Archive of SID

تحقیقات بتن
سال دوازدهم، شمارهٔ دوم
تابستان ۹۸
ص ۶۰ – ۴۹
تاریخ دریافت: ۹۶/۱۱/۱
تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۰/۱۰

بررسی خواص مکانیکی و دوام بتن حاوی مکمل سیمانی زئولیت و آب میکرونانو حباب

علی اکبر شیرزادی جاوید *
استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
معین خوشرو
دانشجو، دانشکده فنی و مهندسی ، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.
علی کاتبی
استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

چکیده
در این مقاله تاثیر استفاده از زئولیت طبیعی به عنوان جایگزین مواد سیمانی و آب میکرو_نانو حباب به عنوان جایگزین آب مخلوط بتن، بر خواص مکانیکی و دوام بتن مورد ارزیابی قرار گرفته است. پارامترهای ارزیابی شده برای بررسی خواص مکانیکی و دوام بتن اصلاح شده شامل: مقاومت فشاری، کششی، خمشی، الکتریکی و جذب آب می‌باشد. نتایج حاکی از آن است که بیشترین تأثیر استفاده از زئولیت و میکرو_نانوحباب در بتن مربوط به نمونه‌های دو فازی حاصل از ترکیب ۱۰ درصد زئولیت و ۱۰۰ درصد میکرو_نانو حباب می‌باشد که سبب افزایش مقاومت فشاری، کششی، خمشی و الکتریکی به میزان ۱۵، ١٤ ، ٦ و ١٩٤ درصد گشته و جذب آب را به میزان ۲۵ درصد کاهش می دهد. به طور کلی با توجه به نتایج می‌توان گفت زئولیت و آب میکرو_نانوحباب سبب بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن می‌گردند و ترکیب آنها بیشترین تأثیر مثبت را در تقویت بتن اصلاح شده ایجاد می‌کند.

واژه‌های کلیدی: **زئولیت، آب میکرو_نانوحباب، خواص مکانیکی، خواص دوام، بتن.**

* نویسنده مسئول: shirzad@iust.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

امروز بتن به جهت در دسترس بودن مواد اولیه آن و قیمت مناسب، همچنین خصوصیات مکانیکی و دوام خوب از جمله مصالح پرمصرف به شمار می‌رود[۱]. همواره تولید سیمان که یکی از اجزای تشکیل دهنده بتن می‌باشد با تولید گاز CO_2 همراه است که از موارد بروز مشکلات زیست محیطی به شمار می‌رود [۲]. استفاده از مواد پوزولانی بعنوان جایگزینی بخشی از سیمان مصرفی در بتن یکی از راه حل‌های کاهش گاز CO_2 و اثرات زیست محیطی آن به سبب تولید سیمان کمتر می‌باشد. محققین پیش بینی می‌کنند بزرگترین بازار آینده در زمینه صنعت سیمان، به زئولیت به دلیل جایگزینی بخشی یا تمام سیمان موجود در بتن اختصاص خواهد داشت [۳]. تحقیقات فراوانی بیانگر خاصیت پوزولانی قابل توجه زئولیت می‌باشد [۴].

ترکیب شیمیایی و کانی شناسی از جمله موارد موثر در فعالیت پوزولانی زئولیتها است. خواص پوزولانی زئولیت (کلینوپتیلولیت) به علت وجود AL_2O_3 و Sio_2 در ترکیب شیمیایی آن می‌باشد. این ترکیبات با کلسیم هیدروکسید $Ca(OH)_2$ که در طول هیدراسیون سیمان ایجاد می گردد واکنش داده و آن را تبدیل به ژل C-S-H آلومینو سیلیکات های هیدراته می‌کند در نتیجه ریز ساختار بتن سخت شده را بهبود می بخشد و بتن نفوذناپذیر می گردد[۵]. بتن حاوی زئولیت در مقایسه با بتن معمولی، بعلت 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 [۶].

نجیمی و همکاران [۱] در طی تحقیقات خود به این موضوع اشاره نمودند که زئولیت گرمای هیدراسیون بتن را کاهش داده و به دنبال آن باعث کمتر شدن ترک های حرارتی و افزایش خواص دوام از جمله نفوذ یون کلراید، نفوذ آب، میزان خوردگی و انقباض خشک می‌شود . نظر جمعی در مورد تاثیر زئولیت در افزایش مقاومت در سنین اولیه وجود ندارد، در حالیکه افزایش مقاومت نسبت به بتن معمولی در سنین بالاتر گزارش شده است [۶]. رمضانیانپور و همکاران [۷] 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 تاخیر انداخته و پس از آن بتن هایی که دارای ۱۰ درصدزئولیت طبیعی بودند تقریبا مقاومت فشاری مشابهی با بتن های مرجع به دست آوردند. نجیمی و همکاران[۱] 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 خشک شدگی نسبت به مخلوط شاهد به میزان ۸۴ و ۶۴ درصد کاهش یافته است.

از جمله مواد جدیدی که توانسته‌اند خواص مکانیکی و فیزیکی بتن را ارتقا دهند، نانو مواد می‌باشند . یکی از نانو ذرات تولید شده که مطالعات کمی روی آن صورت پذیرفته آب میکرو_نانوحباب می‌باشد. مشخصات آب میکرو نانو حباب از جمله افزایش pH[1] ، اکسیژن محلول[2] (Do) و کدورت توسط مظفری نائینی در سال ۲۰۱۴ مورد بررسی قرار گرفته است [۸].

عارفی و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۶ آزمایش های مختلفی بر روی بتن ساخته شده با آب نانو حباب انجام داده‌اند که نتایج بیانگر آن است که استفاده از آب حاوی میکرو_نانو حباب باعث کاهش روانی و اسلامپ، زمان گیرش اولیه و نهایی بتن ودمای اولیه بتن می‌گردد . آنها همچنین گزارش کرده اند که پارامتر های خواص مکانیکی بتن از جمله مقاومت فشاری و کششی، بتن حاوی آب میکرو_نانوحباب به میزان ۱۹ و ۱۶ درصد افزایش می‌یابد. نتایج حاکی از آن است که آب میکرو_نانو حباب رفتاری کاملاً مشابه با دیگر ذرات نانو از جمله $Nano-Al_2O_3$ ، $Nano-sio_2$ $Nano-FeO_2$ دارد و هیچ شباهتی به افزودنی های هوازا ندارد [۹].

تا به امروزمحققان زیادی در جهت بهبود کیفیت خواص بتن تلاش کرده‌اند. با این حال استفاده از مکمل‌های سیمانی و همچنین مصالح جدید در بتن همیشه مورد توجه قرار داشته است . در این تحقیق سعی بر آن است که نخست خواص بررسی نشده آب میکرو_نانوحباب در بتن از جمله: آزمایش جذب آب و مقاومت الکتریکی بررسی گردد و سپس برای اولین بار خواص مکانیکی و دوام مشترک و تاثیر همزمان استفاده از پوزولان طبیعی زئولیت و آب میکرو_نانو حباب مورد ارزیابی قرار گیرد.

[1] Potential Of Hydrogen
[2] Dissolve oxygen

www.SID.ir

Archive of SID

۲- مواد و روش‌ها

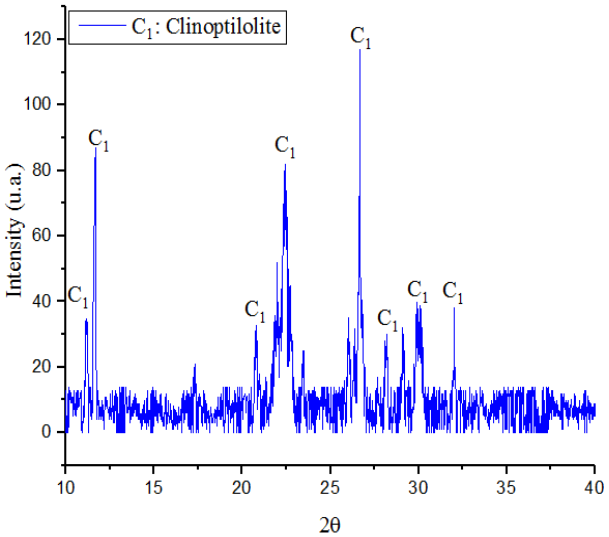
۲-۱- مصالح مصرفی

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 ASTM C150 [۱۰] و ASTM C618 [۱۱] بوده است که در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی سیمان و زئولیت

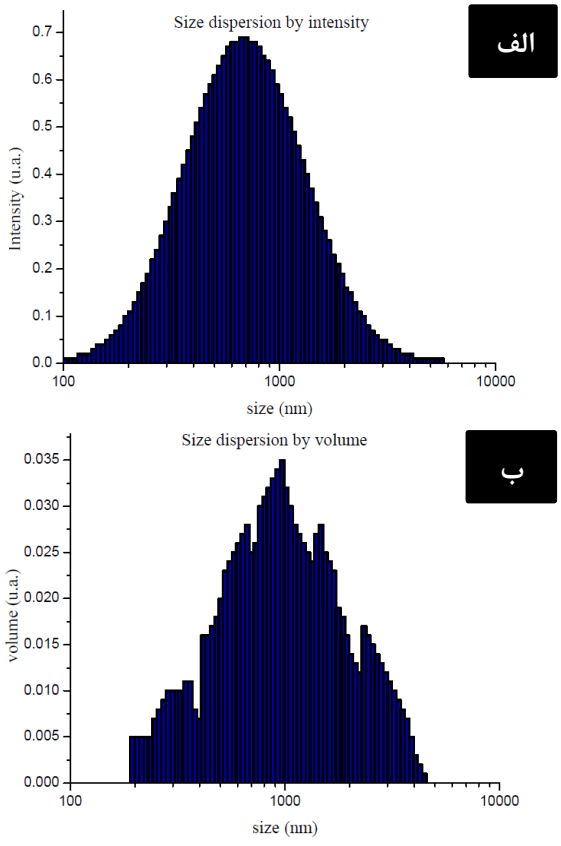
درصد ترکیب شیمیایی(٪)	سیمان	زئولیت طبیعی
سیلیسیم(SiO_2)	۲۲,۳	۶۹,۲۸
اکسید کلسیم(CaO)	۶۲,۴۰	۳,۵۶
اکسید آهن(Fe_2O_3)	۳,۷۰	۰,۴۹
آلومینیوم(Al_2O_3)	۴,۵۰	۱۰,۴۳
اکسید منیزیم(MgO)	۲,۳۰	۰,۵
اکسید سدیم (Na_2O)	۰,۲۷	۰,۷۳
اکسید پتاسیم(K_2O)	۰,۷۶	۱,۲۷
اکسید سولفور (SO_3)	۲,۲۵	۰,۰۰۵

در شکل ۱ نمودار XRD[1] مربوط به زئولیت را نشان داده است. آب استفاده شده برای اختلاط نمونه های بتنی مطابق استاندارد EN 1008:2002 [۱۲] از نوع آب آشامیدنی سالم و فاقد هرگونه مواد مضر برای بتن بوده است.



شکل ۱- نمودار XRD زئولیت

آب میکرو_نانوحباب مورد استفاده در این تحقیق توسط دستگاه تولید میکرو_نانوحباب که بر مبنای روش برش و استفاده از لوله ونتوری و فرآیند کاویتاسیون هیدرولیکی کار می‌کند و حباب‌هایی با ابعاد تقریبا یکسان ایجاد می کند تهیه گردیده است. از دیگر ویژگی های آب نانو حباب تولید شده پتانسیل زتا می‌باشد که در محدوده بین (Mv) ۳۰-و۱۰- قرار گرفته است. نمودار پایداری ابعاد آب میکرو_نانوحباب در طول زمان در شکل ۲ نشان داده شده است. جهت افزایش خاصیت روانی بتن از فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلیک محصول شرکت ب.آ.اس.اف ایرانیان با نام تجاری Gelenium p110و با چگالی در ۲۰ درجه سانتی گراد ۱,۰۸ گرم بر سانتی مترمکعب، مقدار pH برابر ۷ و درصد بهینه استفاده ۰,۵ تا ۱,۶درصد وزنی مواد سیمانی استفاده شده است. سنگدانه مصرفی بر اساس استاندارد ASTM C33 [۱۳] دارای حداکثر اندازه ۱۹ میلی متر و با وزن مخصوص ۲,۶۸ و ۲,۶۲ کیلوگرم بر سانتی متر مربع برای شن و ماسه بوده است. همچنین میزان جذب آب (SSD) شن و ماسه به ترتیب به مقدار ۱/۹ و ۲/۳ درصد می‌باشد.



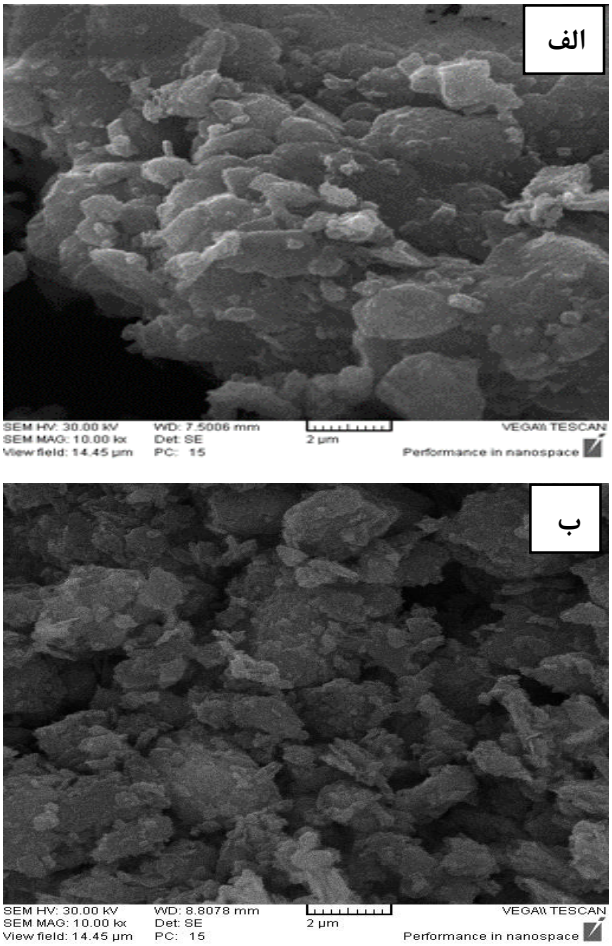
شکل ۲- منحنی توزیع ابعادی میکرو-نانوجباب بر اساس الف- حجم و ب- شدت

[1] X-ray diffraction

www.SID.ir

Archive of SID

نتیجه آزمایش تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی (SEM) روی زئولیت و سیمان در شکل ۳ قابل ملاحظه می باشد. شکل ۳- ب بیانگر شکل ظاهری کریستال های زئولیت، سطح مخصوص بالا و اندازه ذرات مختلف آن می‌باشد.



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی(الف-سیمان و ب- زئولیت)

در این تحقیق جهت بررسی خواص مکانیکی و دوام بتن دارای زئولیت از نسبت های ۱۰ و ۲۰ جایگزینی به جای سیمان و نیز برای بررسی اثر استفاده از آب میکرو_نانوحباب از نسبت های ۳۰، ۶۰ و ۱۰۰ درصد جایگزین کردن بجای آب مخلوط بتن، همچنین جهت ارزیابی تاثیر همزمان زئولیت و آب میکرو_نانوحباب از نسبت ۱۰ درصد زئولیت بهمراه ۳۰، ۶۰ و ۱۰۰ آب میکرو_نانوحباب استفاده گردیده است.

نسبت مخلوط نمونه ها در جدول ۲ نشان داده شده است. پس از ساخت و عمل آوری ۹ نسبت اختلاط بتنی مطابق استاندارد ASTM C192 [۱۴] آزمایش های مقاومت فشاری، کششی، خمشی، الکتریکی، جذب آب بر روی نمونه ها انجام گردید. به سبب افزایش دقت در ارزیابی در تمام آزمایش ها میانگین سه آزمونه به عنوان نتیجه نهایی ثبت گردیده است.

۲-۲- روش آزمایش ها

۲-۲-۱- آزمایش مقاومت فشاری، کششی غیر مستقیم و خمشی

آزمایش مقاومت فشاری طبق استاندارد ASTM C39 [۱۵] بر روی نمونه های مکعبی ۱۰*۱۰ سانتی متر انجام و سپس به نمونه های استوانه ای ۳۰*۱۵ سانتی متر تبدیل شده است. آزمایش مقاومت کششی به روش غیر مستقیم بر اساس مقاومت کششی برزیلی و استاندارد ASTM C496[۱۶] و آزمایش مقاومت خمشی مطابق با استاندارد

جدول۲- نسبت مخلوط نمونه ها

طرح	w/c	سیمان (kg)	زئولیت (kg)	آب (lit)	میکرونانو حباب (lit)	روان کننده (٪)	ریزدانه (kg)	شن نخودی (kg)	شن بادامی (kg)	وزن مخصوص (kg/cm3)
M	۰,۴۵	۳۸۰	۰	۱۷۱	۰	۰,۱	۸۱۲	۵۵۷	۴۵۶	۲۳۷۸
Z10	۰,۴۵	۳۴۲	۳۸	۱۷۱	۰	۰,۴۵	۸۱۲	۵۵۷	۴۵۶	۲۳۹۶
Z20	۰,۴۵	۳۰۴	۷۶	۱۷۱	۰	۰,۶۵	۸۱۲	۵۵۷	۴۵۶	۲۴۰۵
MN30	۰,۴۵	۳۸۰	۰	۱۱۹,۷	۵۱,۳	۱	۸۱۲	۵۵۷	۴۵۶	۲۳۹۲
MN60	۰,۴۵	۳۸۰	۰	۶۸,۴	۱۰۲,۶	۱,۱	۸۱۲	۵۵۷	۴۵۶	۲۴۰۱
MN100	۰,۴۵	۳۸۰	۰	۰	۱۷۱	۱,۲۵	۸۱۲	۵۵۷	۴۵۶	۲۴۰۸
Z10MN30	۰,۴۵	۳۴۲	۳۸	۱۱۹,۷	۵۱,۳	۱,۴	۸۱۲	۵۵۷	۴۵۶	۲۳۹۸
Z10MN60	۰,۴۵	۳۴۲	۳۸	۶۸,۴	۱۰۲,۶	۱,۵	۸۱۲	۵۵۷	۴۵۶	۲۴۰۰
Z10MN100	۰,۴۵	۳۴۲	۳۸	۰	۱۷۱	۱,۶۵	۸۱۲	۵۵۷	۴۵۶	۲۴۰۵

M: نماد بتن شاهد، MN: نماد میکرو_نانو حباب، Z: نماد زئولیت

www.SID.ir

Archive of SID

۲-۲-۲- آزمایش جذب آب ۳۰ دقیقه و ۲٤ ساعت

جهت انجام آزمایش طبق استاندارد BS 1881 [۱۸] نمونه ۱۰*۱۰*۱۰ سانتی متر پس از خارج کردن از محلول آب آهک اشباع در سن ۲۸ و ۹۰ روز، در دستگاه خشک کن تحت دمای ۱۰۵ درجه قرار داده شد و پس از مدت ۲۴ ساعت با تمهیداتخاص به نحوی که تمام سطح آن با آب در تماس باشد، مرطوب گردید و در مدت ۳۰ دقیقه و ۲۴ ساعت مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج بر اساس اختلاف وزن در دو حالت مرطوب و خشک طبق معادله ۱ محاسبه می‌گردد.

$$A = \frac{M1-M0}{M0} \times 100 \qquad (۱)$$

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 می‌دهد.

۲-۲-۳- مقاومت الکتریکی

آزمایش مقاومت الکتریکی طبق استاندارد FM 5-578 [۱۹] ، بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد ۱۰*۲۰ سانتی متر در سن ۲۸ و ۹۰ روز به روش چهار نقطه‌ای دستگاه Wenner انجام گرفته است. مقاومت الکتریکی از معادله ۲ محاسبه می‌گردد.

$$R = \frac{2\pi \mathrm{a v}}{\mathrm{i}} \qquad (۲)$$

در رابطه (۲)، R بیانگر مقاومت الکتریکی برحسب(K.Ω.Cm) ، a فاصله ۲ الکترود برحسب (Cm)، vاختلاف پتانسیل الکتریکی اعمال‌شده برحسب (V) و i شدت جریان بر حسب (A) است.

۳- نتایج و تحلیل نتایج

۳-۱- خواص بتن تازه

با توجه به آزمایش اسلامپ که در جدول ۳ به نمایش در آمده است، مشخص گردید که بتن حاوی زئولیت و آب میکرو_نانو حباب باعث کاهش اسلامپ و روانی بتن می‌شوند و به میزان این اثرات با افزایش درصد جایگزینی افزوده می‌گردد. کاهش اسلامپ در بتن دارای زئولیت را می‌توان به سطح مخصوص بالای آن ارتباط داد. همچنین بتن حاوی آب میکرو_نانوحباب جهت گیرش اولیه زیاد و افزایش سرعت فرآیند هیدراسیون سبب کاهش روانی می‌گردد. این مقدار کاهش روانی توسط جایگزین کردن درصد فوق روان کننده بیشتر جبران می‌گردد. نتایج به دست آمده توسط محققین دیگر نیز تأییدکننده تأثیر استفاده از زئولیت در کاهش اسلامپ و روانی بتن تازه است [۲۰]. همچنین در مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۶ اثر استفاده از آب میکرو_نانو حباب و روانی بتن تازه بررسی گردید که نتایج مشابه ای حاصل شد [۹].

نتایج آزمایش چگالی بتن تازه که در شکل ۲ نشان داده شده است بیانگر آن است که بتن دارای آب میکرو_نانوحباب و زئولیت، تراکم بیشتری نسبت به بتن کنترل دارند. بیش‌ترین مقدار تراکم مربوط به نمونه‌های ترکیبی به مقدار ۲۴۰۵ کیلوگرم بر مترمکعب برای نمونهZ10MN100 است، درحالی‌که بتن کنترل دارای چگالی ۲۳۷۸ کیلوگرم بر مترمکعب است.

جدول۳- اسلامپ نمونه ها

طرح	اسلامپ (میلی متر)
M	۹۶
Z10	۸۸
Z20	۸۵
MN30	۹۴
MN60	۹۲
MN100	۸۹
Z10MN30	۸۸
Z10MN60	۸۶
Z10MN100	۸۳

۳-۲- مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه ای ۳۰*۱۵ سانتی متر در سن ۷، ۲۸ و ۹۰ روز در شکل ۴ نشان داده شده است. همان طور که از شکل مشخص است مقاومت فشاری نمونه‌های دارای زئولیت به نسبت ۱۰ و ۲۰ درصد جایگزینی در سن ۷ روز به میزان ۸ و ۱۲ درصد از نمونه کنترل کمتر است. این اتفاق به دلیل کندی فعالیت پوزولانی در بتن‌های حاوی زئولیت رخ می‌دهد. این کاهش مقاومت در سن ۲۸ روز پس از عمل‌آوری به دلیل فعالیت SiO_2 وAl_2O_3 در زئولیت و همچنین با افزایش فعالیت پوزولانی و بهبود فرایند هیدراسیون در بتن کاملاً جبران شده و به میزان ۵ و ۳ درصد نسبت به بتن شاهد در ۱۰ و ۲۰ درصد جایگزینی زئولیت، افزایش مقاومت داشته است. در سن ۹۰ روز بهبود مقاومت فشاری نمونه‌های دارای زئولیت نسبت به ۲۸ روز دارای شیب ملایم‌تری بوده است و در سطح نزدیک‌تری نسبت به نمونه کنترل قرار می‌گیرد. مطالعه احمدی و همکاران [۲۱] و ولی پور و

www.SID.ir

Archive of SID

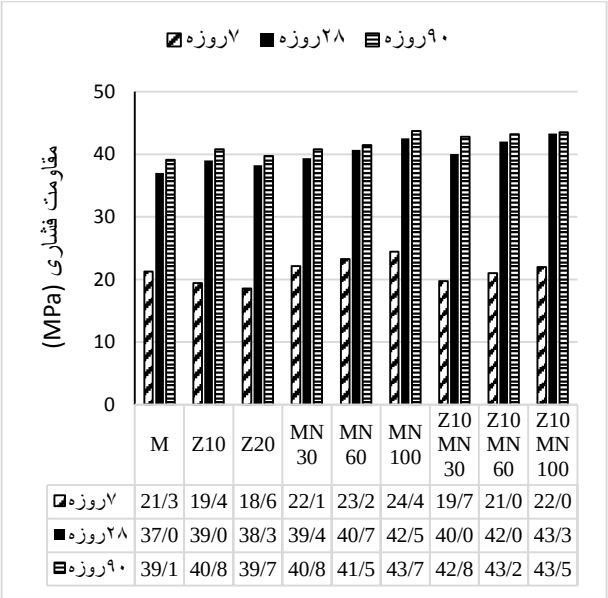
همکاران [۲۰] تأییدکننده نتایج مقاومت فشاری ثبت‌شده در این پژوهش است. مقاومت فشاری در سن ۲۸ و۷ روز در بتن دارای آب میکرو_ نانوحباب نسبت به بتن شاهد بهبود داشته است. این افزایش برای نمونه‌های دارای میکرو_نانو حباب با درصد جایگزینی ۳۰، ۶۰ و ۱۰۰ درصد به ترتیب به مقدار ۶، ۹ و ۱۳ درصد افزایش مقاومت نسبت به بتن مرجع می‌رسد. نتایج بیانگر آن است که افزودن مقدار آب میکرو_نانو حباب تأثیر بیشتری در بهبود خواص مکانیکی ایجاد می‌کند.

این بهبود را می‌توان به سرعت بالای فرایند هیدراسیون بتن دارای میکرو_نانو حباب در ۲۸ روز اولیه عمل‌آوری و همچنین همگنی بالای نمونه بتنی به دلیل خاصیت اثر برخورد ذره با حباب‌های آب میکرو_ نانو حباب نسبت داد. این خاصیت در آب میکرو_نانو حباب با رابطه ۳ معرفی می‌گردد .

$$P_c = \left[\frac{3}{2} + \frac{4{R_e}^{0.72}}{15}\right]\left(\frac{D_p}{D_b}\right)^2 \qquad (۳)$$

در این معادله D_p ، D_b و R_e به ترتیب قطر ذره ، قطره حباب و عدد رینولدز است. فرمول ۳ اشاره می‌کند که آب میکرو_نانوحباب نرخ پایین فولوتاسیون ذرات سیمان، به علت بازدهی کم برخورد با حباب‌های با اندازه معمولی که از دلایل خاصیت شناوری پایین ذرات سیمان با آب است را به نحو مطلوبی جبران می‌کند. البته باید اشاره کرد که قدرت نیروی بالابری کم میکرو_نانو حباب‌ها باعث کاهش روند بهبود دلخواه فرایند فولوتاسیون می‌گردد. ولی در هر صورت منجر به افزایش همگنی خمیر سیمان و چسبندگی بالاتر ژل سیمانی به سنگ‌دانه‌ها و بهبود خواص ناحیه انتقال گشته و در نهایت خواص مکانیکی بتن از جمله مقاومت فشاری را ارتقا می‌بخشد. تحقیق عارفی و همکاران [۹] تأییدکننده نتایج روند بهبود مقاومت فشاری ۲۸ روزه دارای میکرو- نانوحباب است.

روند افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های دارای میکرو_نانو حباب در سن ۹۰ روز شیب کمتری داشته است که این را می‌توان به این موضوع که بیشتر روند تکمیل فرایند هیدراسیون تا سن ۲۸ روز در این بتن انجام می‌گردد، اختصاص داد. آزمایش مقاومت فشاری در نمونه‌های ترکیبی بیانگر آن است که خواص آب میکرو_نانوحباب، افت مقاومت زئولیت در سن ۷ روز را به نحو مطلوبی بهبود می‌بخشد و در سن ۲۸ روز اثر همزمان زئولیت و آب میکرو_نانو حباب سبب بهبود چشمگیر مقاومت گشته است تا جایی که بیش‌ترین مقاومت فشاری در نمونه‌ها مربوط به نمونه Z10MN100 به میزان ۱۵ درصد افزایش می‌باشد.



شکل ۴- نمودار مقاومت فشاری

۳-۳- مقاومت کششی غیرمستقیم

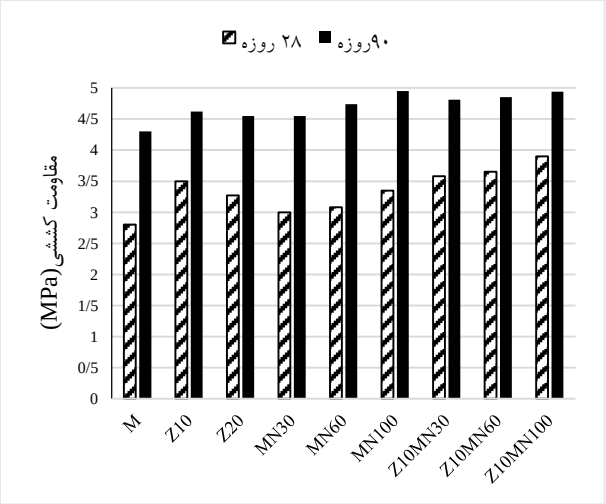
نتیجه آزمون مقاومت کششی در شکل ۵ قابل‌ملاحظه است. روند افزایش مقاومت کششی در نمونه‌های دارای زئولیت و آب میکرو_نانوحباب نسبت به نمونه مرجع در سنین ۲۷ و ۹۰ روزه با افزایش روبرو است. افزایش مقاومت کششی ۲۸ روزه برای نسبت ۱۰ و ۲۰ درصد جایگزینی به ترتیب برابر ۲۸ و ۱۷ درصد و برای مقاومت ۹۰ روزه برابر ۷ و ۵ درصد بوده است. روند افزایش در سن ۲۸ و ۹۰ روز بیانگر آن است که فعالیت پوزولانی زئولیت در سن ۲۸ روز به مراتب بیشتر از ۹۰ روز می‌باشد .افزایش مقاومت کششی بتن در سن ۲۸ روز ارتباط مستقیمی باکیفیت بتن ناحیه انتقال دارد. از آنجایی که زئولیت با گذشت زمان تا ۲۸ روز واکنش پوزولانی بیشتری از خود نشان می‌دهد و فعالیت هیدراسیون را کامل‌تر کرده و ژل سیمانی متراکم تری تولید می‌کند، بنابراین مقاومت کششی بیشتری ایجاد می‌کند.

طبق تحقیق رمضانیان پور و همکاران [۷]، افزایش مقاومت کششی بتن دارای زئولیت قابل پیش بینی بوده است. مقاومت کششی بتن دارای آب میکرو_نانوحباب نیز روند افزایشی نسبت به نمونه شاهد داشته است. این مقدار برای نمونه‌های دارای ۱۰۰ درصد

www.SID.ir

Archive of SID

میکرو_نانوحباب به میزان ۲۰ درصد افزایش نسبت به نمونه کنترل، در سن ۲۸ روز است. دلیل این افزایش همگن بودن بالای نمونه میکرو_نانو حباب است. طبق تحقیق صورت گرفته روی خواص مکانیکی آب میکرو_نانو حباب مقاومت کششی بتن دارای ۱۰۰ درصد آب میکرو_نانو حباب افزایش مقاومت داشته است که در راستای نتایج بدست آمده در این تحقیق می‌باشد [۹]. بیش‌ترین افزایش مقاومت کششی در مخلوط بتنی دو فازی شامل زئولیت و میکرو_نانو حباب مربوط به نمونه Z10MN100به میزان ۳۹ درصد مشاهده گردیده است.

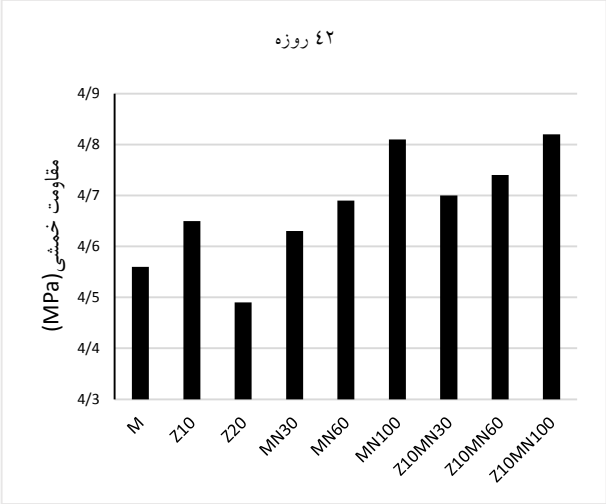


شکل ۵- نمودار مقاومت کششی

۳-٤- مقاومت خمشی

این آزمایش بر روی تیر بتنی با تکیه‌گاه ساده، با ابعاد ۱۰*۵۰*۵۰ سانتی متر در سن ۴۲ روز صورت پذیرفت. مقاومت خمشی نمونه‌ها روندی مشابه با مقاومت کششی و فشاری داشته است. شکل ۶ مقاومت خمشی بتن در سن ۴۲ روز را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل پیدا است بیش‌ترین مقدار مربوط به نمونه دارای زئولیت ۱۰ درصد هست که دارای ۶ درصد افزایش نسبت به نمونه شاهد است. همچنین کمترین مقاومت را نمونه دارای ۲۰ درصد زئولیت داشته است که کاهش مقاومتی به مقدار ۲ درصد را نشان می‌دهد. با توجه به سیر نمودار در شکل ۶ می‌توان گفت که زئولیت و میکرو_نانو حباب باعث افزایش مقاومت خمشی می‌شوند.

پیوستگی بین سنگ دانه‌ها و خمیر سیمان عامل مهمی در مقاومت خمشی بتن است. نتایج آزمون مقاومت خمشی بیانگر آن است که این پیوستگی در نمونه‌های دارای زئولیت و میکرو_نانو حباب به خوبی در بتن شکل گرفته است.



شکل ۶- نمودار مقاومت خمشی

۳-۵- جذب حجمی آب

نتایج این آزمون در شکل ۷ و ۸ نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشخص است با بالا رفتن سن نمونه‌ها از میزان درصد جذب آب در بتن سخت شده کاسته می‌شود که امر طبیعی است و حاکی از کامل شدن واکنش‌های هیدراسیون و کاسته شدن تخلخل و حفرات موئین و پیوستگی آن‌ها است. کمترین درصد جذب آب در بین کلیه مخلوط‌ها متعلق به مخلوط حاوی ۱۰ درصد زئولیت و ۱۰۰ درصد میکرو نانو حباب می‌باشد که به میزان ۲۵ درصد جذب آب ۳۰ دقیقه کمتری در سن ۲۸ روز از نمونه شاهد دارد. این موضوع به خواص مطلوب زئولیت و میکرو_نانو حباب در پرکنندگی حفرات اشاره دارد.

مقدار جذب آب ۳۰ دقیقه در سن ۲۸ روز برای نسبت اختلاط ۱۰ و ۲۰ درصد جایگزینی به جای سیمان در نمونه‌های دارای زئولیت به میزان ۷ و ۱۵ درصد و در سن ۹۰ روز به میزان ۷ و ۱۰ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش داشته است. این نشان‌دهنده کاهش تخلخل و حفرات در بتن دارای زئولیت می‌باشد . طبق آزمایش تخلخل صورت گرفته برای نمونه‌های دارای زئولیت در تحقیق ناگروکین و گرسکاس[1] نمونه حاوی ۱۰ درصد زئولیت دارای ۳ درصد تخلخل باز و ۹,۶۵ درصد تخلخل بسته است که نسبت به نمونه کنترل به میزان چشمگیری کمتر است [۲۲]. ولی پور و

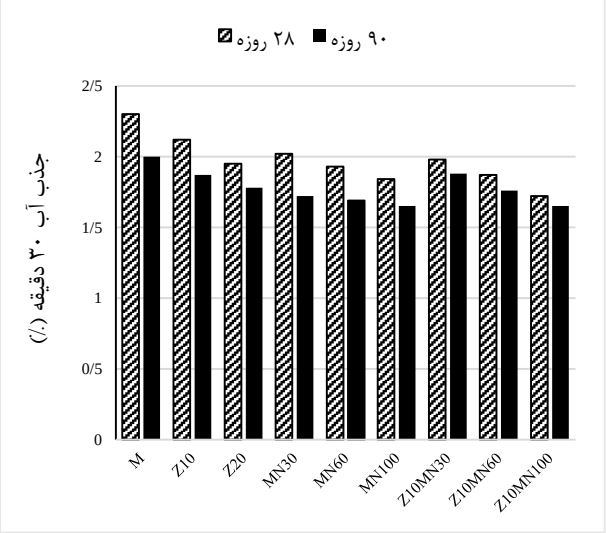
[1] Nagrockien and Girskas

www.SID.ir

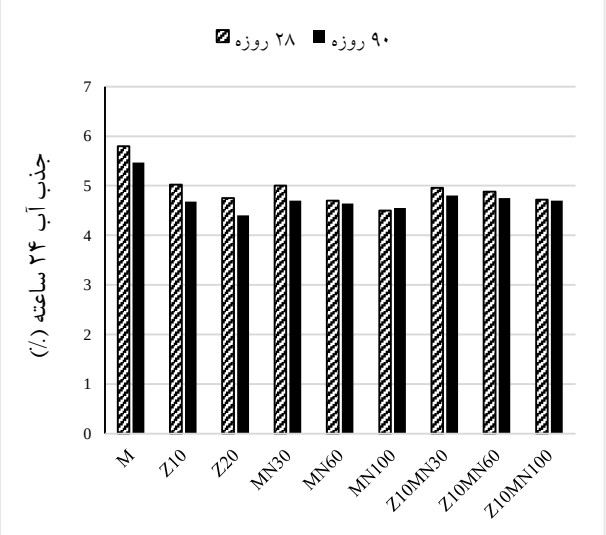
Archive of SID

همکاران [۲۰] به کاهش جذب آب بتن دارای زئولیت در تحقیق خود اشاره کرده‌اند.

در مورد جذب آب ۳۰ دقیقه بتن دارای میکرو_نانوحباب نیز کاهشی به میزان ۱۲، ۱۶ و ۲۰ درصد نسبت به نمونه شاهد برای طرح ۳۰، ۶۰ و ۱۰۰ درصد جایگزینی به جای آب اختلاط رخ داده است. این امر به دلیل کاهش حفرات و ترک‌های مویی در بتن رخ می‌دهد. بر خلاف تصور از آنجایی که آب دارای میکرو_نانو حباب می‌بایست حفراتی با اندازه میکرو و نانو در بتن ایجاد کند این اتفاق نیفتاده است و بتن دارای این نانو ماده به شکل چشمگیری منسجم و فاقد حفرات زیاد و بسیار همگن بوده و در مقابل جذب آب مقاومت خوبی از خود نشان می‌دهد.



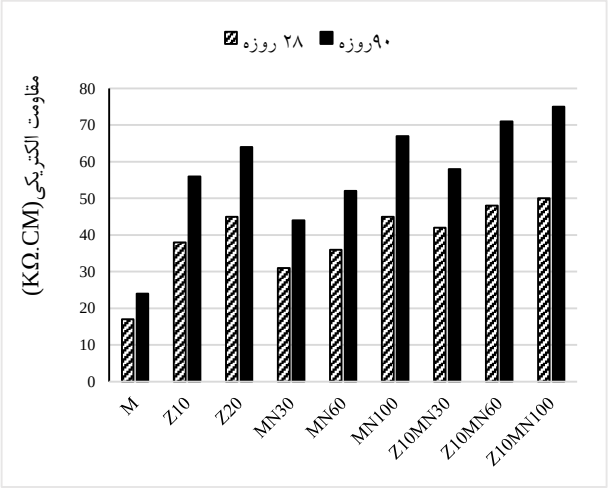
شکل۷- نمودار جذب آب ۳۰ دقیقه



شکل۸- نمودار جذب آب ۲۴ ساعته

۳-۶- مقاومت الکتریکی

مقدار مقاومت الکتریکی بستگی مستقیم به نفوذپذیری بتن و شرایط محیطی آن مانند مقدار یون‌های نفوذی و درصد رطوبت نسبی دارد. مسلماً هر چه نفوذپذیری بتن بیشتر باشد یون‌ها به راحتی و با سرعت بیشتری می‌توانند به داخل بتن راه یابند. هرچه مقاومت الکتریکی بتن کمتر باشد، امکان حرکت یون‌ها در داخل بتن بیشتر می‌شود و یون‌ها با سرعت بیشتری داخل منافذ عبور می‌کنند. در مقابل بتن‌های دارای مقاومت الکتریکی بالاتر در برابر یون‌های مخرب مانند کلراید و شروع خوردگی عملکرد بهتری دارند. شکل ۹ مقدار مقاومت الکتریکی نمونه‌های مخلوط بتن را نشان می‌دهد.



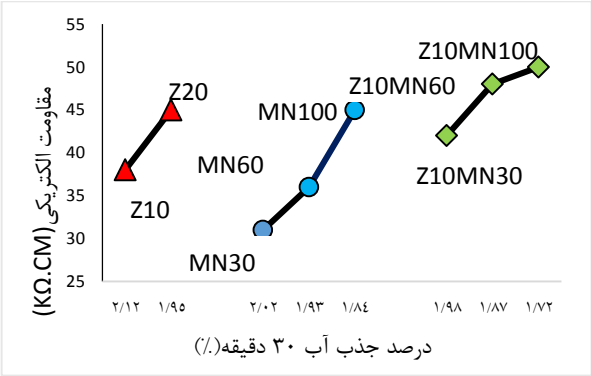
شکل۹- نمودار مقاومت الکتریکی

همان طور که در شکل قابل مشاهده است زئولیت و آب میکرو_نانو حباب تأثیر مثبتی در مقابل عبور یون‌های الکتریکی را از خود نشان می‌دهند. بیش‌ترین افزایش مربوط به نمونه‌های ترکیبی می‌باشد که نمونه‌های دارای ۱۰ درصد زئولیت و ۱۰۰ درصد میکرو_نانو حباب افزایشی به میزان ۱۹۴ درصد نسبت به نمونه مرجع داشته است. همان طور که از نتایج قابل مشاهده است بیش‌ترین تأثیر زئولیت و آب میکرو_نانوحباب بر خواص دوام بتن و بحث نفوذپذیری بوده است. این امر بیانگر آن است که نمونه زئولیتی با مصرف هیدروکسید کلسیم و بهبود فضای متخلخل بتن و نمونه دارای میکرو_نانوحباب با همگن کردن و تشکیل ژل سیمانی مناسب و ناحیه انتقال متراکم سبب بهبود خواص بتن از نظر نفوذپذیری می‌گردد. مقاومت الکتریکی با بالا رفتن سن بتن افزایش می‌یابد. نتایج تحقیق فنگ و همکاران تایید کننده نتایج بدست آمده در این پژوهش می‌باشد [۲۴ و۲۳].

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۱۰ نسبت مقاومت الکتریکی به جذب آب ۳۰ دقیقه حجمی بتن را برای درصدهای مختلف جایگزینی زئولیت و میکرو-نانو حباب در سن ۲۸ روزنشان می‌دهد.



شکل ۱۰- نسبت مقاومت الکتریکی به جذب آب مطابق با افزایش درصد مکمل سیمانی و میکرو_نانوحباب بتن

همان طور که در نمودار شکل ۱۰ مشخص است با افزایش مقدار جایگزین کردن مکمل سیمانی و میکرو_نانوحباب، جذب آب کاهش و مقاومت الکتریکی افزایش می‌یابد. در نتیجه رابطه‌ی معکوسی بین جذب آب و مقاومت الکتریکی به ازای افزایش درصد مکمل سیمانی و میکرو_نانوحباب بتن وجود دارد.

۳-۷- همبستگی بین نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت کششی

در شکل۱۱ و جدول۴ نتایج همبستگی آزمایش های مقاومت فشاری و کششی ۲۸ روزه بهمراه روابط پیشنهای استاندارد ACI318 [۲۵] نشان داده شده است. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود می توان دریافت که رابطه این پژوهش تخمین بزرگتری برای مقاومت کششی به ازای مقدار مشخصی مقاومت فشاری نسبت به رابطه ACI318 ارائه می‌دهد. اگرچه ضریب همبستگی این رابطه (R2=0.49) در عمل بیان میکند که در صورت استفاده از رابطه موجود ممکن است نتایج قابل قبولی بدست نیاید. یکی از اصلی ترین دلایل تغییر در رفتار رابطه بدست آمده در این پژوهش نسبت به رابطه ACI318 را می‌توان مشارکت طرح هایی دانست که در آنها از زئولیت بعنوان مکمل سیمان استفاده شده است و یا دارای درصد مشخصی از میکرو_نانوحباب می‌باشد. بعنوان مثال مقاومت کششی نمونه دارای ۱۰ درصد زئولیت بیشتر از مقاومت کششی نمونه دارای ۲۰ درصد زئولیت می‌باشد، در حالیکه مقاومت کششی نمونه های دارای میکرو_نانوحباب با افزایش درصد این افزودنی بهبود میابد.

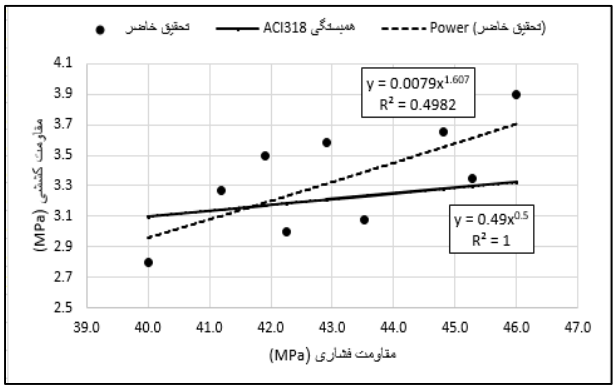
جدول۴- روابط همبستگی بین پارامترهای مختلف مکانیکی

رابطه همبستگی بین مقاومت فشاری و مقاومت خمشی	رابطه همبستگی بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی	مرجع
$F_f=0.72(F`_c)^{0.49}$ $R^2=0.79$	$F_{st}=0.0079(F`_c)^{1.61}$ $R^2=0.49$	در این تحقیق
$F_f=0.54(F`_c)^{0.5}$ $R^2=1$	$F_{st}=0.49(F`_c)^{0.5}$ $R^2=1$	ACI318-2

F_{st}:مقاومت کششی F_f:مقاومت خمشی $F`_c$:مقاومت فشاری

۳-۸- همبستگی بین نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت خمشی

در شکل۱۲ همبستگی بین نتایج آزمایشهای مقاومت فشاری و خمشی نشان داده شده است. همچنین در جدول۴ رابطه پیشنهاد شده ACI318 [۲۵] و رابطه بدست آمده در این پژوهش آورده شده است. همانطور که در شکل مشخص است رابطه حاصل از این تحقیق تخمین بزرگتری برای مقاومت خمشی به ازای مقاومت فشاری ارائه می‌دهد. اگرچه ضریب همبستگی تقریبا مطلوبی برای این رابطه بدست آمده است (R2=0.79)، اما همچنان با رابطه

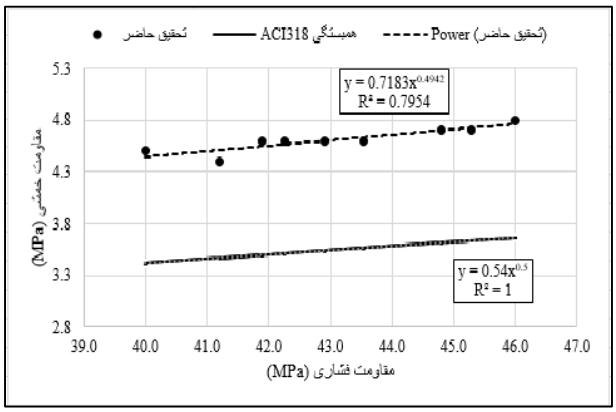


شکل۱۱- همبستگی بین نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت کششی

www.SID.ir

Archive of SID

پیشنهاد شده توسط ACI318 اختلاف دارد. دلیل این اختلاف رفتار را می توان به تغییر رفتار خواص مکانیکی بتن (مقاومت فشاری و خمشی) در اثر استفاده از درصدهای مختلف زئولیت و میکرو_نانوحباب نسبت داد. بعنوان نمونه با افزایش درصد مکمل زئولیت مقاومت خمشی کاهش اما در مقابل با افزایش درصد میکرو_نانوحباب مقدار مقاومت خمشی بهبود میابد. این موضوع در مقادیر مقاومت فشاری نیز صدق میکند.



شکل ۱۲- همبستگی بین نتایج آزمایش های مقاومت فشاری و مقاومت خمشی

٤- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر استفاده از زئولیت، آب میکرو_نانو حباب و ترکیب آن‌ها بر خواص مهندسی بتن مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

۱-استفاده از زئولیت طبیعی باعث کاهش مقاومت فشاری بتن در سنین اولیه و سپس در سن ۲۸ روز باعث افزایش مقاومت نسبت به بتن کنترل می‌گردد. با افزایش مقدار زئولیت همچنین افزایش سن بتن از مقدار افزایش کاسته می شود. نتایج این تحقیق در راستای نتایج بدست آمده در سایر مطالعات می‌باشد[۲۱ و ۲۰].

۲- استفاده از آب میکرو_نانو حباب باعث بهبود خواص مکانیکی بتن از جمله مقاومت فشاری، کششی و خمشی در سنین مختلف می‌شود و با افزایش درصد جایگزینی بهبود بیشتری حاصل می‌گردد. نتایج تحقیق عارفی و همکاران[۹] تایید کننده نتایج بدست آمده در این تحقیق می‌باشد.

۳- اثر ترکیبی زئولیت و آب میکرو_نانو حباب مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن را به میزان ۱۵، ۱۴ و ۶ درصد افزایش می‌دهد.

۴- زئولیت طبیعی و آب میکرو_نانو جذب آب بتن را کاهش داده و سبب افزایش مقاومت الکتریکی در بتن می‌گردد. نتایج تحقیق فنگ و همکاران نیز بیانگر همین خاصیت در اثر استفاده از زئولیت در بتن می‌باشد[۲۴ و ۲۳].

۵- استفاده همزمان از زئولیت و آب میکرو نانو حباب بیش‌ترین افزایش را در روند بهبود خواص دوام از جمله کاهش جذب آب به میزان ۲۵ درصد و افزایش مقاومت الکتریکی به مقدار۱۹۴ درصد داشته است.

به طور کلی با توجه به نتایج می‌توان گفت زئولیت و آب میکرو_نانو حباب خواص مربوط به مقاومت و پایایی بتن اصلاح‌شده را بهبود می‌بخشند. بنابراین می‌توان از آن‌ها به عنوان مواد جایگزین سیمان و آب اختلاط بتن در جهت کاهش آلایندگی محیط‌زیست و افزایش بازدهی بتن استفاده نمود.

٥- مراجع

[1]. Najimi. M.; Sobhani. J.; Ahmadi. B. and Shekarchi M.; "An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan", Journal of Construction and Building Materials, vol. 35, pp. 1023-1033, 2012.

[2]. Herfort. D. M.; Gartner. E.; "Sustainable Development and Climate Change Initiatives", Cement and Concrete Research, 2008.

[3]. Chan, S. Y. N.; Ji, X.; "Comparative study of the initial surface absorption and chloride diffusion of high performance zeolite, silica fume and PFA concretes", Cement and Concrete Composites, Vol. 21, pp. 293-300, 1999.

[4]. Poon, C. S.; Lam, L.; Kou, S. C.; and lin., Z. S.; "A study on the hydration of natural zeolite blended cement pastes", construction and Building Materials, Vol.19, pp. 579-584, 1999.

[5]. Liguori, B.; Caputo, D.; Marroccoli, M, and Colella C.; "Evaluation of zeolite bearing tuffs as pozzolanic addition for blended cements", Eighth CANMET/ACI International conference on fly ash, silics fume, slag, and natural pozzolans in concrete, 2004.

[6]. Shekarchi, M.; Ahmadi, B.and Najimi, M.; "Use of natural zeolite as pozzolanic Material" cement and concrete composites,Vol. 30, pp. 665-694, 2013.

[7]. Ramezanianpour, A.; Mousavi, R.; Kalhori, M.; Sobhani , J.; and Najimi, M.; "review: Micro and macro level properties of natural zeolite contained

www.SID.ir

Archive of SID

concretes", Construction and Building Materials, Vol. 101, No. 1, pp. , 347-358, 2015.
[8]. Mozaffari Naeeni, R.; "Investigation on the hydrodynamics standard pattern using micro-nano air bubbles", M.Sc. Thesis, Shahrood University of Technology, 2014. In persion.
[9]. Arefi, A.; Saghravani, S. F. A. and Mozaffari Naeeni, R.; "Mechanical behavior of concrete made with Micro-Nano Air Bubbles", Civil engineering Infrastructures Journal, Vol. 49. No. 1, pp 141-149, 2016.
[10]. ASTM C150, "Standard Specification for Portland Cement. American Society for Testing and Materials", Philadelphia, 2012.
[11]. ASTM C618-99, "Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as A Mineral Admixture in Portland Cement concrete", 1999.
[12]. BS EN 1008:2002, "Mixing water for concrete. Specification for sampling, testing and assessing the suitability of water, invluding water recovered from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete, brithish standards", 2002.
[13]. ASTM C33, "Standard Specification for Concrete Aggregates", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 2002.
[14]. ASTM C192, "Standard Practice for Making and Curing Concrete Specimens in the Laboratory", 2002.
[15]. ASTM C39, "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. American Society for Testing and Materials", Philadelphia, 2004.
[16]. ASTM C496, (Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 2004.
[17]. ASTM C78, "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 2002.
[18]. BS 1881 Part 122, "Testing concrete. Method for determination of water absorption", 1983.
[19]. FM 5-578, "Florida Department of Transportation Florida Method of Test for Concrete Resistivity as an Electrical Indicator of its Permeability", Designation Florida, 2004.
[20]. Valipour, M.; Pargar, F.; Shekarchi, M.; and Khani, S.; "Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms", Construction and Building Materials, Vol. 41, pp. 879-888, 2013.
[21]. Ahmadi , B. and shekarchi, M.; "Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material"
Cement & Concrete Composites, Vol. 32, No. 2, pp. 134-141, 2010.
[22]. Nagrockiene, D.; Girskas, G.; "Research into the properties of concrete modified with natural zeolite Addition" Construction and Building Materials, Vol.113, pp. 964–969, 2016.
[23]. Feng, N.Q.; Li, G.Z.; Zang, X.W.; "High-strength and flowing concrete zeolitic mineral admixtures", Cem. Concr. Aggreg, pp. 61–69, 1990.
[24]. Feng N.; Hao T.; "Mechanism of natural zeolite powder in preventing alkali-silica reaction in concrete", Adv Cem Res, Vol. 10, pp. 101–108, 1998.
[25]. American Concrete Institute. ACI Committee 318. (2002). Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary. ACI, Detroit, ACI 318-02/318R.

www.SID.ir

Archive of SID

Study of mechanical properties and durability of concrete containing zeolite as a supplementary cementitious material and micro-nano bubble

Ali Akbar Shirzadi Javid *
Assistant Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology
Moein Khoshroo
M.Sc. Student, Construction and Engineering Management, Tehran University of kharazmi
Ali Katebi
Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Tehran University of kharazmi

Abstract

In this paper, the effect of using natural zeolite as a supplementary cementitious material and micro-nano bubble as a substitute for concrete mixture water has been evaluated on the mechanical properties and durability of concrete. The evaluated parameters for properties of modified concrete include: compressive strength, tensile strength, Bending strength, electrical resistivity and water absorption. The results indicate that the use of zeolite and micro-nano bubble in concrete increases the mechanical properties and the durability of concrete. The greatest improvement is related to the two-phase samples from the combination of 10% zeolite and 100% micro-nano bubble, which compressive strength, tensile strength, bending strength and electrical resistivity increase by 15, 14.88, 5.65 and 194.12% respectively, and water absorption decrease by 25.22%. In general, according to the results, it can be concluded that zeolite and micro-nano bubble, improve the mechanical properties and durability of concrete and their combination has the most positive effect on modified concrete.

Keywords: Zeolite, Micro-nano bubble, Mechanical properties, durability properties, concrete.

* Corresponding Author: shirzad@iust.ac.ir

www.SID.ir