

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست

بررسی خواص بتن سازگار با محیط زیست در حوزه سازه های دریایی

نگارنده:

پوریا محسن زاده

اساتید راهنما

دکتر سید فضل الله ساغروانی

دکتر غلامرضا اسداله فردی

بهمن ۱۳۹۶

شماره: ۹۶  
تاریخ: ۱۵ آذر ۸۷

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 آقای پوریا محسن زاده با شماره دانشجویی ۹۴۱۵۸۲۴ رشته مهندسی عمران گرایش مهندسی محیط زیست تحت عنوان "بررسی خواص بتن سازگار با محیط زیست در حوزه سازه های دریایی" که در تاریخ ۱۳۹۶/۱۱/۰۲ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

<input type="checkbox"/> مردود <input checked="" type="checkbox"/> قبول (با درجه: .....)			
<input type="checkbox"/> عملی <input checked="" type="checkbox"/> نظری			
امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	دانشیار	دکتر سید فضل الله ساغروانی	۱- استاد راهنمای اول
	استاد	دکتر غلامرضا اسداله فردی	۲- استاد راهنمای دوم
	-	-	۳- استاد مشاور
	استادیار	دکتر محمد شامخی امیری	۴- نماینده تحصیلات تکمیلی
	دانشیار	دکتر علی کیهانی	۵- استاد ممتحن اول
	استادیار	دکتر سید علی حسینی	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر احمد احمدی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم به

خدایی که آفرید

جهان را، انسان را، عقل را، علم را، معرفت را و عشق را

و به کسانی که عشقشان را در وجودم دمید...

تقدیم به

پدر بزرگوار، مهربانی مشفق، بردبار و حامی.

و مادر عزیزتر از جانم، که زندگیم را مدیون مهر و عطوفتش می دانم.

و تقدیم به برادران عزیزم پدرام و محمد حسین، که وجودشان مایه آرامش و دلگرمی من است.

## «من لم يشكر المخلوق لم يشكر الخالق»

بسی شایسته است از اساتید فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر فردی و جناب آقای دکتر ساغروانی که با کرامتی چون خورشید، راهنمایی‌های کارساز و سازنده و در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند، تقدیر و تشکر نمایم.

اساتیدی که لذت و غرور دانستن، جسارت خواستن، عظمت رسیدن و تمام تجربه‌های زیبای زندگی، مدیون حضور سبز آنهاست.

و با تشکر خالصانه خدمت همه کسانی که به نوعی مرا در به انجام رساندن این مهم یاری نموده‌اند.

## تعهدنامه

اینجانب پوریا محسن زاده دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران - محیط زیست دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان - نامه " بررسی خواص بتن سازگار با محیط زیست در حوزه سازه های دریایی " تحت راهنمایی دکتر سید فضل الله ساغروانی و دکتر غلامرضا اسدالله فردی " متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام گردیده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه 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 شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند، در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت گردیده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت گردیده است.

امضاء دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه 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

تاکنون مطالعات زیادی در خصوص جایگزینی بخشی از سیمان مصرفی در بتن با پوزولان های مناسب که باعث بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن می گردند، انجام شده است. این تحقیق به بررسی اثر استفاده از متاکائولین و زئولیت بجای سیمان مصرفی در بتن، آب میکرو-نانوحباب به عنوان جایگزین آب طرح اختلاط و ترکیب درصد بهینه زئولیت و متاکائولین در اختلاط با آب میکرو-نانو حباب با انجام آزمایش های مقاومت فشاری (BS 1881)، خمشی (ASTM C78)، کششی (ASTM C496)، الکتریکی (FM 5-578)، جذب آب (BS 1881)، نفوذ تسریع شده یون کلراید (ASTM C1202) و میکروسکوپ الکترونی در شرایط عمل آوری استاندارد شامل آب و آهک اشباع شده و بصورت موردی در شرایط عمل آوری در آب دریای مصنوعی مطابق استاندارد (ASTM D1141) پرداخته است. نتایج آزمایش ها نشان داد که در شرایط عمل آوری استاندارد استفاده از ۱۰ درصد متاکائولین سبب افزایش مقاومت به مقدار ۴/۷۵، ۲۵، ۱/۹۷ درصد بترتیب در آزمایش های مقاومت فشاری، کششی، خمشی و کاهش نفوذ یون کلر به مقدار ۵۶/۳۶ درصد در آزمایش نفوذ کلراید در سن ۲۸ روز نسبت به نمونه شاهد شده است همچنین این موضوع در نمونه حاوی ۱۰ درصد زئولیت به مقدار ۳/۷ درصد افزایش در مقاومت فشاری و به مقدار ۴/۳۴ و ۱۶/۶۱ درصد کاهش در جذب آب ۳۰ دقیقه و جذب آب ۲۴ ساعت مشاهده شده است. نمونه های حاوی آب میکرو-نانوحباب با درصد جایگزینی ۵۰ و ۱۰۰ درصد جایگزین آب مخلوط بتن بترتیب سبب افزایشی به مقدار ۸/۸۲ و ۱۳/۲ درصد در آزمایش مقاومت فشاری، ۱۰ و ۱۹/۶۴ درصد در آزمایش مقاومت کششی و کاهش به مقدار ۱۶/۰۸ و ۲۰ درصد در آزمایش جذب آب ۳۰ دقیقه در سن ۲۸ روز نسبت به نمونه شاهد شده است. اثر هم زمان استفاده از زئولیت و متاکائولین در اختلاط با آب میکرو-نانوحباب سبب بهتر شدن خواص مکانیکی و دوام بتن شده که بهترین نمونه ساخته شده مربوط به ترکیب ۱۰ درصد زئولیت به همراه ۱۰ درصد متاکائولین در اختلاط با ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانو حباب بوده که سبب بهتر شدن خواص مکانیکی بتن در آزمایش های مقاومت فشاری و کششی به مقدار ۱۴/۸۵ و ۱۸/۳۷ درصد افزایش و بهتر شدن خواص دوام بتن در آزمایش های جذب آب ۲۴ ساعت و نفوذ تسریع شده یون کلراید به مقدار ۱۷/۵۶ و ۸۰/۴۵ درصد کاهش در سن ۹۰ روز

نسبت به نمونه شاهد شده است. بر اساس نتایج بدست آمده در آزمایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز مشاهده شد که عمل آوری نمونه حاوی ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب در آب دریا سبب افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی به مقدار ۹۷/۶، ۷۱/۱۰ و ۱۱ درصد نسبت به نمونه مشابه در شرایط عمل آوری شده در شرایط عمل آوری استاندارد شده است. همچنین در نمونه حاوی ۱۰ درصد زئولیت به همراه ۱۰ درصد متاکائولین در اختلاط با ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانو حباب در سن ۲۸ روز عمل آوری شده در آب دریا سبب افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی به مقدار ۱۳/۱۱، ۱۴ و ۱/۹ درصد و سبب کاهش نفوذ کراید و جذب آب ۲۴ ساعته به مقدار ۱۹/۱۵ و ۸۶/۷ درصد نسبت به نمونه مشابه در شرایط عمل آوری استاندارد شده است.

واژه‌های کلیدی: متاکائولین، زئولیت، آب میکرو-نانوحباب، خواص مکانیکی، خواص دوام، آب دریا



## لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱- محسن زاده، پ. ساغروانی، س.ف. اسدالله فردی، غ. (۱۳۹۶)، " بررسی خواص مکانیکی بتن حاوی متاکائولین در اختلاط با آب میکرو-نانو حباب"، پنجمین کنفرانس ملی پژوهش های کاربردی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دی ماه ۹۶، تهران.

۲- محسن زاده، پ. ساغروانی، س.ف. اسدالله فردی، غ. (۱۳۹۶)، " بررسی خواص مکانیکی بتن حاوی زئولیت در اختلاط با متاکائولین و آب میکرو-نانو حباب"، پنجمین کنفرانس ملی پژوهش های کاربردی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دی ماه ۹۶، تهران.

## فهرست عنوان‌ها

فصل ۱ کلیات .....	۱
۱-۱-مقدمه .....	۲
۲-۱-بیان مسئله .....	۳
۳-۱-ضرورت انجام تحقیق .....	۳
۴-۱-اهداف تحقیق .....	۴
۵-۱-زمینه نوآوری تحقیق .....	۵
۶-۱-روش تحقیق .....	۵
۷-۱-سازمان بندی پایان نامه .....	۵
فصل ۲ مروری بر ادبیات و پیشینه تحقیق .....	۷
۱-۲-مقدمه .....	۸
۲-۲-بتن .....	۸
۳-۲-پوزولان .....	۸
۱-۳-۲-طبقه بندی پوزولانها.....	۹
۲-۳-۲-پوزولان مصنوعی.....	۹
۳-۳-۲-پوزولان طبیعی.....	۱۰
۴-۲-تاریخچه شناخت ژئولیت .....	۱۰
۱-۴-۲-خاصیت پوزولانی ژئولیت.....	۱۲
۵-۲-کاربردهای ژئولیت در بتن .....	۱۲
۱-۵-۲-تأثیر ژئولیت بر خواص بتن تازه.....	۱۳
۲-۵-۲-تأثیر ژئولیت بر بتن سخت شده.....	۱۳
۶-۲-خواص مکانیکی ژئولیت .....	۱۴

۱۸	۷-۲- خواص انتقال
۱۹	۸-۲- خاصیت پوزولانی متاکائولین
۲۰	۱-۸-۲- کاربرد متاکائولین در بتن
۲۰	۲-۸-۲- ترکیب متاکائولین با آب دریا
۲۱	۹-۲- بتن در محیطهای دریایی
۲۶	۱۰-۲- کلیاتی از میکرو نانو حبابها
۲۷	۱-۱۰-۲- بتن ساخته شده با میکرو نانو حباب
۲۹	فصل ۳ مواد و روش ها
۳۰	۱-۳- مقدمه
۳۰	۲-۳- برنامه آزمایشها
۳۰	۳-۳- خصوصیات مصالح
۳۰	۱-۳-۳- آب
۳۱	۲-۳-۳- آب دریای مصنوعی
۳۱	۴-۳-۳- سنگدانه
۳۲	۵-۳-۳- فوق روان کننده
۳۳	۶-۳-۳- آب میکرو-نانوحباب
۳۴	۴-۳- نسبت مخلوط
۳۸	۵-۳- برنامه آزمایشگاهی
۳۸	۱-۵-۳- نحوه اختلاط و قالب گیری
۳۹	۲-۵-۳- عمل آوری نمونه ها
۳۹	۳-۵-۳- آزمایش نمونه ها
۳۹	۱-۳-۵-۳- آزمایش اسلامپ
۴۱	۲-۳-۵-۳- آزمایش مقاومت فشاری
۴۲	۳-۳-۵-۳- آزمایش مقاومت کششی (برزیلی)
۴۳	۴-۳-۵-۳- آزمایش مقاومت خمشی
۴۵	۵-۳-۵-۳- آزمایش جذب آب ۳۰ دقیقه و ۲۴ ساعت
۴۶	۶-۳-۵-۳- آزمایش نفوذپذیری تسریع شده یون کلراید (RCPT)
۴۷	۷-۳-۵-۳- آزمایش مقاومت الکتریکی
۴۸	۸-۳-۵-۳- آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM

فصل ۴ تجزیه و تحلیل داده ها	۵۱
۴-۱- مقدمه	۵۲
۴-۲- دانه بندی سنگدانه ها	۵۲
۴-۳- سیمان	۵۴
۴-۴- پوزولان طبیعی زئولیت	۵۵
۴-۵- پوزولان متاکائولین	۵۷
۴-۶- نتایج میکروسکوپ الکترونی سیمان پرتلند، زئولیت و متاکائولین	۵۹
۴-۷- آزمایش اسلامپ	۶۰
۴-۸- مقاومت فشاری	۶۱
۴-۹- آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم	۶۴
۴-۱۰- مقاومت خمشی	۶۵
۴-۱۱- آزمایش جذب آب	۶۷
۴-۱۲- مقاومت الکتریکی	۶۹
۴-۱۳- نفوذ تسریع شده یون کلراید (RCPT)	۷۱
۴-۱۴- آزمایش میکروسکوپ الکترونی (SEM)	۷۲
۴-۱۵- بررسی خواص مکانیکی و دوام بتن حاوی متاکائولین و زئولیت در اختلاط با آب میکرو-نانوحباب در شرایط عمل آوری در آب دریا	۷۶
۴-۱۵-۱- مقاومت فشاری	۷۷
۴-۱۵-۲- آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم	۷۸
۴-۱۵-۳- آزمایش مقاومت خمشی	۸۰
۴-۱۵-۴- آزمایش جذب آب	۸۱
۴-۱۵-۵- مقاومت الکتریکی	۸۳
۴-۱۵-۶- نفوذ تسریع شده یون کلراید	۸۴
فصل ۵ نتیجه گیری و پیشنهادات	۸۷
۵-۱- مقدمه	۸۸
۵-۲- جمع بندی نتایج آزمایشات در سن ۲۸ روز	۸۸

۹۱..... ۳-۵- پیشنهادات تحقیقات آینده

۹۲..... منابع

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۳-۱ دستگاه لرزاننده الک ها ..... ۳۲
- شکل ۳-۲ منحنی توزیع ابعادی میکرو-نانوحباب تولید شده در آب ..... ۳۴
- شکل ۳-۳ ابزارهای موردنیاز آزمایش اسلامپ ..... ۴۰
- شکل ۳-۴ افت بتن در آزمایش اسلامپ ..... ۴۱
- شکل ۳-۵ جک هیدرولیکی استفاده شده برای آزمایش مقاومت فشاری ..... ۴۲
- شکل ۳-۶ آزمایش مقاومت کششی (برزیلی) ..... ۴۳
- شکل ۳-۷ شکل هندسی دستگاه آزمون مقاومت خمشی بتن - روش بارگذاری چهار نقطه‌ای ..... ۴۴
- شکل ۳-۸ آزمایش مقاومت خمشی تیر بتنی قبل و بعد از شکست نمونه ..... ۴۴
- شکل ۳-۹ دستگاه جک هیدرولیکی استفاده شده برای آزمایش مقاومت خمشی ..... ۴۵
- شکل ۳-۱۰ میله دوشاخه مورد استفاده در آزمایش مقاومت خمشی ..... ۴۵
- شکل ۳-۱۱ دستگاه آزمایش RCPT ..... ۴۷
- شکل ۳-۱۲ دستگاه آزمایش مقاومت الکتریکی ..... ۴۸
- شکل ۳-۱۴ دستگاه تصویربرداری الکترونی روبشی SEM ..... ۴۹
- شکل ۴-۲ منحنی دانه بندی شن بادامی با اندازه ذرات ۱۲/۵ تا ۱۹ میلی متر ..... ۵۳
- شکل ۴-۳ منحنی دانه بندی ماسه با اندازه ذرات ۰/۱۵ تا ۴/۷۵ میلی متر ..... ۵۴
- شکل ۴-۴ منحنی مخلوط ۰/۵۵ درصد شن به ۰/۴۵ درصد ماسه و مقایسه با منحنی استاندارد ..... ۵۴
- شکل ۴-۵ پوزولان طبیعی زئولیت ..... ۵۶
- شکل ۴-۶ نمودار آزمایش XRD پوزولان زئولیت ..... ۵۷
- شکل ۴-۷ پوزولان متاکائولین ..... ۵۷
- شکل ۴-۸ نمودار XRD پوزولان متاکائولین ..... ۵۸
- شکل ۴-۹ تصاویر SEM سیمان، متاکائولین و زئولیت ..... ۶۰
- شکل ۴-۱۰ نمودار مقاومت فشاری ..... ۶۴
- شکل ۴-۱۱ نمودار مقاومت کششی ..... ۶۵

- شکل ۴-۱۲ نمودار مقاومت خمشی..... ۶۶
- شکل ۴-۱۳ درصد جذب آب در ۳۰ دقیقه..... ۶۸
- شکل ۴-۱۴ درصد جذب آب در ۲۴ ساعت..... ۶۹
- شکل ۴-۱۵ نمودار مقاومت الکتریکی..... ۷۰
- شکل ۴-۱۶ نمودار نفوذپذیری یون کلراید..... ۷۲
- شکل ۴-۱۷ (الف) نمونه حاوی آب میکرو-نانوحباب و نمونه ترکیبی با بتن شاهد..... ۷۳
- شکل ۴-۱۷ مقایسه میکروساختار بتن توسط تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی..... ۷۴
- شکل ۴-۱۸ نمودار مقاومت فشاری..... ۷۸
- شکل ۴-۱۹ نمودار مقاومت کششی..... ۸۰
- شکل ۴-۲۰ نمودار مقاومت خمشی..... ۸۱
- شکل ۴-۲۱ نمودار درصد جذب آب در ۳۰ دقیقه..... ۸۳
- شکل ۴-۲۲ نمودار درصد جذب آب در ۲۴ ساعت..... ۸۳
- شکل ۴-۲۳ نمودار مقاومت الکتریکی..... ۸۴
- شکل ۴-۲۴ نمودار نفوذپذیری یون کلراید..... ۸۵

## فهرست جدول‌ها

- جدول ۳-۱- مشخصات شیمیایی آب شهری ..... ۳۰
- جدول ۳-۲- ترکیب شیمیایی آب دریا ساخته شده (G/L) ..... ۳۱
- جدول ۳-۳- ویژگی های فوق روان کننده ..... ۳۲
- جدول ۳-۴- مشخصات آب میکرو-نانوحباب ..... ۳۳
- جدول ۳-۴- نسبت های مخلوط یک مترمکعب بتن ..... ۳۵
- جدول ۳-۵- کدگذاری نمونه ها ..... ۳۷
- جدول ۳-۷- مشخصات جک هیدرولیکی TONI TECHNIK (برگرفته از کاتالوگ دستگاه) ..... ۴۱
- جدول ۴-۱- مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۴۲۵-۱ تهران ..... ۵۵
- جدول ۴-۲- مشخصات شیمیایی پوزولان طبیعی زئولیت ..... ۵۶
- جدول ۴-۳- مشخصات شیمیایی پوزولان طبیعی متاکائولین ..... ۵۸
- جدول ۴-۴- نتایج آزمایش اسلامپ ..... ۶۱







# فصل ۱ کلیات

بتن در حال حاضر جزو پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی دنیا می‌باشد (Sabir et al, 2001). امروزه بتن به دلایلی از جمله وجود برخی ویژگی‌ها نظیر قابلیت شکل‌پذیری، مقاومت فشاری بالا، دوام در شرایط محیطی مختلف، در دسترس بودن مصالح مورد نیاز برای ساخت آن و قیمت مناسب مورد توجه ویژه بوده و به عنوان ماده ساختمانی قرن بیست و یکم مطرح گردیده است.

در ایران نیز با توجه به حجم بالای پروژه‌های عمرانی و در دسترس بودن نسبی مصالح مورد نیاز برای تولید سیمان، استفاده از بتن بسیار رواج دارد. در چند دهه گذشته، دوام بتن به عنوان عاملی مهم و اساسی در طول عمر مفید سازه‌های بتنی در نظر مهندسين قرار داشته است. در عین حال با توجه به گسترده‌گی ساخت و ساز و فعالیت‌های عمرانی در دنیا دسترسی به سیمان با کیفیت و قیمت مناسب مورد توجه بوده است.

از طرف دیگر مطالعات نشان داده است که تولید سیمان علاوه بر آن که مقادیر متناهی از منابع طبیعی مانند سنگ آهک، سوخت‌های فسیلی و غیره را از بین می‌برد، به ازای هر تن سیمان تولید شده حدود ۰/۸ تن گاز دی‌اکسید کربن که یکی از گازهای گلخانه‌ای آلاینده محیط زیست می‌باشد نیز ایجاد می‌شود (فامیلی، ۱۳۷۹). تخمین زده می‌شود که حدوداً ۷ درصد از گازهای CO<sub>2</sub> تولید شده در جهان توسط صنعت سیمان است و این میزان تولید گازهای گلخانه‌ای می‌تواند اثرات زیادی بر گرم شدن زمین و عوارض آن داشته باشد (فامیلی، ۱۳۷۹). چالش‌های زیست محیطی پیش آمده در دهه‌های اخیر در مورد افزایش دمای اتمسفر زمین و لزوم کاهش انتشار گازهای CO<sub>2</sub> در جهان، کاهش مصرف انرژی و استفاده از مواد خام طبیعی، در کنار اعمال پروتکل کیوتو در سال ۱۹۹۷ (در مورد دگرگونی جو زمین) و همچنین با توجه به بیانیه ریود ژانیرو پیرامون محیط زیست و توسعه در سال ۱۹۹۲، بنا به اصل ۳ بیانیه ریو (حق توسعه باید به نحوی اعمال شود که متساویاً نیازهای نسل کنونی و نسل‌های آینده را در زمینه توسعه و حفظ محیط زیست برآورده سازد) و اصل ۴ بیانیه ریو (به منظور نیل به توسعه پایدار، حفاظت از محیط زیست جزو لاینفکی از فرآیند توسعه بوده و نمیتواند

جدا از آن مدنظر قرار گیرد) باعث افزایش دامنه تحقیقات در خصوص یافتن جایگزین‌های مناسب برای سیمان در جهت کاهش آثار زیست محیطی و هزینه تولید بتن شده است.

### ۱-۲- بیان مسئله

امروزه به دلیل گسترش و اهمیت فعالیت‌های نفتی و حمل و نقل دریایی و همچنین توجه به استخراج معادن در بستر دریاها، فعالیت‌های دریایی مانند ساخت اسکله، سکوها و سازه‌های نظیر آن در مناطق ساحلی و دریایی افزایش چشمگیری داشته است. هرچند بتن به عنوان یک ماده‌ی با دوام در محیط دریا محسوب می‌شود، اما خرابی‌های زیادی از سازه‌های بتنی نظیر اثرات سولفات‌های پتاسیم و منیزیم ( $MgSO_4$  و  $K_2SO_4$ ) موجود در آب دریا بر سیمان و همچنین نفوذ یون‌های کلر در بتن که موجب تسریع خوردگی آرماتور می‌شوند، مخصوصاً در کنار سواحل جنوبی کشور گزارش شده است. سازوکارهای اصلی تخریب سازه‌های بتنی در محیط دریایی شامل خوردگی میلگردهای کار گذاشته شده در بتن، تجزیه و تخریب بتن، چرخه‌های یخ زدن و آب شدن و واکنش سیلیسی-قلیایی است که بررسی و کاهش اثرات فوق امری مهم به شمار می‌رود. در نتیجه لازم است به منظور غلبه بر مشکلات اشاره شده، بتنی طراحی و ساخته شود که علاوه بر بهبود خواص بتن معمولی، قابلیت استفاده موثر در مناطق ساحلی و دریایی و همچنین خصوصیت سازگاری با محیط زیست را از طریق کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای (کربن دی اکسید) داشته باشد.

### ۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

با استفاده از جایگزینی پوزلان‌ها که می‌توان سبب کاهش میزان سیمان مصرفی در بتن و در نتیجه کاهش انتشار گاز کربن دی اکسید در محیط زیست شد که این امر موجبات جلوگیری از گرمایش روزافزون کره‌ی زمین و حرکت به سوی توسعه‌ی پایدار خواهد شد. همچنین بتن‌های سازگار با محیط‌های دریایی می‌بایست دارای خصوصیات ویژه‌ای باشند که در این تحقیق سعی بر آن شده که این خواص در نمونه بتن‌های ساخته شده به صورت موردی بررسی گردد. از جمله این خواص

مقاومت فشاری، نفوذپذیری در برابر یون کلراید و دوام می باشد که توسط آزمایش های استاندارد در محیط آزمایشگاهی مطابق با شرایط بهره برداری مورد ارزیابی قرار می گیرد.

#### ۱-۴-اهداف تحقیق

با گسترش ساخت و ساز و افزایش چشمگیر پروژه های عظیم و پرهزینه، نیاز به تولید مصالح با بیشترین بازدهی و در عین حال کمترین هزینه بیش از پیش احساس می شود. یکی از روشهای مدرن در تولید مصالح با بالاترین کیفیت استفاده از فن آوری نانو و پوزولان ها است که در سالهای اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. با این حال کشورهای در حال توسعه برای استفاده از فن آوری نانو با مشکلاتی اعم از، عدم وجود تکنولوژی تولید مواد در سائز نانو و بالا بودن هزینه ی تهیه این مواد روبرو هستند. کاهش استفاده از سیمان در ساخت بتن از یک طرف باعث کاهش مصرف منابع طبیعی و آلودگی هوا که همسوی با اهداف توسعه پایدار هستند، می شود و از طرف دیگر باعث ایجاد صرفه ی اقتصادی در مدیریت هزینه های مواد اولیه بتن می گردد. بنابراین هدف از انجام این مطالعه پاسخ گویی به سوال اساسی زیر است:

۱- آیا می توان بتنی طراحی و ساخت که علاوه بر بهبود خواص بتن معمولی، قابلیت استفاده موثر در مناطق ساحلی و دریایی و همچنین خصوصیت سازگاری با محیط زیست و توسعه پایدار را از طریق کاهش مصرف سیمان که سبب کاهش انتشار گازهای گلخانه ای (کربن دی اکسید) خواهد شد را داشته باشد؟

۲- آیا استفاده همزمان از پوزولان و آب میکرو-نانوحباب تأثیر هم افزایی دارد؟

بنابراین هدف از مطالعه حاضر بررسی خواص مکانیکی و دوام نمونه های بتنی حاوی پوزولان ها به جهت جایگزین بخشی از سیمان مصرفی و آب میکرو-نانو جایگزین آب مخلوط بتن بوده است. که این موضوع سبب کاهش مصرف سیمان و در نتیجه کاهش انتشار گاز کربن دی اکسید در محیط زیست

شده که این امر موجبات جلوگیری از گرمایش روز افزون کره زمین و حرکت به سوی توسعه پایدار خواهد شد.

#### ۱-۵-زمینه نوآوری تحقیق

در این پژوهش، برای نخستین بار از ترکیب پوزولان زئولیت و متاکائولین به همراه سیمان در اختلاط با آب میکرو-نانوحباب در ساخت نمونه های بتنی استفاده شده است که خواص مکانیکی و دوام این نمونه ها با نمونه مرجع ساخته شده با آب معمولی بر اساس آزمایش های استاندارد مورد مقایسه قرار گرفته است.

#### ۱-۶-روش تحقیق

تحقیق حاضر در مقیاس آزمایشگاهی به بررسی خواص مکانیکی و دوام نمونه های بتنی با انجام آزمایش های آزمایش های مقاومت فشاری (BS 1881, 1993) ، خمشی (ASTM C78, 2002) ، کششی (ASTM C496, 2004) ، الکتریکی (FM 5-578, 2004)، جذب آب (BS 1881, 1983)، نفوذ تسریع شده یون کلراید (ASTM C1202, 2007) و میکروسکوپ الکترونی ASTM C1723 (2010)، در شرایط عمل آوری استاندارد شامل آب و آهک اشباع شده و بصورت موردی در شرایط عمل آوری در آب دریای مصنوعی مطابق استاندارد (ASTM D1141, 2008) پرداخته است.

#### ۱-۷- سازمان بندی پایان نامه

این گزارش مشتمل بر پنج فصل است. در فصل اول آن به تعریف موضوع و ضرورت انجام تحقیق پرداخته شده و در فصل دوم تحقیقات گذشته و مبانی تحقیق به طور خلاصه بیان گردیده است. در فصل سوم مواد مورد استفاده در ساخت بتن و روش انجام آزمایش های صورت گرفته توضیح داده شده و در فصل چهارم نتایج بدست آمده از آزمایش های انجام شده تجزیه و تحلیل گردیده و در فصل پنجم به نتیجه گیری کلی و ارائه پیشنهادات برای پژوهش های آینده پرداخته شده است.





# فصل ۲ مروری بر ادبیات و پیشینه تحقیق

## ۲-۱-مقدمه

در این فصل به تحقیقات گذشته و مبانی تحقیق پرداخته شده است. در ابتدا توصیف بتن و کاربرد آن بررسی گردید. پس از آن کاربرد پوزولان در بتن بیان شده است. بخش بعدی بررسی تاریخچه شناخت ژئولیت و متاکائولین و بتن دارای نانوذرات مختلف میباشد. در پایان نیز بتن تولید شده با میکرو نانو حباب معرفی گردید.

## ۲-۲- بتن

بتن در مفهوم وسیع، به هر ماده یا ترکیبی که از یک ماده چسبنده با خاصیت سیمانی شدن تشکیل شده باشد، گفته می‌شود. این ماده چسبنده عموماً حاصل فعل و انفعال سیمان‌های هیدرولیکی و آب می‌باشد. بتن از پر کاربردترین مصالح ساختمانی است. ویژگی اصلی بتن ارزان بودن و در دسترس بودن مواد اولیه آن است. کاربرد بتن را می‌توان در تمامی کارهای عمرانی از قبیل ساختمان، مخازن و نیروگاه‌ها، سازه‌های دریایی مثل اسکله‌ها، جاده‌ها و راه‌ها، مسیرهای انتقال آب و سدها مشاهده کرد (مستوفی نژاد، ۱۳۹۴). تاکنون مطالعات زیادی در زمینه بهبود کیفیت بتن انجام شده است که اکثر آن‌ها تغییر در ترکیب بتن (که به آن طرح اختلاط بتن گفته می‌شود) را بررسی کرده اند، با این حال استفاده از افزودنی‌ها و همچنین جایگزین کردن مصالح متداول مورد استفاده در بتن با مصالح جدید همیشه مورد توجه بوده است.

## ۲-۳- پوزولان

در استاندارد (ASTM C595 (2000) پوزولان به این صورت تعریف شده است:

"پوزولان یک ماده سیلیسی یا سیلیسی-آلومیناتی است که به تنهایی خاصیت چسبانندگی کمی داشته و یا خاصیت چسبانندگی خاصی ندارد اما پودر نرم و همگن شده ی آن در مجاورت رطوبت و حرارت معمولی با هیدروکسید کلسیم وارد واکنش شیمیایی شده و ترکیبات سیمانی را بوجود می‌آورد". همچنین استاندارد ملی با شماره ۳۴۳۳ (استاندارد ۳۴۳۳ ایران، ۱۳۷۳) تعریفی مشابه با

استاندارد ASTM ارائه کرده است. بنابراین، پوزولان یک ماده طبیعی یا مصنوعی است که حاوی سیلیس فعال می‌باشد. لازم است که ماده پوزولانی به شکل پودر شده باشد، زیرا فقط در این صورت سیلیس می‌تواند در حضور آب با آهک (که می‌تواند بر اثر هیدراسیون سیمان پرتلند بوجود آمده باشد) سیلیکات‌های کلسیمی پایدار که دارای خواص چسبندگی‌اند، را تشکیل دهند.

### ۲-۳-۱- طبقه بندی پوزولان‌ها

اگرچه پوزولان‌ها از نظر ترکیب شیمیایی، کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی دارای اختلاف زیادی هستند، اما رفتار یکسانی که در ترکیب با آب و آهک از خود بروز می‌دهند. به طور کلی پوزولان‌ها را به دو گروه اصلی پوزولان‌های طبیعی و پوزولان‌های مصنوعی تقسیم‌بندی می‌کنند. البته برخی از محققین مواد طبیعی که بر روی آن‌ها فرآوری حرارتی انجام گرفته است تا خواص پوزولانی پیدا کنند را جزو پوزولان‌های مصنوعی به حساب آورده‌اند. از جمله این مواد می‌توان متاکائولن را نام برد متاکائولن توسط حرارت دادن رس‌های حاوی کائولین در دماهای ۶۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد بدست می‌آید و یک سیلیکات آلومینیوم سفید رنگ و آمورف می‌باشد که به شدت با هیدروکسید کلسیم واکنش می‌دهد تا ترکیباتی چسبنده و سیمانی شکل بگیرد (Poon et al, 1999).

### ۲-۳-۲- پوزولان مصنوعی

خاکسترهای حاصل از سوختن زغال سنگ و بعضی محصولات باقی مانده در آن، سیلیس ناپایدار حاصل از بعضی عملیات متالوژی و روباره حاصل از صنایع آهن‌گذاری و هم غیرآهنی مواد زائد صنعتی هستند که برای مصرف به عنوان پوزولان‌های مصنوعی در بتن و سیمان پرتلند مناسب هستند. کشورهای صنعتی مانند ایالات متحده آمریکا، انگلستان، روسیه، فرانسه و ژاپن جزو بزرگترین تولیدکنندگان خاکسترآبی و روباره آهن‌گذاری می‌باشند (رمضانیاپور، ۱۳۹۰).

## ۲-۳-۳- پوزولان طبیعی

در طبقه‌بندی پوزولان‌های طبیعی اجماع کاملی وجود ندارد. متا<sup>۱</sup> و همکاران پوزولان‌ها را براساس ماده‌ی متشکله واکنش‌زای اصلی موجود، به چهار گروه عمده به شرح زیر تقسیم کرده‌اند (Mehta et al, 2005).

الف- شیشه‌های آتشفشانی تغییر نیافته

ب- توف‌های آتشفشانی

ج- شیل‌ها

د- خاک دیاتومه

## ۲-۴- تاریخچه شناخت زئولیت

در سه دهه اخیر، استفاده اقتصادی از زئولیت در صنایع مختلف جایگاه ویژه‌ای را به خود اختصاص داده است. البته شناسایی کانی زئولیت مربوط به دو و نیم قرن پیش است که کانی‌شناس سوئدی فردریک کرونستد<sup>۲</sup> برای اولین بار زئولیت را در شکل متبلور تشخیص داد. با توجه به اینکه این کانی در اثر حرارت در دمای زیاد به جوش می‌آید، این کانی را با بهره‌گیری از واژه یونانی "زئولیت" به مفهوم سنگ‌جوشان نام‌گذاری نمود. تا اواسط قرن نوزدهم تعداد زیادی از کانی‌های زئولیت توسط زمین‌شناسان با بهره‌گیری از میکروسکوپ‌های پلاریزه کشف و معرفی گردیدند. از نظر زمین‌شناسی گفته می‌شود که زئولیت مربوط به پدیده نهایی فعالیت ماگمایی است که اغلب حفره‌های موجود در سنگ‌های آتشفشانی، نظیر بازالت را پر می‌کند (baldar and Wittig, 1968).

برای کانی زئولیت گستردگی و توزیع بسیار محدودی در طبیعت متصور بود. در اوایل قرن نوزدهم دانشمندان متعددی در شناخت خواص فیزیکی آن، نظیر تبادل یونی- کاتیونی و جذب و دفع آب در

---

<sup>۱</sup>Mehta

<sup>۲</sup>Fredreck Cronstedt

درون شبکه بلوری به موفقیت‌هایی نائل شدند، با این وجود به علت کمیابی زئولیت در طبیعت کاربرد آن در صنعت مورد توجه قرار نگرفت (رمضانیانپور و همکاران، ۱۳۹۰).

دویست سال پس از اولین کشف زئولیت، حدود ۳۵ نوع از این کانی کشف و نامگذاری شد و مطالعاتی نیز در مورد دو نوع زئولیت دیگر به نام‌های کابازیت و موردنیت که از نظر خواص فیزیکی و شیمیایی برتر بودند صورت پذیرفت. نتایج مطلوب این مطالعات دانشمندان شیمی را بر آن داشت که بتوانند این کانی‌ها را بصورت انبوه که جنبه اقتصادی داشته باشد تولید نمایند. بر این اساس شرکت آمریکایی Union Carbide در سال ۱۹۶۰ در یک سنتز هیدروترمال درجه پایین موفق به تولید اولین کانی جدید زئولیت مصنوعی گردید، این زئولیت نسبت به همتای مشابه طبیعی خود ویژگی‌های فیزیکی مطلوب‌تری داشته و آن را زئولیت A نامیدند. با تولید صنعتی زئولیت مصنوعی، زمین‌شناسان با بهره‌گیری از ابزار کانی‌شناسی<sup>۱</sup> XRD توانستند ذخایر انبوهی از زئولیت‌های طبیعی را کشف نمایند. کشف ذخایر انبوه از زئولیت‌های طبیعی، تحول گسترده‌ای در شناخت خواص فیزیکی و شیمیایی این ماده معدنی ایجاد نموده و بر این اساس ده‌ها کاربرد صنعتی و کشاورزی برای آن‌ها تعریف شده است (رمضانیانپور و همکاران، ۱۳۹۰).

با وجود کشف ذخایر عظیمی از انواع کانی زئولیت طبیعی، هنوز این ماده ارزشمند نتوانسته در بسیاری از موارد در کاربردهای صنعتی جایگزین زئولیت‌های مصنوعی گردد، چرا که شبکه درون زئولیت‌های مصنوعی با توجه به نیازهای صنایع نفت و پتروشیمی، طراحی می‌گردد (رمضانیانپور و همکاران، ۱۳۹۰).

در کشور ما زئولیت بعنوان یک ماده معدنی ناشناخته بوده و نخستین بار در دو دهه اخیر، وجود ذخایری از آن توسط محققان کشور شناسایی و کاربرد آن در صنعت و کشاورزی معرفی شده است. کشور ما با دارا بودن بخش عظیمی از سنگ‌های آتشفشانی ترشیر، شرایط مطلوبی برای تشکیل ذخایر

---

<sup>۱</sup>X-ray diffraction

بزرگی از ژئولیت را نوید می‌دهد. هر چند که در کشف و شناسایی ذخایر انبوه این کانی در کشور موفقیت چشمگیری بدست آمده، لیکن دسترسی به استفاده‌های کاربردی به سادگی میسر نیست، چرا که اغلب کشورهای صنعتی جز در موارد محدودی، کاربرد آن را در انحصار داشته و یا بعنوان اعطای حق امتیاز بهره‌برداری استفاده می‌کنند (رمضانپور و همکاران، ۱۳۹۰).

#### ۲-۴-۱- خاصیت پوزولانی ژئولیت

فعالیت پوزولانی ژئولیت‌ها بستگی به ترکیبات شیمیایی و کانی‌شناسی آن‌ها دارد. خواص پوزولانی ژئولیت‌ها به علت وجود  $\text{SiO}_2$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  در ترکیب شیمیایی آن‌ها می‌باشد. این ترکیبات با  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ایجاد شده در طول هیدراسیون سیمان واکنش می‌دهند و آن را تبدیل به ژل آلومینوسیلیکات‌های هیدراته می‌کند. در نتیجه ریز ساختار بتن سخت شده بهبود می‌یابد و بتن نفوذناپذیر می‌شود (Feng et al, 2005).

#### ۲-۵- کاربردهای ژئولیت در بتن

از زمان امپراطوری روم توف‌های ژئولیتی به طور گسترده‌ای همراه با آهک در صنعت ساختمان استفاده شده است. امروزه تحقیقات بسیاری در مورد پوزولان‌های ژئولیت و استفاده از آن در سیمان-های آمیخته انجام گرفته است (Perraki, et al, 2003). محققین در آخرین گزارش خود در مورد ژئولیت، بزرگترین بازار آینده را در زمینه صنعت سیمان به عنوان یک ماده پوزولانی و جایگزین بخشی سیمان برای ژئولیت پیش‌بینی کرده اند (Sammy, et al, 1999). ژئولیت طبیعی، یک پوزولان طبیعی رایج در کشور چین می‌باشد که به طور گسترده در معادن آن کشور موجود است. امروزه بیشترین مصرف ژئولیت در کشور چین، در صنعت سیمان است (Sammy, et al, 1999 and poon, et al, 1999).

همچنین در یک دهه اخیر از ژئولیت به عنوان یک افزودنی معدنی برای تولید بتن در چین استفاده شده است. این ماده می‌تواند از اب انداختگی و جداشدگی بتن تازه جلوگیری و فرایند پمپاژ بتن را

آسان تر کند، نفوذپذیری بتن سخت شده را کاهش دهد، پایایی بتن را (بویره مقاومت در برابر واکنش قلیایی سنگدانه‌ها) افزایش دهد و سبب افزایش مقاومت بتن شود (Feng and Peng, 2005).

## ۲-۵-۱- تأثیر ژئولیت بر خواص بتن تازه

توکشین و همکاران نمونه‌های ملات سیمانی حاوی ژئولیت را بدون استفاده از فوق روان‌کننده‌ها ساختند، روانی ملات با افزایش مقدار ژئولیت به صورت خطی کاهش پیدا کرد. آنها همچنین برای دستیابی به روانی مناسب جهت ریختن ملات حاوی ژئولیت در قالب‌ها از فوق روان‌کننده بر پایه کربوکسیلاتی<sup>۱</sup> استفاده نمودند (Tokushige, et al, 2009).

اغلب با توجه به مقدار زیاد منافذ موجود در ساختار ژئولیت طبیعی و همچنین سطح مخصوص بالای آن، بتن‌های حاوی ژئولیت در مقایسه با بتن معمولی؛ دارای نیاز آبی بیشتر و در نتیجه کارایی کمتر می‌باشند. بنابراین در برخی از مطالعات انجام شده بر روی ژئولیت طبیعی استفاده از فوق روان‌کننده-ها تاکید شده است. با این حال، برخی از ژئولیت‌های طبیعی تأثیر ناچیزی بر روی کارایی بتن را نشان می‌دهند. به نظر می‌رسد که عوامل مختلفی از قبیل محل معدن ژئولیت، رفتارشناسی سطحی<sup>۲</sup> و کریستال‌های ژئولیت بر روی کارایی بتن تازه تأثیرگذار است (Shekarchi, et al, 2012).

## ۲-۵-۲ تأثیر ژئولیت بر بتن سخت شده

فنگ<sup>۳</sup> و همکاران با جایگزینی ۱۰ درصد از وزن سیمان با ژئولیت و افزودن مقدار مناسبی فوق روان‌کننده در بتن ( $W/C = 0.35$ ) به مقاومت ۲۸ روزه بیش از ۸۰ مگاپاسکال و اسلامپ ۱۸۰ میلیمتر دست یافتند. بتن‌های دارای مقاومت بیش از ۸۰ مگاپاسکال به عنوان بتن‌های فوق پرمقاومت شناخته می‌شوند (Feng, et al, 1988 and Feng, et al, 1990). برای دسترسی به این مقاومت معمولاً استفاده از دوده سیلیس و عمل‌آوری در اتوکلاو پیشنهاد شده است. از آنجا که در کشور چین کمبود تجهیزات

---

<sup>۱</sup> Pplycarboxylic  
<sup>۲</sup> morphology  
<sup>۳</sup> Feng

آتوکلاو وجود دارد و دوده سیلیس بسیار گران قیمت است در نتیجه زئولیت یک افزودنی مناسب برای ساختن بتن‌های فوق پرمقاومت است.

بسیار واضح است که زئولیت طبیعی یک ماده مکمل سیمانی بسیار عالی است. زئولیت‌های طبیعی حاوی مقادیر فراوانی  $\text{SiO}_2$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  فعال هستند. که این ترکیبات با هیدروکسید کلسیم تولید شده توسط هیدراسیون سیمان به صورت ژل C-S-H اضافی و هیدرات آلومینیوم، منجر به بهبود ریز ساختار و خمیر سیمان سخت شده می‌شود. همچون مواد پوزولانی دیگر، جایگزینی قسمتی از سیمان با زئولیت طبیعی می‌تواند، مقاومت ترکیب سیمان و بتن را بهبود بخشد، نفوذپذیری را کاهش دهد، انبساط ناشی از فعالیت سیلیسی-قلیایی سنگدانه‌ها را کاهش داده و همچنین منجر به افزایش مقاومت در برابر حمله سولفات‌ها به بتن شود. برخی از تحقیقات تاکید می‌کنند که؛ اگرچه تاثیر زئولیت بر روی خواص مکانیکی ناچیز است، ولی تاثیر آن بر روی خواص دوام بتن بسیار زیاد است (Shekarchi, et al, 2012).

## ۲-۶ خواص مکانیکی زئولیت

فنگ و همکاران در سال ۱۹۹۰ برای بررسی تاثیر زئولیت بر خواص بتن تازه و مقاومت بتن، چهار سری آزمایش مختلف انجام پرداختند. زئولیت‌های مورد بررسی از نوع کلینوپتیلولیت (با نشان Zeolite 1) و موردنیت (با نشان Zeolite 2) بودند، در اولین آزمایش، برای مقایسه تاثیر زئولیت بر خواص بتن تازه و مقاومت بتن با تاثیر خاکسترپادی، ۱۰ درصد از وزن سیمان ( $500 \text{ Kg/m}^3$ ) با این مواد جایگزین شد. جایگزینی ۱۰ درصد زئولیت از نوع کلینوپتیلولیت به جای سیمان باعث مقاومت  $80 \text{ MPa}$  و اسلامپ  $175 \text{ mm}$  شد. در حالی که نمونه شاهد  $70 \text{ MPa}$  مقاومت و اسلامپ  $200 \text{ mm}$  از خود نشان داد. نتایج نشان دادند که هر دو نوع آزمون حاوی زئولیت در همه سنین نسبت به آزمون شاهد مقاومت بیشتری پیدا کرده‌اند. در حالی که آزمون‌های حاوی خاکسترپادی و روباره در تمام سنین کمتر از ۲۸ روز به مقاومت کمتری نسبت به آزمون شاهد دست یافتند. در دومین سری از



آزمایش‌ها تاثیر اندازه ذرات زئولیت را بر مقاومت فشاری بتن بررسی شد، مشاهده شد که هر چه زئولیت نرم‌تر باشد بیشتر سبب افزایش مقاومت می‌شود. در سومین آزمایش مقادیر، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد از وزن سیمان را با هر دو نوع زئولیت نامبرده جایگزین شد. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار زئولیت اندازه اسلامپ کمتر و مقدار مقاومت کاهش می‌یابد. در آزمایش چهارم نشان داده شد که با جایگزینی ۱۳ درصد زئولیت هم در سیمان پرتلند معمولی و هم در سیمان روباره‌ای سبب بهبود مقاومت فشاری بتن نسبت به نمونه‌های شاهد در سنین مختلف و نسبت‌های آب به سیمان مختلف می‌شود. در نهایت بتن‌های تازه حاوی زئولیت آب انداختگی بسیار کمتری نسبت به بتن‌های حاوی سیمان پرتلند خالص از خود نشان دادند (Feng, et al, 1988).

در تحقیق چان<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۱۹۹۹ دو سری آزمایش تاثیر زئولیت بر خواص بتن تازه و مقاومت بتن با تاثیر دوده سیلیسی و خاکستربادی مورد بررسی قرار گرفت. در اولین آزمایش سه ماده فوق جایگزین ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۳۰٪ از سیمان آزمون شد. در نمونه‌های ساخته شده نسبت آب به سیمان ۲۸٪ بوده است. نتایج اسلامپ نشان داد که هم برای زئولیت و هم برای خاکستربادی، جایگزینی ۵ الی ۱۵ درصد تاثیری بر اسلامپ نسبت به آزمون شاهد نمی‌گذارد، در حالیکه برای مقادیر بیش از ۱۰٪ جایگزینی دوده سیلیسی، اسلامپ شدیداً کاهش یافت. همچنین آزمون‌های حاوی ۵ درصد و ۱۰ درصد خاکستربادی دچار آب انداختگی شدند. در حالی که آزمون‌های حاوی زئولیت هیچگونه آب انداختگی از خود نشان ندادند و چسبندگی بتن تازه افزایش یافت. نتایج مقاومت فشاری نشان داد که صرف نظر از مقدار جایگزینی، تمام آزمون‌های حاوی پوزولان مقاومت ۲۸ روزه بیشتری نسبت به آزمون شاهد کسب کرده‌اند و تنها در آزمون حاوی ۳۰٪ زئولیت و خاکستر بادی مقاومت ۷ روزه بتن کاهش یافته است. با توجه به مقاومت ۲۸ روزه آزمون‌ها، ۱۵ درصد زئولیت و خاکستربادی مقدار بهینه و برای دوده سیلیس مقدار بهینه ۱۰ درصد بوده است. ۱۵ درصد جایگزینی زئولیت سبب افزایش ۱۴٪ مقاومت فشاری شده است. علاوه بر آزمایش‌های فوق تاثیر این مواد معدنی نیز بر

---

<sup>۱</sup>Chan

نفوذپذیری بتن بررسی شد. و نتایج نشان داد که خواص پوزولانی ژئولیت در زمینه افزایش مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری برتر از خاکستر بادی و کم اثرتر از دوده سیلیس است (Chan and Ji, 1999).

پون<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۱۹۹۹ تاثیر ژئولیت از نوع کلینوپتیلولیت را بر مقاومت فشاری خمیر سیمانی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها همچون Ji و Chan گزارش دادند که خواص موثر ژئولیت در بتن بیشتر از خاکستر بادی و کمتر از دوده سیلیس است. همچنین به این نتیجه رسیدند که ژئولیت در خمیرهای دارای نسبت آب به سیمان کمتر تاثیر بهتری در افزایش مقاومت دارد و افت مقاومت اولیه آن‌ها نسبت به خمیر حاوی خاکستر بادی کمتر است در حالی که در زمان‌های عمل‌آوری طولانی (بیش از ۹۰ روز) افزایش مقاومت کمتری دارند. در نهایت عنوان کردند که ژئولیت‌های طبیعی خواص شیمیایی متفاوتی دارند و نتایج آزمایش را نمی‌توان به همه مواد دیگر تعمیم داد (Poon et al, 1999).

دینگ و همکاران برای نشان دادن تاثیر مقدار پوزولان بر مقاومت ۲۸ روزه بتن حاوی ژئولیت از نوع کلینوپتیلولیت و خاکستر بادی استفاده کردند. با توجه به نتایج، ژئولیت نسبت به خاکستر بادی تاثیر بهتری بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن داشته است. درصد جایگزینی بهینه برای ژئولیت ۱۰ درصد بوده است (Ding et al, 1999).

کسای<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۱۹۹۲ تاثیر ژئولیت‌های از نوع کینوپتیلولیت و موردنیت بر روانی، مقاومت فشاری و مقاومت خمشی ملات را با تاثیر دوده سیلیسی، خاکستر بادی و روباره مقایسه کردند. با توجه به نتایج، با افزایش مقدار جایگزینی نیاز به آب برای حصول روانی مشخص در ملات-های حاوی ژئولیت و دوده سیلیسی بیشتر شده است و همچنین آزمون‌های حاوی موردنیت نیاز به آب بیشتری نسبت به آزمون‌های کلینوپتیلولیت داشته است. این محققین علت این موضوع را قابلیت جذب آب، شکل و اندازه متفاوت این دو نوع ژئولیت دانسته‌اند. همچنین بررسی مقاومت فشاری و

---

<sup>۱</sup>Poon  
<sup>۲</sup>kasai

خمشی آزمون‌ها نشان داد که هر دو نوع ژئولیت با مقادیر جایگزینی ۱۰ درصد ۲۰ درصد و ۳۰ درصد سبب افت مقاومت‌های ۷ و ۲۸ روزه شده است. ملات‌های حاوی کلینوپتیلولیت مقاومت بیشتری نسبت به مقاومت ملات‌های حاوی موردنیت از خود نشان دادند. تاثیر جایگزینی مواد معدنی بر جمع شدگی ناشی از خشک شدن افزایش یافته است (kasai, et al, 1992).

پژوهشی دیگر در سال ۲۰۰۴ تاثیر جایگزینی بخشی از سیمان با درصدهای مختلف ژئولیت بر زمان گیرش، انبساط حجمی و مقاومت فشاری ملات بررسی شد. مشاهده شد که رابطه مشخصی بین نسبت جایگزینی و انبساط حجم وجود ندارد و با افزایش مقدار ژئولیت نیاز به آب برای حفظ روانی افزایش می‌یابد. علت این امر افزایش سطح مخصوص مواد سیمانی به خاطر افزایش مقدار ژئولیت بیان شد. همچنین افزودن هر چه بیشتر ژئولیت سبب کاهش زمان گیرش می‌شود و در زمینه مقاومت فشاری مشاهده شد که در سنین کمتر از ۷ روز آزمون‌های حاوی بیش از ۱۵ درصد ژئولیت افت مقاومت و آزمون‌های حاوی کمتر از ۱۵ درصد ژئولیت افزایش مقاومت می‌یابد. ولی پس از ۹۰ روز تمام آزمون‌ها (حاوی ۵ الی ۳۵ درصد ژئولیت) به مقاومتی در حدود مقاومت ۹۰ روزه آزمون شاهد می‌رسد (Canpolat, et al, 2004).

توافق کلی بر روی تاثیر ژئولیت در افزایش مقاومت در سنین اولیه وجود ندارد؛ در حالی که در سنین بالاتر افزایش مقاومت نسبت به بتن معمولی گزارش شده است (Shekarchi, et al, 2012). در مطالعه ای در سال ۲۰۱۲ به مطالعه امکان‌سنجی استفاده از مقادیر بالای ژئولیت (۵۰ درصد وزن مواد سیمانی) در بتن پرداخته شد. در این تحقیق از سه نوع پوزولان از قبیل ژئولیت (نوع کلینوپتیلولیت)، پرلیت و توف ولکانیک استفاده شد و در نهایت نتایج را با مخلوط‌های حاوی خاکستر بادی و سربراره مقایسه گردید. براساس نتایج بدست آمده، ساختار بتن ساخته شده با حجم بالای ژئولیت طبیعی قابل تولید می‌باشد. همچنین مشاهده شد که بتن حاوی ژئولیت دارای مقاومت فشاری و خمشی بیشتری نسبت به سایر پوزولان‌های مورد استفاده در بتن می‌باشد، به علاوه این نتایج قابل قیاس با نتایج بدست آمده در مورد خاکستر بادی و سربراره نیز می‌باشد (Uzal, et al, 2012).

## ۲-۷- خواص انتقال

طبق گزارش متا و همکاران در سال ۱۹۸۱ تنها حفرات با قطر بزرگتر از ۱۰۰۰ آنگسترم در خمیر سیمان برای مقاومت و دوام بتن آسیب رسانند (Mehta et al, 1981). مطالعه ای دیگر در سال ۱۹۹۹ به بررسی بهبود خواص نفوذپذیری بتن در اثر استفاده از مواد معدنی زئولیت، دوده سیلیس و خاکستر بادی پرداخته شد. بدین منظور دو سری آزمایش جذب سطح اولیه و نفوذ یون کلر انجام شد. نتایج نشان داد که به علت کاهش اندازه منافذ خمیر سیمان توسط واکنش پوزولانی زئولیت، جایگزینی ۵ الی ۳۰ درصد زئولیت سبب کاهش جذب سطحی اولیه و نفوذ یون کلر، در بتن شده است و همچنین زئولیت در مقایسه با خاکستربادی در درصدهای جایگزینی و نسبت های آب به سیمان برابر تاثیر بیشتری در کاهش جذب سطحی اولیه و کاهش نفوذ یون کلر در بتن داشته است. لیکن در مقایسه با دوده سیلیسی تاثیر ضعیفتری از خود نشان می دهد. همچنین نتایج مشابهی برای مقاومت فشاری بتن گزارش شد (Chan and Ji, 1999).

فنگ<sup>۱</sup> همکاران در سال ۲۰۰۲ طبق آزمایش تسریع شده نفوذ یون کلر (RCPT<sup>۲</sup>) بر طبق (2007) ASTM C1202 نفوذپذیری بتن های حاوی زئولیت، خاکستربادی، دوده سیلیسی و روباره در برابر یون کلر، توسط اندازه گیری مقدار جریان عبوری ۶ ساعته در بتن ۲۸ روزه اندازه گیری کردند. نتایج نشان داد که افزایش مقدار مواد معدنی و کاهش نسبت آب به مواد سیمانی سبب کاهش مقدار جریان عبوری و در نتیجه کاهش نفوذپذیری بتن می شود. آن ها به ترتیب دوده سیلیسی، خاکستربادی، زئولیت و روباره را موثرتر در کاهش مقدار جریان عبوری ۶ ساعته بتن معرفی نمودند (Feng et al, 2002).

نتایج به دست آمده از تحقیقات پرکی و همکاران در سال ۲۰۰۳ نشان داد که استفاده از زئولیت طبیعی در خواص انتقال موثر است. در آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلر که بر روی مخلوط های

---

<sup>۱</sup>Feng  
<sup>۲</sup>Rapid Chloride Permeability Test

حاوی ۱۰ و ۱۵ درصد زئولیت انجام شد مشخص گردید که مقدار نفوذپذیری به ترتیب ۳۰/۷ و ۲۲/۷ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است (Perraki et al, 2003). احمدی و شکارچی در سال ۲۰۱۰ به بررسی مقدار نفوذ گاز اکسیژن در بتن حاوی زئولیت پرداختند. جایگزینی ۱۰ درصد زئولیت مقدار نفوذپذیری گاز اکسیژن را در حدود ۲۵ درصد کاهش داده است، در حالی که استفاده از ۱۵ و ۲۰ درصد زئولیت مقدار نفوذپذیری را نسبت به بتن مرجع افزایش داده است. همچنین به این نتیجه رسیدند که استفاده از زئولیت طبیعی به طور موثری ضریب نفوذپذیری یون کلر را کاهش می‌دهد. با این حال، سیلیس اثر بهتری بر بهبود انتشار یون کلر در بتن را دارد (Shekarchi et al, 2010).

خواص انتقال در بتن سخت شده یکی از کلیدهای مهم در خواص دوام و عمر سرویس‌دهی می‌باشد. براساس تحقیقات انجام گرفته زئولیت همچون پوزولان‌های دیگر با انجام واکنش پوزولانی سبب بهبود ریزساختار بتن و کاهش تخلخل و نفوذپذیری آن در سنین اولیه می‌شود. با این حال تحت این شرایط با کاهش نفوذپذیری عمر سربس‌دهی در سنین بالاتر افزایش می‌یابد (Shekarchi et al, 2012).

## ۲-۸- خاصیت پوزولانی متاکائولین

متاکائولین یک ماده آلومینوسیلیکاتی با فعالیت پوزولانی بالا می‌باشد که از طریق گرم کردن کائولین دردمای ۶۵۰-۸۰۰ درجه سانتی‌گراد تولید مشود. کائولین یک ماده معدنی است که در دماهای ۱۰۰ و ۲۰۰ درجه، بیشتر آب جذب شده خود را از دست می‌دهد. دمایی که در آن کائولینیت که اصلیتین جز تشکیل دهنده کائولین است به واسطه ی دی هیدراکسیونیازسیون آب از دست می‌دهد (Bonakdar et al, 2005).

متاکائولین به عنوان یک ماده معدنی و غیرآلی با خواص پوزولانی بالا که اجزای اصلی آن  $Al_2O_3$  و  $2SiO_2$  غیر متبلور هستند با افزودن به بتن باعث افزایش مقاومت فشاری بتن میشود (Bich et al, 2009, Fernandez et al, 2011). و همچنین متاکائولین بدلیل اثر پرکنندگی و شتاب در واکنش

هیدراتاسیون و واکنش پوزولانی با هیدروکسید کلسیم به شکل C-S-H<sup>۱</sup> باعث کاهش تخلخل و نفوذپذیری میشود (Li et al, 2015).

## ۲-۸-۱- کاربرد متاکائولین در بتن

بتیس<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۵ اثر متاکائولین را روی مقاومت خوردگی ملات بررسی کردند. طبق نتایج این تحقیق، نمونه های حاوی ۱۰ درصد متاکائولین بیشترین مقاومت فشاری و مقاومت در برابر خوردگی را نشان داده است و درصدهای بیشتر عملکرد مطلوبی نداشته اند (Batis et al, 2005).

محققان بسیاری بروی خواص هیدراتاسیون بتن با افزودن ۱۰-۳۰٪ متاکائولین مطالعه نمودند. پگیتر و همکاران (۲۰۰۶) در طی تحقیقات خود مشاهده کردند که ملات با ۱۰ درصد جایگزینی متاکائولین بیشترین افزایش مقاومت فشاری را از خود نشان میدهد. خطیب (۲۰۰۸) در تحقیقات خود از درصدهای ۵، ۷/۵، ۱۲/۵ و ۲۰ درصد متاکائولین و با نسبت آب به سیمان ۰/۳ استفاده نمود با بررسی نتایج حاصله مشاهده می شود که تا سطح جایگزینی ۱۵ درصد متاکائولین به جای سیمان خواص مکانیکی بتن افزایش و در سطوح بالاتر کاهش می یابد (Potigietter et al, 2006 , Khatib, 2008).

شکارچی و همکاران در سال ۲۰۱۰ بررسی کردند افزودن متاکائولین، مقاومت الکتریکی ویژه بتن را ۵،۵ برابر افزایش میدهد. به طوری که بتن حاوی ۱۵ درصد متاکائولین، بیشترین مقاومت را در برابر خوردگی دارد (shekachi et al, 2010).

## ۲-۸-۲- ترکیب متاکائولین با آب دریا

لی و همکاران (۲۰۱۵) بر روی اثر متاکائولین و اختلاط با آب دریا بر روی خواص هیدراتاسیون بتن تحقیق کردند. متاکائولین با اصلاح ساختار منافذ مقاومت فشاری را بهبود میبخشد. آب دریا باعث افزایش مقاومت فشاری در سنین اولیه بدون تغییر ساختار منافذ شد (Li et al, 2015).

---

<sup>۱</sup> C-S-H  
<sup>۲</sup> Batis

شی و همکاران در سال ۲۰۱۵ بر روی اثر ۰-۶٪ متاکائولین و ترکیب یا آب دریا بر خواص هیدراتاسیون و ریز ساختارهای بتن مطالعه کردند. مقاومت فشاری در ۲۸ روز با افزودن ۵٪ وزنی متاکائولین باعث افزایش ۳۳ درصدی شد. و با ۲۲٪ مخلوط آب دریا بصورت ترکیبی باعث افزایش مقاومت فشاری به میزان ۵۲٪ گردید. متاکائولین موجب شکل گیری نمک فریدل در مخلوط بتن با آب دریا شد. این مطالعه نشان داد متاکائولین و آب دریا باعث بهبود عملکرد بتن میشود (Shi et al, 2017).

## ۲-۹- بتن در محیط‌های دریایی

عموما تصور بر این است که بتن یکی از مصالح بسیار با دوام است. ولی تاریخچه‌ی بتن در محیط دریایی حاکی از آن است که در مقابل آب دریا به عنوان یکی از خورنده ترین محیط‌های طبیعی در جهان، بتن از نقطه نظر دوام<sup>۱</sup> در معرض مشکلات جدی قرار دارد. دوام بتن به طور کلی به عنوان توانایی آن برای مقاومت در برابر تاثیرات محیط در عین حفظ عملکرد مطلوب آن اتلاق می‌شود (Hoff, 1991).

زوال بتن را می‌توان به صورت پدیده‌ای توصیف کرد که طی آن مقاومت بتن با کنش عوامل متعدد مانند بارگذاری، محیط و حملات شیمیایی (مانند یون‌های کلر، سولفات، کلسیم، منیزیم و پتاسیم) کاهش می‌یابد که این امر می‌تواند منجر به تخریب بتن شود.

پدیده حمله آب دریا به بتن حمله شیمیایی نامیده می‌شود. حمله شیمیایی توسط عوامل مختلف در آب دریا آغاز می‌شود. شدت حمله شیمیایی به عوامل تهاجمی<sup>۲</sup> استفاده شده در سیمان بستگی دارد. این عوامل به همراه تبخیر آب دریا با سیمان واکنش داده و ممکن است موجب خوردگی بتن شوند (Dhir and Newlands, 1999).

---

<sup>۱</sup>durability  
<sup>۲</sup>Aggressive Agents

پیش بینی عملکرد بتن در حضور آب دریا کار آسانی نیست، زیرا تعداد زیادی از واکنش‌های شیمیایی در شرایط غیرتعادلی، در حال انجام است و اطلاعات حاصل از شرایط تعادل ترمودینامیکی در بهترین شرایط، تنها می‌تواند به عنوان یک راهنما مورد استفاده قرار گیرد. آب دریا دارای یون‌های مخرب زیادی است که هر یک به طور جداگانه اثر نامطلوبی بر روی بتن دارند، اما ممکن است اثر تخریبی ترکیب آن‌ها، کمتر از اثر هر کدام به صورت جداگانه باشد. تاثیر آب دریا بر بتن برای اولین بار در سال ۱۸۴۰ توسط ویکات و اسمیتون<sup>۱</sup> مورد بحث قرار گرفت. بررسی دو ساله آن‌ها بر موضوع تحقیقی با عنوان "مشکل بتن در آب دریا چیست" نشان داد که تعداد زیادی از سازه‌های دریایی در آب دریا در ایالات متحده، کانادا، کوبا و پاناما در معرض زوال شیمیایی قرار دارند (Tibbetts, 1968).

ترکیبات شیمیایی اولیه آب دریا در محل‌های مختلف متفاوت است، اما به طور کلی می‌توان گفت یون‌های کلر، سدیم، منیزیم، کلسیم و پتاسیم یون‌های اصلی موجود در آب دریا هستند. در آب دریا کلرید سدیم (NaCl) نمک غالب است (حدود ۰.۸۸٪ وزن نمک) (McCoy, 1996).

واکنش‌های شیمیایی آب دریا بر بتن عمدتاً ناشی از عملکرد مخرب سولفات منیزیم ( $MgSO_4$ ) موجود در آب دریا بر سیمان است. سولفات‌های پتاسیم و منیزیم ( $K_2SO_4, MgSO_4$ ) موجود در آب شور می‌توانند موجب تخریب بتن شوند زیرا می‌توانند ابتدا با هیدروکسید کلسیم ( $Ca(OH)_2$ ) واکنش دهند که در مجموعه سیمان تشکیل شده توسط دی‌کلسیم سیلیکات ( $C_2S$ ) و تری‌کلسیم سیلیکات ( $C_3S$ ) موجود است. حمله سولفات منیزیم ( $MgSO_4$ ) بسیار مخرب است و موجب تشکیل هیدروکسید منیزیم محلول ( $Mg(OH)_2$ ) می‌شود که به نوبه خود موجب واکنش نیروها برای تشکیل گچ می‌شود.

یون‌های کلر می‌توانند در بتن نفوذ کرده و موجب تسریع خوردگی آرماتور شوند. واکنش شیمیایی خمیر سیمان با محتوای بالای کلر آب دریا عموماً کم بوده و موجب نگرانی اولیه نیست. یون‌های

---

<sup>۱</sup>Vicat And Smithon



سدیم و پتاسیم ممکن است موجب واکنش قلیایی سنگدانه‌ها شده یا آن را تشدید کنند، در صورت استفاده از سنگدانه‌های واکنشی و یون‌های منیزیم و سولفات موجب تضعیف عملکرد خمیر سیمان می‌شوند (Uddin et al, 2004).

برخی مطالعات تاثیرات ترکیب و عمل آوری آب دریا بر مقاومت فشاری ملات ماسه سیمان و بتن متناظر آن را نشان داده اند. تحقیقات نشان می‌دهد که آب دریا برای ترکیب و عمل آوری بتن ساده و آرماتوربندی شده در شرایط دریایی مفید است (Aburawi and Swamy, 2008).

افزودن خاک رس به ترکیب بتن می‌تواند مقاومت فشاری بتن را در شرایط معمولی افزایش داده و عملکرد بتن سخت شده را برای مقاومت در برابر عوامل تهاجمی آب شور دریا افزایش دهد. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که کامپوزیت سرباره کوره مقاومت خوبی در محیط‌های دریایی داشته و سطح جایگزینی ریزدانه‌ها با سرباره کوره و سنگ بازالت تاثیر سودمندی بر افت مقاومت فشاری ناشی از حمله آب دریا و مقدار سایش دارد (Naghoj and Abdel-Rahmna, 2005).

برخی مطالعات نیز بر تاثیر غلظت‌های مختلف محلول‌های شیمیایی، کیفیت انواع بتن‌ها، سطح بار تنش اعمالی بر مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن و همچنین مکانیزم خوردگی آرماتور فولاد متمرکز بودند (Schneider and Chen 2005).

ابوراوی و سوامی<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۸ با افزودن نمک طعام به نمونه‌های بتنی و انجام آزمایشاتی بر روی آن‌ها، ویژگی‌های مهندسی و دوام بتن ساخته شده با و بدون کلراید را در محیط‌های دریایی بررسی کردند. نتایج نشان داد که بتن‌های حاوی کلراید دارای مقاومت اولیه بیشتری در مقایسه با بتن‌های بدون کلراید هستند اما مقاومت طولانی مدت برای هر دو مورد مشابه است. هیچ قانون ساده‌ای درباره افزایش مقاومت طولانی مدت بتن حاوی نمک که در مجاورت محیط‌های دریایی قرار می‌گرفت، وجود ندارد. با این حال، بتن‌های حاوی کلراید در شرایط عمل آوری مورد بررسی دچار کاهش قابل توجه

---

<sup>۱</sup>Aburawi & Swamy

مقاومت با افزایش سن شدند اگر سازه در طول خدمت در معرض هوا نیز قرار گیرد، این امر خطر خوردگی آرماتور را افزایش می‌دهد. مخرب‌ترین تاثیر آب دریا بر سازه‌های بتنی از تاثیر کلر بر آرماتور فولادی و ساختمان نمک نشات می‌گیرد (Aburawi and Swamy, 2008).

الوتوج<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۴ در مطالعه‌ای تاثیر آب دریا بر مقاومت فشاری بتن بررسی گردید. در این تحقیق ۱۴۰ نمونه مکعب بتنی ۱۵ سانتی‌متری را با استفاده از آب شیرین و آب دریا ساخته شد، نیمی از آن‌ها را در آب شیرین و نیمی از آن‌ها در آب دریا عمل آوری شد. نمونه‌ها با استفاده از دستگاه آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۷، ۱۴، ۲۱، ۲۸ و ۹۰ روزه شکسته شدند. این تحقیق افزایش مقاومت فشاری بتن را برای نمونه‌های بتنی ترکیب و عمل آوری شده با آب دریا نشان داد. مقاومت فشاری بتن زمانی که با آب شیرین ساخته و در آب دریا عمل آوری شد و در حالت برعکس آن نیز، افزایش یافت (Olutoge et al, 2014).

رتنو<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۵ مقاومت فشاری استوانه‌های بتنی را برای عمل آوری ۷ روزه و ۱۴ روزه در آب دریا و آب شیرین بررسی کردند. نتایج آزمایشگاهی این تحقیق نشان دادند که مقاومت فشاری ۷ روزه و ۱۴ روزه نمونه‌های بتنی با عمل آوری آب دریا بزرگتر از نمونه‌های عمل آوری شده در آب معمولی بودند. برای نمونه‌های ۷ روزه این افزایش حدود ۵/۲۵- ۲۹/۵۶٪ و برای نمونه‌های ۱۴ روزه این افزایش مقاومت در محدوده ۳/۳۹- ۱۱/۸۷٪ بوده است. نتایج نشان دادند که هر چه نسبت آب به سیمان کمتر باشد، مقاومت فشاری بتن بیشتر خواهد بود (Mehta and Monteiro, 2005).

گروهی از محققین به بررسی تاثیر آب نمک بر مقاومت فشاری بتن پرداختند. در این تحقیق مکعب‌های بتنی ۱۵ \* ۱۵ \* ۱۵ سانتی‌متری با آب نمک و آب شیرین بتن ریزی شدند. نسبت وزنی بتن ۱:۲:۴ و نسبت آب به سیمان ۰/۶ بود. مجموعاً ۱۳۲ مکعب بتنی را بتن ریزی شد که نیمی از آن‌ها با استفاده از آب شیرین و نیمی دیگر با آب نمک ساخته شده بودند. این نمونه‌ها در آب دریا و در آب

---

<sup>۱</sup>Olutoge

<sup>۲</sup>Retno

نمک عمل آوری شدند. مکعب‌های بتنی برای مقاومت فشاری در ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ روزه آزمایش شدند. مقاومت فشاری بتن در نمونه‌های حاوی آب نمک یا نمک اقیانوس در ترکیب و عمل آوری افزایش یافته اند (Mehta and Monteiro, 2005).

واگیان<sup>۱</sup> در سال ۲۰۱۰ تاثیر ترکیب و عمل آوری بتن با آب دریا را بر مقاومت فشاری، کششی و خمشی و پیوستگی بتن مورد بررسی قرار داد. ترکیبات بتن با تغییر سنگدانه‌ها، نسبت‌ها و انواع سیمان آماده شدند. شش گروه ترکیبات بتنی با آب شیرین ترکیب و عمل آوری شده، شش گروه با آب دریا ترکیب و عمل آوری شدند، چهار گروه با آب شیرین ترکیب و با آب دریا عمل آوری شدند. مقاومت فشاری، کششی و خمشی برای نمونه‌های ترکیب و عمل آوری شده در آب دریا در سنین اولیه تا ۴ روز افزایش داشتند، درحالی که مقاومت‌های مربوطه برای سنین بیشتر از ۲۸ روزه تا ۹۰ روز کاهش داشتند. کاهش مقاومت با افزایش زمان عمل آوری افزایش یافت. نمونه‌های بتنی در سنین ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روزه برای آزمایش‌های فشاری آزمایش شدند. همچنین این نمونه‌ها برای مقاومت کششی، خمشی و پیوستگی در ۲۸ و ۹۰ روزه آزمایش شدند. نمونه‌های آزمایشی با استفاده از دو نوع سیمان بتن ریزی شدند: سیمان پورتلند معمولی<sup>۲</sup> (OPC) و سیمان مقاوم در برابر سولفات<sup>۳</sup> (SRC). در این تحقیق از آب دریا با pH حدود ۸٫۲ استفاده شد (Wegian, 2010).

مبادیک و الینوا<sup>۳</sup> در سال ۲۰۱۱ در تحقیقی تاثیر آب نمک در تولید بتن بررسی شد. در آزمایش آن‌ها ۹۰ نمونه مکعبی بتنی برای بررسی مقاومت فشاری ساخته شد. ۴۵ عدد از این نمونه‌ها با آب شیرین و ۴۵ نمونه دیگر با آب شور ترکیب شده بود. برای بررسی مقاومت خمشی نیز ۹۰ تیر بتنی، ۴۵ تیر با آب شیرین و ۴۵ تیر با آب شور ساخته شد. مکعب‌ها و تیرهای بتنی برای ۷، ۲۱، ۲۸، ۶۰ و ۹۰ روز عمل آوری شدند. میانگین مقاومت فشاری برای بتن ساخته شده با استفاده از آب شیرین در محدوده ۲۷/۳۵-۴۲/۳۴ نیوتن بر میلی‌متر مربع و برای نمونه‌های ساخته شده با آب شور ۳۸/۸۱-

---

<sup>۱</sup> Wagian

<sup>۲</sup> Ordinary Portland Cement

<sup>۳</sup> Mbadike & Elinwa

۲۵/۲۴ نیوتن بر میلی‌متر مربع بودند (در عمل آوری‌های ۷، ۲۱، ۲۸، ۶۰ و ۹۰ روزه). محدوده مقاومت خمشی بتن ساخته شده با آب شور ۵/۹۸-۱۱/۰۴ نیوتن بر میلی‌متر مربع بود. میانگین مقاومت فشاری ساخته شده از آب شیرین و آب شور به ترتیب در محدوده‌های ۴۰/۸۰-۲۷/۲۶ نیوتن بر میلی‌متر مربع و ۳۹/۱۳-۲۴/۶۸ نیوتن بر میلی‌متر مربع و مقاومت خمشی برای بتن ساخته شده از آب شیرین و آب شور به ترتیب در محدوده ۶/۵۵-۱۱/۳ نیوتن بر میلی‌متر مربع و ۱۰/۷۶-۶/۲۶ نیوتن بر میلی‌متر مربع قرار داشتند. برای طرح اختلاط ۱:۰.۶۶:۴۱/۲۴:۱ و نسبت آب به سیمان ۰/۵، میانگین مقاومت فشاری بتن ساخته شده با آب شیرین و آب شور به ترتیب در محدوده‌های ۳۸/۱۳-۲۵/۰۵ نیوتن بر میلی‌متر مربع و ۳۶/۰۳-۲۳/۵۸ نیوتن بر میلی‌متر مربع و مقاومت خمشی برای آب شیرین و آب شور به ترتیب در محدوده‌های ۹/۸۸-۶/۱۸ نیوتن بر میلی‌متر مربع و ۱۰/۳۹-۶/۱۵ نیوتن بر میلی‌متر مربع قرار داشتند. نتایج آزمایش نشان دادند که با افزایش زمان عمل آوری، مقاومت آن افزایش یافت. استفاده از آب شور در ساخت بتن مقاومت بتن را در حدود ۸٪ کاهش داده است (Mbadike, 2011).

## ۲-۱۰- کلیاتی از میکرو نانو حباب‌ها

حباب‌ها از نظر ساختاری به دو دسته گاز-گاز و مایع-گاز تقسیم می‌شوند. و خود حباب‌های مایع-گاز به دو دسته حباب‌های کروی و حباب‌های دیسکی تقسیم می‌شوند. میکرو نانو حباب‌ها حفره‌هایی حاوی گاز در محلول آبی هستند. علت تولید این حفره‌ها فرآیند کاویتاسیون هیدرودینامیکی در حضور هسته گازی یا گاز هسته زایی شده در آب است. فرآیند هسته زایی در مایع سبب چرخش ذرات گاز در میدان داخلی هسته می‌شود که باعث ایجاد میدان الکترواستاتیکی به دور هسته می‌گردد و این میدان الکترو استاتیکی با ذرات باردار دور هسته که تشکیل لایه دوگانه را داده‌اند به طور مداوم در تبادل شار الکتریکی ثابتی هستند. این افزایش یا کاهش تبادل شار الکتریکی و همچنین افت پتانسیل شیمیایی هسته، باعث رشد یا انقباض هسته و به تبع آن بزرگتر یا کوچکتر شدن لایه دوگانه

می‌گردد. بزرگ یا کوچک شدن لایه دوگانه باعث بزرگ یا کوچک شدن نیروی کشش سطحی می‌شود. به همین دلیل نانو حباب‌ها یا میکرو حباب‌ها به کمک انتشار ذرات و متناسب با مقدار پتانسیل اطراف محلول و مقدار پتانسیلی که باعث فوق اشباع و یا زیر اشباع شدن بشود، شروع به رشد کردن و یا کوچک شدن در طول زمان می‌کنند (مظفری نائینی ر، ۱۳۹۲).

## ۲-۱۰-۱- بتن ساخته شده با میکرو نانو حباب

<sup>۱</sup> عارفی در سال ۱۳۹۳ آزمایشات مختلفی بر روی بتن ساخته شده با میکرو نانو حباب انجام داد که نتایج زیر از این آزمایش‌ها بدست آمد

استفاده از آب حاوی میکرو نانو حباب‌ها برخلاف عملکرد حباب‌های معمول در ساخت بتن حباب دار که با کمک مواد شیمیایی مضاف ساخته می‌شوند باعث کاهش روانی و اسلامپ بتن می‌شود. مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با آب حاوی میکرو-نانو حباب به طور میانگین ۱۵ درصد بیشتر از مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با آب معمولی می‌باشد. مقاومت خمشی بتن حاوی میکرو-نانو حباب بیشتر از مقاومت خمشی بتن معمولی می‌باشد. مقاومت کششی بتن حاوی میکرو-نانو حباب از بتن معمولی بیشتر است. آزمایشات کاهش شدید زمان گیرش اولیه و نهایی سیمان با آب حاوی میکرو-نانو حباب را نشان دادند. این مقدار برای ترکیب سیمان و آب حاوی میکرو-نانو حباب برابر ۲۳،۳ دقیقه و برای ترکیب سیمان و آب معمولی برابر ۸۶ دقیقه می‌باشد. مدت زمان گیرش نهایی نیز برای نمونه نانو برابر ۱۳۵ دقیقه و برای نمونه معمولی برابر ۲۵۶ دقیقه می‌باشد (عارفی ا، ۱۳۹۳).

عارفی کاربرد میکرو نانو حباب‌های هوا را در آب مورد استفاده در بتن مورد بررسی قرار داد. به منظور بررسی تاثیر میکرو نانو حباب بر ملات و بتن مجموعه آزمایش‌هایی طراحی و انجام گرفتند. مقاومت-های فشاری، کششی و خمشی بتن معمولی با بتن میناب با مصالح و طرح اختلاط مشابه مقایسه شدند. افزودن میناب چگالی آب و در نتیجه نسبت آب به سیمان را تغییر نمی‌دهد. نتایج تحقیق

---

<sup>۱</sup>Arefi

نشان دادند که میناب می‌تواند ویژگی‌های مکانیکی بتن را در عین کاهش کارایی آن به طور موثری ارتقا بخشد. مشاهده شد که مقاومت کششی و فشاری به ترتیب ۱۶٪ و ۱۹٪ افزایش یافت درحالی‌که دما در طول گیرش به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داشته است. زمان اولیه و نهایی گیرش نیز کاهش یافته است یعنی این نوع بتن باید در زمان کوتاهتری در مقایسه با بتن معمولی بتن ریزی شود (Arefi et al, 2016).

## فصل ۳ مواد و روش‌ها

### ۳-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا برنامه آزمایش ها به همراه خصوصیات مواد و مصالحی که برای ساخت بتن مورد استفاده قرار گرفتند، بیان می شود و سپس نحوه ساخت نمونه بتنی، عمل آوری و آزمایش ها شرح داده خواهد شد.

### ۳-۲- برنامه آزمایش ها

در این تحقیق بعد از تهیه مصالح و انجام آزمایش های لازم روی مواد اولیه، ۱۸ مخلوط بتنی ساخته و پس از عمل آوری در سنین مشخص تحت آزمایش های مربوط به پارامترهای خواص مکانیکی و دوام قرار داده شدند.

### ۳-۳- خصوصیات مصالح

#### ۳-۳-۱- آب

آب مورد استفاده در این تحقیق بر اساس جدول ۳-۱ توسط دستگاه SmartCHEM-Lab شرکت TPS و با استفاده از سنسورهای مربوطه انجام شده است. مشخصات شیمیایی آب شهری در جدول ۳-۱ قابل مشاهده می باشد.

جدول ۳-۱- مشخصات شیمیایی آب شهری

مقدار	واحد	موارد اندازه گیری
۸/۱۵	-	pH
۵۸۱	μs	EC
۱	NTU	کدورت
۱	T.C.U	رنگ
۲۱	°C	دما
۳/۲۲	ppm	اکسیژن محلول
۲۷۴	ppm	TDS



### ۳-۳-۲- آب دریای مصنوعی

آب دریا مطابق استاندارد ASTM D1141-1998 بر اساس مشخصات جدول ۳-۲ ساخته شده است. همچنین مقدار pH و کلر آب توسط دستگاه SmartCHEM-Lab شرکت TPS و با استفاده از سنسورهای مربوطه بر اساس استاندارد ASTM D512(2012) اندازه گیری شده که مقادیر آن بتریب ۸/۲۵ برای pH و به مقدار ۱۹۲۳ به واحد اندازه گیری (ppm) برای مقدار کلر آب دریای مصنوعی می باشد. لازم به ذکر برای تنظیم PH آب دریا از محلول ۰/۱ مولار NaOH استفاده شده است.

جدول ۳-۲ ترکیب شیمیایی آب دریا ساخته شده (g/L)

NaCL	MgCL <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	CaCL <sub>2</sub>	KCL	KBr	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	NaF
۲۴/۵۳	۵/۲۰	۴/۰۹	۱/۱۶	۰/۶۹۵	۰/۱۰۱	۰/۰۲۷	۰/۰۰۳

### ۳-۳-۴- سنگدانه

مشخصات سنگدانه مصرفی در ساخت بتن مطابق با استاندارد ASTM C33(2002) در نظر گرفته شده . دارای حداکثر اندازه ۱۹ میلی متر و با وزن مخصوص ۲,۶۸ و ۲,۶۲ گرم بر سانتی متر مربع برای شن و ماسه بوده است.

برای تعیین دانه بندی مصالح سنگی (شن و ماسه) از آزمایش دانه بندی مطابق با استاندارد ASTM C136(2004) استفاده شده است. نتایج این آزمایش برای تطبیق توزیع اندازه دانه ها با مشخصات لازم برای مصالح سنگی و همچنین تهیه اطلاعات لازم برای کنترل تولید سنگدانه های مختلف و مخلوط هایی که در آنها مصالح سنگی به کار می رود، مورد استفاده قرار می گیرد. برای انجام آزمایش دانه بندی نمونه مورد آزمون در دمای  $5 \pm 110^{\circ}\text{C}$  تا رسیدن به وزن ثابت خشک می شود . وزن مشخصی از مصالح سنگی را در سری الک های تیلور (که اندازه ی هر دو الک متوالی به نسبت ۲ به ۱ است) ریخته و مجموعه را در دستگاه لرزاننده مکانیکی (شکل ۳-۱) به مدت ۲ دقیقه قرار می دهیم

تا الک شوند الک کردن را تا هنگامی ادامه داده می شود که پس از آن به ازای هر یک دقیقه الک کردن ، کمتر از یک درصد وزن مواد باقیمانده روی هر الک از آن عبور کند.



شکل ۳-۱ دستگاه لرزاننده الک ها

### ۳-۳-۵- فوق روان کننده

جهت افزایش خاصیت روانی بتن در این تحقیق از فوق روان کننده مطابق جدول ۳-۳ که محصول شرکت ب.آ.اس.اف ایرانیان می باشد، مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۳-۳ ویژگی های فوق روان کننده

<b>GLENIUM-51P</b>	نام تجاری
محصول پلی کربکسیلات	ساختار
مایع قهوه ای رنگ	ظاهر
108 gr/cm <sup>3</sup>	چگالی در 20 °C
<b>7 ± 1</b>	PH

### ۳-۳-۶- آب میکرو-نانوحباب

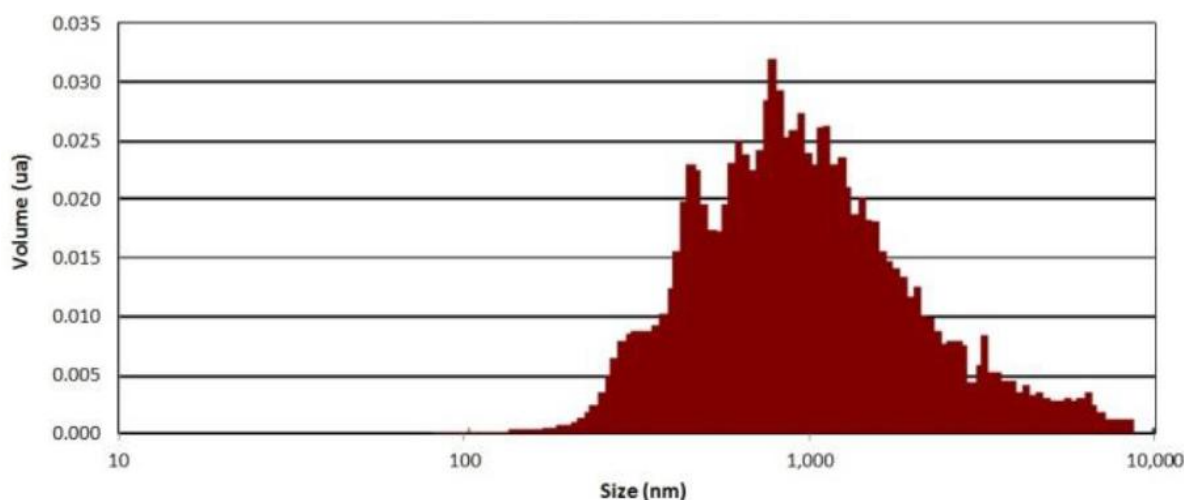
آب میکرو-نانوحباب مورد استفاده در این تحقیق بر مبنای روش برش و استفاده از لوله ونتوری و فرآیند کاویتاسیون هیدرولیکی در دانشگاه صنعتی شاهرود به شماره ثبت ایران (۸۳۹۹۸#) تولید شده است. مشخصات این آب در جدول ۳-۴ نمایش داده شده است (Mozaffari, 2014).

جدول ۳-۴ مشخصات آب میکرو-نانوحباب

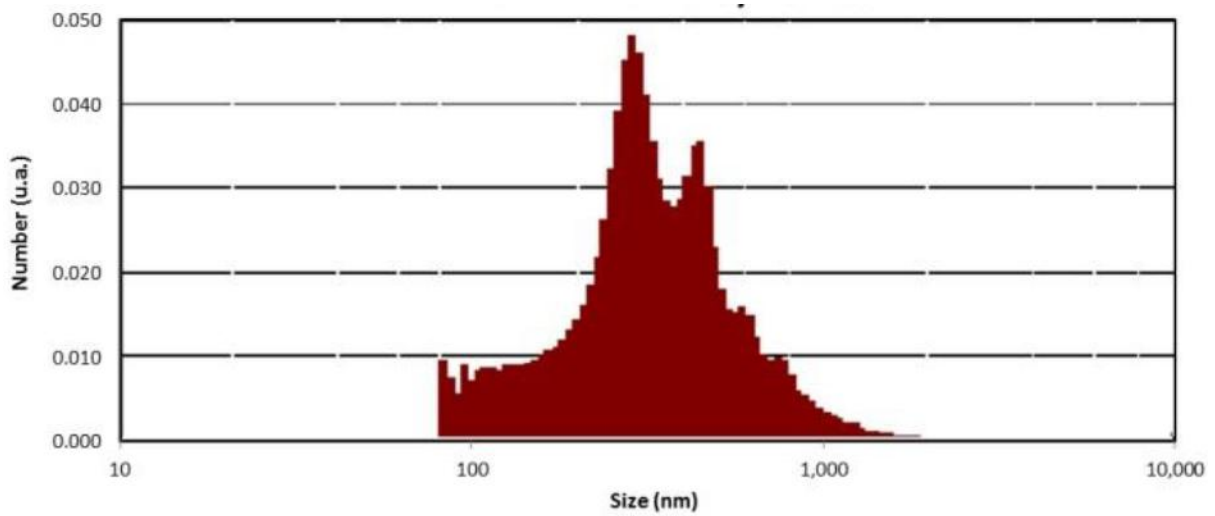
مشخصات	مقدار
DO (غلظت اکسیژن حل شده)	۳/۰۱ppm
متوسط ابعاد میناب	۵۲۱/۵۱Nm
پتانسیل زتا	-۱۰-۳۰Kv

در شکل ۳-۲ توزیع اندازه حباب های آب میکرو-نانوحباب براساس سه پارامتر شدت، تعداد و حجم مشاهده میشود. همانطور که در شکل مشخص است پراکندگی ابعاد میکرو-نانو حباب بر اساس هر کدام از پارامتر های اندازه گیری شده متفاوت است (Arefi et al, 2016).

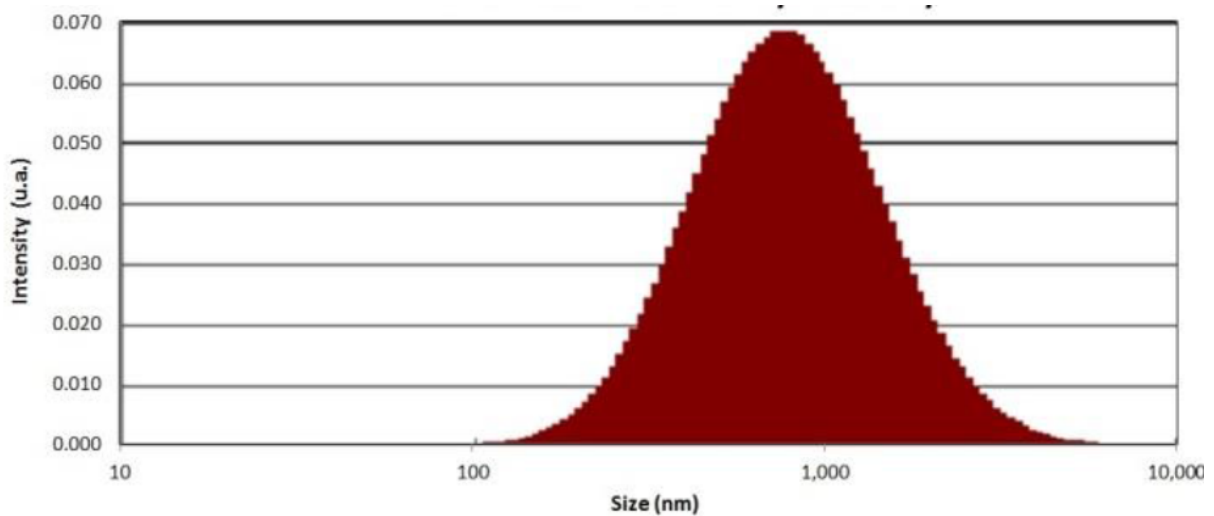
شکل ۳-۲ نشان دهنده نمودار پایداری ابعاد آب میکرو-نانوحباب می باشد



الف) اندازه پراکندگی ذرات میکرو نانو حباب براساس حجم



ب) اندازه پراگندگی ذرات میکرو نانو حباب براساس تعداد



ج) اندازه پراگندگی ذرات میکرو نانو حباب براساس شدت

شکل ۳-۲ منحنی توزیع ابعادی میکرو-نانوحباب تولید شده در آب

### ۳-۴- نسبت مخلوط

طرح مخلوط بتن بدین معناست که اجزا بتن یعنی سیمان، آب، شن و ماسه را به چه نسبتی مخلوط کنیم تا بتن ساخته شده به مشخصات از پیش تعیین شده دست یابد. پس از مخلوط کردن بتن، تمام

قسمت‌های مخلوط باید دارای وزن مخصوص، درصد هوا، اسلامپ، سنگدانه و خمیر سیمان یکسان بوده و مخلوط به دست آمده همگن و یکنواخت باشد.

در این تحقیق با بهره‌گیری از آیین‌نامه ملی طرح مخلوط بتن ایران (نشریه ض- ۴۷۹، ۱۳۸۸)، نسبت های مخلوط مطابق با جدول ۳-۸ مشخص گردیده است. برای نسبت اختلاط نهایی اسلامپ هدف در محدوده ۸۰-۱۰۰ میلی متر و نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ انتخاب گردید و همچنین به سبب افزایش دقت در ارزیابی، تمام آزمایش‌ها میانگین سه آزمون به عنوان نتیجه نهایی ثبت گردیده است.

جدول ۳-۴ نسبت های مخلوط یک مترمکعب بتن

طرح	w/c	سیمان (kg)	آب (lit)	میکرو_نانو حباب (lit)	شن نخودی (kg)	شن بادامی (kg)	ریزدانه (kg)	روان کننده (%)
C	۰/۴۵	۳۸۰	۱۷۱	۰	۸۱۲	۵۵۷	۴۵۶	۰/۱
MK5	۰/۴۵	۳۶۱	۱۷۱	۰	۸۱۲	۵۵۷	۴۵۶	۰/۲۵
MK10	۰/۴۵	۳۴۲	۱۷۱	۰	۸۱۲	۵۵۷	۴۵۶	۰/۴
Z10	۰/۴۵	۳۴۲	۱۷۱	۰	۸۱۲	۵۵۷	۴۵۶	۰/۴۵
Z20	۰/۴۵	۳۰۴	۱۷۱	۰	۸۱۲	۵۵۷	۴۵۶	۰/۶۵
MK10Z10	۰/۴۵	۳۰۴	۱۷۱	۰	۸۱۲	۵۵۷	۴۵۶	۰/۸

۱	۴۵۶	۵۵۷	۸۱۲	۸۵/۵	۸۵/۵	۳۸۰	۰/۴۵	NB50
۱/۱	۴۵۶	۵۵۷	۸۱۲	۱۷۱	۰	۳۸۰	۰/۴۵	NB100
۱/۳	۴۵۶	۵۵۷	۸۱۲	۸۵/۵	۸۵/۵	۳۴۲	۰/۴۵	MK10NB50
۱/۴	۴۵۶	۵۵۷	۸۱۲	۱۷۱	۰	۳۴۲	۰/۴۵	MK10NB100
۱/۴۵	۴۵۶	۵۵۷	۸۱۲	۸۵/۵	۸۵/۵	۳۴۲	۰/۴۵	Z10NB50
۱/۵	۴۵۶	۵۵۷	۸۱۲	۱۷۱	۰	۳۴۲	۰/۴۵	Z10NB100
۱/۶	۴۵۶	۵۵۷	۸۱۲	۸۵/۵	۸۵/۵	۳۰۴	۰/۴۵	MK10Z10NB50
۱/۶	۴۵۶	۵۵۷	۸۱۲	۱۷۱	۰	۳۰۴	۰/۴۵	MK10Z10NB100

در این تحقیق جهت بررسی خواص مکانیکی و دوام بتن دارای افزودنی ها از سه سیستم ترکیبی شامل ۱۴ نسبت مخلوط بتنی استفاده گردیده است. سیستم تک فاز؛ دارای ۷ نسبت مخلوط به ترتیب شامل بتن شاهد، بتن حاوی ۵ و ۱۰ درصد متاکائولین، بتن دارای ۱۰ و ۲۰ درصد زئولیت جایگزین وزن سیمان و دو نسبت ۵۰ و ۱۰۰ درصد آب میکرو\_نانوحباب بجای آب مخلوط بتن می باشد. سیستم دو فاز؛ شامل ۵ نسبت مخلوط به صورت ترکیب همزمان ۱۰ درصد متاکائولین با ۵۰

و ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب، ۱۰ درصد زئولیت با ۵۰ و ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب جایگزین آب مخلوط بتن و ترکیب ۱۰ درصد زئولیت به همراه ۱۰ درصد متاکائولین بوده است. سیستم سه فازی؛ شامل ۲ نسبت اختلاط به صورت ترکیب همزمان ۱۰ درصد متاکائولین به همراه ۱۰ درصد زئولیت در اختلاط با ۵۰ و ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانو حباب استفاده گردیده است. کدگذاری نمونه ها در جدول ۳-۵ شرح داده شده است.

جدول ۳-۵ کدگذاری نمونه ها

نمونه	شرح
C	نمونه شاهد
MK5	جایگزینی ۵ درصد وزنی سیمان متاکائولین
MK10	جایگزینی ۱۰ درصد وزنی سیمان متاکائولین
Z10	جایگزینی ۱۰ درصد وزنی سیمان زئولیت
Z20	جایگزینی ۲۰ درصد وزنی سیمان زئولیت
MK10Z10	جایگزینی ۱۰ درصد متاکائولین و ۱۰ درصد زئولیت
NB50	۵۰ درصد آب میکرو-نانو حباب جایگزین آب مخلوط بتن
NB100	۱۰۰ درصد آب میکرو-نانو حباب جایگزین آب مخلوط بتن
MK10NB50	۱۰ درصد متاکائولین به همراه ۵۰ درصد آب میکرو-نانوحباب
MK10NB100	۱۰ درصد متاکائولین به همراه ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب
Z10NB50	۱۰ درصد زئولیت به همراه ۵۰ درصد آب میکرو-نانوحباب
Z10NB100	۱۰ درصد زئولیت به همراه ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب
MK10Z10NB50	۱۰ درصد متاکائولین به همراه ۱۰ درصد زئولیت در اختلاط با ۵۰ درصد آب میکرو-نانوحباب
MK10Z10NB100	۱۰ درصد متاکائولین به همراه ۱۰ درصد زئولیت در اختلاط با ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب

جهت بررسی عمل آوری در شرایط آب دریا نسبت های مخلوط نمونه ها بر اساس جدول ۳-۶ بوده، پس از عمل آوری ۵ طرح مخلوط بتنی در آب دریا مصنوعی، تحت آزمایش های مقاومت فشاری،

کششی، خمشی، الکتریکی، جذب آب و تسریع نفوذپذیری کلراید<sup>۱</sup> RCPM قرار گرفته است و نتایج بدست آمده با نتایج حاصله از نمونه های عمل آوری شده در شرایط آب و آهک اشباع مقایسه شده است.

جدول ۳-۶ نسبت های مخلوط یک مترمکعب بتن در شرایط عمل آوری در آب دریا

معرفی نمونه بتنی	طرح	w/c	سیمان (kg)	آب (lit)	میکرو-نانو حباب (lit)	شن نخودی (kg)	شن بادامی (kg)	ریزدانه (kg)	روان کننده (%)
نمونه شاهد عمل آوری شده در آب دریا	CS	۰/۴۵	۳۸۰	۱۷۱	۰	۸۱۲	۵۵۷	۴۵۶	۰/۱
۵۰ درصد آب میکرو-نانو حباب جایگزین آب مخلوط بتن در شرایط عمل آوری در آب دریا	NB100S	۰/۴۵	۳۸۰	۰	۱۷۱	۸۱۲	۵۵۷	۴۵۶	۱/۱
۱۰ درصد زئولیت به همراه ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانو حباب در شرایط عمل آوری در آب دریا	Z10NB100S	۰/۴۵	۳۴۲	۰	۱۷۱	۸۱۲	۵۵۷	۴۵۶	۰/۴
۱۰ درصد متاکائولین به همراه ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانو حباب در شرایط عمل آوری در آب دریا	MK10NB100S	۰/۴۵	۳۴۲	۰	۱۷۱	۸۱۲	۵۵۷	۴۵۶	۱
۱۰ درصد متاکائولین به همراه ۱۰ درصد زئولیت در اختلاط با ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانو حباب	MK10Z10NB100	۰/۴۵	۳۰۴	۰	۱۷۱	۸۱۲	۵۵۷	۴۵۶	۱/۱

### ۳-۵- برنامه آزمایشگاهی

#### ۳-۵-۱- نحوه اختلاط و قالب گیری

برای ساخت بتن از یک میکسر با ظرفیت ۱۲۰ لیتر با سرعت گردش دیگ ۱۵ دور در دقیقه استفاده گردید. نحوه اختلاط و عمل آوری بتن، با توجه به آیین نامه بتن (نشریه ض- ۴۷۹، ۱۳۸۸) ایران و استاندارد (ASTM C192(2002) صورت پذیرفت. با توجه به صفر در نظر گرفتن رطوبت مصالح در

<sup>۱</sup> Rapid Chloride Permeability Test



طرح اختلاط، مصالح پیش از استفاده در داخل دستگاه گرمخانه قرار داده شدند تا رطوبت آن به صفر برسد. سپس ابتدا سنگدانه‌ها شامل شن و ماسه در مخلوط کن به مدت ۶۰ ثانیه مخلوط شدند. در ادامه با اضافه کردن سیمان، به مدت ۶۰ ثانیه دیگر اختلاط ادامه یافت و در مرحله بعد آب افزوده شده و به مدت ۳ دقیقه کاملاً مخلوط گردید. سپس برای مدت ۱ دقیقه دستگاه خاموش شد و مصالح چسبیده به دیواره میکسر به مخلوط اضاف شد و پس از آن دوباره اختلاط برای ۲ دقیقه ادامه یافت. پس از اختلاط، نخست آزمایش اسلامپ بر روی نمونه های بتن تازه صورت پذیرفت و در نهایت بتن آماده شده طی سه مرحله درون قالب‌های فولادی ریخته و با ضربه میله مخصوص (به قطر ۱۶ میلی-متر و طول ۶۰ سانتی متر) متراکم شده و سپس سطح آن‌ها صاف گردید.

### ۳-۵-۲- عمل آوری نمونه ها

بعد از گذشت ۲۴ ساعت نمونه ها از قالب خارج شده و بر اساس استاندارد (ASTM C192(2002) درون حوضچه آب آهک اشباع با دمای ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتیگراد تا سن مورد نیاز برای آزمایش های در نظر گرفته شده، عمل آوری و همچنین بصورت موردی تعدادی از نمونه ها در آب دریا مصنوعی که مطابق استاندارد (ASTM D1141(1998) ساخته شده، عمل آوری شدند.

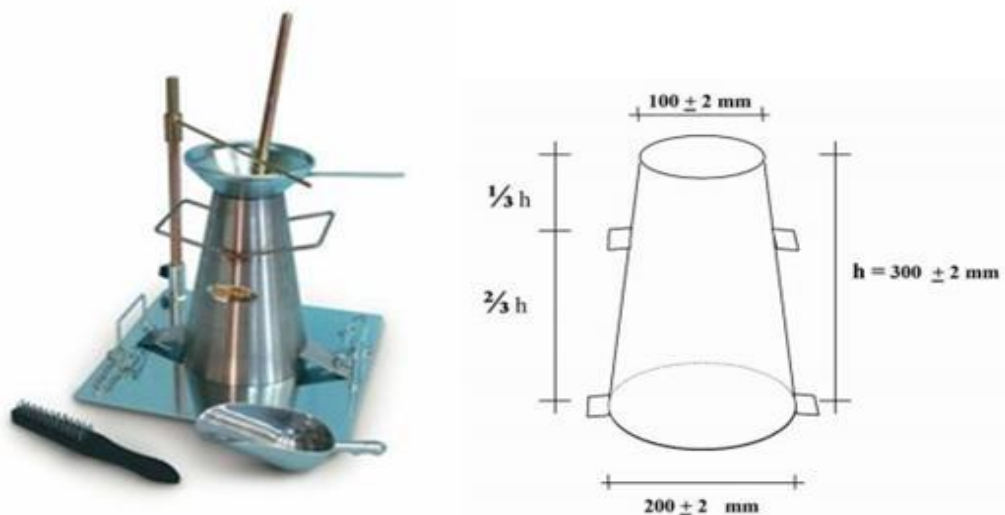
### ۳-۵-۳- آزمایش نمونه ها

در این پژوهش ابتدا آزمایش های اسلامپ صورت پذیرفت و سپس نمونه ها بعد از عمل آوری در سنین مشخص، تحت آزمایش مقاومت فشاری، کششی، خمشی، الکتریکی، جذب آب حجمی، نفوذپذیری تسریع شده یون کلراید و تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) قرار داده شدند.

### ۳-۵-۳-۱- آزمایش اسلامپ

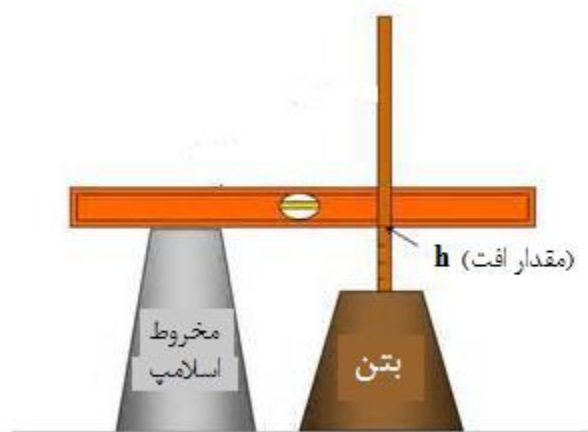
روانی بتن یعنی قابلیت بتن یا ملات تازه مخلوط شده برای جریان یافتن که منجر به سهولت در ریختن، قابلیت تراکم، سهولت در پرداخت بتن و مقاومت در برابر جدا شدگی می شود. استاندارد

ASTM C143(2010) به بیان مواد و روش لازم جهت تعیین روانی بتن تازه به روش اسلامپ پرداخته اند. در این روش، بتن تازه در قالبی به شکل مخروط ناقص با ابعاد معین، متراکم می گردد. هنگامی که مخروط به طرف بالا کشیده میشود، میزان افتی که بتن تازه نسبت به حالت اولیه به دست می آورد اندازه گیری می شود. قالب، میله تراکم، خط کش، صفحه پایه، ظرف اختلاط، بیلچه، پارچه مرطوب، کمچه و زمان سنج از جمله ابزارهای مورد نیاز این آزمایش به شمار می روند که در شکل ۳-۳ قابل ملاحظه می باشند.



شکل ۳-۳ ابزارهای مورد نیاز آزمایش اسلامپ

برای انجام آزمایش ابتدا قالب اسلامپ و صفحه پایه مرطوب می شوند. بتن آماده شده به طور یکنواخت در ۳ لایه به درون قالب ریخته می شود. هر لایه با ۲۵ ضربه میله کوبه متراکم می شود، ارتفاع هر لایه پس از تراکم به حدود ۱۰ سانتی متر می رسد. در نهایت پس از متراکم نمودن لایه بالایی، سطح آن به وسیله غلتاندن میله کوبه صاف و بتن های ریخته شده بر روی صفحه پایه تمیز می شوند. در ادامه قالب به طور یکنواخت و در مدت زمان ۵ تا ۱۰ ثانیه به سمت بالا کشیده می شود و مقدار افت ( $h$ ) که در شکل ۳-۴ مشخص است. کلیه کارهای یاد شده در مدت زمان ۱۵۰ ثانیه انجام گرفته است (شکل ۳-۴). لازم به ذکر است که نتیجه این آزمایش زمانی مورد قبول است که نمونه بتن پس از برداشته شدن قالب به شکل مخروط ناقص باقی بماند.



شکل ۳-۴ افت بتن در آزمایش اسلامپ

### ۳-۵-۲- آزمایش مقاومت فشاری

این آزمایش طبق استاندارد BS1881 (1993) در سنین ۷ و ۲۸ و ۹۰ روزه توسط جک هیدرولیکی انجام گردید. برای انجام آزمایش نمونه‌های مکعبی استاندارد ۱۰ سانتی‌متری مورد استفاده قرار گرفت. جک مورد استفاده، ساخت شرکت Toni Technik با سرعت بارگذاری ۱ min/mm (شکل ۳-۵) برای انجام آزمایش مقاومت فشاری استفاده شده است. مشخصات این جک هیدرولیکی در جدول ۳-۷ ارائه شده است.

جدول ۳-۷ مشخصات جک هیدرولیکی Toni Technik (برگرفته از کاتالوگ دستگاه)

ویژگی‌های خاص	حداکثر نیروی فشاری	حداکثر نیروی خمشی	سیستم اندازه‌گیری
سیستم چند منظوره با امکانات انعطاف پذیر، به خصوص برای تحقیق و توسعه	۲۰۰ kN تا ۱۰۰۰ kN	۲۰ kN تا ۱۰۰ kN	ToniTrol testXpert



شکل ۳-۵ جک هیدرولیکی استفاده شده برای آزمایش مقاومت فشاری

### ۳-۵-۳-۳- آزمایش مقاومت کششی (برزیلی)

برای انجام این آزمایش نمونه های استوانه ای با قطر ۱۵ سانتی متر و ارتفاع ۳۰ سانتی متر در سن ۲۸ و ۹۰ روز، پس از نگهداری در محلول آب آهک اشباع، طبق استاندارد (ASTM C496(2004) ، تحت آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم برزیلی قرار داده شدند. در آزمایش مقاومت کششی از جک هیدرولیکی Toni Technik با سرعت بارگذاری ۱ mm/min استفاده شده است. تصویر دستگاه در شکل ۳-۶ به نمایش در آمده است.

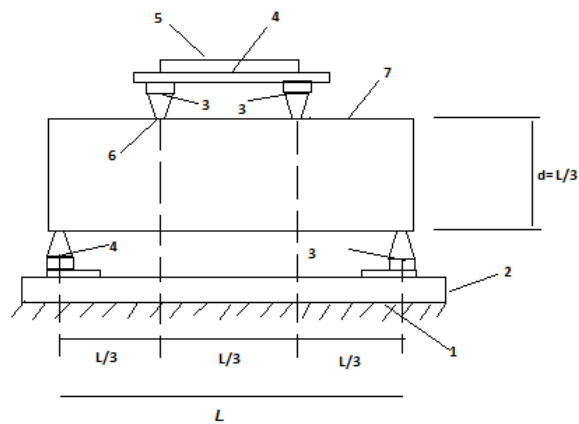


شکل ۳-۶- آزمایش مقاومت کششی (برزیلی)

### ۳-۵-۳-۴- آزمایش مقاومت خمشی

این آزمایش بر روی تیر بتنی با تکیه گاه ساده، با ابعاد  $10 * 50 * 50$  سانتی متر در سن ۴۲ روز صورت پذیرفت. مقاومت خمشی بتن بر اساس استاندارد ASTM C78(2002) به صورت تست چهار نقطه‌ای (شکل ۳-۷ و ۳-۸) با اعمال دوبار متمرکز بر روی تیر (با تکیه گاه های ساده) انجام می گردد. بار اولیه که میتواند سریعاً وارد شود، حداکثر تا ۵۰٪ درصد بار گسیختگی نمونه است و از آن به بعد سرعت ازدیاد بار به گونه ای تنظیم می گردد که تنش تارهای انتهایی مقطع در هر دقیقه بیشتر از ۳۲ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع، افزایش نیابد.

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



شکل ۳-۷ شکل هندسی دستگاه آزمون مقاومت خمشی بتن - روش بارگذاری چهار نقطه‌ای



شکل ۳-۸ آزمایش مقاومت خمشی تیر بتنی قبل و بعد از شکست نمونه

برای انجام این آزمایش نیز از جک هیدرولیکی ساخت شرکت Toni Technik با سرعت بارگذاری  $1 \text{ mm/min}$  (شکل ۳-۹) استفاده شده است. همچنین به منظور اعمال بار از دو نقطه بر روی نمونه از پد دو شاخه ای (شکل ۳-۱۰) استفاده شده است.



شکل ۳-۹ دستگاه جک هیدرولیکی استفاده شده برای آزمایش مقاومت خمشی



شکل ۳-۱۰ میله دوشاخه مورد استفاده در آزمایش مقاومت خمشی

### ۳-۵-۵- آزمایش جذب آب ۳۰ دقیقه و ۲۴ ساعت

جهت انجام آزمایش طبق استاندارد (BS 1881(1983)، نمونه ۱۰\*۱۰\*۱۰ سانتی متر پس از عمل آوری در شرایط استاندارد در سن ۲۸ و ۹۰ روز، در دستگاه خشک کن تحت دمای ۱۰۵ درجه قرار داده شد و پس از مدت ۲۴ ساعت با تمهیدات خاص به نحوی که تمام سطح آن با آب در تماس باشد، مرطوب گردید و در مدت ۳۰ دقیقه و ۲۴ ساعت مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بر اساس اختلاف وزن در دو حالت مرطوب و خشک طبق رابطه ۳-۱۰ محاسبه می گردد.

$$A = \frac{M1 - M0}{M0} \times 100$$

معادله ۳-۱

$M_0$  جرم بتن خشک (پس از قرار گرفتن در دستگاه خشک کن)؛  $M_1$  جرم بتن مرطوب (پس از قرار گرفتن در آب به مدت ۳۰ دقیقه و ۲۴ ساعت) را نشان می دهد.

### ۳-۵-۳-۶- آزمایش نفوذپذیری تسریع شده یون کلراید<sup>۱</sup> (RCPT)

آزمایش RCPT به طور گسترده ای در دنیا مورد استفاده قرار گرفته است. همان گونه که از شکل (۳-۱۱) قابل مشاهده است. در این روش میزان کل بار الکتریکی عبوری از نمونه های بتنی اشباع به قطر ۱۰۰ و ضخامت ۵۰ میلیمتر در طول ۶ ساعت تحت اختلاف پتانسیل ۶۰ ولت، اندازه گیری می شود. نمونه های بتنی از یک وجه با محلول NaCl و از وجه دیگر با محلول NaOH در تماس قرار میگیرند و با ایجاد اختلاف پتانسیل، جریان الکتریکی از نمونه ها عبور کرده و یونهای کلراید به درون بتن رانده می شوند (شکل ۳-۱۱). این روش بر این فرض استوار است که میزان جریان عبوری، با قابلیت انتشار یونهای کلر از میان منافذ موئین بتن ارتباط دارد. RCPT روشی است که در آن شرایط پایدار نفوذ وجود ندارد. بدان معنی که برای دستیابی به انتشار پایدار، میبایست شرایطی ایجاد شده باشد که یونهای کلرید از یک سوی نمونه به سوی دیگر آن رسیده باشند که برای حصول این شرط، نیاز به مدت زمان طولانی است. لیکن در روش RCPT اندازه گیری از همان لحظه شروع انجام آزمایش، آغاز می گردد. مشکل دیگری که در روش RCPT وجود دارد، حرارت به وجود آمده در طول انجام آزمایش میباید. به علاوه، به دلیل ولتاژ نسبتاً زیاد ۶۰ ولت، جریان برقرار شده در حالت پایداری قرار نمیگیرد. در نتیجه ممکن است نتایج به دست آمده به درستی بیانگر انتشار یونهای کلرید نباشد.

در این تحقیق آزمایش RCPT مطابق با استاندارد ASTM C1202(2007)، در سن ۲۸ و ۹۰ روز انجام شد. برای هر طرح اختلاط، ۳ نمونه استوانه ای ۵\*۱۰ سانتی متر بعد از آماده سازی، درون سلولهای آزمایش قرار داده شدند. در انتها، جریان ثابتی با اعمال ۶۰ ولت اختلاف پتانسیل از نمونه ها عبور داده شد و بعد از ۶ ساعت، میزان کل بار الکتریکی عبوری از نمونه ها بدست آمد.

<sup>۱</sup>Rapid Chloride Permeability Test





شکل ۱۱-۳ دستگاه آزمایش RCPT

### ۳-۵-۳-۷- آزمایش مقاومت الکتریکی

مقاومت الکتریکی بتن یکی از خواص ذاتی آن می باشد که به میزان رطوبت بتن و ترکیبات آن بستگی دارد. در حالت کلی، ضریب نفوذ یونهای کلرید به طور عکس با مقاومت الکتریکی بتن رابطه دارد. همچنین، مقاومت الکتریکی با نرخ خوردگی آرماتور بعد از شروع خوردگی در ارتباط است. انتقال یون ها بین آند و کاتد در سطح آرماتور یکی از عوامل کنترلی نرخ خوردگی میباشد. آزمایش مقاومت الکتریکی طبق استاندارد (FM 5-578(2004 بر روی نمونه های استوانه ای با ابعاد ۱۰\*۲۰ سانتی متر در سن ۲۸ و ۹۰ روز به روش چهار نقطه ای دستگاه Wenner انجام گرفته است(شکل ۱۲-۳). مقاومت الکتریکی از معادله ۱۱-۳ محاسبه می گردد.

$$R = \frac{2\pi av}{i} \quad \text{معادله ۲-۳}$$

در رابطه ۲-۳؛ R بیانگر مقاومت الکتریکی بر حسب (K.Ω.Cm) ؛ a فاصله ۲ الکتروود بر حسب (Cm)؛ v ولتاژ اعمال شده بر حسب (V) و i شدت جریان بر حسب (A) می باشد.



شکل ۳-۱۲ دستگاه آزمایش مقاومت الکتریکی

### ۳-۵-۳-۸- آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM<sup>۱</sup>

میکروسکوپ الکترونی روبشی یکی از بهترین روشهای آنالیزی است که امروزه در حوزه های مختلف کاربردهای فراوانی دارد. این میکروسکوپ، امکان بررسی و آنالیز شیمیایی ترکیب، سطح و ریزساختارها داخلی را در ابعاد میکرونی و نانومتری فراهم آورده است. قبل از تصویربرداری نمونه توسط دستگاه نیاز به آماده سازی نمونه است که بسته به جنس، سختی، اندازه، کیفیت سطح و مانند آن متغیر است. نمونه هایی که داخل دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی قرار می گیرند باید کاملاً خشک، عاری از هرگونه خواص مغناطیسی، دارای رسانایی بالا و در ابعاد مناسب باشند تا هم به نتیجه موردنظر دست یافت و هم دستگاه را از هرگونه آسیبی حفظ کرد. میکروسکوپ الکتریکی دارای یک تفنگ الکترونی در بالای ستون خود هستند که برای پدید آوردن باریکه الکترونی بکار می رود. همچنین یک ستون الکترونی برای همگرا کردن باریکه الکترونی و پدید آوردن تغییرات لازم در شرایط کاری آن نیاز وجود دارد. برهم کنش باریکه الکترونی با نمونه در یک محفظه خلاء انجام می شود. به کمک آشکار سازهای مناسب، می توان نسبت به تشکیل تصویر از نقاط گوناگون سطح روبش

<sup>۱</sup>Scanning Electron Microscopy

شده نمونه یا تهیه طیف عنصرهای موجود در آن اقدام نمود.

در این تحقیق ساختار نمونه های مخلوط بتن پس از پوشیده شدن سطح آن ها با طلا، زیر میکروسکوپ الکترونی دستگاه TESCAN VEGA II با ولتاژ شتاب دهنده ۳۰ KV با سه دقت ۱۰۰، ۲۰ و ۵ میکرومتر ( $\mu m$ ) بر اساس استاندارد ASTM C1723 (2010) مورد ارزیابی قرار گرفته است (شکل ۳-۱۴).



شکل ۳-۱۴ دستگاه تصویربرداری الکترونی روبشی SEM

#### - مشکلات و محدودیت ها:

در مدت زمانی که برای این تحقیق وقت گذاشته شد همواره مشکلاتی از قبیل دسترسی محدود به تجهیزات آزمایشگاهی و وقت محدود در استفاده از آزمایشگاه مشاهده شده است.



## فصل ۴ تجزیه و تحلیل داده ها

#### ۴-۱- مقدمه

این فصل به ارائه نتایج آزمایش هایی که روش و استاندارد انجام آنها در فصل ۳ شرح داده شد و تجزیه و تحلیل این نتایج اختصاص دارد.

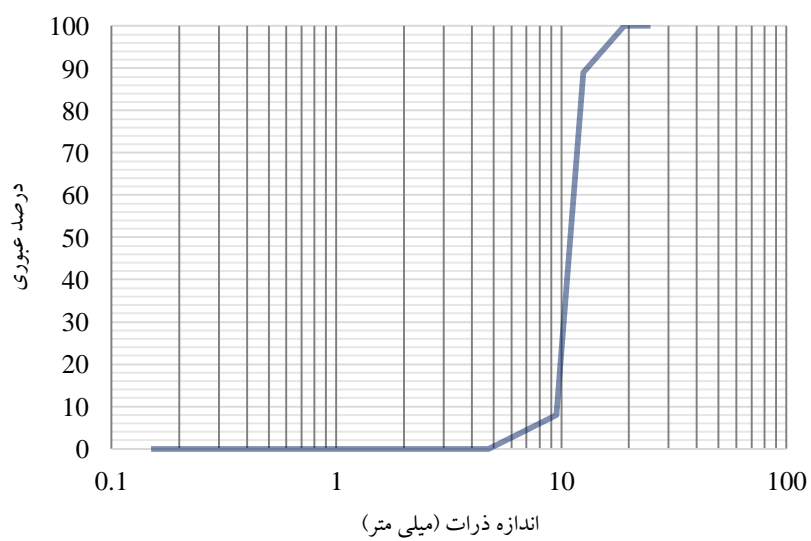
#### ۴-۲- دانه بندی سنگدانه ها

طبق توصیه آیین نامه ملی طرح مخلوط بتن ایران (نشریه ض - ۴۷۹)، در حالتی که ساخت بتن برای بتن ریزی در قطعاتی همچون تیر و دال با نمای معمولی در نظر باشد، قرارگیری در حد فاصل منحنی A و B مناسب است. در حالتی که ساخت بتن برای بتن ریزی در قطعاتی همچون ستون و دیوار مد نظر است قرارگیری منحنی در ناحیه میانی A و B و نزدیک به B توصیه می شود. نمای این بتن کاملاً مطلوب است و بافت نسبتاً ریزتری خواهیم داشت. عدد n در رابطه ی تامسون-فولر (رابطه ۴-۱) که جهت دانه بندی مصالح مورد استفاده قرار میگیرد، برای منحنی A برابر ۰/۶۷ و برای منحنی B برابر ۰/۳۵ می باشد. بنابراین در این تحقیق جهت قرارگیری منحنی در حدفاصل A و B از n برابر با ۰/۵۵ برای بزرگترین بعد سنگدانه ۱۹ میلی متر استفاده گردیده است. بر این اساس نمودار دانه بندی شن بادامی، شن نخودی، ماسه و مخلوط شن و ماسه به نسبت ۵۵ به ۴۵ درصد در شکل های ۴-۱، ۴-۲، ۴-۳ و ۴-۴ به نمایش در آمده است.

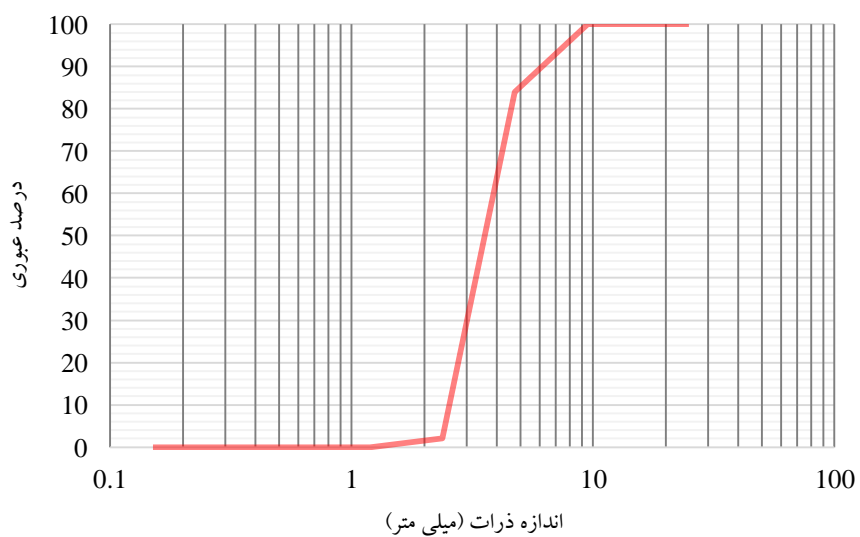
$$P = \left(\frac{d}{D}\right)^n * 100$$

رابطه ۴-۱ تامسون- فولر

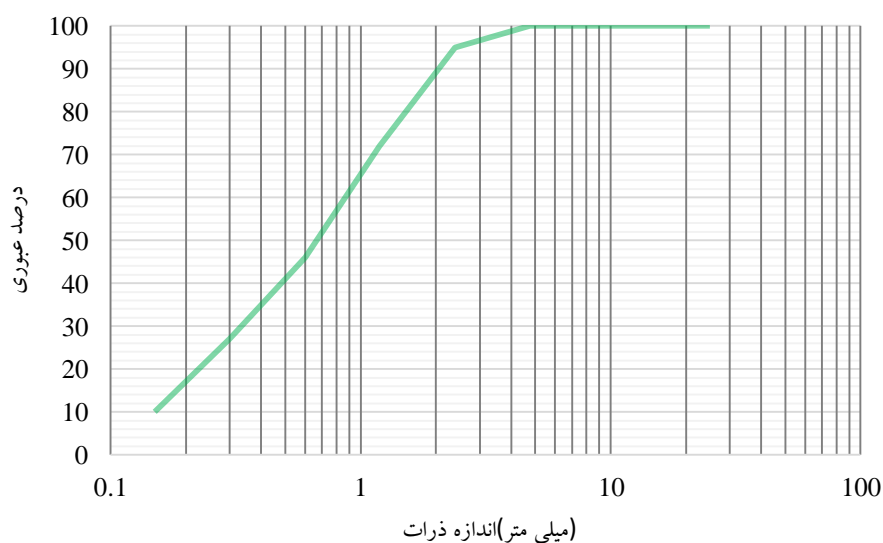
در رابطه ۴-۱: P درصد گذشته تجمعی از الک d (بصورت درصد حجمی)؛ D حداکثر اندازه سنگدانه و n توانی است که برای منحنی A برابر با ۰/۶۷ و برای منحنی B برابر با ۰/۳۵ و برای منحنی C برابر با ۰/۱ می باشد.



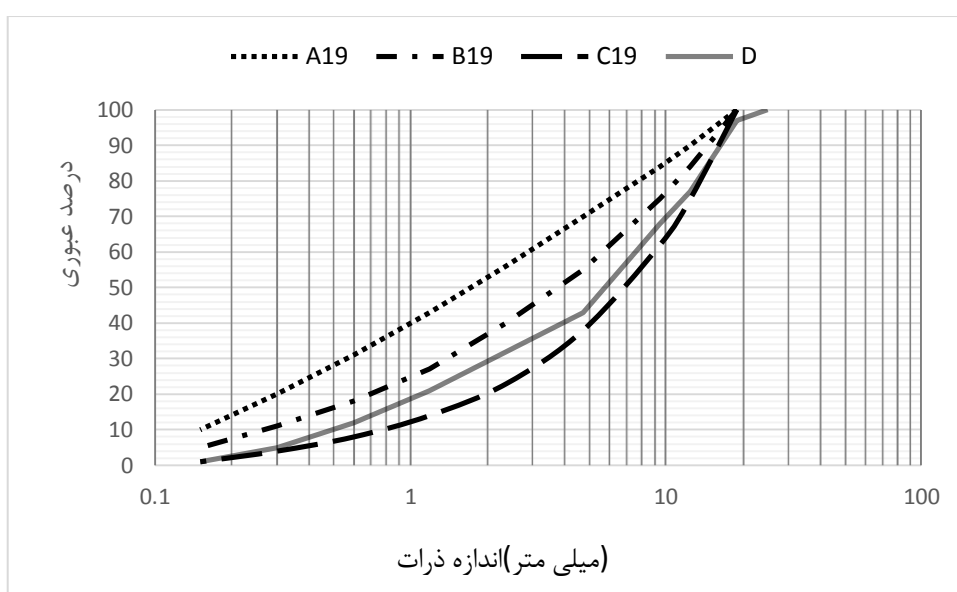
شکل ۱-۴ منحنی دانه بندی شن بادامی با اندازه ذرات ۱۲/۵ تا ۱۹ میلی متر



شکل ۲-۴ منحنی دانه بندی شن نخودی با اندازه ذرات ۴,۷۵ تا ۱۲,۵ میلی متر



شکل ۳-۴ منحنی دانه بندی ماسه با اندازه ذرات ۰/۱۵ تا ۴/۷۵ میلی متر



شکل ۴-۴ منحنی مخلوط ۰/۵۵ درصد شن به ۰/۴۵ درصد ماسه و مقایسه با منحنی استاندارد

### ۳-۴- سیمان

برای ساخت نمونه های بتنی از سیمان پرتلند تپ ۴۲۵-۱ شرکت سیمان تهران با مشخصات شیمیایی مندرج در جدول های ۴-۱ که در آزمایشگاه علم و صنعت ایران انجام شده، مورد استفاده



قرار گرفته است. سیمان مورد استفاده مطابق با استاندارد (۳۸۹ ایران، ۱۳۹۵) و ASTM C150(2012) می باشد.

جدول ۴-۱ مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۴۲۵-۱ تهران

مشخصات شیمیایی	سیمان تهران (%)	استاندارد ۳۸۹ ملی ایران (%)
Silica (SiO <sub>2</sub> )	۲۲/۳	حداقل ۲۰
Calcium Oxide (CaO)	۶۲/۴	-
Iron Oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	۳/۷۰	حداکثر ۶
Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	۴/۵۰	حداکثر ۶
Magnesium Oxide (MgO)	۲/۳۰	حداکثر ۵
Sodium Oxide (Na <sub>2</sub> O)	۰/۲۷	-
Potassium Oxide (K <sub>2</sub> O)	۰/۷۶	-
Sulfur Three Oxide (SO <sub>3</sub> )	۲/۲۵	حداکثر ۳

#### ۴-۴- پوزولان طبیعی زئولیت

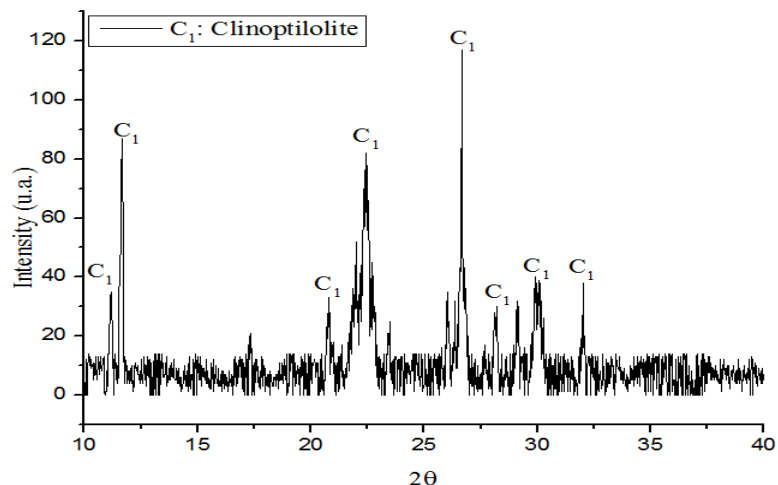
پوزولان زئولیت طبیعی (شکل ۴-۵) از نوع کلینوپتیلولیت دارای وزن مخصوص  $1/19 \text{ kg/cm}^3$  محصول شرکت نگین پودر سمنان می باشد. مشخصات شیمیایی زئولیت مطابق با الزامات استاندارد ASTM C618(1999) در جدول ۴-۲ ارائه شده است و همچنین شکل ۴-۶ مربوط به آزمایش XRD پوزولان زئولیت می باشد. آزمایش های مذکور در دانشگاه علم و صنعت ایران انجام شده است.



شکل ۴-۵ پوزولان طبیعی زئولیت

جدول ۴-۲ مشخصات شیمیایی پوزولان طبیعی زئولیت

مشخصات شیمیایی	زئولیت (%)
Silica (SiO <sub>2</sub> )	۶۸/۷۹
Calcium Oxide (CaO)	۳/۵۲
Iron Oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	۰/۵۶
Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	۱۱/۵۵
Magnesium Oxide (MgO)	۰/۷۵
Sodium Oxide (Na <sub>2</sub> O)	۰/۶۵
Potassium Oxide (K <sub>2</sub> O)	۱/۳۳
Sulfur Three Oxide (SO <sub>3</sub> )	۰/۰۰۸



شکل ۴-۶ نمودار آزمایش XRD پوزولان زئولیت

#### ۴-۵- پوزولان متاکائولین

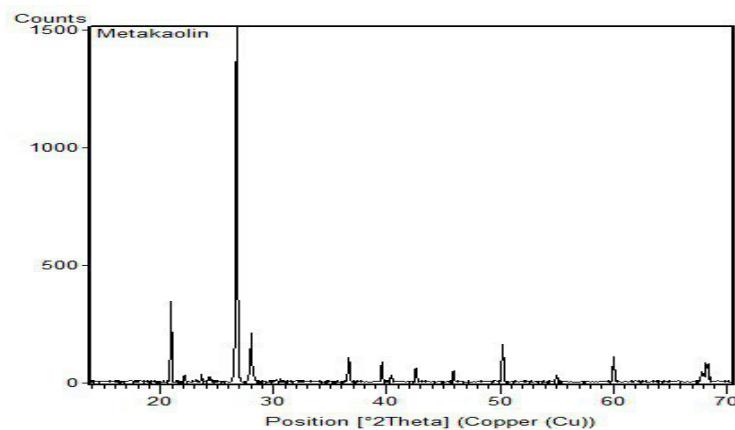
پوزولان طبیعی مورد استفاده در این پژوهش (شکل ۴-۷)، تولید شرکت جهان پودر دلیجان و دارای ترکیبات شیمیایی مطابق با الزامات استاندارد ASTM C618(1999) به شرح جدول ۴-۳ می باشد و همچنین شکل ۴-۸ مربوط به آزمایش XRD پوزولان متاکائولین می باشد. آزمایش های مذکور در دانشگاه علم و صنعت ایران انجام شده است.



شکل ۴-۷ پوزولان متاکائولین

جدول ۳-۴ مشخصات شیمیایی پوزولان طبیعی متاکائولین

مشخصات شیمیایی	متاکائولین (%)
Silica (SiO <sub>2</sub> )	۷۴/۲
Calcium Oxide (CaO)	۳/۳۲
Iron Oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	۰/۸۵
Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	۱۷/۶
Magnesium Oxide (MgO)	۰/۲۵
Sodium Oxide (Na <sub>2</sub> O)	۰
Potassium Oxide (K <sub>2</sub> O)	۰/۳۴
Sulfur Three Oxide (SO <sub>3</sub> )	۰/۴۳



شکل ۴-۸ نمودار XRD پوزولان متاکائولین

در استاندارد ASTM C618(1999) محدودیت های زیر بصورت اجباری برای آنالیز شیمیایی پوزولان های طبیعی در نظر گرفته شده است.

$$(SiO_2) + (Al_2O_3) + (Fe_2O_3) > 70\% \quad \text{رابطه ۲-۴}$$

$$(SO_3) < 4\% \quad \text{رابطه ۳-۴}$$

محدودیت اول به این دلیل می باشد که وجود مقدار کافی سه اکسید اشاره شده در رابطه ۱-۳ برای انجام واکنش پوزولانی لازم است. یعنی این ترکیبات با آهک ناشی از هیدراسیون سیمان واکنش می دهند و سبب بهبود ریز ساختار بتن می گردند. محدودیت دوم مربوط به مقدار حداکثر سولفور می

باشد که خطر حمله سولفاتی را افزایش می دهد که نتیجه آن انبساط های نامطلوب و مخرب می باشد. با توجه به ترکیبات زئولیت و متاکائولین و محدودیتهای ۱ و ۲ داریم:

$$(SiO_2) + (Al_2O_3) + (Fe_2O_3) = 80.9\% > 70\% \quad \text{رابطه}$$

۴-۴

$$(SiO_2) + (Al_2O_3) + (Fe_2O_3) = 92.65\% > 70\% \quad \text{رابطه}$$

۵-۴

$$(SO_3) = 0.008\% < 4\% \quad \text{رابطه}$$

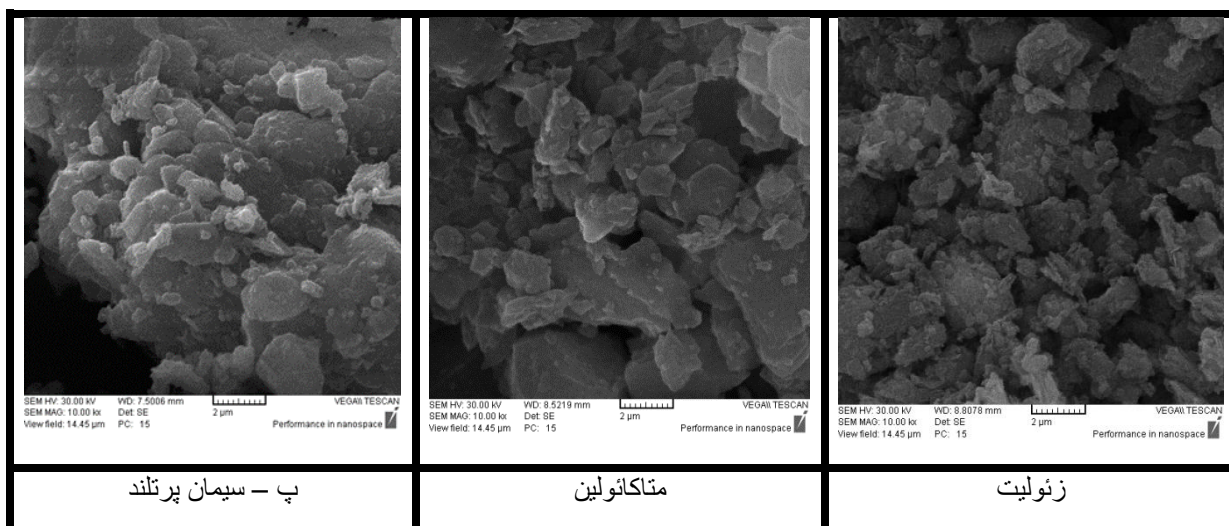
۶-۴

$$(SO_3) = \quad \text{رابطه ۷-۴}$$
$$0.43\% < 4\%$$

از نتایج روابط ۴-۴ و ۶-۴ که مربوط به پوزولان زئولیت و همچنین رابطه ۵-۴ و ۷-۴ که مربوط به پوزولان متاکائولین می باشد مشاهده گردید که هر دو شرط اشاره شده، برای هر دو پوزولان ارضا شده است.

#### ۶-۴- نتایج میکروسکوپ الکترونی سیمان پرتلند، زئولیت و متاکائولین

در شکل ۹-۴ نتایج حاصله از آزمایش میکروسکوپ الکترونی (SEM) نشان داده شده است. بر اساس نتایج حاصله مشاهده می شود که زئولیت و متاکائولین استفاده شده در این تحقیق دارای سطح مخصوص بالا بوده و همچنین حاوی ذراتی با اندازه های مختلف می باشند. آزمایش مذکور در دانشگاه علم و صنعت ایران انجام شده است.



شکل ۴-۹ تصاویر SEM سیمان، متاکائولین و زئولیت

#### ۴-۷- آزمایش اسلامپ

با توجه به انجام آزمایش اسلامپ مشخص گردید که نمونه های حاوی زئولیت سبب کاهش روانی بتن شده که این موضوع در تمامی نمونه های حاوی آب میکرو-نانوحباب ۵۰ و ۱۰۰ درصد مشاهده گردید که این کاهش اسلامپ در نمونه های آب میکرو- نانو حباب نسبت به نمونه های حاوی متاکائولین و زئولیت در اختلاط با آب معمولی بیشتر بوده است. همچنین نتایج نشان می دهد مخلوط حاوی متاکائولین مقدار روان کننده کمتری در مقایسه با مخلوط حاوی زئولیت و آب میکرو-نانوحباب نیاز دارد.

نتایج بدست آمده توسط محققین دیگر نیز تایید کننده تاثیر استفاده از زئولیت در کاهش اسلامپ و روانی بتن تازه می باشد (valipour at al, 2013). در بتن حاوی آب میکرو\_نانو حباب کاهش روانی بتن را می توان به تمایل آن جهت شروع کردن سریع تر فرآیند هیدراسیون و افزایش سرعت این فرآیند که با جذب آب بیشتری در بتن تازه همراه است و در نهایت منجر به کاهش کارایی بتن می گردد، نسبت داد. در مطالعه ای در سال ۲۰۱۶ اثر استفاده از آب میکرو\_نانو حباب بر خواص بتن تازه بررسی گردید که مشخص شد آب میکرو\_نانو حباب سبب کاهش کارایی بتن تازه می گردد (Arefi at

(al, 2016). این مقدار کاهش کارایی توسط جایگزین کردن درصد فوق روان کننده بیشتر جبران می‌گردد. نتایج آزمایش اسلامپ پس از اضافه کردن فوق روان کننده در جدول ۴-۴ ارائه گردیده است.

جدول ۴-۴ نتایج آزمایش اسلامپ

اسلامپ(mm)	نمونه
۱۰۰	C
۱۰۰	MK5
۱۰۰	MK10
۹۰	Z10
۸۷	Z20
۸۸	MK10Z10
۹۰	NB50
۹۲	NB100
۹۴	MK10NB50
۹۲	MK10NB100
۹۳	Z10NB50
۹۱	Z10NB100
۹۳	MK10Z10NB50
۹۰	MK10Z10NB100

#### ۴-۸ مقاومت فشاری

با توجه به شکل ۴-۱۰ مشاهده گردید که در سن ۲۸ روز افزودن ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی سیمان زئولیت سبب افزایش مقاومت فشاری بتن به مقدار ۳/۷ و ۲ درصد، در نمونه های حاوی ۵ و ۱۰ درصد متاکاؤلین به مقدار ۳ و ۴/۷۵ درصد افزایش نسبت به نمونه شاهد گردید و همچنین نمونه حاوی ۱۰ درصد متاکاؤلین به همراه ۱۰ درصد زئولیت سبب افزایش مقاومت فشاری بتن به مقدار ۶/۲۵ درصد

نسبت به نمونه شاهد گردید که دلیل این موضوع ممکن است بعلت بهبود فرایند هیدراسیون از طریق افزودن پوزولان و همچنین اصلاح ساختار حفرات نمونه های بتنی باشد.

نمونه های حاوی آب میکرو-نانوحباب در ۵۰ و ۱۰۰ درصد جایگزینی بجای آب طرح مخلوط بتن در سن ۲۸ روز به ترتیب به مقدار ۸/۸۲ و ۱۳/۲ درصد سبب افزایش مقاومت فشاری بتن شده است که دلیل این موضوع ممکن است بعلت افزایش سرعت هیدراسیون و خاصیت برخورد ذرات که با معادله ۸ نشان داده شده است، باشد. این موضوع سبب اختلاط همگن نمونه حاوی آب میکرو-نانوحباب به نسبت به نمونه شاهد شده است (Yoon and Lutell, 1989).

$$P_c = \left[ \frac{3}{2} + \frac{4Re^{0.72}}{15} \right] \left( \frac{D_p}{D_b} \right)^2 \quad (۸)$$

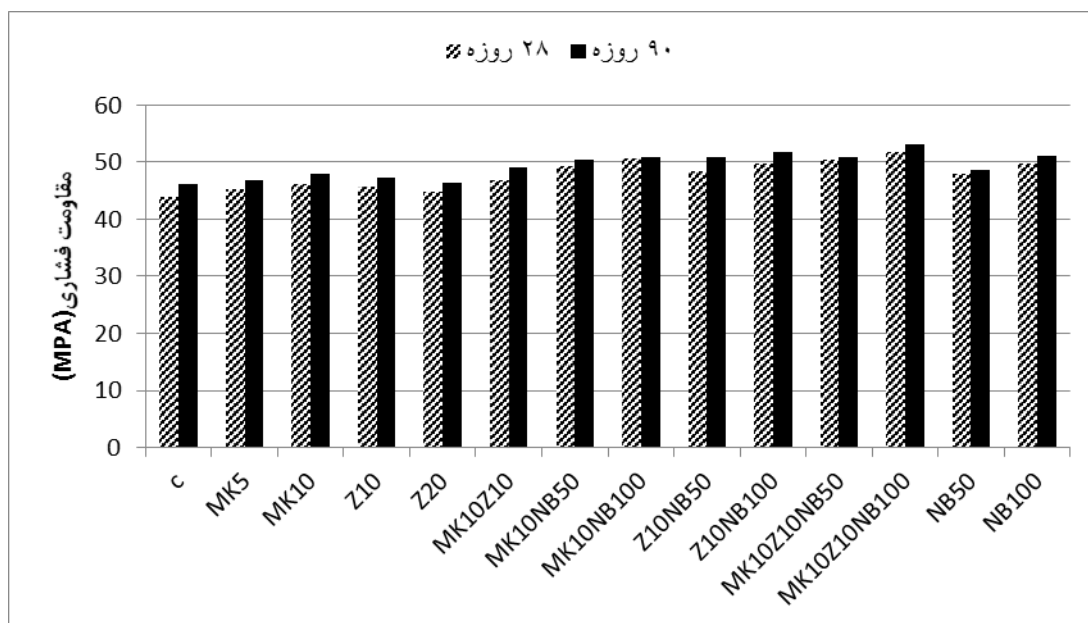
در این معادله Re معرف عدد رینولدز، DP قطر ذرات سیمان (میکرومتر) و Db قطر حباب (میکرومتر و نانومتر) می باشد. از آنجایی که نرخ فولوتاسیون ذرات سیمان در اثر برخورد با حباب های با اندازه معمولی پایین است سبب می شود که بخشی از ذرات سیمان بدون شرکت در واکنش هیدراسیون ته نشین شده و باعث هدر رفت مصرف سیمان گردند و همچنین این موضوع باعث می شود ژل سیمانی کمتری تولید گردد که سبب ایجاد خلل و فرج در نمونه های بتنی گردد. آب میکرو-نانو حباب با بالا بردن نرخ فولوتاسیون سبب افزایش برخورد ذرات سیمان با حباب های میکرو و نانو شده که این موضوع می تواند از طرفی سبب جلوگیری از هدر رفت سیمان از طریق شرکت بیشتر ذرات سیمان در فرایند هیدراسیون شده و از طرف دیگر سبب تشکیل ژل سیمانی بیشتر، اختلاط همگن تر و تراکم بیشتر به نسبت آب مخلوط معمولی شود. در نتیجه نمونه های ساخته شده با آب میکرو-نانو حباب سبب بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن می گردند

در نمونه های حاوی پوزولان ها و آب میکرو-نانو حباب بر اساس شکل ۴-۴ در سن ۲۸ روز مشاهده شده است که ترکیب این دو سبب افزایش مقاومت فشاری بتن شده به نحوی که نمونه حاوی ۱۰



درصد متاکائولین در اختلاط با ۵۰ و ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب در سن ۲۸ روز افزایش مقاومتی به مقدار ۱۲ و ۱۵ درصد نسبت به نمونه شاهد و ۶/۹ و ۹/۷ درصد افزایش نسبت به نمونه MK10 داشته است همچنین این روند افزایش مقاومت در نمونه حاوی ۱۰ درصد زئولیت به همراه ۵۰ و ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب به میزان ۱۰ و ۱۳/۲۵ درصد افزایش نسبت به نمونه شاهد و به مقدار ۶/۰۲ و ۹/۲۲ درصد افزایش نسبت به نمونه z10 مشاهده شده است و بیشترین افزایش مقاومت فشاری مربوط به نمونه MK10Z10NB100, MK10Z10NB50 به مقدار ۱۴/۵ و ۱۷/۷۵ درصد نسبت به نمونه شاهد و به مقدار ۷/۷۶ و ۱۰/۸۲ درصد افزایش نسبت به نمونه MK10Z10 بوده است.

از شکل ۴-۱۰ مشاهده گردید که روند افزایش مقاومت فشاری در سن ۹۰ روز شیب ملایم تری را نسبت به سن ۲۸ روز داشته است که در نمونه های حاوی آب میکرو-نانوحباب نیز روندی مشابه با نمونه های پوزولانی در سن ۹۰ روز مشاهده شده که این موضوع بیانگر این است که اکثر فرآیند هیدراسون در سن ۲۸ روز انجام گرفته است. در سن ۹۰ روز بیشترین و کمترین مقاومت فشاری به ترتیب مربوط به نمونه های MK10Z10NB100 و Z20 به مقدار ۱۴/۸۵ و ۰/۳۸ درصد افزایش نسبت به نمونه شاهد بوده است. بصورت کلی در همه نمونه ها در سن ۹۰ روز، روند افزایش مقاومت فشاری نمونه های حاوی پوزولان و میکرو-نانوحباب با شیب ملایمتری نسبت به سن ۲۸ روزه بوده و در سطح نزدیکی نسبت به نمونه شاهد قرار گرفته اند. این موضوع در نمونه دارای متاکائولین ممکن است بعلت فعالیت پوزولانی کمتر متاکائولین در سن ۹۰ روز نسبت به ۲۸ روز و در نمونه دارای میکرو-نانو حباب ممکن است بعلت این باشد که اکثر فرآیند هیدراسیون در سن ۲۸ روز انجام شده است.

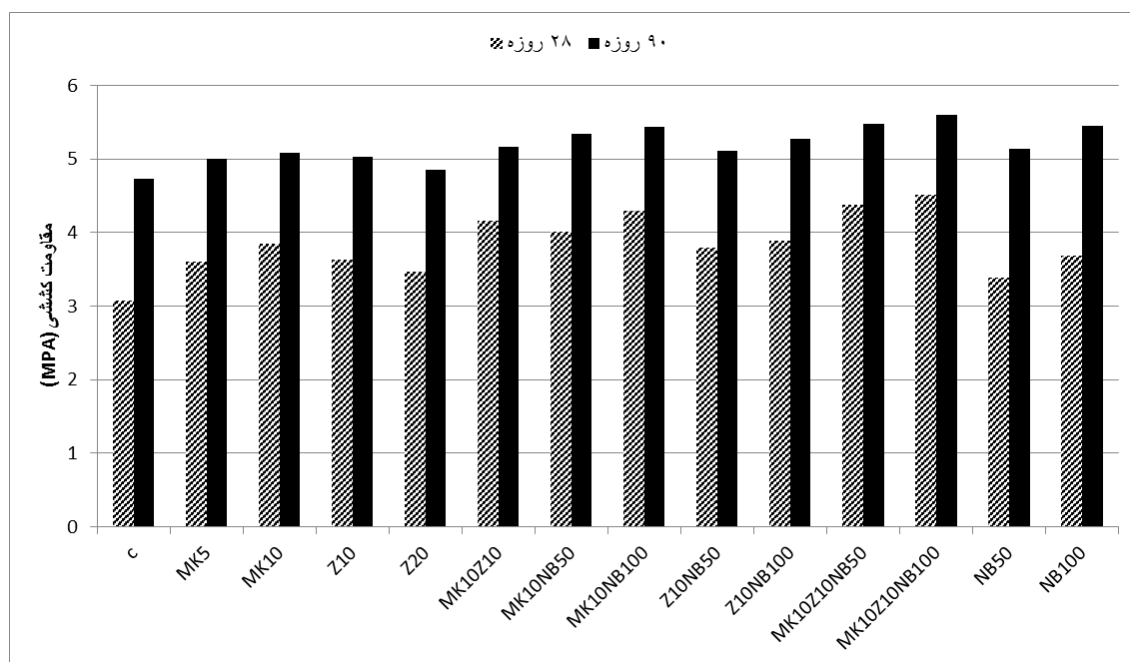


شکل ۴-۱۰ نمودار مقاومت فشاری

#### ۴-۹ آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم

بر اساس نتایج مشاهده شده در شکل ۴-۱۱ در سن ۲۸ روز نمونه های حاوی ۵۰ و ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانو حباب سبب افزایش مقاومت کششی به مقدار ۱۰ و ۱۹/۶۴ درصد نسبت به نمونه شاهد شده است و همچنین افزودن ۱۰ درصد متاکائولین به همراه ۵۰ و ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب سبب افزایش مقاومت کششی به مقدار ۳۰/۳۵ و ۳۹/۲۸ درصد نسبت به نمونه شاهد و ۴/۲۸ و ۱۱/۴۲ درصد افزایش نسبت به نمونه MK10 شده است و همچنین این روند افزایش مقاومت کششی در نمونه حاوی ۱۰ درصد زئولیت به همراه ۵۰ و ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب بجای آب مخلوط بتن به ترتیب به مقدار ۲۳/۲۱ و ۲۶/۴۲ درصد افزایش نسبت به نمونه شاهد و به مقدار ۴/۵۴ و ۷/۲۷ درصد افزایش نسبت به نمونه Z10 مشاهده شده است. در نمونه های MK10Z10NB100, MK10Z10NB50 ترکیب دو پوزولان سبب افزایش مقاومت کششی به مقدار ۴۲/۱۴ و ۴۶/۴۲ درصد نسبت به نمونه شاهد و به مقدار ۵/۴۹ و ۸/۶۷ درصد نسبت به نمونه MK10Z10 شده است. دلیل این موضوع ممکن است بعلت به تولید ژل سیمانی بیشتر از طریق افزودن متاکائولین و زئولیت و اثر آب میکرو-نانوحباب در اختلاط همگن نمونه ها نسبت داد.

بر اساس نتایج مشاهده شده در شکل ۴-۱۱ در سن ۹۰ روز مقاومت کششی نمونه ها مشابه مقاومت فشاری با شیب کمتری نسبت به سن ۲۸ روز بوده است بگونه ای که مقاومت کششی نمونه های NB100,NB50 به مقدار ۸/۶۶ و ۱۵/۱۱ درصد افزایش نسبت به نمونه شاهد بوده است که این روند افزایش مقاومت کششی در نمونه های MK10NB100,MK10NB50 به مقدار ۱۲/۷ و ۱۴/۸۸ درصد نسبت به نمونه شاهد و به مقدار ۵/۰۱ و ۶/۹۶ درصد نسبت به نمونه MK10 مشاهده شده است. در نمونه های ترکیبی اثر هم زمان ۱۰ درصد متاکاولین با ۱۰ درصد ژئولیت در اختلاط با ۵۰ و ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب سبب افزایش مقاومت کششی به مقدار ۱۵/۶۴ و ۱۸/۳۷ درصد افزایش نسبت به نمونه شاهد و به مقدار ۵/۸ و ۸/۲۹ درصد افزایش نسبت به نمونه MK10Z10 شده است.



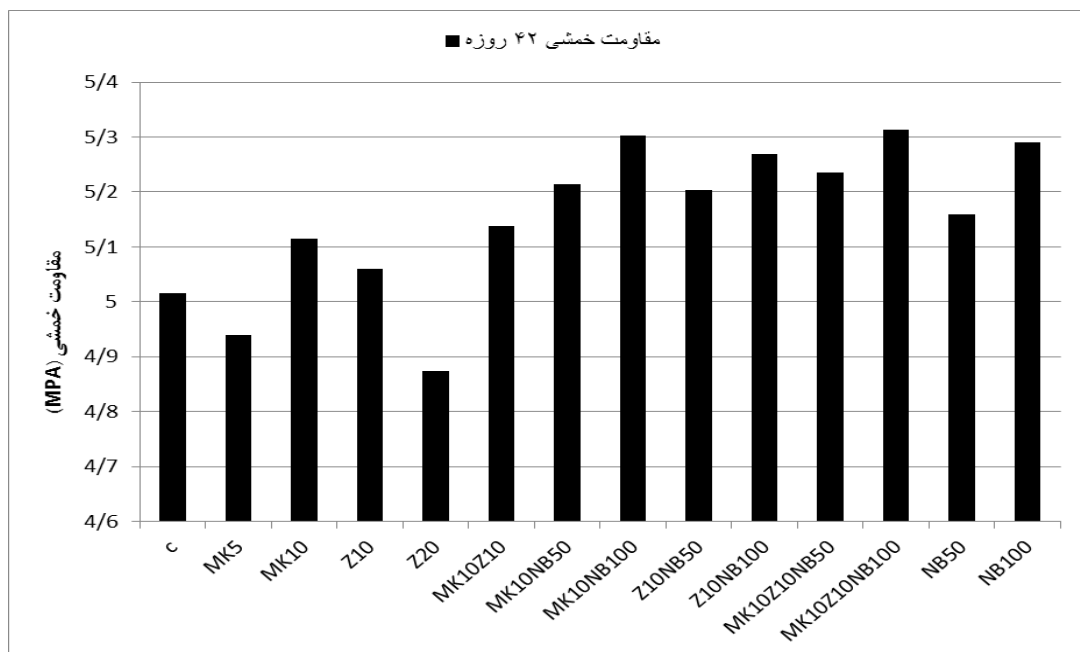
شکل ۴-۱۱ نمودار مقاومت کششی

#### ۴-۱۰ مقاومت خمشی

شکل ۴-۱۲ بیانگر مقاومت فشاری نمونه های بتنی در سن ۴۲ روز بوده که بر اساس نتایج بدست آمده بیشترین مقاومت خمشی مربوط به نمونه های MK10Z10NB100 به مقدار ۵/۳۱ مگاپاسکال

و کمترین مقاومت خمشی مربوط به نمونه Z20 به مقدار ۲/۸۵ درصد کمتر از نمونه شاهد بوده است. نمونه های دارای ۵۰ و ۱۰۰ درصد آب میکرو- نانو حباب سبب افزایش مقاومت خمشی به مقدار ۲/۸۵ و ۵/۴۸ درصد نسبت به نمونه شاهد شده که این روند افزایش مقاومت خمشی در نمونه های MK10, Z10 به مقدار ۰/۸۷ و ۱/۹۷ درصد نسبت به نمونه شاهد مشاهده شده است. مقاومت خمشی نمونه MK10Z10 به مقدار ۲/۴۱ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته و بترتیب به مقدار ۱/۷۷ و ۳/۳۱ درصد کمتر از نمونه های MK10Z10NB100, MK10Z10NB50 بوده است.

بر اساس شکل ۴-۱۲ نمونه حاوی ۱۰ درصد زئولیت به همراه ۵۰ و ۱۰۰ درصد آب میکرو نانو حباب سبب افزایش مقاومت خمشی به مقدار ۳/۷۲ و ۵/۰۴ درصد نسبت به نمونه شاهد و به مقدار ۲/۸۲ و ۴/۱۳ درصد افزایش نسبت به نمونه Z10 شده است که این روند افزایش مقاومت خمشی در نمونه حاوی ۱۰ درصد متاکائولین به همراه ۵۰ و ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانو حباب به مقدار ۳/۹۴ و ۵/۷۰ درصد افزایش نسبت به نمونه شاهد و به مقدار ۱/۹۳ و ۳/۶۵ درصد افزایش نسبت به نمونه MK10 مشاهده شده است.



شکل ۴-۱۲ نمودار مقاومت خمشی

#### ۴-۱۱ آزمایش جذب آب

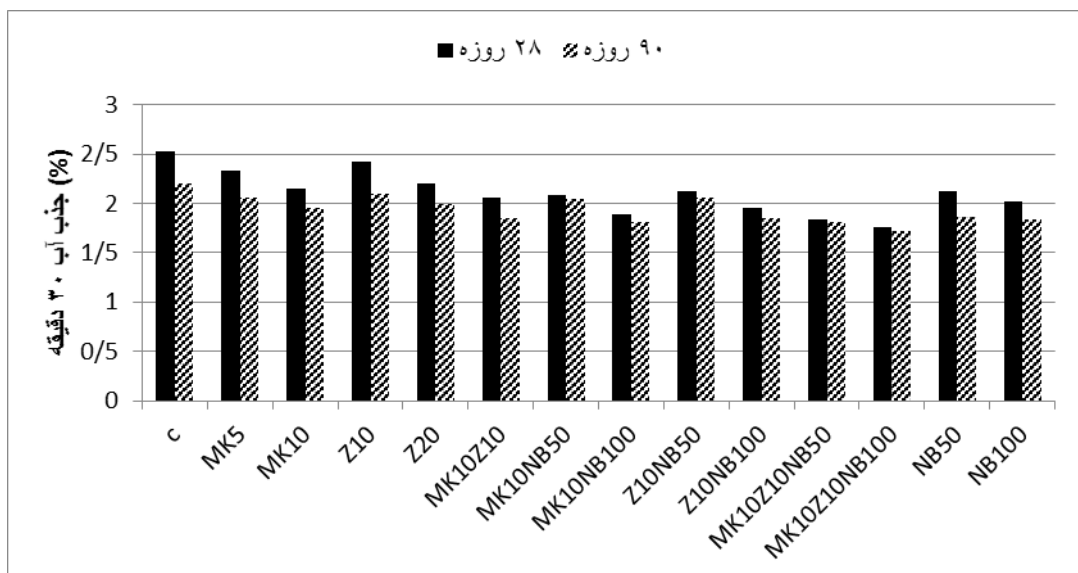
براساس نتایج حاصل شده از شکل ۴-۱۳ مشاهده شده که در آزمایش جذب آب ۳۰ دقیقه در سن ۲۸ روز نمونه حاوی ۵۰ و ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب سبب کاهش جذب آب به مقدار ۱۶/۰۸ و ۲۰ درصد نسبت به نمونه شاهد شده است و همچنین در نمونه های حاوی ۱۰ درصد متاکائولین به همراه ۵۰ و ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب سبب کاهش جذب آب به مقدار ۱۷/۸۲ و ۲۵/۲۱ درصد و در نمونه های حاوی ۱۰ درصد زئولیت به همراه ۵۰ و ۱۰۰ درصد آب میکرو نانو حباب کاهشی به مقدار ۱۶ و ۲۲/۵ درصد نسبت به نمونه شاهد بدست آمده است که این روند کاهش در جذب آب در نمونه های ترکیبی MK10Z10NB100 به مقدار ۳۰/۴۳ درصد کاهش نسبت به نمونه شاهد و به مقدار ۱۴/۴۳ درصد کاهش نسبت به نمونه MK10Z10 بوده است.

نتایج بدست آمده از شکل ۴-۱۴ حاکی از آن است که در آزمایش جذب آب ۲۴ ساعته در سن ۲۸ روز برای نمونه های حاوی ۱۰ و ۲۰ درصد زئولیت سبب کاهش جذب آب به مقدار ۱۶/۶۱ و ۱۹/۳۵ درصد و همچنین در نمونه های حاوی ۵ و ۱۰ درصد متاکائولین سبب کاهش جذب آب به مقدار ۱۳/۴۴ و ۱۸/۱۰ درصد نسبت به نمونه شاهد شده است که این روند کاهش در جذب آب در نمونه های حاوی ۱۰ درصد زئولیت به همراه ۵۰ و ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب و ۱۰ درصد متاکائولین به همراه ۵۰ و ۱۰۰ درصد آب میکرونانوحباب به ترتیب به مقدار ۱۹/۳۴، ۲۱/۴۷، ۱۸/۶۲ و ۲۲/۴۱ درصد کاهش در جذب آب نسبت به نمونه شاهد بدست آمده است.

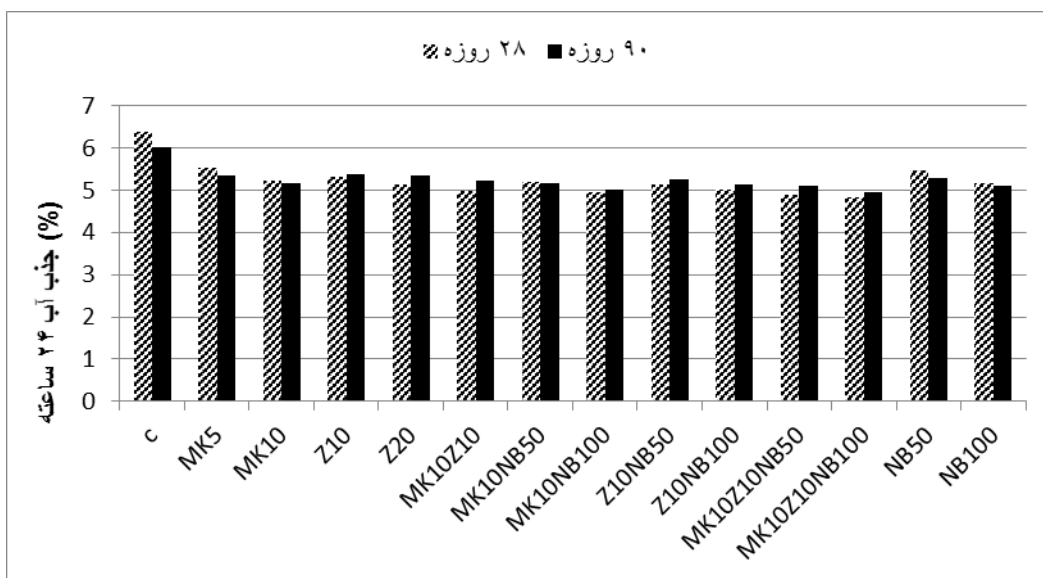
بر اساس نتایج بدست آمده در جذب آب ۳۰ دقیقه در سن ۹۰ روز در شکل ۴-۱۳ مشاهده شده است که نمونه های حاوی ۱۰ درصد زئولیت به همراه ۵۰ و ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب کاهشی به مقدار ۶/۳۶ و ۱۵/۹ درصد نسبت به نمونه شاهد داشته و همچنین نمونه های حاوی ۱۰ درصد متاکائولین به همراه ۵۰ و ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب به مقدار ۷ و ۱۷/۵ درصد کاهش نسبت به نمونه شاهد داشته است.

نتایج بدست آمده از شکل ۴-۱۴ حاکی از آن است که در آزمایش جذب آب ۲۴ ساعته در سن ۹۰ روز نمونه های حاوی ۱۰ درصد زئولیت به همراه ۱۰ درصد متاکائولین در اختلاط با ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب سبب کاهشی به مقدار ۱۷/۵۶ درصد نسبت به نمونه شاهد و ۵/۰۷ درصد کاهش نسبت به نمونه MK10Z10 شده است. نمونه MK10Z10NB50 سبب کاهش جذب آب به مقدار ۱۵/۱۲ نسبت به نمونه شاهد و ۲/۲۵ درصد نسبت به نمونه حاوی ۱۰ درصد متاکائولین به همراه ۱۰ درصد زئولیت شده است. و همچنین آب میکرو-نانوحباب سبب کاهشی به مقدار ۱۲/۲۴ و ۱۵/۱۷ درصد نسبت به نمونه شاهد شده است.

بر اساس نتایج حاصل شده ممکن است که آب میکرو-نانو حباب با ایجاد فلوتاسیون مطلوب سبب شناور سازی ذرات سیمان و در نتیجه بهبود فرایند هیدراسیون شده و همچنین پوزولان متاکائولین و زئولیت با تشکیل ژل های ثانویه سبب پر شدن خلل و فرج نمونه های حاوی پوزولان و آب میکرو-نانوحباب شده که مجموع این عوامل سبب کاهش جذب آب ۳۰ دقیقه و ۲۴ ساعته نمونه های بتنی شده است.



شکل ۴-۱۳ درصد جذب آب در ۳۰ دقیقه



شکل ۴-۱۴ درصد جذب آب در ۲۴ ساعت

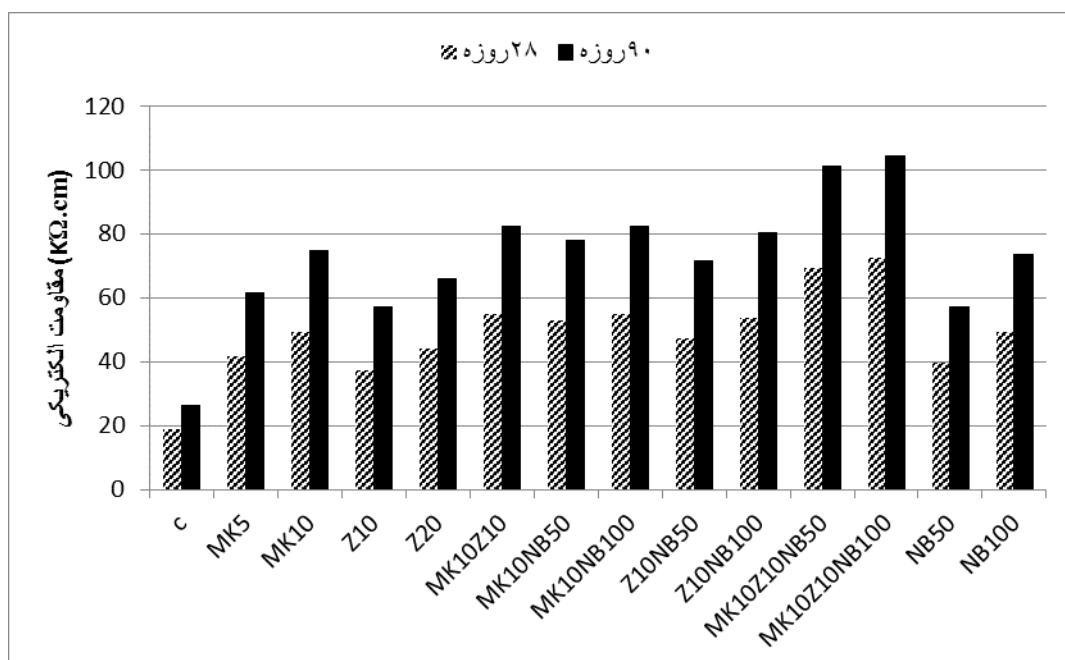
#### ۴-۱۲ مقاومت الکتریکی

بر اساس استاندارد FM 5-578 نرخ خوردگی آرماتور در بتن های با مقاومت بیشتر از ۲۱ کیلو اهم - سانتی متر ناچیز می باشد که این موضوع در تمام نمونه های حاوی پوزولان و آب میکرو-نانو حباب به غیر از نمونه شاهد در سن ۲۸ روز مشاهده شده است.

بر اساس نتایج بدست آمده در شکل ۴-۱۵ در سن ۲۸ روز کمترین مقاومت الکتریکی مربوط به نمونه شاهد به مقدار ۱۸/۷ کیلو اهم - سانتی متر می باشد و بیشترین مقاومت الکتریکی مربوط به نمونه MK10Z10NB100 به مقدار ۷۲/۶ کیلو اهم - سانتی متر بوده که به نسبت نمونه شاهد به مقدار ۳/۸۸ برابر و به نسبت نمونه MK10, Z10, MK10Z10 به ترتیب به مقدار ۹۴/۱۱، ۴۶/۶۶ و ۳۲ درصد افزایش داشته است. در نمونه های حاوی آب میکرو-نانو حباب ۵۰ و ۱۰۰ درصد سبب افزایشی به مقدار ۲/۱۱ و ۲/۶۴ برابر نسبت به نمونه شاهد شده است که این روند در افزایش مقاومت الکتریکی در نمونه های MK10NB100, Z10NB100 به ترتیب به مقدار ۲/۸۸ و ۲/۹۴ برابر نسبت به نمونه شاهد بدست آمده است

بر اساس نتایج بدست آمده در سن ۹۰ روز در شکل ۴-۱۵ که نمونه های حاوی ۱۰ و ۲۰ درصد زئولیت و نمونه حاوی ۵ و ۱۰ درصد متاکائولین به ترتیب سبب افزایش مقاومت الکتریکی به مقدار ۲/۱۶، ۲/۵، ۲/۳۳ و ۲/۸۳ برابر نسبت به نمونه شاهد شده است که این روند افزایش در مقاومت الکتریکی در نمونه MK10Z10 به مقدار ۳/۱۲ برابر نسبت به نمونه شاهد بوده است. همچنین در سن ۹۰ روز در نمونه های Z10NB100, Z10NB50 به ترتیب افزایشی معادل ۵۱/۱۶ و ۴۸/۹۷ درصد نسبت به سن ۲۸ روز خود مشاهده شده که این روند در نمونه های MK10NB100, MK10NB50 به مقدار ۴۷/۹۱ و ۵۰ درصد نسبت به سن ۲۸ روزه خود بدست آمده است.

بر اساس نتایج بدست آمده ممکن است استفاده از متاکائولین، زئولیت و آب میکرو-نانوحباب که منجر به تولید ژل چسباننده بیشتر توسط سیمان و فعالیت پوزولانی شده که این موضوع می تواند سبب حجم کمتر فضاهای خالی نمونه ها و انسجام مطلوب آنها شده باشد بنابراین مجموع این عوامل سبب بهبود مقاومت الکتریکی نمونه ها به نسبت نمونه شاهد شده است.



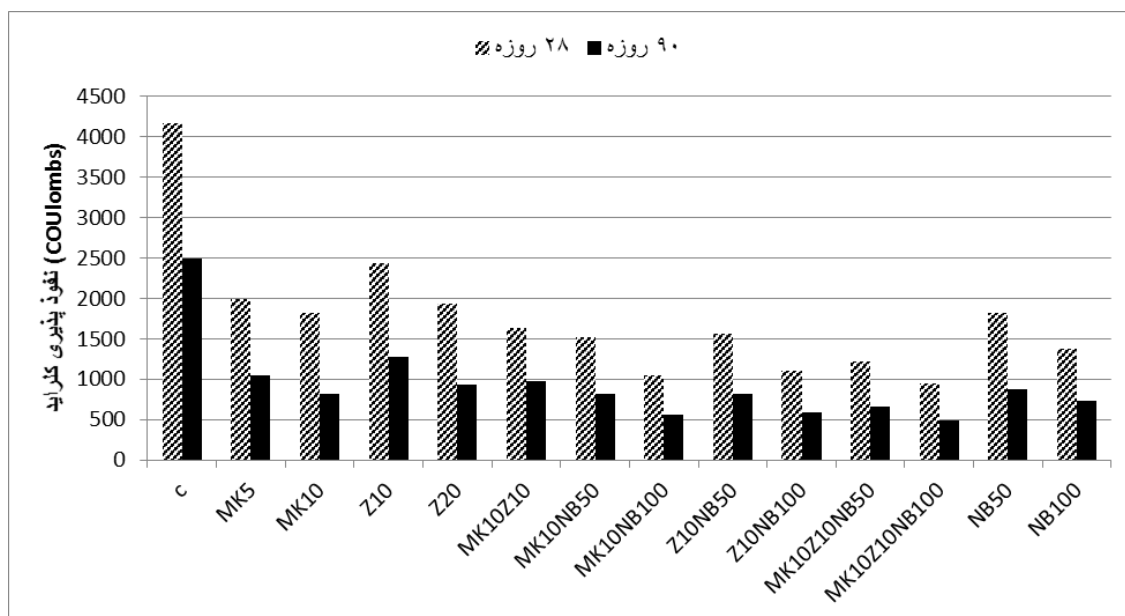
شکل ۴-۱۵ نمودار مقاومت الکتریکی



#### ۴-۱۳ نفوذ تسریع شده یون کلراید (RCPT)

بر اساس نتایج بدست آمده از شکل ۴-۱۶ مشاهده شده است که در سن ۲۸ روز مقدار عبور یون کلراید از نمونه شاهد ۴۱۶۴/۶ کولمب بوده است. همچنین نمونه های MK10NB100, Z10NB100 و MK10Z10NB50 سبب کاهش نفوذ تسریع شده یون کلراید بترتیب معادل ۷۰/۷۰، ۷۳/۵۳ و ۷۴/۸۵ درصد نسبت به نمونه شاهد شده است. در نمونه های حاوی ۵۰ و ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب این روند کاهش در نفوذ یون کلر به مقدار ۵۶/۴۱ و ۶۶/۹۵ درصد نسبت به نمونه شاهد مشاهده شده است. و بیشترین کاهش در نفوذ تسریع شده یون کلراید مربوط به نمونه MK10Z10NB100 به مقدار ۷۷/۳۹ درصد نسبت به نمونه شاهد و به مقدار ۴۲/۵۵ درصد کاهش نسبت به نمونه MK10Z10 بوده است.

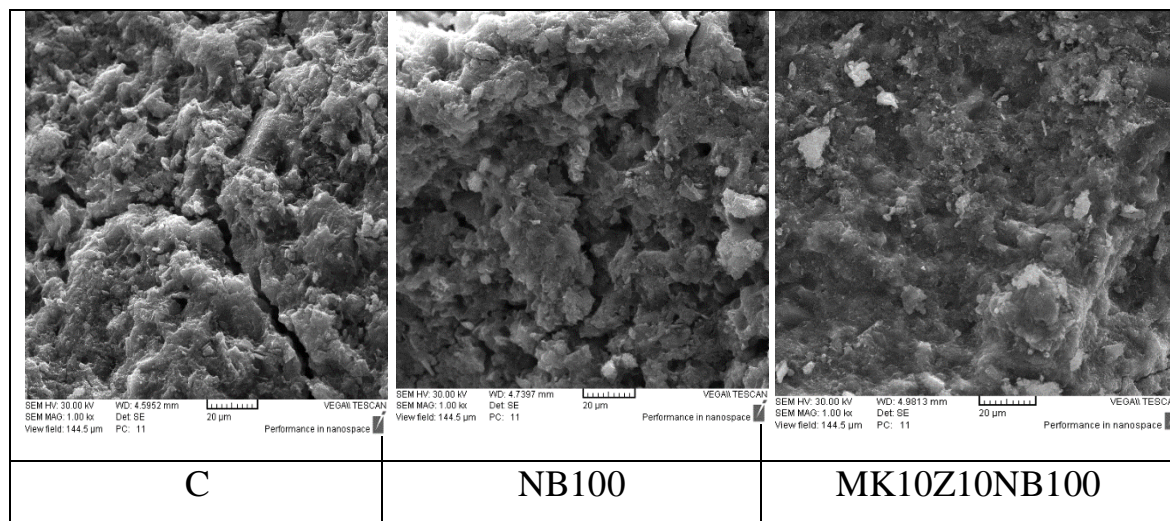
بر اساس شکل ۴-۱۶ در سن ۹۰ روز نمونه حاوی ۱۰ درصد زئولیت به همراه ۱۰ درصد متاکائولین به مقدار ۶۰/۸۵ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش داشته است و در نمونه های MK10NB100, MK10NB50 کاهش معادل ۶۷/۱۸ و ۷۷/۴۴ درصد و همچنین در نمونه های Z10NB100, Z10NB50 کاهش به مقدار ۶۷/۰۵ و ۷۶/۱۱ درصد نسبت به نمونه شاهد بدست آمده است. در نمونه های MK10Z10NB100, MK10Z10NB50 به میزان ۷۳/۵۵ و ۸۰/۴۵ درصد یون کلر کمتری نسبت به نمونه شاهد نفوذ کرده است و در نمونه حاوی ۵۰ و ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب این کاهش در نفوذ تسریع شده یون کلراید به مقدار ۶۴/۸۸ و ۷۰/۷۶ درصد نسبت به نمونه شاهد مشاهده است. ممکن است آب میکرو-نانو حباب باعث بهتر شدن فرایند هیدراسیون شده و از طرف دیگر زئولیت و متاکائولین باعث کاهش یون های هیدروکسید کلسیم سبب پر شدن منافذ موجود در بتن و کاهش نفوذ تسریع شده یون کلراید شده باشد.



شکل ۴-۱۶ نمودار نفوذپذیری یون کلراید

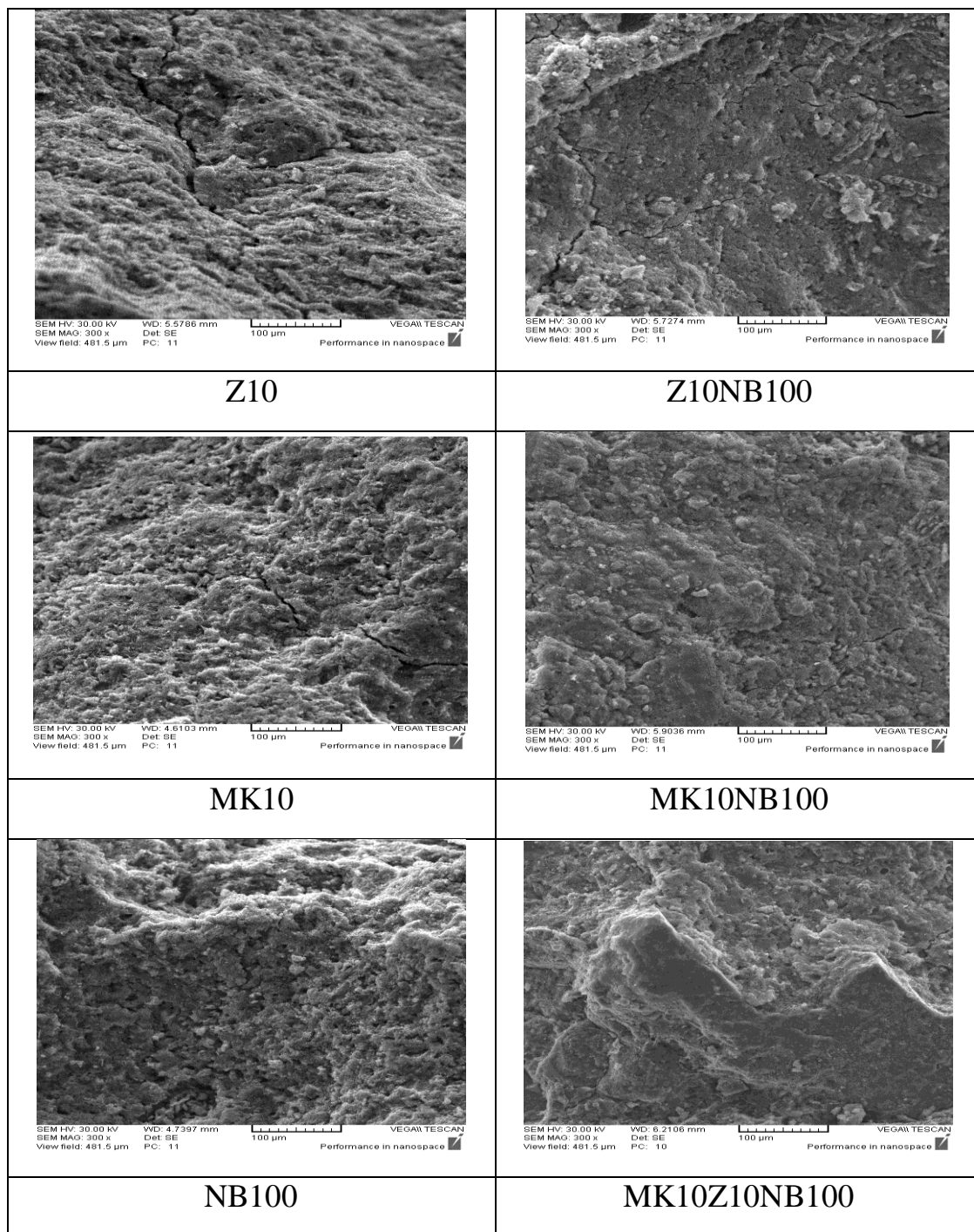
#### ۴-۱۴ آزمایش میکروسکوپ الکترونی (SEM)

تصاویر موجود در شکل ۴-۱۷ الف مربوط به نمونه شاهد، نمونه حاوی آب میکرو-نانوحباب با ۱۰۰ درصد جایگزینی بجای آب مخلوط و نمونه ترکیبی شامل ۱۰ درصد متاکائولین، ۱۰ درصد زئولیت و ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب در بزرگنمایی ۲۰ میکرو متر می باشد. همانطور که از نتایج این آزمایش مشاهده شده آب میکرو-نانو حباب سبب اختلاط همگن و در نتیجه تراکم و انسجام بهتر نمونه نسبت به نمونه شاهد شده و همچنین افزودن متاکائولین به همراه زئولیت به سبب ایجاد ژل های ثانویه ناشی از فعالیت پوزولانی سبب تراکم بهتر و ترک کمتر نمونه نسبت به نمونه شاهد شده است. بنابراین می توان نتیجه گرفت استفاده هم زمان از آب میکرو-نانوحباب با پوزولان زئولیت و متاکائولین اثر هم افزایی در بتن نسبت به نمونه شاهد ایجاد کرده است.



۱۷-۴ الف) نمونه حاوی آب میکرو-نانوحباب و نمونه ترکیبی با بتن شاهد

چهار تصویر اول شکل ۴-۱۷ مربوط به نمونه های حاوی زئولیت و متاکائولین در اختلاط با آب میکرو-نانو حباب در قیاس با نمونه مشابه با آب اختلاط معمولی در بزرگنمایی ۱۰۰ میکرو متر می باشد. بر اساس نتایج بدست آمده مشاهده شده است که جایگزینی ۱۰۰ درصد از آب میکرو نانو-حباب بجای آب طرح اختلاط در نمونه های حاوی متاکائولین و زئولیت سبب انسجام بیشتر، اختلاط همگن و تراکم بیشتری نسبت به نمونه های فاقد آب میکرو-نانو حباب شده است. همچنین همانگونه که از تصاویر مشخص است نمونه های حاوی آب میکرو-نانوحباب دارای ترک های کمتری در سطح و عمق بوده که این موضوع نشان دهنده اثر هم زمان آب میکرو- نانوحباب با زئولیت و متاکائولین بوده است. دو تصویر آخر شکل ۱۱-ب نمای دیگر از نمونه NB100, MK10Z10NB100 در بزرگنمایی ۱۰۰ میکرو متر می باشد. همانگونه که از قیاس تصاویر مشخص است بهترین نتیجه مربوط به نمونه حاوی ۱۰ درصد متاکائولین به همراه ۱۰ درصد زئولیت و ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب بوده که تراکم و انسجام بیشتری نسبت به نمونه شاهد داشته است. همچنین در نمونه حاوی ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانو حباب به نسبت نمونه شاهد افزایش انسجام و تراکم مشهود است. بنابر این نتایج حاصل شده از تصاویر SEM تایید کننده نتایج بدست آمده در این تحقیق بوده است.



شکل ۴-۱۷ ب) میکرو ساختار بتن در نمونه های حاوی زئولیت، متاکائولن، آب میکرو نانو حباب و ترکیبی با هم از نظر انسجام و وجود ترک

شکل ۴-۱۷ مقایسه میکروساختار بتن توسط تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی  
 نتایج بدست آمده در این تحقیق در خصوص استفاده از ۱۰ و ۲۰ درصد زئولیت در سن ۲۸ روز سبب افزایش مقاومت فشاری بترتیب به مقدار ۳/۷ و ۲ درصد، افزایش مقاومت الکتریکی به مقدار ۲ و ۲/۳۵ برابر، کاهش جذب آب ۳۰ دقیقه به مقدار ۴/۳۴ و ۱۳/۰۴ درصد، کاهش جذب آب ۲۴ ساعته به

مقدار ۱۶/۶۱ و ۱۹/۳۵ درصد نسبت به نمونه شاهد شده است که مطالعات ولی پور و همکاران (۲۰۱۳) حاکی از آن است که استفاده از زئولیت سبب افزایش مقاومت فشاری و الکتریکی و همچنین کاهش جذب آب ۳۰ دقیقه و ۲۴ شده است در نتیجه با نتایج بدست آمده از این تحقیق همخوانی دارد (Valipour et al, 2013). همچنین از نتایج بدست آمده در این تحقیق در سن ۲۸ روز مشاهده شده است که جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد زئولیت بترتیب سبب افزایش مقاومت کششی به مقدار ۱۷/۸۵ و ۱۲/۵ درصد و کاهش نفوذ تسریع شده یون کلراید به مقدار ۴۱/۵۲ و ۵۳/۴۰ درصد شده است و مطالعات رمضانپور و همکاران (۲۰۱۵) حاکی از آن است که استفاده از ۱۰ درصد زئولیت در سن ۲۸ روز سبب افزایش مقاومت کششی به مقدار ۳۸ درصد و کاهش نفوذ کلراید به مقدار ۵۹ درصد بوده است که بنابراین که با نتایج بدست آمده در این تحقیق همخوانی دارد ( Ramezaniyanpour et al, 2015). در این تحقیق مشاهده می شود که ۵ و ۱۰ درصد متاکائولین سبب افزایش مقاومت فشاری بترتیب به مقدار ۳ و ۴/۷۵ درصد، افزایش مقاومت کششی به مقدار ۱۶/۷۸ و ۲۵ درصد، افزایش مقاومت الکتریکی به مقدار ۲/۲۳ و ۲/۶۴ برابر و کاهش جذب آب ۳۰ دقیقه به مقدار ۷/۸۲ و ۱۵/۲ درصد نسبت به نمونه شاهد در سن ۲۸ روز شده است که تحقیق سیدیک<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۹ نشان دهنده افزایش مقاومت فشاری، کششی و کاهش نفوذ پذیری کلراید نمونه حاوی پوزولان متاکائولین بوده و مطالعات خطیب تایید کننده کاهش جذب آب نمونه های حاوی متاکائولین می باشد. همچنین مطالعه شکارچی و همکاران (۲۰۱۰) نشان می دهد که استفاده از ۱۵ درصد متاکائولین سبب افزایش مقاومت فشاری به مقدار ۲۰ درصد، افزایش مقاومت الکتریکی به مقدار ۴۵۰ درصد و همچنین کاهش جذب آب به مقدار ۲۵ درصد شده است بنابر این می توان گفت نتایج بدست آمده از سایر محققین تأیید کننده نتایج حاصل شده از این تحقیق بوده است ( Siddique and Klaus, 2009, Shekarchi et al, 2010, Khatib and Clay, 2004). نتایج بدست آمده در خصوص استفاده از ۵۰ و ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب جایگزین آب مخلوط بتن بترتیب سبب افزایش مقاوت

---

<sup>۱</sup>Siddique

فشاری به مقدار ۱۰ و ۱۳/۲ درصد و افزایش مقاومت کششی به مقدار ۱۰ و ۱۹/۶۴ درصد شده است که نتایج مطالعات عارفی و همکاران (۱۳۹۳) حاکی از آن است که استفاده از ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب سبب افزایش مقاومت فشاری به مقدار ۱۹ درصد و افزایش مقاومت کششی به مقدار ۱۶ درصد شده است که با نتایج بدست آمده در این تحقیق همخوانی دارد (Arefi et al, 2016). اما آزمایش های مربوط به خواص دوام شامل جذب آب، نفوذ تسریع شده کلراید و مقاومت الکتریکی نمونه های حاوی ۵۰ و ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب همچنین در خصوص خواص مکانیکی شامل مقاومت فشاری، خمشی، کششی و دوام نمونه های حاوی ۱۰ درصد متاکائولین به همراه ۵۰ و ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب و همچنین ۱۰ درصد ژئولیت به همراه ۵۰ و ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب و همچنین در نمونه های ترکیبی حاوی ۱۰ درصد ژئولیت به همراه ۱۰ درصد متاکائولین در اختلاط با ۵۰ و ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب در تحقیقی پیدا نشده که مقایسه گردد بنابراین ممکن است نوآوری محسوب گردد.

#### ۴-۱۵ بررسی خواص مکانیکی و دوام بتن حاوی متاکائولین و ژئولیت در اختلاط با آب

##### میکرو-نانوحباب در شرایط عمل آوری در آب دریا

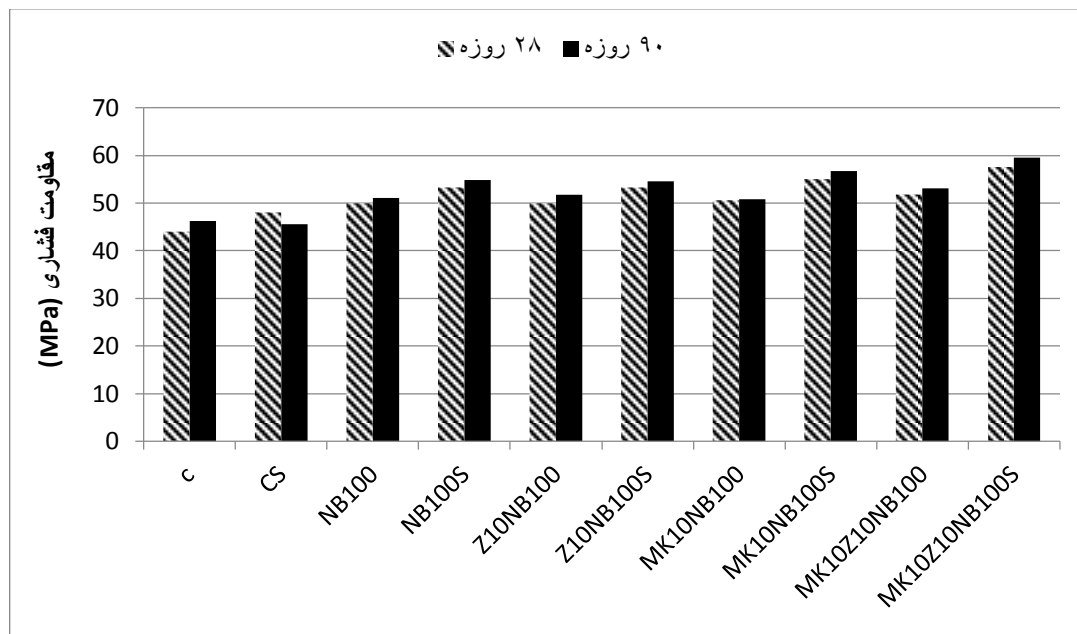
امروزه به دلیل گسترش و اهمیت فعالیت های نفتی و حمل و نقل دریایی و همچنین توجه به استخراج معادن در بستر دریاها، فعالیت های دریایی مانند ساخت اسکله، سکوها و سازه های نظیر آن در مناطق ساحلی و دریایی افزایش چشمگیری داشته است. هرچند بتن به عنوان یک ماده ی با دوام در محیط دریا محسوب می شود، اما خرابی های زیادی از سازه های بتنی نظیر اثرات سولفات های پتاسیم و منیزیم موجود در آب دریا بر سیمان و همچنین نفوذ یون های کلر در بتن که موجب تسریع خوردگی آرماتور می شوند، مخصوصاً در کنار سواحل جنوبی کشور گزارش شده است. سازوکارهای اصلی تخریب سازه های بتنی در محیط دریایی شامل خوردگی میلگردهای کار گذاشته شده در بتن، تجزیه و تخریب بتن، چرخه های یخ زدن و آب شدن و واکنش سیلیسی-قلیایی است که بررسی و

کاهش اثرات فوق امری مهم به شمار می‌رود. در نتیجه لازم است به منظور غلبه بر مشکلات اشاره شده، بتنی طراحی و ساخته شود که علاوه بر بهبود خواص بتن معمولی، قابلیت استفاده موثر در مناطق ساحلی و دریایی و همچنین خصوصیت سازگاری با محیط زیست را از طریق کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای داشته باشد. نمونه های بررسی شده در این تحقیق شرایط سازگاری با محیط زیست و همچنین بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن را ارضا نموده اند لذا به جهت بررسی خواص مکانیکی (مقاومت فشاری، کششی و خمشی) و دوام (مقاومت الکتریکی، نفوذ کلراید و جذب آب) بهترین نمونه های بتنی این تحقیق شامل نمونه حاوی ۱۰ درصد متاکائولین به همراه ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب، نمونه حاوی ۱۰ درصد زئولیت به همراه ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب، نمونه ترکیبی حاوی ۱۰ درصد متاکائولین به همراه ۱۰ درصد زئولیت در اختلاط با ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب و همچنین نمونه حاوی ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب را در شرایط آب دریای مصنوعی (ASTM D1141-1998) عمل آوری شده و نسبت به نمونه های عمل آوری شده در شرایط استاندارد (آب و آهک) اشباع مقایسه شده است.

#### ۴-۱۵-۱- مقاومت فشاری

بر اساس نتایج بدست آمده از شکل ۴-۱۸ در سن ۲۸ روز در نمونه های حاوی ۱۰ درصد متاکائولین به همراه ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانو حباب و نمونه حاوی ۱۰ درصد زئولیت به همراه ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب در شرایط عمل آوری آب دریا سبب افزایش مقاومت فشاری بترتیب به مقدار ۸/۷۵ و ۶/۷۶ درصد نسبت به نمونه مشابه در شرایط عمل آوری استاندارد شده است که این موضوع در نمونه ترکیبی حاوی ۱۰ درصد زئولیت به همراه ۱۰ درصد متاکائولین در اختلاط با ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب در شرایط عمل آوری آب دریا به مقدار ۱۱/۱۳ درصد افزایش نسبت به نمونه مشابه در شرایط عمل آوری استاندارد مشاهده شده است. در نمونه حاوی ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب در شرایط عمل آوری آب دریا سبب افزایشی به مقدار ۶/۹۷ درصد نسبت به نمونه شاهد شده است. بر

اساس شکل ۴-۱۸ مقاومت فشاری نمونه های عمل آوری شده در آب دریا در سن ۹۰ روز نسبت به سن ۲۸ روز در تمامی نمونه ها به غیر از نمونه شاهد افزایش داشته است. بگونه ای که سبب کاهش مقاومت فشاری نمونه شاهد در سن ۹۰ روز به مقدار ۵ درصد نسبت به سن ۲۸ روز شده است که دلیل این موضوع ممکن است بعلت حمله کلراید به نمونه شاهد باشد. در نمونه MK10NB100، Z10NB100 بترتیب سبب افزایش مقاومت فشاری به مقدار ۲/۶۸ و ۳/۰۷ درصد نسبت به سن ۲۸ روزه شده است که این موضوع در نمونه حاوی آب میکرو-نانوحباب نسبت به سن ۲۸ روزه به مقدار ۲/۹۰ درصد مشاهده شده است که علت این موضوع ممکن است بعلت بهبود فرایند هیدراسیون توسط آب میکرو-نانوحباب و اصلاح ساختار حفرات نمونه بتنی، اثر پرکنندگی توسط پوزولان ها باشد.



شکل ۴-۱۸ نمودار مقاومت فشاری

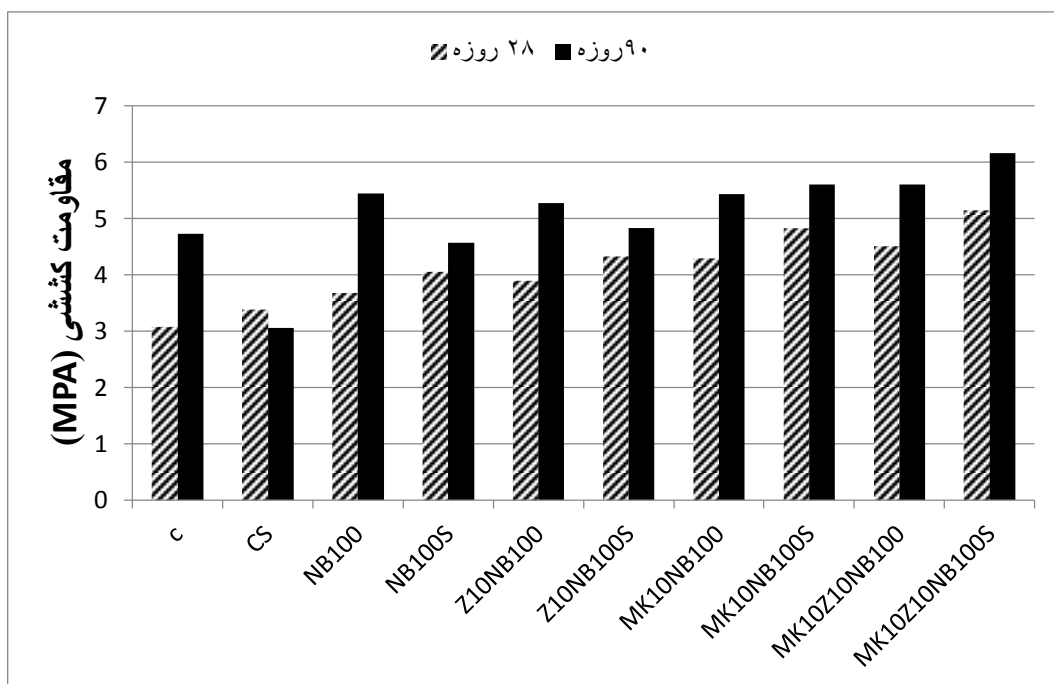
#### ۴-۱۵-۲- آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم

نتایج شکل ۴-۱۹ بیانگر مقاومت کششی نمونه های عمل آوری شده در آب دریا در سن ۲۸ روز نسبت به نمونه های عمل آوری شده در شرایط استاندارد می باشد. نمونه حاوی ۱۰ درصد ژئولیت



به‌همراه ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب در عمل آوری توسط آب دریا سبب افزایش مقاومت کششی به مقدار ۱۱ درصد نسبت به نمونه مشابه در شرایط عمل آوری استاندارد شده است که این موضوع در نمونه حاوی ۱۰ درصد متاکائولین به‌همراه ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب و نمونه ترکیبی شامل ۱۰ درصد زئولیت به‌همراه ۱۰ درصد متاکائولین در اختلاط با ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب بترتیب به مقدار ۱۲/۵ و ۱۴ درصد افزایش نسبت به نمونه مشابه در شرایط عمل آوری استاندارد مشاهده شده است همچنین نمونه حاوی ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب در شرایط عمل آوری آب دریا سبب افزایشی به مقدار ۱۰/۷۱ درصد نسبت به نمونه مشابه در شرایط عمل آوری استاندارد شده است.

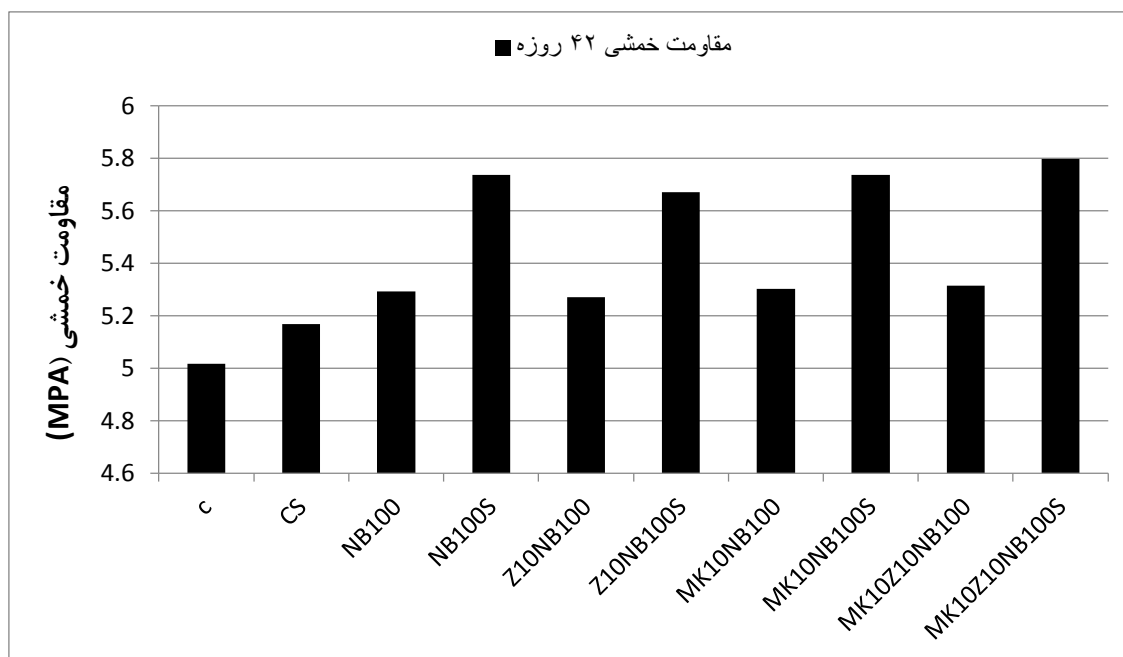
بر اساس شکل ۴-۱۹ در سن ۹۰ روز مشابه آزمایش مقاومت فشاری تمامی نمونه های عمل آوری شده در آب دریا به غیر از نمونه شاهد، افزایش مقاومت کششی داشته است به گونه ای که در نمونه حاوی ۱۰۰ درصد آب میکرو- نانوحباب به میزان ۱۲/۵۹ درصد افزایش نسبت به سن ۲۸ روزه و همچنین در نمونه های حاوی ۱۰ درصد متاکائولین و ۱۰ درصد زئولیت بترتیب سبب افزایشی به مقدار ۱۶/۱۸ و ۱۱/۱۷ درصد نسبت به سن ۲۸ روزه شده است. دلیل این موضوع ممکن است بعلت تولید ژل سیمانی بیشتر توسط نمونه های حاوی پوزولان و همگنی مناسب در نمونه های حاوی آب میکرو-نانو حباب باشد که اثر همزمان این دو موضوع سبب بهبود چشمگیر نمونه ها نسبت به نمونه شاهد شده است.



شکل ۴-۱۹ نمودار مقاومت کششی

#### ۴-۱۵-۳- آزمایش مقاومت خمشی

بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت خمشی در سن ۴۲ روز در شکل ۴-۲۰ نمونه حاوی ۱۰ درصد زئولیت بهمراه ۱۰۰ درصد آب میکرو نانوحباب در عمل آوری آب دریا سبب افزایش مقاومت خمشی به مقدار ۹/۷۲ درصد نسبت به نمونه CS شده است که این موضوع در نمونه حاوی ۱۰ درصد متاکائولین به همراه ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب به میزان ۱۱/۰۲ درصد افزایش نسبت به نمونه شاهد عمل آوری شده در آب دریا دیده شده است. همچنین نمونه حاوی ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب و نمونه ترکیبی حاوی ۱۰ درصد زئولیت بهمراه ۱۰ درصد متاکائولین در اختلاط با ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب عمل آوری شده در آب دریا سبب افزایش مقاومت خمشی بترتیب به مقدار ۱۱ و ۱۲/۱۸ درصد نسبت به نمونه CS و به مقدار ۱۴/۳۴ و ۱۵/۵۵ درصد نسبت به نمونه شاهد عمل آوری شده در شرایط استاندارد شده است.



شکل ۴-۲۰ نمودار مقاومت خمشی

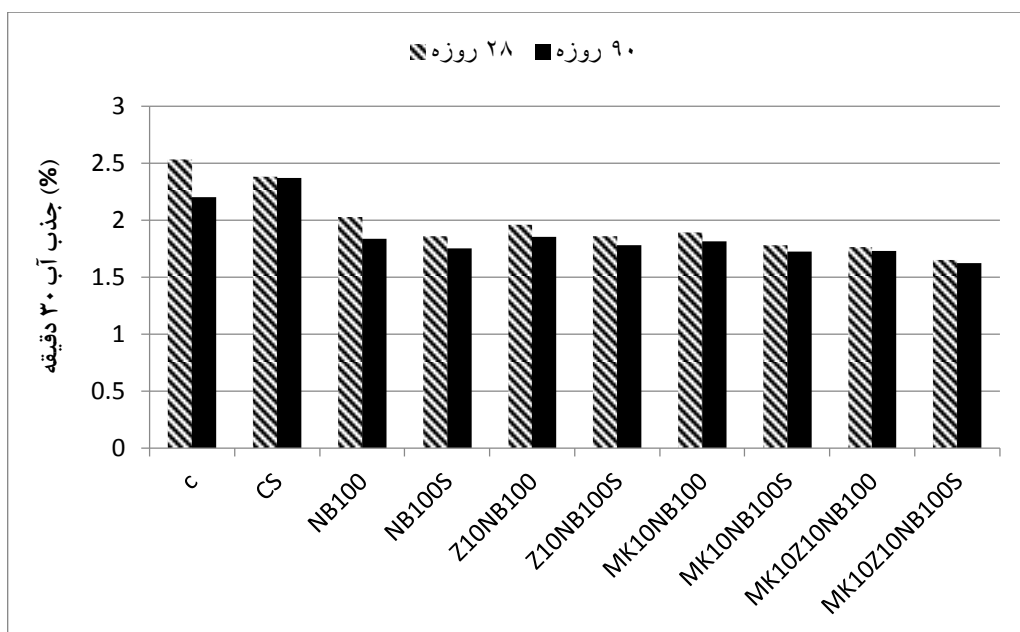
#### ۴-۱۵-۴- آزمایش جذب آب

براساس نتایج بدست آمده از شکل ۴-۲۱ که مربوط به جذب آب ۳۰ دقیقه می باشد، مشاهده می شود که نمونه حاوی ۱۰ درصد متاکائولین همراه با ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب عمل آوری شده در آب دریا سبب کاهش جذب آب به مقدار ۲۱/۸۴ درصد نسبت به نمونه CS و به مقدار ۲۶/۴۸ درصد کاهش نسبت به نمونه C شده است و همچنین در نمونه حاوی ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب در عمل آوری در آب دریا نسبت به نمونه سبب کاهش بترتیب به مقدار ۲۹/۶۴ و ۲۵/۲۱ درصد شده است که بیشترین مقدار کاهش در جذب آب مربوط به نمونه MK10Z10NB100S به مقدار ۳۰/۶۷، ۷۸/۳۴ و ۶/۲۵ درصد کاهش بترتیب نسبت به نمونه شاهد عمل آوری شده در آب دریا، نمونه شاهد عمل آوری شده در شرایط استاندارد و نمونه MK10Z10NB100 شده است.

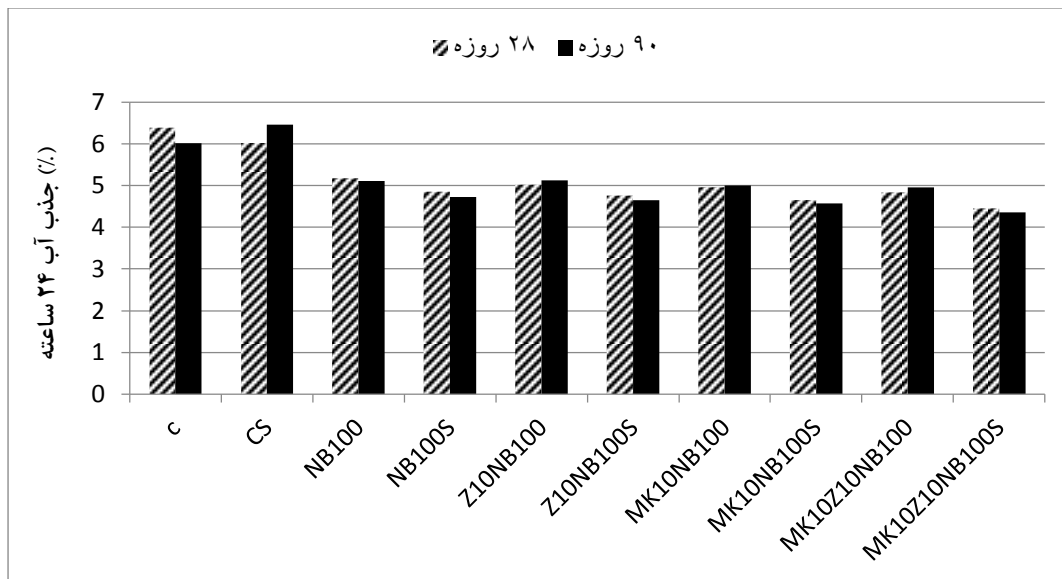
نتایج مربوط به جذب آب ۲۴ ساعته در شکل ۴-۲۲ نشان داده شده است که در سن ۲۸ روز نتایج بیانگر کاهش جذب آب نمونه حاوی ۱۰ درصد زئولیت در اختلاط با ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب عمل آوری شده در آب دریا به مقدار ۲۰/۹۳ و ۴/۹۹ درصد نسبت به نمونه شاهد عمل آوری شده در

آب دریا و نمونه MK10NB100 شده است همچنین بیشترین کاهش در جذب آب ۲۴ ساعته مربوط به نمونه ترکیبی MK10Z10NB100S به مقدار ۲۶/۰۷ درصد نسبت به نمونه شاهد عمل آوری شده در آب دریا می باشد. در نمونه حاوی ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب عمل آوری شده در آب دریا کاهشی معادل ۱۹/۴۳ و ۶/۱۸ درصد بترتیب نسبت به نمونه شاهد عمل آوری شده در آب دریا و نمونه NB100 مشاهده گردید.

همانگونه که از شکل های ۴-۲۱ و ۴-۲۲ که مربوط به جذب آب ۳۰ دقیقه و ۲۴ ساعت نمونه ها در سن ۹۰ روز می باشند، مشاهده می شود که استفاده همزمان از متاکائولین و زئولیت در اختلاط با آب میکرو-نانوحباب چه در شرایط عمل آوری استاندارد و چه در شرایط عمل آوری در آب دریا سبب کاهش جذب آب بتن در سن ۹۰ روز نسبت به سن ۲۸ روز شده است اما در نمونه شاهد بدلیل حمله کلراید های موجود در آب دریا سبب افزایش جذب آب ۹۰ روزه نسبت به ۲۸ روزه شده به نحوی که سبب افزایشی به مقدار ۷/۷۲ درصد در جذب آب ۳۰ دقیقه و به مقدار ۷/۱۹ در جذب آب ۲۴ ساعته در سن ۹۰ روز شده است.



شکل ۴-۲۱ نمودار درصد جذب آب در ۳۰ دقیقه



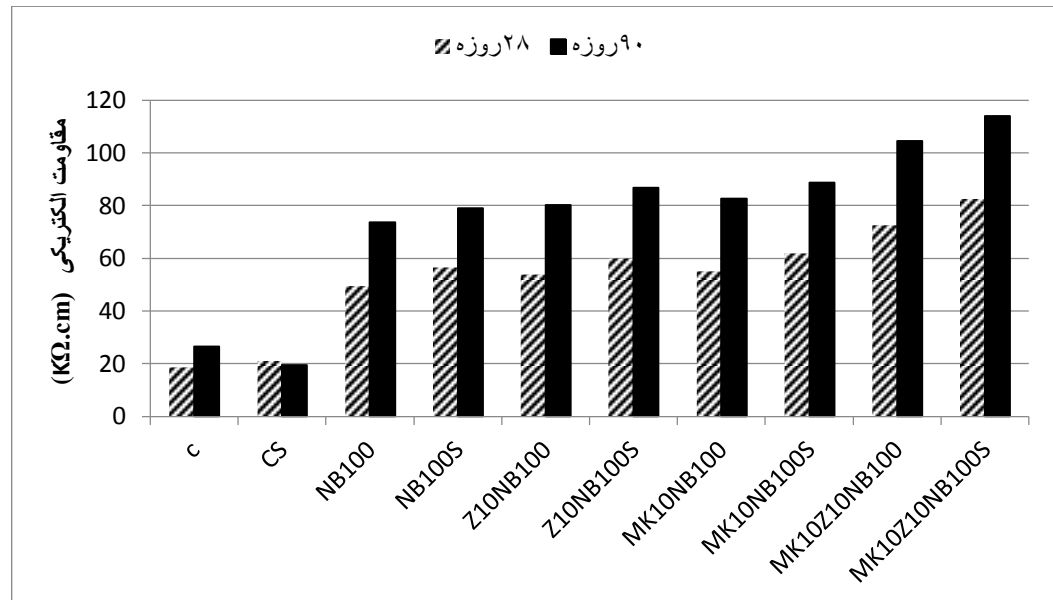
شکل ۴-۲۲ نمودار درصد جذب آب در ۲۴ ساعت

#### ۴-۱۵-۵- مقاومت الکتریکی

بر اساس نتایج بدست آمده از شکل ۴-۲۳ مشاهده می شود که در سن ۹۰ روز کمترین و بیشترین مقاومت الکتریکی بترتیب مربوط به نمونه شاهد و نمونه ترکیبی حاوی ۱۰ درصد ژئولیت به همراه ۱۰ درصد متاکائولین در اختلاط با ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب عمل آوری شده در آب دریا به مقدار ۱۹/۵ و ۱۱۳/۹۰ کیلو اهم - سانتی متر بوده است. همچنین نمونه حاوی ۱۰ درصد متاکائولین به همراه ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانو حباب عمل آوری شده در آب دریا سبب بهبودی به مقدار ۲/۹۳ برابر و ۱۲/۶۵ درصد نسبت به نمونه شاهد عمل آوری شده در آب دریا و نمونه MK10NB100 شده است که این موضوع در نمونه حاوی ۱۰ درصد ژئولیت به همراه ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب عمل آوری شده در آب دریا به مقدار ۲/۸۳ برابر و ۱۱/۲۵ درصد نسبت به نمونه شاهد عمل آوری شده در آب دریا و نمونه Z10NB100 مشاهده شده است.

بر اساس شکل ۴-۲۳ در سن ۹۰ روز مشاهده می شود مقاومت الکتریکی تمامی نمونه های دارای پوزولان و میکرو-نانوحباب بر خلاف نمونه شاهد عمل آوری شده در آب دریا، به نحو چشمگیری

افزایش یافته است. که این موضوع ممکن است بعلت اثر همزمان پوزولان ها و آب میکرو-نانوحباب بعلت کاهش تخلل که منجر به کاهش حجم فضای قابل نفوذ یون می شود، باشد.



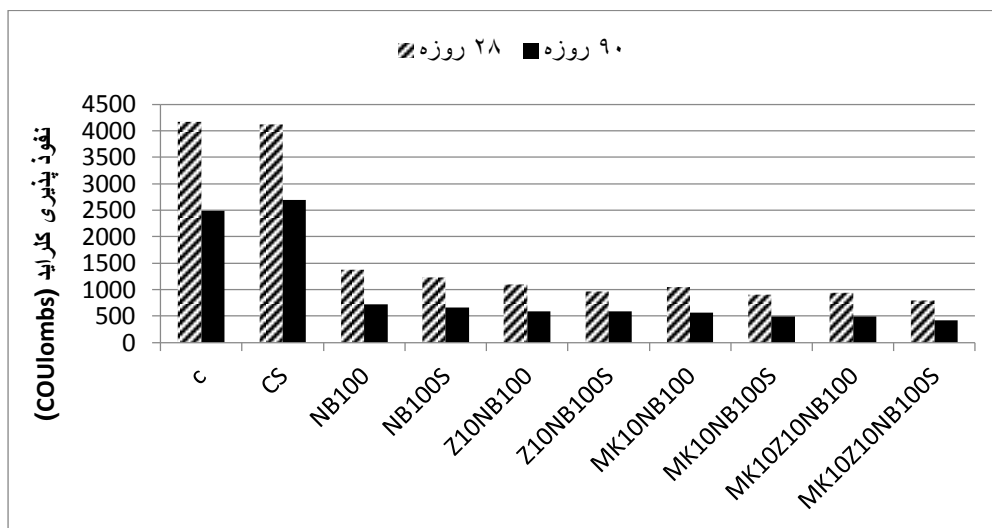
شکل ۴-۲۳ نمودار مقاومت الکتریکی

#### ۴-۱۵-۶- نفوذ تسریع شده یون کلراید

بر اساس نتایجی که از شکل ۴-۲۴ بدست آمده است مشاهده می شود که در سن ۲۸ روز نمونه حاوی ۱۰ درصد زئولیت به همراه ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب در شرایط عمل آوری آب دریا سبب کاهش نفوذ تسریع شده یون کلراید به مقدار ۱۲/۶۴ درصد نسبت به نمونه Z10NB100 شده است و همچنین نمونه حاوی ۱۰ درصد متاکائولین به همراه ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب عمل آوری شده در آب دریا سبب کاهشی به مقدار ۱۳/۲۳ درصد نسبت به نمونه MK10NB100 شده است. در نمونه ترکیبی MK10Z10NB100S سبب کاهشی به مقدار ۱۵/۱۹ درصد نسبت به نمونه MK10Z10NB100 شده است و در نمونه حاوی ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب در شرایط عمل آوری آب دریا سبب کاهشی به مقدار ۱۰/۲۱ درصد نسبت به نمونه NB100 مشاهده شده است.

بر اساس شکل ۴-۲۴ مقدار نفوذ یون کلر در سن ۹۰ روز در نمونه شاهد و نمونه شاهد عمل آوری شده در آب میکرو-نانوحباب بترتیب به مقدار ۲۴۸۷/۱ و ۲۶۸۸/۹ کلومب بوده است و همچنین نمونه

حاوی ۱۰ درصد متاکائولین در اختلاط با ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب در شرایط عمل آوری آب دریا به مقدار ۸۱/۵۵ درصد نسبت به نمونه CS کاهش در نفوذ تسریع شده یون کلراید داشته است که این موضوع در نمونه حاوی ۱۰ درصد زئولیت به همراه ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب در شرایط عمل آوری آب دریا به مقدار ۷۸/۱۳ درصد کاهش مشاهده شده است. بیشترین کاهش در نفوذ تسریع شده یون کلراید مربوط به نمونه ترکیبی حاوی ۱۰ درصد متاکائولین به همراه ۱۰ درصد زئولیت در اختلاط با ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب به مقدار ۸۴/۱۸ درصد کاهش نسبت به نمونه CS بوده است.



شکل ۴-۲۴ نمودار نفوذپذیری یون کلراید





## فصل ۵

# نتیجه گیری و پیشنهادات

## ۵-۱- مقدمه

در این بخش به جمع بندی نتایج حاصل از تحقیق حاضر پرداخته شده است. نتایج بررسی خواص مکانیکی و دوام بتن حاوی پوزولان زئولیت، متاکائولین، آب میکرو-نانوحباب و همچنین ترکیب پوزولان ها با آب میکرو-نانوحباب ارائه گردیده است. در پایان پیشنهاداتی پیرامون تحقیقات آتی ارائه شده است.

## ۵-۲- جمع بندی نتایج آزمایشات در سن ۲۸ روز

(۱) استفاده متاکائولین بجای بخشی از وزن سیمان بعلت واکنش های پوزولانی که منجر به تولید ژل های ثانویه می شود سبب بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن شده است بنحوی که در جایگزینی ۵ و ۱۰ درصد متاکائولین بجای وزن سیمان در آزمایش مقاومت فشاری بترتیب به مقدار ۳ و ۴/۷۵ درصد افزایش و در آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید سبب کاهش نفوذ پذیری به مقدار ۵۲/۳۲ و ۵۶/۳۶ درصد نسبت به نمونه شاهد بوده است.

(۲) جایگزین کردن ۱۰ درصد نسبت به ۵ درصد متاکائولین باعث افزایش به میزان ۱/۶۹، ۷/۰۳، ۳/۵۶، ۱۸/۴۲، ۸/۰۱ و ۸/۴۷ درصد به ترتیب در آزمایشهای مقاومت فشاری، کششی، خمشی و الکتریکی، سبب کاهش به مقدار ۸/۰۱ و ۸/۴۷ درصد در آزمایش های جذب آب و نفوذ تسریع شده یون کلراید شده است. بنابراین میتوان نتیجه گرفت که درصد جایگزینی بهینه متاکائولین در این تحقیق ۱۰ درصد وزنی سیمان بوده است.

(۳) استفاده از زئولیت بجای بخشی از سیمان به علت واکنش پوزولانی و اصلاح ساختار حفرات نمونه های بتنی سبب بهتر شدن خواص مکانیکی و دوام بتن می گردد بگونه ای که در جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد بجای وزن سیمان در آزمایش مقاومت فشاری بترتیب به مقدار ۳/۷ و ۲ درصد افزایش و در آزمایش مقاومت الکتریکی به مقدار ۱۰۰ و ۱۳۵/۲۹ درصد افزایش نسبت به نمونه شاهد بدست آمده است.

۴) جایگزینی ۱۰ درصد نسبت به ۲۰ درصد زئولیت سبب افزایشی به مقدار ۱/۶۶، ۴/۹۱ و ۳/۹ درصد به ترتیب در آزمایش های مقاومت فشاری، کششی و خمشی شده است.

۵) استفاده از آب میکرو-نانوحباب نسبت به جایگزینی ۵۰ و ۱۰۰ درصد بجای آب مخلوط بتن سبب افزایش مقاومت فشاری بتن به مقدار ۸/۸۲ و ۱۳/۲ درصد، افزایش مقاومت الکتریکی بتن به مقدار ۲/۵ و ۲/۶۴ برابر و همچنین کاهش نفوذ یون کلر در آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید به مقدار ۵۶/۴۱ و ۶۶/۹۵ درصد نسبت به نمونه شاهد شده است.

۶) استفاده هم زمان از متاکائولین ۱۰ درصد وزنی سیمان بترتیب همراه با ۵۰ و ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب سبب هم افزایی شده بگونه ای که به مقدار ۱۲ و ۱۵ درصد افزایش در آزمایش مقاومت فشاری، به مقدار ۶۳/۵۴ و ۷۴/۸۵ درصد افزایش در آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید و همچنین به مقدار ۲/۸۲ و ۲/۹۴ برابر افزایش در آزمایش مقاومت الکتریکی نمونه های بتنی نسبت به نمونه شاهد شده است

۷) استفاده هم زمان از ۱۰ درصد زئولیت بترتیب همراه با ۵۰ و ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب باعث هم افزایی شده بگونه ای در آزمایش مقاومت فشاری بترتیب به مقدار ۱۰ و ۱۳/۲۵ درصد افزایش، آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید به مقدار ۶۲/۴۹ و ۷۳/۵۳ درصد کاهش و در آزمایش مقاومت الکتریکی به مقدار ۲/۵ و ۲/۸۸ برابر افزایش نمونه ها نسبت به نمونه شاهد شده است

۸) استفاده هم زمان از ۱۰ درصد زئولیت به همراه ۱۰ درصد متاکائولین در اختلاط با ۵۰ و ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب بترتیب سبب افزایش مقاومت فشاری بتن به مقدار ۱۴/۵ و ۱۷/۷۵ درصد نسبت به نمونه شاهد و به مقدار ۷/۷۶ و ۱۰/۸۲ درصد افزایش نسبت به نمونه حاوی ۱۰ درصد زئولیت به همراه ۱۰ درصد متاکائولین در اختلاط با آب معمولی شده است. همچنین این موضوع در آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید به مقدار ۷۰/۷۰ و ۷۷/۳۹ درصد کاهش نسبت

به نمونه شاهد و به مقدار ۲۵/۵۷ و ۴۲/۵۵ درصد کاهش نسبت به نمونه حاوی ۱۰ درصد زئولیت بهمراه ۱۰ درصد متاکائولین شده است.

(۹) نتایج بدست آمده از آزمایش میکروسکوپ الکترونی بیانگر آن است که استفاده هم زمان از درصد بهینه پوزولان زئولیت و متاکائولین که همان ۱۰ درصد بوده در اختلاط با آب میکرو-نانوحباب سبب بهتر شدن خواص بتن در ناحیه انتقال و کاهش ترک و افزایش انسجام نمونه بتنی در مقایسه با نمونه مشابه در اختلاط با آب معمولی است. همچنین این موضوع در نمونه حاوی ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب در قیاس با نمونه شاهد مشاهده شده است. بیشترین انسجام و تراکم نمونه بتنی در بزرگنمایی ۱۰۰ میکرومتر مربوط به نمونه حاوی ۱۰ درصد زئولیت بهمراه ۱۰ درصد متاکائولین در اختلاط با آب میکرو-نانوحباب در قیاس با همه نمونه های مورد آزمایش بوده است.

(۱۰) نتایج بدست آمده از عمل آوری نمونه ها در شرایط آب دریا نسبت به شرایط استاندارد (آب و آهک اشباع) حاکی از آن است که خواص مکانیکی شامل مقاومت فشاری، کششی و خمشی نمونه های عمل آوری شده در آب دریا بهتر از نمونه های مشابه عمل آوری شده در شرایط استاندارد می باشد بگونه ای که مقاومت فشاری نمونه حاوی ۱۰ درصد متاکائولین بهمراه ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب سبب افزایشی به مقدار ۸/۷۵، ۱۲/۵ و ۸/۲ درصد در آزمایش های مقاومت فشاری، کششی و خمشی نسبت به نمونه مشابه در شرایط عمل آوری استاندارد شده است.

(۱۱) عمل آوری نمونه حاوی ۱۰ درصد زئولیت بهمراه ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب در شرایط عمل آوری آب دریا سبب افزایشی به مقدار ۶/۷۶، ۱۱ و ۷/۶ درصد در آزمایش های مقاومت فشاری، کششی و خمشی نسبت به نمونه مشابه در شرایط عمل آوری استاندارد شده است.

(۱۲) نتایج بدست آمده در آزمایش های مربوط به خواص دوام بتن شامل مقاومت الکتریکی، نفوذ تسریع شده یون کلراید و جذب آب نشان می دهد که نمونه حاوی ۱۰ درصد زئولیت بهمراه ۱۰ درصد متاکائولین در اختلاط با ۱۰۰ درصد متاکائولین سبب افزایش مقاومت الکتریکی به مقدار

۱۳/۶۵ درصد و کاهش نفوذ تسریع شده یون کلراید و کاهش جذب آب ۳۰ دقیقه بترتیب به مقدار ۱۵/۱۹ و ۶/۲۵ درصد نسبت به نمونه شاهد شده است.

۱۳) زئولیت، متاکائولین و آب میکرو-نانوحباب در ترکیب باهم باعث بهتر شدن خواص مکانیکی و دوام بتن می شوند. بنابراین می توان از آنها بعنوان مواد جایگزین سیمان و آب اختلاط بتن در جهت کاهش آلاینده‌گی محیط زیست و افزایش بازدهی بتن و همچنین مدیریت هزینه ساخت بتن استفاده نمود. همچنین بر اساس نتایج بدست آمده از عمل آوری نمونه ها در شرایط آب دریا مشاهده می شود که نمونه های حاوی زئولیت و متاکائولین در اختلاط با آب میکرو نانو حباب بعلا خواص مناسب مکانیکی و دوام قابلیت استفاده موثر در مناطق دریایی را دارند.

### ۳-۵- پیشنهادات تحقیقات آینده

۱- بررسی تاثیر نسبت های آب به سیمان مختلف بر خواص مکانیکی و دوام بتن حاوی پوزولان زئولیت و متاکائولین همراه با آب میکرو-نانوحباب.

۲- بررسی اثر استفاده از پوزولان های دیگر در ترکیب با میکرو-نانوحباب بر خواص مکانیکی و دوام بتن.

۳- بررسی تاثیر استفاده همزمان از میکرو-نانوحباب های هوا و دیگر نانو ذرات بر خواص مکانیکی بتن.

- Aburawi, M. M., & Swamy, R. N., (2008) " Influence of salt weathering on the properties of Concrete" **J. Science and Engineering**, V 33(1), pp 105-116
- Ahmadi, B., shekarchi, M., (2010) "Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material"Cem Concr Compos" **J. Cement & Concrete Composites** V 32, pp, 134-141
- Arefi, A., Saghravani, S. F. A., Mozaffari Naeeni, R., (2016) "Mechanical behavior of concrete made with Micro-Nano Air Bubbles". **J.Civil engineering Infrastructures** V49 (1), pp 141-149.
- ASTM D1141-1998., (2008.) "Standard practice for the preparation of substitute oceanwater" . **American society for testing and materials, United States.**
- ASTM C 618-99a, (1999) "standard specification for fly ash and raw calcined natural pozzolans for use as a mineral admixture in concrete" United States.
- ASTM C1202. (2007)"Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration" , **ASTM Publication, United States.**
- ASTM C143. (2010), "Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete", **Sacramento, California.**
- ASTM C1723. (2010) "Standard Guide for Examination of Hardened Concrete Using Scanning Electron Microscopy", **Concrete and Aggregates**, 04.02.2010. United States
- ASTM C496. (2004), "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. American Society for Testing and Materials", **Philadelphia.**
- ASTM C595. (2000) "Standard Specification for Gypsum Casting Plaster and Gypsum Molding Plaster"
- ASTM C618-99. (1999) "Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as A Mineral Admixture in Portland cement concrete" United States.
- ASTM C78.,(2002), Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). **American Society for Testing and Materials, Philadelphia.**
- ASTM C192. (2002), Standard Practice for Making and Curing Concrete Specimens in the Laboratory.
- ASTM C150. 2012, Standard Specification for Portland Cement. **American Society for Testing and Materials, Philadelphia**
- ASTM D512 (2012), " standard test methods for chloride ion in water", **American Society for testing and materials** . Philadelphia.
- ASTM C136. (2004), Standard method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. **American Society for Testing and Materials, Philadelphia.**

- ASTM C192. (2002), Standard Practice for Making and Curing Concrete Specimens in the Laboratory.
- BS 1881 Part 122., (1983), Testing concrete. Method for determination of water absorption.
- BS 1881: part 116. ( 1993), Methods for determination of compressive strength of concrete cubes. British Standard Institution.
- Baldar, N.A, Wittig, L.D (1968) " Occurrence and Synthesis of soil Zeolite", **J of Soli Sicence Society**, V 32, pp 235-248.
- BS 1881 Part 122. (1983) "Testing concrete. Method for determination of water absorption" **brithish standards Institution**.
- Bonakdar, A., Bakhshi, M., Ghalibafian, M., (2005) "Properties of High-performance Concrete Containing High Reactivity Metakaolin", **J. 7th International Symposium on Utilization of High Strength/High-Performance Concrete, Washington DC.USA**, June2005, V1, pp 228-295.
- Bich, C., Ambroise, J., Pera, J., (2009)," Influence of degree of dehydroxylation on the pozzolanic activity of metakaolin" . **J. Appl. Clay Sci**. V44, pp194–200.
- Batis, G., Pantazopoulou, P., Tsvivilis, S., Badogiannis, E., (2005) "The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars", **J.Cement & Concrete Composites** V27, pp 125–13
- Canpolat, F., Yilmaz, K., Kose, M. M., M sumer ,M. A. Yurdusev., (2004) " use of zeolite , coal bottom ash and fly ash replacement materials in cement production", **J.cement and concrete Research**, V34, pp 731-735
- Chan, S. Y. N. & Ji, X.,(1999) "Comparative study of the initial surface absorption and chloride diffusion of high performance zeolite, silica fume and PFA concretes", **J.cement and concrete composites**, V 21, Issue 4, pp 293-300.
- Ding, J. T., Yan, P. Y., Liu, S. L. and Zhu, J. Q., (1999) "Extreme vertices design of concrete with combined mineral admixtures", **J.Cement and Concrete Research** , V29, pp 957-960
- Dhir, R. K., Newlands, M. D, (1999) " A study of CEN test method for measurement of the carbonation depth of hardened concrete". **J.Materials and structure**,V 33, pp135-142.
- Florida Department of Transportation Florida Method of Test for Concrete Resistivity as an Electrical Indicator of its Permeability,( 2004), Designation: FM 5-578, Florida, USA.
- Feng, N., Li, Gz Zang XW., (1990) " High-strength and flowing concrete with a zeolitic mineral admixture", **J.ASTM Cem Concr Agg**, V12, pp 61-69
- Feng, N., Yang, H., Zu, L.,(1988) " The strength effect of mineral admixture on cement concrete",**J.Cement and Concrete Research**,V 18, pp 464-472.
- Feng, N, Q & peng, G.F., (2005) "Applications of natural zeolite to construction and building materials in China",**J.Construction and Building Materials**, V19, pp 579-584

- Feng, N, Q., Li, G. Z, and Zang X .W., (2002) " Effect of ultrafine mineral powder on the charge passed of the concrete",**J.Cement and concrete Research**, V 32 , pp 623-627
- Fernandez, R., Martirena, F., Scrivener, K.L., (2011) "The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: a comparison between kaolinite, illite and montmorillonite". **J. Cem. Concr. Res.** V41, 113–122
- Hoff, G.C. ,(1991)" Durability of offshore and marine concrete structures", **2nd international conference**, pp33-64
- Kasai, Y., Tobinai, E., Asakura, N, (1992), " Comparative study of natural zeolite and other inorganic admixtures, in terms of characterization and properties of mortar" 4th intl conference on fly ash.silica Fume.slag and natural pozzolans inconcrete. turkey.
- Khatib, J,M., (2008) " Metakaolin concrete at a low water to binder ratio, construction and Building Materials" **J. Construction and Building Materials** V22(8), pp1691-1700
- Khatib, J.M, Clay, R.M., (2004)"Absorption characteristics of metakaolin concrete", **J.Cement and Concrete Research**,V 34, Issue 1, pp19-29
- Li, Q., Geng, H ., Shui Z., Huang., Y ,(2015) " Effect of metakaolin addition and seawater mixing on the properties and hydration of concrete", **J.Applied Clay Science**, V115, pp51-60
- Li, Q., Geng, H ., Shui Z., Huang., Y .,(2015) " Chloride resistance of concrete with metakaolin addition and seawater mixing: A comparative",**J. Construction and Building Materials**, V101, pp184-192
- Mehta, P.K., & Monteiro, P. (2005) " Concrete: microstructure, properties, and materials", **3rd New York: McGraw-Hill Professional**, pp135–136.
- Mbadike, E. M. (2011) "Effect of salt water in the production of concrete". **J.Nigerian Journal of Technology**,V 30 (2), pp 105-110
- Mozaffari Naeeni, R., (2014) " Investigation on the hydrodynamics standard pattern using micro-nanoair bubbles", **M.Sc. Thesis, Shahrood University of Technology, Iran.**
- Mehta, P.K., & Monteiro, P. (2005) " Concrete: microstructure, properties, and materials", **McGraw-Hill Professional**, pp135–136.
- Mehta, P. K. & Manmohan D., (1981) "Influence of pozzolanic , slag , and chemical admixtures on pore distribution and permeability of hardened cement pastes", **J.Cement and concrete and Aggregates**, V 3, pp 63-67
- McCoy, W.J. (1996). "Mixing and curing water for concrete, Significance of tests and properties of concrete and concrete making materials", **American Society for Testing and Materials**, 515–521. Philadelphia.
- Naghoj, N.M., & Abdel-Rahmna, N. (2005) ". Enhancing the performance of concrete subjected to salty seawater", **In: Admixtures – enhancing concrete performance, the international conference**,July,Dundee Scotland, United Kingdom, pp35-40



- Olutoge, F., Adeyemi, . & Amusan, G. Modupeola.,(2014)"The Effect of Sea Water on Compressive Strength of Concrete". **J. of Engineering Science Invention**, V3(7), pp23-31
- Perraki, Th. ,Kakali, G., Kontoleon, F. , (2003) " The effect of natural zeolites on the early hydration of Portland cement",**J.Microporous and Mesoporous Materials**,V 61, pp 205-212
- Poon, C.S. , Lam, L. , Kou, S.C. ,and Lin, Z. S., (1999) " A study on the hydration of natural zeolite blended cement pastes ", **J.construction and Building**
- Potgieter \_ vermaak, s.s., potgieter, j.H., (2006)"Metakaolin as an Extender in south African", **j. of Materials in civil Engineering**, V 18, pp 619-6230
- Ramezani pour, A.A ., Mousavi, R., Kalhori , M., Sobhani, J., Najimi, M. (2015)," Micro and macro level properties of natural zeolite contained concretes", **Construction and Building Materials** V101 pp 347–358.
- Sabir, B.B. , Wild ,S., Bai , J ., (2001)," Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review",**J.Cement and Concrete Composites**,V23, pp 441-445
- Siddique, R., Klaus, J., (2009)" Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review"**J.Applied Clay Science**, V43, pp 392-400
- Sammy Y.N Chan ., Xihuang Ji.,(1999)" Comparative study of the initial surface absorption and chloride diffusion of high performance zeolite, silica fume and PFA concretes",**J. Cement and Concrete Composites**,V 21, pp 293-300
- Shekarchi, M., Ahmadi, B .,Najimi M.,(2012)" Use of natural zeolite as pozzolanic Material in cement and concrete composites" **J. Bentham science**, V30, pp665-694
- Shekarchi, M., Bonakdar, A., Bakhshi, M., Mirdamadi, A., Mobasher, B., (2010) "Transport properties in Metakaolin blended concrete", **J.Construction and Building Materials**, 24, 2217–2223.
- Shi, M R Geiker, K DeWeerd, T Østnor, B Lothenbach,F Winnefeld, J Skibsted., (2017)"Role of calcium on chloride binding in hydrated Portlandcement–metakaolin–limestone blends", **J.Cement and Concrete Research** V 95, pp 205–216
- Schneider, U., & Chen, S.W., (2005)" Deterioration of high-performance concrete subjected to attack by the combination of ammonium nitrate solution and flexural stress",**J. Cement Concrete Research**, V 35 (9), pp1705–1713.
- Tokushige, H., Kamehima, H., Kawakami, M., Bier, TA., (2009), " Effect of use of natural zeolite as a mineral admixture and an aggregate on physical properties of cement mortar and porous concrete. **proceeding of the 4th international conference on construction materials**. pp1231-6.
- Tibbetts, D. C., (1968). "Performance of concrete in sea water", **Canadian Building Series**, pp 159-180.

- Uddin, T., Hidenori, H., & Yamaji, T., (2004) "Performance of seawater-mixed concrete in the tidal environment". **J.Cement and Concrete Research**, V 34 (4), pp593–601.
- Uzal B. Turanli L., Mehta Pk., (2012) "Blended cements containing high volume of natural zeolites Properties hydration and paste microstructure", **J.Cement and concrete Composites**, V 34, pp 101-109
- Valipour, M., Pargar, F., Shekarchi, M., Khani, S., (2013) "Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study", **J.Construction and Building Materials** V 41, pp879–888.
- Wegian, F. M. (2010) "Effect of seawater for mixing and curing on structural Concrete." **J. Civil & Structural Engineering**, V3(4), pp 235-243
- Yoon R H, Luttell G H. (1989)"The effect of bubble size on fine particle flotation"  
**J.Mineral Processing Extractive Metallurgy Review**, V5, pp 101-122

استاندارد ملی ایران به شماره ۳۴۳۳ ، ۱۳۷۳ "ویژگی سیمان پرتلند پوزولانی". چاپ اول،  
موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران.

رضانیانپور، ع. موسوی، ر. احمدی، ب.، مهرماه ۱۳۹۰ ، " خواص مهندسی و دوام بتن های

ساخته شده از زئولیت"، سومین کنفرانس ملی بتن ایران، تهران.

عارفی، ا، ۱۳۹۳، " کاربرد میکرو نانو حباب و نانو مواد در بهبود رفتارهای مکانیکی و عایق بودن

مصالح ساختمانی ( با تاکید بر بتن )" پایان نامه ارشد ، دانشگاه صنعتی شاهرود،

ایران.

مستوفی نژاد، د، ۱۳۹۴، "سازه های بتن آرمه"، جلد اول ، چاپ سی پنجم، انتشارات ارکان

دانش، تهران

مظفری نائینی، ر، ۱۳۹۲: "بررسی الگوهای هیدرودینامیکی استاندارد جریان به کمک

نانو- میکرو حباب هوا"، پایان نامه ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

نشریه شماره ض-۴۷۹، (۱۳۸۸)، "روش ملی طرح مخلوط بتن"، انتشارات مرکز تحقیقات  
ساختمان و مسکن، چاپ دوم.

نشریه شماره ۳۸۹، (۱۳۹۵)، "ویژگی های سیمان پرتلند" انتشارات موسسه استاندارد و تحقیقات  
ایران، چاپ هشتم.

## **Abstract**

Global concerns regard to global warming through producing greenhouse gases such as CO<sub>2</sub> and the need for appropriate concrete resistivity against chloride ion penetration in marine constructions are among the reasons that numerous studies have conducted on using appropriate pozzolan as a substitution to the part of consumed cement in the concrete which improve mechanical properties and durability of concrete.

This study evaluated the effects of using meta-kaolin and zeolite as substitutions to part of consumed cement in the concrete, moreover, micro-nano bubbles of water were used as a substitution for mixing water in the concrete, the combination of optimal percentage of zeolite and meta-kaolin in mixed with micro-nano bubbles of water. We examined the compressive strength (BS 1881), flexural strength (ASTM C78), tensile strength (ASTM C496), Percentage of water absorption in 30 minutes and 24 hours (BS 1881), electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration (ASTM C1202) and examination of hardened concrete using Scanning Electron Microscopy (ASTM 1723-16). We cured concrete samples with drinking water, in standard condition of forming compound which consist of saturated water and lime, and as a case study, in standard condition of forming compound in artificial seawater according to the standards (ASTM D1141).

The results of experiments indicated that using 10% of meta-kaolin instead of part of cement in concrete samples caused to increase compressive strength, flexural strength, and tensile strength by 4.75%, 25%, and 1.97%, respectively. Moreover, in chloride permeability experiment, the chloride ion penetration reduced to 56.36% at the age of 28 days compared to control samples. In addition, in sample containing 10% zeolite, there were 3.7% increase in compressive strength and 4.34% and 16.6% decrease in water absorption 30 minutes and 24 hours of absorbing water, respectively.

The samples contained micro-nano bubbles of water at a replacement rate of 50% and 100% instead of the water mixed concrete caused to increase compressive strength 8.82% and 13.2%, respectively, tensile strength 10% and 19.64%, respectively, and decrease of 16.8% and 20% in 30 minutes' absorption water experiments at the age of 28 days, while compared to the control samples.

The effects of using zeolite and meta-kaolin simultaneously in mixture with micro-nano bubbles of water improved mechanical properties and durability of concrete. The best produced sample related to the combination of 10% zeolite and 10% meta-kaolin in mixture with 100% micro-nano bubbles of water. This compound increased the mechanical properties of concrete in experiments of compressive and tensile strength to 14.85% and 18.37%, respectively. It also improved the durability of concrete in 24 hour experiments of water absorption and at the age of 90 days, chloride permeability decreased to 17.56% and 80.45% respectively, while compared to control samples.

According to the results, in the sample made by 100% micro-nano bubbles of water cured in artificial seawater up to the age of 28 days, caused an increase in compressive strength, tensile and flexural strength of 6.97%, 10.71% and 11% compare to control samples which cured in samples formed in standard conditions.

Also, in the mixed sample which contained 10% silt, 10% meta-kaolin, in a mixture of 100% micro-nano bubbles of water cured in artificial seawater up to the age of 28 days, caused an increase compressive, tensile strength and flexural strength of 11.13%, 14%, and 9.1% and reduction were observed in chloride permeability and 24-hour water absorption of 15.19% and 7.86% compared to similar samples in standard forming condition.

**Keywords:** Meta-kaolin, zeolite, micro-nano bubbles of water; mechanical properties; Durability properties of concrete, sea water



**Faculty of Civil Engineering**

**M.Sc. Thesis in Environmental Engineering**

**Investigating the Properties of Environmental compatible concrete in  
marine structures**

**by:**

**Pouriya Mohsenzadeh**

**Supervisor:**

**Dr. Seyed Fazlolah Saghravani**

**Dr. Gholamreza Asadollah Fardi**

**January 2018**