مطالعه واکنش‌زایی قلیایی سیلیسی سنگدانه‌ها در روسازی‌های بتنی با رویکرد کاهش ریسک خرابی در بتن

علمی - پژوهشی

علی دوستی*، استادیار، مرکز تحقیقات راه مسکن و شهرسازی، تهران، ایران
سهراب ویسه، استادیار، مرکز تحقیقات راه مسکن و شهرسازی، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: a.dousti@bhrc.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۷- پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۵
صفحه ۱۹۶-۱۷۷

چکیده

سنگدانه‌ها به عنوان یکی از اجزاء اصلی بتن، تاثیر بسزایی بر مقاومت و دوام روسازی‌های بتنی خواهند داشت. یکی از مشکلات مهم سنگدانه‌های برخی نقاط کشور، احتمال واکنش‌زایی قلیایی سیلیسی بین سیلیس سنگدانه‌ها و قلیایی‌های موجود سیمان در آب حفره‌ای بتن در طول زمان است. به دلیل استفاده این سنگدانه‌ها در ساخت و سازهای مختلف به ویژه روسازی‌های بتنی، ارزیابی دقیق این مصالح از نظر واکنش‌زایی با قلیایی‌های سیمان بعلاوه ارایه راهکارهایی در جهت کاهش ریسک انبساط ناشی از رخداد واکنش قلیایی سیلیسی از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. پژوهش حاضر به مطالعه و ارزیابی پتانسیل واکنش زایی سنگدانه‌های تعدادی از معادن استان مازندران و گیلان بر پایه آزمون‌های پتروگرافی بر روی سنگدانه مطابق استاندارد ASTM C295، آزمون تسریع شده منشور ملات طبق استاندارد ASTM C1260 و آزمون تعیین تغییر طول منشور بتنی طبق استاندارد ASTM C1293، پرداخته و در ادامه به نحوه انتخاب اقدامات پیشگیرانه در جهت کاهش ریسک انبساط ناشی از سنگدانه‌های واکنش زای مورد استفاده در روسازی‌های بتنی می‌پردازد. بر اساس نتایج به دست آمده در این مطالعه، مشاهده گردید که به ترتیب حدود ۳۰ و ۵۰ درصد از نمونه‌های شن و ماسه مورد آزمون در دو استان مازندران و گیلان واکنش‌زا گزارش شده است. به همین منظور اقدامات پیشگیرانه همچون محدود نمودن قلیایی بتن به میزان حداکثر ۱/۸ کیلوگرم بر متر مکعب، استفاده از مواد سیمانی همچون دوده سیلیس به میزان حداکثر ۷٪ یا ترکیبی از این دو برای استفاده از این مصالح (با واکنش زایی زیاد) در روسازی‌های بتنی پیشنهاد شده است.

واژه‌های کلیدی: اقدامات پیشگیرانه، دوام بتن، روسازی‌های بتنی، واکنش قلیایی سیلیسی

۱- مقدمه

یکی از مباحث مهم و اساسی در بسیاری از کشورها ارزیابی اثرات خرابی ناشی از وقوع واکنش‌های قلیایی سیلیسی و انبساط ناشی از آن در سازه‌های بتنی است. امروزه با توجه به رشد، آگاهی و پیشرفت دانش بشری در همه زمینه‌ها این انتظار وجود دارد تا دست اندرکاران صنعت ساخت اقدام به شناسایی عوامل ایجاد کننده واکنش‌های قلیایی سیلیسی نمایند، فعالیت سنگدانه‌ها را قبل از استفاده در سازه‌ها تعیین کنند و مانع از خطر بروز واکنش‌زایی و انبساط و ترک در بتن شوند. از طرفی دوام بتن می‌تواند تحت تأثیر سنگدانه‌هایی قرار گیرد که در ترکیب آن استفاده می‌شوند. سنگدانه برای مصرف در بتنی که در معرض رطوبت، سیکل‌های متداوم‌تر و خشک شدن یا در تماس با رطوبت قرار خواهد گرفت، نباید حاوی موادی باشد که با قلیایی‌های سیمان، واکنش زیان‌آور ایجاد نماید و نهایتاً باعث انبساط شدید بتن گردد. اگر چنین

موادی در مقادیر زیان‌آور وجود داشته باشند، مصرف سنگدانه تنها به شرطی مجاز است که نشان داده شود با استفاده از سیمان حاوی قلیایی‌های کم یا با افزودن یک افزودنی خاص، از انبساط مضر حاصل از واکنش قلیایی سنگدانه جلوگیری می‌شود. اصولاً برای سنگدانه‌های فعال، واکنش‌زایی و انبساط حاصل از آن، به عوامل مختلفی همچون یون‌های موجود در آب حفره‌ای بتن، نوع سیمان و پوزولان مصرفی، شرایط محیطی ساخت، منابع و محل تجمع یون‌ها به همراه رطوبت و دمای محیط وابسته است (Diamond. 1981; Buck. Pepper. 1951; Ramlochana. Houston and Thomasa and Gruberb. 2000; Fanijo. Kolawole and Almakrab. 2021). واکنش قلیایی سیلیسی بین سیلیس بی‌شکل فعال (آمورف) در سنگدانه‌ها و قلیایی‌های سیمان که به صورت محلول در آب حفره‌ای خمیر سیمان وجود دارد، رخ می‌دهد. در اثر این واکنش، یک نوع ژل سیلیسی تشکیل و با جذب رطوبت در طول زمان، منبسط می‌شود و نهایتاً منجر به ترک‌خوردگی در بتن می‌شود. ترک‌هایی که بواسطه این واکنش تشکیل می‌گردند در سطوح وسیع اغلب بصورات موزاییکی نمایان می‌شوند و در برخی موارد زمانیکه رطوبت هوا بالا باشد یا سازه بتنی در معرض سیکل تر و خشک باشد ژل سفیدرنگی یا بعضاً بی رنگ از ریزترک‌ها خارج و بر روی سطح بتن نمایان می‌گردد (Fanijo. Kolawole and Almakrab. 2021). روسازی‌های بتنی به عنوان یکی از سازه‌های بتنی که در سطوح وسیع اجرا می‌شوند به شدت تحت تاثیر این واکنش قرار دارند بطوریکه پس از رخداد واکنش بواسطه استفاده از سنگدانه‌های واکنش‌زا، در طول زمان رطوبت کافی از طریق جذب موئینه از زمین و یا بارش باران و یا رطوبت محیط به روسازی بتنی انتقال یافته و نهایتاً منجر به ایجاد ترک و تخریب روسازی می‌گردد (شکل ۱). همچنین، مطالعات مختلف حاکی از شدت واکنش به دلیل استفاده از مواد یخ‌زدا در فصول سرد از سال بر روی این روسازی‌های بتنی می‌باشد (Thomas et al, 2011). متاسفانه واکنش قلیایی سیلیسی از آن دسته حملات در بتن است که مادامیکه بتن ترک نخورد متوجه رخداد آن نخواهیم شد و زمانیکه بتن ترک بخورد جهت اصلاح و متوقف نمودن آن بسیار دیر است به همین دلیل است که در بسیاری از مجامع علمی از این واکنش به سرطان بتن یاد می‌شود.

شکل ۱. رخداد ترک‌های موزاییکی در روسازی بتنی
(Alkali –silica reactivity field identification handbook)

پارامترهایی که باعث بروز واکنش قلیایی سیلیسی می‌شوند عبارتند از: ۱) سیلیس فعال در سنگدانه (شامل اپال، کالسدونی، تریدیمیت و کریستوبالیت و نهایتاً آلومینوسیلیکات‌های شیشه‌ای)، ۲) قلیایی به میزان کافی در آب حفره‌ای (که از سیمان تغذیه می‌شود) و ۳) رطوبت. بنابراین چنانچه از سنگدانه‌های واکنش‌زا به هردلیلی در ساخت بتن استفاده گردد می‌بایست وارد مرحله اقدامات پیشگیرانه همچون استفاده از سیمان کم‌قلیا، مواد افزودنی سیمانی همچون پوزولان‌ها، استفاده از مواد شیمیایی (معمولاً پایه لیتیومی) و یا نهایتاً جلوگیری از قرارگیری سازه بتنی در برابر رطوبت شد. این درحالیست که برای سنگدانه‌های آهکی خصوصاً سنگدانه‌های از نوع دولومیتی که منجر به واکنش مخرب قلیایی کربناتی می‌گردند هیچ اقدام پیشگیرانه به جز عدم استفاده از مصالح واکنش‌زا وجود ندارد. میزان قلیایی سیمان به عنوان یکی از عوامل موثر، با قلیایی معادل (Na_2O_{eq}) بیان می‌گردد. قلیایی معادل در سیمان‌های مختلف مقدار متفاوت دارد و بعضاً از ۰/۲ تا ۱/۲ درصد متغیر می‌باشد. برخلاف مقدار قلیایی موجود در سیمان عوامل دیگری موجب افزایش قلیایی کل در بتن خواهند شد. یون سولفات (SO_4^{-2}) و هیدروکسید(OH^-) جهت تعادل یون‌های (Na^+) و (K^+) نقش مهمی در واکنش قلیایی سیلیسی دارند (Thomas et al, 2011). منابع بیرونی همچون آب دریا، نمک‌های یخ‌زدا، آب استخراج شده از صنایع مختلف که بعضاً حاوی محلول سدیم و پتاسیم می‌باشد، آبهای زیرزمینی آغشته به املاح مختلف و در نهایت قلیایی حاصل از افزودنی‌های شیمیایی که ممکن است حاوی یون‌های (Na^+) و (K^+) باشند، موجب افزایش قلیایی در بتن می‌شوند

(Kazmi et al, 2017). براساس مطالعاتی که اخیراً انجام شده، گزارش شده است که $Ca(OH)_2$ به عنوان منبع (Ca^{+2}) نیز می‌تواند نقش مهمی در تشکیل ژل کلسیم آلکالی سیلیکات و نهایتاً رخداد ASR داشته باشد (Figueira, 2019). رطوبت به عنوان عامل موثر دیگر در واکنش قلیایی سیلیسی، نقش مهمی در تسریع واکنش دارد، اگرچه در برخی مطالعات موجود واکنش قلیایی سیلیسی در رطوبت‌های کم نیز اتفاق افتاده است اما رطوبت ۸۰ درصد به عنوان رطوبت بهینه برای این واکنش گزارش شده است (Lu et al, 2006).

با توجه به توضیحات ارایه شده به جهت شناسایی این نوع واکنش در سنگدانه‌ها، به طور کلی آزمایش‌های ارزیابی واکنش قلیایی–سیلیسی در سنگدانه‌ها به دو دسته روش‌های مستقیم ارزیابی سنگدانه و روش‌های غیرمستقیم تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های مستقیم ارزیابی عبارتند از:

- آزمایش سنگ‌شناسی(ASTM C295)؛

و آزمایش‌های غیرمستقیم عبارتند از:

- پتروگرافی بتن مطابق استاندارد ASTM C856
- واکنش‌زایی قلیایی بالقوه ترکیب‌های سیمان – سنگدانه (روش منشور ملات– ASTM C227)؛
- آزمایش کوتاه‌مدت روی منشور ملات در سود ۱ نرمال (ASTM C1260) ؛
- آزمایش درازمدت بتن ساخته شده از سنگدانه‌های مورد نظر در بخار آب و سود ۱ نرمال(ASTM C1293) .

باید خاطر نشان کرد که استاندارد ASTM C227 تقریباً به دلیل ضعف آن در پوشش نقش سنگدانه‌هایی که واکنش‌زایی کندی دارند قابل استفاده نیست. زیرا اندازه کوچک نمونه و شرایط آزمایش به گونه‌ای است که موجب افزایش استخراج قلیایی‌ها از منشور ملات خواهد شد (Thomas et al, 2006). بر اساس مطالعات مختلف انجام شده در مورد روش‌های مختلف اندازه‌گیری پتانسیل واکنش قلیایی سیلیسی (M.D.A. Thomas, 2011) آزمایشی که امروزه بیشتر برای ارزیابی تاثیر مواد سیمانی بر کنترل واکنش‌های قلیایی سیلیسی توصیه و استفاده می‌شود نمونه‌های منشور بتنی طبق استاندارد ASTM C1293 و یا آزمایش تسریع شده ملات طبق ASTM C1260 است. در کشور ما با توجه به اینکه در سالیان اخیر استفاده از روسازی‌های بتنی مطرح و در حال گسترش می‌باشد، اهمیت توجه و پرداختن به پتانسیل واکنش‌های قلیایی سیلیسی و مهمتر از آن راهکارهای عملیاتی در پیشگیری و کنترل آن به لحاظ امکان رخداد بالای آن در روسازی‌های بتنی دوچندان می‌باشد. همانطور که پیش تر بیان گردید روسازی‌های بتنی به دلیل برخورداری از سطح وسیع و در معرض رطوبت محیطی از پتانسیل بالایی در جهت گسترش واکنش‌های احتمالی قلیایی سیلیسی برخوردار هستند. همانطور که در بخش دوم از این پژوهش بیان خواهد شد روسازی‌های بتنی به لحاظ اینکه رخداد ASR در آنها می تواند پیامدهای ایمنی، اقتصادی و زیست محیطی جبران ناپذیری همراه خود داشته باشد، بنابراین، همواره در طراحی آنها احتمال رخداد ASR با پذیرش ریسک کم لحاظ می‌گردد. در کشور ما بر اساس مطالعات انجام شده نشان داده شده است که سنگدانه‌های موجود در کشور دارای پتانسیل واکنش‌زایی می‌باشند (A. Dousti, S. Veyse, 2021). بنابراین، در مطالعه حاضر در گام نخست پتانسیل واکنش‌زایی جمعاً ۱۲ معدن شامل ٦ معدن شن و ماسه در استان مازندران و ٦ معدن دیگر در استان گیلان با استفاده از آزمون‌های کوتاه مدت (شامل آزمون پتروگرافی سنگدانه طبق استاندارد ASTM C295 و منشور تسریع شده ملات طبق ASTM C1260) به همراه آزمون درازمدت (شامل منشور دراز مدت بتنی طبق استاندارد ASTM C1293) مورد ارزیابی و بحث و بررسی قرار گرفته است. با توجه به مطالعات بسیار اندک موجود در این زمینه بخصوص ارزیابی واکنش‌زایی حاصل از آزمون‌های دراز مدت (به دلیل زمان بر بودن آن)، اطلاعات و نتایج موجود در این پژوهش می‌تواند بسیار با اهمیت باشد. از طرف دیگر سعی شده است تا نحوه برخورد و تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از سه آزمون مذکور تبیین گردد.

در گام دوم پس از تعیین واکنش‌زایی تمامی معادن، با فرض استفاده از سنگدانه‌های ریز و درشت آن‌ها در ساخت روسازی‌های بتنی، راهکارهای احتمالی در جهت استفاده از مصالح واکنش‌زا یا مشکوک به واکنش‌زایی بررسی و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. با توجه به ضعف موجود در میان مهندسین و دست اندرکاران حوزه ساخت درخصوص نحوه برخورد با مصالح واکنش‌زا، به جای جایگزینی آن‌ها و تحمیل هزینه‌های گزاف به پروژه‌ها، در این مطالعه راهکارهای ارزشمندی ارایه و ارزیابی شده است.

۲- اقدامات پیشگیرانه مناسب به منظور استفاده از مصالح سنگی واکنش‌زا

در آژانس ایالتی بزرگراه‌های ایالات متحده، بطور کلی استراتژی‌ها در جهت کاهش اثرات مخرب واکنش قلیایی سیلیسی در سازه‌های بتنی بخصوص در روسازی‌های بتنی در درجه اول محدود نمودن قلیایی معادل سیمان در کارخانجات سیمان (قلیایی معادل محدود به کمتر از ۰/٦ درصد) جهت استفاده در روسازی‌های بتنی می‌باشد. اما این محدودیت می‌تواند از ایالتی به ایالت دیگر دستخوش تغییرات قرار گیرد و شاید این خیلی برای دست اندرکاران ساخت و پیمانکاران خوشایند نباشد.

لذا، در سال ۲۰۱۷ اداره فدرال بزرگراه‌های ایالت متحده بهترین راهکار را در ارائه و انتشار یک برنامه و سلسله مراتب مستند و هماهنگ جهت اقدامات پیشگیرانه برای این نوع از واکنش در روسازی‌های بتنی در سرتاسر ایالت متحده دید. لذا، این برنامه نهایتاً منجر به ارایه یک استاندارد با شماره AASHTO R 80-17 در سال ۲۰۱۷ و به موازات آن استاندارد ASTM C1778-20 در سال ۲۰۲۰ گردید. بر اساس این دو استاندارد بطور کلی میزان ریسک استفاده از مصالح واکنش‌زا یا مشکوک به واکنش‌زایی مورد بررسی و در مقابل اقدامات پیشگیرانه و تجویزی لازم برای کاهش این مقدار ریسک مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در پژوهش حاضر ضمن مرور خلاصه مراحل گام به گام این اقدام پیشگیرانه، پس از تعیین میزان واکنش‌زایی مصالح نمونه برداری شده، از این اقدام در پیشبرد هدف کاهش ریسک واکنش‌زایی و ایجاد ترک در روسازی‌های بتنی استفاده خواهیم کرد.

۲-۱- روش تجویزی برای انتخاب اقدامات پیشگیرانه مناسب

این روش همانطور که پیشتر ذکر گردید زمانی مورد استفاده قرار می گیرد که یا اطلاعات دقیقی از وضعیت واکنش‌زایی مصالح طبق آزمون دراز مدت در دسترس نمی‌باشد و یا اینکه شرایط واکنش‌زایی مصالح مشخص است اما به ناچار باید از مصالح مشکوک به واکنش‌زایی یا واکنش‌زا استفاده نماییم. لذا طبق این روش و با طی مراحلی بصورت گام به گام در نهایت ملزم به رعایت اقدامات پیشگیرانه (بطور مثال کاهش قلیائیت بتن و یا استفاده از پوزولان‌ها) خواهیم شد و با پذیرفتن درصدی ریسک طرح مخلوط بتن عملیاتی خواهد شد. در این مرحله می‌بایست اثربخشی اقدامات پیشگیرانه بدست آماده برای مصالح واکنش‌زای مورد استفاده با استفاده از آزمون‌های ASTM C1293 یا ASTM C1567 راستی‌آزمایی گردد. در این روش سطح پیشگیری با درنظر گرفتن رده سازه به لحاظ اهمیت آن، اندازه و وسعت سازه بتنی و شرایط رویارویی آن، میزان واکنش‌زایی مصالح مورد استفاده و همچنین مقدار قلیائیت سیمان مورد استفاده تعریف می‌شود.

۲-۱-۱- تعیین درجه واکنش‌زایی قلیایی سیلیسی

در گام اول رده واکنش‌زایی مصالح مطابق جدول ۱ تعریف می‌شود. درجه واکنش‌زایی قلیایی سیلیسی یک سنگدانه مطابق با آزمون ASTM C1293 برای مدت یکسال بدست می‌آید. چنانچه نتایج آزمون دراز مدت در دسترس نباشد از آزمون تسریع شده مطابق ASTM C1260 می‌توان استفاده کرد. چنانچه میزان واکنش پذیری شن و ماسه با هم متفاوت باشند سطح اقدام پیشگیرانه باید بر اساس سنگدانه با واکنش‌زایی بیشتر انتخاب گردد.

۲-۱-۲- تعیین میزان ریسک رخداد واکنش قلیایی سیلیسی

احتمال رخداد واکنش قلیایی سیلیسی در یک سازه با درنظرگرفتن واکنش‌پذیری سنگدانه و شرایط رویارویی آن در محیط مطابق جدول ۲ تعیین می‌گردد.

۲-۱-۳- تعیین سطح اقدام پیشگیرانه

با درنظرگرفتن ریسک رخداد واکنش قلیایی سیلیسی از جدول ۲ و ترکیب آن با رده سازه بتنی از جدول ۳، رده اقدام پیشگیرانه مطابق جدول ۳ تعیین خواهد شد. منتها قبل از آن می‌بایست رده سازه بتنی به لحاظ اهمیت سازه مشخص گردد.

جدول ۱. رده بندی واکنش زایی مصالح سنگی بر اساس ASTM C1778

رده واکنش زایی مصالح	توصیف واکنش زایی مصالح	مقدار انبساط یک ساله منشور بتنی مطابق ASTM C1293 (٪)	مقدار انبساط ۱٤ روزه منشور ملات مطابق ASTM C1260 (٪)
R0	غیر واکنش زا	انبساط < ۰/۰٤	انبساط < ۰/۱
R1	واکنش زایی معمولی	۰/۰٤ ≥ انبساط > ۰/۱۲	۰/۱ ≥ انبساط > ۰/۳۰
R2	واکنش زایی زیاد	۰/۱۲ ≥ انبساط > ۰/۲٤	۰/۳۰ ≥ انبساط > ۰/٤٥
R3	واکنش زایی خیلی زیاد	انبساط ≥ ۰/۲٤	انبساط ≥ ۰/٤٥

جدول ۲. تعیین سطح ریسک جهت رخداد واکنش ASR براساس ASTM C1778

اندازه و شرایط رویارویی	رده واکنش زایی مصالح سنگی			
	R0	R1	R2	R3
بتن غیر حجیم* در شرایط رویارویی خشک**	سطح ۱	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۲
اعضای بتنی حجیم* در شرایط رویارویی خشک**	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ٤
بتن در تماس با هوای مرطوب، مدفون و مغروق	سطح ۱	سطح ۳	سطح ٤	سطح ٥
بتن در تماس با قلیایی ها در حالت بهره برداری***	سطح ۱	سطح ٤	سطح ٥	سطح ٦

* یک عضو حجیم عضوی است که دارای حداقل بعدی به مقدار ۰/۹ متر باشد.

** شرایط رویارویی خشک برای میانگین رطوبت نسبی محیطی کمتر از ٦۰ درصد که بطور معمول در داخل ساختمان‌ها اتفاق می‌افتد تعریف می‌گردد.

*** نمونه‌ای از این نوع سازه‌ها در تماس با قلیایی‌ها در زمان بهره برداری عبارتست از سازه‌های دریایی در تماس با آب دریا، سازه های حمل و نقلی و جاده ها در تماس با نمک‌های یخ زدا و نمک‌های ضد یخ

رده SC1: شامل سازه‌هایی است که بواسطه رخداد ASR پیامدهای ایمنی، اقتصادی و زیست محیطی آن کم یا قابل صرف نظر خواهد بود. در این حالت مقدار تخریب ناشی از ASR ممکن است قابل تحمل باشد. اعضای غیربارب در داخل ساختمان‌ها، اعضای بتنی که در تماس با رطوبت نیستند، سازه‌های موقت با عمر کمتر از ۵ سال نمونه‌هایی از سازه‌های این رده محسوب می‌شوند.

رده SC2: شامل سازه‌هایی است که چنانچه تخریب ناشی از ASR زیاد باشد، پیامدهای ایمنی، اقتصادی و زیست محیطی کمی همراه خود خواهد داشت. برای این رده احتمال رخداد ASR با پذیرش ریسک در حد متوسط را می‌توان متصور شد. پیاده‌روها، جداول و آبروها، اعضایی با عمرمفید کمتر از ٤۰ سال نمونه‌هایی از این سازه‌ها بشمار می‌آیند.

رده SC3: شامل سازه‌هایی است که چنانچه تخریب ناشی از ASR کم باشد، پیامدهای ایمنی، اقتصادی و زیست محیطی زیادی همراه خود خواهد داشت. در این حالت احتمال رخداد ASR با پذیرش ریسک کم را می‌توان متصور شد. روسازی‌ها، فونداسیون‌ها، دیوارهای حایل و نگهدارنده، آب‌گذرها، موانع بزرگراه‌ها، سازه‌هایی با عمر مفید معمول ٤۰ تا ۷٤ سال نمونه‌هایی از این سازه‌ها هستند.

رده SC4: شامل سازه‌هایی است که چنانچه تخریب ناشی از ASR کم باشد، پیامدهای ایمنی، اقتصادی و زیست محیطی جدی همراه خواهد داشت. در این حالت احتمال رخداد ASR قابل قبول نمی‌باشد. پل‌های اصلی، نیروگاه‌ها، سدها، تاسیسات هسته‌ای، تاسیسات تصفیه آب، تاسیسات تصفیه فاضلاب، تونل‌ها، سازه‌هایی با عمر مفید معمولی بیشتر از ۷۵ سال نمونه‌هایی از این نوع سازه‌ها می‌باشند.

۲-۱-٤- شناسایی و تعیین اقدامات پیشگیرانه

در این بخش با اطلاعات بخش‌های قبلی نوبت به تعیین و انتخاب نوع اقدام پیشگیرانه مناسب شامل ۱) محدودکردن سطح مقدار قلیایی معادل در بتن، ۲) استفاده از مواد افزودنی سیمانی همچون خاکستر بادی، دوده سیلیس یا سیمان سرباره‌ای و ۳) استفاده همزمان از اقدام در جهت محدودکردن قلیایی معادل در بتن و استفاده از مواد سیمانی می‌باشد. جهت محدود کردن قلیایی معادل در بتن، حداکثر مقدار مجاز قلیائیت بتن مطابق جدول ٤ ارایه شده است. استفاده از مواد سیمانی به عنوان گزینه دوم شامل کاهش پتانسیل تخریب بتن بوسیله ASR با استفاده از مقدار کافی از یک ماده سیمانی مناسب همچون خاکستر بادی، سیمان سرباره‌ای، دوده سیلیس یا پوزولان‌های طبیعی می‌باشد. مقدار حداقل جایگزینی مواد سیمانی بر حسب درصد وزنی سیمان مطابق جدول ۵ ارایه شده است. شایان ذکر است حداقل مقادیر ارایه شده در جدول ۵ برای استفاده از سیمان‌های پرتلند با قلیایی معادل متوسط به بالا (۰/۷ تا ۱ درصد Na_2O) مناسب هستند. در جدول ٦ زمانی‌که قلیایی سیمان خارج از مقدار مذکور باشد، مقادیر اصلاحی برای اعمال در جدول ۵ ارایه می‌کند. چنانچه در طرح مخلوط بتن از مواد سیمانی در کنار سیمان‌های کم‌قلیا (Na_2O_{eq} ۰/۷ درصد ≤ قلیایی) استفاده شود لازم است سطح پیشگیری در جدول ٤ یک پله کاهش یابد. به عنوان مثال، اگر سیمان سرباره‌ای با سطح ریسک رخداد ASR برابر با Y با سیمان کم‌قلیا ترکیب شود سطح ریسک سیمان سرباره‌ای یک پله کاهش یافته و به رده X تقلیل می‌یابد. بطور مشابه چنانچه مواد سیمانی با سیمان‌های پرقلیا (Na_2O_{eq} ۱/۰ درصد < قلیایی) ترکیب شوند سطح جایگزینی مواد سیمانی باید به سطح مورد نیاز برای سطح پیشگیری بعدی افزایش یابد. به عنوان مثال اگر سیمان سرباره‌ای با سطح ریسک رخداد ASR برابر با Y با سیمان پرقلیا ترکیب شود سطح ریسک سیمان سرباره‌ای یک پله افزایش یافته و به رده Z افزایش می‌یابد. چنانچه قلیایی سیمان فراتر از ۱/۲۵ درصد Na_2O_{eq} باشد موارد و اقدامات پیشگیرانه پیشنهادی در این مطالعه نباید مورد استفاده قرار گیرد. حالت سوم (کنترل مقدار قلیایی بتن با استفاده از مواد افزودنی سیمانی) برای زمانی است که بالاترین سطح پیشگیری نیاز است (سطوح Z و ZZ). در این حالت ممکن است ترکیبی از گزینه‌های ۱ و ۲ نیاز باشد. لذا، گزینه‌های موجود برای سطوح پیشگیری Z و ZZ در جدول ٦ ارایه شده است

جدول ۳. تعیین سطح پیشگیری براساس ASTM C1778

سطح ریسک رخداد ASR	رده بندی سازه			
	رده SC1	رده SC2	رده SC3	رده SC4
سطح ریسک ۱	V	V	V	V
سطح ریسک ۲	V	V	W	X
سطح ریسک ۳	V	W	X	Y
سطح ریسک ٤	W	X	Y	Z
سطح ریسک ۵	X	Y	Z	ZZ
سطح ریسک ٦	Y	Z	ZZ	*

* چنانچه ریسک رخداد ASR سطح ٦ باشد، اجازه ساخت سازه ای با رده SC4 داده نخواهد شد (طبق جدول ۳). در این شرایط اقداماتی در جهت کاهش سطح ریسک رخداد ASR باید در دستور کار قرار گیرد.

جدول ٤. حداکثر مقدار قلیایی بتن جهت فراهم کردن سطوح پیشگیری مختلف براساس ASTM C1778

سطح پیشگیری	حداکثر مقدار قلیایی بتن** (Na_2O_e)	
	Kg/m^3	Lb/yd^3
V	بدون محدودیت	
W	۳/۰	۵/۰
X	۲/٤	٤/۰
Y	۱/۸	۳/۰
*Z	جدول ٦	
*ZZ		

*مواد افزودنی سیمانی ممکن است در سطوح پیشگیری Z و ZZ مورد استفاده قرار گیرد.

**قلیایی معادل بتن عبارتست از حاصلضرب عیار سیمان مصرفی بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب در مقدار قلیایی سیمان تقسیم بر ۱۰۰).

جدول۵. حداقل مقدار جایگزینی مواد افزودنی سیمانی جهت فراهم کردن سطح پیشگیری مناسب براساس ASTM C1778

افزودنی سیمانی*	مقدار قلیایی (% Na_2O_e)	حداقل مقدار جایگزینی (بر حسب ٪ جرمی)				
		سطح W	سطح X	سطح Y	سطح Z	سطح ZZ
خاکستر بادی** (CaO≤18%)	< ۳/۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	جدول ٦
	۳/۰ – ٤/۰	۲۰	۲۵	۳۰	٤۰	
سیمان سرباره‌ای	< ۱/۰	۲۵	۳۵	۵۰	٦۵	
دوده سیلیس*** (SiO_2 > 85%)	< ۱/۰	۲ × KGA یا ۲ × LBA	۲/۵ × KGA یا ۱/۵ × LBA	۳ × KGA یا ۱/۸ × LBA	٤ × KGA یا ۲/۵ × LBA	

* خاکستر بادی باید الزامات C618، سیمان سرباره‌ای باید ویژگی‌های استاندارد C989 و دوده سیلیس باید الزامات ویژگی C1240 را برآورده نمایند. سیمان‌های آمیخته باید الزامات ویژگی C595 و C1157 را برآورده نمایند.

** خاکستر بادی با مقدار CaO بیشتر از ۱۸ درصد می تواند موجب تاخیر ASR شود.

*** حداقل مقدار جایگزینی دوده سیلیس بر حسب واحد کیلوگرم بر متر مکعب (KGA در جدول) یا lb/yd^3 (LBA در جدول) محاسبه می‌گردد (KGA در جدول ۵ از حاصلضرب عیار سیمان در بتن بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب در مقدار قلیایی سیمان تقسیم بر ۱۰۰ به دست می آید.

جدول ٦. استفاده از مواد افزودنی سیمانی و محدودیت قلیایی بتن جهت فراهم کردن بالاترین سطح پیشگیری براساس ASTM C1778

سطح پیشگیری	مواد افزودنی سیمانی	محدود کردن قلیایی بتن به علاوه مواد افزودنی سیمانی	
	حداقل سطح مواد افزودنی سیمانی	حداکثر مقدار قلیایی kg/m^3 [lb/yd^3]	حداقل سطح مواد افزودنی سیمانی
Z	سطح مواد افزودنی سیمانی نشان داده شده برای سطح Z در جدول ۵	۱/۸ [۳/۰]	سطح مواد افزودنی سیمانی نشان داده شده برای سطح Y در جدول ۵
ZZ	اجازه داده نشده	۱/۸ [۳/۰]	سطح مواد افزودنی سیمانی نشان داده شده برای سطح Z در جدول ۵

۳- برنامه آزمایشگاهی

۳-۱- مواد مورد استفاده در آزمایش اندازه گیری پتانسیل واکنش قلیایی سیلیسی مطابق استاندارد ASTM C1260

در این مطالعه همانطور که پیشتر ذکر گردید ابتدا به مطالعه واکنش‌زایی سنگدانه‌های ٦ کارگاه در استان مازندران و ٦ کارگاه در استان گیلان پرداخته شده است. همچنین نمونه‌برداری از سنگدانه‌های ریز و درشت در محل کارگاه از زیر نوار نقاله صورت پذیرفت و سپس در آزمایشگاه مقدار نمونه صحرایی برای رسیدن به مقدار لازم نمونه‌های آزمایشگاهی مطابق با ASTM C702 کاهش یافت. آنگاه به منظور ساخت منشورهای ملات سنگدانه ریز مطابق استاندارد ASTM C1260، دانه بندی گردیدند (شکل ۱).

شکل ۱. وسایل و تجهیزات لازم به منظورانجام آزمون انبساط منشور ملات طبق استاندارد ASTM C1260

سیمان: به منظور اندازه‌گیری پتانسیل واکنش قلیایی سیلیسی مطابق استاندارد ASTM C1260 باید از سیمانی استفاده گردد که بعدا در پروژه‌های ساخت مورد استفاده قرار خواهد گرفت. با توجه به دردسترس بودن سیمان تهران، در مطالعه حاضر از سیمان تیپ۲ تهران استفاده گردید که در جدول ۷ آنالیز شیمیایی آن گزارش شده است. همچنین طبق جدول ۷ مشاهده می‌شود که معادل قلیایی سیمان تیپ ۲ تهران کمتر از ۰/٦ درصد محاسبه شده است که در گروه سیمان‌های کم قلیا قرار دارد.

آب مصرفی: از آب شرب برای ساخت آزمونه‌های منشوری ملات استفاده شد.

۳-۲- مواد مورد استفاده در آزمایش اندازه‌گیری پتانسیل واکنش قلیایی سیلیسی مطابق استاندارد ASTM C1293

سنگدانه مصرفی: به منظور بررسی واکنش‌زایی و انبساط بلندمدت منشور بتنی ساخته شده با سنگدانه‌های ریزدانه مشکوک، از مصالح ریزدانه کارگاه با درشت دانه غیرواکنش‌زا مطابق تعریف مطرح شده در استاندارد استفاده شد. در مورد مصالح درشت دانه کارگاه نیز مطابق تعریف استاندارد از مصالح ریزدانه غیرواکنش‌زا استفاده گردید (شکل ۲).

سیمان: به منظور اندازه‌گیری پتانسیل واکنش قلیایی سیلیسی مطابق استاندارد ASTM C1293 از سیمان تیپ ۱ تهران با رده ٤۲۵ و با مشخصات و آنالیز شیمیایی ارایه شده در جدول ۷ استفاده شد.

آب مصرفی: از آب شرب برای ساخت آزمونه‌های منشوری بتن استفاده شد.

شکل ۲. قرائت انبساط منشور بتن طبق ASTM C1293

جدول ۷. آنالیز شیمیایی سیمان‌های مورد استفاده

نوع سیمان	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	SO_3	L.O.I	$Na_2O+0.658K_2O$
سیمان تیپ ۲ تهران	۲۱/٦	٦۳/۳	٤/٤٥	٤/٤	۱/٤	۲/٦	۱/۱	۰/٤٤
سیمان تیپ ۱-٤۲۵	۲۲/۰	٦۲/۲	٤/۹	۳/۸	۱/۸	۲/۹	۱/٦	۰/۵۸

۳-۳- طرح‌های مخلوط ساخته شده

در مطالعه حاضر بر روی سنگدانه‌های ریز و درشت جمعاً ۱۲ معدن در استان‌های گیلان و مازندران، آزمون‌های پتروگرافی سنگدانه طبق استاندارد ASTM C295، منشور تسریع شده ملات طبق ASTM C1260 و منشور دراز مدت بتنی طبق ASTM C1293 انجام پذیرفت که در بخش بعدی نتایج حاصل به تفصیل ارائه شده است. لازم به ذکر است که کارگاه‌های مورد مطالعه در استان مازندران با نام‌های M1 تا M6 و کارگاه‌های استان گیلان با نام های G1 تا G6 نام‌گذاری شده‌اند.

٤- نتایج حاصل به همراه بحث و بررسی

٤-۱- تعیین پتانسیل واکنش زایی مصالح

نتایج مقدار انبساط منشورهای ملات طبق استاندارد ASTM C1260 و منشور دراز مدت بتنی طبق ASTM C1293 برای معادن استان‌های مازندران و گیلان به ترتیب در نمودارهای انبساط حاصل در شکل‌های ۳ تا ٦ ارائه شده است. همچنین وضعیت واکنش‌زایی برای هر کارگاه طبق جمع‌بندی نتایج سه آزمون پتروگرافی، منشور تسریع‌شده و منشور بتنی دراز مدت بتنی بطور خلاصه مطابق جدول ۸ ارائه شده است. براساس جدول ۸، مشاهده می‌گردد که از ۱۲ نمونه سنگدانه ریز و درشت، در نهایت بر اساس استاندارد ASTM C1293، سنگدانه‌های ریز مربوط به دو کارگاه M2 و M4 و سنگدانه‌های درشت مربوط به دو کارگاه M4 و M6 واکنش‌زا گزارش شده است. بر همین اساس برای استان گیلان سنگدانه‌های ریز ٤ کارگاه G3، G5، G6 و G7 و سنگدانه‌های درشت ٤ کارگاه G3، G4، G5 و G7 واکنش‌زا گزارش شده است. بنابراین براساس نتایج ارایه شده می‌توان مشاهده کرد که براساس نمونه‌های برداشت شده واکنش‌زایی مصالح در استان گیلان بیشتر از استان مازندران می‌باشد. نتایج آزمون پتروگرافی به عنوان یکی از آزمون‌های انجام شده در این مطالعه در جدول ۸ ارایه شده است. بطور کلی پتروگرافی می‌تواند اطلاعات مفیدی در خصوص ترکیب سنگدانه‌ها شامل تعیین و مقدار تقریبی کانی‌هایی که پتانسیل واکنش‌زایی دارند ارایه دهد. پتروگراف باید دنبال ترکیب سیلیس‌های فعال در برابر قلیایی‌ها همچون اوپال، چرت، کلدستونی، کریستوبالیت، تریدیمیت، کوارتزهای تحت تنش و کریستاله شده و شیشه‌های آتشفشانی باشد. پتروگراف‌ها همچنین باید از خصوصیات مشخص بافتی و کانی‌شناسی مصالح کربناتی واکنش‌زا در برابر قلیایی‌ها اطمینان حاصل کنند. مصالح واکنش‌زای قلیایی کربناتی اغلب شامل رگه‌هایی از دولومیت به همراه مخلوط ریزدانه‌ای از کلسیت، کوارتز و رس می‌باشند. بنابراین از پتروگرافی می‌توان در جهت رده‌بندی سنگدانه به لحاظ پتانسیل واکنش‌زایی استفاده گردد، منتها همواره جهت اطمینان از واکنش‌زایی مصالح نیاز به انجام آزمون‌های تعیین انبساط منشور ملات یا بتن می‌باشد. بطور مثال مطابق جدول ۸ مشاهده می‌گردد که براساس مشاهدات پتروگرافی پتانسیل واکنش‌زایی برای مصالح ریزدانه کارگاه‌های M2 و M4 ضعیف گزارش شده است در حالی که ماسه کارگاه M2 طبق دو آزمون دیگر واکنش‌زا و ماسه کارگاه M4 طبق آزمون منشور دراز مدت بتنی واکنش‌زا گزارش شده است. بنابراین چنانچه در یک پروژه بتنی همچون روسازی بتنی که به لحاظ واکنش‌زایی مصالح بسیار پر اهمیت می‌باشد تنها براساس نتایج پتروگرافی تصمیم‌گیری شود اقدام بسیار پر ریسک و خطرناکی اتخاذ شده است.

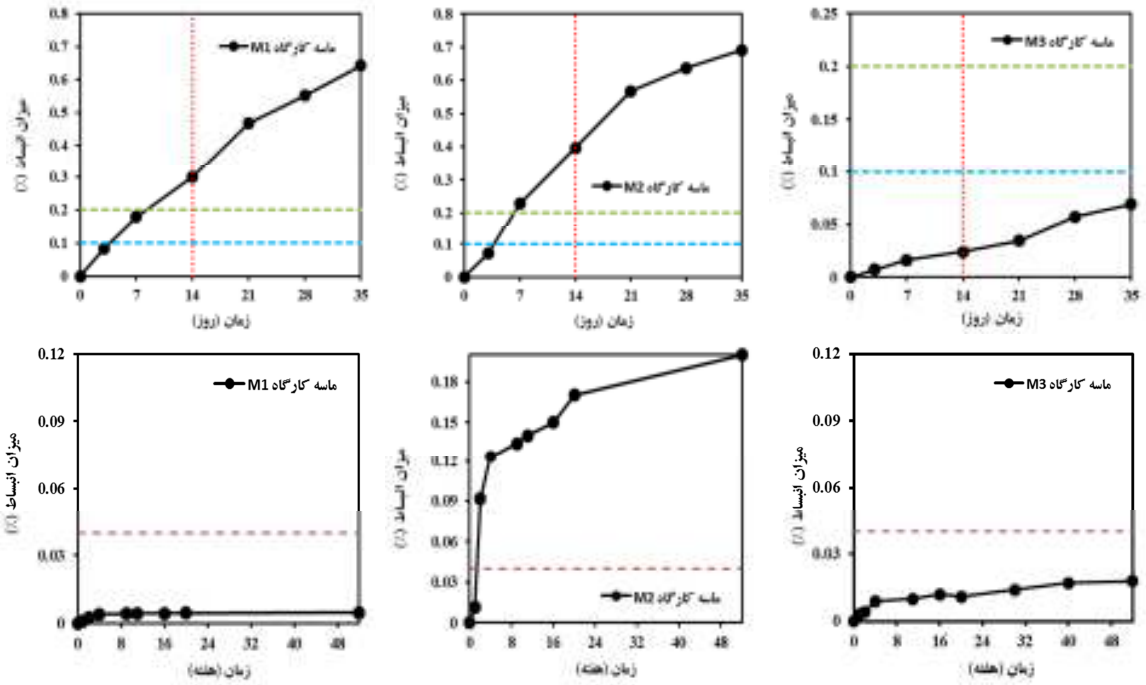
آزمون تسریع شده منشور ملات مطابق با استاندارد ASTM C1260 بر اساس توضیحات استاندارد ASTM C1778 بطور کلی به عنوان یک آزمون نسبتاً سخت معرفی می‌شود که طبق آن تعداد زیادی از منابع سنگدانه که قبلاً توسط آزمون منشور بتنی دراز مدت مطابق استاندارد ASTM C1293 غیرواکنش‌زا گزارش شده‌اند مستعد واکنش زایی معرفی شده‌اند. به همین دلیل، مطابق نتایج این آزمون (ASTM C1260) نباید سنگدانه‌ای مردود اعلام شود. در واقع چنانچه سنگدانه‌ای مطابق با آزمون ASTM C1260 دارای انبساط ١٤ روزه بیشتر از ۰/۱ درصد می‌باشد پتانسیل واکنش‌زایی آن باید به تایید آزمون بلند مدت ASTM C1293 نیز برسد یا اقدامات احتیاطی پیشگیری از واکنش‌زایی و انبساط در خصوص آن اعمال گردد. همچنین توصیه شده است که چنانچه نتایج این آزمون با آزمون ASTM C1293 در تناقض با یکدیگر هستند

نتیجه آزمون منشور دراز مدت بتنی طبق ASTM C1293 می‌بایست اولویت داده شود. بنابراین باید بپذیریم که وقتی با اکتفا به نتیجه آزمون منشور تسریع شده طبق ASTM C1260 از سنگدانه‌ای در طرح مخلوط بتن یک سازه بتنی همچون روسازی بتنی استفاده می‌کنیم و منتظر جواب آزمون دراز مدت نمی‌مانیم یا اصلاً آن را انجام نمی‌دهیم مقداری ریسک وارد محاسبات ما شده است. بطور مثال مطابق شکل ٤ برای سنگدانه ریز کارگاه M4 طبق آزمون پتروگرافی پتانسیل واکنش‌زایی ضعیف و انبساط منشور ملات طبق ASTM C1260 کمتر از ۰/۱ درصد (غیرواکنش‌زا) گزارش شده است. درحالیکه طبق آزمون دراز مدت سنگدانه این کارگاه دارای انبساط بیشتر از ۰/۰٤ درصد و واکنش‌زا گزارش شده است. لذا، با اتکاء به دو آزمون پتروگرافی و منشور تسریع شده ملات، سنگدانه غیرواکنش‌زا اطلاق خواهد شد در حالیکه در عمل واکنش‌زا می‌باشد.

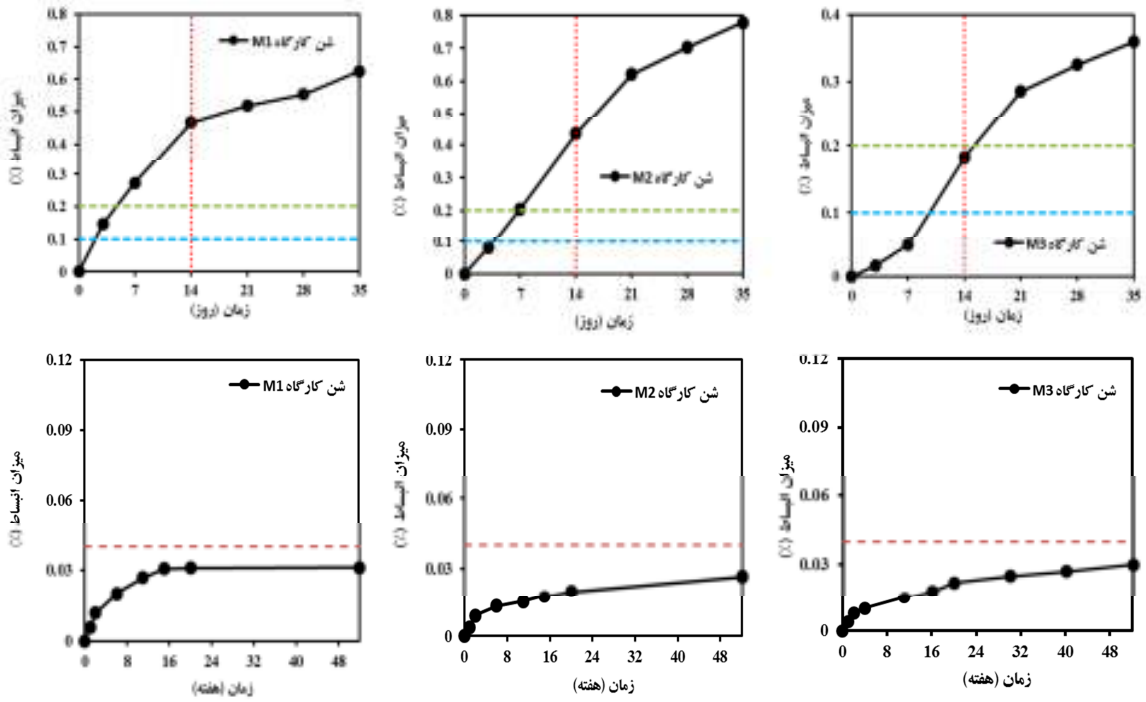
براساس نمودارهای ترسیم شده در شکل‌های ۳ تا ٦ مشاهده می‌گردد اگرچه میان نتایج آزمون‌های تسریع شده ملات و منشور بتنی دراز مدت، اغلب هماهنگی و همراستایی وجود دارد، اما نتایج بدست آمده در این مطالعه نشان می‌دهد که همیشه این طور نیست و به عنوان مثال برای سنگدانه ریز و درشت کارگاه M1، سنگدانه درشت کارگاه M2، سنگدانه ریز کارگاه M4 یا شن کارگاه G4 و غیره، میان نتایج این دو آزمون هماهنگی مشاهده نمی‌گردد. همچنین نتایج آزمون درازمدت در این مطالعه نشان می‌دهد که اغلب، واکنش‌زایی مصالح در آزمون دراز مدت طی ٦ ماه ابتدایی ثبت قرائت‌های انبساط منشور بتنی، قابل دستیابی می‌باشد؛ هرچند در مواردی نیاز است تا قرائت‌ها تا یک‌سال ادامه یابد که در همین مطالعه به عنوان مثال برای سنگدانه درشت کارگاه M6 قابل مشاهده است. براساس مطالعات موجود در ادبیات فنی و تا حدی نتایج ارائه شده در این مطالعه بطورکلی انتظار واکنش‌زایی از مصالح ریزدانه بیشتر از مصالح درشت‌دانه است زیرا اصولاً عملیات خردایش از طرفی منجر به نامنظم شدن ساختار مصالح شده و از طرف دیگر با ریزتر شدن مصالح، سطح ویژه و در تماس با خمیر سیمان افزایش می‌یابد، لذا، در مجموع برای مصالح ریزدانه انتظار واکنش‌زایی نسبت به مصالح درشت‌دانه بیشتر است. مطابق شکل ٦، ماسه کارگاه G4 واکنش‌زا به دست آمده است درحالی که شن همان کارگاه غیرواکنش‌زا به دست آمده است.

٤-۲- ارایه راهکارهای تجویزی در جهت پیشگیری از رخداد واکنش

براساس نتایج حاصل از سه آزمون انجام شده در بخش ٤-۱ و طبق جدول ۸، مشاهده شد که اگرچه طبق انتظار نتایج هر سه آزمون هرچند اندک در یک راستا و هماهنگ می‌باشند منتها همانطور که نتایج این مطالعه بخوبی نشان می‌دهد اکتفا نمودن به نتایج یک یا دو آزمون می‌تواند منجر به ریسک بالا در تعیین واکنش‌زایی یا بالعکس گردد. لذا، با توجه به اینکه در بسیاری از پروژه‌ها آزمون دراز مدت انجام نمی‌پذیرد و می‌بایست براساس دو آزمون اول (بخصوص آزمون تسریع شده) درخصوص واکنش‌زایی مصالح تصمیم‌گیری نمود یا اینکه آزمون دراز مدت انجام شده و به دلایلی مجبور به استفاده از مصالح واکنش‌زا می‌باشیم، در اینصورت با یاری از روش تجویزی ارائه شده در بخش ۲، می‌توان در انتخاب اقدامات پیشگیرانه مناسب اقدام نمود. لازم به ذکر است که در این روش، توصیه شده است تا در جهت اطمینان، تاثیر اقدامات پیشگیرانه استفاده شده درخصوص مصالح واکنش‌زا توسط آزمون ASTM C1293 یا ASTM C1567 کنترل گردد. همانطور که پیش‌تر ذکر شد در این پژوهش فرض شده است تا از مصالح مورد آزمون در بخش قبل در ساخت روسازی بتنی استفاده گردد. علت انتخاب روسازی بتنی نیز جدا از بحث رواج آن در چند سال اخیر در کشور و همچنین اهمیت آن به لحاظ عمرانی، اهمیت روسازی‌های بتنی به لحاظ پیامدهای ایمنی، اقتصادی و زیست محیطی است که در صورت رخداد ASR متوجه کشور خواهد شد.

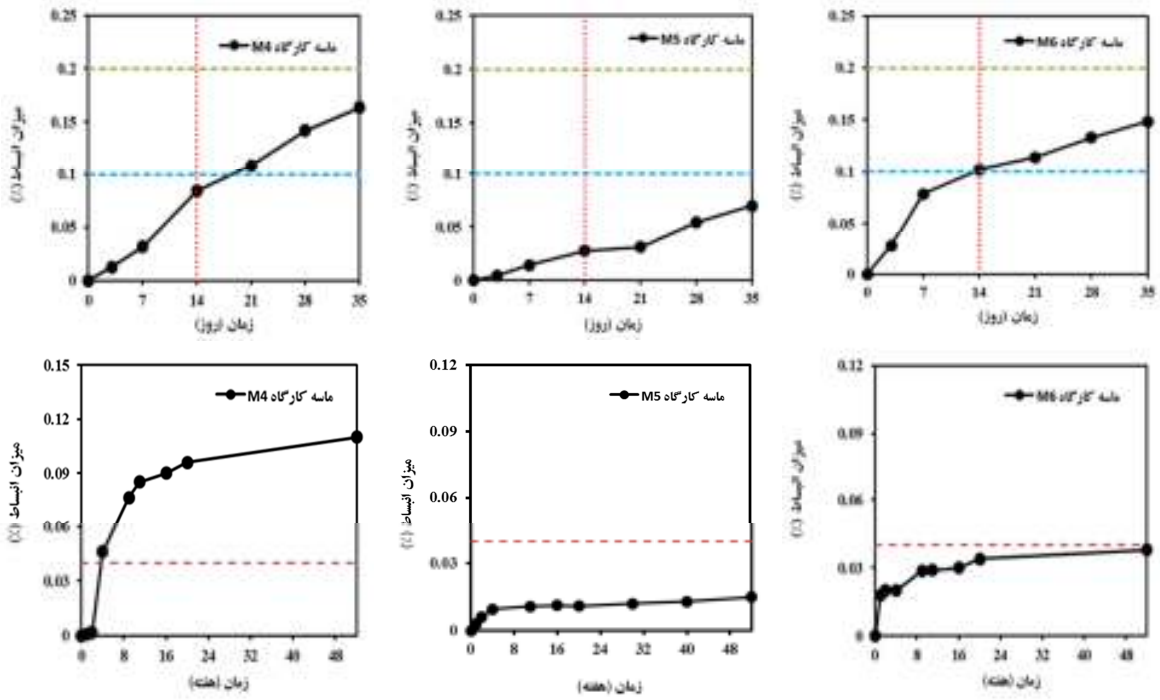


الف) سنگدانه ریز

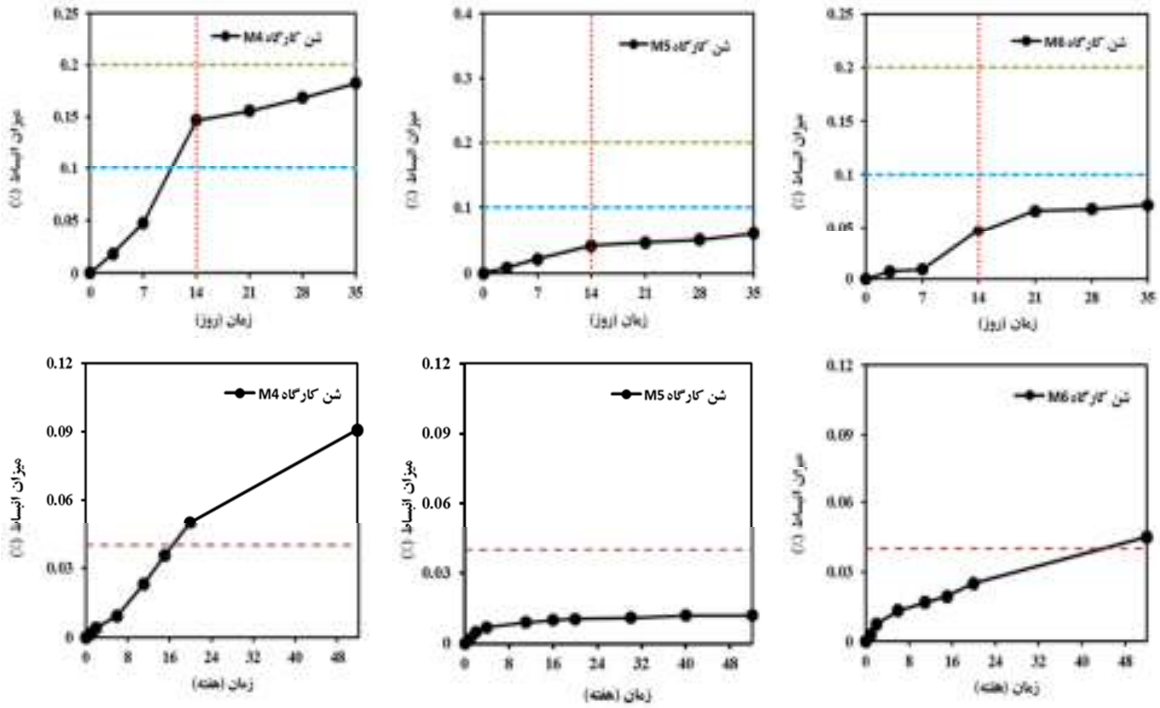


ب) سنگدانه درشت

شکل۳. نمودار انبساط منشور ملات طبق استاندارد ASTM C1260 و منشور دراز مدت بتنی طبق ASTM C1293 برای سنگدانه‌های استان مازندران

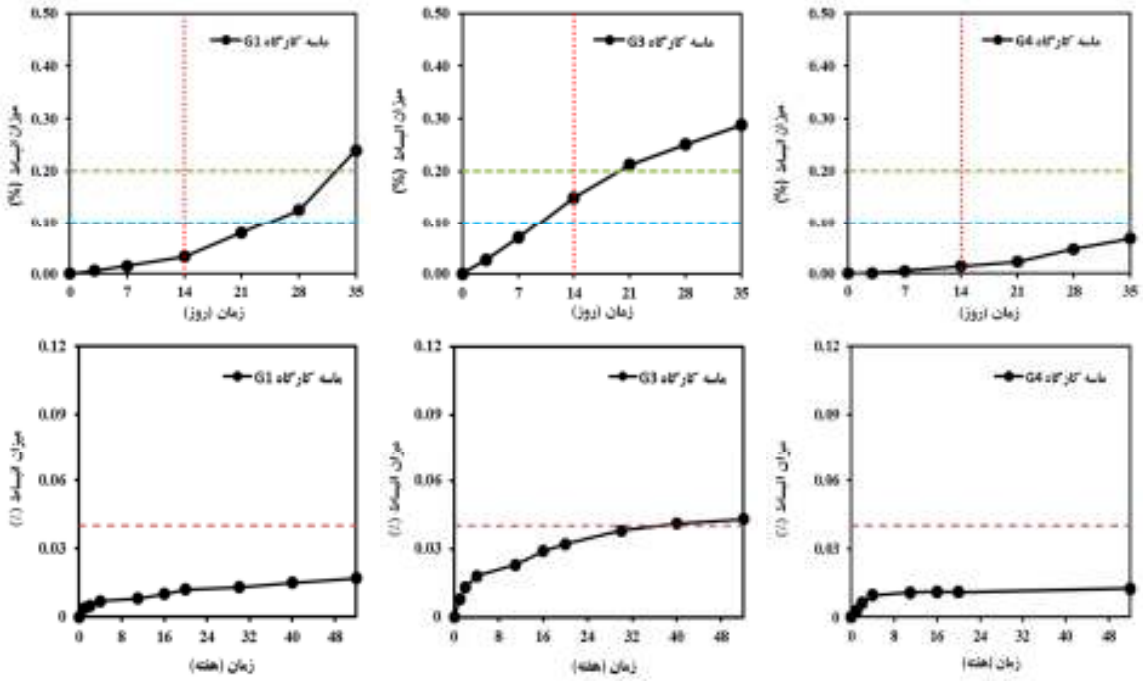


الف) سنگدانه ریز

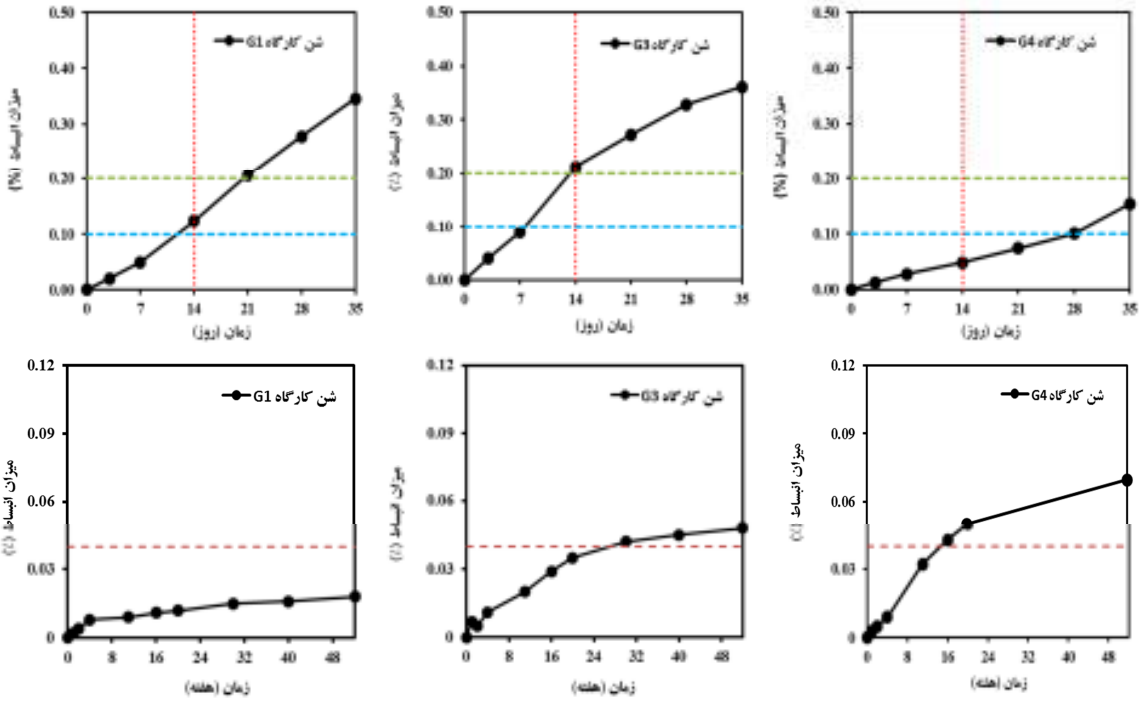


ب) سنگدانه درشت

شکل٤. نمودار انبساط منشور ملات طبق استاندارد ASTM C1260 و منشور دراز مدت بتنی طبق ASTM C1293 برای سنگدانه‌های استان مازندران

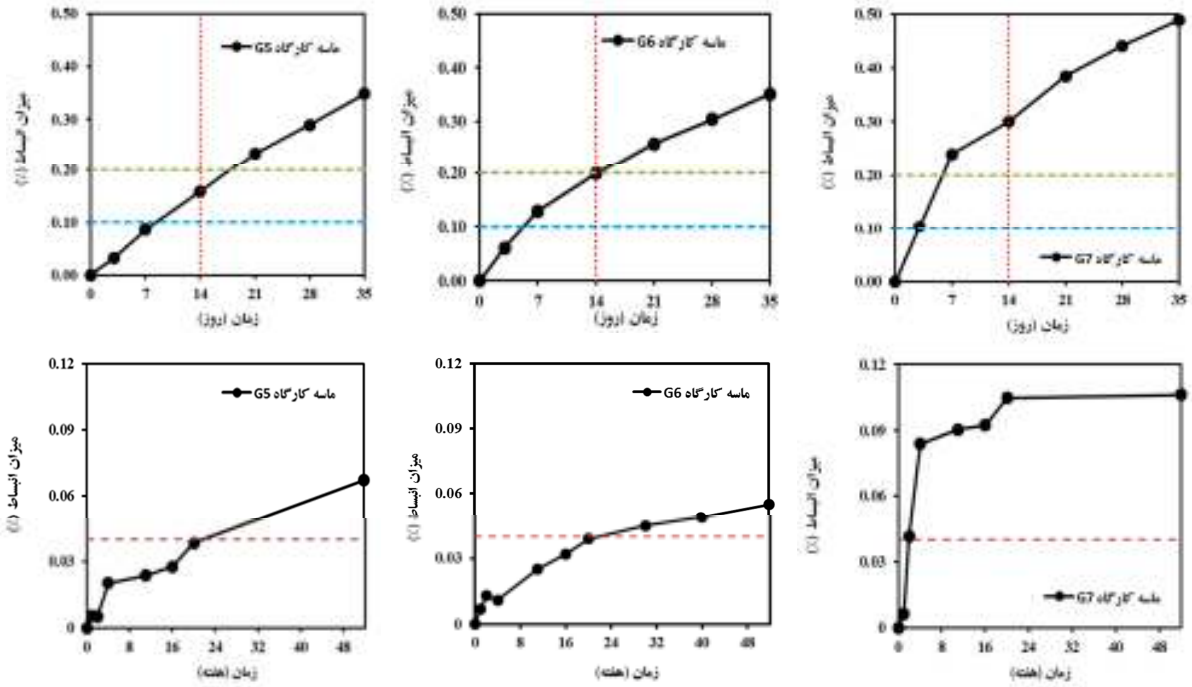


الف) سنگدانه ریز

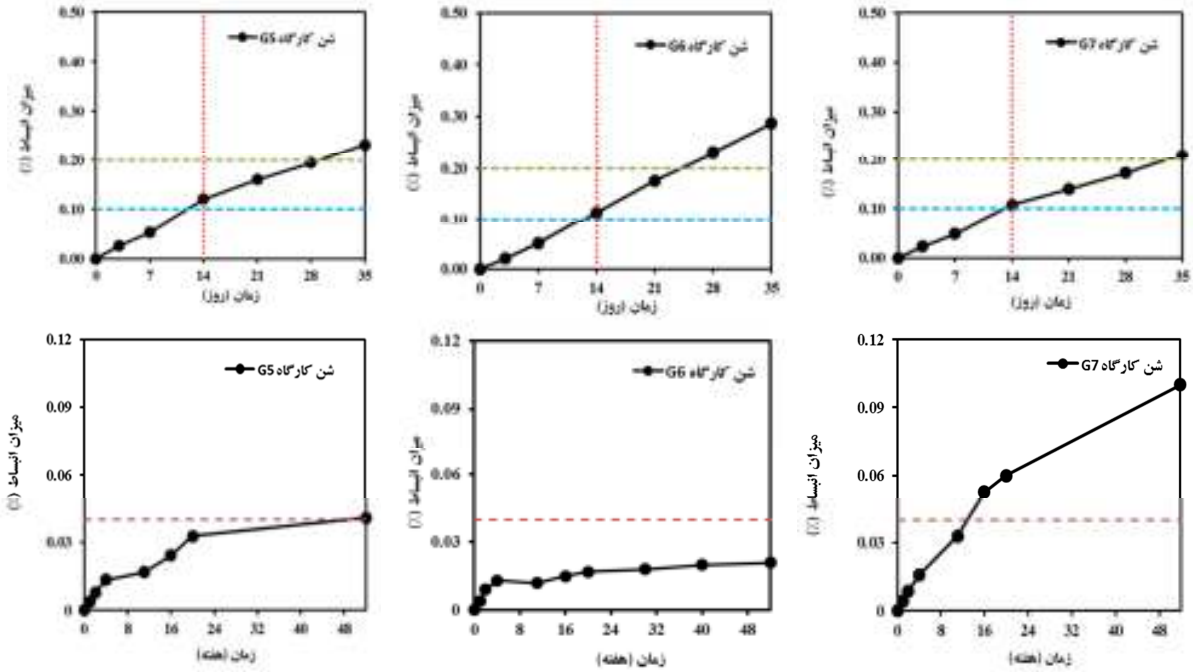


ب) سنگدانه درشت

شکل۵. نمودار انبساط منشور ملات طبق استاندارد ASTM C1260 و منشور دراز مدت بتنی طبق ASTM C1293 برای سنگدانه‌های استان گیلان



الف) سنگدانه ریز



ب) سنگدانه درشت

شکل٦. نمودار انبساط منشور ملات طبق استاندارد ASTM C1260 و منشور دراز مدت بتنی طبق ASTM C1293 برای سنگدانه‌های استان گیلان

جدول ۸. خلاصه نتایج واکنش‌زایی مصالح سنگی ریز و درشت کارگاه‌های مورد مطالعه در استان‌های گیلان و مازندران

نام کارگاه	احتمال واکنش‌زایی بر اساس نتیجه آزمون پتروگرافی	نتیجه آزمون کوتاه مدت مطابق ASTM C1260	نتیجه آزمون بلند مدت مطابق ASTM C1293
	استان مازندران		
ماسه کارگاه M1	متوسط	واکنش‌زا	غیرواکنش‌زا
ماسه کارگاه M2	ضعیف	واکنش‌زا	واکنش‌زا
ماسه کارگاه M3	ضعیف	غیرواکنش‌زا	غیرواکنش‌زا
ماسه کارگاه M4	ضعیف	غیرواکنش‌زا	واکنش‌زا
ماسه کارگاه M5	ضعیف	غیرواکنش‌زا	غیرواکنش‌زا
ماسه کارگاه M6	متوسط	مشکوک به واکنش‌زایی	غیرواکنش‌زا
شن کارگاه M1	متوسط	واکنش‌زا	غیرواکنش‌زا
شن کارگاه M2	ضعیف	واکنش‌زا	غیرواکنش‌زا
شن کارگاه M3	ضعیف	مشکوک به واکنش‌زایی	غیرواکنش‌زا
شن کارگاه M4	ضعیف	مشکوک به واکنش‌زایی	واکنش‌زا
شن کارگاه M5	ضعیف	غیرواکنش‌زا	غیرواکنش‌زا
شن کارگاه M6	متوسط	غیرواکنش‌زا	واکنش‌زا
	استان گیلان		
ماسه کارگاه G1	بسیار ضعیف	غیرواکنش‌زا	غیرواکنش‌زا
ماسه کارگاه G3	ضعیف	مشکوک به واکنش‌زایی	واکنش‌زا
ماسه کارگاه G4	ضعیف	غیرواکنش‌زا	غیرواکنش‌زا
ماسه کارگاه G5	زیاد	مشکوک به واکنش‌زایی	واکنش‌زا
ماسه کارگاه G6	متوسط	مشکوک به واکنش‌زایی	واکنش‌زا
ماسه کارگاه G7	زیاد	واکنش‌زا	واکنش‌زا
شن کارگاه G1	ضعیف	مشکوک به واکنش‌زایی	غیرواکنش‌زا
شن کارگاه G3	زیاد	واکنش‌زا	واکنش‌زا
شن کارگاه G4	ضعیف	غیرواکنش‌زا	واکنش‌زا
شن کارگاه G5	زیاد	مشکوک به واکنش‌زایی	واکنش‌زا
شن کارگاه G6	ضعیف	مشکوک به واکنش‌زایی	غیرواکنش‌زا
شن کارگاه G7	زیاد	مشکوک به واکنش‌زایی	واکنش‌زا

به عنوان مثال، چنانچه فرض گردد برای ساخت یک روسازی بتنی در منطقه شمال کشور قرار است تا از مصالح ریزدانه و درشت‌دانه یکی از معادن موجود در این مطالعه استفاده شود، با توجه به وضعیت واکنش‌زایی مصالح (طبق جدول ۸) راهکار پیشگیرانه مناسب مطابق جدول ۹ گزارش شده است. لازم به ذکر است که در محاسبات جدول ۹، فرض شده است که سیمان مورد استفاده همان سیمان تیپ ۲ تهران با معادل قلیایی ۰/٤٤ درصد باشد. مطابق نتایج حاصل مشاهده می‌گردد که برای کارگاه M1، M3 و M5 با توجه به رده واکنش‌زایی R0 (عدم واکنش‌زایی)، همانطور که از پیش انتظار می‌رفت، عملاً هیچگونه اقدام پیشگیرانه توصیه نشده است. برای کارگاه M2 با رده واکنش‌زایی زیاد اقدام پیشگیرانه توصیه شده استفاده از ۷ درصد وزنی دوده سیلیس یا اعمال همزمان محدودیت قلیایی معادل در بتن به مقدار ۱/۸ کیلوگرم بر متر مکعب و جایگزینی ۵ درصد دوده سیلیس به جای سیمان می‌باشد. برای بقیه کارگاه‌ها باتوجه به رده واکنش‌زایی معمولی، اقدام پیشگیرانه توصیه شده محدود کردن قلیایی معادل بتن به ۱/۸ کیلوگرم بر متر مکعب یا استفاده از ۵ درصد دوده سیلیس جایگزین سیمان تیپ ۲ مصرفی می‌باشد. شایان ذکر است طبق روابط تعریف شده،

قلیایی معادل سیمان تاثیر بسزایی در نتایج جدول ۹ دارد بطوریکه به عنوان مثال چنانچه به جای سیمان تهران از سیمان تیپ ۲ فیروزکوه با قلیایی معادل ۰/٦٦ درصد مطابق مستندات کارخانه استفاده گردد مقدار درصد دوده سیلیس از ۷ به ۱۰ درصد برای کارگاه M2 و از ۵ به ۷ درصد برای بقیه کارگاه‌ها با حفظ بقیه شرایط تغییر خواهد یافت. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کنترل و محدود کردن قلیایی معادل سیمان در کارخانجات سیمان تا چه اندازه می‌تواند به ما در کنترل یا کاهش اثرات ناشی از واکنش مصالح یاری کند.

جدول ۱۱. تعیین نوع اقدام پیشگیرانه مناسب برای استفاده از مصالح سنگی ریز و درشت کارگاه‌های مورد مطالعه

کارگاه	توصیف واکنش‌زایی	رده واکنش‌زایی	سطح ریسک واکنش	سطح پیشگیری	تعیین نوع اقدام پیشگیرانه		
					محدود کردن قلیایی بتن (کیلوگرم بر متر مکعب)	مقدار دوده سیلیس جایگزین سیمان (٪)*	استفاده همزمان از محدود کردن قلیایی بتن و دوده سیلیس
M1	غیرواکنش‌زا	R0	سطح ۱	V	–	–	–
M2	واکنش‌زایی زیاد	R2	سطح ۵	Z	-	۷	حداکثر قلیایی بتن ۱/۸ کیلوگرم بر متر مکعب و ۵ درصد دوده سیلیس
M3	غیرواکنش‌زا	R0	سطح ۱	V	–	–	–
M4	واکنش‌زایی معمولی	R1	سطح ٤	Y	۱/۸	۵	–
M5	غیرواکنش‌زا	R0	سطح ۱	V	–	–	–
M6	واکنش‌زایی معمولی	R1	سطح ٤	Y	۱/۸	۵	–
G1	غیرواکنش‌زا	R0	سطح ۱	V	–	–	–
G3	واکنش‌زایی معمولی	R1	سطح ٤	Y	۱/۸	۵	–
G4	واکنش‌زایی معمولی	R1	سطح ٤	Y	۱/۸	۵	–
G5	واکنش‌زایی معمولی	R1	سطح ٤	Y	۱/۸	۵	–
G6	واکنش‌زایی معمولی	R1	سطح ٤	Y	۱/۸	۵	–
G7	واکنش‌زایی معمولی	R1	سطح ٤	Y	۱/۸	۵	–

۵- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر پس از بازدید و نمونه‌برداری از سنگدانه‌های ریز و درشت جمعاً ۱۲ معدن (کارگاه تولید شن و ماسه) در استان‌های مازندران و گیلان شامل ٦ کارگاه در استان مازندران و ٦ کارگاه در استان گیلان، سه آزمون مهم به ترتیب شامل پتروگرافی بر روی سنگدانه مطابق استاندارد ASTM C295، منشور تسریع شده ملات طبق استاندارد ASTM C1260 و منشور دراز مدت بتنی طبق استاندارد ASTM C1293 جهت تعیین پتانسیل واکنش‌زایی انجام پذیرفت.

با مشاهده نتایج بدست آمده در جدول۸ ، می‌توان نتیجه گیری کرد که:

-برای تعدادی از کارگاه‌های نمونه برداری شده در هر دو استان، واکنش‌زایی سنگدانه‌ها بر اساس نتایج هر سه آزمون پتروگرافی، ملات منشوری تسریع شده و منشور دراز مدت بتنی محرز گردید. لذا براساس روش تجویزی مورد استفاده با فرضیات انجام شده (شامل سیمان تیپ ۲ تهران و عیار ٤۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب) در نهایت برای ساخت روسازی بتنی در منطقه برای کارگاه‌های مختلف وابسته به رده واکنش‌زایی مصالح، محدود کردن قلیایی بتن به مقدار ۱/۸ کیلوگرم بر متر

مکعب، استفاده از دوده سیلیس به تنهایی یا همراه با محدودیت قلیایی بتن توصیه شده است.

-همانطور که انتظار می‌رفت برای نمونه‌هایی که آزمون پتروگرافی برای آنها انجام شده است، نتایج پتروگرافی با نتایج دو آزمون دیگر تقریباً هم‌راستا هستند. بنابراین انجام این آزمون پیش از دو آزمون دیگر می‌تواند احتمال واکنش‌زایی را در نمونه به درستی تخمین بزند منتها باید خاطر نشان کرد که به تنهایی با انجام آزمون پتروگرافی و با تکیه بر نتایج آن اتخاذ تصمیم درخصوص پتانسیل واکنش‌زایی اقدامی بسیار پر ریسک می‌باشد؛

-آزمون منشور ملات تسریع شده به تنهایی نمی‌تواند تعیین‌کننده واکنش‌زایی قطعی برای یک نمونه سنگدانه باشد. بنابراین اعلام نظر قطعی در خصوص واکنش‌زایی یک نمونه سنگدانه با انجام آزمون دراز مدت میسر خواهد بود و چنانچه تنها به انجام آزمون تسریع شده اکتفا گردد مقداری ریسک در تصمیم گیری پذیرفته شده است؛

- بر اساس منابع مختلف موجود در ادبیات فنی و نتایج موجود در این مطالعه، اعلام نظر قطعی در خصوص واکنش‌زایی یک نمونه سنگدانه بعد از انجام آزمون درازمدت مطابق استاندارد ASTM C1293 امکان‌پذیر است؛

- براساس نتایج قطعی حاصل در این مطالعه و براساس تعداد کارگاه‌های نمونه‌برداری شده به نظر می‌رسد پتانسیل واکنش‌زایی در استان گیلان بیشتر از استان مازندران می‌باشد. اگرچه تعداد نمونه‌های اخذ شده در این مطالعه برای اینچنین نتیجه گیری کلی کم می‌باشد و جهت اظهار نظر قطعی، باید به نمونه‌برداری‌های با تعداد بیشتر و یکسان اقدام نمود.

- براساس نتایج بدست آمده چنانچه یک سنگدانه مشکوک به واکنش‌زایی باشد یا واکنش‌زا تلقی گردد از آن سنگدانه تحت تدابیر و اقدامات پیشگیرانه می‌توان با پذیرفتن اندکی ریسک در روسازی بتنی استفاده کرد منتها توصیه می‌گردد از اقدام انجام شده (بخصوص استفاده از نوع پوزولان مصرفی و مقدار استفاده شده) طبق استاندارد ASTM C1293 یا ASTM C1567 اطمینان حاصل نمود.

٦- پی‌نوشت‌ها

1. Alkali silica reaction (ASR)
2. Federal Highway Administration (FHWA)

۷- مراجع

-A. D. Buck, B. J. Houston, L. Pepper, (1953), "Effectiveness of mineral admixtures in preventing excessive expansion of concrete due to alkali-aggregate reaction", Journal of the American Concrete Institute, 30 (10), pp. 11-60.

- M.D.A. Thomas, B. Fournier, K. Folliard, J. Ideker, M. Shehata, (2006), "Test methods for evaluating preventive measures for controlling expansion due to alkali-silica reaction in concrete", Cem. Concr. Res. 36 (10), pp.1842–1856.

- M.D.A. Thomas, B. Fournier, K.J. Folliard, Y. Resendez, (2011), "Alkali-Silica Reactivity Field Identification Handbook", Federal Highway Administration, Office of Pavement Technology, United States.

-S. Diamond et al., (1981), "On the physics and chemistry of alkali–silica reactions", In: Proc. 5th Conf. Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, S252/22, pp.1–11.

-T. Ramlochana, M. Thomasa, K.A. Gruberb., (2000), "The effect of metakaolin on alkali-silica reaction in concrete", Cement and Concrete Research, 30, pp. 339- 344.

-A. Dousti, S. Veyse, (2021), "Laboratory study of alkali silica reactivity of aggregates of a number of sand mines in Zanjan province", Proceeding of 2th Conference of Concrete durability, Tehran, Iran (In Persian).

-AASHTO R 80-17, (2017), "Standard Practice for Determining the Reactivity of Concrete Aggregates and Selecting Appropriate Measures for Preventing Deleterious Expansion in New Concrete Construction", American Association of State and Highway Transportation Officials.

-Alkali –silica, (2019), "reactivity field identification handbook, U.S department of Transportation", Federal Highway administration.

-ASTM C 1260, (2014), "Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)".

-ASTM C1293, (2020),"Test Method for Concrete Aggregates by Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction", American Society for Testing and Materials.

-D. Lu, X. Zhou, Z. Xu, X. Lan, M. Tang, B. Fournier, (2006), "Evaluation of laboratory test method for determining the potential alkali contribution from aggregate and the ASR safety of the Three-Gorges dam concrete", Cem. Concr. Res. 36, pp.1157–1165.

-M.D.A. Thomas, (2011), "The effect of supplementary cementing materials on alkali–silica reaction: a review", Cem. Concr. Res. 41, pp.1224–1231.

-R.B. Figueira, R. Sousa, L. Coelho, M. Azenha, J.M. de Almeida, P.A.S. Jorge, C.J.R. Silva, (2019), "Alkali-silica reaction in concrete: mechanisms, mitigation and test methods", Constr. Build. Mater. 222, pp.903–931.

-S.M.S. Kazmi, M.J. Munir, I. Patnaikuni, Y.-F. Wu., (2017), "Pozzolanic reaction of sugarcane bagasse ash and its role in controlling alkali silica reaction", Constr. Build. Mater., 148, pp.231–240.

-STM C295, (2012), "Practice for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete", American Society for Testing and Materials.

-ASTM C1567, (2013), "Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method)", American Society for Testing and Materials.

-ASTM C1778, (2020), "Standard Guide for Reducing the Risk of Deleterious Alkali-Aggregate Reaction in Concrete" American Society for Testing and Materials.

-ASTM C227, (2010), "Test Method for Potential Alkali Reaction of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method)", American Society for Testing and Materials.

ASTM C702, (2018), "Practice for Reducing Field Samples of Aggregate to Testing Size", American Society for Testing and Materials.

-ASTM C856, (2020), "Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete" American Society for Testing and Materials.

Study on Alkali Silica Reactivity of Aggregates at Concrete Pavements with Describing a Method for Reducing the Risk of Deterioration in Concrete

Ali Dousti, Assistant Professor, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.
Sohrab Veiseh, Assistant Professor, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

E-mail: a.dousti@bhrc.ac.ir

Received: September 2022- Accepted: February 2023

ABSTRACT
The aggregates as a prominent part of concrete mixture have significant impact on durability and strength of concrete pavements. One of the most important problems attributed to some part of aggregates in Iran are reported to possibly deleterious alkali silica reaction between the hydroxyl ions (OH^-) in the pore solution and reactive silica in the aggregate over the time. So, investigation of alkali-silica reaction potential for aggregate in this area in addition to identifying appropriate preventive measures to minimize the risk of expansion is so invaluable because of high consumption of these suspicious materials in the construction of concrete pavements. This study presents evaluation of alkali silica reactivity potential of Mazandaran and Guilan aggregates using petrography examination of aggregate according to ASTM C295, alkali silica reactivity mortar bar testing according to ASTM C1260 and determination of length change of concrete due to alkali silica reaction according to ASTM C1293. Selecting appropriate preventive measures to minimize the risk of expansion when deleterious reactive aggregates are used in concrete pavements are described in following. Based on results obtained in present study, it was observed that about 30 and 50 percentages of aggregates placed in two studied province of Mazandaran and Gilan respectively, has high alkali silica reactivity. Furthermore, preventive measures including limiting the alkali loading of the concrete to 1.8 kg/m3, substitution supplementary cementations materials such as silica fume to amount of 7%, or a combination of these strategies was suggested for use of high alkali silica reactivity aggregates in concrete pavements.

Keywords: Preventive Measures, Concrete Durability, Concrete Pavements, Alkali Silica Reaction