

تأثیر شرایط عمل آوری کلرایدی بر خواص مکانیکی و دوام بتن حاوی زئولیت و میکرونانونحباب

معین خوشرو^۱، علی کاتبی*^۲، علی اکبر شیرزادی جاوید^۲^۱دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران^۲دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۶ آبان ۱۳۹۶

بازنگری: ۶ آذر ۱۳۹۶

پذیرش: ۷ آذر ۱۳۹۶

ارائه آنلاین: ۱۸ آذر ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

خواص مکانیکی

خواص دوام

زئولیت

میکرو-نانونحباب

شرایط عمل آوری کلرایدی

چکیده: یون کلراید بیشترین سهم در ترکیبات شیمیایی موجود در آب دریا را به خود اختصاص می‌دهد. در این تحقیق برای بررسی تأثیر این یون بر خواص بتن از شرایط عمل آوری کلرایدی و جهت بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن از افزودنی‌های زئولیت و میکرو-نانونحباب استفاده گردیده است. بر اساس آزمایش‌های انجام شده شامل پراش اشعه ایکس، مقاومت فشاری، جذب آب، نفوذ کلراید و مقاومت الکتریکی مشخص گردید که افزودن پوزولان زئولیت و میکرو-نانونحباب به بتن در شرایط عمل آوری کلرایدی از طریق ایجاد نمک فریدل، خواص مکانیکی و دوام بتن را در سن ۲۸ روز بهبود بخشیده و پس از آن با افزایش سن بتن و تجزیه ترکیب نمک فریدل در نمونه‌های بتنی از روند بهبود کاسته می‌شود. بیشترین تأثیر در بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن در سن ۲۸ روز مربوط به نمونه‌ی شامل ۱۵ درصد زئولیت و ۱۰۰ درصد میکرو-نانونحباب در شرایط عمل آوری کلرایدی است که به ترتیب مقاومت فشاری، کششی و الکتریکی را به مقدار ۴۷، ۷۸ و ۲۵۴ درصد افزایش و نفوذ کلراید و جذب آب را به ترتیب به مقدار ۸۴ و ۴۹ درصد نسبت به نمونه شاهد در شرایط عمل آوری استاندارد کاهش می‌دهد.

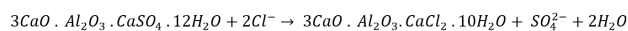
۱- مقدمه

بتن یکی از مصالح با دوام مناسب به شمار می‌رود. تاریخچه‌ی بتن در محیط دریایی حاکی از آن است که بتن در مقابل آب دریا به عنوان یکی از خورنده‌ترین محیط‌های طبیعی در جهان، از دیدگاه دوام در معرض مشکلات جدی قرار دارد [۱]. ترکیبات شیمیایی اولیه آب دریا در محیط‌های مختلف متفاوت است، اما به طور کلی می‌توان گفت یون‌های کلراید، سدیم، منیزیم، کلسیم و پتاسیم یون‌های اصلی موجود در آب دریا هستند. در آب دریا کلراید سدیم (NaCl) نمک غالب است (حدود ۸۸٪ وزن نمک) [۲]. وارد شدن یون کلراید به بتن مسلح و رفتار مربوط به خوردگی یکی از مشکلات عمده در صنعت سیمان و مصالح ساختمانی است. نتایج بیانگر آن است که افزودن مواد پوزولانی مانند متاکائولین^۱ می‌تواند وارد شدن یون کلراید را با بهبود ریزساختار و رفتار مرتبط با کلراید کاهش دهد [۳-۵].

همان طور که یون کلراید به بتن منتقل می‌شود، ترکیب‌های شیمیایی برای حذف برخی از این یون از محلول بتن تشکیل می‌شوند، بدین ترتیب آن را از فرآیند خوردگی حذف می‌کنند. فرآیند «اتصال

کلراید» عمدتاً شامل تشکیل نمک فریدل^۲ است [۶].

نمک فریدل یکی از محصولات فرآیند هیدراتاسیون است و فرمول کلی آن $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ است. نمک فریدل به طور معمول در نتیجه یک واکنش با محصول هیدراتاسیون سیمان به صورت فرمول ۱ ظاهر می‌شود [۶ و ۷].



زیبارا^۳ [۸] دریافت که توانایی یک سیستم برای اتصال به کلرایدها به محتوای آلومینات‌های کلسیم^۴ و آلومینوفریت‌های کلسیم^۵ بستگی دارد که منجر به تشکیل نمک فریدل می‌شود. ولد^۶ و همکاران تأثیر متاکائولین (MK)، خاکستر سوخت ساییده و ترکیبات آن‌ها را بر دوام بتن در محیط‌های دریایی مورد آزمایش قرار دادند. نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که با جایگزینی متاکائولین و خاکستر به جای سیمان، کاهش قابل توجهی در عمق نفوذ کلراید رخ می‌دهد. این کاهش با افزایش

2 Friedel's salt

3 Zibara

4 Calcium Aluminates

5 Calcium Aluminoferrites

6 Wild

1 Metakaolin

نویسنده عهده دار مکاتبات: *katebi@khu.ac.ir

محلول^۴ (Do)، هدایت الکتریکی و کدورت توسط مظفری نائینی در سال ۲۰۱۴ مورد بررسی قرار گرفته است [۱۶]. عارفی و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۶ آزمایش‌های مختلفی بر روی بتن ساخته-شده با آب میکرو-نانوحباب انجام داده‌اند، نتایج بیانگر آن است که استفاده از آب حاوی میکرو-نانوحباب باعث کاهش روانی و اسلامپ، زمان گیرش اولیه و نهایی بتن و دمای اولیه بتن می‌گردد. آن‌ها همچنین گزارش کردند که پارامترهای خواص مکانیکی از جمله مقاومت فشاری و کششی بتن حاوی آب میکرو-نانوحباب به میزان ۱۹ و ۱۶ درصد افزایش می‌یابد [۱۷].

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مصالح مصرفی

مواد مورد استفاده در این پژوهش شامل سیمان پرتلند تیپ یک محصول شرکت سیمان تهران و پوزولان زئولیت طبیعی از نوع کلینوپتیلولیت محصول شرکت نگین پودر سمنان است. ترکیبات شیمیایی سیمان و زئولیت به ترتیب در محدوده استاندارد C150 [18] و ASTM C618 [19] بوده است که در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی سیمان و زئولیت

Table 1. Chemical composition of cement and zeolite

زئولیت طبیعی	سیمان	درصد ترکیب شیمیایی (%)
69/28	22/3	سیلیسیم (SiO ₂)
3/56	62/40	اکسید کلسیم (CaO)
0/49	3/70	اکسید آهن (Fe ₂ O ₃)
10/43	4/50	آلومینیوم (Al ₂ O ₃)
0/5	2/30	اکسید منیزیم (MgO)
0/73	0/27	اکسید سدیم (Na ₂ O)
1/27	0/76	اکسید پتاسیم (K ₂ O)

در شکل ۱ نتایج آزمایش طیف سنجی پراش پرتو ایکس (XRD) صورت گرفته روی نمونه زئولیتی نشان داده شده است. شکل بیانگر فعالیت پوزولانی زئولیت است. همچنین شکل ۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) گرفته شده از زئولیت و سیمان پرتلند را نمایش می‌دهد که نشان دهنده سطح مخصوص و اندازه ذرات سیمان و زئولیت است. همان طور که از شکل پیداست زئولیت دارای سطح مخصوص بالاتر و اندازه ذرات بسیار کوچک تر نسبت به ذرات سیمان است

مقدار جایگزینی و زمان عمل‌آوری افزایش می‌یابد. این امر به تغییرات نسبی نفوذ ذاتی و ظرفیت چسبندگی کلراید با سن مربوط به ترکیبات چسبنده مختلف نسبت داده می‌شود [۹]. کیو و همکاران تأثیر شرایط کلرایدی بر بتن حاوی متاکائولین را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در تحقیق خود اشاره کردند که عمل‌آوری در شرایط کلرایدی باعث افزایش مقاومت فشاری و کاهش نفوذ کلراید در نمونه‌های حاوی پوزولان می‌گردد. همچنین در این تحقیق مقاومت فشاری نمونه شاهد در سن ۹۰ روز نسبت به نمونه مشابه در شرایط استاندارد کاهش می‌یابد [۱۰].

نتایج مطلوب پوزولان‌ها از جمله متاکائولین در محیط کلرایدی باعث شد تا در این تحقیق اثر زئولیت؛ به عنوان یک پوزولان رایج در سطح جهان به همراه میکرو-نانوحباب که یکی از نانو مواد نوین جهت استفاده در صنعت تولید بتن می‌باشد، در محیط کلرایدی مورد مطالعه قرار گیرد. زئولیت طبیعی حاوی مقادیر زیاد SiO₂ و Al₂O₃ است [۱۱]. این ترکیبات با کلسیم هیدروکسید Ca(OH)₂ که در طول فرآیند هیدراتاسیون سیمان ایجاد می‌گردد واکنش داده و آن را تبدیل به ژل C-S-H آلومینوسیلیکات هیدراته می‌کند. در نتیجه ریز ساختار بتن ساخته شده را بهبود می‌بخشد و بتن نفوذناپذیر می‌گردد [۱۲]. بتن حاوی زئولیت در مقایسه با بتن معمولی، به علت وجود مقادیر زیاد منافذ موجود در ساختار زئولیت طبیعی و سطح مخصوص بالای آن، دچار کاهش کارایی شده و نیاز به جذب آب بیشتری دارد [۱۳]. نجیمی و همکاران [۱۴] در طی تحقیقات خود به این موضوع اشاره نمودند که زئولیت گرمای هیدراتاسیون بتن را کاهش داده و به دنبال آن باعث کمتر شدن ترک‌های حرارتی و افزایش خواص دوام از جمله نفوذ یون کلراید، نفوذ آب، میزان خوردگی و انقباض خشک می‌شود. نظر جمعی در مورد تأثیر زئولیت در افزایش مقاومت در سنین اولیه وجود ندارد، در حالی که افزایش مقاومت نسبت به بتن معمولی در سنین بالاتر گزارش شده است [۱۳].

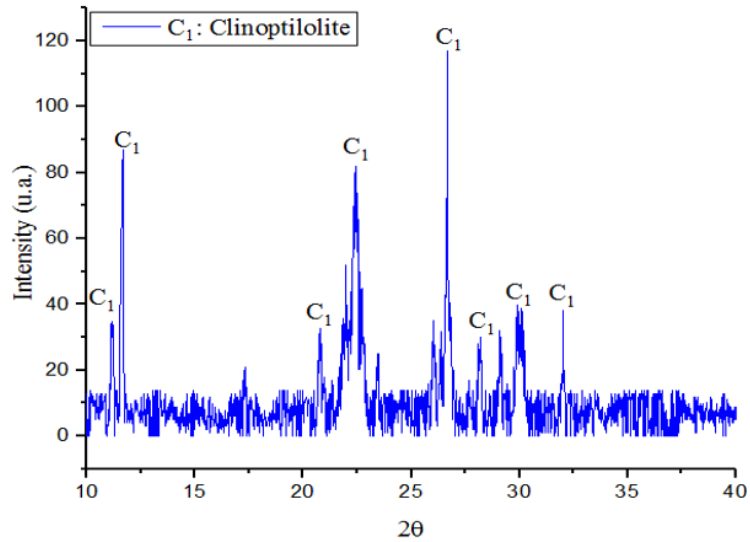
رضانیانپور و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۵ بر اساس مطالعه خود روی خواص زئولیت طبیعی در بتن اشاره نمودند که افزودن زئولیت طبیعی طی ۷ روز اول، توسعه مقاومت را به تأخیر انداخته و پس از آن بتن‌های دارای ۱۰ درصد زئولیت طبیعی تقریباً مقاومت فشاری مشابهی با بتن مرجع را نشان می‌دهد. نجیمی و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۲ در پژوهش خود بر روی خواص بتن با جایگزینی ۱۵ و ۳۰ درصد زئولیت به جای سیمان گزارش کرده‌اند که جمع شدگی ناشی از خشک‌شدگی نسبت به مخلوط شاهد به میزان ۸۴ و ۶۴ درصد کاهش یافته است. مشخصات آب میکرو-نانوحباب^۲ از جمله افزایش^۱ PH، اکسیژن

1 Qio

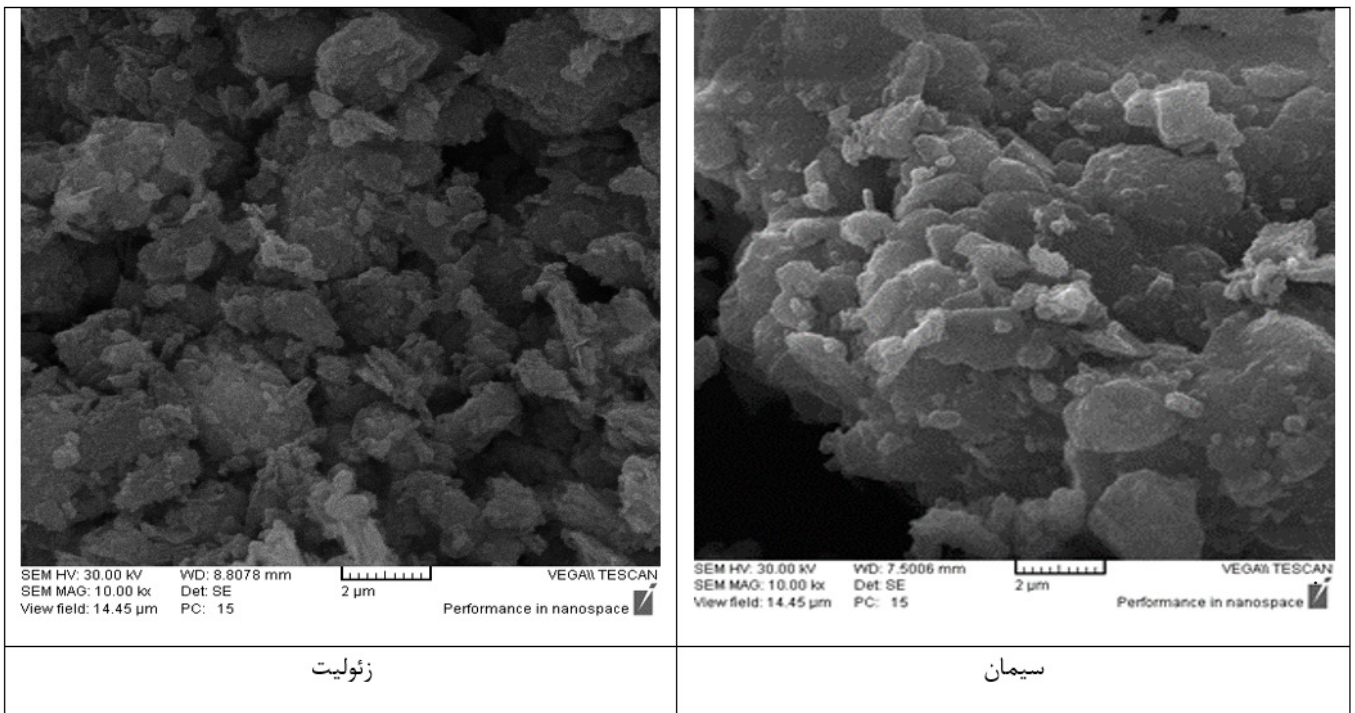
2 Micro-Nano bubble

3 Potential Of Hydrogen

4 Dissolve oxygen



شکل ۱. نمودار XRD زئولیت
Fig1. The XRD diagram of zeolite

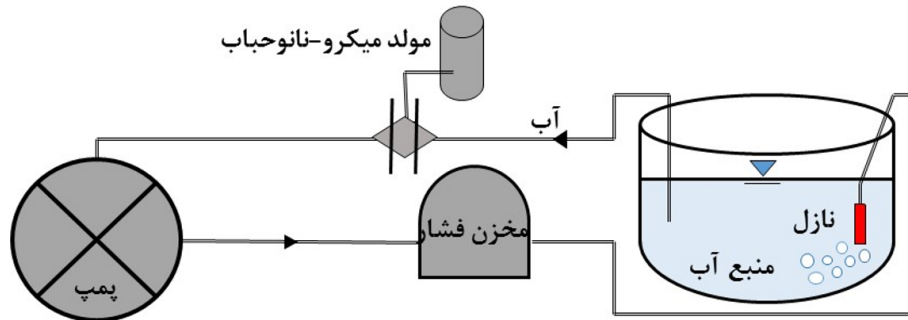


شکل ۲. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سیمان و زئولیت
Fig2. The SEM images of cement and zeolite

فرآیند کاویتاسیون هیدرولیکی در آب شهری حباب‌های نیمه پایدار به اندازه میکرو و نانو ایجاد می‌کند، تولید شده است. مکانیزم عملکرد دستگاه به این نحو می‌باشد که آب در یک منبع قرار داشته و از طریق یک پمپ سانتریفیوژ پس از عبور از مولد میکرو-نانوحباب به داخل آن برگشت داده می‌شود. مولد در قسمت مکش (بالادست) پمپ قرار

آب استفاده شده برای اختلاط نمونه‌های بتنی دارای ویژگی‌های مطابق با استاندارد (EN 1008 (2002) [20] بوده است. در این تحقیق از آب میکرو-نانوحباب به عنوان جایگزین آب مخلوط بتن استفاده شده است. آب دارای حباب‌های به اندازه میکرو و نانو توسط دستگاه تولید میکرو-نانوحباب که طبق روش برش و استفاده از لوله ونتوری و

کافی باشد. در مرحله بعد حباب‌ها به علت چرخش در سامانه به لوله مولد برمی‌گردد، بنابراین کاونتاسیون منجر به کوچک شدن ابعاد حباب‌ها شده و با انجام مکرر میکرو-نانو حباب بیشتر و با قطر کمتری تولید می‌شود [۱۷]. شماتیک عملکرد دستگاه میکرو-نانو حباب در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. شماتیک مکانیزم دستگاه تولید میکرو-نانو حباب
Fig3. Schematic of micro-nanobubble water production

توزیع ابعادی میکرو-نانو حباب ۲۴ ساعت پس از تولید با استفاده از دستگاه آنالیز کننده اندازه ذرات نانو Nano particle size analyzer، مدل LB-550 Horiba ساخت شرکت particle mertix اندازه‌گیری شده است. دستگاه مذکور با روش پراش نور دینامیکی کار می‌کند و قادر به اندازه‌گیری ذرات در محدوده ابعادی ۱ نانومتر تا ۶ میکرون است. پراکندگی ابعاد میکرو-نانو حباب بر اساس هر کدام از پارامترهای اندازه‌گیری شده متفاوت است. بیشترین محدوده ابعاد در پارامتر حجم بین ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر است. در حالی که حداکثر تعداد میکرو-نانو حباب در محدوده اندازه حباب‌های ۲۵۰ تا ۳۵۰ نانومتر است. بالاترین شدت ذرات نانو حباب نیز در اندازه ۸۰۰ تا ۶۰۰ نانومتر اندازه‌گیری شده است.

۲-۱-۱- سنگدانه

مشخصات سنگدانه مصرفی در ساخت بتن مطابق با استاندارد ASTM C33(2002) [21]، دارای حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر و با وزن مخصوص ۲۶۸۰ و ۲۶۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب برای شن و ماسه بوده است. برای تعیین دانه‌بندی مصالح سنگی (شن و ماسه) از آزمایش دانه‌بندی مطابق با استاندارد ASTM C136(2006) [22] استفاده شده است.

جهت دانه‌بندی مصالح رابطه‌ی تامسون-فولر، رابطه ۲ مورد استفاده قرار می‌گیرد. طبق آیین‌نامه ملی طرح مخلوط بتن ایران، در حالتی که ساخت بتن برای بتن‌ریزی در قطعاتی همچون ستون و دیوار مدنظر است، توصیه می‌شود توان n بین اعداد ۰/۶۷ و ۰/۳۵ و

گرفته است. در مولد، در ناحیه‌ی همگرای مخروطی این لوله، سرعت جریان افزایش یافته و در نتیجه فشار کاهش می‌یابد و در قسمتی از لوله فشار منفی شده و با افزایش سرعت از فشار بخار کاسته می‌شود که این امر باعث مکش هوا به داخل لوله می‌گردد. به کمک شیرآلات موجود مکش هوا به نحوی تنظیم می‌شود که برای تشکیل حباب

از آنجا که پایداری میکرو-نانو حباب یکی از پارامترهای مهم می‌باشد و یکی از موارد پایداری بررسی پتانسیل زتا است، لذا تغییرات توزیع ابعادی این حباب‌ها با گذشت زمان بررسی شده است. به این منظور مقادیر پتانسیل زتای سطحی میکرو-نانو حباب‌ها نیز به عنوان تابعی از زمان، اندازه‌گیری شد. مقادیر پتانسیل زتای سطحی میکرو-نانو حباب‌ها با استفاده از یک زتاپتانسیل متر Zeta Compact Cad Instrument اندازه‌گیری شدند. اندازه‌گیری ویسکوزیته نیز با استفاده از همین دستگاه به صورت اتوماتیک از نمونه‌ها انجام شد. با کاهش مقدار مطلق پتانسیل زتای سطحی و متعاقب آن کاهش بار سطحی (که در اینجا منفی است)، نیروی دافعه بین میکرو-نانو حباب‌ها کاهش یافته و به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شوند. این نزدیکی، منجر به تلفیق، بهم پیوستگی و درشت‌تر شدن ابعاد میکرو-نانو حباب‌ها می‌گردد. به علت اینکه شناوری ذرات به علت بزرگ‌تر بودن پتانسیل زتا از نیروی واندروالسی است و ویسکوزیته نیز تابعی از تابع نیروهای بین مولکولی می‌باشد، کاهش پتانسیل زتا با کاهش ویسکوزیته همراه است. مشخصات آب میکرو-نانو حباب در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲. مشخصات آب میکرو-نانو حباب

Table2. Specification of micro-nano bubble water

مشخصات	مقدار
D _{۵۰} (غلظت اکسیژن حل شده)	3/01 ppm
متوسط ابعاد میکرو-نانو حباب	521/51 nm
پتانسیل زتا	(-10 -30) mV
ویسکوزیته	0/908 -0 /921 MPa.s

۲-۱-۳- نسبت‌های مخلوط و شرایط عمل‌آوری

نسبت اختلاط نمونه‌های بتنی در جدول ۴ نشان داده شده است. برای ساخت و عمل‌آوری در شرایط استاندارد نمونه‌های بتنی از استاندارد ASTM C192 [23] استفاده شد. در این تحقیق جهت بررسی خواص مکانیکی و دوام بتن دارای ژئولیت و میکرو-نانوحباب در شرایط کلرایدی و مقایسه آن با شرایط استاندارد از دو سیستم عمل‌آوری استفاده گردیده است؛ در سیستم اول نمونه‌ها در شرایط کلرایدی مورد عمل‌آوری قرار گرفتند. یعنی پس از یک روز از قالب خارج شده و به مدت دو روز تحت شرایط عمل‌آوری استاندارد یعنی در محلول آب آهک اشباع قرار گرفته و پس از آن در محلول آب آهک اشباع که به آن به مقدار ۵ درصد وزنی NaCl اضافه گردیده است، عمل‌آوری شدند. در این سیستم به صورت هفتگی محلول کلرایدی مجدداً ساخته شد. در سیستم دوم نمونه‌ها بر اساس روش استاندارد عمل‌آوری شدند، بدین صورت که پس از یک روز از قالب خارج شده و سپس در محلول آب آهک اشباع $Ca(OH)_2$ قرار داده شدند. برای بررسی و تأثیر درصدهای مختلف افزودنی ژئولیت و میکرو-نانوحباب از دو گروه نسبت مخلوط بتنی استفاده شده است. در گروه یک مقادیر ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی سیمان، پوزولان ژئولیت و ۵۰ و ۱۰۰ درصد آب مخلوط بتن، میکرو-نانوحباب به ترتیب جایگزین سیمان و آب مخلوط بتن گردیدند. در گروه دو از ترکیب ۱۰ و ۱۵ درصد پوزولان ژئولیت به همراه ۵۰ و ۱۰۰ درصد آب میکرو-نانوحباب به عنوان جایگزین سیمان و آب مخلوط، در نمونه‌های بتنی استفاده شده است. در تمامی نمونه‌ها مقدار ماسه برابر با ۸۱۲ کیلوگرم بر مترمکعب، مقدار شن بادامی مترمکعب و نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۴۵ در نظر گرفته شده است. جهت به حداقل رساندن خطا در اندازه‌گیری، در همه‌ی آزمایش‌ها از میانگین سه آزمون به عنوان نتیجه نهایی استفاده شده است. از این پس جهت معرفی نمونه‌های عمل‌آوری شده در شرایط کلرایدی از پسوند CI بعد از نام نمونه‌ها استفاده می‌شود.

جدول ۴. نسبت مخلوط نمونه‌ها

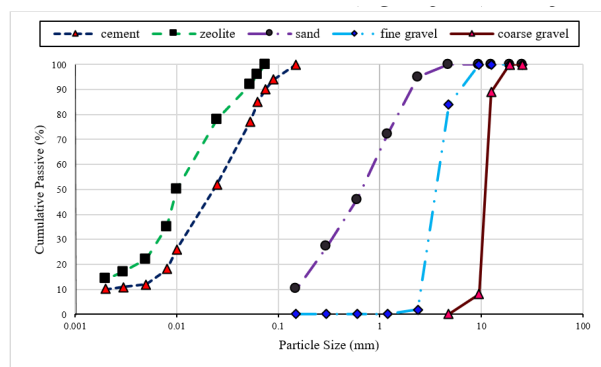
Table 4. Mixture proportions of samples

نام مخلوط	سیمان (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	شن نخودی (kg/m ³)	شن بادامی (kg/m ³)	ژئولیت		میکرو-نانوحباب		روان کننده (kg/m ³)
					٪ (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	٪ (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	
M	380	812	557	456	-	-	-	-	0.4
Z10	342	812	557	456	10	38	-	-	1.7
Z15	323	812	557	456	15	57	-	-	2.1
NB50	380	812	557	456	-	-	85	85	4
NB100	380	812	557	456	-	-	-	-	4.8
Z10NB50	342	812	557	456	10	38	85	85	5.5
Z10NB100	342	812	557	456	10	38	-	-	6.3
Z15NB50	323	812	557	456	15	57	85	85	5.9
Z15NB100	323	812	557	456	15	57	-	-	6.7

انتخاب گردد. نمای بتن در این محدوده کاملاً مطلوب است و بافت نسبتاً ریزتری خواهد داشت؛ بنابراین در این تحقیق از n برابر با ۰/۵۵ برای بزرگ‌ترین بعد سنگدانه ۱۹ میلی‌متر استفاده گردیده است. بر این اساس نمودار دانه‌بندی شن نخودی، شن بادامی، ماسه و مخلوط شن و ماسه به نسبت ۵۵ به ۴۵ درصد در شکل ۴ به نمایش درآمده است. همچنین در این شکل دانه‌بندی ژئولیت طبیعی و سیمان نیز قابل مشاهده است.

$$P = \left(\frac{d}{D}\right)^n * 100 \quad (2)$$

در رابطه ۱: P درصد گذشته تجمعی از الک d (به صورت درصد حجمی)؛ D حداکثر اندازه سنگدانه و n توانی است که برای شرایط مختلف بتن مانند بتن خود تراکم و یا بتن با روانی کم متفاوت است.



شکل ۴: نمودار دانه‌بندی مصالح سنگی
Fig4. Particle size distribution of Stone materials

۲-۱-۲- فوق روان کننده

جهت افزایش خاصیت روانی بتن از فوق روان‌ساز بر پایه پلی‌کربوکسیلات اتر با مشخصات مندرج در جدول ۳ استفاده شده است.

جدول ۳. ویژگی‌های فوق روان کننده

Table 3. The superplasticizer properties

مشخصات	موارد
کمتر از 0/1 درصد	مقدار یون کلراید
مایع غلیظ قهوه‌ای رنگ	شکل ظاهری
1/0-6/5 درصد مواد سیمانی	میزان مصرف
محصول پلی‌کربوکسیلات اتر	ساختار
108 gr/cm ³	چگالی در 20 °C

۲-۲- روش آزمایش‌ها

در این تحقیق جهت بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های بتنی، آزمایش‌های مقاومت فشاری بر اساس استاندارد (ASTM C39, 2004) [24] و جهت بررسی خواص دوام نمونه‌های بتنی، آزمون جذب آب ۳۰ دقیقه و ۲۴ ساعته بر اساس استاندارد BS 1881, (1983) [25]، بر روی نمونه‌های ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر مکعبی انجام شده است. جهت بررسی آزمایش جذب حجمی آب از رابطه ۳ بر اساس اختلاف وزن نمونه‌ی بتنی در دو حالت مرطوب و خشک استفاده گردیده است.

$$A = \frac{M1 - M0}{M0} \times 100 \quad (3)$$

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 می‌دهد.

آزمون نفوذ تسریع شده یون کلراید مبتنی بر استاندارد ASTM C 1202, (2007) [26]، بر روی نمونه‌های استوانه‌ای ۵۰×۱۰۰ میلی‌مترمربع و آزمایش مقاومت الکتریکی طبق استاندارد FM 5-578, (2004) [27]، بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد ۲۰۰×۱۰۰ میلی‌مترمربع به روش چهار نقطه‌ای دستگاه Wenner در سن ۲۸ و ۹۰ روز انجام گرفته است. نتایج آزمون مقاومت الکتریکی برای نمونه‌های بتنی که از رابطه ۴ محاسبه می‌گردد.

$$R = \frac{2\pi av}{i} \quad (4)$$

در رابطه (۱) R بیانگر مقاومت الکتریکی بر حسب (K.Ω.cm)، فاصله ۲ الکتروود بر حسب (cm)، v اختلاف پتانسیل الکتریکی اعمال شده بر حسب (V) و i شدت جریان بر حسب (A) است.

۲-۲-۱- آزمایش پراش اشعه ایکس XRD

آنالیز XRD توسط دستگاه DRON-۸ با اختلاف پتانسیل الکتریکی ۴۰ کیلوولت و اندازه گام ۰/۰۲ درجه و موقعیت شروع ۵ درجه و پایان ۱۰۰ درجه بر روی نمونه شاهد در شرایط عمل‌آوری کلرایدی و استاندارد و نمونه‌های دارای افزودنی در شرایط کلرایدی در سن ۲۸ و ۹۰ روز انجام گرفته است.

۲-۲-۲- آزمایش میکروسکوپ الکترونی SEM

آزمایش SEM توسط دستگاه VEGAII TESCAN، با اختلاف پتانسیل الکتریکی شتاب‌دهنده ۳۰ کیلوولت مطابق با استاندارد ASTM C 1723 (2010) [۲۸]، بر روی نمونه‌های بتنی صورت گرفته است.

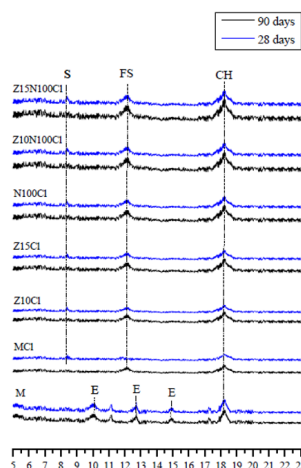
۳- نتایج و تفسیر

۳-۱- پراش اشعه ایکس XRD

نتایج آزمایش XRD برای نمونه شاهد در شرایط عمل‌آوری استاندارد و کلرایدی و سایر نمونه‌ها در شرایط عمل‌آوری کلرایدی در سن ۲۸ و ۹۰ روزه در شکل ۵ قابل ملاحظه است. محصولات خمیر هیدراتاسیون در نمونه شاهد که در شرایط استاندارد عمل-آوری شده است عموماً شامل اترینگایت^۱ و CH است. مقدار این ترکیبات با افزایش سن بتن در مدت ۹۰ روز در شرایط عمل‌آوری استاندارد افزایش می‌یابد. در نمونه‌های عمل‌آوری شده در شرایط کلرایدی محصولات عمده خمیر سیمان شامل نمک فریدل^۲ و CH است. نتایج نشان می‌دهد افزودن ژئولیت به بتن در شرایط عمل‌آوری کلرایدی سبب ایجاد نمک فریدل $(Ca_2Al(OH)_6Cl \cdot 2H_2O)$ بیشتری در بتن می‌گردد اما با گذشت زمان در سن ۹۰ روز تشکیل استراتلینگیت^۳ (C_2ASH_8) باعث تجزیه نمک فریدل شده است.

تشکیل نمک فریدل به دو دلیل مهم می‌باشد؛ اول اینکه پایدارتر از هیدروکسید آلومینات است و دوم به آن علت که از طریق تبادل آنیونی از پراکندگی یون کلراید در بتن جلوگیری می‌کند [۲۹].

بیشترین مقدار نمک فریدل در نمونه حاوی ۱۰ درصد ژئولیت، ۱۵ درصد ژئولیت و ۱۰۰ درصد میکرو-نانوحباب از نمونه شاهد بیشتر است؛ بنابراین نمک فریدل بیشتری در این نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد در شرایط عمل‌آوری کلرایدی شکل گرفته است. بیشترین مقدار ترکیبات نمک فریدل و CH در نمونه حاوی ۱۵ درصد متاکاؤلین و ۱۰۰ درصد میکرو-نانوحباب مشاهده شده است.

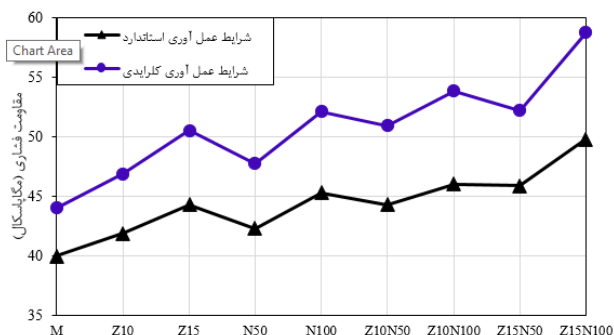


شکل ۵. نمودار پراش اشعه ایکس XRD
Fig5. X-ray Powder Diffraction analysis The

- 1 Ettringite
- 2 Friedel's salt
- 3 Stratlingite

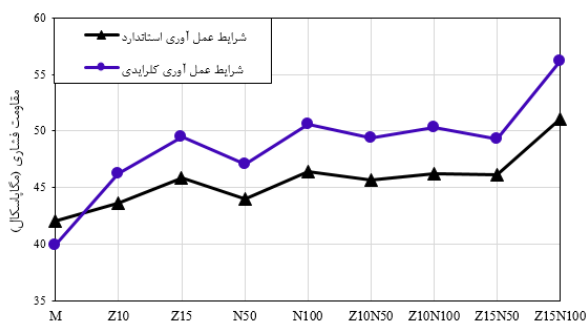
۳-۲- مقاومت فشاری

مقدار ۵ درصد مشاهده شده است. همان طور که نتایج آزمایش XRD نیز نشان می‌دهد از مقدار نمک فریدل با افزایش سن بتن در نمونه شاهد عمل‌آوری شده در شرایط کلرایدی کاسته می‌شود که این امر مسبب کاهش مقاومت در سنین بالا در این نمونه شده است.



شکل ۶. نمودار مقاومت فشاری نمونه‌ها در شرایط عمل‌آوری استاندارد و کلرایدی در سن ۲۸ روز

Fig6. The compressive strength under Standard and chloride curing condition at the age of 28 days



شکل ۷. نمودار مقاومت فشاری نمونه‌ها در شرایط عمل‌آوری استاندارد و کلرایدی در سن ۹۰ روز

Fig7. The compressive strength under Standard and chloride curing condition at the age of 90 days

۳-۳- جذب آب حجمی ۳۰ دقیقه و ۲۴ ساعته

جذب آب نمونه‌ها در شرایط کلرایدی در نمونه‌های دارای ژئولیت نسبت به نمونه‌های مشابه عمل‌آوری شده در شرایط استاندارد کمتر است. کمترین جذب آب در نمونه‌های حاوی ژئولیت، مربوط به نمونه‌ی Z15Cl به مقدار 1/69 درصد برای جذب آب 30 دقیقه 28 روزه می‌باشد که این به علت کاسته شدن تخلخل و حفرات مؤئینه در این نمونه‌های بتنی است. نتیجه تحقیق ولی پور و همکاران در مورد ژئولیت تأییدکننده نتایج بدست آمده در این تحقیق می‌باشد. در نمونه حاوی میکرو-نانوحباب کاهش جذب آب نسبت به نمونه شاهد هم در شرایط کلرایدی و هم در شرایط استاندارد مشاهده شده است [31]. همچنین نمونه‌های عمل‌آوری شده در شرایط کلرایدی نسبت به نمونه‌های مشابه در شرایط استاندارد آب کمتری جذب

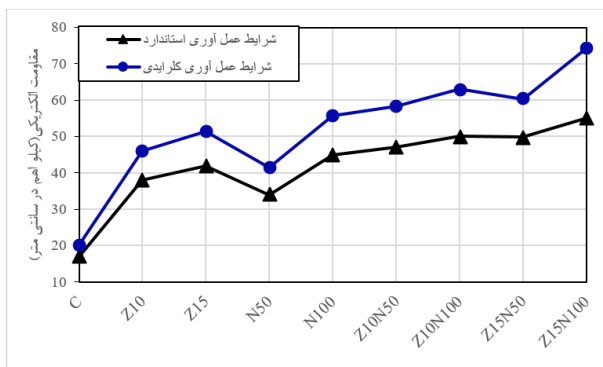
نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در شکل ۶ و ۷ نشان داده شده است. نمونه‌های دارای پوزولان ژئولیت در سن ۲۸ و ۹۰ روز در محیط عمل‌آوری با آب آهک اشباع نسبت به نمونه شاهد افزایش مقاومت فشاری داشته است. با افزودن درصد پوزولان از ۱۰ به ۱۵ به مقدار بهبود مقاومت افزوده می‌شود. این امر را می‌توان به فعالیت پوزولانی و بهبود فرایند هیدراسیون در نمونه‌های دارای ژئولیت ارتباط داد. نتایج تحقیق احمدی و همکاران تأییدکننده نتایج بدست آمده در این آزمایش است [۳۰]. نمونه‌های حاوی ژئولیت در شرایط عمل‌آوری کلرایدی نسبت به نمونه‌های مشابه در شرایط عمل‌آوری استاندارد دارای مقاومت فشاری بیشتری است. با افزایش سن نمونه‌ها از این مقدار بهبود کاسته می‌شود. در نمونه‌های دارای میکرو-نانوحباب در شرایط استاندارد نسبت به نمونه شاهد ۵/۶۵ و ۱۳/۲ درصد به ترتیب برای نمونه حاوی ۵۰ و ۱۰۰ درصد میکرو-نانوحباب، افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه مشاهده شده است. دلیل این امر ایجاد خاصیت شناوری ذرات سیمان توسط حباب‌های با اندازه نانو در میکرو-نانوحباب می‌باشد که سبب ایجاد مخلوط همگن در نمونه‌های بتنی می‌گردد. تحقیق عارفی و همکاران نتیجه مشابه با این تحقیق را نشان می‌دهد [۱۷].

مقدار بهبود مقاومت فشاری در نمونه‌های N50Cl و N100Cl نسبت به نمونه‌های N50 و N100 به ترتیب به مقدار ۱۳ و ۱۵ درصد در سن ۲۸ روز بوده است. مقدار افزایش مقاومت در شرایط عمل‌آوری کلرایدی با افزایش سن بتن کاهش می‌یابد. نمونه‌های ترکیبی دارای ژئولیت و میکرو-نانوحباب دارای بیشترین مقاومت فشاری در بین کلیه نمونه‌های بتنی در شرایط عمل‌آوری استاندارد می‌باشند. تأثیر توأمان ژئولیت و میکرو-نانوحباب در ایجاد ژل سیمانی متراکم، باعث بدست آمدن این نتیجه می‌گردد. مقدار مقاومت فشاری این نمونه‌ها در شرایط عمل‌آوری کلرایدی نسبت به شرایط عمل‌آوری استاندارد بیشتر می‌باشد. به نحوی که نمونه‌های N10Z50Cl و N10Z50Cl نسبت به نمونه‌های N10Z50 و N10Z100 به ترتیب ۱۵ و ۱۷ درصد پیشرفت داشته‌اند. این مقدار پیشرفت برای دو نمونه N15Z50Cl و N15Z100Cl نسبت به نمونه‌های مشابه در شرایط استاندارد N15Z50 و N15Z100 به ترتیب به مقدار ۱۳/۸۱ و ۱۸ درصد در سن ۲۸ روز می‌رسد. افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های دارای افزودنی در شرایط کلرایدی را می‌توان به تشکیل نمک فریدل در این نمونه‌ها ارتباط داد. همان طور که با افزایش سن نمونه‌ها نمک فریدل تشکیل شده تجزیه می‌شود از مقاومت فشاری نمونه‌ها در شرایط کلرایدی نیز کاسته می‌شود. بتن شاهد در شرایط کلرایدی در سن ۲۸ روز به مقدار ۱۰ درصد افزایش مقاومت داشته است؛ اما برخلاف نمونه‌های دارای افزودنی در سن ۹۰ روز، کاهش مقاومت نسبت به شرایط عمل‌آوری استاندارد به

۴-۳- مقاومت الکتریکی

نتایج آزمون مقاومت الکتریکی در شکل ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. مقاومت الکتریکی نمونه‌های دارای ژئولیت و میکرو-نانوحباب و همچنین نمونه‌های شامل ترکیب ژئولیت و میکرو-نانوحباب بیشتر از نمونه شاهد در شرایط عمل‌آوری استاندارد است. این امر بیانگر آن است که نمونه ژئولیتی باعث مصرف هیدروکسید کلسیم در بتن شده و فضای متخلخل کمتری در بتن ایجاد می‌کند و نمونه دارای میکرو-نانوحباب باعث همگنی بیشتر نمونه‌های بتنی و ناحیه انتقال متراکم می‌گردند که سبب بهبود خواص بتن از نظر نفوذپذیری می‌گردند. فنگ و همکاران در تحقیق خود در ارتباط با ژئولیت به افزایش مقاومت الکتریکی اشاره کرده‌اند [۳۲].

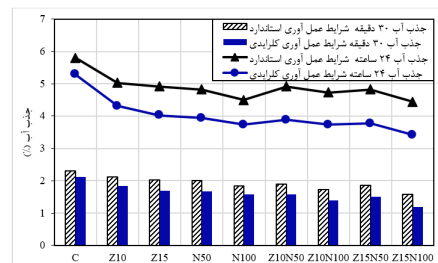
در نمونه‌های عمل‌آوری شده در شرایط کلرایدی، مقاومت الکتریکی پیشرفت بیشتری نسبت به نمونه‌های مشابه در شرایط استاندارد داشته است. بیشترین مقاومت الکتریکی در نمونه‌های کلرایدی مربوط به نمونه N15Z100Cl است که نسبت به نمونه مشابه (N15Z100)، ۳۵ درصد و نسبت به بتن شاهد در شرایط استاندارد (M)، ۲۵۴ درصد و در شرایط کلرایدی (MCl)، ۲۳۴ درصد بهبود داشته است. نمونه شاهد در سن ۲۸ روز در شرایط کلرایدی نسبت به نمونه مشابه در شرایط استاندارد مقاومت الکتریکی بیشتری داشته است اما در سن ۹۰ روز این روند معکوس شده و به مقدار ۴ درصد کاهش مقاومت الکتریکی نسبت به نمونه M مشاهده می‌گردد. نمک فریدل باعث افزایش قابلیت اتصال کلرید به CSH می‌شود بنابراین از طریق کاهش تخلخل باعث افزایش مقاومت الکتریکی در نمونه در سن ۲۸ روز می‌گردد و در سن ۹۰ روز با تجزیه شدن نمک فریدل از مقدار مقاومت الکتریکی کاسته می‌شود [۶].



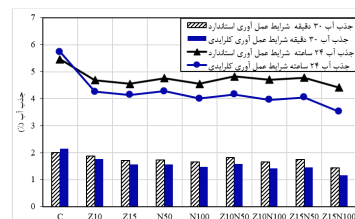
شکل ۱۰. نمودار مقاومت الکتریکی نمونه‌ها در شرایط عمل‌آوری استاندارد و کلرایدی در سن ۲۸ روز
Fig10. The electrical resistance values under Standard and chloride curing condition at the age of 28 days

کرده‌اند. کمترین جذب آب در این نمونه‌ها مربوط به نمونه N100Cl به مقدار 58/1 درصد است. با افزایش درصد افزودنی در پوزولان ژئولیت و آب میکرو-نانوحباب با توجه به اثر پرکنندگی و کاهش نفوذپذیری بر مقدار بهبود جذب آب افزوده شده است.

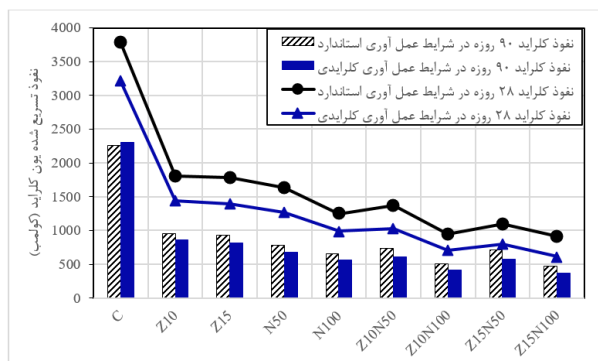
بیشترین بهبود در آزمایش جذب آب، در نمونه‌های ترکیبی شامل ژئولیت و میکرو-نانوحباب مشاهده می‌گردد. این مقدار برای نمونه‌های N15Z100، N10Z100، N10Z50، N15Z50 عمل‌آوری شده‌اند، به ترتیب برابر با ۱/۷۲، ۱/۸۶، ۱/۵۷ درصد، در مورد جذب آب ۳ دقیقه در سن ۲۸ روز است. برای نمونه‌های مشابه در شرایط عمل‌آوری کلرایدی این مقادیر به مقدار ۱/۵۷، ۱/۳۹، ۱/۵۰ و ۱/۱۸ درصد به ترتیب برای نمونه‌های N15Z50Cl، N10Z100Cl، N15Z50Cl و N15Z100Cl کاهش می‌یابد. در کلیه نمونه‌ها به جز نمونه شاهد با افزایش سن بتن مقدار جذب آب کاهش می‌یابد. در نمونه شاهد با افزایش سن بتن در شرایط کلرایدی تا ۹۰ روز بتن در شرایط عمل‌آوری کلرایدی آب بیشتری جذب می‌کند. این در حالی است که این نمونه در ۲۸ روز نسبت به نمونه مشابه در شرایط استاندارد آب کمتری جذب کرده است. نتایج جذب آب ۳ دقیقه و ۲۴ ساعته مطابق با هم بوده و نتیجه این آزمایش‌ها در شکل ۸ و ۹ به نمایش درآمده است. تشکیل نمک فریدل به علت استفاده از ژئولیت، سبب بهبود تخلخل در نمونه‌های حاوی افزودنی در محیط عمل‌آوری کلرایدی نسبت به نمونه‌های عمل‌آوری شده در شرایط استاندارد می‌گردد [۶].



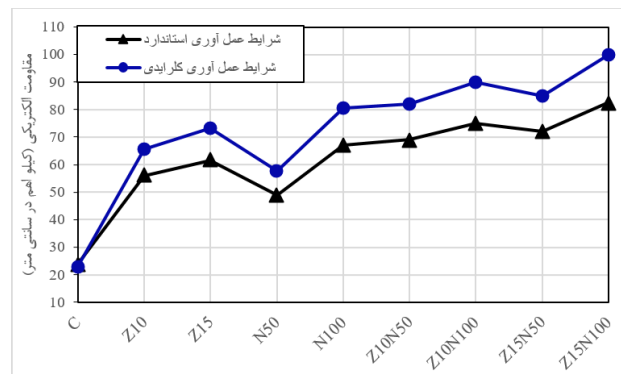
شکل ۸. نمودار جذب آب نمونه‌ها در شرایط عمل‌آوری استاندارد و کلرایدی در سن ۲۸ روز
Fig8. The water adsorption under Standard and chloride curing condition at the age of 28 days



شکل ۹. نمودار جذب آب نمونه‌ها در شرایط عمل‌آوری استاندارد و کلرایدی در سن ۹۰ روز
Fig9. The water adsorption under Standard and chloride curing condition at the age of 90 days



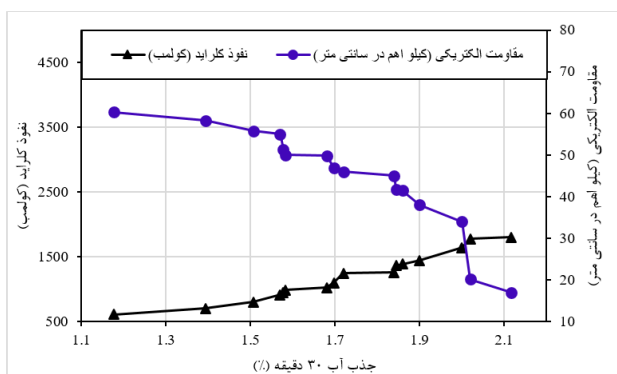
شکل ۱۲. نمودار نفوذ تسریع شده یون کلراید نمونه‌ها در شرایط عمل آوری استاندارد و کلرایدی
 Fig12. The test results of rapid chloride permeability under Standard and chloride curing condition



شکل ۱۱. نمودار مقاومت الکتریکی نمونه‌ها در شرایط عمل آوری استاندارد و کلرایدی در سن ۹۰ روز
 Fig11. The electrical resistance values under Standard and chloride curing condition at the age of 90 days

۳-۶- مقایسه نتایج آزمون جذب آب بانفوذ تسریع شده یون کلراید و مقاومت الکتریکی

در شکل ۱۳ نتایج آزمون‌های جذب آب بانفوذ کلراید و مقاومت الکتریکی نمونه‌ها در شرایط عمل آوری استاندارد مقایسه شده است. همان طور که از شکل مشخص است با کاهش جذب آب نفوذ یون کلراید به داخل بتن کاهش و مقدار مقاومت الکتریکی افزایش می‌یابد. از آنجایی که مقدار جذب آب و نفوذ کلراید و مقاومت الکتریکی بستگی به خاصیت نفوذپذیری و تخلخل نمونه‌های بتنی دارد و با توجه به ارتباط مستقیمی که بین آزمون جذب آب و نفوذ کلراید و ارتباط معکوسی که بین جذب آب مقاومت الکتریکی وجود دارد می‌توان به این نتیجه رسید که هر چه مقدار نفوذپذیری بتن کمتر باشد، مقدار جذب آب و نفوذ کلراید به داخل بتن کمتر و در مقابل مقدار مقاومت الکتریکی بتن بیشتر است.



شکل ۱۳. نمودار مقایسه نتایج آزمون جذب آب با نفوذ تسریع شده یون کلراید و مقاومت الکتریکی
 Fig13. The relation between water Absorption, chloride permeability and electrical resistance of the concrete mixtures

۳-۵- نفوذ تسریع شده یون کلراید

نتایج آزمون RCPT نمونه‌های عمل آوری شده در شرایط استاندارد و کلرایدی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. کل جریان عبوری از بتن به طور کلی با افزایش درصد افزودنی‌ها و افزایش سن نمونه‌ها کاهش یافته است. بیش‌ترین و کمترین جریان عبوری در شرایط استاندارد ۲۸ روزه مربوط به نمونه M و Z15N100 به ترتیب به مقدار ۳۷۸۶ و ۹۱۴ کولمب است. این نتیجه به سبب کاهش حجم منافذ و کاهش یون هیدروکسل در این نمونه‌ها اختصاص داد که به سبب وجود ژئولیت و میکرو-نانوحباب در بتن ایجاد می‌گردد. در تحقیق رضانیانپور و همکاران به بهبود خاصیت نفوذ کلراید در نمونه‌های دارای ژئولیت اشاره شده است [۱۵].

یون کلراید در نمونه‌های عمل آوری شده در شرایط کلراید نسبت به نمونه‌های عمل آوری شده در شرایط استاندارد به مقدار کمتری نفوذ کرده است. در نمونه‌ی شاهد در سن ۲۸ روز یون کلراید کمتری در نمونه MCl نسبت به نمونه M نفوذ کرده است اما در سن ۹۰ روز مقدار نفوذ یون کلراید در نمونه M نسبت به نمونه MCl به مقدار ۲ درصد کمتر است. کمترین مقدار نفوذ یون کلراید در نمونه‌های ترکیبی N10Z50Cl، N10Z100Cl، N15Z50Cl و N15Z100Cl به ترتیب به مقدار ۱۰۲۶، ۷۰۴/۵، ۸۰۴/۵ و ۶۱۲/۴ کولمب بوده است که نسبت به نمونه‌های مشابه N10Z50، ۲۵، ۲۸، ۲۶ و ۳۳ درصد پیشرفت در سن ۲۸ روز داشته‌اند. استفاده از ژئولیت و میکرو-نانوحباب در شرایط عمل آوری کلرایدی پایداری کلرایدی در بتن را افزایش می‌دهند. بهبود ریز ساختار بتن در این نمونه‌ها انتشار یون کلراید در این نمونه‌ها را کاهش می‌دهد.

مراجع

- [1] G. Hoff, DURABILITY OF OFFSHORE AND MARINE CONCRETE STRUCTURES. IN: DURABILITY OF CONCRETE. SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE. AUGUST 4-9, 1991, MONTREAL, CANADA. VOLUME I, in: DURABILITY OF CONCRETE. SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE., 1991.
- [2] W. McCoy, Mixing and curing water for concrete, in: Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials, ASTM International, 1966.
- [3] R. Dhir, M. Jones, Development of chloride-resisting concrete using fly ash, fuel, 78(2) (1999) 137-142.
- [4] P.C. Hewlett, G. Hunter and M. Jones, RBridging the gaps, Chem. Br, 35(1) (1999) 40-43. 1999.
- [5] G. Batis, P. Pantazopoulou, S. Tsvilis, E. Badogiannis, The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars, Cement and Concrete Composites, 27(1) (2005) 125-130.
- [6] T. Dyer, Concrete durability, Crc Press, 2014.
- [7] J. Bai, S. Wild, B. Sabir, Sorptivity and strength of air-cured and water-cured PC-PFA-MK concrete and the influence of binder composition on carbonation depth, Cement and Concrete Research, 32(11) (2002) 1813-1821.
- [8] H. Zibara, Binding of external chlorides by cement pastes, National Library of Canada= Bibliothèque nationale du Canada, 2001.
- [9] J. Bai, B. Sabir, S. Wild, J. Kinuthia, Strength development in concrete incorporating PFA and metakaolin, Magazine of concrete research, 52(3) (2000) 153-162.
- [10] Q. Li, H. Geng, Y. Huang, Z. Shui, Chloride resistance of concrete with metakaolin addition and seawater mixing: a comparative study, Construction and Building Materials, 101 (2015) 184-192.
- [11] H. Pradesh, Application Of Nanotechnology In Building Materials, International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), 2 (2012) 1077-1082.
- [12] H. Li, L. Hu, D. Song, A. Al-Tabbaa, Subsurface transport behavior of micro-nano bubbles and potential applications for groundwater remediation, International journal of environmental research and public health, 11(1) (2014) 473-486.
- [13] F. Maoming, T. Daniel, R. HONAKER, L. Zhenfu, Nano-bubble generation and its application in froth flotation (part I): nanobubble generation and its effects on properties of microbubble and millimeter scale bubble solutions, Mining Science and Technology (China), 20(1) (2010) 1-19.
- [14] A. Arefi, S.F. Saghraani, R. Mozaffari Naeni, Mechanical

۴- نتیجه گیری

بر پایه نتایج ارائه شده در این تحقیق موارد زیر به عنوان جمع بندی ارائه می شود:

۱. ژئولیت و میکرو-نانوحباب در شرایط استاندارد باعث بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن براساس آزمایش های صورت گرفته در این تحقیق شامل آزمایش XRD، مقاومت فشاری، الکتریکی، جذب آب و نفوذ کلراید می شوند. Z15N100 در بین نمونه های عمل آوری شده در شرایط استاندارد بیشترین بهبود را ایجاد می کند.

۲. درصد بهینه ژئولیت و میکرو-نانوحباب در این تحقیق به ترتیب برابر ۱۵ درصد جایگزینی بجای وزن سیمان و ۱۰۰ درصد جایگزینی به جای آب اختلاط بتن است.

۳. شکل گیری نمک فریدل به عنوان یک اتصال کلرایدی در تمامی نمونه ها در شرایط عمل آوری کلرایدی توسط آزمایش پراش اشعه ایکس مشاهده شده است.

۴. مقاومت فشاری در نمونه های حاوی میکرو-نانوحباب و ژئولیت عمل آوری شده در شرایط کلرایدی نسبت به شرایط استاندارد افزایش می یابد. این افزایش با افزودن درصد افزودنی بیشتر می گردد. هر دو عامل ژئولیت و میکرو-نانوحباب مقاومت فشاری و کششی را بهبود بخشیده و بیشترین تأثیر در ترکیب همزمان ژئولیت و میکرو-نانوحباب مشاهده می گردد. بیشترین مقاومت فشاری در این نمونه به ترتیب به مقدار ۵۹ مگا پاسکال برای نمونه Z15N100Cl بوده است.

۵. جذب آب و نفوذ کلراید نمونه های بتنی دارای ژئولیت و میکرو-نانوحباب در شرایط کلرایدی کمتر از نمونه های مشابه در شرایط استاندارد است. کمترین جذب آب در ۳۰ دقیقه و نفوذ کلراید برای نمونه Z15N100Cl به مقدار ۲ درصد و ۳۶۵ کولمب می باشد.

۶. مقاومت الکتریکی نمونه های عمل آوری شده در شرایط کلرایدی در محدوده ۱۹ تا ۳۵ درصد نسبت به نمونه های مشابه در شرایط استاندارد بهبود داشته است.

بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایش ها می توان دریافت که ژئولیت و میکرو-نانوحباب سبب بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن در محیط های تحت تأثیر یون کلراید نسبت به بتن شاهد در سن ۲۸ روز شده و اثر بلندمدت تا سن ۹۰ روز بهتری در بتن ایجاد می کنند.

تشکر و قدردانی

"نویسندگان بر خود لازم می دانند از آقای دکتر سید فضل الله ساغروانی مدیر عامل محترم شرکت میناب به دلیل تامین آب میکرو-نانوحباب جهت انجام این پژوهش تشکر و قدردانی نمایند."

tion on the chloride binding behaviour of MK–lime paste, *Thermochimica Acta*, 444(1) (2006) 16-25.

[17] U. Birmin-Yauri, F. Glasser, Friedel's salt, $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6(\text{Cl}, \text{OH}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: its solid solutions and their role in chloride binding, *Cement and Concrete Research*, 28(12) (1998) 1713-1723.

Behavior of Concrete, Made with Micro-Nano Air Bubbles, *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 49(1) (2016) 139-147.

[15] S. Kwan, Larosa, J. Si and Al MASNMR, Study Of Stratlingite, *American Ceramic Society*, 78 (2005) 1921-1926.

[16] N. Saikia, S. Kato, T. Kojima, Thermogravimetric investiga-

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. Khoshroo¹, A. Katebi¹, A. A. Shirzadi Javid², The evaluation of concrete properties including zeolite and micro-nano bubble water in the chloride curing condition, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(3)(2019)523-534.

DOI: 10.22060/ceej.2017.13603.5446



