

## تعیین جهت بهینه چال‌های تزریق دوغاب در پرده آب‌بند سد صفارود با استفاده از ترکیب روش تانسور هدایت هیدرولیکی و آزمایش لوژان

فرهاد صمیمی‌نمین<sup>۱\*</sup>؛ ساسان قربانی<sup>۲</sup>؛ میثم شمسی گوشکی<sup>۳</sup>

۱- دانشیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

۲- استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران.

۳- کارشناس ارشد مکانیک سنگ، گروه مهندسی معدن، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۹؛ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۰

(\* نویسنده مسئول: f.samiminamin@znu.ac.ir)

### چکیده

تعیین مسیر نشت آب از درون شبکه شکستگی‌های توده‌سنگ برای مدیریت مسیر فرار آب، مسائل اقتصادی و پایداری سد بسیار مهم است. مشکل اصلی روش تانسور هدایت هیدرولیکی به عنوان پرکاربردترین روش تعیین نفوذپذیری، تعیین بازشدگی ناپیوستگی‌ها است که نمی‌توان با قانون مکعب این روش تعیین نمود. از طرفی، آزمایش لوژان قادر به تعیین راستای تانسور نشت نمی‌باشد. لذا در این پژوهش، آزمایش‌های هیدرولیکی برجا و روش تانسور هدایت هیدرولیکی برای محاسبه تانسور نشت توده‌سنگ شکسته ترکیب شدند. پس از برداشت ویژگی‌های هندسی درزه‌های ساختگاه سد صفارود، نفوذپذیری توده‌سنگ‌ها با استفاده از روش تانسور هدایت هیدرولیکی تعیین شدند. سپس، راستاهای اصلی فرار آب و تطبیق این راستاها با دسته‌درزه‌های حاکم بر نشت در نرم‌افزار *DIPS* انجام و جهت بهینه برای حفر چال‌های تزریقی مشخص شدند. در ادامه، کارآیی جهت چال‌ها در تزریق زون‌های گسله بررسی و در زون‌های با کارآیی کم، جهت بهینه چال‌ها تعیین شدند. بر اساس نتایج آزمایش‌های لوژان و تصحیح نتایج تانسور هدایت هیدرولیکی با استفاده از آن، بیشترین و کمترین نفوذپذیری به ترتیب در تکیه‌گاه چپ و بستر ساختگاه مشاهده شدند. همچنین، راستای بهینه برای کارآیی بهتر تزریق، حفر گمانه در راستای  $K_0$  می‌باشد که عمود بر راستای  $K_1$  و  $K_2$  و صفحه  $K_1-K_2$  می‌باشد.

### واژگان کلیدی

تانسور هدایت هیدرولیکی، نفوذپذیری، گمانه‌های تزریق، آزمایش لوژان، راستای بهینه چال تزریقی

### ۱- مقدمه

تکیه‌گاه‌های سد می‌باشد. ایجاد پرده آب‌بند برای ساختگاه سد بدون داشتن طرح جامع عملیات تزریق می‌تواند باعث عدم موفقیت در آب‌بندی و تحکیم، افزایش هزینه‌ها و طولانی شدن زمان اتمام پروژه شود. برای جلوگیری از این نقیصه‌ها اجرای عملیات تزریق با یک طرح جامع عملیات تزریق مشخص می‌تواند باعث اجرای بهینه تزریق گردد. از آنجا که تراوش در محل پی و تکیه‌گاه‌های یک سد امکان هدر رفتن آب ذخیره شده در مخزن را فراهم می‌سازد و از طرف دیگر انباشت رسوب را در مخزن افزایش می‌دهد، در نتیجه پایداری

عملیات تزریق، فرآیند تزریق یک دوغاب سیمانی یا مواد مناسب دیگر تحت فشار به درون یک ساختار سنگی از طریق یک چال برای اصلاح شکاف‌ها و ترک‌ها می‌باشد [۱]. اهداف اصلی از عملیات تزریق در پروژه‌های ژئوتکنیکی، تقویت زمین یا توده‌سنگ و کاهش نفوذپذیری آب در توده‌سنگ می‌باشد [۲ و ۳].

تزریق در پروژه‌های سدسازی شامل عملیاتی جهت ایجاد یک پرده با نفوذپذیری اندک جهت کنترل نشت در پی و یا

هزینه‌های حفاری-تزریق و مقدار آب نشت را در سد کارون ۴ تعیین کردند. قربانی و همکاران [۴] با بهره‌گیری از روش *DFN-DEM* توسط نرم‌افزار *UDEC* و روابط تحلیلی، بهینه‌ترین آرایش تزریق دوغاب شامل شعاع تأثیر دوغاب و زوایای بهینه گمانه‌های تزریقی در یکی از مقاطع پرسیک تونل انتقال آب کرمان که در معرض هجوم آب شدید بود را طراحی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که مناسب‌ترین الگوهای تزریق گمانه‌ها در توده‌های سنگی با چگالی شکستگی کم و زیاد در فشار  $24 \text{ bar}$  به ترتیب با چیدمان گمانه‌های با زوایای  $60^\circ$  و  $45^\circ$  می‌باشد. پس از تزریق، برخی از نمونه‌های مغزه برای ارزیابی راندمان تزریق و بررسی وضعیت دوغاب تزریق شده در ترک‌های توده‌سنگ بررسی کردند که طبق مشاهدات، آرایش‌های پیشنهادی بسیار کارآمد بودند. قربانی و همکاران [۲] در مطالعه‌ای دیگر به بررسی کارایی عملیات پیش‌تزریق در زون‌های گسلی تونل انتقال آب لار-کلان و تأثیر آن بر کیفیت توده‌سنگ بر مبنای سیستم طبقه‌بندی *RMR* و با استفاده از روش تانسور هدایت هیدرولیکی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که در برخی از گمانه‌های تزریق، راندمان تزریق به حدود ۸۳٪ رسیده است. شی و همکاران [۸] به بررسی و تحلیل نتایج عملیات تزریق در توده‌سنگ در زون‌های ضعیف در یک پروژه تونل‌سازی در کشور چین پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که پس از تزریق اولیه، میزان نفوذ آب ۹۵٪ کاهش یافته و مقاومت توده‌سنگ بیش از ۵۰٪ بهبود یافته است. قربانی و همکاران [۳] در تحقیقی به بررسی راندمان آب‌بندی انواع مختلف دوغاب شامل سیمان پرتلند معمولی (*OPC*)، سیمان فوق ریز (*UFC*) و سیلیکا سل (*Silica sol*) با استفاده از روابط تحلیلی و شبیه‌سازی با نرم‌افزار *UDEC* در درزه‌های یک بخش پرسیک از تونل انتقال آب کرمان پرداختند. بر اساس نتایج مطالعه آن‌ها، شعاع نفوذ دوغاب‌های *OPC*، *UFC* و سیلیکا سل به ترتیب برابر با  $1/5 \text{ m}$ ،  $3/5 \text{ m}$  و  $5 \text{ m}$  به دست آمدند. به عبارت دیگر، انتشار دوغاب‌های *UFC* و سیلیکا سل در درزه‌ها کارآمدتر از دوغاب *OPC* بودند. بهادری و همکاران [۹] با استفاده از شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزار *UDEC*، بهینه‌ترین آرایش برای سیستم آب‌بندی پی سد سردشت را طراحی نمودند. بر اساس نتایج مطالعات آن‌ها، عمق بهینه پرده  $40 \text{ m}$ ، فاصله‌داری چال‌های تزریق در پی و تکیه‌گاه‌ها به

درازمدت سد به مخاطره می‌افتد. لذا، ضرورت اجرای عملیات بهینه تزریق به عنوان یک راه‌حل عملی جهت کاهش نشت و مقاوم‌سازی پی، اهمیت بسیار زیادی دارد.

عملکرد تزریق دوغاب نه تنها تحت تأثیر خواص توده‌سنگ و شرایط زمین‌شناسی، بلکه تحت تأثیر جنس دوغاب و فرآیند تزریق نیز قرار دارد. عملکرد تزریق دوغاب به شدت به شرایط ناپیوستگی‌های اطراف توده‌سنگ وابسته است. هنگامی که درزه منفرد به دلیل شدت کم، طول کوتاه و نفوذپذیری کم، ضعیف باشد، نتایج تزریق نامناسب است زیرا منطقه تزریق طراحی شده با دوغاب تزریق شده پر نمی‌شود. در مقابل، هنگامی که یک مجموعه درزه عمدتاً در یک جهت خاص توسعه یافته باشد، دوغاب تزریق شده ممکن است به طور بهینه از طریق درزه‌های متصل در منطقه تزریق طراحی شده نفوذ نکند. در این حالت، عملکرد تزریق غیر اقتصادی خواهد بود [۴].

انتخاب فشار تزریق مناسب، فاصله بهینه گمانه‌های تزریقی و به طور کلی، الگوی مناسب چال‌های تزریقی، همگی بخش‌هایی از طراحی یک عملیات تزریق مناسب هستند. در این بین، جهت بهینه گمانه‌های تزریقی برای آب‌بند کردن کامل ساختگاه‌های سد بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

تاکنون روش‌های مختلفی توسط محققین برای تعیین نفوذپذیری و راستای بهینه چال‌های تزریقی در ساختگاه سدها و فضاهای زیرزمینی ارائه شده‌اند. رحیم‌پور و همکاران [۵] به آنالیز نشت سد بتنی با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی توسط نرم‌افزار *PLAXIS 3D* و انجام آزمایش‌های لوژان قبل و بعد از اجرای پرده تزریق پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان از کاهش تقریباً ۸۰ درصدی دبی نشت پس از احداث پرده تزریق داشت. چن و همکاران [۶] به بررسی تغییرات نفوذپذیری توده‌سنگ‌های شکسته در پی یک سد قوسی بلند با استفاده از روشی ترکیبی از طراحی متعامد، مدل‌سازی جریان گذرا، شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که نفوذپذیری سنگ‌های پی سد در طول بهره‌برداری سالانه از یک روند نمایی پیروی می‌کند که تطابق خوبی بین مشاهدات میدانی و شبیه‌سازی‌های عددی داشت. حسینی و سازنده [۷] با استفاده از نرم‌افزار *FLAC 2D* در یک فرآیند مدل‌سازی پرده دوغاب با طول‌های مختلف، عمق پرده، راندمان جریان پرده،

ترتیب  $m$  و  $3m$  و  $5m$ ، پیشنهاد شد. همچنین زاویه انحراف بهینه چال‌ها معادل  $11^\circ$  برآورد گردید. مرتضوی و معادپخواه [۱۰] به بررسی فاکتورهای مهم تزریق و توده‌سنگ بر عملیات تزریق توده‌سنگ درزه‌دار در سد گتوند با استفاده از شبیه‌سازی المان مجزا (*DEM*) پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش بازشدگی درزه، سختی نرمال و فشار تزریق، شعاع نفوذ دوغاب افزایش می‌یابد. افزایش فاصله درزه‌ها هیچ تأثیری بر شعاع نفوذ دوغاب نداشته است. از طرفی، تأثیر جهت‌گیری درزه‌ها بر فرآیند تزریق به شدت به وضعیت تنش برجا وابسته بود. سعیدی و همکاران [۱۱] در مطالعه‌ای یک مدل عددی برای پیش‌بینی جریان دوغاب و طول نفوذ در توده‌سنگ درزه‌دار سد بختیاری با استفاده از نرم‌افزار *UDEC* ارائه دادند. علاوه بر این، تحلیل حساسیت پارامترهای بازشدگی هیدرولیکی درزه، زبری، فاصله‌داری، طول اثر و خواص دوغاب مانند مقدار تسلیم، ویسکوزیته و فشار دوغاب بر نرخ جریان دوغاب و طول نفوذ دوغاب انجام شد. نتایج آن‌ها نشان از تطابق خوب خروجی‌های شبیه‌سازی‌های عددی با نتایج روش‌های تحلیلی و داده‌های میدانی داشت. باغبانان و همکاران [۱۲] به بررسی نفوذپذیری توده‌های سنگی شکسته و طراحی دیوار آب‌بند در سد چم‌شیر با شبیه‌سازی شبکه شکستگی در نرم‌افزارهای *3DEC* و *Seep/w* پرداختند. آن‌ها نتایج شبیه‌سازی‌های عددی را با نتایج به دست آمده از آزمایش‌های لوژان اعتبارسنجی کرده و نشان دادند که بر اساس نتایج حاصل از نرم‌افزارهای *3DEC* و *Seep/w*، اجرای آب‌بند نشت آب را به ترتیب  $70\%$  و  $80\%$  کاهش داده است. لیو و همکاران [۱۳] روشی برای ارزیابی قابل اعتماد هدایت هیدرولیکی نماینده در توده‌سنگ‌های درزه‌دار برجا ارائه کرده است که نقش عوامل تأثیرگذار را به صورت کمی در نظر می‌گیرد. در این راستا، با استفاده از آزمون هیدروژنولوژیکی، نظریه تانسور ترک توسعه داده شده و نتایج آن با تحلیل‌های عددی مبتنی بر شبکه‌های شکستگی مجزا (*DFN*) مقایسه شده است. نتایج آن‌ها نشان داد که توزیع گشودگی درزه‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در ارزیابی هدایت هیدرولیکی دارد و مقیاس برداشت داده‌ها تأثیر چشم‌گیری بر میزان تغییرپذیری هدایت هیدرولیکی اعمال می‌کند. چنگ‌چنگ و همکاران [۱۴] پارامترهای نفوذپذیری را برای توده‌سنگ درزه‌دار را با استفاده از داده‌های هندسی دقیق درزه‌ها و نتایج آزمایش‌های

هیدرولیکی محاسبه و کالیبره کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که خطای اندازه‌گیری عرض درزه‌ها و روش حفاری تأثیر قابل توجهی بر محاسبه پارامترهای نفوذپذیری دارند. به منظور کاهش این خطاها، روشی اصلاحی مبتنی بر تانسور تراوایی استخراج‌شده از فناوری تصویربرداری درون‌گمانه‌ای (دوربین گمانه) پیشنهاد کردند. هوانگ و همکاران [۱۵] در پژوهشی با هدف کاهش مخاطرات هجوم ناگهانی آب به تونل، یک روش بهینه‌سازی تزریق (تزریق تحکیمی/آب‌بندی) مبتنی بر *DFN* را برای توده‌سنگ‌های درزه‌دار با رده‌های کیفی *II* تا *IV* ارائه دادند. در این روش، با استفاده از یک مدل شبکه‌ای ساختاری، میزان نفوذپذیری توده‌سنگ ارزیابی شده و ضرایب تراوایی و شعاع‌های بیضی تراوایی در فواصل زاویه‌ای  $30^\circ$  درجه در سراسر شبکه محاسبه شده تا ارزیابی جامعی از ویژگی‌های هیدرولیکی حاصل گردد. در شرایطی که فشار آب خارجی بیش از حد مجاز بوده و هجوم آب شدید باشد، اجرای هم‌زمان زهکشی و کاهش فشار پیش از انجام عملیات تزریق و نصب پوشش تونل پیشنهاد شد. همچنین، روش *DFN* ارائه شده امکان تزریق هدفمند را فراهم کرده و با تمرکز بر نواحی پرخطر، ریسک وقوع هجوم آب به تونل را به‌طور مؤثری کاهش می‌دهد. وانگ و همکاران [۱۶] نمونه‌های سنگ طبیعی را با استفاده از اسکن سه‌بعدی با دقت بالا بررسی کرده و از روش‌های تحلیلی و شبیه‌سازی عددی برای مطالعه اثر مقیاس و ناهمسانگردی فاکتور تصحیح زبری استفاده نمودند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که عامل تصحیح زبری هم وابستگی قابل توجهی به مقیاس دارد و هم ناهمسانگردی جهتی را نشان می‌دهد.

در این پژوهش، مقادیر هدایت‌های هیدرولیکی و جهات بهینه گمانه‌های تزریقی برای اولین بار با استفاده از ادغام روش تانسور هدایت هیدرولیکی و نتایج آزمایش‌های لوژان در تکیه‌گاه‌های راست و چپ و بستر سد صفارود تعیین شده‌اند. مهم‌ترین نوآوری پژوهش حاضر را می‌توان در برآورد بهینه مقادیر هدایت‌های هیدرولیکی و جهات حفاری گمانه‌های تزریقی و تصحیح آن‌ها با در نظر گرفتن نتایج آزمایش‌های بر جای لوژان دانست. به عبارتی دیگر، بر مبنای رویکرد این پژوهش یعنی استفاده از نتایج آزمایش‌های بر جای لوژان و تصحیح نتایج حاصل از روش تحلیلی تانسور هدایت هیدرولیکی، اصلی‌ترین چالش‌های عملیات تزریق شامل

مقادیر ضرایب نفوذپذیری و جهات چال‌های تزریقی در پروژه‌های سدسازی بطور بهینه تعیین می‌شوند. نوآوری این تحقیق در به‌کارگیری عملی تانسور هدایت هیدرولیکی به‌عنوان مبنای طراحی چال‌های تزریقی، مبتنی بر داده‌های آزمایش لوزان است که منجر به تعیین هدفمند آرایش و جهت‌گیری چال‌ها، افزایش کارایی پرده آب‌بند و کاهش تزریق‌های غیرضروری در پروژه‌های مهندسی سنگ می‌شود.

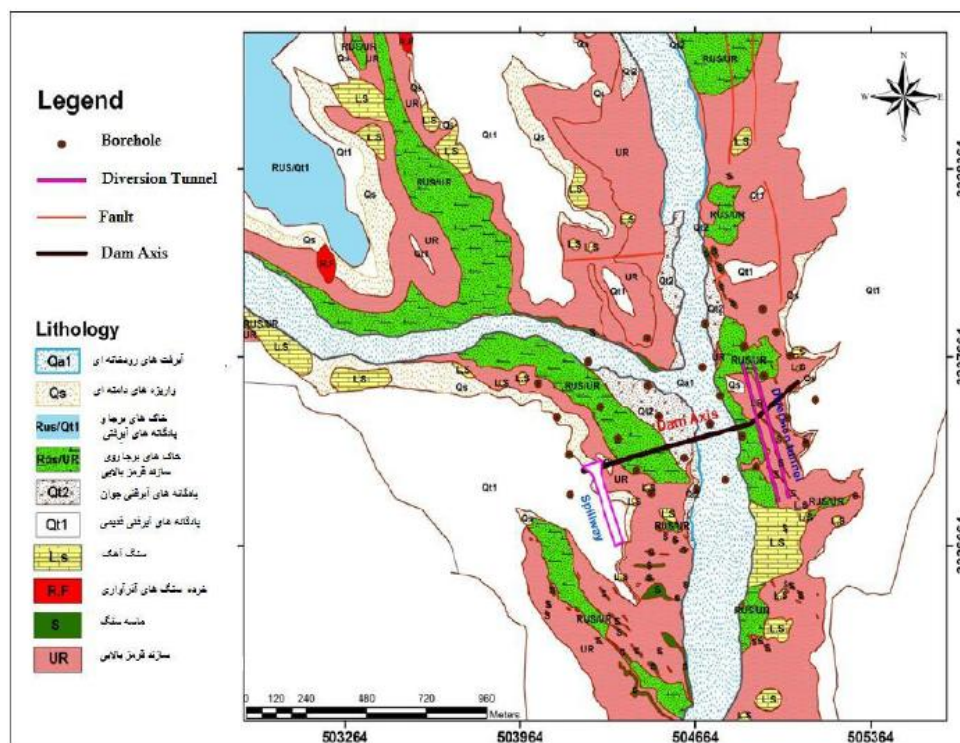
## ۲- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه برای سازه‌های مهار، کنترل و انتقال بین مخزنی آب سر شاخه‌های رودخانه‌ی هلیل در فاصله حدود ۱۸۰ کیلومتری جنوب شهر کرمان در محدوده‌ای میان طول-های جغرافیایی ۴۸' ۵۶° تا ۱۱' ۵۷° شرقی و عرض‌های ۲۹' ۱۵° تا ۳۰' ۲۹° شمالی قرار دارد. مسیر ارتباطی به تکیه‌گاه چپ ساختگاه سد صفارود از شهر رابر حدود ۱۱ کیلومتر و دارای پوشش آسفالتی است. دسترسی به تکیه‌گاه راست از شهر رابر با یک راه خاکی امکان‌پذیر است.

ساختگاه سد صفارود بر روی رودخانه صفا و در دره‌ای نسبتاً عریض قرار گرفته است. دره نسبتاً عریض و متقارن ساختگاه سد دارای عرض متوسط ۳۰۰-۲۵۰ متر است. ارتفاع کف رودخانه در محل محور، ۲۰۹۵ متر از سطح دریا است.

شیب عمومی توپوگرافی در جناح راست ملایم‌تر از شیب توپوگرافی در جناح چپ است، بطوریکه این شیب در جناح راست حدود ۱۵° و در جناح چپ حدود ۳۰ تا ۲۰ درجه می‌باشد. از تراز ۲۱۷۲ به بعد در دو تکیه‌گاه شیب توپوگرافی بسیار کم شده و منطقه مسطح می‌شود. سازند قرمز بالایی قسمت وسیعی از محدوده طرح را شامل می‌شود. این سازند با ناپیوستگی توسط ماسه‌سنگ و کنگلومرای میوسن میانی-بالایی پوشیده می‌شود. سازند قرمز بالایی در این ناحیه با ۵-۴ متر کنگلومرا آغاز می‌گردد که بر روی رسوبات ائوسن و الیگوسن قرار گرفته است [۱۳].

سنگ بستر در ساختگاه سد عمدتاً از تناوب مارن و گل‌سنگ به رنگ قهوه‌ای متمایل به قرمز و ماسه‌سنگ خاکستری رنگ ریزدانه به صورت ممتد بوده که با بین‌لایه‌های مارن سیلنتی و سیلت و بصورت بین‌انگشتی همراه می‌باشد. امتداد لایه‌بندی شمال‌غرب-جنوب‌شرق می‌باشد. شیب لایه‌بندی در جناح راست حدود ۴۰° و در جناح چپ حدود ۲۰° به سوی شمال‌شرق می‌باشد. از مهم‌ترین عوارض مورفولوژیک منطقه، وجود آبراهه دره‌چنار در تکیه‌گاه راست و به فاصله تقریباً ۲۰۰ متری از بازوی خاکی می‌باشد که قسمت انتهایی سر ریز سد نیز در آن قرار می‌گیرد. در شکل ۱ زمین‌شناسی سد صفارود نشان داده شده است.



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی محل سد [۱۷]

### ۳- رویکرد تانسور هدایت هیدرولیکی توده سنگ اصلاح شده

هدایت هیدرولیکی توده سنگ‌های درزه‌دار مسئله پیچیده‌ای در مهندسی معدن و سازه‌های هیدرولیکی محسوب می‌شود [۱۸]. ضریب هدایت هیدرولیکی آب یکی از پارامترهای مهم و مشکل‌ترین پارامتر برای به دست آوردن در تجزیه و تحلیل نفوذپذیری می‌باشد [۱۹]. به دلیل تأثیر عوامل مختلف، آزمایش یا روش محاسبه دقیق و مشخصی برای تعیین ضریب هدایت هیدرولیکی توده سنگ درزه‌دار وجود ندارد [۲۰]. هدایت هیدرولیکی برای محیط همگن و ایزوتروپ ثابت است، اما برای توده سنگ‌های ناهمگن و انیزوتروپیک به عنوان تانسور هدایت هیدرولیکی توده سنگ شکسته این مطلب درست نیست [۱۹].

روش‌های معمول مورد استفاده برای تعیین هدایت هیدرولیکی شامل آزمون‌های آزمایشگاهی، آزمایش‌های هیدرولیکی برجا، روش‌های اندازه‌گیری هندسی و حل مدل‌های مختلف می‌باشد. هر روش مزایا، تناسب و

محدودیت‌هایی دارد. شکستگی‌های مصنوعی معمولاً برای تحقیقات آزمایشگاهی بکار می‌روند، اما معمولاً با حالت طبیعی اختلاف دارد، بنابراین استفاده از نتایج آن برای عملیات مهندسی بسیار مشکل است. آزمایش‌های هیدرولیکی برجا، نفوذپذیری سنگ را در اطراف به صورت مستقیم تعیین می‌نماید. با این حال، جهت‌گیری تانسور نشت را نمی‌توان تعیین کرد و این آزمایش‌ها خیلی هزینه‌بر و زمان‌بر هستند [۲۱].

یکی از مهم‌ترین آزمایش‌های برجا، آزمایش لوژان است که در واقع برای تخمین یک ضریب نفوذپذیری میانگین ( $K_m$ ) در طول گمانه‌ای که در آن آزمون انجام می‌گیرد، به کار می‌رود. این ضریب حساس به وجود ویژگی‌های ساختاری همچون میزان بازشدگی شکاف‌ها بوده و جهت‌گیری فضایی ندارد [۲۲].

در سال ۱۹۶۰ اسنو و روم مفهوم تانسور هدایت هیدرولیکی را برای توصیف خاصیت ناهمسانگردی معرفی کردند. بنابراین، می‌توان با استفاده از روش اسنو بر اساس داده‌های هندسی شکستگی‌های بررسی شده در محل، هدایت

$$\begin{cases} n_{xi} = \sin \alpha_i \cdot \cos \beta_i \\ n_{yi} = \sin \alpha_i \cdot \sin \beta_i \\ n_{zi} = \cos \alpha_i \end{cases} \quad (2)$$

در روابط بالا،  $\alpha_i$  و  $\beta_i$  به ترتیب شیب و جهت شیب هر دسته‌درزه می‌باشند.

با استفاده از روابط بالا، می‌توان تانسور هدایت هیدرولیکی را بدست آورده و پس از آن سه مؤلفه اصلی نشت و جهت آن‌ها را محاسبه کرد.

$K$  یک ماتریس مربع متقارن با سه مؤلفه اصلی متفاوت و بردارهای متعامد مربوط به آن‌ها است که از رابطه ۳ بدست می‌آید [۲۱].

$$\begin{cases} (K_{ij} - \lambda_i \delta_{ij}) U_i = 0, \\ U_i = [U_{ix} \quad U_{iy} \quad U_{iz}]^T, i=1,2,3 \end{cases} \quad (3)$$

در رابطه بالا،  $\delta_{ij}$  نماد دلتای کرانکر،  $\lambda_i$  مقادیر ویژه و  $U_i$  بردارهای ویژه متناظر وابسته به  $\lambda_i$  می‌باشد.

رابطه ۳ نماینده یک گروه از معادله همگن است و حل  $\lambda_i$  و  $U_i$  با استفاده از روابط ۴ و ۵ بدست می‌آیند [۲۱].

$$|K - \lambda I| = 0 \quad (4)$$

$$\begin{cases} (K_{xx} - \lambda) U_x + K_{xy} U_y + K_{xz} U_z = 0 \\ K_{yx} U_x + (K_{yy} - \lambda) U_y + K_{yz} U_z = 0 \\ K_{zx} U_x + K_{zy} U_y + (K_{zz} - \lambda) U_z = 0 \\ U_x^2 + U_y^2 + U_z^2 = 1 \end{cases} \quad (5)$$

با استفاده از  $U_i$  به عنوان بردارهای اصلی، تانسور هدایت هیدرولیکی به صورت ماتریس قطری مطابق زیر کاهش می‌یابد:

$$\overline{\overline{K}}' = \text{diag}[\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3] \quad (6)$$

از نظر هیدروژئولوژیکی به راحتی می‌توان فهمید که  $\lambda_i$  نمایانگر سه مقدار اصلی هدایت هیدرولیکی است. بنابراین،  $\lambda_1 = K_1$ ،  $\lambda_2 = K_2$  و  $\lambda_3 = K_3$  بوده و جهت  $K_i$  توسط  $U_i$  بدست می‌آید.

هر یک از مقادیر ویژه دارای بردارهای ویژه‌ای هستند. با استفاده از بردارهای ویژه تانسور، می‌توان راستا و میل مقادیر اصلی را طبق روابط ۷ و ۸ تعیین نمود [۲۴].

$$\beta = \tan^{-1} \left( \frac{U_x}{U_y} \right) + Q \quad (7)$$

هیدرولیکی توده‌سنگ درزه‌دار را تعیین کرد.

روش تانسور هدایت هیدرولیکی می‌تواند جهت‌گیری نسبتاً معقولی از تانسور هیدرولیکی را هنگامی که برخی از پارامترهای درزه‌ها را می‌گیرد ارائه کند. اما، مهم‌ترین پارامتر یعنی بازشدگی درزه را نمی‌توان با توجه به قانون مکعب به راحتی در محل بدست آورد. بنابراین، این روش را نمی‌توان به صورت مستقل به کار برد. بر این اساس، در این پژوهش آزمایش‌های هیدرولیکی برجا و روش تانسور هدایت هیدرولیکی برای محاسبه تانسور نشت توده‌سنگ شکسته ترکیب می‌شوند. بطوریکه، اولی برای بدست آوردن مقادیر و دومی برای تعیین جهت تانسور هدایت هیدرولیکی استفاده می‌شوند.

از آنجایی که جهت تانسور هدایت هیدرولیکی فقط به طرز قرارگیری دسته‌درزه‌ها وابسته است، جهت‌های اصلی تانسور هدایت هیدرولیکی به روش‌های آماری می‌توانند تعیین شوند. مقدار همگن و ایزوتروپ هدایت هیدرولیکی می‌تواند به وسیله داده‌های آزمایش فشار آب صحرایی تعیین شوند. بنابراین، تانسور هدایت هیدرولیکی می‌تواند به صورت زیر تعیین شود. ابتدا، مقادیر اصلی و جهت تانسور هدایت هیدرولیکی با یک روش آماری بر اساس اندازه‌گیری تقسیم فضایی شکستگی‌ها تعیین می‌شود و آنگاه با استفاده از تخمین هدایت هیدرولیکی ایزوتروپیک، که توسط نرخ نفوذپذیری آزمایش فشار آب صحرایی محاسبه شده است، اصلاح می‌شود. به شرط آنکه، محیط سنگی شکست‌های هموزن منظمی نشان دهد، می‌توان یک شبکه شکست تراوا با  $N$  شکاف فرض کرد. برای شکستگی‌های باز، تانسور هدایت هیدرولیکی به صورت رابطه ۱ است [۲۳]:

$$K = \frac{g}{12v} \sum_{i=1}^N \frac{b_i^3}{B_i} \begin{bmatrix} 1 - n_{xi}^2 & -n_{xi}n_{yi} & -n_{xi}n_{zi} \\ -n_{yi}n_{xi} & 1 - n_{yi}^2 & -n_{yi}n_{zi} \\ -n_{zi}n_{xi} & -n_{zi}n_{yi} & 1 - n_{zi}^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

در رابطه بالا،  $K$  تانسور هدایت هیدرولیکی توده‌سنگ،  $g$  شتاب گرانش،  $v$  ضریب ویسکوزیته سینماتیک آب  $(3/2 \text{ m}^3/s)$ ،  $b_i$  میانگین بازشدگی شکاف هیدرولیکی دسته‌درزه‌های  $i$ ،  $B_i$  فاصله‌داری دسته‌درزه‌های  $i$  و  $n_{xi}$ ،  $n_{yi}$  و  $n_{zi}$  کسینوس‌های جهت نرمال درزه می‌باشند که مطابق رابطه ۲ محاسبه می‌شوند.

در محیط متخلخل یا سنگ شکسته خطی و تابع قانون دارسی (*Darcy's law*) است.

- همگنی نسبی در مقیاس تعیین شده: هدایت هیدرولیکی به صورت میانگین در یک حجم مشخص تعریف می‌شود. یعنی مقیاس مدل باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا رفتار غیرهمگن ریزساختار (مانند ترک‌ها یا منافذ) را متوسط‌گیری کند، اما نه خیلی بزرگ که جزئیات محلی از دست برود.
- ثابت بودن خواص محیط: فرض می‌شود که خواص هدایت هیدرولیکی در طول زمان تغییر نمی‌کنند (غیرمداوم یا ایستا).
- جهتی بودن جریان: تانسور هدایت هیدرولیکی برای محیط‌های غیرهمسانگرد تعریف می‌شود و جهت‌های اصلی آن مشخص و ثابت فرض می‌شوند.
- عدم وجود اثرات غیرخطی یا تراکم‌پذیری شدید: برای جریان‌های با سرعت بالا یا در محیط‌هایی که تراکم‌پذیری سیال یا محیط مهم است، تانسور هدایت هیدرولیکی ممکن است دقیق نباشد.

علاوه بر روش مذکور برای محاسبه هدایت هیدرولیکی میانگین، روابط تجربی دیگری نیز توسط محققین مختلف ارائه شده است. بر این اساس، در پژوهش حاضر، از رابطه ۱۳ [۲۵] به عنوان یکی از مهم‌ترین روابط تجربی، با هدف اعتبارسنجی نتایج حاصل از روش تانسور هدایت هیدرولیکی، مورد استفاده قرار گرفته است.

$$K_{\text{eff}} = C.f.b^3 / s \quad (13)$$

که در رابطه بالا،  $C$  ثابت تجربی (اغلب ۱)،  $f$  چگالی شکستگی ( $\text{Number}/\text{m}^2$ )،  $b$  میانگین بازشدگی درزه‌ها و  $s$  میانگین فاصله‌داری درزه‌ها می‌باشند.

#### ۴- تحلیل نتایج و بحث

##### ۴-۱- الگوی گمانه‌های تزریق

گمانه‌های تزریق پرده آب‌بند در سد صفارود به صورت قائم طراحی شده‌اند. فاصله گمانه‌های اکتشافی  $m$  ۳۲ می‌باشد. مابین گمانه‌های اکتشافی چهار مرحله عملیات تزریق طراحی شده است که فاصله چال‌های تزریق در مرحله چهارم  $m$  ۲

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{U_z}{\sqrt{U_x^2 + U_y^2}} \right) \quad (8)$$

اگر  $U_x \geq 0$  و  $U_y \geq 0$  باشند، آنگاه  $Q = 0$ ، اگر  $U_x < 0$  و  $U_y \geq 0$  باشند، آنگاه  $Q = 360$  و در سایر علامت‌ها،  $Q = 180$  خواهد بود [۲۴].

برای مقایسه این روش و تخمین هدایت هیدرولیکی تعیین شده توسط روش‌های دیگر، میانگین هندسی سه مقدار اصلی مطابق رابطه ۹ به عنوان هدایت هیدرولیکی ترکیب شده فرض می‌شود [۲۳].

$$K_0 = \sqrt[3]{K_1 K_2 K_3} \quad (9)$$

همچنین، میانگین حسابی مقدار هدایت هیدرولیکی تعیین شده از آزمایش لوژان بیشتر از هدایت هیدرولیکی افقی است و میانگین هندسی به مقادیر واقعی نزدیک‌تر است. بنابراین، میانگین هندسی به عنوان میانگین هدایت هیدرولیکی توده‌سنگ فرض می‌شود. لذا، میانگین هدایت هیدرولیکی با استفاده از نتایج آزمایش‌های فشار آب توسط رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود [۲۳].

$$K_\omega = \sqrt[n]{K_1 K_2 \dots K_n} \quad (10)$$

به طوری که،  $K_\omega$  میانگین هدایت هیدرولیکی و  $K_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ) هدایت هیدرولیکی هر قطعه آزمایش است.

در نهایت، از متوسط هدایت هیدرولیکی به دست آمده با استفاده از آزمایش فشار آب برای تصحیح تانسور هدایت هیدرولیکی به دست آمده از روش آماری استفاده شده و ضریب اصلاح با استفاده از رابطه ۱۱ بدست می‌آید [۲۳].

$$m = \frac{K_\omega}{K_0} \quad (11)$$

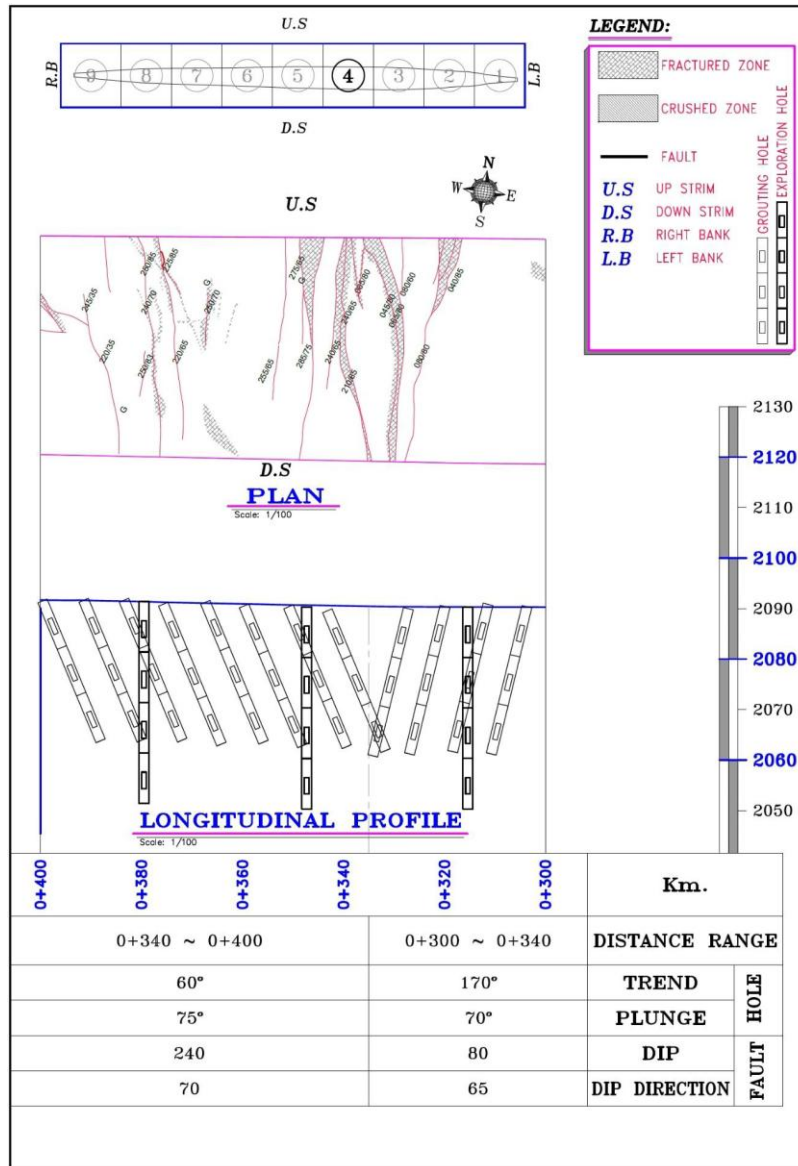
$m$  در تانسور هدایت هیدرولیکی بدست آمده با روش آماری جایگزین شده و تانسور هدایت هیدرولیکی توده‌سنگ شکسته را بصورت زیر اصلاح می‌کند [۲۳].

$$K_m = mK = \begin{bmatrix} mK_1 & 0 & 0 \\ 0 & mK_2 & 0 \\ 0 & 0 & mK_3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

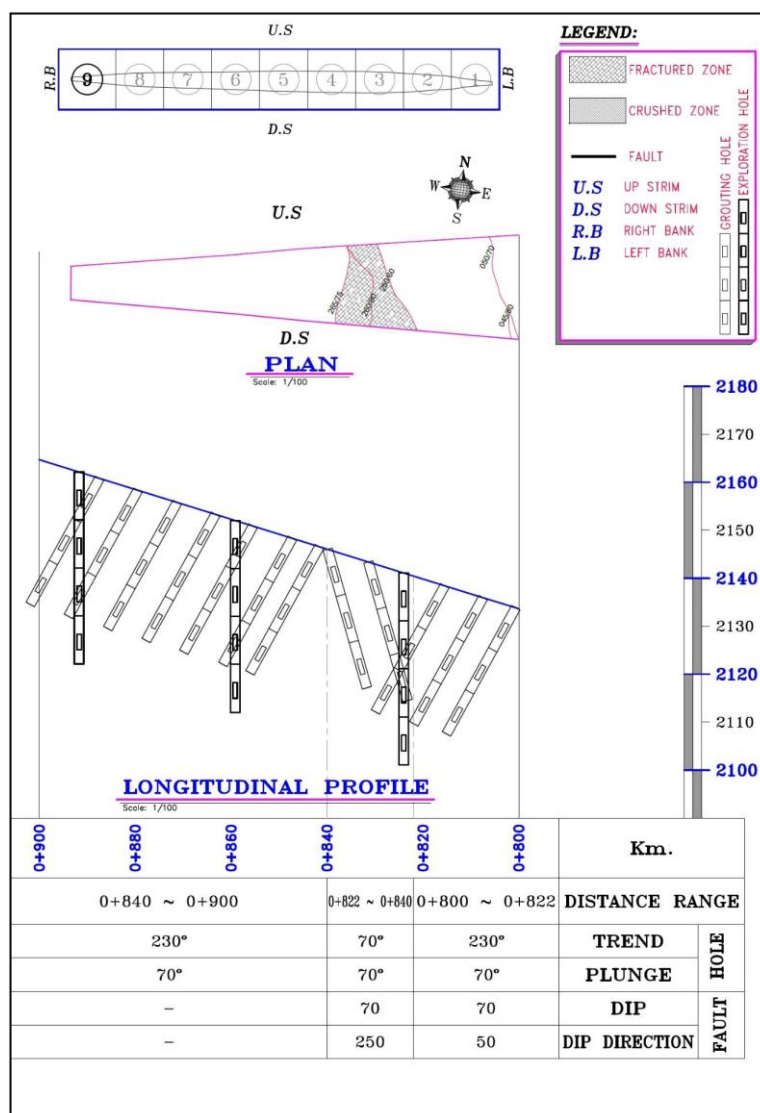
لازم به ذکر است که روش تانسور هدایت هیدرولیکی دارای فرضیاتی به شرح زیر می‌باشد:

- خطی بودن جریان: فرض می‌شود که جریان سیال

می‌باشد. پس از تزریق چهار مرحله، گمانه‌های کنترلی اجرا خواهد شد که به صورت شیب‌دار طراحی شده‌اند. در شکل‌های ۲ و ۳ نمونه‌ای از الگوهای پیشنهادی حفاری چال‌های پرده آببند در فواصل مختلف نشان داده شده‌اند.



شکل ۲- الگوی پیشنهادی حفاری چال‌های پرده آببند در سد صفارود (کیلومتراژ ۳۰۰ الی ۴۰۰)



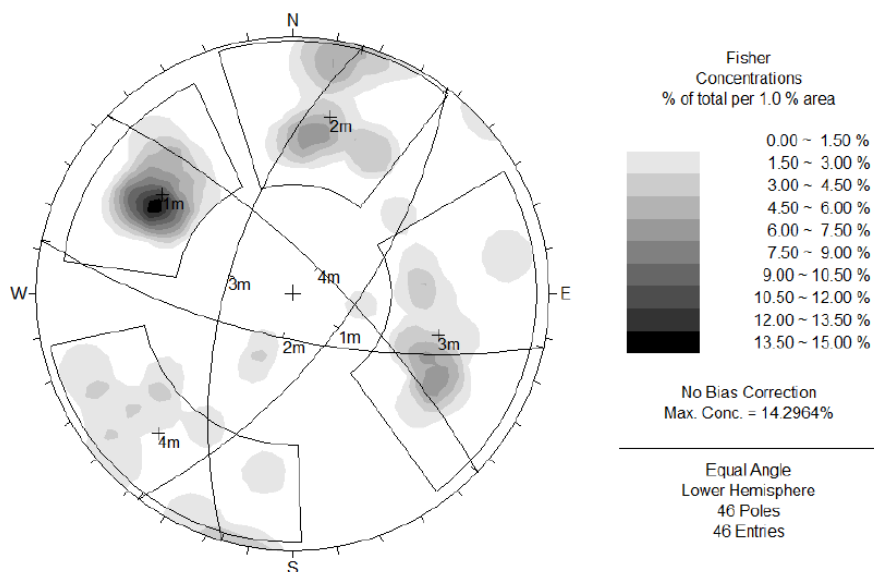
شکل ۳- الگوی پیشنهادی حفاری چال‌های پرده آب‌بند در سد صفارود (کیلومتر از ۸۰۰ الی ۹۰۰)

#### ۴-۲- برداشت اطلاعات درزه‌ها و گسل‌ها

طی مطالعات اولیه و با توجه به نتایج آزمایش‌های لوژان در گمانه‌های اکتشافی (نفوذپذیری کم ساختگاه)، در طراحی از حفاری گالری تزریق در ساختگاه سد صرف‌نظر شده است. با توجه به طراحی اسلب بتنی در محل ساختگاه، گمانه‌های تحکیمی و آب‌بند قبل از اجرای بدنه و همزمان با ساخت فرازبند بر روی اسلب بتنی حفاری شدند. برای اجرای عملیات بتن‌ریزی اسلب، ساختگاه به قطعه‌های مختلف

تقسیم‌بندی شد. ابعاد هر قطعه بین ۶×۱۰ تا ۱۰×۱۰ متر متغیر بود. قبل از عملیات بتن‌ریزی ابتدا قطعه موردنظر تمیز شده و پس از برداشت درزه‌ها عملیات بتن‌ریزی انجام گرفت. در مرحله برداشت، اطلاعات مربوط به درزه‌ها از جمله شیب، جهت شیب، فاصله‌داری، بازشدگی، طول، زبری، شکل، پرشدگی و اطلاعات نشت درزه‌ها در هر قطعه ثبت شد. نمونه‌ای از اطلاعات برداشت شده و تعیین دسته درزه‌ها در شکل ۴ و جدول ۱ نشان داده شده‌اند. پس از برداشت چند قطعه اطلاعات درزه‌ها منطبق گردید که نمونه‌ای از آن در

شکل ۵ نشان داده شده است.

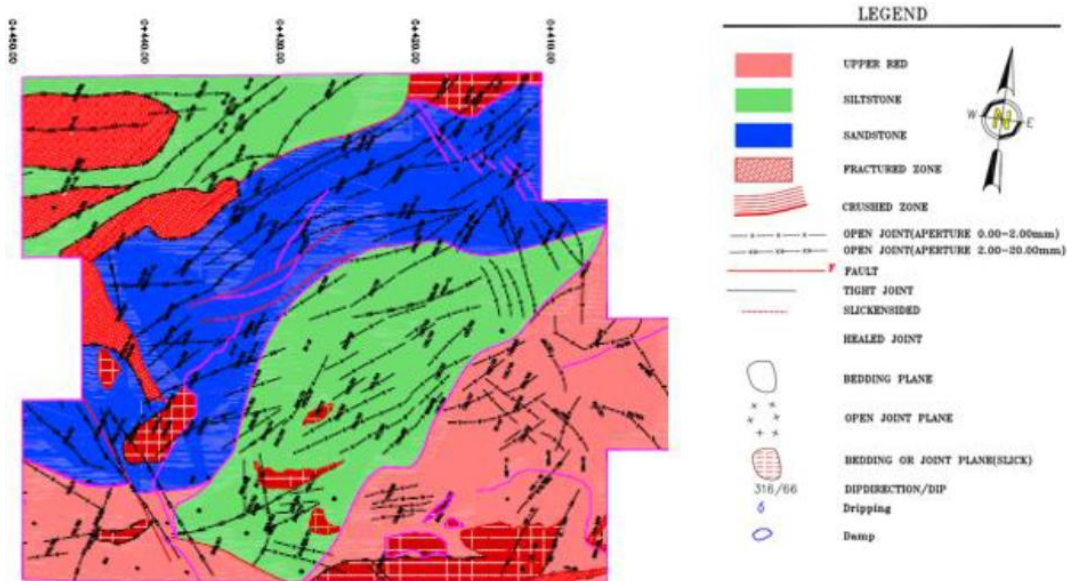


شکل ۴- تعیین دسته‌درزه‌های فواصل ۳۵۰ تا ۳۸۰ در نرم‌افزار DIPS

جدول ۱- خصوصیات برداشت شده دسته‌درزه‌ها در فواصل ۳۵۰-۳۸۰

شیب (°)	جهت شیب (°)	نوع	فاصله‌داری (m)	بازشدگی (mm)	پرکننده	زبری	شکل	نشت آب
۶۸	۱۳۹	J	۰/۲۶	۰/۵	C-CL	S	P	CD
۶۰	۲۳۵	J	۰/۱۲	۱/۵	CL	R	P	CD
۵۷	۳۱۷	J	۰/۳۷	۱	CL	S	P	CD
۷۵	۴۰	J	۰/۱۳	۱	CL	S	P	CD

CD نمایانگر حالت کاملاً خشک در مبحث نشت آب، P شکل مسطح درزه، S و R به ترتیب حالت‌های هموار و ناهموار برای تعریف زبری سطوح می‌باشند. در قسمت پرکننده‌ها نیز C نمایانگر کلسیت و CL نمایانگر رس می‌باشد.



شکل ۵- تطبیق دسته‌درزه‌ها و تنوع سنگی در نرم‌افزار اتوکد فواصل ۴۵۰-۴۱۰

دارای سطحی زبر (*Rough*) می‌باشند. درزه‌های دارای خش لغز نیز درصد کمی از کل درزه‌ها را تشکیل می‌دهند (حدود ۲٪) که بطور پراکنده در برخی گمانه‌ها مشاهده شده‌اند. آثار سطح صیقلی عموماً در سطح درزه‌ها مشاهده می‌شود بگونه‌ای که حدود ۲۷٪ از سطح درزه‌ها دارای این ویژگی هستند که بنظر می‌رسد مربوط به حرکت بین لایه‌ای بوده که با توجه به خصوصیات لیتولوژیکی سازند قرمز بالایی که عموماً از مارن و گل‌سنگ تشکیل شده است؛ این اثر در سطح درزه‌ها بیشتر نمود پیدا کرده است. جداول ۲ تا ۴ مشخصات گسل‌ها، درزه‌ها و لایه‌بندی ماسه‌سنگ را در تکیه‌گاه چپ، تکیه‌گاه راست و پی ساختگاه نشان می‌دهند.

مهم‌ترین خصوصیات ناپیوستگی‌ها و درزه‌ها و ویژگی مهندسی سطح درزه‌ها شامل موارد زیر است:

الف - بیشتر از ۶۱٪ درزه‌ها در گمانه‌های محدوده پی و تکیه‌گاه‌ها پرشدگی داشته که توسط سیلت و رس حدود ۴۸٪ و ژئپس حدود ۵۱٪ پر شده و یا جوش خورده‌اند و درصد بسیار کمی از درزه‌ها (حدود ۱٪) توسط کلسیت پرشدگی دارند.

ب - درزه‌های با بازشدگی عموماً کمتر از ۱ mm حدود ۸۰٪ درزه‌های باز ساختگاه را تشکیل می‌دهند.

ج - سطح درزه‌ها عموماً نرم (*Smooth*) بوده؛ بطوریکه نزدیک به ۵۰٪ درزه‌ها دارای سطحی نرم و نیز ۲۰٪ درزه‌ها

جدول ۲- مشخصات گسل‌ها در موقعیت‌های مختلف ساختگاه (G نمایان‌گر پرشدگی از نوع ژئپس می‌باشد)

موقعیت	گسل	شیب (°)	جهت شیب (°)	پرشدگی	بازشدگی (mm)
تکیه‌گاه	F1	۶۵	۲۹۵	CL-G	۱۵۰
چپ	F2	۵۰	۴۵	CL-G	۲۵۰
بستر	F1	۶۰	۲۹۵	CL	۱۵۰
	F2	۷۰	۴۵	G-CL	۱۵۰
	F3	۶۵	۲۴۵	G-CL	۱۰۰
تکیه‌گاه راست	F1	۶۰	۱۰	CL	۱۰۰
	F2	۷۰	۴۵	G-CL	۷۵
	F3	۶۰	۲۵۰	G-CL	۶۰

جدول ۳- مشخصات دسته‌درزه‌ها در موقعیت‌های مختلف ساختگاه

موقعیت	دسته‌درزه	شیب (°)	جهت شیب (°)	فاصله‌داری (m)	پرش‌دگی	بازشدگی (mm)
تکیه‌گاه	J1	۶۰	۱۲۰	۰/۲۹	-	۱
چپ	J2	۶۴	۱۸۲	۰/۲۹	CL-G	۳
	J3	۵۲	۲۹۴	۰/۲۹	CL-G	۱۰
بستر	J1	۶۳	۱۳۰	۰/۲۷	CL-G	۴
	J2	۷۰	۱۹۵	۰/۲۷	CL-G	۳/۴
	J3	۵۵	۲۸۳	۰/۲۹	CL-G	۱۱
	J4	۶۲	۴۲	۰/۱۸	CL-G	۶
تکیه‌گاه	J1	۷۰	۱۲۱	۰/۳۲	-	۱
راست	J2	۷۹	۳۷	۰/۲	CL-G	۳/۲
	J3	۸۰	۲۶۰	۰/۴	-	۱

جدول ۴- مشخصات لایه‌بندی ماسه‌سنگ ساختگاه

موقعیت	شیب (°)	جهت شیب (°)	فاصله‌داری (m)	بازشدگی (mm)
تکیه‌گاه	۱۹	۶۷	۰/۱۵	۰/۵۵
چپ				
پی‌سد (بستر)	۴۳	۵۹	۰/۱۵	۰/۰۴۳
تکیه‌گاه	۴۶	۵۸	۰/۱۵	۰/۰۴
راست				

#### ۴-۳- محاسبه تانسور هدایت هیدرولیکی

پس از عملیات درزه‌نگاری، مشخصات هندسی درزه‌ها و گسل‌ها در برنامه محاسبه تانسور که با نرم‌افزار *MATLAB* نوشته شده است، وارد شد. این برنامه با دریافت مقدار شتاب جاذبه زمین، ویسکوزیته آب، تعداد دسته‌درزه، مقدار بازشدگی، فاصله‌داری، شیب و جهت شیب هر دسته‌درزه، تانسور هدایت هیدرولیکی مربوط به هر دسته‌درزه را محاسبه

و مجموع آن را برآورد می‌نماید. پس از آن مقادیر ویژه و بردار ویژه تانسور هدایت هیدرولیکی را مشخص می‌کند. این برنامه پس از محاسبه مقادیر ویژه و بردار ویژه تانسور، راستا و میل مقادیر اصلی تانسور را محاسبه نموده و می‌تواند میانگین هندسی مقادیر ویژه تانسور را تعیین کند. در جداول ۵ تا ۷، به ترتیب نتایج محاسبات در تکیه‌گاه چپ، بستر ساختگاه و تکیه‌گاه راست ارائه شده‌اند.

جدول ۵- تانسور هدایت هیدرولیکی محاسبه شده بر اساس ویژگی هندسی درزه‌های تکیه‌گاه چپ ساختگاه

تانسور هدایت هیدرولیکی $\times 10^{-3}$	مقادیر ویژه	میل (°)	راستا (°)	میانگین هندسی مقادیر ویژه
(m/s)	(m/s)			(m/s)
۰/۲۰۲۹	$K_1 = ۰/۰۲۴۸$	۳۸	۱۵۶	۰/۲۷۰۴
۰/۴۴۸۸	$K_2 = ۰/۸۸۱۸$	۲۷	۲۶۹	
۰/۳۹۰۹	$K_3 = ۰/۹۰۵۲$	۴۰	۲۴	

جدول ۶- تانسور هدایت هیدرولیکی محاسبه شده بر اساس ویژگی هندسی درزه‌های بستر ساختگاه

تانسور هدایت هیدرولیکی $\times 10^{-3}$	مقادیر ویژه	میل (°)	راستا (°)	میانگین هندسی مقادیر ویژه
(m/s)	(m/s)			(m/s)
-۰/۰۰۷۴	$K_1 = ۰/۷۰۸۱$	۳۳	۱۶۸	۱/۱۹۸۹
۱/۰۱۸۲	$K_2 = ۱/۴۰۰۸$	۳۲	۵۵	
۰/۴۶۴۹	$K_3 = ۱/۷۱۷۲$	۴۱	۲۹۳	

جدول ۷- تانسور هدایت هیدرولیکی محاسبه شده بر اساس ویژگی هندسی درزه‌های تکیه‌گاه راست ساختگاه

تانسور هدایت هیدرولیکی $\times 10^{-3}$	مقادیر ویژه	میل (°)	راستا (°)	میانگین هندسی مقادیر ویژه
(m/s)	(m/s)			(m/s)
-۰/۰۰۶۱	$K_1 = ۰/۰۰۱۱$	۱۱	۲۳۲	۰/۰۱۲۷
-۰/۰۰۴۸	$K_2 = ۰/۰۴۲۳$	۷	۱۴۱	
۰/۰۴۱۷	$K_3 = ۰/۰۴۲۳$	۷۷	۲۰	

هیدرولیکی و تعیین راستای گمانه‌های تزریق استفاده شده است. مقادیر اصلی هدایت هیدرولیکی به صورت  $K_1$ ،  $K_2$  و  $K_3$  نشان داده شده که  $K_1 > K_2 > K_3$  می‌باشد. با استفاده از نرم افزار *DIPS* می‌توان شیب و جهت شیب دسته‌درزه‌ها، راستا و میل مقادیر اصلی هدایت هیدرولیکی و گمانه تزریق را نمایش داد. شکل‌های ۶ تا ۸، دسته‌درزه‌ها، راستا و میل مقادیر اصلی و جهت گمانه تزریق را به ترتیب در تکیه‌گاه چپ، بستر ساختگاه و تکیه‌گاه راست نشان می‌دهند.

در عملیات تزریق، آرایش گمانه‌های تزریق باید به گونه‌ای باشد که تا حد ممکن اکثر دسته‌درزه‌های تزریق‌پذیر را قطع نماید. با توجه به توجیه فضایی درزه‌های قابل تزریق، بیشترین کارایی چال‌های تزریق در محدوده خاصی از شیب و جهت شیب می‌باشد. اگر گمانه‌های قائم یا نزدیک به قائم در محدوده مورد نظر قرار گیرند، حالت بهینه اتفاق می‌افتد؛ زیرا حفاری و تزریق آن‌ها ساده‌تر و کم هزینه‌تر می‌باشد. پرده

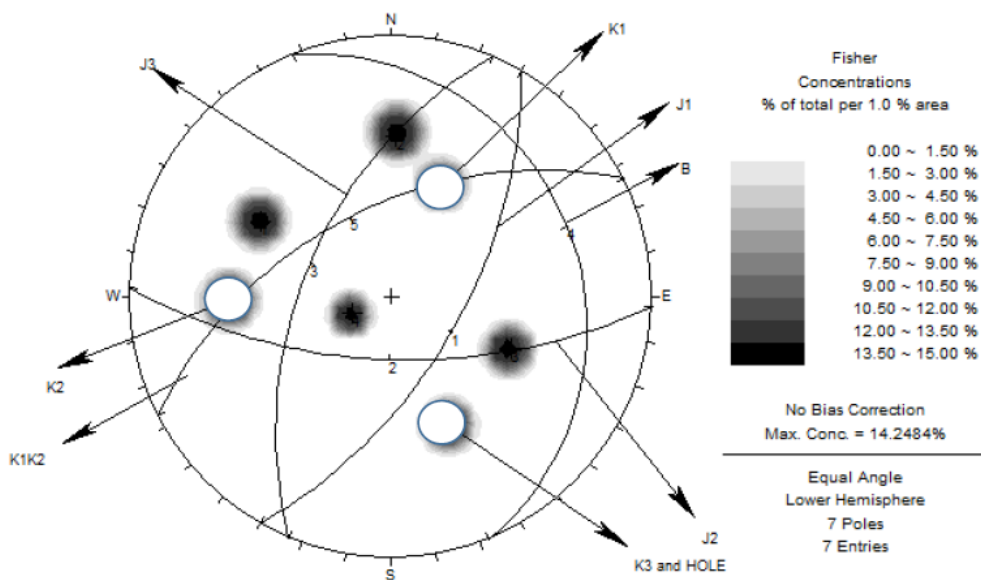
با هدف اعتبارسنجی نتایج حاصل از محاسبات تانسور هدایت هیدرولیکی بدست آمده، از رابطه ۱۳ نیز استفاده شده است. نتایج مربوط به محاسبات نشان داد که مقادیر میانگین هندسی هدایت هیدرولیکی در تکیه‌گاه چپ، بستر و تکیه‌گاه راست ساختگاه سد به ترتیب برابر  $m/s$  ۰/۳۲۳۷،  $m/s$  ۱/۰۸۳۵ و  $m/s$  ۰/۰۱۵۱ بدست آمدند. مقایسه مقادیر بدست آمده از رابطه تجربی ۱۳ با نتایج روش تانسور هدایت هیدرولیکی اصلاح شده نشان داد که اختلاف ناچیز بوده و به ترتیب برابر ۱۶/۵٪، ۹/۶٪ و ۱۵/۹٪ به ترتیب در تکیه‌گاه چپ، بستر و تکیه‌گاه راست ساختگاه سد می‌باشند. این تغییرات نشان از دقت بالای رویکرد تانسور هدایت هیدرولیکی اصلاح شده دارد.

#### ۴-۴- تحلیل نشت و فرار آب از پرده آب‌بند

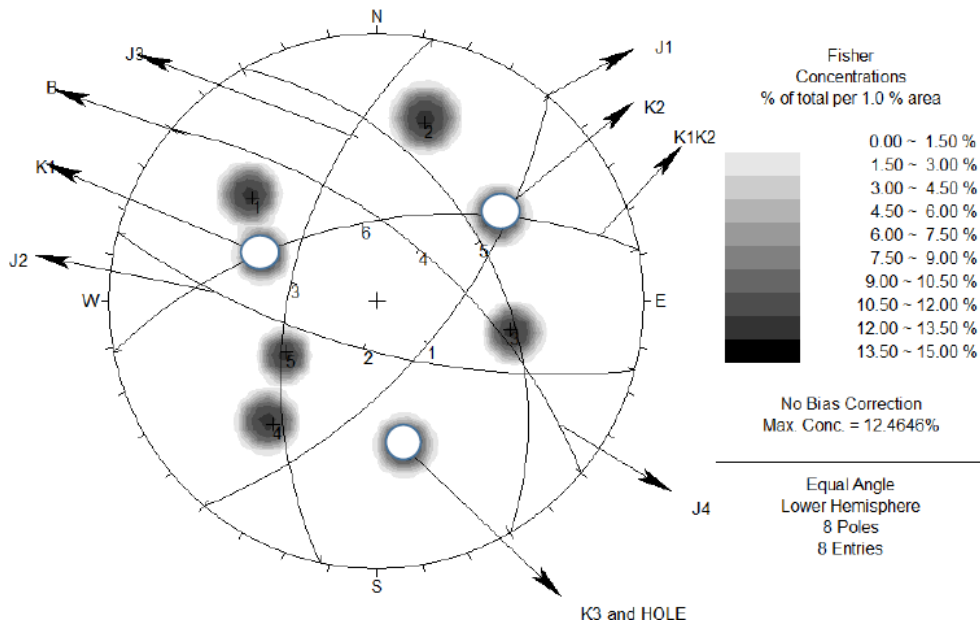
جهت تحلیل نشت آب از پرده آب‌بند از خصوصیات هندسی دسته‌درزه‌ها، مقادیر اصلی، بردارهای ویژه تانسور هدایت

جهت اصلی هدایت هیدرولیکی عمود بر هم می‌باشند؛ پس واضح است که راستای گمانه تزریق بایستی با راستای  $K_0$  موازی باشد. لذا، بر مبنای این تحلیل چنانچه راستای گمانه تزریق موازی با مقادیر  $K_1$  و  $K_2$  و یا موازی با صفحه  $K_1 K_2$  باشد، تزریق کارآیی لازم را نخواهد داشت و احتمال نشتی در این مقاطع وجود دارد. در نهایت، می‌توان بر اساس شکل‌های ۶ تا ۸ مشاهده کرد که گمانه‌های تزریق موازی با جهت  $K_3$  و عمود بر صفحه  $K_1 K_2$  پیشنهاد شده‌اند.

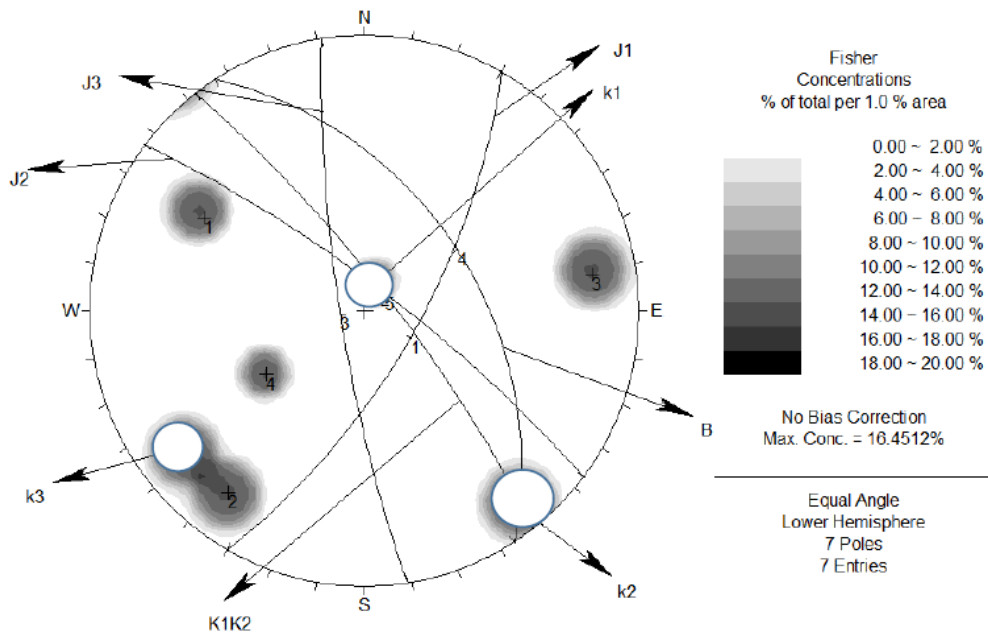
آب‌بند در دو حالت کارآیی موردنظر را نخواهد داشت. اول اینکه گمانه تزریق موازی با یکی از دسته‌درزه‌های حاکم بر نشت باشد که در این حالت امکان نشت درون درزه و فرار آب از درزه موردنظر وجود خواهد داشت. دوم اینکه راستای  $K_1$  دارای بیشترین نشت و راستای  $K_3$  دارای کم‌ترین نشت از دسته‌درزه‌ها باشد. در محاسبات،  $K_2$  کمتر از  $K_1$  و با مقداری نزدیک به آن به دست می‌آید. بنابراین، می‌توان گفت راستای گمانه‌های تزریق باید عمود بر راستای  $K_1$  و  $K_2$  و لذا عمود بر صفحه‌ای باشد که از این ۲ راستا می‌گذرد. به دلیل اینکه سه



شکل ۶- توزیع دسته‌درزه‌های اصلی، راستای مقادیر اصلی تانسور و راستای گمانه تزریق در تکیه‌گاه چپ ساختگاه



شکل ۷- توزیع دسته‌درزه‌های اصلی، راستای مقادیر اصلی تانسور و راستای گمانه تزریق در بستر ساختگاه



شکل ۸- توزیع دسته‌درزه‌های اصلی، راستای مقادیر اصلی تانسور و راستای گمانه تزریق در تکیه‌گاه راست ساختگاه سازه‌های آبی می‌باشند. هرچند گسل‌های ساختگاه سد

#### ۴-۵- بررسی کارآیی راستای تعیین شده گمانه

#### تزریق در زون‌های گسله

گسل‌ها از نواحی مهم در ناپایداری سازه‌ها و نشست آب در

صفاورد در آزمایش‌های هیدرولیکی برج، نفوذپذیری بالایی از خود نشان نداده‌اند؛ ولی با توجه به نوع پرشدگی آن که

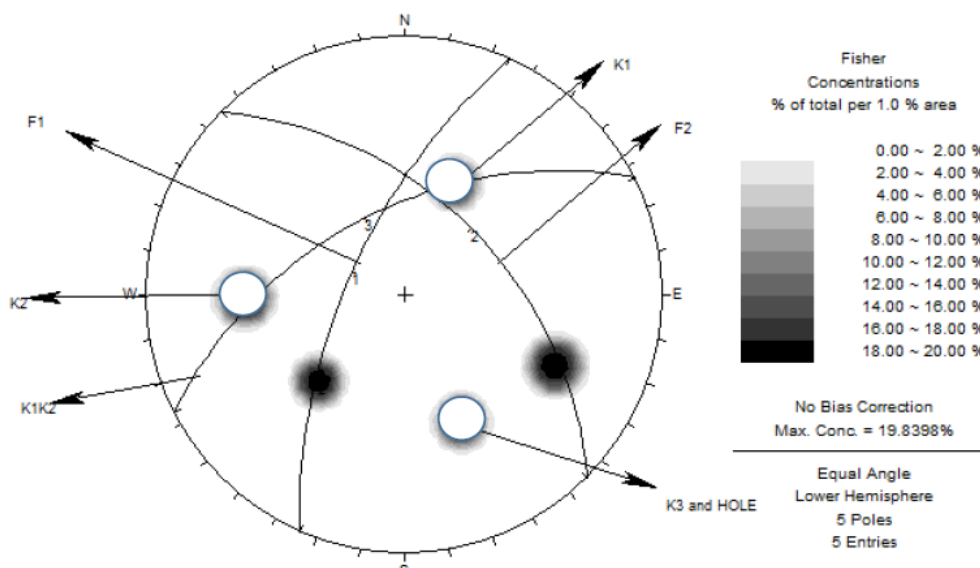
است. همچنین، راستای  $K_2$  نیز تقریباً با محور تلاقی  $F_1$ - $F_2$  هم‌جهت است. اما، در مورد گسل  $F_3$ ، راستای  $K_3$  تقریباً با صفحه گسل موازی بوده که ممکن است کارآیی پرده آب‌بند کاهش یابد. می‌توان گفت گمانه با راستای موازی با مقدار اصلی  $K_3$  می‌تواند دو گسل  $F_1$  و  $F_2$  بستر ساختگاه را قطع نماید؛ اما در مورد گسل  $F_3$  پرده آب‌بند کارآیی لازم را نخواهد داشت. لذا، در نواحی نزدیک به گسل  $F_3$  باید الگوی جدید از گمانه‌های تزریق به کار رود. در این نواحی گمانه‌هایی با امتداد  $70^\circ$  و زاویه میل  $30^\circ$  عمود بر سطح گسل می‌باشد.

همچنین با توجه به شکل ۱۱، راستای مقدار اصلی  $K_1$  با شیب و جهت شیب محور تلاقی گسل  $F_1$ - $F_2$  تقریباً هم‌مسو است. همچنین  $K_2$  نیز مطابقت خوبی با گسل  $F_2$  دارد. لذا، می‌توان گفت گمانه با راستای موازی با مقدار اصلی  $K_3$  می‌تواند دو گسل مهم تکیه‌گاه راست را قطع نماید. اما در مورد گسل  $F_3$  راستای  $K_3$  تقریباً با صفحه گسل موازی بوده که ممکن است کارآیی پرده آب‌بند کاهش یابد. لذا، در نواحی نزدیک به گسل  $F_3$  باید الگوی جدیدی از گمانه‌های تزریق به کار رود. در این نواحی می‌توان از گمانه‌هایی با امتداد  $70^\circ$  و زاویه میل  $30^\circ$  استفاده نمود.

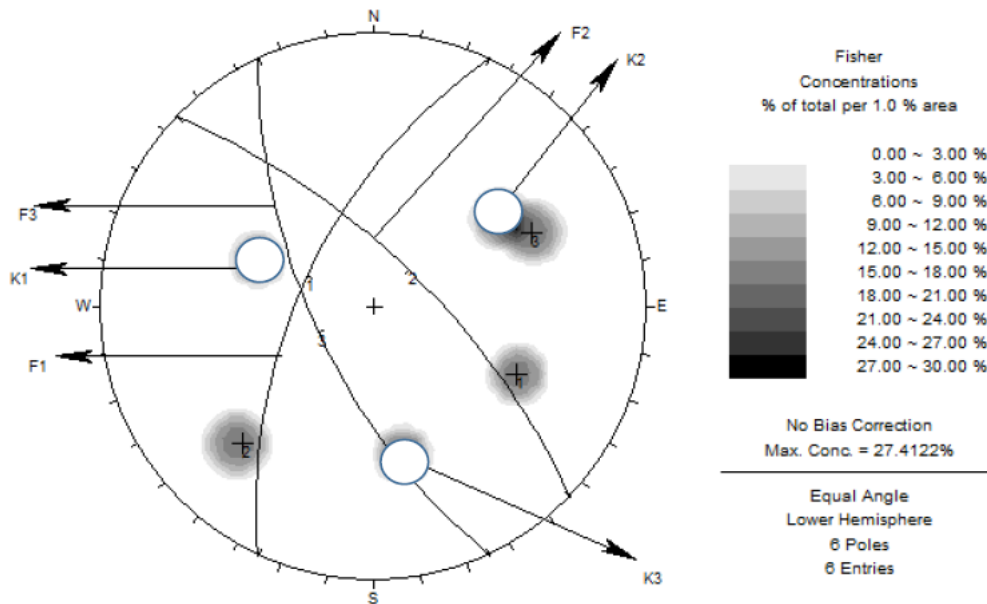
رس و ژئیس می‌باشد این احتمال وجود دارد که در طول عمر بهره‌برداری و با شسته شدن پرشدگی‌ها، همین گسل‌ها عامل اصلی فرار آب و ناپایداری در پروژه شوند. پس باید علاوه بر پر کردن سطح گسل توسط بتن و...، آرایش گمانه‌های تزریق به گونه‌ای باشد که سطح گسل‌ها را برای عملیات تزریق کارآمد قطع نمایند. شکل‌های ۹ تا ۱۱ ارتباط میان گسل‌ها و جهت و راستای مقادیر اصلی تانسور هدایت هیدرولیکی و چال‌های تزریق را به ترتیب در تکیه‌گاه چپ، پی ساختگاه و تکیه‌گاه راست نشان می‌دهند.

همانگونه که در شکل ۹ مشخص است، راستای مقدار اصلی  $K_1$  تقریباً با جهت تلاقی گسل  $F_1$  و  $F_2$  هم‌جهت است. همچنین راستای  $K_2$  نیز تقریباً با صفحه گسل  $F_1$  هم‌جهت می‌باشد. بنابراین، می‌توان گفت گمانه با راستای موازی با مقدار اصلی  $K_1$  می‌تواند هر دو گسل مهم تکیه‌گاه چپ را قطع نماید. لذا، نیازی به حفاری خارج از الگو در تکیه‌گاه چپ نمی‌باشد.

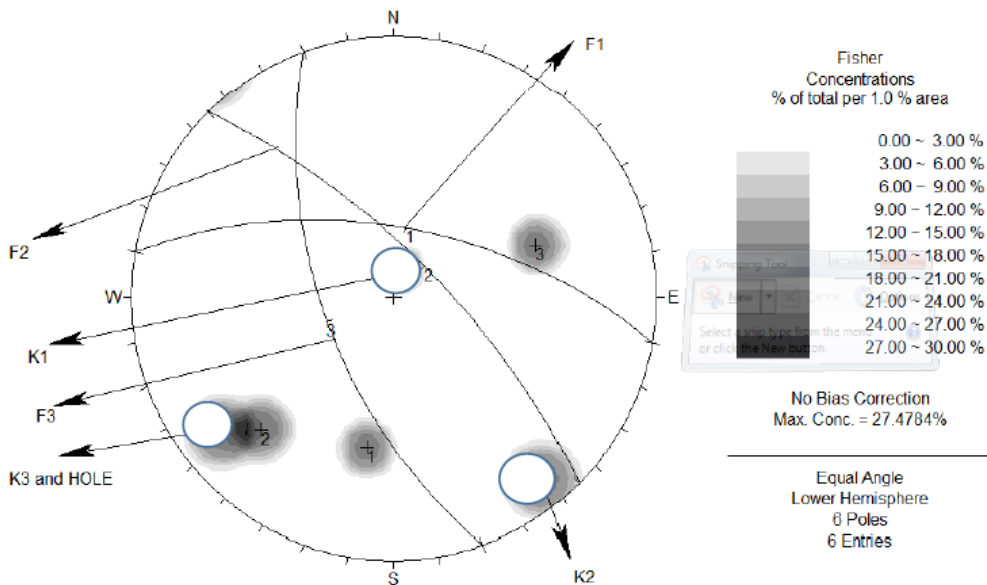
با توجه به شکل ۱۰، راستای مقدار اصلی  $K_1$  تقریباً با جهت تلاقی گسل‌های  $F_1$ - $F_2$ ،  $F_1$ - $F_3$  و  $F_2$ - $F_3$  هم‌جهت



شکل ۹- جهت گسل‌های اصلی، راستای مقادیر اصلی تانسور و راستای گمانه تزریق در تکیه‌گاه چپ ساختگاه



شکل ۱۰- جهت گسل‌های اصلی، راستای مقادیر اصلی تانسور و راستای گمانه تزریق در بستر ساختگاه



شکل ۱۱- جهت گسل‌های اصلی، راستای مقادیر اصلی تانسور و راستای گمانه تزریق در تکیه‌گاه راست ساختگاه

۴۰° می‌باشد. برای مقایسه این دو پیشنهاد باید دو مسئله مدنظر قرار گیرد. ابتدا اینکه آیا چال‌های تزریق قائم می‌توانند درزه‌های حاکم بر نشت آب را قطع نمایند و دوم اینکه آیا چال‌های تزریق با زاویه میل کمتر از ۴۰° از لحاظ فنی و اقتصادی قابل حفاری و به صرفه می‌باشند یا خیر؟ همانگونه که اشاره شد، بهترین حالت برای تزریق

#### ۴-۶- مقایسه جهت بهینه چال‌های تزریق و الگوی

##### چال‌های تزریق در مرحله اجرا

الگوی چال‌های تزریق که توسط طراح پیشنهاد شده است به صورت قائم می‌باشد. اما زاویه میل بهینه چال‌های تزریق که توسط تانسور هدایت هیدرولیکی تعیین شده است، کمتر از

#### ۴-۶- هیدروژئولوژی

سنگ بستر ساختگاه سد صفارود متشکل از تناوب لایه‌های مارن و گل‌سنگ و ماسه‌سنگ به همراه میان لایه‌های مارن سیلتی و سیلت متعلق به سازند قرمز بالایی می‌باشد. این سازند به سبب ماهیت لیتولوژیکی خود فاقد نفوذپذیری اولیه می‌باشد، لذا هیدروژئولوژی توده‌سنگ متأثر از نفوذپذیری ثانویه‌ای است که تحت تأثیر درزه و ترک در توده‌سنگ شکل گرفته است.

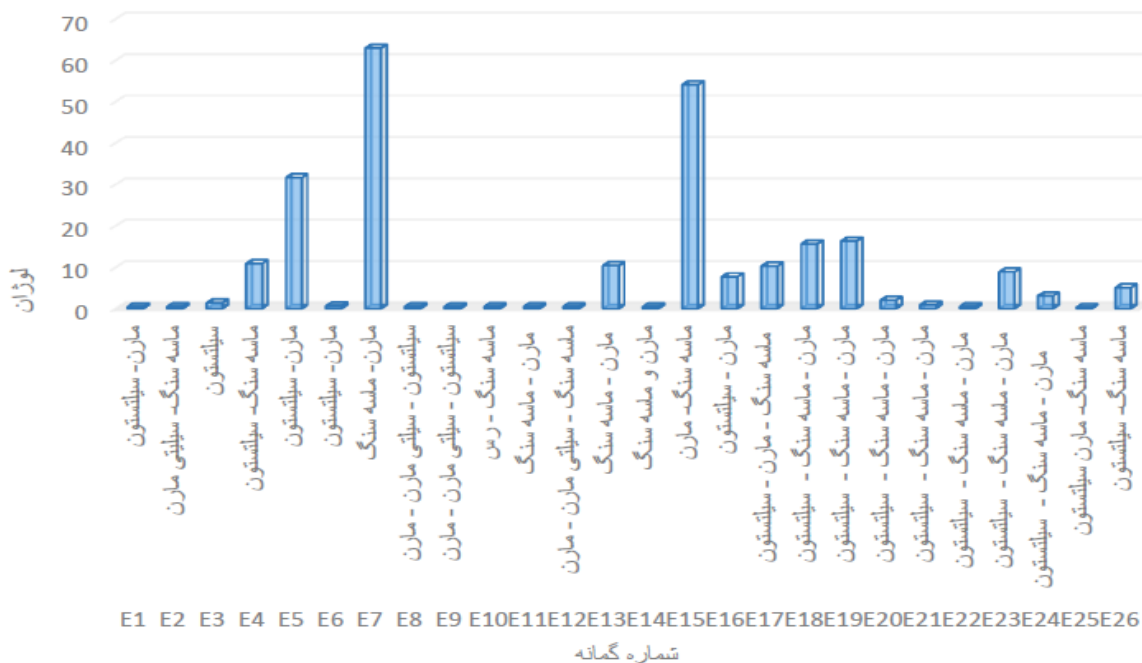
جهت انجام مطالعات هیدروژئولوژی تعداد ۳۰ گمانه اکتشافی حفر گردید که اطلاعات ۲۶ مورد از گمانه‌ها مورد تحلیل قرار گرفت. فاصله گمانه‌ها  $32\text{ m}$  می‌باشد. آزمایش لوژان در قطعات ۵ متری از عمق گمانه انجام پذیرفت و میزان نفوذپذیری بر حسب لوژان و رفتار جریان در هر قطعه از آزمایش مشخص گردید. هم‌چنین در این گمانه‌ها عملیات مغزه‌گیری انجام شد که نوع و مشخصات مقاومتی سنگ و مشخصات لایه‌بندی تعیین گردید.

بر اساس شکل ۱۲، در عمق ۵-۱ متری به علت هوازگی سطح و انبساط لایه‌های سنگی مختلف رفتار جریان بیشتر به صورت انبساط لایه‌ها و یا نشت آب به سطح اسلب بتنی می‌باشد که دو دلیل دارد: دلیل اول جریان آب در نقاط ضعف بین لایه‌ها بوده که در نقطه انقطاع لایه‌بندی و درزه‌ها آب به سمت بالا و اسلب بتنی هدایت شده است و دلیل دیگر آن نیز وجود زون خردشدگی در برخی از نقاط ساختگاه است. لازم به ذکر است، در شکل ۱۲ رفتار جریان نامعلوم مربوط به نشت آب به سطح اسلب بتنی می‌باشد که عملیات آزمایش در این موارد متوقف گردید.

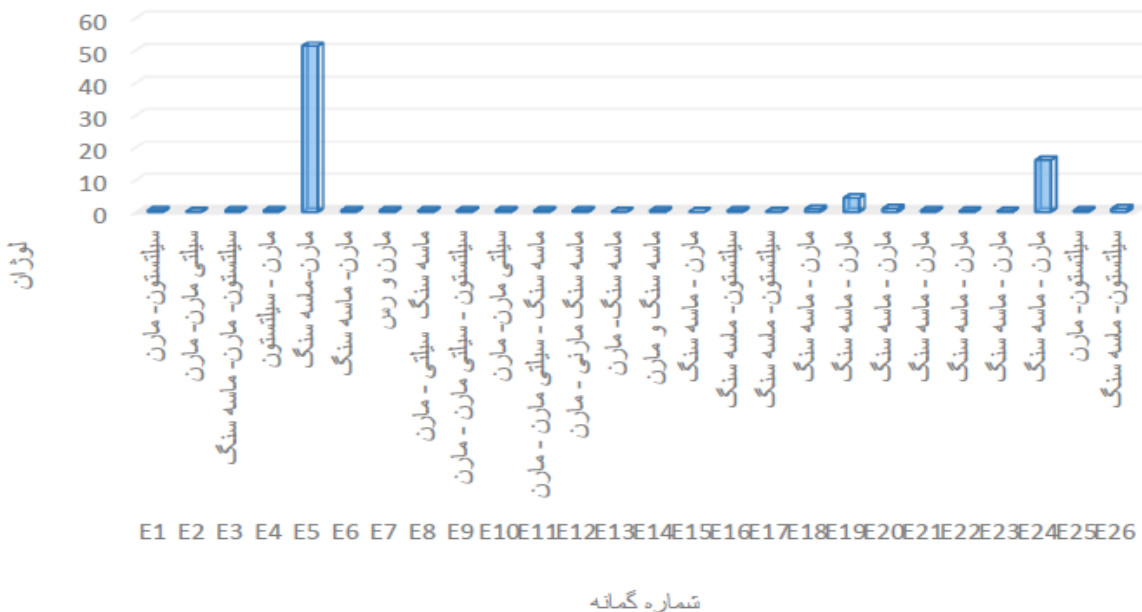
درزه‌های با شیب بین ۳۰ تا ۶۰ درجه استفاده از چال‌های قائم می‌باشد. بنابراین، برای تعیین بهترین الگوی تزریق بایستی کارایی چال‌های قائم در دو حالت مد نظر قرار گیرد. اولاً بر مبنای روش تانسور هدایت هیدرولیکی، اگر شیب صفحه‌ای که دو راستای  $K_1$  و  $K_2$  از آن می‌گذرد کمتر از  $60^\circ$  باشد، می‌توان گفت چال تزریق قائم مناسب‌تر است و اگر بیش از  $60^\circ$  باشد می‌توان چال تزریق را به صورت زاویه‌دار نسبت به قائم و در راستایی که با استفاده از تانسور هدایت هیدرولیکی پیشنهاد شده است حفاری نمود. صفحه  $K_1K_2$  در بستر ساختگاه دارای شیب  $55^\circ$  و در تکیه‌گاه چپ دارای شیب  $50^\circ$  می‌باشد که چال‌های قائم در این نواحی کارایی مناسب خواهند داشت. اما در تکیه‌گاه راست این صفحه دارای شیب  $78^\circ$  می‌باشد که کارایی چال‌های تزریق قائم کاهش می‌یابد. بنابراین در این نواحی بایستی چال‌های تزریق در راستای بهینه پیشنهاد شده با استفاده از تانسور هدایت هیدرولیکی و به صورت شیب‌دار حفاری شوند.

حالت دوم کارایی چال‌های تزریق در ارتباط با گسل‌ها می‌باشد. در تکیه‌گاه چپ گسل  $F_1$  و در بستر و تکیه‌گاه راست ساختگاه گسل  $F_2$  دارای شیب‌هایی بین ۶۵ تا ۷۵ درجه هستند که تا حدودی کارایی چال‌های تزریق قائم را کاهش می‌دهند. در خصوص تکیه‌گاه چپ و بستر ساختگاه بایستی یا از چال قائم استفاده نمود که راحت‌تر و با هزینه کم‌تر حفاری می‌شود و یا اینکه چال‌های تزریق حدود ۱۰ تا ۲۰ درجه نسبت به حالت قائم و در راستای بهینه چال‌های تزریق پیشنهاد شده با استفاده از تانسور هدایت هیدرولیکی و به صورت زاویه‌دار حفاری شود تا کارایی آن افزایش یابد. در مورد تکیه‌گاه راست نیز حفاری چال‌های تزریق بایستی به صورت شیب‌دار و در راستای پیشنهادی حفاری شود.

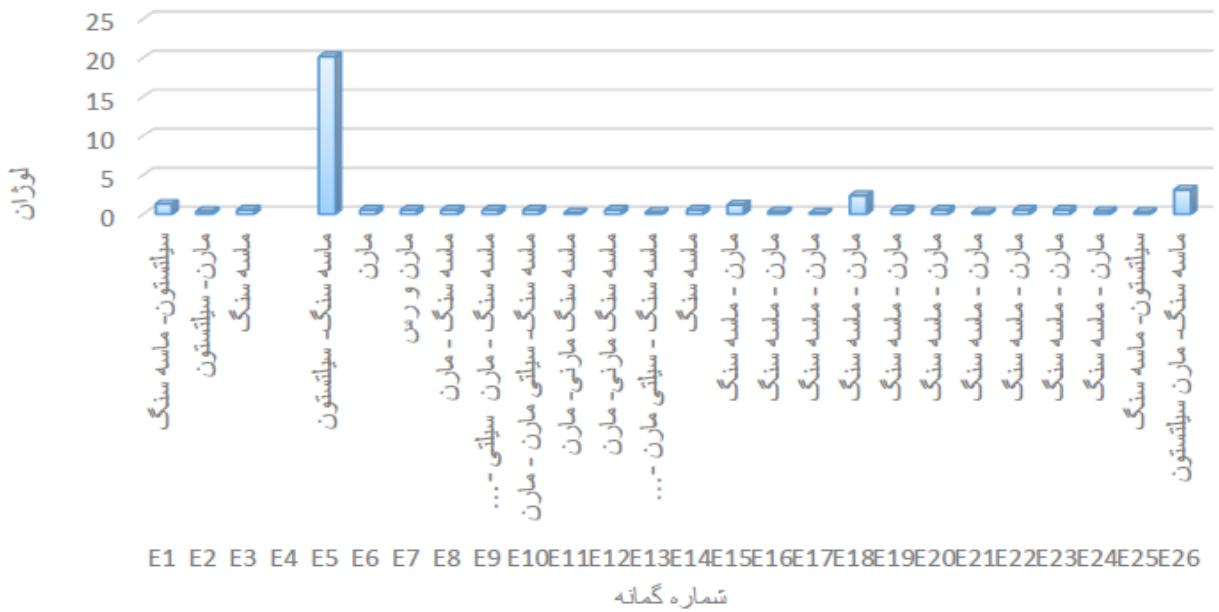




شکل ۱۴- مقادیر لوزان در سنگ‌های مختلف در عمق ۱۰-۵ متری



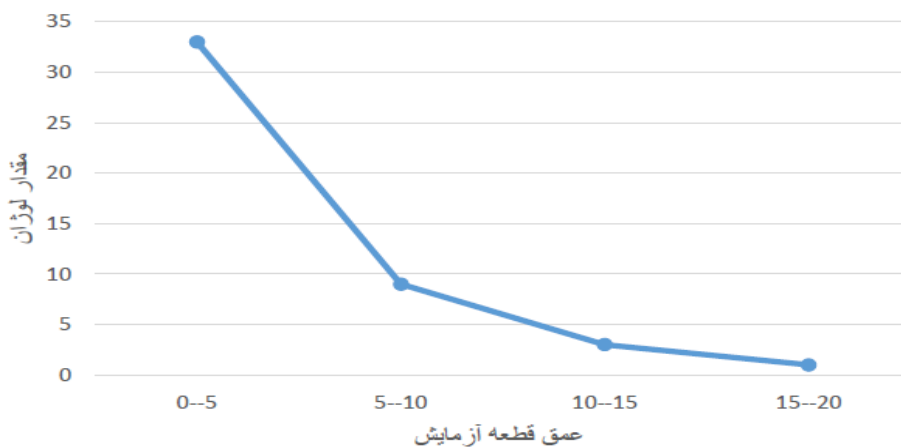
شکل ۱۵- مقادیر لوزان در سنگ‌های مختلف در عمق ۱۵-۱۰ متری



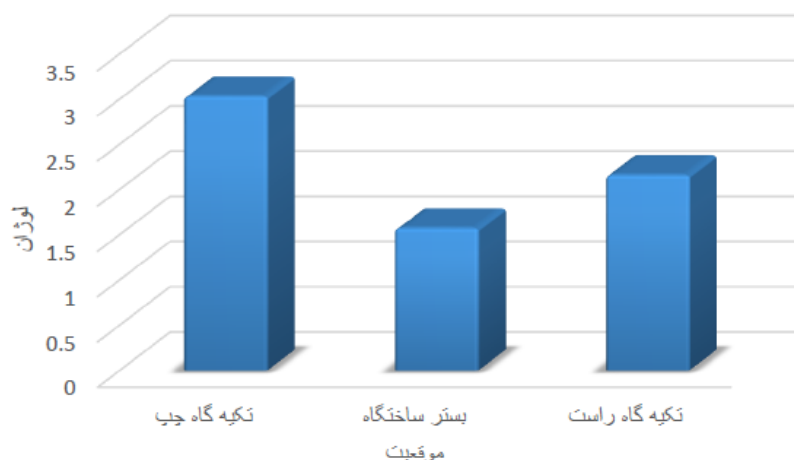
شکل ۱۶- مقادیر لوژان در سنگ‌های مختلف در عمق ۲۰-۱۵ متری

تکیه‌گاه چپ، پی و تکیه‌گاه راست ساختگاه را نشان می‌دهد. تکیه‌گاه چپ دارای بیشترین نفوذپذیری و پی سد دارای کمترین مقدار نفوذپذیری می‌باشد.

با توجه به نمودار شکل ۱۷ نفوذپذیری ساختگاه با توجه به ماهیت انعطاف‌پذیر سازند قرمز بالایی از سطح به عمق کاهش می‌یابد. شکل ۱۸ میانگین هندسی نفوذپذیری را در



شکل ۱۷- کاهش نفوذپذیری ساختگاه با افزایش عمق



شکل ۱۸- مقایسه میانگین هندسی نفوذپذیری تکیه‌گاه چپ، بستر و تکیه‌گاه راست ساختگاه با استفاده از نتایج آزمایش لوژان

جدول ۱۲ میانگین هندسی تانسور هدایت هیدرولیکی، میانگین هندسی هدایت هیدرولیکی آزمایش‌های لوژان و ضریب تصحیح تانسور هدایت هیدرولیکی را در تکیه‌گاه چپ، پی و تکیه‌گاه راست ساختگاه نشان می‌دهد. پس از محاسبه ضریب تصحیح، مقادیر اصلی تانسور هدایت هیدرولیکی با استفاده از نتایج تست لوژان تصحیح می‌شوند که نتایج آن در جدول ۱۳ نشان داده شده است.

هنگامی که طول مقطع آزمایش  $L = 5m$  باشد، رابطه بین  $N$  و  $K$  برقرار است:

$$K = 1.3 \times 10^{-7} N(m/s) \quad (13)$$

برای تعیین هدایت هیدرولیکی با استفاده از آزمایش لوژان از رابطه فوق استفاده می‌شود. همچنین میانگین هندسی به عنوان میانگین هدایت هیدرولیکی توده‌سنگ به کار برده شده است.

جدول ۱۲- هدایت هیدرولیکی تعیین شده با آزمایش لوژان و تعیین ضریب تصحیح  $m$

موقعیت	لوژان	$K_0 \times 10^{-7} (m/s)$	$K (m/s)$	$m = K_0 / K$
تکیه‌گاه چپ	۳	۳/۹	۰/۲۷۰۴	$1/442 \times 10^{-6}$
پی سد (بستر)	۱/۶	۲/۰۸	۱/۱۹۸۹	$1/735 \times 10^{-7}$
تکیه‌گاه راست	۲/۲	۲/۸۶	۰/۰۱۲۷	$2/252 \times 10^{-5}$

جدول ۱۳- مقادیر ویژه تانسور هدایت هیدرولیکی اصلاح شده با استفاده از نتایج آزمایش لوژان

موقعیت	$K_1 (m/s)$	$K_2 (m/s)$	$K_3 (m/s)$
تکیه‌گاه چپ	$10^{-6}$	$1/28 \times 10^{-6}$	$3/577 \times 10^{-8}$
پی سد (بستر)	$10^{-6}$	$2/43 \times 10^{-7}$	$1/229 \times 10^{-7}$
تکیه‌گاه راست	$9/73 \times 10^{-7}$	$9/53 \times 10^{-7}$	$2/47 \times 10^{-8}$

## ۵- نتیجه گیری

- در این مطالعه، به بررسی و تعیین جهت بهینه چال‌های تزریق دوغاب در پرده آب‌بند سد صفارود با استفاده از ترکیب روش تانسور هدایت هیدرولیکی و آزمایش لوژان پرداخته شد. بر این اساس، پس از تعیین خصوصیات هندسی درزه‌ها، تانسور هدایت هیدرولیکی محاسبه و مقادیر ویژه و بردارهای ویژه آن تعیین شد. سپس، با استفاده از بردارهای ویژه، راستا و میل مقادیر اصلی تانسور هدایت هیدرولیکی تعیین و جهت بهینه چال‌های تزریق با استفاده از تانسور هدایت هیدرولیکی مشخص گردید. در ادامه، در نواحی گسله که جهت چال‌های تزریق پیشنهادی کارایی کمتری داشت، جهت بهینه جدید معرفی گردید. همچنین، جهت چال‌های تزریق پیشنهادی و چال‌های تزریق طراحی شده با هم مقایسه گردید. در نهایت، در مورد نتایج آزمایش لوژان بحث و مقادیر ویژه تانسور هدایت هیدرولیکی با استفاده از این نتایج تصحیح گردید. اهم نتایج حاصله به شرح زیر می‌باشند:
  - مقادیر لوژان در محدوده پی و تکیه‌گاه‌ها از سطح به عمق کاهش می‌یابند. در اعماق کم بدلیل تأثیر هوازدگی، گسترش و ارتباط بین درزه‌ها و همچنین به دلیل روباره کم نفوذپذیری بیشتر بوده که با افزایش عمق و برطرف شدن موارد فوق نفوذپذیری کاهش می‌یابد. البته تأثیر نقش ماهیت لیتولوژیکی سازند قرمز بالایی که غالباً نرم و انعطاف‌پذیر است بسیار زیاد است؛ زیرا این ویژگی باعث بسته شدن و عدم گسترش درزه‌ها و ارتباط آن‌ها با یکدیگر شده است.
  - با وجود ماهیت انعطاف‌پذیر و نفوذپذیری پایین سازند قرمز بالایی، وجود گسل‌ها که عمدتاً عمود بر محور سد می‌باشند، می‌تواند مشکل‌ساز شود؛ زیرا پرشدگی آن‌ها از نوع ژئوپیس و رس بوده که ممکن است طی زمان بهره‌برداری ژئوپیس شسته شده و با توجه به نامناسب بودن راستای گسل در صورت عدم توجه می‌تواند باعث بروز مشکلاتی در آینده شود.
  - با توجه به نتایج آزمایش‌های لوژان و تصحیح نتایج تانسور هدایت هیدرولیکی با استفاده از آن، بیشترین و کم‌ترین نفوذپذیری به ترتیب در تکیه‌گاه چپ و بستر ساختگاه مشاهده شد.
- تعیین راستای بهینه گمانه‌های تزریق نقش مهمی در کاهش احتمال نشست از ساختگاه سد را دارد. گمانه‌های تزریق در هر منطقه نباید موازی با راستای  $K_1$  و  $K_2$  حفر شوند. همچنین، حفاری گمانه‌های تزریق موازی با صفحه شامل راستای این دو جهت اصلی نفوذپذیری کارایی پرده آب‌بند را کاهش می‌دهد. راستای بهینه برای کارایی بهتر تزریق، حفر گمانه در راستای  $K_0$  می‌باشد که عمود بر راستای  $K_1$  و  $K_2$  و صفحه  $K_1$   $K_2$  می‌باشد. البته اگر محدوده موردنظر به صورتی باشد که بتوان حفاری را به صورت قائم انجام داد از لحاظ اقتصادی و سهولت کار حالت بهتری است.
- در محدوده بستر و تکیه‌گاه راست احتمال ناکارآمد بودن تزریق در گسل  $F_0$  به ترتیب با شیب و جهت شیب  $65^\circ/245^\circ$  و  $60^\circ/250^\circ$  با توجه به راستای چال‌های تزریق پیشنهاد شده بر اساس تانسور هدایت هیدرولیکی وجود دارد. این احتمال، در محدوده زون گسله چال‌های تزریق با راستای حدوداً موازی با بردار نرمال عمود بر صفحه گسل یعنی راستا و زاویه میل حدود  $70^\circ/30^\circ$  عمود بر صفحه گسل می‌باشند.
- یکی از محدودیت‌ها در حفاری چال‌های تزریق در این مطالعه، زاویه میل محاسبه شده برای چال‌های تزریق پرده آب‌بند می‌باشد. حفاری با زاویه میل کم غیرمنطقی می‌باشد. به همین دلیل بایستی با استفاده از مهندسی ارزش و در نظر گرفتن محدودیت‌های فنی جهت حفاری‌های زاویه‌دار، بهترین زاویه میل از نظر فنی و اقتصادی تعیین شود.
- هم‌افزایی حاصل از تلفیق تانسور هدایت هیدرولیکی با داده‌های آزمایش لوژان، چارچوبی نوآورانه و مبتنی بر فیزیک جریان برای طراحی بهینه چال‌های تزریقی و پرده آب‌بند فراهم می‌آورد. در حالی که آزمایش لوژان صرفاً برآوردی مقیاس‌محدود و نقطه‌ای از نفوذپذیری ارائه می‌دهد، به‌کارگیری تانسور هدایت هیدرولیکی امکان بازنمایی ناهمسانگردی، جهت‌داری و پیوستگی مسیرهای

عمق و جهت‌گیری چال‌های تزریقی به صورت هدفمند و مبتنی بر مسیرهای غالب جریان آب تعیین می‌شوند. این راهبرد ضمن افزایش اثربخشی هیدرولیکی پرده آب‌بند، به کاهش تزریق‌های مازاد، بهینه‌سازی مصرف مصالح و انرژی و ارتقای پایداری فنی-اقتصادی پروژه‌های سدسازی و زیرساختی منجر می‌شود.

جریان در توده‌سنگ‌های درزه‌دار را میسر می‌سازد. ادغام این دو رویکرد موجب ارتقای تفسیر داده‌های لوژان از یک شاخص تجربی به یک توصیف جهت‌مند از رفتار هیدرولیکی توده‌سنگ شده و عدم قطعیت‌های ذاتی طراحی پرده آب‌بند را به‌طور معناداری کاهش می‌دهد. در نتیجه، پارامترهای کلیدی طراحی شامل آرایش فضایی، فاصله‌گذاری،

## منبع‌ها

- [1] Singh, B., & Goel, R. K. (2011). *Engineering rock mass classification*. Elsevier Inc, Boston: Butterworth-Heinemann.
- [2] Ghorbani, S., Bour, K., & Javdan, R. (2024). Evaluating the efficiency of pre-grouting in fault zones of tunnel and its effect on rock mass quality: A case study. *Geotechnical and Geological Engineering*, 42(7), 6641-6654. DOI:[10.1007/s10706-023-02557-8](https://doi.org/10.1007/s10706-023-02557-8)
- [3] Ghorbani, S., Bour, K., & Javdan, R. (2024). Investigating the sealing efficiency of grouting in joints: insights from effects of the rheological properties of grout and joint characteristics. *Geomechanics and Geoengineering*, 19(6), 1021-1037. DOI:[10.1080/17486025.2024.2340117](https://doi.org/10.1080/17486025.2024.2340117)
- [4] Ghorbani, S., Bour, K., Javdan, R., & Bour, M. (2023). Design of effective grouting pattern in Kerman water conveyance tunnel using DFN-DEM and analytical approaches. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 9(2), 19. DOI:[10.1007/s40891-023-00441-2](https://doi.org/10.1007/s40891-023-00441-2)
- [5] Rahimpour, M., Rabeti Moghadam, M., Parvizi, M., Sedghi Asl, M., & Fazeli, J. (2022). Evaluation of Grout Curtain Performance in Seepage Control from Rock Formations by 3D Analysis (A Case Study of Haigher RCC Dam). *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(8), 3119-3138. DOI:[10.22060/ceej.2022.20508.7446](https://doi.org/10.22060/ceej.2022.20508.7446)
- [6] Chen, Y. F., Zeng, J., Shi, H., Wang, Y., Hu, R., Yang, Z., & Zhou, C. B. (2021). Variation in hydraulic conductivity of fractured rocks at a dam foundation during operation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(2), 351-367. DOI:[10.1016/j.jrmge.2020.09.008](https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.09.008)
- [7] Hosseini, M., & Sazandeh, S. (2017). A numerical modeling study for determining the optimal depth of grout curtain in foundation and abutments of Karun 4 dam. *Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 6, 41-53.
- [8] Shi, P., Pan, J., Chen, L., & Zhang, J. (2016). Rock mass grouting in major weakness zones during subsea tunneling. In *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium* (pp. ARMA-2016). ARMA.
- [9] Bahadori, M., Beiranvand, P., & Bakhshandeh Amnieh, H. (2021). Optimization of Sardasht Dam Sealing System Using UDEC Software. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 11(26), 23-34. DOI:[10.22034/anm.2021.1827](https://doi.org/10.22034/anm.2021.1827)
- [10] Mortazavi, A., & Maadikhah, A. (2016). An investigation of the effects of important grouting and rock parameters on the grouting process. *Geomechanics and Geoengineering*, 11(3), 219-235. DOI:[10.1080/17486025.2016.1145255](https://doi.org/10.1080/17486025.2016.1145255)

- [11] Saecidi, O., Stille, H., & Torabi, S. R. (2013). Numerical and analytical analyses of the effects of different joint and grout properties on the rock mass groutability. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 38, 11-25. DOI:[10.1016/j.tust.2013.05.005](https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.05.005)
- [12] Baghbanan, A., Dararbi, M., Momeni, A., Rahmani Shahraki, A., & Azhari, A. (2025). Three-Dimensional Analysis of Seepage in Fractured Rock Masses and Evaluation of the Accuracy of Empirical Methods for Predicting Permeability in Cutoff Walls: A Case Study of Chamshir Dam. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 15(43), 21-30. DOI:[10.22034/ANM.2025.22475.1654](https://doi.org/10.22034/ANM.2025.22475.1654)
- [13] Liou, T. S., Lin, J. J., Chen, P. K., Yeh, E. C., Jeng, F. S., & Wang, T. T. (2025). Determining representative elementary volume for hydraulic conductivity of fractured rock masses: Comparative analytical and numerical studies. *Engineering Geology*, 348, 107966. DOI:[10.1016/j.enggeo.2025.107966](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2025.107966)
- [14] Chengcheng, Z., Dongqing, W., Hao, D., Jinming, Z., & Qi, C. (2025). Accurate Estimation of Fractured Rock Mass Permeability Using Borehole Imaging and Water Pressure Testing. *Geotechnical and Geological Engineering*, 43(5), 208. DOI:[10.1007/s10706-025-03160-9](https://doi.org/10.1007/s10706-025-03160-9)
- [15] Huang, D., Jin, Q., & Wu, Z. (2025). Grouting optimization for tunnel water-inrush disaster mitigation in jointed rock masses using discrete fracture network modeling. *Geohazard Mechanics*, 3(4), 261-271. DOI:[10.1016/j.ghm.2025.11.001](https://doi.org/10.1016/j.ghm.2025.11.001)
- [16] Wang, L., Long, Y., Chen, G., Mei, Q., Luo, F., Gong, H., & Ma, L. (2025). Calculation Method of Permeability Tensor Based on the Size Effect and Anisotropy of Rock Fracture Surface Roughness. *Advances in Civil Engineering*, 2025(1), 5581786. DOI:[10.1155/adce/5581786](https://doi.org/10.1155/adce/5581786)
- [17] lashkaripour, G., Aghamolae, I., ghafoori, M. (2014). An investigation on engineering properties of marl rocks of Safa dam foundation. *Journal of Engineering Geology*, 7(2), 1743-1762.
- [18] Zhao, H., Ma, F., Li, G., Zhang, Y., & Guo, J. (2012). Study of the hydrogeological characteristics and permeability of the Xinli seabed gold mine in Laizhou Bay, Jiaodong Peninsula, China. *Environmental Earth Sciences*, 65(7), 2003-2014. DOI:[10.1007/s12665-011-1181-y](https://doi.org/10.1007/s12665-011-1181-y)
- [19] Min, K. B., Rutqvist, J., Tsang, C. F., & Jing, L. (2004). A block-scale stress-permeability relationship of a fractured rock determined by numerical experiments. In *Elsevier Geo-Engineering Book Series*, Vol. 2, 269-274. Elsevier.
- [20] Yin, L., Yang, C., & Wang, G. (2014). Seepage Analysis of Fractured Rock-mass Based on In-situ Joint Investigation. *Physical and Numerical Simulation of Geotechnical Engineering*, (15), 3.
- [21] Lin, L., & Xu, Y. (2006). A tensor approach to the estimation of hydraulic conductivities in Table Mountain Group aquifers of South Africa. *Water SA*, 32(3), 371-378. DOI:[10.4314/wsa.v32i3.5262](https://doi.org/10.4314/wsa.v32i3.5262)
- [22] Barton, N., & Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock mechanics*, 10(1), 1-54.
- [23] Li, P., Lu, W., Long, Y., Yang, Z., & Li, J. (2008). Seepage analysis in a fractured rock mass: The upper reservoir of Pushihe pumped-storage power station in China. *Engineering Geology*, 97(1-2), 53-62. DOI:[10.1016/j.enggeo.2007.12.005](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.12.005)
- [24] Priest, S. D. (1993). *Discontinuity analysis for rock engineering*. Springer Science & Business Media.

[25] Zimmerman, R. W., & Bodvarsson, G. S. (1996). Hydraulic conductivity of rock fractures. *Transport in porous media*, 23(1), 1-30. DOI:[10.1007/BF00145263](https://doi.org/10.1007/BF00145263)



## Determining the Optimal Direction of Grout Injection Holes in the Cut Off Curtain of Safarood Dam Using Combination of Hydraulic Conductivity Tensor and Lugeon Test

Farhad Samimi Namin<sup>1</sup>; Sasan Ghorbani<sup>2</sup>; Meysam Shamsi Gooshki<sup>3</sup>

1- Associate Professor, Department of Mining Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran.

3- Master of Science in Rock Mechanics, Department of Mining Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

Received: 31 July 2025; Accepted: 21 September 2025

(\*Corresponding author: f.samiminamin@znu.ac.ir)

### Keywords

Hydraulic conductivity tensor  
Permeability  
Grouting boreholes  
Lugeon test  
Optimal orientation of grouting boreholes

### Final English Extended Abstract

#### Summary

Cracks are known as the main water passes in rock masses. Determination of the leakage path within the cracks and the quantity of hydraulic conductivity is essential for controlling the water escape path, economic issues and stability of dams. After determining the water escape paths, direction of injection boreholes will be specified. Hydraulic conductivity tensor method can provide a relatively reasonable orientation of the main pathways of water flow through discontinuities, but one of the most important parameters -the aperture of the joints- cannot be easily determined. Hence, according to the cube law this method cannot be used independently. On the other hand, the most common

method to determine the hydraulic conductivity factor of jointed rocks is Lugeon test. This test directly determines the permeability of the rock around the boreholes, but cannot determine the orientation of leakage tensor. Therefore, the in-situ hydraulic experiments and hydraulic conductivity tensor methods should be combined to correct the leakage tensor in broken rocks.

#### Introduction

Grouting is the process of injecting a cementitious slurry or other suitable materials under pressure into a rock mass through boreholes in order to treat joints and fractures. The primary objectives of grouting in geotechnical projects are to strengthen the ground or rock mass and to reduce water permeability within the rock mass. Constructing a grout curtain for a dam site without a comprehensive grouting design may lead to inadequate seepage control and ground improvement, increased costs, and delays in project completion. To avoid these shortcomings, implementing grouting operations based on a well-defined and comprehensive grouting plan can result in optimized grouting performance.

#### Methodology and Approaches

the main directions of water leakage in rock and implementation of versus ruling leakage joints is determined in the DIPS software and the optimized direction of the injection boreholes in the rock mass is studied. Then the capability of injection holes' direction in fault zones has been studied and, in the zones, where the decreasing of capability was observed, the direction of the optimal hole was determined. The principal values of hydraulic conductivity tensor were corrected using Lugeon test results as well.

#### Results and Conclusions

Based on the results of the Lugeon tests and the correction of the hydraulic conductivity tensor, the maximum and minimum permeabilities were observed in the left abutment and in the foundation bed of the site, respectively. In addition, the optimal orientation for more effective grouting is drilling boreholes along the ( $K_0$ ) direction, which is perpendicular to the  $K_1$  and  $K_2$  directions and to the  $K_1$ - $K_2$  plane.