

معرفی توف‌های آهکی به عنوان منابع جدید پوزولان: بر اساس مطالعه توف‌های سازند کرج در جنوب غرب

بلده

فریبرز مسعودی

دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

مهناز خادمی پارسا

دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

سید محمود فاطمی عقدا

دانشکده علوم، دانشگاه خوارزمی و مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

طیبه پرهیزکار

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

تاریخ دریافت: ۹۱/۴ ۲۵ تاریخ پذیرش: ۹۲/۱/۲۷

F_masoudi@sbu.ac.ir

چکیده

پوزولان طبیعی سنگ‌های آتشفشانی هستند که در تولید سیمان‌های آمیخته استفاده می‌شوند. این سنگ‌ها به صورت گرد نرم در مجاورت رطوبت و در دمای معمولی با هیدروکسید کلسیم واکنش نشان داده و ترکیباتی با خواص سیمانی بوجود می‌آورند. توف‌های آهکی ترکیب شیمیایی استانداردهای بین‌المللی را نشان نمی‌دهند، و از این رو به عنوان پوزولان استفاده نمی‌شوند. میزان سیلیس آنها کمتر از حد معرفی شده و میزان کلسیم آنها بیشتر از حد مجاز استانداردهای بین‌المللی است. اما بر اساس مطالعات صورت گرفته در این تحقیق بخشی از توف‌های آهکی سازند کرج در منطقه جنوب غرب بلده قابلیت کاربرد به عنوان پوزولان طبیعی را دارا می‌باشند. توف‌های آهکی مورد مطالعه دارای سیلیس به صورت آذر آوارهای شیشه‌ای هستند. این توف‌ها فعالیت پوزولانی خوبی را نشان می‌دهند. درصد بالای کلسیم در نمونه‌های پوزولانی باعث می‌شود تا مدت زمان رسیدن به فعالیت پوزولانی مطلوب افزایش یابد. علاوه بر معرفی توف‌های آهکی به عنوان منابع جدید پوزولان، بر اساس نتایج حاصل از مطالعات پتروگرافی، آنالیزهای ICP-MS و نتایج آزمایش‌های تعیین فعالیت پوزولانی، این تحقیق نشان داد که تنها ویژگی‌های شیمیایی برای تعیین کیفیت سنگ‌های آتشفشانی به عنوان پوزولان‌های طبیعی کافی نبوده و مطالعات پتروگرافی نیز در این راستا لازم می‌باشد.

کلمات کلیدی: پوزولان، توف آهکی، آذر آوار شیشه‌ای، سازند کرج، بلده

مقدمه

کلسیم ناشی از هیدراسیون سیمان واکنش دهد و قابلیت کاربرد به عنوان جایگزین بخشی از سیمان را داشته باشد، اولین گام در ارزیابی پوزولان‌های طبیعی است.

در جنوب غرب بلده توف‌های متنوعی به سن ائوسن رخنمون دارند. بر اساس مطالعات صورت گرفته توسط خادمی پارسا و همکاران (۱۳۸۸) این توف‌ها قابلیت استفاده به عنوان پوزولان در ساخت سیمان آمیخته را دارند.

مطالعه حاضر به بررسی و معرفی توف‌های سازند کرج در منطقه بلده و امکان استفاده از آنها به عنوان پوزولان طبیعی پرداخته است. این تحقیق برای اولین بار امکان استفاده از توف‌های آهکی به عنوان پوزولان طبیعی را بررسی نموده است. بدین منظور خصوصیات پتروگرافی و شیمیایی و رابطه آنها با فعالیت پوزولانی مطالعه شده است.

استفاده از سنگ‌های آتشفشانی مناسب به عنوان پوزولان‌های طبیعی در صنعت سیمان باعث ایجاد اثرات مهمی در خواص ملات سیمان‌های آمیخته از قبیل کاهش نفوذ پذیری و دمای هیدراسیون، بهبود ویژگی‌های بتن تازه و افزایش مقاومت آن در دراز مدت و افزایش مقاومت شیمیایی آن می‌شود (Mehta, 1989; Shannag and Yeginobal, 1995). همچنین افزودن این مواد به سیمان دارای مزایای زیست محیطی و اقتصادی (کاهش گازهای مضر و کاهش مصرف انرژی) می‌باشد. علاوه بر مزایای یاد شده استفاده صحیح از پوزولان می‌تواند دوام و مقاومت سیمان را نیز افزایش دهد (Shi et al., 2006).

تعیین مشخصات اولیه پوزولان‌های طبیعی، به عنوان مواد سیلیسی یا آلومینو-سیلیکاتی که بتوانند در حضور رطوبت، در دمای محیط، با هیدروکسید

زمین شناسی

واحد توف شیلی خاکستری رنگ

با عبور از توف‌های زرد رنگ، توف‌های خاکستری با مرز تدریجی مشاهده می‌شود. این بخش از توف‌های شیلی کاملاً خرد شده با میان لایه‌هایی از ژیسپ به رنگ زرد و نارنجی تشکیل شده است. دو واحد سنگی دیگر در بخش انتهایی توف‌های خاکستری تفکیک شده‌اند که شامل لایه آهکی و لایه‌ای از گچ است.

روش کار

ابتدا ۱۵ نمونه از واحدهای توفی مختلف برداشت شد و پس از تهیه مقاطع نازک میکروسکوپی از این نمونه‌ها، مشخصات پتروگرافی آن‌ها به طور دقیق مورد بررسی قرار گرفت. جهت تکمیل مطالعات پتروگرافی مقدار عناصر اصلی و کمپاب ۵ نمونه توسط آنالیز ICP-MS در آزمایشگاه Labwest استرالیا بدست آمد. در نهایت با توجه به نتایج حاصل از ICP-MS و مطالعات پتروگرافی، ۲ نمونه انتخاب شده و فعالیت پوزولانی آن‌ها به سه روش، تعیین اندیس فعالیت مقاومتی (اندیس هیدرولیکی) براساس استاندارد ASTM C-618، تعیین فعالیت پوزولانی با استفاده از دستگاه STA (روش ترموگرومتری) و تعیین فعالیت پوزولانی بر اساس روش استاندارد EN 196-5 در بخش مصالح ساختمانی مرکز تحقیقات راه، ساختمان و شهرسازی مورد ارزیابی قرار گرفت.

پتروگرافی

بر اساس مطالعات میکروسکوپی و با توجه به تقسیم‌بندی توف‌ها (Fisher, 1966)، توف‌های واقع در سکانس، شامل لیتیک توف و کریستال توف است که اغلب دارای ترکیب اسیدی هستند. به‌طور کلی قطعات بلورین شکل‌دار و نیمه‌شکل‌دار بوده و مقدار شکستگی و اندازه آن‌ها متفاوت است و جورشدگی ضعیف تا متوسط دارند. قطعات بلورین شکسته و زاویه‌دار معمول‌تر از بلورهای خودشکل هستند. اغلب قطعات بلورین را فنوکریستال‌های پلاژیوکلاز، فلدسپات آلکان و کوارتز شامل می‌شود که در ماتریکس سنگ شناور هستند. عموماً حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد حجم توف‌ها را ماتریکس آن‌ها تشکیل می‌دهد که در بعضی موارد زمینه کریپتوکریستالین حاوی میکروولیت‌های فلدسپات آلکان و پلاژیوکلاز بوده و در دیگر موارد زمینه حاوی آذرآوار-های شیشه‌ای و خمیره کریپتوکریستالین است. بلورهای ثانویه بیوتیت و گاهی کانی‌های اوپک در زمینه سنگ رشد کرده‌اند. حفرات پراکنده نامنظم انحلالی به وسیله کلسیت با بافت موزائیکی پر شده است و رگه‌های کلسیت ریز بلور در جهات مختلف سنگ را قطع می‌کند. نتایج مطالعات میکروسکوپی ۲ نمونه انتخابی جهت تست سیمان به شرح زیر می‌باشد.

نمونه CA40

زمینه کریپتوکریستالین ۵۰٪ که حاوی میکروولیت‌های فلدسپات آلکان و پلاژیوکلاز است. درشت بلورهای پلاژیوکلاز با حواشی شکسته شده در زمینه پراکنده است. زمینه کریپتوکریستالین کاملاً سالم است. کمتر از ۵٪ قطعات خرده سنگی نیز در سنگ یافت می‌شود. بافت سنگ آذرآواری و نام سنگ توف کریستالین است (شکل ۳).

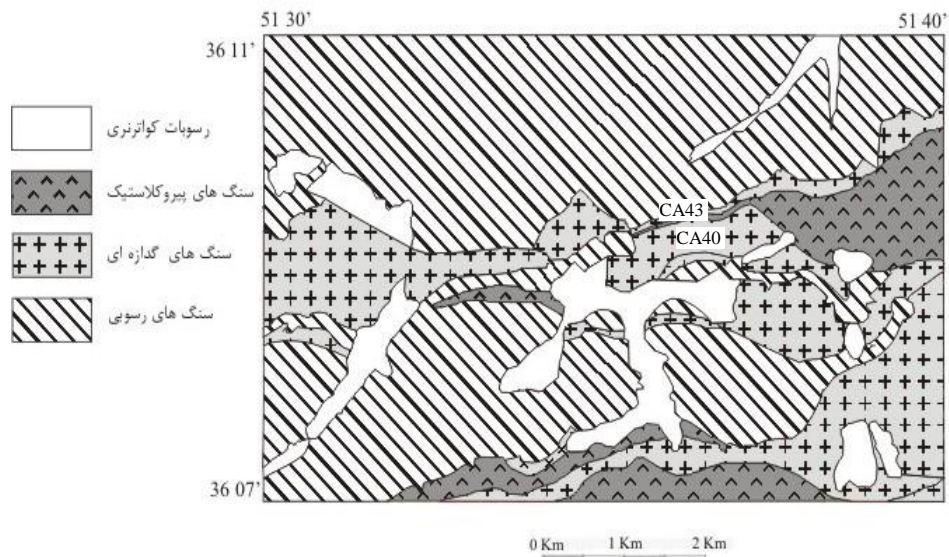
نهبسته‌های آذر آواری و سنگ‌های آتشفشانی در منطقه مورد مطالعه در جنوب بخش بلده از توابع استان مازندران در جنوب البرز مرکزی، در محدوده‌ای با مختصات ۳۶°۰۶ تا ۱۱°۱۱ عرض شمالی و ۵۱°۳۰ تا ۵۱°۴۰ طول شرقی واقع شده است و قسمتی از برکه‌های ۱/۲۵۰۰۰۰۰ آمل و ۱/۱۰۰۰۰۰۰ بلده را به‌خود اختصاص می‌دهد. نگاهی به نقشه زمین‌شناسی منطقه با مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰۰ (سعیدی، ۱۳۷۲) نشان می‌دهد که واحدهای این بخش به لحاظ سنی در بر گیرنده سنگ‌های آذرین و رسوبی سنوزوئیک و مزوزوئیک است. سنگ‌ها و انباشته‌های سنوزوئیک از امتداد بلده به سوی جنوب گسترش دارند و تقریباً ۹۰٪ سطح این بخش را در بر می‌گیرند. در این میان سنگ‌ها و انباشته‌های ولکانیک و ولکانیک-رسوبی ائوسن بیشترین سهم را دارا است (شکل ۱). ترکیب سنگ‌های آتشفشانی از آندزیت و تراکی آندزیت تا پیروکلاستیک‌هایی با ترکیبی متفاوت از اسیدی تا حد واسط می‌باشد. در طی مطالعات زمین‌شناسی، حاجی محمدی (۱۳۸۰) سنگ‌های آتشفشانی و آتشفشانی-رسوبی منطقه بلده را مورد مطالعه قرار داده، نوری‌زاده (۱۳۸۱) به بررسی ژئودینامیک گنبد‌های آتشفشانی بلده پرداخته است و خادمی پارسا (۱۳۹۰) پتروولوژی سنگ‌های آتشفشانی جنوب غرب بلده را مورد بررسی قرار داده‌است. سنگ‌های پیروکلاستیک که گستره وسیعی از سنگ‌های منطقه را تشکیل می‌دهند از نظر چینه‌شناسی متعلق به سازند کرج به سن ائوسن می‌باشند. این توف‌ها در بعضی موارد دارای لایه بندی ظریف همراه با پیچ خوردگی می‌باشند که نشان دهنده وجود جریان‌های آشفته در محل است. این سازند در این منطقه از نظر رخساره سنگی دارای گوناگونی است. بخش عمده این سازند در خاور روستای انگه رود تجمع یافته است. بر اساس بررسی‌های صحرایی توف‌های این منطقه را به ۳ بخش مجزا با ویژگی‌های سنگ‌شناسی متفاوت می‌توان تقسیم نمود (شکل ۲).

واحد توف ماسه‌ای سبز رنگ

این واحد با رنگ سبز و مورفولوژی تپه‌ای مشاهده می‌شود، که تناوبی از توف‌های سبز نازک لایه و شیل‌های با ضخامت کم است. با گذر از پایه به سمت پسین از مقدار شیل کاسته شده و بر مقدار ماسه افزوده می‌شود، به‌طوری که در قسمت‌های انتهایی این واحد تبدیل شدگی به توف ماسه‌ای دیده می‌شود. حالت کنکرسین در بخش‌های توف ماسه‌ای بسیار معمول است.

واحد توف آهکی زرد رنگ

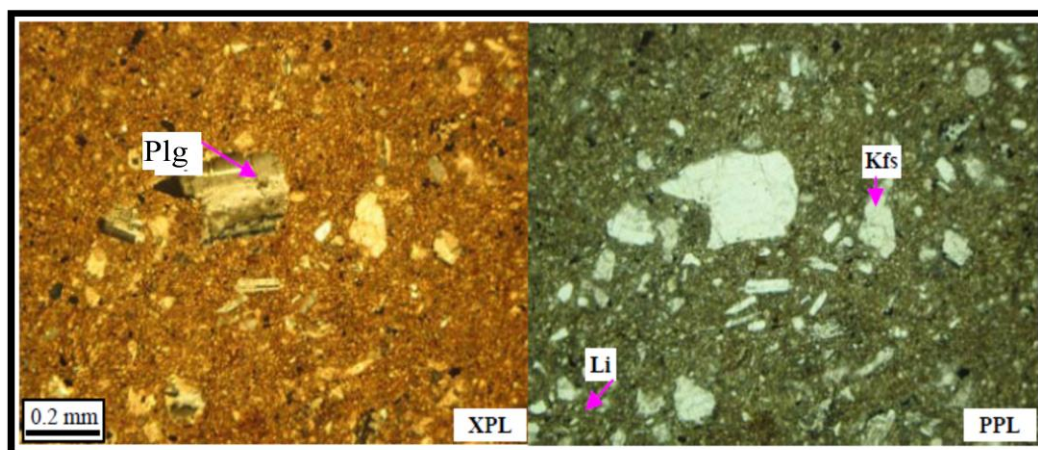
با گذر از توف سبز، توف‌های زرد رنگ با مرز مشخص قابل تمایز است. این بخش متشکل از توف‌های آهکی نازک لایه می‌باشد که لایه‌بندی چلیپایی (لایه بندی متقاطع) همراه با غسل خوردگی‌های ریز در آن دیده می‌شود. وجود لایه‌بندی چلیپایی نشان دهنده تغییر جهت جریان و کم ژرفا بودن حوضه رسوبی است. در بخش‌های انتهایی این واحد از مقدار آهک کاسته شده و بر مقدار توف افزوده می‌شود به‌طوری که توف‌های آهکی نازک‌لایه تبدیل به توف-های کریستالین توده‌ای با حالت بودینگ می‌شوند. در انتهای این واحد لایه‌ای از توف کریستالین با رنگ سبز کاملاً مشخص است همچنین گسلی باعث ایجاد جابجایی این بخش شده است.



شکل ۱. نقشه زمین شناسی ساده شده منطقه مورد مطالعه (اقتباس از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ بلده).



شکل ۲. سه واحد توف با رنگ و سنگ شناسی متفاوت مربوط به سازند کرج (حوالی روستای انگه رود، دید به سمت شرق)



شکل ۳. توف کریستالین اسیدی منطقه جنوب بلده (Kfs= پتاسیم فلدسپات Li=خرده سنگی Plg=پلاژیوکلاز)

نمونه CA 43

هیدروکسید کلسیم در دمای بیشتر از ۴۰۰ درجه سلسیوس است که به اکسید کلسیم و آب تبدیل می‌شود. خارج شدن مقدار آب مربوط به هیدروکسید کلسیم باقی مانده که به صورت یک قله مشخص می‌شود، بیانگر میزان آهک جذب نشده توسط پوزولان است. افت وزن که ناشی از تبخیر آب در محیط است، در پوزولان‌های فعال بسیار کم و در پوزولان‌های ضعیف زیاد است. بر اساس تجربیات به دست آمده از بررسی نتایج روش STA، می‌توان فعالیت پوزولانی نمونه‌های پوزولان را در چهار رده خوب (بیش از ۲۵ درصد)، متوسط (بین ۲۰ تا ۲۵ درصد)، ضعیف (بین ۱۵ تا ۲۵ درصد) و خیلی ضعیف (کمتر از ۱۵ درصد) دسته‌بندی نمود. بر این اساس هر دو نمونه انتخابی با فعالیت پوزولانی بیش از ۲۵ درصد در رده خوب قرار می‌گیرند (جدول ۳، شکل ۵ و ۶).

۳- تعیین فعالیت پوزولانی براساس روش استاندارد EN 196-5

به منظور بررسی کامل‌تر و اطمینان از نتایج و تجزیه و تحلیل دقیق‌تر جهت توسعه الگوی سنگ‌شناسی پوزولان‌ها، نمونه‌های انتخابی با روش استاندارد EN 196-5 نیز مورد آزمون قرار گرفتند. در این روش اندازه‌گیری فعالیت پوزولانی بر پایه اندازه‌گیری ظرفیت پیوند آهکی پوزولان طبیعی در یک محیط حاوی هیدروکسید کلسیم صورت می‌گیرد. در روش EN 196-5، غلظت Ca^{2+} و OH^- در محلول آبی سیمان آمیخته پوزولانی در زمان‌های معین تعیین می‌شود. همچنین یک منحنی تعادل Ca^{2+} و OH^- نیز ارائه شده است. در صورتیکه غلظت Ca^{2+} و OH^- در زیر منحنی تعادل قرار گیرد، فعالیت پوزولانی قابل قبول خواهد بود (شکل ۷ و ۸).

زمینه حاوی ۵۰٪ آذر آوارهای شیشه‌ای و خمیره کریپتوکریستالین است. میکرولیت‌های پلاژیوکلاز ۲۰٪ و فنوکریستال‌های پلاژیوکلاز، فلدسپات آلکان و کوارتز خرد شده در آن شناور است. بلورهای ثانویه بیوتیت و کانی‌های اپک در زمینه سنگ قابل مشاهده است. کمتر از ۵٪ از سنگ را قطعات خرده-سنگی تشکیل می‌دهد، که همجنس زمینه اصلی است. بافت سنگ آذرآوری به همراه بافت فرعی جریان‌ی است و نام سنگ توف کریستالین می‌باشد (شکل ۴).

ترکیب شیمیایی توف‌ها و فعالیت پوزولانی نمونه‌های پوزولانی

آنالیز ۵ نمونه توف منطقه مورد مطالعه جهت مقایسه با استانداردها و خصوصیات ژئوشیمیایی پوزولان‌ها در (جدول ۱) ارائه شده است.

تعیین فعالیت پوزولانی

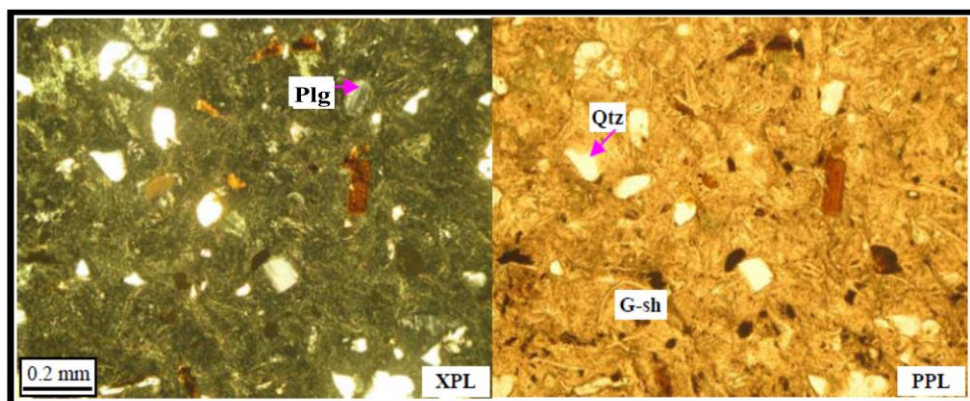
فعالیت پوزولانی ۲ نمونه انتخابی به سه روش زیر انجام شد.

۱- تعیین اندیس فعالیت مقاومتی (اندیس هیدرولیکی) پرکاربردترین و معتبرترین استاندارد در زمینه ارزیابی ویژگی‌های پوزولان‌های طبیعی جهت جایگزینی در سیمان، استاندارد ASTM C 618 (استاندارد ملی ایران به شماره ۳۴۳۳ نیز برگرفته از این استاندارد است) می‌باشد. در این استاندارد، معیارها و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی لازم برای پوزولان‌های طبیعی ارائه شده است. در این استاندارد پوزولان‌های طبیعی در رده N جای می‌گیرند و باید اندیس فعالیت مقاومتی آن‌ها در سن ۷ و ۲۸ روز، بیشتر از ۷۵ باشد (جدول ۲).

۲- تعیین فعالیت پوزولانی با استفاده از دستگاه STA (روش

ترموگراویمتری)

با استفاده از روش وزن سنجی حرارتی (TG-DTG)، فعالیت پوزولانی انواع پوزولان‌ها قابل اندازه‌گیری است. اساس روش بر پایه تجزیه حرارتی بلورهای



شکل ۴. توف کریستالین اسیدی جنوب بلده (Qtz=کوارتز Plg=پلاژیوکلاز G-sh=آذر آوار شیشه‌ای)

جدول ۱. آنالیز ICP عناصر اصلی ۵ نمونه توف منطقه مورد مطالعه برحسب درصد

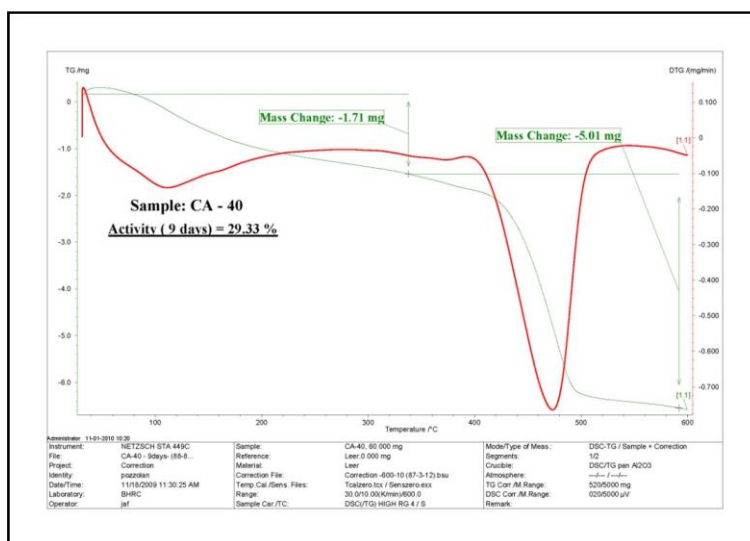
Number	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	SUM
CA 40	۴۹/۱۶	۴۸/۰	۷/۱۶	۳/۲۲	۱/۲۶	۰/۰۹	۱۸/۷۶	۰/۶۹	۱/۵۷	۰/۱۲	۱۲/۶۸	۹۵/۱۸
CA 43	۷۷/۸۰	۱۵/۰	۱۲/۰۱	۰/۴۶	۱/۱۱	۰/۰۰	۳/۵۹	۰/۸۰	۰/۹۰	۰/۰۱	۱/۳۲	۹۸/۱۵
PM 114	۵۳/۹۷	۵۵/۰	۷/۸۶	۲/۵۳	۱/۲۵	۰/۱۰	۱۸/۴۵	۰/۵۰	۳/۴۹	۰/۱۰	۸/۹۰	۹۷/۷۱
PM 117	۴۸/۶۶	۲۸/۰	۳/۳۹	۲/۲۰	۱/۲۸	۰/۰۹	۲۲/۸۲	۰/۹۰	۰/۷۷	۰/۱۳	۱۶/۹۳	۹۷/۴۶
PM 121	۴۶/۵۵	۳۹/۰	۷/۵۹	۲/۳۶	۰/۸۲	۰/۰۷	۲۲/۱۳	۱/۰۸	۲/۲۲	۰/۱۰	۱۳/۲۱	۹۶/۵۳

جدول ۲. اندیس هیدرولیکی ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های پوزولان

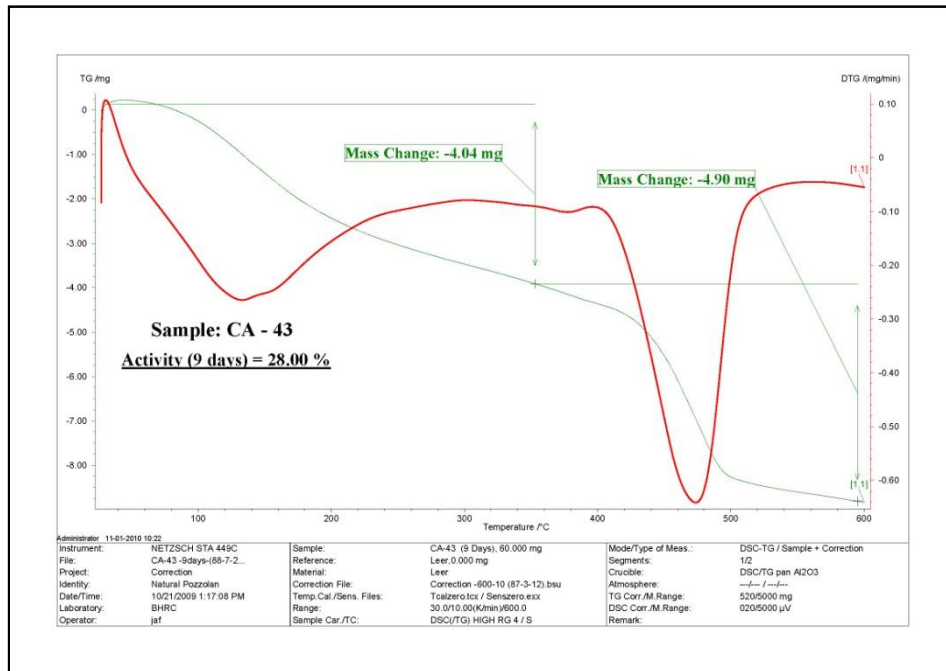
اندیس هیدرولیکی		نمونه پوزولان
۲۸ روزه	۷ روزه	
۱۴۵	۱۳۱	CA 40
۱۲۱	۱۰۰	CA 43

جدول ۳. فعالیت پوزولانی نمونه‌های پوزولانی پس از ۹ روز با استفاده از دستگاه STA

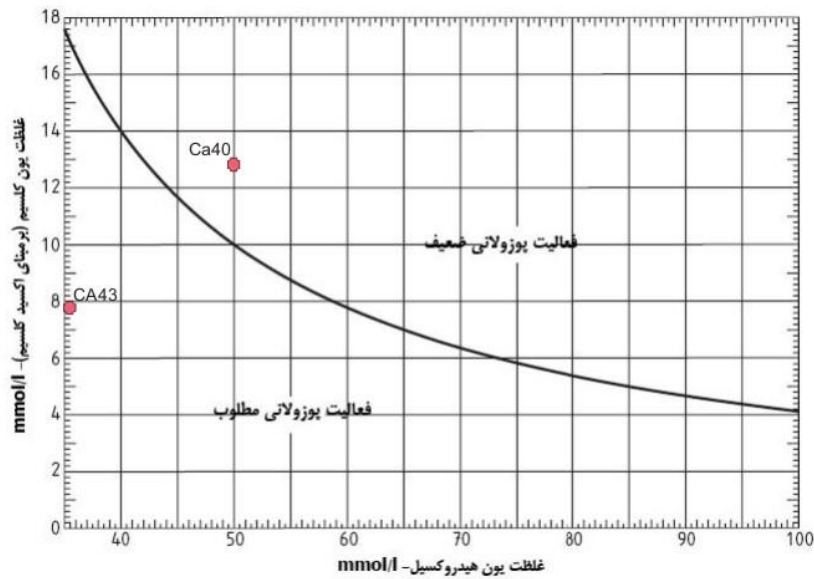
فعالیت پوزولانی	نوع پوزولان
۲۹/۳۳	CA 40
۲۸/۰۰	CA 43



شکل ۵. منحنی آنالیز حرارتی نمونه پوزولان با مشخصه CA-40، با استفاده از دستگاه STA.



شکل ۶. منحنی آنالیز حرارتی نمونه پوزولان با مشخصه CA-43، با استفاده از دستگاه STA.

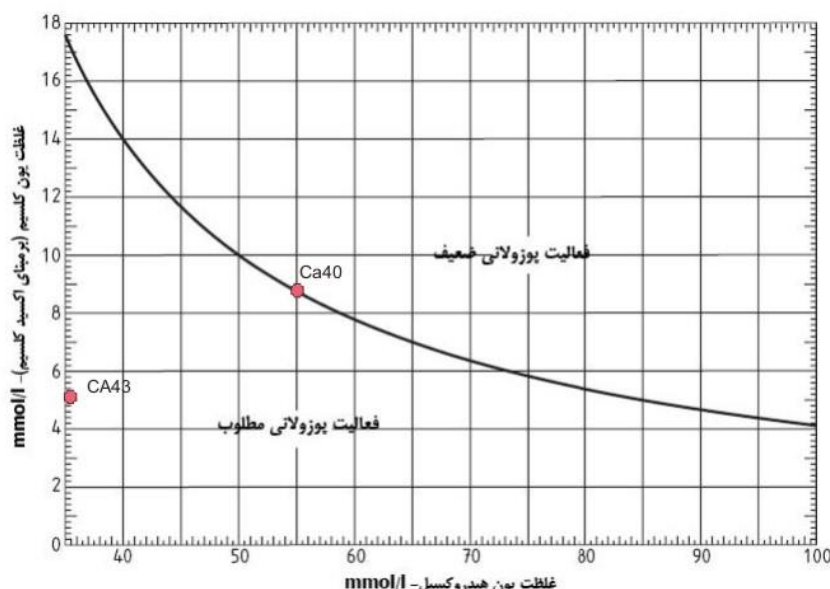


شکل ۷. منحنی تعادل غلظت یون هیدروکسید-یون کلسیم پس از ۹ روز برای نمونه‌های پوزولان براساس استاندارد EN 196-5

بحث

۷۰ درصد باشد. میزان حداکثر اکسید گوگرد، اکسید منیزیم و LOI نیز به ترتیب ۳، ۵ و ۱۰ درصد تعیین شده است (جدول ۴). در برخی از منابع میزان اکسید پتاسیم بر حسب اکسید سدیم محاسبه و مجموع آنها با عنوان میزان الکالی معادل اکسید سدیم معرفی می‌شود. بر اساس این استاندارد با توجه به آنالیز شیمیایی، نمونه CA43 جهت استفاده به عنوان پوزولان مناسب بوده و نمونه‌های CA40، PM114، PM117 و PM121 قابلیت استفاده به عنوان پوزولان را ندارند.

در منابع علمی ترکیب شیمیایی پوزولان بسیار کلی بیان شده است. از این رو در استانداردهای کشورهای مختلف سعی شده است ترکیب مشخص‌تری برای پوزولان‌های قابل استفاده در سیمان ارائه شود. مهمترین استانداردها عبارتند از: استاندارد ASTM این استاندارد توسط American Society for Testing and Materials معرفی و تعیین شده است. بر اساس استاندارد - ASTM، مجموع اکسیدهای سیلیسیم، آلومینیم و آهن حداقل می‌بایست



شکل ۸. منحنی تعادل غلظت یون هیدروکسید-یون کلسیم پس از ۳۰ روز برای نمونه‌های پوزولان براساس استاندارد EN 196-5

جدول ۴. استاندارد ASTM برای پوزولان‌های طبیعی

	استاندارد ASTM	نمونه CA40	نمونه CA43
ASTM C618 Class N (American Society for Testing and Materials)	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	70% Minimum	۵۹/۵۴
	SO ₃	4% Maximum	
	Moisture Content	3% Maximum	
	LOI (950C)	۱۰/۱۰ Maximum	۱۲/۶۸
	MgO	۵/۱۰ Maximum	۱/۲۶
	Available Alkalis as Na ₂ O K ₂ O(96) Na ₂ O(62)	۱/۵ Maximum	

استاندارد DIN آلمان

آلومینیوم در محدوده پرآلومین قرار می‌گیرد اما بالا بودن درصد آلومینیوم در نمونه CA43 با توجه به میزان بالای درصد سیلیس تأثیر چندانی در کاهش فعالیت پوزولانی نداشته است. در منابع علمی به آن اندازه که به ویژگی‌های شیمیایی پوزولان‌ها توجه شده، به ویژگی‌های بافتی آنها اشاره نشده است. شاید هم به دلیل منافع اقتصادی در صنعت اینگونه مطالعات بافتی کمتر منتشر می‌شوند. بافت سنگ‌های آذرین، که گویای شرایط فیزیکی در هنگام تشکیل سنگ است، اهمیت بسیار زیادی در خواص پوزولانی آن دارد. سنگ گرانیت و رپولیت دارای ترکیب شیمیایی مشابه هستند ولی گرانیت سنگی است فاقد شیشه و دارای بلورهای درشت، اما رپولیت دارای فنوکریستال‌های محدودی در زمینه شیشه است. گرانیت‌ها بر اساس استانداردهای بین‌المللی ترکیب شیمیایی مناسبی جهت استفاده به عنوان پوزولان را داشته ولی به دلیل ویژگی‌های بافتی دارای خواص پوزولانی نیستند. از این رو به همراه بررسی شیمی سنگ‌های آذرین می‌بایست ویژگی‌های بافتی آنها نیز مطالعه شود تا بتوان مناسب بودن سنگ برای مصرف به عنوان پوزولان را تعیین نمود. اگرچه میزان SiO_2 و Al_2O_3 فعالیت پوزولانی را تغییر می‌دهد، اما قطعات پومیس حفره‌دار و آذر آوارهای شیشه‌ای (glass shards) در مقایسه با بلورهای کوارتز، بیوتیت، هورنبلند، پیروکسن و قطعات لیتیک دارای اهمیت بیشتری هستند. لذا حضور فاز شیشه و آذر آوارهای شیشه‌ای و آلتراسیون کمتر می‌تواند خواص پوزولانی را کنترل نماید. Shi (2001) نشان داد که هر عاملی که ساختار شیشه را تغییر دهد فعالیت پوزولانی را نیز تغییر می‌دهد. مهمترین عوامل ترکیب شیمیایی، میزان شیشه، اندازه ذرات و مواد شیمیایی افزوده شده به سیمان هستند. نمونه CA40 در بعضی موارد تحت پوشش استانداردهای شیمیایی ASTM و DIN قرار نمی‌گیرد. این نمونه دارای میزان سیلیس بسیار کم و در مقابل از درصد بالایی کلسیم به صورت آهک تشکیل شده است ولی با توجه به این مطلب، این نمونه در روش اندیس هیدرولیکی و ترموگراویمتری دارای فعالیت پوزولانی بالاتری نسبت به نمونه CA43 است و تنها در روش استاندارد EN196-5 پس از ۳۰ روز در منطقه مطلوب پوزولانی قرار گرفته است. نمونه CA43 دارای درصد بالایی از سیلیس آزاد به صورت آذرآوار شیشه‌ای است و در روش اندیس هیدرولیکی و ترموگراویمتری دارای فعالیت پوزولانی بالایی بوده است و نیز در روش استاندارد EN196-5 پس از ۹ روز در منطقه مطلوب پوزولانی قرار گرفته است این نمونه تقریباً منطبق با تمام موارد ذکر شده در استاندارد ASTM و DIN و نیز داده‌های ژئوشیمیایی است.

در این استاندارد (DIN 51043) تفکیک بیشتر نسبت به استاندارد ASTM دیده می‌شود و اجزا سازنده اصلی پوزولان با تفکیک بیشتری مشخص می‌شوند (جدول ۵). بر اساس این استاندارد، اکسید سیلیسیم در پوزولان می‌بایست بین ۵۰-۶۷ درصد، اکسید آلومینیم بین ۲۰-۱۴ درصد، اکسید آهن بین ۵-۲ درصد و مجموع اکسیدهای کلسیم و منیزیم کمتر از ۱۰ درصد باشند. مجموع آلکالی‌ها نیز بین ۸-۳ درصد است. بر اساس جدول ۱، حداقل در دو مورد از ۵ نمونه توف آنالیز شده با استاندارد آلمان برای پوزولان‌های طبیعی (با وجود دامنه گسترده تر درصد وزنی برای اکسیدها) مطابقت ندارند. بر اساس استاندارد آلمان (جدول ۵) ۲۲ درصد سنگ‌های استفاده شده به عنوان پوزولان در جهان دارای شرایط لازم طبق این استاندارد نیستند و میزان درصد SiO_2 آنها در دامنه ۵۰ تا ۷۰ درصدی این استاندارد قرار نمی‌گیرد (قریشوندی، ۱۳۸۸). با توجه به محدودیت‌های دیگر این استاندارد (مانند مجموع الکالی)، در مجموع ۵۸ درصد پوزولان‌های مورد استفاده در صنعت سیمان دنیا از استاندارد آلمان (DIN) تبعیت نمی‌کنند (قریشوندی، ۱۳۸۸). پوزولان‌های مصرفی در صنعت سیمان دارای تنوع شیمیایی زیادی هستند. اما پوزولان‌های طبیعی از ماگماهایی با ویژگی‌های مشخص بوجود می‌آیند. رحیم‌زاده (۱۳۸۸) و قریشوندی (۱۳۸۹) سه الگوی ژئوشیمیایی جهت تعیین ویژگی‌های شیمیایی پوزولان‌های طبیعی ارائه کرده‌اند، بدین صورت که پوزولان‌های طبیعی بیشتر از ماگماهای ساب‌آلکالن بوجود می‌آیند که میزان سیلیس آنها بسیار متنوع است و ضریب اشباع از آلومین آنها بیشتر در محدوده متا آلومین تا پرآلومین قرار می‌گیرند. Turkmenoglu and Tankut (2002) بر این عقیده هستند که با افزایش K_2O و یا مجموع $Na_2O + K_2O$ مقاومت و سختی ملات‌های پوزولانی کاهش می‌یابد، همچنین بیان کرده‌اند تأثیر آلومینیم و سیلیس عکس یکدیگر است و در حالی که افزایش سیلیس مقاومت و سختی ملات‌های ساخته شده را افزایش می‌دهد، افزایش میزان آلومینیم این سختی را کاهش می‌دهد. به اعتقاد Rodriguez و همکاران (۲۰۰۲) کاهش آلومینیم، باعث افزایش مقاومت در برابر تخریب سطحی می‌شود و میزان فعالیت پوزولانی با افزایش سیلیس افزایش می‌یابد. با توجه به آنالیزهای ارائه شده در جدول ۱ تمام نمونه‌های توف مورد مطالعه در محدوده ماگماهای ساب‌آلکالن قرار می‌گیرند و از نظر ضریب اشباع از آلومینیم، به جز نمونه CA43، در محدوده متا آلومین قرار گرفته و میزان آلومینیم آن‌ها کمتر از ۸ درصد وزنی است. در نمونه CA43 متناسب با افزایش میزان درصد سیلیس میزان درصد آلومینیم نیز افزایش یافته است و از نظر ضریب اشباع از

جدول ۵. استاندارد آلمان برای پوزولان

	نام اکسید	استاندارد آلمان	نمونه CA40	نمونه CA43
Chemical requirements (German standard) DIN 51043	SiO ₂	۵۰-۶۷	۴۹/۱۶	۷۷/۸۰
	Al ₂ O ₃	۱۴-۲۰	۷/۱۶	۱۲/۰۱
	Fe ₂ O ₃	۲-۵	۳/۲۲	۰/۴۶
	CaO+MgO	<10	۲۰/۰۲	۴/۷
	Na ₂ O+K ₂ O	۳-۸	۲/۲۶	۱/۷

نتیجه گیری

راستا ضروری به نظر می رسد. وجود سیلیس آزاد به صورت آذر آوار شیشه ای باعث افزایش فعالیت پوزولانی و کاهش زمان گیرش می شود. در توف های آهکی نیز وجود آهک می تواند باعث افزایش فعالیت پوزولانی شود و تنها در زمان طولانی تری فعالیت پوزولانی در منطقه مطلوب قرار می گیرد. این تحقیق نشان داد که علاوه بر توف های اسیدی، توف های آهکی می توانند به عنوان منابع جدید پوزولان طبیعی مورد استفاده قرار گیرند. این توف ها در سنگ های آذرین با سن ائوسن ایران مانند سازند کرج وجود دارند. بدیهی است تحقیقات گسترده تری مانند انجام آزمایش های تعیین زمان گیرش یا حرارت هیدراسیون سیمان (استانداردهای ۳۹۲ و ۳۹۴ سازمان تحقیقات صنعتی و استاندارد ایران) و یا تعیین مقاومت فشاری نمونه استوانه ای و تعیین انبساط به روش اتوکلاو (استانداردهای ۶۰۴۸ و ۳۹۱ اداره استاندارد ایران) بر روی نمونه های متنوع تری از توف های آهکی مناطق مختلف سازند کرج در ایران می تواند منجر به ارائه الگویی برای استفاده از این سنگ ها به عنوان منابع جدید پوزولان در کشور باشد

نمونه CA43 که یک توف اسیدی است تقریباً منطبق با تمام موارد ذکر شده در استاندارد ASTM و DIN و نیز داده های ژئوشیمیایی است. ولی نمونه CA40 به عنوان یک توف آهکی از نظر شیمیایی تحت پوشش استانداردهای ASTM و DIN نبوده اما دارای فعالیت پوزولانی خوبی است. نمونه CA43 دارای درصد بالایی از سیلیس آزاد به صورت آذر آوار شیشه ای است. نمونه CA40 دارای آذر آوار شیشه ای کمتر و میزان سیلیس پائین تر و در مقابل از درصد بالایی آهک تشکیل شده است. هر دو نمونه در روش اندیس هیدرولیکی و ترموگرایمتری فعالیت پوزولانی بالایی داشته اند. در روش استاندارد EN196-5 نمونه CA43 پس از ۹ روز در منطقه مطلوب پوزولانی قرار گرفته اما نمونه CA40 پس از ۳۰ روز در منطقه مطلوب پوزولانی قرار گرفته می گیرد. با توجه به مطالب ذکر شده، این طور به نظر می رسد که استانداردهای ارائه شده (ASTM و DIN) تمام سنگ هایی که قابلیت استفاده به عنوان پوزولان را دارند تحت در بر نمی گیرد و بررسی شواهد بافتی در این

منابع

- حاجی محمدی، ف.، ۱۳۸۰، بررسی پتروگرافی و پترولوژی سنگ های آتشفشانی و آتشفشانی- رسوبی منطقه بلده، پایان نامه کارشناسی ارشد، پژوهشکده علوم زمین. خادمی پارسا، م.، مسعودی، ف.، پرهیزکار، ط.، پورخورشیدی، ع.، ۱۳۸۹، پتروگرافی سنگ های جنوب غرب بلده با نگرشی بر قابلیت کاربرد پوزولان، اولین همایش پترولوژی کاربردی، دانشگاه آزاد اسلامی خوراسگان.
- خادمی پارسا، م.، ۱۳۹۰، پترولوژی سنگ های آتشفشانی جنوب غرب بلده (البرز مرکزی)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی.
- رحیم زاده، ب.، ۱۳۸۸، پترولوژی سنگ های آتشفشانی شرق قزوین با نگرشی بر امکان وجود پوزولان، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی.
- سعیدی، ع.، ۱۳۷۲، تهیه نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ بلده، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- قریشوندی، ح.، ۱۳۸۹، پتروگرافی و پترولوژی سنگ های آذرین منطقه جام (سمنان) با نگرشی بر امکان وجود پوزولان، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی.
- نوری زاده، ح.، ۱۳۸۱، بررسی پترولوژی و ژئودینامیک خروج گنبد های آتشفشانی و سایر توده های نیمه عمیق جوان منطقه بلده، پایان نامه کارشناسی ارشد، پژوهشکده علوم زمین.

- Mehta, P.K., 1989, "Pozzolanic and Cementitious By -Product in Concrete- Another Look", Silica Fume, Slag and Natural Pozzolan in Concrete Proc, 3rd International Conference, Trondheim, Norway.
- Fisher, R.V., 1966, Mechanism of deposition from Pyroclastic flows, Am. Sci., Vol:264, P:350-363
- Habert, G., Choupay, N., Montel, J.M., Guillaume, D., Escadeillas, G., 2008, Effects of the secondary minerals of the natural pozzolans on their pozzolanic activity, Cement and Concrete Research, Vol: 38, P:963-975.
- Rodriguez-Camacho, R.E., Uribe-Afif, R., 2002, Importance of using the natural pozzolans on concrete durability, Cement Concrete Research, Vol: 32 P: 1851- 1858.
- Shannag, M.J., Yeginobali, A., 1995, Properties of Pastes, Mortars and Concrete Containing Natural Pozzolan, Cement and Concrete Research, Vol:25, P:647-657.
- Shi, C., Day, R.L., 2000, Pozzolanic reactions in the presence of chemical activators part I: reaction kinetics, Cement and Concrete Research, Vol:30, P:51-58.
- Shi, C., 2001, An overview on the activation of reactivity of natural pozzolans, Can. J. Civ. Eng., Vol: 28, P:778-786.
- Shi, C., Krivenko, P.V., Roy, D., 2006, Alkali -Activated Cement and Concrets, Taylor & Francis, P: 376.
- Turkmenoglu, A.G., Tankut, A., 2002, Use of tuffs from central Turkey as admixture in pozzolanic cements; Assessment of their petrographical properties, Cement and Concrete Research, Vol:32, P:629-637.