

بررسی وضعیت واکنش پذیری شیمیایی بتن برخی از سازه‌های آبی بزرگ کشور

محمد رضا هاتف^۱، اکبر قاضی فرد^{۲*}، مجتبی کمانی^۳

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۷

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۱۶

چکیده

واکنش‌پذیری شیمیایی بتن یکی از عوامل مهم تخریب و نابودی سازه‌های بتنی در بلند مدت است. در این تحقیق به بررسی وضعیت بتن سازه‌های آبی بزرگ در جنوب کشور و برآورد میزان واکنش‌پذیری شیمیایی بتن آنها پرداخته شده است. بدین منظور، بخش‌های بتنی شش سد بزرگ کشور طی بازدیدهای میدانی و اخذ بیش از ۱۶ نمونه بتن و ۱۵ نمونه رسوب رویه بتن بررسی شده است. سازه‌های بررسی شده شامل سد دز، سد بالارود، سد گدارلندر، سد گتوند علیا، سد کرخه و سد جره رامهرمز است. با استفاده از بررسی‌های صحرایی، تعیین نمایه میزان تخریب (Damage Rating Index=DRI) بتن بر روی مقاطع صیقلی و بررسی ترکیب شیمیایی رسوبات رویه و شیرابه‌ی بتن توسط آنالیز XRD، میزان واکنش‌پذیری شیمیایی بتن و تخریب حاصل از آن بررسی شده است. روش تعیین نمایه میزان تخریب یک روش پتروگرافی برای کمی‌سازی وضعیت تخریب بتن حاصل از واکنش‌پذیری قلیایی سنگدانه‌های بتن است. نتایج تعیین نمایه میزان تخریب و بررسی‌های صحرایی نشان می‌دهد که به جزء سد دز تمام سازه‌های بتنی مورد بررسی دچار واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها هستند ولی هنوز آنقدر توسعه نیافته است که آسیب جدی به بتن وارد کرده باشد. نتایج آنالیزهای XRD و شواهد صحرایی حاکی از وجود واکنش‌پذیری شیمیایی از نوع حمله خارجی سولفات‌ها در قسمت‌های مورد بررسی سد جره و بالارود دارد.

کلید واژه‌ها: بتن، واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها، سد، نمایه میزان تخریب بتن.

۱. دانشجوی دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان

۲. عضو هیات علمی گروه زمین‌شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان a.g hazifard@sci.ui.ac.ir

۳. پژوهشگر پسادکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

یکی از عوامل اصلی تخریب و زوال سازه‌های بتنی در دو دهه اخیر واکنش‌های شیمیایی در بتن بوده است (Sims and Poole, 2017). واکنش‌های شیمیایی مانند واکنش قلیایی سیلیسی به طور گسترده به عنوان یکی از عوامل اصلی تخریب سازه‌های بتنی بزرگ در سال‌های اخیر منتشر شده است (Sims and Poole, 2017; Berra et al., 2018). واکنش‌های شیمیایی بین سنگدانه‌ها و اجزاء بتن منجر به ایجاد حفره، درز و ترک‌هایی در بتن و در نتیجه کاهش مقاومت و دوام و افزایش نفوذپذیری بتن می‌گردد. در نتیجه ممکن است که مقاومت و دوام بتن از آنچه مدنظر طراح بوده است، کمتر گردد و سبب آسیب و تخریب سازه شود (Blight and Alexander, 2011).

واکنش‌پذیری شیمیایی سنگدانه‌های بتن شامل مجموعه‌ای از واکنش‌ها است که مقاومت سنگدانه‌ها را در برابر کلریدها، سولفات‌ها و اسیدها به دست می‌آورند (Blight and Alexander, 2011). به طور کلی مهمترین واکنش‌پذیری شیمیایی بتن شامل دو گروه اصلی واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها (Alkali-Aggregate Reaction=AAR) و حمله سولفات‌ها می‌شود. واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها (AAR) شامل واکنش قلیایی-سیلیکاته (ASR) و واکنش قلیایی-کربناته (ACR) و حمله سولفات‌ها شامل حمله خارجی و حمله داخلی سولفات‌ها می‌شود. در جدول (۱) انواع واکنش‌های شیمیایی، علت و مدت زمان لازم برای نمود اثرات واکنش‌ها در سازه‌های بتنی ارائه شده است (Van Dam et al., 2002).

جدول ۱. انواع مکانیسم‌های شیمیایی تخریب بتن (برگرفته از Van Dam et al., 2002)

Type	Symbole	Cause	Time of Appearance
Alkali-Silica Reaction	ASR	Reaction between alkalis in the pore solution and reactive silica in aggregate results in formation of an expansive gel and degradation of the aggregate particle	5-25 years
Alkali-Carbonate Reaction	ACR	Aggressive expansive reaction between alkalis in pore solution and certain dolomitic aggregates which commonly involves dedolomitization and brucite formation	5-15 years
External Sulfate Attack	ESA	Formation of ettringite, gypsum, or thaumasite that occurs when external sources of sulfate (e.g., groundwater, deicing chemicals) react with aluminate phases in HCP	1-10 years
Internal Sulfate Attack	ISA	Delayed ettringite formation (DEF) from high early-age curing temperatures that results in either expansive disruption in the paste phase	1-5 years

برای بررسی واکنش‌پذیری شیمیایی سنگدانه‌های بتن، روش‌های مختلفی وجود دارد. از این روش‌ها و آزمایش‌ها می‌توان بررسی‌های سنگ‌شناسی سنگدانه‌ها (ASTM C295)، آزمایش تعیین پتانسیل قلیایی بر اساس روش‌های شیمیایی تسریع شده (ASTM C289)، آزمایش منشور ملات (ASTM C227) و آزمایش بلند مدت بر روی بتن ساخته شده از سنگدانه‌های موردنظر (ASTM C1293) را نام برد. بررسی‌های سنگ‌شناسی بر روی مقاطع نازک سنگدانه‌ها جهت شناسایی کانی‌ها و بافت مستعد واکنش‌های شیمیایی

مضر در بتن در مرحله انتخاب منبع قرضه طبق رهنمودهای استاندارد ASTM C295 انجام می‌گیرد. آزمایشات شیمیایی جهت تعیین پتانسیل واکنش‌پذیری سنگدانه‌ها در نمونه‌های بتن ساخته شده در محیط آزمایشگاه طبق استانداردهای نام برده شده چه به صورت کوتاه مدت (معمولاً چند روز) و یا بلند مدت (معمولاً چند ماه) وجود دارد. اصول کلی این آزمایش‌ها، قراردادن نمونه بتن در محلول‌های شیمیایی خاص، دمای تعریف شده و در مدت معین است که نتیجه نهایی آنها اندازه‌گیری تغییرات طول نمونه‌های بتن بر اثر

دستورالعمل پتروگرافی بتن سخت شده طبق استاندارد ASTM C856 (2020) ارائه شده است. از اهداف اصلی این استاندارد، ارائه توصیف کلی از وضعیت فعلی بتن از نظر اندازه اجزاء موجود و رابطه میان آنها، بررسی تراکم و توزیع سنگدانه‌ها، نوع سیمان و ارتباط آن با سنگدانه‌ها، میزان نحوه پراکنش خلل و فرج، بروز یا عدم وجود ریز ترکها و بررسی نقص ساختاری در بتن است (ASTM C856, 2020). طبق این استاندارد، بررسی‌های پتروگرافی بتن با نمونه‌گیری از بتن با دستگاه مغزه‌گیری و تهیه مقاطع نازک میکروسکوپی و صیقلی و انجام بررسی‌های میکروسکوپی انجام می‌گردد. نحوه نمونه‌برداری و حفاری باید به گونه‌ای باشد که کمترین آسیب به ساختار مرکب بتن و فولاد و کمترین امکان برش میلگردهای فولادی را داشته باشد. همچنین می‌توان از نمونه مغزه‌های بتن که در حین حفاری جهت تزریق آب‌بندی بدست آمده استفاده نمود. به هر حال این استاندارد به صورت توصیفی است. در این تحقیق علاوه بر استفاده از توصیه‌های این استاندارد، با استفاده از روش نمایه میزان تخریب (Damage Rating Index=DRI) بتن، میزان واکنش‌پذیری بتن بررسی و به صورت کمی و عددی ارائه شده است. امروزه روش نمایه میزان تخریب بتن یکی از روش‌های شایع بین دانشمندان برای تعیین میزان تخریب بتن بر اثر واکنش-های قلیایی سنگدانه‌ها است (Mythili and Johnson, 2019). این روش در ابتدا توسط گراتان‌بلو و دنی (Grattan-Bellew and Danay, 1992) مطرح و در ادامه دانشمندان مختلفی به توسعه و استفاده از آن پرداختند (Grattan-Bellew and Mitchell, 2006; Rivard and Saint-Pierre 2009; Villeneuve and Fournier, 2012; Sanchez et al. 2015; Sanchez et al. 2020). سانچز و همکاران (Sanchez et al., 2015) به بررسی صحت و دقت روش DRI در برآورد میزان تخریب بتن ناشی از واکنش‌پذیری قلیایی سنگدانه‌ها پرداختند. آنها بیان داشتند که DRI به عنوان یک ابزار قدرتمند و مناسب برای برآورد تخریب بتن ناشی از واکنش‌پذیری قلیایی سنگدانه‌های درشت و ریز در بتن است. هاروی و همکاران (Harvey et al., 2017) با استفاده از روش نمایه

واکنش‌های شیمیایی است. دانشمندان مختلفی در موضوع صحت و گاهی تضادهایی که بین نتایج مختلف آزمایش‌های ذکر شده وجود دارد بحث کرده‌اند (Berra et al., 2018; Chatterji, 2005). به هر حال تمامی این آزمایش‌ها قبل از ساخت سازه بتنی در شرایط آزمایشگاهی و بر روی تعدادی محدود از سنگدانه‌ها انجام می‌شوند. آزمایش‌های آزمایشگاهی مربوط به قبل از ساخت سازه چه کوتاه مدت و چه بلند مدت نمی‌تواند گویای خیلی از شرایط محیطی و سازه‌ای بتن ساخته شده باشد (Drolet et al., 2017). با وجود تمام کنترل‌ها و آزمایش‌هایی که برای جلوگیری از انجام واکنش‌های شیمیایی مخرب در بتن قرار داده شده است، گزارش‌های مختلفی از رخداد واکنش‌های مخرب شیمیایی در بتن بعد از گذشت سال‌ها وجود دارد. بعد از ساخت سازه و در بلند مدت، توسط روش‌هایی دیگر واکنش‌پذیری شیمیایی سازه‌ها بررسی و کنترل می‌شود. یکی از این روش‌ها را می‌توان مغزه‌گیری از نمونه‌های بتن در عمق‌های مختلف از یک سازه و انجام آزمایش‌هایی مانند مقاومت فشاری بتن دانست (Swamy and Al-Asali, 1988). در این روش با بررسی میزان کاهش مقاومت بتن، میزان واکنش‌پذیری و تخریب بتن تعیین می‌شود (Blight and Alexander, 2011). یکی دیگر از این روش‌ها، استفاده از روش ژئوفیزیکی برای بررسی درز و ترک‌ها و تخریب بتن است. این روش علاوه بر هزینه و زمان، در تعیین عامل تخریب نتایج مناسبی ندارد و نیاز به مطالعات تکمیلی دارد (Ohtsu and Watanabe, 2001). ریوارد و سنت‌پیر (Rivard and Saint-Pierre, 2009) بیان داشتند که روش‌های غیرتخریبی مقاومت الکتریکی و مودول یانگ دینامیکی برای بررسی میزان تخریب بتن و انجام واکنش‌های شیمیایی مناسب نیستند و با نتایج میدانی تخریب بتن و نتایج آزمایشگاهی همخوانی ندارد. بررسی شیرابه و رسوب رویه‌های بتن توسط آنالیزهای شیمیایی و یا پراش اشعه ایکس بدین منظور از دیرباز مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین این روش در استانداردهای جدید مانند ASTM C856 (2020) هم توصیه شده است.

بتنی در آزادراهی در کانادا که دچار واکنش‌های ASR شده بود دست یافتند که روش DRI علاوه بر مفید بودن برای ASR برای دیگر فرایندهای زوال هم مانند ذوب و یخبندان هم مفید خواهد بود.

در شرایط کنونی کشور که سازه‌های بتنی بزرگ متعددی مانند سدها ساخته شده و عمری نه چندان طولانی دارند، نیاز است که بررسی‌هایی در موضوع واکنش پذیری آنها انجام شود تا بتوان از شرایط سازه‌ها آگاه شد. هنوز نتایجی از مطالعات موضوع واکنش‌پذیری شیمیایی سازه‌های بزرگ در ایران در دسترس نیست. اگر شناسایی واکنش‌پذیری بتن به موقع انجام شود می‌توان از ایجاد خسارت‌های زیاد به بتن و تخریب سازه جلوگیری نمود (Rivard and Saint-Pierre, 2009). در این تحقیق با استفاده از روش‌های غیرتخریبی به بررسی نوع و شدت واکنش‌پذیری شیمیایی در سازه‌های بتنی موجود در جنوب کشور پرداخته شده است. شناسایی به هنگام واکنش‌های شیمیایی در سازه‌های بتنی باعث تسهیل و انجام به موقع عملیات ترمیم خواهد شد و از هدررفت هزینه‌ها و مشکلات بعدی خواهد کاست.

میزان تخریب به بررسی وضعیت بتن پل‌ها و بتن خیابان‌ها در کالیفرنیا پرداختند. هدف اصلی آنها بررسی وضعیت فعلی سازه‌های کالیفرنیا در اثر واکنش‌های قلیایی بتن بود که بتواند توصیه‌ها و راهکارهای برای مدیریت بهتر در این زمینه داشته باشند. توماس و همکاران (Thomas et al., 2012) دریافتند که یک همبستگی قوی بین گستردگی واکنش‌های قلیایی سیلیکاته بدست آمده از نمایه میزان تخریب با وضعیت ظاهری قسمت‌های سازه‌های پل وجود دارد. آنها مقدار DRI را در سایت یک، خیلی کمتر از سایت سوم که بیشتر تحت تاثیر واکنش‌های شیمیایی سنگدانه‌های بتن بود، بدست آوردند (شکل ۱). توماس و همکاران (Thomas et al., 2013) پس از موفق بودن روش DRI در برآورد صحیح میزان تخریب حاصل از واکنش‌پذیری شیمیایی سنگدانه‌های بتن، آن را به عنوان یک روش کارآمد برای بررسی واکنش‌های شیمیایی بتن در آمریکا معرفی کردند. همچنین در ادامه سانچز و همکاران (Sanchez et al., 2018) و سانچز و همکاران (Sanchez et al., 2017) روش نمایه میزان تخریب بتن را به عنوان یکی از روش‌های موثر در برآورد میزان واقعی تخریب بتن ناشی از واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها بیان نمودند. سانچز و همکاران (Sanchez et al., 2020) با بررسی سازه پل بزرگ



شکل ۱. ارتباط بین ظاهر بتن و مقادیر DRI، مقادیر DRI در سایت سوم تقریباً چهار برابر سایت یک بدست آمد (برگرفته از

(Thomas et al. 2012)

که بررسی‌هایی در موضوع واکنش پذیری آنها انجام شود تا بتوان از شرایط سازه‌ها آگاه شد. هنوز نتایجی از مطالعات

در شرایط کنونی کشور که سازه‌های بتنی بزرگ متعددی مانند سدها ساخته شده و عمری نه چندان طولانی دارند، نیاز است

شده است. باید توجه داشت که این بررسی‌ها منوط به سدهای بتنی است و در سدهای خاکی و سنگریزه‌ای مانند سد مسجدسلیمان (گدارلندر) مربوط به بخش‌های بتنی آن مانند سرریز و گالری‌های دسترسی به بدنه می‌باشد.

طول عمر سازه‌ها به همراه نقاط مورد بررسی و نمونه‌برداری در جدول (۲) ارائه شده است. سعی شده است که بخش‌های مورد بررسی نشانگر وضعیت کلی سازه باشد و ممکن است بخش‌هایی با وضعیت بهتر و یا بدتر از محدوده مورد بررسی وجود داشته باشد. به هر حال در هر سد، چندین نقطه مورد بررسی قرار گرفته و نتایج میانگین آنها در نظر گرفته شده است.

بیش از ۵۰ موقعیت از بخش‌های بتنی شش سد بزرگ کشور طی بازدیدهای میدانی و اخذ ۱۶ نمونه بررسی شده است. همچنین پانزده نمونه منتخب از رسوب رویه بتن برای بررسی‌های پراش اشعه ایکس انتخاب شد. در شکل (۳) برخی از موقعیت‌های مورد بررسی و نمونه برداری از رسوب رویه بتن نمایش داده شده است. نمونه‌برداری طبق استاندارد پتروگرافی بتن سخت شده (ASTM C856, 2020) و بدون دخالت دست و ابزار آلوده انجام گرفته است. نمونه‌ها طبق توصیه همان دستورالعمل توسط روش پراش اشعه ایکس (XRD) و دستگاه موجود در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه اصفهان مورد بررسی محتوای کانی‌شناسی و بلورشناسی قرار گرفت.

موضوع واکنش‌پذیری شیمیایی سازه‌های بزرگ در ایران در دسترس نیست. اگر شناسایی واکنش‌پذیری بتن به موقع انجام شود می‌توان از ایجاد خسارت‌های زیاد به بتن و تخریب سازه جلوگیری نمود (Rivard and Saint-Pierre, 2009). در این تحقیق با استفاده از روش‌های غیرتخریبی به بررسی نوع و شدت واکنش‌پذیری شیمیایی در سازه‌های بتنی موجود در جنوب کشور پرداخته شده است. شناسایی به هنگام واکنش‌های شیمیایی در سازه‌های بتنی باعث تسهیل و انجام به موقع عملیات ترمیم خواهد شد و از هدررفت هزینه‌ها و مشکلات بعدی خواهد کاست.

۲. روش تحقیق

در این تحقیق با استفاده از روش‌های تعیین نمایه میزان تخریب بتن (DRI) و بررسی ترکیب شیمیایی رسوبات رویه و شیرابه‌ی بتن، میزان واکنش‌پذیری شیمیایی در بتن سازه‌های آبی بزرگ جنوب کشور و تخریب حاصل از آن بررسی شده است. همچنین بررسی‌های میدانی از وضعیت ظاهری بتن و بررسی‌های زمین‌شناسی از محل ساختگاه و مخزن سدها انجام شده است.

تقریباً تمام سدهای بزرگ کشور در حوضه کارون، کرخه و دز مورد بررسی قرار گرفته است. سازه‌های مورد بررسی در این تحقیق شامل سد دز، سد بالارود، سد گدارلندر (مسجدسلیمان)، سد گتوند علیا، سد کرخه و سد جره رامهرمز است. موقعیت مکانی این سازه‌ها در شکل (۲) ارائه



شکل ۲. موقعیت مکانی سازه‌های مورد بررسی

جدول ۲. ویژگی‌های سازه‌های مورد بررسی و محل نمونه‌گیری

Dam		XRD Samples	DRI Determining
name	Time	Code	Code
Godarlandar	23 years (1376 SH)	GdX1-2	GD1-2
Gotvand Uleya	23 years (1376 SH)	GtX1-2	GT1-2
Dez	57 years (1342 SH)	DX1-3	D1-3
Balaroud	15 years (1384 SH)	BX1-2	B1-2
Karkheh	23 years (1376 SH)	KX1-4	K1-5
Jarreh	23 years (1376 SH)	JX1-2	J1-2



پ- سد کرخه؛ راست) سرریز، چپ) اتاکن شیرآلات



ب- سد بالارود



الف- سد دز



ج- سد گدارلندر



ث- سد گتوند علیا



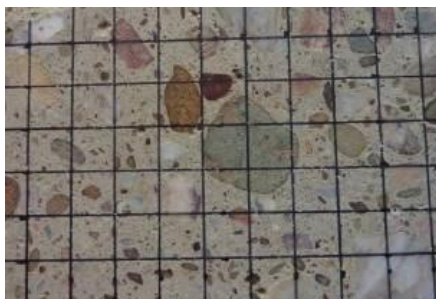
ت- سد جره رامهرمز

شکل ۳. برخی از موقعیت‌های بررسی و نمونه برداری شده

هنوز زمان لازم برای رخداد واکنش قلیایی سیلیکاته (۲۵ سال) به جزء سد دز برای سایر سازه‌های مورد بررسی کافی نیست. به هر حال زمان مناسبی برای انجام این بررسی‌ها می‌تواند باشد تا در صورت نیاز طرح‌های علاج بخشی و بهسازی به موقع مطرح و مورد بررسی قرار گیرد. وضعیت ظاهری بتن در سازه‌های نام برده شده بررسی شد. نمایه میزان تخریب بتن (DRI) با روش پیشنهاد شده توسط

با توجه به عمر سازه‌ها (جدول ۲) و توصیه‌های وان‌دم و همکاران (Van Dam et al., 2002) (جدول ۱) در تمامی سازه‌ها امکان نمود و ظهور اثرات واکنش‌های شیمیایی سنگدانه‌های بتن وجود دارد. اگر حد پایین زمان لازم برای ظهور اثرات واکنش‌های شیمیایی در نظر گرفته شود، برای تمامی سازه‌های مورد بررسی زمان انجام واکنش‌های شیمیایی در بتن کافی بوده است. اگر حد بالایی در نظر گرفته شود،

ضرب نمود. این مراحل برای تمامی عارضه‌های مشخص شده انجام می‌گردد و در پایان مجموع امتیازها، عدد نمایه میزان تخریب است (Rivard and Ballivy, 2005). البته این عدد باید برای سطح مقطع استاندارد (۱۰۰ سانتی‌متر مربع) تعدیل شود. در جدول (۳) ویژگی‌های پتروگرافی به همراه فاکتور وزنی آن که توسط گراتان‌بلو (Grattan-Bellow, 2011) پیشنهاد شده است، ارائه گردیده است. سانچز و همکاران (Sanchez et al., 2014) مساحت مورد نیاز برای تعیین نمایه میزان تخریب را $2 \times 100 \text{ cm}^2$ و یا بر روی دو نمونه $200 \times 100 \text{ mm}$ در نظر گرفته است. سانچز و همکاران (Sanchez et al., 2015) نمایه میزان تخریب را بر روی نمونه های 100 cm^2 (۱۰×۱۰) بررسی نموده‌اند. در این تحقیق نمایه میزان تخریب در هر موقعیت در مساحتی بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ سانتی‌متر مربع بررسی شده و مقادیر آن برای مساحت ۱۰۰ سانتی‌متر مربع تعدیل شده است.



شکل ۴. نحوه مش‌بندی $1 \times 1 \text{ cm}$ مقاطع بتن برای تعیین DRI

جدول ۳. ویژگی‌های پتروگرافی و فاکتورهای وزنی آنها برای تعیین DRI

Petrographic feature	Symbol	weighted factore
Coarse aggregate with cracks	CCA	0.25
Coarse aggregate with cracks and gel	GCA	2
Coarse aggregate debonded	CAD	3
Reaction rims around aggregate	RR	0.5
Cement paste with cracks	CCP	2
Cement paste with cracks and gel	GCP	4
Air voids lined or filled with gel	GAV	0.5

نتایج نمایه میزان تخریب در شکل (۵) ارائه شده است. نمایه میزان تخریب بین ۹ تا $48/5$ بدست آمده است. کمترین نمایه میزان تخریب مربوط به نقطه K5 با مقدار ۹ است که مربوط

ریوارد و بالیوی (Rivard and Ballivy, 2005) و تعاریف ASTM C856 تعیین شد. روش آنها در اصل برپایه روش گراتان‌بلو (Grattan-Bellow, 1995) است. از این روش در سال‌های گوناگون استفاده شده است مانند گراتان‌بلو (Grattan-Bellow, 2011)، گراتان‌بلو و میتچل (Grattan-Bellow and Mitchell, 2006)، گراتان‌بلو (Grattan-Bellow, 2012) و سانچز و همکاران (Sanchez et al., 2020). در هر سازه در دو تا پنج موقعیت از آن، نمایه میزان تخریب تعیین شد.

نمایه میزان تخریب یک روش پتروگرافی نیمه کمی برای ارزیابی وضعیت بتن در اثر واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها است. در این روش، سطح بتن به قسمت‌های ۱ سانتی‌متر در ۱ سانتی‌متر تقسیم می‌شود و در هر قسمت به بررسی وجود عوارض پتروگرافی مشخص شده پرداخته می‌شود (شکل ۴). برای محاسبه نمایه میزان تخریب بتن باید تعداد واحدهایی که عارضه پتروگرافی وجود داشته را در فاکتور وزنی آن عارضه

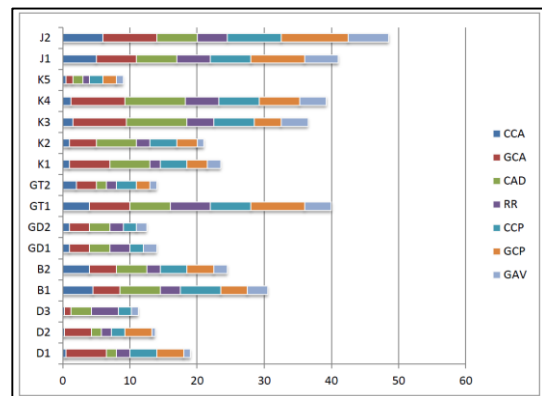
۳. نتایج و بحث

۳-۱. نتایج نمایه میزان تخریب

به بتن سرریز سد کرخه می‌باشد (شکل ۵). بیشترین نمایه میزان تخریب مربوط به J2 با مقدار ۴۸/۵ است که مربوط به بتن گالری دسترسی به تکیه گاه چپ سد جره می‌باشد (شکل ۳ت).

طبق طبقه‌بندی گراتان‌بلو (Grattan-Bellew, 1995)، مقادیر DRI بالای ۵۰ نشان دهنده آسیب بتن ناشی از واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها ASR است، مقادیر بین ۲۰ تا ۵۰ نشان می‌دهد که واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌های بتن در حال انجام است اما هنوز صدمه‌ای جدی به سازه بتنی وارد نشده است. مقادیر کمتر از ۲۰ لزوماً به معنای تاثیر واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها نیست زیرا برخی از ویژگی‌های که DRI شامل می‌شود در هر بتنی ممکن است وجود داشته باشد (Grattan-Bellew, 1995). باتوجه به طبقه‌بندی گراتان‌بلو (Grattan-Bellew, 1995)، سدهای مختلف در جدول (۴) دسته‌بندی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که به جزء سد بالارود و دز، در سایر سدها فرایندهای AAR در حال انجام است ولی هنوز

آسیب جدی به بتن وارد نکرده است ($20 < DRI < 50$). با توجه به عمر بالای ۲۵ سال سازه‌های بتنی در سد دز (حدود ۵۷ سال) که از حداکثر زمان ظهور واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها عبور نموده و مقادیر DRI، می‌توان از عدم انجام واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها در این سازه‌ها پی‌برد. در مورد سازه‌های بتنی سد بالارود این اطمینان هنوز ایجاد نشده است. با توجه به عمر کم سازه‌های بتنی در این سد و زمان لازم برای ظهور واکنش‌های شیمیایی سنگدانه‌ها (نگاه کنید به جدول ۱ و ۲)، هنوز امکان انجام واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها وجود دارد. در نتیجه باتوجه به مقادیر DRI، به جزء سد دز تمام سازه‌های بتنی مورد نظر، دچار واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها هستند ولی هنوز آنقدر توسعه نیافته است که آسیب جدی به بتن وارد کرده باشد. در این شرایط استفاده از طرح‌های علاج بخشی و مهار واکنش‌های شیمیایی سنگدانه‌ها در بتن توصیه می‌شود.



شکل ۵. نمایه میزان تخریب DRI



شکل ۶. مغزه از بتن سرریز سد کرخه

جدول ۴. دسته بندی سازه‌ها بر اساس مقادیر DRI

DRI	Jarreh	Karkheh	Balaroud	Dez	Gotvand Uleya	Godarlandar
Average	44.75	25.85	27.50	14.67	27	13.25
Minimum	41	9	24.5	11.25	14	12.5
Maximum	48.5	36.25	30.5	19	40	14
Class	R	K5=NR Others=R	R	NR	GT1=R GT2=NR	NR

NR=عدم واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها و $DRI < 20$. R واکنش‌های AAR در حال انجام ولی سازه هنوز آسیب جدی ندیده است $20 < DRI < 50$ ، RD واکنش‌های AAR در حال انجام و بتن آسیب دیده است $DRI < 50$.

بخش سد گتوندعلیا است. به طوری که در محل GT1 نمایه میزان تخریب در حدود ۴۰ است ولی در محل GT2 نمایه

باتوجه به بررسی مقادیر DRI در سازه‌ها، نکته قابل توجه وجود تفاوت بارز در عدد نمایه میزان تخریب بتن در دو

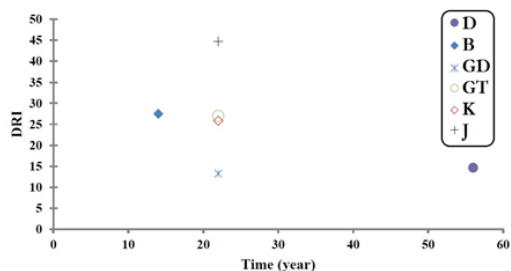
میزان تخریب برابر ۱۴ در موقعیت بدون شوری قرار می‌گیرند. تاثیر محیط، میزان املاح و شوری بیشتر آب می‌تواند دلیل افزایش میزان تخریب بتن در قسمت‌های دارای ترازهای پایین‌تر باشد. بررسی‌های صحرائی در محل مخزن و سد گتوندعلیا نشان می‌دهد که یکی از دلایل افزایش املاح و شوری آب دریاچه سد، وجود رسوبات مارنی و تبخیری سازند گچساران است (شکل ۶).

میانگین نمایه میزان تخریب در برابر عمر سازه‌ها در شکل (۷) نمایش داده شده است. بیشترین میانگین نمایه میزان تخریب با مقدار ۴۴/۷۵ مربوط به سد جره و کمترین آن با مقدار ۱۳/۲۵ مربوط به سد گذارلندر با عمر ۲۲ سال است. میانگین نمایه میزان تخریب سد دز برابر ۱۴/۶۷ است که نشان دهنده وضعیت مطلوب سد پس از گذشت ۵۷ سال از عمر آن است.

میزان تخریب برابر ۱۴ است. این می‌تواند گویای این واقعیت باشد که در یک سازه در قسمت‌های مختلف آن می‌تواند واکنش‌پذیری شیمیایی باتوجه به شرایط محیطی و اجرا به میزان متفاوت رخ دهد و در نتیجه نمایه میزان تخریب بتن هم متفاوت بدست آید. جلالی و همکاران (Jalali et al., 2019) به لایه‌بندی آب بر اثر تفاوت غلظت شوری و املاح در مخزن دریاچه سد گتوند پرداختند. لایه‌هایی پایینی آب در کف دریاچه سد گتوند دارای غلظت چند برابری از املاح و نمک نسبت به لایه‌های سطحی است. آنها از نظر میزان املاح و شوری آب طبق طبقه‌بندی رودس و همکاران (Rhoades et al., 1992)، شش دسته برای ترازهای مختلف آب در پشت دریاچه سد گتوندعلیا ارائه نمودند. از نظر میزان املاح و شوری آب طبق طبقه‌بندی رودس و همکاران (Rhoades et al., 1992)، محل نمونه GT1 دارای تراز ۱۴۶ متری با عدد نمایه میزان تخریب برابر ۴۰ در موقعیت دارای شوری متوسط؛ و محل نمونه GT2 دارای تراز ۱۹۲ متری با نمایه



شکل ۶. تصویر لایه های تبخیری و مارن سازند گچساران در محدوده عنبل که امروزه بخش‌هایی از آن در زیر آب دریاچه سدگتوندعلیا قرار گرفته است، دید به شرق



شکل ۷. میانگین نمایه میزان تخریب در برابر عمر سازه‌ها

کانی ناترولیت در نمونه‌های BX2 و JX1 مشاهده شده است. کانی ناترولیت یک کانی سیلیکات آبدار آلومینیوم سدیم است که جزء کانی‌های سیلیکاته و در گروه زئولیت‌ها قرار دارد. به طور طبیعی در حفرات و رگه‌های سنگ‌های دگرسان شده

۲-۳. نتایج آنالیزهای رسوب رویه و شیرابه بتن

نتایج بررسی ترکیب شیمیایی رسوب رویه و شیرابه خروجی از بتن در جدول (۵) و شکل (۸) آورده شده است.

انحلال جزئی مونتموریلونیت و تشکیل لایه‌های مختلف ایلیت - اسمکتیت و ژئولیت در شرایط هایپرآلکالین می‌شود (Fernandez et al., 2016). مواد بتنی که در محیط های رسی قرار می‌گیرند در معرض رسوبزایی کربناته و سولفات قرار می‌گیرند (Jenni et al., 2014). طبق نتایج نمونه‌های بررسی شده در سد جره رامهرمز، قرارگیری کانی‌های ژئولیتی و رسی در کنارهم نشان دهنده رخداد واکنش‌های حمله سولفات در بتن نمونه‌های این سد است. همچنین بررسی‌های میدانی نشان می‌دهد که این حمله احتمالاً از نوع حمله خارجی سولفات‌ها است. قرارگیری سازند گچساران در مجاورت دریاچه سد جره (شکل ۹) و وجود کانی‌ها و ترکیبات سولفات مانند گچ در این سازند می‌تواند عامل حمله خارجی سولفات‌ها در سد جره رامهرمز باشد. مقادیر DRI بالا، وضعیت ظاهری بتن و ترکیب شیمیایی رویه و شیرابه بتن در سد جره همگی حاکی از وضعیت نامطلوب بتن و ظهور آثار تخریب آن بر اثر واکنش‌های شیمیایی دارد. در محل BX2 در سد بالارود احتمال واکنش‌های حمله سولفات‌ها به دلیل وجود کانی ناترولیت وجود دارد. شواهد صحرائی هم تایید کننده احتمال حمله خارجی سولفات‌ها است (شکل ۱۰).

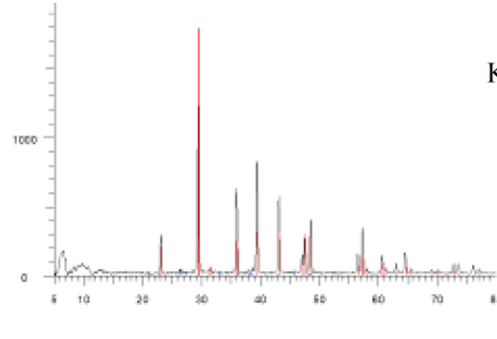
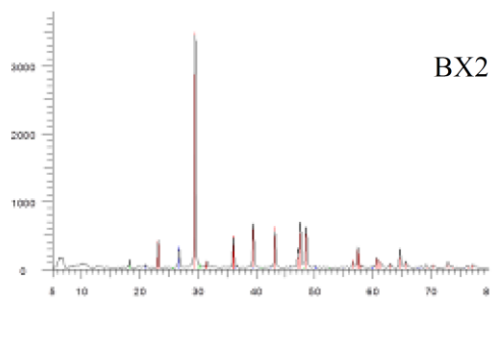
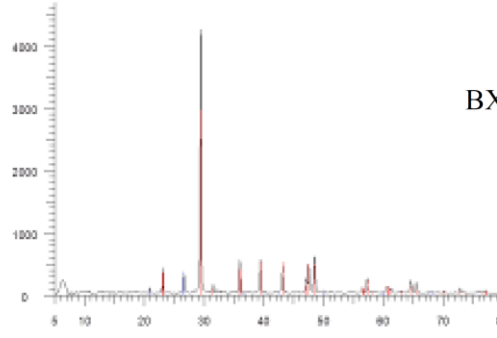
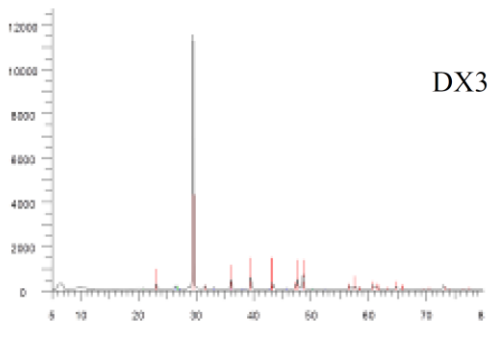
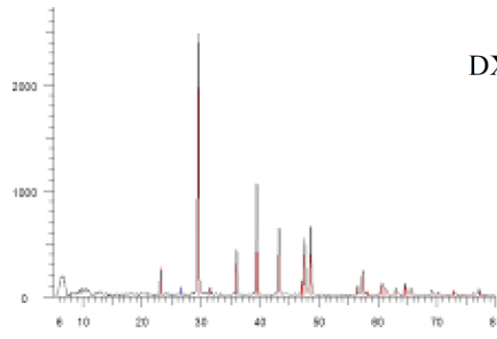
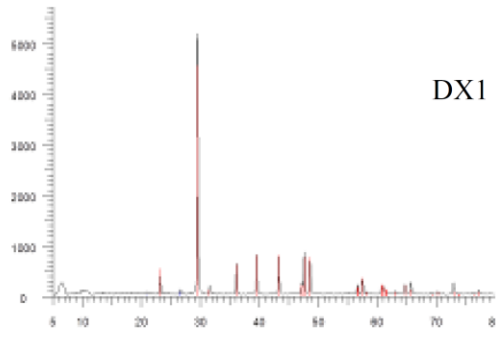
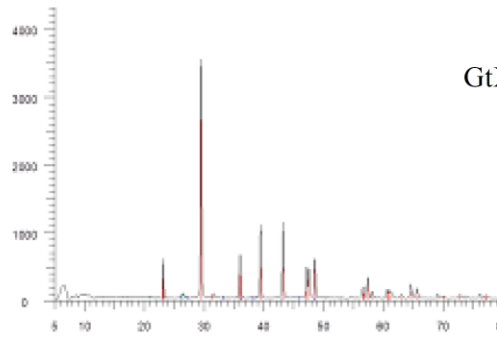
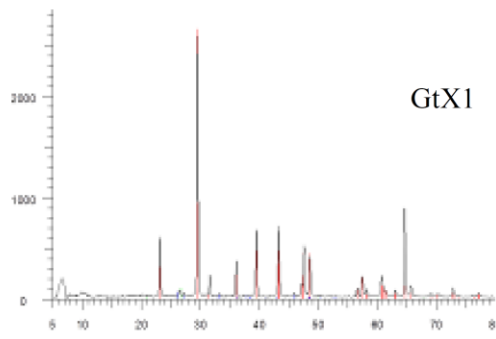
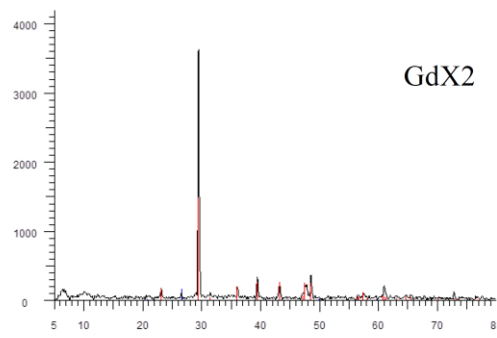
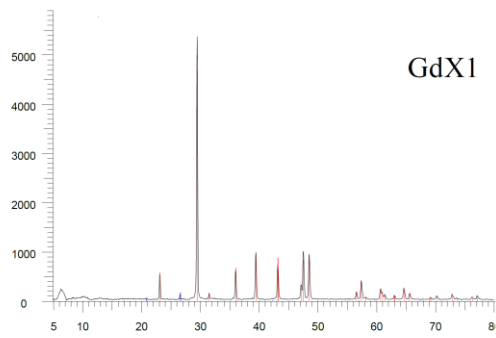
بازالتی دیده می‌شود (Alberti et al., 1982). تحقیقات جدید نشان داده است که این کانی بر اثر واکنش بین آلبیت و مواد سیمان در دماهای ۲۰ تا ۸۰ درجه سانتی گراد تشکیل می‌شود. انحلال آلبیت، اترینگیت و هیدرات سیلیکات کلسیم (calcium-silicate-hydrate C-S-H) باعث ایجاد غلظت بالایی از کلسیم، غلظت کم سدیم و سیلیکات شده و منجر به تولید کانی‌های ژئولیتی مانند ناترولیت می‌شود (Lothenbach et al., 2017). طبق تحقیقات لوتنباخ و همکاران (Lothenbach et al., 2017) در شرایط آزمایشگاه و در دمای ۲۰ تا ۵۰ درجه سانتی گراد تنها بین ۴۰ تا ۶۰ درصد سیلیس طی سه سال واکنش کرده بود و تبدیل به سایر کانی‌ها شده بود. در دماهای ۸۰ درجه سانتی گراد که بخار سیلیس بیشتر است، شابازیت (Chabazite) مشاهده شد. در نتیجه می‌توان بیان داشت که این کانی بر اثر واکنش بین کانی اترینگیت و ژل‌های هیدرات سیلیکات کلسیم C-S-H gels در PH کمتر از ۱۲/۵ تشکیل شده است.

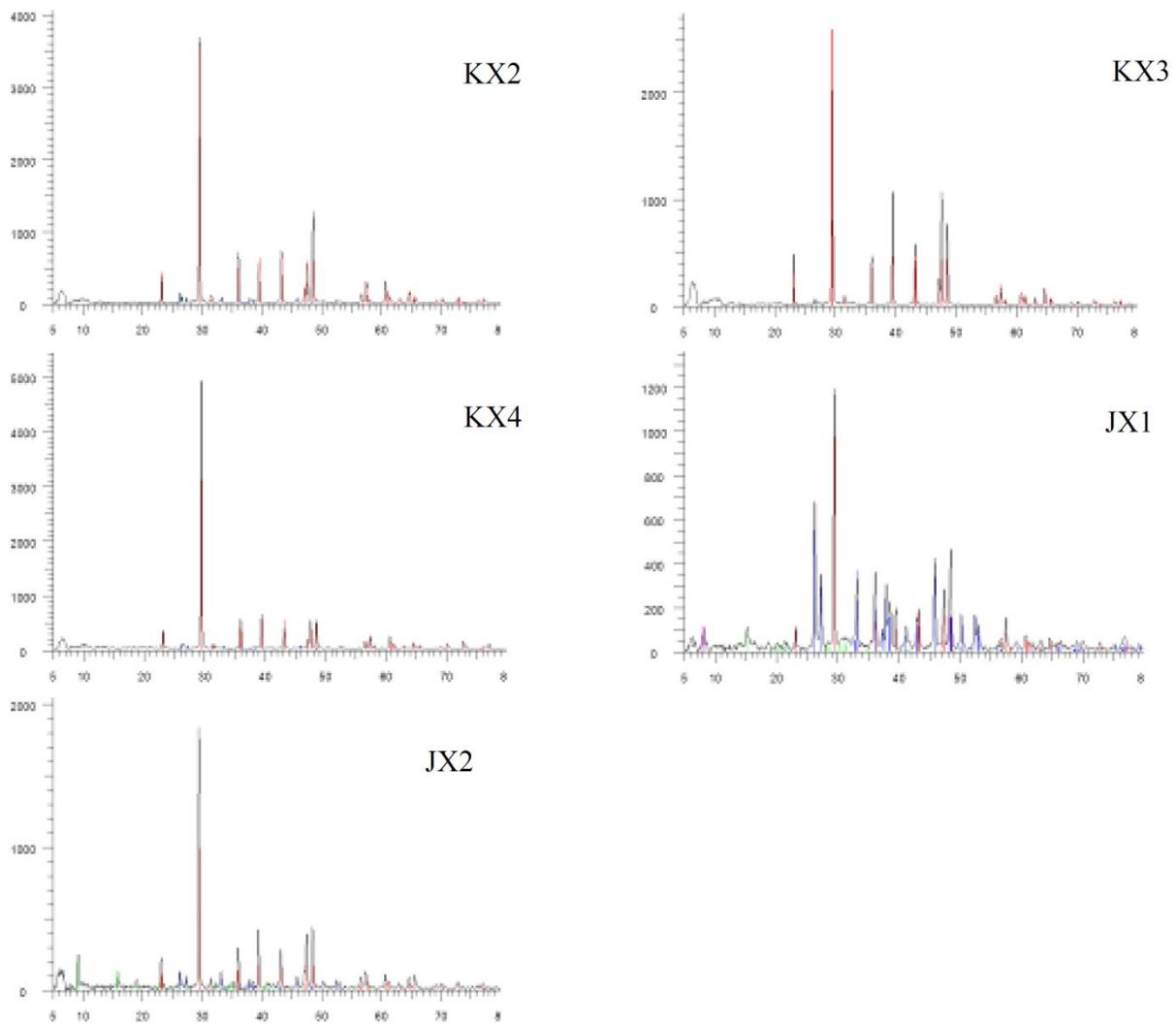
طبق نتایج آنالیز XRD، کانی اترینگیت در نمونه JX2 سد جره مشاهده شده است. این کانی نشان دهنده واکنش از نوع حمله خارجی سولفات‌ها است. کانی مونتموریلونیت در نمونه JX1 سد جره وجود دارد. وجود مواد قلیایی سیمان باعث

جدول ۵. نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس نمونه های رسوب رویه بتن سازه های آبی

Code	Minerals/Percentage					
	Cal	Mont	Ettri	Natro	Qtz	Arg
GdX1	98.0					
GdX2	93.8				6.2	
GtX1	92.7				2.3	5.1
GtX2	90.7				2.2	7.0
DX1	97.5				2.5	
DX2	97.6				2.4	
DX3	90.6				2.5	6.9
BX1	93.2				6.8	
BX2	91.9			3.9	4.3	
KX1	93.4				1.2	5.4
KX2	93.1				1.5	5.4
KX3	98.7				1.3	
KX4	91.1				1.7	7.3
JX1	40.5	9.3		6.2		43.9
JX2	61.0		23.3			15.7

Cal Calcite, Arg Aragonite, Natro Natrolite, Mont Montmorillonite, Ettri Ettringite, Qtz Quartz





شکل ۸. نتایج XRD نمونه ها



شکل ۹. قرارگیری طبقات مارنی و گچی سازند گچساران در مخزن سد جره، دید به شمال



شکل ۱۰. انحلال ژپس در طبقات مارلستونی سازند آغاچاری در نزدیکی تکیه گاه چپ سد بالارود

نتایج نشان داد که بین وضعیت ظاهری بتن، مقادیر نمایه میزان تخریب بتن، ترکیب شیرابه بتن و سازندهای زمین‌شناسی محل ساختگاه سد ارتباط برقرار است. نتایج بررسی نمایه میزان تخریب نشان داد که به جزء سد دز، تمام سازه‌های بتنی مورد بررسی دچار واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها هستند ولی هنوز آنقدر توسعه نیافته است که آسیب جدی به بتن وارد کرده باشد. DRI در بخش‌های بتنی سد بالارود پایین است ولی با توجه به عمر کم این سازه هنوز امکان ظهور واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها وجود دارد. بیشترین میانگین نمایه میزان تخریب با مقدار ۴۴/۷۵ مربوط به سد جره و کمترین آن با مقدار ۱۳/۲۵ مربوط به سد گدارلندر هر دو با عمر ۲۲ سال است. میانگین نمایه میزان تخریب سد دز برابر ۱۴/۶۷ است که نشان دهنده وضعیت مطلوب سد پس از گذشت ۵۷ سال از عمر آن و علی‌رغم عبور از حداکثر زمان ظهور اثرات واکنش‌های قلیایی سیلیکاته است. نتایج بررسی‌های صحرایی و رسوبات رویه بتن در برخی از سدها مانند جره و بالارود نشان از وجود واکنش‌های حمله خارجی سولفات‌ها دارد. مقادیر DRI بالا، وجود کانی‌های ناترولیت، اترینگیت و مونتموریلونیت در ترکیب شیمیایی رویه و وضعیت ظاهری بتن در سد جره همگی حاکی از وضعیت نامطلوب بتن آن و ظهور آثار تخریب بر اثر واکنش‌های شیمیایی است. در این باره انجام مطالعات تکمیلی و اجرای روش‌های بهسازی قبل از توسعه بیشتر واکنش‌های شیمیایی و آسیب جدی به بتن آن توصیه می‌گردد. این تحقیق جزء اولین تلاش‌های علمی برای بررسی وضعیت بتن سدهای بزرگ جنوب کشور پس از گذشت ۱۵ تا ۵۷ سال از عمر آنها است. نتایج این تحقیق صرفاً مربوط به بخش‌های مورد بررسی است و نیازمند بررسی‌های بیشتر و مطالعات تکمیلی دارد.

سپاسگزاری

لازم است از همکاری مدیران ارشد و کارشناسان سازمان آب و برق خوزستان به دلیل حمایت‌ها در انجام این تحقیق و نیز از مساعدت کلیه مدیران و کارشناسان شرکت‌های بهره

کانی آراگونیت که فاز ناپایدار کانی کلسیت است در نمونه های JX2 و JX1، KX4، KX2، KX1، DX3، GtX2، GtX1 مشاهده شده است. بیشترین آراگونیت در نمونه‌ی JX1 با ۴۳/۹ درصد و سپس در نمونه JX2 با ۱۵/۷ درصد مشاهده شده است. همچنین در نمونه‌های سد گتوندعلیا با میانگین ۶/۰۵ و کرخه با میانگین ۴/۵۳ درصد هم مشاهده شده است. بک (Back, 1955) در موضوع ایجاد ژل حاصل از واکنش‌های شیمیایی در بتن از اصطلاح ژل ایمن و ژل نایمن unsafe gels استفاده نمود (به نقل از Sanchez et al. 2015). به اعتقاد سانچز و همکاران (Sanchez et al., 2015) ژل ایمن دارای مقادیر زیادی کلسیم است و مقدار ناچیزی انقباض در اثر جذب آب دارد ولی ژل نایمن دارای مقادیر بالاتری از سدیم یا پتاسیم و یا هردو است و از نظر تراوش و جابجایی بسیار فعال هستند. اگرچه مطالعات زیادی در موضوع واکنش‌پذیری شیمیایی در بتن و اثرات آنها بر تخریب بتن انجام شده است ولی هنوز ابهامات و عدم قطعیت‌هایی وجود دارد (Giaccio et al., 2008; Sanchez et al., 2015). وجود آراگونیت در رسوب رویه و شیرابه بتن به تنهایی نمی‌تواند نشان از وجود واکنش‌های قلیایی کربناته باشد ولی شواهد بررسی‌های صحرایی و نمایه میزان تخریب حاکی از بیشتر بودن آثار تخریب بتن در سازه‌های دارای مقادیر بیشتری از آراگونیت مانند سد جره و گتوندعلیا است. با توجه به مباحث ژل ایمن و شواهد صحرایی، نمونه‌های دارای مقادیر بیشتری از کربنات کلسیم (بالای ۹۵ درصد) را می‌توان ژل ایمن در نظر گرفت مانند نمونه‌های DX1، DX2، و GdX1.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از روش‌های نمایه میزان تخریب بتن، بررسی‌های میدانی و بررسی رسوب رویه و شیرابه خروجی به بررسی وضعیت واکنش‌پذیری بتن سدهای دز، بالارود، گدارلندر، گتوند علیا، کرخه و سد جره رامهرمز پرداخته شده است. با شناسایی به موقع واکنش‌های شیمیایی مخرب در بتن می‌توان با صرف هزینه کمتر با اجرای روش‌های علاج بخشی از تخریب و آسیب جدی جلوگیری نمود.

صمیمانه سپاسگزاری و تقدیر می‌گردد.

برداری از سد و نیروگاه‌های دز، گدارلندر مسجدسلیمان،
گتوندعلیا، کرخه و جره رامهرمز و شرکت توسعه منابع آب
و نیروی ایران به سبب همکاری در بررسی سازه‌های سدها

منابع

- Alberti, A., Pongiluppi, D., and Vezzalini, G., 1982. The crystal chemistry of natrolite, mesolite and scolecite. *Neues Jahrb. Miner. Monatsh*, 231-248.
- ASTM C856 / C856M-20, 2020. Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org DOI: 10.1520/C0856_C0856M-20.
- Berra, M., Mangialardi, T. and Paolini, A.E., 2018. Alkali Release from Aggregates in Long-Service Concrete Structures: Laboratory Test Evaluation and ASR Prediction, *Materials*, 11(8): 1393.
- Blight, GE., Alexander, MG., 2011. Alkali-Aggregate Reaction and Structural Damage to Concrete, CRC Press, Taylor & Francis Group, London, UK.
- Chatterji, S., 2005. Chemistry of alkali-silica reaction and testing of aggregates, *Cement & Concrete Composites* 27: 788-795.
- Drolet, C., Duchesne, J. and Fournier, B., 2017. Validation of the alkali contribution by aggregates to the concrete pore solution. *Cement and Concrete Research*, 98: 10-23.
- Fernandez, R., Ruiz, A.I. and Cuevas, J., 2016. Formation of CASH phases from the interaction between concrete or cement and bentonite. *Clay Minerals*, 51(2): 223-235.
- Giaccio, G., Zerbino, R., Ponce, J.M. and Batic, O.R., 2008. Mechanical behavior of concretes damaged by alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 38(7): 993-1004.
- Grattan-Bellew, P.E. and Mitchell, L.D., 2006. Quantitative petrographic analysis of concrete-the damage rating index (DRI) method, a review, In Proc. Marc-André Bérubé symposium on AAR in concrete, CANMET/ACI Advances in concrete technology seminar, Montréal, Canada, 321-334.
- Grattan-Bellew, PE., 2012. Petrographic methods for distinguishing between alkali-silica, alkaliearbonate reactions and other mechanisms of concrete deterioration. *Proceedings of the 14th International Conference on Alkali Aggregate Reaction*, Austin, USA: 10 pp.
- Grattan-Bellew, PE., Danay, A., 1992. Comparison of laboratory and field evaluation of AAR in large dams. *Proc. of the International Conference on Concrete AAR in Hydroelectric Plants and Dams*, Canadian Electrical Association & Canadian National Committee of the Int. Commission on Large Dams.
- Grattan-Bellew, PE., 1995. Laboratory evaluation of alkali-silica reaction in concrete from Saunders generating station. *ACI Mater J* 92 (2):126-34.
- Harvey, H., Li, J., Asselanis, J., Zhou, J., Guada, I., Kannekanti, V., Wu, R., 2017. Results from Visual Inspection and Laboratory Testing for ASR in Existing Concrete Cores from Bridges and Pavements in California, University of California, Pavement Research Center Department of Civil and Environmental Engineering, 57 p.
- Jalali, L., Zarei, M., Gutiérrez, F., 2019. Salinization of reservoirs in regions with exposed evaporites. The unique case of Upper Gotvand Dam, Iran, *Water Research*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.04.015>.
- Jenni, A., Mäder U., Lerouge C., Gaboreau S., Schwyn B., 2014. In situ interaction between different concretes and Opalinus Clay. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 70-71, 71-83.
- Lothenbach, B., Bernard, E. and Mäder, U., 2017. Zeolite formation in the presence of cement hydrates and albite. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 99, pp.77-94.
- Mythili, D., Johnson, C., 2019. Alkali Aggregate reaction in Dam Structures—a Review. *International Research Journal of Multidisciplinary Technovation*, 1(6): 220-224.
- Ohtsu, M. and Watanabe, H., 2001. Quantitative damage estimation of concrete by acoustic emission. *Construction and Building Materials*, 15(5-6): 217-224.
- Rhoades, J.D., Kandiah, A., Mashali, A.M., 1992. The use of saline waters for crop production. *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 48*, Rome, 133 pp.

- Rivard, P., Ballivy G., 2005. Assessment of the expansion related to alkali-silica reaction by the Damage Rating Index method, *Constr Build Mater* 19(2): 83–90.
- Rivard, P., Fournier B, Ballivy G., 2002. The damage rating index method for ASR affected concrete: a critical review of petrographic features of deterioration and evaluation criteria, *Cement Concrete Aggr* 24(2): 80–90.
- Rivard, P., Saint-Pierre F, 2009. Assessing alkali-silica reaction damage to concrete with non-destructive methods: From the lab to the field, *Construction and Building Materials* 23: 902-909.
- Rivard, P., Fournier, B. and Ballivy, G., 2002. The damage rating index method for ASR affected concrete-a critical review of petrographic features of deterioration and evaluation criteria. *Cement, Concrete and Aggregates*, 24(2): 1-11.
- Sanchez, L., 2014. Contribution to the assessment of damage in aging concrete infrastructures affected by alkali-aggregate reaction (Doctoral dissertation, Université Laval).
- Sanchez, L.F.M., Drimalas, T., Fournier, B., Mitchell, D., Bastien, J., 2018. Comprehensive evaluation of damage in concrete regarding different distress mechanisms, *Cem. Concr. Res.* 107: 284–303.
- Sanchez, L.F.M., Fournier, B., Jolin, M. and Duchesne, J., 2015. Reliable quantification of AAR damage through assessment of the Damage Rating Index (DRI), *Cement and Concrete Research*, 67: 74-92.
- Sanchez, L.F.M., Fournier, B., Jolin, M., Bastien, J., Mitchell, D., 2017. Overall assessment of alkali-aggregate reaction (AAR) in concretes presenting different strengths and incorporating a wide range of reactive aggregate types and natures, *Cem. Concr. Res.* 93: 17–31.
- Sanchez, L.F.M., Fournier, B., Mitchell, D., Bastien, J., 2020. Condition assessment of an ASR-affected overpass after nearly 50 years in service, *Construction and Building Materials* 236: 117554. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117554>.
- Shrimer F., 2000. Application and use of damage rating index in assessment of AAR affected concrete-selected case studies. In: *Proceedings of the 11th international conference on AAR in concrete*, Quebec City (Canada): 899–908.
- Sims, I., Poole, A.B., 2017. *Alkali-Aggregate Reaction in Concrete: A World Review*. CRC Press.
- Swamy, R.N., Al-Asali, M. M., 1988. Engineering properties of concrete affected by alkali-silica reaction, *ACI Materials Journal* 85.5: 367-374.
- Thomas, M.D.A., Fournier, B., Folliard, K.J. and Resendez, B., 2012. *Alkali-Silica Reactivity Surveying and Tracking Guidelines*, July, 32 p.
- Thomas, M.D., Fournier, B., Folliard, K.J., 2013. *Alkali-aggregate reactivity (AAR) facts book* (No. FHWA-HIF-13-019), United States, Federal Highway Administration, Office of Pavement Technology.
- Van Dam, T.J., Sutter, L.L., Smith, K.D., Wade, M.J., Peterson, K.R., 2002. *Guidelines for Detection, Analysis, and Treatment of Materials-Related Distress in Concrete Pavements -Volume 1: Final Report*. FHWA-RD-01-163. Federal Highway Administration, McLean, VA.
- Villeneuve, V., Fournier, B., 2012. Determination of the damage in concrete affected by ASR - the damage rating index (DRI), 14th ICAAR-International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, May 20–25th, electronic, Austin (Texas).
- Zhou, Li, H., Guada, J., Wu, I., Kannekanti, R., Asselanis, J., 2017. Results from Visual Inspection and Laboratory Testing for ASR in Existing Concrete Cores from Bridges and Pavements in California (No. CAS15-2702). University of California (System). Pavement Research Center.