A study of alkali silica reactivity of some of aggregates used in concrete in the west of Iran (Research Note)

Ali Dousti*
Assistant Professor, Faculty member of Road, Housing & Urban Development Research Center, Tehran, Iran
a.dousti@bhrc.ac.ir

sohrab Veiseh
Assistant Professor, Faculty member of Road, Housing & Urban Development Research Center, Tehran, Iran

Abstract
The aggregates as a prominent part of concrete mixture have significant impact on durability and strength of concrete. 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 is so invaluable because of high consumption of these suspicious materials in the construction of varied hydraulic structures.
In present study, alkali silica reactivity of aggregate in a number of mines in West of Iran including Zanjan, Kermanshah and Kordestan province has been investigated comprehensively. In this regard, in order to evaluate alkali silica reactivity of aggregates, 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 was used. Based on results obtained in present study, it was concluded that alkali silica reactivity was observed at a number of aggregates placed in every three studied province. Furthermore, in order to using of these aggregate at concrete structures exposed to water, preventive action including using low alkali cement or pozzolan could be useful.
Keywords*: Concrete durability, Aggregate, Concrete structures, Hydraulic structure, Alkali silica reaction..*

مطالعه پتانسیل واکنش زایی قلیایی سیلیسی سنگدانه های تعدادی از معادن شن و ماسه مورد استفاده در بتن در غرب ایران (یادداشت فنی)

دریافت مقاله: ۰۱-۰۹-۱۴۰۰
پذیرش مقاله: ۲۸-۰۹-۱۴۰۰

علی دوستی
استادیار، عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
a.dousti@bhrc.ac.ir

سهراب ویسه
استادیار، عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات راه مسکن و شهرسازی

چکیده

سنگدانه‌ها به عنوان یکی از اجزاء اصلی بتن، تاثیر بسزایی بر مقاومت و دوام بتن خواهند داشت. یکی از مشکلات مهم سنگدانه‌های برخی نقاط کشور، احتمال واکنش‌زایی قلیایی سیلیسی بین سیلیس سنگدانه‌ها و قلیایی‌های موجود سیمان در آب حفره ای بتن در طول زمان است. به دلیل استفاده این سنگدانه‌ها در ساخت و سازهای مختلف به ویژه سازه‌های هیدرولیکی، ارزیابی دقیق این مصالح از نظر واکنش‌زایی با قلیایی‌های سیمان از اهمیت قابل توجهی برخوردار است.

در پژوهش حاضر ، به مطالعه و ارزیابی پتانسیل سنگدانه¬های تعدادی از معادن استان زنجان، کرمانشاه و کردستان پرداخته شده است. در این مطالعه جهت ارزیابی پتانسیل واکنش¬زایی مصالح از 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 استفاده شد. بر اساس نتایج ، مشاهده گردید که پتانسیل واکنش‌زایی در برخی از معادن سطح هر سه استان¬ وجود دارد. بنابراین در جهت استفاده از این سنگدانه ها در سازه های بتنی در تماس با رطوبت، اقدامات پیشگیرانه همچون استفاده از سیمان‌های کم قلیا یا پوزولان با مقدار مشخص و بهینه می¬تواند مفید باشد.

کلمات کلیدی: دوام بتن، سنگدانه، سازه بتنی، سازه هیدرولیکی، 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 متداوم تر 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. به علاوه 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 [۱-۳].

هدف از این پژوهش، بررسی واکنش‌زایی قلیایی سیلیسی سنگدانه‌های تعدادی از معادن با اهمیت سطح سه استان زنجان، کرمانشاه و کردستان به کمک روشهای آزمایشگاهی است. در انتخاب این معادن سعی شده است تا پارامترهایی همچون میزان تولید زیاد، گستردگی معادن در سطح استان، مورد استفاده در پروژه های عمرانی بزرگ و از جهتی ملی و غیره لحاظ شده است. جهت اطمینان از واکنش¬زایی، در این پژوهش از سه آزمون پتروگرافی سنگدانه طبق استاندارد ASTM C295، آزمون کوتاه مدت و تسریع شده منشور ملات مطابق استاندارد ASTM C1260 و آزمون دراز مدت منشور بتنی مطابق استاندارد ASTM C1293 استفاده شده است.

۲- ساز و کار واکنش قلیایی سیلیسی سنگدانه:

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 می¬شود. پارامترهایی که باعث بروز واکنش قلیایی سیلیسی می‌شوند شامل سیلیس فعال در سنگدانه، قلیایی به میزان کافی در آب حفره ای و رطوبت می باشند که در ادامه درخصوص هر یک توضیحاتی ارائه شده است.

الف) سیلیس فعال در سنگدانه: به طور کلی دو گروه کلی از کانی‌های سیلیسی شامل ۱) سیلیس‌های ناپایدار (شامل اپال، کالسدونی، تریدیمیت و کریستوبالیت) که شامل تعدادی از شکل‌های کوارتز نامنظم هستند و ۲) آلومینو سیلیکات‌های شیشه‌ای قادر هستند تا با قلیایی‌ها واکنش شدیدی انجام دهند[۴-۵]. مطالعات مختلف و موجود در ادبیات فنی نشان می‌دهد که در شرایط مساعد سیلیس‌های بی‌شکل درpHهای بالا خیلی راحت‌تر از کوارتزهای بلورین حل می‌شوند[۶]. فراوان‌ترین نوع سنگدانه خطرناک و مورد استفاده آنهایی هستند که حاوی سیلیس غیربلورین یا به طور ضعیف یا ناقص متبلور شده می‌باشند. به همین منظور همواره توصیه شده است که اولین قدم در شناسایی و آزمون واکنش‌زایی سنگدانه¬ها انجام بررسی سنگ‌شناسی باشد. به دلیل تفاوت تاریخچه زمین‌شناسی هر منطقه با منطقه دیگر این امکان وجود دارد که یک نوع سنگ در یک ناحیه واکنش‌زا و همان سنگ در ناحیه دیگری غیرواکنش‌زا تشخیص داده شود. بنابراین طبقه‌بندی سنگ‌ها به لحاظ واکنش‌زایی باید از الگوی محلی ویژه همان ناحیه یا بخش پیروی کند. بر اساس طبقه‌بندی RILEM AAR-1 [7] سنگدانه¬ها به سه

دسته تقسیم می‌شوند که عبارتند از: ۱) سنگدانه‌هایی که احتمال واکنش‌زایی کمی دارند ۲) سنگدانه‌هایی که از نظر واکنش‌زایی مشکوک هستند و ۳) سنگدانه‌هایی که احتمال واکنش‌زایی زیادی دارند. همچنین باید خاطر نشان کرد که علاوه بر خاصیت کانی شناسی سنگدانه، میزان تخلخل و نفوذپذیری سنگدانه نقش به سزایی در واکنش‌پذیری آنها ایفا خواهد کرد]۵، ۸ [.

ب) وجود قلیایی‌ها به میزان کافی در آب حفره‌ای بتن: مهمترین منبع داخلی قلیایی بتن، سیمان است. در حالی که اجزای دیگری همچون سنگدانه، مواد سیمانی و افزودنی‌های معدنی و شیمیایی نیز ممکن است موجب افزایش قلیایی بتن شوند. اگرچه پوزولان‌ها در ساختار خود دارای مقداری قلیایی هستند و این مسئله به لحاظ واکنش‌های قلیایی سیلیسی نکته‌ای منفی است، با این حال مطالعات اخیر نشان داده است که نهایتاً آنچه که موجب خواهد شد تا استفاده از پوزولان‌ها باعث کاهش انبساط ناشی از واکنش‌های قلیایی سیلیسی شود مربوط به کاهش مقدار قلیایی موجود در آب حفره ای بتن است]۴[. به منظور بررسی قلیایی‌ها در آب حفره‌ای بتن بر اساس استاندارد باید از قلیایی معادل (Na2Oeq = Na2O + 0.658 K2O) بر حسب درصد وزنی استفاده نمود. همواره برای یک سنگدانه مشخص حداکثری برای مقدار معادل قلیایی تعریف می‌شود که برای مقادیر کمتر از آن، سنگدانه واکنش نشان نخواهد داد. بنابراین با کاهش میزان pH آب حفره‌ای بتن می‌توان از رخداد واکنش قلیایی سیلیسی جلوگیری به عمل آورد]۹-۱۲[. مطابق ادبیات فنی حاضر محققین مختلفی این غلظت را ۲۰۰ تا ۳۰۰ میلی مول بر لیتر یا مقدار pH نزدیک به ۱۳/۳ تا ۱۳/۵گزارش کرده اند] ۱، ۱۴-۱۷[.

ج) رطوبت: عموماً برای رخداد واکنش قلیایی سیلیسی، یک منبع رطوبت مورد نیاز می باشد. این منبع رطوبت علاوه بر سبب شکل‌گیری ژل موجب خواهد شد تا همواره در طول عمر سازه بتنی ژل با جذب رطوبت انبساط بیشتر و تخریب و ترک بیشتری را همراه داشته باشد.بر اساس مشاهدات عینی مشخص شده است که در محیطی با رطوبت کمتر از ۸۰٪، مشروط بر این که تنها منبع رطوبت، هوا باشد به‌طور کلی یا آسیبی متوجه سازه بتنی نخواهد شد و یا پیشرفت واکنش پس از طی مدتی عملاً متوقف خواهد شد [۱۷].

با توجه به توضیحات ارائه شده بنابراین بهترین راهکار جهت جلوگیری از رخداد این واکنش تشخیص امکان رخداد آن از طریق تعیین پتانسیل واکنش زایی سنگدانه پیش از استفاده در بتن می باشد. به طور کلی آزمایش‌های ارزیابی واکنش قلیایی-سیلیسی سنگدانه‌ها به دو دسته روش‌های مستقیم ارزیابی سنگدانه و روش‌های غیرمستقیم تقسیم بندی می‌شوند. روش های مستقیم ارزیابی عبارتند از:

- آزمایش سنگ‌شناسی (ASTM C295) [۱۸]

و آزمایش‌های غیرمستقیم عبارتند از:

- واکنش‌زایی قلیایی بالقوه ترکیب‌های سیمان – سنگدانه (روش منشور ملات- ASTM C227) [۱۹]
- آزمایش کوتاه‌مدت روی منشور ملات در سود ۱ نرمال (ASTM C1260)[۲۰]
- آزمایش درازمدت بتن ساخته شده از سنگدانه‌های مورد نظر در بخار آب و سود ۱ نرمال (ASTM C1293)[۲۱]

باید خاطر نشان کرد که استاندارد ASTM C227 [۱۹] 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 [۲۲]. بر اساس مطالعات مختلف انجام شده در مورد روش‌های مختلف اندازه‌گیری پتانسیل واکنش قلیایی سیلیسی [۲۳] 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. به همین منظور در مطالعه حاضر از این دو روش استفاده گردید.

۳- برنامه آزمایشگاهی:

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

به منظور بررسی واکنش‌زایی قلیایی سیلیسی سنگدانه‌های استان‌های زنجان، کرمانشاه و کردستان، به ترتیب از سنگدانه‌های ریز و درشت ۴ معدن در سطح استان زنجان، ۷ معدن در سطح استان کرمانشاه و ۴ معدن در سطح استان کردستان نمونه برداری به عمل آمد. همانطور که پیش تر توضیح داده شد نمونه برداری‌ها از سطح استان و از شهرستان‌های مختلف بعمل آمد. همچنین نمونه برداری 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 [۲۴] کاهش یافت. آنگاه به منظور ساخت منشورهای ملات سنگدانه ریز مطابق استاندارد ASTM C1260، دانه بندی گردیدند.

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 ۱ آنالیز شیمیایی آن گزارش شده است. همچنین طبق جدول ۱ مشاهده می‌شود که معادل قلیایی سیمان تیپ ۲ تهران کمتر از ۰/۶ درصد محاسبه شده است که در گروه سیمان‌های کم قلیا قرار دارد.

جدول ۱. 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	۲۱/۶	۶۳/۳	۴/۴۵	۴/۴	۱/۴	۲/۶	۱/۱	۰/۴۴
سیمان تیپ ۱-۴۲۵	۲۲/۰	۶۲/۲	۴/۹	۳/۸	۱/۸	۲/۹	۱/۶	۰/۵۸

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

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

سنگدانه مصرفی: به منظور بررسی بلند مدت واکنش‌زایی قلیایی سیلیسی سنگدانه‌های معادن مذکور، پس از مشخص شدن نتایج پتانسیل واکنش‌زایی مطابق ASTM C1260، ساخت منشور بتنی برای آزمایش بلند مدت تنها بر روی مصالح ریزدانه و درشت دانه ای انجام گردید که طبق استاندارد ASTM C1260 واکنش زا یا مشکوک به واکنش‌زایی گزارش شدند. به همین منظور برای بررسی واکنش‌زایی ریزدانه مشکوک در ساخت مخلوط بتن، از مصالح ریزدانه مشکوک به واکنش‌زایی با درشت دانه غیرواکنش زا مطابق تعریف مطرح شده در استاندارد استفاده شد. در مورد مصالح درشت دانه مشکوک به واکنش‌زایی نیز مطابق تعریف استاندارد از مصالح ریزدانه غیرواکنش زا استفاده گردید.

سیمان: به منظور اندازه‌گیری پتانسیل واکنش قلیایی سیلیسی مطابق استاندارد ASTM C1293 از سیمان تیپ ۱ تهران با رده ۴۲۵ و با مشخصات و آنالیز شیمیایی ارائه شده در جدول ۱ استفاده شد.

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

۳-۳- طرح‌های مخلوط ساخته شده:

در مطالعه حاضر همانطور که پیش تر توضیح داده شد به منظور بررسی مستقل واکنش‌زایی سنگدانه‌های ریز و درشت از تولیدات ۱۵ معدن مختلف و فعال در سطح استان‌های زنجان (۴ کارگاه)، کرمانشاه (۷ کارگاه) و کردستان

(۴ کارگاه) نمونه برداری بعمل آمد و بر روی تولیدات شن و ماسه هر ۱۵ معدن آزمون پتروگرافی سنگدانه و ملات منشور تسریع شده طبق استاندارد ASTM C1260 انجام پذیرفت. در ادامه و با مشخص شدن نتایج آزمون تسریع شده، بر روی نمونه‌های مشکوک به واکنش زایی یا واکنش زا آزمون بلندمدت منشور بتنی طبق استاندارد ASTM C1293 انجام پذیرفت که در بخش بعدی نتایج حاصل به تفصیل ارائه شده است. لازم به ذکر است که کارگاه های مورد مطالعه در استان زنجان در این مقاله با نام های Z1 تا Z4، کارگاه های استان کرمانشاه با نام های K1 تا K7 و کارگاه های استان کردستان با نام های C1 تا C4 نام گذاری شده اند.

۴- نتایج حاصل به همراه بحث و بررسی:

مطابق جدول ۲ و بطور خلاصه شکل های ۱ تا ۳، به منظور بررسی پتانسیل واکنش‌زایی معادن مختلف مطابق استاندارد ASTM C1260 برای هر دو محصول ریزدانه و درشت دانه ملات منشوری ساخته شد و مطابق استاندارد روش آزمون، اندازه‌گیری‌ها و قرائت انبساط منشورها تا مدت زمان ۳۵ روز به عمل آمد. همان طور که مشاهده می‌شود مطابق تعریف استاندارد، برای سنگدانه‌های ریز کارگاه‌های Z1 از استان زنجان، K1، K2، K4، K6 و K7 از استان کرمانشاه و C1 و C3 از استان کردستان و سنگدانه‌های درشت Z1، Z2 و Z3 از استان زنجان، K1 تا K7 از استان کرمانشاه و C1 و C3 از استان کردستان پس از مدت زمان ۱۴ روز، انبساطی کمتر از ۰/۱ درصد گزارش گردید. لذا طبق استاندارد، این سنگدانه‌ها احتمالاً غیرواکنش‌زا می‌باشند. درحالی‌که برای سنگدانه ریز کارگاه‌های Z2، K3، K5 و C2 و سنگدانه درشت کارگاه های Z2، Z3 و C2 پس از ۱۴ روز میزان انبساط منشور ملات بزرگتر از ۰/۱ و کوچکتر از ۰/۲ درصد گزارش شده که در رده مشکوک به واکنش‌زایی قرار دارند. در نهایت میزان انبساط منشور ملات برای سنگدانه ریز کارگاه‌های Z3، Z4 و C4 و سنگدانه درشت کارگاه‌های Z4 و C4، مقدار انبساط منشور ملات عملاً بزرگتر از ۰/۲ درصد محاسبه شده است و طبق استاندارد این سنگدانه‌ها واکنش‌زا تلقی می‌گردند. همانطور که در شکل‌ها مشخص می‌باشد به منظور شناخت و اطمینان بیشتر از رفتار این مصالح، قرائت انبساط منشور ملات‌ها تا مدت زمان ۳۵ روز ادامه داده شد و مطابق شکل‌های ۱ تا ۳، مشاهده گردید که شیب نمودار انبساط برای اغلب طرح‌ها همواره تند محسوب می‌شود لذا به منظور اطمینان از واکنش‌زایی سنگدانه‌های مشکوک به واکنش‌زایی و سنگدانه‌های واکنش‌زا همانطور که پیش‌تر ذکر شد آزمایش‌های تکمیلی همچون آزمون دراز مدت منشور بتن مطابق ASTM C1293 و آزمون پتروگرافی سنگدانه مطابق ASTM C295 انجام پذیرفت که در ادامه توضیح داده خواهد شد. همچنین مطابق شکل‌های ۱ تا ۳، براساس نتایج حاصل مشاهده می‌گردد که شدت واکنش‌زایی مصالح (میزان انبساط منشور ملات‌ها) در استان زنجان به مراتب نسبت به دو استان کرمانشاه و کردستان شدیدتر می‌باشد. از طرف دیگر براساس نتایج حاصل مشاهده می‌گردد که اغلب، شدت واکنش‌زایی و پتانسیل منشورهای ملات برای نمونه‌های ماسه نسبت به شن به مراتب بیشتر می‌باشد. در واقع با ریزتر شدن دانه‌ها علاوه بر تاثیر شکست و خردشدگی دانه‌ها بر مورفولوژی و ساختار سنگدانه‌ها، موجب افزایش سطح تماس آنها با خمیر سیمان و نهایتاً افزایش واکنش‌زایی گردد. لذا این مسئله باعث شده است که در عمل، این واکنش برای ماسه از اهمیت بیشتری نسبت به شن برخوردار گردد.

در خصوص نتایج آزمون بلند مدت، مطابق شکل‌های ۱ تا ۳، نمودارهای انبساط قرائت شده تا مدت زمان یک سال برای برخی از منشورهای بتنی ساخته شده با سنگدانه‌های ریز و درشت مشکوک به واکنش‌زایی در کنار نمودارهای آزمون تسریع شده ملات منشوری ارائه شده است. از طرف دیگر مقدار انبساط منشورهای بتنی برای تمامی طرح‌ها مطابق جدول ۳ ارائه شده است. همچنین نتایج آزمون پتروگرافی بر روی سنگدانه‌های ریز و درشت مورد آزمون مطابق جدول ۴ با جزئیات کامل ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد برای استان زنجان سنگدانه‌های ریز و درشت کارگاه های Z2، Z3 و Z4 واکنش‌زا (دارای انبساط بزرگتر از ۰/۰۴ درصد) گزارش شده است. در واقع نتایج آزمون دراز مدت مطابق ASTM C1293 هم راستا با آزمون تسریع شده طبق استاندارد ASTM C1260،

سنگدانه‌هایی را که مشکوک بـه واکـنش زایـی بودنـد واکـنش زا گـزارش نمـوده اسـت. مطـابق شـکل‌هـای ۲ و ۳، بـرای بقیـه مصالح سنگی ریز و درشت در استان‌هـای کرمانشـاه و کردسـتان کـه آزمـون دراز مـدت بـرای آنهـا انجـام شـده، بـه جـز یـک مورد (شن کارگـاه K4)، نتـایج حاصـل از ایـن دو آزمـون کـاملا هـم راسـتا و منطبـق بـرهم مـی‌باشـند بطوریکـه در مـواردی کـه سـنگدانه طبـق آزمـون ASTM C1260 غیـر واکـنش زا بـوده بـر اسـاس ASTM C1293 نیـز غیـر واکـنش زا گـزارش شده اسـت و در اغلـب مواردیکـه سـنگدانه طبـق اسـتاندارد ASTM C1260 واکـنش‌زا یـا مشـکوک بـه واکـنش‌زایـی بـوده در نهایـت واکـنش‌زا گـزارش شـده اسـت. ایـن همراهـی و هـم راسـتا بـودن، نتیجـه مهمـی اسـت کـه پـیش‌تـر در اسـتاندارد ASTM C1778 به آن اشاره شده است. البتـه بـر اسـاس ایـن اسـتاندارد مـواردی نیـز بصـورت اسـتثناء ذکـر شـده اسـت کـه طبـق اسـتاندارد ASTM C1260 واکـنش زا یـا غیـر واکـنش زا گـزارش گردیـده و در ادامـه طبـق ASTM C1293 عکـس آن گزارش شده اسـت. بـه همـین منظـور همـواره توصـیه شـده اسـت کـه در کنـار آزمـون‌هـایی چـون پتروگرافـی و منشـور تسریع شده ملات جهت اطمینان کافی و عدم پذیرش ریسک در محاسبات بعدی، آزمون درازمدت انجام پذیرد.

جدول ۲. مقادیر انبساط منشورهای ملات طبق استاندارد ASTM C1260

کارگاه	۳ روزه	۷ روزه	۱۴ روزه (٪)	۲۱ روزه (٪)	۲۸ روزه	۳۵ روزه
سنگدانه ریز						
Z1	۰/۰۰۱	۰/۰۰٤	**۰/۰۵۱**	۰/۰۵۱	۰/۰۵۹	۰/۰٦۷
Z2	۰/۰۱۷	۰/۰۵۱	**۰/۱۳۵**	۰/۱٦۵	۰/۱۸۸	۰/۲۲۷
Z3	۰/۰۸۱	۰/۲۵۸	**۰/۳۹۸**	۰/٤٤۱	۰/٤۷٤	۰/۵۲۹
Z4	۰/۱۱٤	۰/۳۳۲	**۰/٤۲۵**	۰/٤۹۸	۰/۵٤۳	۰/٦۰۱
K1	۰/۰۰۱	۰/۰۰۷	**۰/۰٤٤**	۰/۰٤۵	۰/۰۵۱	۰/۰۵۵
K2	۰/۰۰۲	۰/۰۱۸	**۰/۰۲۰**	۰/۰۳۸	۰/۰۳۹	۰/۰٤۲
K3	۰/۰۰۱	۰/۰٦٦	**۰/۱۸۷**	۰/۲۳۹	۰/۲٤۸	۰/۲٦۲
K4	۰/۰۰۳	۰/۰۵۳	**۰/۰۵۵**	۰/۰۵۹	۰/۰٦۳	۰/۰٦۷
K5	۰/۰۱۰	۰/۰۷۰	**۰/۱۱۷**	۰/۱۵۲	۰/۱۹۵	۰/۱۹۸
K6	۰/۰۳۰	۰/۰۳۸	**۰/۰٤۱**	۰/۰٤۷	۰/۰۵۱	۰/۰۵۷
K7	۰/۰۰۱	۰/۰۰٤	**۰/۰۰۹**	۰/۰۱٦	۰/۰۲۰	۰/۰۲۷
C1	۰/۰۰۹	۰/۰۲۹	**۰/۰٤۱**	۰/۰٤۹	۰/۰۸٤	۰/۰۹۱
C2	۰/۰۱٤	۰/۰۷۵	**۰/۱۳۲**	۰/۲٤۱	۰/۳۱۹	۰/۳۲۱
C3	۰/۰۰٤	۰/۰۲۱	**۰/۰۹۸**	۰/۱۰۷	۰/۱۱۳	۰/۱۱۹
C4	۰/۰۳۱	۰/۱٦۷	**۰/۲۰٦**	۰/۲۹۹	۰/۳۵۵	۰/۳٦٦
سنگدانه درشت						
Z1	۰/۰۱۳	۰/۰٤۷	**۰/۰٦۰**	۰/۰٦۵	۰/۰۷۳	۰/۰۷۵
Z2	۰/۰۲۲	۰/۰۹۰	**۰/۱٦۸**	۰/۲۱۵	۰/۲۸۰	۰/۳۰
Z3	۰/۰٤۰	۰/۰۹۸	**۰/۱۳۰**	۰/۱٤٦	۰/۱۵۲	۰/۱٦۰
Z4	۰/۰۸۰	۰/۲۰۸	**۰/۳۲۰**	۰/۳۸۳	۰/٤٤۵	۰/٤۵۰
K1	۰/۰۰۲	۰/۰۰٤	**۰/۰۱۰**	۰/۰۲۰	۰/۰۳۰	۰/۰٤۰
K2	۰/۰	۰/۰۰۹	**۰/۰۰۹**	۰/۰۱۱	۰/۰۱۳	۰/۰۱۸
K3	۰/۰۰٤	۰/۰۱۱	**۰/۰۱۵**	۰/۰۱۹	۰/۰۲٦	۰/۰٤۰
K4	۰/۰۲٦	۰/۰۷۷	**۰/۰۸۳**	۰/۱۱٤	۰/۱۸٦	۰/۲۲٦
K5	۰/۰	۰/۰۰۲	**۰/۰۰۵**	۰/۰۰۷	۰/۰۱۱	۰/۰۱۸
K6	۰/۰۰۷	۰/۰۲٤	**۰/۰۳۲**	۰/۰۵٦	۰/۰٦۰	۰/۰۹۳
K7	۰/۰۰۲	۰/۰۰٤	**۰/۰۱۰**	۰/۰۲۰	۰/۰۳۰	۰/۰٤۰
C1	۰/۰۰۱	۰/۰۰٤	**۰/۰۰٦**	۰/۰۰٦	۰/۰۰۸	۰/۰۱۱
C2	۰/۰۳٦	۰/۱۳۹	**۰/۱٦۰**	۰/۲۵۸	۰/۳۹۹	۰/٤۹٤
C3	۰/۰	۰/۰۰۲	**۰/۰۰۵**	۰/۰۱۳	۰/۰۵۲	۰/۰۵۸
C4	۰/۰٤۵	۰/۲۰۲	**۰/۲٤۸**	۰/۳٦٦	۰/۳٦٦	۰/٤۰۸

جدول ۳. نتایج انبساط منشورهای بتنی طبق استاندارد ASTM C1293

کارگاه	مقدار انبساط (٪)							
	هفته ۱	هفته	هفته	هفته	هفته	هفته	هفته	هفته
سنگدانه ریز								
Z2	۰/۰۰٤	۰/۰۱۰	۰/۰۱۷	۰/۰۳٦	۰/۰۸٦	۰/۱۱٤	۰/۱۲٤	**۰/۱۳۷**
Z3	۰/۰۰٥	۰/۰۱۰	۰/۰۱۹	۰/۰۳۲	۰/۰٥۰	۰/۰۷٤	۰/۰۷٥	**۰/۰۸۱**
Z4	۰/۰۰۰	۰/۰۰٤	۰/۰۱۲	۰/۰۲٥	۰/۰۳۸	۰/۰٤۳	۰/۰٤٥	**۰/۰٤۷**
K3	۰/۰۰۲	۰/۰۰۷	۰/۰۱۱	۰/۰٤۰	۰/۰٥٥	۰/۰۷۲	۰/۰۷۸	**۰/۰۸٥**
K5	۰/۰۰٤	۰/۰۱۰	۰/۰۲۳	۰/۰۳۲	۰/۰٥۲	۰/۰٦٥	۰/۰۷۳	**۰/۰۸۳**
K7	۰/۰۰۱	۰/۰۰٥	۰/۰۰۹	۰/۰۱۰	۰/۰۱۳	۰/۰۱٥	۰/۰۱۷	**۰/۰۲۰**
C1	۰/۰۰۰	۰/۰۰۲	۰/۰۰۸	۰/۰۰۸	۰/۰۱٤	۰/۰۲۲	۰/۰۳٤	**۰/۰۳۸**
C2	۰/۰۰۰	۰/۰۰۳	۰/۰۱٥	۰/۰۲۷	۰/۰۳۳	۰/۰٤۱	۰/۰٤۹	**۰/۰٥۸**
C4	۰/۰۰۷	۰/۰۱٤	۰/۰۳٥	۰/۰٤۰	۰/۰٥۹	۰/۰٦۱	۰/۰٦۳	**۰/۰۷۱**
سنگدانه درشت								
Z2	۰/۰۱۰	۰/۰۲۹	۰/۰٦٤	۰/۰۹۹	۰/۱۰۹	۰/۱۱٥	۰/۱۲۱	**۰/۱۲۷**
Z3	۰/۰۰۷	۰/۰۱٦	۰/۰۳۹	۰/۰٥۱	۰/۰۷۸	۰/۰۹۰	۰/۰۹٤	**۰/۰۹۸**
Z4	۰/۰۰۹	۰/۰۱۹	۰/۰٦۱	۰/۰۸۱	۰/۰۸۸	۰/۰۹۱	۰/۰۹٤	**۰/۰۹۷**
K4	۰/۰۰٦	۰/۰۱۱	۰/۰۲۱	۰/۰٤۸	۰/۰۷۳	۰/۰۷۷	۰/۰۹۱	**۰/۰۹٥**
K5	۰/۰۰٥	۰/۰۱۰	۰/۰۱۸	۰/۰۲۲	۰/۰۲٦	۰/۰۳۰	۰/۰۳۲	**۰/۰۳٤**
K7	۰/۰۰۱	۰/۰۰٤	۰/۰۱٤	۰/۰۱۰	۰/۰۲۲	۰/۰۲٥	۰/۰۳۱	**۰/۰۳٦**
C2	۰/۰۰۰	۰/۰۰۲	۰/۰۱٤	۰/۰۲۳	۰/۰۳۲	۰/۰٤۷	۰/۰٦۱	**۰/۰۷۰**
C3	۰/۰۰۰	۰/۰۰۳	۰/۰۱٥	۰/۰۲۷	۰/۰۳۳	۰/۰٤۱	۰/۰٤۹	**۰/۰٥۸**
C4	۰/۰۰٥	۰/۰۱۳	۰/۰۳٤	۰/۰٤٦	۰/۰٥٥	۰/۰٥۹	۰/۰٦٥	**۰/۰٦۹**

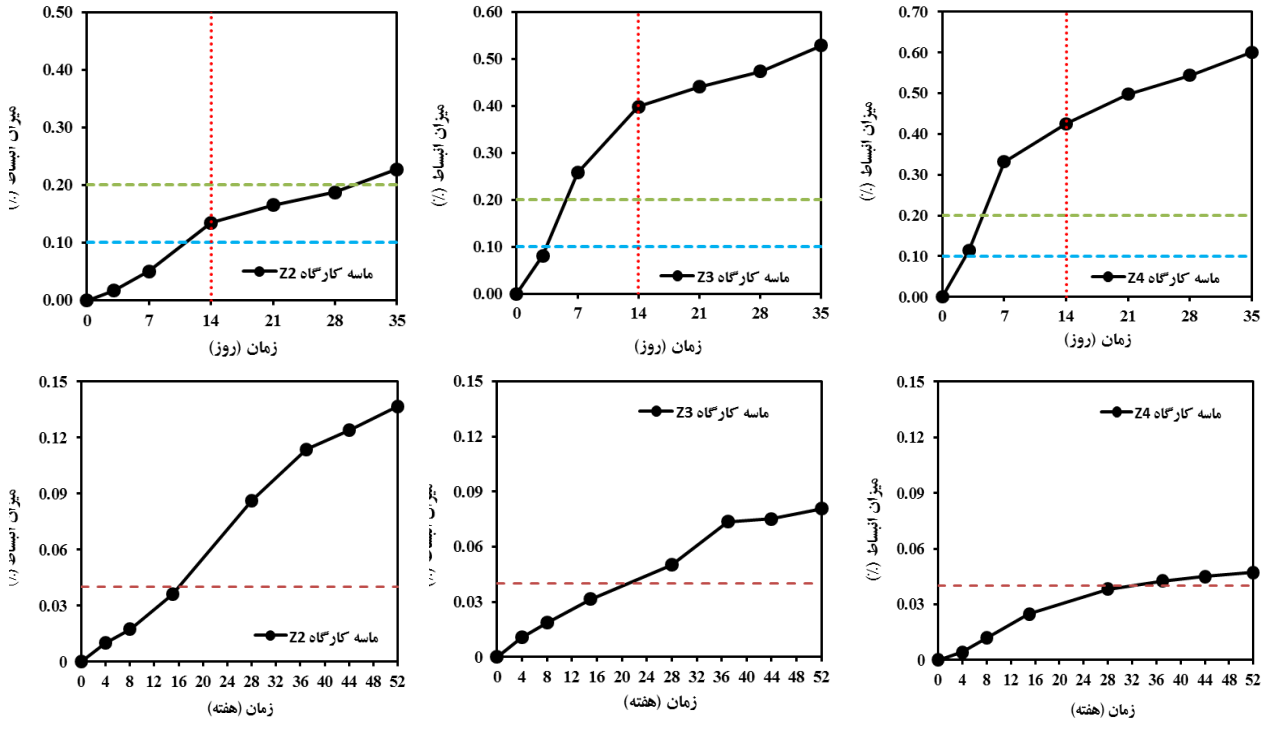
از مقایسه نمودار نتایج انبساط آزمونه‌ها طبق دو استاندارد ASTM C1260 و ASTM C1293، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که جدا از هم راستا و هماهنگ بودن این دو آزمون، برای آزمون دراز مدت، اغلب (نه در همه موارد)، نتیجه قرائت‌های ۶ ماهه اول می‌تواند تا حدی حاکی از واکنش‌زا یا غیرواکنش‌زا بودن مصالح باشد. لذا می‌توان در مدت زمان کمتری درصورت آماده بودن پاسخ آزمون‌های جانبی دیگر همچون پتروگرافی و منشور تسریع شده ملات، از واکنش‌زایی اطمینان حاصل نمود زیرا شیب نمودار در ۶ ماهه اول اغلب شدیدتر از ۶ ماهه دوم می‌باشد بطوریکه حاکی از سرعت بیشتر واکنش و نهایتاً انبساط بیشتر در این مدت می‌باشد. موضوع مهم دیگری که از مقایسه نتایج این دو آزمون بدست می‌آید این است که میان نتیجه مشکوک به واکنش‌زایی با واکنش‌زا بودن سنگدانه طبق استاندارد ASTM C1260 نمی‌بایست تفاوت چندانی قائل شد یا به عبارتی در واقع این تصور که بعضاً در میان جامعه مهندسی فرض می‌شود که مصالح مشکوک به واکنش‌زایی را می‌توان مادامیکه میزان انبساط ملات از ۰/۲ درصد بیشتر نشده و در ناحیه مشکوک به واکنش زایی قرار دارند تا حدی غیرواکنش زا تلقی نمود بسیار خطرناک

می‌باشد زیرا نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که تمامی نمونه‌های مشکوک به واکنش‌زایی طبق آزمون دراز مدت واکنش زا گزارش شده است.

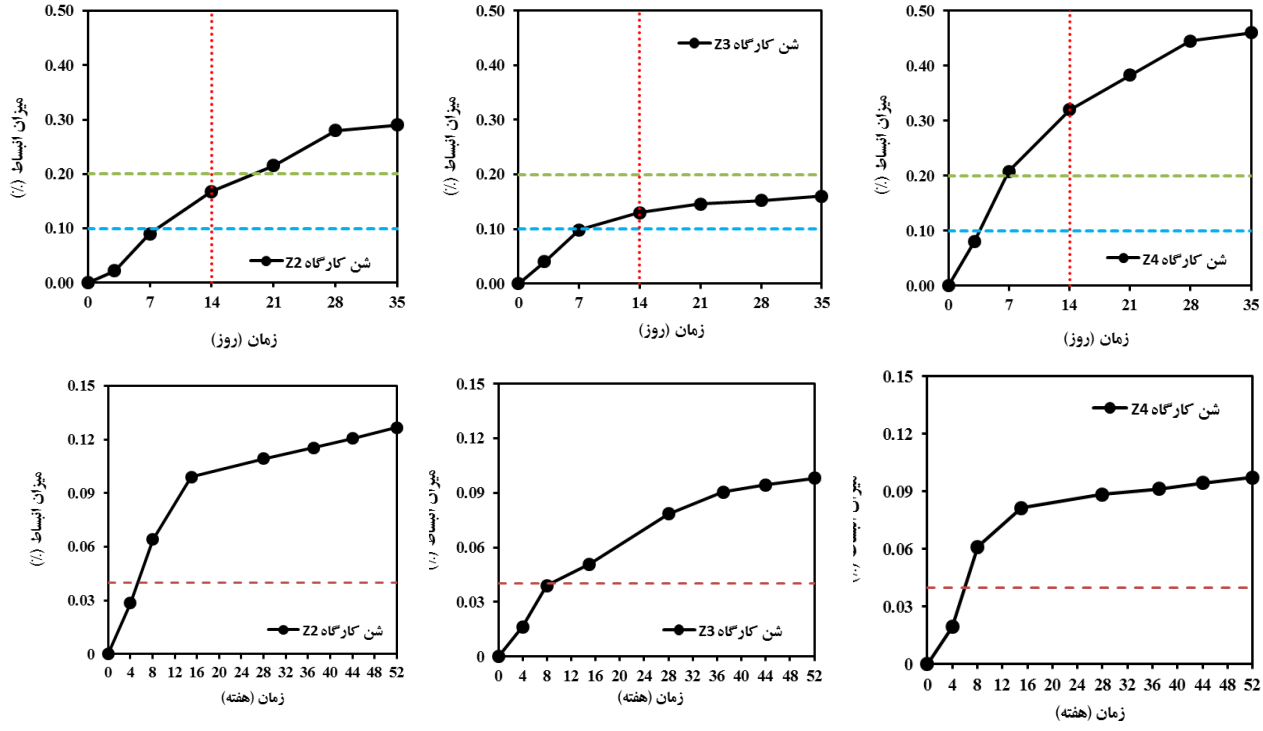
مطابق شکل ۲ و ۳، نمونه شن و ماسه کارگاه K7 و ماسه کارگاه C1 طبق آزمون تسریع شده منشور ملات غیر واکنش‌زا تلقی گردیده‌اند. مطابق آزمون پتروگرافی پتانسیل واکنش زایی در کارگاه K7 ضعیف و برای کارگاه C1 متوسط گزارش شده است. لذا جهت اطمینان از واکنش‌زایی مورد بررسی و آزمون دراز مدت قرار گرفتند که نتیجه این آزمون هم راستا با آزمون تسریع شده حاکی از غیرواکنش‌زا بودن سنگدانه‌های ریز و درشت ذکر شده می‌باشد منتها می‌بایست خاطر نشان کرد که مطابق استاندارد ASTM C1778 این امکان وجود دارد که یک سنگدانه طبق استاندارد ASTM C1260 غیر واکنش‌زا گزارش گردد در حالیکه طبق استاندارد ASTM C1293 همان سنگدانه واکنش‌زا گزارش گردد. به عنوان مثال مطابق شکل ۲ برای نمونه شن کارگاه K4 مشاهده می‌گردد که آزمون تسریع شده حاکی از غیرواکنش‌زا بودن سنگدانه می‌دهد در حالیکه بر اساس نتایج آزمون دراز مدت این سنگدانه واکنش زا گزارش شده است. با مراجعه به جدول ۴ و نتایج آزمون پتروگرافی، مشاهده می‌گردد که علت واکنش زایی و انبساط منشور بتنی، رخداد واکنش قلیایی کربناتی بوده است بطوریکه امکان ردیابی آن در آزمون تسریع شده عملاً فراهم نبوده است. به همین منظور در استاندارد ASTM C1778 تاکید شده است که مادامیکه آزمون دراز مدت انجام نشود همواره گزارش و اعلام واکنش‌زا یا غیرواکنش‌زا بودن یک سنگدانه همراه با پذیرفتن درصدی ریسک می‌باشد. از طرف دیگر انجام آزمون‌های جانبی همچون پتروگرافی (که توصیه می‌گردد پیش از دو آزمون دیگر انجام پذیرد) می‌تواند در تفسیر نتایج و آگاهی و اطمینان از وضعیت واکنش‌زایی بسیار مفید باشد.

نتایج حاصل از سه آزمون پتروگرافی، منشور ملات و منشور دراز مدت بتنی برای کلیه معادن بطور خلاصه در جدول ۵ جمع بندی شده است. با مشاهده نتایج آزمون پتروگرافی، همانطور که انتظار می‌رفت میزان شدت پتانسیل واکنش‌زایی برای سنگدانه‌های موجود از بسیارضعیف تا زیاد درجه بندی شده است. شدت پتانسیل واکنش‌زایی برای اغلب سنگدانه‌ها (به جز کارگاه C4) ضعیف و متوسط گزارش شده است و با نتایج دو آزمون دیگر کاملاً هم راستا می‌باشد، منتها به نظر می‌رسد آزمون پتروگرافی در قیاس دو آزمون دیگر شدت واکنش زایی را کمتر گزارش کرده است. به عنوان مثال برای کارگاه‌های Z2 (برای سنگدانه درشت) Z3 (برای سنگدانه درشت دانه) یا K3 (برای سنگدانه ریز)، آزمون پتروگرافی احتمال واکنش‌زایی را ضعیف پیش بینی نموده است در حالیکه هر سه نمونه بر اساس دو آزمون دیگر، واکنش‌زا گزارش شده‌اند. بنابراین همانطور که انتظار می‌رفت آزمون پتروگرافی به عنوان یکی از آزمون‌های ابتدایی، می‌تواند پتانسیل واکنش‌زایی را بصورت کیفی پیش از دو آزمون دیگر گزارش دهد، منتها نتایج این مقاله بخوبی نشان می‌دهد که به تنهایی و بدون انجام دو آزمون دیگر اتخاذ تصمیم در خصوص واکنش‌زایی مصالح با استفاده از آن با ریسک بسیار بالا همراه می‌باشد.

یکی از موارد مهم و مطرح دیگر بر اساس مطالعه حاضر این است که در برخی موارد این امکان وجود دارد که برای یک معدن یک نوع سنگدانه (معمولاً ماسه) واکنش‌زا و دیگری غیرواکنش‌زا گزارش گردد به عنوان مثال مطابق شکل ۲ و جدول ۵، برای کارگاه K5 مشاهده می‌گردد که واکنش‌زایی ماسه طبق آزمون تسریع شده مشکوک و طبق آزمون دراز مدت قطعی گزارش شده است در حالیکه برای همین معدن برای سنگدانه درشت طبق هر دو آزمون و استاندارد، سنگدانه غیر واکنش‌زا گزارش شده است. بنابراین نمی‌توان برای یک کارگاه بر اساس یک رده از شن یا ماسه برای بقیه تولیدات تصمیم گیری کرد. همانطور که پیش‌تر بیان گردید اغلب انتظار می رود که واکنش زایی برای یک معدن در سنگدانه‌های ریز گزارش گردد ولی این یک قانون کلی نیست و قطعاً استثناء وجود دارد.

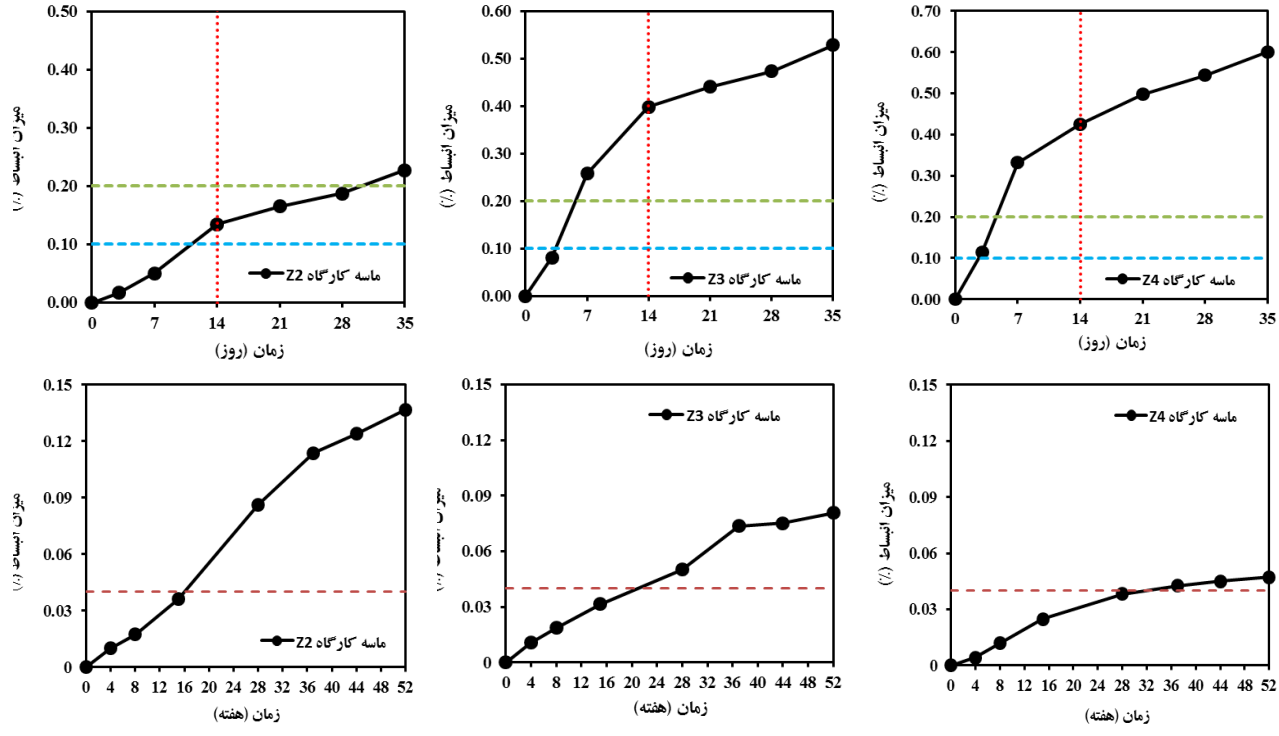


الف) سنگدانه ریز

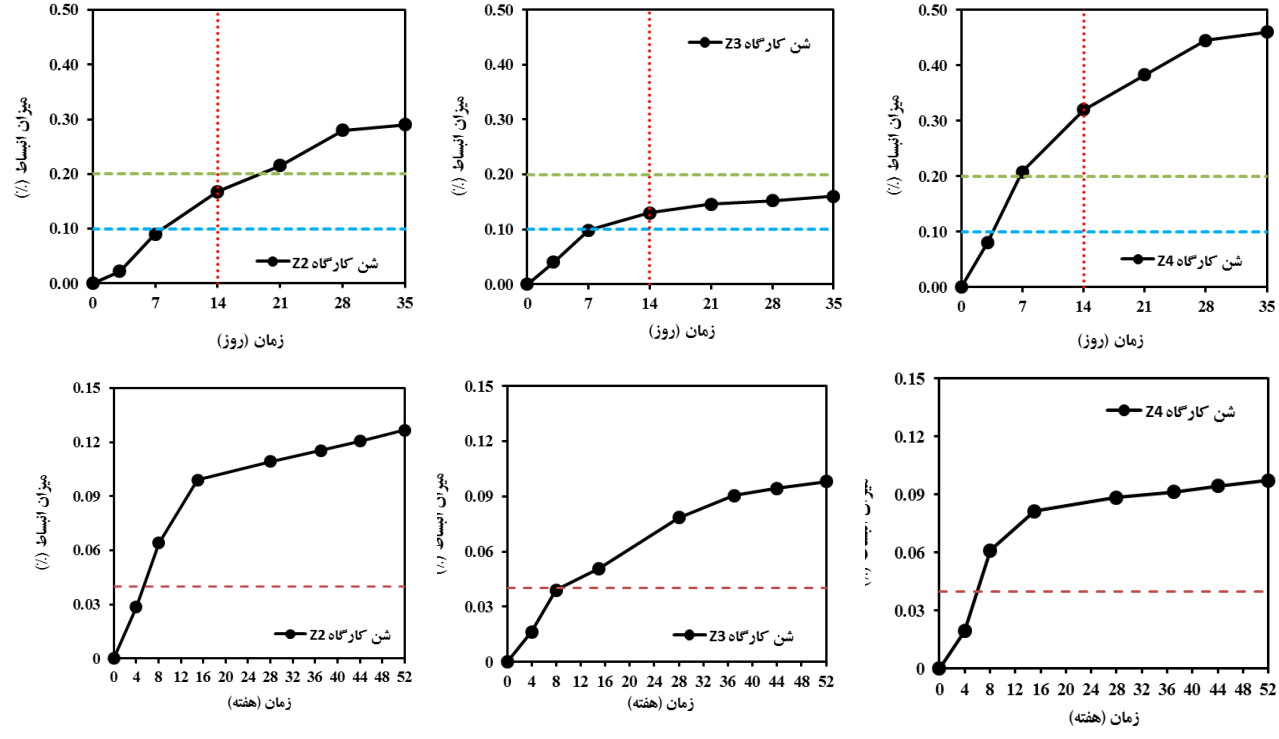


ب) سنگدانه درشت

شکل ۱. نمودارهای انبساط منشور ملات مطابق استاندارد ASTM C1260 و منشور بتنی مطابق ASTM C1293 برای سنگدانه های ریز و درشت استان زنجان

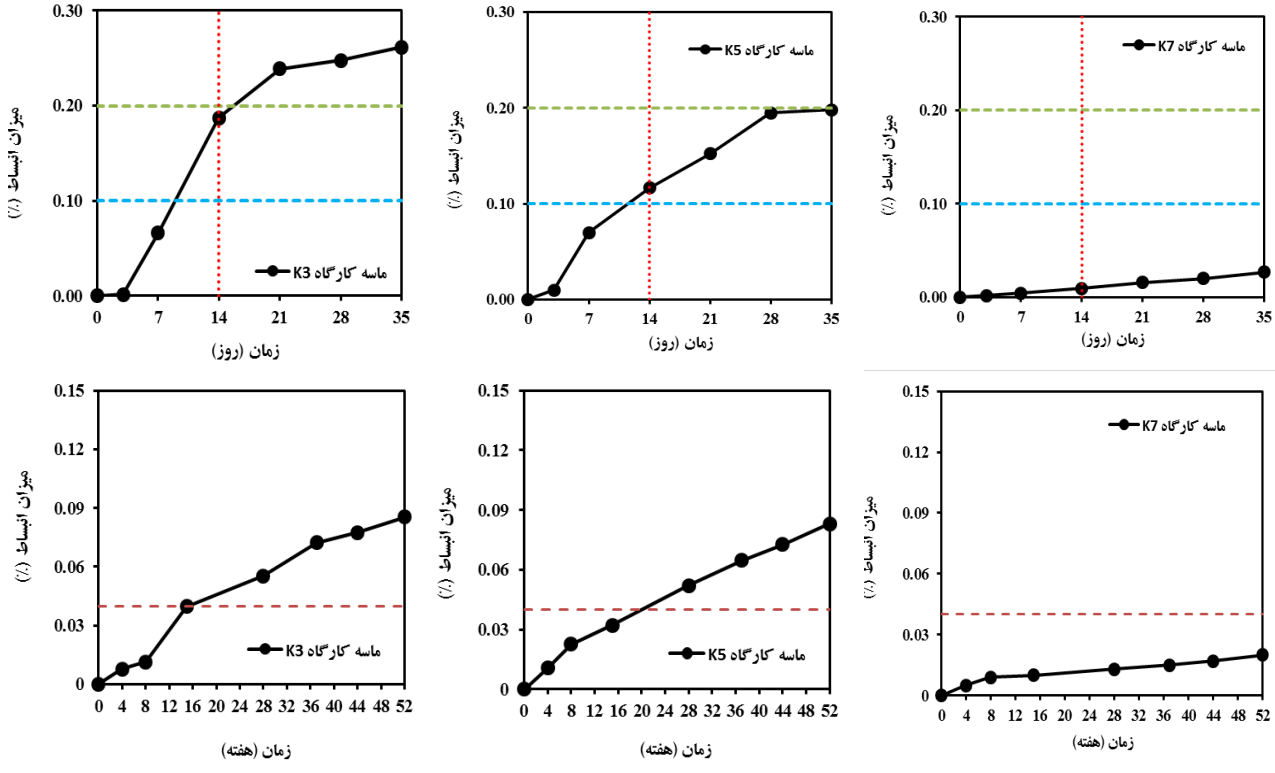


الف) سنگدانه ریز

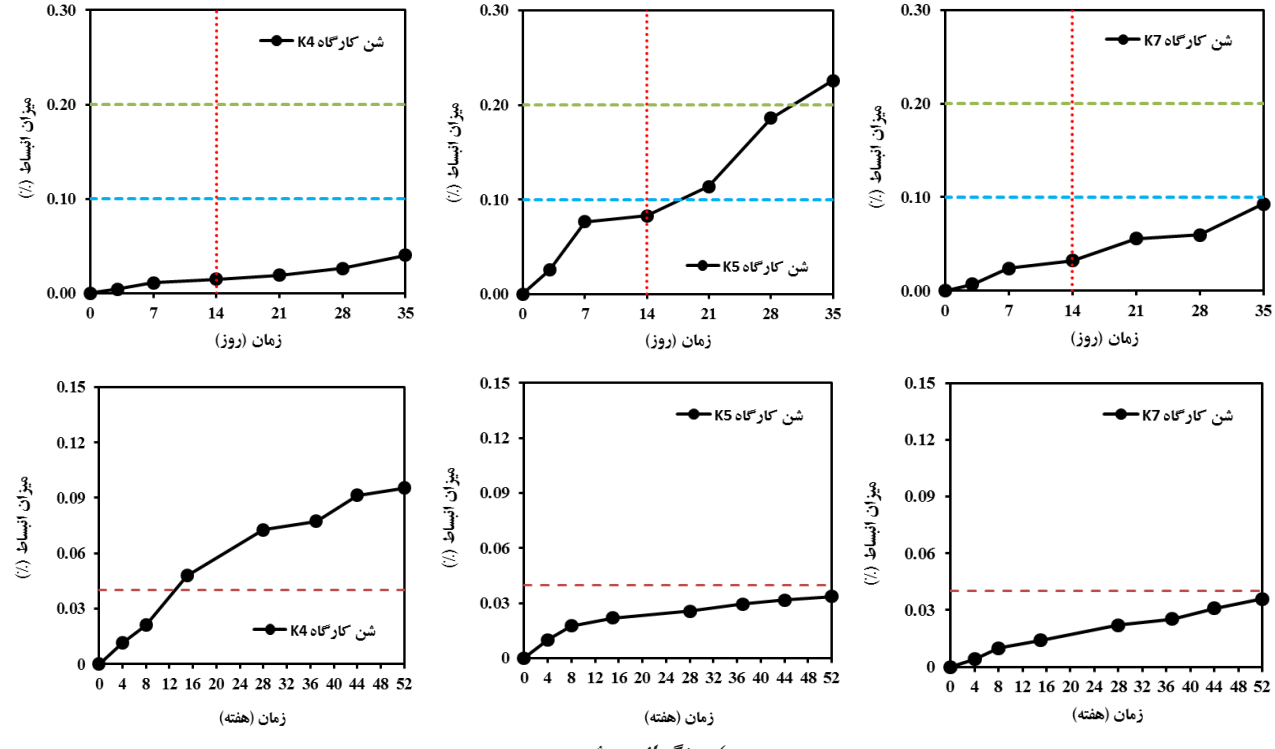


ب) سنگدانه درشت

شکل ۱. نمودارهای انبساط منشور ملات مطابق استاندارد ASTM C1260 و منشور بتنی مطابق ASTM C1293 برای سنگدانه های ریز و درشت استان زنجان

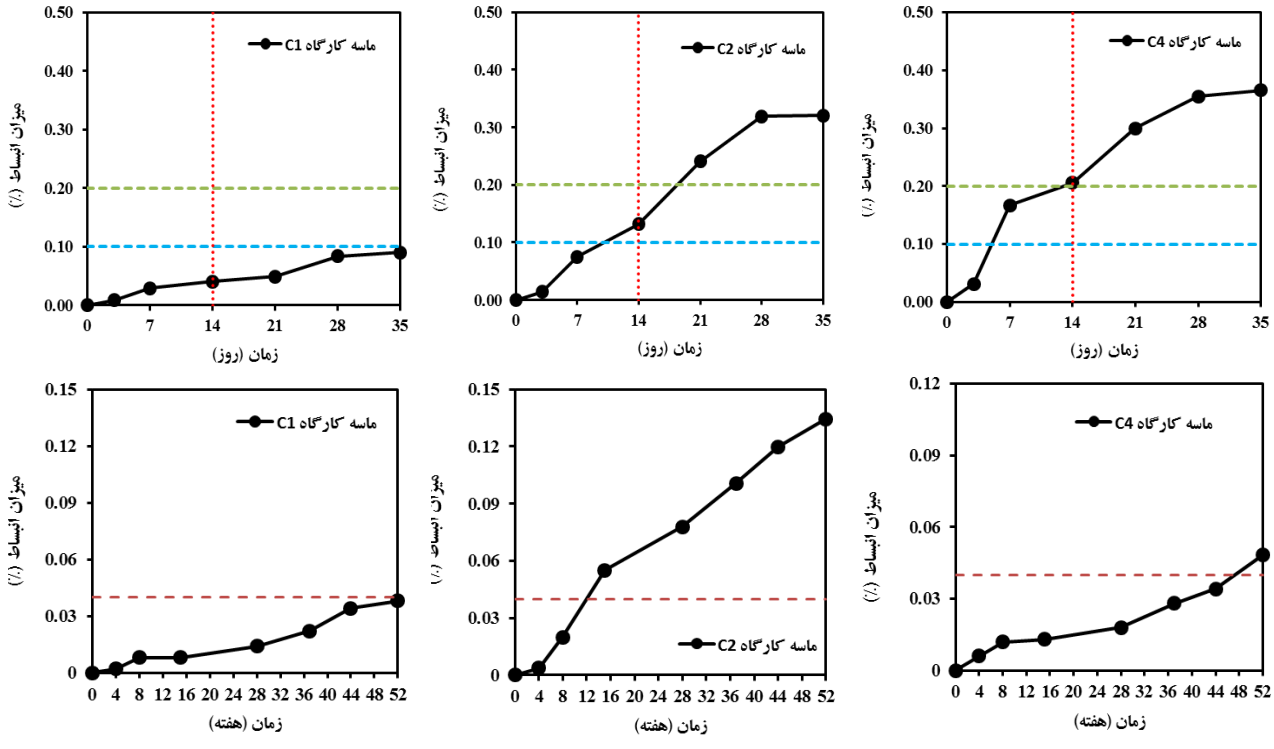


الف) سنگدانه ریز

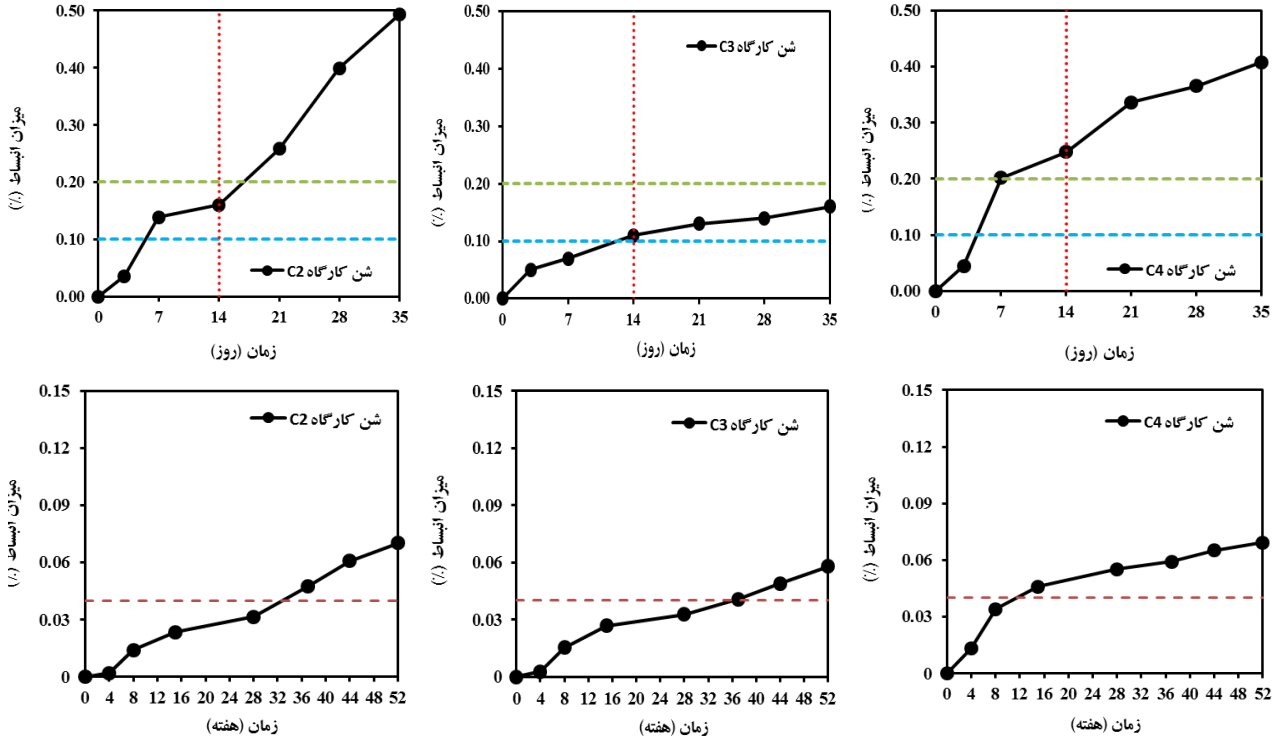


ب) سنگدانه درشت

شکل ۲. نمودارهای انبساط منشور ملات مطابق استاندارد ASTM C1260 و منشور بتنی مطابق ASTM C1293 برای سنگدانه های ریز و درشت استان کرمانشاه



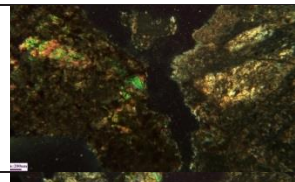
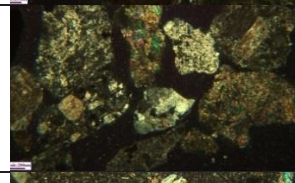
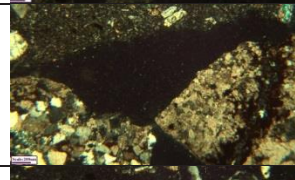
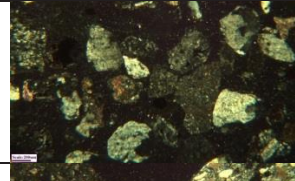
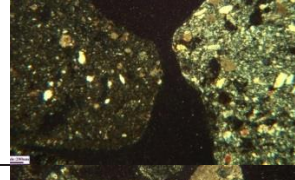
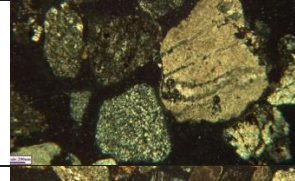
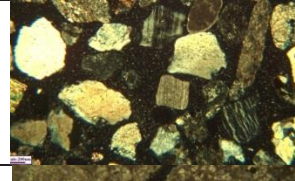
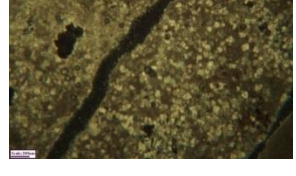
الف) سنگدانه ریز



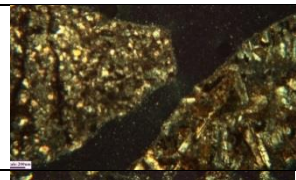
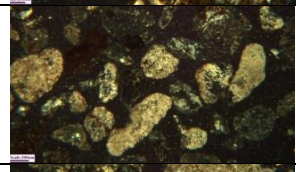
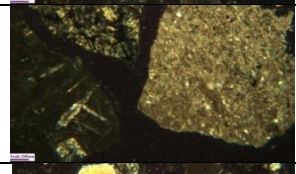
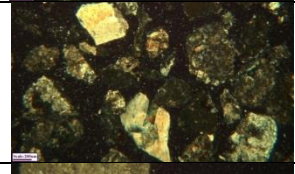
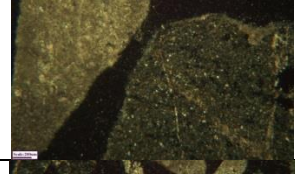
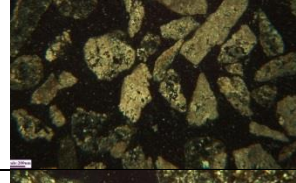
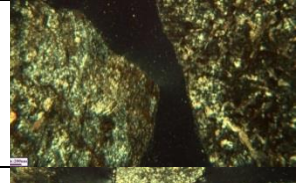
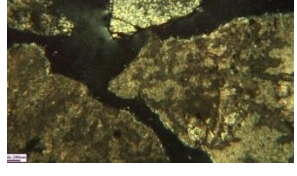
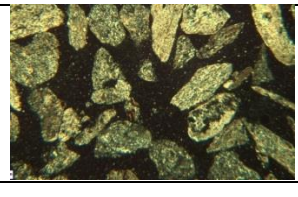
ب) سنگدانه درشت

شکل ۳. نمودارهای انبساط منشور ملات مطابق استاندارد ASTM C1260 و منشور بتنی مطابق ASTM C1293 برای سنگدانه های ریز و درشت استان کردستان

جدول ۴. نتایج حاصل از آزمون پتروگرافی طبق ASTM C295 بر روی برخی از سنگدانه‌های ریز و درشت استان‌های زنجان (Z)، کرمانشاه (K) و کردستان (C)

کارگاه	سنگدانه	نوع خرده سنگ ها و کانی های موجود	تصویر میکروسکوپی	شدت واکنش زایی قلیایی سیلیسی
Z2	درشت دانه	- قطعات ولکانیک با محدودهٔ ترکیبی مافیک - آندزیت، آندزی‌بازالت، تراکی آندزیت، بازالت، دیاباز،		ضعیف
	ریزدانه	- قطعات ولکانیک، کمتر ساب‌ولکانیک، کربناته و آواری - آندزیت، آندزی‌بازالت، تراکی آندزیت، بازالت، دیاباز		متوسط
Z3	درشت دانه	- ترکیبی از سنگ‌های ولکانیک – ساب‌ولکانیک مافیک – حدواسط - اسیدی، سنگ‌های پیروکلاستیک، رسوبی شیمیایی و آواری - پلاژیوکلاز، فلدسپار آلکالن، کوارتز، کلسیت، دولومیت، پیروکسن، کلریت، سریسیت، اپیدوت، کانی‌های رسی و شیشهٔ آتشفشانی نیمه‌آلتره و ...		ضعیف
	ریزدانه	- قطعات ولکانیک با ترکیب اسیدی تا بازیک -بازالت، آندزیت، داسیت، ریوداسیت، گرانودیوریت، دولومیت آهکی، لیتیک، میکرودیوریت، قطعات کوارتز میکروکریستالین تا پلی‌کریستالین و بعضاً فرم کلسدونی، قطعات خرده‌کانی از نوع کوارتز، فلدسپار، اپیدوت و پیروکسن و ...		متوسط
Z4	درشت دانه	- قطعات خرده سنگی عمدتاً شامل بایومیکرایت، ریوداسیت، تراکی آندزیت، آندزیت، کریستال ویتریک توف کربناته تا آرژیلتی شده - کوارتز به فرم‌های تک‌کریستال، میکرو تا کریپتوکریستال، کلسیت، پلاژیوکلاز، آلکالی فلدسپار، پیروکسن، بیوتیت، مسکویت، شیشهٔ آتشفشانی نیمه‌آلتره و ...		متوسط
	ریزدانه	- قطعات ولکانیک با ترکیب حدواسط – مافیک -کریستال ویتریک توف، آندزیت، آندزی بازالت، کریستال ویتریک توف کربناته، میکرایت، یک قطعه کوارتز دیوریت، یک قطعه میکروگرانیت و قطعات خرده کانی از نوع فلدسپارها و قطعات کوارتز پلی تا میکروکریستالین و ...		متوسط
K3	ریزدانه	- قطعات خرده سنگی شامل میکرایت، ریوداسیت، کریستال ویتریک توف، آندزیت، کوارتز آندزیت، دیوریت، میکرودیوریت، دیاباز، گرانیت، اسلیت و ... - قطعات خرده‌کانی از نوع کوارتز، فلدسپار پلاژیوکلاز، قطعات کوارتز پلی‌کریستالین و میکروکریستالین، فلدسپار آلکالن نوع میکروکلین و اورتوز و ...		ضعیف
K4	درشت دانه	قطعات خرده‌سنگی عمدتاً از نوع رسوبی کربناته بوده؛ شامل میکرایت، بایومیکرایت، دولومیت، آهک دولومیتی، دولومیت آهکی و آهک کریستالین است. کانی‌های تشکیل دهندهٔ قطعات یادشده شامل کلسیت به دو فرم میکرایتی و میکرواسپاری، دولومیت، به‌ندرت پلاژیوکلاز، آمفیبول و قطعات اوپاک می‌باشد		واکنش زای قلیایی کربناتی

ادامه جدول ۲

کارگاه	سنگدانه	نوع خرده سنگ ها و کانی های موجود	تصویر میکروسکوپی	شدت واکنش زایی قلیایی سیلیسی
K5	درشت دانه	قطعات خرده‌سنگی شامل بایو میکرایت، سنگ آهک ناخالص حاوی قطعات آواری کوارتز، آهک کریستالین، آندزیت، آهک سیلیسی، دیاباز با ترکیب میکرودیوریتی آلتره، کریستال ویتریک توف، میکرو کوراتز دیوریت آلتره و قطعات خرده‌سنگی کربناته حاوی سیدریت		بسیار ضعیف
	ریزدانه	- قطعات خرده‌سنگی میکرایت، آهک کریستالین حاوی کوارتز، کریستال ویتریک توف، میکرودیوریتِ آلتره، مونزونیت نیمه‌آلتره و ... - کانی‌های کلسیت، فلدسپات نوع پلاژیوکلاز، کوارتز، کلریت، اپیدوت، سریسیت، شیشهٔ آتشفشانی نیمه‌آلتره، سیدریت و ...		ضعیف
K7	درشت دانه	- قطعات تشکیل دهندهٔ عمدتاً از نوع ولکانیک بوده؛ در مرتبه‌های بعد قطعات ساب‌ولکانیک و سپس پلوتونیک قرار دارند - خرده سنگهای تشکیل دهنده شامل دیاباز، آندزیت، بازالت، آمفیبولیت، میکرودیوریت، میکروگابرو، گابرو، ماسه سنگ و توف کربناتی		ضعیف
C1	ریزدانه	- اغلب قطعات از نوع ولکانیک و آلتره بوده، دگرسانی‌های پروپیلیتی، کربناتی و کلریتی را نشان می‌دهند. - قطعات خرده‌سنگی شامل آندزی بازالت، آندزیت، بازالت با دگرسانی شدت بالا؛ قطعات خرده‌کانی نیز شامل فلدسپات‌ها و سرپانتین است		متوسط
C2	درشت دانه	- قطعات خرده‌سنگی عمدتاً از نوع کربناته بوده؛ شامل قطعات میکرایت، بایومیکرایت واسپارایت است. کلسیت به دو فرم میکرایتی و اسپارایتی؛ در مقادیر اندک، کوارتز به فرم تک کریستال آواری و نیز قطعات پلی‌کریستالین تا میکروکریستالین، پراکنده در زمینه قطعات کربناته وجود دارد.		ضعیف
	ریزدانه	قطعات خرده سنگی عمدتاً از دو نوع کربناته و پیروکلاستیک می‌باشند. در قطعات کربناته کلسیت کانی تشکیل دهندهٔ اصلی و در قطعات پیروکلاستیک، کانی‌های تشکیل دهنده عمده شامل کوارتز، میکاها، کلسیت، شیشهٔ آتشفشانی نیمه تا تماماً آلتره به کانی‌های رسی و کانی‌های خانوادهٔ زئولیت و ... می باشد.		متوسط
C3	درشت دانه	قطعات خرده‌سنگی عمدتاً از نوع ولکاتیک - ساب‌ولکانیک با ترکیب حدواسط بوده؛ در مقادیر کمتر قطعات پیروکلاستیک، رسوبی و پلوتونیک وجود دارد. مجموعهٔ قطعات خرده‌سنگی شامل: آندزیت، بازالت، کوارتز دیوریت، ویتریک کریستال توف، میکرایت، ماسه‌سنگ، گری‌وکه، بایومیکرایت و ... می باشد		متوسط
C4	درشت دانه	قطعات خرده‌سنگی عمدتاً از نوع پیروکلاستیک می‌باشند. کانی‌های تشکیل‌دهندهٔ قطعات موجود شامل کوارتز به فرم‌های میکرو تا کریپتوکریستالین و تک‌بلور، فلدسپار، سریسیت، کلسیت مسکویت، شیشهٔ آتشفشانی نیمه‌آلتره به کانی‌های رسی و کانی‌های خانواده زئولیت‌ها و ... می‌باشد.		زیاد
	ریزدانه	قطعات خرده‌سنگی عمدتاً از نوع پیروکلاستیک می‌باشند. قطعات خرده‌سنگی عمدتاً شامل کریستال ویتریک توف کربناته، ریولیت نیمه تا تماماً آلتره (سریسیتی شدن و آرژیلیتی‌شدن)، میکرایت، آهک کریستالین و قطعات خرده‌کانی از نوع کوارتز و فلدسپات می‌باشد		زیاد

جدول ۵. نتیجه گیری کلی از وضعیت کارگاه‌های مورد بررسی به لحاظ واکنش‌زایی قلیایی سیلیسی

نام کارگاه	احتمال واکنش‌زایی بر اساس نتیجه آزمون	نتیجه آزمون کوتاه مدت مطابق ASTM C1260	نتیجه آزمون بلند مدت مطابق ASTM C1293
استان زنجان			
ماسه کارگاه Z1	-	غیرواکنش زا	-
ماسه کارگاه Z2	متوسط	مشکوک به واکنش زایی	واکنش زا
ماسه کارگاه Z3	-	واکنش زا	واکنش زا
ماسه کارگاه Z4	متوسط	واکنش زا	واکنش زا
شن کارگاه Z1	-	غیرواکنش زا	-
شن کارگاه Z2	ضعیف	مشکوک به واکنش زایی	واکنش زا
شن کارگاه Z3	ضعیف	مشکوک به واکنش زایی	واکنش زا
شن کارگاه Z4	متوسط	واکنش زا	واکنش زا
استان کرمانشاه			
ماسه کارگاه K1	-	غیرواکنش زا	-
ماسه کارگاه K2	-	غیرواکنش زا	-
ماسه کارگاه K3	ضعیف	مشکوک به واکنش زایی	واکنش زا
ماسه کارگاه K4	-	غیرواکنش زا	-
ماسه کارگاه K5	ضعیف	مشکوک به واکنش زایی	واکنش زا
ماسه کارگاه K6	-	غیرواکنش زا	-
ماسه کارگاه K7	-	غیرواکنش زا	-
شن کارگاه K1	-	غیرواکنش زا	-
شن کارگاه K2	-	غیرواکنش زا	-
شن کارگاه K4	بسیار ضعیف	غیرواکنش زا	واکنش زا
شن کارگاه K5	ضعیف	غیرواکنش زا	غیرواکنش زا
شن کارگاه K6	-	غیرواکنش زا	-
شن کارگاه K7	ضعیف	غیرواکنش زا	غیر واکنش زا
استان کردستان			
ماسه کارگاه C1	متوسط	غیرواکنش زا	غیر واکنش زا
ماسه کارگاه C2	متوسط	مشکوک به واکنش زایی	واکنش زا
ماسه کارگاه C3	-	غیرواکنش زا	-
ماسه کارگاه C4	متوسط با بالا	واکنش زا	واکنش زا
شن کارگاه C1	متوسط	غیرواکنش زا	-
شن کارگاه C2	ضعیف	مشکوک به واکنش زایی	واکنش زا
شن کارگاه C3	متوسط	غیرواکنش زا	واکنش زا
شن کارگاه C4	متوسط به بالا	واکنش زا	واکنش زا

۵- نتیجه گیری:

در پژوهش حاضر پس از بازدید و نمونه برداری از سنگدانه‌های ریز و درشت جمعاً ۱۵ معدن در غرب کشور شامل استان های زنجان، کردستان و کرمانشاه، 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 واکنش زایی انجام پذیرفت. نتایج حاصل از جمع‌بندی این آزمون‌ها برای کارگاه‌های مختلف عبارتند از:

۱- برای تعدادی از کارگاه‌های نمونه برداری شده در هر سه استان، واکنش‌زایی سنگدانه‌ها بر اساس نتایج هر سه آزمون پتروگرافی، ملات منشوری تسریع شده و منشور دراز مدت بتنی محرز گردید. لذا به نظر می‌رسد جهت ساخت بتن برای سازه‌های هیدرولیکی در این مناطق بکاربردن اقدامات پیشگیرانه همچون استفاده از سیمان کم قلیا یا پوزولان الزامی است؛

۲- بر اساس نتایج بدست آمده، مشاهده گردید که تصمیم گیری درخصوص واکنش زایی سنگدانه ها با اتکاء بر نتایج آزمون پتروگرافی کاری بسیار پر ریسک می‌باشد؛

۳- دو آزمون پتروگرافی و تسریع‌شده در کنار هم اگرچه ریسک تصمیم گیری درخصوص واکنش زایی سنگدانه‌ها را کمتر می‌کنند منتها به تنهایی کافی نیستند و 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 یا پتروگرافی اکتفا گردد مقداری ریسک در تصمیم گیری پذیرفته شده است؛

۴- بر اساس نتایج موجود در این مطالعه، نشان داده شده است که اعلام نظر قطعی در خصوص واکنش‌زایی یک نمونه سنگدانه بعد از انجام آزمون درازمدت مطابق استاندارد ASTM C1293 امکان‌پذیر است؛

۵- براساس نتایج قطعی حاصل در این مطالعه و همچنین براساس تعداد کارگاه‌های نمونه برداری شده، به نظر می‌رسد پتانسیل واکنش‌زایی در استان زنجان بیشتر از دو استان دیگر می‌باشد. اگرچه تعداد نمونه های اخذ شده در این مطالعه یکسان نمی باشد و جهت اظهار نظر قطعی نیاز به نمونه برداری‌های با تعداد بیشتر و یکسان می باشد، منتها نتایج حاصل تا حدی شرایط را برای استان زنجان نسبت به دو استان دیگر بدتر نمایش می‌دهد.

۶- قدردانی:

در این بخش جا دارد از زحمات کلیه همکاران در بخش مصالح و فرآورده‌های ساختمانی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی که ما را در انجام این پروژه یاری رساندند، کمال تشکر و قدردانی بعمل آید.

۷- منابع:

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

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

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

[4] Lindgård, J. Andiç-Çakır. O, Fernandes, I. Rønning, T. F. Thomas, M. D. A. Alkali–silica reactions (ASR): Literature review on parameters influencing laboratory performance testing, Cement and Concrete Research, 42 (2012) 223–243.

[5] St John D.A., Poole A.B., I. Sims, Concrete Petrography—A Handbook of Investigative Techniques, Arnold, U.K, 1998, p. 474.

[6] Dove, P.M. Rimstidt, J.D. Silica–water interactions, in: P.J. Heaney, C.T. Prewitt, G.V. Gibbs (Eds.), Silica: physical behaviour, geochemistry and materials applications Reviews in Mineralogy, Mineralogical Society of America, 1994, pp. 259–308.

[7]RILEM TC 191-ARP: 'Alkali-reactivity and prevention—assessment, specification and diagnosis of alkali-reactivity', RILEM recommended test method AAR-1: detection of potential alkali-reactivity of aggregates—petrographic method, Mater. Struct. 36 (2003) 480–496.

[8] Broekmans M.A.T.M., The alkali–silica reaction: mineralogical and geochemical aspects of some Dutch concretes and Norwegianmylonites, PhD. Thesis, in, University of Utrecht, 2002, pp. 144.

[9] Böhm, M. Baetzner, S. The effect of the alkalinity of the pore solution on ASR, in: M.A.T.M. Broekmans, B.J. Wigum (Eds.), 13th International Conference on Alkali– Aggregate Reactions in Concrete, Trondheim, Norway, 2008, pp. 501–510.
[10] Rivard, P. Bérubé, M.-A. Ollivier, J.-P. Ballivy, G. Alkali mass balance during the accelerated concrete prism test for alkali–aggregate reactivity, Cem. Concr. Res. 33 (2003) 1147–1153.
[11] Leemann, A. Lothenbach, B. The influence of potassium–sodium ratio in cement on concrete expansion due to alkali–aggregate reaction, Cem. Concr. Res. 38 (2008) 1162–1168.
[12] Leemann, A. Lothenbach, B. The Na2O-equivalent of cement: a universal parameter to assess the potential alkali–aggregate reactivity of concrete? in: M.A.T.M. Broekmans, B.J.Wigum (Eds.), 13th International Conference on Alkali–Aggregate Reactions in Concrete, Trondheim, Norway, 2008, pp. 909–919.
[13] Kollek, J.J. Varma, S.P. Zaris, C. Measurement of OH− concentrations of pore fluids and expansion due to alkali–silica reaction in composite cement mortars, 8th International Congress on the Chemistry of Cement, Rio de Janeiro, 1986, pp. 183–189.
[14] Thomas, M.D.A. Review of the effect of fly ash and slag on alkali–aggregate reaction in concrete, BRE Report, Building Research Establishment Report, BR 314, Construction Research Communications, UK, 1996, p. 117.
[15] Kagimoto, H. Inoshita, I. Kawamura, M. Threshold OH− concentration in pore solution of mortar using alkali reactive aggregates, in: M. Tang, M. Deng (Eds.), 12th International Conference on Alkali–Aggregate Reaction in Concrete, Beijing, China, 2004, pp. 728–735.
[16] Shehata, M.H. Thomas, M.D.A. Alkali release characteristics of blended cements, Cem. Concr. Res. 36 (2006) 1166–1175.
[17] Larive, C. Laplaud, A. Coussy, O. The role of water in alkali–silica reaction, in: M.-A. Bérubé, B. Fournier, B. Durand (Eds.), 11th International Conference on Alkali– Aggregate Reaction, Québec, Canada, 2000, pp. 61–69.
[18] ASTM C295–12: "Practice for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete", American Society for Testing and Materials.
[19] ASTM C227: Test Method for Potential Alkali Reaction of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method), American Society for Testing and Materials
[20] ASTM C 1260 Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)
[21] ASTM C1293-95: Test Method for Concrete Aggregates by Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction, American Society for Testing and Materials
[22] Thomas, M.D.A. Fournier, B. Folliard, K. Ideker, J. Shehata, M. Test methods for evaluating preventive measures for controlling expansion due to alkali-silica reaction in concrete, Cem. Concr. Res. 36 (10) (2006) 1842–1856.
[23] Thomas M.D.A., The effect of supplementary cementing materials on alkali–silica reaction: a review, Cem. Concr. Res. 41 (2011) 1224–1231.
[24] ASTM C702 – 87: "Practice for Reducing Field Samples of Aggregate to Testing Size", American Society for Testing and Materials.