

## ارزیابی کیفیت پرده آب‌بند سد سلمان فارسی با استفاده از شاخص نفوذپذیری ثانویه (SPI)

\*سیدمحمود فاطمی عقدا: دانشگاه خوارزمی، دانشکده علوم  
علی نورزاد: دانشگاه صنعت آب و برق تهران، دانشکده مهندسی آب و

محیط زیست

آرمان هدایی: دانشگاه خوارزمی

پذیرش ۹۱/۶/۱۹

تاریخ: دریافت ۹۰/۷/۲۸

### چکیده

سد سلمان فارسی در ۱۸۰ کیلومتری جنوب شرقی شیراز بر روی رودخانه قره‌آغاج واقع شده است. سد از نوع بتنی قوسی-وزنی با ارتفاع ۱۲۵ متر از پی است. پرده آب‌بند این سد تماماً در محیط کارستی، درون آهک‌های آسماری قرار دارد. برای ارزیابی کیفیت پرده آب‌بند، پس از عملیات تزریق گمانه‌های کنترلی حفر شده و آزمایش فشار آب در آنها صورت گرفته است. در این تحقیق با توجه به نتایج آزمایش فشار آب، شاخص نفوذپذیری ثانویه محاسبه گردید و با طبقه‌بندی توده سنگ، کیفیت آنها بعد از تزریق مشخص شد. نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده کیفیت بهتر پرده آب‌بند در جناح راست نسبت به جناح چپ سد است. در کل کیفیت پرده آب‌بند خوب تا عالی است. هم‌چنین با استفاده از مقایسه درجه درزه‌داری و SPI به‌دست آمده، پیشنهادهایی در زمینه به‌سازی ساخت‌گاه سد داده شده که مجموعاً ۱۴/۵۱٪ از مقاطع آزمایش شده نیاز به به‌سازی دارند.

واژه‌های کلیدی: سد سلمان فارسی، پرده آب‌بند، گمانه کنترلی، آزمایش فشار آب، شاخص نفوذپذیری ثانویه، درجه درزه‌داری.

Fatemi@tmu.ac.ir

نویسنده مسئول

### مقدمه

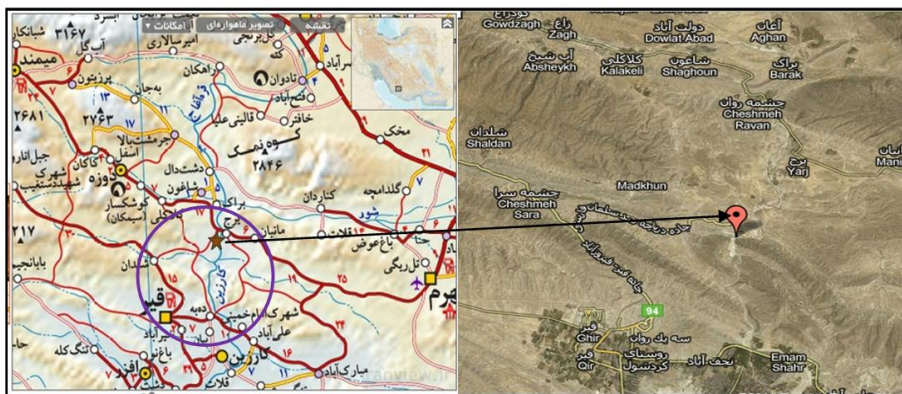
سد سلمان فارسی در ۱۸۰ کیلومتری جنوب شرقی شیراز بر روی رودخانه قره‌آغاج واقع شده است. سد از نوع بتنی قوسی-وزنی با ارتفاع ۱۲۵ متر از پی، و حجم مخزن آن در تراز نرمال یک میلیارد و چهارصد میلیون متر مکعب است. پرده آببند این سد از نوع معلق است و تمام مسیر آن درون آهک‌های آسماری قرار دارد. انجام عملیات تزریق و آببند کردن پی و تکیه‌گاه‌ها در طرح‌های سدسازی از اساسی‌ترین و پر هزینه‌ترین بخش‌های اجرایی سد است. ارزیابی‌هایی که بر روی پرده آببند صورت گرفته متنوع و گسترده است و از آن جمله می‌توان به بررسی طراحی پرده آببند سد مسوچورا<sup>۱</sup> در یونان با استفاده از نتایج تزریق توسط لامبروپولوس (۲۰۱۰)[۱۲]، بررسی پرده آببند سد دال<sup>۲</sup> در کرواسی با استفاده از نتایج ابزار دقیق توسط بوناچی و بوناچی (۲۰۱۰) [۶]، ارزیابی وضعیت پرده تزریق پی سد بیدواز اسفراین با استفاده از میزان خوردند سیمان، توسط میرانی مقدم و اسپندار (۱۳۸۷)[۵] و یا ارزیابی پرده آببند در تکیه‌گاه چپ سد ارداک با استفاده از نتایج خوردند، بررسی گمانه‌های کنترلی و آزمایش لوژان، توسط عباسی و همکاران (۱۳۸۶)[۱] اشاره کرد. یکی از روش‌های ارزیابی موفقیت‌آمیز بودن عملیات تزریق پرده آببند، حفر گمانه‌های کنترلی و انجام آزمایش فشار آب در آن‌ها است. در این تحقیق با استفاده از نتایج آزمایش فشار آب در ۵۸۵ مقطع از ۴۹ حلقه گمانه کنترلی حفر شده در گالری‌های این سد و تعیین شاخص نفوذپذیری ثانویه برای هر یک از این مقاطع، توده سنگ ساخت‌گاه سد پس از تزریق ارزیابی شد.

### ویژگی عمومی و زمین‌شناسی منطقه بررسی شده

سد سلمان فارسی در استان فارس ۱۸۰ کیلومتری جنوب شرقی شیراز (۳۰ کیلومتری شمال شرقی قیر) بر روی رودخانه قره‌آغاج واقع شده است (شکل ۱). طول جغرافیایی محل احداث سد  $۱۳^{\circ}۵۳'۱۳''$  شرقی و عرض جغرافیایی آن  $۲۹^{\circ}۳۲'۲۸''$  شمالی است. بدنه سد و پرده آببند روی سازند آسماری قرار دارد. این سازند به سه بخش بالایی، میانی و پایینی تقسیم می‌شود. بخش بالایی آسماری: شامل آهک صدف‌دار، آهک مارنی و مارن است.

۱. Messochora

۲. Dale



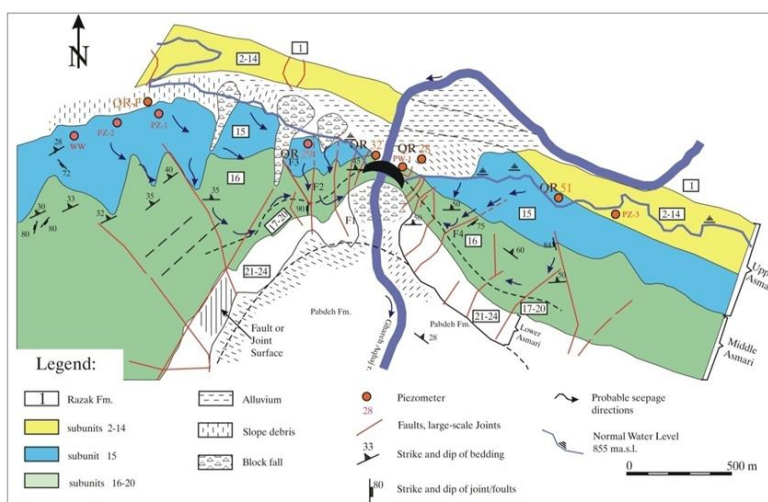
شکل ۱. موقعیت سد و راه های دسترسی

آثار کارست در این واحد به ندرت دیده می شود. بخش میانی آسماری: شامل کالکارنایت (آهک ماسه ای)، آهک چرتی، آهک نومولیتی، آهک کریستاله و هم چنین تعداد کمی میان لایه های آهک مارنی و مارن است. به دلیل تنوع لیتولوژیکی و وجود سنگ های قابل انحلال شبکه وسیعی از عوارض کارستی در آن به وجود آمده است. بدنه سد و قسمت عمده پرده آب بند در همین واحد قرار گرفته است. بخش پایینی آسماری: قسمت بالایی این بخش متشکل از تناوب سنگ آهک ضخیم لایه و مارن و قسمت پایین آن شامل تناوب منظمی از آهک های نازک لایه و مارن است. در پایین دست آسماری پایینی سازند پابده است که شامل آهک نازک لایه، شیل و مارن است [۲]. انتهای پرده آب بند درون سازند آسماری پایینی قرار دارد و به سازند پابده نمی رسد. در شکل ۲ نقشه زمین شناسی محدوده ساخت گاه سد مشاهده می شود.

### روش تحقیق

یکی از مسائل مهم در سدسازی، اجرای پرده آب بند و اطمینان از اجرای درست و موفقیت آمیز آن است. برای این امر لازم است ارزیابی عمل کرد عملیات تزریق صورت پذیرد، لذا پس از پایان حفاری ها و تزریق، برای ارزیابی عمل کرد عملیات تزریق و میزان موفقیت آن، گمانه های کنترلی، حفاری و تزریق می شوند. در این پژوهش گمانه ها به طور عمودی و زاویه دار و با آزمون های مختلف حفاری شده اند. پراکندگی این گمانه ها طوری طراحی شده است که اکثر سنگ بستر تزریق شده ارزیابی شود. هم چنین پس از حفاری گمانه های کنترلی،

آزمایش فشار آب در آن‌ها انجام شده است. آزمایش فشار آب معمول‌ترین روش اندازه‌گیری نفوذپذیری توده‌های سنگی درزه‌دار در صحرا، شیوه ابداع شده توسط لوژان (۱۹۳۳) است. در طی انجام آزمایش فشار آب (WPT) آب، مقطع به مقطع به داخل گمانه تحت فشار تزریق می‌گردد و مقاطع در هر آزمایش از یک‌دیگر جدا می‌شوند. حجم آب تزریق شده در محدوده هر مقطع تحت آزمایش منجر به نتیجه‌گیری در مورد نفوذپذیری می‌شود. فشار در طول آزمایش متغیر است تا رفتار تراوایی در حالت وابسته به فشار بررسی شود. نفوذپذیری سنگ‌های درزه‌دار، به ویژگی‌های ناپیوستگی مانند درجه درزه‌داری، بازشدگی درزه‌ها، پیوستگی درزه‌ها و خصوصیات مواد پرکننده بستگی دارد. درجه درزه‌داری و بازشدگی ناپیوستگی‌های سنگ را می‌توان با بررسی مغزه‌های حفاری شده تخمین زد، ولی پیوستگی درزه‌ها و مواد پرکننده آن‌ها را نمی‌توان با بررسی ظاهری آن‌ها برآورد کرد. از این رو بررسی خصوصیات و کیفیت توده سنگ با شاخص نفوذپذیری ثانویه (SPI) پیشنهاد می‌شود. با استفاده از حجم آب تزریق شده و فشار آب می‌توان به راحتی شاخص نفوذپذیری ثانویه را محاسبه کرد. با استفاده از این شاخص توده سنگ‌های موجود در ساخت‌گاه سد، به مناطق با کیفیت‌های مختلف طبقه‌بندی شده‌اند که هر کدام رفتار جداگانه دارند [۹].



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی محدوده ساخت‌گاه سد

## شاخص نفوذپذیری ثانویه

گانگوپدهای (۱۹۸۱) [۱۰]، شاخص نفوذپذیری ثانویه را با در نظر گرفتن مقطع آزمایش استوانه‌ای شکل، به صورت رابطه (۱) تعریف کرده است (فویو و همکاران) [۹]:

$$SPI = C \frac{\ln\left(\frac{2l_e}{r} + 1\right)}{2\pi l_e} \frac{Q}{Ht} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن:

**SPI**: شاخص نفوذپذیری ثانویه بر حسب لیتر در ثانیه در مترمربع از سطح گمانه  $(l/s \times m^2)$

**C**: ضریب ثابت وابسته به ویسکوزیته که برای سنگ‌ها در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد

$10^{-10} \times 1/49$  در نظر گرفته می‌شود (اسنو، ۱۹۸۵) [۱۴]

**le**: طول مقطع آزمایش در گمانه بر حسب متر (m)

**r**: شعاع گمانه بر حسب متر (m)

**Q**: مقدار جریان آب جذب شده توسط توده سنگی شکسته شده (l)

**t**: مدت زمان هر مرحله از فشار (s)

**H**: فشار کل بیان شده به صورت ارتفاع ستون آب (m)

این شاخص بر حسب پارامترهای کلاسیک مانند فشار و جذب آب تعریف شده است و برخلاف لوژان نیازمند به تبدیل نیست. همچنین واحد **SPI**، بیان کننده مقدار جذب آب در واحد زمان (لیتر در ثانیه) برای سطح مورد نظر بر حسب مترمربع است، بنا بر این شاخصی مناسب برای سنگ‌های درزه‌دار است که بر مبنای آن می‌توان توده سنگ را بر اساس نفوذپذیری طبقه‌بندی، و مقدار هدایت هیدرولیکی آن را تعیین کرد.

۲-۳ طبقه‌بندی توده سنگ با استفاده از **SPI**

با توجه به تعریف **SPI** می‌توان توده سنگ را بر حسب میزان جذب آن که تابع میزان و وضعیت شکستگی‌های آن است تقسیم‌بندی کرد. همچنین با استفاده از این شاخص می‌توان طرح مناسب به‌سازی سنگ را نیز ارائه و میزان موفقیت اجرای طرح به‌سازی آن را کنترل کرد.

در جدول ۱ چگونگی رده‌بندی توده سنگ با استفاده از SPI و نیز معادل تقریبی لوژان برای هر رده<sup>۱</sup> توده سنگ آورده شده است [۹].

جدول ۱. طبقه‌بندی و کیفیت توده سنگ بر اساس SPI و معادل تقریبی لوژان برای هر رده [۹]

$1.72 \times 10^{-12} <$	$1.72 \times 10^{-12} \geq$	$1.72 \times 10^{-13} \geq$	$2.16 \times 10^{-14} \geq$	SPI (l/s×m <sup>2</sup> )
رده D	رده C	رده B	رده A	طبقه‌بندی توده سنگ
بسیار ضعیف	ضعیف	خوب تا نسبتاً خوب	عالی	کیفیت توده سنگ
> ۸۰	۸ تا ۸۰	۱ تا ۸	≤ ۱	معادل تقریبی لوژان
تزیق به صورت گسترده	تزیق مجدد	تزیق به صورت محلی	ندارد	نیاز به به‌سازی

بر اساس بررسی‌های صورت گرفته توسط شیباتا (۱۹۸۱) [۱۳]، کوتزرنر (۱۹۹۶) [۱۱] و فویو و سانچز (۲۰۰۲) [۷] مشخص شده است که آزمایش فشار آب در توده سنگ سبب تغییراتی در وضعیت درزه‌های سنگ‌ها می‌شود. برای تشخیص این تغییرات می‌توان از نمودارهای فشار آب در مقابل SPI استفاده کرد. با استفاده از این نمودارها می‌توان نوع<sup>۲</sup> رفتار جریان در مقاطع مختلف را تشخیص داد و سپس بر اساس نوع رفتار جریان، مقطع مورد نظر را طبقه‌بندی کرد [۹]. در واقع با استفاده از این چهار نوع رفتار جریان (نمودارهای شکل ۳) در مقاطع مختلف، می‌توان توده سنگ را در چهار رده (A, B, C و D) طبقه‌بندی کرد. انواع این رفتارها و نحوه طبقه‌بندی توده سنگ با این نمودارها در شکل ۳ مشاهده می‌شوند.

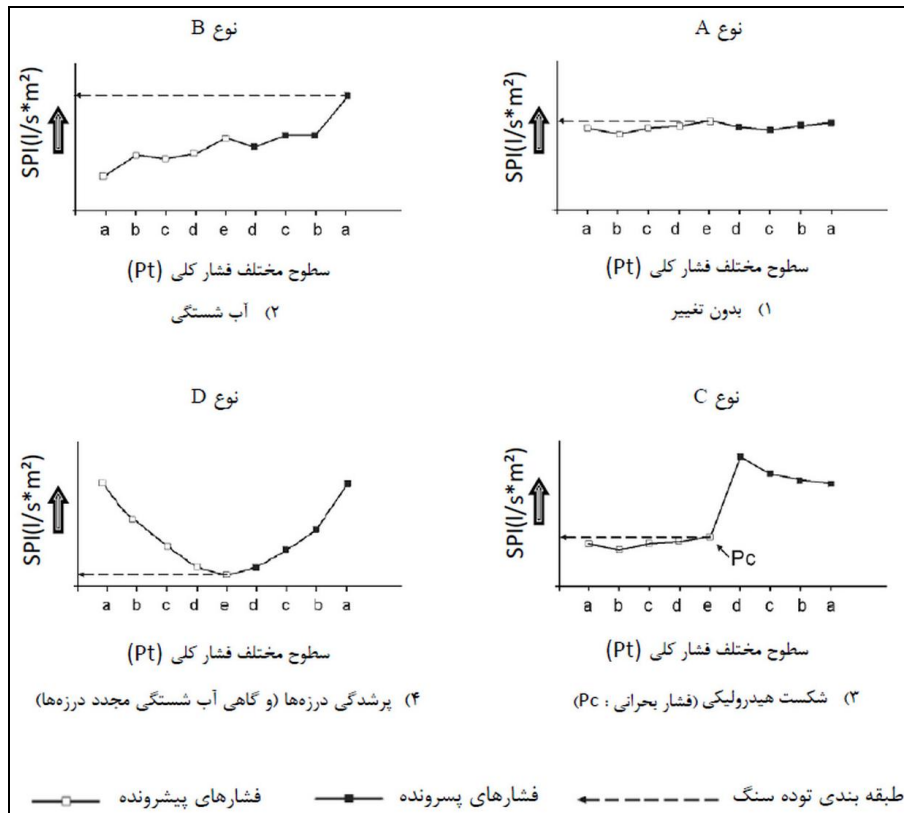
## تجزیه و تحلیل نتایج SPI و طبقه‌بندی توده سنگ ساخت‌گاه سد سلمان فارسی

در این تحقیق برای همه ۵۸۵ مقطع از ۴۹ گمانه کنترلی، نمودارهای فشار-شاخص نفوذپذیری ثانویه رسم شده و برای همه مقاطع، SPI و نوع رفتار سنگ، محاسبه و تعیین شده است. چند نمونه از محاسبات و نمودارهای رسم شده برای رفتارهای A, B, C و D برای چهار مقطع از گمانه‌های کنترلی سد سلمان فارسی در ادامه آورده شده است.

تعیین SPI برای نمودارهای نوع A (گمانه کنترلی 853-CH4، مقطع ۵۰-۴۵ متری)

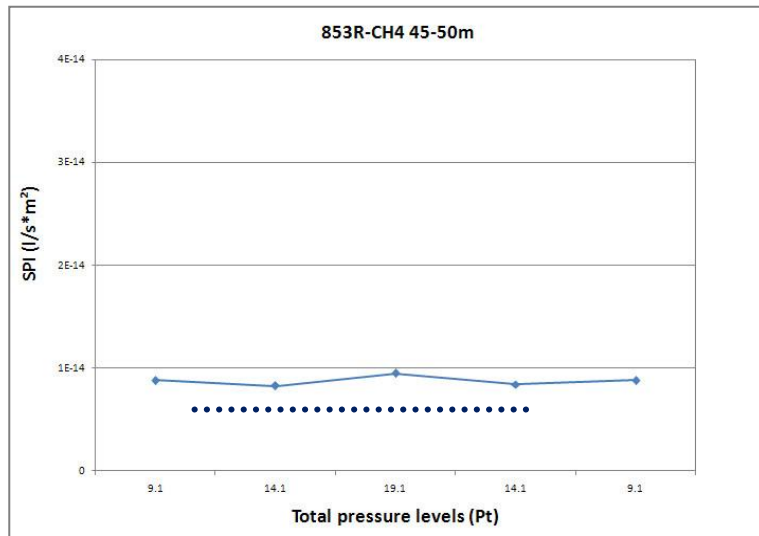
در جدول ۲، SPI محاسبه شده برای تمامی پله‌های فشار مشاهده می‌شود.

۱. Class                      ۲. Type



۵۰- ۴۵m	Le	Pe	Q	SPI	Lu	SPI	LUGEON	TYPE	GROUP
a	۵	۹/۱	۰/۶۲	۸/۸۱۱۹۵E-۱۵	۰/۷	۹/۴۸E-۱۵	۱	A	A
b	۵	۱۴/۱	۰/۹	۸/۲۵۵۵۳E-۱۵	۰/۶				
c	۵	۱۹/۱	۱/۴	۹/۴۸۰۱۷E-۱۵	۰/۷				
b	۵	۱۴/۱	۰/۹۲	۸/۴۳۸۹۹E-۱۵	۰/۷				
a	۵	۹/۱	۰/۶۲	۸/۸۱۱۹۵E-۱۵	۰/۷				

با توجه به نتایج جدول ۲، نمودار شکل ۴ به دست می‌آید.



شکل ۴. نمودار SPI-Pt برای مقطع ۴۵-۵۰ متری گمانه CH4 در گالری ۸۵۳

چنان‌که در نمودار شکل ۴ مشاهده می‌شود نوع جریان در این مقطع، نوع A است، که نشان‌دهنده یک‌نواختی جریان در این مقطع است، و برای طبقه‌بندی توده سنگ، SPI مربوط به بیش‌ترین فشار را در نظر می‌گیریم، که در این مقطع  $10^{-10} \times 9/48015$  است و در نتیجه توده سنگ، در رده A قرار می‌گیرد. (خط نقطه‌چین نشان‌دهنده رده مقطع)

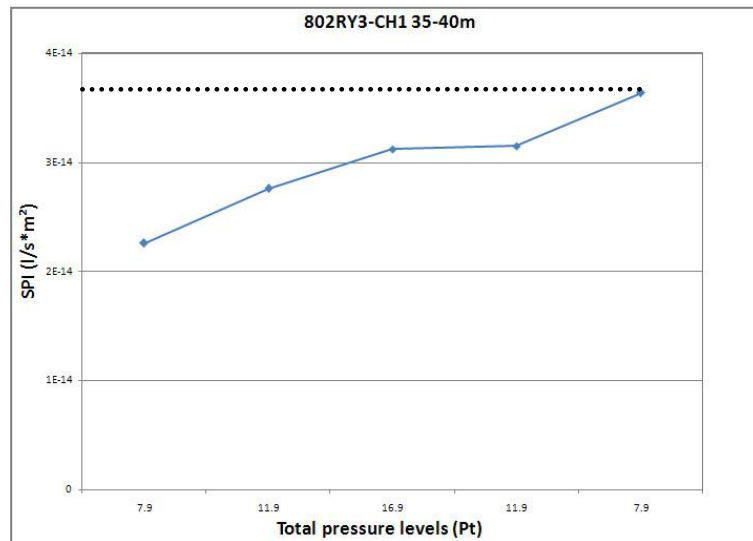
تعیین SPI برای نمودارهای نوع B (گمانه کنترلی CH1 بخش Y3 گالری ۸۰۲ راست، مقطع ۳۵-۴۰ متر)

برای همه پله‌های فشار و میزان آب جذب شده برای هر پله فشار، SPI را محاسبه می‌کنیم که نتایج در جدول ۳ مشاهده می‌شود.

جدول ۳. محاسبه SPI در مقطع ۳۵-۴۰ متری گمانه CH1 در بخش Y3 گالری ۸۰۲ راست

۴۰-۳۵m	Le	Pe	Q	SPI	Lu	SPI	LUGEON	TYPE	GROUP
A	۵	۷/۹	۱/۳۸	۲/۲۵۹۳E-۱۴	۱/۷	۳/۶۳E-۱۴	۳	B	B
B	۵	۱۱/۹	۲/۵۴	۲/۷۶۰۶۳E-۱۴	۲/۱				
C	۵	۱۶/۹	۴/۰۸	۳/۱۲۲۴۵E-۱۴	۲/۴				
B	۵	۱۱/۹	۲/۹	۳/۱۵۱۹E-۱۴	۲/۴				
A	۵	۷/۹	۲/۲۲	۳/۶۳۴۵۲E-۱۴	۲/۸				

با توجه به نتایج جدول ۳، نمودار شکل ۵ به دست می‌آید.



شکل ۵. نمودار SPI-Pt مقطع ۳۵-۴۰ متری گمانه CH1 در بخش Y3 گالری ۸۰۲ راست

چنان‌که در شکل ۵ مشاهده می‌شود نوع جریان در این مقطع نوع B است و برای تعیین طبقه‌بندی توده سنگ در این مقطع باید بیش‌ترین SPI را در نظر بگیریم که SPI مربوط به فشار ۷/۹ در فشارهای پس‌رونده است و برابر با  $3/63452 \times 10^{-14}$  است. در نتیجه این مقطع در رده B قرار می‌گیرد.

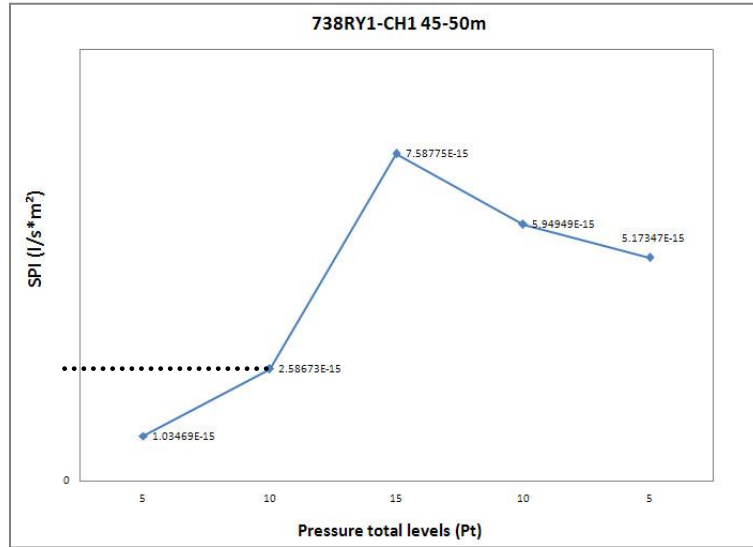
تعیین SPI برای نمودارهای نوع C (گمانه Y1-CH1 در گالری ۷۳۸ راست، مقطع ۴۵-۵۰ متری)

برای همه پله‌های فشار SPI را محاسبه می‌کنیم که در جدول ۴ مشاهده می‌شود.

جدول ۴. محاسبه SPI در مقطع ۴۵-۵۰ متری گمانه CH1 در بخش Y1 گالری ۷۳۸ راست

۴۵-۵۰m	Le	Pe	Q	SPI	Lu	SPI	LUGEON	TYPE	GROUP
a	۵	۵	۰/۰۴	۱/۰۳۴۶۹E-۱۵	۰/۱	۲/۵۹E-۱۵	۱	C	A
b	۵	۱۰	۰/۲	۲/۵۸۶۷۳E-۱۵	۰/۲				
c	۵	۱۵	۰/۸۸	۷/۵۸۷۷۵E-۱۵	۰/۶				
b	۵	۱۰	۰/۴۶	۵/۹۴۹۴۹E-۱۵	۰/۵				
a	۵	۵	۰/۲	۵/۱۷۳۴۷E-۱۵	۰/۴				

با استفاده از نتایج به دست آمده از جدول ۴، نمودار شکل ۶ به دست می‌آید.



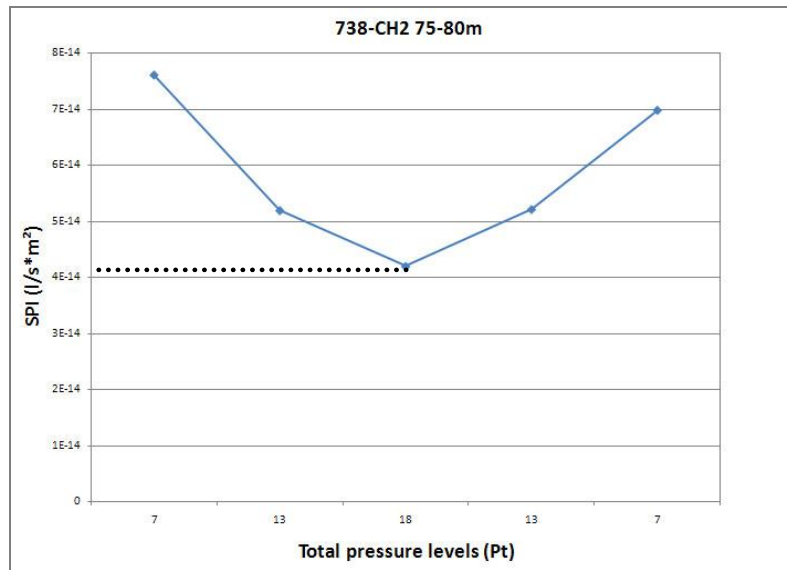
شکل ۶. نمودار SPI-Pt در مقطع ۴۵-۵۰ متری گمانه CH1 در بخش Y1 گالری ۷۳۸ راست با توجه به نمودار شکل ۶ مشخص می‌شود که نوع جریان در این مقطع، نوع C است و برای طبقه‌بندی توده سنگ باید SPI مربوط به فشار بحرانی (فشاری که شکست هیدرولیکی در آن صورت گرفت‌هاست) در نظر گرفته شود که در اینجا  $10^{-15} \times 2/58673$  بوده است و در نتیجه، توده سنگ در رده A قرار دارد.

تعیین SPI برای نمودارهای نوع D (گمانه کنترلی CH-2 در گالری ۷۳۸ راست، مقطع ۷۵ تا ۸۰ متری)

برای همه پله‌های فشار SPI را محاسبه می‌کنیم که در جدول ۵ مشاهده می‌شود.  
جدول ۵. محاسبه SPI در مقطع ۷۵-۸۰ متری در گمانه CH2 در گالری ۷۳۸ راست

۷۵-۸۰m	Le	Pe	Q	SPI	Lu	SPI	LUGEON	TYPE	GROUP
a	۵	۷	۴/۱۲	۷/۶۱۲۳۹E-۱۴	۵/۹	۴/۲۰E-۱۴	۳	D	B
b	۵	۱۳	۵/۲۲	۵/۱۹۳۳۶E-۱۴	۴				
c	۵	۱۸	۵/۸۴	۴/۱۹۶۲۶E-۱۴	۳/۲				
b	۵	۱۳	۵/۲۴	۵/۲۱۳۲۶E-۱۴	۴				
a	۵	۷	۳/۷۸	۶/۹۸۴۱۸E-۱۴	۵/۴				

با توجه به نتایج جدول ۵، نمودار شکل ۷ به دست می آید.



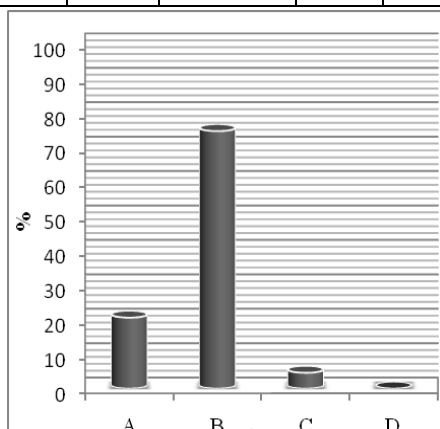
شکل ۷. نمودار SPI-Pt در مقطع ۷۵-۸۰ متری در گمانه CH2 گالری ۷۳۸ راست چنانکه در نمودار شکل ۷ مشاهده می شود نوع جریان در این مقطع نوع D است و برای تعیین طبقه بندی توده سنگ در این مقطع باید کمترین SPI را در نظر بگیریم که SPI فشار ۱۸ بار، که برابر است با  $4/19626 \times 10^{-14}$  و در نتیجه این مقطع در رده B قرار می گیرد. در جدول های ۶ و ۷ و شکل ۸، فراوانی SPI در مقاطع مختلف گمانه های کنترلی گالری های دو جناح سد مشاهده می شود.

جدول ۶. فراوانی SPI در مقاطع گمانه های آزمایشی گالری های دو جناح سد

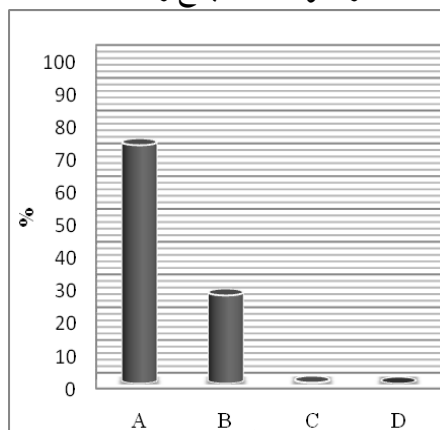
رده	گالری های جناح راست سد					گالری های جناح چپ سد			
	738R	769R	802R	835R	853R	738L	802L	835L	853L
A	۱۰۱	۳۸	۵۶	۱۲	۲۸	۱۹	۲۶	۴	۵
B	۳۲	۶	۳۱	۴	۱۴	۱۱۳	۲۲	۲۷	۳۴
C	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۷	۴
D	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
جمع	۱۳۳	۴۴	۸۷	۱۶	۴۳	۱۳۲	۴۹	۳۸	۴۳

جدول ۷. فراوانی SPI در مجموع دو جناح پرده آب‌بند

رده	گالری‌های جناح راست سد		گالری‌های جناح چپ سد		مجموع گالری‌های دو جناح	
	تعداد مقاطع	%	تعداد مقاطع	%	TOTAL	%
A	۲۳۵	۷۲/۷۶	۵۴	۲۰/۶۱	۲۸۹	۴۹/۴۰
B	۸۷	۲۶/۹۳	۱۹۶	۷۴/۸۱	۲۸۳	۴۸/۳۸
C	۱	۰/۳۱	۱۲	۴/۵۸	۱۳	۲/۲۲
D	۰	۰	۰	۰	۰	۰
جمع	۳۲۳	۱۰۰	۲۶۲	۱۰۰	۵۸۵	۱۰۰



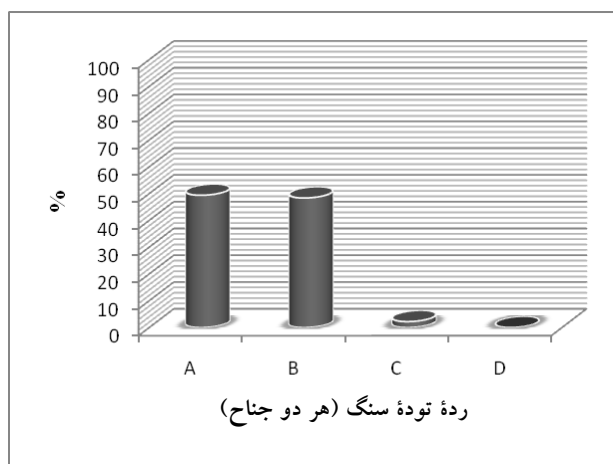
رده توده سنگ (جناح راست)



رده توده سنگ (جناح چپ)

شکل ۸. نمودارهای فراوانی SPI در دو جناح سد

در جناح راست سد، رده A اکثریت مقاطع گمانه‌های کنترلی را با  $72/76\%$  شامل می‌شود و نشان‌دهنده این است که در اکثر مقاطع مورد آزمایش، کیفیت پرده آب‌بند در تکیه‌گاه راست عالی است. سپس رده B در این گالری با  $26/93\%$  قرار دارد که نشان‌دهنده کیفیت نسبتاً خوب تا خوب پرده آب‌بند در مقاطع مورد آزمایش است. همچنین رده C که نشان‌دهنده کیفیت ضعیف توده سنگ است در این تکیه‌گاه با درصد پایین  $0/31\%$  وجود دارد. در جناح چپ سد، رده B که نشان‌دهنده کیفیت نسبتاً خوب تا خوب پرده آب‌بند است با  $74/81\%$  از مقاطع گمانه‌های گالری چپ، بیش‌ترین مقدار را داشته است و سپس رده‌های A و C با  $20/61\%$  و  $4/58\%$  قرار دارند که به ترتیب نشان‌دهنده کیفیت عالی و ضعیف پرده آب‌بند هستند. با توجه به این که رده A در جناح چپ  $20/61\%$  از مقاطع را شامل می‌شود، نمی‌توان عمل‌کرد تزریق را عالی ارزیابی کرد، البته با توجه به کارستی بودن سنگ‌های پی و تکیه‌گاه‌ها، و وجود نداشتن رده D و درصد پایین مقاطع در بردارنده رده C نمی‌توان این عمل‌کرد را ناموفق دانست. به‌طور کلی عمل‌کرد نسبتاً خوبی را برای عملیات تزریق در این جناح می‌توان ارزیابی کرد. در ارزیابی کلی مشخص است که  $97/78\%$  از مقاطع مورد آزمایش، در دو رده A و B قرار دارند و می‌توان گفت کیفیت پرده آب‌بند با توجه به فراوانی این دو رده، خوب تا عالی است. هرچند در کل  $2/22\%$  از مقاطع در رده C قرار گرفته‌اند و کیفیت توده سنگ در این مقاطع ضعیف بوده است (شکل ۹).



شکل ۹. فراوانی SPI در کل پرده آب‌بند

به‌طورکلی با توجه به کارستی بودن تمام مسیر پرده آب‌بند و وجود گسل‌های محلی و همچنین وجود غارها و شفت‌های متعدد در این ناحیه پیش از تزریق، مشخص است که پس از ایجاد پرده آب‌بند، با توجه به وجود نداشتن رده D و درصد کم رده C، عمل‌کرد تزریق تا حدود زیادی موفق بوده است. هر چند در بعضی مناطق برای به‌سازی کلی پرده آب‌بند، به تزریق موضعی در بعضی مقاطع رده B و تزریق مجدد در مقاطع رده C نیاز است که در ادامه به آن می‌پردازیم.

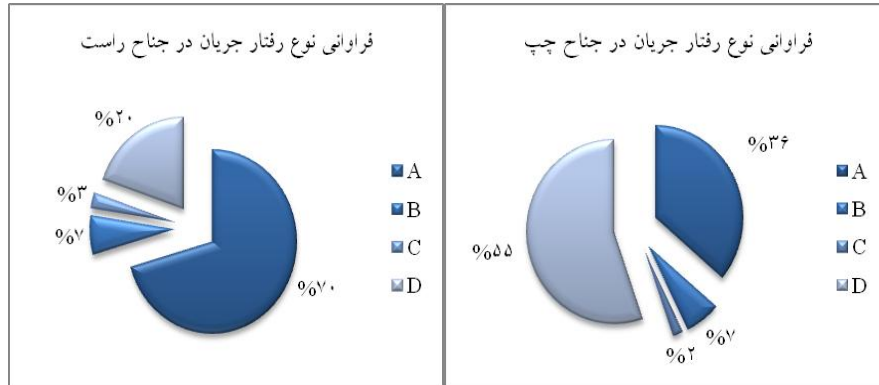
هم‌چنین با استفاده از نمودارهای SPI-Pt، نوع جریان و میزان فراوانی آن در مقاطع مختلف گمانه‌های گالری‌های دو جناح سد بررسی شده است و بر اساس آن وضعیت توده سنگ دو جناح سد ارزیابی شده است. نتایج بررسی‌ها در جدول‌های ۸ و ۹ و شکل ۱۰ ارائه شده است.

جدول ۸. فراوانی نوع رفتار جریان در مقاطع گمانه‌های آزمایشی گالری‌های دو جناح سد

نوع رفتار جریان	گالری‌های جناح راست سد					گالری‌های جناح چپ سد			
	738R	769R	802R	835R	853R	738L	802L	835L	853L
A	۱۰۶	۲۸	۵۲	۹	۳۳	۴۰	۲۹	۱۵	۱۱
B	۷	۴	۸	۱	۲	۱۴	۱	۲	۰
C	۲	۰	۵	۲	۰	۵	۰	۰	۰
D	۱۸	۱۲	۲۲	۴	۸	۷۳	۱۹	۲۱	۳۲
جمع	۱۳۳	۴۴	۸۷	۱۶	۴۳	۱۳۲	۴۹	۳۸	۴۳

جدول ۹. فراوانی نوع رفتار جریان در مجموع دو جناح پرده آب‌بند

نوع رفتار جریان	گالری‌های جناح راست سد		گالری‌های جناح چپ سد		مجموع گالری‌های دو جناح	
	تعداد مقاطع	%	تعداد مقاطع	%	تعداد	%
A	۲۲۸	۷۰/۵۹	۹۵	۳۶/۲۶	۳۲۳	۵۵/۲۱
B	۲۲	۶/۸۱	۱۷	۶/۴۹	۳۹	۶/۶۷
C	۹	۲/۷۹	۵	۱/۹۱	۱۴	۲/۳۹
D	۶۴	۱۹/۸۱	۱۴۵	۵۵/۳۴	۲۰۹	۳۵/۷۳
جمع	۳۲۳	۱۰۰	۲۶۲	۱۰۰	۵۸۵	۱۰۰



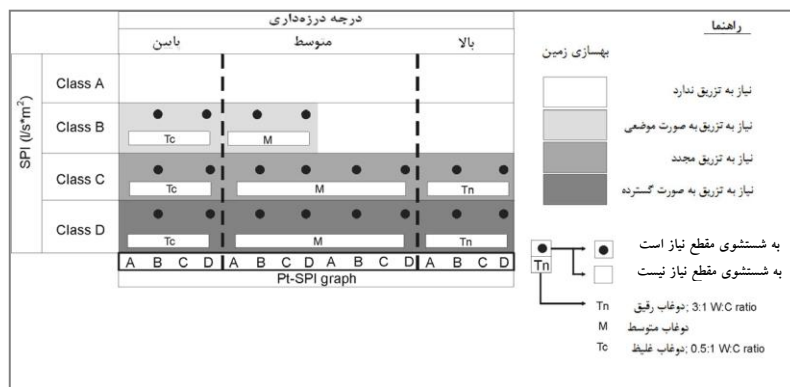
شکل ۱۰. فراوانی نوع رفتار جریان در دو جناح سد

چنان‌که از جدول‌های ۸ و ۹ و شکل ۱۰ استنباط می‌شود، در جناح راست سد، رفتار نوع A (رفتار یکنواخت) با ۷۰/۵۹٪ بیش‌ترین نوع رفتار جریان در مقاطع این جناح است و سپس رفتارهای نوع D (پر و خالی شدن درزه‌ها)، B (آب‌شستگی) و C (شکست هیدرولیکی) با ۱۹/۸۱٪، ۶/۸۱٪ و ۲/۷۹٪ قرار دارند. با توجه به این‌که اکثر مقاطع جناح راست سد در رده A قرار دارند و هم‌چنین رفتار نوع A بیش‌ترین نوع رفتار جریان بوده است، می‌توان گفت در اکثر مقاطع کیفیت توده سنگ در جناح راست عالی و یکنواخت است و هم‌چنین رابطه مستقیمی بین رده A با ۷۲/۷۶٪ و رفتار نوع A با ۷۰/۵۹٪ در این جناح وجود دارد. بیش‌ترین نوع رفتار جریان در جناح چپ سد، نوع D است که ۵۵/۲۱٪ از مقاطع گمانه‌های کنترلی این جناح را تشکیل می‌دهد. هم‌چنین رفتار نوع A با ۳۵/۳۳٪ در رده بعدی قرار دارد. چنان‌که مشخص است رفتار نوع A نسبت به جناح راست کاهش چشم‌گیری داشته است که می‌توان علت آن را نسبت کم‌تر توده سنگ‌های رده A در این جناح نسبت به جناح راست دانست. سپس به ترتیب رفتارهای نوع B (آب‌شستگی) و C (شکست هیدرولیکی) با ۷٪ و ۲٪ در رده‌های بعدی قرار دارند. به جز رفتار نوع A که نشان‌دهنده کیفیت یکنواخت توده سنگ است، بقیه رفتارها نامطلوبند. هم‌چنین رفتار نوع C یعنی شکست هیدرولیکی که نامطلوب‌ترین نوع رفتار است، کم‌ترین میزان را در دو جناح سد داشته است. پدیده شکست هیدرولیکی بر مسیرهای هیدرولیکی اثر می‌گذارد و به آن‌ها آسیب می‌رساند. اگر در اثر شکست کاهش شاخص SPI به اندازه‌ای باشد که در رده سنگ تغییر حاصل نشود میزان آسیب‌پذیری کم و

قابل اغماض است. با توجه به این‌که در ۵۸۵ مقطع مورد آزمایش تنها در ۱۲ مقطع شکست هیدرولیکی دیده شده (۲/۳۹٪ از مقاطع) و در تمامی آن‌ها در اثر شکست هیدرولیکی در رده سنگ تغییری ایجاد نشده، شکست هیدرولیکی پس از آزمایش‌های فشار آب سبب ایجاد درزه‌ها و یا آسیب جدی به مقاطع نشده است. توجه به بررسی‌های صورت گرفته و نتایج حاصل از ارزیابی مقادیر SPI و نمودارهای SPI-Pt در توده سنگ ساخت‌گاه سد، می‌توان توده سنگ ساخت‌گاه را در رده سنگ‌های با کیفیت خوب تا عالی پس از انجام عملیات تزریق ارزیابی کرد.

### به‌سازی زمین با استفاده از شاخص نفوذپذیری ثانویه

با قرار دادن شاخص نفوذپذیری ثانویه در مقابل درجه درزه‌داری می‌توان درباره نحوه به‌سازی زمین اظهار نظر کرد (شاخص کیفیت توده سنگ نمایان‌گر درجه درزه‌داری سنگ است). دیر و همکاران [۷] شاخص کیفیت توده سنگ را به صورت جدول ۱۰ تعریف کرده است.



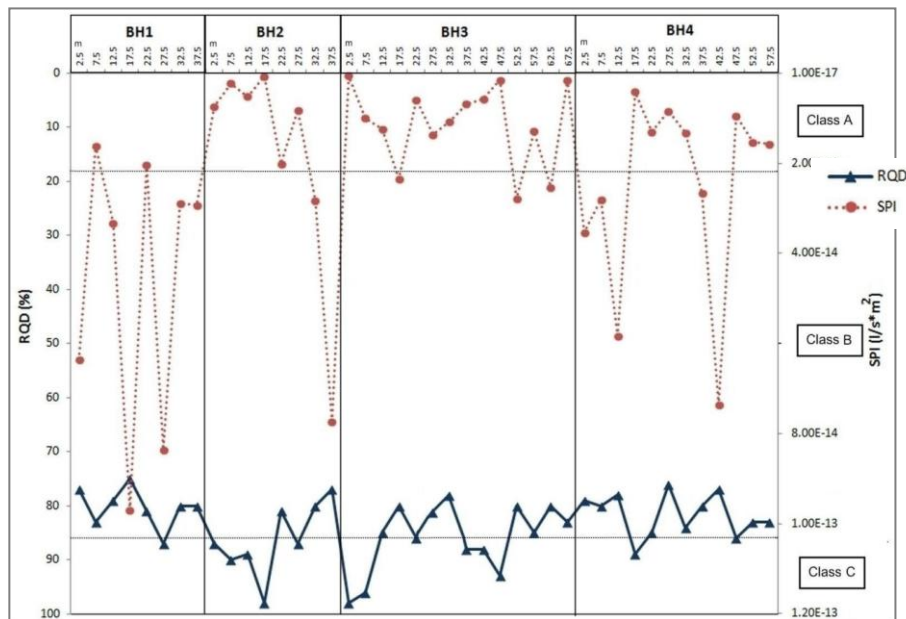
شکل ۱۱. به‌سازی زمین با استفاده از SPI و درجه درزه‌داری (فویو و همکاران ۲۰۰۵) [۹]  
جدول ۱۰. مقادیر شاخص RQD به تفکیک وضعیت کیفیت توده سنگ (دیر و همکاران ۱۹۶۸) [۷]

RQD	۹۰-۱۰۰	۷۵-۹۰	۵۰-۷۵	۲۵-۵۰	۰-۲۵
وضعیت توده سنگ	عالی	خوب	متوسط	ضعیف	خیلی ضعیف

هنگامی که کیفیت توده سنگ در ساخت‌گاه سد پس از تزریق براساس SPI مشخص شد، با قرار دادن SPI در مقابل درجه درزه‌داری می‌توان درباره به‌سازی ساخت‌گاه پیشنهادهایی کرد (شکل ۱۱).

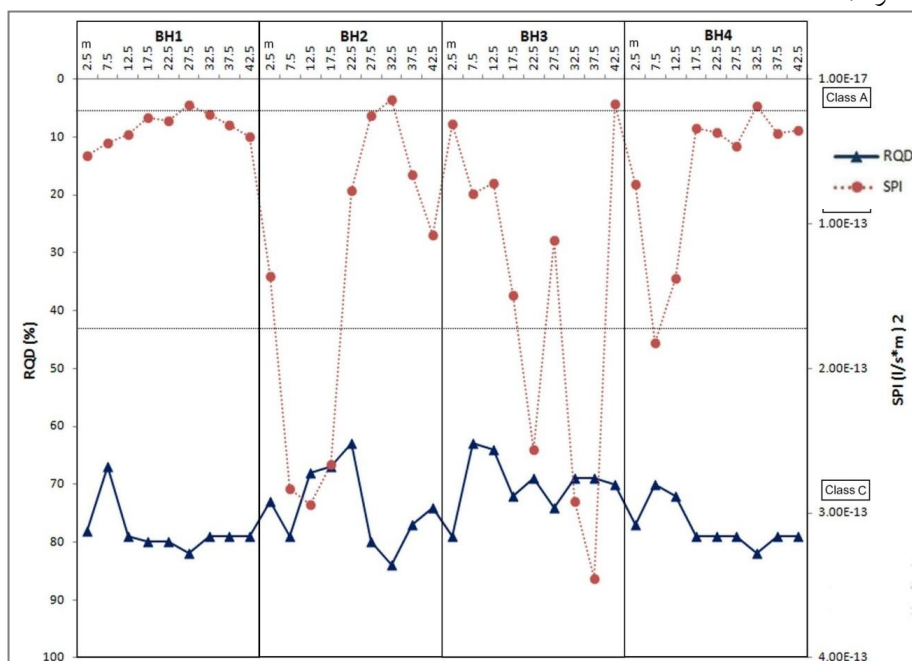
با توجه به جدول، سنگ‌هایی که در رده A قرار دارند نیاز به به‌سازی ندارند ولی سنگ‌های رده B دو وضعیت متفاوت دارند. اگر درجه درزه‌داری کم یا متوسط باشد باید حتماً تزریق شوند، ولی اگر درجه درزه‌داری زیاد یا متوسط بالا باشد، بازشدگی درزه‌ها ناچیز است و عملاً تزریق‌پذیر نیستند و نیاز به به‌سازی ندارند. رده‌های C و D آسیب‌پذیری فوق‌العاده پی سد را نشان می‌دهند. اگر این مقدار نفوذپذیری مربوط به یک درزه باشد (درزه‌داری پایین) باید از نسبت‌های غلیظ دوغاب برای تزریق استفاده کرد، اما اگر سنگ به شدت ترک خورده باشد باید از نسبت‌های رقیق دوغاب استفاده شود. در حالت بینابین باید از نسبت‌های متوسط برای تزریق استفاده کرد [۹].

با ترسیم نمودار SPI در برابر درجه درزه‌داری برای گمانه‌های کنترلی می‌توان در ارتباط با به‌سازی ساخت‌گاه سد اظهار نظر کرد. برای نمونه، دو مورد از نمودارهای SPI در برابر درجه درزه‌داری برای گمانه‌های کنترلی دو گالری ۸۳۵ و ۸۵۳ راست برای بررسی و نتیجه‌گیری بهتر، آورده شده است. (شکل‌های ۱۲ و ۱۳).



شکل ۱۲. مقایسه SPI و درجه درزه‌داری در گمانه‌های کنترلی گالری ۸۳۵ چپ

در نمودارهای رسم شده در شکل ۱۲ برای گمانه‌های کنترلی گالری ۸۵۳ راست تقریباً در اکثر مقاطع، ارتباط دقیقی بین درجه درزه‌داری و  $SPI$  وجود دارد، یعنی کاهش  $SPI$  (کاهش نفوذپذیری)، با کاهش درجه درزه‌داری (افزایش  $RQD$ ) همراه است. با توجه به نمودار شکل ۱۲ و پیشنهاد فویو و همکاران در نمودار شکل ۱۳ برای به‌سازی توده سنگ، مقاطع ۲/۵، ۱۲/۵، ۱۷/۵، ۲۷/۵، ۳۲/۵ و ۳۷/۵ متری از گمانه  $BH1$ ، ۳۲/۵ و ۳۷/۵ متری از گمانه  $BH2$ ، ۱۷/۵، ۵۲/۵ و ۶۲/۵ متری از گمانه  $BH3$  و ۲/۵، ۷/۵، ۱۲/۵، ۳۷/۵ و ۴۲/۵ متری از گمانه  $BH4$ ، که در رده  $B$  قرار گرفته‌اند با توجه به درجه درزه‌داری کم، به به‌سازی به‌صورت موضعی با دوغاب غلیظ نیاز دارند و سایر مقاطع که در رده  $A$  قرار دارند به به‌سازی نیاز ندارند.



شکل ۱۳. مقایسه  $SPI$  و درجه درزه‌داری در گمانه‌های کنترلی گالری ۸۳۵ چپ

در نمودارهای رسم شده در شکل ۱۳ برای گمانه‌های کنترلی گالری ۸۳۵ چپ نیز ارتباط بین  $SPI$  و درجه درزه‌داری مشاهده می‌شود، بدین‌صورت که، افزایش  $SPI$  (افزایش نفوذپذیری)،

با افزایش درجه درزه‌داری (کاهش RQD) همراه است. در گمانه BH1 اکثر مقاطع در رده B قرار دارند که با توجه به درجه درزه‌داری اندک، بر طبق نمودار به‌سازی شکل ۱۱ نیاز به به‌سازی به‌طور موضعی با دوغاب غلیظ، دارند. به جز مقطع ۷/۵ متری که درجه درزه‌داری آن متوسط کم است و نیاز به تزریق موضعی با دوغاب متوسط دارد. در گمانه BH2، پنج مقطع در رده B قرار دارند، برای چهار مقطع ۲/۵، ۲۷/۵، ۳۷/۵ و ۴۲/۵ متری با درجه درزه‌داری پایین به به‌سازی به‌صورت موضعی و با دوغاب غلیظ نیاز است و برای مقطع ۲۲/۵ متر با درجه درزه‌داری متوسط پایین برای به‌سازی به تزریق موضعی با دوغاب متوسط نیاز است. در این گمانه سه مقطع نیز در رده C قرار گرفته‌اند که برای به‌سازی، مقطع ۷/۵ متری با درجه درزه‌داری پایین به تزریق مجدد با دوغاب غلیظ و مقاطع ۱۲/۵ و ۱۷/۵ با درجه درزه‌داری متوسط پایین به تزریق مجدد با دوغاب متوسط نیاز دارند. در گمانه BH3، مقاطع ۲/۵ و ۲۷/۵ متری که در رده B قرار دارد (با توجه به درجه درزه‌داری پایین) به به‌سازی به‌صورت موضعی و با دوغاب غلیظ نیاز دارند، مقاطع ۷/۵، ۱۲/۵ و ۲۷/۵ متری که در رده B قرار دارند با درجه درزه‌داری متوسط پایین به تزریق موضعی با دوغاب متوسط نیاز دارند و مقاطع ۲۲/۵، ۳۲/۵ و ۳۷/۵ متری که در رده C قرار دارند که با درجه درزه‌داری متوسط پایین برای به‌سازی به تزریق مجدد با دوغاب متوسط نیاز دارند و مقطع ۴۲/۵ متری که در رده A قرار دارد به به‌سازی نیاز ندارد. در گمانه BH4، مقطع ۷/۵ متری که در رده C قرار دارد با درجه درزه‌داری متوسط پایین به تزریق مجدد (با دوغاب متوسط) و مقاطع ۲/۵، ۱۷/۵، ۲۲/۵، ۲۷/۵ و ۳۷/۵ و ۴۲/۵ متری که در رده B قرار دارند، با درجه درزه‌داری پایین به تزریق موضعی (با دوغاب غلیظ) نیاز دارند. همچنین مقطع ۱۲/۵ متری نیز که در رده B قرار دارد با توجه به درجه درزه‌داری متوسط پایین برای به‌سازی به تزریق موضعی با دوغاب متوسط نیاز دارد.

برای همه گمانه‌های کنترلی در گالری‌های مختلف این نمودارها رسم شده است. با توجه به نمودار پیشنهادی فویو و همکاران (شکل ۱۱) و نتایج رده‌بندی مقاطع مورد آزمایش در جدول ۷ می‌توان نتیجه گرفت، ۴۹/۴۰٪ از مقاطع مورد آزمایش در رده A قرار دارند که به به‌سازی نیاز ندارند. ۴۸/۳۸٪ از مقاطع در رده B قرار دارند که با بررسی درجه درزه‌داری

آن‌ها، تنها ۱۲/۳۱٪ از این مقاطع، برای به‌سازی به تزریق موضعی نیاز دارند. هم‌چنین ۲/۲۲٪ از مقاطع در رده C قرار دارند که به تزریق مجدد نیاز دارند. در کل ۱۴/۵۳٪ درصد از کل مقاطع به به‌سازی نیاز دارند.

### نتیجه‌گیری

بر اساس بررسی‌های انجام شده بر روی گمانه‌های کنترلی سد سلمان فارسی و بررسی نتایج آزمایش فشار آب و تعیین میزان نفوذپذیری ثانویه برای هر یک از مقاطع مورد آزمایش و بررسی درجه درزه‌داری، این نتایج حاصل می‌شود:

- با توجه به آزمایش‌های فشار آب انجام شده در گمانه‌های کنترلی و نتایج آن و به تبع آن محاسبه SPI برای ۵۸۵ مقطعی که در آن‌ها آزمایش فشار آب صورت گرفته، می‌توان نتیجه گرفت، جناح راست از لحاظ آب‌بندی وضعیت بهتری نسبت به جناح چپ دارد؛ زیرا نتایج نشان می‌دهد که در جناح راست ۷۲/۷۶٪ از مقاطع مورد آزمایش در رده A و ۲۶/۹۳٪ در رده B قرار دارند در حالی که در جناح چپ ۲۰/۶۱٪ از مقاطع مورد آزمایش در رده A و ۷۴/۸۱٪ در رده B قرار دارند. این امر می‌تواند ناشی از روند صحیح‌تر تزریق در جناح راست و وجود حفره‌های کارستی و شکستگی‌های بیش‌تر قبل از تزریق در جناح چپ، که به‌خوبی آب‌بندی نشده‌اند، باشد. به‌طورکلی خصوصیات خاص سازند تکتونیزه و کارستیک آسماری در محل ساخت‌گاه سد، سبب عدم یک‌نواختی تزریق و آب‌بندی کامل ساخت‌گاه سد در نواحی مختلف شده است.
- کیفیت کلی پرده آب‌بند با توجه به فراوانی ۹۷/۷۸٪ دو رده A و B خوب تا عالی ارزیابی می‌شود، که نشان‌دهنده موفقیت‌آمیز بودن عملیات تزریق دارد.
- با قرار دادن شاخص نفوذپذیری ثانویه در مقابل درجه درزه‌داری می‌توان درباره به‌سازی ساخت‌گاه اظهار نظر کرد. برای ساخت‌گاه سد سلمان فارسی، ۱۲/۳۱٪ از مقاطع مورد آزمایش که در رده B و ۲/۲۲٪ از مقاطع مورد آزمایش که در رده C قرار دارند، به‌ترتیب به تزریق موضعی و مجدد نیاز دارند.
- در این تحقیق برای بررسی نفوذپذیری ساخت‌گاه سد پس از تزریق، شاخص نفوذپذیری ثانویه به لوژان ترجیح داده شده است. با استفاده از این شاخص علاوه بر طبقه‌بندی توده سنگ، طرحی مناسب برای به‌سازی زمین ارائه می‌شود، هم‌چنین دقت

عددی این شاخص بسیار بیش تر از لوژان است. پیشنهاد می شود در تحقیقات آتی در این زمینه نیز از این شاخص به جای لوژان استفاده شود.

### تشکر و قدردانی

بدین وسیله از مدیریت و کارکنان شرکت سهامی آب منطقه ای استان فارس به ویژه نماینده محترم مجری طرح سد سلمان فارسی جناب آقای محمد رحیمی و شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس مخصوصاً آقایان مهندس محمدرضا جبروتی و مهندس بهنام نوروزی به دلیل همکاری صمیمانه و در اختیار گذاشتن اطلاعات مورد نیاز برای این تحقیق سپاس گذاری می شود.

### منابع

۱. عباسی، م، غفوری، م. و ارومیه ای، ع. ارزیابی عملیات تزریق پرده آب بند در تیکه گاه چپ سد ارداک، پنجمین همایش زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، (۱۳۸۶).
۲. مهندسین مشاور مهتاب قدس، گزارش زمین شناسی و ژئوتکنیکی سد سلمان فارسی، (۱۳۶۹).
۳. مهندسین مشاور مهتاب قدس، نتایج تست آب (لوژان) گمانه های کنترلی جناح راست سد سلمان فارسی، (۱۳۸۰).
۴. مهندسین مشاور مهتاب قدس، نتایج تست آب (لوژان) گمانه های کنترلی جناح چپ سد سلمان فارسی، (۱۳۸۰).
۵. میرانی مقدم، ح. و اسپندار، ر. بررسی وضعیت پرده تزریق پی سد بیدواز اسفراین، دوازدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، (۱۳۸۷).
6. Bonacci O., Bonacci, T. R., "Impact of grout curtain on groundwater regime in karst: the example of Dale reservoir (Croatia)", EGU General Asembly, Vol 12 (2010).
7. Deer D. U., Hendron A. J., Patton F. D., Cording E. J., "Design of surface and near surface construction in rock", Proceedings of 8<sup>th</sup> U.S. symposium, Rock mechanics, AIME (1968) 237-302, New York.

8. Foyo A., Sanchez M. A. "Permeability test for rocks masses, a proposal for a new expression for the equivalent Lugeon unit (ELU)", *Dam Engineering*, 8 (3) (2002) 199-218.
9. Foyo A., Sanchez M., A., Tomillo C., "A proposal for a Secondary Permeability Index obtained from water pressure tests in dam foundations", *Engineering Geology*, (77) (2005) 69-82.
10. Gangopadhyay S., "Significance of water pumping test in detecting subsurface weak feature with reference to projects of Eastern India", In: *International Symposium on weak rock, In situ investigation of the weak rock*, Vol 1. Balkema, Tokyo (1981) 595-600.
11. Kutzner C., "Grouting of Rock and Soil. Balkema", Netherlands, 271 (1996) 10.
12. Lambropoulos D. C., "Design, construction and evaluation of the Messochora dam grout curtain in Central Greece", *Engineering Geology & Hydrogeology*, 43 (2010) 249-256.
13. Shibata I., "Procedures for the investigation of permeability and seepage control in soft rock foundations from dams. In: *International Symposium on Weak Rock*", In situ Investigation of the Weak Rock, vol 1. Balkema, Tokyo (1981) 503-508.
14. Snow D. T., "Rock fractures spacings", openings and porosities, *Am. Soc., Civ. Eng. Proc.*, 94 (1968) 73-91.