

A. Sohrabi-Bidar*

School of Geology, College of
Sciences, University of
Tehran, Tehran.

e-mail: asohrabi@ut.ac.ir

M. Mozafari

School of Geology, College of
Sciences, University of
Tehran, Tehran.

e-mail: mmozafari@ut.ac.ir

A. Zolfaghari

Department of Geology,
Faculty of Sciences, Tarbiat
Modares University.

e-mail:
abbas.zolfaghari@modares.ac.ir

A. Rastegarnia

Department of Geology,
Faculty of Sciences, Ferdowsi
University.

e-mail:
ahmad.rastegarnia@mail.um.ac.ir

Assessment of Groutability and Cement Take in Khersan II Dam Site

Cement grouting is a common method for sealing and consolidating dam foundations. Since grouting is a cost and time-consuming process, understanding the amount of cement consumption is essential to estimate the cost of any dam construction. The geological setting is one of the main factors affecting the amount of cement take. In this paper, an attempt has been made to investigate the relation between the amount of cement take and the values of Rock Quality Designation (RQD), permeability, joint spacing, and joint aperture, measured in pilot holes drilled at the Khersan II Dam site (west Iran). The amount of cement take shows a direct relation with the values of permeability and joint aperture but presents a reverse relation with the values of RQD and joint spacing. Among the mentioned parameters, the Lugeon value has the highest correlation with cement consumption, however, poor correlation indicates the influence of other factors. To reduce the influence of other factors, the values of cement take were normalized to the injection pressure and then its correlation with the mentioned parameters was investigated again. Results show a significant improvement, especially between the normalized cement take and Lugeon values, resulted in at least the coefficient of determination of 0.7. After validation, the presented equation could be used to estimate the value of cement consumption at similar dam sites.

Keywords: Grouting, Cement Take, Lugeon Number, Joint Aperture, Khersan II Dam.

* Corresponding author

بررسی تزریق‌پذیری و تخمین خوردن سیمان در ساختگاه سد خرسان II

تزریق سیمان روشی متداول برای آب‌بندی و تحکیم پی و تکیه‌گاه‌های سد می‌باشد. در پروژه‌های سدسازی معمولاً بخش مهمی از منابع اختصاص یافته، صرف عملیات تزریق می‌گردد؛ بنابراین نداشتن برآوردی از مقادیر خوردن سیمان می‌تواند در برنامه‌ریزی اجرای پروژه مؤثر باشد. یکی از عوامل اصلی مؤثر بر تزریق و مقدار خوردن سیمان، مشخصات جایگاه زمین‌شناسی است. در این مقاله، با استفاده از داده‌های پانل تزریق آزمایشی در سنگ‌های آهکی تکیه‌گاه چپ سد خرسان II، رابطه بین خوردن سیمان و چهار پارامتر شاخص کیفی سنگ، عدد لوژن، فاصله‌داری درزه‌ها و بازشدگی درزه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که خوردن سیمان دارای رابطه‌ای معکوس با شاخص کیفی و فاصله‌داری درزه‌ها است، اما با عدد لوژن و بازشدگی درزه‌ها رابطه مستقیم دارد. در بین پارامترهای ذکر شده، عدد لوژن دارای بیشترین همبستگی با خوردن سیمان است، با این حال، همبستگی ضعیف نشانگر اثرگذاری عوامل دیگری نیز می‌باشد. با توجه به این مسئله مقادیر خوردن سیمان به میزان فشار تزریق نرمال گردیده و همبستگی آن با پارامترهای مورد اشاره بررسی شد. نتایج، بهبود قابل توجهی، به خصوص در رابطه بین خوردن نرمال شده و عدد لوژن نشان داد و ضریب تعیین بیش از ۰/۷ حاصل گردید. رابطه ارائه شده می‌تواند در تخمین خوردن سیمان در ساختگاه‌های مشابه مورد سنجش و آزمون قرار گیرد.

واژگان کلیدی: تزریق، خوردن سیمان، عدد لوژن، بازشدگی درزه، سد خرسان II.

عبداله سهرابی بیدار*

دانشکده زمین شناسی، پردیس
علوم، دانشگاه تهران.
پست الکترونیک:
asohrabi@ut.ac.ir

مرتضی مظفری

دانشکده زمین شناسی، پردیس
علوم، دانشگاه تهران.
پست الکترونیک:
mmozaafari@ut.ac.ir

عباس ذوالفقاری

گروه زمین شناسی، دانشکده
علوم، دانشگاه تربیت مدرس.
پست الکترونیک:
abbas.zolfaghari@modares.ac.ir

احمد رستگاریا

دانشکده زمین شناسی، پردیس
علوم، دانشگاه تهران.
پست الکترونیک:
ahmad.rastegarnia@mail.um.ac.ir

۱- مقدمه

حفره‌های تشکیلات سنگی و خاکی، تزریق شده و موجب بهبود خصوصیات مهندسی آنها می‌گردد، به طوری که در اثر آن نفوذپذیری لایه‌ها کم و مقاومت لایه‌ها افزایش یافته و در نتیجه تغییر شکل‌پذیری توده سنگ کاهش می‌یابد.

سه عامل اصلی مؤثر بر تزریق‌پذیری توده سنگ عبارت است از: مشخصات و ویژگی‌های محیط تزریق، مشخصات دوغاب تزریقی و فشار تزریق. ویژگی‌ها و مشخصات زمین را می‌توان به عنوان مهمترین عامل مؤثر

تزریق دوغاب و ایجاد پرده آب‌بند یکی از متداول‌ترین روش‌های جلوگیری از هدر رفتن آب مخزن سدها است. تزریق دوغاب سیمانی، روشی است که توسط آن، ماده تزریقی به خلل و فرج و درز و شکاف یا

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۰، بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۲۷، پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۲
DOI: 10.22091/cer.2021.6560.1227 شناسه دیجیتال

در عملیات تزریق تلقی نمود چراکه دو عامل اخیر تحت تأثیر ویژگی‌های محیط تزریق قرار داشته و براساس آن تعیین می‌شوند [۱]. در بین خصوصیات محیط زمین‌شناسی، مشخصات درزه‌ها عامل اصلی می‌باشد. خصوصیات کلی درزه‌ها که بر تزریق‌پذیری و نفوذ دوغاب تأثیر می‌گذارند، شامل مشخصات درزه‌داری سنگ از قبیل بازشدگی درزه، زبری و نامنظمی سطح درزه، فاصله درزه‌ها از یکدیگر، و تداوم درزه‌ها می‌باشد. لوئیس^۱ ضمن مدل‌سازی یک محیط زمین‌شناسی ساده، به بررسی عوامل مؤثر بر نفوذپذیری سنگ‌های دارای درزه‌داری پرداخت. در مطالعه وی محیط همگن و درزه‌ها به صورت موازی و با فاصله‌داری منظم در نظر گرفته شده بودند [۲]. پریست^۲ مشخصات ناپیوستگی‌های توده سنگ را مورد توجه قرار داد [۳]. بل^۳ در معرفی ویژگی‌های درزه‌ها (از جمله بازشدگی، زبری، فرکانس، جهت‌یابی و شیب درزه‌ها) به اثر آنها بر خوردند سیمان و نفوذپذیری توده سنگ اشاره کرده است [۴]. اگرچه عموماً عدد لوژن که شاخصی از نفوذپذیری توده سنگ می‌باشد، به عنوان معیاری برای تزریق‌پذیری در نظر گرفته می‌شود، اما فویو^۴ و همکاران با معرفی شاخص نفوذپذیری ثانویه معیاری جدید برای تخمین تزریق‌پذیری سنگ‌ها ارائه نمودند [۱ و ۵]. برخی محققین نیز با توجه به نتایج آزمایش فشارآب و اطلاعات مغزه‌های حفاری و حجم خوردند واقعی ثبت شده، در صدد شناخت نسبی از بازشدگی درزه‌ها برآمده‌اند [۶]. امروزه همچنان مشخصات هیدروژئولوژیکی ساختگاه سدها به عنوان یکی از مهمترین پارامترها در مطالعه و طراحی سدها موضوع پژوهش و مطالعات مختلفی قرار می‌گیرد. توسعه روش‌های تجربی پیشین و کاربرد آنها برای ارزیابی وضعیت تزریق‌پذیری در سنگ‌ها، ارزیابی اثرات تزریق بر

بهبود کیفیت توده سنگ با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی، مدل‌سازی عددی و ارزیابی اثرات آب‌بندی تزریق، مشخصات مصالح و دوغاب تزریق و شناخت رفتار تزریق در توده سنگ با استفاده از داده‌کاوی، جنبه‌های مختلفی از پژوهش‌های اخیر در خصوص تزریق دوغاب در توده سنگ می‌باشند [۷-۱۳].

عملیات حفاری و تزریق، بخش قابل‌توجهی از هزینه‌های طرح‌های سدسازی را به خود اختصاص می‌دهد. در ساختگاه‌هایی که قابل اعتماد نباشد، قبل از نهایی شدن طرح سد و پرده تزریق، اجرای برنامه تزریق آزمایشی ضروری است؛ زیرا بدین وسیله می‌توان نسبت نفوذپذیری قبل از عملیات تزریق به متوسط نفوذپذیری بعد از عملیات تزریق، متوسط خوردند سیمان و دوغاب در هر مرحله و فاصله حداکثر بین آخرین گمانه‌های تزریق و نیز فشار مورد نیاز تزریق را به‌دست آورد. معمولاً خوردند سیمان برحسب مقدار مصرف سیمان در هر قطعه (معمولاً به طول ۵ متر) و یا برحسب مصرف سیمان در طول واحد بیان می‌گردد. در اختیار داشتن برآوردی از مقادیر خوردند سیمان و دوغاب در عملیات تزریق، نقش مؤثری در برنامه‌ریزی و طراحی عملیات تزریق خواهد داشت. داشتن چنین برآوردی نیازمند بررسی اثر پارامترهای مختلف بر مقدار جذب سیمان و دوغاب در طی فرایند تزریق است. پس از لوئیس که مبانی اولیه نفوذ سیال در یک توده سنگ درزه‌دار را فرمول‌بندی و براساس آن مقادیر نفوذپذیری توده سنگ و شعاع نفوذ سیالات با ویسکوزیته مختلف را بیان کرد، محققان در دهه اخیر به حل تحلیلی نفوذ دوغاب تزریق در توده سنگ درزه‌دار پرداختند. آنها در حل تحلیلی برای برآورد حجم دوغاب تزریقی از روش مشابه با مطالعات لوئیس استفاده کردند [۲ و ۱۴]. سهرابی‌بیدار و همکاران در یک مطالعه تجربی، رابطه بین خوردند سیمان و دوغاب تزریقی با برخی مشخصات مهندسی توده سنگ شامل عدد لوژن، شاخص نفوذپذیری ثانویه، بازشدگی درزه‌ها و شاخص Q را با استفاده از تحلیل تک‌متغیره برای ساختگاه سد بختیاری بررسی

¹- Louis

²- Priest

³- Bell

⁴- Foyo

زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه سد است. پیش از این عبدالشریف و بخت‌آور، با استفاده از روش زمین‌آمار به بررسی مشخصات بهینه پرده تزریق و به خصوص فشار تزریق در ساختگاه سد خرسان پرداخته‌اند [۲۳]. در مطالعه پیش‌رو، از داده‌های پانل تزریق آزمایشی در قطعات ۵ متری تکیه‌گاه چپ ساختگاه سد خرسان II استفاده شده و با تحلیل همبستگی بین پارامترهای مذکور، رابطه بین میزان خوردند سیمان با پارامترهای شاخص کیفی سنگ، عدد لوژن، فاصله‌داری و بازشدگی درزه‌ها بررسی شده است.

۲- موقعیت و زمین‌شناسی سد خرسان

سد بتنی دو قوسی خرسان II به ارتفاع ۲۴۰ متر از پی و حجم مخزن ۲۱۴۲ میلیون مترمکعب با هدف تولید بهینه انرژی برقابی به میزان ۱۴۹۷ گیگاوات‌ساعت در مرحله طراحی می‌باشد. این سد بر روی رودخانه خرسان در ناحیه جنوب باختری ایران در ارتفاعات زاگرس مرتفع ساخته خواهد شد [۲۴]. واحدهای سنگی ساختگاه سد عمدتاً شامل سازند آهکی آسماری و بخش‌هایی از سازند گچساران می‌باشد که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

سنگ بستر و تکیه‌گاه‌ها در محل سد از جنس سنگ آهک و مربوط به سازند آسماری می‌باشد. این سازند به لحاظ خصوصیات سنگ چینه‌شناسی آن به سه واحد بالایی، میانی و پایینی قابل تفکیک است. واحد آسماری بالایی ($U.As^Y$) که تقریباً تمام سازه‌ها به جز نیروگاه سطحی در آن واقع می‌گردد، ۲۸۰-۲۵۰ متر از آهک‌های ضخیم تا متوسط لایه با لایه‌بندی منظم و درصد کمی از آهک‌های نازک لایه تا آهک‌های مارنی است. واحد آسماری میانی ($M.As^A$) شامل ۱۰۰ متر تناوب آهک‌های متوسط تا نازک لایه خاکستری متمایل به سبز تا کرم رنگ و آهک مارنی و مارن می‌باشد.

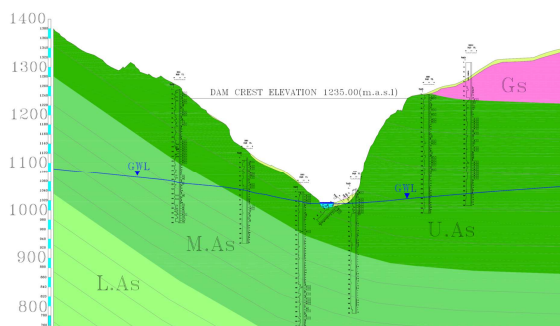
کردند. نتایج نشان داد که بیشترین همبستگی بین خوردند و عدد لوژن وجود دارد، اگرچه ارائه رابطه تخمین خوردند به علت همبستگی نسبتاً ضعیف میسر نبود [۱۵]. چیچائو^۵ و همکاران با استفاده از پردازش آماری داده‌های یک سد در کشور چین رابطه‌ای تجربی برای تخمین خوردند سیمان براساس مقادیر نفوذپذیری و شاخص کیفیت توده سنگ ارائه کردند، اگرچه همبستگی همچنان ضعیف و ضرایب تعیین کمتر از ۰/۵ بود [۱۶]. در مطالعه‌ای مشابه، رستگاریا و همکاران در ساختگاه سد بازفت، رابطه خوردند دوغاب و بازشدگی درزه‌ها را بررسی کردند [۱۷]. اوجه^۶ با استفاده از شبکه عصبی فازی و تحلیل آماری چندمتغیره به تخمین خوردند سیمان در پایدارسازی شفت معادن پرداخت [۱۸]. رحیمی و همکاران نیز از روش شبکه عصبی برای تخمین خوردند سیمان در ساختگاه سد کارون ۴ استفاده کردند که استفاده از این روش منجر به بهبود نسبی در ضرایب همبستگی حاصله شد [۱۹]. محققان در مطالعه‌ای، برای تخمین خوردند سیمان و دوغاب از داده‌های ساختگاه آهکی سد موت در کشور ترکیه استفاده نموده و با تحلیل آماری چندمتغیره روابط مختلفی برای تخمین خوردند ارائه نمودند [۲۰]. علاوه بر مطالعات تجربی، پژوهشگران با استفاده از مدل‌سازی عددی نفوذ دوغاب در داخل یک درزه منفرد ناهموار، به بررسی و تخمین خوردند دوغاب و سیمان پرداختند [۲۱]. همچنین در برخی از مطالعات اخیر، ترکیبی از روش‌های تحلیلی و تجربی برای تخمین خوردند سیمان براساس وضعیت نفوذپذیری توده سنگ در یک ساختگاه آهک کارستی به کار گرفته شده است [۲۲]. هدف اصلی در این مقاله، بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی در گمانه‌های حفاری شده پانل تزریق آزمایشی سد خرسان II و مقایسه میزان خوردند سیمان و دوغاب با برخی پارامترها و ویژگی‌های

⁷- Upper Asmari

⁸- Middle Asmari

⁵- Guichao

⁶- Öge



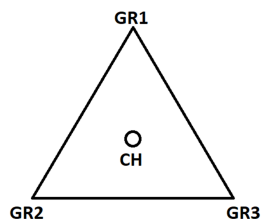
(ب)



(الف)

شکل ۱- (الف) تصویر و (ب) مقطع زمین‌شناسی محل محور سد خرسان II [۲۴]

نفوذپذیری اولیه برحسب عدد لوژن، براساس وضعیت آب برگشتی یا ریزشی بودن گمانه در قطعات ۵ متری تصمیم به ادامه حفاری یا شروع عملیات تزریق گرفته شده است؛ اگرچه با توجه به پایدار بودن گمانه‌ها، عموماً تزریق به صورت پایین به بالا انجام شده است. فشار تزریق براساس عمق قطعات مورد تزریق، وزن مخصوص سنگ، میزان نفوذپذیری و همچنین نوع پرشدگی محل تزریق و به‌گونه‌ای در نظر گرفته شده است که منجر به شکست هیدرولیکی نگردد. مقادیر فشار تزریق در هر قطعه در کنار مقدار وزن سیمان، نسبت آب به سیمان و حجم دوغاب مصرفی ثبت گردیده است.



شکل ۲- طرحی از آرایش گمانه‌های تزریق آزمایشی در

ساختگاه سدهای خرسان II

۴- مواد پژوهش و داده‌ها

از مهمترین مشخصات مؤثر بر خوردند سیمان و دوغاب تزریقی در توده سنگ می‌توان به نفوذپذیری توده سنگ، شاخص کیفی سنگ و ویژگی‌های فیزیکی و هندسی درزه‌ها نظیر فاصله‌داری و بازشدگی آنها اشاره نمود. در این پژوهش، رابطه بین شاخص کیفی سنگ،

واحد آسماری پایینی (L.As)^۹ ضخامت حدود ۱۲۰-۱۴۰ متر از آهک ضخیم لایه تا توده‌ای به رنگ نخودی روشن است که در پایین‌دست مجموعه سازه‌های طرح رخنمون دارد. در محل بستر رودخانه و نیز برخی نقاط روی واحدهای سنگی مصالح آبرفتی و واریزه‌ای قرار دارند.

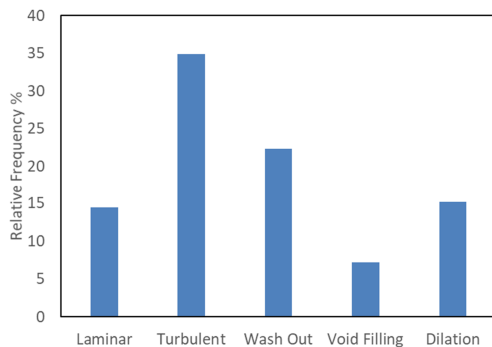
۳- مشخصات پانل تزریق آزمایشی

در آزمون تزریق‌پذیری توده‌سنگ ساختگاه سد خرسان II، عملیات تزریق آزمایشی سیمان در یک پانل تزریق آزمایشی با نام GR در تکیه‌گاه چپ سد و در سنگ‌های آهکی سازند آسماری انجام شده است. گمانه‌های پانل با آرایش مثلث متساوی الاضلاع (با طول ضلع ۳ متر) به‌صورت قائم و تا اعماق ۸۰ متری حفاری شده‌اند. این گمانه‌ها همگی در بالای سطح ایستابی و در وضعیت خشک می‌باشند. عملیات تزریق در این پانل‌ها به ترتیب با حفاری و تزریق گمانه ۱ شروع و پس از حفاری و تزریق هر سه گمانه گوشه مثلث، با حفر گمانه کنترلی در مرکز پانل تزریق آزمایشی خاتمه یافته است. شکل ۲ طرحی از آرایش گمانه‌های تزریق و موقعیت گمانه کنترلی را نشان می‌دهد.

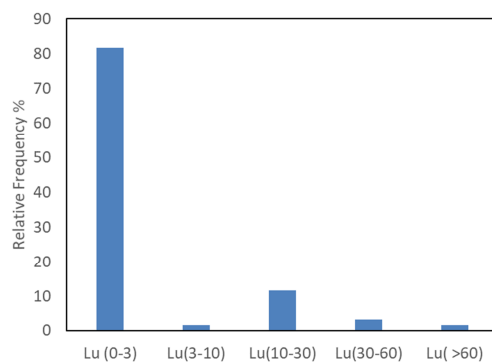
در حین حفاری، مقادیر شاخص کیفی توده سنگ ثبت گردیده و پس از حفاری و مشخص نمودن

^۹- Lower Asmari

شکل ۳ می‌باشد. همچنین مقادیر نفوذپذیری توده سنگ در پانل تزریق آزمایشی برحسب عدد لوژن مطابق نمودار شکل ۴ می‌باشد. چنانکه دیده می‌شود، نفوذپذیری ساختگاه، پایین و اکثراً در رده نفوذناپذیر بوده و مقدار کمی در رده نفوذپذیری متوسط قرار دارد.



شکل ۳- فراوانی نسبی انواع مختلف رفتار هیدرولیکی درزه‌ها در ساختگاه سد خرسان II



شکل ۴- فراوانی نسبی مقادیر مختلف عدد لوژن در پانل تزریق آزمایشی ساختگاه سد خرسان II

۴-۳- بازشدگی و فاصله‌داری درزه‌ها

برای محاسبه بازشدگی درزه‌ها در گمانه‌های پانل تزریق آزمایشی از رابطه تحلیلی نفوذپذیری در محیط‌های درزه‌دار استفاده شده است [۲]:

$$K = \frac{ge^3}{12\mu cb} \quad (2)$$

در این رابطه، g شتاب ثقل است که مقدار آن برابر ۹۸۱ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه، μ ویسکوزیته آب است که برابر با ۰/۰۱۰۹ سانتی‌مترمربع بر ثانیه، e بازشدگی درزه

نفوذپذیری، فاصله‌داری درزه و بازشدگی درزه‌ها با خوردن سیمان و دوغاب مقایسه و مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۱- شاخص کیفی سنگ (RQD)

شاخص کیفی توده سنگ (RQD^{10}) توسط دیر^{۱۱} ارائه شده است [۲۵]. میانگین شاخص کیفی توده سنگ در ساختگاه سد خرسان II در هر سه گمانه تزریق آزمایشی در محدوده ۷۵ تا ۱۰۰ درصد قرار داشته و از این نظر در رده با کیفیت خوب قرار می‌گیرد. تنها دو مورد از مقادیر شاخص کیفی توده سنگ در قطعات ۵ متری تزریق آزمایشی بین ۵۰ تا ۷۵ قرار دارد.

۴-۲- نفوذپذیری (عدد لوژن)

آزمایش فشار آب، معمول‌ترین آزمایش جهت تعیین نفوذپذیری و تزریق‌پذیری توده سنگ است. این آزمایش معمولاً در پنج پله و در بعضی مواقع در پله‌های فشار بیشتر و یا کمتر انجام می‌شود. فشارهای آزمایش به صورت پله‌ای تا فشار بیشینه افزایش و سپس تا فشار اولیه کاهش می‌یابد. مقدار لوژن در هر پله از فشار را می‌توان با استفاده از رابطه (۱) به دست آورد [۱]:

$$Lu = \frac{10Q}{P_e L} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، Q میزان جریان برحسب لیتر در دقیقه، L طول قطعه مورد آزمایش و P_e فشار مؤثر در مقطع آزمایش برحسب بار است. با داشتن مقادیر لوژن و مقایسه آنها با هم می‌توان رفتار جریان آب در درزه‌ها را گروه‌بندی نمود و آنگذری معرف را برای مقطع آزمایش ارائه داد. هولسبی^{۱۲} با توجه به رفتار جریان در طی فشارهای آزمایش، انواع مختلفی از رفتار هیدرولیکی را تعریف نموده است [۲۶]. در ساختگاه سد خرسان II فراوانی نسبی رفتار هیدرولیکی مختلف مطابق نمودار

¹⁰- Rock Quality Designation

¹¹- Deere

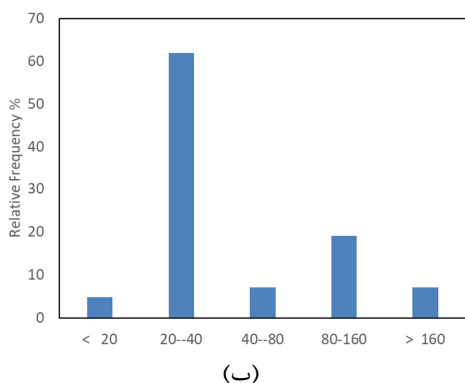
¹²- Houlby

[۲۷]. شکل ۵- الف، نمودار فراوانی نسبی بازشدگی درزه‌ها در ساختگاه پانل تزریق آزمایشی سد خرسان II را نشان می‌دهد.

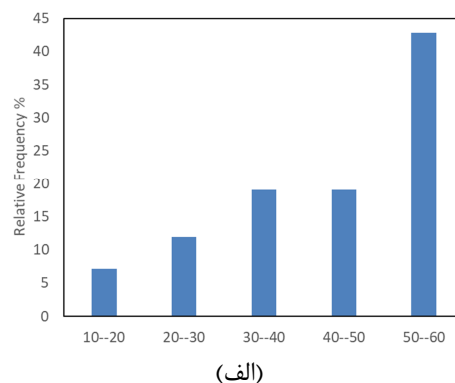
با در اختیار داشتن فاصله‌داری و نفوذپذیری توده سنگ و جایگزینی مقادیر ثابت ذکر شده در رابطه (۳) و حل این رابطه برای بازشدگی درزه، بازشدگی متوسط درزه‌ها در قطعات ۵ متری قابل محاسبه می‌باشد:

$$e = \sqrt[3]{K \times b \times 13 \times 10^{-5}} \quad (۳)$$

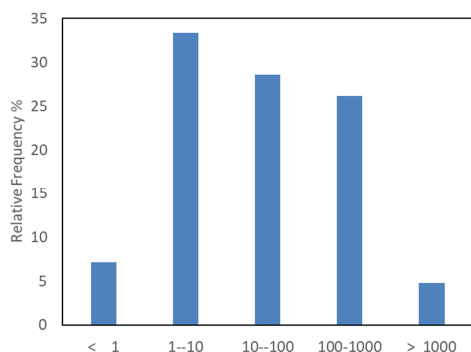
میزان بازشدگی درزه با رابطه (۳) برای مقاطع ۵ متری در هر کدام از گمانه‌های تزریق آزمایشی سد خرسان II محاسبه شده است. نمودار شکل ۵-ب، فراوانی نسبی مقادیر بازشدگی درزه‌ها در پانل تزریق آزمایشی این سد را نشان می‌دهد.



برحسب سانتی‌متر و K نفوذپذیری برحسب سانتی‌متر بر ثانیه می‌باشد که براساس مقادیر لوژان در مقاطع پنج متری محاسبه شده است. برای تبدیل عدد لوژن به نفوذپذیری از رابطه غیرخطی لوژن و نفوذپذیری استفاده و رفتار محیط حد واسط محیط‌های همسانگرد و ناهمسانگرد در نظر گرفته شده است [۱]. همچنین C ضریبی است که تابع وضعیت زبری سطح درزه بوده و اثر زبری نسبی سطح درزه را بر هدایت هیدرولیکی نشان می‌دهد. مقدار C برای درزه‌های صاف برابر یک است. در ساختگاه سد خرسان II و بازفت با توجه به اینکه مقدار Jr (زبری سطح درزه) در گمانه‌های پانل تزریق آزمایشی کمتر از ۲ است، از این رو، مقدار C را می‌توان برابر با یک فرض نمود. پارامتر b نیز فاصله درزه‌ها از یکدیگر برحسب سانتی‌متر می‌باشد. برای محاسبه متوسط فاصله درزه‌ها از یکدیگر از نمودار پیشنهادی بنیوسکی استفاده شده است



شکل ۵- فراوانی نسبی مقادیر مختلف (الف) فاصله‌داری درزه‌ها (سانتی‌متر)، (ب) بازشدگی درزه‌ها (میکرومتر) در پانل تزریق آزمایشی سد خرسان II



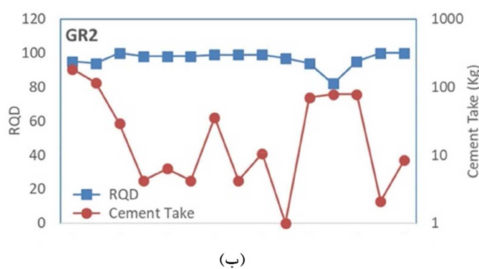
شکل ۶- فراوانی نسبی خوردند سیمان (کیلوگرم) در قطعات ۵ متری پانل تزریق آزمایشی سد خرسان II

کلیه داده‌های مورد اشاره شامل شماره گمانه، عمق قطعه، شاخص کیفی سنگ، عدد لوژن، نفوذپذیری، بازشدگی درزه، فاصله داری درزه‌ها، مقادیر سیمان و دوغاب تزریقی و فشار تزریق دوغاب برای هر قطعه ۵ متری تزریق آزمایشی در یک بانک اطلاعاتی گردآوری و برای پردازش‌های آماری، آماده گردید. فراوانی نسبی مقادیر خوردند سیمان برای قطعات ۵ متری در شکل ۶ ارائه شده است.

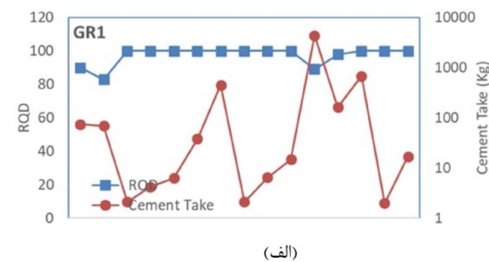
۵- تحلیل داده‌ها و بحث

هدف اصلی پژوهش حاضر، دستیابی به روابطی برای برآورد مقدار خوردن سیمان در فرایند تزریق می‌باشد. در این بخش، براساس بانک اطلاعاتی تهیه شده برای پانل تزریق آزمایشی، نمودارهای مقدار خوردن سیمان در کنار پارامترهای زمین‌شناسی مهندسی، ترسیم و مورد بررسی قرار گرفته است.

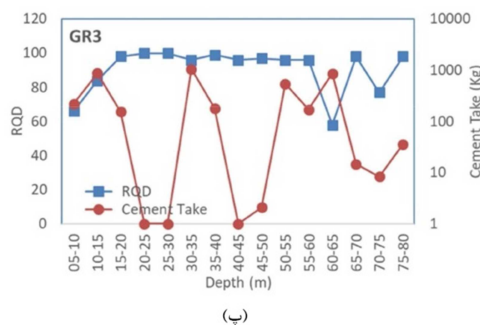
برای هر سه گمانه تزریق آزمایشی نمودار تغییرات خوردن سیمان برحسب کیلوگرم در هر ۵ متر طول قطعه



(ب)



(الف)



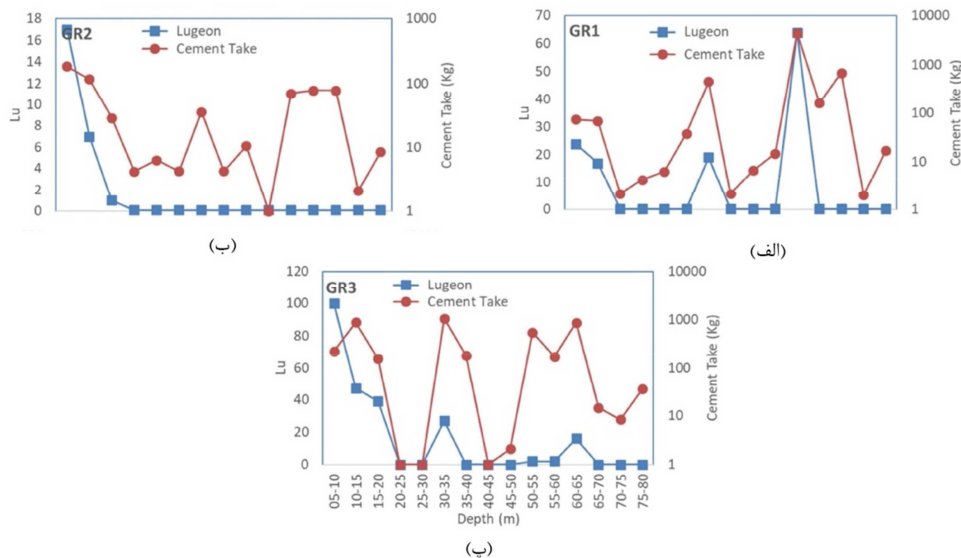
(پ)

شکل ۷- مقایسه خوردن سیمان با شاخص کیفی سنگ در سه گمانه تزریق آزمایشی، گمانه (الف) اول، (ب) دوم و (پ) سوم

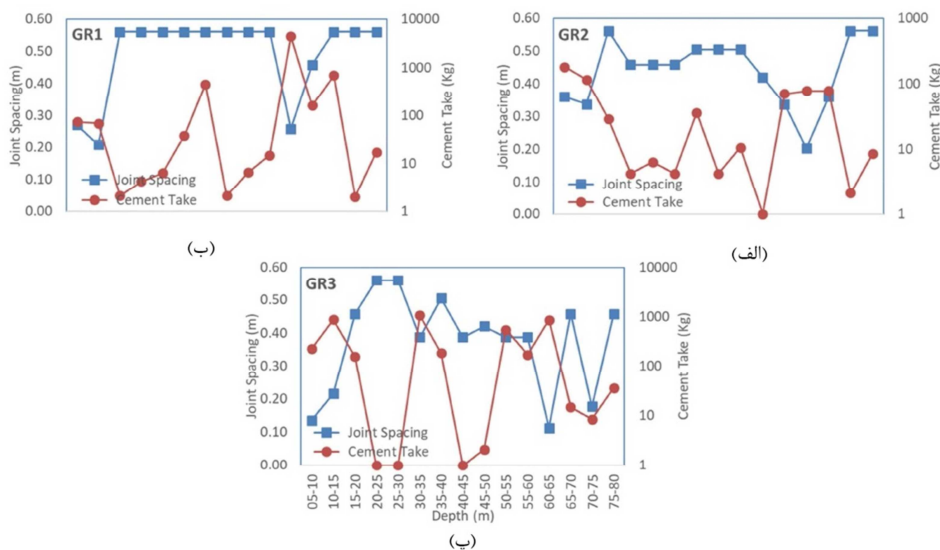
بسیار کمتر است. در این شکل، بار دیگر مقادیر بالای خوردن سیمان و اعداد لوژن بزرگتر در اعماق سطحی و نیز اعماق ۵۵ تا ۷۰ متر مشهود است. در گمانه دوم صرفا مقادیر لوژن بالا در نزدیک به سطح زمین دیده می‌شود.

شکل ۹ مقادیر خوردن سیمان را در کنار فاصله داری درزه‌ها نشان داده است. چنان که پیشتر اشاره شد، مقادیر فاصله داری با توجه به مقادیر شاخص کیفی سنگ به دست آمده و همانند شاخص کیفی، سازگاری نسبی خوبی با مقادیر خوردن سیمان نشان می‌دهند.

در شکل ۸، نمودار تغییرات خوردن سیمان با عدد لوژن برای هر سه گمانه تزریق آزمایشی نشان داده شده است. چنانکه دیده می‌شود، در گمانه اول و سوم تطابق مشهودی بین مقادیر خوردن سیمان و عدد لوژن وجود دارد. انطباق نسبی نقاط قعر و قله مقادیر خوردن سیمان و عدد لوژن، حکایت از سازگاری و همخوانی مناسب این دو پارامتر دارد. در ارتباط با این پارامترها در گمانه دوم تطابق کمتری دیده می‌شود، اگرچه باید توجه داشت که مقادیر خوردن در این گمانه در مقایسه با دو گمانه دیگر



شکل ۸- مقایسه خوردن سیمان با عدد لوژن در سه گمانه تزریق آزمایشی، گمانه (الف) اول، (ب) دوم و (پ) سوم



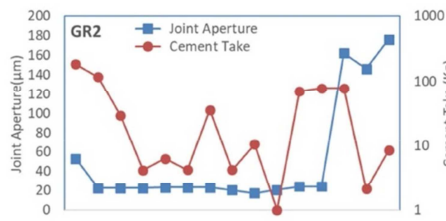
شکل ۹- مقایسه خوردن سیمان با فاصله داری درزه ها در سه گمانه تزریق آزمایشی، گمانه (الف) اول، (ب) دوم و (پ) سوم

که با وجود رابطه کمی مورد انتظار بین پارامترهای بررسی شده و خوردن سیمان، ضرایب همبستگی روابط برازش شده، پایین بوده و امکان استفاده از آنها برای تخمین مقادیر خوردن وجود ندارد. شکل ۱۱، بهترین روابط برازش شده بین پارامترهای مورد مطالعه و خوردن سیمان را نشان داده است. در بین پارامترهای بررسی شده، شاخص کیفی سنگ، دارای کمترین همبستگی می باشد. اگرچه با توجه به ماهیت تعریف RQD نمی توان رابطه مستقیم و دقیقی بین RQD و خوردن سیمان انتظار داشت؛ چه بسا وجود درزه های با فواصل چند ده

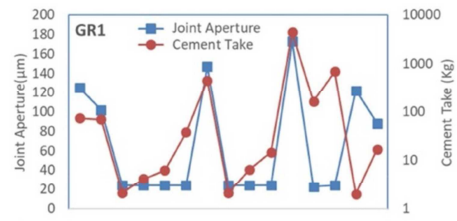
شکل ۱۰، مقادیر خوردن سیمان در هر سه گمانه پانل تزریق آزمایشی را در کنار بازشدگی درزه ها نشان داده است. بازشدگی درزه ها، ترکیبی از مقادیر شاخص کیفی سنگ و عدد لوژن را در خود دارد، این مسئله سبب شده است که سازگاری و تطابق مناسبی بین خوردن سیمان و بازشدگی درزه ها وجود داشته باشد. انطباق بین نقاط قله و قعر در هر دو نمودار خوردن سیمان و بازشدگی درزه ها دیده می شود. بررسی امکان برآورد مقادیر خوردن سیمان براساس برازش تک متغیره با پارامترهای ذکر شده نشان می دهد

نفوذپذیری و خوردن سیمان گردد.

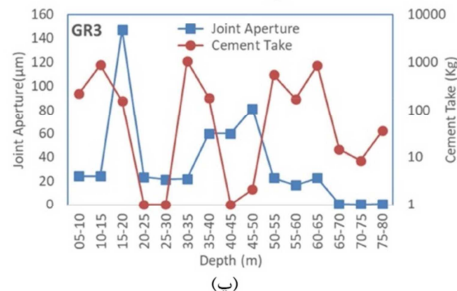
سانتی متر و بازشدگی قابل توجه که تغییر و افت شاخصی در RQD ایجاد نمی‌نماید، سبب افزایش قابل توجه



(ب)



(ف)

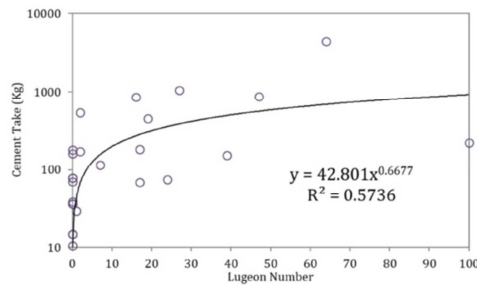


(پ)

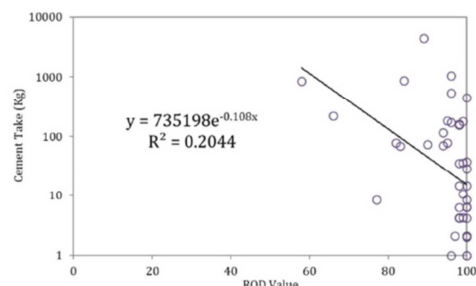
شکل ۱۰- مقایسه خوردن سیمان با بازشدگی درزه‌ها در سه گمانه تزریق آزمایشی، گمانه (الف) اول، (ب) دوم و (پ) سوم

بین خوردن سیمان و عدد لوژن می‌باشد. با این حال ضریب تعیین رابطه مذکور نیز نزدیک به ۰/۵ بوده و استفاده از آن برای برآورد مقدار خوردن می‌تواند، غیر دقیق و دارای خطای زیادی باشد.

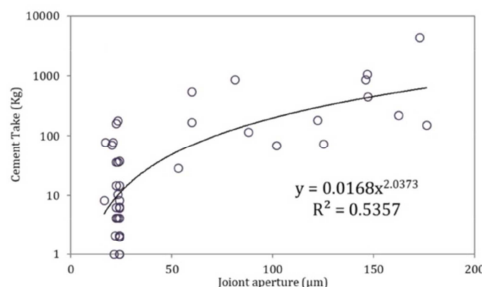
پس از RQD، فاصله‌داری درزه دارای کمترین همبستگی می‌باشد. همانگونه که انتظار می‌رود، همبستگی بیشتری بین خوردن سیمان و بازشدگی درزه وجود دارد، همچنین بیشترین همبستگی مربوط به رابطه



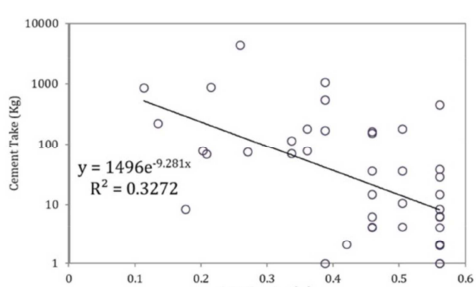
(ب)



(ف)



(ت)

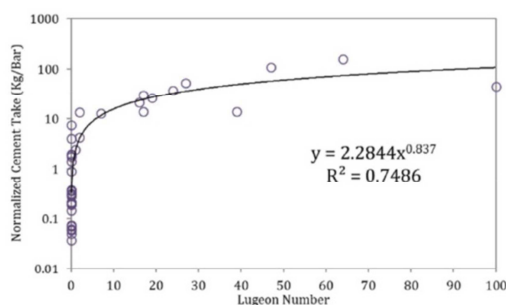


(پ)

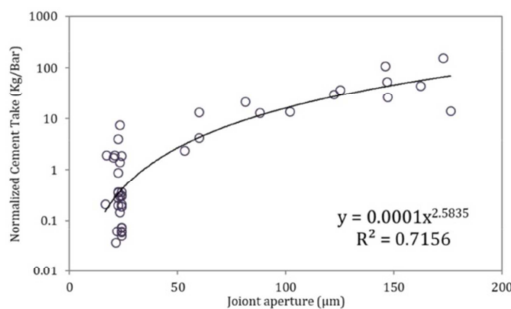
شکل ۱۱- برآزش خوردن سیمان با (الف) شاخص کیفی سنگ، (ب) عدد لوژن، (پ) فاصله‌داری درزه‌ها و (ت) بازشدگی درزه‌ها در پانل

تزریق آزمایشی سد خرسان II

بهبود همبستگی برای رابطه بین خوردن و RQD و همچنین رابطه بین خوردن و فاصله داری کم است، اما بهبود قابل توجهی در دو رابطه دیگر دیده می شود. نرمال کردن مقادیر خوردن به فشار اعمالی سبب حذف اثرات پراکندگی خوردن ناشی از فشار تزریق گردیده و برازش بسیار بهتری بین خوردن سیمان با عدد لوژن و همچنین بین خوردن سیمان و بازشدگی درزه ها ایجاد شده است. ضرایب تعیین در هر دو رابطه بیش از ۰/۷ بوده و می توان از روابط ارائه شده برای تخمین خوردن سیمان نرمال شده به فشار تزریق استفاده نمود.

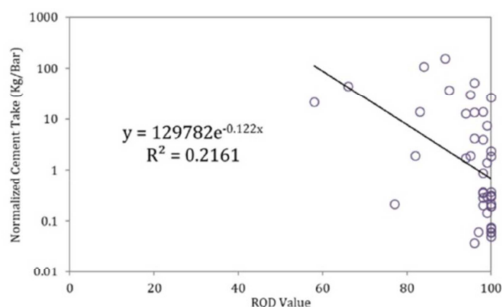


(ب)

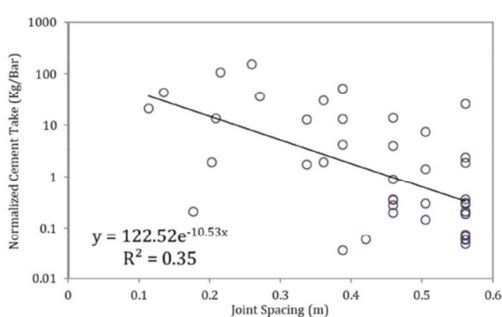


(ت)

همانگونه که در مقدمه مورد اشاره قرار گرفت علاوه بر پارامترها و مشخصات محیط زمین شناسی، فشار تزریق نیز یکی دیگر از عوامل تعیین کننده در فرایند تزریق است. عموماً با افزایش فشار، مقدار خوردن افزایش و با کاهش فشار مقدار خوردن کاهش خواهد یافت. با توجه به این مسئله مقادیر خوردن ثبت شده طی آزمایش تزریق بر مقادیر فشار اعمالی در هر قطعه نرمال و مجدداً روابط همبستگی بین پارامترهای ذکر شده بررسی شده و نتایج آن در شکل ۱۲ ارائه گردیده است. چنان که مشاهده می شود، در هر چهار پارامتر بررسی شده بهبود همبستگی و افزایش ضرایب تعیین مشاهده می گردد. اگرچه مقدار



(الف)



(پ)

شکل ۱۲- برازش خوردن سیمان نرمال شده به فشار تزریق با (الف) شاخص کیفی سنگ، (ب) عدد لوژن، (پ) فاصله داری درزه ها و (ت)

بازشدگی درزه ها در پانل تزریق آزمایشی سد خرسان II

۶- نتیجه گیری

درزه ها دارد. برازش تک متغیره خوردن سیمان با چهار پارامتر ذکر شده نشان داد که همبستگی نسبتاً ضعیفی بین خوردن سیمان و پارامترهای مذکور وجود دارد. در مقابل، بررسی همبستگی خوردن سیمان نرمال شده به فشار تزریق با پارامترهای مذکور، بهبود قابل توجهی در روابط برازش شده ایجاد نمود و رابطه (۴) با ضریب تعیین

در این مقاله از داده های پانل تزریق آزمایشی سد خرسان II برای بررسی امکان تخمین مقادیر خوردن سیمان استفاده شد. نتایج نشان داد که خوردن سیمان دارای رابطه معکوس با شاخص کیفی سنگ و فاصله داری درزه است و رابطه مستقیمی با عدد لوژن و بازشدگی

تقدیر و تشکر

داده‌های اولیه این پژوهش برگرفته از مطالعات مرحله اول و دوم سد خرسان II می‌باشد که توسط شرکت مهتاب قدس به انجام رسیده و از سوی شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران در اختیار محققین قرار گرفته است. به همین سبب از شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران جهت در اختیار قرار دادن این داده‌ها تشکر و قدردانی می‌گردد.

قابل قبول بیش از ۰/۷ بین خوردند نرمال شده با عدد لوژن به دست آمد:

$$NCT = 2.2844 \times Lu^{0.837} \quad (۴)$$

$$R^2 = 0.7486$$

در این رابطه، NCT خوردند سیمان نرمال شده برای قطعه ۵ متری از گمانه و Lu عدد لوژن در آن قطعه می‌باشد. رابطه ارائه شده می‌تواند برای ارزیابی و تخمین مقادیر خوردند در ساختگاه‌های مشابه مورد سنجش و آزمون قرار گیرد.

مراجع

- [1] Nonveiller, E. (1989). *Grouting theory and practice*. Development of Geotechnical Engineering, Elsevier.
- [2] Louis, C. (1974). *Introduction al'hydraulique des roches*. Bull BRGM, III, 4:283-356.
- [3] Priest, P. (1993). *Discontinuity Analysis for Rock Engineering*. Chapman and Hall.
- [4] Bell, G. (2000). *Engineering Properties of Soil and Rocks*. Blackwell science, 4th edition.
- [5] Foyo, A., Sánchez, M. A., & Tomillo, C. (2005). "A proposal for a secondary permeability index obtained from water pressure tests in dam foundations", *Engineering geology*, 77(1), 69-82.
- [6] Yang, M. J., Yue, Z. Q., Lee, P. K., Su, B., & Tham, L. G. (2002). "Prediction of grout penetration in fractured rocks by numerical simulation", *Canadian geotechnical journal*, 39(6), 1384-1394.
- [7] Hosseiny Sohi, S. M., Koch, M., & Ashjari, J. (2017). "Evaluating permeability and groutability at Karun 4 dam Iran using Lugeon values and grout Take", In *Symposium Proceeding of 85th Annual Meeting of International Commission on Large Dams, Prague*.
- [8] Jones, B. R., Van Rooy, J. L., & Mouton, D. J. (2019). "Verifying the ground treatment as proposed by the Secondary Permeability Index during dam foundation grouting", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(3), 1305-1326.
- [9] Zolfaghari, A., Sohrabi-Bidar, A., Maleki Javan, M. R., Haftani, M., & Mahinrad, A. (2015). "Evaluation of rock mass improvement due to cement grouting by Q-system at Bakhtiary dam site", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 74(1), 38-44.
- [10] Lunn, R. J., Corson, L. T., Howell, C., El Mountassir, G., Reid, C., & Harley, S. L. (2018). "Could magnetic properties be used to image a grouted rock volume?", *Journal of Applied Geophysics*, 155(2018), 162-175.
- [11] Ganjalipour, K., & Esmailzadeh, M. (2019). "Numerical modeling for evaluating grout curtain depth and providing a new approach for calculating the efficiency based on installation position of piezometers around sealing system", *Modeling Earth Systems and Environment*, 5, 1587-1605.
- [12] Zhang, W., Li, S., Wei, J., Zhang, Q., Liu, R., Zhang, X., & Yin, H. (2018). "Grouting rock fractures with cement and sodium silicate grout", *Carbonates Evaporites*, 33, 211-222.
- [13] Liu, Q., Xiao, F., & Zhao, Z. (2020). "Grouting knowledge discovery based on data mining", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 95, 103093, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103093>.
- [14] Gustafson, G., Claesson, J., & Fransson, Å. (2013). "Steering Parameters for Rock Grouting", *Journal of Applied Mathematics*, 2013, Article ID 269594, <https://doi.org/10.1155/2013/269594>.
- [15] Sohrabi-Bidar, A., Rastegar-Nia, A., & Zolfaghari, A. (2016). "Estimation of the grout take using empirical relationships (case study: Bakhtiari dam site)", *Bull Eng Geol Environ*, 75, 425-438.
- [16] Fan, G., Zhong, D., Wang, J., & Ren, B. (2016). "Cement Take Evaluation and Prediction based on Empirical Relationships and Support Vector Regression", In *2016 5th International Conference on Energy and Environmental Protection (ICEEP 2016)*, 699-704.
- [17] Rastegarnia, A., Sohrabi-Bidar, A., Bagheri, V., Razifard, M., & Zolfaghari, A. (2017). "Assessment of Relationship Between Grouted Values and Calculated Values in the Bazoft Dam Site", *Geotech Geol Eng*, 35, 1299-1310.
- [18] Öge, İ. F. (2017). "Prediction of cementitious grout take for a mine shaft permeation by adaptive neuro-fuzzy inference system and multiple regression", *Engineering Geology*, 228, 238-248.

- [19] Rahimi, E., Teshnizi, E. S., Rastegarnia, A., & Al-shariati, E. M. (2019). "Cement take estimation using neural networks and statistical analysis in Bakhtiari and Karun 4 dam sites, in south west of Iran", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(4), 2817-2834.
- [20] Kayabasi, A., & Gokceoglu, C. (2019). "An Assessment on Permeability and Grout Take of Limestone: A Case Study at Mut Dam, Karaman", Turkey. *Water*, 11(12), 2649, 10.3390/w11122649.
- [21] Mu, W., Li, L., Yang, T., Yu, G., & Han, Y. (2019). "Numerical investigation on a grouting mechanism with slurry-rock coupling and shear displacement in a single rough fracture", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(8), 6159-6177.
- [22] Niu, J. D., Wang, B., Chen, G. J., & Chen, K. (2019). "Predicting of the unit grouting quantity in karst curtain grouting by the water permeability of rock strata", *Applied Sciences*, 9(22), 4814, 10.3390/app9224814.
- [23] Abdollahisharif, J., & Bakhtavar, E. (2019). "Using geo-statistical simulation to determine optimal grout injection pressure in dam foundation based on geo-mechanical characteristics", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78, 2253-2266.
- [24] Mahab Ghods Consulting Engineers. (2010) "Engineering geological report, Feasibility study of Dam and Hydropower plant of Khersan II", Iran Water and Power Resources Development Company.
- [25] Deere, D. U., & Deere, D. W. (1989). *Rock quality designation (RQD) after twenty years*. Department of the Army U.S. Army Corps of the Engineers Washington, DC 20314-1000.
- [26] Houlby, A. C. (1976). "Routine interpretation of the Lugeon water-test", *Quarterly journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 9(4), 303-313.
- [27] Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons, ISBN10: 0471601721, ISBN13: 9780471601722.