

اثر زئولیت بر مقاومت فشاری و خصوصیات دوام بتن غلتکی حجیم

علی صرافعی، سید مهدی زهرائی*، امیرمحمد رمضانیان

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران .

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۱۷

بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۰۵

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۶

ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۱۲/۰۷

کلمات کلیدی:

زئولیت

بتن غلتکی

خصوصیات دوامی

خصوصیات مکانیکی

کارایی

خلاصه: بتن غلتکی کم سیمان یکی از انواع بتن‌های خاص است که به جهت کاهش حدود ۲ برابری حرارت ناشی از واکنش هیدراته شدن، مقدار سیمان در نسبت مخلوط آن کم است. این موضوع باعث افزایش قابل توجه نفوذپذیری بتن غلتکی نسبت به بتن معمولی می‌شود. افزایش نفوذپذیری نیز ورود یون‌های مخرب (نظیر یون‌های کلراید، سدیم، پتاسیم و کلسیم) به بدنه بتنی سازه‌های حجیم را موجب می‌شود و در نهایت عدم پایداری این سازه‌ها را به دنبال دارد. پوزولان‌ها مانند زئولیت می‌توانند نفوذپذیری را کاهش دهند، از این رو در تحقیق حاضر، تأثیر جایگزینی بخشی از سیمان با زئولیت بر مقاومت فشاری و خصوصیات دوام نظیر نفوذ تسریع شده یون کلراید، عمق نفوذ آب، جذب آب، مقاومت الکتریکی و سرعت پالس اولتراسونیک بتن غلتکی بررسی شده است. ابتدا آنالیز شیمیایی و واکنش پوزولانی زئولیت بررسی شدند. سپس به منظور ارزیابی تأثیر زئولیت بر خواص بتن، نمونه‌های بتن غلتکی در چهار نسبت مخلوط با درصدهای جایگزینی ۰٪، ۱۵٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ سیمان با زئولیت ساخته شدند و تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری، عمق نفوذ آب، جذب آب، نفوذ تسریع شده یون کلراید (RCPT)، مقاومت الکتریکی، سرعت پالس اولتراسونیک (UPV) قرار گرفتند. کارایی مخلوط‌های بتن غلتکی نیز از طریق آزمایش میز وی بی تعیین شد. نتایج نشان دادند که بر طبق آزمایش‌های RCPT، عمق نفوذ آب و مقاومت الکتریکی، جایگزینی ۱۵٪ وزن سیمان با زئولیت باعث کاهش نفوذپذیری و بهبود چشمگیر خصوصیات دوامی می‌شود. همچنین افزایش درصد زئولیت، مقاومت فشاری نمونه‌ها را کاهش می‌دهد. مقایسه با تعداد ۹۶ نمونه مکعبی ۱۵ سانتی‌متری صورت گرفته است. بر اساس نتایج مقاومت فشاری ۷ روزه، جایگزینی سیمان با ۱۵٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ زئولیت به ترتیب باعث کاهش ۴۵/۷٪، ۵۶٪ و ۶۱/۷٪ مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد شده است. این مقادیر کاهش برای مقاومت فشاری ۲۸ روزه به ترتیب ۲۴/۷٪، ۳۹/۵٪ و ۵۱/۶٪، برای نتایج ۵۶ روزه به ترتیب ۲۷٪، ۳۴/۳٪ و ۴۶/۱٪ و برای نتایج ۹۱ روزه نیز، به ترتیب ۲۱/۲٪، ۳۵/۳٪ و ۴۵/۳٪ می‌باشد.

۱- مقدمه

مخلوط این نوع از بتن باعث افزایش نفوذپذیری قابل توجهی نسبت به بتن معمولی می‌شود، زیرا سیمان قادر به پر کردن همه فضاهای خالی بین سنگدانه‌ها نشده و کاهش چشمگیر مقاومت فشاری و افزایش قابل توجه نفوذپذیری از همین فضاهای خالی ناشی می‌شود، زیرا وقتی که فضاهای خالی بین سنگدانه‌ها به طور کامل با خمیر سیمان پر نشوند، عملاً همین فضاهای خالی هستند که بر روی مقاومت تأثیر گذارند، نه فضاهای ریز مویینه‌ای که در خمیر سیمان وجود دارد. یکی از راهکارهای بهبود خواص در بتن‌ها جایگزین کردن بخشی از سیمان با مواد مکمل سیمانی است، این موضوع از نقطه نظر زیست محیطی نیز مفید است زیرا تولید سیمان به تنهایی ۷٪ کربن دی اکسید تولیدی در جهان را به عهده دارد [۲].

بتن غلتکی یک بتن با مقدار کم آب و اسلامپ صفر است که بیشتر حجم آن را سنگدانه‌ها تشکیل می‌دهند، همچنین در نسبت مخلوط آن مقدار آب و سیمان نسبت به بتن معمولی حدود ۳۰٪ کمتر است. مخلوط بتن غلتکی قادر به تحمل وزن غلتک‌ها بوده و عدم نیاز آن به قالب‌بندی باعث شده است که استفاده از آن زمان و هزینه پروژه‌ها را کاهش دهد. بنابراین بتن غلتکی به دلیل دارا بودن سرعت اجرای بالا و صرفه اقتصادی، در پروژه‌های عمرانی مورد استفاده قرار گرفته است. از ویژگی‌های زیست محیطی بتن غلتکی حجیم، می‌توان به حرارت زایی کمتر آن به دلیل مصرف کم سیمان در نسبت مخلوط آن اشاره کرد [۱]. کم بودن سیمان در نسبت

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mzahrai@ut.ac.ir



در سال‌های اخیر، پژوهشگران از طریق جایگزینی بخشی از سیمان با انواع پوزولان‌ها سعی در بهبود خواص دوامی و مکانیکی بتن غلتکی داشتند. بر اساس نتایج تحقیق مردانی آقاییگلو^۱ و همکاران (۲۰۱۳)، جایگزینی بخشی از سنگدانه‌ها با خاکستر بادی باعث کاهش ۳۷ درصدی عمق نفوذ آب و جذب آب می‌شود [۳]. در خصوص میکروسیلیس، شن^۲ و همکاران (۲۰۲۰) دریافتند که میکروسیلیس نسبت به سایر پوزولان‌ها (نظیر خاکستر بادی و پودر سنگ آهک) تأثیر بیشتری بر بهبود خصوصیات دوامی بتن غلتکی دارد [۴]. دوآن^۳ و همکاران (۲۰۱۳) نیز با افزودن پوزولان‌هایی نظیر میکروسیلیس، متاکاولین و سرباره به خمیر بتن، به نتایج مشابهی در رابطه با تأثیر این مواد بر بهبود ریزساختار، ناحیه انتقال و نفوذپذیری (آزمایش تصویربرداری میکروسکوپی الکترونی) خمیر سیمان در بتن رسیدند [۵]. در رابطه با نانوسیلیس در بتن غلتکی پرعیار، در تحقیق توکلی و همکاران (۲۰۲۰) ابتدا مواد بازیافتی با ۱۰، ۴۰ و ۷۰٪ جایگزین ماسه شدند، سپس به منظور بهبود خواص مکانیکی بتن غلتکی دارای مواد بازیافتی، درصد‌های مختلف نانوسیلیس (۰/۵، ۰/۷، ۱ و ۱/۵٪) جایگزین سیمان شدند، نتایج نشان دادند که درصد جایگزینی بهینه سیمان با نانوسیلیس که مطابق نتیجه آزمایش مقاومت فشاری ۰/۷ تا ۱٪ بود باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتن غلتکی و کاهش جذب آب و اثر مخرب وجود مواد بازیافتی در نسبت مخلوط آن می‌شود [۶]. بررسی تأثیر پوزولان‌ها نظیر میکروسیلیس (سطح جایگزینی ۱۰٪) و پومیس (سطوح جایگزینی ۱۰ و ۳۰٪) بر خواص بتن غلتکی کم عیار (با مقدار سیمان 215 kg/m^3 در طرح مخلوط) نشان داده است که میکروسیلیس مقاومت فشاری را از ۲۷ مگاپاسکال به ۳۴/۳ مگاپاسکال رسانده (۲۱/۳٪ افزایش) و خصوصیات دوامی را بهبود بخشیده است اما پومیس در مواردی حتی مقاومت را نسبت به طرح شاهد کاهش داده است. بیشترین مقاومت فشاری را نمونه‌های دارای ۱۰٪ میکروسیلیس کسب نمودند و کمترین مقاومت متعلق به نمونه‌های دارای ۳۰٪ پومیس بود [۷]. در پژوهش قدوسی و سعدآبادی (۲۰۲۲) نمونه‌های بتنی با نسبت‌های جایگزینی سیمان با میکروسیلیس ۰ تا ۸٪ و با نسبت‌های آب به سیمان مختلف ساخته شدند، نتایج نشان دادند که استفاده از میکروسیلیس مقاومت الکتریکی را افزایش و نفوذ یون کلراید را کاهش می‌دهد [۸]. همچنین در پژوهشی دیگر در سال ۲۰۱۷ استفاده از ۴۰٪ سرباره در نسبت مخلوط بتن غلتکی پرعیار، نفوذپذیری آن را کاهش داده است [۹].

ژئولیت یک آلومینوسیلیکات^۴ هیدراته از کاتیون‌های قلیایی و قلیایی خاکی است که به دلیل وجود مقادیر زیادی آلومینیوم اکسید و سیلیس فعال در ترکیب آن، به خوبی می‌تواند با کلسیم هیدروکسید حاصل از هیدراته شدن واکنش دهد و جذب آب را به میزان ۳۵٪ و مقاومت الکتریکی را به میزان ۴۴٪ بهبود ببخشد [۱۰]. از مهم‌ترین مزایای ژئولیت، اقتصادی بودن (از دلایل اقتصادی بودن آن، در دسترس بودن آن است) و سازگاری بیشتر آن با محیط زیست نسبت به سایر مواد مکمل سیمانی است (از دلایل سازگاری بیشتر آن با محیط زیست، طبیعی بودن این پوزولان است) [۱۱]. ولی‌پور و همکاران (۲۰۱۳) [۱۱] با جایگزین کردن سیمان با ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ ژئولیت در بتن معمولی دریافتند که جایگزینی سیمان با ۲۰٪ و ۳۰٪ ژئولیت، نفوذ یون کلراید را کاهش داده و مقاومت الکتریکی را افزایش می‌دهد. همچنین آن‌ها مشاهده کردند که ۱۰٪ ژئولیت مقاومت فشاری را به میزان ۱۰٪ افزایش می‌دهد اما در نمونه‌های دارای ۲۰ و ۳۰٪ ژئولیت بهبودی در مقاومت مشاهده نمی‌شود که علت این موضوع آن است که مقدار جایگزینی بهینه ژئولیت با سیمان در برخی منابع [۱۳ و ۱۲] ۱۵٪ عنوان شده است. در خصوص آزمایش جذب آب، نتایج نشان دادند که استفاده از ۲۰٪ ژئولیت حدود ۱ درصد جذب آب را افزایش داد. احمدی و شکرچی زاده (۲۰۱۰) نیز در تحقیق خود با ساخت نمونه‌های بتن معمولی در ۴ طرح با درصد‌های جایگزینی سیمان با ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ ژئولیت به این نتیجه رسیدند که افزایش درصد ژئولیت تا ۲۰٪ بر بهبود مقاومت فشاری، جذب آب، نفوذ یون کلراید و مقاومت الکتریکی بتن معمولی بسیار مؤثر است [۱۰]. نجیمی و همکاران (۲۰۱۲) در تحقیقات خود دریافتند که نمونه‌های حاوی ۱۵ و ۳۰٪ ژئولیت، عمق نفوذ آب و نفوذ یون کلراید کمتری نسبت به نمونه‌های شاهد دارند، همچنین در این پژوهش‌ها عنوان شده است که افزایش درصد ژئولیت، کاهش مقاومت فشاری و افزایش جذب بتن معمولی را به دنبال دارد [۱۴]. در پژوهش دیگر نیز در سال ۱۹۹۹ علاوه بر تأکید بر نقش زیاد ژئولیت در بهبود خصوصیات دوامی بتن معمولی، عنوان شده است که افزایش درصد ژئولیت در مخلوط‌های بتنی دارای نسبت‌های آب به مواد سیمانی بالاتر از ۰/۴۵ موجب کاهش ۲۱٪ مقاومت فشاری می‌گردد، همچنین در این تحقیق درصد بهینه ژئولیت ۱۵٪ بیان شده است [۱۳]. رضانبان‌پور^۵ و همکاران (۲۰۱۵) [۱۲] نیز با ساخت نمونه‌های بتنی دارای ۱۰ و ۱۵٪ ژئولیت، این پوزولان را در افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه و بهبود قابل توجه ریزساختار بتن معمولی مؤثر دانسته‌اند و نتایج این پژوهش نشان دادند که نمونه‌های دارای

1 Mardani-Aghabaglou
2 Shen
3 Duan

4 Aluminosilicate
5 Ramezaniapour

گردد. شاخص فعالیت پوزولانی ژئولیت نیز با استفاده از آزمایش مربوطه مورد ارزیابی قرار گرفت تا واکنش پذیری ژئولیت مورد بررسی قرار گیرد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

۲-۱-۱- سنگدانه

سنگدانه‌های مصرفی شامل شن (درشت و ریز) و ماسه شسته بودند. در شکل‌های ۱، ۲ و ۳ منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های مصرفی ارائه شده است. در جدول ۲ نیز مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های مصرفی ارائه شده است. دانه‌بندی مطابق با استاندارد ASTM C136 و تعیین درصد جذب آب درشت‌دانه و ریزدانه نیز به ترتیب مطابق با استانداردهای ASTM C127 و ASTM C128 انجام شد.

۲-۱-۲- سیمان و پوزولان

سیمان مصرفی، سیمان تیپ ۲ کارخانه سیمان ساوه و پوزولان مورد استفاده در این پژوهش، ژئولیت طبیعی موجود در معدن سمنان بود. نتایج آنالیز شیمیایی (XRF) سیمان و ژئولیت در جدول ۳ ارائه شده است.

۲-۱-۳- آب

در طرح مخلوط بتن‌ها از آب آشامیدنی شهر تهران با pH برابر ۷ استفاده شد.

۲-۲- طرح مخلوط

در پژوهش حاضر ۴ طرح مخلوط بتن غلتکی در نظر گرفته شد شامل یک طرح مخلوط شاهد و ۳ طرح مخلوط دارای ژئولیت که در آن‌ها ژئولیت با درصدهای ۱۵٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ جایگزین وزن سیمان شد، در جدول ۴، طرح‌های مخلوط ارائه شده است. درصدهای ۱۵، ۳۰ و ۴۰٪ بر اساس پژوهش‌های انجام شده در زمینه کاربرد ژئولیت در بتن می‌باشد. به منظور ساخت طرح‌های بتنی، ابتدا شن، ماسه، سیمان و ژئولیت در داخل مخزن میکسر مخلوط شدند، سپس آب به مخلوط بتنی اضافه شد. از زمان اضافه کردن آب به مخلوط، مصالح به مدت ۴ دقیقه توسط میکسر مخلوط شدند.

ژئولیت، عمق نفوذ آب و نفوذ یون کلراید کمتری نسبت به نمونه‌های شاهد دارند، همچنین نتایج این پژوهش بیانگر آن است که استفاده از ژئولیت، مقاومت الکتریکی نمونه‌ها را افزایش می‌دهد. شربتدار و ارویی (۱۳۹۷) در پژوهش خود دریافتند که استفاده از ۱۰٪ ژئولیت جایگزین سیمان باعث بهبود خصوصیات مکانیکی نظیر مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی می‌شود [۱۵]. رمضانپور و همکاران (۱۳۹۴) با جایگزین کردن ۱۰ و ۱۵٪ وزن سیمان با ژئولیت و اعمال شرایط عمل‌آوری متفاوت دریافتند که ژئولیت باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود، همچنین ژئولیت در هر دو شرایط عمل‌آوری نفوذ یون کلراید را کاهش داد و باعث حدود ۳ برابر شدن مقاومت الکتریکی نمونه‌ها شد [۱۶]. ایزدی‌فرد و مقدم (۱۳۹۹) در پژوهش خود با ساخت نمونه‌های حاوی ۱۰ و ۲۰٪ ژئولیت به این نتیجه رسیدند که ژئولیت موجب کاهش جزئی مقاومت فشاری ۲۸ روزه می‌شود، همچنین در این پژوهش دریافت شد که ژئولیت مقاومت الکتریکی را افزایش و عمق نفوذ آب را کاهش می‌دهد [۱۷]. نادری و همکاران (۱۳۹۹) نیز دریافتند که استفاده از ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰٪ ژئولیت نفوذپذیری و مقاومت فشاری بتن را کاهش می‌دهد [۱۸]. در جدول ۱ خلاصه‌ای از پژوهش‌های انجام شده در زمینه کاربرد ژئولیت در بتن ارائه شده است.

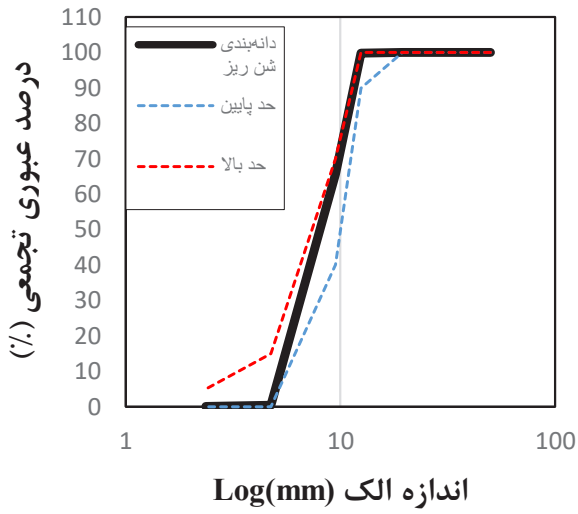
در خصوص پوزولان ژئولیت، پژوهش‌های زیادی بر روی تأثیر این ماده مکمل سیمانی بر خواص دوامی و مکانیکی بتن معمولی انجام شده است. اما در خصوص اثر آن بر خواص بتن غلتکی کم سیمان کار نشده است. طبق پژوهش‌های قبلی [۱۴-۱۰]، انتظار می‌رود ژئولیت تأثیرات مثبتی را در رابطه با مشخصات نفوذپذیری یون کلراید، عمق نفوذ آب، جذب آب، مقاومت الکتریکی و مقاومت فشاری بتن‌های غلتکی کم سیمان، همانند بتن‌های معمولی داشته باشد. از این رو در تحقیق حاضر، نمونه‌های بتن غلتکی با درصدهای جایگزینی ۱۰٪، ۱۵٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ ژئولیت ساخته شدند، سپس به منظور ارزیابی تأثیر ژئولیت بر خواص مکانیکی و دوام بتن غلتکی کم سیمان، آزمایش‌های مقاومت فشاری، نفوذ تسریع شده یون کلراید، عمق نفوذ آب، جذب آب بتن، مقاومت الکتریکی و سرعت پالس اولتراسونیک (UPV) بر روی نمونه‌های ساخته شده انجام شد. همچنین بر روی مخلوط‌های بتنی تازه آزمایش‌های زمان وی‌بی و وزن مخصوص انجام شد تا تأثیر ژئولیت بر خواص بتن غلتکی در حالت سخت نشده نیز بررسی

جدول ۱. پژوهش‌های انجام شده در زمینه کاربرد زئولیت طبیعی در بتن

Table 1. Research studies conducted in the field of using natural zeolite in concrete

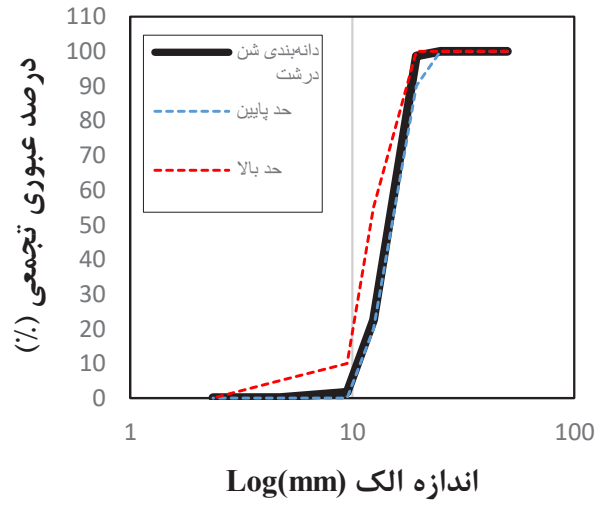
نویسندگان	پارامترهای تحقیق	میزان افت و افزایش خواص
۱ احمدی و شکرچی‌زاده [۱۰]	۰/۵٪، ۱/۱۰٪، ۱/۱۵٪ و ۲/۲۰٪ زئولیت	- افزایش ۰/۴۴٪، ۱/۱۲۲٪، ۱/۱۶۶٪ و ۲/۲۳۳٪ مقاومت الکتریکی - کاهش جذب آب از ۲/۲۷٪ به ۲/۱٪ افزایش ۰/۱۴، ۰/۱۶، ۲۳ و ۲۵٪ مقاومت فشاری
۲ رضانیان‌پور و همکاران [۱۲]	۱۰٪ و ۱۲/۵٪ میکروسیلیس	- افزایش ۲/۲۰٪، ۳/۲۲٪ و ۵/۵۶٪ مقاومت الکتریکی - کاهش جذب آب از ۲/۲۷٪ به ۲/۱٪ - کاهش ۶۷٪ و ۸۵٪ عمق نفوذ آب نفوذ یون کلراید برای بتن‌های حاوی ۱۰٪ و ۱۵٪ زئولیت به ترتیب حدود ۵۰٪ و ۵۸٪ مخلوط شاهد بود.
۳ ولی‌پور و همکاران [۱۱]	۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ زئولیت	- افزایش ۲۸۶٪ مقاومت الکتریکی - اندکی افزایش جذب آب در درصدهای جایگزینی ۱۰٪ و ۲۰٪ و کاهش حدود ۱٪ جذب آب در درصد جایگزینی ۳۰٪ - افزایش ۱۰٪ مقاومت فشاری در درصد جایگزینی ۱۰
۴ نجیمی و همکاران [۱۴]	۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ متاکائولین	- افزایش ۲۰۶٪ مقاومت الکتریکی - کاهش جذب آب از ۵/۵٪ به ۴٪ - افزایش ۳۶۷٪ مقاومت الکتریکی - کاهش جذب آب از ۵/۵٪ به ۳/۷٪ - نفوذ یون کلراید برای بتن‌های حاوی ۱۵٪ و ۳۰٪ زئولیت به ترتیب حدود ۲۷/۵٪ و ۸/۲٪ مخلوط شاهد بود. - به ترتیب کاهش ۱۳٪ و ۴۰٪ عمق نفوذ آب افزایش جذب آب از ۶/۸۸٪ به ترتیب به ۷/۹۷ و ۷/۷۵٪
۵ ناگروکین و گیرسکاس [۱۹]	۵، ۷/۵ و ۱۰٪ زئولیت	- به ترتیب کاهش ۹/۹ و ۳۷/۹٪ مقاومت فشاری ۷ روزه، کاهش ۳/۷ و ۲۴/۵٪ مقاومت ۲۸ روزه و کاهش ۲/۷ و ۵۶/۹٪ مقاومت ۹۰ روزه افزایش ۷/۱، ۷/۷ و ۱۳/۳٪ مقاومت فشاری ۲۸ روزه
۶ Bilim [۲۰]	۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰٪ زئولیت	- با افزایش درصد زئولیت تا ۱۰٪، جذب آب از ۳/۲۱٪ به ۱/۳۸٪ کاهش یافت. افزایش ۰/۲، ۰/۶، ۰/۸ و ۱٪ وزن مخصوص افزایش مقاومت فشاری از ۴۳/۹ به ۵۲/۵ مگاپاسکال با افزایش درصد زئولیت تا ۱۵٪

			- کاهش درصد جذب آب از ۸/۷۲٪ به ۸/۱۶٪
			- کاهش جذب آب از ۲/۳٪ به ۲٪
۷	خوشرو و همکاران-a [۲۱]	۱۰ و ۱۵٪ زئولیت	- کاهش حدود ۵۰ درصدی نفوذ یون کلر - افزایش ۲۳۴٪ و ۲۵۴٪ مقاومت الکتریکی - افزایش ۴/۷۵ و ۱۰/۷۵٪ مقاومت فشاری ۲۸ روزه
۸	Poon et al. [۲۲]	۱۵ و ۲۵٪ زئولیت	۱۵٪ زئولیت: به ترتیب کاهش ۰/۷٪، ۱۱٪ و ۹/۲٪ مقاومت فشاری ۰/۷، ۲۸ و ۹۰ روزه ۲۵٪ زئولیت: افزایش ۱٪ مقاومت ۷ روزه و کاهش ۴ و ۱۱٪ مقاومت فشاری‌های ۲۸ و ۹۰ روزه
۹	شاه منصوری و همکاران [۲۳]	۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰٪ زئولیت	- به ترتیب کاهش جذب آب از ۶/۸٪ به ۵/۹٪، ۴/۱۸، ۴/۱۵، ۴/۳، ۴/۵ و ۵/۵٪ - کاهش ۱۵٪، ۲۰٪، ۲۵٪، ۲۷/۵٪ و ۲۶/۲۵٪ عمق نفوذ آب
			- افزایش ۵ و ۲/۵ درصدی مقاومت فشاری ۲۸ روزه و افزایش ۱۰ و ۷/۵ درصدی مقاومت ۹۰ روزه
۱۰	خوشرو و همکاران-b [۲۴]	۱۰ و ۲۰٪ زئولیت	- کاهش ۱۴ و ۱۸٪ جذب آب - کاهش ۵۲/۶٪ و ۵۵/۲٪ نفوذ یون کلراید - افزایش ۱۲۳/۵٪ و ۱۶۴/۷٪ مقاومت الکتریکی
			- کاهش مقاومت فشاری ۷ روزه از ۳۴/۴ به ۲۲/۲ مگاپاسکال
۱۱	Canpolat et al. [۲۵]	۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵٪ زئولیت	- افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه از ۴۵/۱ به ۴۶/۲ مگاپاسکال - کاهش مقاومت فشاری ۹۰ روزه از ۵۷/۶ به ۵۳/۵ مگاپاسکال
۱۲	معدن دوست و همکاران [۲۶]	۲۰٪ زئولیت	- کاهش ۹٪ جذب آب کاهش ۶، ۵ و ۷٪ مقاومت فشاری‌های ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه
			- افزایش ۲۳٪ جذب آب
۱۳	Chan and Ji [۱۳]	۵، ۱۰، ۱۵ و ۳۰٪ زئولیت	- افزایش ۷/۶٪، ۸/۶٪، ۱۴/۲٪ و ۵/۳٪ مقاومت فشاری ۲۸ روزه
۱۴	احمدی و همکاران [۲۷]	۱۵٪ زئولیت	- افزایش ۱۸٪ مقاومت فشاری ۲۸ روزه و ۱۸/۳٪ مقاومت فشاری ۹۰ روزه - کاهش نفوذ یون کلراید
			- به ترتیب کاهش ۰٪، ۷/۵٪، ۱۲/۵٪ و ۲۰٪ مقاومت فشاری ۲۸ روزه
۱۵	نادری و همکاران [۱۸]	۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰٪ زئولیت	- کاهش عمق نفوذ آب از ۷۲ میلی‌متر (در مخلوط شاهد) به ترتیب به ۶۴، ۵۵، ۵۹ و ۶۳ میلی‌متر - کاهش ۱۰/۴٪، ۲۳/۲٪، ۱۶/۸٪ و ۱۰/۶٪ جذب آب



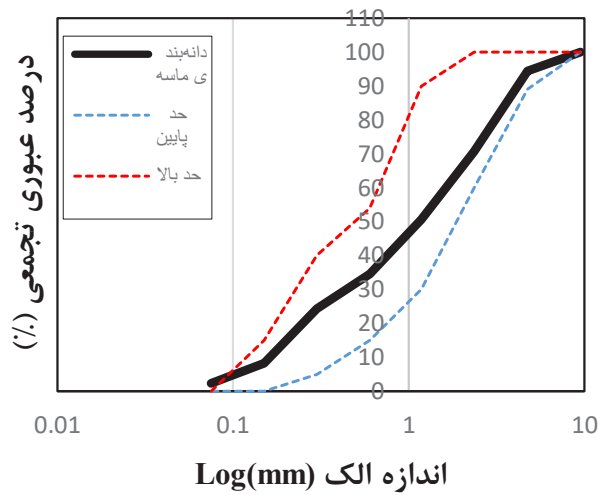
شکل ۲. دانه‌بندی شن ریز

Fig. 2. Grading distribution of fine gravel



شکل ۱. دانه‌بندی شن درشت

Fig. 1. Grading distribution of coarse gravel



شکل ۳. دانه‌بندی ماسه

Fig. 3. Grading distribution of sand

جدول ۲. مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های مصرفی

Table 2. Physical and mechanical properties of aggregates

مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها	شن درشت	شن ریز	ماسه
جذب آب (%)	۱/۷۸	۱/۹۹	۲/۲۹
وزن مخصوص	۲/۵۷	۲/۵۹	۲/۵۴

جدول ۳. آنالیز شیمیایی سیمان و زئولیت

Table 3. Chemical properties of cement and zeolite

ترکیب شیمیایی	سیمان (%)	زئولیت (%)
SiO ₂	۲۰/۲	۶۴/۹
Al ₂ O ₃	۳/۸	۱۲/۳
Fe ₂ O ₃	۳/۸	۰/۴
CaO	۶۴/۱	۲/۱
MgO	۱/۲	۰/۹
SO ₃	۳/۶	۰/۲
Na ₂ O	۱/۴	۲/۲
K ₂ O	۱	۲/۸

جدول ۴. نسبت‌های مخلوط بتن غلتکی

Table 4. Mixture proportions

عنوان طرح	نسبت آب به مواد سیمانی	سیمان (kg/m ³)	زئولیت (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	شن درشت (kg/m ³)	شن ریز (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)
C208-Z0	۰/۷۲	۲۰۸	۰	۱۵۱	۵۱۳/۷۵	۵۱۳/۷۵	۱۰۲۷/۵
Z15	۰/۷۲	۱۷۶/۸	۳۱/۲	۱۵۱	۵۱۳/۷۵	۵۱۳/۷۵	۱۰۲۷/۵
Z30	۰/۷۲	۱۴۵/۶	۶۲/۴	۱۵۱	۵۱۳/۷۵	۵۱۳/۷۵	۱۰۲۷/۵
Z40	۰/۷۲	۱۲۴/۸	۸۳/۲	۱۵۱	۵۱۳/۷۵	۵۱۳/۷۵	۱۰۲۷/۵

۲-۳- روش آزمایش‌ها

فشاری که بر روی نمونه‌های اصلی (نمونه‌های مکعبی ۱۵ سانتی‌متری) انجام شد، مشاهده گردید که با افزایش درصد جایگزینی سیمان با ژئولیت و کاهش سیمان، مقاومت فشاری کاهش یافته است که دلیل این موضوع مستقیماً در ارتباط با فعالیت پوزولانی کم ژئولیت است.

آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های ساخته شده شامل مقاومت فشاری، نفوذ تسریع شده یون کلراید، عمق نفوذ آب، جذب آب، مقاومت الکتریکی، سرعت پالس اولتراسونیک بودند. شایان ذکر است که در ارزیابی دوام بتن، نفوذپذیری اصلی‌ترین نقش را ایفا می‌کند و با عنایت به این موضوع، فارغ از اینکه بتن در معرض چه مکانیزم خرابی باشد، بررسی نفوذپذیری اهمیت دارد. آزمایش‌های مختلفی نیز برای ارزیابی نفوذپذیری انجام شده است که البته هیچکدام به تنهایی کفایت نمی‌کنند و نتیجه‌گیری بر روی مجموعه‌ای از آزمایش‌های مختلف انجام شده است. آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید نیز یکی از این آزمایش‌هاست که صرفاً از منظر بررسی نفوذپذیری مورد استفاده قرار گرفته است. نویسندگان این مقاله متوجه این نکته هستند که نفوذ یون کلراید از جهت خوردگی آرماتور اهمیت دارد و این مسئله در بتن غلتکی حجیم یا اصلاً وجود ندارد و یا بسیار کم‌رنگ است. اما به جهت وجود این آزمایش استاندارد، از آن در راستای ارزیابی نفوذپذیری استفاده شده است.

۲-۳-۲- آزمایش زمان وی بی

به منظور ارزیابی کارایی مخلوط‌های بتن غلتکی، آزمایش زمان وی بی مطابق با استاندارد ASTM C1170 انجام شد. بتن تازه در داخل ظرف استوانه‌ای به وسیله وزنه و لرزش میز شروع به متراکم شدن نمود. لرزش میز به صورت ارتعاش سینوسی با فرکانس ۶۰ هرتز و با دامنه 0.08 ± 0.43 میلی‌متر است. از زمان روشن شدن میز لرزه تا زمانی که بتن در دور تا دور فضای حلقوی بین ظرف و وزنه شروع به بالا آمدن کند، به وسیله زمان سنج ثبت شد که به عنوان زمان وی بی در نظر گرفته می‌شود که معیاری است برای سنجش کارایی مخلوط‌های بتن غلتکی. از نتایج این آزمایش به منظور ارزیابی تأثیر ۱۵٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ ژئولیت بر کارایی بتن غلتکی کم سیمان بهره گرفته شده است. نتیجه آزمایش زمان وی بی در قسمت ۳-۲ ارائه شده است.

۲-۳-۱- آزمایش شاخص فعالیت پوزولانی

آزمایش شاخص فعالیت پوزولانی مطابق با استاندارد ASTM C311 و به منظور تعیین واکنش‌پذیری ژئولیت انجام شد. به منظور انجام این آزمایش، ملات‌های سیمانی حاوی ۵۰۰ گرم سیمان، ۲۴۲ گرم آب و ۱۳۷۵ گرم ماسه در دو طرح ۰ و ۲۰٪ ژئولیت جایگزین سیمان و در نمونه‌های مکعبی ۵ سانتی‌متری ساخته شدند. نمونه‌های ساخته شده تا رسیدن سن مورد نظر مطابق با توصیه استاندارد ASTM C 109/C 109 M در داخل آب آهک اشباع تحت عمل‌آوری قرار گرفتند. آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روز بر روی نمونه‌های ساخته شده انجام شد. هدف از انجام آزمایش شاخص فعالیت پوزولانی آن است که واکنش پوزولانی ژئولیت در سنین اولیه بررسی و با واکنش هیدراته شدن مقایسه شود، زیرا طبق نتایج آزمایش مقاومت فشاری در این پژوهش که در قسمت نتایج آزمایش‌ها و تفسیر ارائه شده است، ژئولیت مقاومت فشاری را نسبت به نمونه شاهد کاهش داده است و قصد نویسندگان از انجام آزمایش شاخص فعالیت پوزولانی ژئولیت، استفاده از این آزمایش برای تفسیر هر چه بهتر نتایج آزمایش مقاومت فشاری است، به این صورت که بر اساس نتایج آزمایش شاخص فعالیت پوزولانی که در قسمت ۳-۱ ارائه شده است، فعالیت پوزولانی ژئولیت در سنین اولیه کمتر از واکنش هیدراته شدن سیمان است، به همین دلیل در نتایج آزمایش مقاومت

۲-۳-۳- آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری مطابق با استاندارد ASTM C39 انجام شد. به منظور انجام این آزمایش نمونه‌های مکعبی ۱۵ سانتی‌متری ساخته شدند و در سنین ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۱ روز مورد آزمایش قرار گرفتند. مطابق نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه، در میان نمونه‌های دارای ژئولیت، نمونه‌های حاوی ۱۵٪ ژئولیت مقاومت بیشتری نسبت به سایر درصدها داشتند، از این رو برای آزمایش‌های دوامی، نمونه‌های دارای ۱۵٪ ژئولیت ساخته شد و نتایج آن‌ها با مخلوط شاهد مقایسه گردید.

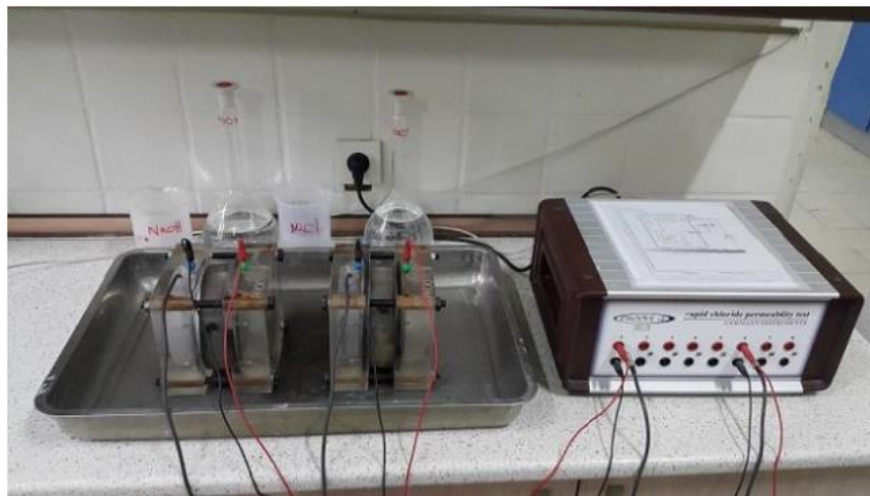
۲-۳-۴- آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید (RCPT)

آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید مطابق با استاندارد ASTM C1202 انجام شد. ابتدا از نمونه‌های مکعبی ۱۵ سانتی‌متری که به سن ۲۸ روز رسیده بودند، مغزه‌هایی با قطر ۱۰ و ارتفاع ۵ سانتی‌متر گرفته شد. مغزه‌ها مطابق شکل ۴، به مدت ۲۴ ساعت در شرایط خلاء قرار گرفتند، سپس هر کدام از دو انتهای مغزه‌ها در تماس با یک محفظه قرار داده شدند که در یکی از محفظه‌ها محلول ۳٪ کلرید سدیم (NaCl) ریخته



شکل ۴. قرارگیری نمونه‌ها در شرایط خلأ

Fig. 4. Placement of specimens in vacuum conditions



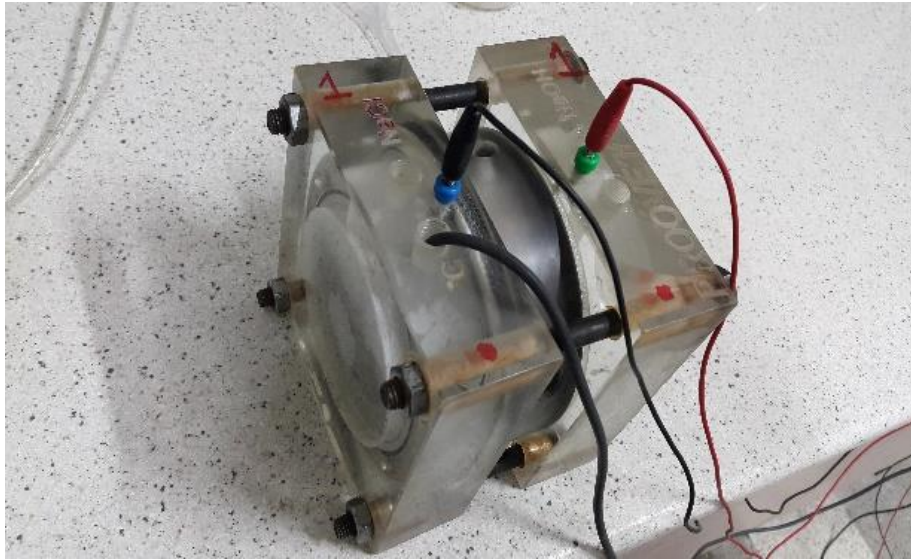
شکل ۵. دستگاه آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید

Fig. 5. Rapid chloride permeability test equipment

این اختلاف پتانسیل برقرار گردد. شار عبوری بین دو سر مغزه‌ها پس از ۶ ساعت برحسب واحد کولن^۱ اندازه‌گیری شد. نتایج آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید در قسمت ۳-۴ ارائه و بحث گردیده است.

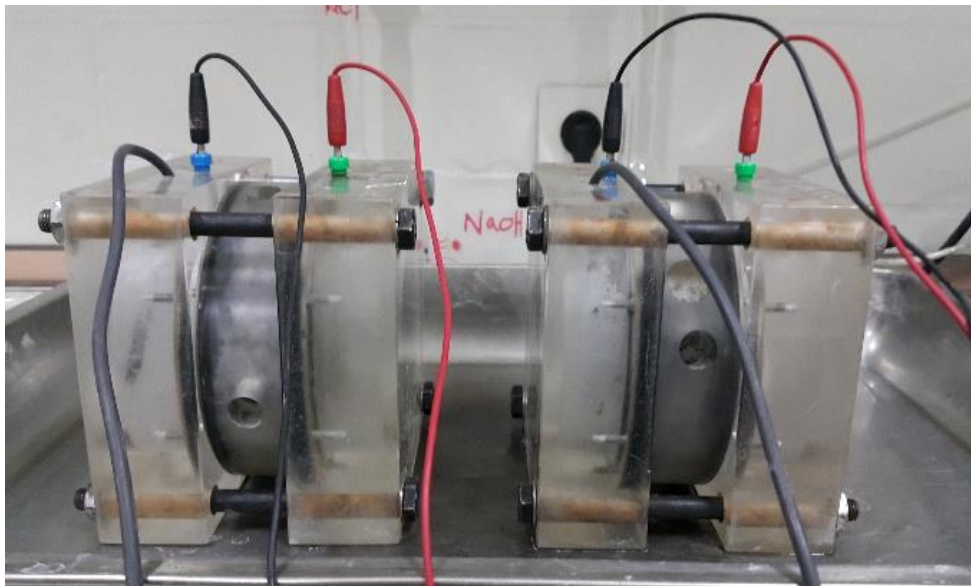
شد و به قطب منفی وصل گردید و در محفظه دیگر نیز محلول ۰/۳ نرمال هیدروکسید سدیم (NaOH) ریخته شد که به قطب مثبت وصل شد. پس از آن مطابق شکل‌های ۵، ۶ و ۷ دو سر مغزه‌ها به مدت ۶ ساعت تحت اختلاف پتانسیل ۶۰ ولت قرار گرفتند تا جریان الکتریکی بین دو سر مغزه‌ها در اثر

1 Coulomb



شکل ۶. آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید

Fig. 6. Rapid chloride permeability test



شکل ۷. جزئیات آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید

Fig. 7. Details of rapid chloride permeability test



شکل ۸. قرارگیری نمونه‌ها در دستگاه عمق نفوذ آب

Fig. 8. Placement of specimens in water penetration depth apparatus



شکل ۱۰. دو نیم شده نمونه‌ها توسط دستگاه

Fig. 10. Specimen after halving by the apparatus

آزمایش (شکل ۸) به مقدار ۵۰ کیلوپاسکال تنظیم شد. پس از ۷۲ ساعت نمونه‌ها از دستگاه خارج شده و توسط جک مقاومت فشاری بر روی قطرشان به دو نیم تقسیم شدند (شکل‌های ۹ و ۱۰). عمق پیشروی آب در داخل نمونه‌ها اندازه‌گیری شد (شکل‌های ۱۱ و ۱۲).



شکل ۹. دو نیم شدن نمونه‌ها توسط دستگاه

Fig. 9. Halving of specimens by the apparatus

۲-۳-۵- آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار در بتن
آزمایش عمق نفوذ آب مطابق با استاندارد EN 12390-8 بر روی نمونه‌های مکعبی ۱۵ سانتی‌متری در سن ۲۸ روز انجام گرفت. ابتدا نمونه‌های ساخته شده به مدت ۲۴ ساعت در گرمخانه با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند تا کاملاً خشک شوند. فشار وارد بر نمونه‌ها در دستگاه



شکل ۱۱. میزان نفوذ آب در نمونه‌ها

Fig. 11. Water penetration depth in specimens



شکل ۱۲. نمای بزرگنمایی شده میزان نفوذ آب در نمونه‌ها

Fig. 12. Close up of water penetration depth in specimens



شکل ۱۳. دستگاه سرعت پالس اولتراسونیک

Fig. 13. Ultrasonic pulse velocity test apparatus

۲-۳-۶- آزمایش جذب آب بتن

انجام شد. سپس به وسیله حجم ظرف استوانه‌ای، وزن مخصوص بتن تازه مطابق رابطه ۲ محاسبه شد.

$$\text{وزن ظرف خالی} - \text{وزن ظرف حاوی بتن} = \text{وزن مخصوص بتن تازه} \times \text{حجم ظرف استوانه‌ای} \quad (۲)$$

۲-۳-۸- آزمایش سرعت پالس اولتراسونیک

این آزمایش مطابق با استاندارد ASTM C597 در سن ۲۸ روز انجام شد. مطابق شکل ۱۳، مبدل‌های دستگاه اولتراسونیک بر روی دو وجه روبرویی نمونه‌های مکعبی ۱۵ سانتی‌متری قرار داده شدند. سرعت عبور موج از داخل نمونه‌ها برحسب واحد m/s ثبت شد. بحث و نتیجه‌گیری از آزمایش در قسمت ۳-۸ ارائه شده است. هدف از انجام آزمایش سرعت پالس اولتراسونیک آن بوده است که با توجه به هدف تحقیق که ارزیابی تأثیر ژئولیت بر بهبود نفوذپذیری بتن غلتکی کم سیمان می‌باشد، از نتایج آزمایش سرعت پالس اولتراسونیک بهره برده و به عنوان شاخصه‌ای از نفوذپذیری، بررسی نماییم که آیا ژئولیت توانسته است سرعت عبور موج‌های اولتراسونیک از داخل مصالح بتنی نمونه‌ها را افزایش دهد و به عبارت دیگر آیا ژئولیت توانسته است نفوذپذیری را کاهش دهد یا خیر.

آزمایش جذب آب مطابق با استاندارد ASTM C642 در سن ۲۸ روز انجام شد. ابتدا نمونه‌ها در داخل گرمخانه با دمای ۱۰.۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند تا کاملاً خشک شوند و هر ۲۴ ساعت وزن آن‌ها ثبت گردید، اگر اختلاف بین وزن‌های به دست آمده از مراحل متوالی از ۰.۵٪ وزن کمتر بیشتر بود، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت دیگر در گرمخانه قرار می‌گرفتند. این عمل تا زمانی تکرار شد تا اختلاف بین وزن‌های متوالی کمتر از ۰.۵٪ وزن کمتر شود. در نهایت وزن خشک نهایی به عنوان وزن خشک نمونه‌ها ثبت شد (m_0). در مرحله بعد نمونه‌ها داخل آب قرار داده شدند و وزن آن‌ها پس از گذشت ۰.۵، ۱ و ۲۴ ساعت از زمان قرارگیری در آب ثبت شد (m). در نهایت درصد جذب آب بتن مطابق با رابطه ۱ محاسبه شد: (بحث و نتیجه‌گیری در خصوص نتایج آزمایش جذب آب در قسمت ۳-۶ ارائه شده است).

$$\text{درصد جذب آب بتن} = \left(\frac{m - m_0}{m_0} \right) \times 100 \quad (۱)$$

۲-۳-۷- آزمایش وزن مخصوص بتن تازه (چگالی بتن)

آزمایش وزن مخصوص بتن تازه مطابق با استاندارد ASTM C1۳۸



شکل ۱۴. مقاومت الکتریکی بتن

Fig. 14. Electrical Resistivity of concrete

پژوهش رضانیان پور و همکاران (۲۰۱۵) با عنوان ویژگی‌های میکروسکوپی و ماکروسکوپی بتن‌های حاوی زئولیت طبیعی در این خصوص است [۱۴].

۳-۲- آزمایش زمان وی بی

در شکل ۱۶ نتایج زمان وی بی مخلوط‌های بتن غلتکی ارائه شده است. بر اساس این نمودار، با افزودن درصد جایگزینی سیمان با زئولیت طبیعی، زمان وی بی کاهش یافته است به طوری با جایگزینی سیمان با ۱۵٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ زئولیت در مخلوط‌های بتن غلتکی، زمان وی بی به ترتیب ۲۵٪، ۳۱٪ و ۴۷٪ نسبت به مخلوط شاهد کاهش یافته است. دلیل این موضوع ریزتر بودن ذرات زئولیت نسبت به ذرات سیمان است، از این رو با افزایش درصد زئولیت، پرکننده (ریزدانه) بیشتری به مخلوط اضافه شده است، بنابراین با وجود اینکه جذب آب زئولیت بیشتر از سیمان است اما توزیع دانه‌بندی زئولیت و سنگدانه‌ها به گونه‌ای بوده است که چگالی خشک سنگدانه‌ها^۱ (چگالی خشک سنگدانه‌ها به این صورت انجام می‌شود که سیمان، زئولیت، شن و ماسه موجود در طرح مخلوط بدون اضافه کردن آب با هم مخلوط شده و بر روی میز لرزه متراکم می‌شوند، در نهایت چگالی خشک مصالح محاسبه می‌شود) بیشتر شده و این موضوع باعث کاهش جذب آب توسط دانه‌های جامد در مخلوط بتن شده است، از این رو با افزایش درصد زئولیت، آبی که منجر به افزایش روانی مخلوط می‌شود بیشتر شده و در نتیجه زمان وی بی کاهش یافته است. نتایج تحلیل آماری داده‌های زمان وی بی در جدول ۵ ارائه شده است.

۳-۳-۹- آزمایش مقاومت الکتریکی

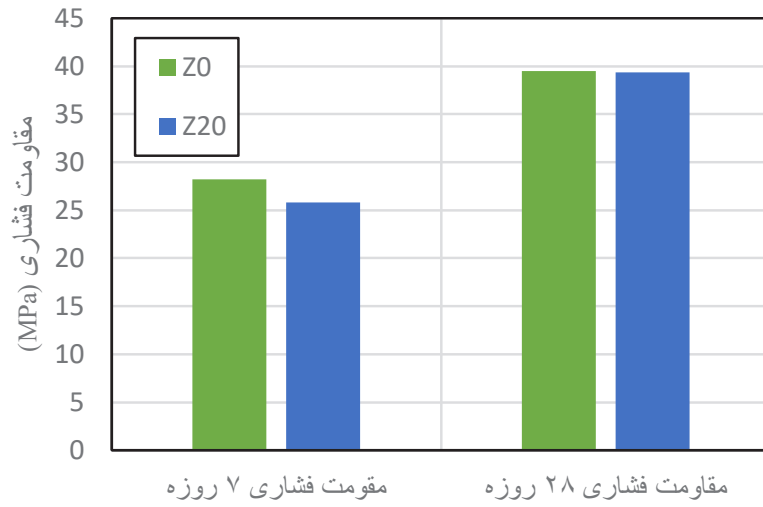
آزمایش مقاومت الکتریکی در سن ۲۸ روز بر اساس روش چهار نقطه‌ای بر روی نمونه‌های مکعبی ۱۵ سانتی‌متری انجام شد. مطابق شکل ۱۴ مقاومت الکتریکی توسط دستگاه برحسب کیلو اهم سانتی‌متر ثبت شد. بحث و نتیجه‌گیری از آزمایش مقاومت الکتریکی در قسمت ۳-۹ ارائه شده است.

۳-۳- نتایج آزمایش‌ها و تفسیر

۳-۱- آزمایش شاخص فعالیت پوزولانی

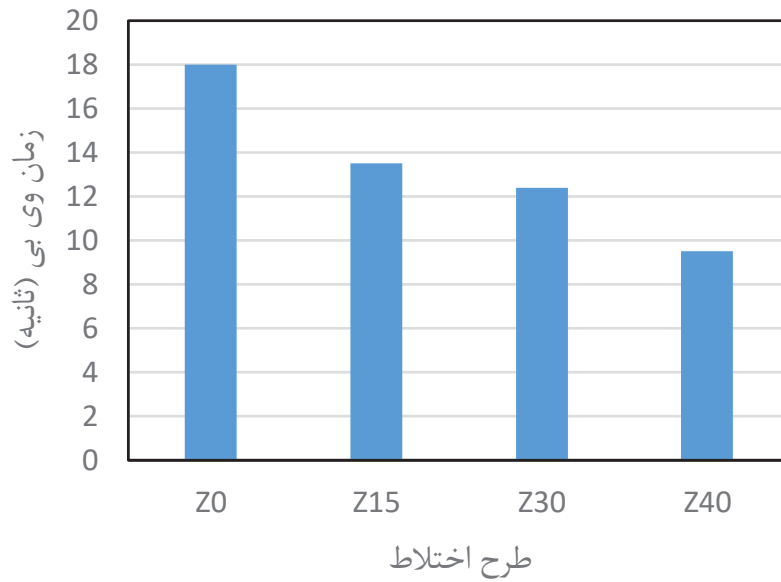
نتایج آزمایش شاخص فعالیت پوزولانی در شکل ۱۵ ارائه شده است. بر اساس این نتایج، با جایگزین کردن ۲۰٪ وزن سیمان با زئولیت، مقاومت فشاری‌های ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب ۸/۵٪ و ۰/۴٪ کاهش یافته است. مطابق مقادیر به دست آمده از این آزمایش، شاخص فعالیت پوزولانی زئولیت ۹۶/۲٪ است. از این نتایج به صورت کیفی در راستای تفسیر هر چه بهتر نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های اصلی بهره گرفته شده است، به این صورت که در نتایج آزمایش مقاومت فشاری که بر روی نمونه‌های اصلی (نمونه‌های مکعبی ۱۵ سانتی‌متری) انجام شد، مشاهده گردید که با افزایش درصد جایگزینی سیمان با زئولیت و کاهش سیمان، مقاومت فشاری کاهش یافته است که دلیل این موضوع مستقیماً در ارتباط با فعالیت پوزولانی کم زئولیت است، زیرا بر اساس نتایج این آزمایش، فعالیت پوزولانی زئولیت در سنین اولیه (۷ روز) کمتر از واکنش هیدراتاسیون سیمان و در سن ۲۸ روز تقریباً با آن برابر است. این نتیجه تأیید کننده نتیجه حاصل از

1 Packing density



شکل ۱۵. نتایج آزمایش شاخص فعالیت پوزولانی

Fig. 15. Results of pozzolanic activity index test



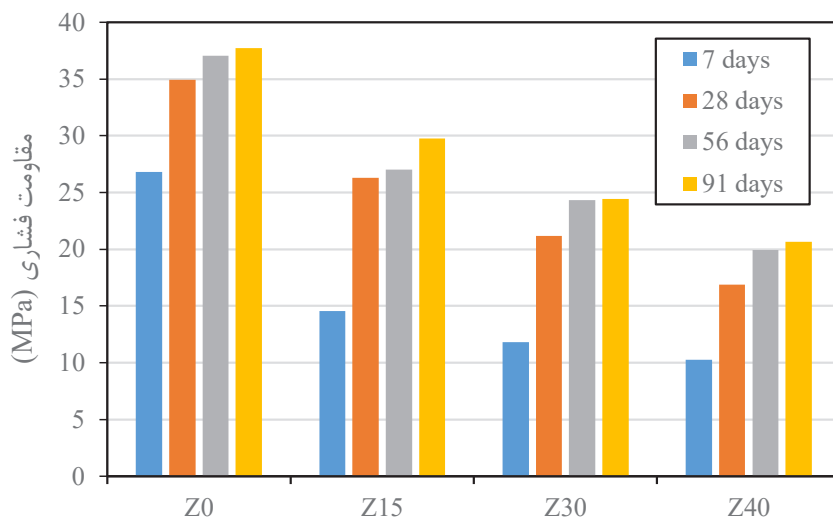
شکل ۱۶. زمان وی بی طرح‌های بتن غلتکی

Fig. 16. V.B. time of RCC mixtures

جدول ۵. نتایج تحلیل آماری داده‌های زمان وی بی

Table 5. The results of statistical analysis of V.B. time data

فاصله	اطمینان برای میانگین نمونه‌ای	تعداد مقادیر	مجموع مقادیر	بزرگ‌ترین مقدار	کوچک‌ترین مقدار	دامنه تغییرات	چولگی	کشیدگی	واریانس نمونه‌ای	انحراف استاندارد نمونه‌ای	خطای استاندارد	میانگین	شاخص
	۵/۶۲	۴	۵۳/۴	۱۸	۹/۵	۸/۵	۰/۶۷	۱/۲۸	۱۲/۴۶	۳/۵۳	۱۲/۹۵	۱۳/۳۵	مقادیر



شکل ۱۷. نتایج مقاومت فشاری

Fig.17. Results of compressive strength

هیدراتاسیون است. همچنین عنوان شده است که ژئولیت در افزایش مقاومت مخلوط‌های دارای نسبت‌های آب به سیمان بالاتر از ۰/۴۵ شرکت نمی‌کند [۱۳]. در پژوهش نجیمی و همکاران (۲۰۱۲) با عنوان مطالعه تجربی بر روی خواص دوام بتن حاوی ژئولیت به عنوان یک پوزولان طبیعی بسیار واکنش‌پذیر نیز نمونه‌های دارای ۱۵ و ۳۰٪ ژئولیت (جایگزین سیمان) مقاومت فشاری کمتری نسبت به نمونه شاهد داشتند و افزایش درصد ژئولیت منجر به کاهش مقاومت فشاری در همه سنین شد [۱۲]. در تحقیق ولی‌پور و همکاران (۲۰۱۳) نیز در نمونه‌های دارای ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ ژئولیت (جایگزین سیمان) با افزایش درصد ژئولیت تا ۲۰٪، مقاومت فشاری ۲۸ روزه کاهش یافت [۱۱]. نتایج تحلیل آماری داده‌های مقاومت فشاری در جدول ۶ ارائه شده است.

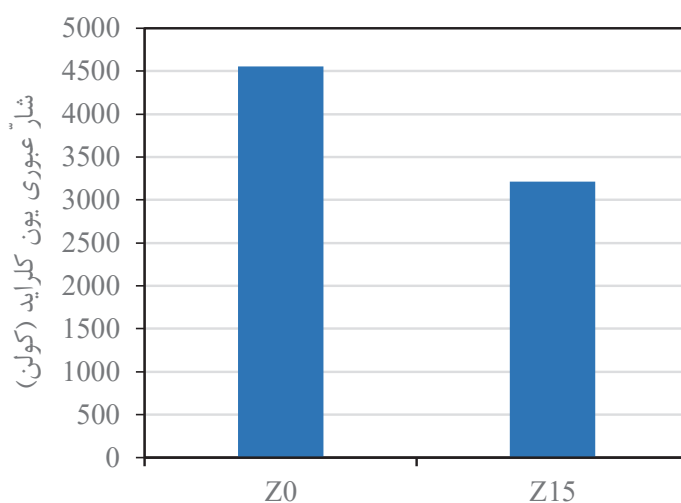
۳-۳- آزمایش مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری در شکل ۱۷ ارائه شده است. بر اساس نتایج مقاومت فشاری ۷ روزه، جایگزینی سیمان با ۱۵٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ ژئولیت به ترتیب باعث کاهش ۴۵/۷٪، ۵۶٪ و ۶۱/۷٪ مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد شده است. این مقادیر کاهش برای مقاومت فشاری ۲۸ روزه به ترتیب ۲۴/۷٪، ۳۹/۵٪ و ۵۱/۶٪، برای نتایج ۵۶ روزه به ترتیب ۲۷٪، ۳۴/۳٪ و ۴۶/۱٪ و برای نتایج ۹۱ روزه نیز، به ترتیب ۲۱/۲٪، ۳۵/۳٪ و ۴۵/۳٪ می‌باشد. در همه سنین، نمونه شاهد بیشترین مقاومت را داشته و با افزایش درصد ژئولیت، مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش یافته است. دلیل این موضوع کاهش سیمان به دلیل جایگزینی بخشی از آن با ژئولیت است. زیرا سیمان یکی از عوامل مهم برای افزایش مقاومت از طریق واکنش

جدول ۶. نتایج تحلیل آماری داده‌های مقاومت فشاری

Table 6. The results of statistical analysis of compressive strength data

فاصله	اطمینان برای میانگین نمونه‌ای	تعداد مقادیر	مجموع مقادیر	بزرگ‌ترین مقدار	کوچک‌ترین مقدار	دامنه تغییرات	چولگی	کشیدگی	واریانس نمونه‌ای	انحراف استاندارد نمونه‌ای	میانگین	خطای استاندارد	میانگین	شاخص مقادیر
	۴/۴۵	۱۶	۳۸۳/۶۸	۳۷/۷۵	۱۰/۲۸	۲۷/۴۷	۰/۰۹	-۰/۶۶	۶۹/۷۷	۸/۳۵	۲۴/۳۹	۲/۰۸	۲۳/۹۸	مقادیر



شکل ۱۸. شار عبوری جریان یون کلراید از داخل نمونه‌ها

Fig.18. Charge passed of chloride ion through the specimens

کاهش یافته است. در پژوهش رضانیان پور و همکاران (۲۰۱۵) با عنوان ویژگی‌های میکروسکوپی و ماکروسکوپی بتن‌های حاوی زئولیت طبیعی و پژوهش نجیمی و همکاران (۲۰۱۲) با عنوان مطالعه تجربی بر روی خواص دوام بتن حاوی زئولیت به عنوان یک پوزولان طبیعی بسیار واکنش‌پذیر، نمونه‌های دارای ۱۵٪ زئولیت، نفوذ یون کلراید کمتری را نسبت به طرح شاهد دارا بودند [۱۴ و ۱۲]. در پژوهش نجیمی و همکاران (۲۰۱۲) نتایج نشان دادند که نتایج نفوذ یون کلراید برای بتن‌های حاوی ۱۵٪ و ۳۰٪ زئولیت به ترتیب حدود ۲۷/۵٪ و ۸/۲٪ مخلوط شاهد بود. در پژوهش رضانیان پور و همکاران نیز، نفوذ یون کلراید برای بتن‌های حاوی ۱۰٪ و ۱۵٪ زئولیت به ترتیب حدود ۵۰٪ و ۵۸٪ مخلوط شاهد بود.

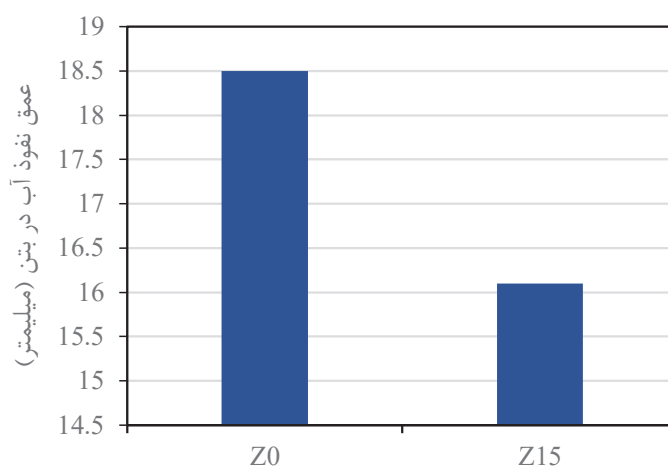
۳-۴- آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید

نتایج این آزمایش در شکل ۱۸ ارائه شده است. مطابق این نمودار جایگزینی سیمان با ۱۵٪ زئولیت باعث کاهش شار عبوری یون کلراید در بتن غلتکی به میزان ۲۹/۴٪ شده است. مطابق جدول ارائه شده در ASTM C1۲۰۲ (جدول ۷)، نفوذپذیری نمونه شاهد بتن غلتکی در محدوده زیاد قرار دارد که با جایگزینی سیمان با ۱۵٪ زئولیت، نفوذپذیری آن به محدوده متوسط رسیده است. بنابراین پوزولان زئولیت در کاهش نفوذپذیری یون کلراید بتن غلتکی حجیم در محدوده پژوهش حاضر مؤثر است، دلیل این موضوع خواص مطلوب زئولیت از قبیل واکنش پوزولانی مناسب در سن آزمایش (۲۸ روز) و خاصیت پر کنندگی آن است که منجر به پر شدن حفرات بتن شده است و به واسطه آن، شار جریان الکتریکی از داخل بتن

جدول ۷. نفوذپذیری یون کلراید بر اساس شار عبوری

Table 7. Chloride Ion Penetrability Based on Charge Passed

شار عبوری (کولن)	نفوذپذیری یون کلراید
> ۴۰۰۰	زیاد
۲۰۰۰ - ۴۰۰۰	متوسط
۱۰۰۰ - ۲۰۰۰	کم
۱۰۰ - ۱۰۰۰	خیلی کم
< ۱۰۰	قابل صرف نظر



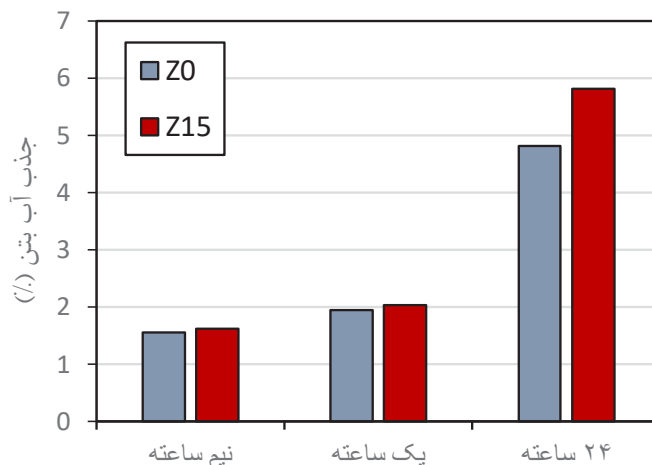
شکل ۱۹. نتایج عمق نفوذ آب

Fig. 19. Results of water penetration depth

بر واکنش‌های پوزولانی ژئولیت است که در نتیجه آن بلورهای هیدروکسید کلسیم مصرف شده و ژل متراکم C-S-H تولید شده است که نفوذپذیری بتن را کاهش داده است. همچنین خاصیت هسته‌زایی ژئولیت نیز به کاهش نفوذپذیری کمک کرده است. نتیجه حاصل شده از آزمایش عمق نفوذ آب در پژوهش حاضر تأیید کننده نتایج به دست آمده از پژوهش‌های رمضان‌پور و همکاران (۲۰۱۵) [۱۴] و نجیمی و همکاران (۲۰۱۲) [۱۲] است، در این پژوهش‌ها نیز نمونه‌های دارای ۱۵٪ ژئولیت عمق نفوذ آب کمتری نسبت به نمونه‌های شاهد داشتند. شایان ذکر است که نتایج آزمایش عمق نفوذ در تحقیق حاضر روندی مشابه با آزمایش RCPT دنبال کرده است. در نتایج

۳-۵- آزمایش عمق نفوذ آب

نتایج آزمایش عمق نفوذ آب در شکل ۱۹ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که جایگزینی سیمان با ۱۵٪ ژئولیت باعث کاهش ۱۳٪ عمق نفوذ آب در نمونه‌های بتن غلتکی شده است. دلیل این موضوع خواص شیمیایی و فیزیکی پوزولان ژئولیت در کاهش نفوذپذیری بتن غلتکی است. خاصیت فیزیکی همان خاصیت پرکنندگی ژئولیت به دلیل ریزتر بودن ذرات ژئولیت نسبت به سیمان است که با جایگزینی بخشی از سیمان با ژئولیت، پیوستگی و یکنواختی خمیر بتن بیشتر شده و ذرات ریز ژئولیت در فضاهای مویینه و حفرات ریز بتن قرار گرفته‌اند. خاصیت شیمیایی نیز ناظر



شکل ۲۰. نتایج جذب آب بتن

Fig. 20. Water absorption results of the concrete

همکاران (۲۰۱۲) [۱۲] با عنوان مطالعه تجربی بر روی خواص دوام بتن حاوی زئولیت به عنوان یک پوزولان طبیعی بسیار واکنش پذیر و ولی پور و همکاران (۲۰۱۳) [۱۱] با عنوان مقایسه یک پوزولان طبیعی، زئولیت، با متاکائولین و میکروسیلیس از نظر تأثیر آن‌ها بر ویژگی‌های دوام بتن: یک مطالعه آزمایشگاهی، نیز جذب آب نمونه‌های حاوی زئولیت بیشتر از نمونه شاهد بود. نتایج تحلیل آماری داده‌های درصد جذب آب بتن در جدول ۸ ارائه شده است.

۳-۷- آزمایش وزن مخصوص بتن تازه (چگالی بتن)

نتایج وزن مخصوص بتن تازه در شکل ۲۱ ارائه شده است. با افزایش درصد جایگزینی سیمان با زئولیت، وزن مخصوص بتن غلظتی افزایش یافته است به طوری که با جایگزینی ۱۵، ۳۰ و ۴۰٪ سیمان با زئولیت، وزن مخصوص بتن غلظتی به ترتیب ۲/۹٪، ۴/۵٪ و ۵/۵٪ نسبت به طرح شاهد افزایش یافته است. دلیل این موضوع آن است که شکل دانه‌بندی زئولیت به گونه‌ای بوده است که با جایگزینی بخشی از سیمان با زئولیت، چگالی خشک سنگدانه‌ها افزایش یافته است، از این رو با افزایش درصد جایگزینی سیمان با زئولیت، وزن مخصوص مخلوط‌ها بیشتر شده است. در پژوهش ناگروکین و گیرسکاس (۲۰۱۶) [۱۹] نیز نتیجه مشابه در این خصوص کسب شده است. نتایج تحلیل آماری داده‌های وزن مخصوص بتن تازه در جدول ۹ ارائه شده است.

نفوذ تسریع شده یون کلراید نیز نمونه‌های حاوی ۱۵٪ زئولیت، نفوذ یون کلراید کمتری نسبت به مخلوط شاهد داشتند و در نتیجه دارای نفوذپذیری کمتری بودند که مشابه نتیجه گرفته شده از آزمایش عمق نفوذ آب است، زیرا در این آزمایش نیز نمونه‌های دارای ۱۵٪ زئولیت عمق نفوذ آب و در نتیجه نفوذپذیری کمتری نسبت به نمونه‌های شاهد داشتند.

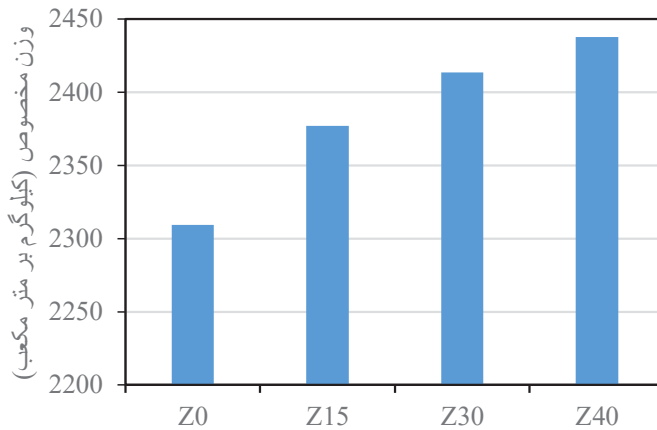
۳-۶- آزمایش جذب آب بتن

نتایج آزمایش جذب آب بتن در شکل ۲۰ ارائه شده است. مطابق این نتایج، با جایگزین کردن ۱۵٪ وزن سیمان با زئولیت، جذب آب ۰/۵، ۱ و ۲۴ ساعته به ترتیب ۳/۸۴٪، ۴/۱٪ و ۲۰/۵٪ افزایش یافته است. مطابق نتایج جذب آب نیم ساعته، یک ساعته و ۲۴ ساعته، جذب آب نمونه‌های دارای زئولیت بیشتر از بتن شاهد بوده است و با افزایش زمان قرارگیری نمونه‌ها در آب، درصد جذب آب نمونه‌ها بیشتر شده است. دلیل این موضوع ریزتر بودن دانه‌های زئولیت نسبت به دانه‌های سیمان است، بنابراین زئولیت سطح مخصوص بیشتری نسبت به سیمان دارد و در نتیجه جذب آب زئولیت به طور قابل توجهی بیشتر از سیمان است، جذب آب بتن نیز ناشی از جذب آب اجزای آن است، از این رو هنگامی که زئولیت در بتن جایگزین بخشی از سیمان می‌شود بتن‌های دارای زئولیت تا حداکثر حدود ۲۰٪ آب بیشتری نسبت به نمونه‌های شاهد جذب می‌کنند. از دلایل دیگر آن است که با توجه به اینکه جذب آب تابع ساختار منافذ می‌باشد و به این دلیل که زئولیت ساختاری با منافذ فراوان دارد، هنگامی که زئولیت جایگزین بخشی از سیمان می‌شود جذب آب بتن افزایش می‌یابد. در پژوهش‌های نجیمی و

جدول ۸. نتایج تحلیل آماری داده‌های درصد جذب آب بتن

Table 8. Results of statistical analysis of concrete water absorption data

فاصله	اطمینان برای میانگین نمونه‌ای	تعداد مقادیر	مجموع مقادیر	بزرگ‌ترین مقدار	کوچک‌ترین مقدار	دامنه تغییرات	چولگی	کشیدگی	واریانس نمونه‌ای	انحراف استاندارد نمونه‌ای	میانه	خطای استاندارد	میانگین	شاخص مقادیر
۱/۹۵	۶	۱۷/۷۹	۵/۸۱	۱/۵۶	۴/۲۵	۱/۰۴	-۱/۱۵	۳/۴۴	۱/۸۵	۱/۹۹	۰/۷۶	۲/۹۶	مقادیر	



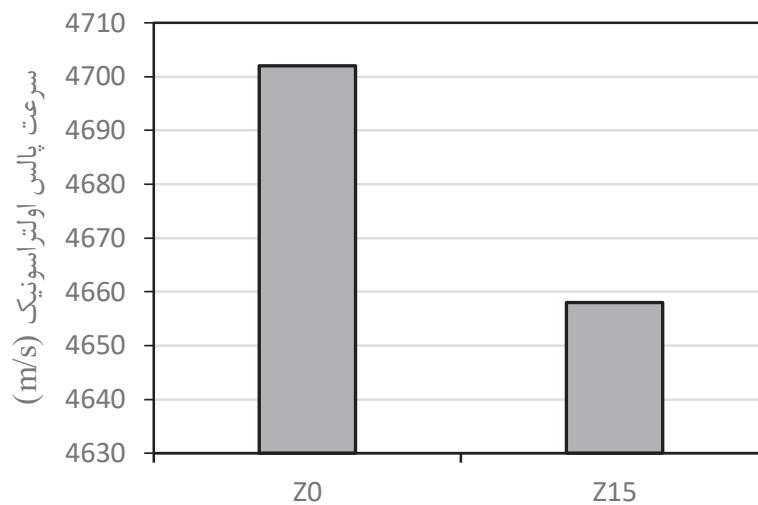
شکل ۲۱. نتایج وزن مخصوص بتن تازه

Fig. 21. Specific weight of fresh concrete results

جدول ۹. نتایج تحلیل آماری داده‌های وزن مخصوص بتن تازه

Table 9. Results of statistical analysis of specific weight of fresh concrete data

فاصله	اطمینان برای میانگین نمونه‌ای	تعداد مقادیر	مجموع مقادیر	بزرگ‌ترین مقدار	کوچک‌ترین مقدار	دامنه تغییرات	چولگی	کشیدگی	واریانس نمونه‌ای	انحراف استاندارد نمونه‌ای	میانه	خطای استاندارد	میانگین
۸۹/۰۴	۴	۹۵۳۷/۵۸	۲۴۳۷/۸۶	۲۳۰۹/۲۵	۱۲۸/۶۱	-۰/۹۴	۰/۳۶	۳۱۳۰/۹۹	۵۵/۹۵	۲۳۹۵/۲۳	۲۷/۹۸	۲۳۸۴/۳۹	



شکل ۲۲. نتایج سرعت پالس اولتراسونیک

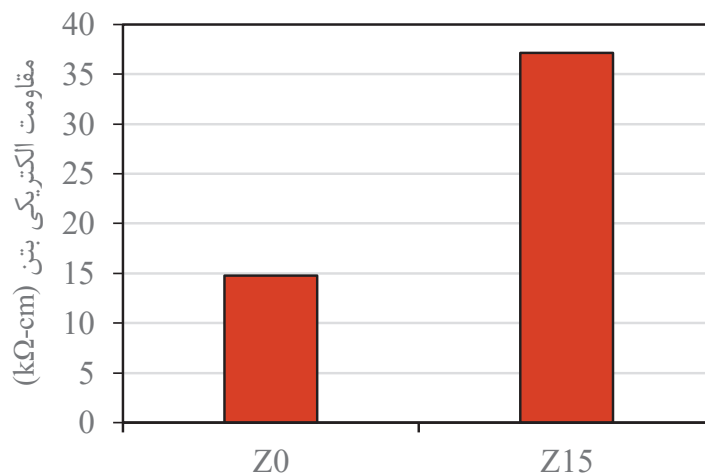
Fig. 22. Results of ultrasonic pulse velocity test

۳-۸- آزمایش سرعت پالس اولتراسونیک

مطابق شکل ۲۲ که نتایج به دست آمده از آزمایش سرعت پالس اولتراسونیک در آن ارائه شده است، با جایگزین کردن ۱۵٪ وزن سیمان با زئولیت، سرعت پالس نمونه‌ها اندکی (۱٪) کاهش یافته است. با توجه به این که سرعت پالس اولتراسونیک متناسب با مقاومت فشاری است و سن انجام آزمایش بر روی نمونه‌ها ۲۸ روز بوده است، نتایج آزمایش سرعت پالس اولتراسونیک با نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه مقایسه می‌شود، پرسا و همکاران (۲۰۲۱) در تحقیق خود با عنوان همبستگی بین تست مقاومت فشاری تک محوری و سرعت پالس اولتراسونیک در سیمان با افزودنی‌های مختلف پوزولانی، از طریق انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری و سرعت پالس اولتراسونیک بر روی نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان‌های مختلف و با درصد‌های جایگزینی متفاوت و با رسم نمودارهای همبستگی بین نتایج به دست آمده از این دو آزمایش دریافتند که در روابط خطی و غیرخطی، مقاومت فشاری دارای رابطه مستقیم با سرعت پالس اولتراسونیک است [۲۸]. همان طور که مشاهده می‌شود، نتایج آزمایش سرعت پالس اولتراسونیک روندی مشابه با آزمایش مقاومت فشاری را دنبال کرده است، در داده‌های مقاومت فشاری ۲۸ روزه نیز مشاهده شد که جایگزینی سیمان با زئولیت باعث کاهش مقاومت فشاری می‌شود.

۳-۹- آزمایش مقاومت الکتریکی

نتایج مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتن غلتکی در شکل ۲۳ ارائه شده است. این نتایج نشان می‌دهند که جایگزینی ۱۵٪ سیمان با زئولیت، مقاومت الکتریکی نمونه‌ها را ۱۵۱/۲٪ افزایش داده است. این موضوع بیانگر تأثیر بسزای زئولیت در بهبود خصوصیات دوامی و کاهش نفوذپذیری بتن غلتکی کم سیمان است. این روند در نتایج آزمایش‌های RCPT و عمق نفوذ آب نیز مشاهده شد. در پژوهش احمدی و شکرچی زاده (۲۰۱۰) با عنوان استفاده از زئولیت طبیعی به عنوان یک پوزولان، پژوهش ولی‌پور و همکاران (۲۰۱۳) با عنوان مقایسه یک پوزولان طبیعی، زئولیت، با متاکائولین و میکروسیلیس از نظر تأثیر آن‌ها بر ویژگی‌های دوام بتن: یک مطالعه آزمایشگاهی و پژوهش رمضان‌پور و همکاران (۲۰۱۵) با عنوان ویژگی‌های میکروسکوپی و ماکروسکوپی بتن‌های حاوی زئولیت طبیعی نیز نتایج مشابه در خصوص آزمایش مقاومت الکتریکی کسب شد، در این پژوهش‌ها جایگزینی بخشی از سیمان با زئولیت باعث افزایش مقاومت الکتریکی نمونه‌ها شد [۱۴، ۱۱ و ۱۰].



شکل ۲۳. نتایج مقاومت الکتریکی

Fig. 23. Results of the electrical resistivity test

۴- نتیجه گیری

ابتدا طرح‌های بتن غلتکی با چهار درصد جایگزینی سیمان با زئولیت ساخته شدند و مخلوط‌های بتنی تازه تحت آزمایش‌های زمان وی بی و وزن مخصوص قرار گرفتند. سپس آزمایش‌های مقاومت فشاری، نفوذ تسریع شده یون کلراید، عمق نفوذ آب تحت فشار، جذب آب، سرعت پالس اولتراسونیک و مقاومت الکتریکی بر روی نمونه‌های بتنی ساخته شده انجام شد. بر پایه آزمایش‌های انجام شده، نتایج زیر ارائه می‌شود:

- بر اساس نتایج مقاومت فشاری ۷ روزه، جایگزینی سیمان با ۱۵٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ زئولیت به ترتیب باعث کاهش ۴۵/۷٪، ۵۶٪ و ۶۱/۷٪ مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد شده است. این مقادیر کاهش برای مقاومت فشاری ۲۸ روزه به ترتیب ۲۴/۷٪، ۳۹/۵٪ و ۵۱/۶٪ برای نتایج ۵۶ روزه به ترتیب ۲۷٪، ۳۴/۳٪ و ۴۶/۱٪ و برای نتایج ۹۱ روزه نیز، به ترتیب ۲۱/۲٪، ۳۵/۳٪ و ۴۵/۳٪ می‌باشد. بر اساس این نتایج، در سنین ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۱ روزه با افزایش درصد زئولیت، مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است.

- مطابق نتایج آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید، جایگزین کردن ۱۵٪ وزن سیمان با زئولیت، نفوذ یون کلراید در بتن غلتکی را به میزان ۲۹/۴٪ نسبت به نمونه شاهد کاهش داده است. دلیل این موضوع خواص مطلوب زئولیت از قبیل واکنش پوزولانی مناسب در سن آزمایش (۲۸ روز) و خاصیت پرکنندگی آن است که منجر به پر شدن حفرات بتن شده است و به

واسطه آن، شارژ جریان الکتریکی از داخل بتن کاهش یافته است.

- جایگزین کردن سیمان با ۱۵٪ زئولیت در نمونه‌های بتن غلتکی باعث کاهش ۱۳٪ عمق نفوذ آب نسبت به نمونه شاهد شده است.
- جایگزینی ۱۵٪ وزن سیمان با زئولیت در بتن غلتکی، جذب آب ۰/۵ و ۱ و ۲۴ ساعته را به ترتیب ۳/۸۴٪، ۴/۱٪ و ۲۰/۵٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش داده است. مطابق این نتایج، جذب آب نمونه‌های دارای زئولیت بیشتر از بتن شاهد بوده است و با افزایش زمان قرارگیری نمونه‌ها در آب، درصد جذب آب نمونه‌ها بیشتر شده است. دلیل این موضوع ریزتر بودن دانه‌های زئولیت نسبت به دانه‌های سیمان است، بنابراین زئولیت سطح مخصوص بیشتری نسبت به سیمان دارد و جذب آب بتن نیز ناشی از جذب آب اجزای آن است، از این رو هنگامی که زئولیت در بتن جایگزین بخشی از سیمان می‌شود بتن‌های دارای زئولیت آب بیشتری نسبت به نمونه‌های شاهد جذب می‌کنند.

- ۱۵٪ زئولیت جایگزین سیمان، باعث کاهش ۱٪ سرعت پالس اولتراسونیک در نمونه‌های بتن غلتکی و افزایش ۱۵۱/۲٪ مقاومت الکتریکی بتن غلتکی نسبت به نمونه شاهد شده است.

- با افزایش درصد جایگزینی سیمان با زئولیت، وزن مخصوص بتن غلتکی افزایش یافته است به طوری که با جایگزینی ۱۵٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ سیمان با زئولیت، وزن مخصوص بتن به ترتیب ۲/۹، ۴/۵ و ۵/۵٪ نسبت به طرح شاهد افزایش یافته است.

effects of supplementary cementitious materials on the performance of low-cement roller compacted concrete pavement, *Construction and Building Materials*, 24(12) (2010) 2528-2535.

- [8] P. Ghoddousi, L. Adelzade Saadabadi, Effect of Pore Physical and Chemical Microstructure Properties on Durability and Rebar Corrosion of Self-Compacting Concretes Containing Silica Fume and Metakaolin, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(12) (2022) 04022330.
- [9] A. Aghaiepour, M. Madhkhan, Effect of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) on RCCP durability, *Construction and Building Materials*, 141 (2017) 533-541.
- [10] B. Ahmadi, M. Shekarchi, Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material, *Cement and concrete composites*, 32(2) (2010) 134-141.
- [11] M. Valipour, F. Pargar, M. Shekarchi, S. Khani, Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study, *Construction and Building Materials*, 41 (2013) 879-888.
- [12] A.A. Ramezani pour, R. Mousavi, M. Kalhori, J. Sobhani, M. Najimi, Micro and macro level properties of natural zeolite contained concretes, *Construction and building materials*, 101 (2015) 347-358.
- [13] S.Y. Chan, X. Ji, Comparative study of the initial surface absorption and chloride diffusion of high performance zeolite, silica fume and PFA concretes, *Cement and Concrete Composites*, 21(4) (1999) 293-300.
- [14] M. Najimi, J. Sobhani, B. Ahmadi, M. Shekarchi, An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan, *Construction and building materials*, 35 (2012) 1023-1033.
- [15] M.K. Sharbatdar, M. Orui, Improved compressive, tensile and bending strength of unreinforced samples and reinforced concrete beams containing zeolite. *Journal of Civil and Environmental Engineering of Tabriz University*, 48(93) (2019) 103-113. (in Persian).

- قیمت تمام شده بتن غلتکی با درصدهای مختلف زئولیت نسبت به بتن غلتکی بدون افزودنی کاهش می‌یابد و با افزایش درصد جایگزینی سیمان با زئولیت نیز قیمت تمام شده کاهش می‌یابد. بنابراین با توجه به نتایج آزمایشگاهی در پژوهش حاضر، زئولیت علاوه بر کاهش نفوذپذیری بتن غلتکی و بهبود دوام آن، بر کاهش قیمت تمام شده بتن نیز مؤثر است.

- نتایج آزمایش‌های نفوذ تسریع شده یون کلراید، عمق نفوذ آب و مقاومت الکتریکی نشان می‌دهند که استفاده از زئولیت تأثیر بسزایی در کاهش نفوذپذیری و بهبود خصوصیات دوامی بتن غلتکی دارد.

منابع

- [1] M. Ashkar, V. Toufigh, M. Ghaemian, M. Azizmohammadi, Application of ultrasonic models for investigating the properties of the interface between roller compacted concrete (RCC) layers, *NDT & E International*, 124 (2021) 102516.
- [2] J.S. Damtoft, J. Lukasik, D. Herfort, D. Sorrentino, E.M. Gartner, Sustainable development and climate change initiatives, *Cement and concrete research*, 38(2) (2008) 115-127.
- [3] A. Mardani-Aghabaglou, Ö. Andiç-Çakir, K. Ramyar, Freeze-thaw resistance and transport properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method, *Cement and Concrete Composites*, 37 (2013) 259-266.
- [4] L. Shen, Q. Li, W. Ge, S. Xu, The mechanical property and frost resistance of roller compacted concrete by mixing silica fume and limestone powder: Experimental study, *Construction and Building Materials*, 239 (2020) 117882.
- [5] P. Duan, Z. Shui, W. Chen, C. Shen, Effects of metakaolin, silica fume and slag on pore structure, interfacial transition zone and compressive strength of concrete, *Construction and Building Materials*, 44 (2013) 1-6.
- [6] D. Tavakoli, R.S. Dehkordi, H. Divandari, J. de Brito, Properties of roller-compacted concrete pavement containing waste aggregates and nano SiO₂, *Construction and Building Materials*, 249 (2020) 118747.
- [7] F. Vahedifard, M. Nili, C.L. Meehan, Assessing the

- hydration rate of natural zeolite blended cement pastes, *Construction and building materials*, 13(8) (1999) 427-432.
- [23] A.A. Shahmansouri, H.A. Bengar, H. AzariJafari, Life cycle assessment of eco-friendly concrete mixtures incorporating natural zeolite in sulfate-aggressive environment, *Construction and Building Materials*, 268 (2021) 121136.
- [24] M. Khoshroo, A.A.S. Javid, A. Katebi, Effects of micro-nano bubble water and binary mineral admixtures on the mechanical and durability properties of concrete, *Construction and Building Materials*, 164 (2018) 371-385.
- [25] F. Canpolat, K. Yılmaz, M. Köse, M. Sümer, M. Yurdusev, Use of zeolite, coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement production, *Cement and concrete research*, 34(5) (2004) 731-735.
- [26] R. Madandoust, J. Sobhani, P. Ashoori, Concrete made with zeolite and metakaolin: A comparison on the strength and durability properties, *Asian Journal of Civil Engineering*, 14(4) (2013) 533-543.
- [27] J. Ahmadi, H. Azizi, M. Koohi, Effect of zeolite on the strength and permeability of conventional concrete with different content of cement, *Concrete Research*, 8(2) (2016) 5-18. (in Persian).
- [28] L. Presa, J.L. Costafreda, D.A. Martín, Correlation between uniaxial compression test and ultrasonic pulse rate in cement with different pozzolanic additions, *Applied Sciences*, 11(9) (2021) 3747.
- [16] A.A. Ramzaniapour, R. Mousavi, M. Kalhari, Investigating the effect of processing systems on the engineering properties and durability of concrete containing zeolite. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 31(1.1) (2015) 113-118. (in Persian).
- [17] R.A. Izadifard, M. Abdi Moghadam, Evaluation of various content of zeolite on the mechanical and durability properties of concrete at high temperatures, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(9) (2020) 2321-2338. (in Persian).
- [18] M. Naderi, A. Kabodan, M. Keshtkar, Studying the permeability and resistance of concrete containing silica fume, zeolite and fly ash using the “cylindrical chamber” method and the British standard. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 7(3) (2020) 92-113. (in Persian).
- [19] D. Nagrockiene, G. Girskas, Research into the properties of concrete modified with natural zeolite addition, *Construction and Building Materials*, 113 (2016) 964-969.
- [20] C. Bilim, Properties of cement mortars containing clinoptilolite as a supplementary cementitious material, *Construction and Building Materials*, 25(8) (2011) 3175-3180.
- [21] M. Khoshroo, A.A.S. Javid, A. Katebi, Effect of chloride treatment curing condition on the mechanical properties and durability of concrete containing zeolite and micro-nano-bubble water, *Construction and Building Materials*, 177 (2018) 417-427.
- [22] C.S. Poon, L. Lam, S. Kou, Z. Lin, A study on the

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Sarafi, S. M. Zahrai, A. M. Ramezaniapour, *Effect of Zeolite on the Compressive Strength and Durability Properties of Roller-Compacted Mass Concrete*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(3) (2023) 641-664.

DOI: [10.22060/ceej.2023.21999.7875](https://doi.org/10.22060/ceej.2023.21999.7875)

