین، برخلاف سایر دستگاه‌ها، گاز یا هوا در این دستگاه قبل از پمپ تزریق شده است. ویژگی طراحی و ساخت این دستگاه بنحوی است که به راحتی امکان استفاده از چندین مولد هیدرودینامیکی میکرو- نانو حباب با قطر گلوگاه های متفاوت بطور همزمان وجود دارد، که در این دستگاه از سه مولد استفاده شده است، از ویژگی‌های منحصر به فرد میکرو- نانو حباب‌ها می‌توان به پایداری آن‌ها برای چندین روز در آب اشاره نمود [مظفری نائینی، ۱۳۹۲].

در مورد استفاده از میکرو- نانو حباب‌ها در ساخت بتن تا به امروز مطالعه خاصی صورت نگرفته و در بررسی‌های قبلی با استفاده از مواد حباب‌زا بیشتر به تولید بتنی با حباب‌هایی به اندازه ۱۰ تا ۱۰۰۰ میکرو متر به هنگام طرح اختلاط پرداخته شده است، اما در این پایان نامه برای اولین بار با استفاده از میکرو- نانو حباب هوا که در آب به صورت شناور هستند به آن پرداخته می‌شود. امید است که به کمک میکرو- نانو حباب‌ها بتوان راه حل ساده تر، در دسترس تر و در عین حال ارزان تری را جهت بهبود خواص مکانیکی بتن ارائه کرد.

۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

با گسترش ساخت و ساز و افزایش چشمگیر پروژه های عظیم و پرهزینه، نیاز به تولید مصالح با بیشترین بازدهی و در عین حال کمترین هزینه بیش از پیش احساس می‌شود. یکی از روشهای مدرن در تولید مصالح با بالاترین کیفیت استفاده از فن آوری نانو است که در سالهای اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. با این حال کشورهای در حال توسعه برای استفاده از این فن آوری با مشکلاتی اعم از، عدم وجود

تکنولوژی تولید مواد در سایز نانو و بالا بودن هزینه‌ی تهیه این مواد روبرو هستند. امید است که این پژوهش بتواند روشی ارزان قیمت و در عین حال ساده و در دسترس جهت افزایش بازدهی مصالح ساختمانی خصوصا بتن ارایه کند.

۳-۱- زمینه نوآوری تحقیق

در این پژوهش یکی دیگر از نانو ذرات مورد استفاده در صنعت ساختمان علی الخصوص تولید بتن معرفی شد که آن هم، استفاده از نانو حباب‌های هوا است. از مهمترین ویژگی‌های این نانو ذره که آن را متمایز از دیگر نانو ذرات می‌کند، هزینه‌های بسیار کمتر تولید، سرعت تولید بالا و در دسترس بودن آن در هر مکان و زمان است. رفتار بتن ساخته شده با میکرو-نانو حباب‌های هوا مشابه بتن حاوی دیگر نانو ذرات است و کمتر شباهتی به بتن حباب دار ساخته شده با مواد مضاف حبابزا دارد.

۴-۱- معرفی ساختار پایان نامه

پایان نامه پیش رو مشتمل بر ۵ فصل می‌باشد. فصل اول آن مقدمه، شامل معرفی اجمالی نانو ذرات و نانو حباب‌ها است. فصل دوم مروری بر تحقیقات گذشته و مبانی تحقیق است و در فصل سوم شرح آزمایشات و تجهیزات و وسایل استفاده شده در آنها بیان گردید. در فصل چهار نتایج بدست آمده از آزمایشات و تحلیل آنها ذکر شده است. و در نهایت فصل پنجم نتیجه گیری و پیشنهادات برای دیگر پژوهش‌ها ارایه شده است.

فصل ۲

مروری بر تحقیقات گذشته و

مبانی تحقیق

۱-۲- کلیاتی در مورد نانو مواده‌ها و ویژگی‌های بتن ساخته شده با این نانو مواد:

تحقیقات زیادی در زمینه کاربرد نانو موادهای مختلف در بهبود ویژگی‌های بتن انجام شده که از جمله آن‌ها می‌توان به nano-SiO₂، Carbon nanotube (CNT)، nano – Al₂O₃، nano-Fe₂O₃، nano-TiO₂ و ... اشاره کرد. در زیر به برخی از مهمترین نانو مواد به کار رفته در بتن اشاره می‌شود:

۱-۱-۲- nano-SiO₂

با استفاده از نانوذرات سیلیس می‌توان میزان تراکم ذرات را در بتن افزایش داده که این امر به افزایش چگالی میکرو و نانو ساختارهای تشکیل دهنده بتن و در نتیجه بهبود ویژگی‌های مکانیکی می‌انجامد [Pradesh, 2012].

آزمایشات حاکی از افزایش مقاومت فشاری و خمشی بتن حاوی نانو سیلیس است. این آزمایشات نشان داد که مقاومت ملات حاوی نانو سیلیس از ملات حاوی گرد سیلیس نیز بیشتر است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) نشان داد که نانو ذرات SiO₂ منافذ را پر می‌کنند و همچنین باعث کاهش مقدار Ca(OH)₂ در محصولات هیدراتاسیون می‌شوند. این اثرات باعث بهبود خواص مکانیکی ملات سیمان توسط نانو ماده می‌شود [Sobolev et al, 2008].

مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که نانو سیلیس در بتن معمولی باعث افزایش مقاومت فشاری، مقاومت خمشی [Boshehrian and Hosseini 2013] و مقاومت کششی [Khanzadi et al. 2010] خصوصا در اولین روزهای عمر بتن می‌گردد و روانی بتن را نیز کاهش می‌دهد [Abd EL-Baky et al. 2013].

۲-۱-۲- (CNT) Carbon nanotube

نانو لوله‌های کربنی استوانه‌های تو خالی از تک ورقه‌های گرافیتی هستند که به شکل استوانه پیچیده شده اند این موارد دارای خواص ساختاری و مکانیکی و الکترونیکی فوق العاده هستند که ناشی از خواص ویژه پیوندهای کربن و تقارن استوانه‌ای آن‌هاست. از نانو لوله‌های کربنی جهت ترمیم، تقویت و بهسازی در طرح اختلاط بتن استفاده

می‌شود. هم اکنون از الیاف و مواد افزودنی جهت بهسازی و مقاوم سازی بتن استفاده می‌شود. افزودن نانو لوله‌های کربنی به سیمان موجب افزایش استحکام کششی و فشاری بتن و همچنین سبب افزایش مقاومت در برابر حملات شیمیایی می‌شود که این امر دوام و پایداری بتن را بدنبال دارد. و از طرف دیگر نانو لوله‌های کربنی یکی از مستحکم‌ترین مواد بشمار می‌رود و می‌توان در طرح پوشش بتن از این مواد استفاده کرد. از آنجا که نانو لوله‌های کربن از کربن گرافیتی ساخته شده اند، مقاومت بسیار خوبی در برابر حملات شیمیایی داشته و نیز پایداری حرارتی خیلی خوبی دارند. تحقیقات گسترده ای در خصوص کاربردهای نانولوله‌های کربنی در حال انجام است و تاکنون خواص قابل ملاحظه‌ای از آن‌ها کشف شده است؛ برای مثال باوجود اینکه چگالی آن‌ها یک ششم چگالی فولاد است، مدول الاستیسیته آنها پنج برابر و استحکام آنها تا هشت برابر فولاد می‌رسد. در صورت افزودن نانو لوله‌های کربنی به میزان نیم الی یک درصد وزنی ملات بتن به آن خواص نمونه‌ها به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. نانولوله‌های کربنی به صورت‌های تک جداره و یا چند جداره مورد استفاده قرار می‌گیرند [Pradesh 2012].

۲-۱-۳- nano-Al₂O₃

Al₂O₃ با هیدروکسید کلسیم ناشی از هیدراسیون سیلیکات کلسیم واکنش می‌دهد، میزان واکنش پوزولانی متناسب با مقدار سطح موجود برای واکنش است. اضافه کردن نانو Al₂O₃ باعث بهبود مقاومت کششی و مقاومت خمشی بتن می‌گردد. از طرفی نانو Al₂O₃ باعث افزایش مدول الاستیسیته بتن نیز می‌گیرد، افزودن ۵٪ نانو Al₂O₃ (با اندازه متوسط ذرات حدود ۱۵۰ nm) مدول الاستیسیته نمونه‌های ۲۸ روزه ۱۴۳٪ افزایش می‌یابد این در حالی است که مقاومت فشاری افزایش چشمگیری ندارد.

بررسی نتایج مختلف آزمایشگاهی حاصل از افزودن nano-Al₂O₃ به سیمان نشان داده است که کارایی این نوع سیمان‌ها نسبت به سیمان‌های معمولی کمتر است [Nazari et al, 2010].

۲-۱-۴- nano-Fe₂O₃

بتن دارای نانو ذرات آهن (nano-Fe₂O₃)، مقاومت فشاری و کششی بیشتری نسبت به بتن معمولی دارد. طبق پژوهش‌های انجام شده توسط Abdoli Yazdi و همکارانش، درصد بهینه مصرف نانو ذرات آهن در بتن 3%

است، در صورتی که با افزایش درصد نانو آهن تا ۰.۵٪، مقاومت بتن بصورت خطی کاهش می‌یابد. با اضافه کردن $\text{nano-Fe}_2\text{O}_3$ میزان افزایش مقاومت فشاری نسبت به مقاومت کششی بیشتر است، دلیل این پدیده نیز وجود میکرو ترک‌هایی در بتن است که این ترک‌ها در کشش تاثیر بیشتری دارند [Abdoli Yazdi et al, 2011].

طبق آزمایشات Nazari و همکارانش، بکارگیری حداکثر ۰.۲٪ $\text{nano-Fe}_2\text{O}_3$ در بتن باعث کاهش زمان گیرش اولیه و نهایی بتن و افزایش مقاومت کششی و خمشی آن می‌گردد. درصد بهینه برای افزایش مقاومت خمشی و کششی ۰.۱٪ است که بیشترین مقاومت را باعث می‌شود. افزایش مقاومت خمشی بدلیل مصرف سریع Ca(OH)_2 که در طی هیدراتاسیون سیمان پرتلند شکل گرفته است [Nazari et al, 2010].

۲-۱-۵ - nano-TiO_2

از nano-TiO_2 برای تولید بتن خود تمیز شونده استفاده می‌گردد که کمک زیادی به تمیزی و زیبایی محیط می‌کند. عملکرد نانو اکسید تیتانیوم (nano-TiO_2) بر فعال کردن اضمحلال فتوکالیستی آلاینده‌هایی از قبیل NOx، منوکسید کربن، مواد آلی فرار، کلروفنول و آلاینده‌های حاصل از آگزوز خودروها یا صنایع صنعتی استوار است. بتن خود تمیز شونده امروزه برای استفاده در نمای ساختمان‌ها و سنگ فرش معابر در اروپا و ژاپن مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر این ویژگی، مطالعات اخیر نشان داده است که بتن دارای nano-TiO_2 از مقاومت فشاری، خمشی و سایشی بیشتری نسبت به بتن معمولی برخوردار است و همچنین سرعت هیدراتاسیون سیمان را در سنین اولیه افزایش می‌دهد [Salemi et al. 2014].

طبق مطالعات انجام شده، استفاده از nano-TiO_2 تا حداکثر ۲٪ باعث کاهش روانی بتن می‌گردد

[Nazari et al 2010]

۲-۲- کاربرد مواد افزودنی حبابزا در بتن و ویژگی‌های بتن حاوی این افزودنی‌ها

امروزه مواد افزودنی مولد حباب هوا تقریباً برای تمامی بتن‌ها عمدتاً به منظور بهبود مقاومت در برابر سیکل یخبندان و زمانی که در معرض آب و مواد شیمیایی قرار گرفته است توصیه می‌شود. با این حال، مزایای مهم دیگری در هر دو بتن تازه و سخت شده وجود دارد.

بتن دارای هوا یا با استفاده از سیمان حباب‌زا یا با اضافه کردن افزودنی‌های حباب‌زا در زمان ترکیب شدن مخلوط بتن تولید می‌شود. مواد افزودنی حباب‌هواساز آنیونی آبگریز و دارای بار الکتریکی هستند، مواد افزودنی بدون بار نیز در دسترس است. بار الکتریکی منفی جذب بار مثبت ذرات سیمان می‌شود که در برقراری ثبات در حباب‌ها کمک می‌کند.

حباب‌های هوای تزریق شده با حفره‌های هوای محبوس که در تمام بتن در نتیجه‌ی مخلوط کردن و برهم زدن مخلوط بتن رخ می‌دهد و تا حد زیادی تابعی از خصوصیات دانه‌هاست، فرق دارد. حباب‌های هوای تزریق شده در اندازه قطر بسیار کوچک، بین ۱۰ تا ۱۰۰۰ میکرومتر می‌باشد، در حالی که حفره‌های محبوس شده معمولاً ۱۰۰۰ میکرومتر (۱ میلی‌متر) و یا بزرگتر هستند.

قطر اکثر حباب‌های هوای تزریق شده در بتن‌های معمولی بین ۱۰ تا ۱۰۰ میکرومتر می‌باشد. حباب‌ها به هم پیوسته نیستند، آن‌ها به خوبی پراکنده شده و به طور تصادفی توزیع شده است. میزان هوای محبوس شده در بتن با اندازه‌ی بزرگترین دانه برابر ۲۵ mm تقریباً ۱,۵٪ می‌باشد، در حالی که در بتن با ترکیبات مشابه برای مقاومت در برابر سیکل یخبندان باید کل هوای موجود در بتن حدود ۶٪ باشد که این شامل هم حباب‌های بزرگ (به دام افتاده) و هم حباب‌های ریزتر (تزریق شده) می‌شود.

خواص بتن هوادار:

برخی از خواص بتن هوادار در جدول شماره ۲-۱ بیان گردیده است.

ویژگی‌ها	تاثیر
سایش (Abrasion)	تاثیر کم، مقاومت زیاد شده
جذب (Absorption)	تاثیر کم
واکنش قلیایی سیلیسی	توسعه آن با افزایش میزان هوا کاهش پیدا می‌کند
اتصال به فولاد	کاهش می‌یابد
مقاومت فشاری	کاهش حدود ۰.۲٪ تا ۰.۶٪ به ازای هر درصد افزایش هوا، با اختلاط شدید آرام ممکن است مقاومت بدست آورد.
خزش (Creep)	تاثیر کم
ورقه شدن	به طور قابل ملاحظه کاهش می‌یابد
چگالی	با افزایش هوا کاهش می‌یابد
خستگی (Fatigue)	تاثیر کم
قابلیت پرداخت کاری	کاهش به دلیل افزایش چسبندگی
مقاومت خمشی	به ازای هر درصد افزایش هوا ۰.۲٪ تا ۰.۴٪ کاهش می‌یابد.
مقاومت سیکل یخبندان و ذوب	به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود پیدا می‌کند.
دمای هیدراسیون	اثر قابل توجهی ندارد.
مدول الاستیسیته (static)	به ازای هر درصد افزایش هوا ۷۲۰ Mpa تا ۱۳۸۰ Mpa کاهش می‌یابد
نفوذپذیری (Permeability)	تاثیر کم، کاهش در نسبت آب به سیمان باعث کاهش نفوذ پذیری می‌شود.
پوسته پوسته شدن (Scaling)	به طور قابل ملاحظه کاهش می‌یابد.
انقباض (Shrinkage)	تاثیر کمی دارد.

اسلامپ	به ازای هر ۰,۵ تا ۱ درصد افزایش هوا حدود ۲۵mm افزایش می یابد.
مقاومت در برابر سولفات	به طور قابل ملاحظه بهبود یافته
چسبندگی	چسبندگی افزایش می یابد، ماله کشی سخت می شود
دمای بتن مرطوب	تاثیری ندارد
رسانایی گرمایی	به ازای هر درصد افزایش هوا ۰,۱٪ تا ۰,۳٪ کاهش می یابد.
ضریب انتقال حرارتی	به ازای هر درصد افزایش هوا ۰,۱,۶٪ کاهش می یابد.
نیاز به آب در بتن مرطوب برای اسلامپ یکسان	به ازای هر درصد افزایش هوا 1 kg/m^3 تا 3 kg/m^3 کاهش می یابد.
ضد آب	کمی افزایش می یابد، کاهش نسبت آب به سیمان ویژگی ضد آب بودن افزایش می دهد.
کارایی	با افزایش هوا افزایش می یابد.

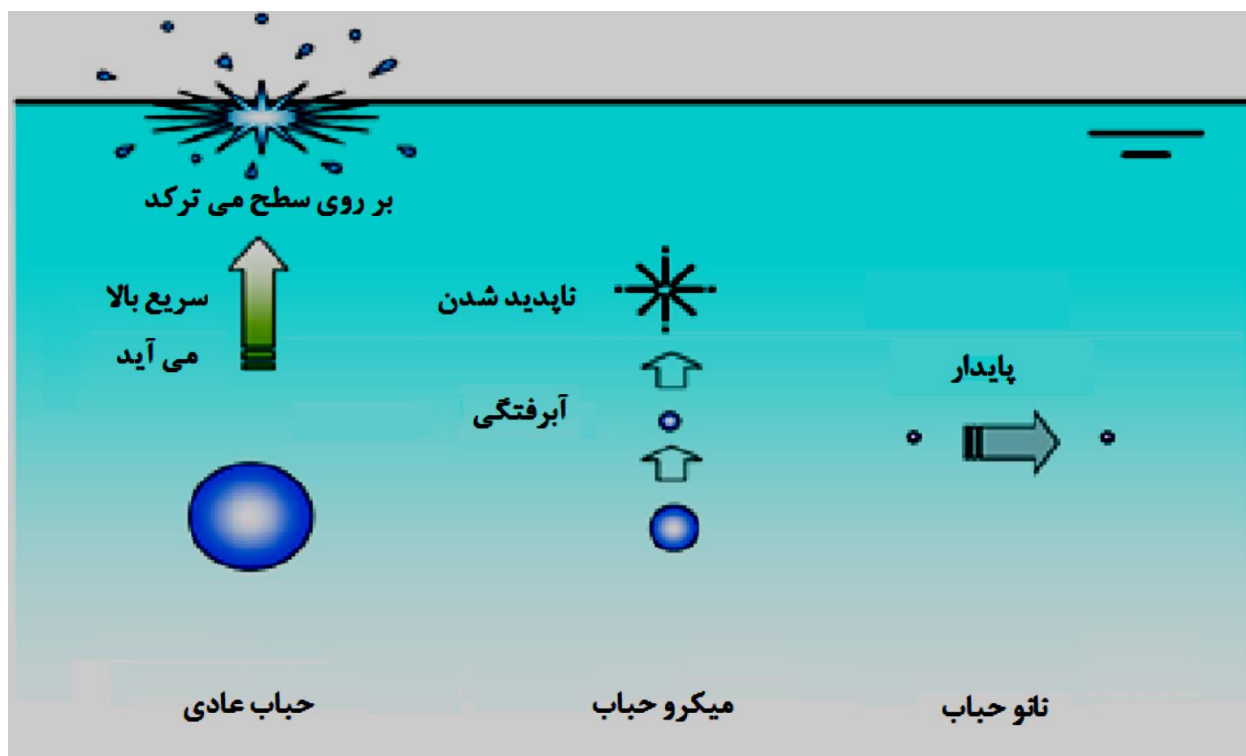
توجه : اطلاعات جدول ممکن است در تمام شرایط صدق نکند

برگرفته از [Kosmatka et all,2003]

۲-۳- میکرو-نانو حباب های هوا

۲-۳-۱- کلیاتی درباره میکرو نانو حباب ها

حباب ها از نظر ساختاری به دو دسته گاز و مایع گاز تقسیم می شوند. و خود حباب های مایع گاز به دو دسته حباب های کروی و حباب های دیسکی تقسیم می شوند.

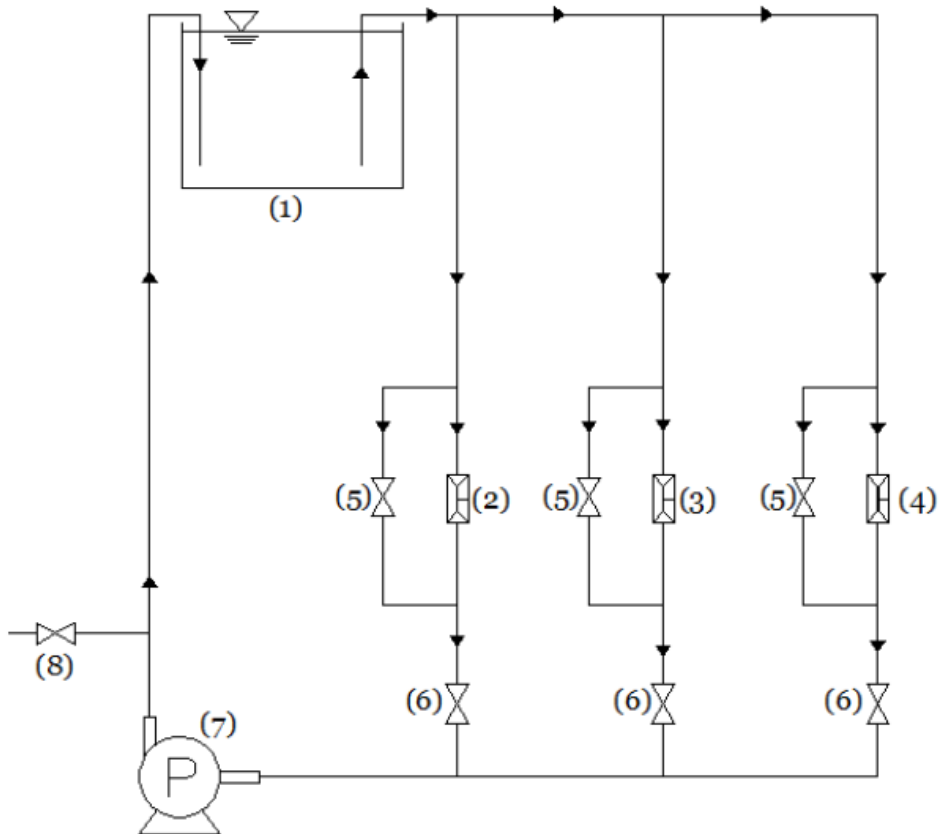


شکل ۱-۲: نحوه حرکت حباب عادی، حباب میکرو، حباب ناتو در آب

میکرو ناتو حباب ها حفره هایی حاوی گاز در محلول آبی هستند. علت تولید این حفره ها فرآیند کائوتاسیون هیدرودینامیکی در حضور نوکلی گازها یا گاز هسته زایی شده در آب است. فرآیند هسته زایی در مایع سبب چرخش ذرات گاز در میدان داخلی هسته می شود که باعث ایجاد میدان الکترو استاتیکی به دور هسته می گردد و این میدان الکترو استاتیکی با ذرات باردار دور هسته که تشکیل لایه دوگانه را داده اند به طور مداوم در تبادل شار الکتریکی ثابتی هستند. این افزایش یا کاهش تبادل شار الکتریکی و همچنین افت پتانسیل شیمیایی هسته، باعث رشد یا انقباض هسته و به تبع آن بزرگتر یا کوچکتر شدن لایه دوگانه می گردد. بزرگ یا کوچک شدن لایه دوگانه باعث بزرگ یا کوچک شدن نیروی کشش سطحی می شود. به همین دلیل ناتو حباب ها یا میکرو حباب ها به کمک انتشار ذرات و متناسب با چه مقدار پتانسیل اطراف محلول و مقدار پتانسیلی که باعث فوق اشباع و یا زیر اشباع شدن بشود، شروع به رشد کردن و یا کوچک شدن در طول زمان می کنند.

۲-۳-۲- چگونگی تولید و ساخت نانو میکرو حباب‌ها

در این تحقیق، از دستگاه تولید میکرو-نانو حباب بر مبنای روش برش و استفاده از لوله ونتوری و فرآیند کاویتاسیون هیدرودینامیکی به تولید میکرو نانو حباب‌ها با ابعاد تقریباً یکسان بوسیله تنظیم پارامترهای فیزیکی مبادرت گردید. این دستگاه از سه بخش اصلی تشکیل یافته است: (۱) ورودی هوا (۲) اعمال فشار بر محلول (۳) منطقه افت فشار هدف وجود هوا در این دستگاه دقیقاً در محل فشار منفی افزایش کارایی پدیده کاویتاسیون و تولید میکرو نانو حباب می‌باشد. بنابراین، برخلاف سایر دستگاهها، لوله‌های ونتوری و ورودی هوا در این دستگاه قبل از پمپ، وارد آب می‌شود. گاز اصلی مورد استفاده جهت تولید میکرو نانو حباب‌ها، هوا بوده است. مایع نیز از آب لوله کشی شهری شهر شاهرود بدون هیچ گونه ماده اضافی استفاده گردید. سیال در یک منبع با ارتفاع اولیه حدود ۳ متر که از تراز مولد‌های هیدرودینامیکی داشته و از طریق یک پمپ سانتریفیوژ (مدل PK ساخت شرکت پدرولو ایتالیا با قدرت ۰٫۵ اسب بخار) پس از عبور از مولد نانو میکرو حباب به داخل آن برگشت داده می‌شود. مولد در قسمت مکش (بالادست) پمپ قرار گرفت. شایان ذکر است که در سیستم از سه مولد هیدرودینامیکی با قطرهای داخلی mm ۱ و mm ۳ و mm ۵ استفاده گردید. در مولد‌ها، در ناحیه‌ی همگرای مخروطی این لوله، سرعت جریان افزایش می‌یابد، در نتیجه فشار کاهش می‌یابد و در قسمتی از لوله فشار منفی می‌شود و با افزایش سرعت از فشار بخار کمتر می‌شود که این امر باعث مکش هوا به داخل لوله می‌شود. به کمک شیر آلات موجود مکش هوا بنحوی تنظیم می‌شد که برای تشکیل حباب کافی باشد. در مرحله بعد حباب‌ها به علت چرخش در سامانه به لوله مولد بر می‌گردد، بنابراین کاویتاسیون منجر به کوچک شدن ابعاد حباب‌ها شده و با انجام مکرر میکرو-نانو حباب بیشتر و با قطر کمتری تولید می‌شود. شکل ۲-۲ شماتیک از دستگاه میکرو نانو حباب ساز را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲: شماتیک از دستگاه نانو میکرو حباب، (۱) مخزن آب (۲) مولد با قطر مرکزی ۱ mm (۳) مولد با قطر مرکزی ۳ mm (۴) مولد با قطر مرکزی ۵ mm (۵) شیرهای تنظیم دبی (۶) شیرهای اصلی مولد (۷) پمپ آب (۸) شیر نمونه گیری

۲-۳-۳- روش اندازه گیری ابعاد نانو میکرو حبابها

روشی که در این تحقیق از آن استفاده شده است، روش پراش نور دینامیکی^۱ می باشد که برای اندازه گیری اندازه ذرات در محیط مایع مورد استفاده قرار می گیرد. در یک محلول، برخورد ذرات و مولکول های کوچک با مولکول های حلال، منجر به حرکت تصادفی مولکول ها می شود. که به این حرکت ذرات کوچک در یک سیال، حرکت براونی می گویند. در عمل ذرات در مایع هیچ گاه ساکن نبوده و بوسیله ی حرکات براونی دائماً در حرکت هستند. یکی از ویژگی های حرکت براونی آن است که ذرات کوچک، سریع و ذرات بزرگ، آهسته حرکت می کنند و در یک دمای ثابت ذرات بزرگ تر در مقایسه با ذرات کوچک تر، حرکت

^۱ Dynamic light scattering

بسیار آهسته تری دارند و زمانی که ذرات به طور ثابت در حرکت باشند، به نظر می رسد که الگوی ایجاد شده بوسیله آن ها نیز حرکت می کند.

تئوری مای وقتی اتفاق می افتد که ذرات هم اندازه یا کمی بزرگتر از طول موج نوری هستند که با آنها برخورد می کند. برای استفاده از این تئوری، کاربر نیاز به دانستن ضریب شکست ذره و محیط یا همان ضریب شکست نسبی دارد. از این رو این تئوری برخلاف تقریب فرانیهوفر، برای ذرات شفاف در محدوده اندازه یک تا پنجاه میکرومتر نیز قابل استفاده است. می توان گفت که فرانیهوفر نتایج خوبی برای ذرات بزرگتر از ۵۰ میکرومتر می دهد، ولی تئوری مای، بهترین راه حل عمومی برای ذرات کوچکتر از ۵۰ میکرومتر می باشد.

شرایط استفاده از تئوری مای، بدین شرح است :

- نور استفاده شده در تعیین اندازه ذرات، باید دارای یک طول موج و فرکانس یکنواخت باشد.
- ذره باید کروی باشد، چون شکل ذره بر الگوی پراکندگی اثرگذار است.
- ذرات باید ایزوتروپ و همسان باشند، اگر ذرات غیرایزوتروپ یا غیر همسان باشند، خصوصیات نوری آنها در جهات مختلف متفاوت خواهد بود.
- نور برخوردی باید به صورت امواج صفحه ای باشد یا توزیع سه بعدی نداشته باشد.
- هم پراکندگی و هم جذب باید در نظر گرفته شوند.
- ضریب شکست محیط و ذره باید شناخته شده باشد.
- و بالاخره مجموعه باید همگن باشد، زیرا ناهمگنی روی الگوی پراکندگی اثر دارد.

برخی از این شرایط، جزء شرایط اصلی تئوری مای هستند، ولی برخی دیگر برای ساده سازی مسئله و تعیین اندازه به کار گرفته می شوند.

روش تفرق نور دینامیکی مطابق با استاندارد ISO 22412 سال ۲۰۰۸ جهت تعیین ابعاد ذرات در

محدوده ابعادی بین ۰/۶ نانو تا ۸ میکرون قابل استفاده می‌باشد.

جهت اندازه گیری ابعاد حباب‌ها، از دو روش پاد - لاپلاس^۲ و کومولانت^۳ مورد استفاده قرار می‌گیرد. که نتایج روش کومولانت دقیق تر و قابل استناد تر می‌باشد. در روش کومولانت امکان اندازه گیری پارامتر ارزشمندی به نام Zaverage فراهم می‌شود. که از طریق شدت نوسان نور پخش شده با استفاده از یک آشکارساز مناسب قابل اندازه گیری است. شدت نوسان نور پخش شده مستقیماً به سرعت نفوذ مولکول در حلال بستگی دارد و با دانستن ویسکوزیته محیط، شدت این نوسانات برای تعیین قطر نمونه مورد استفاده قرار می‌گیرد. قطری که در این روش اندازه گیری می‌شود، قطر هیدرودینامیکی نمونه نامیده شده و نشان دهنده ی چگونگی نفوذ ذرات در سیال است.

۲-۳-۴- اصول کاویتاسیون هیدرو دینامیکی

میکرو-نانو حباب‌های هوا ذراتی با بار سطحی منفی هستند که به روشهای مختلفی تولید می‌شوند که یکی از این روش‌ها کاویتاسیون هیدرودینامیکی است. کاویتاسیون هیدرودینامیکی زمانی روی می‌دهد که به علت سرعت بالای جریان فشار در یک نقطه در یک مایع به طور لحظه ای به زیر فشار بخار، کاهش یابد. کاویتاسیون هیدرودینامیکی به خوبی از طریق معادله ی برنولی توصیف شده است:

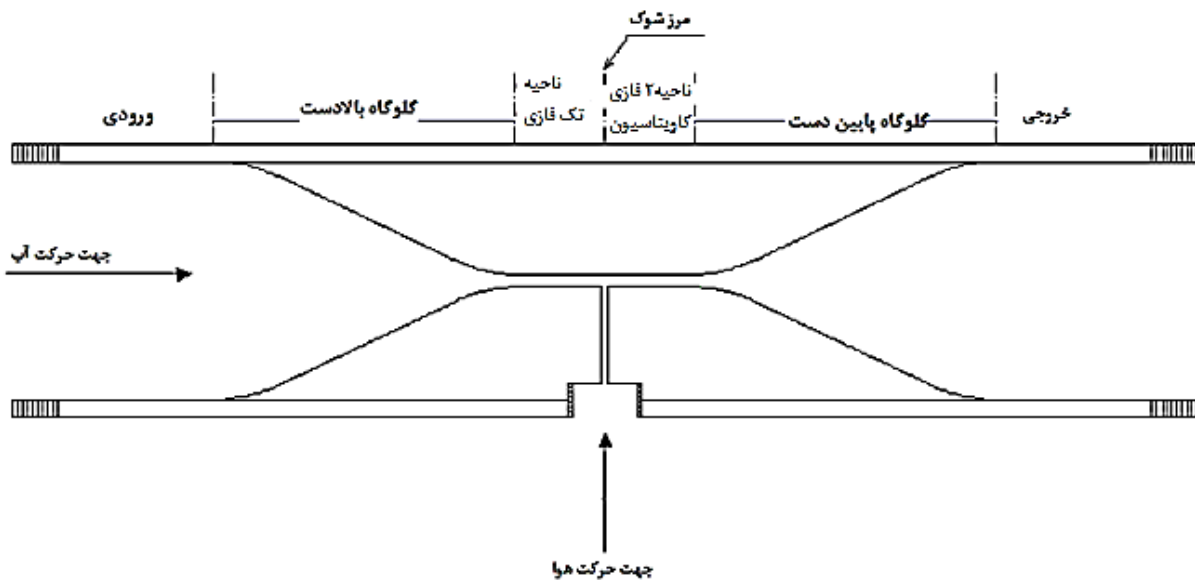
$$P + \frac{\rho U^2}{2} = C \text{ (constant)}$$

که C روی یک خط جریان مقدار ثابتی است. در این رابطه U سرعت جریان آب در یک نقطه، P فشار، و ρ چگالی مایع هستند. بازنویسی معادله به صورت زیر است :

²Pade-Laplace
³ Cumulants

$$U^2 + \frac{2P}{\rho} = \frac{2C}{\rho}$$

این رابطه نشان می‌دهد هرگاه که سرعت جریان مایع بیش از $\sqrt{\frac{2C}{\rho}}$ باشد فشار منفی خواهد بود. بایستی خاطر نشان کرد که تغییر و ایجاد یک مسیر ورودی هوا در قسمتی از لوله ونتوری باعث عملکرد بهتر و مقرون به صرفه تر آن برای ایجاد میکرو نانو حباب در سیال گردیده است. شکل ۳، شماتیک وسیله ایجاد کاویتاسیون هیدرودینامیکی را نشان می‌دهد.



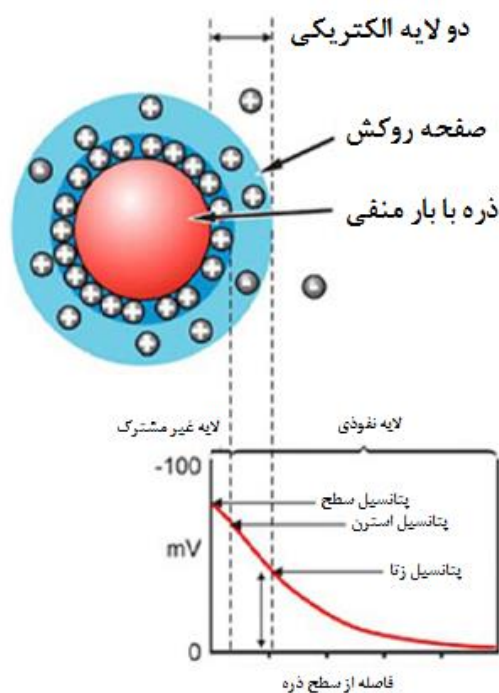
شکل ۲-۳: شماتیکی از مولد هیدرودینامیکی میکرو-نانو حباب

در ناحیه مخروطی لوله به علت کاهش قطر لوله سرعت زیاد می‌شود. جریان در این ناحیه نسبت به ناحیه ورودی لوله دارای سرعت بیشتر و فشار کمتری می‌باشد. با افزایش سرعت و کاهش فشار به کمتر از فشار اتمسفر، می‌توان از ورودی هوای گاز برای ایجاد حباب از گاز دلخواه استفاده کرد. کاویتاسیون هیدرودینامیکی بر اثر جریان در مسیرهای مستقیم رخ نمی‌دهد ولی در یک جریان ساده بدون انشعاب و اغتشاش، تغییر در جهت و همگرایی جریان باعث ایجاد پدیده کاویتاسیون می‌شود.

برگرفته از: (مظفری نائینی، ر، ۱۳۹۲)

۲-۳-۵- تئوری پتانسیل سطحی از نانو - میکرو حباب ها

پتانسیل زتا یک خاصیت فیزیکی ذرات خنثی است که در فصل مشترک با (جدایش فازی) فاز جامد با محلولها ی الکترولیتی بروز میکند. در شکل ۲-۷ یک ذره خنثی به طور شماتیک درون محلول نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه میشود وجود این پدیده موجب ایجاد یک لایه دوگانه در اطراف ذره میگردد.



شکل ۲-۷: شماتیک حضور یک ذره خنثی در الکترولیت

پتانسیل الکتریکی حاصل از لایه دوگانه را پتانسیل الکتروستاتیکی یا پتانسیل زتا می گویند. این پتانسیل تابع عواملی از قبیل اندازه و نوع ذرات، PH و سایر عوامل مؤثر بر دو لایه الکتریکی خواهد بود. عموماً افزایش pH موجب کاهش پتانسیل زتا خواهد شد. نکته قابل تأمل اینکه هر ذره در pH های گوناگون رفتار منحصر به فردی از خود نشان می دهد. به طوری که نه تنها مقدار پتانسیل آن تغییر خواهد کرد، بلکه مثبت و منفی بودن آن نیز به راحتی قابل تغییر خواهد بود، به این ترتیب میتوان با انتخاب درست pH رفتار و عکس العمل ذره را در محیطهای گوناگون تحت کنترل قرار داد.

پتانسیل زتا به سطح هیدرودینامیکی نسبت داده می شود و بار سطحی برای سطح جامد- مایع تعریف می شود. هر چه پتانسیل زتا بیشتر باشد در نتیجه احتمال تشکیل دو لایه الکتریکی روی سطح ذره بیشتر

می‌شود و تمایل برای لخته شدن و تجمع کم می‌شود و ذرات ریزتر می‌مانند و تجمع نمی‌کنند و توزیع اندازه ذرات باریک‌تر می‌شود. به عبارتی زتا اصطلاح یونانی می‌باشد. پتانسیل زتا، مقدار دافعه بین ذره مجاور را نشان می‌دهد. موقعی که زتا پایین می‌آید، جاذبه بر دافعه غلبه کرده و لخته تشکیل می‌شود، درحالی که ذرات با پتانسیل زتای بالا، از لحاظ الکتریکی پایدار هستند. طبق جدول ۲-۳ پتانسیل زتا، یکی از عوامل پیش بینی پایداری ذرات در حلال است.

جدول ۲-۳: رفتار پایداری ذرات در بازه های پتانسیل زتای آنها

رفتار پایداری ذرات	پتانسیل زتا (mV)
سریع لخته می‌شوند	از ۰ تا ۵ ±
ناپایدار	از ۱۰ ± تا ۳۰ ±
پایداری متوسط	از ۳۰ ± تا ۴۰ ±
پایداری خوب	از ۴۰ ± تا ۶۰ ±
پایداری عالی	بیشتر از ۶۱ ±

پتانسیل زتا به عنوان یک پتانسیل الکتریکی در پیرامون ذرات و همچنین سلولها وجود دارد که تحقیقات زیادی در مورد این پتانسیل الکتریکی اطراف غشاء انجام شده است. سلولها در محلول به علت وجود خاصیت‌های یونی، همچنین ترکیبات سازنده غشاء (مانند پروتئینها، چربی‌ها و قندها) و پخش بار در سطح غشاء آنها دارای یک بار الکتریکی در سطح غشاء می‌باشند. گسترش بار در اطراف غشاء باعث تأثیر بر روی یونهای مجاور شده که نتیجه آن افزایش غلظت تعداد یونها (یونهای با بار الکتریکی مخالف) در فاصله نزدیک غشاء می‌شود. بنابراین غشاء در محلول توسط یک لایه از یونهای با بار مخالف محصور شده که آن را لایه ثابت می‌گویند. در قسمت بیرونی لایه ثابت، تعداد زیادی از یونها با بارهای مختلف وجود دارد که باعث تشکیل یک لایه ابری شکل می‌شود. بنابر این دولایه الکتریکی در ناحیه ای که سطح غشاء در مجاورت محیط مایع اطراف آن وجود دارد، تشکیل می‌شود. این لایه دوگانه توسط دو قسمت شرح داده می‌شود:

۱. قسمت درونی: شامل یونهای است که به صورت قوی با سطح خارجی غشاء اتصال پیدا کرده است.

۲. قسمت بیرونی یا ناحیه پراکنده که یونها در آن قسمت در حالت تعادل یونی به سر می برند.

پتانسیل موجود در این قسمت با افزایش فاصله از غشاء کاهش پیدا کرده، تا جایی که به صفر برسد. هنگامی که بر محیط مایع اطراف سلول میزان معینی ولتاژ اعمال شود سلولها از طریق بار موجود در غشاء به سمت الکتروود با قطب مخالف بار غشاء حرکت می کنند. حرکت سلولها به دلیل اثر ولتاژ خارجی بر روی لایه ثابت و همچنین بر روی قسمتی از ناحیه پراکنده و قسمت بینا بینی این دو ناحیه در سطح غشاء می باشد. این دو قسمت و قسمت بینابینی آن به shear plane معروف می باشد و بار الکتریکی موجود در این قسمت پتانسیل زتا نام دارد. پتانسیل زتا به عنوان قسمت کاربردی بار الکتریکی سطح غشاء عمل می کند. ماهیت محیطی که سلول در آن قرار دارد، میزان یونها و pH محیط بر روی میزان پتانسیل زتا تأثیر می گذارد. بسیاری از مواد هنگام قرار گرفتن در مایعات و یا آب از خود درجات متفاوتی از پتانسیل زتا را نشان می دهند. همچنین مولکولهای آبی که در مجاورت غشای سلولی وجود دارند تقریباً بی حرکت هستند و وجود آنها همراه با گروههای باردار در سطح غشاء باعث تأثیر در انتشار یونهای متحرک می شود. سطح غشای سلولهای ایزوله شده معمولاً دارای بار منفی است. بار موجود در دولایه الکتریکی آن با بار یونهای مخالف محیط به تعادل می رسد. این پتانسیل ایجاد شده در چنین محیط استاتیکی به صورت تصاعدی با ایجاد فاصله از سطح غشاء کاهش می یابد. در صورتی که این سطح در طول محیط حرکت کند یک لایه نازکی از محیط همراه با مقداری از یونها با این غشای حرکت می کنند. در نتیجه پتانسیلی در سطح غشاء به نام پتانسیل زتا ایجاد می شود که به وسیله روشهای سینتیکی مثل الکتروفورز اندازه گیری می شود که مقدار آن چند میلی ولت کمتر از پتانسیل واقعی غشاء می باشد. در اغلب سلولها این پتانسیل اندازه گیری شده بین ۱۰- تا ۲۰- میلی ولت است. در غشاهای سلولی، محیطهای مایع خاص مجاور غشاء ممکن است بر روی فعالیت غشاء اثر بگذارند. در نتیجه غلظت یونهای نزدیک در سطح غشاء ممکن است از کل یونهای محیط متفاوت شوند.

برگرفته از: (مظفری نائینی ر، ۱۳۹۲)

۲-۳-۶- اثر برخورد ذره با حباب

یکی از دلایل شناوری پایین ذرات سیمان با آب، نرخ پایین فلوتاسیون ذرات به علت بازدهی کم برخورد با حباب‌های با اندازه معمولی می‌باشد. برخورد یک ذره با حباب با توجه به شرایط هیدرودینامیکی محیط فلوتاسیون در صورت نزدیک شدن به حد کافی اتفاق می‌افتد. یون و لوتل [Yoon R H, Lutell G H.] با استفاده از تابع جریان بدون بعد، معادله زیر را برای احتمال برخورد ذره حباب ارائه داده اند:

$$P_c = \left[\frac{3}{2} + \frac{4R_e^{0.72}}{15} \right] \left(\frac{D_p}{D_b} \right)^2$$

در این معادله که برای حباب‌های زیر ۱۰۰ میکرون کاربرد دارد، D_p ، D_b و Re به ترتیب قطر ذره، قطر حباب و عدد رینولدز می‌باشد. شایان ذکر است که استفاده از حباب‌های کوچک یا میکرو حباب‌ها به طور مستقل در فلوتاسیون دارای معایبی است که یکی از این معایب، نیروی بالابری کم آن‌ها است، که از انتخابی بودن فرآیند فلوتاسیون می‌کاهد [Yoon and Lutell, 1989].

آزمایشات، تجهیزات و

مصالح مصرفی

۳-۶- طرح اختلاط :

در این تحقیق با بهره گیری از روش ACI-211 از مصالح سنگی شامل شن و ماسه رودخانه‌ای با حداکثر قطر ۱۹ میلی متر، سیمان تیپ ۲ شرکت سیمان شاهرود و آب لوله کشی شده در طرح اختلاط بتن استفاده شد. مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی در جدول شماره (۳-۱) و توزیع وزنی و حجمی مصالح در جدول شماره (۳-۲) آمده است.

بر این اساس نسبت وزنی آب به سیمان برابر با ۰,۶ است.

جدول ۳-۱: مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی

مشخصات شیمیایی	میانگین	استاندارد کارخانه ای
SiO ₂	۲۱,۱۱	حد اقل ۲۰,۵
Al ₂ O ₃	۴,۴۱	حداکثر ۵
Fe ₂ O ₃	۳,۹۵	حداکثر ۵
CaO	۶۳,۵۵	---
MgO	۱,۵۲	حداکثر ۲,۵
SO ₃	۲,۷۴	حداکثر ۲,۹
K ₂ O	۰,۵۵	---
Na ₂ O ₃	۰,۴۱	---
LOI	۲,۲۲	حداکثر ۲,۹

جدول ۳-۲: نسبت وزنی مواد بکار رفته در ساخت نمونه‌های بتن

وزن	واحد	مصالح
۲۳۴۵	kg	وزن کل بتن برای متر مکعب
۳۱۷	kg	وزن سیمان
۱۹۰	kg	وزن آب
۷۶۲	kg	وزن ماسه
۵۳۸	kg	وزن شن نخودی
۵۳۸	kg	وزن شن بادامی
۰,۶	-	نسبت آب به سیمان

۷-۳- تجهیزات مورد استفاده در آزمایشات

۱-۲-۳- آزمایش اسلامپ

- ۱- مخروط ناقص اسلامپ به ارتفاع ۳۰۰ میلی متر و قطر پایین ۲۰۰ میلی متر و قطر بالایی ۱۰۰ میلی متر
- ۲- میله کوبنده به قطر ۱۶ میلی متر و طول ۶۰۰ میلی متر که یک سر آن به صورت نیمکره به قطر ۱۶ میلی متر می باشد.

۳- کاردک

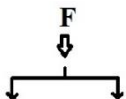
۴- بیلچه

۲-۲-۳- آزمایش مقاومت فشاری

- ۱- جک هیدرولیکی ساخت شرکت Toni Technik با سرعت بارگذاری ۱ mm/min.

۳-۲-۳- آزمایش مقاومت خمشی

- ۱- جک هیدرولیکی ساخت شرکت Toni Technik با سرعت بارگذاری ۱ mm/min.



- ۲- میله دو شاخه جهت اعمال نیرو از دو نقطه به نمونه مورد آزمایش.



شکل ۳-۱: میله دو شاخه مورد استفاده در تست خمش

۳-۲-۴- آزمایش مقاومت کششی

۱- جک هیدرولیکی Toni Technik با سرعت بارگذاری ۱ mm/min .

۲- دو نوار از جنس تخته سه لا جهت قرار گرفتن در مرز تماس نمونه با دستگاه اعمال فشار

۳-۲-۵- آزمایش مدت زمان (سرعت) گیرش اولیه و نهایی بتن (سوزن و یکات)

۱- دستگاه سوزن و یکات

۲- قالب به شکل مخروط ناقص

۳- کاردک

۴- صفحه صاف غیر متخلخل

۵- دستگاه مخلوط کن جهت تهیه خمیر سیمان



شکل ۳-۲: مخلوط کن برقی

۳-۲-۶- آزمایش تعیین تغییرات دمای هیدراسیون سیمان

۱- بشر

۲- ترازوی دقیق

۳- دستگاه SmartCHEM-Lab ساخت شرکت tps جهت ثبت دما

۳-۳- نحوه اختلاط و قالب‌گیری:

برای ساخت و عمل آوری بتن، استاندارد ایران به شماره ۵۸۱ بکار گرفته شد.

با توجه به مقایسه‌ای بودن نتایج آزمایشات و تاثیر دمای اولیه مصالح بر خواص بتن تولید شده، چند ساعت قبل از ساخت بتن مصالح وزن شده در محیط کارگاه قرار گرفته تا دمای اولیه یکسانی داشته باشند. سپس ابتدا سنگدانه‌ها شامل شن و ماسه در مخلوط‌کن مخلوط شدند. در ادامه با اضافه کردن سیمان به آن اختلاط ادامه یافت و در مرحله بعد آب به آن اضافه شد و به مدت ۴ دقیقه کاملاً مخلوط گردید. پس از اطمینان از یکپارچه شدن ملات، از بتن آزمایش اسلامپ صورت گرفت. در ادامه بتن طی سه مرحله درون قالب‌های فولادی ریخته و با ۲۵ ضربه میله مخصوص (به قطر ۱۶ میلیمتر و طول ۶۰ سانتی متر) متراکم شد. قالب‌های پر شده به مدت ۱ دقیقه ویریه شد و سپس سطح آن‌ها صاف گردید. نمونه‌ها پس از گذشت ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و به مدت ۲۸ روز درون حوضچه آب قرار گرفتند.

۳-۴- شرح آزمایش‌ها:

۳-۴-۱- آزمایش اسلامپ

این آزمایش طبق استاندارد شماره ۴۹۲ ایران بلافاصله بعد از ساخت بتن جهت تعیین میزان روانی آن انجام گردید. پس از آماده شدن مخلوط بتن، قالب اسلامپ را مرطوب نموده در محل نمناک، صاف و تخت، که نتواند رطوبت را

جذب کند (سینی فلزی) قرار داده شد. پای خود را بر روی تکیه گاه‌های دو طرف مخروط قرار داده و مخلوط تهیه شده را در ۳ لایه در مخروط اسلامپ می‌ریزیم و هر لایه را با ۲۵ ضربه میله اسلامپ می‌کوبیم. ارتفاع هر لایه پس از تراکم باید تقریباً یک سوم ارتفاع قالب باشد. در لایه زیرین ضربه‌ها باید تا عمق آن لایه نفوذ کنند و ۲ لایه دیگر را به ترتیبی تراکم می‌کنیم که اثر کوبیدن هر لایه به لایه زیرین برسد. قبل از تراکم ساختن لایه فوقانی باید قالب را به اندازه کافی از بتن پر نمود. چنانچه پس از تراکم ساختن لایه فوقانی سطح بتن پایین‌تر از لبه‌های قالب قرار گیرد مجدداً مقداری بتن روی آن ریخته و سطح قالب را با میله و سپس کاردک صاف می‌کنیم. دستگیره‌های مخروط اسلامپ را گرفته و آن را به آرامی بالا می‌کشیم. عمل بلند کردن قالب باید تقریباً در پنج ثانیه و با یک حرکت مداوم رو به بالا بدون آنکه هیچگونه حرکت جانبی یا دورانی به بتن منتقل شود انجام گیرد تمام عمل از آغاز پرکردن تا برداشتن قالب باید بدون وقفه در مدت ۱,۵ دقیقه انجام شود. سپس مخروط را در کنار بتن فرو نشسته قرار می‌دهیم و میله اسلامپ را بر روی آن گذاشته و اسلامپ را با محاسبه تفاضل ارتفاع قالب از ارتفاع بتن در مرکز پس از برداشتن قالب تعیین می‌کنیم.



شکل ۳-۳: آزمایش اسلامپ

۳-۴-۲- آزمایش مقاومت فشاری

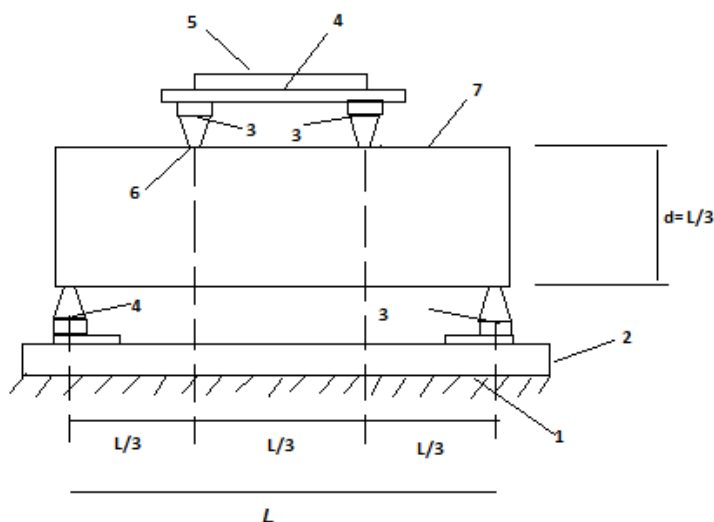
این آزمایش طبق استاندارد شماره ۳۲۰۶ ایران در سنین ۷ و ۲۸ روزه توسط جک هیدرولیکی و با سرعت بارگذاری ۱ mm/min انجام گردید. برای انجام آزمایش نمونه‌های مکعبی استاندارد (۱۵*۱۵*۱۵) مورد استفاده قرار گرفت. ساخت و عمل آوری بتن مطابق استاندارد ۵۸۱ ایران انجام گردید، بدین ترتیب که بتن در قالب‌ها طبق استاندارد طی سه مرحله و هر بار ۲۵ ضربه میله انجام شده و در نهایت هم تمامی قالب‌ها به مدت یک دقیقه روی شیکر قرار داده شد پس از آن، سطح بتن را صاف کرده و قالب‌ها را به مدت ۲۴ ساعت جهت گیرش اولیه در شرایط کارگاه نگهداری و پس از خروج نمونه‌ها از درون قالب‌ها جهت تکمیل فرایند هیدراسیون در حوضچه پر از آب معمولی قرار گرفت.



شکل ۳-۴: آزمایش مقاومت فشاری نمونه های مکعبی

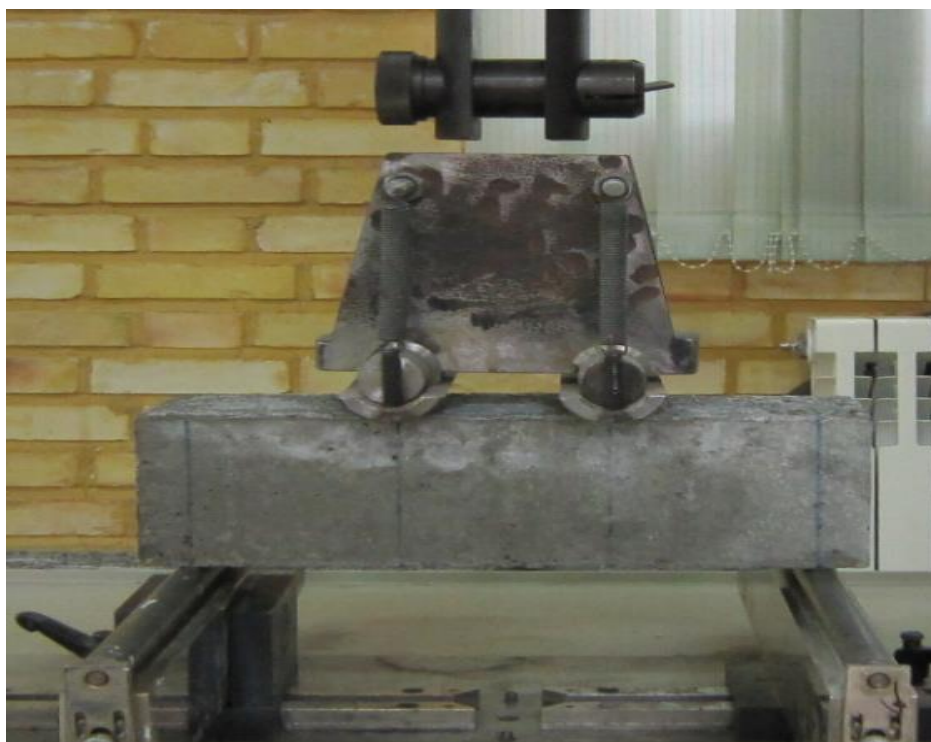
۳-۴-۳- آزمایش مقاومت خمشی

این آزمایش بر اساس استاندارد شماره ۴۹۰ ایران به صورت تست چهار نقطه ای (شکل ۳-۳) و ساخت و عمل آوری نمونه‌های مورد آزمایش نیز مطابق استاندارد شماره ۵۸۱ ایران انجام شد.



- ۱- پایه ماشین آزمون
- ۲- آهن ناودانی یا صفحه فولادی
- ۳- گلوله فولادی
- ۴- میله فولادی
- ۵- سر ماشین آزمون
- ۶- خط توزیع بار در امتداد عرض نمونه
- ۷- نمونه مورد آزمون

شکل ۳-۵: شکل هندسی دستگاه آزمون مقاومت خمشی بتن - روش بارگذاری چهار نقطه ای



شکل ۳-۶: آزمایش مقاومت خمشی تیر بتنی

نمونه‌های آزمون باید در حالیکه محور طولی آن افقی است ساخته شود، بتن مصرفی در دو لایه برابر ریخته شده و هر لایه به کمک کوبیدن متراکم می‌گردد. لایه تحتانی را باید چنان بکوبیم که میله کوبنده در تمام عمق آن نفوذ کند و سپس سطح فوقانی آن با تخته ماله صاف می‌کنیم. لایه فوقانی را کمی بیش از گنجایش قالب ریخته و آن را می‌کوبیم به طوریکه نیمی از ضربه‌ها در لایه زیرین نفوذ کند.

تعداد ضربه‌ها و ابعاد میله کوبنده در جدول شماره (۳-۳) داده شده است.

جدول شماره ۳-۳: قطر میله و تعداد ضربه‌ها برای نمونه‌های آزمون خمشی

تعداد ضربه‌ها برای هر میله	قطر میله (میلیمتر)	سطح نمونه‌ها (سانتیمتر مربع)
۲۵	۱۰	تا ۱۶۰
یک ضربه برای هر ۶,۵ سانتیمتر مربع	۱۰	از ۱۶۱ تا ۳۲۰
یک ضربه برای هر ۱۳ سانتیمتر مربع	۱۶	از ۳۲۱ به بالا

با توجه به سطح نمونه‌ها که برابر ۳۳۰ سانتی متر مربع می‌باشد از میله با قطر ۱۶ میلیمتر و تعداد ۲۵ ضربه برای هر لایه استفاده گردید.

بعد از کوبیدن هر لایه، اطراف قالب را با فرو بردن سر ماله بنائی بطور عمودی در قالب متراکم کرده و سپس قالب‌ها به مدت ۱ دقیقه روی شیکر قرار داده شد تا از تشکیل حباب‌های هوا جلوگیری شود. بعد از این کار بتن اضافی سطح فوقانی قالب با کمچه برداشته شد.

نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و به مدت ۲۸ روز در حوضچه آب قرار گرفت.

۳-۴-۴- آزمایش مقاومت کششی (برزیلی)

برای انجام این آزمایش از استاندارد شماره ۶۰۴۷ ایران و برای ساخت و عمل آوری نمونه‌ها نیز استاندارد شماره ۵۸۱ ایران مورد استفاده قرار گرفت.

در این آزمایش از نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ استفاده گردید. نمونه‌های ساخته شده بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و جهت عمل آوری در حوضچه آب به مدت ۲۸ روز قرار گرفتند. جهت انجام آزمایش ابتدا خطوط قطری نمونه‌ها را رسم می‌کنیم، دو نوار از جنس تخته چند لا آماده کرده تا در بین نمونه و فک دستگاه قرار بگیرد، برای هر نمونه نوارهای جداگانه‌ای استفاده شد. به کمک خطوط رسم شده نمونه را به گونه‌ای تنظیم می‌کنیم که صفحه‌های دستگاه نیرو را به بصورت عمودی به قطر نمونه وارد کنند. در صورت تنظیم صحیح، شکست دقیقاً از محل خط کشی شده انجام می‌گیرد.



شکل ۳-۷: دستگاه تست مقاومت کششی (برزیلی)

۳-۴-۵- آزمایش مدت زمان گیرش اولیه و نهایی بتن (سوزن و یکات)

هدف از این آزمایش تعیین زمان گیرش سیمان است که طبق استاندارد شماره 392 ایران و ASTM C 191 انجام گردید. این آزمایش زمان گیرش اولیه و نهایی سیمان را بوسیله دستگاه سوزن و یکات مشخص می‌کند. در این آزمایش برای تهیه خمیر سیمان، نسبت آب به سیمان ۰,۲۶٪ در نظر گرفته شد. (۵۰۰ گرم سیمان با ۱۳۰ گرم آب)

برای تهیه خمیر سیمان مقدار ۵۰۰ گرم سیمان را با ۱۳۰ ml آب را در دستگاه مخلوط کن ریخته و سپس به مدت دو دقیقه با سرعت پایین و سپس ۲ دقیقه دیگر با سرعت بالا مخلوط را هم می‌زنیم، حال مخزن دستگاه را از آن جدا کرده و به مدت یک دقیقه با دست و کاردک مخلوط را هم زده تا کاملا یکنواخت گردد.

برای قالبگیری نمونه آزمایش، پس از پوشیدن دستکش سرعت خمیر سیمان ساخته شده را تقریباً به شکل توپ در آورده و سپس آن را ۶ بار از فاصله آزاد ۶ اینچ (۱۵ سانتیمتر) از یک دست به دست دیگر پرتاب می‌نماییم، طوری که گلوله نسبتاً کروی ایجاد شود که با کمترین دست خوردگی به سادگی وارد حلقه و یکات شود. گلوله را در کف یک دست گرفته و آن را از انتهای گشادتر حلقه که در دست دیگر است فشار می‌دهیم، طوری که حلقه کاملاً از خمیر پر شود. با یک حرکت کف دست خمیر اضافی را از انتهای بزرگتر حلقه برمی‌داریم. سپس حلقه را از طرف با قطر بزرگ‌تر روی صفحه غیر متخلخل قرار می‌دهیم. سپس به کمک ماله با لبه‌های تیز که با زاویه کمی نسبت به بالای حلقه نگهداشته شده، خمیر اضافی بالای حلقه را به یک حرکت برش داده و در صورت لزوم با چند حرکت آرام ماله سطح آن را صاف می‌کنیم. لازم است توجه شود که طی عملیات بریدن و صاف کردن، خمیر سیمان فشرده نشود. بعد از ۳۰ دقیقه سوزن مماس شده بر سطح خمیر را رها می‌کنیم تا تحت تاثیر وزن خود در آن نفوذ کند بعد از ثابت شدن میزان نفوذ (مدت زمان حدود ۳۰ ثانیه) عدد مربوطه را یادداشت کرده و سوزن را در مکان دیگری به فاصله بیش از ۶,۴ میلی متر تنظیم کرده و همین عمل را بعد از این هر ۱۵ دقیقه تکرار می‌کنیم. در هیچ موردی نباید فاصله محل نفوذ سوزن تا لبه داخلی قالب از ۹,۵ میلی‌متر کمتر باشد. در نهایت به مرحله ای می‌رسیم که سوزن در خمیر سیمان نفوذ نمی‌کند.

نمودار نفوذ - زمان را رسم می‌کنیم مدت زمان متناظر با نفوذ ۲۵ mm بیانگر گیرش اولیه و مدت زمان مربوط به نفوذ صفر معادل گیرش نهایی خمیر سیمان است.



شکل ۳-۷: آزمایش سوزن ویکات

۳-۴-۶- آزمایش تعیین تغییرات دمای هیدراسیون سیمان

هدف از این آزمایش تعیین تغییرات دمای خمیر سیمان در اثر هیدراسیون و مقایسه آن در خمیر سیمان ساخته شده با آب حاوی میکرو-نانو حباب و آب معمولی است.

با توجه به اینکه مدت آزمایش چند ساعت طول می‌کشد لازم است که محیط آزمایش کاملاً عایق بندی شده باشد تا از تبادل حرارت با محیط جلوگیری شود. برای عایق شدن، از یک بلوک پلی استایرن استفاده شد. در داخل این

بلوک فضای خالی برای بشر با ظرفیت 200 cc تعبیه شد. درپوش آن نیز یک قطعه پلی استایرن بود که فقط برای رد شدن حسگر حرارتی دستگاه اندازه گیری محلی تعبیه شده بود.

ابتدا آب و سیمان به مدت طولانی در محیط آزمایشگاه قرار گرفتند تا درجه حرارت محیط را کسب کنند سپس مقدار ۱۰۰ ml آب را درون بشر ریخته و مقدار ۱۰۰ گرم سیمان با آن اضافه می شود. حرارت مخلوط سیمان در فواصل زمانی ۱۵ ثانیه برداشت گردید.

با توجه به مقایسه ای بودن نتایج و موثر بودن دمای اولیه در تغییرات دمای هیدراسون، هر دو آزمایش با دمای اولیه یکسان انجام شد.

۳-۵- اندازه گیری ابعاد نانو - میکرو حبابها

ابعاد نانو - میکرو حبابها حداقل ۲۴ ساعت پس از تولید شده با استفاده از دستگاه Nano Particle Size Analyzer انجام شد. که بر اساس تئوری مای طراحی شده است. دستگاه مزبور با روش پراش نور دینامیکی کار می کند و قادر به اندازه گیری ذرات در محدوده ابعادی ۱ نانومتر تا ۶ میکرون است. آزمایشات تعیین اندازه بر روی نمونه هایی با عمر تا یک ماه انجام شد و نتایج به ۲ روش کومولانت و پاد-لاپلاس و بر اساس ۳ پارامتر حجم، تعداد و شدت نمونه ها به دست آمد. در این آزمایشات فرض شده است که ضریب شکست نور برای نانو - میکرو حباب ها ۱/۵۶ و برای آب ۱/۳۳ است. توزیع ذرات در مقیاس نانو به کمک نور لیزر با طول موج ۶۵۷ nm و توان ۵۰٪ تعیین شد. و نمونه برداری هایی به صورت دوره ای برای تعیین اندازه ذرات انجام گرفت، تا توزیع اندازه ذره ها در بازه یک ماهه مشخص گردد. آزمایشات مشخص نمود کوچکترین حبابها دارای اندازه تقریبی ۸۱ nm می باشند.

برای کاهش و کنترل خطاها، هر اندازه گیری حداقل ۲ بار با فاصله زمانی کوتاهی انجام شد و میانگین دو اندازه گیری ملاک عمل قرار گرفت. اندازه گیری ها بصورت نمودار توزیع آماری قطر نانوحباب ها بیان می شوند. و ملاک مقدار متوسط ابعاد نانو - میکرو حبابها Dmean number است. و میانگین قطر هیدرودینامیکی Zaverag با متوسط قطر ذرات با $Db(50)$ که معرف اندازه ای است که ۵۰٪ حجمی نانو -

میکرو حباب‌ها دارای ابعادی کوچکتر از این اندازه و ۵۰٪ حجمی دارای ابعادی بزرگتر از آن می‌باشد، تفاوت دارد. (به پیوست بخش مراجعه شود)

۳-۵-۱- صحت اندازه گیری ابعاد نانو - میکرو حباب‌ها:

جهت بررسی صحت اندازه گیری‌ها با روش تفرق نور دینامیکی، حداقل ۲ اندازه گیری تحت شرایط مشابه از یک نمونه حاوی محلول نانو - میکرو حباب انجام شد. متوسط ضریب پراکندگی چند گانه این اندازه گیری‌ها معادل برای نمونه های ۶ روزه برابر ۰,۴۸۳ بدست آمد. براساس استاندارد ایزو ۲۲۴۱۲ سال ۲۰۰۸ جهت صحت نتایج اندازه گیری‌ها با روش تفرق نور دینامیکی، مقدار ضریب همبستگی برای ذرات تا ۰,۷ اندازه گیری‌ها قابل قبول است.

۳-۵-۲- بررسی پایداری نانو - میکرو حباب‌ها:

از آنجا که برای مقاصد کاربردی و عملی، پایداری نانوحباب‌ها یکی از پارامترهای مهم می‌باشد، لذا تغییرات توزیع ابعادی این حباب‌ها با زمان نیز بررسی شد. به این منظور مقادیر پتانسیل زتای سطحی نانوحباب‌ها نیز بعنوان تابعی از زمان، اندازه گیری شد. مقادیر پتانسیل زتای سطحی نانو - میکرو حباب‌ها با استفاده از یک زتا پتانسیل متر Zeta Compact Cad Instrument اندازه گیری شدند. اندازه گیری ویسکوزیته نیز با استفاده از همین دستگاه به صورت اتوماتیک از نمونه‌ها گرفته شد.

۳-۵-۳- اندازه گیری خصوصیات شیمیایی:

در این آزمایش از آب شهری شهر شاهرود و بدون هیچگونه ناخالصی افزودنی به عنوان سیال پایه و از هوای محیط برای ایجاد نانو حباب استفاده شد. برای اندازه گیری خصوصیات اولیه از قبیل: اکسیژن محلول، رسانایی محلول، pH، دما و اختلاف بار مطلق با استفاده از دستگاه SmartCHEM-Lab شرکت TPS و با استفاده از سنسور مربوطه انجام گردید.

آب شهری دارای مشخصاتی مطابق با جدول ۳-۴ بود :

جدول ۳-۴ : اندازه گیری خصوصیات آب شهری

مقادیر	موارد اندازه گیری
8.15	PH
581	Conductivity(μ s)
0.41	Turbidity(NTU)
19	Temperature($^{\circ}$ c)
3.01	Dissolved Oxygen(ppm)
-61	Absolute Millivolt (mv)
0.147	Absorption(abs)
274	TDS(ppm)

۳-۵-۴- اندازه گیری کدورت:

مقدار کدورت ها با استفاده از دستگاه کدورت سنج شرکت lovibond آلمان با استاندارد ISO 7027

و بازه عملکردی ۰,۰۱ NTU تا ۱۱۰۰ NTU و نوع پرتو اینفرارد با زاویه ۹۰ درجه و طول موج ۸۶۰ nm

مورد استفاده قرار گرفت.

فصل چهارم

تحلیل نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها

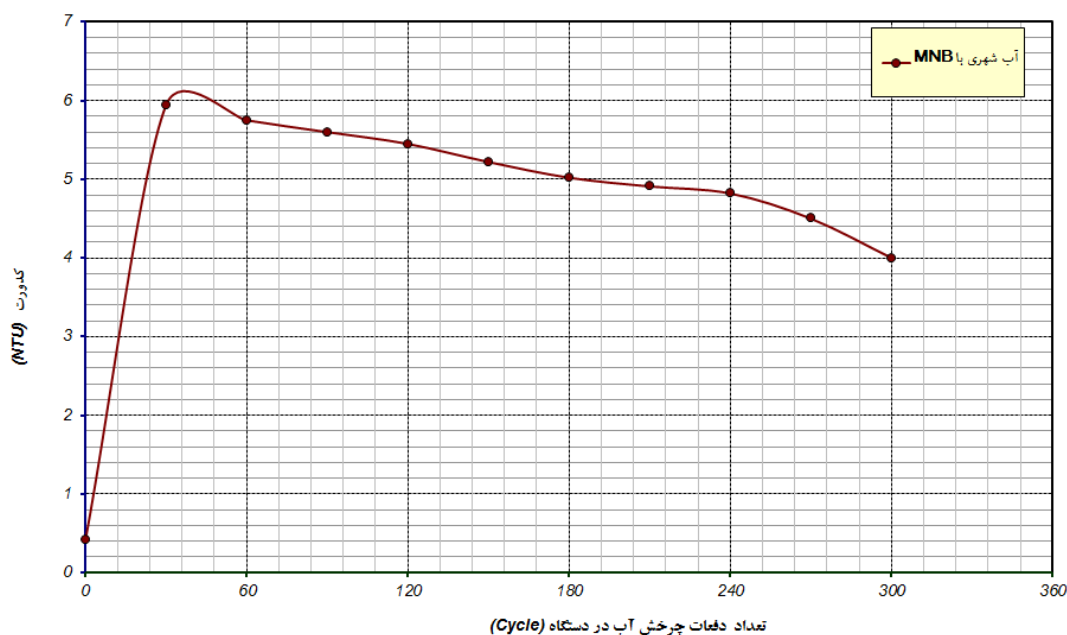
۴-۱- نتایج آزمایش های صورت گرفته روی آب حاوی میکرو نانو حبابها

۴-۱-۱ پایداری حباب ها در طول کارکرد دستگاه:

به علت اینکه در مدت زمان ساخت بتن بایستی حباب ها از پایداری قابل قبولی برخوردار باشند، به همین علت برر سی پایداری حباب ها در هنگام عملکرد دستگاه و همچنین پس از اتمام کار دستگاه و برای یک نمونه ثابت در دستور کار قرار گرفت. و آزمایشاتی در خصوص پایداری نانو- میکرو حباب ها انجام گرفت، که در این بخش به آنها اشاره شده است.

۴-۱-۱-۱-۱ اندازه گیری کدورت در هنگام عملکرد دستگاه:

پس از شروع به کار دستگاه حباب ساز اقدام به نمونه گیری از آب برای اندازه گیری کدورت گرفته شد. همانطور در شکل ۴-۱ مشاهده می شود، در ابتدای شروع به کار دستگاه مولد میکرو- نانو حباب، کدورت افزایش یافته و سپس با شیب بسیار ملایم تری از شدت کدورت کاسته می شود. در ابتدا امکان حل شدن بیشتر هوا در آب وجود دارد و لذا ذرات هوا بصورت محلول یا بصورت محدوده و سیعی از حبابهای با اندازه متفاوت موجود هستند. چون دستگاه و 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. با چرخش آب حاوی حباب در داخل چرخه بسته تولید نانو حباب به تدریج هوا در آب به مرحله فوق اشباع رسیده و امکان حل شدن بیشتر هوا در آب وجود ندارد. از سوی دیگر فرآیند تولید حباب همانگونه که قبلا ذکر شد، منجر به کاهش اندازه حبابها می شود. و در نتیجه چون متوسط اندازه حبابها به کمتر از طول موج منفی میل می کند، دستگاه کدورت سنج مقادیر کمتری را نشان می دهد، زیرا ذرات کمتری را شناسایی و در نتیجه این امر گزارش کدورت کمتر آب با زمان است زیرا با هر بار گذر آب از مولد حبابهای ریز تری و زیر حد ردیابی دستگاه کدورت سنج تولید شده و از ذرات قابل ردیابی کاسته می شود.



شکل ۴-۱ منحنی تغییرات کدورت نانو- میکرو حباب تولید شده در آب در طی زمان

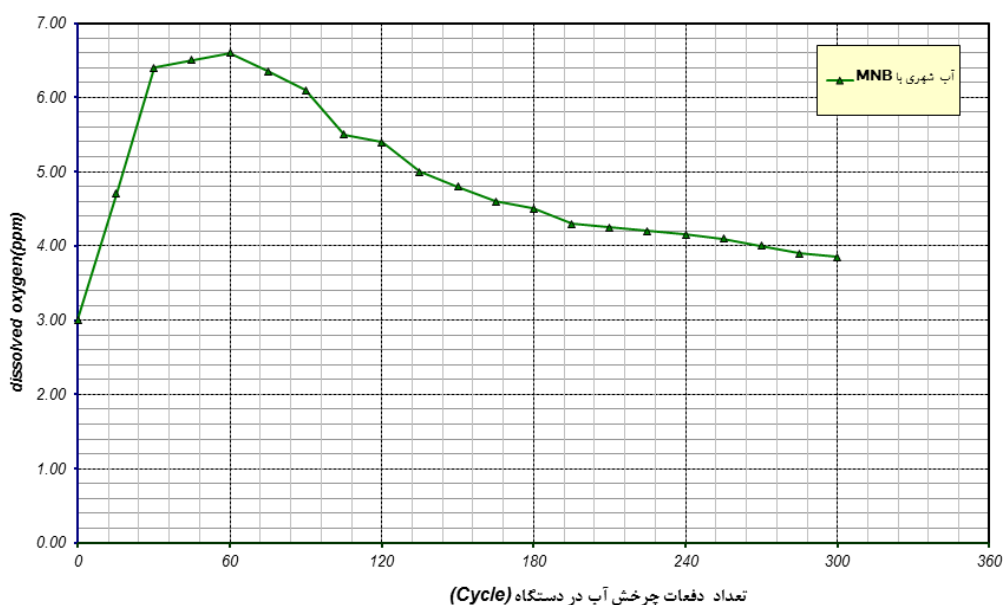
۴-۱-۱-۲- اندازه گیری اکسیژن حل شده در هنگام عملکرد دستگاه:

برای بررسی عملکرد پایدار شدن ذرات در دستگاه اکسیژن محلول (DO^4) آب نیز مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۴-۴، تغییرات غلظت اکسیژن حل شده در محلول حاوی نانو- میکرو حبابها را از لحظه شروع به کار دستگاه نانو حباب ساز تا رسیدن به حداکثر و سپس کاهش و نهایتاً توقف کار دستگاه نانو حباب ساز، تا مدت ۵ ساعت نشان می‌دهد. مقادیر DO در بازه زمانی مزبور، حاکی از کاهش مقدار DO زمان می‌باشد. مطابق شکل ۴-۲، مقدار اکسیژن حل شده در محلول در لحظه تولید نانو- میکرو حبابهای هوا برابر 1.3 ppm می‌باشد. این مقدار در زمان ۱ ساعت پس از تولید که بیانگر حداقل میزان کارکرد دستگاه می‌باشد، به مقدار 6.6 ppm افزایش یافت. تغییرات مقدار اکسیژن حل شده در فاصله زمانی تا ۵ ساعت پس از زمان تولید، نسبتاً ناچیز و قابل صرف نظر بوده است. (5.4% افزایش یافته است)

کاهش غلظت اکسیژن حل شده در محلول حاوی نانو- میکرو حبابها، باعث افزایش گرادیان غلظت هوا بین سطح مشترک نانو حباب و آب می‌گردد. با گذشت زمان، هوای موجود در درون نانو- میکرو حبابها در

⁴ Dissolved Oxygen

آب حل می شود. که موجب کاهش فشار درونی و در نهایت از بین رفتن نانو — میکرو حبابها می گردد. با کاهش غلظت نانو — میکرو حبابها، کدورت کاهش می یابد. کاهش مقدار اکسیژن حل شده در آب پس از تولید نانوحبابهای هوا و کاهش ابعاد نانوحبابها با گذشت زمان در تحقیقات گذشته نیز گزارش شده است. براساس اطلاعات بدست آمده، مقدار اکسیژن حل شده با کنترل مقدار نفوذ گاز از فصل مشترک نانوحباب با محلول، عامل پایداری نانو — میکرو حبابها می باشد. اما به نظر میرسد تنها غلظت اکسیژن حل شده قادر به توجیه یا توضیح پایداری توزیع ابعادی نانو - میکرو حبابها نیست.

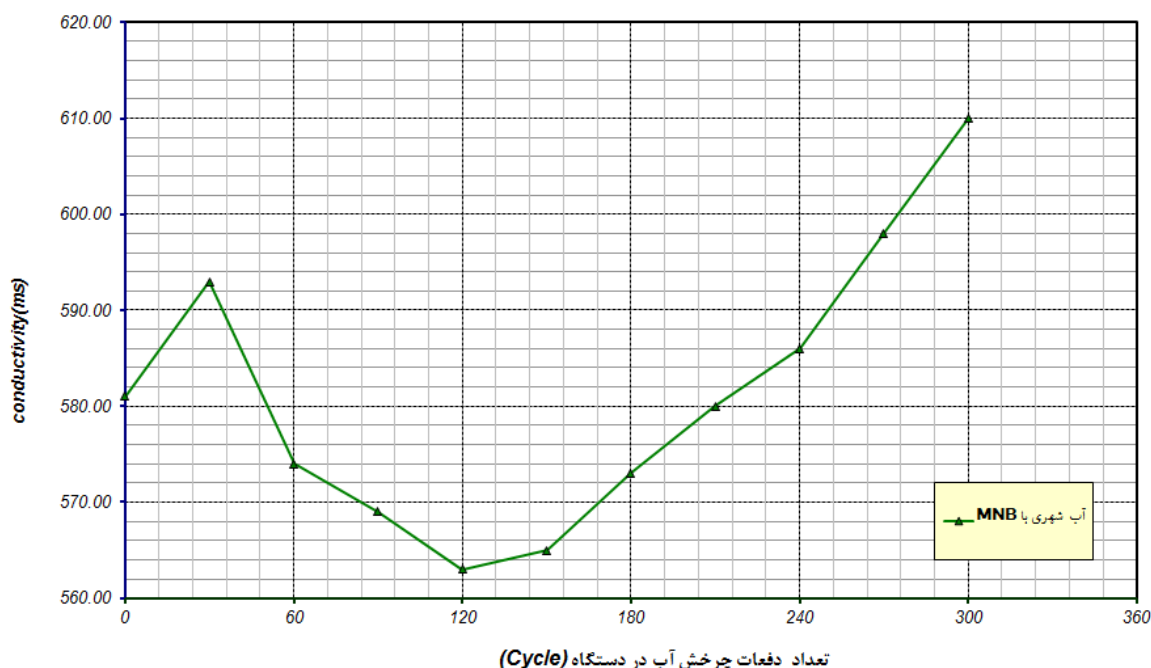


شکل ۴-۲ منحنی تغییرات اکسیژن حل شده در محلول در طی زمان

۴-۱-۱-۳- اندازه گیری رسانایی در هنگام عملکرد دستگاه:

مطابق شکل ۴-۳ مقدار رسانایی محلول با افزایش زمان دستگاه را نشان داده است. در ابتدا با افزایش میکرو حبابها بارهای درون هسته به یک سمت (بار مثبت) متمایل می شوند. از این رو انتقال بارها و یا رسانایی درون مایع بیشتر از مقدار اولیه خود می شود. سپس با کارکرد بیشتر دستگاه با کاسته شدن از مقدار میکرو حبابها و افزایش نانو حبابها روبرو خواهیم بود. از این رو در هنگامی که از مقدار میکرو حبابها کاسته و به مقدار نانو حبابها افزوده می شود، به علت به سمت تعادل رفتن مقدار بارهای درون

سپس هسته از مقدار رسانایی کاسته شده تا هنگامی که ثبات الکترو استاتیکی در هسته شکل گیرد سپس بارهای هسته به یک سمت (بار منفی) تمایل پیدا می کنند و از این هنگام به بعد دوباره انتقال بارها و الکترون ها راحت تر انجام شده و رسانایی به صورت پیوسته افزایش می یابد.



شکل ۳-۴ منحنی تغییرات رسانایی محلول در مدت زمان کارکرد دستگاه

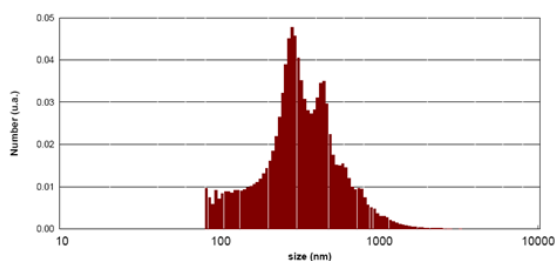
۲-۱-۴- پایداری اندازه حباب ها از نمونه گرفته شده در طول زمان:

در این بخش به بررسی یک نمونه تهیه شده در طول زمان از دستگاه نانو- میکرو حباب ساز پرداخته می شود و تاثیرات زمان بر روی نمونه مورد بررسی قرار می گیرد.

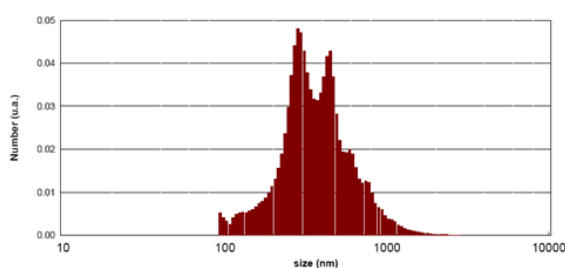
۴-۱-۲-۱- پایداری نانو - میکرو حباب ها:

جهت مطالعه پایداری حباب ها در طول زمان پس از تولید به بررسی پایداری یک نمونه مشخص در طول زمان پرداخته شد. شکل های ۴-۴ و ۵-۴، تغییرات حبابهای ابعاد نانو- میکرو را با ابعاد آنها در فواصل زمانی پس از تولید نشان می دهند. همانگونه که در شکل ۴-۴، منحنی های تعداد با ابعاد نانو — میکرو حباب ها در بازه های زمانی ۱، ۳ و ۶ و ۳۰ روزه پس از لحظه تولید را که توسط دستگاه Nano Particle Size Analyzer

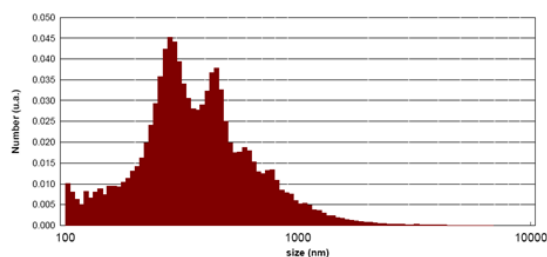
به دست آمده است، نشان داده شده است. در شکل ۴-۵، به بررسی تغییرات این نمودارها به شکل مجتمع پرداخته و متوسط ابعاد نانو- میکرو حبابها D_{mean} number به ترتیب $364,24 \text{ nm}$ و $405,18 \text{ nm}$ و $441,37 \text{ nm}$ و $1347,25 \text{ nm}$ می باشد، که قطر اصلی تعداد ملاک اندازه گیری می باشد. و متوسط ضریب پراکندگی هر یک از روزها به ترتیب $0,44$ و $0,53$ و $0,473$ که متوسط این مقادیر برای نمونه های ۱ و ۳ و ۶ روزه برابر $0,483$ است.



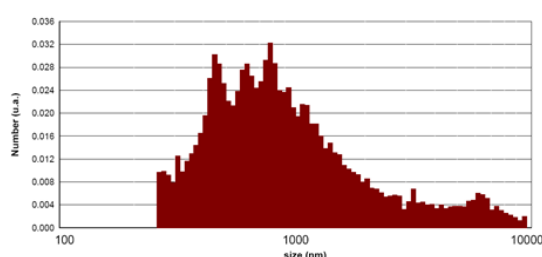
شکل الف



شکل ب



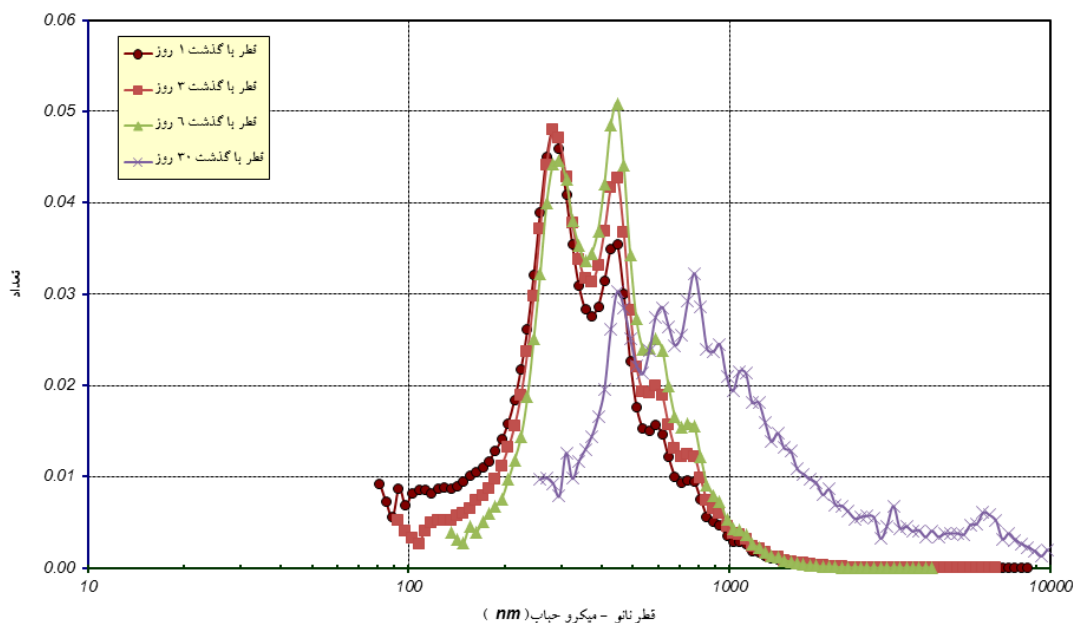
شکل پ



شکل ت

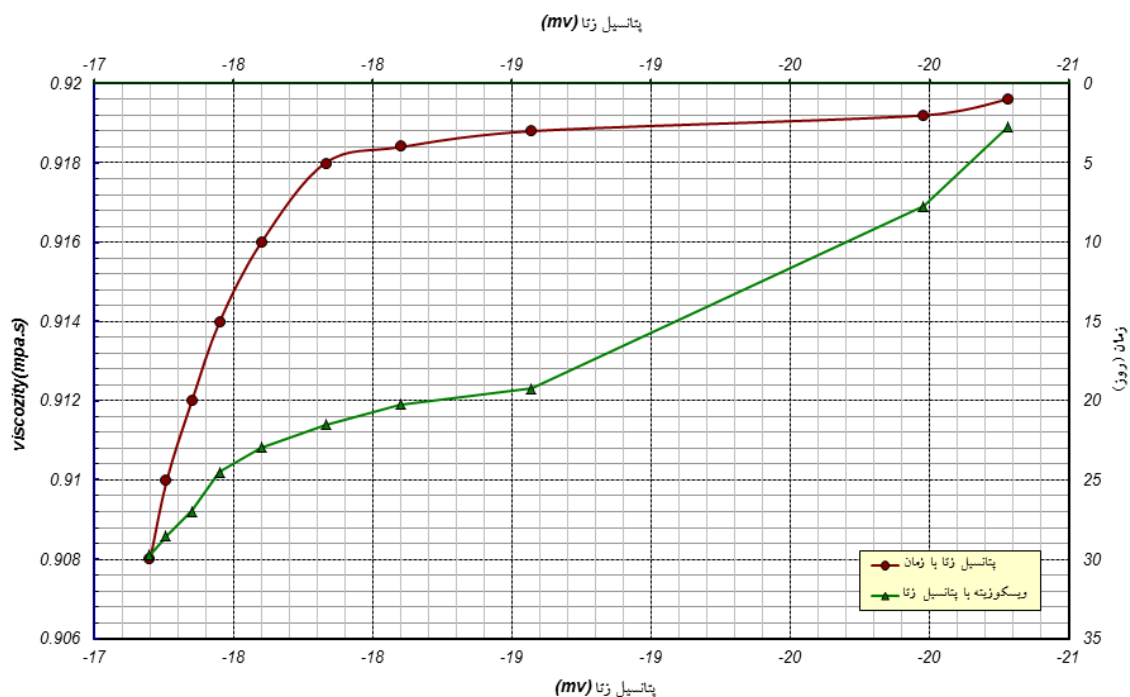
شکل ۴-۴-۴ منحنی توزیع ابعادی نانو- میکرو- حباب تولید شده در آب

(الف: نمونه پس از گذشت ۱ روز، ب: پس از گذشت ۳ روز، پ: پس از گذشت ۶ روز، ت: پس از گذشت ۳۰ روز)



شکل ۴-۵ منحنی تغییرات تعداد ابعاد نانو- میکرو حباب تولید شده در آب در طول زمان

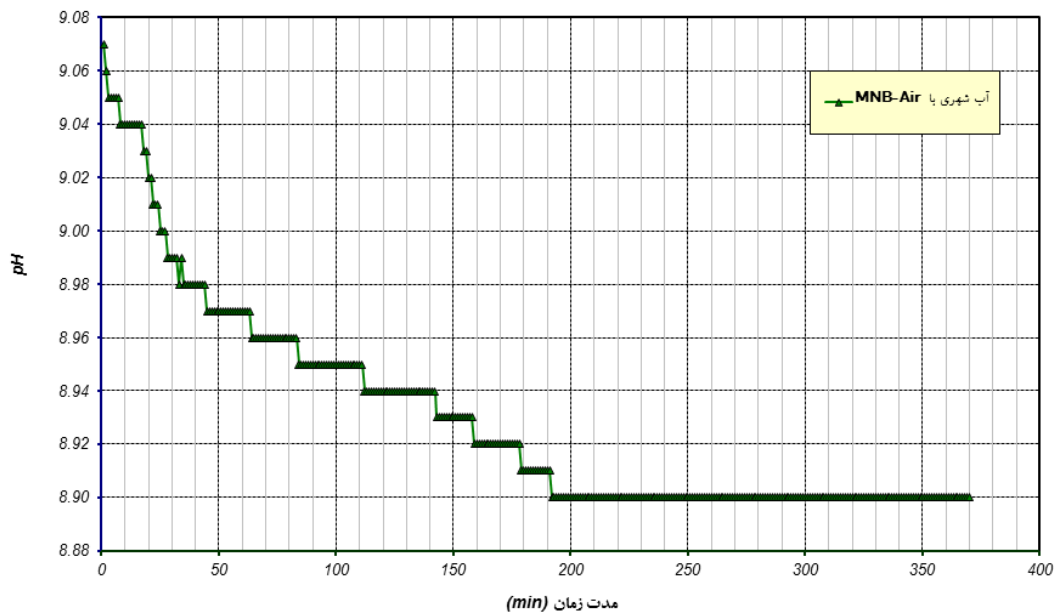
شایان ذکر است که یکی از پارامترهای پایداری بررسی پتانسیل زتا می باشد. شکل ۴-۶، تغییرات پتانسیل زتای سطحی نانو — میکرو حبابها را از ۱ روز پس از تولید تا یک ماه پس از آن، نشان میدهد. مطابق این شکل، مقدار پتانسیل زتا در این محدوده زمانی از حدود 20.8 mV در ۱ روز پس از تولید به حدود 17 mV پس از ۳۰ روز از تولید کاهش یافته است. با کاهش مقدار مطلق پتانسیل زتای سطحی و متعاقب آن کاهش بار سطحی (که در اینجا منفی است)، نیروی دافعه بین نانو — میکرو حبابها کاهش یافته و به یکدیگر نزدیکتر می شوند. این نزدیکی، منجر به تلفیق، بهم پیوستگی و درشت تر شدن ابعاد نانو — میکرو حبابها میگردد. کاهش پتانسیل زتای سطحی نانو — میکرو حبابها با گذشت زمان توسط یوشیکوبو و همکارانش نیز مورد تأیید قرار گرفته است. به علت اینکه شناوری ذرات به علت بزرگتر بودن پتانسیل زتا از نیروی واندروالسی است و ویسکوزیته نیز تابعی از تابع نیروهای بین مولکولی می باشد، همانطور که از شکل ۴-۵، که بیانگر تغییرات ویسکوزیته با پتانسیل زتا می باشد. نیز استنباط می شود که کاهش پتانسیل زتا با کاهش ویسکوزیته همراه است.



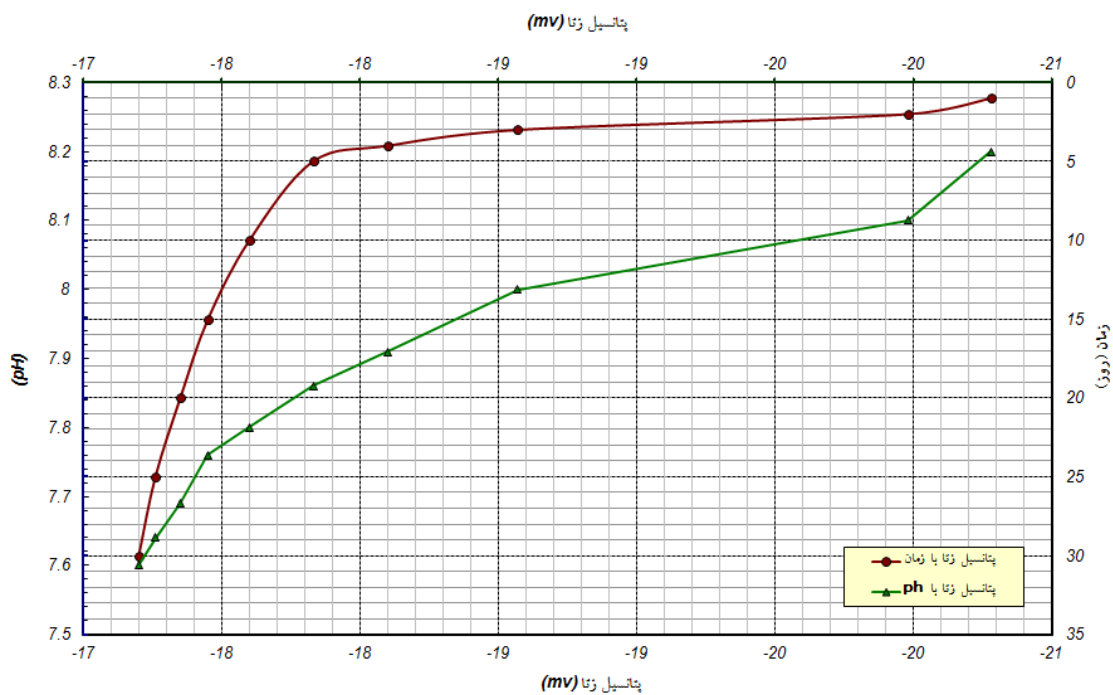
شکل ۴-۶ منحنی ویسکوزیته- پتانسیل زتا و پتانسیل زتا با زمان

۴-۱-۲-۲- اثر pH در طول زمان نانو- میکرو حبابها:

شکل ۴-۷، تغییرات pH نانو- میکرو حبابها را در طول زمان برای یک نمونه نشان می دهد. pH با کاهش از ۹ به ۸،۹ در طول ۳۰۰ دقیقه تغییرات اندکی را تجربه می کند. در شکل ۴-۸ تغییرات پتانسیل زتا با pH نشان داده شده است. ذرات دارای بار الکتریکی یکسان در سیستمهای کلوئیدی در مقادیر بالای پتانسیل زتا، تمایل به دفع یکدیگر دارند. در خصوص نانوحبابها نیز، مقادیر بالای پتانسیل زتا که با افزایش بار منفی سطح باعث جذب آنیونهای (OH⁻) همراه است. با ایجاد نیروی دافعه سطحی، از نزدیک شدن نانوحبابها به یکدیگر و در نتیجه تلفیق و بزرگتر شدن آنها جلوگیری می نماید و باعث معلق ماندن ذرات درشت تر در طول بازه زمانی می شوند.



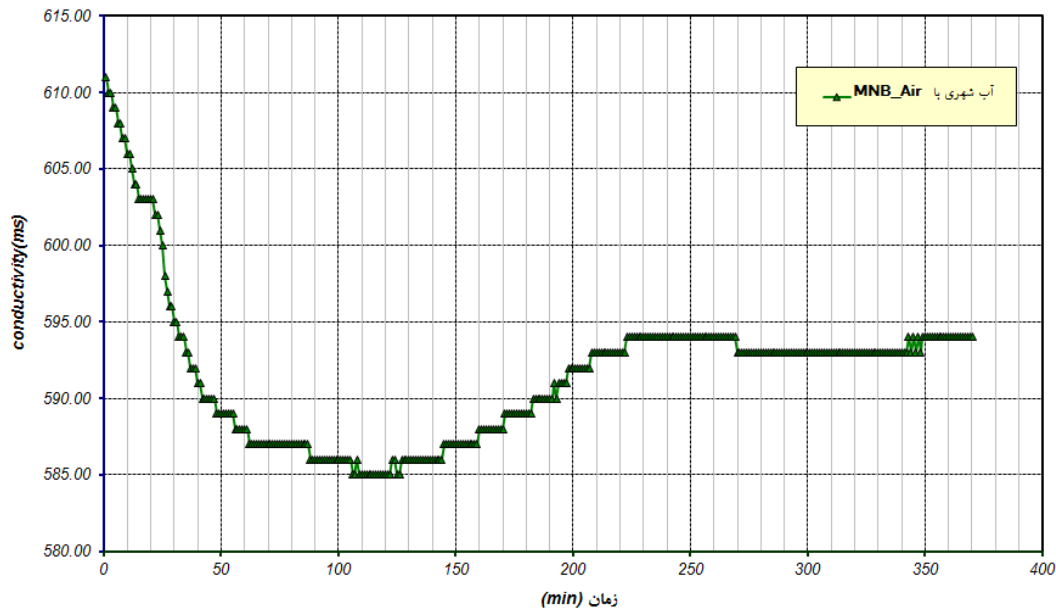
شکل (۷-۴) منحنی تغییرات pH با زمان برای میکرو - نانو حباب هوا



شکل (۸-۴) منحنی تغییرات pH - پتانسیل زتا میکرو - نانو حباب هوا در طول یک ماه

۴-۱-۲-۳- اثر رسانایی محلول در طول زمان نانو - میکرو حباب‌ها:

همانطور که در شکل ۴-۹ دیده می شود با افزایش دفعات گذر یک حجم مشخص آب از دستگاه مقدار رسانایی آب که قبلا در حدود $581 \mu S$ بود به حدود $610 \mu S$ و پس از حدود ۳۵۰ دقیقه به یک ثابت نسبی می رسد. تغییرات به این خاطر است که با افزایش زمان، پتانسیل زتا کاهش و قطر نانو حباب ها افزایش و انحلال درون هسته کاهش یافته و از انرژی هسته کاسته می شود و لذا میدان الکترو استاتیکی داخلی هسته ضعیف شده و بارها تا وقتی که به مقدار پایداری برسند به یک سمت میل می کنند.

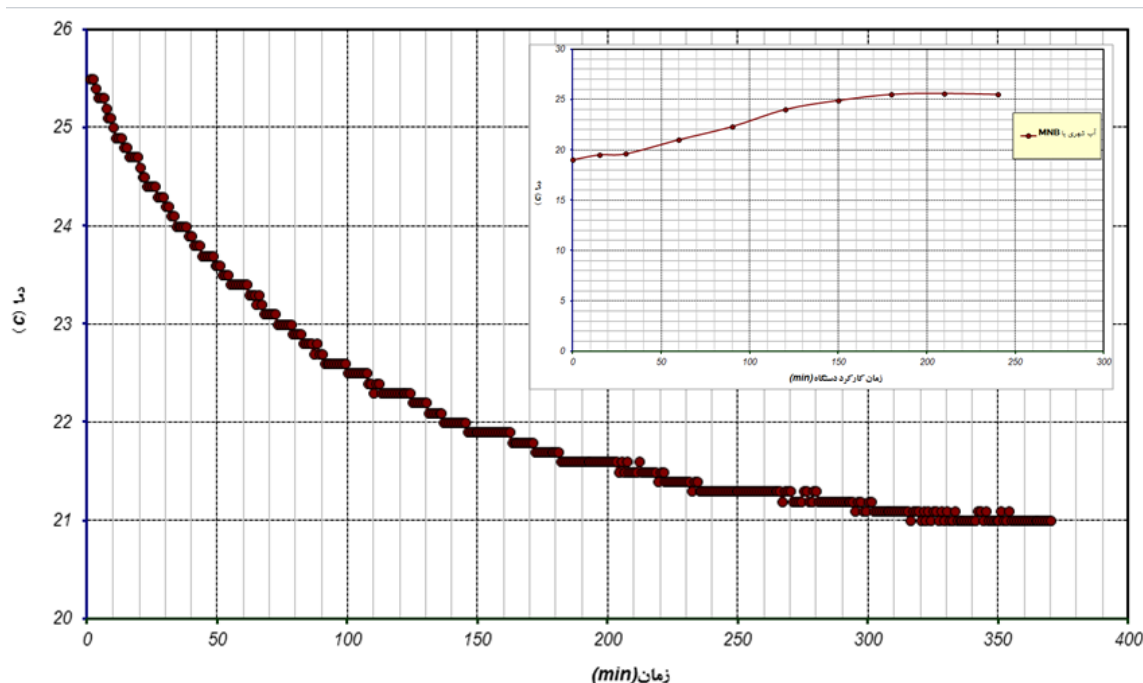


شکل (۴-۹) منحنی هدایت الکتریکی با زمان برای میکرو - نانو حباب هوا

۴-۱-۲-۴- اثر دما در طول زمان نانو - میکرو حباب‌ها:

مطابق شکل ۴-۱۰ که تغییرات دما در هنگام کارکرد دستگاه را برای یک نمونه نشان می دهد . می توان دریافت که با افزایش کارکرد دستگاه دمای آب حدود ۵ درجه در طول مدت ۴ ساعت کارکرد دستگاه افزایش یافته و برای یک نمونه ثابت در طول مدت ۵ ساعت تقریبا به دمای اولیه خود برگشته است. این افزایش ناشی از آبشار انرژی توربولنسی است که انرژی پمپ را مستهلک نموده است. زو و همکاران در سال

۱۹۹۶ نشان داد که افزایش دما منجر به تشکیل حباب در سرعت های کمتر جریان مایع در لوله ونتوری می شود. این امر، بواسطه افزایش فشار بخار و در نتیجه کاهش عدد کاپیتاسیون رخ می دهد. اگر نانو حباب متشکل از هسته های گاز باشد، تغییرات دما و فشار محیط اطراف باعث تغییر در اندازه و شکل آنها خواهد شد. یانگ نشان داد که افزایش دما از ۲۵ به ۳۰ درجه منجر به تشکیل نانو حباب ها بصورت انتخابی بر سطح یک جامد می شود با افزایش دما از ۳۰ درجه به بیش از ۴۰ درجه سانتی گراد منجر به افزایش حجم، بهم پیوستگی و ترکیدن و در نتیجه ناپدید شدن آن میگردد. دلایل این پدیده توسط یانگ ارائه نگردید، ولی مشاهده شد که در تشکیل نانو حباب ها، دما عامل مهمی است.

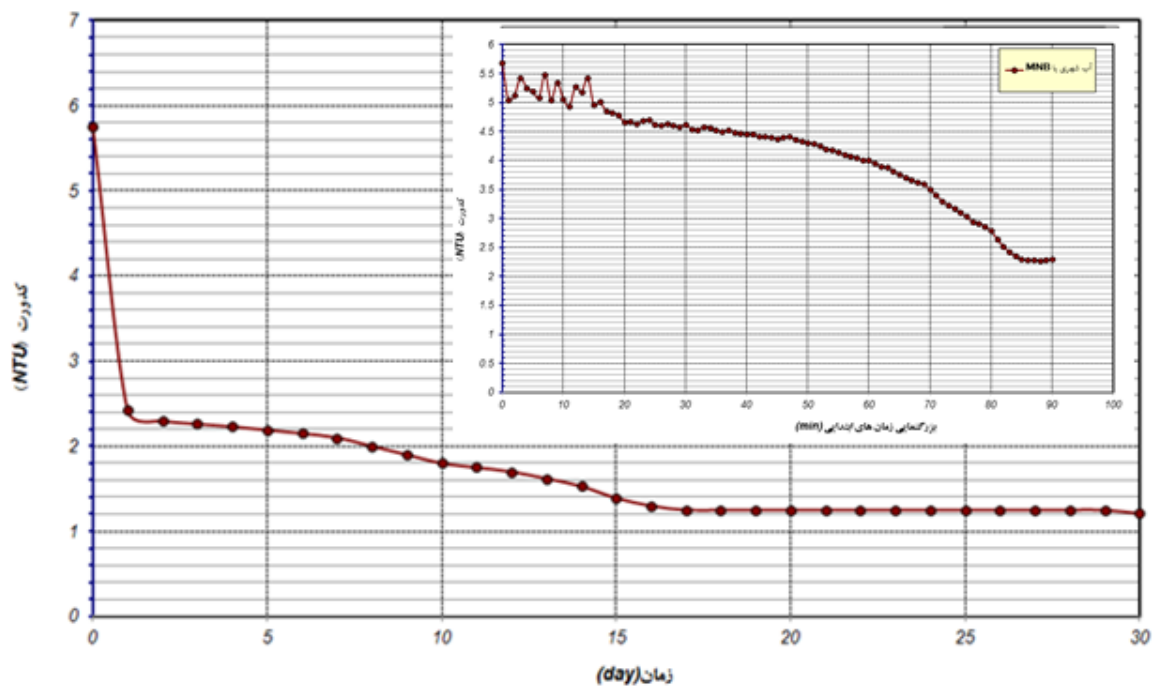


شکل (۴-۱۰) منحنی دما با زمان برای میکرو - نانو حباب هوا

۴-۱-۲-۵- اثر نانو - میکرو حباب ها بر کدورت در طول زمان:

از شکل ۴-۱۱ استفاده می شود که با افزایش زمان برای یک نمونه ثابت کدورت کاهش می یابد. در لحظات اولیه بعد از اتمام فرآیند نانو حباب، مایع، دارای کدورت ۵,۸ NTU بود که با گذشت زمان و در بازه

زمانی حدود ۹۰ دقیقه به مقدار ۲,۴ NTU کاهش یافت و پس از گذشت یک ماه به حدود ۱,۲ NTU رسید.



شکل (۴-۱۱) منحنی تغییرات کدورت با زمان

در قسمت بالای شکل ۴-۱۱ تصویر بزرگتر به بزرگنمایی محدوده ابتدایی منحنی ارائه شده است. که این قسمت نشان دهنده فعل و انفعالات شدید احتمالی نانو حباب ها در محدوده پروب اندازه گیری است.

برگرفته از: (مظفری نائینی ر، ۱۳۹۲)

۴-۲- آزمایش اسلامپ

نتایج حاصل از آزمایش اسلامپ نشان می‌دهد که استفاده از آب حاوی میکرو- نانو حباب‌ها برخلاف عملکرد حباب‌های معمول در ساخت بتن حباب‌دار که با کمک مواد شیمیایی مضاف ساخته می‌شوند باعث کاهش روانی و اسلامپ بتن می‌شود. جدول شماره (۴-۱) نشان دهنده متوسط مقادیر حاصل از سه آزمایش در فصول مختلف سال و در دماهای متفاوت است. همانگونه که دیده می‌شود هرچند مقدار اسلامپ‌ها در نمونه‌ها مختلف است ولی

الگوی کاهش روانی در بتن ساخته شده در بتن ساخته شده با میکرو- نانو حباب در مقایسه با بتن معمولی در تمام نمونه‌ها وجود دارد.

جدول شماره ۴-۱: نتایج بدست آمده از آزمایش اسلامپ، آزمایش اول

With MNB (mm)			Without MNB (mm)			آزمایش اول
۱	۲	۳	۱	۲	۳	اختلاف ارتفاع اندازه گیری شده
۴۶	۳۷	۴۰	۴۱,۵	۵۰	۵۱	
۴۱			۴۷,۵			میانگین نمونه‌ها

جدول شماره ۴-۲: درصد انحراف از میانگین نتایج بدست آمده از آزمایش اسلامپ

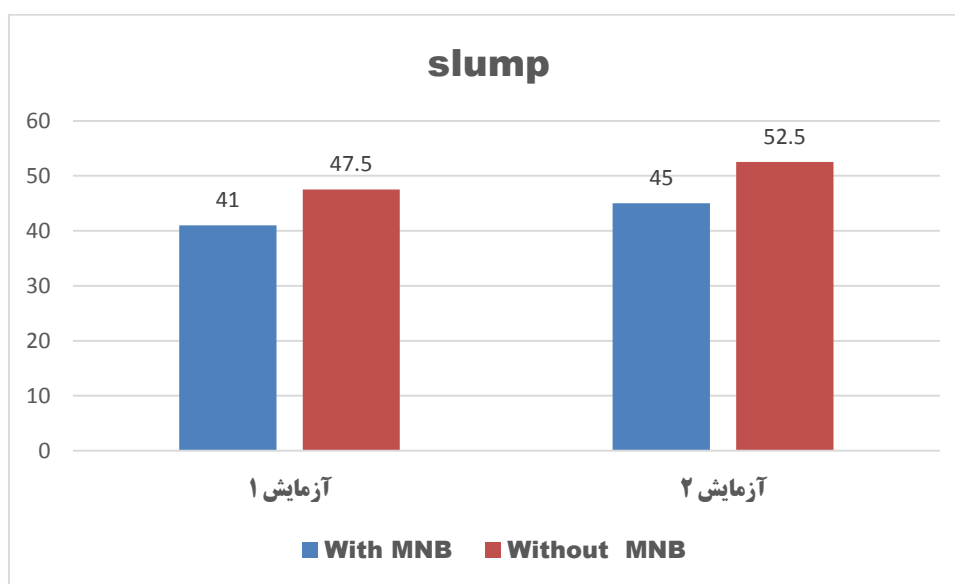
With MNB (mm)			Without MNB (mm)			آزمایش اول
۱	۲	۳	۱	۲	۳	شماره نمونه
۱۲,۲	-۹,۷۵	-۲,۴۳	-۱۲,۶۳	۵,۲۶	۷,۳۷	درصد انحراف از میانگین (%)

جدول شماره ۴-۳: نتایج بدست آمده از آزمایش اسلامپ، آزمایش دوم

With MNB (mm)			Without MNB (mm)			آزمایش دوم
۱	۲	۳	۱	۲	۳	اختلاف ارتفاع اندازه گیری شده
۳۹	۴۷	۴۹	۴۸,۵	۵۶	۵۳	
۴۵			۵۲,۵			میانگین نمونه‌ها

جدول شماره ۴-۴: درصد انحراف از میانگین برای نتایج آزمایش اسلامپ، آزمایش دوم

With MNB (mm)			Without MNB (mm)			آزمایش دوم
۱	۲	۳	۱	۲	۳	شماره نمونه
-۱۳,۳۳	۴,۴۴	۸,۹	-۷,۶	۶,۶۷	۰,۹۵	درصد انحراف از میانگین (%)



شکل ۴-۱۱: اسلامپ بتن حاوی میکرو-نانو حباب و بتن معمولی

از سوی دیگر این نتایج با مطالعات انجام شده در مورد دیگر نانو مواد از قبیل: nano-TiO₂, nano-Al₂O₃ و nano-ZnO₂ و nano-Fe₂O₃ موافقت دارد [Salemi, Behfarnia and Zaree, 2014] و این نانو ذرات نیز باعث کاهش اسلامپ و روانی بتن می گردند.

این در حالی است که افزایش ۰,۵ تا ۱ درصدی حباب های هوا در بتن به کمک افزودنی های حبابزا باعث افزایش اسلامپ به میزان ۲۵ میلی متر می شود [Kosmatka et al, 2003].

۴-۳- آزمایش مقاومت فشاری

این آزمایشات نیز به صورت نمونه های سه گانه انجام شده است. نتایج بدست آمده از این آزمایش نشان دهنده افزایش مقاومت فشاری نمونه های بتنی ساخته شده با آب حاوی میکرو- نانو حباب به مقدار میانگین ۱۵ درصد است. (مقاومت ۲۸ روزه)

جدول شماره ۴-۵: مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه های ساخته شده با آب حاوی نانو حباب و آب معمولی، آزمایش اول

With MNB						Without MNB						آزمایش اول
Force (KN)			Stress (MP)			Force (KN)			Stress (MP)			
۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	شماره نمونه
۴۴۹	۴۳۶	۴۳۹,۵	۱۹,۹۵	۱۹,۳۸	۱۹,۵۳	۳۲۰	۳۴۵	۳۵۵	۱۴,۲۲	۱۵,۷۷	۱۵,۳۳	مقاومت فشاری
۴۴۱,۵			۱۹,۶			۳۴۰			۱۵,۱			میانگین

جدول شماره ۴-۶: انحراف از میانگین نتایج مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه های ساخته شده با آب حاوی نانو حباب و آب معمولی

آزمایش اول

With MNB						Without MNB						آزمایش اول
Force (KN)			Stress (MP)			Force (KN)			Stress (MP)			
۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	شماره نمونه
۱,۷	-۱,۲	-۰,۴۵	۱,۷	-۱,۲	-۰,۴۵	-۵,۸۸	۱,۴۷	۴,۴۱	-۵,۸۸	۱,۴۷	۴,۴۱	انحراف از میانگین (%)

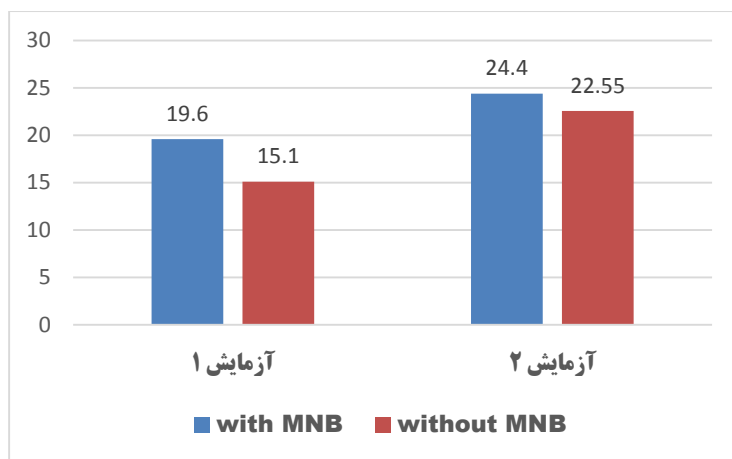
جدول شماره ۴-۷: مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه های ساخته شده با آب حاوی نانو حباب و آب معمولی، آزمایش دوم

With MNB						Without MNB						آزمایش دوم
Force (KN)			Stress (MP)			Force (KN)			Stress (MP)			
۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	شماره نمونه
۵۳۱	۵۵۱	۵۶۸	۲۳,۶	۲۴,۴۹	۲۵,۲۴	۵۰,۵	۵۰,۰	۵۱,۸	۲۲,۴۴	۲۲,۲۲	۲۳,۰۲	مقاومت فشاری
۵۵۰			۲۴,۴			۵۰,۷,۶			۲۲,۵۵			میانگین

جدول شماره ۴-۸: انحراف از میانگین نتایج مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه های ساخته شده با آب حاوی نانو حباب و آب معمولی

آزمایش دوم

With MNB						Without MNB						آزمایش دوم
Force (KN)			Stress (MP)			Force (KN)			Stress (MP)			
۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	شماره نمونه
-۳,۴۵	۰,۱۸	۳,۲۷	-۳,۴۵	۰,۱۸	۳,۲۷	-۰,۵۱	-۱,۵	۲	-۰,۵۱	-۱,۵	۲	انحراف از میانگین (%)



شکل ۴-۱۲: نمودار مقاومت فشاری ۷ روزه بتن حاوی میکرو-نانو حباب و بتن معمولی

جدول شماره ۴-۹: مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های ساخته شده با آب حاوی نانو حباب و آب معمولی، آزمایش اول

With MNB						Without MNB						آزمایش اول
Force (KN)			Stress (MP)			Force (KN)			Stress (MP)			
۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	شماره نمونه
۴۷۰	۴۷۸	۴۹۲	۲۰,۸۹	۲۱,۲۴	۲۱,۸۷	۳۷۵	۳۸۰	۳۹۲,۵	۱۶,۶۷	۱۶,۸۹	۱۷,۴۴	مقاومت فشاری
۴۸۰			۲۱,۳۳			۳۸۲,۵			۱۷			میانگین

جدول شماره ۴-۱۰: انحراف از میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های ساخته شده با آب حاوی نانو حباب و آب معمولی،

آزمایش اول

With MNB						Without MNB						آزمایش اول
Force %			Stress %			Force %			Stress %			
۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	شماره نمونه
-2.08	-0.41	2.5	-2.06	-0.42	2.53	-1.96	-0.65	2.61	-1.94	-0.64	2.59	انحراف از میانگین

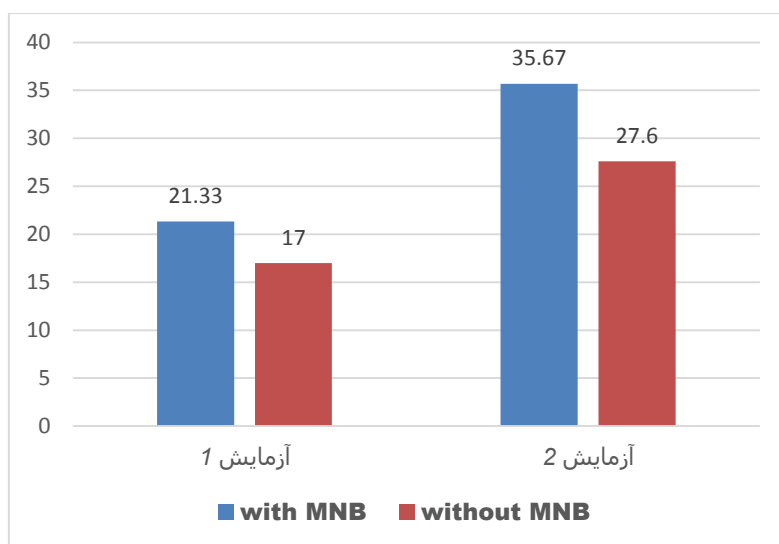
جدول شماره ۴-۱۱: مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های ساخته شده با آب حاوی نانو حباب و آب معمولی، آزمایش دوم

With MNB						Without MNB						آزمایش دوم
Force (KN)			Stress (MP)			Force (KN)			Stress (MP)			
۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	شماره نمونه
۸۴۰	۷۷۲	۷۹۶	۳۷,۳۳	۳۴,۳۱	۳۵,۳۸	۶۲۰	۵۳۰	۷۱۵	۲۷,۵۵	۲۳,۵۵	۳۱,۷۷	مقاومت فشاری
۸۰۲,۶۷			۳۵,۶۷			۶۲۱,۶۷			۲۷,۶			میانگین

جدول شماره ۴-۱۲: انحراف از میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های ساخته شده با آب حاوی نانو حباب و آب معمولی،

آزمایش دوم

With MNB						Without MNB						آزمایش دوم
Force %			Stress %			Force %			Stress %			
۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	شماره نمونه
4.65	-3.82	-0.83	4.65	-3.81	-0.81	-0.27	-14.74	15.01	-0.18	-14.67	15.11	انحراف از میانگین (%)



شکل ۴-۱۳: نمودار مقاومت ۲۸ روزه بتن حاوی میکرو-نانو حباب و بتن معمولی

مطالعات اخیر نشان می‌دهد که افزایش یک درصدی حباب‌های معمولی هوای موجود در بتن، کاهش ۲ تا ۶ درصدی مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن را به دنبال دارد [Kosmatka et al, 2003]. طبق پژوهش‌های Nazari و همکارانش، استفاده‌ی حداکثر ۲ درصد از nano-TiO₂ باعث افزایش مقاومت فشاری بتن می‌گردد و حالت بهینه آن، اضافه کردن یک درصد nano-TiO₂ است که مقاومت را تا ۲۰٪ افزایش می‌دهد [Nazari et al, 2010]. استفاده از nano-SiO₂ تا حداکثر ۳٪ مقاومت فشاری بتن را تا ۳۰٪ افزایش می‌دهد

[Boshehrian and Hosseini, 2011]. مطالعات انجام شده توسط Nazari et al نشان می‌دهد که جایگزینی حداکثر ۲٪ از nano-Al₂O₃ با سیمان در بتن باعث افزایش مقاومت فشاری می‌شود، درصد بهینه آن که بیشترین مقاومت را نتیجه می‌دهد استفاده ۱٪ از nano-Al₂O₃ می‌باشد [Nazari et al, 2010]. افزایش ۵ درصدی nano-ZnO مقاومت فشاری بتن را تقریباً به صفر می‌رساند به نظر می‌رسد این ماده از هیدراسیون سیمان جلوگیری می‌کند [Behfarnia et al, 2013]. مطالعات انجام شده توسط Abdoli Yazdi و همکارانش نشان می‌دهد که استفاده از nano-Fe₂O₃ در بتن تا حداکثر ۳ درصد، مقاومت فشاری بتن را تا بیش از ۷۰٪ افزایش می‌دهد، اما با افزایش مقدار ماده نانو تا ۵٪ مقاومت کمتر از بتن معمولی می‌گردد

[Abdoli Yazdi et al,2011]. استفاده از nano- CuO تا حداکثر ۴٪ مقاومت فشاری بتن را افزایش می‌دهد

ولی بیشتر از ۴٪ درصد مقاومت فشاری کاهش پیدا می‌کند [Nazari and Riahi,2011].

۴-۴- آزمایش مقاومت خمشی:

برگرفته از استاندارد ملی ایران شماره ۴۹۰ (ISIRI 490)

۴-۴-۱- محاسبات:

الف- چنانچه ترک تازه به وجود آمده در سطح تنش در درون یک سوم طول دهانه وسط قرار بگیرد، محاسبه شکستگی از معادله ۳ تعیین می‌شود.

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (3)$$

که در آن:

R= مدول شکستگی (مگا پاسکال)

P= حداکثر بار اعمال شده توسط دستگاه آزمون (نیوتن)

L= طول دهانه (میلی متر)

b= میانگین عرض آزمون در نقطه شکست (میلی متر)

d= میانگین عمق آزمون در نقطه شکست (میلی متر)

یادآوری ۱: وزن میله نباید در محاسبات فوق منظور شود.

ب- چنانچه ترک بوجود آمده در سطح تنش خارج از یک سوم طول دهانه وسط بیشتر از ۵ درصد از طول

دهانه نباشد، مدول شکستگی از معادله ۴ تعیین می‌شود.

$$R = \frac{3pa}{bd^2} \quad (4)$$

که در آن:

R = مدول شکستگی (مگا پاسکال)

P = حداکثر بار اعمال شده توسط دستگاه آزمون (نیوتن)

a = میانگین فاصله بین مقطع ترک خورده با نزدیک ترین تکیه گاه (میلی متر)

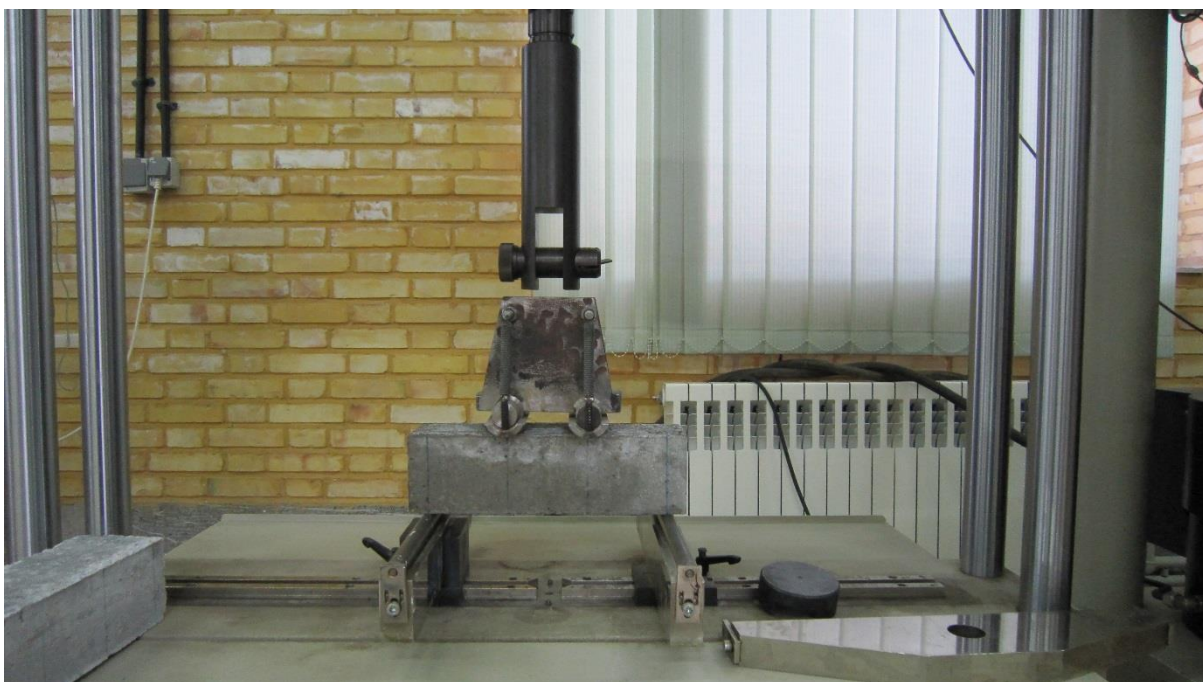
b = میانگین عرض آزمون در نقطه شکست (میلی متر)

d = میانگین عمق آزمون در نقطه شکست (میلی متر)

ج - چنانچه ترک بوجود آمده در سطح تنش خارج از یک سوم طول دهانه وسط بیشتر از ۵ درصد از طول دهانه باشد، نتایج آزمون غیرقابل قبول می‌باشد.

با توجه به اینکه شکست در یک سوم میانی طول دهانه اتفاق افتاد از معادله شماره ۳ جهت محاسبه مدول شکستگی استفاده می‌کنیم. نتایج بدست آمده از تست مقاومت خمشی در جدول شماره ۷ آمده است.

[استاندارد ملی ایران شماره ۴۹۰ ، تجدید نظر اول]



شکل ۴-۱۴: تیر بتنی قبل از اعمال فشار در آزمایش مقاومت خمشی



شکل ۴-۱۵: تیر بتنی بعد از شکست در آزمایش مقاومت خمشی

۴-۲-۴- نتایج

در جدول شماره ۱۳-۴ نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت خمشی نشان داده شده است، طبق این نتایج مقاومت خمشی بتن حاوی نانو-میکرو حباب بیشتر از مقاومت خمشی بتن معمولی می باشد.

جدول شماره ۴-۱۳: مدول گسیختگی و نیروی Max شکست تیر بتنی، آزمایش اول

With MNB				Without MNB				آزمایش اول
F _{max} (KN)		R (MP)		F _{max} (KN)		R (MP)		
۱	۲	۱	۲	۱	۲	۱	۲	شماره نمونه
۱۳,۹۳	۱۵,۳۸	۴,۱۷۹	۴,۶۱۴	۱۱,۱۸	۱۲	۳,۳۵	۳,۶	
۱۴,۶۵۵		۴,۳۹		۱۱,۵۹		۳,۴۸		میانگین

جدول شماره ۴-۱۴: درصد انحراف معیار مدول گسیختگی و نیروی Max شکست تیر بتنی، آزمایش اول

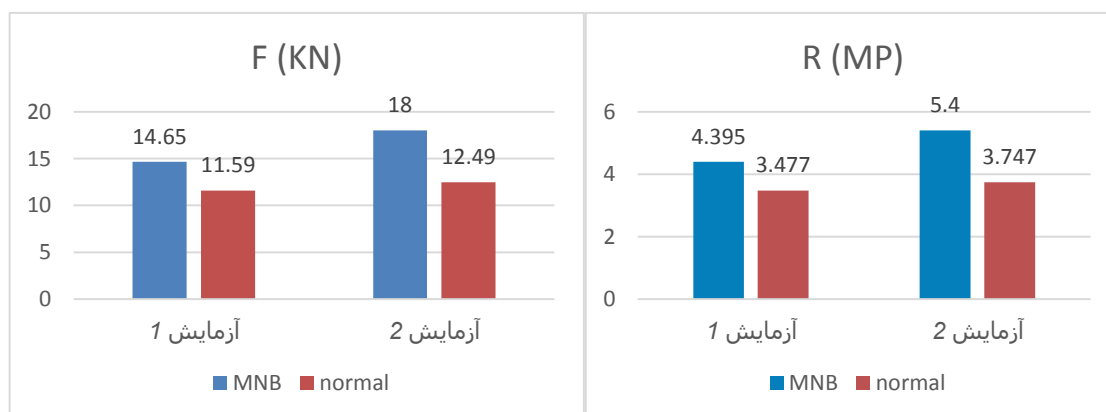
With MNB				Without MNB				آزمایش اول
F _{max} (%)		R (%)		F _{max} (%)		R (%)		
۱	۲	۱	۲	۱	۲	۱	۲	شماره نمونه
-4.95	4.95	-4.95	4.95	-3.537	3.537	-3.537	3.537	انحراف از میانگین (%)

جدول شماره ۴-۱۵: مدول گسیختگی و نیروی Max شکست تیر بتنی، آزمایش دوم

With MNB				Without MNB				آزمایش دوم
F _{max} (KN)		R (MP)		F _{max} (KN)		R (MP)		
۱	۲	۱	۲	۱	۲	۱	۲	شماره نمونه
۱۸,۹۶	۱۷,۰۴	۵,۶۹	۵,۱۱	۱۳,۵	۱۱,۴۸	۴,۰۵	۳,۴۴	
۱۸		۵,۴		۱۲,۴۹		۳,۷		میانگین

جدول شماره ۴-۱۶: درصد انحراف معیار مدول گسیختگی و نیروی Max شکست تیر بتنی، آزمایش دوم

With MNB				Without MNB				آزمایش دوم
F _{max} (%)		R (%)		F _{max} (%)		R (%)		
۱	۲	۱	۲	۱	۲	۱	۲	شماره نمونه
5.33	-5.33	5.33	-5.33	8.086	-8.086	8.086	-8.086	انحراف معیار



شکل ۴-۱۷: نیروی max شکست تیر بتنی

شکل ۴-۱۶: مدول گسیختگی تیر بتنی

مطالعات انجام شده قبلی نشان می‌دهد که استفاده‌ی حداکثر ۲٪ از nano-SiO₂ و حداکثر ۴٪ از nano-TiO₂ باعث افزایش مقاومت خمشی بتن می‌گردد [Rathi V.R, Modhera, 2014]. طبق آزمایشات انجام شده توسط Liu X و همکارانش استفاده‌ی ۱٪ از nano-CaCO₃ در بتن باعث افزایش مقاومت خمشی ۲۸ روزه بتن می‌گردد [Liu X ,Chen L ,Liu A ,Wang X ; 2012].

استفاده از nano-Fe₂O₃ [Nazari et al , 2010] و nano- Al₂O₃ [Olar , 2011] در بتن نیز باعث بهبود مقاومت خمشی بتن می‌گردد که این امر در بتن حاوی MNB هم دیده می‌شود.

۴-۵- آزمایش مقاومت کششی (برزیلی)

برگرفته از استاندارد شماره ۶۰۴۷ ایران (ISIRI 6047)

۴-۵-۱- محاسبات

مقاومت کششی دو نیم شدن برای استوانه‌های ۱۵۰×۳۰۰ میلی‌متر و سرعت اعمال بار در حدود ۵۰ تا ۱۰۰ کیلو نیوتن در دقیقه از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$T = \frac{2P}{\pi \cdot L \cdot d}$$

که در آن :

T = مقاومت کششی دو نیم شدن، کیلو پاسکال (کیلو نیوتن بر متر مربع)

P = حداکثر بار اعمال شده، کیلو نیوتن

L = طول آزمون، متر

d = قطر آزمون، متر

۴-۵-۲- نتایج

طبق رابطه مذکور و اعداد بدست آمده از تست فشار نمونه‌های استوانه‌ای، مقاومت کششی نمونه‌ها به ترتیب ذکر شده در جدول شماره ۴-۱۷ بدست می‌آید. مطابق نتایج بدست آمده، مقاومت کششی بتن حاوی میکرو-نانو حباب از بتن معمولی بیشتر است.

جدول شماره ۴-۱۷: بیشترین نیروی فشاری نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد و مقاومت کششی (برزیلی) نمونه‌های استوانه‌ای

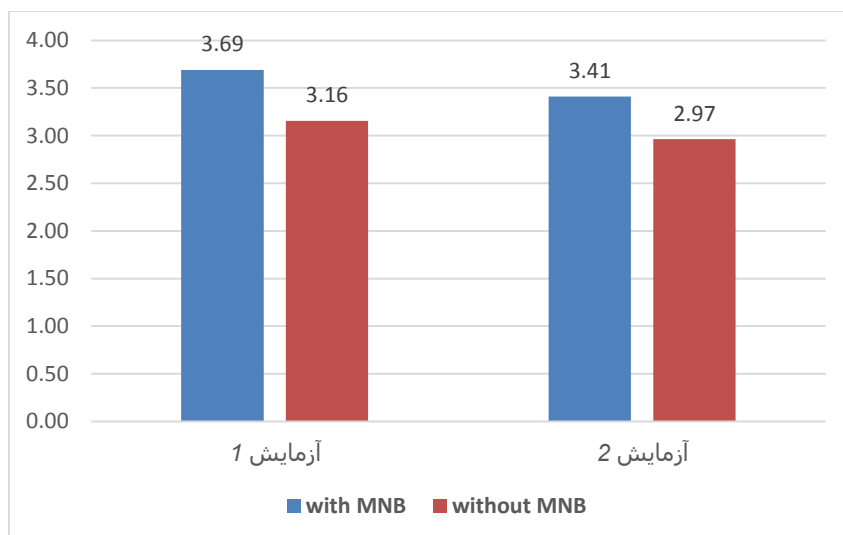
استاندارد

With MNB						Without MNB						شماره نمونه
F _{max} (KN)			τ (MP)			F _{max} (KN)			τ (MP)			
۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	مقاومت کششی
۲۶۰,۷۹	۲۴۰,۹۳	۲۵۲,۱۳	۳,۶۹	۳,۴۱	۳,۵۷	۲۲۳,۰۳	۲۰۹,۴۸	۲۱۰,۴۲	۳,۱۶	۲,۹۷	۲,۹۸	
۲۵۱,۲۸			۳,۵۶			۲۱۴,۳۱			۳,۰۳			میانگین

جدول شماره ۴-۱۸: انحراف از میانگین نتایج بیشترین نیروی فشاری نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد و مقاومت کششی (برزیلی)

نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد

With MNB						Without MNB						شماره نمونه
F _{max} (KN)			τ (MP)			F _{max} (KN)			τ (MP)			
۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	انحراف از میانگین (%)
۳,۷۸	-۴,۱۲	۰,۳۴	۳,۷۸	-۴,۱۲	۰,۳۴	۴,۰۷	-۲,۲۵	-۱,۸۲	۴,۰۷	-۲,۲۵	-۱,۸۲	



شکل ۴-۱۸: مقاومت کششی نمونه های استوانه ای استاندارد

همانطور که مشاهده می گردد مقاومت کششی بتن به کمک میکرو-نانو حباب ها به میزان ۱۶٪ افزایش یافته است.

مطالعات انجام شده نشان می دهد که استفاده از حداکثر ۴٪ nano-TiO₂ و همچنین حداکثر ۳٪ nano-SiO₂

در ترکیب بتن، باعث افزایش مقاومت کششی بتن می گردد [Rathi and Modhera, 2014]. استفاده ی حداکثر

۲٪ از nano - Fe₂O₃ در بتن نیز مقاومت کششی بتن را افزایش می دهد، درصد بهینه آن ۱٪ است که بالاترین

مقاومت را در پی دارد [Nazari et al, 2010]. طبق مطالعات انجام شده توسط nazari و همکارانش استفاده ی

۲٪ از nano - Al₂O₃ در بتن مقاومت کششی را افزایش می دهد، درصد بهینه استفاده از ۱٪ نانو ماده می باشد

[Nazari et al, 2009].

۴-۶- آزمایش مدت زمان (سرعت) گیرش اولیه و نهایی بتن (سوزن ویکات)

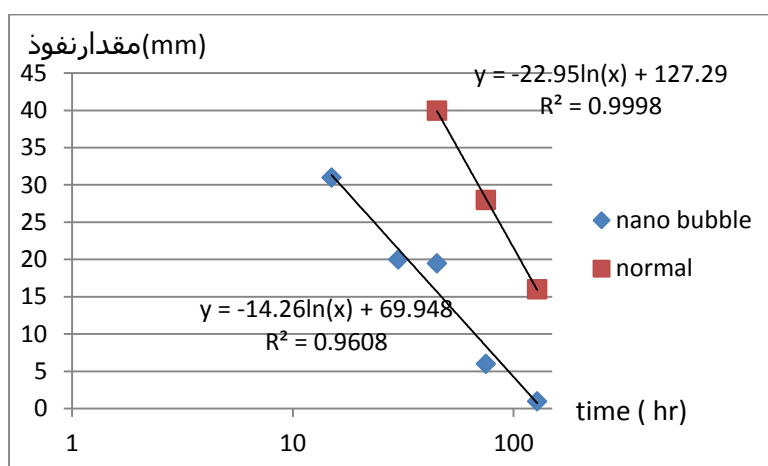
نتایج حاصل از آزمایش سوزن ویکات حاکی از کاهش شدید زمان گیرش اولیه سیمان با آب حاوی میکرو-نانو

حباب دارد. بر اساس استاندارد شماره ۳۹۲ ایران و ASTM C 191 برای محاسبه زمان گیرش اولیه سیمان مدت

زمان متناظر با نفوذ ۲۵ mm ملاک محاسبه قرار گرفت، با مراجعه به شکل (۹) این مقدار برای ترکیب سیمان و

آب حاوی میکرو-نانو حباب برابر $\text{min } 23,3$ و برای ترکیب سیمان و آب معمولی برابر $\text{min } 86$ برداشت می‌شود. مدت زمان گیرش نهایی که متناظر با نفوذ صفر می‌باشد نیز برای نمونه نانو برابر $\text{min } 135$ و برای نمونه معمولی برابر $\text{min } 256$ می‌باشد.

مطالعات اخیر در زمینه کاربرد نانو مواد در بتن نشان می‌دهد که استفاده از nano-ZnO در بتن زمان گیرش بتن را به شدت به تاخیر می‌اندازد [Behfarnia et al, 2013]. استفاده از SiO_2 در بتن به مقدار حداکثر ۴٪ هم زمان گیرش اولیه و هم گیرش نهایی را افزایش می‌دهد [Reddy Babu, 2013]. بکارگیری nano- Fe_2O_3 در بتن باعث کاهش زمان گیرش اولیه و نهایی بتن می‌گردد [Nazari et al, 2010]. این نتیجه نیز حاکی از شباهت عملکرد میکرو-نانو حباب‌های هوا و نانو اکسید آهن در بتن است.

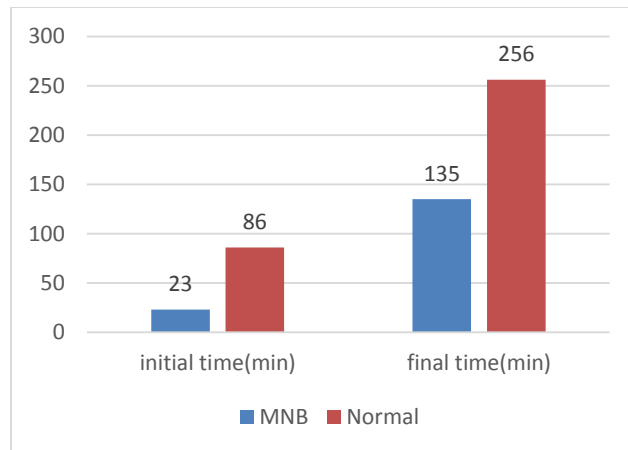


شکل ۴-۱۹: نمودار گیرش اولیه و نهایی نمونه‌های سیمان بر اساس آزمایش سوزن و ویکات

جدول شماره ۴-۱۹: زمان گیرش اولیه و ثانویه مخلوط سیمان با آب

حاوی نانو-میکرو حباب و آب معمولی

	initial time(min)	final time(min)
MNB	۲۳	۱۳۵
Normal	۸۶	۲۵۶



شکل ۴-۲۰: زمان گیرش اولیه و نهایی ترکیب سیمان با آب حاوی

میکرو-نانو حباب و آب معمولی

۴-۷- آزمایش تعیین دمای هیدراتاسیون سیمان

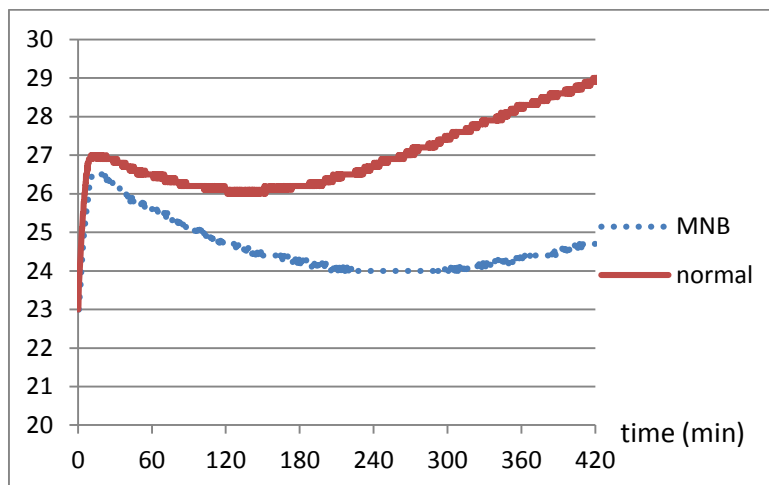
به ۲ الی ۳ ساعت اولیه عمر بتن دمای اولیه بتن گفته می‌شود و دمای بتن پس از این زمان تا انتهای ۲۸ روز مراقبت را دمای بتن در دوره مراقبت گفته می‌شود.

خروجی دستگاه ثبت دما در نمودار شکل (۱۱) نشان داده شده است. با ملاحظه این شکل دیده می‌شود که دمای اولیه بتن حاوی میکرو-نانو حباب‌ها کمتر از دمای اولیه بتن معمولی است. شایان ذکر است که نگهداری هردو نمونه در یک محل، با دمای محیط یکسان بوده و دمای دوره مراقبت نیز برای هردو یکی بوده است.

البته نتایج در توافق با نتایج حاصل از زمان گیرش سیمان نیز می‌باشد که در آن زمان گیرش بتن حاوی MNB بسیار کوتاهتر از بتن معمولی گزارش شد.

طبق پژوهش‌های انجام شده افزایش دمای هیدراتاسیون سیمان ابتدا مقاومت کمتر از ۲۸ روز بتن را افزایش می‌دهد اما در ادامه با افزایش سن بتن، مقاومت بتن کاهش می‌یابد (دایی چینی م و نیلی م، ۱۳۸۹). این نتیجه در بتن

حاوی میکرو-نانو حباب نیز دیده شد با این تفاوت که، مقاومت فشاری بتن میکرو-نانو حبابدار که دمای هیدراسیون کمتری دارد در تمام سنین از مقاومت نمونه‌های معمولی بیشتر است.



شکل ۴-۲۱: درجه حرارت بتن در ۴۲۰ دقیقه اول

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای مطالعات بعدی

۵-۱- نتیجه گیری:

نتایج کلی حاصل از تحقیق بصورت زیر خلاصه می‌شود:

- استفاده از میکرو-نانو حباب‌های معمولی هوا در بتن باعث کاهش روانی و اسلامپ بتن می‌گردد و این امر مشابه رفتار دیگر نانو ذرات از قبیل nano-TiO_2 , $\text{nano-Al}_2\text{O}_3$, $\text{nano-Fe}_2\text{O}_3$ و nano-ZnO_2 در بتن است.
- کاربرد میکرو-نانو حباب‌ها در ترکیب بتن، افزایش مقاومت فشاری بتن در سنین ۷ و ۲۸ روز را به میزان ۱۰ الی ۳۰ درصد در پی دارد که با توجه به نسبت آب به سیمان و دمای اولیه این مقدار متغیر است. طبق پژوهش‌های انجام شده نانو ذرات دیگر نیز باعث بهبود مقاومت فشاری بتن در سنین مختلف می‌شود.
- بتن حاوی میکرو-نانو حباب‌های هوا از مقاومت خمشی بیشتری نسبت به بتن معمولی برخوردار است که این رفتار نانو حباب‌ها مشابه دیگر نانو ذرات در بتن است.
- استفاده از میکرو-نانو حباب‌ها در بتن باعث افزایش مقاومت کششی بتن به میزان ۱۶٪ نسبت به بتن معمولی می‌شود. طبق مطالعات انجام شده، دیگر نانو ذرات نظیر nano-TiO_2 , $\text{nano-Al}_2\text{O}_3$, $\text{nano-Fe}_2\text{O}_3$, nano-SiO_2 نیز باعث بهبود مقاومت کششی بتن می‌گردد. از طرف دیگر استفاده از مواد افزودنی حباب‌زا باعث کاهش مقاومت کششی بتن می‌گردد.
- میکرو-نانو حباب‌های هوا باعث کاهش دمای هیدراتاسیون سیمان می‌شوند که این امر با توجه به ثابت بودن دمای مراقب بتن، باعث افزایش مقاومت فشاری بتن می‌گردد. پژوهش‌های گذشته نیز نشان دادند که افزایش دمای هیدراتاسیون، کاهش مقاومت ۲۸ روزه و بیشتر از آن را در پی دارد هرچند ممکن است مقاومت‌های در سنین پایین‌تر افزایش یافته باشد.
- سرعت گیرش اولیه و ثانویه سیمان با آب حاوی میکرو-نانو حباب‌های هوا بسیار بیشتر از آب معمولی است. سرعت گیرش سیمان با دمای هیدراتاسیون آن رابطه مستقیم دارد و دمای هیدراتاسیون بیشتر مبین سرعت گیرش بیشتر سیمان است، اما ترکیب سیمان با آب حاوی میکرو-نانو حباب از این الگو

تبعیت نمی‌کند. به نظر می‌رسد عاملی غیر از دمای هیدراسیون بر سرعت گیرش سیمان اثر گذار است.

- به طور کلی رفتار بتن حاوی میکرو-نانو حباب‌های هوا کاملاً شبیه دیگر نانو ذرات مانند nano-TiO₂ حباب‌زا ندارد و نتایج آن کاملاً مخالف این نوع بتن است.

۵-۲- پیشنهادهای مرتبط با موضوع تحقیق:

پیشنهاد می‌شود که در بررسی‌های آتی به نکات زیر توجه شود و مورد تحقیق و مذاقه قرار گیرد.

- بررسی خواص مکانیکی بتن در دماهای مختلف آب مصرفی.
- بررسی تاثیر استفاده همزمان از میکرو-نانو حباب‌های هوا و دیگر نانو ذرات بر خواص مکانیکی بتن.
- بررسی دیگر ویژگی‌های بتن مانند مقاومت سیکل یخبندان، مقاومت سایشی و ...
- بررسی میکرو-نانو حباب‌های مختلف مانند اکسیژن خالص در بتن و مقایسه نتایج آن با یکدیگر.
- بررسی تاثیر میکرو-نانو حباب‌های هوا در رفع آلودگی و تصفیه فاضلاب‌ها.

منابع

- Abd el-baky s, yehia s, s. khalil i, (2013), influence of nano-silica addition on properties of fresh and hardened cement mortar.
- Abdoli Yazdi N , Arefi M. R , Mollaahmadi E , Abdollahi Nejang B,(2011) ,To study the effect of adding Fe₂O₃ nanoparticles on the morphology properties and microstructure of cement mortar, *Life Science Journal*.
- Behfarnia K, Keivan A, Keivan A,(2013),the effects of TiO₂ and ZnO nanoparticles on physical and mechanical properties of normal concrete, *Asian Journal of Civil Engineering, (BHRC), VOL. 14, NO. 4*
- Boshehrian A, Hosseini P,(2011), Effect of nano-SiO₂ particles on properties of cement mortar applicable for ferrocement elements.
- 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.
- Kosmatka, Steven H, Kerkhoff, Beatrix, Panarese, William C.(2003). “*Design and Control of Concrete Mixtures*”, EB001, 14th edition, CHAPTER 8 ,Air-Entrained Concrete, USA.
- Liu X ,Chen L ,Liu A ,Wang X ,(2012), “Effect of Nano-CaCO₃ on Properties of Cement Paste”, *International Conference on Future Energy, Environment, and Materials*, energy Procedia, doi:10.1016/j.egypro.2012.01.158, pp.991– 96.
- Nazari A, Riahi Sh,(2011), “Effects of CuO nanoparticles on compressive strength of self-compacting concrete”, *Indian Academy of Sciences, Sadhana Vol. 36, Part 3, pp. 371–391*.

- Nazari A, Riahi Sh, Riahi Sh, Shamekhi S.F, Khademno A,(2010), “Assessment of the effects of the cement paste composite in presence TiO₂ Nanoparticles”, *Journal of American Science*, vol.6(4), pp.43-46, ISSN: 1545-1003.
- Nazari A, Riahi Sh, Riahi Sh, Shamekhi S.F, Khademno A,(2010), “Influence of Al₂O₃ nanoparticles on the compressive strength and workability of blended concrete”, *Journal of American Science*, vol.6(5), pp.6-9, ISSN: 1545-1003.
- 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*, vol.6(4), pp.90-93, ISSN: 1545-1003.
- Nazari A, Riahi Sh, Riahi Sh, Shamekhi S.F, Khademno A,(2009), “Mechanical properties of cement mortar with Al₂O₃ nanoparticles”, *Journal of American Science*, vol.6(4), pp.94-97, ISSN: 1545-1003.
- Pradesh H,(2012), “Application Of Nanotechnology In Building Materials”, *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)* ISSN: 2248- 9622 Vol. 2, Issue5, pp.1077-1082.
- Reddy Babu G,(2013), “Effect of nano-silica on properties of blended cement”, *International Journal of Computational Engineering Research, Vol,03,Issue,5*
- Rathi V.R, Modhera C.D,(2014), “An overview on the Influence of Nano Materials on Properties of Concrete”, *International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology*.
- Salemi N, Behfarnia K , Zaree S.A,(2014), “effect of nanoparticles on frost durability of concrete”, *asian journal of civil engineering (bhrc)*,vol. 15, pp. 411-420

- Sobolev K, Flores I, Hermosillo R, and Torres-Martínez L.M, (2008), “*Nanotechnology of Concrete: Recent Developments and Future Perspectives*”, american concrete institute, Library of Congress catalog card number: 2008936318, ISBN: 978-0-87031-299-1, pp.100-104.
- Olar R, (2011), “nanomaterials and nanotechnologies for civil engineering”.
- Yoon R H, Luttell G H. “The effect of bubble size on fine particle flotation. *Mineral Processing Extractive Metallurgy Review*”, 1989(5), pp. 101-122.

• دایی چینی م و نیلی م: (بررسی اثر افزایش دما در بتن حجیم). پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران: ۱۴ تا ۱۶ اردیبهشت ۱۳۸۹، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

• مظفری نائینی، ر: (بررسی الگوهای هیدرودینامیکی استاندارد جریان به کمک نانو- میکرو حباب هوا)، کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، بهمن ماه ۱۳۹۲.

پیوست الف:

در این پیوست، جداول مربوط به اندازه گیری ابعاد و پتانسیل زتا نمونه های ۱ روزه ضمیمه شده است. برگرفته

از: (مظفری نائینی ر، ۱۳۹۲)



NanoQ Report

Sample

Name : MNB
Measured on : 10/4/2013 10:59:59
by : admin

Mode: Acquisition
Profil: Admin

Comments from user:

SOP

Name Mr.Mozaffarei **Operating mode** Continuous

Dispersant / solvent properties

Refractive Index (nd) : 1.33
Viscosity : 0.891

Particles refractive Index

Real Part : 1.560
Imaginary Part : 0.01

Device settings

Time interval : 10.000µs
Number of channels : 400

SOP comment :
Default Procedure

Analysis mode

- Cumulants
 Pade-Laplace

Results

- Intensity
 Volume
 Number

Measure conditions

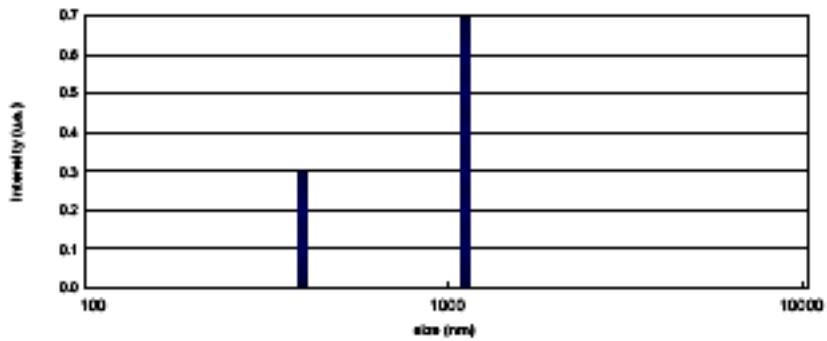
Temperature : 25.0°C
Acquisitions : 0
Average count rate : 131.60 kcps

Duration : 0h 1min 27s
Laser power : 50%
DTC position : DOWN
Wavelength : 657.00

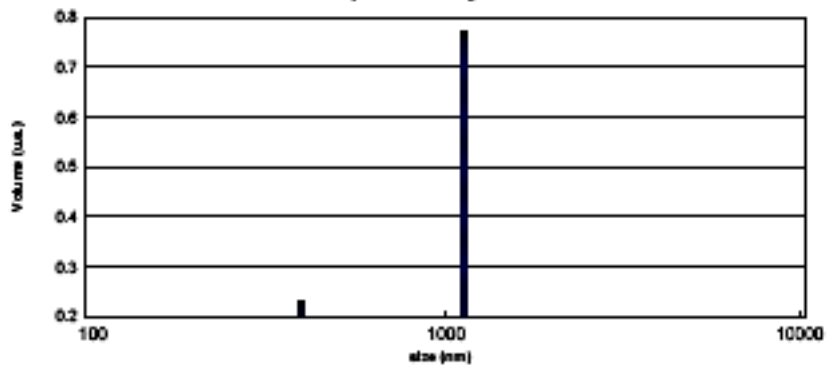
Pade-Laplace method

Dv10:	389.15	Dv50:	1 122.32	Dv90:	1 122.32
Dmean Intensity:	898.70	Dmean volume:	953.38	Dmean number:	478.75

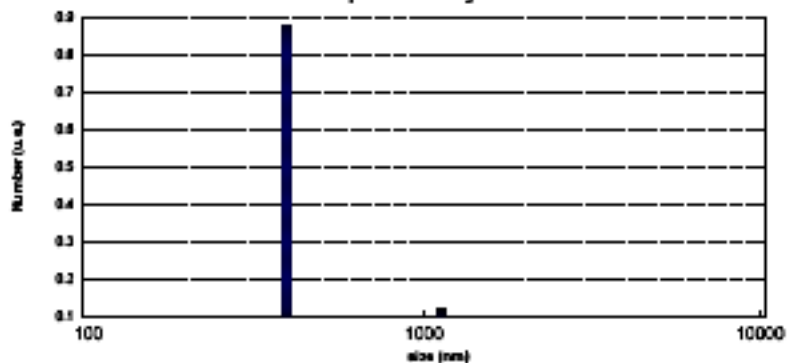
Size dispersion by Intensity



Size dispersion by Volume



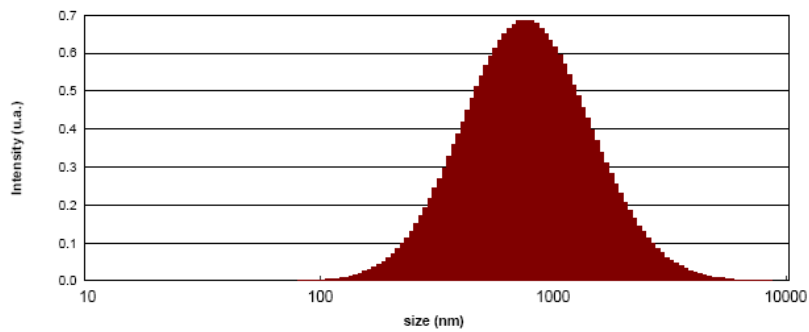
Size dispersion by Number



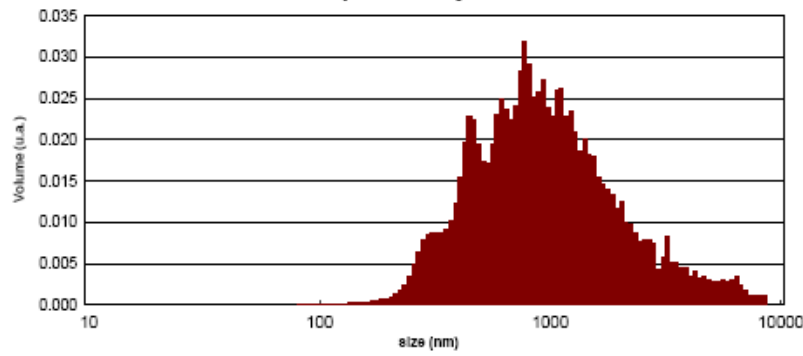
Size (nm)	Intensity	Number	Volume
389.15	0.30	0.88	0.23
1,122.32	0.70	0.12	0.77

<i>Cumulants method</i>							
			Zaverage (nm):	696.57			
Dv10:	407.49	Dv50:	891.49	Dv90:	2 571.08	PDI:	0.4340
Dmean Intensity:	941.55	Dmean volume:	1 278.66	Dmean number:	364.24		

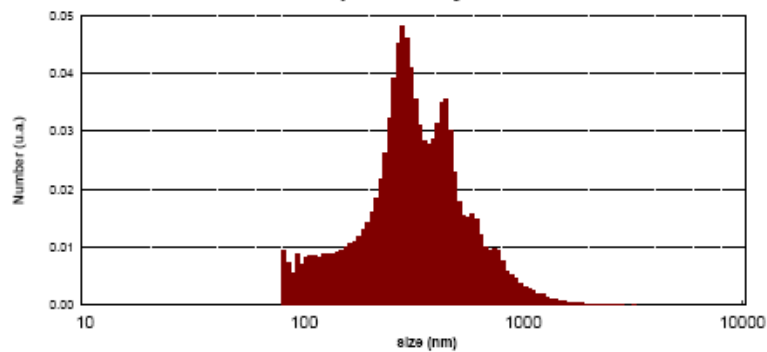
Size dispersion by Intensity



Size dispersion by Volume



Size dispersion by Number



Size (nm)	Intensity	Number	Volume
81.30	0.00	0.01	0.00
85.14	0.00	0.01	0.00
89.15	0.00	0.01	0.00
93.35	0.00	0.01	0.00
97.75	0.00	0.01	0.00
102.36	0.00	0.01	0.00
107.18	0.00	0.01	0.00
112.23	0.01	0.01	0.00
117.52	0.01	0.01	0.00
123.06	0.01	0.01	0.00
128.86	0.01	0.01	0.00
134.93	0.01	0.01	0.00
141.29	0.02	0.01	0.00
147.95	0.02	0.01	0.00
154.92	0.02	0.01	0.00
162.22	0.03	0.01	0.00
169.87	0.04	0.01	0.00
177.88	0.04	0.01	0.00
186.26	0.05	0.01	0.00
195.04	0.06	0.01	0.00
204.23	0.07	0.02	0.00
213.85	0.08	0.02	0.00
223.93	0.10	0.02	0.00
234.49	0.11	0.03	0.00
245.54	0.13	0.03	0.00
257.11	0.15	0.04	0.00
269.22	0.17	0.05	0.01
281.91	0.19	0.05	0.01
295.20	0.22	0.05	0.01
309.11	0.24	0.04	0.01
323.68	0.27	0.04	0.01
338.93	0.30	0.03	0.01
354.91	0.33	0.03	0.01
371.63	0.36	0.03	0.01
389.15	0.39	0.03	0.01
407.49	0.42	0.03	0.02
426.69	0.45	0.03	0.02
446.80	0.48	0.04	0.02
467.86	0.51	0.03	0.02
489.91	0.54	0.02	0.02
513.00	0.57	0.02	0.02
537.17	0.59	0.02	0.02
562.49	0.61	0.02	0.02
589.00	0.63	0.02	0.02
615.76	0.65	0.01	0.02
645.83	0.67	0.01	0.02
675.26	0.68	0.01	0.02
708.13	0.68	0.01	0.02
741.51	0.69	0.01	0.03
775.45	0.69	0.01	0.03
813.05	0.68	0.01	0.03
851.36	0.68	0.01	0.03
891.49	0.67	0.01	0.03
933.50	0.65	0.00	0.03
977.50	0.64	0.00	0.02
1,023.56	0.62	0.00	0.02
1,071.80	0.59	0.00	0.03
1,122.32	0.57	0.00	0.03
1,175.21	0.54	0.00	0.02
1,230.59	0.52	0.00	0.02
1,288.59	0.49	0.00	0.02

1,349.32	0.46	0.00	0.02
1,412.91	0.43	0.00	0.02
1,479.50	0.40	0.00	0.02
1,549.23	0.37	0.00	0.02
1,622.24	0.34	0.00	0.02
1,698.69	0.31	0.00	0.01
1,778.75	0.28	0.00	0.01
1,862.58	0.26	0.00	0.01
1,950.36	0.23	0.00	0.01
2,042.28	0.21	0.00	0.01
2,138.53	0.19	0.00	0.01
2,239.31	0.18	0.00	0.01
2,344.85	0.15	0.00	0.01
2,455.36	0.13	0.00	0.01
2,571.08	0.11	0.00	0.01
2,692.25	0.10	0.00	0.01
2,819.13	0.08	0.00	0.01
2,951.99	0.07	0.00	0.00
3,091.11	0.06	0.00	0.01
3,236.79	0.05	0.00	0.01
3,389.34	0.05	0.00	0.01
3,549.07	0.04	0.00	0.01
3,716.34	0.03	0.00	0.00
3,891.48	0.03	0.00	0.00
4,074.88	0.02	0.00	0.00
4,266.93	0.02	0.00	0.00
4,468.02	0.02	0.00	0.00
4,678.59	0.01	0.00	0.00
4,899.09	0.01	0.00	0.00
5,129.97	0.01	0.00	0.00
5,371.74	0.01	0.00	0.00
5,624.90	0.01	0.00	0.00
5,890.00	0.00	0.00	0.00
6,167.58	0.00	0.00	0.00
6,458.25	0.00	0.00	0.00
6,762.82	0.00	0.00	0.00
7,081.33	0.00	0.00	0.00
7,415.07	0.00	0.00	0.00
7,764.53	0.00	0.00	0.00
8,130.46	0.00	0.00	0.00
8,513.84	0.00	0.00	0.00

ZETA COMPACT REPORT

MNB2

2013/04/10

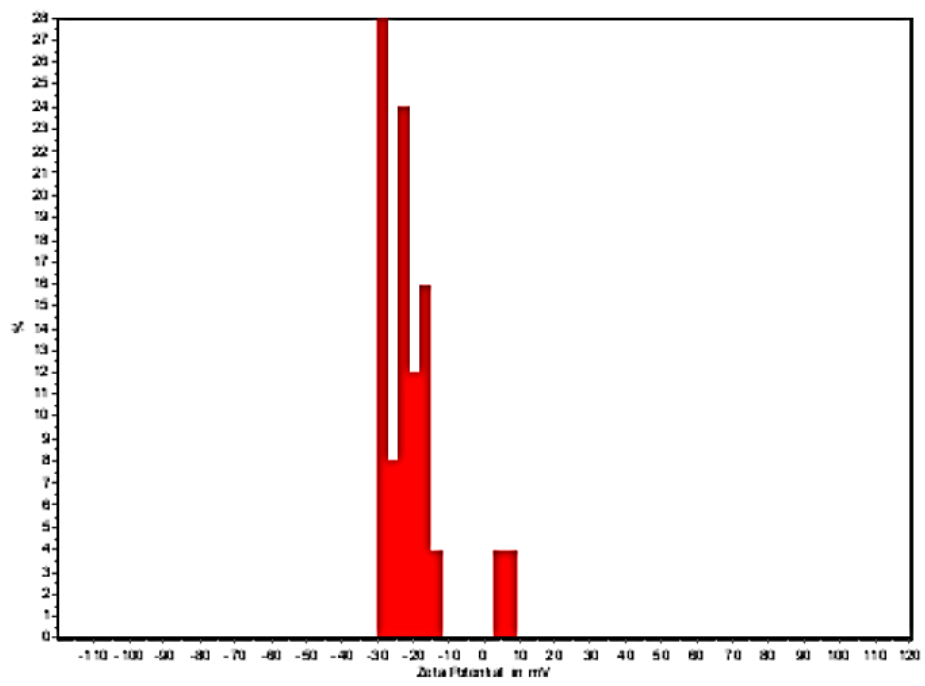
Experiment Parameters

Dielectric constant:	78.91	Temperature:	23.63 °C
Electric Field:	8.41 V/cm	pH:	0.00
Conductivity:	0.022 mS/cm	Viscosity:	0.9189 mPas

Statistics

<u>Mobility:</u>		<u>Zeta Potential:</u>	
Mean:	-1.54 $\mu\text{m}^2/\text{Vs}$	Mean:	-20.28 mV
Standard Deviation:	0.66	Standard Deviation:	8.73
Number of Trackings:	25	Coefficient:	13.15

Mobilites Distribution



Abstract

In this study, the effect of micro-nano bubbles (MNB) on mechanical properties of concrete were investigated. Experiments were performed with a mixture of water-cement ratio of 0.6. All experiments were carried out on triplicate samples and the results were compared with the control samples. According to tests, the micro-nano air bubbles in the concrete increase the compressive, tensile, and flexural strength of concrete. The results showed that the hydration temperature as well the initial and final setting time of cement mix with water containing MNB was reduced. The concrete made with MNB has lower slump than the ordinary concrete. The results obtained in this study showed that the mechanical properties of concrete made with MNB is similar to concrete contain other nano particles while has shown different with the concrete made with plasticizers.



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil and Architectural Engineering

**Application of micro-nano bubbles and nano material in improvement
mechanical and insulation properties of building materials
(with emphasize on concrete)**

Amir Arefi

Supervisor:

Dr.S.f.Saghravani

September 2014