

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی

**تأثیر همزمان میکرو- نانوحباب و فوق روان کننده بر مشخصات مکانیکی**

**بتن**

نگارنده: علی ترکی

اساتید راهنما:

دکتر سید فضل‌الله ساغروانی

دکتر جلیل شفائی

دی ۱۳۹۶

شماره: ۹۶۲۱۳  
تاریخ: ۱۶ / ۱ / ۹۶

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای علی ترکی با شماره دانشجویی ۹۴۰۴۶۳۴ رشته مهندسی عمران گرایش سازه های هیدرولیکی تحت عنوان تاثیر همزمان میکرو-نانو حباب و فوق روان کننده بر مشخصات مکانیکی بتن که در تاریخ ۱۳۹۶/۱۰/۲۳ با حضور هیات محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: .....):  مردود   
نوع تحقیق:  نظری  عملی

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر سید فضل الله ساغروانی	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر جلیل شفانی	استادیار	
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر محسن کرامتی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر بهناز دهرآزما	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر فرشید جندقی علانی	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر احمد احمدی

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری و امضاء و مهر دانشکده:

دانشگاه مهندسی شهیران ۱۳۹۶/۰۴/۲۳

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر در این مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع

مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

## تقدیم اثر

به پاس تعبیر عظیمشان از کلمه ایثار،

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان در سردترین روزه گاران،

به پاس قلب‌های بزرگشان که سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می‌گراید،

و به پاس محبت‌های بی‌دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند،

این مجموعه را به پدر و مادر و برادر عزیزم تقدیم می‌کنم...

## تشکر و قدردانی

شکر و سپاس خداوند باری تعالی، که به من قدرت فکر کردن و آموختن ارزانی داشت.

بر خود لازم می‌دانم تا از زحمات و رهنمودهای مشفقانه استاد فرزانه، جناب آقای دکتر ساغروانی،

که چه در این پژوهش و چه در طول دوره تحصیل همواره یاری‌ام نموده‌اند تشکر و قدردانی کنم.

همچنین شایسته است از استاد فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر جلیل شفائی که با کرامتی چون

خورشید، سرزمین دل را روشنی بخشیدند و گلشن سرای علم و دانش را با راهنمایی‌های کارساز و سازنده

بارور ساختند؛ تقدیر و تشکر نمایم.

در انتها از دوست عزیزم، جناب آقای مهندس محمد شیخ حسنی، که به بنده در انجام آزمایش‌ها

و ساخت نمونه‌ها یاری نموده‌اند قدردانی می‌کنم و سپاس از وجود پرمهرشان که همواره دلگرمی بنده در

مسیر تحقیق و پژوهش بود.

## تعهد نامه

اینجانب، علی ترکی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران- سازه‌های هیدرولیکی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان تأثیر همزمان میکرو- نانوحباب و فوق روان کننده بر مشخصات مکانیکی بتن تحت راهنمایی دکتر سید فضل‌الله ساغروانی و دکتر جلیل شفائی متعهد می‌شوم .

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
  - در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده است .
  - مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
  - کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج بانام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technolog » به چاپ خواهد رسید .
  - حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
  - در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافت‌های آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

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

## چکیده:

با توجه به گسترش روزافزون استفاده از نانو مواده‌ها در صنعت بتن تحقیقات بسیار زیادی در این زمینه انجام شده است. یکی از جدیدترین نانو مواده‌ها، استفاده از میکرو-نانوحباب‌ها (میناب) به‌عنوان مکمل آب مصرفی در بتن، می‌تواند بر خصوصیات بتن اثرات ویژه‌ای داشته باشد. که بعضاً این اثرات می‌تواند در جهت بهبود یا تضعیف خصوصیات بتن سخت شده و بتن در حالت خمیری باشد. یکی از اثرات مشاهده‌شده در بتن حاوی میناب کاهش کارایی بتن می‌باشد. با توجه به مشخصات فوق روان کننده‌ها، استفاده از آن‌ها می‌تواند نقش مؤثری در کاهش اثرات بعضاً منفی میناب بر خصوصیات بتن داشته باشد.

در این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی تأثیر همزمان میناب و فوق روان کننده بر مشخصات مکانیکی بتن پرداخته شده است. این پژوهش دارای دو بخش است، در بخش اول به تأثیر میناب بر مشخصات مکانیکی بتن پرداخته شد که از چهار طرح اختلاط با نسبت آب به سیمان 0.35, 0.4, 0.5, 0.6 برای ساخت بتن استفاده گردید، سپس در بخش دوم، تأثیر میناب در حضور سه غلظت از فوق روان کننده (0.5%, 0.9%, 1.4%) بر مشخصات مکانیکی بتن مورد مطالعه قرار گرفت که از سه طرح اختلاط با نسبت آب به سیمان از 0.4, 0.5 و 0.6 برای ساخت بتن استفاده گردید. بدین منظور تعداد ۱۶ نمونه آزمایشگاهی خمیر سیمان برای آزمایش زمان گیرش، ۱۶ نمونه ملات سیمان برای آزمایش جریان سیمان، ۴۸ نمونه ملات سیمان برای آزمایش مقاومت فشاری ملات، ۶۰ نمونه آزمایشگاهی بتن برای آزمایش اسلامپ بتن، ۱۵۶ نمونه آزمایشگاهی بتن برای آزمایش مقاومت فشاری بتن، تعداد ۹۶ نمونه آزمایشگاهی بتن برای مقاومت کششی و تعداد ۱۲ نمونه ملات سیمان برای آزمایش ملات منشوری تسریع شده ساخته شد و در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه صنعتی شاهرود مورد آزمایش قرار گرفت.

نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد میناب باعث زود گیر شدن سیمان، کاهش کارایی بتن و

ملات سیمان و افزایش مقاومت فشاری ملات سیمان و بتن با توجه به نسبت آب به سیمان در سن ۷ و ۲۸ روزه گردید. و همچنین اضافه کردن فوق روان کننده در حضور میناب در بتن نشان داد که زمان گیرش خمیر سیمان افزایش یافته و کارایی بتن در نسبت آب به سیمان 0.4 نسبت به نمونه‌های حاوی میناب به‌طور متوسط ۵۰ درصد افزایش یافته است و مقاومت فشاری بتن در سن ۷ روزه در غلظت‌های 0.5 و 0.9 درصد افزایش یافته و مقاومت فشاری بتن در سن ۲۸ و ۹۰ روزه در سه غلظت از فوق روان کننده کاهش یافته است.

**واژه‌های کلیدی:** بتن، میکرو-نانوحباب، فوق روان کننده، مشخصات مکانیکی بتن، کارایی بتن



## فهرست مطالب

فصل اول.....	۱
۱-۱ - مقدمه .....	۲
۲-۱ - ضرورت انجام تحقیق .....	۳
۳-۱ - اهداف تحقیق .....	۳
۱-۳-۱ - اهداف کلی .....	۳
۲-۳-۱ - اهداف جزئی .....	۳
۴-۱ - زمینه نوآوری تحقیق .....	۴
۵-۱ - معرفی ساختار پایان نامه .....	۴
فصل دوم.....	۵
۱-۲ - مقدمه .....	۶
۲-۲ - استفاده از نانو ذرات در بتن .....	۶
۱-۲-۲ - نانو اکسید سیلیس در بتن .....	۶
۲-۲-۲ - نانو اکسید آهن .....	۷
۳-۲-۲ - نانو اکسید آلومینیوم در بتن .....	۸
۴-۲-۲ - نانو کائولین در بتن .....	۸
۳-۲ - کاربرد مواد افزودنی حباب‌زا در بتن ویژگی‌های بتن حاوی این افزودنی‌ها.....	۹

- ۴-۲ - میکرو- نانوحبابهای هوا..... ۱۰
- ۱-۴-۲ - کلیات میکرو- نانوحبابها..... ۱۰
- ۲-۴-۲ - اصول کاویتاسیون هیدرودینامیکی..... ۱۱
- ۳-۴-۲ - تئوری پتانسیل سطحی از میکرو- نانو حبابها..... ۱۲
- ۴-۴-۲ - مروری بر تحقیقات میکرو- نانوحبابها..... ۱۴
- ۵-۲ - کلیاتی درباره‌ی فوق روان کننده..... ۱۵
- ۱-۵-۲ - فلسفه و دلایل به‌کارگیری افزودنی‌های روان کننده (کاهنده آب)..... ۱۵
- ۲-۵-۲ - موارد کاربرد افزودنی‌های کاهنده آب..... ۱۶
- ۳-۵-۲ - دسته‌بندی افزودنی‌های کاهنده آب..... ۱۶
- ۱-۳-۵-۲ - روان کننده‌ها..... ۱۶
- ۲-۳-۵-۲ - فوق روان کننده‌ها..... ۱۷
- ۳-۳-۵-۲ - فرا روان کننده‌ها..... ۱۸
- ۴-۵-۲ - مکانیسم عملکرد کاهنده‌های آب..... ۱۹
- ۵-۵-۲ - تأثیر مواد متشکله بتن بر عملکرد کاهنده‌های آب..... ۲۱
- ۶-۵-۲ - ارزیابی و انتخاب کاهنده آب..... ۲۲
- ۷-۵-۲ - تحقیقات در زمینه‌ی کاربرد کاهنده‌های آب در حضور نانو مواد..... ۲۳

فصل سوم.....	۲۵
۱-۳ - مقدمه .....	۲۶
۲-۳ - برنامه آزمایشگاهی .....	۲۶
۳-۳ - مصالح مصرفی .....	۲۷
۱-۳-۳ - سیمان .....	۲۷
۲-۳-۳ - آب و میکرو- نانو حباب .....	۲۸
۳-۳-۳ - مصالح سنگی .....	۲۸
۴-۳-۳ - افزودنی کاهنده آب .....	۲۹
۴-۳ - طرح اختلاط .....	۳۰
۵-۳ - روش انجام آزمایش ها بر روی سیمان و بتن .....	۳۱
۱-۵-۳ - آزمایش تعیین غلظت نرمال سیمان هیدرولیکی .....	۳۱
۲-۵-۳ - آزمایش زمان گیرش سیمان .....	۳۲
۳-۵-۳ - آزمایش جریان ملات سیمان .....	۳۴
۴-۵-۳ - آزمایش تعیین مقاومت فشاری ملات سیمان .....	۳۵
۵-۵-۳ - آزمایش جذب آب و درصد رطوبت .....	۳۸
۶-۵-۳ - آزمایش اسلامپ بتن .....	۳۹
۷-۵-۳ - آزمایش مقاومت فشاری بتن .....	۴۲

۴۴	..... ۳-۵-۸ - آزمایش مقاومت کششی بتن
۴۶	..... ۳-۵-۹ - آزمایش طیف‌سنج فلورسانس پرتو ایکس XRF
۴۷	..... ۳-۵-۱۰ - آزمایش ملات منشوری تسریع شده
۴۹	..... ۳-۶ - نحوه اختلاط و قالب‌گیری
۵۰	..... ۳-۷-۷ - آزمایش‌های انجام‌شده روی آب معمولی و آب حاوی میکرو- نانوحباب‌های هوا
۵۰	..... ۳-۷-۱ - مشخصات اولیه
۵۰	..... ۳-۷-۱-۱ - pH متر
۵۱	..... ۳-۷-۱-۲ - هدایت سنج الکتریکی EC meter
۵۱	..... ۳-۷-۱-۳ - دستگاه کدورت سنج Turbidity meter
۵۲	..... ۳-۷-۲ - اندازه‌گیری ابعاد و توزیع میکرو- نانوحباب‌ها
۵۳	..... ۳-۷-۳ - بررسی پایداری میکرو- نانوحباب‌ها
۵۵	..... فصل چهارم
۵۶	..... ۴-۱ - مقدمه
۵۶	..... ۴-۲ - نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها روی آب حاوی میکرو- نانوحباب و آب معمولی
۵۶	..... ۴-۲-۱ - پایداری میکرو- نانوحباب‌های هوا
۵۸	..... ۴-۲-۲ - مشخصات اولیه
۵۹	..... ۴-۲-۳ - ابعاد و توزیع میکرو- نانوحباب‌های هوا در آب

۶۱	..... ۳-۴ - آزمایشات سیمان
۶۱	..... ۱-۳-۴ - آزمایش زمان گیرش سیمان
۶۴	..... ۲-۳-۴ - آزمایش جریان ملات سیمان
۶۵	..... ۳-۳-۴ - آزمایش مقاومت فشاری ملات سیمان
۶۷	..... ۴-۳-۴ - آزمایش XRF
۶۸	..... ۴-۴ - آزمایش‌های بتن تازه و سخت شده
۶۸	..... ۱-۴-۴ - آزمایش اسلامپ
۷۱	..... ۲-۴-۴ - آزمایش مقاومت فشاری بتن
۸۶	..... ۳-۴-۴ - آزمایش ملات منشوری تسریع شده
۸۸	..... ۴-۴-۴ - آزمایش کششی بتن
۹۷	..... <b>فصل پنجم</b>
۹۸	..... ۱-۵ - نتیجه‌گیری
۱۰۱	..... ۲-۵ - پیشنهادات برای انجام مطالعات آتی
۱۰۲	..... <b>منابع و مراجع</b>
۱۰۷	..... <b>پیوست</b>
۱۰۸	..... ۱-۷ پیوست الف:
۱۱۲	..... ۲-۷ پیوست ب:



## فهرست اشکال

- شکل ۱-۲- نحوه حرکت حباب عادی، حباب میکرو، حباب نانو در آب ..... ۱۱
- شکل ۲-۲- حضور یک ذره خنثی در الکترولیت به صورت شماتیک ..... ۱۴
- شکل ۳-۲- مکانیسم عملکرد کاهنده‌ی آب به صورت شماتیک ..... ۲۰
- شکل ۱-۳- سیمان پرتلند تیپ دو شاهرود ..... ۲۷
- شکل ۲-۳- منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی ..... ۲۹
- شکل ۳-۳- فوق روان کننده‌ی استفاده‌شده در این تحقیق ..... ۳۰
- شکل ۴-۳- دستگاه ویکات (عکس سمت راست) و دستگاه مخلوط‌کن (عکس سمت چپ) ..... ۳۳
- شکل ۵-۳- نمایی از میز جریان برای آزمایش جریان ملات سیمان ..... ۳۶
- شکل ۶-۳- نمایی از قالب مکعبی ۵سانتی‌متری ..... ۳۶
- شکل ۷-۳- دستگاه جک هیدرولیکی کامپیوتری ..... ۳۷
- شکل ۸-۳- نمای از مخروط ناقص برای آزمایش اسلامپ ..... ۴۱
- شکل ۹-۳- قالب مکعبی 15cm\*15cm\*15cm ..... ۴۲
- شکل ۱۰-۳- نمایی از شیکر ..... ۴۲
- شکل ۱۱-۳- نمایی از محفظه آهنی ..... ۴۵
- شکل ۱۲-۳- نمایی از قالب استوانه‌ای ..... ۴۶
- شکل ۱۳-۳- دستگاه طیف‌سنج فلورسانس پرتو ایکس (XRF) ..... ۴۷

- شکل ۳-۱۴- قالب‌گیری و عمل‌آوری نمونه‌های بتن ..... ۵۰
- شکل ۳-۱۵- آزمایش اسلامپ برای بتن حاوی MNB (سمت چپ) و بتن حاوی آب (سمت راست) ..... ۴۱
- شکل ۳-۱۶- نمونه بتن زیر جک هیدرولیکی برای آزمایش مقاومت فشاری بتن ..... ۴۴
- شکل ۳-۱۷- نمایی از قالب 25\*25\*250 mm ..... ۴۸
- شکل ۳-۱۸- ماده‌ی سدیم هیدروکسید ..... ۴۹
- شکل ۳-۱۹- دستگاه pH متر ..... ۵۱
- شکل ۳-۲۰- دستگاه هدایت سنج الکتریکی ..... ۵۱
- شکل ۳-۲۱- دستگاه کدورت سنج ..... ۵۲
- شکل ۴-۱- نمودار تغییرات زتاپتانسیل آب حاوی MNB ..... ۵۷
- شکل ۴-۲- نمودار تغییرات زتا پتانسیل برای آب حاوی MNB و فوق روان کننده ..... ۵۷
- شکل ۴-۳- نمودار اندازه-تعداد میکرو-نانوحباب‌های هوا در آب ..... ۶۰
- شکل ۴-۴- مقایسه زمان‌گیریش سیمان حاوی میناب و آب معمولی ..... ۶۲
- شکل ۴-۵- مقایسه زمان‌گیریش سیمان با آب معمولی در حضور درصد‌های مختلف فوق روان کننده ..... ۶۲
- شکل ۴-۶- مقایسه زمان‌گیریش با میناب در حضور درصد‌های مختلف فوق روان کننده ..... ۶۳
- شکل ۴-۷- مقایسه زمان‌گیریش سیمان با آب و میناب در حضور درصد‌های مختلف فوق روان کننده ..... ۶۳



- شکل ۴-۸- صحت سنجی مقدار آب کاهش داده شده برای فوق روان کننده و جریان ملات  
سیمان.....۶۵
- شکل ۴-۹- 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 .....۶۶
- شکل ۴-۱۰- اسلامپ بتن حاوی میکرو- نانوحباب و بتن معمولی در حالت درجا و در حالت ۳۰  
دقیقه بعد از ساخت بتن در نسبت آب به سیمان مختلف.....۶۹
- شکل ۴-۱۱- نتایج اسلامپ در حضور درصدهای مختلف فوق روان کننده در نسبت آب به  
سیمان‌های (الف)  $W/C=0.6$ ، (ب)  $W/C=0.5$ ، (ج)  $W/C=0.4$ .....۷۰
- شکل ۴-۱۲- مقاومت فشاری ۷ روزه بتن حاوی MNB و بتن معمولی .....۷۱
- شکل ۴-۱۳- مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن حاوی MNB و بتن معمولی .....۷۲
- شکل ۴-۱۴- مقاومت فشاری ۹۰ روزه بتن حاوی MNB و بتن معمولی .....۷۲
- شکل ۴-۱۵- تغییرات درصد افزایش مقاومت فشاری بتن حاوی MNB نسبت به آب معمولی با  
افزایش سن بتن.....۷۴
- شکل ۴-۱۶- روند کسب مقاومت بتن حاوی MNB و بتن معمولی در نسبت آب به سیمان  
.....0.35
- شکل ۴-۱۷- مقاومت فشاری ۷ روزه بتن حاوی MNB و فوق روان کننده نسبت به بتن با آب  
معمولی و فوق روان کننده (الف)  $W/C=0.4$  (ب)  $W/C=0.5$  (ج)  $W/C=0.6$ .....۷۶
- شکل ۴-۱۸- مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن حاوی MNB و فوق روان کننده نسبت به بتن با آب  
معمولی و فوق روان کننده (الف)  $W/C=0.6$ ، (ب)  $W/C=0.5$  (ج)  $W/C=0.4$ .....۷۷

- شکل ۴-۱۹- مقاومت فشاری ۹۰ روزه بتن حاوی MNB و فوق روان کننده نسبت به بتن با آب معمولی و فوق روان کننده الف)  $W/C=0.6$ ، ب)  $W/C=0.5$ ، ج)  $W/C=0.4$ ..... ۷۸
- شکل ۴-۲۰- درصد افزایش مقاومت فشاری بتن حاوی میکرو- نانوحباب و فوق روان کننده نسبت به آب و فوق روان کننده در نسبت آب به سیمان 0.6..... ۸۰
- شکل ۴-۲۱- درصد افزایش مقاومت فشاری بتن حاوی میکرو- نانوحباب و فوق روان کننده نسبت به آب و فوق روان کننده در نسبت آب به سیمان 0.5..... ۸۰
- شکل ۴-۲۲- درصد افزایش مقاومت فشاری بتن حاوی میکرو- نانوحباب و فوق روان کننده نسبت به آب و فوق روان کننده در نسبت آب به سیمان 0.4..... ۸۱
- شکل ۴-۲۳- روند کسب مقاومت فشاری بتن با آب معمولی در حضور فوق روان کننده نسبت به بتن با آب معمولی در نسبت آب به سیمان 0.6..... ۸۲
- شکل ۴-۲۴- روند کسب مقاومت فشاری بتن با آب معمولی در حضور فوق روان کننده نسبت به بتن با آب معمولی در نسبت آب به سیمان 0.5..... ۸۲
- شکل ۴-۲۵- روند کسب مقاومت فشاری بتن با آب معمولی در حضور فوق روان کننده نسبت به بتن با آب معمولی در نسبت آب به سیمان 0.4..... ۸۳
- شکل ۴-۲۶- روند کسب مقاومت فشاری بتن با MNB در حضور فوق روان کننده نسبت به بتن با MNB در نسبت آب به سیمان 0.6..... ۸۴
- شکل ۴-۲۷- روند کسب مقاومت فشاری بتن با MNB در حضور فوق روان کننده نسبت به بتن با MNB در نسبت آب به سیمان 0.5..... ۸۴
- شکل ۴-۲۸- روند کسب مقاومت فشاری بتن با MNB در حضور فوق روان کننده نسبت به بتن

- با MNB در نسبت آب به سیمان 0.4 ..... ۸۵
- شکل ۴-۲۹- روند کسب مقاومت فشاری بتن با MNB در حضور فوق روان کننده نسبت به بتن  
با آب معمولی در نسبت آب به سیمان 0.6 ..... ۸۵
- شکل ۴-۳۰- روند کسب مقاومت فشاری بتن با MNB در حضور فوق روان کننده نسبت به بتن  
با آب معمولی در نسبت آب به سیمان 0.5 ..... ۸۶
- شکل ۴-۳۱- روند کسب مقاومت فشاری بتن با MNB در حضور فوق روان کننده نسبت به بتن  
با آب معمولی در نسبت آب به سیمان 0.4 ..... ۸۶
- شکل ۴-۳۲- نمودار مقایسه‌ی مقاومت کششی ۷ روزه بین نمونه‌های MNB و آب معمولی در  
نسبت آب به سیمان‌های مختلف ..... ۸۹
- شکل ۴-۳۳- نمودار مقایسه‌ی مقاومت کششی ۲۸ روزه بین نمونه‌های MNB و آب معمولی در  
نسبت آب به سیمان‌های مختلف ..... ۸۹
- شکل ۴-۳۴- درصد کاهش مقاومت فشاری بتن حاوی MNB نسبت به آب معمولی سن ۷ و ۲۸  
روزه در نسبت آب به سیمان‌های مختلف ..... ۹۰
- شکل ۴-۳۵- مقاومت کششی بتن حاوی MNB نسبت به بتن با آب معمولی در حضور  
درصدهای مختلف فوق روان کننده در نسبت آب به سیمان 0.6 الف) در سن ۷ روزه ب) در سن ۲۸  
روزه ..... ۹۱
- شکل ۴-۳۶- مقاومت کششی بتن حاوی MNB نسبت به بتن با آب معمولی در حضور  
درصدهای مختلف فوق روان کننده در نسبت آب به سیمان 0.5 الف) در سن ۷ روزه ب) در سن ۲۸  
روزه ..... ۹۲

شکل ۴-۳۷- مقاومت کششی بتن حاوی MNB نسبت به بتن با آب معمولی در حضور درصد‌های مختلف فوق روان کننده در نسبت آب به سیمان 0.4 الف) در سن ۷ روزه ب) در سن ۲۸ روزه.....۹۳

شکل ۴-۳۸- درصد کاهش مقاومت کششی بتن حاوی MNB به بتن معمولی در نسبت آب به سیمان‌های مختلف در حضور 0.5 درصد فوق روان کننده .....۹۴

شکل ۴-۳۹- درصد کاهش مقاومت کششی بتن حاوی MNB به بتن معمولی در نسبت آب به سیمان‌های مختلف در حضور 0.9 درصد فوق روان کننده .....۹۵

شکل ۴-۴۰- درصد کاهش مقاومت کششی بتن حاوی MNB به بتن معمولی در نسبت آب به سیمان‌های مختلف در حضور 1.4 درصد فوق روان کننده .....۹۵

## فهرست جداول

- جدول ۱-۲- خلاصه‌ای از خواص بتن هوادار ..... ۱۰
- جدول ۲-۲- میزان رفتار پایداری ذرات در بازه‌های زتا پتانسیل آن‌ها ..... ۱۴
- جدول ۱-۳- مشخصات آنالیز شیمیایی سیمان پرتلند (گزارش شده از آزمایشگاه شرکت سیمان شاهرود) ..... ۲۸
- جدول ۲-۳- طرح اختلاط استفاده شده در این پژوهش ..... ۳۱
- جدول ۳-۳- مقادیر سیمان و آب و فوق روان کننده ..... ۳۳
- جدول ۴-۳- طرح مخلوط ملات سیمان برای آزمایش جریان ملات سیمان ..... ۳۵
- جدول ۵-۳- طرح مخلوط ملات سیمان برای آزمایش مقاومت فشاری ..... ۳۸
- جدول ۶-۳- طرح اختلاط ملات سیمان برای آزمایش ملات منشوری تسریع شده ..... ۴۸
- جدول ۷-۳- محدوده‌ی مجاز فعالیت قلیایی مصالح سنگی ..... ۴۸
- جدول ۱-۴- مشخصات اولیه آب میکرو- نانوحباب ..... ۵۹
- جدول ۲-۴- مشخصات آب حاوی MNB و آب معمولی در حضور ۳ غلظت فوق روان کننده ... ۵۹
- جدول ۳-۴- مشخصات نمونه میکرو- نانوحباب ..... ۶۰
- جدول ۴-۴- نتایج آنالیز XRF از خمیر سیمان حاوی MNB و آب معمولی ..... ۶۷
- جدول ۵-۴- نتایج آزمایش ملات منشوری تسریع شده ..... ۸۷



فصل اول

کلیات

تکنولوژی نانو توسط ریچارد فیمن و مقاله معروف آن در سال ۱۹۵۹ بانام "اتاق‌های زیادی در کف وجود دارد" معرفی گردید [Feynman, 1960]. نانو تکنولوژی 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 [Birgisson, 2012]. فناوری نانو دربرگیرنده پتانسیل عظیمی است که می‌تواند ارزش افزوده صنایع مرتبط را حداکثر نموده و منجر به نوآوری‌های اقتصادی و اجتماعی گردد. بنابراین نوآور بودن فناوری نانو به‌طور چشمگیری، نوآوری فناوری سایر صنایع را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. این امر فناوری نانو را به یک فناوری عام تبدیل می‌کند که در آن دگرگون‌سازی خلاقانه وجود داشته و نوآور بودن بسیار حائز اهمیت است [Bae, 2013]. خواص، رفتار و عملکرد بتن بستگی به ساختار ماده زمینه بتن و سیمانی دارد که چسبندگی، پیوستگی و یکپارچگی آن را به وجود 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 و با افزودنی‌هایی مانند نانولوله‌های کربنی-نانو تیتانیوم اکسید-نانو الیاف - نانو آلومینا- نانو آهن و .. قبلاً مورد مطالعه قرار گرفته است. (Pradesh, 2012)

میکرو- نانوحباب‌های هوا حفره‌های گازی بسیار ریز پایدار در آب هستند که به روش‌های مختلفی تولید می‌شوند. از جمله روش‌های تولید، استفاده از کاویتاسیون هیدرودینامیکی است که به علت سرعت بالای جریان، فشار در یک نقطه در یک مایع به‌طور لحظه‌ای به زیر فشار بخار کاهش می‌یابد. این امر منجر به تولید حباب‌هایی در محیط می‌شود که می‌تواند از گازهای مختلفی تولید شوند. [Tsuge, 2007]

در مورد استفاده از میکرو- نانوحباب‌ها و فوق روان کننده به‌صورت همزمان در ساخت بتن مطالعه



خاصی صورت نگرفته است. در این پایان نامه برای اولین بار با استفاده از همزمان این دو ماده، امید است بتوان راه حل ساده تر، در دسترس تر و درعین حال ارزان تری را جهت بهبود خواص مکانیکی بتن ارائه کرد.

## ۲-۱ - ضرورت انجام تحقیق

با گسترش ساخت و ساز و افزایش چشمگیر پروژه های عظیم و پرهزینه، نیاز به تولید مصالح با بیشترین بازدهی و درعین حال کمترین هزینه بیش از پیش احساس می شود. یکی از روش های مدرن در تولید مصالح با کیفیت بهتر استفاده از فناوری نانو است که در سال های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. با این حال کشورهای در حال توسعه برای استفاده از این فناوری با مشکلاتی اعم از عدم وجود تکنولوژی تولید مواد در سایز نانو، بالا بودن هزینه ی تهیه این مواد روبرو هستند. امید است که این پژوهش بتواند روشی ارزان قیمت و درعین حال ساده و در دسترس بودن جهت افزایش بازدهی مصالح ساختمانی خصوصاً بتن ارائه کند.

## ۳-۱ - اهداف تحقیق

### ۱-۳-۱ - اهداف کلی

با توجه به مشکل گران بودن، بحث حمل و نقل و اثرات زیست محیطی نانو مواد دلایلی هستند که منجر به عدم استفاده یا کاهش سرعت استفاده از این افزودنی ها شده اند. با نگاهی به سیستم تولید میکرو-نانو حباب ها می توان گفت روشی سبز است و می تواند جایگزین خوبی برای افزودنی های نانو ساختار باشد.

### ۱-۳-۲ - اهداف جزئی

در این پایان نامه که شامل ۲ بخش می باشد ابتدا در بخش اول به بررسی آزمایشگاهی اثر استفاده از میکرو-نانو حباب بر روی سیمان و بتن در چهار طرح اختلاط با نسبت آب به سیمان  $W/C=0.6$ ،

W/C=0.5، W/C=0.4 و W/C=0.35، آزمایش‌های زمان‌گیرش، جریان سیمان، اسلامپ و مقاومت فشاری و مقاومت کششی مورد تحقیق قرار گرفت. سپس در بخش دوم به بررسی همزمان میکرو-نانوحباب‌ها و فوق‌روان‌کننده در ۳ غلظت از فوق‌روان‌کننده (1.4%، 0.9%، 0.5% وزن سیمان) در ۳ طرح اختلاط با نسبت آب به سیمان W/C=0.6، W/C=0.5 و W/C=0.4، آزمایش‌های زمان‌گیرش، جریان سیمان، اسلامپ، مقاومت فشاری و مقاومت کششی مورد تحقیق قرار گرفت و نتایج آن با نتایج بخش اول مقایسه گردید.

#### ۴-۱ - زمینه نوآوری تحقیق

در این پژوهش تأثیر همزمان میکرو-نانوحباب و فوق‌روان‌کننده می‌باشد. 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. رفتار بتن ساخته‌شده با میکرو-نانوحباب‌های هوا مشابه بتن حاوی دیگر نانو ذرات است و کمتر شباهتی به بتن حباب‌دار ساخته‌شده با مواد مضاف حباب‌زا دارد. [Arefi et al, 2016]

#### ۵-۱ - معرفی ساختار پایان‌نامه

پایان‌نامه پیش‌رو مشتمل بر پنج فصل می‌باشد. فصل اول آن مقدمه، شامل معرفی اجمالی نانو ذرات و نانوحباب‌ها و فوق‌روان‌کننده‌ها است. فصل دوم مروری بر تحقیقات گذشته و مبانی تحقیق است و در فصل سوم شرح آزمایش‌ها و تجهیزات وسایل استفاده‌شده در آن‌ها بیان گردید. در فصل چهارم نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها و تحلیل آن‌ها ذکر شده است. در نهایت فصل پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای پژوهش‌های آتی ارائه شده است.

فصل دوم

# مروری بر تحقیقات گذشته

## ۱-۲ - مقدمه

یکی از نوآوری‌های فناوری نانو، استفاده از آب حاوی میکرو-نانوحباب<sup>۱</sup> (میناب یا MNB) به‌عنوان مکمل آب مصرفی در بتن است. استفاده از میناب به عنوان مکمل آب مصرفی در بتن می‌تواند در خصوصیات بتن اثرات ویژه‌ای داشته باشد. که بعضاً این اثرات می‌تواند در جهت بهبود یا تضعیف خصوصیات بتن سخت شده و بتن در حالت خمیری باشد. با توجه به مشخصات فوق روان کننده‌ها، استفاده از آن‌ها می‌تواند نقش مؤثری در کاهش اثرات بعضاً منفی میناب در خصوصیات بتن داشته باشد. در این پژوهش به‌منظور بررسی اثرات جایگزین میناب با آب در بتن در حضور درصدهای مختلف روان کننده (0.5%, 0.9%, 1.4%) بر مشخصات مکانیکی سیمان و بتن بررسی می‌گردد [Arefi et al, 2016]. در ابتدای این فصل مروری بر تحقیقات مشابه (استفاده از نانو ذرات) که روی بتن انجام شده را خواهیم داشت. سپس به‌صورت مفصل درباره‌ی میکرو-نانوحباب و شاخص‌ها و پیشینه‌ی آن بحث خواهد شد. بعد از آن به پیشینه‌ی تحقیقات تأثیر همزمان نانو ذرات و افزودنی کاهنده‌ی آب پرداخته خواهد شد.

## ۲-۲ - استفاده از نانو ذرات در بتن

تحقیقات زیادی در زمینه‌ی کاربرد نانو موادهای مختلف در بهبود برخی از ویژگی‌های بتن انجام شده که از جمله آن‌ها می‌توان به نانو اکسید سیلیس، نانو کائولین، نانو اکسید آلومینیوم و نانو اکسید آهن، نانولوله‌های کربنی و نانو تیتانیوم اشاره کرد.

### ۱-۲-۲ - نانو اکسید سیلیس<sup>۲</sup> در بتن

افزودن نانو سیلیس به بتن موجب افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی، کاهش زمان گیرش و کاهش نفوذپذیری آب درون بتن و همچنین مقاومت بالاتر در برابر حمله‌های شیمیایی می‌شود.

---

<sup>۱</sup> Micro-Nano bubble

<sup>۲</sup> SiO<sub>2</sub>

آزمایش‌هایی که بر روی نانو سیلیس انجام شده ، نشان داده‌اند که این ذرات نه تنها برای محیط زیست مشکل‌ساز نیستند بلکه نتایج بهتری در مقایسه با میکرو سیلیس ارائه می‌کنند [Chong, 2002].

آزمایش‌ها حاکی از افزایش مقاومت فشاری و خمشی بتن حاوی نانو سیلیس است. این آزمایش‌ها نشان داد که مقاومت ملات حاوی نانو سیلیس نیز بیشتر است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM<sup>۳</sup>) نشان داد که ذرات اکسید سیلیس منافذ را پر می‌کنند و همچنین باعث کاهش مقدار کلسیم هیدروکسید<sup>۴</sup> در محصولات هیدراتاسیون می‌شوند. این اثرات باعث بهبود خواص مکانیکی ملات سیمان توسط نانو ماده می‌شود [Sobolev et al, 2008].

مطالعات انجام‌شده 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] خصوصاً در اولین روزهای عمر بتن می‌گردد و روانی را نیز کاهش می‌دهد [Abd EL-Baky et al, 2013].

## ۲-۲-۲ - نانو اکسید آهن<sup>۵</sup>

بتن دارای نانو ذرات آهن، مقاومت فشاری و کششی بیشتری نسبت به بتن معمولی دارد. طبق پژوهش‌های انجام‌شده توسط عبدلی یزدی و همکارانش، درصد بهینه مصرف نانو ذرات آهن در بتن 3% است، در صورتی‌که با افزایش درصد نانو آهن تا 5%، مقاومت بتن به صورت خطی کاهش می‌یابد. با اضافه کردن نانو اکسید آهن میزان افزایش مقاومت فشاری نسبت به مقاومت کششی بیشتر است، دلیل این پدیده نیز وجود میکرو ترک‌های در بتن است که ترک‌ها در کشش تأثیر بیشتری دارند [Abdoli Yazdi et al, 2011].

<sup>3</sup> Scanning Electron Microscope

<sup>۴</sup> CaOH

<sup>۵</sup> Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

طبق آزمایش‌ها نظری و همکارانش، بکارگیری حداکثر 2% نانو اکسید آهن 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 1% است که بیشترین مقاومت را باعث می‌شود. افزایش مقاومت خمشی به دلیل مصرف سریع کلسیم هیدروکسید که در طی هیدراتاسیون سیمان پرتلند شکل گرفته است [Nazari et al, 2010].

### ۲-۲-۳ - نانو اکسید آلومینیوم<sup>۶</sup> در بتن

نانو آلومینیوم اکسید با هیدرو اکسید کلسیم ناشی از هیدراتاسیون سیلیکات کلسیم واکنش می‌دهد، میزان واکنش پوزولانی متناسب با مقدار سطح موجود برای واکنش است. اضافه کردن نانو اکسید آلومینیوم باعث بهبود مقاومت کششی و مقاومت خمشی بتن می‌گردد. از طرفی نانو آلومینیوم باعث افزایش مدول الاستیسیته بتن نیز می‌گردد. افزودن 5% نانو اکسید آلومینیوم (با اندازه متوسط ذرات حدود 150 nm) مدول الاستیسیته نمونه‌های 28 روزه 143% افزایش می‌یابد. این در حالی است که مقاومت فشاری افزایش چشمگیری ندارد [Li, 2006].

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 [Nazari et al, 2010].

### ۲-۲-۴ - نانو کائولین<sup>۷</sup> در بتن

افزودنی نانو کائولین در بتن مقاومت ملات را بهبود بخشیده و تقریباً تا 8% تا 10% افزایش مقاومت فشاری، در نتایج مشاهده شده است. و در حدود 10% تا 15% افزایش مقاومت کششی در ملات به دست آمده است [Morsy, 2010].

---

<sup>۶</sup> Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

<sup>۷</sup> Kaolin

## ۳-۲ - کاربرد مواد افزودنی حباب‌زا در بتن ویژگی‌های بتن حاوی این افزودنی‌ها

امروزه مواد افزودنی مولد حباب هوا تقریباً برای تمامی بتن‌ها عمدتاً به‌منظور 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 حباب‌ها ساز 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 [Kosmatka, 2003].

حباب‌های هوای تزریق‌شده 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 تزریق‌شده در اندازه قطر بسیار کوچک، بین 10 تا 1000 میکرومتر می‌باشد، در حالی که حفره‌های محبوس شده معمولاً 1000 میکرومتر (1 میلی‌متر) و یا بزرگ‌تر هستند [Kosmatka, 2003].

قطر اکثر حباب‌های هوای تزریق‌شده در بتن‌های معمولی بین 10 تا 100 میکرومتر می‌باشد. حباب‌ها به هم پیوسته نیستند، آن‌ها به خوبی پراکنده شده و به‌طور تصادفی توزیع شده است. میزان هوای محبوس شده در بتن با اندازه‌ی بزرگ‌ترین دانه برابر 25 mm تقریباً 1.5% می‌باشد، در حالی که در بتن با ترکیبات مشابه برای مقاومت در برابر سیکل یخبندان باید کل هوای موجود در بتن حدود 6% باشد که این شامل هم حباب‌های بزرگ (به دام افتاده) و هم حباب‌های ریزتر (تزریق‌شده) می‌شود [Kosmatka, 2003].

خواص بتن هوادار:

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

جدول ۱-۲- خلاصه‌ای از خواص بتن هوادار [Kosmatka, 2003]

ویژگی‌ها	تأثیر
جذب	تأثیر کم
مقاومت فشاری	کاهش حدود 2% تا 6% به ازای هر درصد افزایش هوا
خزش	تأثیر کم
چگالی	با افزایش هوا کاهش می‌یابد
مقاومت خمشی	به ازای هر درصد افزایش هوا 2% تا 4% کاهش می‌یابد
نفوذپذیری	تأثیر کم، کاهش در نسبت آب به سیمان باعث کاهش نفوذپذیری
اسلامپ	به ازای هر 0.5 تا 1 درصد افزایش هوا حدود 25mm افزایش می‌یابد
چسبندگی	چسبندگی افزایش می‌یابد، ماله‌کشی سخت می‌شود
رسانایی گرمایی	به ازای هر درصد افزایش هوا 1% تا 3% کاهش می‌یابد

## ۴-۲ - میکرو- نانوحبابهای هوا

### ۱-۴-۲ - کلیات میکرو- نانوحبابها

میکرو حباب‌ها و نانوحباب‌ها، حباب‌های بسیار کوچکی از هوا هستند که به ترتیب دارای ابعاد

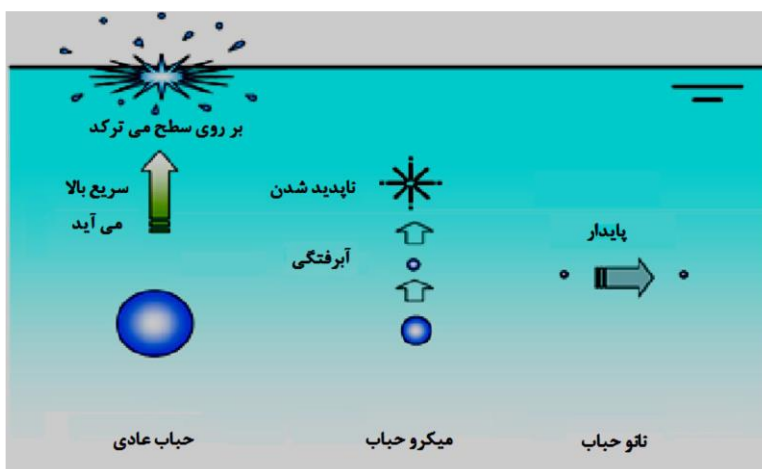
۱۰ - ۵۰ میکرومتر و کمتر از ۲۰۰ نانومتر می‌باشند. یک حباب معمولی، مسیری به سمت بالا را با

سرعت زیاد طی می‌کند و پس از رسیدن به سطح آب متلاشی می‌شود. یک میکرو حباب نیز مسیری به



سمت بالا را طی می‌کند با این تفاوت که معمولاً در داخل آب متلاشی می‌شود. همچنین یک نانوحباب می‌تواند درون آب در جهت‌های مختلفی حرکت کند و برای مدت زمان طولانی (مثلاً چند ماه) پایدار بماند و به تدریج حباب کوچک شود تا محو گردد که شکل ۱-۲ نحوه حرکت حباب عادی، میکرو حباب و نانوحباب را نشان می‌دهد. [Agarwal, 2011]

میکرو- نانوحباب‌ها طی فرآیند کاویتاسیون هیدرودینامیکی در حضور گاز هسته‌زایی شده در آب تولید می‌شوند. 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. [Agarwal, 2011]



شکل ۱-۲- نحوه حرکت حباب عادی، حباب میکرو، حباب نانو در آب [Arefi et al, 2016]

## ۲-۴-۲- اصول کاویتاسیون هیدرودینامیکی

میکرو- نانوحباب‌های هوا به دلیل وجود اکسیژن دارای بار منفی هستند و به روش مختلفی تولید می‌شوند که یکی از این روش‌ها کاویتاسیون هیدرودینامیکی است. کاویتاسیون هیدرودینامیکی زمانی اتفاق می‌افتد که به علت سرعت بالای جریان، فشار در یک نقطه در یک مایع به‌طور لحظه‌ای به زیر فشار بخار، کاهش یابد. به همین منظور تغییر و ایجاد یک مسیر ورودی هوا در قسمتی از لوله ونتوری باعث

عملکرد بهتر و مقرون به صرفه تر برای ایجاد میکرو- نانوحباب در سیال می گردد. کاویتاسیون هیدرودینامیکی بر اثر جریان در مسیرهای مستقیم رخ نمی دهد ولی در یک جریان ساده بدون انشعاب و اغتشاش، تغییر در جهت و همگرایی جریان باعث ایجاد پدیده کاویتاسیون می شود. تولید و ساخت میکرو- نانوحبابها بر اساس این اصل طراحی و ساخته شده است. [Takahashi, 2009]

## ۲-۴-۳- تئوری پتانسیل سطحی از میکرو- نانو حبابها

زتا پتانسیل یک خاصیت فیزیکی ذرات باردار است که در فصل مشترک با فاز جامد یا مایع با محلول های الکترولیتی بروز می کند. در شکل ۲-۲ یک ذره باردار به طور شماتیک درون محلول نشان داده شده است. پتانسیل زتا برای درک و کنترل خواص سوسپانسیون های کلوئیدی بسیار حائز اهمیت است. عموماً می توان خصوصیات یک سوسپانسیون را با درک چگونگی برهم کنش کلوئیدها با یکدیگر شناسایی نمود. به دلیل اندازه بسیار کوچک کلوئید، نیروهای سطحی در مرز بین ذره و مایع بسیار مهم هستند. یکی از مهم ترین اثرات سطحی، الکتروستاتیک است ذرات کلوئید بار الکتریکی یکسانی داشته لذا نیروی دافعه الکتروستاتیک بین دو ذره مجاور ایجاد می شود. اگر بار به اندازه کافی بزرگ باشد، کلوئیدها به صورت جدا از هم و پراکنده در سوسپانسیون باقی می مانند کاهش یا حذف این بارها اثر معکوس دارد. بنابراین ذرات کلوئیدی به راحتی تجمع کرده و از سوسپانسیون خارج می شوند. این تجمع باعث تغییر در خواص سوسپانسیون نیز می شود. بار الکتریکی ذرات با ایجاد تغییر در مایع سوسپانسیون قابل کنترل است. این تغییر و تعدیل شامل کاهش یا افزایش pH ، تغییر در گونه های یونی درون محلول و استفاده از یک گونه فعال سطحی که به طور مستقیم به ذرات کلوئیدی اتصال یافته و خواص آنها را دستخوش تغییر می کند است [Hunter , 1981].

جدایش بار در فصل مشترک بین دو فاز، لایه مضاعف الکتریکی نامیده می شود. این دو فاز در

حالت ایده‌ال، دو منطقه با بارهای مخالف هستند. برای به تصویر درآوردن محیط یونی در نزدیکی یک کلئید باردار و توضیح چگونگی عمل نیروهای دافعه الکتریکی، از مدل لایه مضاعف استفاده می‌شود. می‌توان این مدل را به صورت لایه‌های متوالی از یون‌ها در اطراف یک کلئید با بار منفی تصور کرد. ابتدا تأثیر کلئید بر روی یون‌های مثبت (یون‌های با بار مخالف)<sup>۸</sup> مورد توجه قرار می‌گیرد. در این حالت، نیروی جاذبه از طرف کلئید با بار منفی، باعث جذب یون‌های مثبت و تشکیل یک لایه در اطراف سطح کلئید می‌شود. این لایه با بار مخالف، لایه استرن<sup>۹</sup> نامیده می‌شود. سپس یون‌های مثبت اضافی باز هم به وسیله کلئید جذب شده ولی به وسیله لایه استرن و سایر یون‌های مثبت که سعی در نزدیک شدن به کلئید را دارند، دفع می‌شوند. این تعادل دینامیکی منجر به تشکیل لایه نفوذی<sup>۱۰</sup> یون‌های با بار مخالف می‌شود [Hunter, 1981].

اکثر مایعات حاوی کاتیون‌ها و آنیون‌ها یعنی یون‌های 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 جذب شده در حالی که 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 برشی<sup>۱۱</sup> 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. طبق

---

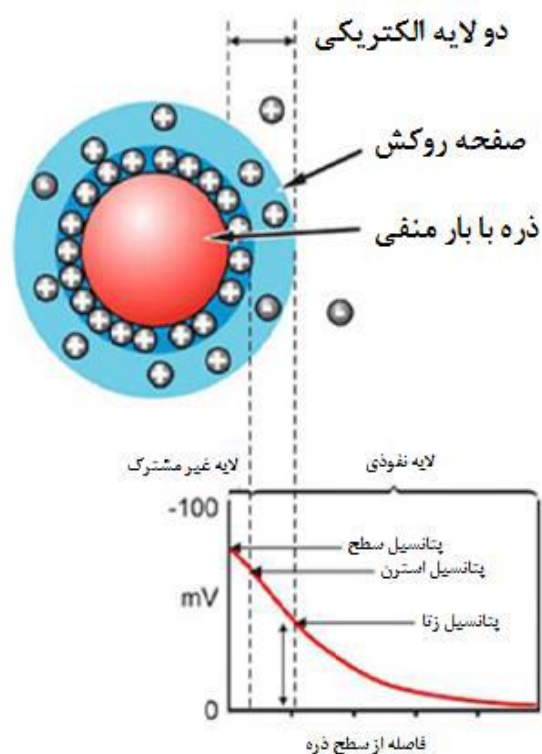
<sup>۸</sup> Counter-ion

<sup>۹</sup> Stern Layer

<sup>۱۰</sup> Diffused Layer

<sup>۱۱</sup> Shear Plane

جدول ۲-۲ زتا پتانسیل ، یکی از عوامل پیش بینی پایداری ذرات در حلال است [Hunter, 1981].



شکل ۲-۲- حضور یک ذره باردار در الکترولیت به صورت شماتیک [Arefi et al, 2016]

جدول ۲-۲- میزان رفتار پایداری ذرات در بازه‌های زتا پتانسیل آن‌ها [Arefi et al, 2016]

رفتار پایداری ذرات	پتانسیل زتا (mV)
سریع لخته می‌شوند	از ۰ تا $\pm 5$
ناپایدار	از $\pm 10$ تا $\pm 30$
پایداری متوسط	از $\pm 30$ تا $\pm 40$
پایداری خوب	از $\pm 40$ تا $\pm 60$
پایداری عالی	بیشتر از $\pm 60$

۲-۴-۴- مروری بر تحقیقات میکرو- نانوحباب‌ها

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 [Arefi et al, 2016].

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 [Maruyama, 2015].

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 قرار گرفته است [Han, 2012].

## ۵-۲ - کلیاتی درباره‌ی فوق روان کننده

برای بهبود کیفیت بتن سخت شده، کاهش نسبت آب به سیمان از ابتدای قرن بیستم در دستور کار ساخت بتن پایاتر و مقاوم‌تر و با نفوذپذیری کمتر می‌باشد. همواره این کاهش W/C به کاهش کارایی و روانی بتن منجر می‌شود و تضادی وجود داشت که حل آن در گرو تغییر روش‌های ساخت و اجرا بود اما تا به کارگیری مواد کاهنده آب (روان کننده) تحول اساسی و عظیمی رخ نداد [Dhir, 1996].

## ۲-۵-۱ - فلسفه و دلایل به کارگیری افزودنی‌های روان کننده (کاهنده آب)

افزودنی‌ها طبق ASTM C125 به موادی غیر از آب، سنگدانه، سیمان هیدرولیکی و الیاف گفته

می‌شود که در هنگام اختلاط و یا درست قبل از اختلاط به بتن یا اجزاء آن اضافه می‌شود تا خاصیت جدیدی را در بتن خمیری یا سخت شده به وجود آورد. سه دلیل می‌توان برای افزودنی‌های روان کننده (کاهنده آب) برشمرد [Dhir, 1996].

۱- افزایش روانی بتن و ملات ها ۲- کاهش آب مصرفی ۳- کاهش عیار سیمان بتن و ملات

## ۲-۵-۲- موارد کاربرد افزودنی‌های کاهنده آب

امروزه کاربردهای متعددی برای این مواد با قدرت کاهندگی متفاوت وجود دارد که به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود:

۱- ریختن بتن در قطعات نازک و پر میلگرد با ساخت بتن روان تر ۲- بتن‌ریزی زیر آب ۳- ساخت بتن‌های خود تراکم یا خود تراز ۴- ساخت بتن پر مقاومت ۵- ساخت بتن

آب‌بند [Dhir, 1996]

## ۳-۵-۲ - دسته‌بندی افزودنی‌های کاهنده آب

افزودنی‌های کاهنده آب به سه گروه اصلی و هر گروه نیز بسته به خواص جانبی خود به دسته‌های دیگری طبق استاندارد ASTM C494 و استاندارد ملی ایران ISIRI 2930 طبقه‌بندی می‌شود [استاندارد ملی ایران ۲۹۳۰].

## ۲-۵-۳-۱ - روان کننده‌ها

روان کننده‌ها که نخستین گروه کاهنده‌های آب هستند و کاربرد آن‌ها از دهه ۱۹۳۰ میلادی آغاز شده است، بسته به خواص جانبی خود و بر اساس استاندارد ASTM C494 به دسته‌های زیر تقسیم می‌شوند:

۱- روان کننده (کاهنده آب) معمولی (Type A) ۲- روان کننده (کاهنده آب) کند گیر (Type)

(D) ۳- روان کننده (کاهنده آب) زود گیر (Type E)

روان کننده‌ها در بسیاری از پروژه‌های کوچک و بزرگ و به ویژه در بتن‌های حجیم مانند بدنه سدها و تولید قطعات بزرگ بتنی به کار می‌روند و می‌توان آن‌ها را پرمصرف‌ترین کاهنده‌های آب به شمار آورد. این افزودنی‌ها در مقادیر مصرف متعارف، مقدار آب اختلاط بتن را ۵ تا ۱۲ درصد کاهش می‌دهند و در مقادیر زیاد مصرف ممکن است تأثیرات جانبی همچون کندگیری بیش از اندازه یا هوا زایی داشته باشند. به همین دلیل دامنه مقدار مصرف آن‌ها محدود است. این افزودنی‌ها بانام‌های پلاستی‌سایزر، کاهنده آب یا روان کننده بتن عرضه و مصرف می‌شوند [Dhir, 1996].

## ۲-۵-۳-۲ - فوق روان کننده‌ها

فوق روان کننده‌ها که دومین گروه کاهنده‌های آب هستند و از دهه ۱۹۵۰ مورد استفاده قرار گرفته‌اند با عنوان بسا کاهنده‌های آب شناخته می‌شوند. فوق روان کننده‌ها بر اساس استانداردهای C1017 & ASTM C494 به دو دسته زیر تقسیم می‌شوند:

۱- فوق روان کننده معمولی (ASTM C494: Type F) ۲- فوق روان کننده کند گیر (ASTM)

(C494: Type G)

این افزودنی‌ها در مقادیر مصرف متعارف، مقدار آب اختلاط بتن را ۱۲ تا ۲۵ درصد کاهش می‌دهند و نسبت به روان کننده‌ها تأثیرات جانبی کمتری دارند ولی برخی از آن‌ها در مقادیر مصرف بیش از اندازه موجب کندگیری یا هوا زایی می‌شوند. عموماً فوق روان کننده‌ها در مقادیر مصرف خیلی کم، روانی کمتری نسبت به روان کننده‌ها (در مقدار مصرف یکسان) ایجاد می‌کنند.

نکته ۱-۲ - به دلیل اثرات نامطلوب مصرف بیش از اندازه روان کننده‌ها، نمی‌توان آن‌ها را در

مقادیر زیاد به جای فوق روان کننده‌ها به کار برد.

نکته ۲-۲ – در مقادیر مصرف بیش از اندازه فوق روان کننده‌ها در مخلوط‌های بتن با دانه‌بندی نامناسب، ممکن است جداسدگی و آب انداختگی افزایش یابد [Dhir, 1996].

### ۲-۳-۵-۳ – فرا روان کننده‌ها

این افزودنی‌ها که سومین گروه کاهنده‌های آب هستند از دهه‌ی ۱۹۹۰ میلادی مورداستفاده قرار گرفته‌اند و بانام‌های فوق روان کننده توانمند یا ابر روان کننده نیز شناخته می‌شوند. هرچند این افزودنی‌ها ویژگی‌های منحصر به فردی نسبت به فوق روان کننده‌ها دارند ولی در حال حاضر در همان دسته‌بندی فوق روان کننده‌ها یعنی **ASTM C494: Type F & G** و **ASTM C1017: Type I & II** جای می‌گیرند.

این افزودنی‌ها مقدار آب اختلاط بتن را بیش از ۲۵ درصد کاهش می‌دهند. این دسته از افزودنی‌ها نسبت به روان کننده‌ها و فوق روان کننده‌ها تأثیرات جانبی کمتری دارند. عموماً فراروان کننده‌ها در مقادیر مصرف کم، تأثیر روان کنندگی بیشتری نسبت به فوق روان کننده‌ها (در مقدار مصرف یکسان) دارند. ویژگی‌های منحصر به فرد این افزودنی‌ها از جمله تولید بتن‌های توانمند، خود تراز، خودمتراکم و با مقاومت‌های خیلی زودرس و خیلی زیاد از یکسو صرفه‌جویی در انرژی مصرفی، کاهش هزینه‌های اجرایی و سازگاری زیست‌محیطی از سوی دیگر، باعث گسترش روزافزون کاربرد آن‌ها در کشورهای مختلف جهان شده است.

نکته ۳-۲ – فرآیند تولید این افزودنی‌ها این امکان را فراهم می‌آورد که بر اساس نیاز هر صنعت یا مشخصات فنی و شرایط اجرایی هر پروژه، فراروان کننده‌ای سازگار و مناسب تولید کرد.

نکته ۴-۲ – مراکز تحقیقاتی جهان، شرکت‌های تولیدکننده افزودنی‌های بتن و سازمان‌های



مرتبط با صنعت ساخت‌وساز همواره در جستجوی یافتن مواد شیمیایی جدید با کارایی و تأثیر بهتر بر عملکرد مخلوط‌های بتنی هستند و احتمال پیدایش و عرضه محصولات جدید همچنان وجود دارد.

نکته ۲-۵ - با توجه به خاصیت پخش‌کنندگی بسیار زیاد فراروان کننده، تأثیر آن بر احتمال جدایش و آب انداختگی در مخلوط‌های بتن با دانه‌بندی نامناسب به مراتب بیشتر از سایر کاهنده‌های آب است [Dhir, 1996].

#### ۲-۵-۴ - مکانیسم عملکرد کاهنده‌های آب

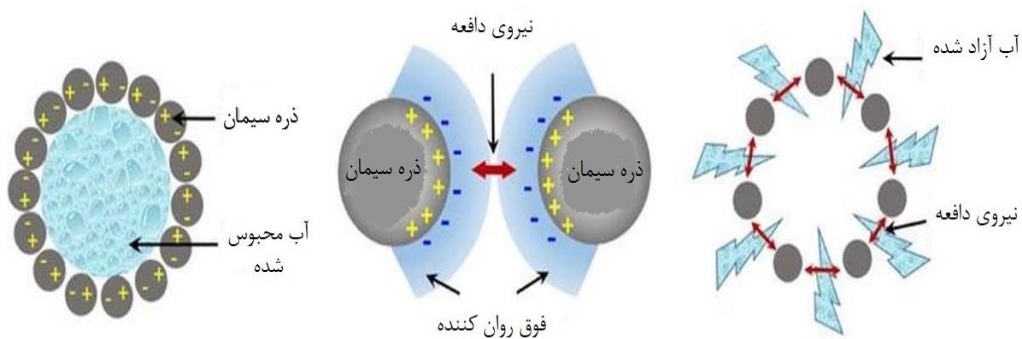
کاهنده‌های آب از نوع افزودنی‌های با عملکرد فیزیکی هستند و تأثیری مستقیمی بر فرآیند آبگیری سیمان ندارند. بخش اصلی افزودنی‌های کاهنده‌ی آب، عوامل اثرکننده بر سطح هستند. عوامل اثرکننده بر سطح موادی هستند که در سطح مشترک بین دو فاز آمیخته نشدنی متمرکز می‌شوند و نیروهای فیزیکی شیمیایی مؤثر بر این سطح را تغییر می‌دهند. در مخلوطی که از مواد کاهنده آب استفاده نشود، ذرات سیمان به یکدیگر می‌چسبند و لخته می‌شوند. مکانیسم کلی عملکرد این افزودنی‌ها، کاهش نیروهای جاذبه بین ذرات و کمک به جدایش و بهبود پخش شونده‌ی دانه‌های سیمان از یکدیگر است. این مکانیسم علاوه بر فراهم کردن حرکت آزادانه ذرات سیمان به دلیل جدایش آن‌ها از یکدیگر، آب محبوس در لخته‌های سیمانی را نیز آزاد و صرف بهبود روانی مخلوط بتن می‌کند. روان کننده‌ها به یکی از شیوه‌های زیر نیروی جاذبه بین ذرات سیمان را کاهش می‌دهند و به پراکنده شدن آن‌ها کمک می‌کنند [Dhir, 1996].

۱- کاهش کشش بین سطحی ۲- جذب چندلایه‌ای مولکول‌های آلی ۳- افزایش پتانسیل الکتروستاتیکی ۴- ایجاد لایه‌ای از مولکول‌های آب احاطه‌کننده ذرات ۵- تغییر در ساختار

ترکیبات هیدراته شده سیمان

مکانیسم کلی عملکرد فوق‌روان‌کننده‌ها، جدایش و پراکندن دانه‌های سیمان از یکدیگر به کمک نیروهای دافعه ناشی از بارهای الکتروستاتیکی است. در بتن و ملات، دانه‌های سیمان و سنگدانه در اثر ترکیب با آب دارای بار سطحی الکتروستاتیکی می‌شوند، ذرات سیمان در این حالت تمایل دارند که به یکدیگر بچسبند. فوق‌روان‌کننده‌ها در زمان اختلاط، جذب سطح دانه‌های سیمان می‌شوند و به آن‌ها بار منفی می‌دهند که منجر به ایجاد نیروی دافعه بین ذرات سیمان و پراکندن آن‌ها می‌شوند. این اثر به نام "پخش‌کنندگی" شناخته می‌شود. مکانیسم پخش‌کنندگی الکتروستاتیکی علاوه بر پخش کردن دانه‌های سیمان، آب محبوس در لخته‌های سیمانی را نیز آزاد و صرف بهبود روانی مخلوط بتن می‌کند که شکل ۲-۳ مکانیسم عملکرد کاهنده‌ی آب را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.

فراروان‌کننده‌ها با توجه به ساختار مولکولی و با استفاده از همان اصل بارهای الکتروستاتیکی نه تنها ذرات سیمان را بهتر از روان‌کننده‌ها و فوق‌روان‌کننده‌ها پخش می‌کنند (تأثیر اولیه) بلکه به دلیل داشتن شاخه‌های جانبی در زنجیره مولکولی، از جذب شدن ذرات سیمان پخش شده نیز ممانعت به عمل می‌آورند (تأثیر ثانویه). تأثیر ثانویه فراروان‌کننده‌ها در اصطلاح شیمیایی "ممانعت فضایی" نامیده می‌شود که به دلیل ساختار و آرایش مولکول‌ها یا اتم‌های مجاور یکدیگر ایجاد می‌شود [Dhir, 1996].



شکل ۲-۳- مکانیسم عملکرد کاهنده‌ی آب به صورت شماتیک [Dhir, 1996]

## ۲-۵-۵- تأثیر مواد متشکله بتن بر عملکرد کاهنده‌های آب

همان‌گونه که وجود یک افزودنی بر روی نسبت اجزا ویژگی‌های بتن تأثیر می‌گذارد، خواص و مقدار اجزای تشکیل‌دهنده بتن نیز تأثیرات متقابلی بر عملکرد افزودنی دارد. مقدار، نوع، و ترکیبات شیمیایی سیمان بر عملکرد کاهنده‌های آب تأثیر می‌گذارد. با افزایش مقدار سیمان، نسبت مصرف فوق روان‌کننده به سیمان کاهش می‌یابد. سیمان‌های نوع ۲ و ۵ در مقایسه با سیمان‌های نوع ۱ و ۳ به کاهنده آب کمتری نیاز دارند. ترکیبات شیمیایی سیمان به ویژه نسبت  $C_3A/C_3S$  و مقدار  $C_3A$  و نیز مقدار قلیایی‌ها بر عملکرد افزودنی‌های کاهنده آب تأثیر می‌گذارد. با افزایش مقدار  $C_3A$  در سیمان از راندمان روان‌کننده‌های نوع اول کاسته می‌شود. با افزایش مقدار قلیایی‌های سیمان میزان تأثیر و حفظ روانی روان‌کننده‌ها در بتن کاهش می‌یابد.

شکل و بافت سطحی سنگ‌دانه‌ها بر عملکرد کاهنده‌های آب تأثیرگذار است. سنگ‌دانه‌های گرد گوشه در مقایسه با سنگ‌دانه‌های تیز گوشه مقدار روان‌کننده کمتری را برای رسیدن به یک روانی مشخص لازم دارند. برای دستیابی به یک روانی مشخص هرچقدر بافت سطحی سنگ‌دانه‌ها زبرتر باشد مقدار مورد نیاز افزودنی کاهنده آب افزایش می‌یابد.

پوزولان‌ها به جز خاکستر بادی، عموماً به دلیل افزایش چشمگیر سطح جانبی دانه‌ها و تمایل به لخته شدن، کارایی و روانی بتن را به شدت کاهش می‌دهند و به همین دلیل توصیه می‌شود که در بتن‌های دارای پوزولان و به ویژه دوده سیلیسی از فوق روان‌کننده یا فراروان‌کننده استفاده شود. در مجموع مطالعه، بررسی و انجام آزمایش‌های کارگاهی برای مشخص کردن تأثیر مواد متشکله بتن بر افزودنی‌های کاهنده آب به شدت توصیه می‌شود. [Dhir, 1996]

## ۲-۵-۶- ارزیابی و انتخاب کاهنده آب

عملکرد افزودنی‌ها از هر نوع و طبقه با یکی از شیوه‌های زیر بررسی می‌شوند. این شیوه‌ها ممکن است به تنهایی و یا توأم در تشخیص و انتخاب یک افزودنی مورد توجه قرار گیرند.

۱) نتایج حاصل از کاربرد موفقیت‌آمیز یک افزودنی در کارهای مشابه قبلی که تحت شرایط کنترل‌شده کارگاهی انجام شده باشد. در این روش بایستی تا حد امکان شرایط کار و مصالح مرجع انتخابی شبیه به شرایط کارگاه باشد.

۲) انجام آزمایش‌های کارگاهی با مصالح و شرایط موجود در محل کارگاه.

۳) کتب و نشریات فنی و اطلاعات ارائه شده از سوی تولیدکننده‌ها.

با استفاده از روش‌های فوق محدوده مقادیر مصرفی و حد بهینه آن تعیین می‌شود و اثرات احتمالی ناشی از مصرف بیش از حد مورد بررسی قرار می‌گیرد ولی لازم است اطلاعات کاملی از عملکردهای قبلی یک افزودنی و نتایج آن که بیانگر محدوده مقادیر مصرف باشد در اختیار مصرف‌کننده قرار گیرد. بدیهی است که نتایج تأثیر یک افزودنی معین بر روی انواع سیمان، مقدار سیمان، نوع سنگ‌دانه‌ها، شرایط آب و هوا و شرایط ساخت بتن متفاوت است ولی محدوده تعیین‌شده از سوی تولیدکننده می‌تواند ملاک سنجش در هر کارگاهی قرار گیرد.

از آنجایی که این افزودنی‌ها عموماً مقاومت‌های بتن را افزایش می‌دهند و این فرصت را فراهم می‌آورند که مقدار سیمان کمتری مصرف شود، علاوه بر ایجاد صرفه‌جویی اقتصادی در طرح می‌توانند حرارت آبگیری را کاهش دهند که بخصوص در بتن‌ریزی‌های حجیم بسیار مؤثر است. توجه شود که

استفاده از کاهنده‌های آب به خودی خود باعث کاهش حرارت آبیگری نمی‌شود بلکه کاهش مقدار سیمان این امر را میسر می‌سازد. با استفاده از روان کننده کند گیر می‌توان با اصلاح زمان گیرش حرارت زایی بتن را در سنین اولیه کاهش داد. [Dhir, 1996]

در ادامه به مطالعات برخی از پژوهشگران در موارد استفاده از نانو مواد و فوق روان کننده‌ها می‌پردازیم.

## ۲-۵-۷- تحقیقات در زمینه‌ی کاربرد کاهنده‌های آب در حضور نانو مواد

تحقیقات زیادی در زمینه کاربرد کاهنده‌های آب در بهبود ویژگی‌های بتن حاوی نانو مواد انجام شده است که به تعدادی از آن اشاره می‌کنیم:

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 [Rauof, 2014].

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 [Habashi, 2014].

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 [Shaikh, 2015].

با بهبود بخشی دمایی، با افزایش دما از 25 تا 450 درجه سانتی‌گراد، در استفاده‌های 0، 1 و 2 درصد وزنی نانوالومینا 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

به دست آمده است. [Heikal, 2015]

در سال 2010 تأثیر نانو اکسید مس بر روی بتن خود تراکم انجام شد. که نتایج نشان می دهد نانو اکسید مس به عنوان جایگزین بخشی سیمان تا 4 درصد وزنی می تواند 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 می شود. نانو اکسید مس همچنین ساختار منافذ بتن را بهبود می بخشد [Nazari, 2010].

فصل سوم

# مواد و روش‌ها

### ۱-۳ - مقدمه

در این فصل به توضیح برنامه آزمایشگاهی، مصالح مصرفی، طرح اختلاط، تجهیزات و شرح آزمایش‌ها انجام‌شده بر سیمان، بتن، آب معمولی و آب حاوی MNB پرداخته‌شده است. که به توضیح مصالح مصرفی سیمان، آب، مصالح سنگی و افزودنی کاهنده‌ی آب در این پایان‌نامه پرداخته‌شده است. از 13 طرح اختلاط در این پایان‌نامه استفاده‌شده است. سپس به شرح آزمایش‌ها و تجهیزات استفاده‌شده در هر آزمایش پرداخته می‌شود.

### ۲-۳ - برنامه آزمایشگاهی

به‌منظور بررسی تأثیر همزمان فوق روان‌کننده و MNB بر مشخصات مکانیکی بتن و سیمان چهار برنامه آزمایشگاهی طراحی و انجام‌شده است. برنامه‌های آزمایشگاهی به شرح زیر است:

تأثیر MNB و تأثیر همزمان MNB و فوق روان‌کننده بر مشخصات مکانیکی سیمان از جمله زمان‌گیری، جریان ملات سیمان، مقاومت فشاری ملات سیمان و انجام آزمایش طیف‌سنج فلورسانس پرتو ایکس بر روی خمیر سیمان حاوی آب معمولی و آب حاوی MNB

ساخت نمونه بتن با آب و آب حاوی MNB به‌منظور آزمایش اسلامپ و مقاومت فشاری بتن و مقاومت کششی با آب معمولی به‌عنوان کنترل در 4 طرح اختلاط با مقاومت‌های ( $f_c=30\text{MPa}, 40\text{MPa}, 50\text{MPa}, 60\text{MPa}$ )

ساخت نمونه بتن با آب معمولی و فوق روان‌کننده با ۳ غلظت از فوق روان‌کننده (0.5%, 0.9%, 1.4% وزن سیمان) به‌منظور بررسی اسلامپ، مقاومت فشاری، مقاومت کششی در ۳ طرح



اختلاط ( $f_c=30\text{MPa}, 40\text{MPa}, 50\text{MPa}$ )

ساخت نمونه بتن با آب حاوی MNB و فوق روان کننده با ۳ غلظت از فوق روان کننده (0.5%, 0.9%, 1.4% وزن سیمان) به منظور بررسی اسلامپ، مقاومت فشاری، مقاومت کششی در ۳ طرح اختلاط ( $f_c=30\text{MPa}, 40\text{MPa}, 50\text{MPa}$ ) و مقایسه آن با برنامه دوم و سوم

تمامی آزمایشات در آزمایشگاه بتن و مصالح ساختمانی دانشگاه صنعتی شاهرود- ایران انجام شده است.

### ۳-۳ - مصالح مصرفی

#### ۳-۳-۱ - سیمان

سیمان استفاده شده برای ساخت نمونه‌ها از نوع پرتلند تیپ ۲ که در شکل ۳-۱ نشان داده شده است، مطابق استاندارد ملی ایران به شماره ۳۸۹ ساخته شده توسط شرکت سیمان شاهرود برای ساخت خمیر، ملات و بتن استفاده گردید. جدول ۳-۱ مشخصات آنالیز شیمیایی سیمان را که توسط آزمایش طیف‌سنج فلورسانس پرتو ایکس (XRF (X-ray Fluorescence Spectroscopy) در آزمایشگاه شرکت سیمان شاهرود مشخص شده، نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱- سیمان پرتلند تیپ دو شاهرود

جدول ۳-۱- مشخصات آنالیز شیمیایی سیمان پرتلند (گزارش شده از آزمایشگاه شرکت سیمان شاهرود)

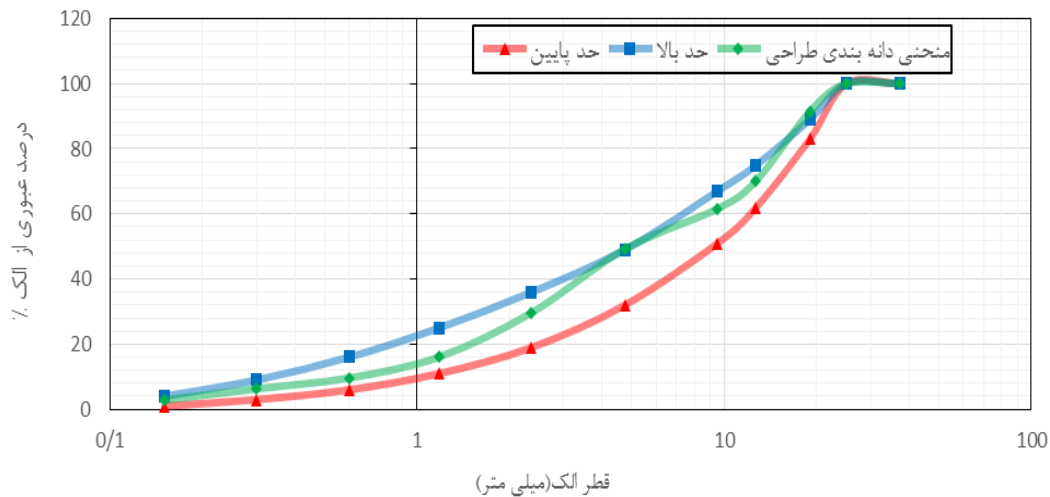
اکسیدهای سیمان	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	LOI(میزان مواد فرار کل)
درصد وزنی(درصد)	21.2	4.48	3.96	63.36	1.52	2.5	0.37	0.51	1.18

### ۲-۳-۳ - آب و میکرو- نانو حباب

آب استفاده شده 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 استفاده شده است.

### ۳-۳-۳ - مصالح سنگی

در این تحقیق از مصالح سنگی رودخانه‌ای استفاده شد که شامل شن ( $>4.75\text{mm}$ ) و ماسه ( $<4.75\text{mm}$ ) بوده و از قرصه‌ی ده‌ملا واقع در شهرستان شاهرود- سمنان- ایران تأمین شده، استفاده شده است. بزرگ‌ترین اندازه‌ی درشت‌دانه 25mm و درصد رطوبت ماسه 2.66% و جذب آب شن 0.63% می‌باشد. منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی استفاده شده در این تحقیق طبق استاندارد ملی ایران ۳۰۲ در شکل ۳-۲ ارائه شده است. مصالح سنگی به دلیل شباهت به کار عملی از شستن و خشک کردن اجتناب شده است.



شکل ۳-۲- منحنی دانه بندی مصالح سنگی

### ۴-۳-۳ - افزودنی کاهنده آب

افزودنی مورد استفاده از نوع فوق روان کننده<sup>۱۲</sup> 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. شکل ۳-۳ فوق روان کننده استفاده شده در این پایان‌نامه را نشان می‌دهد. (مشخصات کامل فوق روان کننده در پیوست ج آورده شده است)

<sup>12</sup> Super plastizer (SP)



شکل ۳-۳- فوق روان کننده‌ی استفاده‌شده در این تحقیق

### ۴-۲ - طرح اختلاط

در این پژوهش ۴ طرح اختلاط برای نمونه‌های بتن با آب و آب حاوی MNB با توجه به طرح ملی مخلوط بتن ایران برای مقاومت‌های 30, 40, 50, 60 مگا پاسکال با فرض اسلامپ ثابت 100 میلی‌متر طراحی شده است، سپس برای سه رده مقاومتی ( $f_c = 30\text{MPa}, 40\text{MPa}, 50\text{MPa}$ )، سه مقدار فوق روان کننده ( 0.5%, 0.9%, 1.4% وزن سیمان) اضافه شد و با اسلامپ ثابت 100 میلی‌متر و ثابت نگه‌داشتن W/C طراحی گردید. ارائه طرح اختلاط با سعی و خطا بسیار زیاد انجام شد و با استفاده از نمونه‌های شاهد طرح اختلاط صحت سنجی گردید و در نهایت طرح اختلاط نهایی، در جدول ۳-۲ ارائه شده است مورد استفاده در مراحل بعدی تحقیق قرار گرفت. جزئیات ارائه طرح اختلاط بر مبنای روش ملی مخلوط بتن ایران در پیوست ب به‌طور کامل ارائه گردیده است.

جدول ۳-۲- طرح اختلاط استفاده شده در این پژوهش

مقدار درصد فوق روان کننده	مقاومت فشاری (MPa)	W/C	درصدهای وزنی اجزای تشکیل دهنده بتن				درصد کاهش آب (%)	
			فوق روان کننده (kg)	سیمان (kg)	مصالح			آب یا آب حاوی MNB (kg)
					شن (kg)	ماسه (kg)		
0%	fc=30	0.6	0	301	721	1082	181	0
	fc=40	0.5	0	381	684	1026	193	0
	fc=50	0.4	0	503	628	942	209	0
	fc=60	0.35	0	647	565	847	226	0
0.5%	fc=30	0.6	1.32	265	756	1134	158	12
	fc=40	0.5	1.67	335	723	1085	168	12
	fc=50	0.4	2.21	443	675	1012	182	12
0.9%	fc=30	0.6	2.11	234	785	1178	138	22
	fc=40	0.5	2.66	296	757	1136	147	22
	fc=50	0.4	3.52	391	714	1072	159	22
1.4%	fc=30	0.6	2.74	196	822	1233	115	35
	fc=40	0.5	3.46	247	797	1198	122	35
	fc=50	0.4	4.58	327	763	1145	131	35

\*در تمام نمونه‌ها با درصد آب به سیمان مشابه به صورت مجزا برای آب و آب حاوی MNB آزمایش شده‌اند.

### ۳-۵ - تجهیزات و روش انجام آزمایش‌ها

#### ۳-۵-۱ - آزمایش تعیین غلظت نرمال سیمان هیدرولیکی

هدف در این آزمایش مقدار آب لازم جهت تهیه خمیر سیمان با غلظت نرمال که در آزمایش‌ها

دیگر نظیر آزمایش زمان گیرش بکار می‌رود تعیین می‌گردد. که از تجهیزات زیر در این آزمایش

استفاده شده است:

۱- ترازو AND-GF-5000، ۲- استوانه شیشه‌ای مدرج، ۳- دستگاه ویکات (شکل ۳-۴)، ۴-

دستگاه مخلوط‌کن (شکل ۳-۴)

ابتدا با استفاده از ۶۵۰ گرم سیمان و طبق استاندارد ASTM C305 خمیر سیمان آماده شد. سپس طبق استاندارد ASTM C187 خمیر را به شکل توپ در آورده و ۶ بار از فاصله ۱۵ سانتی‌متری از یک دست به دست دیگری پرتاب کرده تا گلوله تقریباً کروی شود. خمیر را از طرف بزرگ‌تر قالب ویکات وارد آن کرده سپس مقدار اضافی از طرف دیگر قالب برداشته و زیر دستگاه ویکات قرار داده و سوزن ویکات را روی سطح نمونه گذاشته و با باز کردن پیچ میله را رها کرده و نفوذ خمیر بعد از ۳۰ ثانیه ثبت شد. اگر در مدت ۳۰ ثانیه سوزن در فاصله ۱۰ میلی‌متری کف قالب قرار گیرد، غلظت خمیر نرمال بوده است. که برای به دست آوردن نسبت آب به سیمان مشخص با ۳ مرتبه سعی و خطا نسبت 0.25 به دست آمد.

### ۲-۵-۳ - آزمایش زمان گیرش سیمان

هدف از این آزمایش تعیین زمان گیرش اولیه سیمان (نفوذ ۲۵ میلی‌متری سوزن ویکات در خمیر سیمان) و زمان گیرش ثانویه (نفوذ صفر سوزن ویکات در خمیر سیمان) است که در این آزمایش از تجهیزات زیر استفاده شده است.

۱- ترازو AND-GF-5000، ۲- دستگاه ویکات، ۳- دستگاه مخلوط‌کن

برای تهیه خمیر سیمان با توجه به غلظت نرمال 0.25 مقدار 650gr سیمان و 162.5gr آب در دستگاه مخلوط‌کن ریخته سپس با توجه به استاندارد ملی ایران به شماره 392 و ASTM C191 آزمایش زمان گیرش انجام شد. خمیر را به شکل توپ در آورده و ۶ بار از فاصله ۱۵ سانتی‌متری از یک دست دیگری پرتاب نموده سپس در قالب ویکات گذاشته و بعد از ۳۰ دقیقه سوزن مماس شده را رها می‌کنیم

تا در خمیر نفوذ کند، میزان نفوذ شده در خمیر را ثبت می‌کنیم و این عمل را هر ۱۵ دقیقه تکرار می‌کنیم. بعد از آن نمودار نفوذ- زمان را رسم کرده و مدت زمان متناظر با نفوذ 25mm بیانگر گیرش اولیه و مدت زمان مربوط به نفوذ صفر گیرش نهایی خمیر سیمان است. سپس درصدهای مختلف فوق روان کننده به خمیر سیمان اضافه شد. که جدول ۳-۳ مقادیر سیمان و آب و فوق روان کننده برای آزمایش زمان گیرش آورده شده است. تعداد ۱۶ نمونه خمیر با تعداد تکرار ۲ مرتبه برای هر آزمایش ساخته شده است.

جدول ۳-۳- مقادیر سیمان و آب و فوق روان کننده

مقدار فوق روان کننده (gr)	سیمان (gr)	آب (gr) یا آب حاوی MNB (gr)
0	650	162.5
0.5 درصد وزن سیمان = 3.25	650	162.5
0.9 درصد وزن سیمان = 5.85	650	162.5
1.4 درصد وزن سیمان = 9.1	650	162.5



شکل ۳-۴- دستگاه ویکات (عکس سمت راست) و دستگاه مخلوط کن (عکس سمت چپ)

### ۳-۵-۳ - آزمایش جریان ملات سیمان

هدف از انجام این آزمایش برآورد میزان کارایی ملات سیمان و صحت سنجی مقدار آب کاهش یافته برای درصدهای فوق روان کننده است که از تجهیزات زیر استفاده شده است:

۱- میز جریان (شکل ۳-۵)، ۲- کولیس، ۳- کوبه، ۴- ماله، ۵- خط کش، ۶- دستگاه مخلوط کن

ملات سیمان طبق روش ارائه شده در ASTM C305 ساخته شد که نسبت آب به سیمان 0.485 و نسبت ماسه به سیمان 2.75 در نظر گرفته شده است سپس با توجه استاندارد ملی ایران ISIRI 2930 برای کمترین درصد فوق روان کننده ۱۲ درصد کاهش آب در نظر گرفته شد و بقیه درصدهای کاهش آب با آزمون و خطا به دست آمد که آزمایش جریان سیمان به دو منظور صحت سنجی میزان درصد کاهش آب و کارایی ملات سیمان با توجه به استاندارد ASTM C1437 انجام شده است. در این آزمایش ابتدا قالب مخروط ناقص با قطر پایینی 100mm و قطر بالایی 70mm و ارتفاع 50mm روی میز گذاشته و قالب را در دو لایه از ملات پر می کنیم سپس هر لایه را ۲۰ مرتبه ضربه زده و آنگاه ۲۵ بار میز جریان ضربه زده شد قطر متوسط ملات پخش شده روی میز اندازه گیری کرده و در رابطه ۳-۱ گذاشته:

رابطه ۳-۱

$$Flow\ cement(\%) = \frac{A - D_0}{D_0} \times 100$$

در رابطه ی فوق:

A = قطر متوسط اندازه گیری شده ملات سیمان،  $D_0$  = قطر داخلی پایینی قالب

جدول ۳-۴ طرح مخلوط ملات سیمان برای آزمایش جریان ملات سیمان در حضور درصدهای

مختلف فوق روان کننده نشان می دهد. تعداد ۱۶ نمونه ملات با تعداد تکرار ۲ مرتبه برای هر آزمایش



ساخته شده است.

جدول ۳-۴- طرح مخلوط ملات سیمان برای آزمایش جریان ملات سیمان

مقدار فوق روان کننده (gr)	درصد کاهش آب (%)	سیمان (gr)	آب یا آب حاوی (gr) MNB	ماسه (gr)
۰,۰	۰,۰	500	242	1275
0.5 درصد سیمان = 2.5	12 درصد	500	212.96	1275
0.9 درصد سیمان = 4.5	22 درصد	500	188.76	1275
1.4 درصد سیمان = 7	35 درصد	500	157.3	1275

### ۳-۵-۴- آزمایش تعیین مقاومت فشاری ملات سیمان

هدف از این آزمایش تعیین مقاومت فشاری ملات سیمان است که تجهیزات استفاده شده در این

آزمایش به شرح زیر است:

۱- ترازو AND-GF-5000، ۲- استوانه مدرج، ۳- قالب مکعبی با ابعاد داخلی 50\*50\*50 mm

(شکل ۳-۶)، ۴- مخلوط کن کاسه‌ای پره دار، ۵- کوبه، ۶- جک هیدرولیکی کامپیوتری ساخت شرکت

Toni Technic (شکل ۳-۷)



شکل ۳-۵- نمایش از میز جریان برای آزمایش جریان ملات سیمان



شکل ۳-۶- نمایش از قالب مکعبی ۵سانتی متری



شکل ۳-۷- دستگاه جک هیدرولیکی کامپیوتری

در این آزمایش ابتدا ملات سیمان طبق استاندارد ASTM C305 ساخته شد. سپس طبق استاندارد ASTM C109 ملات در قالب‌های مکعبی  $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 5\text{cm}$  در دو لایه ریخته شده و با ۳۲ ضربه چکش استاندارد متراکم شد سپس بعد از ۲۴ ساعت نمونه‌ها از قالب جدا کرده و در اتاق رطوبت با توجه به سن نمونه عمل‌آوری شد. تعداد ۴۸ نمونه ملات با تعداد تکرار ۳ مرتبه برای هر آزمایش برای سنین ۷ و ۲۸ روزه ساخته شده است. جدول ۳-۵ طرح اختلاط برای آزمایش مقاومت فشاری ملات سیمان را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۵- طرح مخلوط ملات سیمان برای آزمایش مقاومت فشاری

مقدار فوق روان کننده (gr)	درصد کاهش آب (%)	سیمان (gr)	آب یا آب حاوی MNB (gr)	ماسه (gr)
۰,۰	۰,۰	250	121.25	687.5
0.5 درصد سیمان = 1.25	12 درصد	220	106.7	732.1
0.9 درصد سیمان = 2.25	22 درصد	195	94.58	769.2
1.4 درصد سیمان = 3.5	35 درصد	162.5	78.81	817.4

### ۳-۵-۵ - آزمایش جذب آب و درصد رطوبت

از آنجاکه سنگدانه ها بخش عمده بتن را تشکیل می دهند، لذا میزان رطوبت و جذب آب موجود در سنگدانه ها تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی مخلوط‌های بتنی می‌گذارد. در این آزمایش از تجهیزات زیر استفاده شده است.

#### ۱- ظرف، ۲- آون، ۳- ترازو

طبق استاندارد ASTM C127 ظرف مورد استفاده را با دقت وزن کرده و نمونه‌ها در ظرف ریخته و بعد از خشک کردن وزن کردن در محیط آزمایشگاه قرار داده تا با دمای محیط یکسان شود. سپس به مدت ۲۴ ساعت در حوضچه آب قرار داده و بعد از گذشت ۲۴ ساعت نمونه را خارج کرده و با سشوار خشک کرده تا به حالت ssd (اشباع با سطح خشک) برسد در این حالت مجدداً وزن شد. پس از خشک و سرد شدن نمونه آن‌ها را همراه با ظرف وزن می‌کنیم. درصد رطوبت و جذب آب با استفاده از رابطه ی ۳-۲ به صورت زیر محاسبه می شود:

رابطه ۲-۳

$$P = \frac{B - C}{C - A} \times 100 \quad E = \frac{D - C}{C - A} \times 100$$

که در این رابطه ۲-۳ مشخصات پارامترها به شرح زیر است:

P= مقدار رطوبت کلی نمونه برحسب درصد

B= وزن ظرف و نمونه در حالت مرطوب (طبیعی)

C= وزن ظرف و نمونه خشک شده

A= وزن ظرف

D= وزن ظرف و نمونه در حالت SSD (اشباع با سطح خشک)

E= مقدار درصد جذب آب نمونه برحسب درصد

### ۳-۵-۶ - آزمایش اسلامپ بتن

به منظور برآورد کارایی و روانی بتن این آزمایش انجام شده است که از تجهیزات زیر استفاده شده است.

۱- قالب مخروط ناقص با قطر پایین ۲۰ سانتی متر و قطر بالایی ۱۰ سانتی متر و ارتفاع ۳۰

سانتی متر (شکل ۳-۸)، ۲- کوبه به قطر ۱۶ میلی متر

این آزمایش طبق استاندارد شماره ۴۹۲ ایران و ASTM C143 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 گاه های دو طرف مخروط

قرار داده و مخلوط تهیه شده را در ۱ لایه در مخروط اسلامپ می‌ریزیم و هر لایه را با ۲۵ ضربه میله اسلامپ می‌کوبیم. ارتفاع هر لایه پس از تراکم باید تقریباً یک‌سوم ارتفاع قالب باشد. در لایه زیرین ضربه‌ها باید تا عمق آن لایه نفوذ کنند و ۲ لایه دیگر را به ترتیبی متراکم می‌کنیم که اثر کوبیدن هر لایه به لایه زیرین برسد. قبل از متراکم ساختن لایه فوقانی باید قالب را به اندازه کافی از بتن پر نمود. چنانچه پس از متراکم 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 پر کردن تا برداشتن قالب باید بدون وقفه در مدت ۱/۵ دقیقه انجام شود. سپس مخروط را در کنار بتن فرو نهشته 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 ۳-۱۵)

ابتدا برای سه طرح اختلاط ارائه‌شده در جدول ۳-۲ با مقاومت‌های  $f_c=40\text{MPa}$ ،  $f_c=30\text{MPa}$  و  $f_c=50\text{MPa}$  تعداد ۶ نمونه با تکرار دو مرتبه در هر آزمایش با آب معمولی ساخته شد و اسلامپ درجا آزمایش شد سپس برای این سه طرح اختلاط ذکرشده تعداد ۶ نمونه با تکرار دو بار برای هر آزمایش با MNB ساخته شد و اسلامپ درجا گرفته شد و با آب معمولی مقایسه گردید. برای بررسی عامل زمان و حفظ عملکرد و پایداری MNB، تعداد ۶ نمونه با تکرار دو بار با آب ساخته و بعد از ۳۰ دقیقه از مخلوط کردن آزمایش اسلامپ انجام شد. همین‌طور تعداد ۶ نمونه با تکرار دو بار با آب حاوی MNB ساخته و بعد از ۳۰ دقیقه آزمایش انجام شد و با آب معمولی مقایسه گردید.

بنابراین برای تأثیر MNB بر روی اسلامپ درجا و اسلامپ بعد از ۳۰ دقیقه، تعداد ۲۴ نمونه ساخته شد. بعدازآن برای بررسی همزمان MNB و فوق روان کننده با درصد مختلف 0.5%، 0.9%، 1.4% وزن

سیمان ، آزمایش اسلامپ درجا برای ۳ طرح اختلاط ذکرشده تعداد ۱۸ نمونه بتن با تعداد تکرار دو بار برای هر آزمایش با آب معمولی در حضور فوق روان کننده ساخته و انجام شد سپس آب حاوی MNB را جایگزین آب معمولی کرده و با اضافه کردن فوق روان کننده تعداد ۱۸ نمونه با تکرار ۲ مرتبه برای هر آزمایش ساخته و نتایج آزمایش باهم دیگر مقایسه شد. تعداد ۳۶ نمونه برای این قسمت از آزمایش اسلامپ ساخته شد. و در کل تعداد ۶۰ نمونه بتن برای آزمایش اسلامپ ساخته و آزمایش شده است.



شکل ۳-۸- آزمایش اسلامپ برای بتن حاوی MNB (سمت چپ) و بتن حاوی آب (سمت راست)



شکل ۳-۹- نمای از مخروط ناقص برای آزمایش اسلامپ

### ۷-۵-۳ - آزمایش مقاومت فشاری بتن

آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه‌های مکعبی ۱۵ سانتی‌متر انجام شده است. تجهیزات استفاده شده در این آزمایش به شرح زیر است:

۱- جک هیدرولیکی کامپیوتری ساخت شرکت Toni Technic ، ۲- قالب مکعبی به ابعاد

15cm\*15cm\*15cm (شکل ۳-۹)، ۳- شیکر<sup>۱۳</sup> (شکل ۳-۱۰)



شکل ۳-۱۰- قالب مکعبی 15cm\*15cm\*15cm



شکل ۳-۱۱- نمایی از شیکر

<sup>13</sup> shaker



این آزمایش طبق استاندارد ملی ایران به شماره ۳۲۰۶ در سنین 7، 28 و 90 روزه توسط جک هیدرولیکی با سرعت بارگذاری 0.6MPa/s انجام شد. برای انجام آزمایش از نمونه‌های مکعبی استاندارد (15\*15\*15cm) مورد استفاده قرار گرفت. در تمامی نمونه‌ها قبل از انجام آزمایش مقاومت فشاری تا خشک شدن سطحی آب آن‌ها از حوضچه خارج شده‌اند. آزمایش مقاومت فشاری در دو بخش انجام شده است که در بخش اول این آزمایش تعداد ۲۴ نمونه با تکرار دو بار با آب معمولی برای ۴ طرح اختلاط (fc=30MPa, 40MPa, 50MPa, 60MPa) ساخته شد سپس ۲۴ نمونه با تکرار دو بار با آب حاوی MNB برای ۴ تا طرح اختلاط ذکر شده ساخته و با آب معمولی مقایسه شد.

بخش دوم این آزمایش تعداد ۵۴ نمونه با تعداد تکرار دو بار برای هر آزمایش برای ۳ طرح اختلاط (fc=30MPa, 40MPa, 50MPa) در حضور ۳ مقدار فوق روان کننده برای هر طرح اختلاط (0.5%, 0.9%, 1.4%) با آب معمولی ساخته شد سپس برای همان ۳ طرح اختلاط و ۳ مقدار فوق روان کننده ذکر شده تعداد ۵۴ نمونه با آب حاوی MNB ساخته و با نمونه‌های آب و فوق روان کننده و بخش اول مقایسه گردید. برای این آزمایش در مجموع تعداد ۱۵۶ نمونه بتن ساخته شده است. شکل ۳-۱۶ نمونه ی بتن مکعبی زیر جک هیدرولیکی برای آزمایش مقاومت فشاری بتن نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۲- نمونه بتن زیر جک هیدرولیکی برای آزمایش مقاومت فشاری بتن

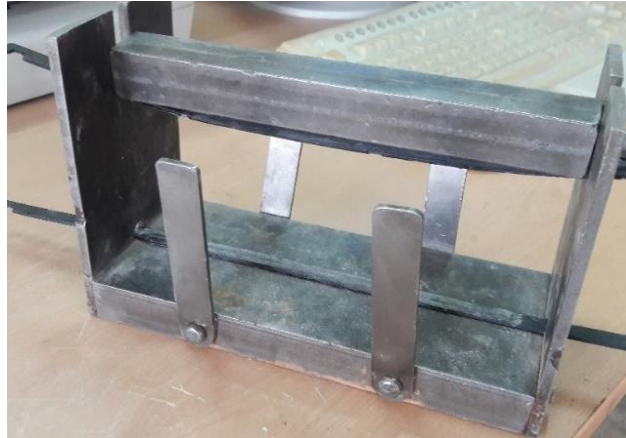
### ۳-۵-۸ - آزمایش مقاومت کششی بتن

آزمایش مقاومت کششی به روش کشش غیرمستقیم یا برزلی انجام شده است که در این آزمایش تجهیزات زیر استفاده شده است.

۱- جک هیدرولیکی کامپیوتری ساخت شرکت Toni Technic، ۲- نوار از جنس تخته سه لایه،

۳- محفظه آهنی (شکل ۳-۱۱)، ۴- قالب استوانه‌ای به قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر (شکل

۳-۱۲)، ۵- شیکر



شکل ۳-۱۳- نمایشی از محفظه آهنی

این آزمایش طبق استاندارد ملی ایران به شماره ۶۰۴۷ در سنین ۷ و ۲۸ روزه توسط جک هیدرولیکی با سرعت بارگذاری 10kN/min انجام شد. برای انجام آزمایش از نمونه‌های استوانه‌ای به قطر 10 سانتی‌متر و ارتفاع 20 سانتی‌متر استفاده شده است. در تمامی نمونه‌ها قبل از انجام آزمایش مقاومت کششی تا خشک شدن سطحی آب آن‌ها از حوضچه خارج شده‌اند. جهت انجام آزمایش ابتدا خطوط قطری نمونه‌ها را رسم می‌کنیم، سپس نمونه را در محفظه آهنی قرار داده سپس نمونه دقیقاً در وسط محفظه قرار داده و نوار تخته سه لا بر روی آن گذاشته و میله آهنی برای اعمال بار عمودی روی آن گذاشته و آزمایش را انجام می‌دهیم.

آزمایش مقاومت کششی در دو بخش انجام شده است که بخش اول ۱۲ نمونه بتن با تکرار دو مرتبه در هر آزمایش برای ۳ طرح اختلاط با مقاومت های  $f_c=50\text{MPa}$  و  $f_c=40\text{MPa}$ ،  $f_c=30\text{MPa}$  ساخته سپس ۱۲ نمونه بتن با آب حاوی MNB برای ۳ طرح اختلاط ذکر شده ساخته شد و با آب مقایسه گردید.

در بخش دوم این آزمایش تعداد ۳۶ نمونه با تعداد تکرار دو بار برای هر آزمایش برای ۳ طرح اختلاط ذکر شده در پاراگراف قبل در حضور ۳ مقدار فوق روان کننده (0.5%, 0.9%, 1.4%) برای هر

طرح اختلاط با آب معمولی ساخته شد سپس MNB جایگزین آب معمولی شده و با همان ۳ مقدار فوق روان کننده و طرح اختلاطها، ۳۶ نمونه بتن با تعداد تکرار ۲ در هر آزمایش ساخته و با نمونه‌های آب و فوق روان کننده و بخش اول مقایسه گردید. در این آزمایش در مجموع ۹۶ نمونه بتن ساخته شده است.



شکل ۳-۱۴- نمایی از قالب استوانه‌ای

### ۹-۵-۳ - آزمایش طیف‌سنج فلورسانس پرتو ایکس XRF

به منظور تجزیه مواد معدنی خمیر سیمان از دستگاه تجزیه مواد معدنی مدل XRF 1800(Shimadzu- Japan) که در شکل ۳-۱۳ نشان داده شده است، استفاده شد. برای بررسی MNB در فرآیند هیدراتاسیون سیمان، آزمایش XRF طبق استاندارد ASTM E1621-13 به منظور تجزیه مواد معدنی سیمان در سن 7 روزه برای نمونه‌های مکعبی ۵۰ میلی‌متری خمیر سفت شده سیمان برای نسبت آب به سیمان 0.4 توسط دستگاه XRF 1800(Shimadzu- Japan) در آزمایشگاه تجزیه مواد معدنی دانشگاه صنعتی شاهرود ایران انجام شده است.



شکل ۳-۱۵- دستگاه طیف‌سنج فلورسانس پرتو ایکس (XRF)

### ۳-۵-۱۰ - آزمایش ملات منشوری تسریع شده

به منظور تعیین فعالیت قلیایی مصالح سنگی و تمایل سنگدانه ها به واکنش قلیایی- مصالح سنگی از تجهیزات زیر برای این آزمایش استفاده شده است.

۱- محلول یک نرمال سدیم هیدروکسید، ۲- قالب مکعب مستطیلی به ابعاد  $25*25*250$

mm

این آزمایش طبق استاندارد ASTM C 1260 برای نمونه‌های مکعب مستطیلی به ابعاد  $25*25*250$  میلی‌متری (شکل ۳-۱۷) به منظور بررسی واکنش قلیایی- مصالح سنگی ساخته شد. در این آزمایش تعداد ۱۲ نمونه به تکرار ۳ مرتبه برای هر آزمایش به ترتیب ملات با آب معمولی، ملات با آب حاوی MNB، ملات با آب و فوق روان کننده (0.9% وزن سیمان) و ملات با آب حاوی MNB و فوق روان کننده (0.9% وزن سیمان) ساخته شد. پس از نمونه‌گیری با آب ۲۳ درجه سانتی‌گراد، نمونه‌ها را در محلول سود نرمال (شکل ۳-۱۸) ۸۰ درجه سانتی‌گراد غوطه‌ور نگاه داشته شد. پس از ۲۴ ساعت، قرائت اولیه را یادداشت کرده و بعد از آن مقدار انبساط ایجاد شده را تا 16 روز قرائت می‌شود. طرح اختلاط

ملات برای نسبت آب به سیمان 0.47 و نسبت سیمان به سنگدانه 1 به 2.25 می‌باشد که در جدول ۳-۶ نشان داده شده است. تغییرات طول نمونه‌ها نسبت به حد مرزی مشخص شده در استاندارد بازه -0.1% 0.2% سنجیده می‌شود، که مضر بودن فعالیت قلیایی آن در جدول ۳-۷ نشان داده شده است.

جدول ۳-۶- طرح اختلاط ملات سیمان برای آزمایش ملات منشوری تسریع شده

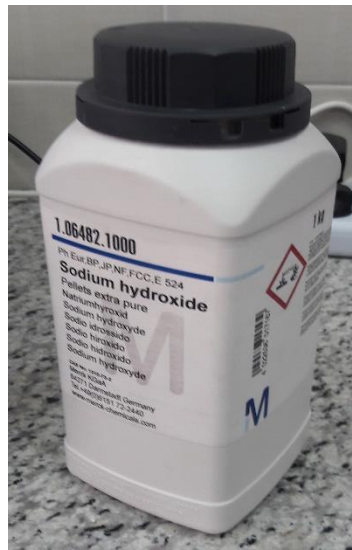
مقدار فوق روان کننده (gr)	درصد کاهش آب (%)	سیمان (gr)	آب (gr)	ماسه (gr)
0	0	440	206.8	990
$0.9\% \times 440 = 3.96$	22	343.2	161.304	1132.3

جدول ۳-۷- محدوده‌ی مجاز فعالیت قلیایی مصالح سنگی

درصد انبساط (%)	فعالیت قلیایی مصالح سنگی
<0.1%	بی‌ضرر
0.1%-0.2%	نیاز به اطلاعات دیگری از جمله آزمایش پتروگرافی دارد
>0.2%	مضر و خطرناک



شکل ۳-۱۶- نمایی از قالب 25\*25\*250 mm



شکل ۳-۱۷ - ماده‌ی سدیم هیدروکسید

### ۳-۶ - نحوه اختلاط و قالب‌گیری

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

با توجه به مقایسه‌ای بودن نتایج آزمایش‌ها و تأثیر دمای اولیه مصالح بر خواص بتن تولیدشده، 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 ۲ دقیقه کاملاً مخلوط گردید. پس از اطمینان از یکپارچه شدن ملات، از بتن آزمایش اسلامپ صورت گرفت. در ادامه بتن طی سه مرحله درون قالب ریخته و با ۲۵ ضربه میله مخصوص (به قطر ۱۶ میلی‌متر) در هر مرحله متراکم شد. قالب‌های پرشده به مدت ۳۰ ثانیه ویبره شد و سپس سطح آن‌ها صاف گردید. نمونه‌ها پس از گذشت ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و به مدت روزه مشخصه برای هر آزمایش درون حوضچه آب قرار گرفتند. که در شکل ۳-۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۸- قالب‌گیری و عمل‌آوری نمونه‌های بتن

### ۳-۷ - آزمایش‌های انجام‌شده روی آب معمولی و آب حاوی میکرو- نانوحباب‌های

هوا

#### ۳-۷-۱ - مشخصات اولیه

اندازه‌گیری خصوصیات اولیه آب میکرو- نانوحباب و آب معمولی و آب معمولی با فوق روان کننده و آب حاوی میکرو- نانوحباب و فوق روان کننده در ۳ غلظت (0.5%, 0.9%, 1.4%) مورد استفاده در آزمایش‌ها، از قبیل: دما، pH، کدورت و قابلیت هدایت الکتریکی در آزمایشگاه محیط زیست دانشگاه صنعتی شاهرود انجام گردید. دستگاه‌های مورد استفاده به ترتیب زیر است:

#### ۳-۷-۱-۱ - pH متر

دستگاه pH متر رومیزی ساخت کمپانی WTW-InoLab آلمان یک pH سنج بسیار ساده و پرتابل است. که در شکل ۳-۱۹ نشان داده شده است. با استفاده از pH متر می‌توان خاصیت اسیدی و بازی بودن محیط را تشخیص داد.





شکل ۳-۱۹- دستگاه pH متر

### ۳-۱-۷-۳ - هدایت سنج الکتریکی EC meter

دستگاهی که توانایی یک محلول آبی برای حمل جریان الکتریکی را اندازه گیری می کند. که این توانایی به نوع یون، تحرک و ظرفیت یون و درجه حرارت محلول بستگی دارد. هدایت الکترولیتی را برحسب  $\mu\text{S}/\text{cm}$  یا  $\text{mS}/\text{cm}$  (میکرو موس بر سانتی متر) اندازه می گیرند. هدایت الکتریکی معیاری از توان آب برای تعیین میزان رسانا بودن آن است. این دستگاه ساخت کمپانی WTW-InoLab آلمان می باشد. که در شکل ۳-۲۰ نشان داده شده است.



شکل ۳-۲۰- دستگاه هدایت سنج الکتریکی

### ۳-۱-۷-۳ - دستگاه کدورت سنج Turbidity meter

دستگاه کدورت سنج استفاده شده ساخت کمپانی Lavibond کشور آلمان می باشد که در شکل

۲-۲۱ نشان داده شده است. کدورت سنجی آنالیزی است که به مطالعه خواص اپتیکی بر پایه پخش نور می‌پردازد. علت پخش نور در آب وجود مواد معلق مثل مواد کلئیدی، مواد آلی، میکرو ارگانیسم‌ها و حتی مولکول‌های درشت می‌باشد. با استفاده از این دستگاه می‌توان کدر بودن محلول را اندازه‌گیری کرد.



شکل ۳-۲۱- دستگاه کدورت سنج

### ۲-۷-۲ - اندازه‌گیری ابعاد و توزیع میکرو- نانوحباب‌ها

روشی که در این تحقیق از آن استفاده شده است، روش پراش نور دینامیکی<sup>۱۴</sup> می‌باشد که برای اندازه‌گیری اندازه ذرات در محیط مایع مورد استفاده قرار می‌گیرد. در یک محلول، برخورد ذرات و مولکول‌های کوچک با مولکول‌های حلال، منجر به حرکت تصادفی مولکول‌ها می‌شود. در عمل ذرات در مایع هیچ‌گاه ساکن نبوده و دائماً در حرکت هستند. یکی از ویژگی‌های این حرکت آن است که ذرات کوچک، سریع و ذرات بزرگ، آهسته حرکت می‌کنند و در یک دمای ثابت ذرات بزرگ‌تر در مقایسه با ذرات کوچک‌تر، حرکت بسیار آهسته‌تری دارند و زمانی که ذرات به‌طور ثابت در حرکت باشند، به نظر می‌رسد که الگوی ایجادشده به‌وسیله‌ی آن‌ها نیز حرکت می‌کند. [ حسنی، ۱۳۸۷ ]

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

<sup>14</sup> Dynamic light scattering

محدوده ابعادی بین ۰,۶ نانو تا ۸ میکرو قابل استفاده می‌باشد. جهت اندازه‌گیری ابعاد حباب‌ها، از دو روش پاد-لاپلاس<sup>۱۵</sup> و کومولانت<sup>۱۶</sup> استفاده می‌کنند؛ که نتایج روش کومولانت دقیق‌تر می‌باشد. در روش کومولانت امکان اندازه‌گیری پارامتری به نام میانگین قطر هیدرودینامیکی<sup>۱۷</sup> فراهم می‌شود. که از طریق شدت نوسان نور پخش شده با استفاده از یک آشکارساز مناسب قابل اندازه‌گیری 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 اندازه‌گیری می‌شود، قطر هیدرودینامیکی نمونه نامیده شده و نشان‌دهنده‌ی چگونگی نفوذ ذرات در سیال است. [ حسنی، ۱۳۸۷ ]

تعیین ابعاد نانو میکرو حباب‌ها، روی نمونه‌ی ۱ روزه و با استفاده از دستگاه Nano Particle Size Analazer انجام شد. دستگاه مزبور با روش پراش نور دینامیکی کار می‌کند و قادر به اندازه‌گیری ذرات در محدوده ابعادی ۱ نانومتر تا ۶ میکرون است. نتایج به روش کومولانت و بر اساس ۳ پارامتر حجم، تعداد و شدت نمونه‌ها به دست آمد. اندازه‌گیری‌ها به صورت نمودار توزیع آماری قطر نانوحباب‌ها بیان می‌شوند. و ملاک، مقدار متوسط ابعاد نانو میکرو حباب‌ها<sup>۱۸</sup> است.

### ۳-۷-۳ - بررسی پایداری میکرو-نانوحباب‌ها

پایداری میکرو-نانوحباب‌ها یکی از پارامترهای مهم می‌باشد، به‌خصوص که در مباحث عملی مانند ساخت بتن ممکن است به دلایلی (مثل نقص فنی در تجهیزات) وقفه‌ای در پروسه‌ی تولید رخ بدهد. پایداری و حفظ خواص میکرو-نانوحباب‌های هوا در آب بسیار حائز اهمیت است. مقادیر زتا پتانسیل سطحی میکرو-نانوحباب‌ها با استفاده از یک زتا پتانسیل متر Zeta compact cad Instrument اندازه‌گیری

---

<sup>15</sup> Pade-Laplace

<sup>16</sup> Cumulants

<sup>17</sup> Zaverage

<sup>18</sup> Dmean number

شدند.

فصل چهارم

# تحلیل و بررسی نتایج

## آزمایش‌ها

#### ۱-۴ - مقدمه

در این فصل ابتدا به نتایج حاصل از آزمایش‌ها روی آب حاوی MNB از جمله پایداری میکرو-نانوحباب‌های هوا، مشخصات اولیه و ابعاد و توزیع میکرو-نانوحباب هوا در آب پرداخته شده است. سپس به نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها بر روی سیمان از جمله زمان گیرش سیمان، جریان ملات سیمان، آزمایش ملات منشوری تسریع شده و مقاومت فشاری ملات پرداخته شد. و بعد از آن به تحلیل و تفسیر برای نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها انجام شده بر بتن از جمله اسلامپ، مقاومت فشاری و مقاومت کششی پرداخته می‌شود.

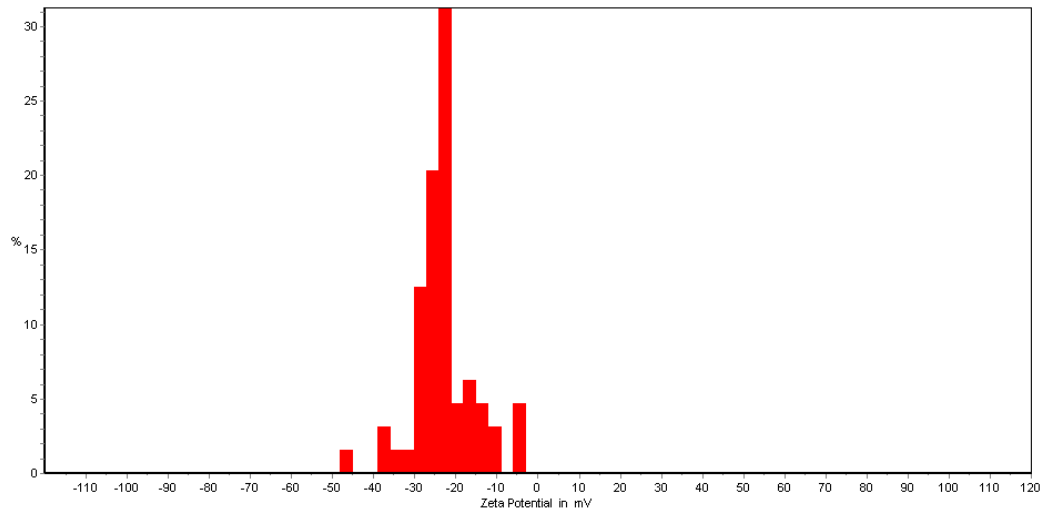
#### ۲-۴ - نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها روی آب حاوی میکرو-نانوحباب و آب

##### معمولی

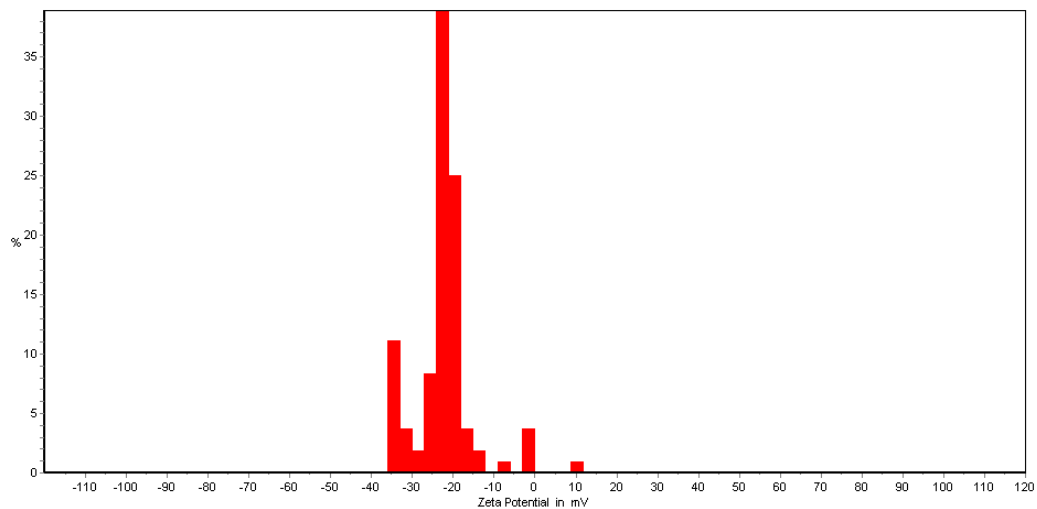
#### ۱-۲-۴ - پایداری میکرو-نانوحباب‌های هوا

آزمایش زتا پتانسیل با دستگاه Zeta Compact Cad Instrument انجام شد. شکل ۱-۴ تغییرات زتا پتانسیل نمونه ۱ روزهی آب حاوی میکرو-نانوحباب را نشان می‌دهد و همین‌طور زتا پتانسیل نمونهی ۱ روزه آب حاوی MNB و 0.9 درصد فوق روان کننده در شکل ۲-۴ نشان داده شده است (نتایج کامل در پیوست الف موجود است).

بازهی زتا پتانسیل برای میکرو-نانوحباب تقریباً بین 15 تا 30 میلی ولت است و میانگین زتا پتانسیل نمونهی آب حاوی میکرو-نانوحباب  $28.35\text{mV}$  می‌باشد که طبق جدول ۱-۲ اگرچه در بازه ناپایدار قرار دارد ولی طبق نمودار ذرات بزرگ‌تر از  $30\text{-}$  در نمودار، می‌توان گفت که میکرو-نانوحباب‌های موجود در آب پایداری چند روزه را تجربه می‌کنند و مادام العمر نیستند.



شکل ۱-۴- نمودار تغییرات زتا پتانسیل آب حاوی MNB



شکل ۲-۴- نمودار تغییرات زتا پتانسیل برای آب حاوی MNB و فوق روان کننده

نتایج نشان می‌دهد که بازه‌ی زتا پتانسیل برای آب حاوی MNB و فوق روان کننده بین 12 و 38

میلی ولت است و میانگین آن  $-22.21\text{mV}$  می‌باشد که با توجه نمودار ذرات بزرگ‌تر از  $-30$  پایداری چند

روزه را تجربه می‌کنند و مادام‌العمر نیستند.

با توجه به مقدار منفی و تعاریف زتا پتانسیل می‌توان نتیجه گرفت که در پوسته‌ی حباب‌های تشکیل شده در آب بارهای منفی وجود دارد. هم‌چنین با اضافه کردن فوق روان کننده به آب حاوی MNB این بار منفی حفظ شده و هم‌چنان در پوسته‌ی خود بارهای منفی دارند.

#### ۴-۲-۲- مشخصات اولیه

جدول ۴-۱ مقادیر مشخصات اولیه اندازه‌گیری شده از قبیل دما، pH، هدایت الکتریکی و کدورت برای آب حاوی میکرو-نانوحباب و آب را نشان می‌دهد. و همین‌طور جدول ۴-۲ مشخصات اولیه برای آب حاوی MNB و آب در حضور ۳ غلظت از فوق روان کننده را نشان می‌دهد. 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 رابطه‌ی مستقیم دارد و با افزایش غلظت فوق روان کننده، مقدار  $H_3O^+$  نیز افزایش می‌یابد [Dhir, 1996]. 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.



جدول ۴-۱- مشخصات اولیه آب میکرو- نانوحباب

پارامتر	آب حاوی MNB	آب معمولی
دما (°C)	25.5	25.1
pH	8.34	8.17
قابلیت هدایت الکتریکی (μS/cm)	1065	530
کدورت (ntu)	29.12	1.54

جدول ۴-۲- مشخصات آب حاوی MNB و آب معمولی در حضور ۳ غلظت فوق روان کننده

ماده	دما (°C)	pH	قابلیت هدایت الکتریکی (μS/cm)	کدورت (ntu)
آب + 0.5% SP	26	6.3	1035	10
MNB + 0.5% SP	26.1	9.33	1049	8
آب + 0.9% SP	26.4	6.21	1045	11
MNB + 0.9% SP	26.3	9.85	1056	9.33
آب + 1.4% SP	26.3	6.13	1059	12.31
MNB + 1.4% SP	26.4	10.2	1066	11.77

SP: فوق روان کننده، MNB: آب حاوی میکرو- نانوحباب هوا

#### ۴-۲-۳- ابعاد و توزیع میکرو- نانوحباب‌های هوا در آب

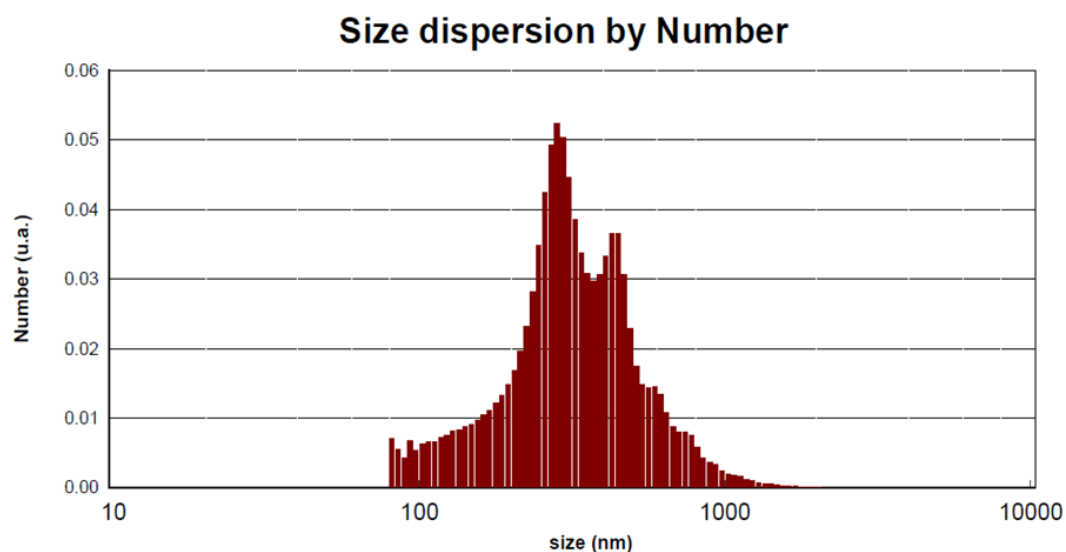
آزمایش اندازه‌گیری ابعاد میکرو- نانوحباب‌های هوا روی نمونه‌ی ۱ روزه و توسط دستگاه Nano

Particle Size Analyzer انجام پذیرفت. این آزمایش به روش کومولانت انجام شد. شکل ۴-۳ نمودار

اندازه-تعداد به دست آمد. جدول ۴-۳ مشخصات بیشتر نتایج را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۴- مشخصات نمونه میکرو- نانوحباب

پارامتر	مقدار (nm)
Zaverage <sup>۱۹</sup>	592.18
Dmean Number <sup>۲۰</sup>	349.84
Dv50 <sup>۲۱</sup>	676.26



شکل ۳-۴- نمودار اندازه-تعداد میکرو- نانوحباب‌های هوا در آب

همان‌طور که نمودار نشان می‌دهد اندازه‌ی کوچک‌ترین حباب‌ها تقریباً به میزان ۸۰ nm و بزرگ‌ترین آن‌ها تقریباً ۱۱۰۰ nm می‌باشد (نتایج کامل آزمایش همراه با نمودارهای مربوطه در پیوست

<sup>۱۹</sup> میانگین قطر هیدرودینامیکی

<sup>۲۰</sup> قطر متوسط نانومیکرو حباب‌ها

<sup>۲۱</sup> قطری که ۵۰ درصد ذرات از آن ریز تر است.

الف موجود است).

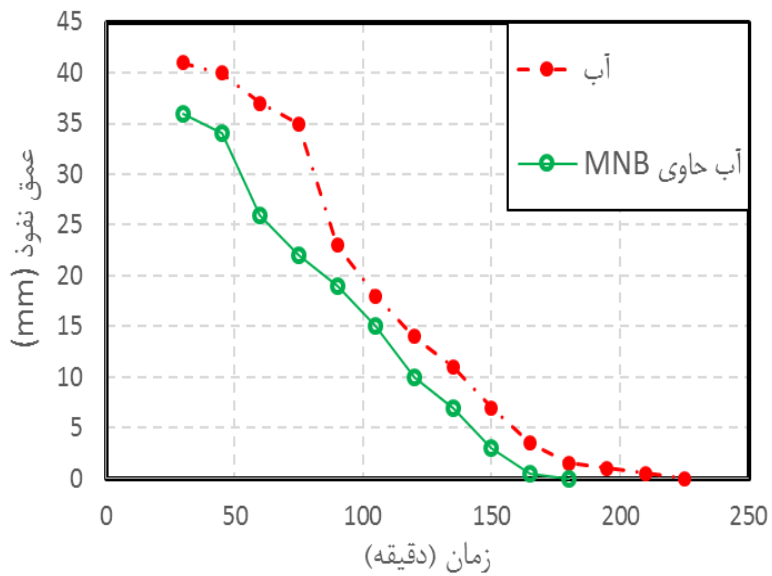
#### ۳-۴ - آزمایشات سیمان

##### ۱-۳-۴ - آزمایش زمان گیرش سیمان

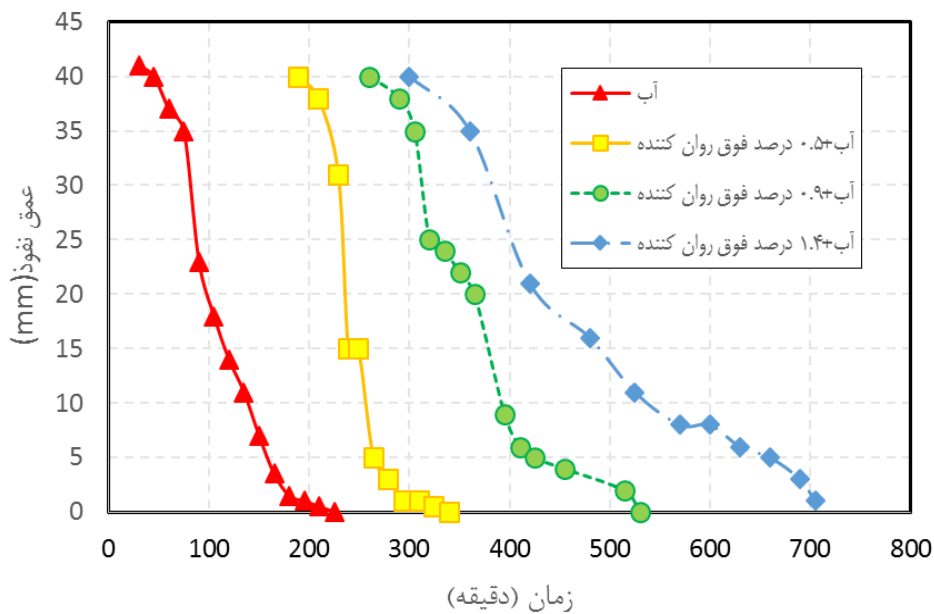
زمان گیرش اولیه خمیر سیمان حاوی میناب حدود ۳۰ دقیقه و زمان گیرش ثانویه خمیر سیمان حاوی میناب حدود ۴۵ دقیقه نسبت به خمیر سیمان حاوی آب معمولی، کاهش یافت مقایسه زمان گیرش سیمان در شکل ۴-۴ نشان داده شده است. با اضافه کردن فوق روان کننده زمان گیرش اولیه و ثانویه خمیر سیمان با آب به ترتیب به طور متوسط 288% و 138% افزایش یافت و زمان گیرش اولیه و ثانویه خمیر سیمان حاوی میناب به ترتیب به طور متوسط 555% و 207% افزایش یافت. مقایسه زمان گیرش سیمان با آب معمولی در حضور درصدهای مختلف فوق روان کننده در شکل ۴-۵ و مقایسه زمان گیرش سیمان حاوی میناب در حضور درصدهای مختلف فوق روان کننده در شکل ۴-۶ نشان داده شده است. در مقایسه میناب و آب در حضور درصدهای مختلف فوق روان کننده می توان گفت در درصدهای 0.5 و 0.9 ابتدا اثر زود گیری میناب عمل می کند و باعث کاهش زمان گیرش سیمان می گردد ولی با گذشت زمان این اثر زود گیری از بین رفته و اثر کندگیری فوق روان کننده جایگزین آن می شود. 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 زمان گیرش سیمان با آب و میناب در حضور درصدهای مختلف فوق روان کننده در شکل ۴-۷ نشان داده شده است.

مطالعه اخیر در زمینه کاربرد میکرو-نانوحباب در بتن نشان می دهد که زمان گیرش اولیه و ثانویه

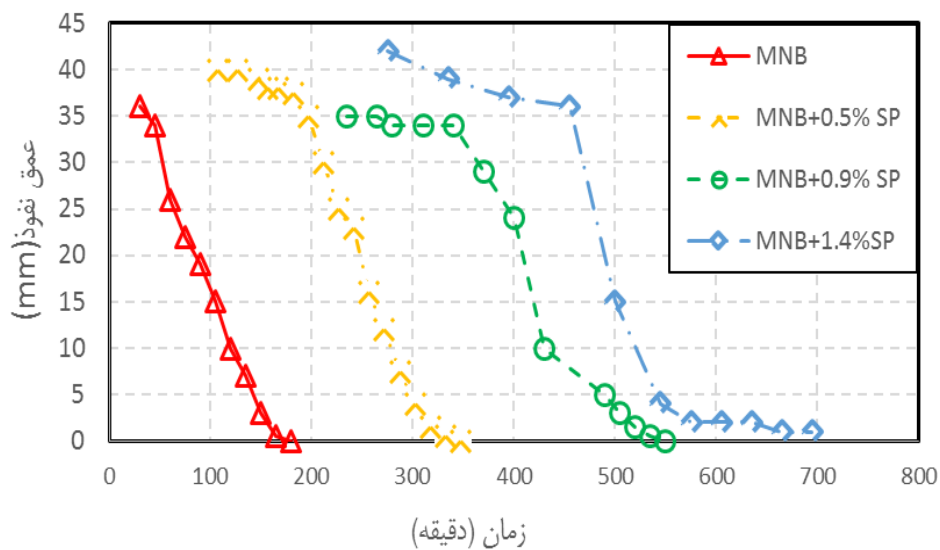
خمیر سیمان حاوی MNB نسبت به آب معمولی کاهش پیدا می کند [عارفی، ۱۳۹۳].



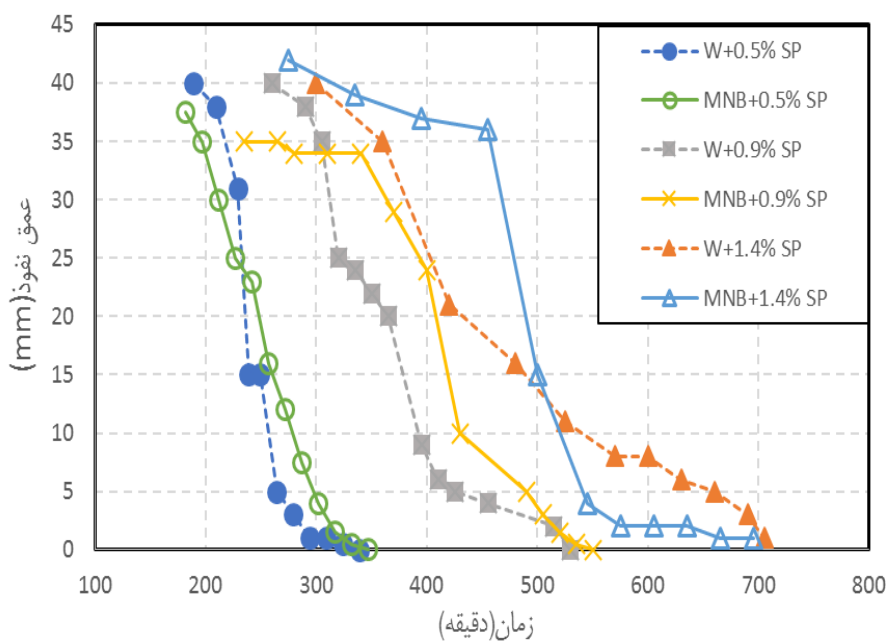
شکل ۴-۴- مقایسه زمان گیرش سیمان حاوی میناب و آب معمولی



شکل ۴-۵- مقایسه زمان گیرش سیمان با آب معمولی در حضور درصد‌های مختلف فوق روان کننده



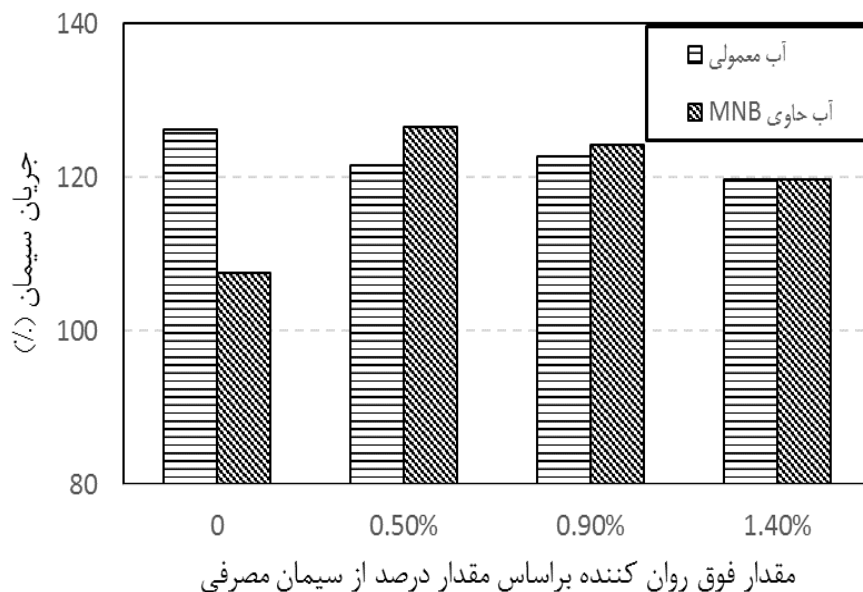
شکل ۴-۶- مقایسه زمان گیرش با میناب در حضور درصد‌های مختلف فوق روان کننده



شکل ۴-۷- مقایسه زمان گیرش سیمان با آب و میناب در حضور درصد‌های مختلف فوق روان کننده

#### ۴-۳-۲- آزمایش جریان ملات سیمان

با توجه استاندارد ملی ایران ISIRI 2930 برای کمترین درصد استفاده شده از فوق روان کننده، ۱۲ درصد کاهش آب در نظر گرفته شد و بقیه درصدهای کاهش آب با آزمون و خطا به دست آمد که برای صحت سنجی آن، از آزمایش جریان ملات سیمان هیدرولیکی با توجه به استاندارد ASTM C1437 استفاده شد. که نتایج نشان می‌دهد این فرض تقریباً درست و قابل قبول است زیرا جریان سیمان در حضور فوق روان کننده تقریباً برابر جریان سیمان بدون فوق روان کننده است. با توجه به زود گیر شدن سیمان انتظار می‌رود آب حاوی MNB جریان ملات سیمان را کاهش دهد که نتایج به دست آمده از آزمایش جریان ملات سیمان، نشان می‌دهد آب حاوی MNB جریان ملات سیمان را کاهش داد از آنجایی که جریان ملات سیمان بیانگر کارایی ملات سیمان می‌باشد و کاهش آن، منجر به کاهش کارایی ملات سیمان می‌شود 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 ۴-۸ نشان داده شده است.

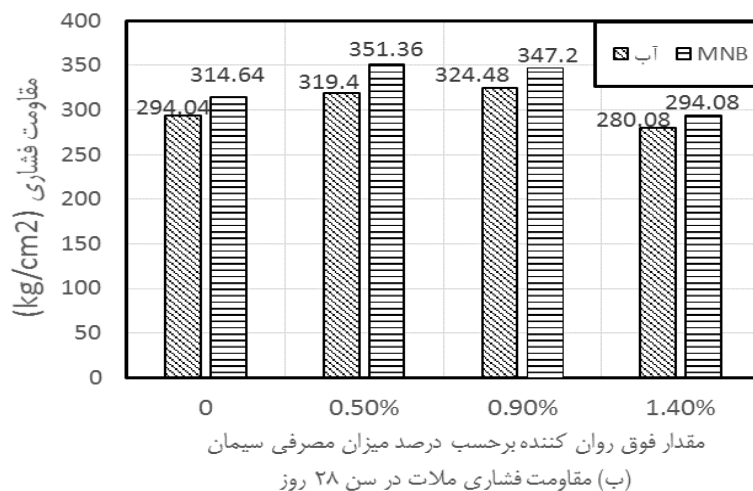
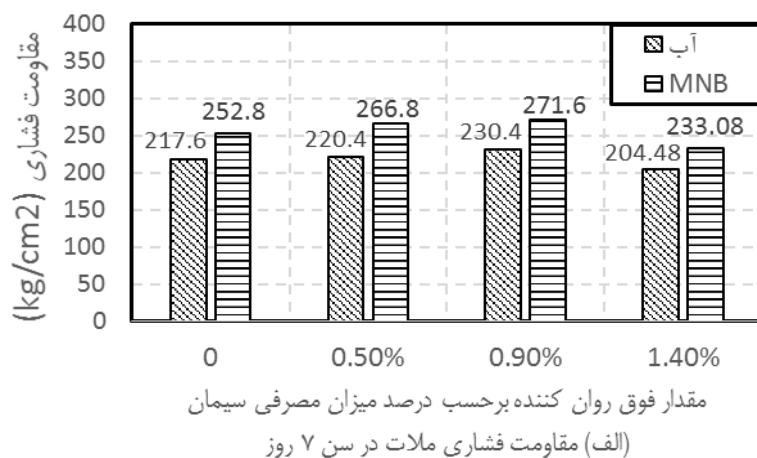


شکل ۴-۸- صحت سنجی مقدار آب کاهش داده شده برای فوق روان کننده و جریان ملات سیمان

#### ۳-۳-۴ - آزمایش مقاومت فشاری ملات سیمان

با توجه به طرح مخلوط ملات سیمان برای آزمایش مقاومت فشاری ملات سیمان ارائه شده در جدول ۳-۵ 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 ۴-۹ 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. 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 ۰.۵٪ فوق روان کننده با افزایش ۲۱ درصدی در سن ۷ روزه و افزایش ۱۰ درصدی در سن ۲۸ مشاهده شد. در ۰.۹٪ 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 ۱.۴٪ 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.



شکل ۴-۹- 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



#### ۴-۳-۴- آزمایش XRF

نتایج در جدول ۴-۴ نشان می‌دهد میکرو-نانوحباب باعث افزایش اکسیدهای  $\text{SiO}_2$ ،  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ،  $\text{MgO}$  و  $\text{TiO}_2$  و کاهش اکسیدهای  $\text{CaO}$ ،  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  شده است و همین‌طور میزان مواد فرار (LOI) را کاهش داده است. وقتی سیمان در آب ریخته می‌شود برخی از یون‌های سیمان مانند پتاسیم، منیزیم، آلومینیوم و تیتانیوم در آب حل می‌شوند اما وقتی در آب حاوی MNB ریخته می‌شود این یون‌ها اکسید شده و به بخش مایع بر می‌گردند و در نتیجه مشاهده می‌شود اکسیدهای  $\text{TiO}_2$ ،  $\text{K}_2\text{O}$  و ... در خمیر سیمان حاوی MNB بیشتر می‌شود.

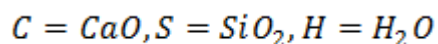
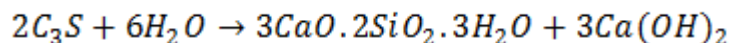
جدول ۴-۴- نتایج آنالیز XRF از خمیر سیمان حاوی MNB و آب معمولی

اکسیدهای سیمان (درصد وزنی %)										
آب موجود در خمیر سیمان	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{SO}_3$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{TiO}_2$	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 [Ushikubo, 2010]؛ از آنجاکه این بار منفی اضافی منجر به افزایش توان حلالیت مواد قطبی در آب خواهد شد، [Tsuge, 2014] لذا انتظار می‌رود حلالیت  $\text{CaO}$  نیز در آب حاوی MNB افزایش یابد. بنابراین در فاز آلیت (اولین واکنش هیدراتاسیون سیمان که در رابطه ی ۴-۱ برای آب معمولی نشان داده شده است) مقدار  $\text{CaO}$  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 SiO<sub>2</sub> 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 بتن 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 بتن تغییری آن‌چنانی نکند.

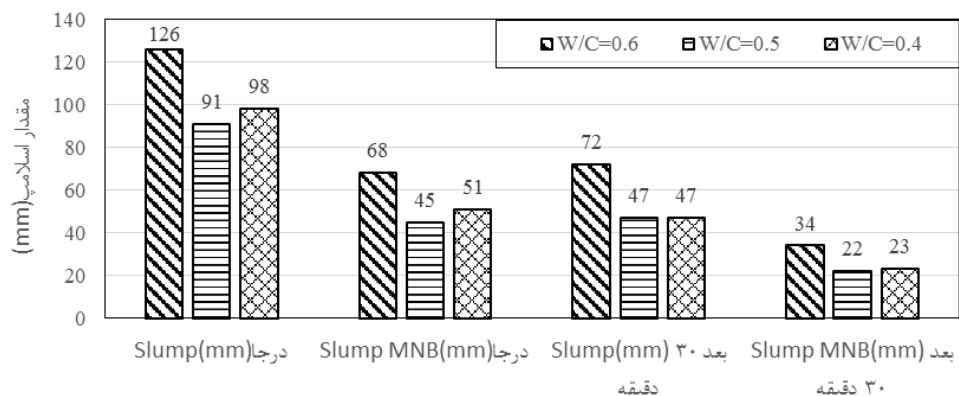
(۱-۴)



#### ۴-۴ - آزمایش‌های بتن تازه و سخت شده

##### ۱-۴-۴ - آزمایش اسلامپ

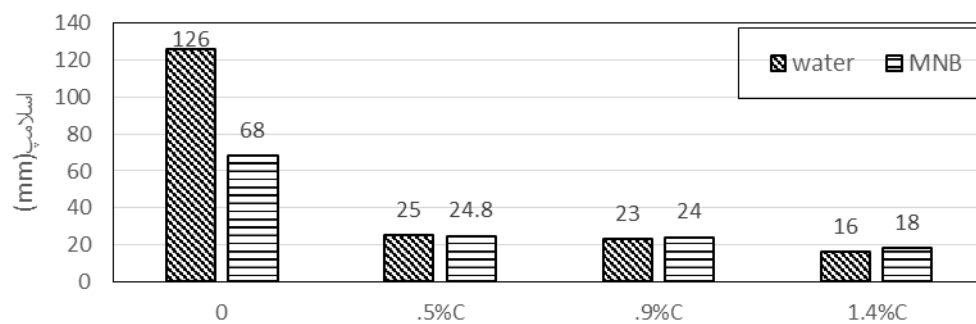
یکی از مشخصات بتن تازه اسلامپ یا کارایی آن می‌باشد که معرف روانی آن است. نتایج نشان می‌دهد که میکرو-نانوحباب طبق انتظار، با توجه به این که جریان ملات را کاهش داد، کارایی بتن را نیز کاهش دهد که نتایج نشان می‌دهد اسلامپ بتن در حضور MNB کاهش پیدا کرده و همین‌طور با گذشت زمان عملکرد زود گیری آن‌ها حفظ شده و اسلامپ بعد از ۳۰ دقیقه ساخت بتن نیز کاهش پیدا کرد. آب حاوی میکرو-نانوحباب‌ها برخلاف عملکرد حباب‌های معمول در ساخت بتن حباب‌دار که با کمک مواد شیمیایی مضاف ساخته می‌شوند عمل می‌کند [Kosmatka et al, 2003]. شکل ۴-۱۰ نتایج اسلامپ بتن حاوی میناب و بتن با آب معمولی در حالت درجا و در حالت ۳۰ دقیقه بعد از ساخت بتن در نسبت آب به سیمان‌های مختلف نشان می‌دهد. میانگین تکرار آزمایش‌ها در نتایج آورده شده است.



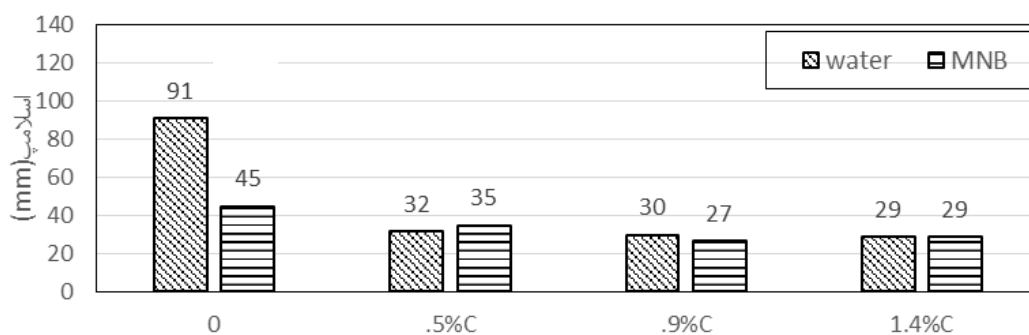
شکل ۴-۱۰- اسلالمپ بتن حاوی میکرو- نانوحباب و بتن معمولی در حالت درجا و در حالت ۳۰ دقیقه بعد از ساخت بتن در نسبت آب به سیمان مختلف

با اضافه کردن درصد های مختلف فوق روان کننده (0.5%, 0.9%, 1.4%) در هر نسبت آب به

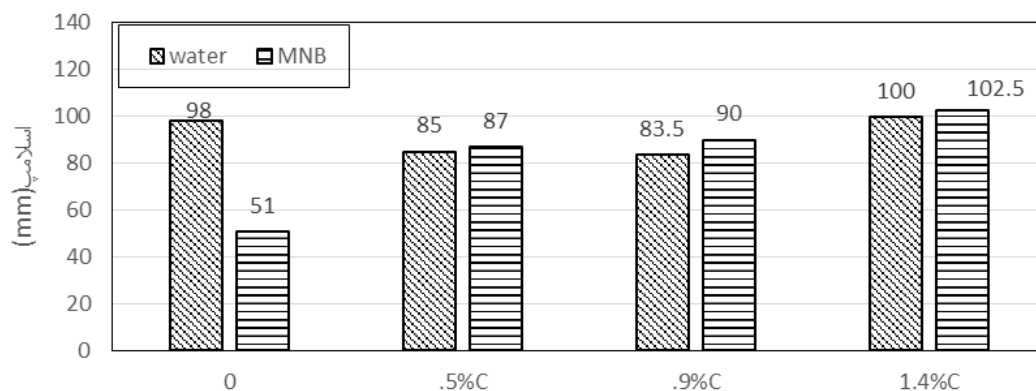
سیمان نتایج نشان می دهد فوق روان کننده، اسلالمپ بتن حاوی MNB نسبت به بتن با آب حاوی MNB بدون فوق روان کننده را افزایش داده است. با اضافه کردن فوق روان کننده در نسبت های آب به سیمان 0.6 و 0.5 به دلیل کاهش سیمان، افزایش مصالح سنگی و عدم چسبندگی بین سیمان و مصالح کارایی بتن نامطلوب است ولی در نسبت آب به سیمان 0.4 به دلیل چسبندگی مناسب سیمان و مصالح سنگی کارایی بتن مطلوب می باشد که به طور متوسط کارایی بتن 50% افزایش یافت. شکل ۴-۱۱ نتایج اسلالمپ بتن حاوی MNB و آب در حضور درصد های مختلف فوق روان کننده نشان می دهد.



مقدار های فوق روان کننده برحسب درصد میزان مصرفی سیمان  
(الف)



مقدار های فوق روان کننده برحسب درصد میزان مصرفی سیمان  
(ب)



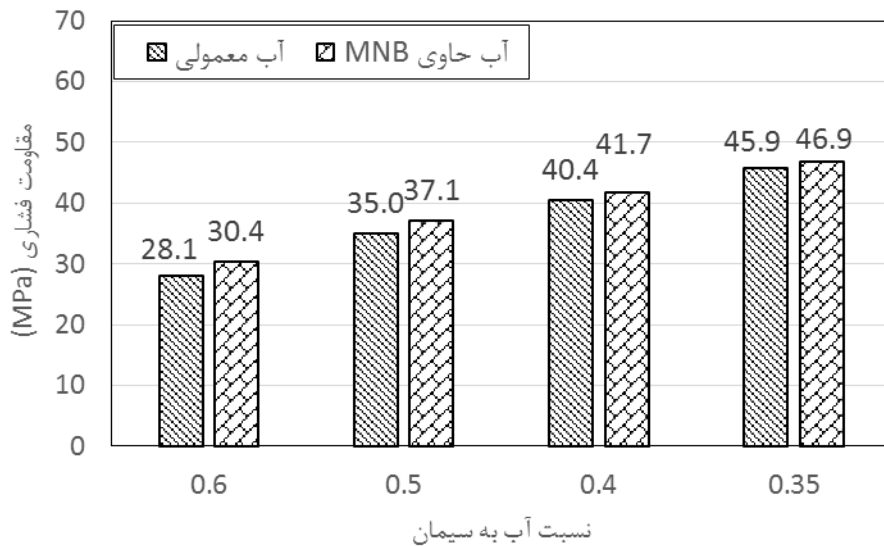
مقدار های فوق روان کننده برحسب درصد میزان مصرفی سیمان  
(ج)

شکل ۴-۱۱- نتایج اسلامپ در حضور درصدهای مختلف فوق روان کننده در نسبت آب به سیمان های

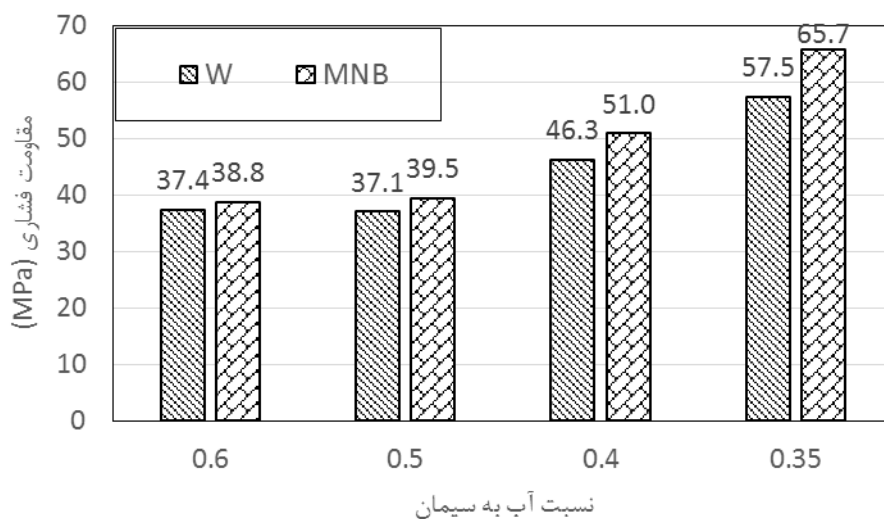
(الف)  $W/C=0.6$ ، (ب)  $W/C=0.5$ ، (ج)  $W/C=0.4$

#### ۲-۴-۴ - آزمایش مقاومت فشاری بتن

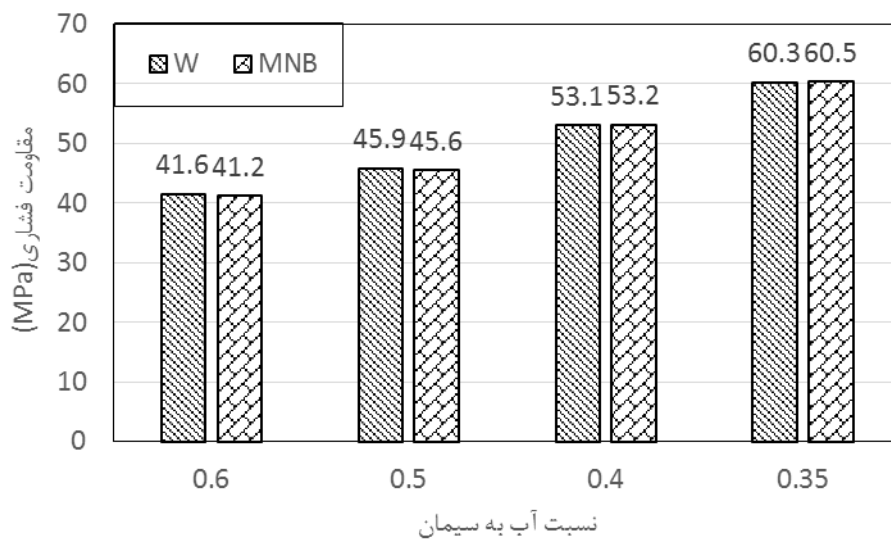
در بخش اول به بررسی آزمایش مقاومت فشاری برای بتن حاوی آب MNB نسبت به بتن با آب معمولی پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقاومت فشاری بتن حاوی MNB با توجه به زود گیر کنندگی میکرو-نانوحباب بر روی بتن و کاهش کارایی بتن، در سنین ۷ و ۲۸ روزه‌ی نمونه‌ها، با توجه به مقدار نسبت آب به سیمان افزایش داشته است ولی به مرور زمان خاصیت زود گیری MNB از بین رفته و در سن ۹۰ روزه تغییرات مقاومتی مشهود نمی‌باشد. شکل ۴-۱۲، شکل ۴-۱۳، شکل ۴-۱۴ مقاومت فشاری بتن حاوی MNB نسبت به بتن با آب معمولی در نسبت آب به سیمان‌های مختلف به ترتیب در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۲ - مقاومت فشاری ۷ روزه بتن حاوی MNB و بتن معمولی



شکل ۴-۱۳- مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن حاوی MNB و بتن معمولی

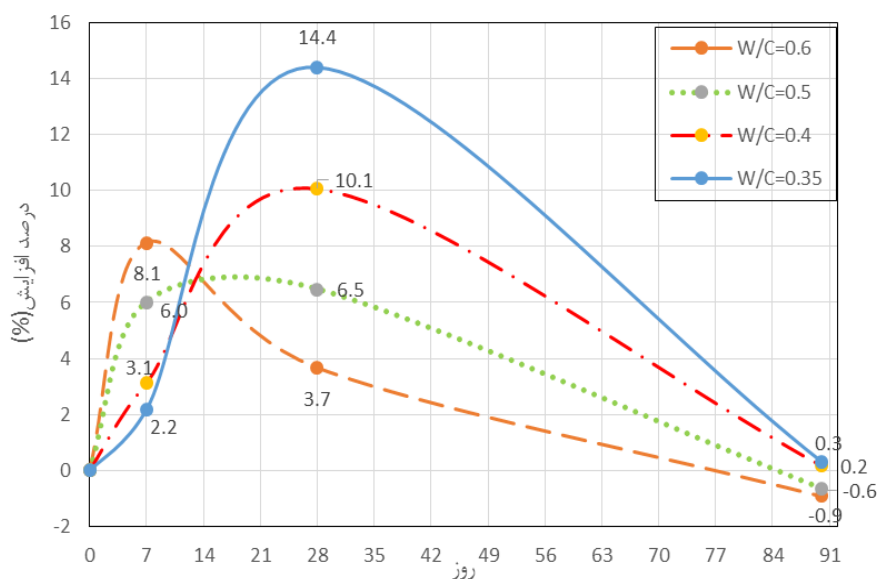


شکل ۴-۱۴- مقاومت فشاری ۹۰ روزه بتن حاوی MNB و بتن معمولی

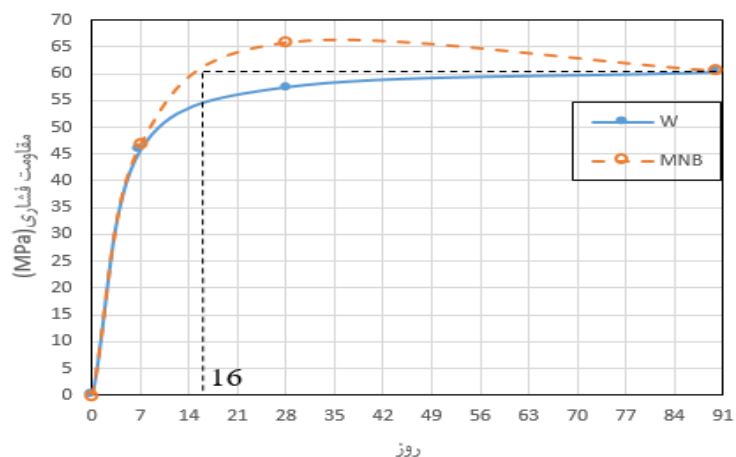
درصد افزایش مقاومت فشاری بتن حاوی MNB نسبت به بتن با آب معمولی در سنین ۷، ۲۸ و

۹۰ روزه‌ی نمونه‌ها، از نمودارهای مقاومت فشاری نشان می‌دهد که این افزایش متناسب با مقدار سیمان

است که هرچقدر مقدار سیمان کمتر (نسبت آب به سیمان بیشتر) باشد مقاومت فشاری در سن ۷ روزه، بیشتر است و با افزایش مقدار سیمان (نسبت آب به سیمان کمتر)، این درصد افزایش در سن ۷ روزه کمتر شده اما در سن ۲۸ روزه بیشترین درصد افزایش را کسب می‌کند. اما در مقدار سیمان کم (نسبت آب به سیمان بیشتر) درصد افزایش مقاومت فشاری بتن حاوی آب MNB نسبت به بتن معمولی، در سن ۲۸ روزه، از تمام درصدهای مشابه خود در همان روزه کمتر مشاهده شد. با مرور زمان اثر میکرو-نانوحباب در بتن از بین رفته و در سن ۹۰ روزه درصد افزایش ناچیز است. که در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است. بر اساس این شکل می‌توان بیان کرد که در سنین اولیه (۷ روزه)، در  $W/C=0.6$ ، نمونه ی بتن حاوی آب MNB بیشترین درصد افزایش مقاومت فشاری را دارد که با کاهش نسبت آب به سیمان (افزایش میزان سیمان) این درصد افزایش، کمتر می‌شود و در مقابل، در سن ۲۸ روزه، در درصد  $W/C=0.35$ ، نمونه ی بتن حاوی آب MNB، بیشترین درصد افزایش مقاومت فشاری را کسب کرد که با افزایش نسبت آب به سیمان (کاهش میزان سیمان) این درصد افزایش، کاهش می‌یابد ولی در نهایت در سن ۹۰ روزه، در تمامی درصدهای آب به سیمان، مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی MNB مانند مقاومت فشاری نمونه‌های شاهد است. نتایج بدین معناست که در  $W/C=0.6$  چون نانوحباب‌ها توانایی احیای تمام سیمان را در واکنش هیدراتاسیون دارند و بیشترین فعالیت تسریع بخشی خود را در سنین اولیه از خود نشان می‌دهند و تمام پتانسیل خود را برای شتاب دادن به فرآیند گیرش انجام می‌دهند که منجر به افزایش مقاومت 8 درصدی می‌شوند. حال هنگامی که میزان سیمان بیشتر می‌شود نانوحباب‌ها تمامی سیمان را در سنین اولیه احیا نمی‌کنند و به مرور در سنین بالاتر (۲۸ روزه) به کمک خاصیت پایداری که دارند، تماماً با سیمان وارد واکنش می‌شوند و منجر به افزایش مقاومت فشاری 14.4% می‌شوند. در واقع نانوحباب با نشان دادن رفتاری کاتالیزوری، نقش یک تسریع کننده فرآیند گیرش بتن را دارد که منجر به زود گیر شدن بتن می‌شود.



شکل ۴-۱۵- تغییرات درصد افزایش مقاومت فشاری بتن حاوی MNB نسبت به آب معمولی با افزایش سن بتن خاصیت زود گیر کنندگی میکرو- نانوحباب‌ها بر روی بتن نشان می‌دهد، که می‌توان در نسبت آب به سیمان‌های متفاوت مقاومت نهایی بتن با آب معمولی را در سن پایین‌تری در بتن آب حاوی MNB کسب کرد. به‌عنوان مثال در نسبت آب به سیمان 0.35، مقاومت نهایی ۹۰ روزه، بتن معمولی را می‌توان در ۱۶ روزگی بتن حاوی MNB کسب کرد. شکل ۴-۱۶ روند کسب مقاومت فشاری بتن حاوی MNB و بتن معمولی در نسبت آب به سیمان 0.35 نشان می‌دهد.





شکل ۴-۱۶- روند کسب مقاومت بتن حاوی MNB و بتن معمولی در نسبت آب به سیمان 0.35

در بخش دوم تأثیر همزمان بتن حاوی MNB در حضور درصدهای مختلف فوق روان کننده

نسبت به بتن با آب معمولی و فوق روان کننده بررسی شد سپس با بخش اول مقایسه گردید.

نتایج مقاومت فشاری بتن حاوی MNB در حضور فوق روان کننده نشان می‌دهد که در

غلظت‌های 0.5% و 0.9% فوق روان کننده در سن ۷ روزه‌ی نمونه‌ها، افزایش مقاومت فشاری نسبت به

بتن معمولی و فوق روان کننده مشاهده شد. سپس به مرور زمان در سن ۲۸ و ۹۰ روز، کاهش مقاومت

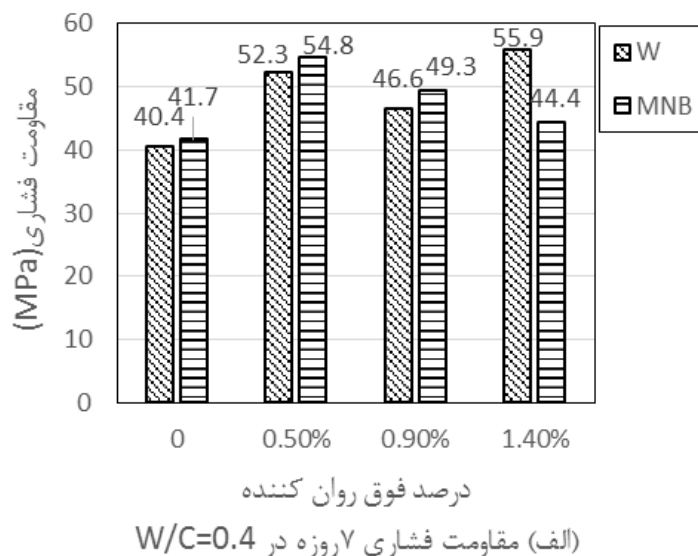
فشاری نسبت به بتن معمولی و فوق روان کننده مشاهده گردید در صورتی که مقاومت فشاری بتن حاوی

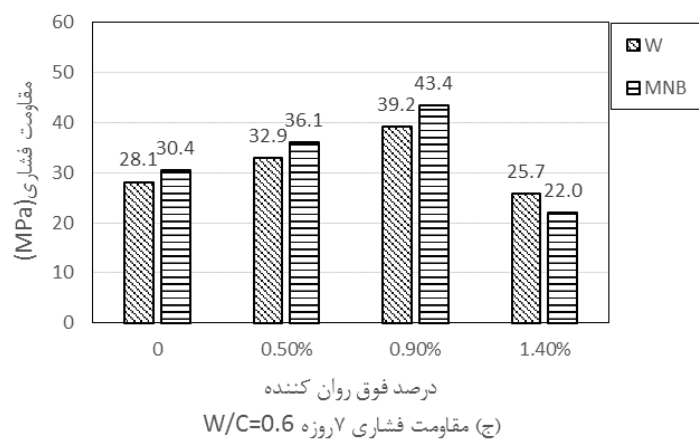
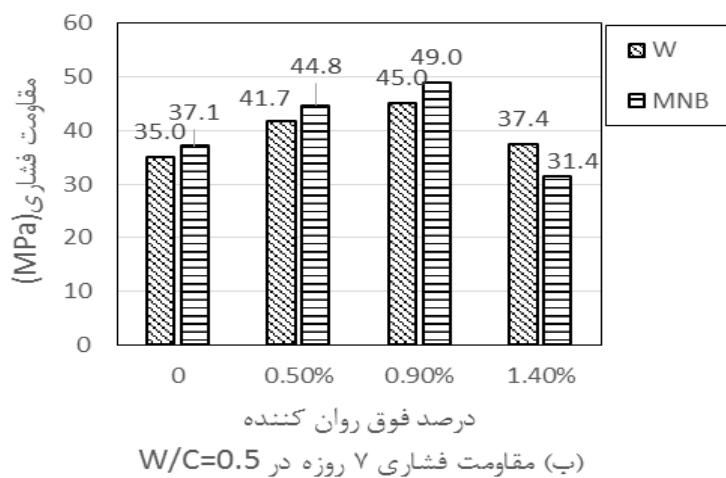
MNB در غلظت 1.4% فوق روان کننده در سن ۲۸، ۷ و ۹۰ روز، کاهش مقاومت فشاری نسبت به بتن با

آب و فوق روان کننده مشاهده شد. در شکل ۴-۱۷، شکل ۴-۱۸ و شکل ۴-۱۹ مقایسه‌ی مقاومت فشاری

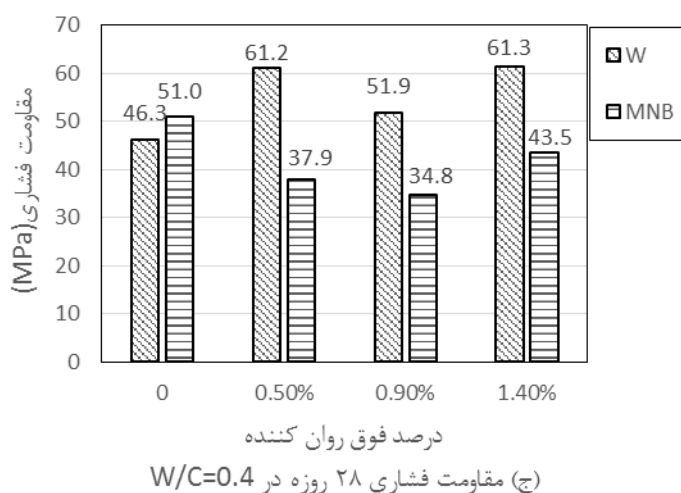
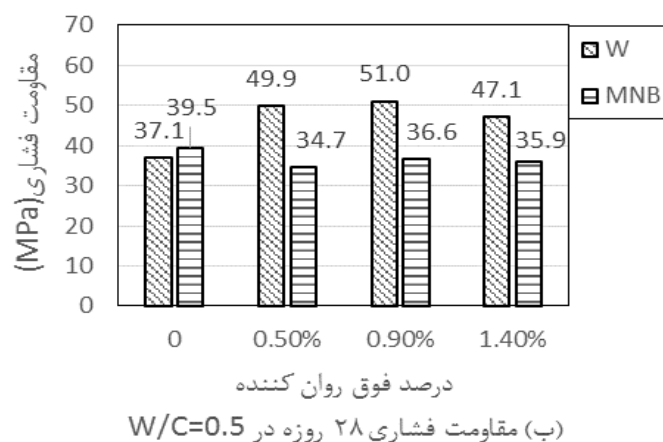
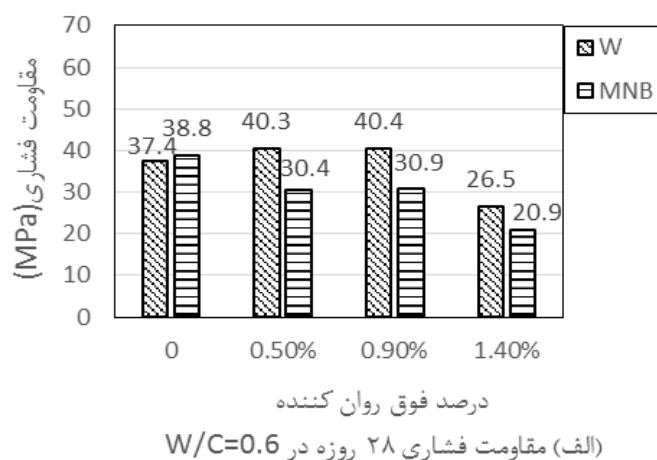
بتن حاوی MNB و آب در حضور درصدهای مختلف فوق روان کننده برای نسبت‌های مختلف آب به

سیمان (0.4, 0.5, 0.6) نشان داده شده است.

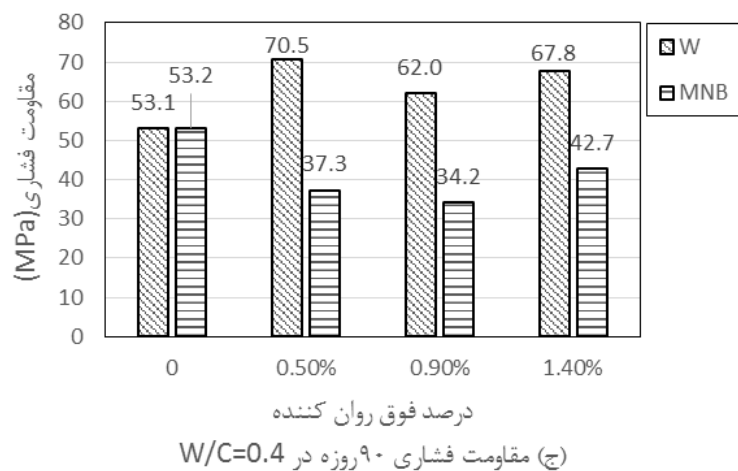
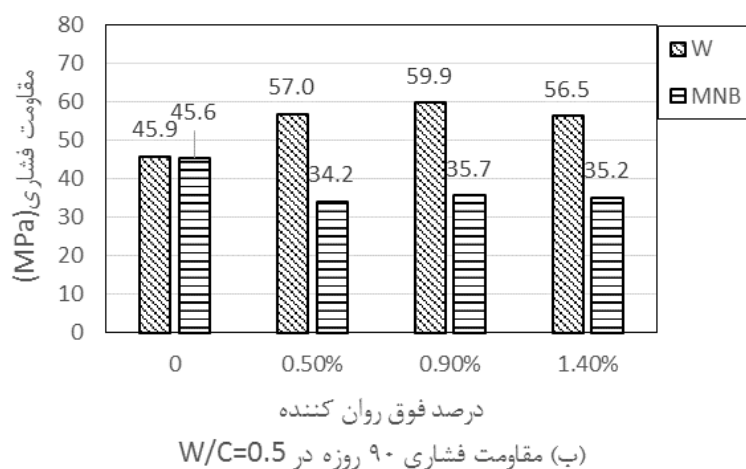
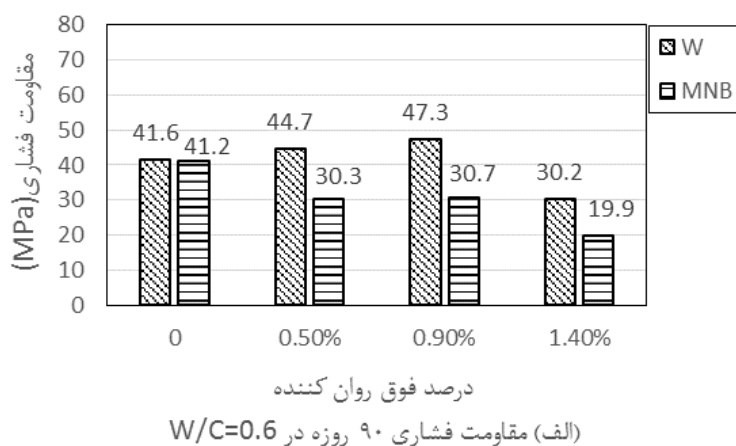




شکل ۴-۱۷- مقاومت فشاری ۷ روزه بتن حاوی MNB و فوق روان کننده نسبت به بتن با آب معمولی و فوق روان کننده الف)  $W/C=0.4$  ب)  $W/C=0.5$  ج)  $W/C=0.6$

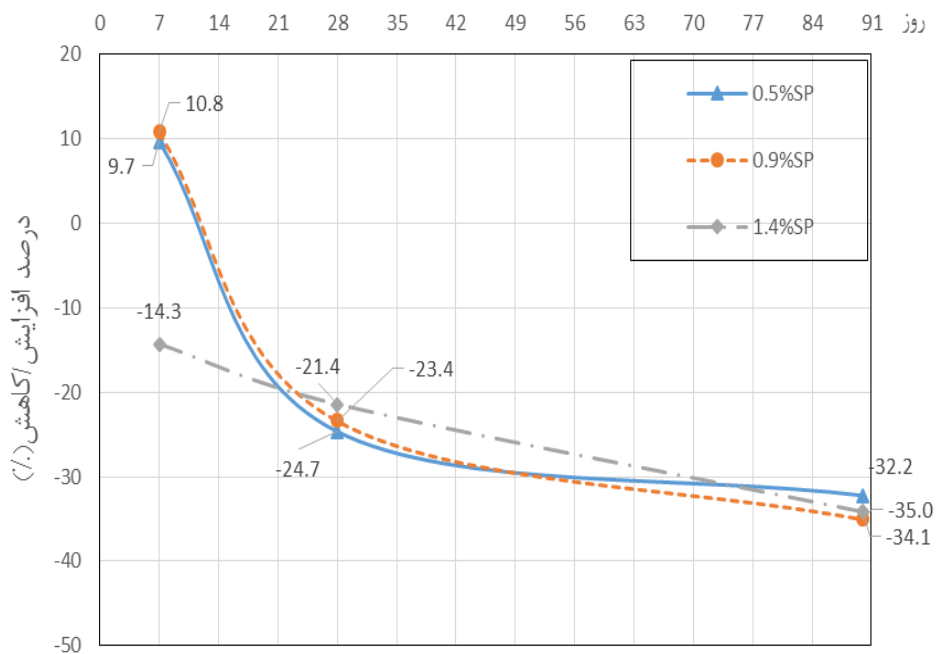


شکل ۴-۱۸- مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن حاوی MNB و فوق روان کننده نسبت به بتن با آب معمولی و فوق روان کننده (الف) W/C=0.6، (ب) W/C=0.5، (ج) W/C=0.4

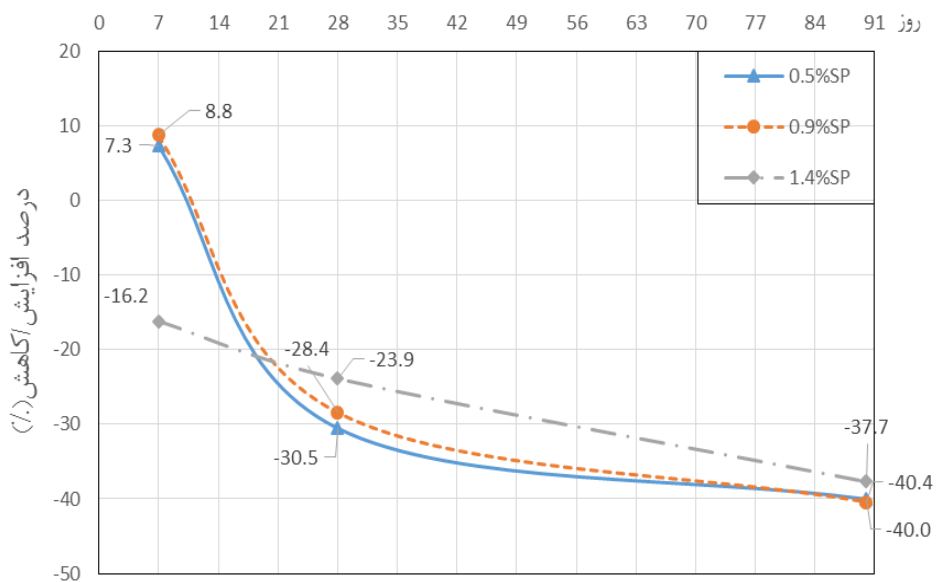


شکل ۴-۱۹- مقاومت فشاری ۹۰ روزه بتن حاوی MNB و فوق روان کننده نسبت به بتن با آب معمولی و فوق روان کننده (الف) W/C=0.6، (ب) W/C=0.5، (ج) W/C=0.4

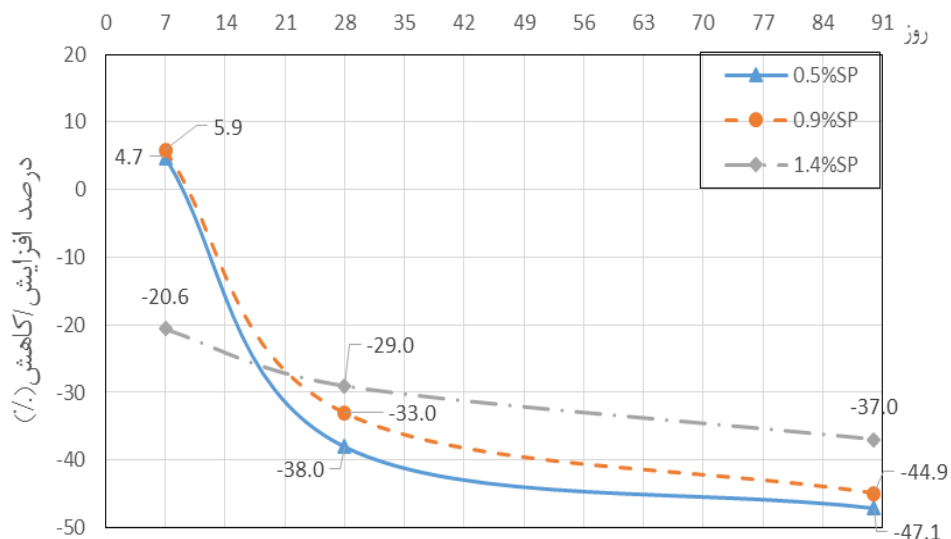
شکل ۴-۲۰، شکل ۴-۲۱ و شکل ۴-۲۲ نمودارهای درصد افزایش مقاومت فشاری بتن حاوی MNB در حضور فوق روان کننده نسبت به بتن با آب معمولی و فوق روان کننده در نسبت‌های آب به سیمان مختلف را نشان می‌دهد. اضافه کردن فوق روان کننده به بتن حاوی میکرو-نانوحباب برای مقایسه مقاومت فشاری بتن نسبت به بتن با آب معمولی و فوق روان کننده، مانند رفتار زمان گیرش سیمان در حضور فوق روان کننده عمل می‌کند، در تمامی نسبت‌های آب به سیمان استفاده شده در این پژوهش، میکرو-نانوحباب‌ها در درصدهای 0.5 و 0.9 فوق روان کننده ابتدا عمل می‌کند و باعث افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود و مقاومت فشاری ۷ روزه، با توجه به نسبت آب به سیمان به‌طور متوسط 7.9% افزایش می‌یابد. سپس با گذشت زمان مقاومت فشاری بتن حاوی MNB در حضور غلظت‌های 0.5% و 0.9% فوق روان کننده در سن ۲۸ و ۹۰ روزه، به ترتیب، به‌طور متوسط 29.7% و 39.8% کاهش می‌یابد. در نسبت آب به سیمان‌های مختلف در غلظت 1.4% فوق روان کننده در تمامی سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه، به ترتیب، به‌طور متوسط 17%، 24.8% و 36.6% مقاومت فشاری کاهش یافته است.



شکل ۴-۲۰- درصد افزایش مقاومت فشاری بتن حاوی میکرو- نانوحباب و فوق روان کننده نسبت به آب و فوق روان کننده در نسبت آب به سیمان 0.6

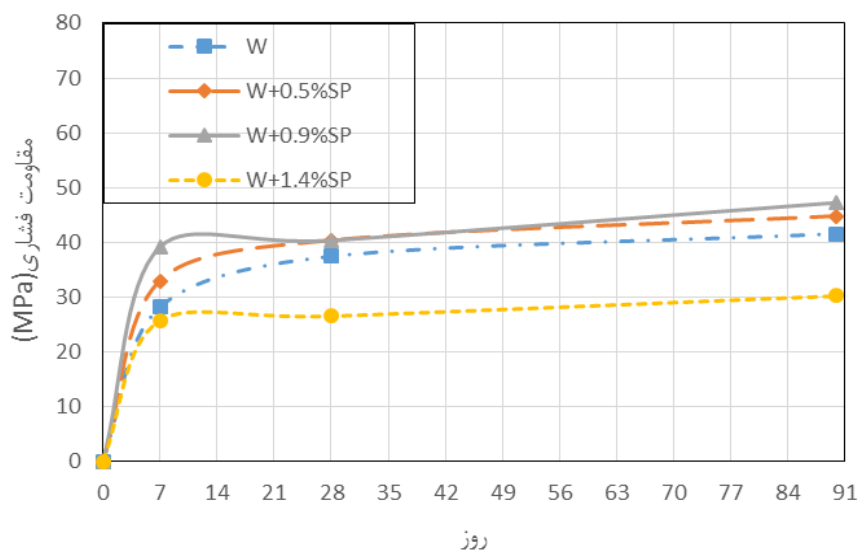


شکل ۴-۲۱- درصد افزایش مقاومت فشاری بتن حاوی میکرو- نانوحباب و فوق روان کننده نسبت به آب و فوق روان کننده در نسبت آب به سیمان 0.5

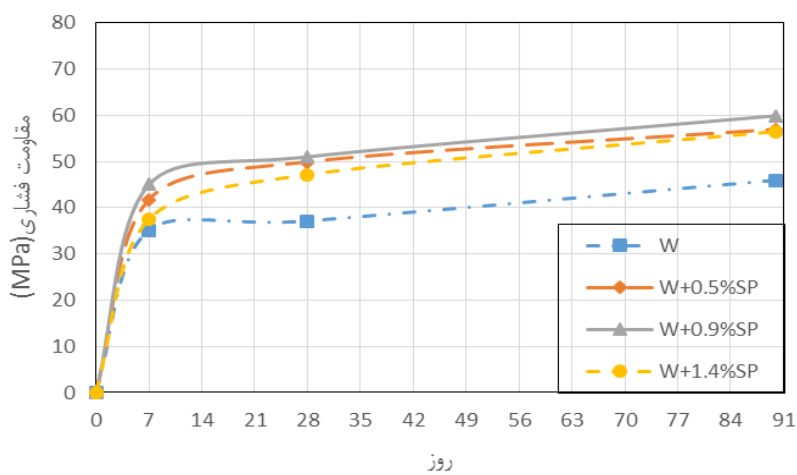


شکل ۴-۲۲- درصد افزایش مقاومت فشاری بتن حاوی میکرو- نانوحباب و فوق روان کننده نسبت به آب و فوق روان کننده در نسبت آب به سیمان 0.4

روند کسب مقاومت فشاری بتن با آب معمولی در حضور فوق روان کننده و بتن حاوی آب در شکل ۴-۲۳، شکل ۴-۲۴ و شکل ۴-۲۵ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقاومت فشاری بتن با نسبت آب به سیمان 0.6، در غلظت 1.4% فوق روان کننده به دلیل کاهش شدید مقدار سیمان و عدم چسبندگی مناسب بین سیمان و مصالح سنگی در مقایسه با سایر نسبت‌های آب به سیمان، از مقاومت فشاری بتن با آب معمولی کمتر است ولی در غلظت‌های 0.9%، 0.5% فوق روان کننده با نسبت‌های آب به سیمان (0.4، 0.5، 0.6) و در غلظت 1.4% فوق روان کننده با نسبت‌های آب به سیمان 0.5 و 0.4، فوق روان کننده به دلیل اینکه باعث افزایش مصالح سنگی در بتن شده، باعث افزایش مقاومت فشاری در تمام سنین شده است.

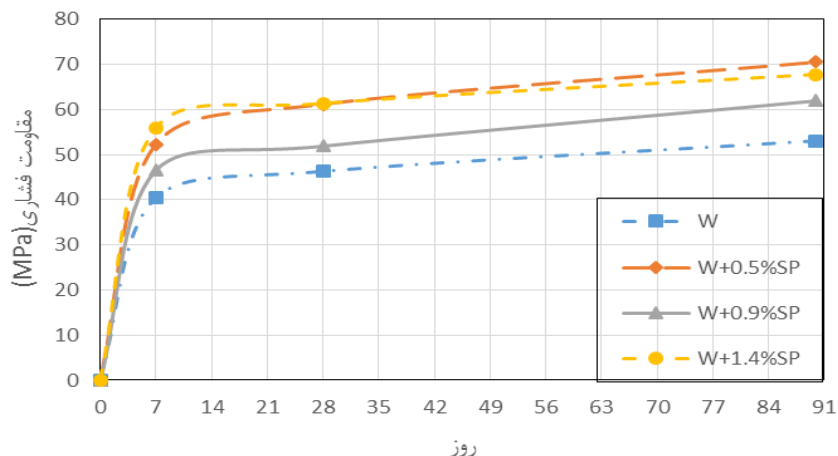


شکل ۴-۲۳- روند کسب مقاومت فشاری بتن با آب معمولی در حضور فوق روان کننده نسبت به بتن با آب معمولی در نسبت آب به سیمان 0.6



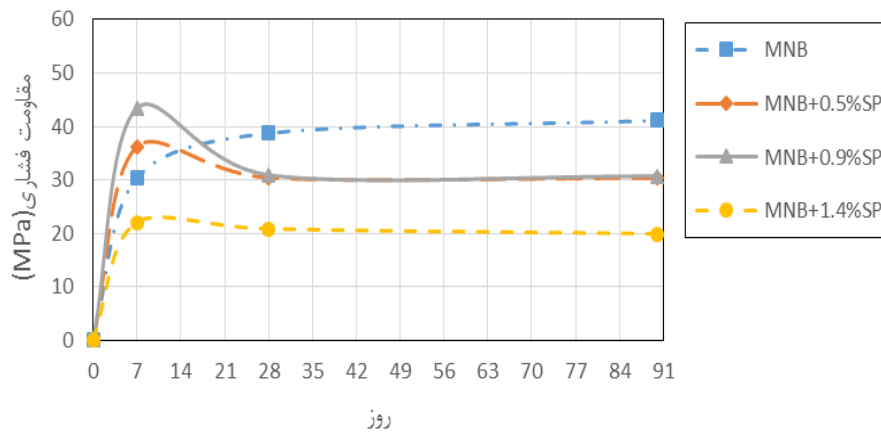
شکل ۴-۲۴- روند کسب مقاومت فشاری بتن با آب معمولی در حضور فوق روان کننده نسبت به بتن با آب معمولی در نسبت آب به سیمان 0.5



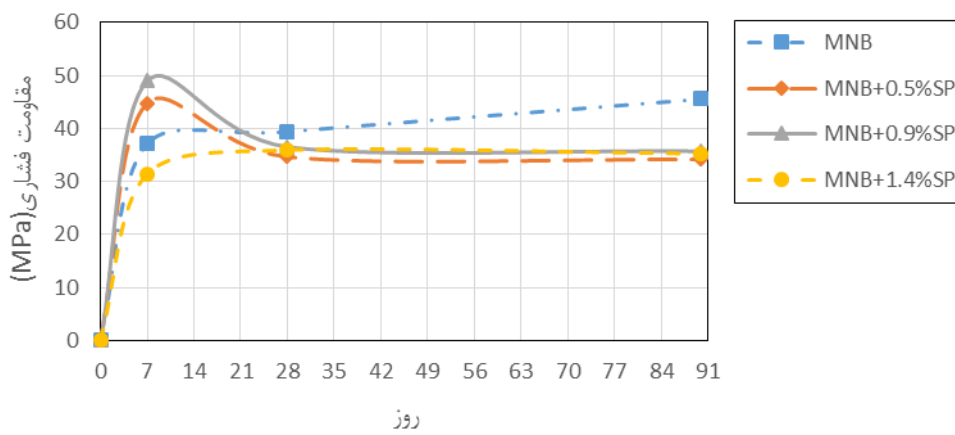


شکل ۴-۲۵- روند کسب مقاومت فشاری بتن با آب معمولی در حضور فوق روان کننده نسبت به بتن با آب معمولی در نسبت آب به سیمان 0.4

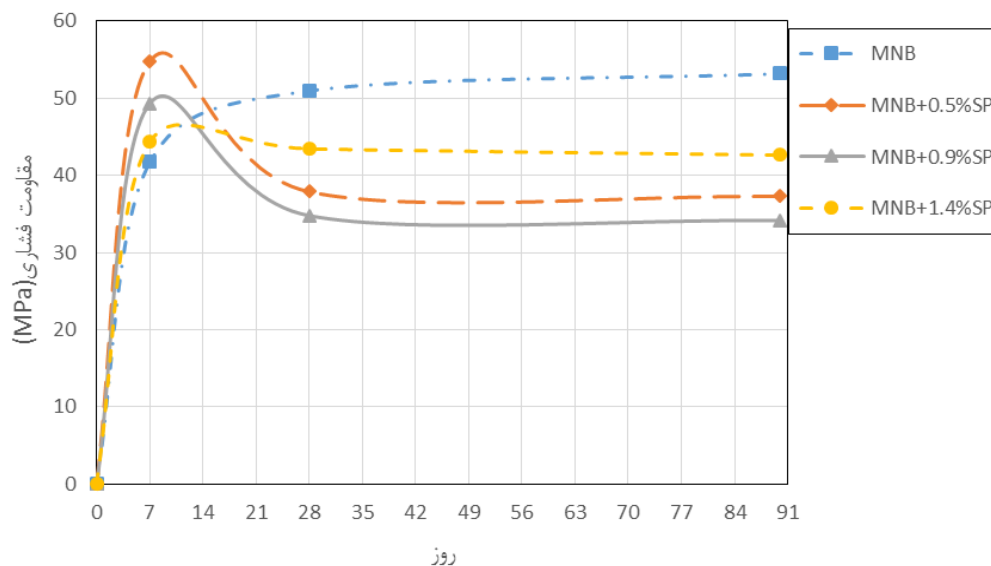
همین طور روند کسب مقاومت فشاری بتن با MNB در حضور فوق روان کننده و بتن حاوی MNB در شکل ۴-۲۶، شکل ۴-۲۷ و شکل ۴-۲۸ نشان داده شده است. که نتایج نشان می‌دهد که مقاومت فشاری در غلظت‌های 0.5%، 0.9% فوق روان کننده در سن ۷ روزه، در نسبت آب به سیمان‌های 0.4، 0.5، 0.6 افزایش پیدا کرده است. در غلظت 1.4% فوق روان کننده در نسبت آب به سیمان 0.5، 0.6 مقاومت فشاری کاهش پیدا کرده اما در نسبت آب به سیمان 0.4، مقاومت فشاری افزایش پیدا کرده است. در سن ۲۸ و ۹۰ روزه، مقاومت فشاری در تمامی غلظت‌های فوق روان کننده و نسبت آب به سیمان کاهش یافته است.



شکل ۴-۲۶- روند کسب مقاومت فشاری بتن با MNB در حضور فوق روان کننده نسبت به بتن با MNB در نسبت آب به سیمان 0.6

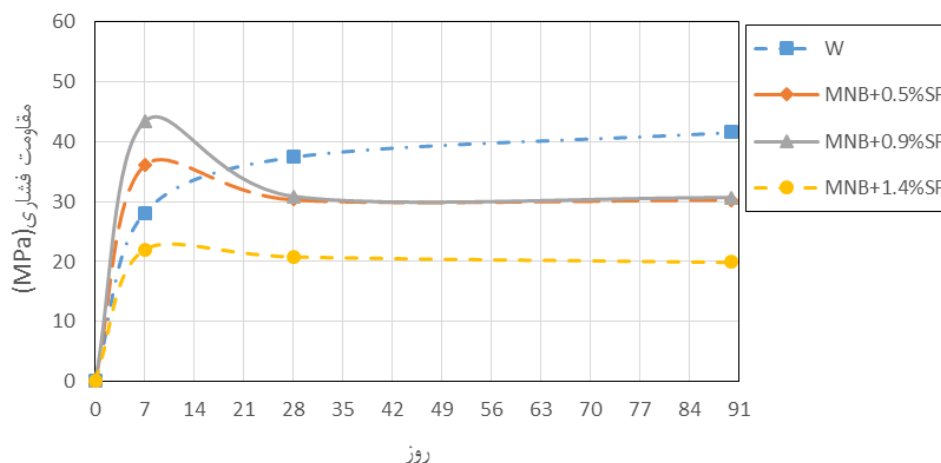


شکل ۴-۲۷- روند کسب مقاومت فشاری بتن با MNB در حضور فوق روان کننده نسبت به بتن با MNB در نسبت آب به سیمان 0.5

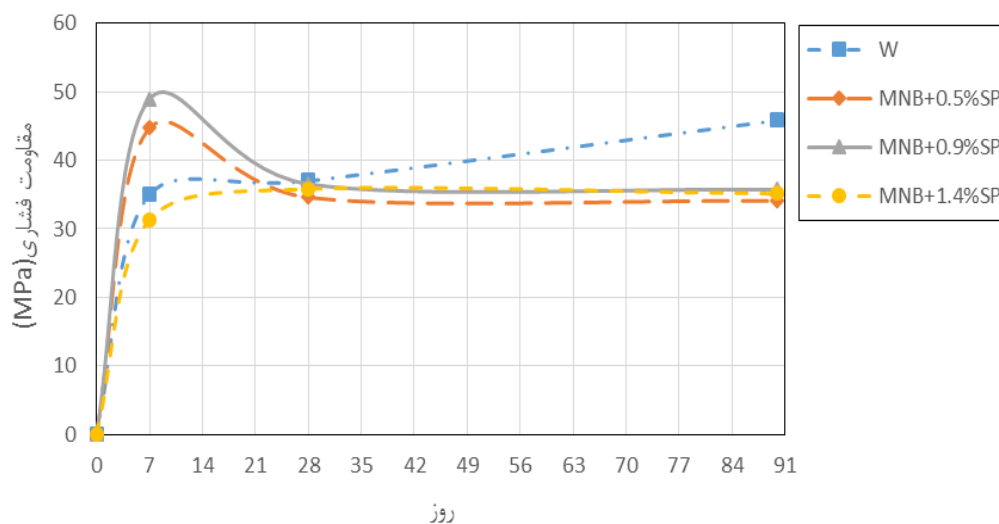


شکل ۴-۲۸- روند کسب مقاومت فشاری بتن با MNB در حضور فوق روان کننده نسبت به بتن با MNB در نسبت آب به سیمان 0.4

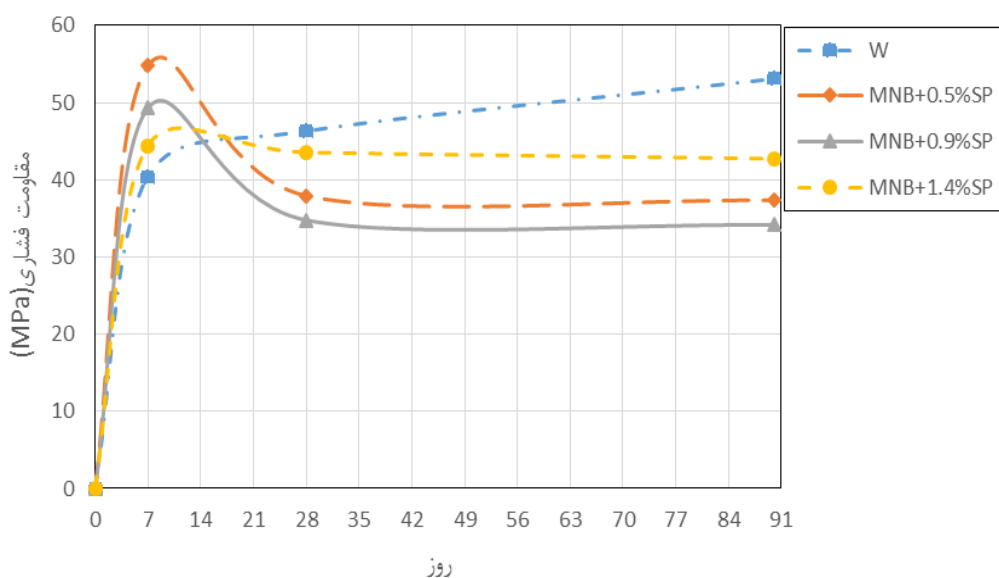
در مقایسه‌ی بتن حاوی MNB و فوق روان کننده نسبت به بتن با آب معمولی، رفتاری شبیه به نمودارهای بتن حاوی MNB و فوق روان کننده نسبت به بتن حاوی MNB مشاهده شد. که در شکل ۴-۲۹، شکل ۴-۳۰، شکل ۴-۳۱ این رفتار برای نسبت‌های آب به سیمان نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۹- روند کسب مقاومت فشاری بتن با MNB در حضور فوق روان کننده نسبت به بتن با آب معمولی در نسبت آب به سیمان 0.6



شکل ۳۰-۴- روند کسب مقاومت فشاری بتن با MNB در حضور فوق روان کننده نسبت به بتن با آب معمولی در نسبت آب به سیمان 0.5



شکل ۳۱-۴- روند کسب مقاومت فشاری بتن با MNB در حضور فوق روان کننده نسبت به بتن با آب معمولی در نسبت آب به سیمان 0.4

#### ۳-۴-۴- آزمایش ملات منشوری تسریع شده

با توجه به جدول ۲-۴ 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. [Kosmatka et al, 2003]

آزمایش ملات منشوری تسریع شده برای پیش‌بینی واکنش قلیایی- مصالح سنگی بکار می‌رود که میانگین نتایج در جدول ۴-۵ آورده شده است. با توجه به نتایج و جدول ۳-۷ می‌توان گفت با بازی‌تر شدن آب موجود در بتن فعالیت قلیایی خطرناک می‌شود و که نتیجه‌ی آن واکنش قلیایی- مصالح سنگی است که منجر به خرابی بتن و همچنین تغییر در نرخ کسب مقاومت بتن می‌شود [رمضانیان پور، ۱۳۹۰].

جدول ۴-۵- 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

با توجه نتایج مقاومت فشاری بتن حاوی MNB و فوق روان کننده به دلیل اینکه محیط بتن با افزایش غلظت فوق روان کننده بازی‌تر شده است، و استناد به نتایج آزمایش ملات منشوری می‌توان گفت در غلظت‌های 0.5% و 0.9% فوق روان کننده به دلیل اینکه محیط آب، بازی شده است فعالیت قلیایی در محدوده‌ی مضر قرار می‌گیرد که منجر به واکنش قلیایی- مصالح سنگی می‌شود و این واکنش باعث کاهش مقاومت فشاری شده است. در غلظت 1.4% فوق روان کننده به دلیل بالا بودن pH و قلیایی بودن محیط واکنش قلیایی- مصالح سنگی سریع‌تر اتفاق می‌افتد و این واکنش منجر به کاهش مقاومت فشاری بتن در تمامی سنین شده است.

#### ۴-۴-۴ - آزمایش کششی بتن

طبق استاندارد ۶۰۴۷ ایران، رابطه ۲-۴ برای محاسبه‌ی مقاومت کششی نمونه استوانه‌ای بتنی

استفاده می‌شود:

رابطه ۲-۴

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

که در این فرمول پارامترها به شرح زیر است:

T : مقاومت کششی دونیم شدن ( $\text{kN/m}^2$ )

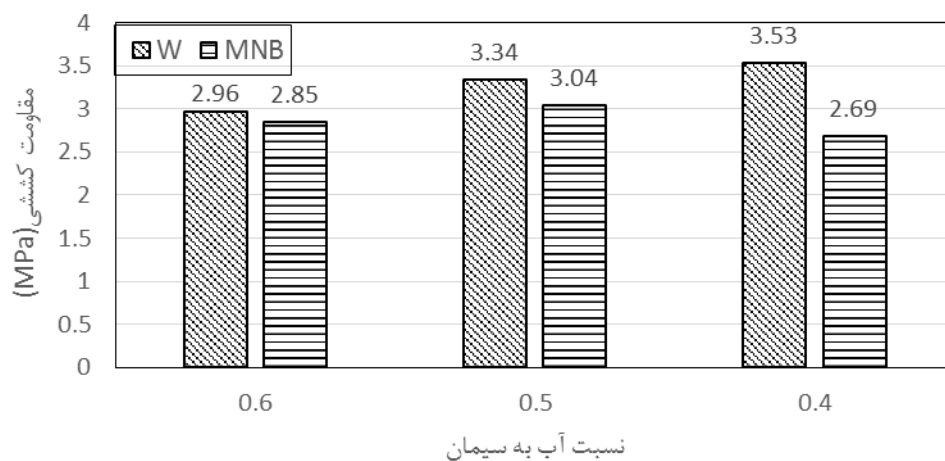
P : حداکثر بار عمودی اعمال شده به نمونه ( $\text{kN}$ )

L : طول نمونه (m)

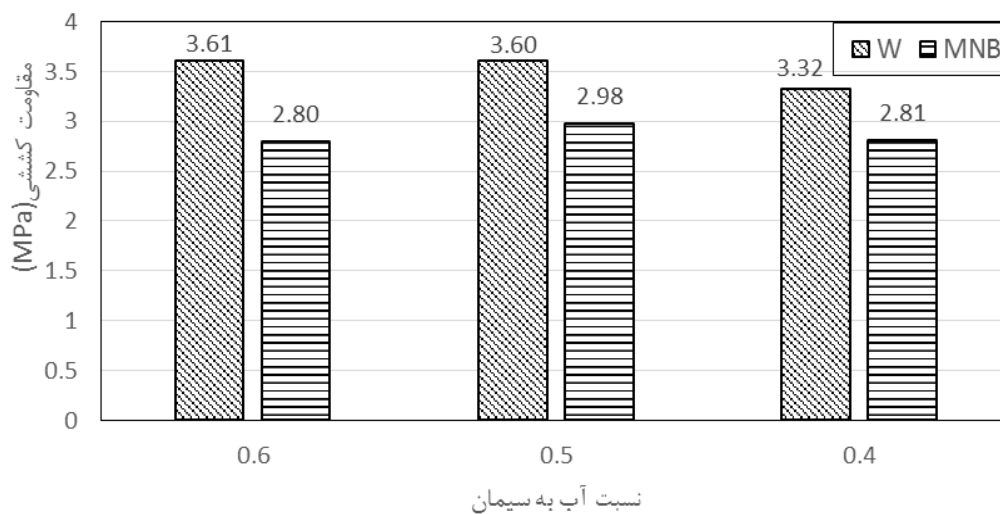
D : قطر نمونه (m)

در بخش اول به مقایسه بتن حاوی MNB نسبت به آب معمولی پرداخته شد. طبق نتایج حاصل از آزمایش‌ها مقاومت کششی، حضور آب حاوی MNB باعث کاهش مقاومت کششی در سن ۷ و ۲۸ روزه شده است. با توجه به نتایج در نسبت آب سیمان بیشتر (مقدار سیمان کمتر) در سن ۷ روزه کمترین مقدار و در سن ۲۸ روزه بیشترین مقدار کاهش مشاهده می‌شود. و در نسبت آب به سیمان کمتر (مقدار سیمان بیشتر) در سن ۷ روزه بیشترین مقدار کاهش و در سن ۲۸ روزه کمترین مقدار کاهش مشاهده شده است. در نسبت آب به سیمان 0.6 در سن ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب 3.7 و 22.6 کاهش مشاهده شد. در نسبت آب به سیمان 0.5 در سن ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب 8.8 و 17.3 کاهش یافت و در نسبت آب

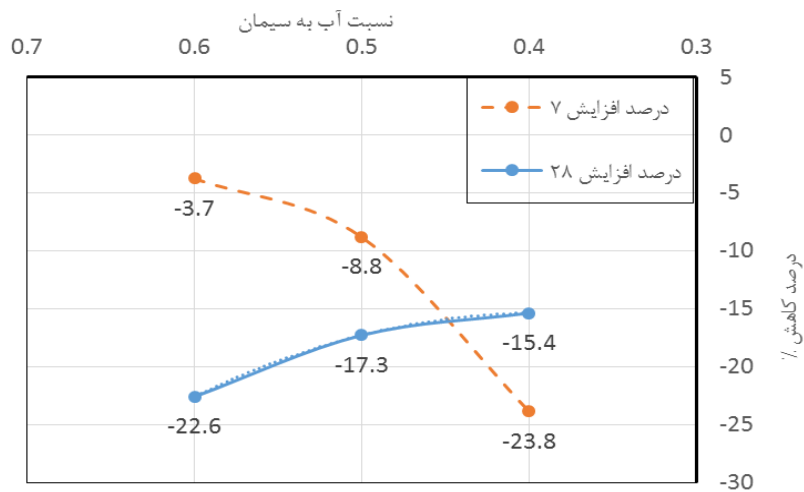
به سیمان 0.4 در سن ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب 15.4 و 23.8 کاهش مشاهده شد.



شکل ۴-۳۲- نمودار مقایسه‌ی مقاومت کششی ۷ روزه بین نمونه‌های MNB و آب معمولی در نسبت آب به سیمان‌های مختلف

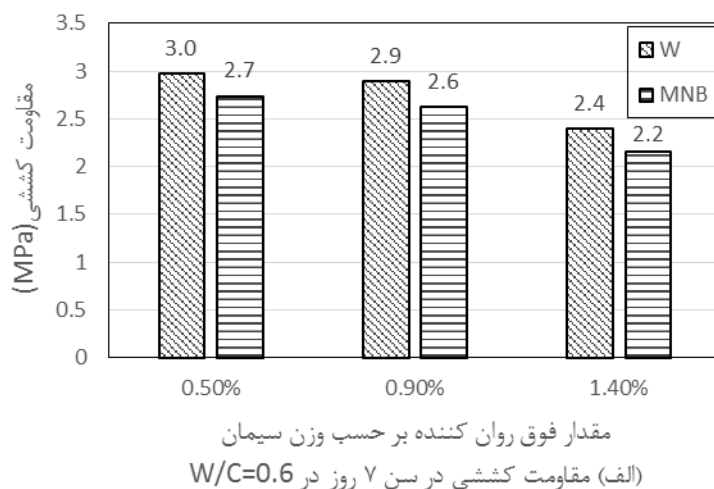


شکل ۴-۳۳- نمودار مقایسه‌ی مقاومت کششی ۲۸ روزه بین نمونه‌های MNB و آب معمولی در نسبت آب به سیمان‌های مختلف

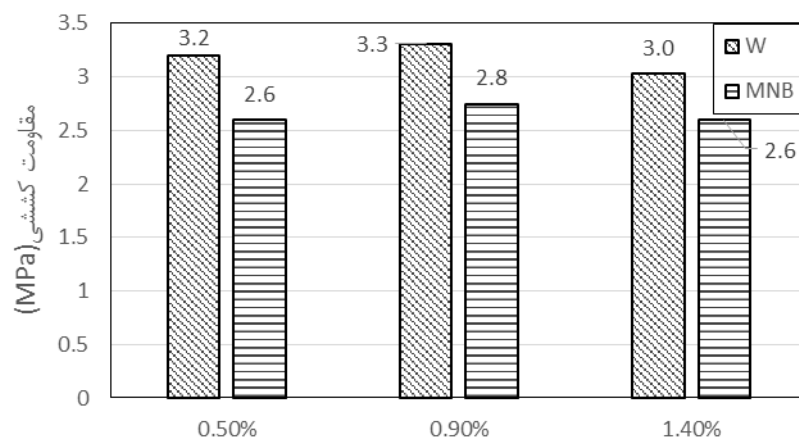


شکل ۴-۳۴- درصد کاهش مقاومت فشاری بتن حاوی MNB نسبت به آب معمولی سن ۷ و ۲۸ روزه در نسبت آب به سیمان‌های مختلف

در بخش دوم این آزمایش تأثیر همزمان MNB و فوق روان کننده بر مقاومت کششی بررسی شد که نتایج نشان می‌دهد مقاومت کششی بتن حاوی MNB و فوق روان کننده نسبت به بتن با آب معمولی و فوق روان کننده در سن ۷ و ۲۸ روزه کاهش پیدا کرده است. نتایج مقاومت کششی بتن حاوی MNB نسبت به بتن معمولی در حضور درصدهای مختلف فوق روان کننده در سن ۷ و ۲۸ روزه در نسبت آب به سیمان 0.6، 0.5 و 0.4 به ترتیب در شکل ۴-۳۵، شکل ۴-۳۶ و شکل ۴-۳۷ نشان داده شده است.

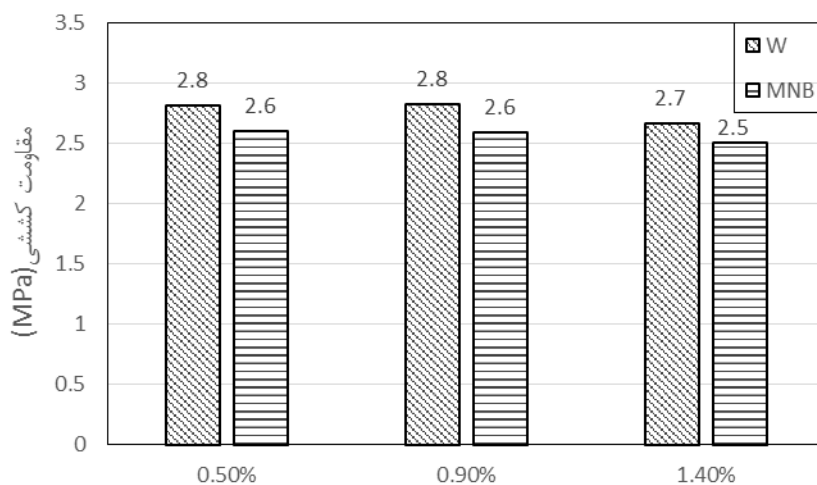




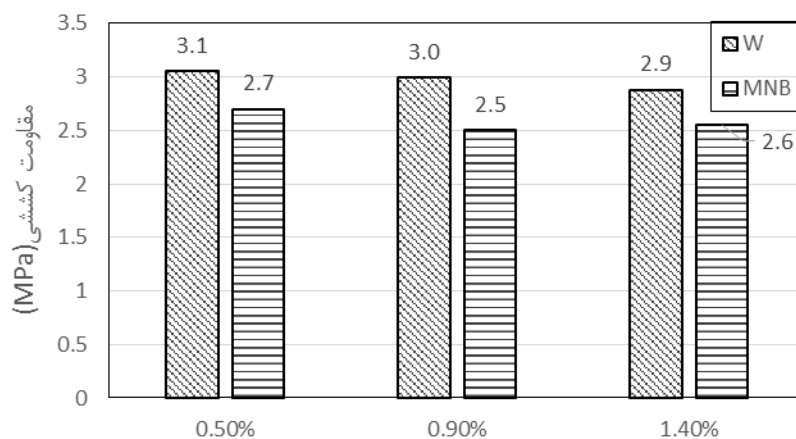


مقدار فوق روان کننده بر حسب وزن سیمان  
 W/C=0.6 روز در ۲۸ مقاومت کششی (ب)

شکل ۴-۳۵- مقاومت کششی بتن حاوی MNB نسبت به بتن با آب معمولی در حضور درصدهای مختلف فوق روان کننده در نسبت آب به سیمان 0.6 (الف) در سن ۷ روزه (ب) در سن ۲۸ روزه

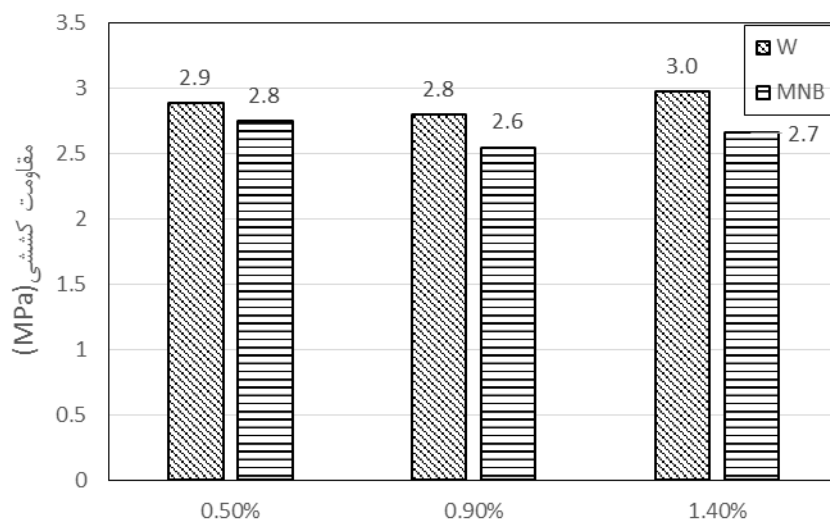


مقدار فوق روان کننده بر حسب وزن سیمان  
 W/C=0.5 روز در ۷ مقاومت کششی (الف)

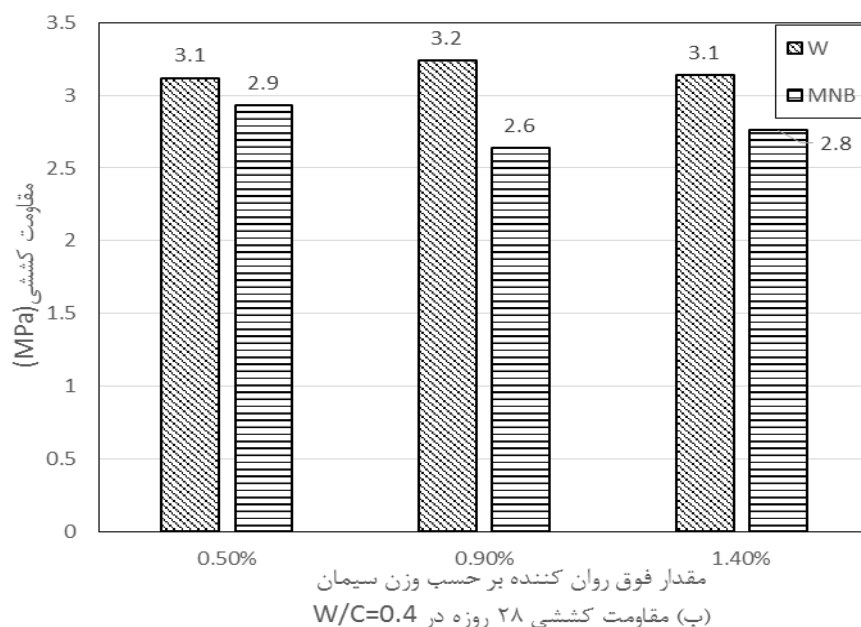


مقدار فوق روان کننده بر حسب وزن سیمان  
 (ب) مقاومت کششی ۲۸ روزه در  $W/C=0.5$

شکل ۴-۳۶- مقاومت کششی بتن حاوی MNB نسبت به بتن با آب معمولی در حضور درصدهای مختلف فوق روان کننده در نسبت آب به سیمان 0.5 (الف) در سن ۷ روزه (ب) در سن ۲۸ روزه



مقدار فوق روان کننده بر حسب وزن سیمان  
 (الف) مقاومت کششی ۷ روزه در  $W/C=0.4$



شکل ۴-۳۷- مقاومت کششی بتن حاوی MNB نسبت به بتن با آب معمولی در حضور درصدهای مختلف فوق روان کننده در نسبت آب به سیمان 0.4 (الف) در سن ۷ روزه (ب) در سن ۲۸ روزه

مقاومت کششی بتن حاوی MNB به بتن معمولی در حضور 0.5% فوق روان کننده در

نسبت‌های مختلف آب به سیمان (0.4, 0.5, 0.6) در سنین ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب، به‌طور متوسط 6.8%

و 12.1% کاهش یافت. شکل ۴-۳۸ جزئیات درصد کاهش مقاومت کششی بتن حاوی MNB به بتن

معمولی در حضور 0.5% فوق روان کننده در نسبت آب به سیمان‌های مختلف در سنین ۷ و ۲۸ روزه را

نشان می‌دهد.

مقاومت کششی بتن حاوی MNB به بتن معمولی در حضور 0.9% فوق روان کننده در

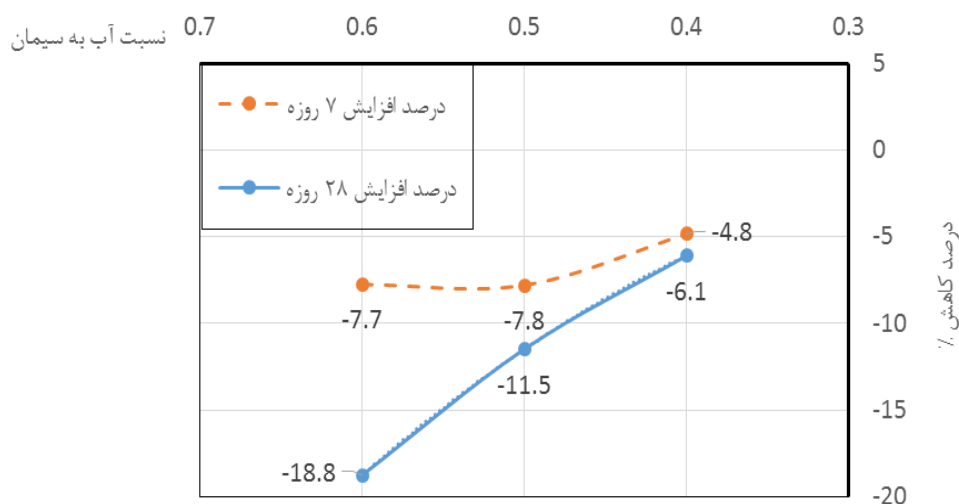
نسبت‌های مختلف آب به سیمان (0.4, 0.5, 0.6) در سنین ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب، به‌طور متوسط 8.9%

و 17.3% کاهش یافت. شکل ۴-۳۹ جزئیات درصد کاهش مقاومت کششی بتن حاوی MNB به بتن

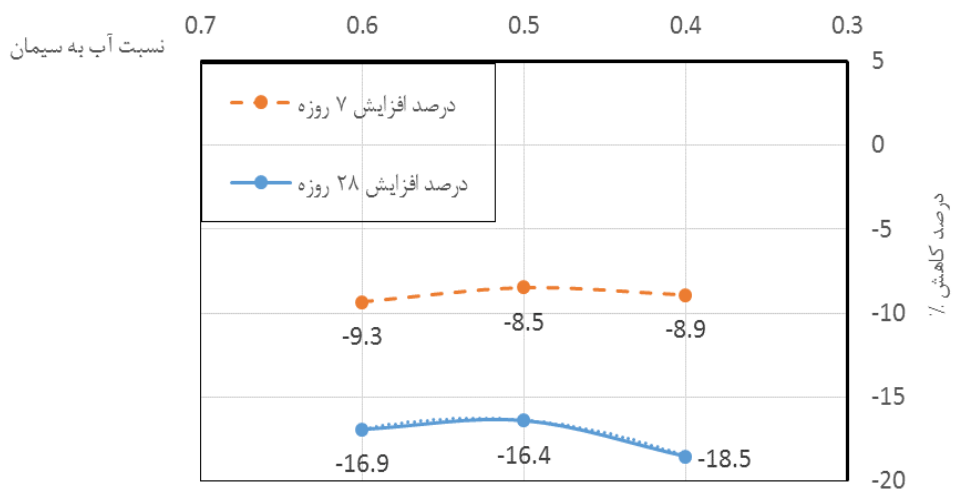
معمولی در حضور 0.9% فوق روان کننده در نسبت آب به سیمان‌های مختلف در سنین ۷ و ۲۸ روزه را

نشان می‌دهد.

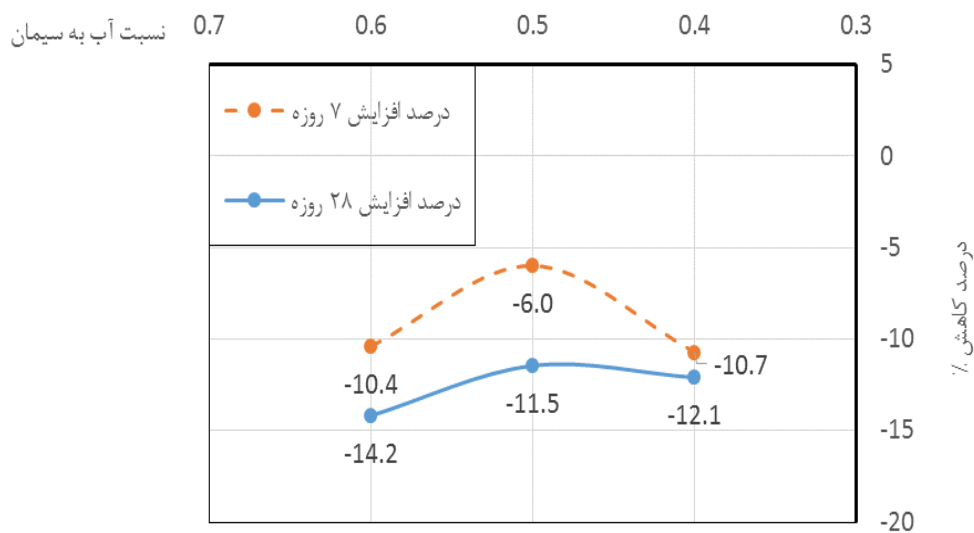
مقاومت کششی بتن حاوی MNB به بتن معمولی در حضور 1.4% فوق روان کننده در نسبت‌های مختلف آب به سیمان (0.6, 0.5, 0.4) در سنین ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب، به‌طور متوسط 9% و 12.6% کاهش یافت. شکل ۴-۴۰ جزئیات درصد کاهش مقاومت کششی بتن حاوی MNB به بتن معمولی در حضور 1.4% فوق روان کننده در نسبت آب به سیمان‌های مختلف در سنین ۷ و ۲۸ روزه را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۳۸- درصد کاهش مقاومت کششی بتن حاوی MNB به بتن معمولی در نسبت آب به سیمان‌های مختلف در حضور 0.5 درصد فوق روان کننده



شکل ۴-۳۹- درصد کاهش مقاومت کششی بتن حاوی MNB به بتن معمولی در نسبت آب به سیمان‌های مختلف در حضور 0.9 درصد فوق روان کننده



شکل ۴-۴۰- درصد کاهش مقاومت کششی بتن حاوی MNB به بتن معمولی در نسبت آب به سیمان‌های مختلف در حضور 1.4 درصد فوق روان کننده



## فصل پنجم

# نتیجه‌گیری و پیشنهادات

## ۱-۵ - نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور بررسی اثر همزمان تأثیر میکرو-نانوحباب و فوق روان کننده بر مشخصات مکانیکی بتن در حالت سخت شده و حالت روان ۱۶ نمونه خمیر سیمان مخروط ناقص برای آزمایش زمان گیرش سیمان، ۱۶ نمونه ملات سیمان برای آزمایش جریان سیمان، ۴۸ نمونه مکعبی ملات سیمان به ابعاد 5\*5\*5 cm برای آزمایش مقاومت فشاری ملات، ۶۰ نمونه بتن برای آزمایش اسلامپ، ۱۵۶ نمونه مکعبی بتن به ابعاد 15\*15\*15 cm برای آزمایش مقاومت فشاری بتن، ۹۶ نمونه استوانه‌ای بتن به ابعاد 10\*20 cm برای مقاومت کششی بتن و ۱۲ نمونه مکعب مستطیلی ملات سیمان به ابعاد 2.5\*2.5\*25 cm برای آزمایش ملات منشوری تسریع شده در آزمایشگاه تکنولوژی بتن و مصالح ساختمانی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌ها انجام شده در این پژوهش نتایج به دست آمده به صورت زیر خلاصه می‌گردد:

- استفاده از میکرو-نانوحباب‌های هوا (MNB) باعث می‌شود زمان گیرش اولیه و ثانویه خمیر سیمان کاهش یافته، اما حضور درصد‌های مختلف فوق روان کننده منجر به کندگیری خمیر سیمان و افزایش چندساعتی زمان گیرش می‌شود. در درصد‌های 0.5 و 0.9 فوق روان کننده ابتدا میکرو-نانوحباب‌ها عملکرد خود را با زودگیری خمیر سیمان نشان می‌دهند سپس فوق روان کننده اثر زودگیری آب حاوی MNB و کاهش زمان گیرش 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.
- میکرو-نانوحباب باعث کاهش کارایی و اسلامپ و جریان ملات سیمان می‌شود این امر



مشابه رفتار دیگر نانو ذرات در بتن است، حضور فوق روان کننده در نسبت‌های آب به سیمان 0.6 و 0.5 به دلیل کاهش سیمان و عدم چسبندگی مناسب، کارایی بتن را نامطلوب می‌کند. اما در نسبت آب به سیمان 0.4، حضور فوق روان کننده اسلایم و کارایی بتن حاوی آب MNB نسبت به بتن حاوی آب MNB را به‌طور متوسط 50% افزایش داد.

- با توجه به آزمایش‌ها زتا پتانسیل و XRF انجام‌شده بر خمیر سیمان، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که توان حل شدن مواد قطبی در آب حاوی MNB افزایش می‌یابد.
- مقاومت فشاری بتن حاوی میکرو-نانوحباب با توجه به نسبت آب به سیمان در سن ۷ و ۲۸ روزه به‌طور متوسط به ترتیب 4.85% و 8.7% افزایش یافت که این افزایش به‌مرور زمان کم می‌شود و در سنین بالا تغییراتی مشاهده نمی‌شود.
- به دلیل خاصیت زود گیر کنندگی میکرو-نانوحباب می‌توان از بتن حاوی میکرو-نانوحباب در صنعت پیش‌ساخته در مقاومت بالا (نسبت آب به سیمان پایین) استفاده کرد.
- اضافه کردن فوق روان کننده به بتن حاوی میکرو-نانوحباب برای مقایسه مقاومت فشاری بتن نسبت به بتن با آب معمولی و فوق روان کننده، مانند رفتار زمان‌گیرش سیمان در حضور فوق روان کننده عمل می‌کند، در تمامی نسبت‌های آب به سیمان استفاده‌شده در این پژوهش، میکرو-نانوحباب‌ها در درصدهای 0.5 و 0.9 فوق روان کننده ابتدا عمل می‌کند و باعث افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود و مقاومت فشاری ۷ روزه با توجه به نسبت آب به سیمان به‌طور متوسط 7.9% افزایش می‌یابد. سپس با گذشت زمان مقاومت فشاری بتن در سن ۲۸ و ۹۰ روزه به ترتیب به‌طور متوسط

29.7% و 39.8% کاهش می‌یابد. در درصد 1.4 فوق روان کننده در تمامی سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه به ترتیب به‌طور متوسط 17%، 24.8% و 36.6% مقاومت فشاری کاهش یافته است.

- اضافه کردن میکرو-نانوحباب به فوق روان کننده ماهیت فوق روان کننده از حالت اسیدی به بازی تغییر داده است که این امر باعث قلیایی شدن محیط بتن می‌شود.
- قلیایی شدن محیط بتن احتمال واکنش قلیایی-مصلح سنگی را افزایش می‌دهد که این واکنش منجر به خرابی بتن و تغییر در روند کسب مقاومت می‌شود.
- با توجه به اضافه کردن فوق روان کننده و خاصیت فوق روان کننده در کاهش سیمان و افزایش چسبندگی سیمان و افزایش مصالح سنگی باعث افزایش مقاومت فشاری نسبت به بتن با آب معمولی شده است. ولی این امر در مقایسه با بتن حاوی MNB فقط در سن ۷ روزه مشاهده شد.
- به‌طور کلی رفتار بتن حاوی میکرو-نانوحباب هوا شبیه به دیگر نانو ذرات است و هیچ شباهتی به بتن حاوی افزودنی‌های حباب‌زا ندارد.
- مقاومت کششی بتن حاوی میکرو-نانوحباب در سن ۷ و ۲۸ روزه نسبت به بتن معمولی به ترتیب، به‌طور متوسط 12.1% و 18.4% کاهش یافت.
- مقاومت کششی بتن حاوی MNB در حضور فوق روان کننده با درصدهای مختلف نیز در سن ۷ و ۲۸ روزه نسبت به بتن با آب و فوق روان کننده کاهش پیدا کرد. این مقدار کاهش برای سن ۷ روزه به‌طور متوسط 8.2% و برای سن ۲۸ روزه به‌طور متوسط 14% می‌باشد.

## ۲-۵ - پیشنهادات برای انجام مطالعات آتی

۱. تأثیر همزمان میکرو- نانوحباب و انواع فوق روان کننده بر مشخصات مکانیکی بتن
۲. یونیزه کردن آب حاوی MNB با عبور از میدان مغناطیسی و بررسی آن بر مشخصات مکانیکی بتن
۳. بررسی تأثیر آب حاوی میکرو- نانوحباب‌های گازهای مختلف از جمله اوزون و نیتروژن بر خواص مکانیکی بتن
۴. بررسی دوام بتن حاوی میکرو- نانوحباب

## منابع و مراجع

- منابع داخلی
- استاندارد ملی ایران به شماره ۵۸۱، ساختن و عمل‌آوری نمونه‌های آزمایشی بتن در آزمایشگاه
- استاندارد ملی ایران به شماره ۳۰۲، تعیین منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های ریز و درشت بتن
- استاندارد ملی ایران به شماره ۳۸۹، مشخصات سیمان پرتلند
- استاندارد ملی ایران به شماره ۳۹۲، تعیین زمان‌گیرش سیمان هیدرولیکی با سوزن و یکات-روش آزمون.
- استاندارد ملی ایران به شماره ۲۹۳۰، ویژگی و روش آزمون مواد افزودنی شیمیایی
- استاندارد ملی ایران به شماره ۳۲۰۶، تعیین مقاومت فشاری آزمون‌های بتن
- استاندارد ملی ایران به شماره ۶۰۴۷، بتن-مقاومت کششی دونیم نمودن آزمون‌های استوانه‌ای- روش آزمون
- صادق حسنی ص، (۱۳۸۷)، "روش دینامیک تفرق نوری برای مطالعه اندازه نانو ذرات"، ماهنامه فناوری نانو، سال هفتم، شماره ۱۳۰
- رمضانیان پور ع، (۱۳۹۰)، تکنولوژی بتن، ویرایش دوم، فصل ۲ و فصل ۱۴
- طرح ملی مخلوط بتن ایران (۱۳۸۸)، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، چاپ دوم.
- عارفی ا، (۱۳۹۳)، کاربرد میکرو-نانوحباب و نانو مواد در بهبود رفتارهای مکانیکی و عایق بودن مصالح ساختمانی (با تأکید بر بتن)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب و

سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

- مظفری نائینی ر، (۱۳۹۲)، بررسی الگوهای هیدرودینامیکی استاندارد جریان به کمک میکرو- نانو حباب هوا، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

- **International References**

- Abd el-baky S, yehia 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 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles on the morphology properties and microstructure of cement mortar*", Life Science Journal.
- Agarwal A, Jem Ng W, Liu Y,(2011), "*Principle and application of microbubble and nanobubble technology for water treatment*", journal Chemospher
- ASTM C109/ C109M, "*Standard Test Method for Compressive Strength Hydraulic Cement Mortars (Using 2- in. or [50-mm] Cube Specimens)*", 2004.
- ASTM C127, "*Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*", 2015.
- ASTM C143, "*Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*", 2003.
- ASTM C187, "*Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement*", 2010.
- ASTM C191, "*Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*", 2013
- ASTM C305, "*Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*", 2014.
- ASTM C494, "*Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*", 2017.

- ASTM C1017, “*Standard Specification for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete*”, 2013.
- ASTM C1260, “*Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)*”, 2014.
- ASTM C1437, “*Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar*”, 2015.
- ASTM E1621-13, “*Standard Guide for Elemental Analysis by Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometry*”, 2013.
- Arefi A, Saghravani S, Mozaffari R, (2016), “*Mechanical Behavior of Concrete, Made with Micro-Nano Air Bubbles*”, Civil Engineering Infrastructure Journal (CEIJ), 49, 1, pp139.
- Boshehrian A, Hosseini P,(2011), “*Effect of nano-SiO<sub>2</sub> particles on properties of cement mortar applicable for ferrocement elements*”,
- Bae S., Lim J. S., Shin K. M., Kim C. W., Kang S. K., Shin M., (2013) "*The innovation policy of nanotechnology development and convergence for the new Korean government.*", Journal of nanoparticle research 15.11: 1-15.
- Bjorn Birgisson, Anal K. Mukhopadhyay, Georgene Geary, Mohammad Khan, Konstantin Sobolev(2012), “*Nanotechnology in Concrete Materials, A synopsis*” Transportation Research Board Technical Activities Council, Transportation Research Board 500 Fifth Street, NW Washington, D.C.
- Chong K. P, Garboczi E. J (2002), “*Smart And Designer Structural Material Systems*”, Process in Structural Engineering and Materials, 4(4):417-430
- Dhir R, Hewlett P, (1996), “*Radical Concrete Technology*”, Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland
- 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.
- 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.

- 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 (Korean)
- Heikal M, Ismail M.N, Ibrahim N.S (2015),” *Physico-mechanical, microstructure characteristics and fire resistance of cement pastes containing Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano-particles*” Construction and Building Materials 91 232–242.
- Hunter R, Ottewill H, Rowell R.L, (1981), “ *Zeta Potential in Colloid Science*” ISBN: 978-0-12-361961-7
- 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.
- 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*”, Mater Lett, 60:356–9.
- Morsy M.S., Alsayed S.A., Aqel, (2010). “*Effect of nano-clay on mechanical properties and microstructures of ordinary Portland cement mortar*”, International Journal of Civil & Environmental Engineering. 10 (01) :145-152
- Maruyama T, Takahashi Naoya, Hashimoto S, Date S, (2015), “*Effect on the Flow Properties of the Mortar using Micro-Nano Bubbles*”, Advanced Materials Research ISSN: 1662-8985, Vol. 1110, pp 249-252
- Nazari A, Riahi Sh, Riahi Sh, Shamekhi S.F, Khademno A,(2009), “*Mechanical properties of cement mortar with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles*”, Journal of American Science, 6, 4, pp94.
- Nazari A, Riahi Sh,(2011), “*Effects of CuO nanoparticles on compressive strength of self-compacting concrete*”, Indian Academy of Sciences, 36, 3, pp 371.
- Nazari A, Riahi Sh, Riahi Sh, Shamekhi S.F, Khademno A,(2010), “*The effects of incorporation Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles on tensile and flexural strength of concrete*”, Journal of American Science, 6, 4, pp 90.
- Pradesh H, (2012), “*Application of Nanotechnology in Building Materials*”, International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), 2, 5, pp1077.

- Rauof, E. Elkady, H. Ragab, M, (2014), “*Investigation on Concrete Properties for Nano Silica Concrete by using Different Plasticizers*”. Civil and Environmental Research, Vol.6, No.9.
- 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.
- Sobolev K, Flores I, Hermosillo R, and Torres-Martinez 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, pp100.
- Takahashi M, (2007) “*Free-Radical Generation from Collapsing Microbubbles in the Absence of a Dynamic Stimulus*”, J. Phys. Chem. B, V: 111 P: 1343-1347.
- Tsuge H, (2007), “*The Latest Technology on Micro-Nano bubbles*”, CMC Publishing Co, Ltd, Japan
- 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



پیوست

## ۱-۷ پیوست الف:

در این پیوست، جداول مربوط به اندازه‌گیری ابعاد و پتانسیل زتا نمونه‌ی ۱ روزه ضمیمه شده است.



### NanoQ Report

#### Sample

**Name** : MNB-A  
**Measured on** : 1/7/2017 10:37:43  
**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

**Results**  Intensity

Volume

Number

##### Measure conditions

**Temperature** : 25.0°C

**Duration** : 0h 0min 19s

**Acquisitions** : 0

**Laser power** : 50%

**Average count rate** : 175.00 kcps

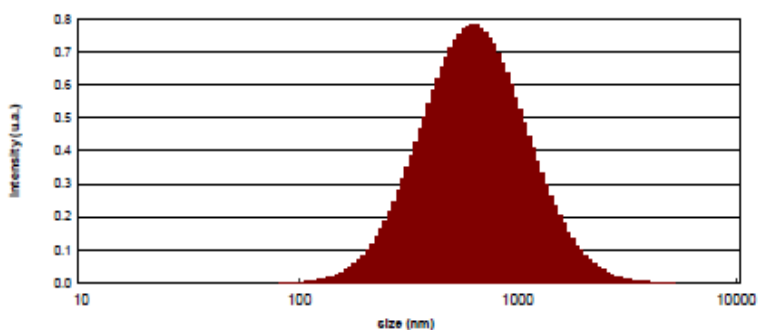
**DTC position** : UP

**Wavelength** : 657.00

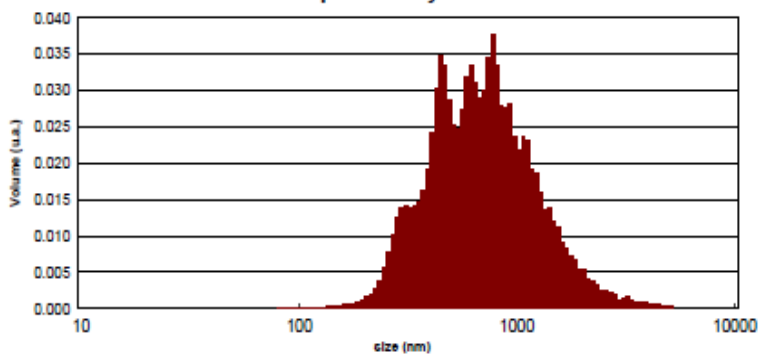
*Cumulants method*

			Zaverage (nm):	592.18			
Dv10:	338.93	Dv50:	676.26	Dv90:	1 412.91	PDI:	0.3220
Dmean Intensity:	730.58	Dmean volume:	812.58	Dmean number:	349.84		

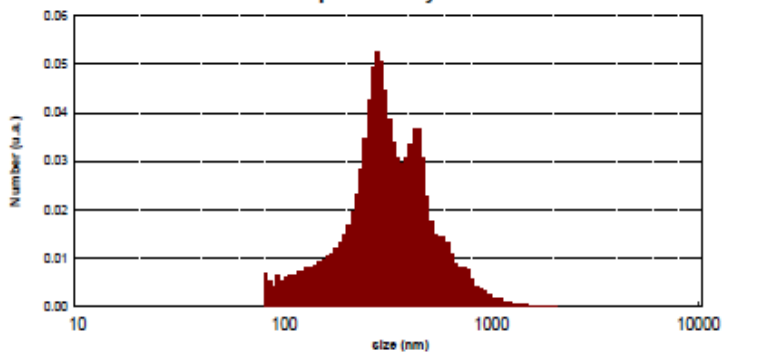
Size dispersion by Intensity



Size dispersion by Volume



Size dispersion by Number



نتایج آزمایش زتا پتانسیل آب حاوی MNB:

**MNB 025**

20170701

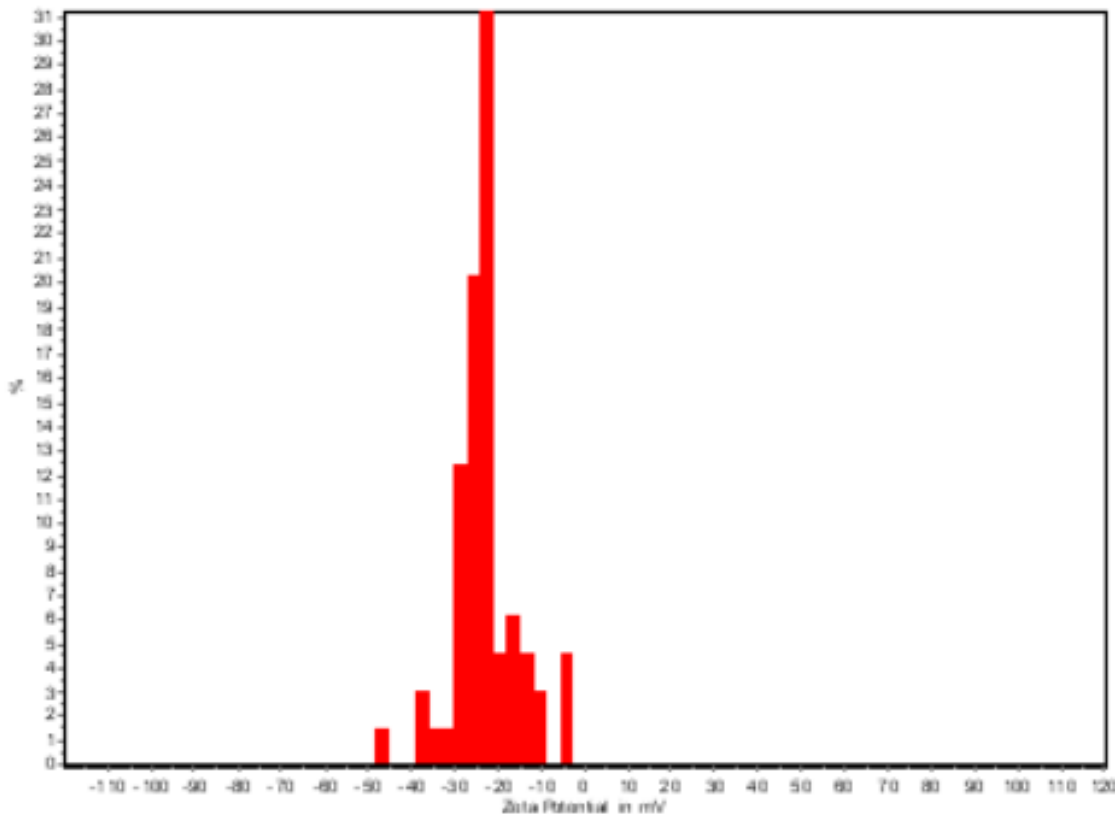
**Experiment Parameters**

Dielectric constant:	78.73	Temperature:	24.11°C
Electric Field:	7.77 V/cm	pH:	0.00
Conductivity:	0.017 mS/cm	Viscosity:	0.9086 mPas

**Statistics**

<u>Mobilities:</u>		<u>Zeta Potential:</u>	
Mean:	-2.18 $\mu\text{m}^2/\text{Vs}$	Mean:	-28.35 mV
Standard Deviation:	1.98	Standard Deviation:	25.85
Number of Trackings:	64	Coefficient:	13.03

**Mobilities Distribution**



نتایج آزمایش زتا پتانسیل میکرو- نانوحباب و فوق روان کننده:

## 2-MNB-2

2017/10/29

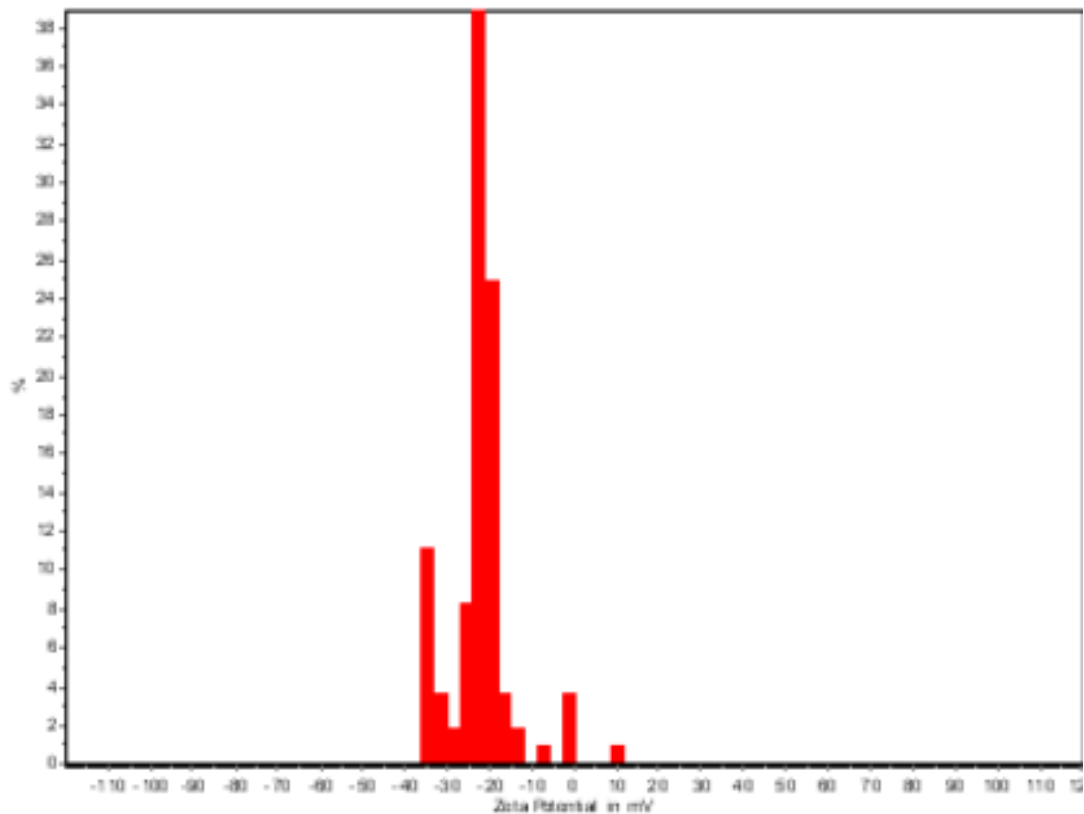
### Experiment Parameters

Dielectric constant:	78.69	Temperature:	24.24 °C
Electric Field:	8.57 V/cm	pH:	0.00
Conductivity:	0.085 mS/cm	Viscosity:	0.9059 mPas

### Statistics

<u>Mobilities:</u>		<u>Zeta Potential:</u>	
Mean:	-1.71 $\mu\text{m}^2/\text{Vs}$	Mean:	-22.21 mV
Standard Deviation:	0.58	Standard Deviation:	7.50
Number of Trackings:	108	Coefficient:	13.00

### Mobilities Distribution



## ۲-۷ پیوست ب:

جزئیات طرح اختلاط برای مقاومت 50MPa و مقاومت 50MPa در حضور 0.5% فوق

روان کننده با اسلامپ ۱۰۰ میلی‌متر:

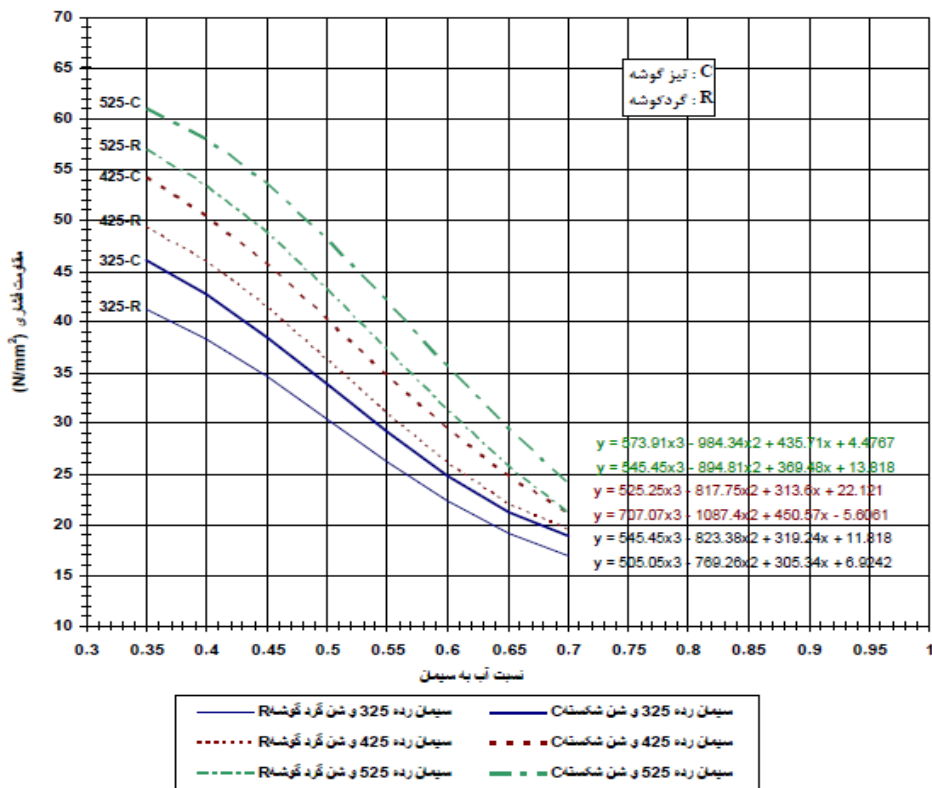
### گام اول تعیین نسبت به آب سیمان:

با استفاده از شکل زیر بر اساس مقاومت ملات استاندارد سیمان (رده مقاومتی سیمان) و مقاومت

فشاری متوسط بتن نسبت به آب به سیمان (W/C) تعیین می‌گردد. این منحنی با توجه به وجود ۱ تا ۲

درصد هوای غیر عمدی در بتن و بکارگیر سنگدانه‌هایی با حداکثر ۱۹ تا ۲۵ میلی‌متر ارائه شده است. در

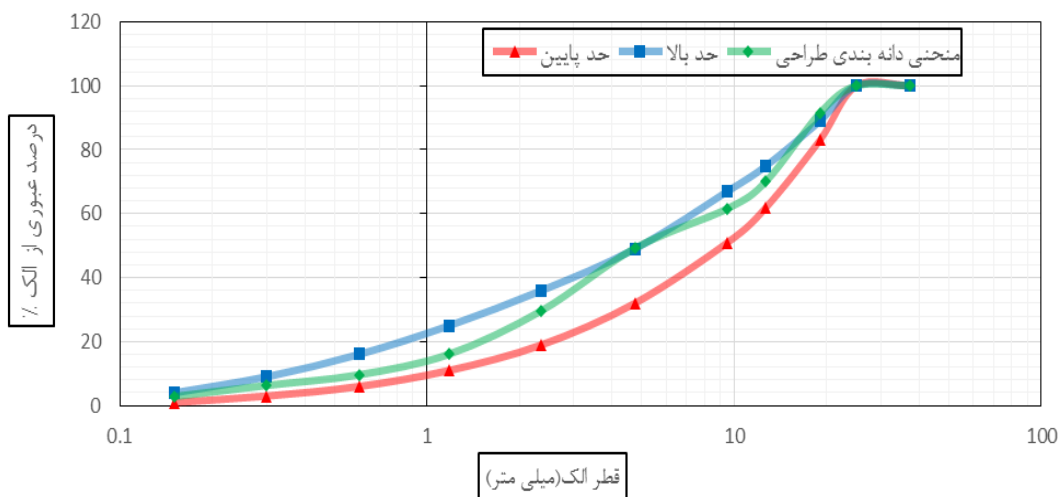
این طرح از سیمان تیب دو شاهرود با مقاومت ملات سیمان ۴۶۹ استفاده می‌شود.



شکل ۴-۱- رابطه نسبت آب به سیمان و مقاومت فشاری بدون مصرف روان کننده

که با توجه به نگاه چشمی به سنگدانه‌ها درصد گردگوشه 0.4 و درصد تیز گوشه 0.6 در نظر گرفته شده است. برای  $f_c=50$  با درون‌یابی 0.4 به دست آمد.

### گام دوم: انتخاب محدوده منحنی مخلوط سنگدانه بتن



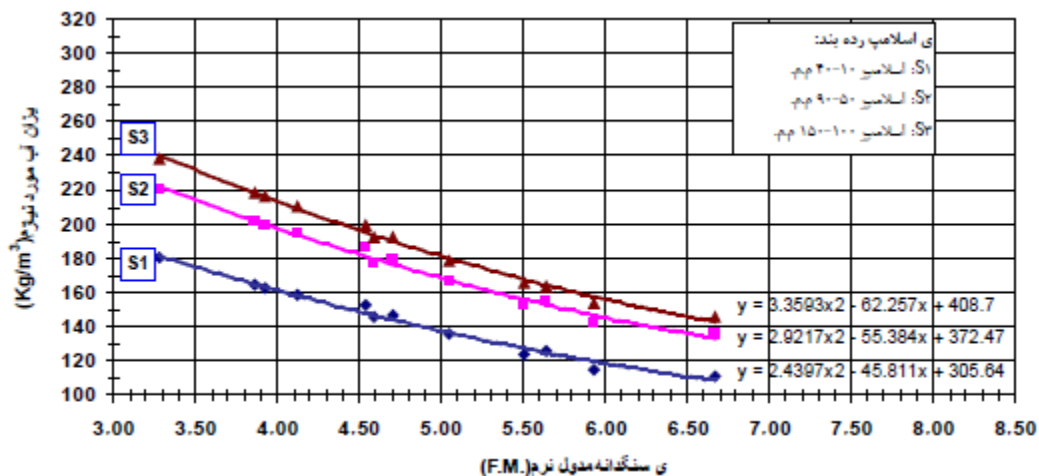
که درصد استفاده از ماسه 0.6 درصد و شن 0.35 درصد است.

تعیین مدول نرمی:

مدول نرمی مخلوط سنگدانه در روش بتن ملی مجموع درصدهای تجمعی مانده بر روی الک‌های 0.15-0.3-1.19-2.38-4.75-9.5-19-37.5 میلی متر تقسیم بر 100 است. که مدول نرمی در این پژوهش 5.33 به دست آمد.

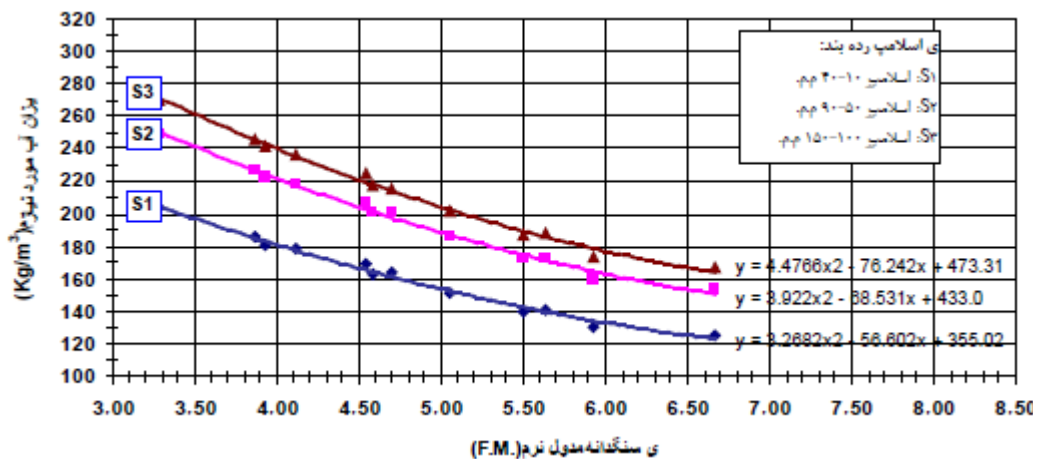
### گام سوم: تعیین مقدار آب آزاد بتن

رابطه مقدار آب آزاد بتن و مدول نرمی سنگدانه هنگامی که به آب کم نیاز است (دلیل گرد گوشگی سنگدانه‌ها)



رابطه مقدار آب آزاد بتن و مدول نرمی سنگدانه هنگامی که به آب زیاد نیاز است (به دلیل تیز

گوشگی سنگدانه ها)



که با توجه به مدول نرمی مقدار آب برای تیز گوشه 199 kg و برای گرد گوشه 173 kg می باشد

که با تناسب درصد های گرد گوشگی و تیز گوشگی مقدار آب 188.6 m<sup>3</sup> به دست می آید.

### گام چهارم: تعیین مقدار سیمان در بتن

نسبت آب به سیمان در گام اول به دست آمد آنگاه داریم:



$$C = \frac{Wf}{\frac{Wf}{C}} = \frac{188.6}{0.6} = 313.843 \text{ kg}$$

منحنی‌های ارائه شده برای عیار سیمان 350 kg/m<sup>3</sup> تهیه شده است. در صورتی که عیار سیمان بتن به میزان 10 kg/m<sup>3</sup> در هر جهت تغییر نماید مقدار آب آزاد مورد نیاز به میزان 1.5 تا 2 کیلوگرم باید در همان جهت تغییر کند (اعمال این تغییرات مستلزم محاسبه عیار سیمان بتن است که در مرحله بعد انجام می‌شود و اصطلاح مورد نظر فقط برای یک نوبت انجام می‌گردد و تکرار نمی‌شود).

اصلاح آب آزاد:

$$W = \left( \frac{350 - C}{10} \times 2 \right) - Wf = 209 \text{ kg}$$

$$C = \frac{209}{0.4} = 503 \text{ kg}$$

گام پنجم: تعیین مقدار سنگدانه بتن

با استفاده از رابطه حجم مطلق:

$$A_{SSD} = \rho_{A_{SSD}} \left( 1000 - \frac{c}{\rho_c} - \frac{w_f}{\rho_w} - \frac{D}{\rho_D} - V_a \right)$$

$$\begin{aligned}
 & A_{SSD} - \text{جرم کل سنگدانه‌های اشباع با سطح خشک بر حسب } kg/m^3 \\
 & c - \text{جرم سیمان بر حسب } kg/m^3 \\
 & w_f = \text{جرم آب آزاد بر حسب } kg/m^3 \\
 & D - \text{جرم مواد جایگزین سیمان بر حسب } kg/m^3 \\
 & V_a - \text{حجم هوای موجود در بتن (عمدی و ناخواسته) بر حسب } dm^3 \\
 & \rho_{A_{SSD}} = \text{وزن مخصوص متوسط سنگدانه‌های اشباع با سطح خشک بر حسب } g/cm^3 \\
 & \rho_c - \text{جرم مخصوص سیمان بر حسب } g/cm^3 \\
 & \rho_w - \text{جرم مخصوص آب بر حسب } g/cm^3 \text{ که معادل ۱ منظور می‌شود} \\
 & \rho_D = \text{جرم مخصوص افزودنی معدنی بر حسب } g/cm^3
 \end{aligned}$$

که در این پژوهش وزن مخصوص متوسط سنگدانه های با سطح اشباع را 2.53 در نظر گرفته شده است. وزن مخصوص سیمان با توجه به آیین‌نامه بتن ایران 3.15 در نظر گرفته شده است. طبق جدول زیر حجم هوای موجود با توجه اندازه حداکثر سنگدانه ها ۱ در نظر گرفته شده است.

۲ مقدار درصد هوای ناخواسته در بتن ( $V_a$ )

۳۸	۲۵	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	حداکثر اندازه سنگدانه (mm)
۰/۵-۱	۰/۷۵-۱/۵	۱-۲	۱/۲۵-۲/۵	۱/۵-۳	درصد هوای ناخواسته

$$= 2.53 \times \left( 1000 - \frac{503}{3.15} - \frac{209}{1} + 10 \right) = 1570 \text{ kg}$$

که با توجه به درصد شن و ماسه داریم:

شن: ۴۰ درصد کل سنگدانه ها: ۶۲۸ کیلوگرم ماسه: ۶۰ درصد کل سنگدانه ها: ۹۴۲ کیلوگرم.

برای مقاومت  $f_c=50\text{MPa}$  و 0.5% فوق روان کننده

با توجه به میزان مصرف و نوع فوق روان کننده طبق استاندارد ۲۹۳۰ ملی ایران ۱۲ درصد از آب

مصرفی را کم شد. گام اول تا گام سوم را محاسبه می‌کنیم سپس مقدار آب کاهش یافته محاسبه می‌شود:

$$W' = W - 0.12 \times W = 184 \text{ kg}$$

با ثابت نگه داشتن نسبت آب به سیمان، و آب اصلاح شده با اضافه کردن فوق روان کننده، مقدار سیمان اصلاح شد.  $C = \frac{W'}{0.4} = 443 \text{ kg}$ ، سپس مقدار فوق روان کننده با توجه به مقدار آن که 0.5% وزن سیمان است مقدار آن برابر است با:  $SP = 0.005 \times 443 = 2.2 \text{ kg}$  بعد از حساب مقدار فوق روان کننده آب دوباره اصلاح می کنیم و به مقدار فوق روان کننده از آب کم می کنیم که مقدار آب مصرفی برابر با ۱۸۲ کیلوگرم است.

با مقدار جدید سیمان و آب مصرفی، مقدار سنگدانه ی بتن را حساب می کنیم:

$$2.53 \times \left( 1000 - \frac{443}{3.15} - \frac{182}{1} + 10 \right) = 1688 \text{ kg}$$

که با توجه به درصد شن و ماسه داریم:

شن: ۴۰ درصد کل سنگدانه ها: ۶۷۵ کیلوگرم      ماسه: ۶۰ درصد کل سنگدانه ها: ۱۰۱۲ کیلوگرم.



## فرکوپلاست

### ● میزان مصرف

- PR قابل استفاده به میزان ۰/۵ تا ۱/۴ درصد نسبت به وزن ترکیبات سیمانی میباشد.
- میزان مصرف با توجه به طرح اختلاط و خصوصیات مورد نیاز تعیین میشود.
- پیشنهاد میشود جهت تعیین میزان مصرف PR و تاثیر آن بر روی خواص بتن تازه و سخت شده مانند کارایی، حفظ کارایی، گیرش و مقاومت های اولیه و نهایی تست هایی در محل کارگاه و با مصالح و شرایط موجود انجام گردد.

### ● روش استفاده

- آماده به مصرف و با هر نسبتی با آب مخلوط میشود.
- هم زمان با آب اختلاط به میکسر میتوان اضافه کرد.
- بطور مستقیم به سیمان و ترکیبات خشک افزوده نشود.
- در پایان عمل اختلاط میتوان به میکسر پیچشگ و یا به داخل تراک میکسرافزود. در این حالت به ازاء هر متر مکعب یک دقیقه اختلاط با دور تند انجام شود.

### ● سازگاری با ترکیبات سیمانی

مناسب برای استفاده با انواع سیمان و با ترکیبات جایگزین سیمانی از جمله : خاکستر بادی، میکروسلیس و سرباره می باشد.

### ● سازگاری با افزودنی های دیگر

با سایر افزودنیها از پیش مخلوط یا مصرف نشود مگر آنکه تولیدکننده مجاز بدانند.  
توصیه میشود که در چنین شرایطی با واحد فنی شرکت شیمی ساختمان مشورت شود.

### ● بسته بندی

PR در گالن های ۲۰، بشکه های ۲۲۰ و مخازن ۱۱۰۰ کیلوگرمی عرضه میشود.

### ● انبار داری

توصیه میشود که انبارداری در دمای ۵ تا ۴۰ درجه سانتیگراد به دور از تابش مستقیم آفتاب باشد. در صورت یخ زدگی دمای مواد را بالا آورده تا ذوب و سپس توسط یک میکسر مخلوط شود.

### ● عمر نگهداری

در صورت حفظ و نگهداری در شرایط مناسب پیشنهادی و در بسته بندی اولیه تا ۱۲ ماه قابل استفاده میباشد.

### ● موارد ایمنی

PR ماده ای کم ضرر میباشد. در شرایط عادی آسیبی به پوست نمی رساند. اما بعنوان یک ترکیب شیمیایی و رعایت موارد احتیاطی برای جلوگیری از تماس با پوست و یا چشم از دستکشهای محافظ و عینک استفاده شود و یا پس از تماس مستقیم با پوست یا چشم با آب شسته شود.

### ● خدمات فنی

بخش فنی شرکت شیمی ساختمان در جهت ارائه مشاوره فنی مربوط به بتن و بتن ریزی و نحوه استفاده صحیح از مواد خود در کارگاه آماده همکاری و انجام خدمات میباشد.



242 Bldg., Mirdamad Blvd., After Naft St., Tehran, Iran  
Tel: +98 21 (22263100 , 22263099 , 22259736) Fax: +98 21 22260586

شیمی ساختمان





FARCO PLAST PR

فرکوپلاست

### فوق روان کننده قوی بتن با خواص حفظ اسلامپ بالا

#### مشخصات

- تولید بتن با اسلامپ تاخیری ۲ تا ۶ ساعت، بدون افت مقاومت، قابل استفاده در شرایط آب و هوای گرم و معتدل
- کاهش ترکهای ناشی از جمع شدگی
- کاهش نفوذپذیری در مقابل آب، کلراید و سولفات بدلیل کاهش شدید نسبت آب به سیمان
- افزایش مقاومت سایشی و دوام بتن در مقابل سبکلهای یخ و ذوب بدلیل کاهش نسبت آب به سیمان
- حفظ کارایی در طول زمان و جلوگیری از ایجاد درز سرد در فواصل بتن ریزی
- بهبود و تسهیل عملیات پمپاژ و تراکم
- PR جهت تولید بتن با کارایی بالا و توان حفظ اسلامپ در زمان طولانی طراحی گردیده است، این محصول کاهش در مقاومتهای سنین اولیه داشته که در سنین ۷ تا ۲۸ روز عامل افزایش مقاومت فشاری نسبت به بتن شاهد میشود.
- کاهش میزان مصرف در مقایسه با افزودنیهای پلی کربوکسیلات معمولی.

PR فوق روان کننده نسل سوم برپایه پلی کربوکسیلاتهای اصلاح شده.  
این محصول با خواص حفظ اسلامپ بتن در زمان طولانی و تاخیری ۲ تا ۶ ساعت طراحی گردیده است.

#### نحوه اثر گذاری

PR دارای مکانیسم اثر گذاری به دو صورت به شرح زیر میباشد:  
• ایجاد غشاء بر روی سطح ذرات سیمان نموده و ممانعت فضایی ناشی از ضخامت لایه جذب شده، از تجمع ذرات سیمان جلوگیری میکند.  
• ایجاد نیروی دافعه بین ذرات سیمان ناشی از جذب ذرات پلیمر و تشکیل بار های همنام

#### اثر بر روی حفظ کارایی بتن

• بتن اصلاح شده با فوق روان کننده PR کارایی خود را در حدود ۲ تا ۶ ساعت در دمای ۲۰°C (دمای داخلی بتن) حفظ می نماید.  
• مدت زمان حفظ کارایی نه تنها به دمای بتن بستگی داشته، بلکه به نوع سیمان، دانه بندی، نحوه جابجایی و مقدار افزودنی نیز بستگی دارد.

#### موارد مصرف

- بتن ریزی به روش ترمی
- بتن یا حمل های طولانی
- بتن ریزی در شرایط آب و هوای گرم
- مناسب جهت بتن با سیمان های با افت اسلامپ بالا
- بتن ریزی در مسیر و پمپاژ طولانی در آب و هوای گرم و معتدل
- ساخت بتن های فوق روان همراه با میکروسیلیس، خاکستر بادی و سرباره

#### مزایای استفاده از PR

- عدم ایجاد آب انداختگی و جداسازی با افزایش روانی در مقادیر مصرف بالا

#### مطابقت با استاندارد

- ASTM C494 Type G
- EN 934-2 – Table 11.1/11.2
- ISIRI 2930 – Table 12.13

#### خصوصیات فیزیکی و شیمیایی

ترکیب شیمیایی	کوپلیمر های اصلاح شده پلی کربوکسیلیک اسید
طبیعت یونی	آنونی
رنگ	سبز تیره
حالت فیزیکی	مایع
وزن مخصوص (kg/lit)	1.1 ± 0.02 20°C
کلراید (PPM)	500 Max



## **Abstract**

Due to the increasing use of nanomaterials in the concrete industry, there are many researchers in this field. One of the newest nanomaterials - the use of micro-nano-bubbles (MNB) - as a supplement to water, can be used to have special effects in concrete properties. Some of these effects can be used to improve or weaken the properties of hardened and fresh concrete. One of the effects observed in concrete containing MNB has been the reduction of concrete workability. Due to the properties of super-plasticizers, using of it can have an effective role in reducing some negative effects of MNB on concrete properties.

This research has investigated on coincident effect of using MNB and super-plasticizer on mechanical properties of concrete. This research has two parts, in the first part, the effect of MNB on mechanical properties of concrete was studied that 4 mixing designs with water to cement ratio (0.35, 0.4, 0.5, and 0.6) for making concrete have been used, then in the second part, the effect of MNB in presence of 3 super-plasticizer concentrations (0.5%, 0.9%, 1.4%) on the mechanical properties of concrete were studied that 3 mixing designs with water to cement ratio (0.4, 0.5, and 0.6) for making concrete have been used. For this purpose, 16 samples of cement paste for setting time test, 16 samples of cement mortar for flow of hydraulic cement mortar test, 48 samples of cement mortar for compressive strength of mortar test, 60 samples of concrete for concrete slump test, 156 samples of concrete for compressive strength of concrete test, 96 samples of concrete for tensile strength test and 12 samples of cement mortar for accelerated mortar bar test, were prepared and tested.

The results of the experiments showed that MNB caused to accelerate setting time of cement, reduced concrete workability and mortar flowability and increased compressive strength considering to the amount of cement at the age of 7 and 28 days. Also, adding super-plasticizer in the presence of MNB in concrete showed that setting time of cement paste increased and concrete workability (W/C=0.4) in comparison with the samples containing MNB increased by an

average of 50% and the 7-day compressive strength of concrete at concentrations of 0.5 and 0.9% has increased and compressive strength of concrete the age of 28 and 90 days at 3 concentrations of the super-plasticizer has decreased.

**Keywords:** Concrete, Micro-Nano Bubble, Super-Plasticizer, Concrete Mechanical Properties, Workability







**Shahrood University of Technology**

**Faculty of Civil Engineering**

**M.Sc. Thesis in Water Engineering and Hydraulic Structures**

**Experimental Study of the Micro-Nano Bubble Efficacy and Super  
Plasticizer on the Concrete Mechanical Properties**

**By: Ali Torki**

**Supervisors:**

**Dr. Seyed Fazoallah Saghraani**

**Dr. Jalil Shafaei**

**January 2018**