

کاهش آثار منفی درزهای ساخت در سازه‌های بتن غلتکی حجیم با استفاده از ژئولیت

علی صرافعی (کارشناس ارشد)

امیرمحمد رمضانپور (دانشیار)

سید مهدی زهرائی* (استاد)

دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه تهران

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۲ (۸۱-۹۱، صص. ۲، شماره ۳۹، پژوهشی)

بتن غلتکی در سازه‌های حجیم کاربرد دارد، که به علت حجم زیاد، بتن‌ریزی در چند مرحله و با ایجاد وقفه‌ی زمانی انجام می‌شود. این موضوع باعث بروز درز می‌شود، که کاهش مقاومت فشاری و افزایش نفوذپذیری را به دنبال دارد. اهداف پژوهش حاضر، ارزیابی تأثیر جایگزینی بخشی از سیمان با ژئولیت در کاهش آثار مخرب تشکیل درز است. بنابراین ژئولیت با درصد‌های مختلف جایگزین سیمان شد و در هر درصد نیز، نمونه‌ها با انواع درز ساخته شدند. سپس آزمایش‌های مقاومت فشاری، نفوذ سریع یون کلراید (RCPT)، عمق نفوذ آب، جذب آب، سرعت پالس اولتراسونیک و مقاومت الکتریکی بر روی نمونه‌ها انجام شده است. نتایج بیانگر نقش بسزای ژئولیت در کاهش آثار مخرب درزهای گرم و سرد در خصوصیات دوامی و همچنین بهبود اثر منفی درزگرم در مقاومت فشاری بوده است.

واژگان کلیدی: ژئولیت، بتن غلتکی، درزهای ساخت (سرد و گرم)، خصوصیات دوامی، خصوصیات مکانیکی.

ali.sarafi@ut.ac.ir
ramezaniyan@ut.ac.ir
mzahrai@ut.ac.ir

۱. مقدمه

بتن غلتکی کم‌سیمان، بتنی با اسلامپ صفر است، که بیشتر حجم آن را سنگ‌دانه‌ها تشکیل می‌دهند. در مخلوط‌های بتن غلتکی کم‌سیمان، حجم خمیر سیمان جهت کاهش حرارت ناشی از هیدراتاسیون و کاهش ترک‌خوردگی کم است؛ به همین علت، خمیر سیمان قادر به پر کردن همه‌ی فضاهای خالی بین سنگ‌دانه‌ها نخواهد بود و در نتیجه نفوذپذیری آن زیاد است. همچنین بتن غلتکی عمدتاً در سازه‌های حجیم استفاده می‌شود و در آنها به علت حجم زیاد بتن مصرفی، بتن‌ریزی در چند نوبت زمانی و با ایجاد وقفه صورت می‌گیرد. افزایش زمان وقفه در بتن‌ریزی باعث ایجاد درز در بدنه‌ی سازه‌ها می‌شود، که افزایش نفوذپذیری و کاهش مقاومت فشاری را به دنبال دارد.^[۱] باید توجه داشت که به دلیل نفوذپذیری بیشتر خمیر سیمان در بتن غلتکی نسبت به بتن معمولی، آثار منفی درزها نیز در بتن غلتکی بیشتر خواهد بود. این موضوع از نظر ورود یون‌های مخرب به بدنه‌ی بتنی سازه‌ها نامطلوب است، زیرا نفوذ عوامل خرابی از میان نواحی متخلخل موجود در بین درزها به مرور زمان موجب خرابی و کاهش عمر

بتن غلتکی کم‌سیمان، بتنی با اسلامپ صفر است، که بیشتر حجم آن را سنگ‌دانه‌ها تشکیل می‌دهند. در مخلوط‌های بتن غلتکی کم‌سیمان، حجم خمیر سیمان جهت کاهش حرارت ناشی از هیدراتاسیون و کاهش ترک‌خوردگی کم است؛ به همین علت، خمیر سیمان قادر به پر کردن همه‌ی فضاهای خالی بین سنگ‌دانه‌ها نخواهد بود و در نتیجه نفوذپذیری آن زیاد است. همچنین بتن غلتکی عمدتاً در سازه‌های حجیم استفاده می‌شود و در آنها به علت حجم زیاد بتن مصرفی، بتن‌ریزی در چند نوبت زمانی و با ایجاد وقفه صورت می‌گیرد. افزایش زمان وقفه در بتن‌ریزی باعث ایجاد درز در بدنه‌ی سازه‌ها می‌شود، که افزایش نفوذپذیری و کاهش مقاومت فشاری را به دنبال دارد.^[۱] باید توجه داشت که به دلیل نفوذپذیری بیشتر خمیر سیمان در بتن غلتکی نسبت به بتن معمولی، آثار منفی درزها نیز در بتن غلتکی بیشتر خواهد بود. این موضوع از نظر ورود یون‌های مخرب به بدنه‌ی بتنی سازه‌ها نامطلوب است، زیرا نفوذ عوامل خرابی از میان نواحی متخلخل موجود در بین درزها به مرور زمان موجب خرابی و کاهش عمر

لیو^۱ و همکاران (۲۰۱۸)،^[۲] با تهیه‌ی عکس‌های الکترونی از نمونه‌های بتن غلتکی دریافتند که با افزایش زمان وقفه بین اجرای دو لایه، در محل درز، حفره‌ها و ترک‌ها بزرگ‌تر می‌شوند، به طوری که در زمان وقفه‌ی ۴۸ ساعته، ترک‌ها به طور واضح قابل مشاهده بودند. کیان و خو^۲ (۲۰۱۸)،^[۳] نیز با اعمال زمان‌های وقفه‌ی صفر ساعت (بدون درز)، ۳ ساعت (درز داغ)، ۶ و ۹ ساعت (درزگرم)، ۱۲ و ۱۵ ساعت (درز سرد) بین اجرای لایه‌های اول و دوم در نمونه‌های بتن غلتکی به این نتیجه رسیدند که افزایش زمان وقفه و تشکیل درز باعث کاهش مقاومت‌های فشاری و کششی و افزایش نفوذ یون کلراید می‌شود؛ همچنین افزایش زمان وقفه، عمق نفوذ آب در نمونه‌ها را افزایش می‌دهد. آشکار^۳ و همکاران (۲۰۲۱)،^[۴] به منظور ایجاد انواع درز در نمونه‌ها، زمان‌های وقفه‌ی ۲، ۱۲ و ۴۸ ساعت را بین اجرای لایه‌های اول و دوم نمونه‌های بتن غلتکی اعمال کردند و دریافتند که وجود درز در کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها تأثیر بسزایی دارد. از این رو پژوهشگران در خصوص استفاده از مواد مکمل سیمانی به منظور بهبود درزها و کاهش اثر مخرب آنها تحقیقاتی انجام

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۷/۲۰، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱۰/۲۶، پذیرش ۱۴۰۱/۱۱/۱۱.

DOI:10.24200/J30.2023.61237.3157

استاد به این مقاله:

صرافی، علی، رمضانپور، امیرمحمد و زهرائی، سید مهدی، ۱۴۰۲. کاهش آثار منفی درزهای ساخت در سازه‌های بتن غلتکی حجیم با استفاده از ژئولیت. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۲)، صص. ۸۱-۹۱.

منفی درزه‌های به وجود آمده در سازه‌های موجود در پروژه‌های عمرانی استفاده شود.

۲. برنامه‌ی آزمایشگاهی

۱.۲. مصالح مصرفی

۱.۱.۲. سنگدانه

سنگدانه‌های مصرفی شامل شن (درشت و ریز) و ماسه‌ی شسته بودند. در شکل‌های ۱ الی ۳، منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های مصرفی ارائه شده است. در جدول ۱، نیز مشخصات فنی سنگدانه‌های مصرفی ارائه شده است. دانه‌بندی سنگدانه‌ها مطابق با استاندارد ASTM C ۱۳۶^[۱۳] و تعیین درصد جذب آب درشت دانه و ریزدانه نیز به ترتیب مطابق با استانداردهای ASTM C ۱۲۷^[۱۴] و ASTM C ۱۲۸^[۱۵] انجام شده است.

۲.۱.۲. سیمان و پوزولان

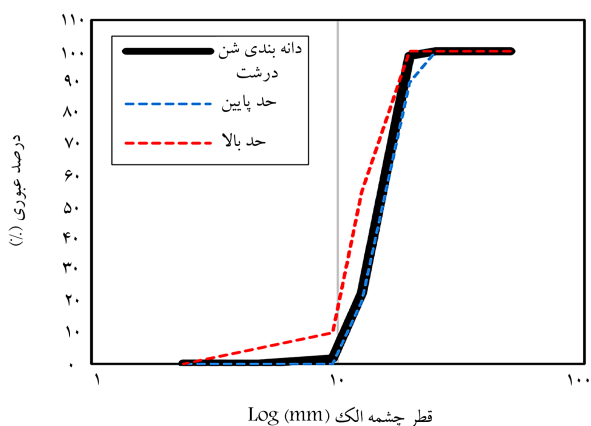
سیمان مصرفی، سیمان تپ II و پوزولان استفاده شده در پژوهش حاضر، زئولیت طبیعی بوده است. نتایج آنالیز شیمیایی (XRF) سیمان و زئولیت در جدول ۲ ارائه شده است.

۳.۱.۲. آب و افزودنی‌های شیمیایی

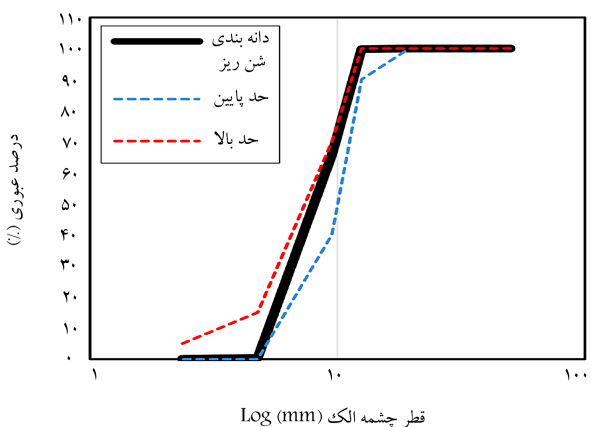
در طرح اختلاط بتن‌ها از آب آشامیدنی شهر تهران استفاده شده است. همچنین فوق روان‌کننده به کار برده شده با پایه‌ی پلی‌کربوکسیلات اثر بوده است.

داده‌اند، لیو و همکاران (۲۰۱۸)^[۲] دریافتند که اجرای یک لایه‌ی ملات سیمانی حاوی درصد‌های مختلف نانوسیلیس در محل یک درز ۴۸ ساعته باعث افزایش مقاومت برشی و بهبود ریزساختار بتن غلتکی در محل درز می‌شود و اثر منفی درز در خواص مکانیکی کاهش می‌یابد. ژو^۴ و همکاران (۲۰۲۰)^[۵] در پژوهش خود ابتدا به منظور ایجاد درز در نمونه‌های بتن غلتکی، بین اجرای لایه‌های اول و دوم نمونه‌ها، ۴۸ ساعت وقفه‌ی زمانی اعمال کردند. سپس با اجرای یک لایه‌ی ملات سیمانی به ضخامت ۱/۵ سانتی‌متر حاوی پوزولان‌های میکروسیلیس و خاکستر بادی در محل درزه‌های بتن غلتکی توانستند مقاومت برشی در محل درزه‌ها به وجود آمده را افزایش دهند. همچنین آنها مشاهده کردند که اجرای لایه‌ی ملات سیمانی اخیر باعث کاهش نفوذپذیری نمونه‌های بتن غلتکی دارای درز می‌شود. بایگرا^۵ و همکاران (۲۰۲۲)^[۶] نیز دریافتند که اجرای یک لایه ملات در محل درز سرد و همچنین جایگزین کردن بخشی از سنگدانه‌ها با خاکستر بادی در طرح اختلاط بتن غلتکی، یک راهکار مناسب برای غلبه بر آثار مخرب درز سرد است و باعث بهبود قابل توجه خصوصیات دوامی بتن غلتکی دارای درز می‌شود. همچنین لو^۶ و همکاران (۲۰۲۲)^[۷] در پژوهش خود با اجرای ملات سیمانی و همچنین اجرای یک نوع از مواد چسبیده در محل درزه‌های بتن غلتکی توانستند خواص بتن غلتکی در محل درزه‌ها به وجود آمده را بهبود ببخشند. سختی شکست در محل درزه‌ها نیز افزایش یافت. در پژوهش کریم‌پور^۷ (۲۰۱۰)^[۸] با جایگزین کردن بخشی از سیمان با سرباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی در مخلوط بتن غلتکی، نه تنها آثار منفی افزایش زمان وقفه بین فرایند اختلاط و تراکم بتن کاهش یافته است، بلکه در مقاومت فشاری و نفوذپذیری نیز بهبود چشمگیری مشاهده شده است.

در پژوهش‌های پیشین، در خصوص نقش زئولیت در کاهش آثار مخرب درزه‌های بتن غلتکی کار نشده است، از این رو در پژوهش حاضر، تأثیر آن بررسی شده است. زئولیت یک آلومینوسیلیکات^۸ هیدراته از کاتیون‌های قلیایی و قلیایی خاکی است، که به دلیل وجود مقادیر زیادی آلومینیوم‌اکسید و سیلیس فعال در ترکیب آن، به خوبی می‌تواند با کلسیم هیدروکسید حاصل از هیدراتاسیون واکنش دهد و ریزساختار بتن را بهبود ببخشد.^[۹] نتایج مطالعات اخیر حاکی از سازگاری بیشتر این ماده‌ی مکمل سیمانی با محیط زیست نسبت به سایر پوزولان‌هاست.^[۱۰] پژوهشگران در سال‌های اخیر در رابطه با تأثیر زئولیت در بهبود خصوصیات دوامی و مکانیکی بتن معمولی به نتایج مطلوبی دست یافته‌اند. ولی‌پور^۹ و همکاران (۲۰۱۳)^[۱۱] با جایگزین کردن سیمان با ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد زئولیت دریافتند که سطوح جایگزینی ۲۰ و ۳۰ درصد، نفوذ یون کلراید را به شدت کاهش می‌دهد. احمدی و شکرچی‌زاده^۹ (۲۰۱۰)^[۹] نیز با جایگزینی سیمان با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد زئولیت به این نتیجه رسیدند که در سطوح جایگزینی ۱۰ تا ۲۰ درصد سیمان با زئولیت، نفوذ یون کلراید کاهش می‌یابد. نتایج تحقیقات در سال ۲۰۱۲ نشان دادند که جایگزینی ۱۵ و ۳۰ درصد سیمان با زئولیت علاوه بر کاهش نفوذ یون کلر در کاهش عمق نفوذ آب در نمونه‌ها نیز مؤثر است.^[۱۱] در پژوهش‌های دیگر در سال ۲۰۱۵ نیز نتایج مشابه در خصوص سطح جایگزینی ۱۵٪ برای زئولیت به دست آمده است.^[۱۲] بنابراین انتظار می‌رود زئولیت در خواص بتن غلتکی بهبود ایجاد کند و باعث کاهش اثر مخرب درزه‌ها شود. از این رو در پژوهش حاضر، نمونه‌های بتن غلتکی با جایگزینی ۵، ۱۵، ۳۰ و ۴۰ درصد زئولیت ساخته و در هر درصد جایگزینی نیز در نمونه‌ها درزه‌های داغ، گرم و سرد اعمال شده‌اند. نمونه‌های ساخته شده تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری، نفوذ تسریع‌شده‌ی یون کلراید، عمق نفوذ آب، جذب آب، سرعت پالس اولتراسونیک و مقاومت الکتریکی قرار گرفتند. امید است از نتایج پژوهش حاضر در کاهش آثار



شکل ۱. دانه‌بندی شن درشت.



شکل ۲. دانه‌بندی شن ریز.

دو لایه به میزانی باشد که نفوذ سنگدانه از لایه‌ی بالایی به درون لایه‌ی زیرین وجود نداشته و لایه‌ی زیرین هنوز به گیرش نهایی نرسیده باشد. درز سرد، که یک درز ضعیف اجرایی است و هنگامی پدید می‌آید که فاصله‌ی زمانی بین اجرای لایه‌ها آنقدر زیاد شود که بتن گیرش خود را آغاز کند، در نتیجه پیوستگی دو لایه‌ی آن کم خواهد بود. در پژوهش حاضر، نمونه‌های هر طرح در دو لایه‌ی ۷/۵ سانتی‌متری اجرا شدند و به منظور ایجاد درزهای داغ، گرم و سرد بین اجرای لایه‌های اول و دوم به ترتیب زمان‌های وقفه‌ی ۳۰ دقیقه، ۲ ساعت و ۲۴ ساعت اعمال شد و هر لایه تحت وزنه‌ی همراه با لرزش میز لرزه تراکم یافت. نمونه‌های ساخته شده تا رسیدن سن مورد نظر آزمایش در حوضچه‌ی آب آهک اشباع تحت عمل‌آوری قرار گرفتند. نمونه‌های هر یک از ۴ طرح مخلوط با سه نوع درز ساخته شدند، که عنوان هر یک از ۱۲ طرح در جدول ۴ ارائه شده است.

۴.۲. روش آزمایش‌ها

۴.۲.۱. آزمایش شاخص فعالیت پوزولانی

آزمایش شاخص فعالیت پوزولانی مطابق با استاندارد ASTM C۳۱۱ [۱۶] و به منظور تعیین واکنش پذیری زئولیت انجام شده است.

۴.۲.۲. آزمایش زمان وی بی

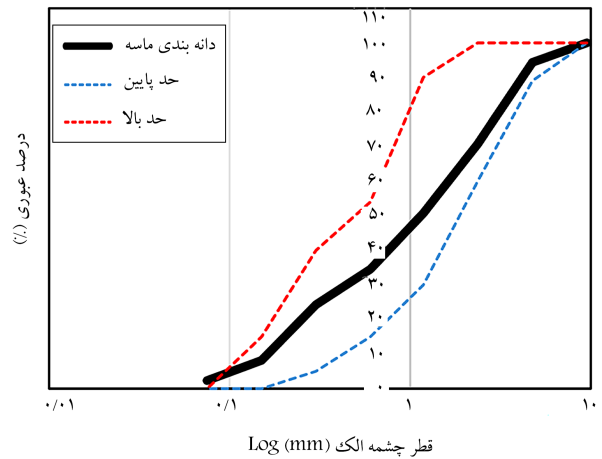
به منظور ارزیابی کارایی مخلوط‌های بتن غلتکی، آزمایش زمان وی بی مطابق با استاندارد ASTM C۱۱۷۰ [۱۷] انجام شده است. بتن تازه در داخل ظرف استوانه‌یی به وسیله‌ی وزنه و لرزش میز شروع به متراکم شدن کرد. لرزش میز به صورت ارتعاش سینوسی با بسامد ۶۰ هرتز و با دامنه‌ی ۸/۰ ± ۴۳ میلی‌متر بوده است. از زمان روشن شدن میز لرزه تا زمانی که بتن در دور تا دور فضای حلقوی بین ظرف و وزنه شروع به بالا آمدن کند، به وسیله‌ی زمان‌سنج ثبت شده است، که به عنوان زمان وی بی در نظر گرفته می‌شود، که معیاری برای سنجش کارایی مخلوط‌های بتن غلتکی است.

۴.۲.۳. آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری مطابق با استاندارد ASTM C۳۹ [۱۸] انجام شده است، که در آن نمونه‌های مکعبی ۱۵ سانتی‌متری ساخته و در سنین ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۱ روز آزمایش شدند. در آزمایش کنونی، ۲۴ نمونه برای هر سن ساخته شد، که شامل ۴ درصد مختلف زئولیت و انواع درز بودند.

۴.۲.۴. آزمایش نفوذ تسریع‌شده‌ی یون کلراید (RCPT)

آزمایش نفوذ تسریع‌شده‌ی یون کلراید مطابق با استاندارد ASTM C۱۲۰۲ [۱۹] انجام شده است. به منظور انجام آزمایش حاضر، ۱۲ نمونه‌ی مکعبی ۱۵ سانتی‌متری ساخته شد، که شامل ۶ نمونه طرح ۰٪ زئولیت و ۶ نمونه طرح ۱۵٪ زئولیت هر کدام دارای ۳ نوع درز داغ، گرم و سرد بودند. ابتدا از نمونه‌های مکعبی ۱۵ سانتی‌متری که به سن ۲۸ روز رسیده بودند، مغزه‌هایی با قطر ۱۰ و ارتفاع ۵ سانتی‌متر گرفته شد. به طوری که درزهای داغ، گرم و سرد، که در داخل نمونه‌ها اعمال شده بودند، عمود بر سطح مقطع دایره‌یی مغزه‌ها قرار داشتند. در مرحله‌ی بعد، مغزه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در شرایط خلأ قرار گرفتند، سپس هر کدام از دو انتهای مغزه‌ها در تماس با یک محفظه قرار داده شدند، که در یکی از محفظه‌ها محلول ۳٪ کلراید سدیم (NaCl) ریخته و به قطب منفی وصل شد و در محفظه‌ی دیگر نیز محلول ۳/۰٪ نرمال هیدروکسید سدیم (NaOH) ریخته و به قطب مثبت وصل شد. پس از آن مطابق شکل ۴، دو سر مغزه‌ها به مدت ۶ ساعت تحت اختلاف پتانسیل ۶۰ ولت قرار گرفتند، تا جریان الکتریکی بین دو سر مغزه‌ها در اثر این اختلاف پتانسیل برقرار



شکل ۳. دانه‌بندی ماسه.

جدول ۱. مشخصات فنی سنگدانه‌های مصرفی.

سنگدانه	درصد جذب آب	وزن مخصوص (چگالی نسبی)
شن درشت	۱/۷۸	۲/۵۷
شن ریز	۱/۹۹	۲/۵۹
ماسه	۲/۲۹	۲/۵۴

جدول ۲. آنالیز شیمیایی سیمان و زئولیت.

ترکیب شیمیایی	سیمان (%)	زئولیت (%)
SiO ₂	۲۰/۱۸	۶۴/۹
Al ₂ O ₃	۳/۷۸	۱۲/۳
Fe ₂ O ₃	۳/۷۹	۰/۴
CaO	۶۴/۰۷	۲/۱
MgO	۱/۲۳	۰/۹
SO ₃	۳/۶	۰/۲
Na ₂ O	۱/۳۶	۲/۲
K ₂ O	۰/۹۶	۲/۸

۲.۲. طرح اختلاط

در پژوهش حاضر، ۴ طرح مخلوط بتن غلتکی در نظر گرفته شده است. به این صورت که زئولیت با ۰، ۱۵، ۳۰ و ۴۰ درصد جایگزین وزن سیمان شد (در جدول ۳ طرح مخلوط ارائه شده است). به منظور ساخت طرح‌های بتنی، ابتدا شن، ماسه، سیمان و زئولیت در داخل مخزن مخلوط کن مخلوط شدند، سپس آب و فوق روان‌کننده به مخلوط بتنی اضافه شد. از زمان اضافه کردن آب به مخلوط، مصالح به مدت ۴ دقیقه توسط مخلوط کن مخلوط شدند. همچنین در هر طرح مخلوط، ۱۰۰ گرم فوق روان‌کننده با پایه‌ی پلی‌کربوکسیلات اثر استفاده شده است.

۳.۲. ساخت نمونه‌های بتنی

در پژوهش حاضر، از نمونه‌های مکعبی ۱۵ سانتی‌متری استفاده شده است. درز داغ هنگامی پدید می‌آید که لایه‌ی بالایی پیش از گیرش لایه‌ی پایینی اجرا شود، در این صورت سنگدانه‌های لایه‌ی بالایی در لایه‌ی زیرین نفوذ می‌کند و دو لایه به یکدیگر پیوسته می‌شوند. درز گرم هنگامی پدید می‌آید که فاصله‌ی زمانی بین اجرای

جدول ۳. طرح‌های مخلوط بتن غلتکی.

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)	فوق روان‌کننده (%)
Z ⁰	۰/۷۲	۲۰۸	۰	۱۵۱	۵۱۳/۷۵	۵۱۳/۷۵	۱۰۲۷/۵	۰/۶
Z ^{۱۵}	۰/۷۲	۱۷۶/۸	۳۱/۲	۱۵۱	۵۱۳/۷۵	۵۱۳/۷۵	۱۰۲۷/۵	۰/۶
Z ^{۳۰}	۰/۷۲	۱۴۵/۶	۶۲/۴	۱۵۱	۵۱۳/۷۵	۵۱۳/۷۵	۱۰۲۷/۵	۰/۶
Z ^{۴۰}	۰/۷۲	۱۲۴/۸	۸۳/۲	۱۵۱	۵۱۳/۷۵	۵۱۳/۷۵	۱۰۲۷/۵	۰/۶

جدول ۴. عنوان طرح‌های مخلوط بتن غلتکی.

Z ^{۴۰}	Z ^{۳۰}	Z ^{۱۵}	Z ^۰	
Z ^{۴۰-۰-۰} /۵h	Z ^{۳۰-۰-۰} /۵h	Z ^{۱۵-۰-۰} /۵h	Z ^{۰-۰-۰} /۵h	H
Z ^{۴۰-۲} h	Z ^{۳۰-۲} h	Z ^{۱۵-۲} h	Z ^{۰-۲} h	W
Z ^{۴۰-۲۴} h	Z ^{۳۰-۲۴} h	Z ^{۱۵-۲۴} h	Z ^{۰-۲۴} h	C



شکل ۵. قرارگیری نمونه‌ها در دستگاه آزمایش عمق نفوذ آب.

کاملاً خشک شوند. سپس وزن آنها به عنوان وزن خشک نمونه‌ها ثبت شد (m_0). در مرحله‌ی بعد، نمونه‌ها داخل آب قرار گرفتند و وزن آنها پس از گذشت ۲۴ ساعت از زمان قرارگیری در آب ثبت شد (m). در نهایت، درصد جذب آب بتن مطابق رابطه‌ی ۱ محاسبه شد:

$$\text{درصد جذب آب بتن} = \left(\frac{m - m_0}{m_0} \right) \times 100 \quad (1)$$

۷.۴.۲. آزمایش وزن مخصوص بتن تازه (چگالی بتن)

آزمایش وزن مخصوص بتن تازه مطابق با استاندارد ASTM C1۳۸ [۲۳] انجام شد. سپس به وسیله‌ی حجم ظرف استوانه‌یی، وزن مخصوص بتن تازه مطابق رابطه‌ی ۲ محاسبه شد:

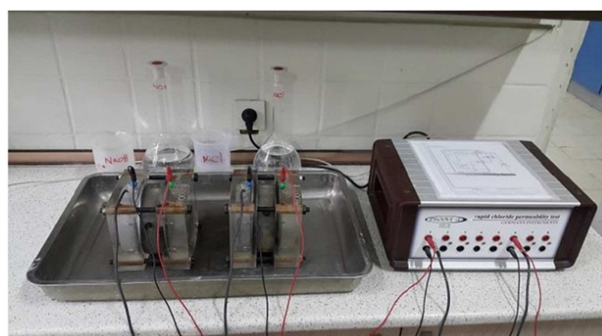
$$\text{وزن مخصوص بتن تازه} = \frac{\text{وزن ظرف خالی} - \text{وزن ظرف حاوی بتن}}{\text{حجم ظرف استوانه‌یی}} \quad (2)$$

۸.۴.۲. آزمایش سرعت پالس اولتراسونیک

آزمایش حاضر مطابق با استاندارد ASTM C5۹۷ [۲۴]، بر روی ۱۲ نمونه‌ی مکعبی ۱۵ سانتی‌متری (۶ نمونه طرح ۰٪ زئولیت و ۶ نمونه طرح ۱۵٪ زئولیت هر کدام دارای ۳ نوع درز داغ، گرم و سرد) در سن ۲۸ روز انجام شده است. مطابق شکل ۶، میبدل‌های دستگاه اولتراسونیک بر روی دو وجه روبه‌رویی نمونه‌های مکعبی ۱۵ سانتی‌متری (به دو صورت موازی و عمود بر صفحه‌ی درزها) قرار داده شدند. سرعت عبور موج از داخل نمونه‌ها بر حسب واحد m/s ثبت شده است.

۹.۴.۲. آزمایش مقاومت الکتریکی

آزمایش مقاومت الکتریکی در سن ۲۸ روز بر روی ۱۲ نمونه‌ی مکعبی ۱۵ سانتی‌متری (۶ نمونه طرح ۰٪ زئولیت و ۶ نمونه طرح ۱۵٪ زئولیت هر کدام دارای ۳ نوع درز داغ، گرم و سرد) انجام شده است. مطابق شکل ۷، مقاومت الکتریکی بتن توسط دستگاه بر حسب واحد $k\Omega \cdot cm$ ثبت شده است.



شکل ۴. دستگاه آزمایش RCPT.

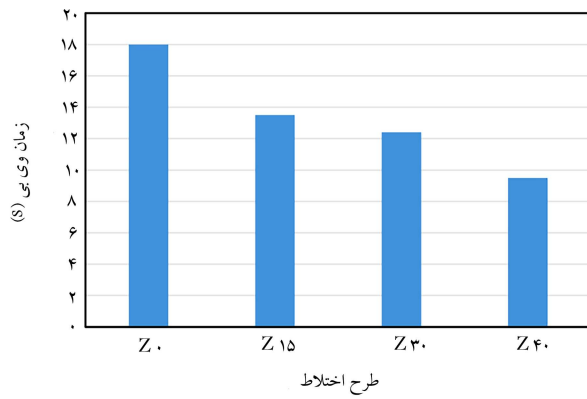
شود. شارژ عبوری بین دو سر مغزه‌ها پس از ۶ ساعت بر حسب واحد کولن^{۱۲} توسط نرم‌افزار Rapid Chloride Permeability Test اندازه‌گیری شده است.

۵.۴.۲. آزمایش عمق نفوذ آب در بتن

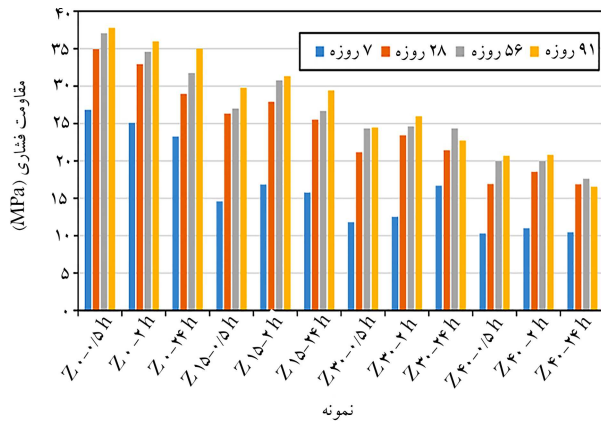
آزمایش عمق نفوذ آب مطابق با استاندارد EN ۱۲۳۹۰-۸ [۲۰]، بر روی ۱۲ نمونه‌ی مکعبی ۱۵ سانتی‌متری (۶ نمونه طرح ۰٪ زئولیت و ۶ نمونه طرح ۱۵٪ زئولیت هر کدام دارای ۳ نوع درز داغ، گرم و سرد) در سن ۲۸ روز انجام گرفت. ابتدا نمونه‌های ساخته شده به مدت ۲۴ ساعت در گرم‌خانه با دمای ۱۰۵ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار گرفتند تا کاملاً خشک شوند. سپس مطابق شکل ۵، نمونه‌ها به گونه‌یی در دستگاه قرار گرفتند که درز موجود در نمونه‌ها در راستای جهت نفوذ آب در نمونه قرار داشت. فشار وارد بر نمونه‌ها نیز به مقدار ۵۰ کیلوپاسکال تنظیم شد. پس از ۷۲ ساعت نمونه‌ها از دستگاه خارج و توسط جک مقاومت فشاری بر روی قطرشان به دو نیم تقسیم شدند و عمق پیشروی آب در داخل نمونه‌ها اندازه‌گیری شد.

۶.۴.۲. آزمایش جذب آب بتن

آزمایش جذب آب مطابق با استاندارد ASTM C۶۴۲ [۲۱]، در سن ۲۸ روز انجام شد. در آزمایش مذکور، ۱۲ نمونه (۶ نمونه طرح ۰٪ زئولیت و ۶ نمونه طرح ۱۵٪ زئولیت هر کدام دارای ۳ نوع درز داغ، گرم و سرد) ساخته شدند. ابتدا نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در داخل گرم‌خانه با دمای ۱۰۵ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار گرفتند تا



شکل ۹. زمان وی بی طرح‌های بتن غلتکی.



شکل ۱۰. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های مختلف.

۲.۳. آزمایش زمان وی بی

در شکل ۹، نتایج زمان وی بی مخلوط‌های بتن غلتکی مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، با افزودن درصد جایگزینی سیمان با زئولیت طبیعی، زمان وی بی کاهش یافته است، به طوری که با جایگزینی ۱۵، ۳۰ و ۴۰ درصد سیمان با زئولیت در مخلوط‌های بتن غلتکی، زمان وی بی به ترتیب ۲۵، ۳۱ و ۴۷ درصد نسبت به مخلوط شاهد کاهش یافته است. که دلیل آن، ریزتر بودن ذرات زئولیت نسبت به ذرات سیمان است، از این رو با افزایش درصد زئولیت، فیلر بیشتری به مخلوط اضافه شده است. بنابراین، با وجود این‌که جذب آب زئولیت بیشتر از سیمان است، اما توزیع دانه‌بندی زئولیت و سنگدانه‌ها به گونه‌ی بوده است که *packing density* دانه‌های خشک بیشتر بوده و این موضوع باعث کاهش جذب آب توسط دانه‌های جامد در مخلوط بتن شده است. لذا با افزایش درصد زئولیت، آبی که منجر به افزایش روانی مخلوط می‌شود، بیشتر شده و در نتیجه زمان وی بی کاهش یافته است. به بیان دیگر، اثر فیلری زئولیت در افزایش کارایی بیشتر از اثر جذب آب آن در کاهش کارایی بوده است.

۳.۳. نتایج آزمایش مقاومت فشاری

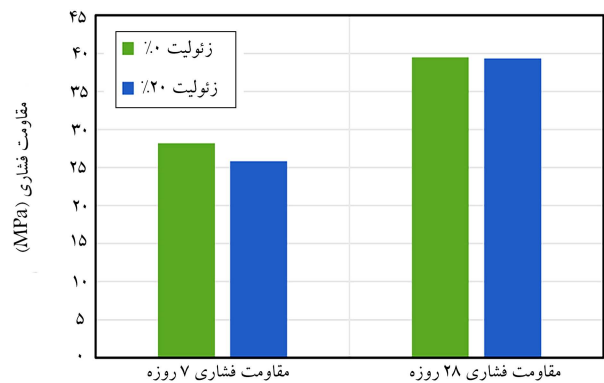
نتایج آزمایش مقاومت فشاری در شکل‌های ۱۰ الی ۱۲ ارائه شده‌اند. براساس نتایج اشاره شده، در تمام سنن در بین نمونه‌های دارای درز یکسان با افزایش درصد زئولیت، عمدتاً مقاومت فشاری کاهش یافته است. روند اخیر فقط بین مقاومت فشاری ۷ روزه‌ی نمونه‌های Z.15 و Z.30 درز سرد برقرار نبوده است، که در آن Z.30



شکل ۶. دستگاه سرعت پالس اولتراسونیک.



شکل ۷. تعیین مقاومت الکتریکی بتن.



شکل ۸. نتایج آزمایش شاخص فعالیت پوزولانی.

۳. نتایج آزمایش‌ها و تفسیر

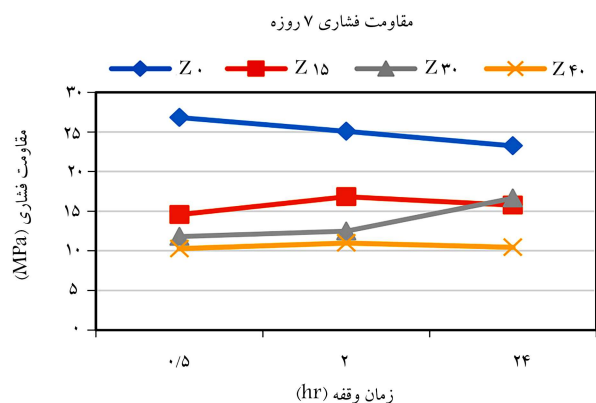
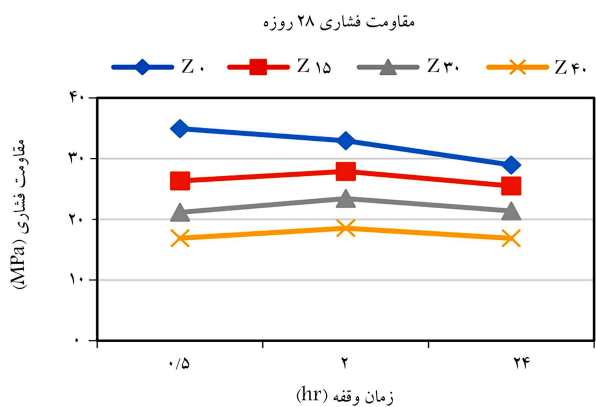
۱.۳. نتایج آزمایش شاخص فعالیت پوزولانی

نتایج آزمایش شاخص فعالیت پوزولانی در شکل ۸ مشاهده می‌شود، که مطابق آنها، با جایگزین کردن ۲۰٪ وزن سیمان با زئولیت، مقاومت‌های فشاری ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب ۸/۵ و ۴/۰ درصد کاهش یافته است. مطابق مقادیر به دست آمده از آزمایش کنونی، شاخص فعالیت پوزولانی زئولیت ۹۶/۲٪ بوده است. نتایج اخیر نشان می‌دهند که فعالیت پوزولانی زئولیت در سنن اولیه (۷ روز) کمتر از واکنش هیدراتاسیون سیمان و در سن ۲۸ روز تقریباً با آن برابر است. پژوهش رمضانیانپور و همکاران (۲۰۱۵) [۱۲] نتیجه‌ی حاصل از پژوهش حاضر را تأیید می‌کند.

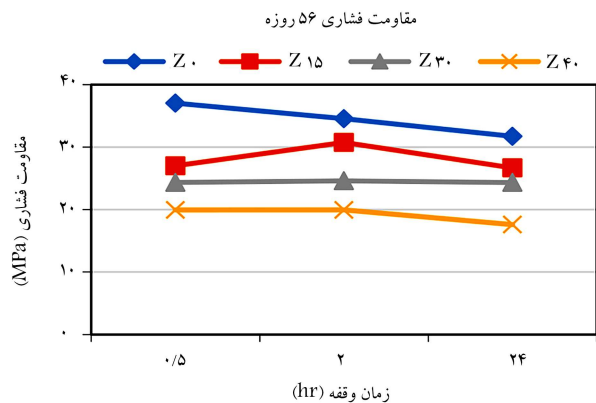
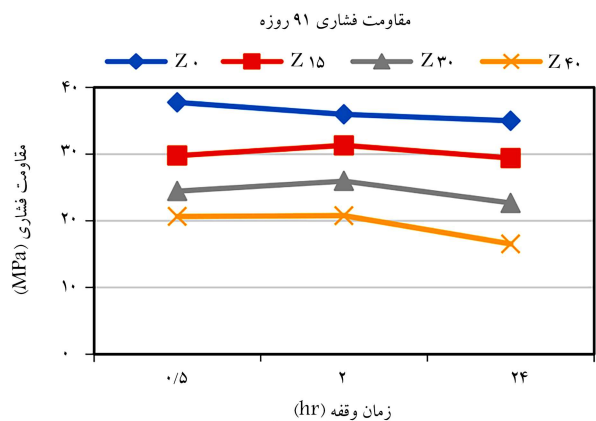
مقاومت بیشتری داشته است. به‌طورکلی، دلیل کاهش مقاومت با افزایش درصد زئولیت، کاهش سیمان در نسبت مخلوط در اثر جایگزینی بخشی از آن با زئولیت بوده است، که کاهش سیمان نیز از مقاومت کاسته است، زیرا سیمان خود عامل مهمی برای افزایش و کسب مقاومت از طریق واکنش هیدراتاسیون است. نتیجه‌ی اخیر، یافته‌های پژوهش نجیمی و همکاران (۲۰۱۲)،^[۱۱] در خصوص مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی زئولیت را تأیید می‌کند، به طوری که در پژوهش ایشان نیز نمونه‌های دارای ۱۵ و ۳۰ درصد زئولیت جایگزین سیمان، مقاومت فشاری کمتری نسبت به نمونه‌ی شاهد داشته و افزایش درصد زئولیت منجر به کاهش مقاومت فشاری در همه‌ی سنین شده است. در مطالعه‌ی ولی‌پور و همکاران (۲۰۱۳)،^[۱۱] نیز در نمونه‌های دارای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد زئولیت (جایگزین سیمان)، با افزایش درصد زئولیت تا ۲۰٪، مقاومت فشاری ۲۸ روزه کاهش یافته است. همچنین مطابق شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که با افزایش سن در تمام نمونه‌ها (به غیر از ۲۴h-۳۰٪ و ۲۴h-۴۰٪) مقاومت فشاری افزایش یافته است. دلیل آن تداوم واکنش هیدراتاسیون بوده است، که باعث کاهش ریزترک‌های ناحیه‌ی انتقال (ITZ) و بهبود آن شده است.

همان‌طور که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود، براساس نتایج مقاومت فشاری ۷ روزه، وجود درزهای گرم و سرد در نمونه‌های طرح شاهد به ترتیب باعث کاهش ۶/۵ و ۱۳/۴ درصدی مقاومت نمونه‌ها نسبت به نمونه‌ی بدون درز (درز داغ) شده است. در نمونه‌های دارای ۱۵٪ زئولیت نیز، درزهای گرم و سرد به ترتیب ۱۵/۵ و ۸/۱ درصد مقاومت را نسبت به نمونه‌ی بدون درز افزایش داده‌اند. در نمونه‌های دارای ۳۰٪ زئولیت، درزهای گرم و سرد به ترتیب باعث افزایش ۵/۹ و ۴۱/۱ درصد و در نمونه‌های دارای ۴۰٪ زئولیت نیز به ترتیب باعث افزایش ۶/۸ و ۱/۶ درصد مقاومت نمونه‌ها شده‌اند. نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه نشان می‌دهد که در نمونه‌های طرح شاهد، درزهای گرم و سرد به ترتیب باعث کاهش ۵/۷ و ۱۷/۱ درصد مقاومت نمونه‌ها نسبت به نمونه‌ی بدون درز شده‌اند. همچنین وجود درز گرم در نمونه‌های ۱۵٪ و ۴۰٪ به ترتیب باعث افزایش ۶ و ۹/۷ درصد مقاومت نمونه‌ها نسبت به نمونه‌ی بدون درز در همان طرح شده است. وجود درز سرد در نمونه‌های ۱۵٪ و ۴۰٪ نیز باعث کاهش ۳/۱ و ۰/۲ درصدی مقاومت نمونه‌ها نسبت به نمونه‌ی بدون درز شده است. در خصوص نمونه‌های دارای ۳۰٪ زئولیت، درزهای گرم و سرد به ترتیب ۱۰/۷ و ۱/۲ درصد مقاومت نمونه‌ها را نسبت به نمونه‌ی بدون درز افزایش داده‌اند. مطابق نتایج مقاومت فشاری ۵۶ روزه، در نمونه‌های شاهد، درزهای گرم و سرد به ترتیب ۶/۶ و ۱۴/۳ درصد مقاومت نمونه‌ها را نسبت به نمونه‌ی بدون درز کاهش داده‌اند. همچنین وجود درز گرم به ترتیب باعث افزایش ۱۳/۹، ۱ و ۰/۱ درصد مقاومت نمونه‌های ۱۵٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ نسبت به نمونه‌ی بدون درز شده است. درز سرد نیز به ترتیب باعث کاهش ۱/۲، ۰/۱ و ۱۱/۸ درصد مقاومت نمونه‌های ۱۵٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ نسبت به نمونه‌ی بدون درز شده است. در خصوص نتایج مقاومت فشاری ۹۱ روزه در نمونه‌های طرح شاهد، درزهای گرم و سرد به ترتیب باعث کاهش ۴/۸ و ۷/۳ درصدی مقاومت نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های دارای درز داغ شده‌اند. در رابطه با طرح اختلاط‌های دارای زئولیت نیز، درز گرم به ترتیب باعث افزایش ۵/۲، ۶/۲ و ۰/۶ درصدی مقاومت نمونه‌های ۱۵٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ نسبت به نمونه‌ی بدون درز شده است. درز سرد نیز به ترتیب ۱/۲، ۷/۲ و ۲۰ درصد مقاومت نمونه‌های ۱۵٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ را نسبت به نمونه‌های درز داغ (بدون درز) کاهش داده است.

با توجه به نتایج مقاومت فشاری ۲۸، ۵۶ و ۹۱ روزه، در هر ۳ طرح ۱۵٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ (به غیر از طرح ۳۰٪ ۲۸ روزه)، وجود درزهای گرم و سرد در نمونه‌های



شکل ۱۱. نتایج مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روزه.



شکل ۱۲. نتایج مقاومت فشاری در سنین ۵۶ و ۹۱ روزه.

درزهای مختلف تقریباً نفوذ یون کلراید یکسانی داشته‌اند، که دلیل آن کاهش اثر منفی درزها و تعدیل نقش مخرب آنها در اثر اضافه کردن پوزولان زئولیت است. اما همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نمونه‌های شاهد که زئولیت حضور نداشته است، درزهای گرم و سرد اثر منفی خود را نشان داده و باعث افزایش قابل توجه نفوذ یون کلراید در نمونه‌ها شده‌اند. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که جایگزینی ۱۵٪ سیمان با زئولیت در کاهش اثر منفی درزهای گرم و سرد در خصوصیات دوامی مؤثر بوده است؛ به این دلیل که در اثر تداوم واکنش پوزولانی زئولیت، بلورهای هیدروکسید کلسیم (CH)^{۱۴}، که عامل افزایش نفوذپذیری هستند، مصرف و ژل متراکم C-S-H تولید می‌شود، که نفوذپذیری بتن را کاهش می‌دهند. از دلایل دیگر، خاصیت پرکنندگی زئولیت به دلیل ریزتر بودن ذرات آن نسبت به سیمان است، که با جایگزینی بخشی از سیمان با زئولیت، پیوستگی و یکنواختی خمیر بتن بیشتر می‌شود و ذرات ریز زئولیت در فضاهای مویینه و حفره‌های ریز بتن قرار می‌گیرند. این عوامل در مجموع خواص بتن غلتکی را بهبود می‌بخشند.

۵.۳. نتایج آزمایش عمق نفوذ آب

نتایج آزمایش عمق نفوذ آب در شکل ۱۴ مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آنها، جایگزینی ۱۵٪ سیمان با زئولیت در نمونه‌های دارای درزهای داغ و سرد به ترتیب باعث کاهش ۱۳ و ۲۳/۵ درصد عمق نفوذ آب در نمونه‌ها نسبت به نمونه‌ی شاهد شده است. در نمونه‌های دارای درز گرم نیز، عمق نفوذ آب در نمونه‌ی دارای زئولیت، ۱۸۷/۵٪ از عمق نفوذ نمونه‌ی شاهد بیشتر بوده است. دلیل این موضوع می‌تواند خطای دستگاه آزمایش عمق نفوذ در اعمال دقیق فشار آب (۵۰ کیلوپاسکال) به نمونه باشد. نتیجه‌ی به دست آمده در پژوهش حاضر در خصوص مؤثر بودن زئولیت در کاهش عمق نفوذ آب، تأییدکننده‌ی نتایج به دست آمده از پژوهش‌های رضانیانپور و همکاران (۲۰۱۵)^{۱۱} و نجیمی و همکاران (۲۰۱۲)^{۱۱} است، که در آنها نیز نمونه‌های دارای درصد‌های مختلف زئولیت، عمق نفوذ آب کمتری نسبت به نمونه‌های شاهد داشته‌اند.

همچنین مطابق نمودار ۱۴ مشاهده می‌شود که در بین نمونه‌های شاهد، عمق نفوذ آب در نمونه‌ی دارای درز گرم، ۵۲/۴٪ کمتر از نمونه‌ی بدون درز و عمق نفوذ نمونه‌ی دارای درز سرد، ۷۹/۵٪ بیشتر از نمونه‌ی بدون درز بوده است. در میان نمونه‌های دارای ۱۵٪ زئولیت نیز مقدار عمق نفوذ آب در نمونه‌های دارای درزهای گرم و سرد به ترتیب ۵۷/۱ و ۵۷/۸ درصد بیشتر از عمق نفوذ در نمونه‌ی بدون درز است. بنابراین همان‌طور که انتظار می‌رفت، با افزایش زمان وقفه بین اجرای دو لایه و تشکیل درز سرد، نفوذپذیری افزایش یافته است. دلیل آن نیز وقفه‌ی ۲۴ ساعته

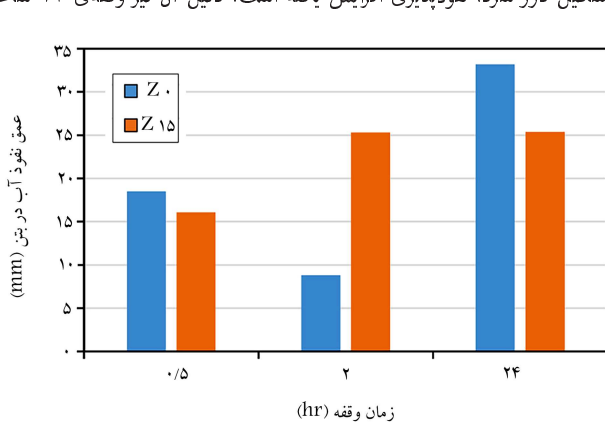
بتن غلتکی به ترتیب موجب افزایش و کاهش مقاومت فشاری نسبت به درز داغ شده است. دلیل بیشتر بودن مقاومت نمونه‌های دارای درز گرم نسبت به درز داغ در نمونه‌های دارای درصد زئولیت مشابه، کم شدن اثر منفی درز گرم در اثر افزودن پوزولان زئولیت و بهبود خواص خمیر بتن است. دلیل کاهش مقاومت در نمونه‌های دارای درز سرد نیز آن است که فاصله‌ی زمانی زیاد (۲۴ ساعت) بین اجرای لایه‌های اول و دوم آن باعث شده است که پوزولان زئولیت نتواند آن را بهبود ببخشد.

۴.۳. نتایج آزمایش نفوذ تسریع‌شده‌ی یون کلراید

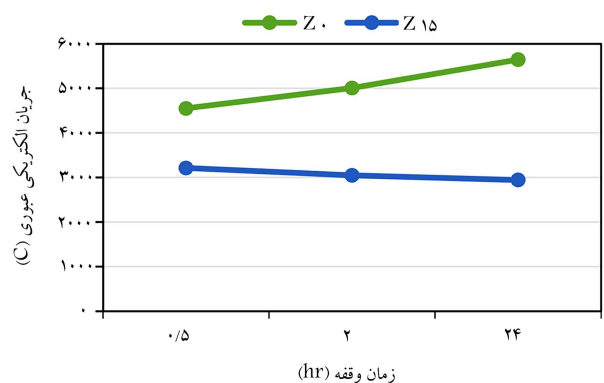
در شکل ۱۳، نتایج آزمایش RCPT بر روی نمونه‌ها مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آنها، در نمونه‌های دارای درزهای داغ (بدون درز)، گرم و سرد جریان الکتریکی عبوری از نمونه‌ی دارای ۱۵٪ زئولیت به ترتیب ۲۹/۴، ۳۹/۲ و ۴۷/۹ درصد کمتر از نمونه‌ی شاهد بوده است. این نتایج بیان‌گر آن است که نفوذپذیری نمونه‌های دارای زئولیت نسبت به نمونه‌های بدون زئولیت کمتر بوده است. بنابراین پوزولان زئولیت در کاهش نفوذ یون کلراید در بتن غلتکی تأثیر بسزایی دارد. نتیجه‌ی به دست آمده در پژوهش حاضر در خصوص مؤثر بودن زئولیت در کاهش نفوذ یون کلراید، تأییدکننده‌ی نتایج تحقیقات رضانیانپور و همکاران (۲۰۱۵)^{۱۱} و نجیمی و همکاران (۲۰۱۲)^{۱۱} است، که در آنها نیز نمونه‌های دارای درصد‌های مختلف زئولیت، نفوذ یون کلراید کمتری را نسبت به طرح شاهد داشته‌اند.

در خصوص تأثیر نوع درز در نفوذ یون کلراید، مطابق شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که در بین نمونه‌های شاهد، جریان الکتریکی عبوری از نمونه‌های دارای درزهای گرم و سرد به ترتیب ۱۰ و ۲۴ درصد بیشتر از نمونه‌ی بدون درز است. بنابراین در نمونه‌های شاهد، تأثیر درز سرد در افزایش نفوذپذیری بیشتر از درز گرم است. در میان نمونه‌های دارای زئولیت، نیز جریان الکتریکی عبوری از نمونه‌های دارای درزهای گرم و سرد به ترتیب ۵/۲ و ۸/۴ درصد کمتر از جریان عبوری از نمونه‌ی بدون درز بوده است. بنابراین در رابطه با تأثیر نوع درز در آزمایش RCPT می‌توان نتیجه گرفت که در نمونه‌های شاهد بتن غلتکی، درز سرد بیشترین تأثیر را در افزایش نفوذپذیری و نمونه‌های درز داغ نیز کمترین نفوذپذیری را در بین انواع درز داشته‌اند. این نتیجه، نتایج آزمایش RCPT در پژوهش کیان و خو (۲۰۱۸)^{۱۳} را تأیید می‌کند، که در آن نیز در نمونه‌های شاهد بتن غلتکی، که بدون پوزولان بودند، افزایش زمان وقفه بین اجرای دو لایه (ایجاد درز در وسط نمونه‌ها)، باعث افزایش نفوذ یون کلراید و افزایش نفوذپذیری نمونه‌ها در آزمایش RCPT شده است.

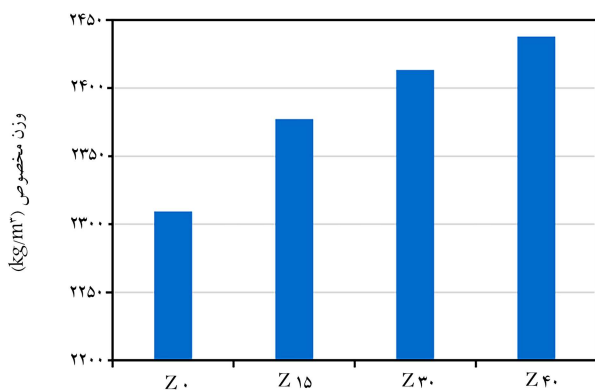
براساس شکل ۱۳، در نمونه‌های دارای ۱۵٪ زئولیت، تمامی نمونه‌های دارای



شکل ۱۴. نتایج آزمایش عمق نفوذ آب.



شکل ۱۳. نمودار شار عبوری جریان از داخل نمونه‌ها در آزمایش نفوذ تسریع‌شده‌ی یون کلراید.



شکل ۱۶. نتایج وزن مخصوص بتن تازه.

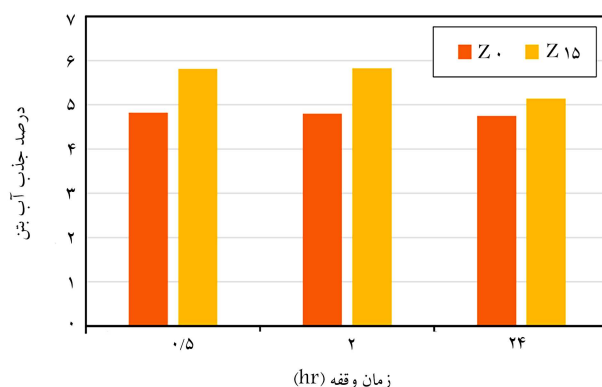
جای می‌گیرند، بنابراین جذب آب نیز بیشتر می‌شود. اما در نمونه‌های دارای درز سرد، که در داخل آنها فضای خالی بیشتری به واسطه‌ی شکاف درز سرد وجود دارد، دانه‌های کمتری جای می‌گیرد، زیرا بخشی از حجم و فضای نمونه را هوا و فضای خالی بین دو لایه اشغال کرده است. از این رو، درصد جذب آب نمونه‌های درز سرد با اختلاف زیادی کمتر از دو نوع دیگر درز است.

۷.۳. نتایج آزمایش وزن مخصوص بتن تازه (چگالی بتن)

نتایج وزن مخصوص بتن تازه در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود. با افزایش درصد جایگزینی سیمان با زئولیت، وزن مخصوص بتن غلظتی افزایش یافته است، به طوری که با جایگزینی ۱۵، ۳۰ و ۴۰ درصد سیمان با زئولیت، وزن مخصوص بتن غلظتی به ترتیب ۲/۹، ۴/۵ و ۵/۵ درصد نسبت به طرح شاهد افزایش یافته است. زیرا هنگامی که دانه‌های ریز زئولیت در فضای خالی بین درشت دانه‌های مخلوط بتن قرار گرفته‌اند، به مانند روان‌کننده عمل کرده و باعث شده‌اند که دانه‌های درشت راحت‌تر بر روی هم حرکت کنند و در جای مناسب و فضای خالی قرار بگیرند. از این رو در حجم ثابت ظرف آزمایش، مصالح بیشتری قرار گرفته است، که باعث افزایش وزن مخصوص مخلوط‌های دارای زئولیت نسبت به طرح شاهد شده است. همچنین شکل دانه‌بندی زئولیت به گونه‌ی بوده است که با جایگزینی بخشی از سیمان با زئولیت، packing density دانه‌های خشک 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)^[۲۴] نیز نتیجه‌ی مشابه در این خصوص کسب شده است.

۸.۳. نتایج آزمایش سرعت پالس اولتراسونیک

نتایج حاصل از آزمایش سرعت پالس اولتراسونیک در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ مشاهده می‌شوند؛ که بر اساس شکل ۱۷، در نمونه‌های دارای درزهای داغ، گرم و سرد جایگزینی ۱۵٪ سیمان با زئولیت، به ترتیب باعث کاهش ۳/۰، ۳/۱ و ۳/۱ درصد سرعت پالس اولتراسونیک نسبت به نمونه‌های شاهد شده است. مطابق شکل ۱۸ نیز در نمونه‌های دارای درزهای داغ، گرم و سرد، جایگزینی ۱۵٪ سیمان با زئولیت به ترتیب ۱، ۲/۵ و ۱/۲ درصد سرعت پالس نمونه‌ها را نسبت به طرح شاهد کاهش داده است. بنابراین در هر دو حالت قرارگیری مبدل‌ها نسبت به موقعیت درزها، در بین نمونه‌های دارای درز یکسان، نمونه‌ی دارای زئولیت، سرعت پالس اولتراسونیک کمتری نسبت به نمونه‌ی شاهد داشته است. با توجه به این‌که سرعت



شکل ۱۵. نتایج جذب آب بتن.

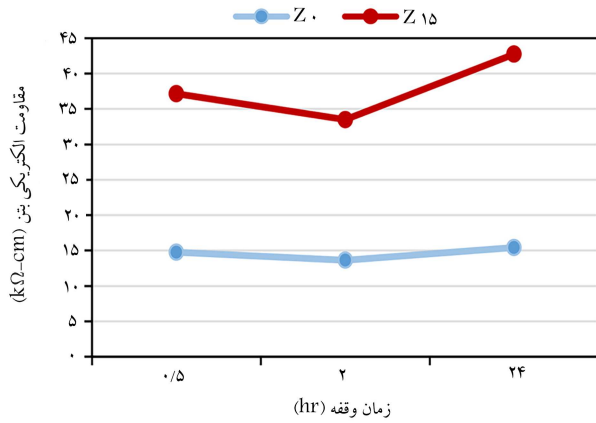
بین اجرای دو لایه در درز سرد و پیوستگی کم لایه‌های آن است. در پژوهش کیان و خو (۲۰۱۸)^[۲۱] نیز افزایش زمان وقفه بین اجرای دو لایه در نمونه‌های بتن غلظتی و ایجاد درز در آنها باعث افزایش عمق نفوذ آب و افزایش نفوذپذیری شده است. مطابق شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که در نمونه‌های دارای ۱۵٪ زئولیت، درزهای گرم و سرد، عمق نفوذ آب یکسانی دارند؛ اما در طرح شاهد، درز سرد باعث حدود ۴ برابر شدن عمق نفوذ آب نسبت به درز گرم شده است، که نشان می‌دهد جایگزینی ۱۵٪ سیمان با زئولیت، منجر به کاهش اثر منفی درز سرد (با زمان وقفه‌ی ۲۴ ساعت) شده و اثر مخرب آن بر دوام را در حد یک درز با زمان وقفه‌ی ۲ ساعته تعدیل کرده است. با وجود این، همچنان نمونه‌های درز سرد و گرم، عمق نفوذ بیشتری نسبت به نمونه‌ی بدون درز دارند.

۹.۳. نتایج آزمایش جذب آب بتن

نتایج حاصل از آزمایش جذب آب در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود؛ که بر اساس آن، جایگزین کردن ۱۵٪ سیمان با زئولیت در نمونه‌های دارای درزهای داغ، گرم و سرد به ترتیب باعث افزایش درصد جذب آب به میزان ۲۰/۵، ۲۱/۵ و ۸/۲ درصد نسبت به نمونه‌ی شاهد شده است؛ که نتیجه‌ی به دست آمده مشابه یافته‌های پژوهش‌های پیشین بوده است.^[۱۰، ۱۱]

مطابق شکل ۱۵ مشاهده می‌شود که در طرح شاهد، درصد جذب آب نمونه‌های دارای درزهای گرم و سرد به ترتیب ۴/۰ و ۱/۵ درصد کمتر از جذب آب نمونه‌ی بدون درز است. باید در نظر داشت که اختلاف درصد جذب آب نمونه‌های درز گرم و سرد در طرح شاهد بسیار ناچیز است (در حدود ۱/۳٪) از این رو می‌توان گفت در طرح شاهد، هر سه نوع درز تقریباً درصد‌های جذب آب یکسانی دارند. در رابطه با تأثیر درز در نمونه‌های ۱۵٪ زئولیت نتایج نشان می‌دهند که جذب آب نمونه‌ی درز گرم ۳/۰٪ بیشتر از نمونه‌ی بدون درز و جذب آب نمونه‌ی درز سرد ۱۱/۵٪ کمتر از جذب آب نمونه بدون درز بوده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نمونه‌های دارای زئولیت، اختلاف بین درصد جذب آب نمونه‌های درز داغ و گرم بسیار کم است (۳/۰٪)، در حالی که درز سرد با اختلاف بیشتری نسبت به دو درز داغ و گرم، جذب آب نمونه‌ها را کاهش داده است، که به دلیل جذب آب بتن تحت تأثیر جذب آب مصالح مصرفی در آن است. بنابراین، هر چه دانه‌های ریز بتن بیشتر باشد، جذب آب آن نیز بیشتر است (به دلیل بیشتر بودن سطح مخصوص ریزدانه‌ها). از این رو در نمونه‌های درز داغ، که به دلیل بهتر بودن پیوستگی میان دو لایه، فضای خالی بین دو لایه کمتر است؛ در نتیجه مجموعه‌ی بتن یکنواخت‌تر عمل می‌کند و دانه‌های بیشتری در حجم مشخص نمونه



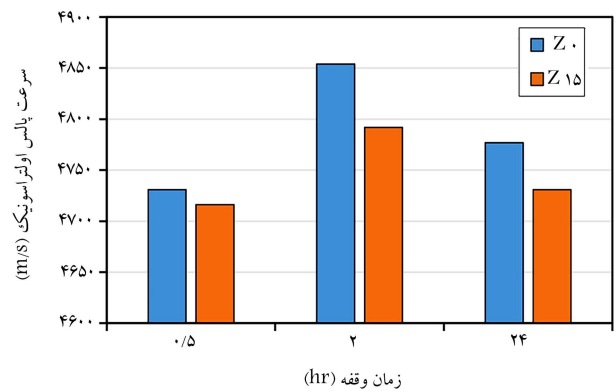
شکل ۱۹. نتایج مقاومت الکتریکی.

می‌کند. در خصوص درز سرد نیز در حالت موازی، درز سرد در حضور زئولیت منجر به افزایش سرعت پالس شده است، از این رو می‌توان نتیجه گرفت که اثر منفی درز سرد در مقاومت نیز توسط زئولیت بهبود یافته است.

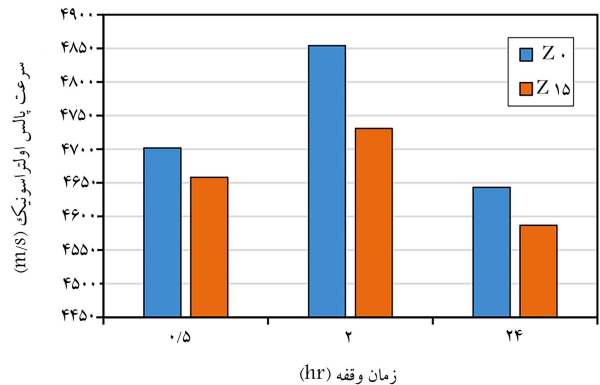
۹.۳. نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت الکتریکی در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، جایگزینی ۱۵٪ سیمان با زئولیت در بین نمونه‌های دارای درزهای داغ، گرم و سرد به ترتیب باعث افزایش ۱۵۱/۵، ۱۴۵/۸ و ۱۷۷ درصدی مقاومت الکتریکی بتن نسبت به نمونه‌ی شاهد شده است. به منظور نتیجه‌گیری در خصوص داده‌های آزمایش مقاومت الکتریکی بتن و مشخص شدن ارتباط آنها با نفوذپذیری نمونه‌ها باید در نظر داشت که هر چه مقاومت الکتریکی نمونه‌ی بیشتر باشد، نفوذپذیری آن کمتر است و بالعکس. بنابراین در بین نمونه‌های دارای درز یکسان، نمونه‌های دارای زئولیت، نفوذپذیری کمتری نسبت به نمونه‌های شاهد داشته‌اند؛ از این رو می‌توان نتیجه گرفت که پوزولان زئولیت در کاهش نفوذپذیری بتن غلتکی مؤثر است. چرا که زئولیت به واسطه‌ی خواص فیزیکی و شیمیایی خود، ریزساختار بتن غلتکی را بهبود داده و باعث کاهش نفوذپذیری شده است، خاصیت فیزیکی همان خاصیت پرکنندگی زئولیت به واسطه‌ی ریزتر بودن ذرات آن نسبت به ذرات سیمان است، و خاصیت شیمیایی نیز منجر به مصرف کلسیم هیدروکسید و تولید ژل C-S-H متراکم از طریق واکنش پوزولانی زئولیت می‌شود، که در نهایت کاهش نفوذپذیری را به دنبال دارد. نتیجه‌ی حاضر مشابه نتایج به دست آمده از آزمایش‌های عمق نفوذ آب و RCPT در پژوهش حاضر در خصوص مؤثر بودن زئولیت در کاهش نفوذپذیری است. در پژوهش‌های رمضانیاپور و همکاران (۲۰۱۵)، احمدی و شکرچی‌زاده (۲۰۱۰) و ولی‌پور و همکاران (۲۰۱۳)، نیز نمونه‌های دارای درصد‌های مختلف زئولیت جایگزین سیمان، مقاومت الکتریکی بیشتری نسبت به نمونه‌ی شاهد داشته‌اند و از این نظر، نتایج آن تأییدکننده‌ی نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی در پژوهش حاضر است.

مطابق شکل ۱۹، در طرح شاهد، مقاومت الکتریکی نمونه‌ی دارای درز گرم ۷/۷٪ کمتر از نمونه‌ی بدون درز و مقاومت الکتریکی نمونه‌ی دارای درز سرد، ۴/۵٪ بیشتر از حالت بدون درز است. در خصوص طرح ۱۵٪ زئولیت، مقاومت الکتریکی نمونه‌ی دارای درز گرم، ۹/۸٪ کمتر از نمونه‌ی بدون درز و مقاومت الکتریکی نمونه‌ی دارای درز سرد، ۱۵/۱٪ بیشتر از حالت بدون درز بوده است.



شکل ۱۷. نتایج آزمایش سرعت پالس اولتراسونیک برای حالت قرارگیری مبدل‌ها به صورت موازی با درزها.



شکل ۱۸. نتایج آزمایش سرعت پالس اولتراسونیک برای حالت قرارگیری مبدل‌ها به صورت عمود بر درزها.

پالس اولتراسونیک متناسب با مقاومت فشاری است، در آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه نیز نتایج مشابه با آزمایش سرعت پالس مشاهده شده است. مطابق شکل ۱۷، درزهای گرم و سرد در نمونه‌های طرح شاهد به ترتیب باعث افزایش ۲/۶ و ۱ درصدی سرعت پالس نسبت به نمونه‌ی بدون درز شده‌اند. در نمونه‌های دارای ۱۵٪ زئولیت نیز درزهای گرم و سرد به ترتیب ۱/۶ و ۳/۰ درصد سرعت پالس را نسبت به نمونه‌های بدون درز افزایش داده‌اند. بنابراین در طرح‌های Z₀ و Z₁₅، نمونه‌ی دارای درز گرم بیشترین سرعت پالس اولتراسونیک و نمونه‌ی دارای درز داغ کمترین سرعت پالس اولتراسونیک را داشته‌اند. مطابق شکل ۱۸، نیز درز گرم در نمونه‌های Z₀ و Z₁₅ به ترتیب باعث افزایش ۳/۲ و ۱/۶ درصدی سرعت پالس نسبت به نمونه‌ی بدون درز و وجود درز سرد در نمونه‌های Z₀ و Z₁₅ به ترتیب باعث کاهش ۱/۳ و ۱/۵ درصد سرعت پالس نسبت به نمونه‌ی بدون درز شده است. بنابراین، در بین نمونه‌های شاهد و نمونه‌های دارای زئولیت، نمونه‌ی دارای درز گرم بیشترین سرعت پالس و نمونه‌ی دارای درز سرد، کمترین سرعت پالس اولتراسونیک را داشته است.

نتایج این آزمایش به‌طور کلی نشان می‌دهد که در هر دو حالت قرارگیری مبدل‌ها، درز گرم سرعت پالس را افزایش داده است. این مطلب در نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه نیز مشاهده شده و در آن، نمونه‌های درز گرم مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌های بدون درز داشته‌اند. بنابراین نتایج آزمایش سرعت پالس اولتراسونیک نیز نقش مؤثر پوزولان زئولیت در بهبود اثر منفی درز گرم در مقاومت فشاری را تأیید

۱۰.۳. مقایسه‌ی کلی آثار درصدهای مختلف زئولیت

در خصوص آزمایش مقاومت فشاری، با افزایش درصد زئولیت مقاومت کاهش یافته است. همچنین مطابق نتایج آزمایش کنونی در سنین ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۱ روزه، جایگزینی ۱۵، ۳۰ و ۴۰ درصد سیمان با زئولیت باعث کاهش اثر منفی درز گرم در مقاومت فشاری به ترتیب به میزان ۱۰، ۶ و ۴ درصد شده است؛ که مطابق آن، جایگزینی ۱۵٪ سیمان با زئولیت، بیشترین تأثیر را در کاهش اثر منفی درز گرم در مقاومت داشته است. همچنین هیچ‌یک از درصدهای مختلف زئولیت، تأثیر چندانی در کاهش آثار منفی درز سرد در مقاومت فشاری نداشته‌اند. مقایسه‌ی آثار درصدهای مختلف زئولیت در آزمایش‌های دوام نشان می‌دهد که در RCPT، عمق نفوذ آب و مقاومت الکتریکی، ۱۵٪ زئولیت تأثیر بسزایی در کاهش اثر منفی درزه‌های گرم و سرد بر خصوصیات دوام داشته و موجب کاهش نفوذپذیری بتن نیز شده است. بنابراین، بر اساس نتایج پژوهش حاضر، استفاده از ۱۵٪ زئولیت در پروژه‌های عمرانی به منظور بهبود آثار منفی درزها توصیه می‌شود.

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، مقاومت فشاری، نفوذ تسریع‌شده‌ی یون کلراید، عمق نفوذ آب، جذب آب، سرعت پالس اولتراسونیک و مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتن غلتکی حاوی زئولیت، که دارای انواع درزه‌های ساخت با زمان‌های وقفه‌ی ۵، ۲ و ۲۴ ساعت بودند، تعیین و با نتایج نمونه‌های بدون زئولیت مقایسه شده است. سپس تأثیر زئولیت در کاهش آثار مخرب درزها و همچنین کاهش نفوذ یون کلراید و بهبود خصوصیات دوامی بتن غلتکی ارزیابی شده است. در ادامه، نتایج به دست آمده از آزمایش‌های پژوهش حاضر ارائه شده است:

- در تمام سنین با افزایش درصد زئولیت، مقاومت فشاری کاهش یافته است. همچنین مطابق انتظار درزه‌های ساخت (سرد و گرم) در نمونه‌های شاهد بتن غلتکی (در غیاب زئولیت)، مقاومت فشاری را در تمام سنین نسبت به حالت بدون درز کاهش داده است. با وجود این، براساس نتایج مقاومت‌های فشاری ۲۸، ۵۶ و ۹۱ روزه، جایگزینی بخشی از سیمان با زئولیت راهکار مؤثری برای بهبود اثر منفی درز گرم در مقاومت فشاری است. در خصوص درز سرد نیز که دارای زمان وقفه‌ی زیادی (۲۴ ساعت) بین اجرای دو لایه‌ی آن است، حتی در حضور درصدهای مختلف زئولیت، همچنان مقاومت‌های کمتری نسبت به نمونه‌ی بدون درز داشته است.

- مطابق نتایج آزمایش RCPT، با جایگزینی ۱۵٪ زئولیت در نمونه‌های دارای درزه‌های داغ، گرم و سرد نفوذ یون کلراید به ترتیب ۴/۲۹، ۲/۳۹ و ۹/۴۷ درصد کاهش یافته است. درزه‌های گرم و سرد در طرح شاهد به ترتیب باعث افزایش نفوذپذیری به میزان ۱۰ و ۲۴ درصد شده‌اند. درزه‌های گرم و سرد در طرح دارای زئولیت نیز نفوذپذیری را به ترتیب ۲/۵ و ۴/۸ درصد کاهش داده است. برخلاف نمونه‌های شاهد، تمامی نمونه‌های دارای ۱۵٪ زئولیت، تقریباً جریان عبوری یکسانی دارند و به عبارت دیگر، درزه‌های گرم و سرد، تأثیری در افزایش نفوذپذیری این نمونه‌ها نداشته‌اند، بنابراین زئولیت توانسته است آثار منفی درزه‌های گرم و سرد در خصوصیات دوامی بتن غلتکی (به ویژه نفوذ یون کلراید) را کاهش دهد.

- جایگزینی ۱۵٪ سیمان با زئولیت در نمونه‌های دارای درزه‌های داغ و سرد به ترتیب باعث کاهش ۱۳ و ۲۳/۵ درصد عمق نفوذ آب در نمونه‌ها و در نمونه‌های دارای درز گرم، باعث افزایش ۵/۱۸۲٪ عمق نفوذ آب شده است. در طرح شاهد، درز سرد باعث افزایش نفوذپذیری به میزان ۵/۷۹٪ و درز گرم باعث کاهش نفوذپذیری به میزان ۴/۵۲٪ شده است. در طرح دارای زئولیت نیز، درزه‌های گرم و سرد به ترتیب موجب افزایش نفوذپذیری به میزان ۱/۵۷ و ۸/۵۷ درصد شده‌اند. مطابق نتایج حاصل از عمق نفوذ آب، زئولیت تأثیر بسزایی در بهبود اثر منفی درز سرد دارد و می‌تواند آثار مخرب درز سرد در دوام را تا حد یک درز با زمان وقفه‌ی ۲ ساعته کاهش دهد.

- جایگزینی ۱۵٪ سیمان با زئولیت در نمونه‌های بتن غلتکی دارای درزه‌های داغ، گرم و سرد به ترتیب باعث افزایش درصد جذب آب به میزان ۵/۲۰ و ۵/۲۱ و ۲/۸ درصد شده است. در طرح شاهد، درزه‌های گرم و سرد در نمونه‌ها به ترتیب باعث کاهش ۴/۰ و ۵/۱ درصد جذب آب شده است. در طرح دارای ۱۵٪ زئولیت نیز، درز گرم در نمونه‌ها موجب افزایش ۳/۰٪ جذب آب و درز سرد باعث کاهش ۵/۱۱٪ جذب آب شده است.

- براساس نتایج آزمایش سرعت پالس اولتراسونیک در حالت قرارگیری مبدل‌ها به صورت موازی با درزها، جایگزینی ۱۵٪ سیمان با زئولیت در نمونه‌های دارای درزه‌های داغ، گرم و سرد به ترتیب باعث کاهش ۳/۰، ۳/۱ و ۱ درصد سرعت پالس اولتراسونیک شده است. در حالت قرارگیری مبدل‌ها به صورت عمود بر درزها نیز جایگزینی ۱۵٪ سیمان با زئولیت در نمونه‌های دارای درزه‌های داغ، گرم و سرد به ترتیب منجر به کاهش ۱، ۵/۲ و ۲/۱ درصد سرعت پالس نمونه‌ها شده است. در خصوص تأثیر درزها در حالت موازی با درزها، درزه‌های گرم و سرد در طرح شاهد به ترتیب باعث افزایش ۶/۲ و ۱ درصد سرعت پالس و در نمونه‌های دارای ۱۵٪ زئولیت نیز به ترتیب باعث افزایش ۶/۱ و ۳/۰ درصدی سرعت پالس شده‌اند. در حالت عمود بر درزها نیز درز گرم در طرح‌های شاهد و ۱۵٪ زئولیت به ترتیب باعث افزایش ۲/۳ و ۶/۱ درصدی سرعت پالس و درز سرد نیز در طرح‌های شاهد و ۱۵٪ زئولیت به ترتیب باعث کاهش ۳/۱ و ۵/۱ درصدی سرعت پالس شده است.

- مطابق نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی، با جایگزینی ۱۵٪ سیمان با زئولیت، نفوذپذیری نمونه‌های بتن غلتکی دارای انواع درز کاهش یافته است، به طوری که جایگزینی ۱۵٪ سیمان با زئولیت در نمونه‌های دارای درزه‌های داغ، گرم و سرد به ترتیب باعث افزایش ۵/۱۵۱، ۸/۱۴۵ و ۷۷ درصدی مقاومت الکتریکی شده است. همچنین وجود درز گرم در نمونه‌های ۱۵ و Z^۰ به ترتیب باعث افزایش نفوذپذیری به میزان ۷/۷ و ۸/۹٪ درصد شده است. درز سرد نیز در نمونه‌های ۱۵ و Z^۰ به ترتیب باعث کاهش نفوذپذیری به میزان ۵/۴ و ۱۵/۱ درصد شده است.

- نتایج آزمایش‌های RCPT، عمق نفوذ آب، و سرعت پالس اولتراسونیک نشان می‌دهند که جایگزینی ۱۵٪ سیمان با زئولیت تأثیر بسزایی در خشی‌سازی و تعدیل کردن اثر منفی درزه‌های سرد و گرم در خصوصیات دوامی دارد، همچنین نتایج آزمایش مقاومت فشاری نشان می‌دهند که زئولیت توانسته است اثر منفی درز گرم بر مقاومت فشاری را کاهش دهد و لذا استفاده از آن توصیه می‌شود.

1. Liu
2. Qian & Xu
3. Ashkar
4. Zhu
5. Bayqra
6. Luo
7. Karimpour
8. Aluminosilicate
9. Valipour
10. Ahmadi & Shekarchi Zadeh
11. Rapid Chloride Permeability Test
12. Coulomb
13. Interfacial Transition Zone (ITZ)
14. Calcium Hydroxide (CH)
15. Nagrockiene & Girskas

منابع (References)

1. Azizmohammadi, M., Toufigh, V. and Ghaemian, M. "Experimental and analytical investigation on the interlayer of roller compacted concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **33**(5), p. 04021090 (2021).
2. Liu, G., Lu, W., Lou, Y. and et al. "Interlayer shear strength of roller compacted concrete (RCC) with various interlayer treatments", *Construction and Building Materials*, **166**, pp. 647-656 (2018).
3. Qian, P. and Xu, Q. "Experimental investigation on properties of interface between concrete layers", *Construction and Building Materials*, **174**, pp. 120-129 (2018).
4. Ashkar, M., Toufigh, V., Ghaemian, M. and et al. "Application of ultrasonic models for investigating the properties of the interface between roller compacted concrete (RCC) layers", *NDT & E International*, **124**, p. 102516 (2021).
5. Zhu, X., Guo, Z., Yang, W. and et al. "Effects of double expansion agents on the properties of interlayer in roller-compacted concrete", *Construction and Building Materials*, **262**, p. 120909 (2020).
6. Bayqra, S.H., Mardani, A., Özen, S. and et al. "Effect of delayed placement of layers on permeability and durability of roller-compacted concrete containing fly ash", *International Journal of Pavement Engineering*, pp. 1-16 (2022). DOI.org/10.1080/10298436.2022.2075552.
7. Luo, D., Lu, S., Hu, C. and et al. "Experimental and numerical investigation on interlayer fracture process of roller compacted concrete", *Construction and Building Materials*, **342**, p. 127998 (2022).
8. Karimpour, A. "Effect of time span between mixing and compacting on roller compacted concrete (RCC) containing ground granulated blast furnace slag (GGBFS)", *Construction and Building Materials*, **24**(11), pp. 2079-2083 (2010).
9. Ahmadi, B. and Shekarchi Zadeh, M. "Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material", *Cement and Concrete Composites*, **32**(2), pp. 134-141 (2010).
10. Valipour, M., Pargar, F., Shekarchi Zadeh, M. and et al. "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**, pp. 879-888 (2013).
11. Najimi, M., Sobhani, J., Ahmadi, B. and et al. "An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan", *Construction and Building Materials*, **35**, pp. 1023-1033 (2012).
12. Ramezani-pour, A.A., Mousavi, R., Kalhori, M. and et al. "Micro and macro level properties of natural zeolite contained concretes", *Construction and Building Materials*, **101**, pp. 347-358 (2015).
13. ASTM International, "ASTM C136-01: Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates", *ASTM International*, West Conshohocken, PA (2001).
14. "ASTM, C127-01, Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate", *ASTM International* (2001).
15. "ASTM C128-01: Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate", *ASTM International* (2001).
16. ASTM International, "ASTM C311: Standard test methods for sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use in portland-cement concrete", (2013).
17. "ASTM C1170/ C1170M-14e1: Standard test method for determining consistency and density of roller-compacted concrete using a vibrating table", *ASTM International*, West Conshohocken, PA (2014).
18. "ASTM C39/C39M-14: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens", *ASTM International*, West Conshohocken, PA. ASTM, AI (2014).
19. "ASTM C1202: Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration", *ASTM International* (2012).
20. The European Committee for Standardization, "Testing hardened concrete. depth of penetration of water under pressure", EN 12390-8 (2009).
21. "ASTM, C642-13: Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete", *ASTM International*, West Conshohocken, PA (2013).
22. American Society for Testing and Materials, "Standard test method for density (unit weight), yield, and air content (gravimetric) of concrete (ASTM C 138)", Philadelphia, PA: ASTM (2009).
23. "ASTM C597-02: Standard test method for pulse velocity through concrete", *Annual Book of ASTM Standards*, American Society for Testing and Materials, **4**(02) (2002).
24. Nagrockiene, D. and Girskas, G. "Research into the properties of concrete modified with natural zeolite addition", *Construction and Building Materials*, **113**, pp. 964-969 (2016).