

بررسی مشخصات بتن‌های حاوی حجم بالای توف آتشفشانی و دوده سیلیسی

محمدناصر نوروزی فر (کارشناس ارشد)

سید حسام مدنی* (استادیار)

دانشکده مهندسی عمران و نقشه برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۷ (دوره ۲ - ۳۴، شماره ۲/۱، ص. ۹۸-۸۷)

در پژوهش حاضر به بررسی تأثیر استفاده از دوده سیلیسی در مشخصات مکانیکی و دوام بتن‌های حاوی حجم بالای توف سیرجان پرداخته شده است. توف آتشفشانی مورد بررسی، یک پوزولان طبیعی موجود در مناطق اطراف سیرجان است که در یکی از کارخانه‌های سیمان کرمان استفاده می‌شود. در پژوهش حاضر، مخلوط‌های بتنی با درصد‌های جایگزینی متغیر توف از ۴۰ تا ۶۰ درصد و دوده سیلیسی از ۰ تا ۹ درصد در سنین تا ۹۰ روز بررسی شدند. نتایج نشان داده است که استفاده از توف در درصد‌های بالای جایگزینی، سبب کاهش قابل توجه مقاومت در سنین پایین می‌شود که اثر آن حتی در سنین پس از ۲۸ روز نیز برای مخلوط‌های حاوی ۴۰ و ۶۰ درصد توف مشهود است. دوده سیلیسی نقشی در بهبود مقاومت در سنین تا ۷ روز نداشته است، لیکن در سنین پس از ۲۸ روز سبب ارتقاء مقاومت مخلوط‌های بتنی حاوی پوزولان طبیعی شده است. مخلوط‌های پوزولانی در سن ۲۸ روز، ارتقاء چندانی از لحاظ مقاومت در برابر نفوذ یون‌های کلرید و جذب موینه نداشته‌اند، لیکن استفاده از دوده سیلیسی حتی در ۳٪ جایگزینی، بهبود قابل توجه مشخصه‌های دوام را برای مخلوط‌های پوزولانی به همراه داشته است.

واژگان کلیدی: بتن توانمند، سیمان چندجزیی، دوده سیلیسی، توف، توسعه‌ی پایدار.

۱. مقدمه

صنعت سیمان با تولید سالانه‌ی بیش از ۷٪ دی‌اکسیدکربن متصاعدشده در جو، یکی از آلاینده‌ترین صنایع موجود در جهان محسوب می‌شود.^[۱] همچنین بخش قابل توجهی از منابع طبیعی سنگ آهک و خاک رس در تولید کلینکر مصرف می‌شود. لیکن بسیاری از سازه‌های بتنی، مشخصه‌های مکانیکی ضعیف دارند و دچار دوام نامناسب و عمر مفید پایین در شرایط قرارگیری در معرض محیط‌های آسیب‌رسان هستند.^[۲] بر این اساس در سال‌های اخیر با رویکرد توسعه‌ی پایدار توجهی جدی به تولید سیمان‌های آمیخته و تولید بتن‌های توانمند و همچنین بتن سبز شده است.^[۳] بتن سبز یا بتن‌های سازگار با محیط‌زیست، به بتن‌هایی گفته می‌شود که برای تولید آن‌ها از مواد بازیافتی یا مواد سازگار با محیط‌زیست استفاده می‌شود.^[۴] در بتن‌های سبز از مواد مکمل سیمانی همچون دوده سیلیسی که حاصل ضایعات کارخانه‌های فروآلیاژ است و یا انواع پوزولان‌های طبیعی می‌توان استفاده کرد. تولید بتن‌های مذکور علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف منابع انرژی و کاهش آلودگی هوا، موجب افزایش عمر مفید بتن نیز می‌شود. لذا استفاده از مواد مکمل سیمانی جهت طراحی مخلوط‌های بتنی با مقدار بهینه‌ی سیمان و افزایش

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۴/۱، اصلاحیه ۱۳۹۵/۶/۲۸، پذیرش ۱۳۹۵/۷/۱۱.

DOI: 10.24200/J30.2018.1346

دوام و عمر مفید بتن و مقرون به صرفه از لحاظ مصرف منابع طبیعی و اقتصادی از موارد مهم مطرح در توسعه‌ی پایدار در صنعت سیمان است. شایان ذکر است که برای افزایش دوام بتن، استفاده از پوزولان‌ها در سطوح جایگزینی مناسب کاهش نسبت آب به سیمان مؤثرتر است.^[۵]

بسیاری از سازه‌های بتنی به دلیل زوال در شرایط آسیب‌رسان محیطی، نظیر حملات سولفاتی و کلریدی، حملات اسیدی و کربناسیون و از این قبیل از سرویس‌دهی خارج می‌شوند و به پایان عمر مفید خود می‌رسند. یکی از روش‌های موفق بهبود دوام بتن در بسیاری از شرایط آسیب‌رسان محیطی، استفاده از سیمان‌های حاوی مواد پوزولانی است.^[۵-۷] بر این اساس انواع مختلفی از پوزولان‌ها همچون پوزولان‌های طبیعی استفاده شده‌اند. بسیاری از پوزولان‌های طبیعی، نرخ مصرف آهک به نسبت کم در سنین پایین دارند و با افزایش سن، عملکرد پوزولانی آن‌ها بهبود می‌یابد.^[۸،۹] علی‌رغم بهبود بسیاری از مشخصه‌های دوام و مقاومت در سنین بالای عمل‌آوری، مواد مذکور در سنین پایین، ارتقاء مناسبی از نظر بهبود مشخصه‌های دوام در بتن ایجاد نمی‌کنند.

مثلاً در پژوهشی در سال ۱۹۸۱، به بررسی میزان کسب مقاومت فشاری یک مخلوط حاوی توف تا سن ۱ سال پرداخته شده است که نتایج آن نشان‌دهنده‌ی کسب بخش عمده‌ی مقاومت فشاری در سنین پس از ۲۸ روز بوده است.^[۱۰]

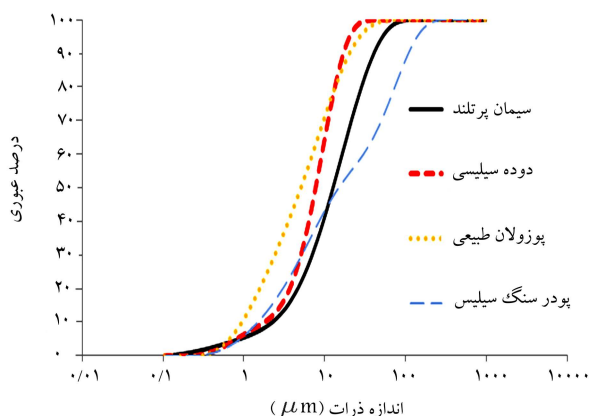
۲. مصالح و روش آزمایشگاهی

۱.۲. مصالح

سیمان استفاده‌شده از نوع سیمان پرتلند تیپ ۲ بوده است. دوده‌ی سیلیسی مورد استفاده نیز محصول شرکت صنایع فرولیاژ ایران با سطح ویژه ۲۱ مترمربع بر گرم بود. همچنین پوزولان طبیعی مورد استفاده در پژوهش حاضر از نوع توف آتشفشانی و پوزولان مصرفی یکی از کارخانه‌های سیمان بوده است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان، توف و دوده‌ی سیلیسی در جدول ۱ و توزیع ابعادی ذرات مواد مذکور شامل ابعاد کلوخه‌های دوده‌ی سیلیسی و پوزولان طبیعی توف در شکل ۱ ارائه شده است.

اندازه‌گیری اندازه‌ی ذرات یک ماده معمولاً با عکس‌های میکروسکوپ الکترونی یا عبوری انجام می‌گیرد. لیکن در مطالعه‌ی حاضر همچون بسیاری از مطالعات معتبر گزارش شده، از دستگاه تعیین توزیع ابعادی لیزری استفاده شده است. دستگاه تعیین توزیع ابعادی لیزری در واقع سائز کلوخه‌ی مواد را نشان می‌دهد. لذا با توجه به نحوه‌ی آسیاب پوزولان طبیعی جهت استفاده در بتن، اندازه‌ی کلوخه‌های آن از کلوخه‌های دوده‌ی سیلیسی ریزتر شده است. شایان ذکر است که در نوشتار دیگری^[۲۸] نشان داده شده است که سائزهای کلوخه‌ی نانوذرات سیلیسی به مراتب بزرگ‌تر از اندازه‌ی کلوخه‌ی دوده‌ی سیلیسی است. البته به این معنا نیست که اندازه‌ی ذرات دوده‌ی سیلیسی کوچک‌تر از اندازه‌ی نانوسیلیس است و قطعاً ذرات دوده‌ی سیلیسی، اندازه‌های کوچک‌تر از اندازه‌ی ذرات توف مورد بحث دارند.

سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر شامل ماسه‌ی طبیعی با بیشینه‌ی اندازه‌ی ۴/۷۵ میلی‌متر و جذب آب ۰/۳٪ و چگالی اشباع با سطح خشک 2640 kg/m^3 ؛ شن نخودی با بیشینه‌ی اندازه‌ی ۱۲/۵ میلی‌متر و جذب آب ۰/۴۵٪ و چگالی اشباع با سطح خشک 2630 kg/m^3 ؛ و شن بادامی با بیشینه‌ی اندازه‌ی ۱۹ میلی‌متر و جذب آب ۰/۹٪ و چگالی اشباع با سطح خشک 2620 kg/m^3 بودند. با توجه به اینکه ماسه‌های موجود در ایران مقدار فیلر کمی دارند، از پودر سیلیس به‌عنوان پرکننده استفاده شد. دانه‌بندی پودر سیلیس با استفاده از دستگاه طیف‌سنج لیزری اندازه‌گیری و در شکل ۱ در مقایسه با دوده‌ی سیلیسی، توف و سیمان نشان داده شده است. فوق روان‌کننده‌ی مورد استفاده از نوع پلی‌کربوکسیلات اتر و مقدار مواد جامد آن ۳٪ و وزن مخصوص آن 1100 kg/m^3 بود.



شکل ۱. دانه‌بندی ذرات سیمان، دوده‌ی سیلیسی، پوزولان طبیعی توف و پودر سنگ سیلیسی.

نتایج برخی پژوهش‌ها در مورد مخلوط‌های حاوی سایر مواد پوزولانی با سرعت واکنش پوزولانی‌کند گزارش شده است.^[۱۱-۱۳] یکی از روش‌های بهبود مشخصه‌های دوام بتن‌های حاوی مواد پوزولانی با سرعت واکنش‌زایی کند، استفاده از مواد پوزولانی با سرعت بالای مصرف آهک است. به این صورت که مواد پوزولانی با سرعت مصرف بالای آهک به بهبود خواص دوام و مقاومت در سنین پایین کمک می‌کند و مواد پوزولانی با سرعت کند، واکنش پوزولانی عملکرد دوام را در سنین بالا ارتقاء می‌دهند؛ لذا چنین ترکیب سیمانی، عملکرد مقاومتی و دوام قابل قبولی را در زمان‌های مختلف دارد و آسیب‌های ناشی از محیط‌های آسیب‌رسان را در سنین پایین کاهش خواهد داد.^[۱۹-۲۱] در این شرایط استفاده از سیمان‌های چندجزئی، گزینه‌ی خوبی خواهد بود. برای مثال در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۴^[۱۴]، نشان داده شده است که استفاده از ۸٪ خاکستر بادی فوق‌العاده ریز، مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روز ملات‌های محتوی حجم بالای خاکستر بادی را بهبود بخشیده و موجب متراکم‌تر شدن ساختار بتن و کاهش نفوذپذیری آن شده است.

هر چند دوده‌ی سیلیسی موجب ارتقاء درجه‌ی هیدراسیون سیمان و بهبود توزیع اندازه‌ی حفره‌ها در سیستم دوجزئی می‌شود،^[۲۰-۲۲] لیکن به دلیل سطح ویژه‌ی بالای آن، کارایی بتن به‌شدت کاهش می‌یابد و امکان استفاده از درصد‌های بالای آن ممکن نیست.^[۱۷] لذا ترکیب آن با پوزولان‌های دیگر همچون پوزولان‌های طبیعی که تأثیر منفی زیادی در کارایی بتن ندارند، امکان استفاده از درصد‌های بالاتر پوزولان را فراهم خواهد کرد. به عنوان مثال، با ترکیب مناسب توف و دوده‌ی سیلیسی می‌توان به مقاومت و مدول کشسانی مناسب برای بتن در سن ۲۸ روز رسید.^[۲۳] به‌طور مشابه در ترکیب دوده‌ی سیلیسی و خاکستر بادی، برخی پژوهش‌ها،^[۲۴-۲۶] نشان داده‌اند که استفاده از ترکیب سه‌جزئی خاکستر بادی و دوده‌ی سیلیسی، عملکرد بسیار بهتری را نسبت به سیمان دوجزئی حاوی خاکستر بادی در سن ۲۸ روز از لحاظ مقاومت در برابر حملات کلریدی نشان داده است. همچنین مخلوط سه‌جزئی محتوی خاکستر بادی و دوده‌ی سیلیسی موجب بهبود کارایی و مقاومت فشاری مخلوط‌ها نسبت به مخلوط حاوی خاکستر بادی شده است.^[۱۸، ۱۹] در جایگزینی ترکیب دوده‌ی سیلیسی و سرباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی نیز، نفوذپذیری بتن به‌طور چشم‌گیری کاهش یافته است.^[۲۷]

در سال‌های اخیر، برای تولید بتن‌های توانمند با هدف توسعه‌ی پایدار، برخی مطالعات به بررسی خواص بتن‌های حاوی درصد بالای مواد پوزولانی پرداخته‌اند. در بتن‌های مذکور، واکنش پوزولانی در سنین اولیه‌ی کند است که با استفاده از یک ماده‌ی پوزولانی دیگر می‌توان آن را تسریع کرد. به عنوان مثال، پژوهش‌های دیگری،^[۱۳، ۱۴] نشان دادند که خاکستر بادی فوق‌العاده ریز به‌عنوان جایگزین سیمان در ملات‌های با حجم بالای خاکستر بادی، واکنش پوزولانی را تسریع، ریزساختار را متراکم‌تر و به بهبود مقاومت فشاری کمک می‌کند.

در مطالعات پیشین، تاکنون از پوزولان طبیعی به ویژه توف در مقدار جایگزینی با حجم بسیار زیاد و در ترکیب با دوده‌ی سیلیسی استفاده نشده است. لذا مطالعه‌ی حاضر به بررسی تأثیر استفاده از دوده‌ی سیلیسی در بتن‌های حاوی توف در درصد‌های بالای جایگزینی ۴۰ تا ۶۰ درصد پرداخته است و نتایج آن می‌تواند از لحاظ مباحث توسعه‌ی پایدار در صنعت سیمان و ساختمان قابل اهمیت باشد و کاربرد پیدا کند. همچنین امکان‌پذیری تولید بتن‌های با عملکرد مناسب، چه در سنین پایین و چه در سنین بالا با اثر ترکیبی توف و دوده‌ی سیلیسی بررسی شده است.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان، توف و دوده سیلیسی.

مشخصات شیمیایی الزامی	سیمان	توف	دوده سیلیسی
%L.O.I.	۱٫۵۳	۲٫۸۸	۰٫۱
%SiO _۲	۲٫۷۴	۶۳٫۴	۹۴٫۳
%Al _۲ O _۳	۴٫۵۲	۱۸٫۴۵	۱٫۱
%Fe _۲ O _۳	۳٫۷۸	۱٫۳	۰٫۷
%CaO	۶۳٫۶۸	۵٫۴۴	۰٫۴۹
%MgO	۱٫۵۰	۱۵	۰٫۸۷
%SO _۳	۲٫۶۹	-	-
%K _۲ O	۰٫۵۱	۲٫۰۶	۱٫۳۲
%Na _۲ O	۰٫۵۹	۳٫۰۰	۰٫۴۲
surface area (cm ^۲ /g)-Blain	۳۲۳۰	۳۹۰۰	-
۷ days compressive strength (MPa)	۳۶۰	-	-
۲۸ days compressive strength (MPa)	۴۷۰	-	-
surface area (cm ^۲ /g)-BET	-	-	۱۹۲۰۰۰
specific weight (kg/m ^۳)	۳۱۴۰	۲۷۱۰	۲۲۰۰
a breviation	C	NP	SF

۲.۲. طرح مخلوط‌ها

در پژوهش حاضر، برای رسیدن به یک بتن توانمند با بیشینه تراکم با توجه به پژوهشی در سال ۱۹۸۰^[۲۹] از نمودار دانه‌بندی اندرسون با توان ۰٫۳۷ برای مخلوط‌های بتن استفاده شد. دلیل استفاده از منحنی دانه بندی مذکور، دست‌یابی به بیشترین تراکم دانه‌ها جهت دست‌یابی به یک مخلوط بتن با بیشترین چگالی است. طبق تعریف ارائه شده در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۳^[۳۰] بتن توانمند به بتنی گفته می‌شود که در حالت تازه، کارایی مناسب و در حالت سخت شده مقاومت فشاری بالا و نیز دوام و پایداری ابعادی بالا دارد. در پژوهشی در سال ۱۹۹۹^[۳۱] کمینه‌ی مقاومت ۶۰ مگاپاسکال به عنوان معیار مقاومتی توصیه شده است. منحنی دانه‌بندی برای نمودار مذکور از رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید:

$$P(d) = \frac{d^q - d_{\min}^q}{d_{\max}^q - d_{\min}^q} \quad (۱)$$

که در آن، $P(d)$: درصد عبوری از الک، (d) : قطر الک در نظر گرفته شده، d_{\max} : بیشینه‌ی قطر سنگ دانه، d_{\min} : کمینه‌ی قطر سنگ دانه، q : پارامتری که منحنی را برای ریزدانه یا درشت دانه تنظیم می‌کند که در پژوهش حاضر ۰٫۳۷ در نظر گرفته شده است.

همچنین در تمامی مخلوط‌ها، مقدار سیمان ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و نسبت آب به سیمان ۰٫۳۸ در نظر گرفته شد. در پژوهش حاضر، ۱۲ طرح اختلاط شامل ۱ طرح مخلوط کنترل، ۳ طرح مخلوط ترکیبی دوجزئی حاوی دوده سیلیسی با نسبت‌های جایگزینی ۳، ۶ و ۹ درصد، ۲ طرح مخلوط دوجزئی با پوزولان با نسبت جایگزینی ۴۰ و ۶۰ درصد و ۶ طرح مخلوط سه‌جزئی با دوده سیلیسی و توف

با لحاظ کردن ترکیب نسبت‌های مذکور ساخته شد. جدول ۲، مشخصات طرح مخلوط‌های بتنی را نشان می‌دهد.

۳.۲. تهیه‌ی نمونه‌های آزمایش

در پژوهش حاضر، برای انجام آزمایش‌ها روی بتن سخت شده، نمونه‌های مکعبی با بعد ۱۰ سانتی‌متر در ۲ لایه و نمونه‌های استوانه‌یی با قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر در ۳ لایه روی میز لرزان تهیه شدند. همچنین اسلامپ تمام نمونه‌ها برابر 12 ± 2 سانتی‌متر در نظر گرفته شد. نمونه‌های استوانه‌یی شکل به منظور انجام آزمایش‌های مربوط به دوام بتن همچون جذب حجمی، جذب موئینه و آزمایش مهاجرت یون‌های کلرید جهت اندازه‌گیری میزان نفوذ یون‌های کلرید در بتن در سنین ۲۸ و ۹۰ روز و نمونه‌های مکعبی برای آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز و تعیین مقاومت فشاری بتن پس از ۴۲ روز قرارگیری در معرض اسیدسولفوریک با غلظت ۱٪ آزمایش شدند. با توجه به اینکه آیین‌نامه‌ی مدونی در مورد آزمایش خوردگی در برابر اسید وجود ندارد، لذا با نظر پژوهش‌گر، برای انجام آزمایش حاضر از اسیدسولفوریک استفاده و با توجه به زمان محدود، زمان ۴۲ روز در نظر گرفته شد. همچنین جهت بررسی مقاومت در برابر خوردگی در محیط‌های اسیدی شدید، از غلظت ۱٪ استفاده شد.

۴.۲. آزمایش مقاومت فشاری

هدف از انجام آزمایش مقاومت فشاری، اندازه‌گیری بیشینه‌ی مقاومت فشاری قابل تحمل توسط بتن است. آزمایش مقاومت فشاری روی دست‌کم ۳ نمونه‌ی

جدول ۲. طرح مخلوط بتن‌ها.

کد طرح	سیمان (kg/m^3)	دوده‌ی سیلیسی (kg/m^3)	پوزولان (kg/m^3)	درصد جایگزینی مواد پوزولانی	پودر سنگ سیلیس (kg/m^3)	شن		ماسه‌ی شسته (kg/m^3)	فوق روان‌کننده (kg/m^3)
						بادامی (kg/m^3)	نخودی (kg/m^3)		
C۱۰۰	۴۰۰	-	-	٪۰	۷۶	۲۸۳	۶۰۵	۱۰۱۴	۴/۴
C۹۷-SF۳	۳۸۸	۱۲	-	٪۳	۷۵	۲۸۲	۶۰۴	۹۳۰	۳
C۹۴-SF۶	۳۷۶	۲۴	-	٪۶	۷۵	۲۸۱	۶۰۲	۹۲۷	۳/۲
C۹۱-SF۹	۳۶۴	۳۶	-	٪۹	۷۵	۲۸۱	۶۰۱	۹۲۵	۳/۴
C۶۰-P۴۰	۲۴۰	-	۱۶۰	٪۴۰	۷۲	۲۷۹	۵۹۸	۸۸۵	۳/۶
C۵۷-P۴۰-SF۳	۲۲۸	۱۲	۱۶۰	٪۴۳	۷۵	۲۷۸	۵۹۵	۹۲۴	۴/۰
C۵۴-P۴۰-SF۶	۲۱۶	۲۴	۱۶۰	٪۴۶	۷۵	۲۷۸	۵۹۴	۹۲۱	۴/۸
C۵۱-P۴۰-SF۹	۲۰۴	۳۶	۱۶۰	٪۴۹	۷۵	۲۷۷	۵۹۳	۹۱۸	۵/۲۸
C۴۰-P۶۰	۱۶۰	-	۲۴۰	٪۶۰	۷۴	۲۷۸	۵۹۵	۹۲۰	۵
C۳۷-P۴۰-SF۳	۱۴۸	۱۲	۲۴۰	٪۶۳	۷۳	۲۷۷	۵۹۳	۹۰۸	۵/۲
C۳۴-P۶۰-SF۶	۱۳۶	۲۴	۲۴۰	٪۶۶	۷۳	۲۷۶	۵۹۲	۹۰۶	۵/۶
C۳۱-P۶۰-SF۹	۱۲۴	۳۶	۲۴۰	٪۶۹	۷۳	۲۷۵	۵۹۰	۹۰۳	۶/۰

مکعبی با بعد ۱۰ سانتی‌متر در سنین ۳، ۷، ۲۸، ۹۰ روز مطابق استاندارد BS۱۸۱-۱۱۶^[۳۱] انجام شده است. در آزمایش مذکور، سرعت اعمال بار به منظور انجام بارگذاری یکنواخت ۴۰۰ کیلوپاسکال بر ثانیه لحاظ شده است.

۵.۲. آزمایش سرعت جذب آب موئینه

هدف از انجام آزمایش سرعت جذب آب موئینه، تعیین نرخ جذب آب توسط بتن برای سنجش وضعیت ریزساختاری بتن است. آزمایش مذکور در سنین ۲۸ و ۹۰ روز مطابق استاندارد ASTM^[۳۲] C۱۵۸۵ روی نمونه‌های استوانه‌یی با ارتفاع ۵ سانتی‌متر و قطر ۱۰ سانتی‌متر که از یک سوم میانی نمونه‌های استوانه‌یی اصلی بریده شده بودند، انجام شد. برای انجام آزمایش قسمت تحتانی، نمونه‌ها به اندازه‌ی ۳ میلی‌متر درون آب قرار گرفتند و افزایش وزن در فواصل زمانی ۱، ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۳۶۰ دقیقه تعیین شد. سپس مطابق استاندارد، نرخ جذب آب اولیه برحسب mm/\sqrt{s} اندازه‌گیری شد.

۶.۲. آزمایش حجم منافذ قابل نفوذ

هدف از انجام آزمایش حجم منافذ قابل نفوذ، بررسی میزان حجم منافذ قابل نفوذ در بتن سخت‌شده به عنوان یکی از معیارهای دوام و ریزساختار بتن است. آزمایش منافذ قابل نفوذ مطابق ASTM^[۳۳] C۶۴۲، روی نمونه‌های استوانه‌یی به ارتفاع ۵ سانتی‌متر و قطر ۱۰ سانتی‌متر در سنین ۲۸ و ۹۰ روز انجام شده است. برای انجام آزمایش، نمونه‌ها در آون ۱۰۵ درجه‌ی سانتی‌گراد تا زمان ثابت شدن وزن نگهداری شده‌اند. پس از اندازه‌گیری وزن خشک، نمونه‌ها در آب قرار داده شدند، تا وزن آن‌ها ثابت شود. حجم منافذ قابل نفوذ مطابق ASTM C۶۴۲ و روابط ۲ الی ۴ تعیین

می‌شوند:

$$[B/(C - D)].\rho = g_1 \quad \text{چگالی خشک} \quad (۲)$$

$$[A/(A - D)].\rho = g_2 \quad \text{چگالی ظاهری} \quad (۳)$$

$$(g_2 - g_1)g_2 \times 100 (\%) \quad \text{حجم حفره‌ها} \quad (۴)$$

که در آن‌ها: A ، وزن نمونه‌ی خشک‌شده در آون بر حسب گرم (gr) ، B ، وزن نمونه‌ی غوطه‌ور شده در آب با سطح خشک بر حسب گرم (gr) ، C ، وزن نمونه‌ی غوطه‌ورو جوشیده با سطح خشک بر حسب گرم (gr) ، D ، وزن ظاهری نمونه پس از غوطه‌وری و جوشیدن بر حسب گرم (gr) ، g_1 چگالی خشک بر حسب تن بر مترمکعب (T/m^3) ، g_2 چگالی ظاهری بر حسب تن بر مترمکعب (T/m^3) ، ρ چگالی آب بر حسب تن بر مترمکعب (T/m^3) .

لازم به ذکر است که دمای ۱۰۵ درجه‌ی سانتی‌گراد می‌تواند تأثیر منفی در ریزساختار نمونه‌های بتنی و توسعه‌ی ریزترک‌ها در نمونه‌های مذکور و بالطبع نتیجه‌گیری نهایی آزمایش داشته باشد، لیکن طبق آیین‌نامه‌ی ASTM C۶۴۸، استفاده از دمای ذکرشده برای انجام آزمایش توصیه شده است.

۷.۲. آزمایش مهاجرت تسریع‌شده‌ی یون‌های کلرید (RCMT)

هدف از انجام آزمایش مهاجرت تسریع‌شده‌ی یون‌های کلرید، ارزیابی سریع نفوذپذیری بتن در برابر نفوذ یون کلرید جهت مصارف کاربردی و ارزیابی ریزساختار است. مهاجرت تسریع‌شده‌ی یون‌های کلرید مطابق ASTM BUILD۴۹۲^[۳۴] در سنین

می‌شود. بعد از آماده‌سازی محلول، ۵ گرم از پوزولان موردنظر به محلول اضافه و تغییرات رسانایی تا ۱۲۰ دقیقه ثبت می‌شود. البته باید نمک‌های موجود در پوزولان را نیز مدنظر قرار داد، لذا ابتدا باید تغییرات رسانایی را در یک محلول حاوی ۲۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر و ۵ گرم ماده‌ی پوزولانی به مدت ۱۲۰ دقیقه اندازه‌گیری کرد.

۳. بحث و نتیجه‌گیری

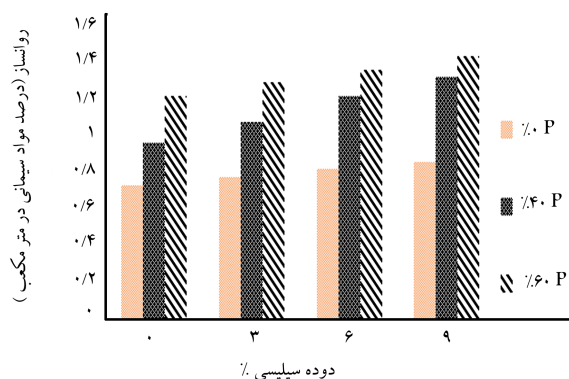
۱.۳. نیاز آبی

جهت بررسی تأثیر توف و دوده‌ی سیلیسی در نیاز آبی مخلوط‌های بتنی، مقدار فوق‌روان‌ساز مصرف‌شده در طرح مخلوط بتن در شکل ۲ ارائه شده است. با توجه به شکل مذکور در مخلوط‌های پوزولانی، افزایش درصد دوده‌ی سیلیسی نیاز به روان‌ساز را افزایش داده است. برای مثال در مقدار ثابت توف ۴۰٪، با افزایش مقدار دوده‌ی سیلیسی از ۰٪ به ۳، ۶ و ۹ درصد، مقدار استفاده از روان‌کننده به میزان ۱۱، ۲۶ و ۳۸ درصد نسبت به طرح مخلوط ۰٪ دوده‌ی سیلیسی افزایش داشته است که دلیل آن سطح ویژه‌ی بالای دوده‌ی سیلیسی و جرم حجمی کمتر آن‌ها در مقایسه با سیمان بوده است که موجب افزایش مصرف می‌شود.

با افزایش مقدار جایگزینی توف در مقدار دوده‌ی سیلیسی ثابت، مصرف فوق‌روان‌کننده افزایش می‌یابد. برای مثال در مقدار ثابت دوده‌ی سیلیسی ۹٪، با افزایش مقدار توف از ۰٪ به ۴۰ و ۶۰ درصد، مقدار مصرف فوق‌روان‌کننده به ترتیب به میزان ۵۴ و ۶۷ درصد نسبت به طرح مخلوط ۰٪ توف افزایش داشته است که به دلیل جذب آب بالای پوزولان‌های طبیعی است. لذا با افزایش مقدار جایگزینی توف و دوده‌ی سیلیسی، نیاز آبی مخلوط‌ها افزایش می‌یابد. در آزمایش حاضر، بیشترین نیاز آبی مربوط به طرح مخلوط SF۹-P۶-C۳۱ بود.

۲.۳. تعیین خواص پوزولانی

محلول آب‌آهک، مقادیر بالایی از یون‌های Ca^{+2} و OH^{-} دارد و در نتیجه، خاصیت رسانایی بالایی دارد. لذا با افزودن مواد پوزولانی به محلول آب‌آهک و واکنش آن‌ها با هیدروکسیدکلسیم، سبب تثبیت یون‌ها و کاهش رسانایی الکتریکی می‌شود. اگر تغییرات رسانایی دوده‌ی سیلیسی در محلول آب مقطر و هیدروکسیدکلسیم، A و تغییرات رسانایی آن ماده در محلول آب مقطر، B در نظر گرفته شود، به دلیل وجود ناخالصی‌ها در مواد پوزولانی که موجب افزایش رسانایی می‌شود، مقادیر A از B کم



شکل ۲. مقدار فوق‌روان‌کننده‌ی مورد استفاده در ساخت مخلوط‌ها.

۲۸ و ۹۰ روز بر روی ۳ نمونه‌ی بتنی انجام شده است. در آزمایش مذکور، نحوه‌ی آماده‌سازی نمونه‌ها بدین گونه است که هر نمونه بعد از ۳ ساعت قرارگیری در شرایط خلأ خشک، ۲ ساعت در شرایط خلأ تر و بعد به مدت ۱۸ ساعت در شرایط اشباع با آب قرار می‌گیرند. سپس نمونه‌ها داخل غلاف لاستیکی قرار داده می‌شوند و محلول سود (هیدروکسید سدیم) با غلظت ۰/۳ نرمال، در تماس با وجه بالایی نمونه‌ی بتنی قرار می‌گیرد. نمونه‌ی آماده‌شده درون ظرف حاوی محلول نمک (کلرید سدیم) با غلظت ۱۰٪ قرار می‌گیرد، به نحوی که وجه پایینی نمونه در تماس با محلول نمک باشد. پس از اعمال ولتاژ از دستگاه مبدل جریان مستقیم طبق روش معرفی‌شده به مدت مشخص، نمونه‌ها دو نیم می‌شوند و با پاشش محلول نیترات نقره بر روی سطح، متوسط عمق نفوذ یون‌های کلرید تعیین می‌شود. ضریب مهاجرت یون‌های کلرید مطابق روش NT BUILD۴۹۲ با استفاده از رابطه‌ی ۵ محاسبه می‌شود: [۲۶]

$$D_{nssm} = \frac{0.239(273 + T) \times L}{(U - 2) \times t} (X_D - 0.238) \times \sqrt{\frac{(273 + T) \times L \times X_d}{U - 2}} \quad (5)$$

که در آن: D_{nssm} ، ضریب مهاجرت یون‌های کلرید $\times 10^{-12} m^2/s$ ، U مقدار ولتاژ اعمالی، T میانگین دمای اولیه و ثانویه در محلول آب‌نمک، L ضخامت نمونه برحسب میلی‌متر، X_d میانگین مقادیر عمق نفوذ، t مدت زمان آزمایش بر حسب ساعت.

۸.۲. آزمایش تعیین مقاومت در برابر اسیدسولفوریک

هدف از انجام آزمایش تعیین مقاومت در برابر اسیدسولفوریک، بررسی عملکرد بتن در شرایط اسیدی و بسیار خورنده به عنوان یکی از معیارهای قرارگیری در شرایط آسیب‌رسان محیطی بود. لذا در پژوهش حاضر، اثر استفاده از توف و دوده‌ی سیلیسی در مقاومت در برابر اسیدسولفوریک روی ۳ طرح مخلوط با مقدار جایگزینی دوده‌ی سیلیسی ثابت ۶٪ و با نسبت‌های جایگزینی توف ۰، ۴۰ و ۶۰ درصد انجام شد. برای این منظور برای هر طرح مخلوط، ۳ نمونه‌ی مکعبی با بعد ۱۰ سانتی‌متر پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در محلول آب‌آهک اشباع، به مدت ۴۲ روز درون محلول اسیدسولفوریک ۱۰٪ قرار گرفتند. بعد از این مدت، نمونه‌ها از درون ظرف خارج و با آب شسته شدند و آزمایش مقاومت فشاری روی آن‌ها انجام شد. شایان ذکر است که جهت بررسی مقاومت در برابر خوردگی در محیط‌های اسیدی شدید، از غلظت ۱۰٪ استفاده شده است.

۹.۲. خاصیت پوزولانی

برای تعیین نحوه‌ی عملکرد و تفسیر نتایج دوام و مقاومت، نیاز به مقایسه‌ی نرخ واکنش پوزولانی دوده‌ی سیلیسی و توف آتشفشانی است. لذا در پژوهش حاضر، خاصیت پوزولانی سنجیده شده است. به این منظور از یکی از روش‌های سریع بررسی واکنش پوزولانی، از روش رسانایی الکتریکی برای بررسی خاصیت پوزولانی خاکستر بادی پیشنهاد شده است که تغییرات رسانایی را در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری می‌کند و با استفاده از آن می‌توان خاصیت پوزولانی مواد را مقایسه کرد. [۲۷] لذا در پژوهش حاضر نیز از روش مذکور برای بررسی خاصیت پوزولانی مواد مختلف از پارامتر درصد کاهش رسانایی LC^۱ استفاده شده است. هر چه عدد پارامتر بیشتر باشد، به معنای آن است که ماده‌ی موردنظر، واکنش پوزولانی بیشتری دارد.

روش انجام آزمایش مذکور به این صورت است که ابتدا در یک ظرف ۲۵۰ میلی‌لیتری، ۱۲۰ میلی‌گرم هیدروکسیدکلسیم در ۱۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر حل

می‌شود تا Ca_t که تغییرات رسانایی اصلاح شده نام دارد، به دست آید (رابطه‌ی ۶):

$$Ca_t = A - B \quad (6)$$

برای بررسی خاصیت پوزولانی مواد مختلف از پارامتر درصد کاهش رسانایی LC استفاده می‌شود. هر چه عدد پارامتر LC بیشتر باشد، نشان‌دهنده‌ی آن است که ماده موردنظر، واکنش پوزولانی دارد (رابطه‌ی ۷):

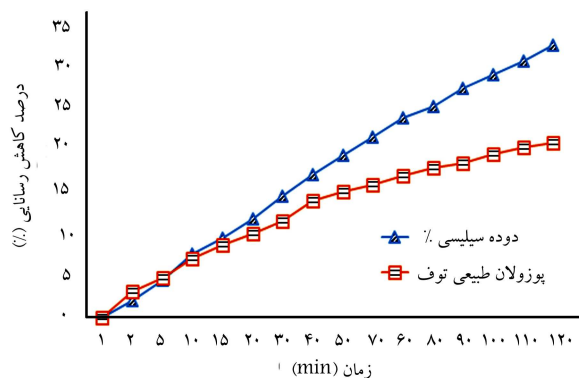
$$LC(\%) = \frac{Ca - Ca_t}{Ca} \quad (7)$$

که در آن، Ca رسانایی اصلاح شده در زمان صفر دقیقه بر حسب $\mu s/cm$ (میکروزیمنس بر ثانیه)، Ca_t رسانایی اصلاح شده در مدت زمان دلخواه (۱۲۰ دقیقه) و LC درصد کاهش رسانایی الکتریکی است.

همان‌طور که شکل ۳ نشان می‌دهد، در مدت ۱۲۰ دقیقه مقدار درصد کاهش رسانایی برای دوده‌ی سیلیسی برابر ۳۲/۴۸٪ و برای پوزولان طبیعی توف، برابر ۲۰/۸۷٪ است. لذا واکنش پوزولانی دوده‌ی سیلیسی نسبت به پوزولان طبیعی بهتر است. این اثر را می‌توان در آزمایش مهاجرت تسریع‌شده‌ی یون‌های کلرید نیز مشاهده کرد، به‌طوری که تأثیر دوده‌ی سیلیسی در کاهش مهاجرت یون‌های کلرید بیشتر از توف است.

۳.۳. آزمایش مقاومت فشاری

نتایج مقاومت فشاری ۳ روزه‌ی مخلوط‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل مذکور در درصد توف یکسان، افزایش دوده‌ی سیلیسی تأثیر چندانی در افزایش مقاومت نداشته و حتی در درصد بالاتر، مقدار دوده‌ی سیلیسی به میزان



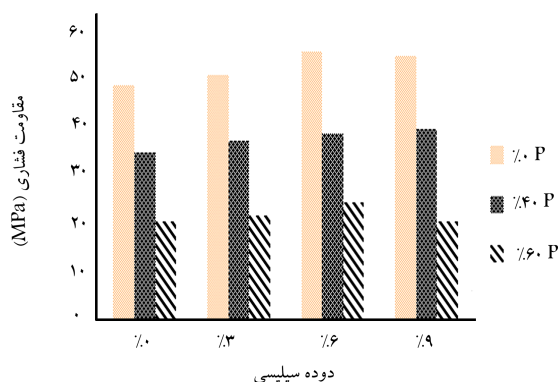
شکل ۳. درصد کاهش رسانایی الکتریکی در توف و دوده‌ی سیلیسی.

اندکی موجب کاهش مقاومت شده است. دلیل این مسئله آن است که دوده‌ی سیلیسی در سن ۳ روز، همان‌طور که در پژوهشی در سال ۱۳۹۰، [۳۸] نیز اشاره شده است، واکنش پوزولانی قابل توجهی نداشته و نتوانسته است بهبودی در مقاومت فشاری ایجاد کند. به‌عنوان مثال در مقدار ثابت ۴۰٪ توف با افزایش دوده‌ی سیلیسی از ۰٪ به ۳، ۶ و ۹ درصد به ترتیب ۳، ۲ و ۱۳ درصد کاهش مقاومت مشاهده شد. نکته‌ی قابل توجه در سن ۳ روز، رسیدن به مقاومت فشاری حدود ۷۰ مگاپاسکال در طرح مخلوط بدون توف و تا ۶٪ دوده‌ی سیلیسی است که بخشی از دلیل آن می‌تواند به استفاده از یک نمودار دانه‌بندی مطلوب مربوط باشد.

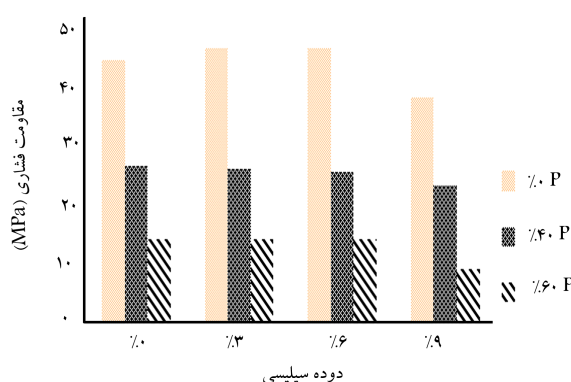
در نسبت دوده‌ی سیلیسی یکسان، با افزایش مقدار توف به ۴۰ و ۶۰ درصد، کاهش شدید مقاومت فشاری مشهود است. علت این کاهش نیز می‌تواند مقدار واکنش‌پذیری اندک توف مورد استفاده در سنین پایین باشد. به‌عنوان مثال در ۶٪ دوده‌ی سیلیسی، افزایش مقدار توف از ۰٪ به ۴۰ و ۶۰ درصد، موجب کاهش مقاومت فشاری به ترتیب به میزان ۴۵ و ۷۰ درصد نسبت به طرح مخلوط بدون توف شده است.

نتایج مقاومت فشاری ۷ روزه‌ی مخلوط‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به شکل مذکور، با افزایش سن از ۳ به ۷ روز، مقاومت فشاری مخلوط‌ها افزایش یافته است. برخلاف سن ۳ روزه که استفاده از دوده‌ی سیلیسی باعث کاهش مقاومت فشاری مخلوط‌ها شده بود، در سن ۷ روز مشاهده می‌شود که در مقدار ثابت توف، افزایش دوده‌ی سیلیسی باعث اندکی افزایش در مقاومت فشاری شده است. به‌عنوان مثال، در مقدار ثابت توف ۴۰٪، با افزایش مقدار دوده‌ی سیلیسی از ۰٪ به ۳، ۶ و ۹ درصد به ترتیب ۷، ۱۱ و ۱۴ درصد افزایش مقاومت فشاری نسبت به مخلوط بدون دوده‌ی سیلیسی مشاهده می‌شود. در مقدار ثابت دوده‌ی سیلیسی ۶٪ با افزایش مقدار توف از ۰٪ به ۴۰ و ۶۰ درصد نیز به ترتیب کاهش مقاومت فشاری ۳ و ۵۵ درصدی نسبت به طرح مخلوط بدون توف مشاهده می‌شود، که دلیل آن را می‌توان به افزایش مقدار توف و کم بودن مقدار سیمان و در نتیجه کم شدن مقدار محصولات هیدراسیون سیمان نسبت داد. در سن ۷ روز، بهترین مقاومت فشاری مربوط به طرح مخلوط C۹۴-SF۶ بوده است که فقط ۶٪ دوده‌ی سیلیسی و مقاومت ۷ روزه‌ی ۵۶ مگاپاسکال دارد. دلیل این افزایش مقاومت فشاری را می‌توان به شروع واکنش دوده‌ی سیلیسی در سن ۷ روز به بعد نسبت داد.

نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی مخلوط‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است. در مقدار ثابت توف، در همه‌ی مخلوط‌ها، با افزایش مقدار دوده‌ی سیلیسی، مقاومت فشاری افزایش یافته است که دلیل آن، واکنش مناسب دوده‌ی سیلیسی در سن ۷



شکل ۵. مقاومت فشاری ۷ روزه‌ی مخلوط‌ها.



شکل ۴. مقاومت فشاری ۳ روزه‌ی مخلوط‌ها.

تا ۹۰ روز به تدریج اختلاف مقاومت مخلوط‌های حاوی حجم زیاد توف نسبت به مخلوط بدون توف در درصد دوده‌ی سیلیسی ثابت کاهش یافته است که این اثر می‌تواند به دلیل واکنش پوزولانی توف و دوده‌ی سیلیسی با افزایش سن به ویژه در سنین پس از ۲۸ روز باشد. به عنوان مثال، در مقدار جایگزینی ۶٪ توف در مقدار دوده‌ی سیلیسی ۶٪، مقدار اختلاف مقاومت فشاری نسبت به مخلوط بدون توف، در سن ۳ روز به ۶٪، در سن ۷ روز به ۵۵٪، در سن ۲۸ روز به ۴۰٪ و در سن ۹۰ روز به ۲۵٪ رسیده است. این امر نشان‌دهنده‌ی این نکته است که واکنش‌پذیری و اثر پرکنندگی مواد پوزولانی مورد استفاده تا سن ۹۰ روز افزایش یافته است که موجب تولید بیشتر سیلیکات کلسیم آب‌دار و در نتیجه، بهبود مقاومت فشاری شده است. شایان ذکر است که طرح مخلوط با جایگزینی ۶٪ پوزولان و محتوی ۹٪ دوده‌ی سیلیسی (با حدود ۳ کیلوگرم بر مترمکعب سیمان) در سن ۳ روز مقاومت فشاری بالاتر از ۵۰ مگاپاسکال داشته است و در رده‌ی بتن‌های توانمند سبز از لحاظ ACI۳۶۳ قرار می‌گیرد.

۴.۳. آزمایش مهاجرت تسریع‌شده‌ی یون‌های کلرید

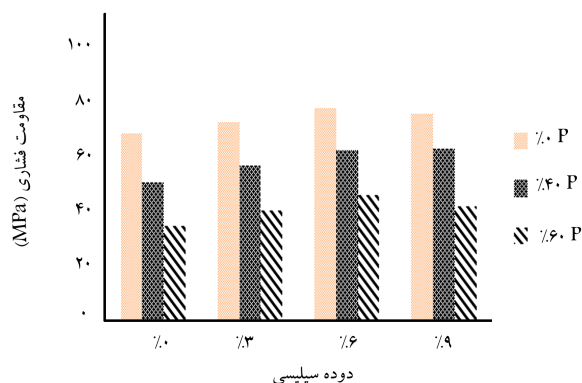
شکل ۸، نتایج ۲۸ روزه‌ی آزمایش مهاجرت تسریع‌شده‌ی یون‌های کلرید را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، طرح مخلوط کنترل بدون دوده‌ی سیلیسی و توف با نفوذپذیری بالای یون‌های کلرید است. در مقادیر جایگزینی سیمان با توف، طرح مخلوط با مقدار جایگزینی ۴۰٪ توف، بیشترین ضریب نفوذ یون‌های کلرید را دارد که با افزایش مقدار توف به ۶۰٪، ضریب نفوذ کاهش می‌یابد و به مخلوط کنترل نزدیک می‌شود. همچنین ضریب مهاجرت یون‌های کلرید مخلوط ۶۰٪ توف، کمتر از مخلوط کنترل شده است؛ بنابراین در سن ۲۸ روز، توف مورد استفاده تأثیر چندانی در کاهش نفوذ یون‌های کلرید نسبت به مخلوط کنترل نداشته است؛ لذا در محیط‌ها و شرایط کلریدی شدید، استفاده از سیمان پوزولانی ذکر شده به تنهایی نتایج قابل اطمینانی به همراه نخواهد داشت.

در سن ۲۸ روز برای درصد توف یکسان، افزودن دوده‌ی سیلیسی موجب ایجاد یک روند کاهشی شدید در مقدار ضریب نفوذ یون‌های کلرید شده است. برای مثال در مقدار ثابت ۴۰٪ توف، با افزودن فقط ۳٪ دوده‌ی سیلیسی، این ضریب حدود ۷۵٪ نسبت به طرح مخلوط بدون دوده‌ی سیلیسی کاهش یافته است. این روند کاهشی در ضریب نفوذ یون‌های کلرید، برای مقدار جایگزینی ۶ و ۹ درصد دوده‌ی سیلیسی بیشتر شده است، به طوری که در نسبت‌های جایگزینی مذکور، به ترتیب ۸۵ و ۹۲ درصد کاهش ضریب مهاجرت یون‌های کلرید نسبت به طرح مخلوط بدون دوده‌ی سیلیسی مشاهده می‌شود. مطابق نتایج، اثر ترکیبی دوده‌ی

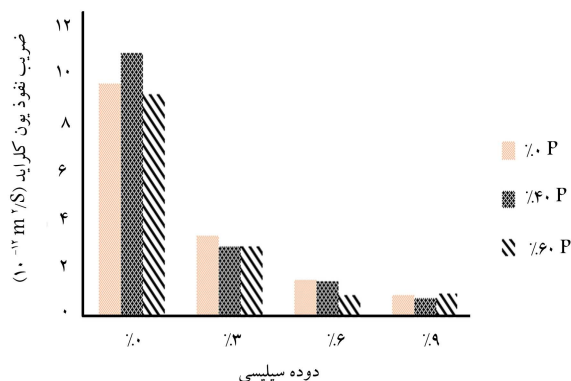
تا ۲۸ روز است. به عنوان مثال، در مقدار ثابت توف ۴۰٪، با افزایش مقدار دوده‌ی سیلیسی از ۰٪ به ۳، ۶ و ۹ درصد به ترتیب ۱۳، ۲۴ و ۲۵ درصد افزایش مقاومت فشاری نسبت به مخلوط بدون دوده‌ی سیلیسی حاصل شده است. در درصد دوده‌ی سیلیسی یکسان، در مقدار ثابت ۶٪ با افزایش مقدار توف از ۰٪ به ۴۰ و ۶۰ درصد به ترتیب، کاهش مقاومت فشاری به میزان ۲۰ و ۴۰ درصد نسبت به مخلوط ۰٪ توف مشاهده شده است. باز هم در سن ۲۸ روز، بهترین مقاومت فشاری مربوط به طرح مخلوط C۹۴-SF۶ بوده است که فقط ۶٪ دوده‌ی سیلیسی و مقاومت ۲۸ روز ۷۷ مگاپاسکال دارد. دلیل افزایش مقاومت فشاری مذکور را می‌توان به واکنش خوب دوده‌ی سیلیسی و مقدار بهینه‌ی آن در سن ۲۸ روز نسبت داد.

نتایج مقاومت فشاری ۹۰ روزه‌ی مخلوط‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج بیان‌گر آن است که در مقدار ثابت توف، افزایش دوده‌ی سیلیسی سبب افزایش مقاومت فشاری شده است. به عنوان مثال، در مقدار ثابت جایگزینی ۴۰٪ توف، با افزایش مقدار دوده‌ی سیلیسی از ۰٪ به ۳، ۶ و ۹ درصد به ترتیب ۸، ۶ و ۱۷ درصد افزایش مقاومت نسبت به طرح مخلوط بدون دوده‌ی سیلیسی مشاهده می‌شود. برای مخلوط‌های با جایگزینی ۴۰ و ۶۰ درصد توف و محتوی ۶٪ دوده‌ی سیلیسی، مقدار اختلاف مقاومت فشاری نسبت به طرح مخلوط بدون توف نیز به ترتیب ۱۲ و ۲۵ درصد بوده است. در سن ۹۰ روز، بهترین مقاومت فشاری مربوط به طرح مخلوط C۹۱-SF۹ بوده است که ۹٪ دوده‌ی سیلیسی و مقاومت ۹۰ روزه‌ی ۸۱ مگاپاسکال دارد. دلیل افزایش مقاومت فشاری مذکور را می‌توان به واکنش خوب دوده‌ی سیلیسی در سنین بالا نسبت داد.

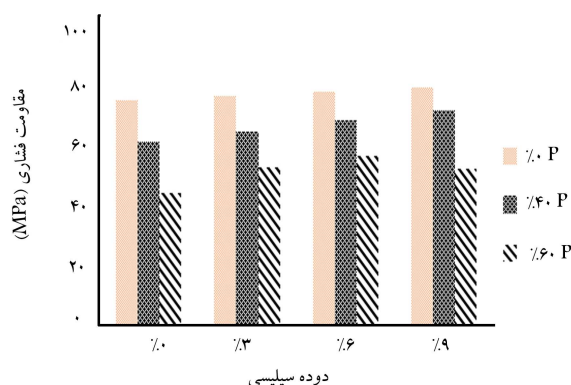
نتایج مقاومت فشاری در سنین مختلف نشان می‌دهد که با افزایش سن از ۳



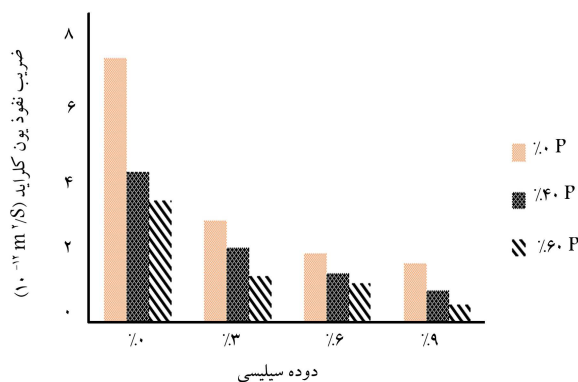
شکل ۶. مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی مخلوط‌ها.



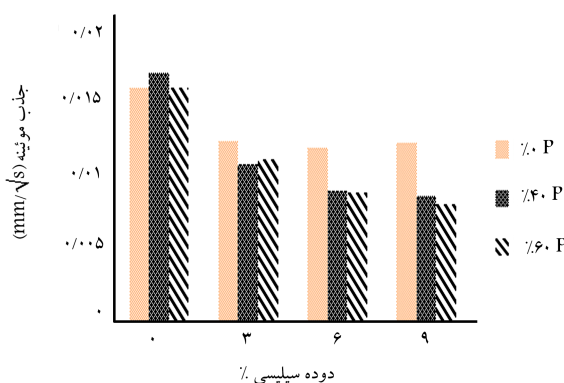
شکل ۸. نتایج ۲۸ روزه‌ی آزمایش مهاجرت تسریع‌شده‌ی یون‌های کلرید.



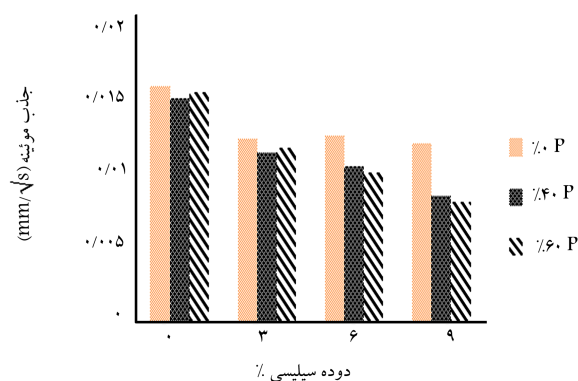
شکل ۷. مقاومت فشاری ۹۰ روزه‌ی مخلوط‌ها.



شکل ۹. نتایج ۹۰ روزه آزمایش مهاجرت یون‌های کلرید.



شکل ۱۰. جذب موئینه‌ی اولیه‌ی ۲۸ روزه‌ی طرح مخلوط‌ها.



شکل ۱۱. جذب موئینه‌ی اولیه‌ی ۹۰ روزه‌ی طرح مخلوط‌ها.

علت بوده است که توف مورد استفاده در پژوهش حاضر، عمده‌ی فعالیت خود را در سنین بین ۲۸ تا ۹۰ روز انجام داده است.

۶.۳. حجم منافذ قابل نفوذ

نتایج حجم منافذ قابل نفوذ مخلوط‌های بتنی برای سنین ۲۸ و ۹۰ روز در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است. همان‌طور که در تصاویر مشهود است، برخلاف نتایج آزمایش دوام مهاجرت یون‌های کلرید و جذب موئینه‌ی آب، استفاده از دوده‌ی سیلیسی، بهبودی در حجم منافذ قابل نفوذ مخلوط‌های بتنی حاوی توف ایجاد نکرده است. به عبارتی، دوده‌ی سیلیسی به دلیل انجام واکنش‌های پوزولانی مناسب با هیدروکسید کلسیم سبب بهبود ریزساختار بتن از طریق مسدود کردن منافذ بتن و

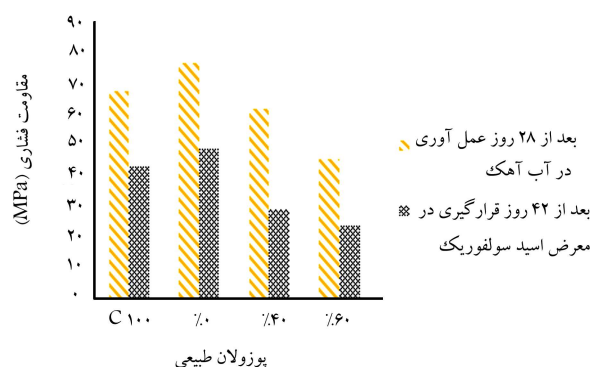
سیلیسی و توف، عملکرد بسیار مطلوبی نسبت به مخلوط‌های فقط محتوی توف دارد؛ بنابراین طبق نتایج به‌دست آمده، استفاده از ترکیب سه‌جزئی توف و دوده‌ی سیلیسی و سیمان، در محیط‌های آسیب‌رسان کلریدی عملکرد بسیار مناسب‌تری را نسبت به مخلوط‌های حاوی توف فراهم می‌آورد.

نتایج ۹۰ روزه‌ی آزمایش مهاجرت تسریع‌شده‌ی یون‌های کلرید در شکل ۹ ارائه شده است. با توجه به شکل مذکور، همچنین سن ۲۸ روز در درصد ثابت توف، آثار مثبت استفاده از دوده‌ی سیلیسی مشاهده می‌شود. برای مثال در مخلوط محتوی ۴۰٪ پوزولان، استفاده از دوده‌ی سیلیسی به مقدار ۳، ۶ و ۹ درصد، ضریب نفوذ یون‌های کلرید را نسبت به طرح مخلوط بدون دوده‌ی سیلیسی به ترتیب در حدود ۵۰، ۷۵ و ۸۰ درصد کاهش داده است؛ بنابراین استفاده از دست‌کم ۳٪ دوده‌ی سیلیسی در مخلوط‌های حاوی توف، عملکرد بسیار خوبی را در کاهش ضریب مهاجرت یون‌های کلرید به همراه دارد. همچنین نتایج بیان‌گر آن هستند که مخلوط‌های حاوی فقط توف به‌ویژه در سطوح بالای جایگزینی، عملکرد نسبتاً خوبی در کاهش مقدار ضریب نفوذ یون‌های کلرید دارد. در آزمایش انجام‌شده، مخلوط C۳۱-P۶۰-SF۹ حاوی ۹٪ دوده‌ی سیلیسی و ۶۰٪ توف، بهترین عملکرد را در بلندمدت داشته است. این مسئله نشان می‌دهد که توف مورد استفاده در پژوهش حاضر، عمده‌ی فعالیت خود را در سنین بین ۲۸ تا ۹۰ روز انجام داده و به این لحاظ بهبود دوام قابل‌توجه در برابر نفوذ یون‌های کلرید در مخلوط‌های بتنی داشته است. به‌عنوان مثال، در مقدار ۰٪ دوده‌ی سیلیسی، با افزایش مقدار جایگزینی توف به ۴۰ و ۶۰ درصد، حدوداً مقدار ۴۵ و ۵۵ درصد کاهش در مقدار ضریب نفوذ یون‌های کلرید نسبت به طرح مخلوط بدون توف مشاهده می‌شود.

۵.۳. آزمایش جذب موئینه

روند تغییرات ضریب جذب موئینه‌ی مخلوط‌ها در سن ۲۸ روز در شکل ۱۰ ارائه شده است، که مطابق آن، در طرح مخلوط‌های با سطح ثابت توف، افزایش مقدار دوده‌ی سیلیسی موجب کاهش مقدار جذب موئینه شده است. به گونه‌ی که با جایگزینی ۳٪ دوده‌ی سیلیسی، افت قابل‌توجهی در نفوذ موئینه مشاهده می‌شود که با افزایش سطح جایگزینی به ۶ و ۹ درصد، میزان افت در ضریب جذب موئینه کاهش یافته است. برای مثال، در طرح مخلوط با مقدار ثابت توف ۶۰٪، با افزایش مقدار دوده‌ی سیلیسی از ۰٪ به ۳، ۶ و ۹ درصد، مقدار جذب موئینه به ترتیب ۳۰، ۵۰ و ۵۰ درصد نسبت به طرح مخلوط بدون دوده‌ی سیلیسی کاهش یافته است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که استفاده از توف در سن ۲۸ روز، اندکی سبب بهبود جذب موئینه‌ی مخلوط‌های بتنی شده است. در درصد دوده‌ی سیلیسی یکسان، مخلوط‌های حاوی ۴۰ و ۶۰ درصد توف جذب موئینه مشابه یکدیگر داشته‌اند.

شکل ۱۱، روند تغییرات جذب موئینه‌ی مخلوط‌ها را در سن ۹۰ روز نشان می‌دهد که مطابق آن در مخلوط‌های حاوی توف مشابه آزمایش تسریع‌شده‌ی یون‌های کلرید با افزودن دست‌کم ۳٪ دوده‌ی سیلیسی، یک افت قابل توجه در ضریب جذب موئینه وجود دارد و با افزایش سطح دوده‌ی سیلیسی به ۶ و ۹ درصد، افت بیشتری در ضریب جذب موئینه‌ی مخلوط‌ها مشاهده می‌شود. برای مثال، در طرح مخلوط با جایگزینی ۶۰٪ توف، با افزایش مقدار دوده‌ی سیلیسی از ۰٪ به ۳، ۶ و ۹ درصد، به ترتیب مقدار جذب موئینه، ۲۵، ۳۵ و ۵۰ درصد کاهش یافته است. در آزمایش انجام‌شده، بهترین طرح مخلوط، طرح C۳۱-P۶۰-SF۹ حاوی ۹٪ دوده‌ی سیلیسی و ۶۰٪ توف، بهترین عملکرد را در بلندمدت داشته و به این



شکل ۱۴. مقاومت فشاری نمونه‌ها در برابر خوردگی اسیدسولفوریک (مخلوط ۱۰۰ C بدون دوده سیلیسی و پوزولان طبیعی است و سایر مخلوط‌ها حاوی ۶٪ دوده سیلیسی هستند).

لذا با افزایش مقدار توف به‌ویژه در حجم‌های بالای جایگزینی به دلیل کاهش مقدار واکنش هیدراسیون ناشی از کاهش مقدار سیمان و افزایش مقدار آب واکنش نداده‌ی موجود در حفره‌ها، حجم حفره‌ها و منافذ قابل نفوذ افزایش یافته است. عملکرد پوزولانی بر پیچ و خم فضای موئینه و عدم پیوستگی‌های موجود در آن تأثیر دارد و به میزان قابل توجه آن را ارتقاء می‌دهد. این مسئله در برخی پژوهش‌ها، تأکید شده است.^{[۴۰] [۴۱]} بنابراین علی‌رغم افزایش حجم منافذ قابل نفوذ به دلیل بهبود قابل توجه ریزساختار و مسدود شدن فضاهای موئینه، نفوذ یون‌های مزاحم همچون کلرید به محیط بتن با ممانعت جدی مواجه می‌شود.

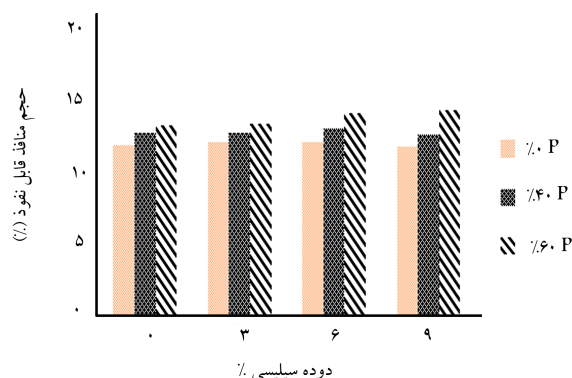
۷.۳. آزمایش مقاومت در برابر اسیدسولفوریک

حمله‌ی سولفات‌ها باعث تشکیل نری سولفوآلومینات کلسیم هیدراته (اترینگایت) و سولفات کلسیم (گچ) می‌شود. هر دوی آن‌ها، نسبت به ترکیب‌هایی که جایگزین آن‌ها شده‌اند، حجم بیشتری دارند و باعث انبساط و ترک‌خوردگی بتن سخت‌شده می‌شوند. در حملات اسیدی، pH بتن نیز کاهش می‌یابد و ساختار $C-S-H$ ناپایدار می‌شود، در نتیجه بتن دچار خوردگی و تخریب می‌شود.

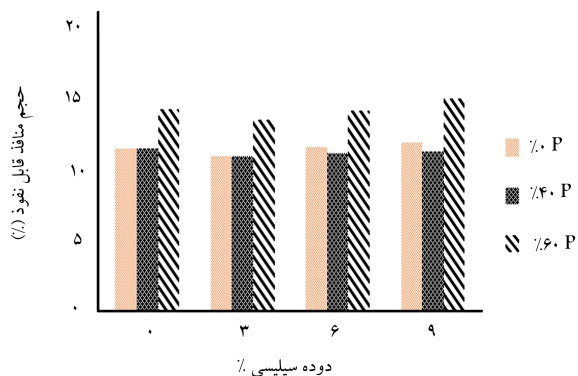
در پژوهش حاضر، طرح مخلوط کنترل حاوی ۱۰۰٪ سیمان و ۳٪ مخلوط با مقدار جایگزینی ثابت ۶٪ دوده سیلیسی و مقدار جایگزینی توف ۰، ۴۰ و ۶۰ درصد انتخاب و پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در حوضچه‌ی آب آهک، به مدت ۴۲ روز در محلول اسیدسولفوریک با غلظت ۱۰٪ قرار داده شدند. نتایج مقاومت فشاری در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

در مطالعه‌ی حاضر، پس از ۴۲ روز قرارگیری نمونه‌ها در معرض اسیدسولفوریک، مخلوط بدون توف و دوده سیلیسی و همچنین مخلوط حاوی فقط ۶٪ دوده سیلیسی و بدون توف، کاهش مقاومتی حدود ۳۵٪ نسبت به حالت ۲۸ روزه خود داشته‌اند، لیکن مخلوط‌های با ۴۰ و ۶۰ درصد توف و با ۶٪ دوده سیلیسی، افت مقاومتی حدود ۵۰٪ نسبت به حالت ۲۸ روز نشان داده‌اند. لذا به نظر می‌رسد استفاده از پوزولان طبیعی یا دوده سیلیسی، بهبودی در مقاومت در برابر اسیدسولفوریک ایجاد نکرده است.

شایان ذکر است که بعد از خارج کردن نمونه‌ها از داخل اسید، دو وجه هر نمونه با استفاده از ملات نازک سیمان کلاهی‌گذاری (Capping) و بعد در زیر جک بتن‌شکن، مقاومت فشاری آن‌ها اندازه‌گیری شده است، تا خطای ناشی از خرابی سطحی بتن به مقدار کمیته برسد. البته باید توجه کرد که در سن ۲۸ روز، نمونه‌های



شکل ۱۲. حجم منافذ قابل نفوذ در سن ۲۸ روز.



شکل ۱۳. حجم منافذ قابل نفوذ در سن ۹۰ روز.

پیچ‌وخم دادن به آن‌ها می‌شود. لیکن مقدار آبی که برای واکنش سیلیس آمورف با هیدروکسیدکلسیم لازم است، کمتر از آب لازم برای هیدراسیون سیمان است. به همین دلیل هر چند دوده سیلیسی، نرخ جذب آب و نفوذ یون‌های کلرید به درون بتن را کنترل کرده است، لیکن در مطالعه‌ی حاضر تأثیر چندانی در تغییر حجم کلی منافذ قابل نفوذ بتن نداشته است.

در درصد دوده سیلیسی ثابت با افزایش حجم ۴۰ و ۶۰ درصد، حجم منافذ قابل نفوذ افزایش یافته است، به طوری که در ۶۰٪ جایگزینی توف، حجم منافذ قابل نفوذ به مقدار قابل توجه نسبت به حجم منافذ قابل نفوذ در مخلوط کنترل تجاوز کرده است. در جایگزینی مواد مکمل سیمانی با سیمان، شدت واکنش هیدراسیون کاهش یافته است، در نتیجه مقداری آب به صورت واکنش‌نداده در حفره‌ها باقی مانده و حجم منافذ قابل نفوذ افزایش یافته است. همچنین افزایش درصد دوده سیلیسی در مخلوط بدون توف، سبب افزایش حجم منافذ قابل نفوذ شده است، لیکن در مخلوط‌های پوزولانی افزایش در حجم منافذ قابل نفوذ مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، روند مشابه سن ۲۸ روز برای مخلوط‌های حجم بالای توف و دوده سیلیسی در سن ۹۰ روز مشاهده می‌شود. به عبارتی با افزایش درصد توف، حجم منافذ قابل نفوذ افزایش داشته است، لیکن افزایش درصد دوده سیلیسی باعث کاهش حجم منافذ قابل نفوذ به میزان اندک در سن ۹۰ روز نسبت به سن ۲۸ روز (کمتر از ۵٪) شده است. شایان ذکر است که مخلوط حاوی ۶۰٪ توف، بدترین عملکرد را در بین مخلوط‌های پوزولانی در سن ۲۸ و ۹۰ روز و نیز حجم منافذ بیشتری نسبت به تمام مخلوط‌ها به‌ویژه مخلوط کنترل داشته است. همان‌گونه که ذکر شد، واکنش‌های پوزولانی عمده‌ی تأثیر خود را در اصلاح ریزساختار از طریق مسدود کردن منافذ و پیچ و خم دادن به آن‌ها دارند،

بتنی با توف به مقاومت بالقوه نرسیده‌اند، لذا با توجه به اینکه در شرایط واقعی امکان قرارگیری بتن‌های حاوی توف در معرض محیط‌های اسیدی شدید وجود دارد، آزمایش مقاومت در برابر اسیدسولفوریک بر روی نمونه‌های بتنی موردنظر انجام شد. همچنین در بیشتر مطالعات و روش‌های استاندارد برای آزمون مقاومت اسید، غلظت اسیدسولفوریک برابر ۵٪ لحاظ می‌شود، لیکن استاندارد مطرچی برای آزمایش مذکور وجود ندارد. لذا در مطالعه‌ی حاضر، با توجه به محدودیت زمانی، بازه‌ی ۴۲ روز در نظر گرفته شده است. همچنین برای بررسی مقاومت در برابر خوردگی در محیط‌های اسیدی شدید، از غلظت ۱۰٪ استفاده شده است.

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، اثر دوده‌ی سیلیسی در خواص مکانیکی و دوام مخلوط‌های بتنی حاوی توف بررسی و این نتایج به‌دست آمده است:

۱. دوده‌ی سیلیسی در سنین پایین، تأثیر زیادی در مقاومت فشاری مخلوط‌های حاوی توف ندارد، ولی در سنین ۲۸ و ۹۰ روز، موجب افزایش در مقاومت فشاری مخلوط‌های حاوی توف می‌شود. برای مثال در سن ۳ روز، مخلوط حاوی ۹٪ دوده‌ی سیلیسی و ۴۰٪ توف نسبت به طرح مخلوط کنترل، موجب کاهش ۱۳٪ مقاومت فشاری شده است، در حالی که این مقدار برای سن ۹۰ روز، ۱۷٪ افزایش مقاومت فشاری را نشان می‌دهد.

۲. بتن‌های توانمند با مقاومت بالا از جایگزینی سیمان با حجم بالای توف و دوده‌ی سیلیسی با استفاده از یک منحنی دانه بندی ایده‌آل حاصل شد. به‌عنوان مثال، جایگزینی سیمان با ۶۰٪ توف و ۹٪ دوده‌ی سیلیسی یا به عبارتی فقط با ۱۲۴ کیلوگرم سیمان در هر مترمکعب بتن با مقاومت فشاری بیشتر از ۵۰ مگاپاسکال در سن ۹۰ روز به دست آمد. مخلوط‌های بتن مذکور علاوه بر داشتن خواص مکانیکی و دوام مطلوب، بتن سازگار با محیط زیست محسوب می‌شوند و در بحث توسعه‌ی پایدار، آثار زیست‌محیطی و اقتصادی مناسبی دارند.

۳. با افزایش مقدار جایگزینی توف و دوده‌ی سیلیسی، میزان استفاده از فوق روان‌کننده افزایش یافت، که دلیل آن سطح ویژه‌ی زیاد و وزن مخصوص کم پوزولان مذکور نسبت به سیمان است که باعث افزایش حجم مقدار مواد پودری در مخلوط و در نتیجه نیاز به فوق روان‌کننده بیشتر می‌شود. برای مثال، در مقدار

ثابت دوده‌ی سیلیسی ۹٪، با افزایش مقدار توف به ۶۰٪، مقدار مصرف فوق روان‌کننده به میزان حدود ۶۵٪ نسبت به طرح مخلوط ۰٪ توف افزایش داشته است.

۴. استفاده از توف در پژوهش حاضر، سبب ارتقاء خواص دوام بتن به‌ویژه مقاومت در برابر نفوذپذیری یون‌های کلرید در سن ۲۸ روز نشد، لیکن با افزایش سن عمل‌آوری در ۹۰ روز، استفاده از توف توانست ضریب نفوذ یون‌های کلرید را کاهش دهد. به‌عنوان مثال، در مقدار ۰٪ دوده‌ی سیلیسی، با افزایش مقدار جایگزینی توف به ۶۰٪، مقدار ضریب نفوذ یون‌های کلرید نسبت به طرح مخلوط بدون توف، در حدود ۵۵٪ کاهش یافت.

۵. دوده‌ی سیلیسی حتی در ۳٪ جایگزینی، اثر قابل‌توجه در بهبود مهاجرت یون‌های کلرید در بتن‌های حاوی حجم بالای توف در سنین ۲۸ و ۹۰ روز داشته است. برای مثال در سن ۲۸ روز در مقدار ثابت ۴۰٪ توف، با افزودن فقط ۳٪ دوده‌ی سیلیسی، ضریب مذکور حدود ۷۵٪ نسبت به طرح مخلوط بدون دوده‌ی سیلیسی کاهش یافت. هر چند توف مورد استفاده در پژوهش حاضر، در سن ۲۸ روز کاهش در نفوذ یون‌های کلرید از خود نشان نداد؛ اما ترکیب آن با دوده‌ی سیلیسی به‌عنوان یک مخلوط سه‌جزئی سیمان، توف و دوده‌ی سیلیسی، عملکرد ذکرشده را به میزان قابل‌توجه ارتقاء داد.

۶. در مطالعه‌ی حاضر، استفاده از توف، تأثیر مثبتی در کاهش حجم منافذ قابل نفوذ نداشته و در نسبت‌های جایگزینی بالا، حجم منافذ افزایش یافته است. در مورد اثر ترکیبی توف و دوده‌ی سیلیسی نیز، بهبود حجم منافذ قابل نفوذ مشاهده نشد.

۷. در جذب موئینه، استفاده از توف و دوده‌ی سیلیسی به تنهایی (سیمان دوجزئی)، تأثیری در کاهش مقدار جذب موئینه نداشتند، لیکن در مخلوط‌های توف، استفاده از دوده‌ی سیلیسی جذب موئینه را در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بهبود بخشید. برای مثال، در سن ۹۰ روز، در طرح مخلوط با جایگزینی ۶۰٪ توف، در مقدار دوده‌ی سیلیسی ۹٪، مقدار جذب موئینه‌ی ۵۰٪ نسبت به طرح مخلوط کنترل کاهش یافت.

۸. پس از ۴۲ روز قرارگیری در معرض اسیدسولفوریک ۱۰٪، افت در مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی حاوی ۶٪ دوده‌ی سیلیسی و ۴۰ و ۶۰ درصد توف حدود ۵۰٪ مقدار آن بیشتر از کاهش مقاومت در مخلوط‌های بدون توف با یا بدون دوده‌ی سیلیسی بود.

پانویس

1. loss on conductivity

منابع (References)

1. Ramazanianpour, A.A., *Cement Replacement Materials*, Springer Geochemistry /Mineralogy publications, pp. 1-46, Tehran (2014).

2. Massazza, F. "Pozzolan cements", *Cement and Concrete Composites*, **15**(4), pp. 185-214 (1993).
3. EN 197-1, "Composition, specifications and conformity criteria for common cements" (2014).
4. Nielsen, C.V. and Glavind, M. "Danish experiences with a decade of green concrete", *Journal of Advanced Concrete Technology*, **5**(1), pp. 3-12 (2003).
5. Valipour, M., Pargar, F., Shekarchi, M. and Khani, S. "Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study", *Journal*

- of Construction and Building Materials*, **41**, pp. 879-888 (2013).
6. Dyer, T., *Concrete Durability*, CRC Press, London New York (2014).
7. Mrida, A. and Kharchi, F. "Pozzolan concrete durability on sulphate attack", *1st International Conference Structural Integrity, Procedia Engineering*, **114**, pp. 832-837 (2015).
8. Senhadji, Y., Escadeillas, G., Moulli, M. and Khelafi, H. "Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar", *Journal of Powder Technology*, **254**, pp. 314-323 (2014).
9. Colak, A. "Characteristics of pastes from a Portland cement containing different amounts of natural pozzolan", *Journal of Cement and Concrete Research*, **33**(4), pp. 585-559 (2003).
10. Mehta, P.K. "Studies on blending portland cements containing Santorian earth", *Cement and Research*, **11**, pp. 507-518 (1981).
11. Ramezani-pour, A.A., Motahari Karein, S., Vosoughi, P., Pilvar, A. Isapour, S. and Moodi, F. "Effects of calcined perlite powder as a SCM on the strength and permeability of concrete", *Journal of Construction and Building Materials*, **66**, pp. 222-228 (2014).
12. Baeza, F., Paya, J., Galao, O., Saval, J.M. and Garcesm, P. "Blending of industrial waste from different sources as partial substitution of Portland cement in pastes and mortars", *Journal of Construction and Building Materials*, **66**, pp. 645-653 (2014).
13. Sabet, F., Libre, N. and Shekarchi, M. "Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash", *Journal of Construction and Building Materials*, **44**, pp. 175-184 (2013).
14. Supit, S., Shaikh, F. and Sarker, P. "Effect of ultrafine fly ash on mechanical properties of high volume fly ash mortar", *Journal of Construction and Building Materials*, **51**, pp. 278-286 (2014).
15. Celik, K., Meral, C., Mancio, M., Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M. "A comparative study of self consolidating concretes incorporating high-volume natural pozzolan or high-volume fly ash", *Journal of Construction and Building Materials*, **67**(Part A), pp. 14-19 (2014).
16. Nuruddin, M.F., Chang, K.Y. and Mohd Azmee, N. "Workability and compressive strength of ductile self compacting concrete (DSCC) with various cement replacement materials", *Journal of Construction and Building Materials*, **55**, pp. 153-157 (2014).
17. Zelic, J., Rusic, D., Ve Za, D. and Krstulovic, R. "The role of silica fume in the kinetics and mechanisms during the early stage of cement hydration", *Journal of Cement and Concrete Research*, **30**(10), pp. 1655-1662 (2000).
18. Li, Y. and Kwan, A. "Ternary blending of cement with fly ash microsphere and condensed silica fume to improve the performance of mortar", *Journal of Cement and Concrete Composites*, **49**, pp. 26-35 (2014).
19. Saraya, M. "Study physico-chemical properties of blended cements containing fixed amount of silica fume, blast furnace slag, basalt and limestone, a comparative study", *Journal of Construction and Building Materials*, **72**, pp. 104-112 (2014).
20. Liu, J., Li, Y., Ouyang, P. and Yang, Y. "Hydration of the silica fume-Portland cement binary system at lower temperature", *Journal of Construction and Building Materials*, **93**, pp. 919-925 (2015).
21. Hewlett, P., *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, New York, Elsevier Ltd (2003).
22. Taylor, H.F.W., *Cement Chemistry*, Thomas Telford, London (1997).
23. Shannag, M.J. "High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume", *Journal of Cement and Concrete Research*, **22**(6), pp. 399-406 (2000).
24. Yazici, H. "The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze-thaw resistance of self-compacting concrete", *Journal of Construction and Building Materials*, **22**(4), pp. 446-462 (2008).
25. Bagheri, A., Zanganeh, H., Alizadeh, H., Shakerinia, H., Marian, M. and Seifi, M.A. "Comparing the performance of fine fly ash and silica fume in enhancing the properties of concretes containing fly ash", *Journal of Construction and Building Materials*, **47**, pp. 1402-1408 (2013).
26. Wongkeo, W., Thongsanitgram, P., Ngamjarurojna, A. and Chaipanich, A. "Compressive strength and chloride resistance of self-compacting concrete containing high level fly ash and silica fume", *Journal of Construction and Building Materials*, **64**, pp. 261-269 (2014).
27. EL-Chabib, H. and Ibrahim, A. "The performance of high-strength flowable concrete made with binary, ternary, or quaternary binder in hot climate", *Journal of Construction and Building Materials*, **47**, pp. 245-253 (2013).
28. Bagheri, A., Parhizkar, T., Madani, H. and Raisghasemi, A.M. "The influence of different preparation methods on the aggregation status of pyrogenic nanosilicas used in concrete", *Journal of Materials and Structures*, **46**(1-2), pp. 135-143 (2013).
29. Funk, J.E., Dinger, D.R. and Funk, J.E.J. "Coal grinding and particle size distribution studies for coal-water slurries at high solids content", Final Report, Empire State Electric Energy Research Corporation (ES-EERCO), New York (1980).
30. Xincheng, Pu., *Super-High-Strength High Performance Concrete*, CRC Press, Boca Raton London New York (2013).
31. Larrad, F.de., *Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach*, E & FN Spon (1999).
32. BS 1881, Part: 116, "Method for determination of compressive strength of concrete", British Standard (1983).
33. ASTM C 1585., *American Society for Testing Materials, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes*, Annual Book of ASTM Standards (2015).

34. ASTM C 642., *American Society for Testing Materials, Standard Test Method for Density, Absorption and Voids in Hardened Concrete*, Annual Book of ASTM Standards (2015).
35. NT Build 492, "Concrete mortar and cement-based repair materials-chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments", NT Build 492 (1999).
36. Mehta, P.K. "Studies on blending portland cements containing Santorian", *Cement and Research*, **II**, pp. 507-518 (1981).
37. Paya, J., Borrachero, M.V., Monzo, J., Peris-Mora, E. and Amahjour, F. "Enhanced conductivity measurement techniques for evaluation of fly ash pozzolanic activity", *Journal of Cement and Concrete Research*, **31**(1), pp. 41-49 (2001).
38. Madani, H., Bagheri, A. and Parhizkar, T. "The pozzolanic reactivity of monodispersed nanosilica hydrosols and their influence on the hydration characteristics of Portland cement", *Journal of Cement and Concrete Research*, **42**(12), pp. 1563-1570 (2012).
39. Massazza, F. "Pozzolanic cements, lea's chemistry of cement and concrete", *Cement & Concrete Composites*, **15**, pp. 185-214 (1993).
40. Taylor, H., *Cement chemistry*, Academic Press, London (1990).