Archive of SID

2nd International Conference on
CIVIL ENGINEERING, ARCHITECTURE & URBAN PLANNING ELITES
15th Nov.2016 London - United Kingdom

دومین کنفرانس بین المللی
نخبگان عمران، معماری و شهرسازی
لندن - انگلستان ۲۵ آبان ماه ۱۳۹۵

بررسی فرآیند پدیده واکنش قلیایی- سنگدانه ای در بتن

مهدی آموزیان

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران، گرایش مهندسی و مدیریت ساخت، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران، گرایش مهندسی و مدیریت ساخت، واحدعلوم تحقیقات خوزستان، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

mehdi.amoozian@yahoo.com

سید فتح اله ساجدی

دانشیار گروه مهندسی عمران، واحد اهواز ، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

Email: f_sajedi@yahoo.com

چکیده:

پدیده واکنش قلیایی- سنگدانه ای، یکی از موثرترین پدیده های مخرب در بتن است که می تواند پس از مدت کوتاهی باعث خرابی کامل بتن و غیر قابل اطمینان شدن سازه در دست بهره برداری گردد. این واکنش مخرب اگرچه تا کنون راه حل مشخصی برای جلوگیری و توقف به صورت کامل نداشته است اما اهل فن در رشته عمران همواره به دنبال روش های نوین جهت کاهش خسارت های ناشی از این پدیده قبل از رخداد آن در مخلوط بتن هستند. در این تحقیق به مطالعه روش های آزمایشگاهی نوین در بررسی پدیده واکنش قلیایی- سنگدانه ای در بتن پرداخته شد که نتایج به دست آمده نشان دهنده یک نقشه راه برای شروع بررسی این پدیده است.

کلمات کلیدی:

واکنش قلیایی- سنگدانه ای، پدیده مخرب، بتن

www.SID.ir

۱- مقدمه

بتن به دلیل مزایایش به طور وسیع در سرتاسر جهان استفاده می شود. کیفیت بتن بستگی به کیفیت سه جزء اصلی آن یعنی سیمان، سنگدانه، آب اختلاط و مهارت در ساختن، ریختن و عمل آوری آن دارد. تاریخچه شناخت واکنش های قلیایی- سنگدانه ای به دهه ۱۹۳۰ باز می گردد، که در آن تاریخ، انبساط های غیرقابل توضیحی در بعضی از سازه های ایالت کالیفرنیا در آمریکا مشاهده گردید. این سازه ها شامل چند مدرسه، پل، روسازی راه و دیوارهای ساحلی بودند. درآن هنگام دلیلی برای این انبساط ها و ترک ها پیدا نشد تا هنگامی که در اواخر دهه ۱۹۳۰ یک مهندس آمریکایی به نام استانتون[1] با عمل آوری استوانه های ملاتی در شرایط خاص، مشاهده نمود که درسطح ملات ها، ترک هایی مشابه با سازه های واقعی به وقوع پیوسته است. بعد از بررسی های بیشتر و تغییر شرایط، علت ترک ها و انبساط ها ناشی از واکنش قلیایی– سنگدانه ای کشف گردید[۱]. ترکیب سیلیس فعال سنگدانه های بتن با مواد قلیایی با گذشت زمان موجب آسیب دیدن سازه های بتنی اجراء شده می شود [۲].

۲- بیان مساله

بتن یکی از سنگ های مصنوعی و بسیار پرکاربرد ساخته دست بشر است که به دلیل سادگی و در دسترس بودن مواد تشکیل دهنده یکی از پرمصرف ترین مواد مورد استفاده در ساخت و ساز های بشر امروز است. این ماده مصنوعی اگرچه تا کنون جایگزینی بهتر و قابل قبول تر را نداشته است، اما دانشمندان علم مهندسی در تلاش هستند تا ترکیب آن را بهینه و عملکرد آن را بهبود بخشند. این کار را با استفاده از مواد افزودنی جدید که تا امروز به صورت آزمایشگاهی مورد امتحان واقع شده اند و نیز دست بردن در ترکیب مواد تشکیل دهنده آن ها انجام می دهند. بتن نیز مانند سایر مواد در معرض خطرات و تخریب های فراوانی است و با توجه به اهمیت ویژه ای که دارد، عوامل مخرب و تاثیرگذار بر روی آن نیز مورد اهمیت هستند. واکنش قلیایی – سنگدانه ای در بتن یکی از عوامل مخرب بتن است که در سال های نه چندان دور کشف شده است. پدیده واکنش قلیایی– سنگدانه ای بر اثر واکنش بین هیدروکسید قلیا در سیمان و مواد معدنی سیلیسی موجود در سنگدانه ها و یا بر اثر واکنش کانی های واکنش زا مانند دولومیت ها و کربنات های موجود در این کانی ها با قلیایی سیمان رخ می دهد. نتیجه ژل قلیایی- سیلیسی است. واکنش قلیایی– سنگدانه ای اغلب بعد از ۵ الی ۱۵ سال ظاهر می شود. آب نیز به عنوان یک کاتالیزور در این ساختار عمل می کند. این واکنش سبب تورم بتن و ترک های ریز و در نهایت ترک های قابل رؤیت شده و با تولید ژلی که آب را جذب می کند، گسترش می یابد که با افزایش حجم و در نتیجه با ترک خوردگی و فروپاشی بتن همراه است. این عامل در ماه های ابتدایی پس از بتن ریزی غیر قابل شناسایی است و پس از چند سال خود را نمایان می سازد و به همین خاطر به "سرطان بتن" نیز شهرت دارد. دلیل آن نیز مخفی بودن این پدیده مخرب تا مدت ها پس از بتن ریزی است. دراین تحقیق به بررسی روش های نوین آزمایشگاهی این پدیده مخرب و نیز نمودار گام به گام این مطالعات پرداخته شده است..

۳- اهمیت و ضرورت انجام تحقیق

با توجه به اینکه پدیده واکنش قلیایی- سنگدانه ای باعث خرابی بتن شده و پس از مدتی شروع به تضعیف مشخصات اساسی مکانیکی بتن از جمله مقاومت فشاری آن می نماید که این امر موجب خرابی سازه در دست بهره برداری و غیرقابل اطمینان شدن آن خواهد شد و این اتفاق سبب بروز خسارت های مالی فراوان و در بعضی از موارد خسارت های جانی و غیرقابل جبران نیز خواهد گردید، لذا شناخت روش های نوین بررسی این پدیده قبل از رخداد در مخلوط بتنی می تواند برای سایر محققین در این زمینه بسیار سودمند و مفید باشد.

[1] Staunton

www.SID.ir

Archive of SID

۴- تاریخچه تحقیق

ارجمند و رمضانیانپور (۱۳۸۴) در تحقیقی به بررسی "استعداد واکنش زایی برخی از سنگدانه های چند منطقه با استفاده از آزمایش هایی که در بالا ذکر شده" به بررسی این پدیده در برخی مناطق کشور پرداختند. نتایج حاصله نشان داد که بر اساس آزمایش شیمیایی ASTM C289 نمی توان به طور دقیق به مضر بودن سنگدانه ها از نظر واکنش قلیایی پی برد، بلکه نتایج این آزمایش همراه با نتایج آزمایش تسریع شده و دراز مدت قابل بررسی است.

نتایج آزمایش ملات منشوری نشان می دهد، که سنگدانه ای که در آزمایش شیمیایی مضر تشخیص داده نشد، در این آزمایش مضر شناخته شده است. اگر نتایج آزمایش ملات منشوری تسریع شده میانگین درصد تغییر طول نمونه های مورد آزمایش را بین ۱/ تا ۲/ درصد نشان دهد، آزمایش های مکمل از جمله آزمایش سنگ شناسی و برای اطمینان بیشتر، آزمایش دراز مدت مورد نیاز است [۳].

بلوردی و حاجی آقابابایی (۱۳۸۸)، در تحقیقی به بررسی "تاثیر میکروسیلیس بر کاهش واکنش زایی قلیایی- سیلیسی سنگدانه های بتن در "سدهای شمیل و نیان" پرداختند. در این تحقیق به منظور تامین مصالح سنگدانه سازه های بتنی سدهای خاکی سنگریزه ای مذکور که در ۸۰ کیلومتری شمال شرقی بندرعباس و در شمال جاده بندرعباس به میناب احداث شده اند و فاصله دو ساختگاه سدهای مذکور از هم ۱۰ کیلومتر می باشد، مصالح معادن قرضه مختلفی بررسی گردیده است. از آنجایی که شناسایی مصالح و معادن قرضه مستعد واکنش زایی قلیایی و جلوگیری از پدیده مذکور در بتن های سازه ای بسیار حائز اهمیت می باشد، بر روی سه معدن قرضه بستر رودخانه زندان، سهرابی و مصالح حاصل از حفاری سرریز سد نیان بررسی واکنش زایی قلیایی صورت گرفته است. نتایج این تحقیق نشان داد که مطابق آزمایش های اولیه، معادن مذکور استعداد واکنش زایی قلیایی- سیلیسی داشتند. برهمین اساس با افزودن درصدهای مختلف میکروسیلیس به مصالح معادن مذکور و انجام آزمایش کنترل واکنش زایی قلیایی به روش ملات منشوری تسریع شده واکنش زایی قلیایی مصالح و تاثیر میکروسیلیس بر کاهش آن مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق نتایج بدست آمده از آزمایش های صورت گرفته، با افزودن درصدی میکروسیلیس به مصالح هر معدن قرضه، میزان واکنش زایی قلیایی- سیلیسی مصالح کاهش یافته و کنترل گردیده است [۴].

زمانی و همکاران (۱۳۹۰) در تحقیقی با عنوان "بررسی اثرات مخرب واکنش قلیایی- سنگدانه ای در بتن در پروژه سد گتوند علیا"، به بررسی واکنش قلیایی- سنگدانه ای در این سد پرداختند. در این تحقیق، احتمال واکنش زایی سنگدانه های مصرفی در بتن پروژه سد گتوند علیا با استفاده از سنگدانه های مورد مصرف در بتن پروژه سد و انجام آزمایش های پتروگرافی و شیمیایی بر روی آن ها، احتمال واکنش پذیری این سنگدانه ها مورد بررسی قرار گرفت. با نمونه برداری از مصالح سنگی مصرفی جهت تهیه بتن مورد استفاده در پروژه سد و تهیه مقاطع میکروسکوپی، نوع و مقدارکانی های تشکیل دهنده آن ها تعیین گردید و سپس احتمال واکنش پذیری قلیایی- سنگدانه ای آن ها بر اساس آزمایش پتروگرافی تخمین و پیش بینی شد. برای اطمینان بیشتر از نتایج تجزیه پتروگرافی، آزمون های شیمیایی مرتبط نیز انجام گرفت، هم چنین تاکید گردید برای این پیش بینی ها انجام آزمون های پتروگرافی و شیمیایی ضروری است که این آزمون ها پیش از تهیه بتن باید انجام گردد [۵].

۵- تشریح آزمایش های مرتبط

۵-۱- مقدمه

یکی از روش های بررسی توان واکنش قلیایی- سنگدانه ای و هم چنین تخمین میزان انبساط بتن در آینده، استفاده از استاندارد ASTM و بررسی مصالح سنگدانه ای و نمونه های بتنی تحت شرایط خاصی است که در آزمایشگاه مهیا می شود. در ادامه به معرفی روش های آزمایشگاهی استاندارد ASTM و نیز چگونگی استفاده از این روش ها برای بررسی توان واکنش زایی قلیایی- سنگدانه ای در بتن و نیز مقایسه نتایج حاصله از هرکدام از آزمایش ها پرداخته خواهد شد. هم چنین، برخی روش های آزمایشگاهی تسریع شده معرفی خواهند گردید.

www.SID.ir

Archive of SID

۵-۲ –مطالعات آزمایشگاهی، استاندارد ها و آزمایش ها

۵-۲-۱- آزمایش های صحرایی

متخصصین فن آوری بتن و پتروگرافی باید با بازدید از محل و بازرسی بتن معیوب، از نحوه نمونه گیری و عکس های تهیه شده اطمینان حاصل نمایند، هم چنین شواهدی مبنی بر وقوع واکنش را شناسایی کنند. در این خصوص عوامل زیر باید مورد بررسی قرار گیرند [۶،۷]:

الف- وضعیت ظاهری ریزترک ها

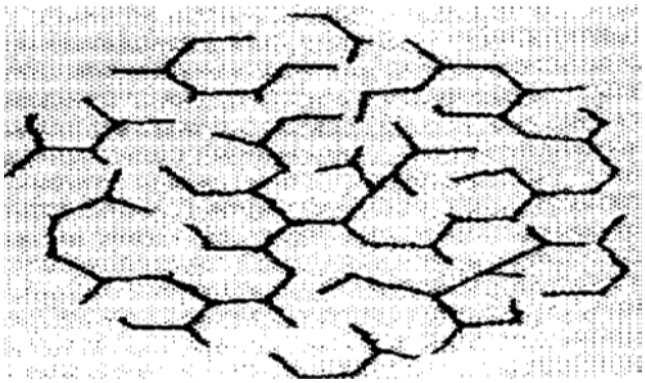
ب- شواهد انبساط سازه ای

پ- تراوش، پوشش و پر شدن حفره ها

ت- نمونه گیری کافی و صحیح از بتن

۵-۲-۱-۱- وضعیت ظاهری ریز ترک ها

الگو و نحوه توزیع ترک های ناشی از انبساط واکنش قلیایی- سنگدانه ای، بسیار شبیه به ترک هایی است که در شوره زارها و مناطق پوشیده از بعضی از خاک های رسی، زمانی که لایه سطحی آن ها پس از خشک شدن و انقباض جمع می شوند، و یا ترک های ناشی از جمع شدگی خمیری و یا هم چنین ترک هایی که روی مواد مذاب وقتی که سطح آن ها به سرعت سرد و جمع می شود، می باشند. الگوی این ریز ترک ها شبیه لانه زنبورهای نامنظم می باشد که در شکل۱ نشان داده شده است. شکل و الگوی ترک ها به چسبندگی، یکنواختی و هم چنین سرعت جمع شدگی بستگی دارد.



]۷[شکل ۱ - یک طرح کلی ازلانه زنبوری شکسته

در انبساط های ناشی از واکنش قلیایی- سنگدانه ای، ترک های ایجاد شده به علت افزایش حجم قسمت های زیرین نسبت به لایه های بالایی و سطحی و چسبندگی بین این دو لایه ایجاد می شوند. قسمت های زیرین بتن به علت تماس با آب زیرزمینی یا بخار آب حاصل از آب زیرزمینی و هم چنین دور بودن از تشعشع نور خورشید و باد، مرطوب تر از سطح بتن می باشند و به همین لحاظ امکان انجام واکنش بیشتر می باشد. شکل ترک های سطحی به نام های، ترک های نقشه ای، شبکه ای، نقش و نگاره ای، و پنجه غازی مانند معروف می باشند[۶،۷].

www.SID.ir

Archive of SID

۵-۲-۱-۲- شواهد انبساط در سازه

انبساط اعضای سازه ای ممکن است بسیار مشخص باشد. برخی از این شواهد به صورت هایی از قبیل بسته شدن درزهای انبساط، نزدیک شدن قطعات محافظ های بتنی و حتی آسیب رساندن آن ها به یکدیگر، عوارضی هم چون بالا پریدگی در تاوه های بتنی، قطع میل مهار ها و تورم در بعضی از شانه های بتنی راه ها پدیدار می گردد. تشخیص انبساط همیشه به سادگی امکان پذیر نمی باشد زیرا انبساط، ناشی از ترکیب چندین عامل هم چون، سنگدانه های فعال، قلیائیت به میزان کافی، رطوبت به میزان کافی و نفوذپذیری زیاد بتن می باشد، که شناسایی این موارد نیاز به تخصص و تجربه کافی دارد. برای انجام اکثر واکنش های شیمیائی که نیاز به آب دارند، رطوبتی در حدود ٪۸۰ باید مهیا باشد. بر اساس تحقیقات انجام شده، بتنی که یک وجه آن در تماس با خاک می باشد، در شرایط آب و هوایی خشک، رطوبت داخلی آن در عمق ۵ سانتی متر بیشتر از ٪۸۰ می باشد[۶،۷].

۵-۲-۱-۳- تراوش، پوشش و حفرات پر شده

بر اثر واکنش قلیایی- سیلیسی، ژل منبسط شونده ای تولید می شود که این ژل در مراحل پیشرفته تخریب، بر سطح بتن نیز قابل رؤیت می باشد. این ژل اصولا" حالت شفاف، مرطوب و هم چنین چسبناکی دارد، اما اغلب به علت از دست دادن آب و کربناتی شدن به حالت غیر شفاف و به شکل شوره زدگی مشاهده می شود. ژل هایی که در سطح بتن و در معرض رفت و آمد و ترافیک (مانند جاده ها) هستند، با وجود اینکه آب خود را از دست می دهند، اما به سبب سایش ایجاد شده به صورت سطح صیقلی نمایان می شوند. در پل هایی که به شدت آسیب دیده هستند، ژل سیلیسی و هم چنین مواد کربناتی همراه، به صورت قندیل های استلاگتیتی در زیر عرشه پل ها نمایان می شوند. هم چنین توجه به این نکته ضروری است که در بعضی از موارد ژل حاصل از واکنش های قلیایی بی ضرر نیز ممکن است از طریق ترک های حاصل از عوامل دیگری هم چون ذوب و انجماد یا نشست سازه به بیرون تراوش نموده و یا این گونه ترک ها را پر نماید، که در این گونه موارد باید دقت بیشتری گردد.

امروزه به منظور تشخیص ژل سیلیسی در محل و یا آزمایشگاه، از یک روش شیمیایی قابل اطمینان استفاده می شود. در این روش از محلول اورانیل استات استفاده می گردد (توضیحات بیشتر در ادامه در بند «مطالعات آزمایشگاهی» ارائه شده است). با استفاده از این روش با سرعت و دقت زیادی می توان ژل های سیلیسی را شناسائی نمود. استفاده از این آزمایش به علت قابلیت استفاده در محل و هم چنین آزمایشگاه و سرعت در شناسائی، در مراجع بین المللی توصیه شده است [۷،۸،۹].

۵-۲-۲- مطالعات آزمایشگاهی

مسائلی که در آزمایشگاه باید مورد ارزیابی قرار گیرند شامل شناسائی سنگدانه های واکنش زا، آزمایش بر روی ریز ترک ها و بررسی ظاهر آنها، شناسایی و بررسی بر روی فرآورده های حاصل از واکنش و نحوه انجام آزمایش های لازم بر روی سنگدانه های طبیعی و واکنش های احتمالی آن ها می باشد. در ادامه به طور خلاصه چندین روش آزمایشگاهی که در تشخیص واکنش های قلیایی- سیلیسی و قلیایی-کربناتی موثر می باشند، تشریح شده است.

۵-۲-۲-۱- بررسی وضعیت ظاهری نمونه ها

با مطالعه بر روی نمونه های مغزه (یا نمونه های بریده شده) از سطح بتن و ریز ترک های سطحی و تطابق آن ها با ارزیابی ترک های روی سازه و ظاهر ترک ها، می توان ترک های ناشی از واکنش و ترک های حاصل از جمع شدگی خمیری را از یکدیگر تمیز داد. در این خصوص باید توجه گردد که، مصالحی که در قسمت های سطحی بتن (که رطوبت کمتری دارند)، قرار دارند و به شدت ترک خورده اند به اندازه دیگر قسمت های بتن منبسط نمی شوند و فرآورده های واکنشی که باعث تخریب می شوند نیز در این نواحی دیده نمی شوند. هم چنین سنگدانه هایی که بر اثر واکنش قلیایی- سیلیسی تغییر پیدا کرده اند، باید مورد مطالعه قرار گیرند. قطعاتی از سنگدانه ممکن است به شدت آسیب دیده باشند. این آسیب دیدگی ممکن است به صورت: (۱)

www.SID.ir

Archive of SID

هاله هایی در اطراف سنگدانه، که به نظر می رسد باعث کاهش نفوذپذیری سطح خارجی سنگدانه گردد (۲) ترک های پر شده با ژل که به خارج از سنگدانه و به داخل خمیر سیمان گسترش پیدا کرده اند (۳) قطعات سنگدانه که به علت انباشتگی ژل و یا ژل هیدراته نشده ترک خورده اند، باشند [۸].

۵-۲-۲-۲- تعیین شاخص خرابی

نمونه هایی از میان مغزه های تهیه شده از قسمت های مختلف مورد ارزیابی، انتخاب می گردد. مغزه های انتخاب شده ابتدا از طول بریده شده و یک وجه آن ها برای بررسی به وسیله استریو میکروسکوپ، صیقلی می شوند. حداقل سطح مورد نیاز در هر مغزه که باید مورد بررسی قرار گیرد، ۱۸۰ سانتی متر مربع می باشد [۸]. شاخص خرابی بتن در هر یک از مغزه ها بر اساس تعداد نواقص موجود در شبکه هایی به ابعاد ۱/۵ سانتی متر تعیین می گردد، به همین منظور از یک صفحه مشبک در زیر استریو میکروسکوپ با بزرگنمائی (۱۶×) استفاده می شود. مواردی که در این خصوص مورد بررسی قرار می گیرند شامل زیر ترک ها با وجود ژل و یا بدون ژل در سنگدانه ها و در خمیر سیمان، هاله های واکنشی و عدم پیوستگی در اطراف سنگدانه های واکنشی با خمیر سیمان و وجود ژل در حفرات می باشد. مجموع هر یک از انواع این نواقص در یک ضریب که بیانگر تأثیر احتمالی آن ها در تخریب بتن است، ضرب می شود. در انتها مجموع هر یک از انواع موارد پس از تصحیح برای هر ۱۰۰ سانتی متر مربع محاسبه می گردد و مجموع کل نواقص تصحیح شده به عنوان میزان شاخص خرابی برای هر مغزه اعلام می گردد. "شاخص خرابی" اگرچه بیانگر میزان تخریب بر اثر واکنش قلیایی- سنگدانه ای می باشد، اما تأثیر ترک های به وجود آمده بر اثر دیگر عوامل را نیز در نظر می گیرد که تشخیص آن بر عهده یک سنگ شناس باتجربه می باشد [۸].

۵-۲-۲-۳- استفاده از معرف شیمیایی

یکی از روش های شناسائی ژل های قلیایی- سیلیسی، استفاده از محلول اورنیل استات می باشد. استفاده از این روش به عنوان یک راه حل نهایی ابهامات میان ژل سیلیسی و دیگر فرآورده های ثانوی مانند کربنات کلسیم را، که گاهی از بتن تراوش می کند، رفع می نماید. ژل سیلیسی به طور معمول در تمام انواع بتن که با سنگدانه های سیلیسی ساخته شده اند، مشاهده می گردد، اما این ژل ها الزاماً مخرب نیستند و تنها زمانی می توانند باعث تخریب شوند که در معرض رطوبت، منبسط شوند. در هنگام استفاده از این روش به علت استفاده از محلول اورانیل استات و هم چنین نور ماوراء بنفش، رعایت مسائل ایمنی و پوشش کافی الزامی می باشد. این آزمایش روی سطحی از بتن که کاملاً تمیز، عاری از گرد و غبار و آثار کربنات می باشد، انجام می پذیرد. ابتدا پس از اینکه سطح بتن به وسیله آب مقطر شسته شد، سطح بتن به محلول اورنیل استات آغشته شده و پس از گذشت ۵ دقیقه دوباره با آب مقطر شسته می شود. محل های مورد نظر در یک مکان تاریک زیر نور ماوراء بنفش مشاهده می شوند. ژل قلیایی- سیلیسی به رنگ زرد مایل به سبز می درخشد [۷،۸،۹].

۵-۳- استاندارد ها و آزمایش های تکمیلی

۵-۳-۱- مقدمه

یکی از روش های استاندارد آزمایش های تکمیلی بررسی پدیده واکنش قلیایی– سنگدانه ای در بتن، استاندارد آمریکایی ASTM می باشد. این روش مبتنی بر سری آزمایش هایی بوده که به بررسی انواع مختلف سنگدانه های بتنی و تعیین میزان استعداد واکنش زایی آن ها می پردازد که در ادامه به تشریح این آزمایش ها پرداخته می شود.

۵-۳-۲- بررسی پتروگرافی سنگدانه های بتن به روش ASTM C295

بررسی پتروگرافی، اولین گام در جهت ارزیابی استعداد واکنش زایی یک نوع سنگدانه به حساب می آید. این بررسی، به منظور تعیین نوع یا انواع سنگ های تشکیل دهنده سنگدانه انجام می گیرد. اطلاعات حاصل از این آزمایش، برای قضاوت در تعیین

www.SID.ir

Archive of SID

نیاز به انجام آزمایش های تکمیلی و هم چنین برای تفسیر نتایج آزمایش ها لازم است. در بعضی موارد که اطلاعات قاطع و مستندی در خصوص قابلیت تخریبی نوع خاصی از سنگ ها یا کانی ها در دسترس باشد، شناسایی آن ها در سنگدانه های مورد نظر از طریق انجام آزمایش پتروگرافی می تواند سند و مدرک کافی برای مردود شناختن آن سنگدانه باشد. باید احتیاط لازم در هنگام انجام آزمایش پتروگرافی روی سنگ های آهکی سیلیس‌دار مبذول گردد. لازم به یادآوری است که حتی مقدار ٪۵ کوارتز ریزدانه در این سنگ های آهکی، که در میکروسکوپ پتروگرافی نیز قابل رویت نمی باشد، توانایی ایجاد انبساط مخرب در بتن را دارد. از آزمایش پتروگرافی می توان به منظور بررسی استعداد واکنش‌زایی سنگ های حاوی کوارتز از طریق تعیین وجود و میزان کوارتز میکروبلورین استفاده نمود. آزمایش پتروگرافی هم چنین روش مفیدی برای تعیین استعداد واکنش‌زایی قلیایی از نوع کربناتی در سنگ آهک های دولومیتی به حساب می آید [۱۰،۱۱].

۵-۳-۳- تعیین میزان واکنش زایی سنگدانه ها به روش ASTM C289

در این آزمایش، نمونه سنگدانه مورد نظر آسیاب شده و ۲۵ گرم از بخش بین ۱۵۰ تا ۳۰۰ میکرون آن، در یک ظرف حاوی ۲۵ سانتی‌متر مکعب سود یک نرمال قرار داده می شود. باید ظرف و نمونه مذکور را به مدت ۲۴ ساعت در اجاق با ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار داد. سپس مقدار سیلیس حل شده و مقدار کاهش در میزان قلیائیت تعیین می شود. نتایج به دست آمده، در یک نمودار، که نشان دهنده استعداد واکنش‌زایی قلیایی- سیلیسی سنگدانه است، ثبت می گردد. روش شیمیایی در سطح گسترده مورد استفاده قرار گرفته ولی در حال حاضر همبستگی بین میزان سیلیس حل شده به دست آمده از این آزمایش با تجارب اجرایی در پای کار یا با نتایج آزمایش تعیین انبساط منشورهای بتنی در بعضی موارد ضعیف است. در کار آسیاب کردن سنگدانه که برای تهیه نمونه آزمایشگاهی مورد نیاز می باشد، ممکن است بخش واکنش‌زای نمونه با عبور از الک از دست برود و نتایج گمراه کننده‌ای از این طریق حاصل شود. سنگدانه های با کیفیت مطلوب در این آزمایش، به دلیل اینکه سطح مخصوص زیادتری از آن ها در معرض فرآیند آسیاب کردن قرار می گیرد، ممکن است نتایج ضعیف و نامناسبی را ارائه دهد. مشکل دیگر، مداخله کربنات و سایر کانی ها در نتایج آزمایشی شیمیایی است. برای از میان بردن این مشکل، نوع اصلاح شده این آزمایش که مختص بررسی سنگدانه های آهکی می باشد، پیشنهاد شده است. به تازگی در برخی از نظریه های اصلاحی که برای این روش آزمایش بدست آمده است، ادعا شده که نزدیکی نتایج آزمایش ها با نتایج آزمایش های منشور بتنی بهبود یافته است. با این حال، هنوز بسیار زود است که در خصوص کارایی این آزمایش اصلاح شده اظهار نظر قطعی نمود [۱۲].

۵-۳-۴- بررسی واکنش‌زایی قلیایی سنگ های آهکی به روش ASTM C586 (استوانه سنگی)

مغزه هایی به قطر۹ و ارتفاع ۳۵ میلی متر (بسته به تجهیزات آزمایشگاهی متغیر و قابل قبول است) از یک نمونه، سنگ گرفته می شود. به منظور تسهیل قرائت های این آزمایش، با استفاده از ماشین تراش یا ساب، دو سر مغزه های مزبور به شکل مسطح یا مخروطی ماشین کاری می شود. استوانه ها در سود سوزآور یک درصد نرمال در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد قرار داده می شوند. اندازه گیری طول نمونه ها به صورت ادواری تا یک سال ادامه می یابد. انبساط بیش از حد نمونه ها، نمایانگر قابلیت واکنش‌زایی مخرب در بتن می باشد. این آزمایش فقط برای ارزیابی آسیب پذیری سنگ در برابر واکنش قلیایی- کربناتی مناسب است. مفید ترین موارد استفاده این آزمایش در شناسایی بسترها یا لایه های واکنش‌زای موجود در معادن سنگ می باشد. نمونه زیادی برای ارزیابی اصولی یک معدن سنگ مورد نیاز است (اخذ حداقل سه نمونه آزمایشی برای هر متر از سنگ موجود در یک معدن سنگ و یا استفاده از سنگ مادر درصورت استفاده از سنگدانه های خرد شده لازم می باشد). این آزمایش برای شناسایی سنگ هایی با استعداد واکنش‌زایی قلیایی- سیلیسی مناسب نیست. زمانی که از این آزمایش برای تعیین میزان استعداد واکنش‌زایی قلیایی- سیلیسی استفاده شود، هیچ گونه تضمینی وجود ندارد که آثار انبساط، از هم پاشیدگی و انقباض ظاهری یا ژل حاصل از واکنش در نمونه مورد نظر ظاهر گردد. سنگدانه های غیر واکنش‌زا نیز ممکن است به دلیل وجود رس متورم شونده در بعضی سنگ آهک ها، از خود انبساط نشان دهند. نتایج به دست آمده از این آزمایش، باید همیشه با نتایج آزمایش تعیین

www.SID.ir

Archive of SID

انبساط منشور بتنی به روش ASTM C1105 کنترل شود. چنانچه میانگین درصد تغییر طول نمونه های مورد آزمایش ۰/۰۱۵٪ در سه ماه یا ۰/۰۲۵٪ در ۶ ماه و یا ۰/۰۳۰٪ در یک سال باشد، می توان سنگدانه را فعال نامید. در واقع از سن سه ماهگی می توان درباره احتمال واکنش زایی سنگدانه در بتن اظهار نظر نمود. افزایش حجم بیش از ۰/۱۰٪ در این آزمایش نشان دهنده واکنش پذیری سنگدانه بوده و نیاز به آزمایش های تکمیلی سنگدانه و در واقع آزمایش ASTM C1105 خواهد بود. معمولا انبساط گسترده پس از ۲۸ روز با غوطه وری در محیط قلیایی قابل رویت است، هرچند در این باره باید به استثنائات نیز توجه داشت [۱۳،۱۴].

۵-۳-۵- بررسی واکنش‌زایی قلیایی - سیلیسی سنگدانه ها به روش ASTM C1260

با استفاده از این آزمایش می توان تقریباً تمامی گونه های سنگدانه های واکنش‌زای قلیایی- سیلیسی را شناسایی نمود. این آزمایش تسریع شده برای تأیید بسیاری از سنگدانه های مصرفی در بتن مناسب می باشد، ولی با استناد به نتایج این آزمایش نمی توان سنگدانه ها را مردود قلمداد نمود. قبل از این کار باید آزمایش تعیین قابلیت انبساط نمونه های منشوری بتنی به روش ASTM C1105نیز انجام شده و نتایج آن ملاک قبول یا رد سنگدانه های مصرفی در بتن قرار گیرد. این آزمایش برای ارزیابی میزان تأثیر استفاده از سیمان کم قلیا در جلوگیری یا کاهش میزان انبساط حاصل از واکنش قلیایی مناسب نمی باشد. در حال حاضر، این روش آزمایشگاهی به منظور ارزیابی کارایی پوزولان ها در جلوگیری یا کاهش میزان انبساط در اثر واکنش قلیایی- سیلیسی، در دست مطالعه است. این آزمایش برای ارزیابی قابلیت انبساط سنگدانه هایی که از خود واکنش قلیایی- کربناتی بروز می دهند، مناسب نیست. افزایش حجم بیشتر از ۰/۰۱٪ درسن ۱۶ روزه پس از جایگیری ملات، نشان دهنده رفتار بی ضرر سنگدانه ها در اکثر موارد می باشد. افزایش حجم بیشتر از ۰/۲۰٪ درسن ۱۶ روزه پس از جایگیری ملات، نشان دهنده رفتار بالقوه و مضر سنگدانه ها در این شرایط هستند. افزایش حجم بین ۰/۰۱٪ و ۰/۲۰٪ درسن ۱۶ روزه پس از جایگیری ملات، نشان دهنده دارا بودن شرایط خنثی یا فعال برای سنگدانه است که بسته به ادامه شرایط محیطی می تواند بروز کند. در این حالت بهتر است قرائت افزایش حجم را تا سن ۲۸ روزه ادامه داد تا مشخص گردد که به کدام حالت خواهد رسید [۱۵].

۵-۳-۶- بررسی واکنش‌زایی ملات ASTM C227

ابتدا نمونه ماسه مورد نیاز با استفاده از مصالح موجود، طبق دانه بندی خاص این آزمایش آماده می شود. مصالح درشت ابتدا باید خرد شود. سپس این ماسه به نسبت وزنی ۲/۲۵ به ۱ با سیمان مخلوط گردیده و برای دست یابی به روانی مورد نظر در این آزمایش، باید به آن آب اضافه کرد. ملات به دست آمده در قالب های منشوری ۲۸۵×۲۵×۲۵ میلی‌متر قالب‌گیری شده و به مدت ۲۴ ساعت عمل آوری می شوند. پس از خارج کردن منشورها از قالب ها، باید طول آن ها را اندازه گیری کرد. سپس منشورها در دمای ۳۷ درجه سانتی گراد و رطوبت ۱۰۰٪ و در مدت زمان قید شده در استاندارد در ظروف در بسته مخصوص نگهداری می شوند. اندازه گیری طول نمونه ها معمولا در فواصل زمانی معین تا مدت یک سال صورت می گیرد. انبساط بیش از حد، نمایانگر استعداد واکنش قلیایی مخرب در بتن است. روش ملات منشوری جزو اولین آزمایش هایی بود که برای ارزیابی میزان واکنش‌زایی سنگدانه ها ابداع شد. این آزمایش احتمالاً بیشترین و گسترده ترین مورد استفاده را در تعیین واکنش زایی سنگدانه ها به خود اختصاص می دهد. علی‌رغم اقبال گسترده به این روش آزمایش، مشخص شد که این آزمایش در بسیاری از موارد قابلیت واکنش زایی بعضی سنگدانه ها را کمتر از حد معمول برآورد می نماید. انبساط های کم به دست آمده از این آزمایش، می تواند در اثر کمبود قلیای کافی در سیمان و خارج شدن املاح قلیایی از ملات های منشوری نگهداری شده در ظروف مخصوص باشد. برداشتن فتیله ها از اطراف ظروف نگهداری نمونه های منشوری، باعث کاهش مقدار خروج قلیا از درون نمونه ها می شود. با این حال، قبل از اینکه عمل به عنوان یک روش آزمایشگاهی استاندارد به اجراء گذاشته شود، لازم است بررسی ها و تحقیقات بیشتری در خصوص این آزمایش اصلاح شده انجام شود. نتایج بررسی ها و تحقیقات اخیر نشان می دهد که وجود مقدار ۱/۲۵٪ قلیا بر حسب اکسید سدیم در سیمان (که از طریق افزودن هیدروکسید سدیم به صورت محلول به ملات حاصل می شود) و

www.SID.ir

Archive of SID

انجام آزمایش به مدت زمان حداقل یک سال برای شناسایی موفقیت آمیز اکثر سنگدانه ها با استعداد واکنش قلیایی- سیلیسی لازم است [۱۶].

۵-۳-۷- تعیین قابلیت انبساط سنگدانه ها به روش ASTM C1105

این آزمایش، روش توصیه شده و منتخب برای تعیین قابلیت انبساط (واکنش‌زایی قلیایی) انواع سنگدانه ها محسوب می شود. به منظور تسریع انبساط، نمونه های بتنی (با طرح اختلاط پیشنهادی و معمولا کارگاهی برای بتن معمولی) ساخته شده را در ۳۸ درجه سانتی گراد و ۱۰۰ درصد رطوبت نگهداری می نمایند. این آزمایش، برای ارزیابی کارایی پوزولان ها در جلوگیری یا کاهش انبساط بتن حاوی سنگدانه های واکنش‌زا نیز مورد استفاده قرار گرفته است. این آزمایش برای ریزدانه ها و درشت دانه ها می تواند استفاده شود. عموما به شش تا دوازده ماه وقت نیازدارد که البته نتایج آن از سن ۳ ماهگی نمونه ها پدیدار می شود و در مورد نتایج می توان تصمیم های لازم را اتخاذ کرد. اگر درصد افزایش طول نمونه ها به صورت ٪ ۰/۱۵ در سه ماه یا ٪ ۰/۲۵ در ۶ ماه و یا ٪ ۰/۳۰ در ۱۲ ماه باشد، می توان آن را واکنش پذیر نامید [۱۶،۱۷،۱۸].

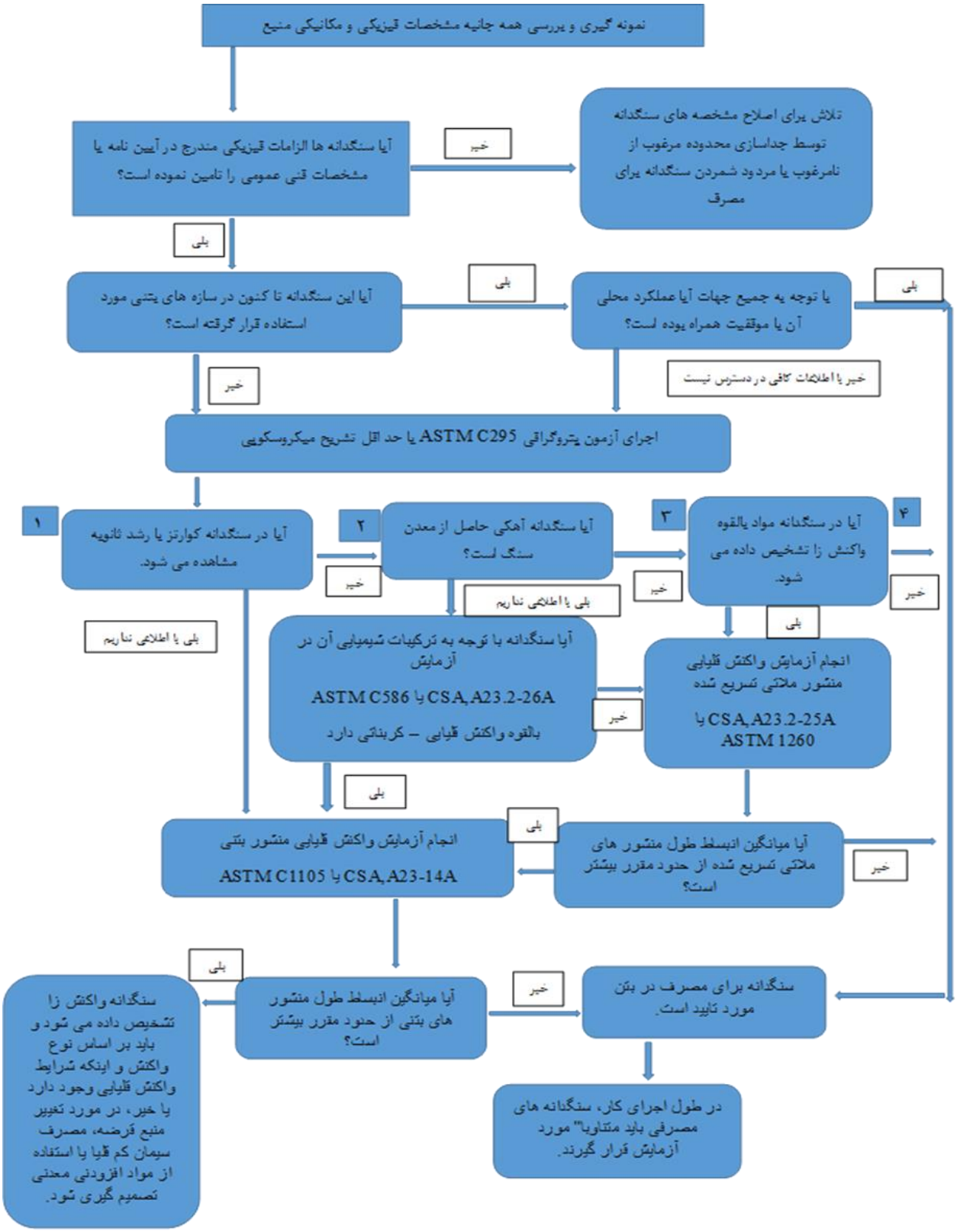
۵-۴- مقایسه نتایج آزمایش ها

با بررسی آزمایش های استاندارد و نیز توضیحات ارائه شده در این استاندارد ها می توان با مقایسه نتایج آزمایش ها، به شرح زیر بیان نمود:

- آزمایش پتروگرافی ASTM C295 اولین گام برای بررسی استعداد سنگدانه های مستعد می باشد. نتایج این آزمایش در صورت مستعد بودن مقدمه ای بر انجام آزمایش های تکمیلی و در صورت مردود بودن می تواند باعث تایید منبع قرضه مورد آزمایش باشد.
- آزمایش شیمیایی ASTM C289 نیز اولین آزمایش تکمیلی در این استاندارد می باشد که برای بررسی میزان سیلیس موجود در ساختار سنگ مورد استفاده قرار می گیرد. نتایج این آزمایش اگرچه به صورت گسترده مورد استفاده واقع می شود، اما به دلیل موارد دخیل و برخی خطاهای فنی توصیه نمی شود. نتایج آن همواره با آزمایش ASTM C1260 مقایسه و بررسی می گردد.
- نتایج آزمایش ASTM C586 یا آزمون استوانه سنگی که برای بررسی واکنش زایی سنگ های آهکی دولومیتی مورد استفاده قرار می گیرد، نیز از سن ۶ ماهگی می تواند ملاک عمل واقع شود، هرچند که نتایج این آزمایش بایستی با نتایج آزمون پتروگرافی و نیز آزمایش ASTM C1105 مقایسه گردد تا بتوان در مورد سنگدانه ها نظر قطعی داد.
- نتایج آزمایش تسریع شده ASTM C1260 برروی سنگدانه های سیلیسی که در آزمون پتروگرافی واکنش زا تشخیص داده شدند، نیز از سن ۱۶ روزه و با توجه به درصد های بحرانی مد نظر استاندارد، می تواند ملاک عمل باشد، اما برای تایید یا رد یک قرضه یا معدن سنگ نیز باید نتایج این آزمایش همواره با آزمایش ASTM C1105 مقایسه گردد.
- نتایج آزمایش ASTM C227 که بر روی ریز دانه ها (ماسه) صورت می پذیرد و از اولین آزمایش های مورد استفاده برای بررسی استعداد واکنش زایی هر دو گروه است، به دلیل دقیق نبودن نتایج آزمایش، باید حتما نتایج این آزمایش با نتایج دراز مدت آزمایش ASTM C1105 مقایسه گردد.
- آزمایش ASTM C1105 مهم ترین آزمایش از استاندارد آمریکایی می باشد. نتایج نهایی این آزمایش در کنار آزمایش های قبلی می تواند ملاک رد یا قبول یک معدن سنگدانه ای واقع شود. در واقع نتایج این آزمون بر سایر آزمون ها برتری داشته و ملاک تصمیم گیری است.

مطابق آنچه تاکنون بیان شد، می توان نمودار ۱ را به عنوان نقشه راهی برای بررسی پدیده واکنش قلیایی- سنگدانه ای معرفی نمود.

www.SID.ir



نمودار ۱- فرآیند بررسی واکنش قلیایی-سنگدانه ای در بتن [۱۹]

Archive of SID
www.SID.ir

Archive of SID

۵-۵- مقایسه نتایج عملکرد آزمایش ها در سنگدانه ها و مخلوط بتن

در بررسی روش های آزمایشگاهی مذکور، یکی دیگر از نکات مهم بررسی عملکرد این آزمایش ها بر روی سنگدانه ها و در مخلوط بتنی است که مطابق جدول ۱ می توان آن را دسته بندی نمود. در بررسی موارد ذکر شده در جدول ۱ می توان به مقایسه ای از عملکرد نتایج آزمایش ها بر روی سنگدانه ها و در مخلوط بتنی دست یافت.

جدول ۱- مقایسه آزمایش های استاندارد و نتایج آن ها در سنگدانه ها و مخلوط بتنی

نوع آزمایش	مورد استفاده	نتایج احتمالی	میزان اعتماد	توضیحات
ASTM C295	آزمایش بر روی سنگدانه ها	کانی شناسی و تعیین میزان واکنش زایی سنگدانه ها	نتایج این آزمایش بسیار معتبر و قابل استناد است	این آزمایش اولین گام در تشخیص میزان استعداد واکنش زایی سنگدانه هاست
ASTM C298	آزمایش شیمیایی بر روی سنگدانه های با پایه سیلیسی	تعیین میزان سیلیس واکنش پذیر موجود در سنگدانه ها	نتایج این آزمایش به تنهایی قابل اطمینان نیست و باید با سایر آزمایش ها مقایسه گردد	این آزمایش خطا های فراوانی در دسترسی به نتایج دارد
ASTM C586	بر روی سنگدانه ها با پایه آهکی	تعیین میزان واکنش پذیری سنگ های آهکی	نتایج این آزمایش در صورت رعایت نکات فنی بسیار قابل اطمینان است	نتایج این آزمایش همواره باید با نتایج آزمایش ASTM C1105 مقایسه گردد
ASTM C1260	بر روی سنگدانه ها با پایه سیلیسی	تعیین میزان واکنش زایی سنگ های با پایه سیلیسی	نتایج این آزمایش کوتاه مدت در صورت رعایت موارد فنی بسیار قابل اطمینان است	نتایج این آزمایش باید همواره با نتایج آزمایش ASTM C1105 مقایسه گردد
ASTM C227	بر روی هر دو نوع سنگدانه درون نمونه ملاتی	تعیین میزان واکنش زایی ملات برای انواع سنگدانه ها	نتایج این آزمایش به تنهایی قابل استناد نبوده و باید با آزمایش های ASTM C295 , ASTM C1105 مقایسه گردد	این آزمایش بیشتر برای بررسی نمونه های ماسه مورد استفاده قرار می-گیرد
ASTM C1105	آزمایش بر روی انواع سنگدانه ها و سیمان در مخلوط بتنی	تعیین میزان واکنش زایی مخلوط بتنی	نتایج این آزمایش در صورت رعایت موارد فنی مد نظر استاندارد ملاک رد یا تایید یک منبع قرضه می باشد.	این آزمایش، تکمیل کننده تمامی آزمایش های پیشین بوده و نتایج آن ملاک تصمیم گیری خواهد بود

در بررسی و مقایسه عملکرد نتایج آزمایش های مذکور بر روی سنگدانه ها و بتن می توان به موارد زیر اشاره نمود:

* در صورت تعیین واکنش پذیری یک نمونه سنگدانه در آزمون پتروگرافی باید با توجه به پایه سنگدانه، آزمایش های تکمیلی را ادامه داد.

www.SID.ir

Archive of SID

* نتایج آزمایش های ASTM C289,C586,C1260,C227 بر روی سنگدانه ها می تواند نشان دهنده واکنش پذیری یا عدم واکنش پذیری یک سنگدانه باشد که این امر با توجه به نتایج به دست آمده در آزمایش پتروگرافی، طبیعی خواهد بود.

* بررسی نتایج آزمایش های ذکر شده در بند قبل درون مخلوط بتنی با استفاده از آزمایش ASTM C1105 که با استفاده از طرح اختلاط کارگاهی و آب و سیمان مشخص صورت می پذیرد، هم می تواند واکنش پذیر باشد و هم می تواند واکنش ناپذیر باشد. واکنش پذیری در این آزمایش در صورت واکنش پذیری آزمایش های قبلی هم می تواند ناشی از ساختار بسیار واکنش پذیر سنگدانه باشد و هم می تواند در اثر استفاده از سیمان با قلیایی بالا باشد که در صورت استفاده از سیمان با قلیائیت معادل کمتر از ۲ درصد، واکنش پذیری در این آزمایش را می توان در اثر ساختار بسیار واکنش پذیر سنگدانه دانست، اما عدم واکنش پذیری در این آزمایش علی رغم واکنش پذیری در سایر آزمایش ها بیان کننده این موضوع است که اگرچه سنگدانه واکنش پذیر است، اما به دلیل استفاده از سیمان با قلیائیت کم واکنش شیمیایی میان قلیای سیمان و ساختار واکنش پذیر سنگدانه رخ نداده است و می توان به ترکیب استفاده شده به عنوان یک ملاک نگاه نمود.

* به صورت کلی می توان گفت نتایج بدست آمده در این آزمایش ها در نهایت برای تایید یا رد واکنش پذیری یک نمونه نیازمند جایگزینی در مخلوط بتنی بوده و با استناد به نتایج آزمایش های کوتاه مدت اولیه، به هیچ عنوان نمی توان یک معدن را رد یا تایید نمود.

۷-نتایج

بررسی ها در این تحقیق بر روی فرآیند واکنش قلیایی- سنگدانه ای در بتن نتایج زیر را به دست داده است:

- بررسی های صحرایی می تواند اولین گام در مشخص نمودن ادامه مسیر برای مطالعات آزمایشگاهی باشد.
- اولین گام در بررسی های آزمایشگاهی مشخص نمودن ساختار کانی شناسی و تشکیل دهنده سنگدانه های مورد آزمایش است
- استاندارد ASTM یکی از روش های نوین بررسی پدیده واکنش قلیایی- سنگدانه ای بر مبنای روش گام به گام تا بررسی نتایج در مخلوط بتنی است.
- اولین گام در روش استاندارد ASTM بررسی پتروگرافی سنگدانه ها است.
- نتایج آزمون پتروگرافی برای ادامه مسیر بسیار مهم و ضروری است.
- بررسی بر روی سنگدانه های با پایه آهکی یا سیلیسی با توجه به نتایج بدست آمده از پتروگرافی مشخص خواهد شد.
- نتایج آزمایش ASTM C289 به تنهایی غیر قابل اطمینان است و نتایج آن در کنار آزمون پتروگرافی و آزمایش ASTM C1260 قابل استناد است.
- نتایج آزمون های ASTM C586, ASTM C1260, ASTM C227 همواره در کنار نتایج آزمون پتروگرافی و آزمایش ASTM C1105 قابل استناد برای رد یا تایید یک معدن خواهد بود.
- نتایج آزمایش ASTM C1105 تکمیل کننده نتایج سایر آزمایش ها خواهد بود، در واقع رد یا تایید یک معدن سنگدانه ای با توجه به نتایج بدست آمده از جایگیری سنگدانه های آن معدن در این آزمون صورت خواهد پذیرفت.
- برای رسیدن به یک جواب منطقی در صورت عدم واکنش پذیری نمونه های سنگ در آزمایش های کوتاه مدت، بهتر است آن نمونه با چند سیمان مختلف و طرح اختلاط متفاوت در آزمایش ASTM C1105 مورد ارزیابی قرار گیرد.

مراجع

[۱] پارسا، س، " تجزیه و تحلیل اثرات واکنش قلیایی- سنگدانه ای بر سد های بتنی ایران "، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، ۱۳۸۹.

[2] Kawamura M., Iwahori K., "ASR gel composition and expansive pressure in mortars under restraint", Cement & Concrete Composites 26: pp. 47-56, 2004.

www.SID.ir

Archive of SID

[۳] ارجمند، م، رمضانیانپور، ع، " ارزیابی سنگدانه های مستعد واکنش قلیایی در چند منطقه کشور" ، نشریه فنی و مهندسی مدرس، شماره ۲۱، صص ۳ و ۴، پاییز ۱۳۸۴.

[۴] بلوردی، آ، حاجی آقابابایی، م، " بررسی تاثیر میکروسیلیس بر کاهش واکنش زایی قلیایی- سیلیسی سنگدانه های بتن سدهای شمیل و نیان" ، نخستین کنفرانس بین المللی تکنولوژی بتن، ۱۳۸۸.

[۵] آلیانی، ف، زمانی، ح، محجوب، م، " بررسی اثرات مخرب واکنش قلیایی- سنگدانه های بتن در پروژه سد گتوند علیا "، اولین کنفرانس بین المللی بتن های ناتراوای مخازن ذخیره آب شرب، گیلان، خرداد ۱۳۹۰.

[6] Jonathan, S., "An analysis of the design and assembly of the AAR tri-axial machine", Enginyeria de Camins, Canals i Ports, Junio 2011.

[7] Hollis, N., Walker, H.N., "petrographic Methods of Examining Hardent concrete", A petrographic Manual", U.S. Dept. of Transportations Federal Highway Administraction research, Development and Technology, Virginia SP&R report, 1991.

[8] Grattan, B.P.E., "Laboratory Evaluation of Alkali-Silica Reaction in Concrete from Standers Generating Station", ACI Materials Journal, Vol. 92, No. 2, March-April 1995.

[9] Strategic Highway Research program (SHRP)," Handbook for the Identification of Alkali-Silica Reactivity in Highway structures", SHRP-C/FR-91-101, National Research Council, 1994.

[۱۰] زمانی، ح، " معرفی استاندارد ارزیابی پتروگرافی سنگدانه‌های بتن ASTM C295، شانزدهمین همایش علمی داخلی، شرکت مادر تخصصی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه و ترابری، تهران، ۱۳۸۶.

[11] ASTM C 295. "Standard Guid for Petrogeraphic Examination of Aggregate for Concrete", Annual book of ASTM Standard, Philadelphia, Vol 04.02, concrete and Aggregate, 1990.

[12] ASTM C289-94., "Standard Test Method for Potential Alkali-Carbonate Reactivity of Rocks ASTM C586, ASTM C1293, ASTM C1260.

[13] Sherwood, C.W., Newlon H.H., "Statewide survey for reactive carbonate aggregates" Potentially reactive carbonate rock, progress Report, Jr. Virginia Council of Highway Investigation and Research, 1964.

[14] ASTM C586, "standard practice for petrographic Examiniation of Hardened concrete ", Annual book of ASTM standard, Philadelphia, Vol. 04.02, Concrete and Aggregates, 1995.

[15] American Society for Testing of Materials (ASTM C1260), "Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates", *(Mortar – Bar Method)*, Vol. 04.02, 2001.

[16] Canadian Standards Association (CSA), "Determination of potential expensively of aggregates", procedure for length change due to Alkali- Aggregate CSA, "CSA A23.2-14A Canadian Standards Association, Mississauga, Ontario, Canada, 2000.

[۱۷] رمضانیانپور، ع، کلوشانی، ح ،" بررسی پدیده واکنش قلیایی- سنگدانه ها در بتن سه سدکشور" ،هفتمین کنگره بین المللی مهندسی ایران، ۱۳۸۵ .

[18] Mielenz. R.C., Witte, L.P., "Tests used by bureau of reclamation for identifying reactive concrete aggregates", Proc. ASTM, 48, pp. 1071-1103, 1948.

[۱۹] جبروتی، م ، " بررسی پدیده واکنش قلیایی- سنگدانه های بتن در مراحل مختلف مطالعات سد سازی با عنایت ویژه به روش ها ی تسریع شده "، چهارمین کنفرانس سد سازی ایران، ۱۳۷۹.

www.SID.ir