

(پژوهشی)

## استفاده از مدل‌سازی عددی المان مجزا برای بهینه‌سازی سیستم آب‌بندی پی و تکیه‌گاه‌های سد سردشت

معین بهادری\*<sup>۱</sup>، پریسا بیرانوند<sup>۲</sup>، حسن بخشنده امینه<sup>۳</sup>

- ۱- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، مجتمع آموزش عالی گناباد
- ۲- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، مجتمع آموزش عالی گناباد
- ۳- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران  
(دریافت: آذر ۱۳۹۸، پذیرش: تیر ۱۳۹۹)

### چکیده

احداث پرده آب‌بند یکی از روش‌های متداول کنترل تراوش از زیر پی سدها است. به منظور ایجاد پرده آب‌بند، تعدادی چال حفر شده و در این چال‌ها عملیات تزریق صورت می‌گیرد. در عملیات تزریق درزه‌های موجود در توده‌سنگ با استفاده از دوغاب مناسب پر می‌شود. از آنجا که نفوذپذیری ماده‌سنگ بسیار کم و قابل صرف‌نظر کردن است، عمق نفوذ دوغاب به پارامترهای متعددی از جمله خصوصیات دوغاب، فشار تزریق و مشخصات ناپیوستگی‌ها بستگی دارد. استفاده از روش‌های عددی برای تعیین آرایش بهینه گمانه‌های تزریق باعث صرفه‌جویی در هزینه‌ها و کاهش زمان تزریق می‌شود. در این مقاله با توجه به خصوصیات توده‌سنگ در محدوده احداث سد سردشت با استفاده از نرم‌افزار المان مجزای UDEC آرایش بهینه سیستم آب‌بندی پی سد بررسی شده‌است. براساس نتایج این تحقیق عمق بهینه پرده ۴۰ متر، فاصله‌داری چال‌های تزریق در پی و تکیه‌گاه‌ها به ترتیب ۳ متر و ۵ متر، پیشنهاد می‌شود. همچنین زاویه انحراف بهینه چال‌ها ۱۷ درجه برآورد شده‌است. مقایسه نتایج بدست آمده از مدل‌سازی عددی با مقادیر اندازه‌گیری شده نشان‌دهنده قابلیت بالای روش عددی در برآورد فشار تزریق و تحلیل نشت از پی سد سردشت است.

### کلمات کلیدی

سیستم آب‌بندی، بهینه‌سازی تزریق، UDEC، سد سردشت

\*عهده‌دار مکاتبات: moein.bahadori@gmail.com

## ۱- مقدمه

هاسلر و اریکسون و همکاران از یک مدل‌سازی عددی یک بعدی از شبکه لوله‌ای در بررسی جریان دوغاب درون شبکه ناپیوستگی‌ها استفاده کرده‌اند [۶, ۷]. یانگ و همکاران با استفاده از یک منطق تصادفی، چگونگی نفوذ سیال بینگهام در توده سنگ درزه‌دار را شبیه‌سازی کرده‌اند [۸]. فیدلیوس و لنتی با استفاده از مدل‌سازی‌های عددی تأثیر برخی فاکتورهای مهم در کنترل تزریق دوغاب را بررسی کرده‌اند [۹]. چن و همکاران انتشار رگه‌های دوغابی در توده سنگ ناشی از فشار تزریق دوغاب را تحلیل کرده‌اند [۱۰]. البته مهم‌ترین نارسائی‌های این بررسی‌ها عدم منظور کردن رفتار هیدرولیکی - مکانیکی بین دوغاب و توده سنگ [۶-۸] و همچنین عدم در نظر گرفتن تغییرات بازشدگی دهانه درزه در اثر تنش تزریق دوغاب [۹, ۱۱] هستند. در برخی موارد سیر تکاملی (تلفیق ناپیوستگی‌های ذاتی با شکستگی‌های جدید) شبکه ناپیوستگی‌ها [۷, ۱۲, ۱۳] و یا سخت شدگی دوغاب در حین تزریق نادیده گرفته شده‌است [۸, ۱۴].

در سال‌های اخیر بر پایه منطق المان محدود مدل‌سازی‌های عددی متنوعی از رفتار ترکیبی هیدرولیکی - مکانیکی توده سنگ انجام شده‌است. اگر چه منطق المان محدود در محاسبه تلاقی ناپیوستگی‌ها محدودیت‌هایی دارد [۱۵]. بر این اساس روش‌های المان‌بندی مجدد پیشرفته<sup>۲</sup> ارائه و در مدل‌سازی عددی تزریق دوغاب استفاده شدند که البته به نوبه خود با برخی محدودیت‌ها همراه بوده است [۱۶-۱۹]. به منظور مرتفع ساختن محدودیت‌های روش المان‌بندی مجدد، استفاده از روش‌های المان محدود توسعه یافته (XFEM<sup>۳</sup>) [۲۰, ۲۱] و المان محدود تعمیم‌یافته (GFEM<sup>۴</sup>) [۲۲, ۲۳] پیشنهاد شده که همچنان در مدل‌سازی شبکه ناپیوستگی‌های پیچیده محدودیت‌های خاص خود را دارند [۲۴, ۲۵]. در مقابل روش المان مرزی برای مدل‌سازی رفتار ترکیبی هیدرولیکی - مکانیکی جذابیت بیشتری داشته است [۲۶-۲۹]. هرچند برخی ناهمگونی‌ها در مدل‌سازی تغییر مسیر ترک در حین انتشار (مانند ترکیب یا انشعاب ترک) در این روش وجود دارد [۳۰]. همچنین استفاده از روش‌های جابجایی گسسته (DDM<sup>۵</sup>) در توسعه ترک‌ها و قابلیت هدایت هیدرولیکی آن مورد توجه برخی محققان قرار گرفته‌است [۳۱, ۳۲]. از بین روش‌های مدل‌سازی عددی، روش المان مجزا با توجه به قابلیت ذاتی در مدل‌سازی تلاقی ناپیوستگی‌ها و ایجاد

تزریق فرآیندی است که به واسطه آن دوغاب سیمانی از طریق یک گمانه با فشار به داخل تشکیلات سنگی (خاکی) نفوذ کرده و در اثر آن نفوذپذیری و تغییر شکل‌پذیری توده سنگ کاهش یافته و مقاومت آن افزایش پیدا می‌کند. نفوذپذیری سنگ بکر در مقایسه با ناپیوستگی‌های موجود بسیار کم بوده و نفوذپذیری توده سنگ غالباً تابع سیستم‌های ناپیوستگی است. در مهندسی سنگ و زمین شناسی، از رفتار رئولوژیکی بینگهام در مدل‌سازی جریان دوغاب‌های سیمانی استفاده می‌شود [۱]. تفاوت اصلی این مدل با یک سیال نیوتنی این است که در یک سیال بینگهام، سطح تنش باید از مقاومت برشی اولیه تجاوز کند تا جریان سیال آغاز شود. الگوی طراحی شبکه گمانه‌های تزریق بسته به هدف تزریق متفاوت است، اما معیار فاصله‌داری نهایی گمانه‌ها مستقل از آن است و به نفوذپذیری اولیه تشکیلات زمین شناسی، سیستم ناپیوستگی‌ها، ترکیب ماده تزریق، فشار تزریق و معیار اشباع‌شدگی بستگی دارد [۲]. نظر به رفتار متفاوت و غیرقابل پیش‌بینی توده‌های سنگی، قانون ثابت و مشخصی برای تعیین فاصله چال‌های تزریق وجود ندارد و عموماً هنگام تصمیم‌گیری در مورد فاصله گمانه‌ها، به تجربه و قضاوت مهندسی طراح تکیه می‌شود. نتایج بررسی‌های ليو و سان نشان داد که مهم‌ترین عوامل پیچیدگی تزریق دوغاب در توده سنگ به عنوان یک فرآیند هیدرولیکی - مکانیکی ناشی از سه عامل اصلی تغییر شکل مکانیکی توده سنگ در طول فرآیند تزریق، نفوذ دوغاب درون درز و شکاف‌ها و توسعه شکستگی‌های ناشی از تنش تزریق، است. مسیر نفوذ دوغاب در توده سنگ محدود به ناپیوستگی‌های ذاتی نبوده بلکه ترکیب این ناپیوستگی‌ها با شکستگی‌های هیدرولیکی در طول فرآیند تزریق، شبکه ناپیوستگی‌ها را تشکیل می‌دهند [۳-۵]. روش‌های تجربی تعیین عمق نفوذ دوغاب، محدود به شرایط آزمایش بوده و راهکارهای تئوری بیشتر براساس تئوری محیط پیوسته هستند اما روش‌های عددی می‌توانند ابزاری مناسب برای مدل کردن جریان واقعی سیال در توده سنگ‌هایی با شکستگی‌های پیچیده باشند. بر این اساس همواره استفاده از روش‌های تحلیل عددی در پیش‌بینی نتایج تزریق در توده سنگ مورد توجه محققین مختلف قرار گرفته‌است.

خاکریزی بدنه سد حدود ۳ میلیون متر مکعب و حجم هسته رسی ۵۱۶ هزار مترمکعب برآورد شده‌است. سیستم انحراف آب شامل دو رشته تونل با قطر داخلی ۷ متر و طول‌های ۶۲۷ متر و ۶۸۲ متر در تکیه‌گاه راست و ارتفاع فرازبند آن ۴۶ متر است. تونل سمت راست در دوره بهره‌برداری به عنوان تخلیه‌کننده تحتانی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴۱]. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به سد سردشت نشان داده شده‌است.

ساختگاه سد و سازه‌های مربوطه در پهنه گسترده‌ای از ردیف رسوب کرتاسه قرار گرفته که دگرگونی ضعیفی را نیز پشت سر گذاشته است. ضخامت این نهشته‌ها که در یک محیط رسوبی در حال فرونشست برجای مانده‌اند تا بیش از ۱۵۰۰ متر برآورد شده‌است. سن این واحدها بر پایه سنگواره‌های موجود در رگه‌های آهکی درون فیلیت‌ها آپسین - آلبین (کرتاسه زیرین) تعیین شده‌است. گستره طرح بخشی از نوار اسلیتی - فیلیتی است که با روند شمال غربی - جنوب شرقی و پهنای میانگین ۲۰ کیلومتر قرار گرفته است. این نوار با همین روند و طول بیش از ۶۰ کیلومتر گسترده شده‌است. در مقیاس وسیع‌تر نوار دگرگونی یادشده بخشی از نوار عریضی است که در پهنه‌بندی نوارهای دگرگونی ایران تحت نام نوار دگرگونی مهاباد - گلپایگان موسوم است. ناحیه مورد بررسی شامل مجموعه‌ای به هم ریخته متشکل از طبقات آهکی و سنگ‌های اولترابازیک است که آثار این سنگ‌ها در دره رودخانه کلاس به‌ویژه پایین دست تونل بلند در دو طرف دره قابل مشاهده است. در شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی عمومی گستره طرح سد سردشت، برگرفته از نقشه چهارگوش آلوت ارائه شده‌است [۴۱].

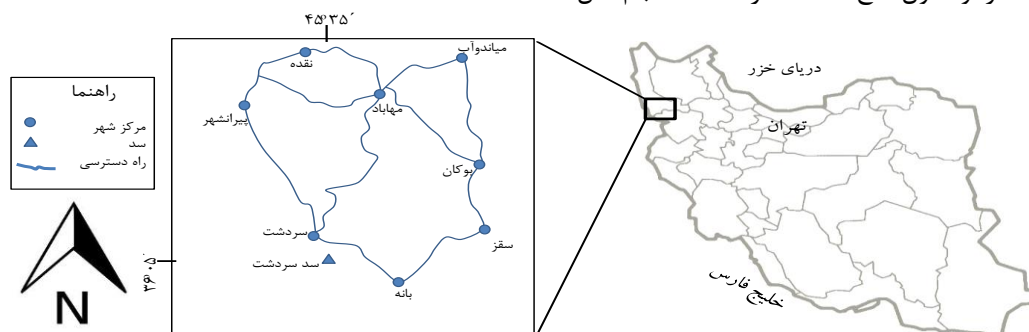
شبکه شکستگی‌ها، قابلیت بالایی در شبیه‌سازی رفتار ترکیبی هیدرولیکی - مکانیکی توده‌سنگ و دوغاب دارد [۳۰، ۳۳-۳۵]. اما رشد ترک‌ها را نمی‌توان به‌صورت مستقیم در محیط المان مجزا مدل‌سازی نمود. مونجیزا روشی ترکیبی از منطق المان مجزا و المان محدود به نام (FEM-DEM<sup>۲</sup>) ارائه کرده که به طور همزمان می‌تواند تغییر شکل بلوک‌های الاستیک در کنار مرزهای ناپیوسته را مدل‌سازی نماید [۳۶]. این روش برای مدل‌سازی رفتار ترکیبی هیدرولیکی - مکانیکی توده‌سنگ و دوغاب توسعه داده شده‌است [۳۷-۴۰]. البته مورد آخر هم تنها قابلیت مدل‌سازی شرایط ترکیبی هیدرولیکی مکانیکی برای سیالی با رفتار ویسکوز خطی را دارد. به علت خواص متغیر و وابسته به زمان دوغاب، طیف وسیعی از رفتارها را می‌توان برای آن متصور بود. به همین دلیل در اغلب بررسی‌هایی که از منطق FDEM استفاده می‌کنند، شرایط مدل‌سازی پیچیده‌ای برای دوغاب وارد نشده‌است [۱۵].

در این مقاله با استفاده از مدل‌سازی عددی در نرم افزار المان مجزای UDEC قابلیت تزریق در پی و تکیه‌گاه‌های سد سردشت مدل‌سازی شده و نتایج آن با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه گردیده‌است. مهم‌ترین نوآوری مقاله حاضر را می‌توان در برآورد قطر و فاصله‌داری بهینه چال‌های تزریق در پی و تکیه‌گاه‌های سد، تعیین مقدار فشار بهینه تزریق و مقایسه آن با روابط تجربی موجود و تعیین زاویه و عمق بهینه احداث پرده آب‌بند در سنگ بستر دانست.

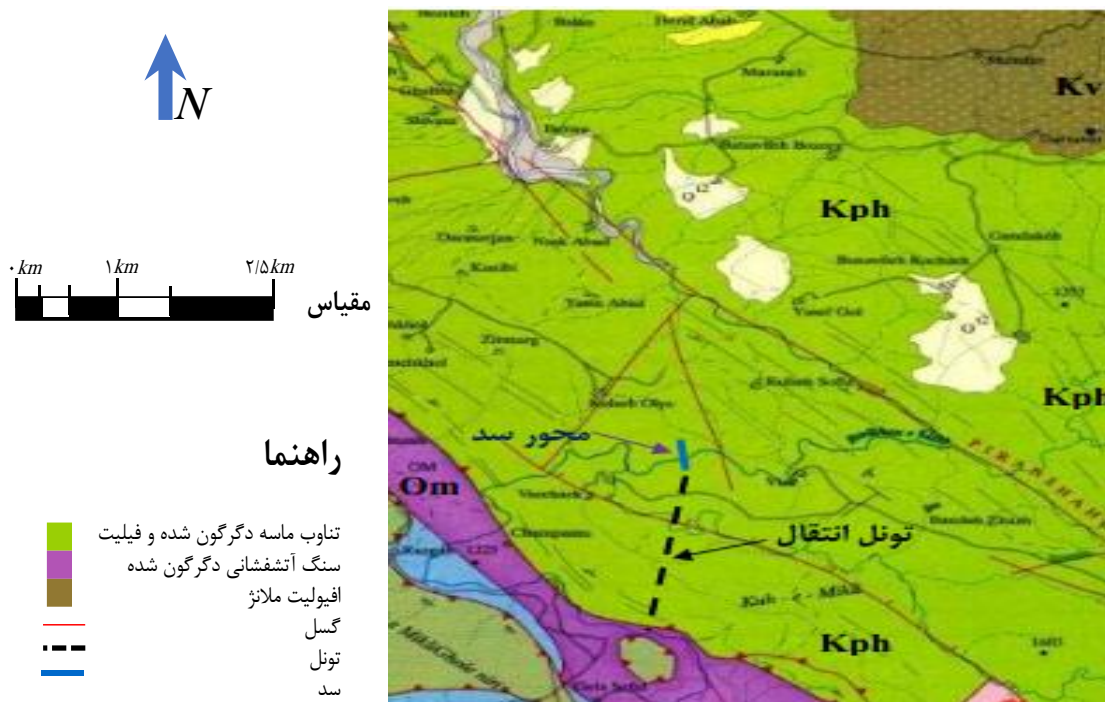
## ۲- موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی ساختگاه سد

### سردشت

سد سردشت از نوع سنگریزه‌ای با هسته رسی با ارتفاع حدود ۱۰۶ متر و طول تاج ۲۸۰ متر است. حجم کل



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به سد سردشت



شکل ۲: نقشه زمین‌شناسی محدوده طرح سردشت و موقعیت سد و سامانه انتقال در آن [۴۱]

دوام، مقاومت فشاری تک محوره (شامل  $\sigma_c$ ، مدول الاستیک  $E$  و نسبت پواسون  $\nu$ )، مقاومت فشاری سه محوره، مقاومت کششی و سرعت انتشار امواج طولی و عرضی بوده‌است. در جدول ۱ میانگین مقادیر ثبت شده برای پارامترهای مذکور ارائه گردیده است.

### ۳-۱- مشخصات ناپیوستگی‌ها در ساختگاه سد

به منظور شناسایی دسته درزه‌های سیستماتیک ساختگاه سد سردشت، بررسی‌های درزه‌نگاری در هر دو تکیه‌گاه به عمل آمده‌است. براساس نتایج این بررسی‌ها در تکیه‌گاه راست دو دسته درزه مشاهده شده‌است. یک دسته درزه موازی اما با شیب کمتر از سیستم کلیواژ و دسته درزه دیگر به حالت متقاطع نسبت به کلیواژ در توده سنگ شکل گرفته‌است. در تکیه‌گاه چپ در چندین ایستگاه تنها ۱ دسته درزه که همراستای سیستم کلیواژ است، مشاهده شده‌است. در جدول ۲ ویژگی‌های هندسی سیستم‌های ناپیوستگی در تکیه‌گاه‌های چپ و راست ساختگاه سد ارائه شده‌است [۴۱].

### ۳- خصوصیات ژئومکانیکی توده‌سنگ محل احداث سد سردشت

از آنجا که خواص فیزیکی و مکانیکی توده‌سنگ نقش مهمی در تعیین میزان تراوایی و قابلیت هدایت هیدرولیکی جریان‌های زیرزمینی دارند، تعیین آن‌ها در تحلیل‌های میدانی و عددی حائز اهمیت است. براساس مشاهدات میدانی توده سنگ‌های تشکیل دهنده ساختگاه اعم از پی و سازه‌های وابسته غالباً از اسلیت با میان لایه ماسه‌سنگ دگرگون شده بوده که به ندرت توده ماسه‌سنگی با گستردگی بسیار کم وجود داشته که نمی‌توان آن را به عنوان توده‌سنگ مؤثر در طراحی‌ها در نظر گرفت. بر این اساس مطالعات مکانیک‌سنگی با تمرکز بر توده‌سنگ دگرگونی صورت گرفته است. شایان ذکر است که تمامی آزمایش‌ها مطابق با روش‌های پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM<sup>۷</sup>) و استاندارد آمریکایی برای مصالح و آزمایش‌ها (ASTM<sup>۸</sup>) انجام شده‌است [۴۱].

مهم‌ترین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی اندازه‌گیری شده در توده‌سنگ دگرگونی محل اجرای سد سردشت شامل شاخص کیفی توده‌سنگ (RQD)، وزن مخصوص (برای حالت‌های خشک و اشباع به ترتیب برابر، تخلخل،

جدول ۱: میانگین خصوصیات ژئومکانیکی اندازه گیری شده در محل احداث سد سردشت [۴۱]

ردیف	پارامتر	نماد	واحد	موقعیت	مقدار
۱			درصد	تکیه گاه چپ	۲۹
۲	شاخص کیفی توده سنگ	$RQD$	درصد	تکیه گاه راست	۳۳
۳			درصد	سنگ بستر	۶۵
۴	چگالی خشک	$\rho_d$	$kg/m^3$	تکیه گاه ها و بستر	۲۷۹۰
۵	چگالی اشباع	$\rho_s$	$kg/m^3$	تکیه گاه ها و بستر	۲۸۰۰
۶	تخلخل	$n$	درصد	تکیه گاه ها و بستر	۰/۶
۷	دوام	$D$	درصد	تکیه گاه ها و بستر	۹۹/۲
۸	نسبت پواسون	$\nu$	-	تکیه گاه ها و بستر	۰/۳
۹	مدول الاستیک	$E$	$GPa$	تکیه گاه ها و بستر	۶/۳
۱۰	مقاومت فشاری تک محوری	$\sigma_c$	$MPa$	تکیه گاه ها و بستر	۱۸/۷
۱۱	مقاومت کششی	$\sigma_t$	$MPa$	تکیه گاه ها و بستر	۴/۱
۱۲	چسبندگی (ماده سنگ)	$C_r$	$MPa$	تکیه گاه ها و بستر	۲/۲
۱۳	چسبندگی (ناپیوستگی ها)	$C_j$	$MPa$	تکیه گاه ها و بستر	۰/۰۸
۱۴	زاویه اصطکاک (ماده سنگ)	$\phi$	$^\circ$	تکیه گاه ها و بستر	۵۰
۱۵	زاویه اصطکاک (ناپیوستگی ها)	$\phi$	$^\circ$	تکیه گاه ها و بستر	۳۲
۱۶	سرعت انتشار امواج طولی	$V_p$	$m/s$	تکیه گاه ها و بستر	۴۴۰۰
۱۷	سرعت انتشار امواج عرضی	$V_s$	$m/s$	تکیه گاه ها و بستر	۲۵۰۰

جدول ۲: ویژگی سیستم های ناپیوستگی در تکیه گاه چپ و راست ساختگاه سد سردشت [۴۱]

موقعیت	درزه	جهت شیب	مقدار شیب
تکیه گاه راست	J1	۲۰	۳۸
	J2	۳۰۶	۱۸
تکیه گاه چپ	J1	۴۲/۵	۷۲

قبول، در مدل سازی عددی رفتار بلوک های سنگی از معیار الاستوپلاستیک موهر - کلمب استفاده شد. برای استفاده از این معیار رفتاری باید مقادیر پارامترهای چگالی، مدول حجمی (بالک)، مدول برشی، زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی، زاویه اتساع و مقاومت کششی توده سنگ را وارد نمود. در نرم افزارهای تحلیل محیط پیوسته، با توجه به تأثیر متقابل خواص ناپیوستگی ها و بلوک ها باید مواد و معیار رفتاری به گونه ای انتخاب شوند که محیط پیوسته ی مدل سازی شده بیانگر خواص ترکیبی این دو گروه باشد. در حالی که در نرم افزار المان مجزای UDEC این خصوصیات بطور مجزا وارد شده و اثر آن ها در پاسخ سیستم تحلیل می شود. به عبارت دیگر در محیط المان مجزا بر خلاف محیط های پیوسته نیازی به معادل سازی در خصوصیات مواد نیست. در جدول ۳ خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ماده سنگ و توده خاکی مورد استفاده در مدل سازی عددی ارائه شده است.

#### ۴- تحلیل عددی

به منظور تعیین وضعیت بهینه پرده آب بند در تکیه گاه ها و پی سد سردشت از نرم افزار المان مجزای UDEC استفاده شده است. این نرم افزار قابلیت بالایی در تحلیل مکانیکی و برآورد نشت سیالات در محیط های ناپیوسته را دارد. با توجه به تغییرات گسترده خواص ژئومکانیکی مواد تشکیل دهنده زمین و عدم قطعیت موجود در داده های ثبت شده میدانی، انتخاب معیار رفتاری و خصوصیات موادی که بتواند شرایط واقعی موجود در منطقه را مدل سازی کند حائز اهمیت است.

#### ۴-۱- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی و معیارهای

##### رفتاری

در نرم افزار عددی UDEC معیارهای رفتاری مختلفی وجود دارد که با توجه به کاربرد گسترده و صحت قابل

جدول ۳: خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ماده سنگ و توده خاکی مورد استفاده در تحلیل عددی

پارامتر	واحد	نماد	پوسته	هسته	ماده سنگ
چگالی	$kg/m^3$	$\rho$	۲۵۰۰	۱۷۰۰	۲۸۰۰
مدول برشی	$GPa$	$G$	۰/۰۳	۰/۰۳۷۵	۲/۴۲
مدول بالک	$GPa$	$B$	۰/۰۱	۰/۰۹۸	۵/۲۵
مدول الاستیک	$GPa$	$E$	۰/۰۵	۶	۶/۳
نسبت پواسون	-	$\nu$	۰/۳	۰/۳۳	۰/۳

گرفته شود. جدول ۴ مدل‌های رفتاری مناسب برای انواع دوغاب‌های سیمانی با نسبت W/C متفاوت را نشان می‌دهد.

جدول ۴: نوع مدل رفتاری دوغاب بر حسب نسبت W/C [۴۳]

معیار رفتاری	نسبت آب به سیمان
سیال نیوتنی	$W/C > ۲/۵$
سیال بینگهام	$۲/۵ > W/C > ۰/۷۵$
سیال شبه پلاستیک	$W/C < ۰/۷۵$

نظر به اینکه عملیات تزریق دوغاب در ساختگاه سردشت با نسبت وزنی W/C ۲:۱ آغاز و تا نسبت ۰/۸ ادامه می‌یابد، از خصوصیات سیال بینگهام برای مدل‌سازی عددی استفاده شده است.

#### ۴-۳- تحلیل عددی تزریق و تعیین فاصله‌داری بهینه گمانه‌ها

پس از ارائه اطلاعات ژئومکانیکی توده سنگ و دوغاب، باید در مدل‌سازی عددی، هندسه و ابعاد مدل و شرایط مرزی تعیین گردند. لازم به ذکر است که هرچند ظاهراً در تحلیل عددی از تأثیر بعد سوم چشم‌پوشی شده و حل مساله در فضای دوبعدی صورت گرفته است اما در منطق محاسباتی UDEC به منظور اعمال شرایط واقعی تأثیر بعد سوم در محاسبات وارد می‌گردد. به عنوان مثال به منظور اجتناب شکست خارج صفحه، شرایط تنش‌های برجا در راستای عمود بر صفحه باید وارد شود. این مهم در مورد نشت سیالات با در نظر گرفتن ضخامت واحد برای مدل مرتفع می‌شود.

#### ۴-۳-۱- هندسه و ابعاد مدل و شرایط مرزی

به منظور مدل‌سازی تزریق دوغاب در توده سنگ پی سد سردشت، محدوده‌ای به ابعاد ۵×۵ مترمربع و برای تکیه‌گاه راست و چپ محدوده‌ای به ابعاد ۱۰×۱۰ مترمربع انتخاب شده است. این ابعاد براساس اجرای چندین مدل عددی و تعیین شعاع حداکثر نفوذ دوغاب بدون ایجاد شکستگی مکانیکی در ماده سنگ انجام شده است، به نحوی که از تأثیر شرایط مرزی بر صحت نتایج به دست آمده از تحلیل عددی اطمینان حاصل شود. به منظور جلوگیری از جابجایی در مرزها، شرایط مرزی غلظتی و ترکیبی آن با شرایط مرزی تراوا بکار گرفته شده و از معیار رفتاری موهر - کلمب برای

به منظور مدل‌سازی رفتار ناپیوستگی‌ها از معیار مدل لغزش نقطه‌ای کلمب استفاده شد. این معیار برای بلوک‌های سنگی تحت فشار با چندین سطوح تماس به کار می‌رود. مهم‌ترین خصوصیات مورد نیاز برای استفاده از این معیار: چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، سختی قائم و برشی سطح درزه هستند. در جدول ۱ پارامترهای مقاومتی از جمله چسبندگی و زاویه اصطکاک سطح درزه که به کمک آزمون آزمایشگاهی برش مستقیم تعیین شده، ارائه شده است. همچنین مقادیر سختی قائم و برشی (به ترتیب JKs و JKn) مورد نیاز برای مدل‌سازی عددی، با استفاده از روابط (۱) و (۲) تعیین شد [۴۲].

$$JK_n = \frac{E_m E_r}{S(E_r - E_m)} \quad (1)$$

$$JK_s = \frac{G_m G_r}{S(G_r - G_m)} \quad (2)$$

که در آن  $E_m$  و  $E_r$  مدول الاستیک توده سنگ و ماده سنگ،  $G_m$  و  $G_r$  مدول برشی توده سنگ و ماده سنگ و  $S$  فاصله‌داری ناپیوستگی‌های اصلی است. در مدل‌سازی عددی که مقدار پارامترهای سختی قائم و برشی به ترتیب برابر ۱۰ (گیگاپاسکال بر متر) و ۱ (گیگاپاسکال بر متر) منظور شده است.

#### ۴-۲- خصوصیات دوغاب مورد استفاده در مدل‌سازی عددی

رفتار رئولوژی دوغاب نقش مهمی در تزریق دارد، زیرا رابطه میان فشار و آهنگ جریان را تعیین می‌کند. علاوه بر این، ویژگی‌هایی مانند تنش تسلیم و شعاع نفوذ دوغاب را محدود خواهد کرد. ویژگی رئولوژیکی دوغاب تابعی از نوع سیمان و نسبت آب به سیمان است و برای محدوده کاربرد هر یک از انواع سیمان‌ها مدل رفتاری خاصی باید در نظر



#### ۴-۳-۳- تحلیل عددی تزریق تکیه‌گاه‌ها

به منظور بررسی عملیات تزریق از تکیه‌گاه‌های راست و چپ سد سردشت، ویژگی‌های زمین‌شناسی و شرایط ناپیوستگی‌های موجود در هر تکیه‌گاه در نرم‌افزار المان مجزای UDEC مدل‌سازی شده و میزان شعاع نفوذ دوغاب و فاصله‌داری بهینه چال‌ها در تکیه‌گاه‌ها بررسی شد. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در تکیه‌گاه راست و چپ به دلیل محدود بودن تعداد دسته درزه‌ها نسبت به پی سد، شعاع نفوذ دوغاب بیشتر شده و این شعاع حدود ۲/۷ متر برآورد می‌شود. به همین دلیل برای دو چال تزریق مجاور که هر کدام ۲/۷ متر شعاع تزریق دوغاب دارند، با فرض مقداری همپوشانی، فاصله‌داری بهینه در دو تکیه‌گاه چپ و راست، برابر با ۵ متر پیشنهاد می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده هرچه تعداد دسته درزه‌های متقاطع با چال تزریق بیشتر شود، شعاع نفوذ دوغاب کاهش یافته، ولی محدوده متقارن‌تری تحت شعاع نفوذ دوغاب قرار می‌گیرد. در حالیکه، هرچه تعداد دسته درزه‌های متقاطع با چال کمتر باشد، شعاع نفوذ بیشتر شده ولی نفوذ دوغاب فقط در راستای خاصی صورت می‌گیرد. به دلیل شعاع نفوذ بیشتر دوغاب در تکیه‌گاه‌ها، در مدل‌سازی عددی محدوده بلوک ۱۰×۱۰ مترمربع برای بررسی و تحلیل انتخاب شد. همچنین برای بررسی تأثیر قطر گمانه بر شعاع نفوذ تزریق دوغاب، در مدل‌سازی عددی چال‌هایی با قطرهای ۵۶ میلیمتر و ۷۶ میلیمتر در نظر گرفته شد، که نتایج آن تفاوت محسوسی نشان نمی‌دهد و به همین دلیل از ارائه شکل تکراری صرف‌نظر شده‌است. در نهایت از نظر اقتصادی چال با قطر ۵۶ میلیمتر پیشنهاد می‌شود.

#### ۴-۳-۴- تعیین فشار بهینه تزریق

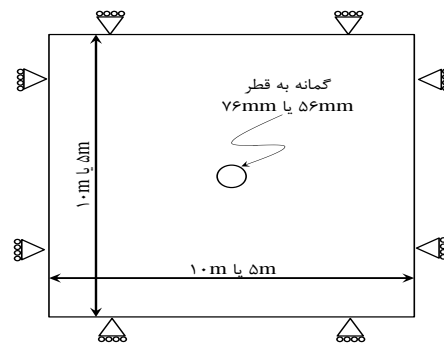
به‌منظور تعیین فشار بهینه تزریق برای اعماق متفاوت (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۹۰) متری، فشارهای مختلف تزریق در مدل‌سازی عددی انجام شده و نتایج آن با روابط تجربی موجود مقایسه شد. براساس نظر لیبالد فشار تزریق از رابطه تجربی (۳) محاسبه می‌شود. این در حالی است که براساس نظریه متخصصان آمریکایی و اروپایی، فشار تزریق باید به ترتیب از روابط (۴) و (۵) محاسبه شود [۴۴].

$$P = 36.765 * 10^{-3} * H \quad (3)$$

$$P = 0.025 * H \quad (4)$$

$$P = 0.1 * H \quad (5)$$

مدل‌سازی رفتار توده‌سنگ استفاده شده‌است. در شکل ۳ هندسه، ابعاد مدل، شرایط مرزی و موقعیت گمانه (به قطر ۵۶ متر یا ۷۶ متر) در مرکز مدل نشان داده شده‌است.

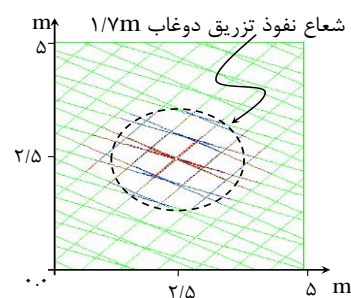


شکل ۳: هندسه و ابعاد مدل و شرایط مرزی در مدل‌سازی عددی تزریق دوغاب

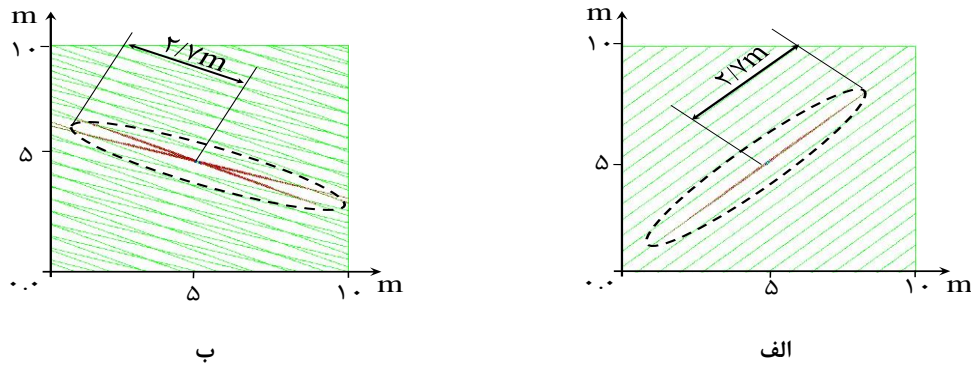
#### ۴-۳-۴- تحلیل عددی تزریق از توده‌سنگ پی

نتایج مدل‌سازی‌های عددی نشان می‌دهد که میزان نفوذ دوغاب برای اعماق مختلف در بازه ۱/۵ متر تا ۱/۷ متر متغیر است. این مقادیر برای اعماق ۵ تا ۵۰ متری به صورت خطی متغیر است. به منظور اطمینان از شعاع نفوذ برآورد شده، پیشنهاد می‌شود که برای عمق‌های متفاوت فشار تزریق متناسب با افزایش عمق، افزایش داده شود. این افزایش فشار نباید با تشکیل درزه و شکاف جدید موجب افزایش هدایت هیدرولیکی در سنگ شود.

همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده، براساس نتایج تحلیل عددی، شعاع نفوذ دوغاب در پی سد سردشت ۱/۷ متر تعیین شده، به همین دلیل می‌توان فاصله‌داری بهینه چال‌ها را ۳ متر در نظر گرفت. به منظور افزایش شعاع تأثیر و اطمینان از تشکیل پرده نفوذناپذیر دوغاب، در عملیات تزریق استفاده از فشارهای بالا پیشنهاد می‌شود. اما این نکته را باید در نظر داشت که در طول فرآیند تزریق، فشار موثر باعث خیز روباره نشده و یا موجب تغییر شکل پلاستیک در توده‌سنگ شود.



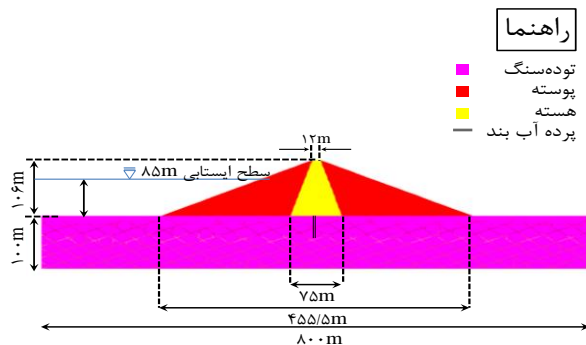
شکل ۴: نتیجه مدل‌سازی عددی برای برآورد شعاع تزریق در پی سد سردشت



شکل ۵: مدل‌سازی عددی تزریق و برآورد شعاع نفوذ دوغاب در تکیه‌گاه‌های راست (الف) و چپ (ب) سد سردشت

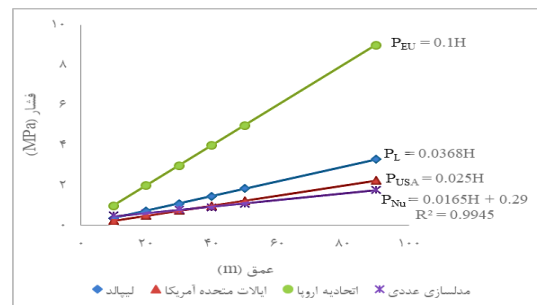
#### ۴-۴- تحلیل عددی عمق و زاویه بهینه برای احداث پرده آب‌بند

به‌منظور کاهش نشت و نفوذپذیری منطقه، پرده‌های آب‌بند با عمق‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متری، در تحلیل عددی بررسی شد. براساس نتایج این مدل‌سازی‌های، با افزایش عمق پرده آب‌بند برای اعماق بالاتر از ۴۰ متر، تغییر قابل ملاحظه‌ای در میزان جریان و نشت آب مشاهده نمی‌شود. در شکل ۷، هندسه و ابعاد مدل و تراز ایستایی (۸۵ متر) در تحلیل عددی ابعاد و زاویه بهینه احداث پرده آب‌بند، نشان داده شده‌است. در تحلیل هیدرولیکی برای حالتی که مخزن سد پر باشد، فشار منفذی (pp) در سمت بالادست ثابت و در سمت پایین دست صفر فرض شده و با توجه به ارتفاع ۸۵ متر آب و رابطه  $p = \rho \times g \times h$  مقدار فشار منفذی محاسبه شده‌است. همچنین بار قائم ناشی از وزن آب به پی سد اعمال شده و فشار افقی، فشار آب به صورت تنش افقی به بدنه سد وارد شده‌است. مدل‌سازی هندسه و خواص پرده آب‌بند در تحلیل عددی، از طریق نسبت دادن رفتار ناتراوا به درزه‌ها در یک محدوده مشخص از مرکز مدل و دقیقاً در زیر هسته سد اجرا شده‌است.



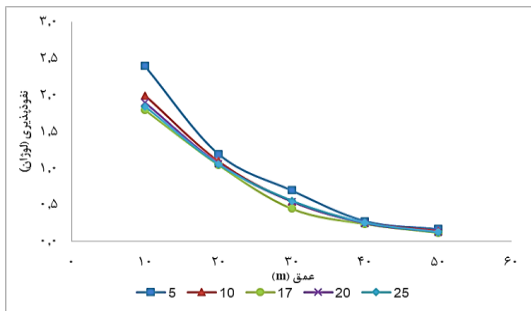
شکل ۷: هندسه بدنه سد و هسته رسی آن و وضعیت پرده آب‌بند در مدل‌سازی عددی

در این روابط،  $P$  فشار تزریق (MPa) و  $H$  عمق (m) است. همانطور که در شکل ۶ ملاحظه می‌شود، فشار بهینه تعیین شده برای عملیات تزریق در منطقه سردشت، به قانون تجربی آمریکا نزدیک‌تر است. در مدل‌سازی عددی چندین مدل مشابه با مقادیر مختلف از فشار تزریق اجرا شد. براساس نتایج تحلیل عددی فشار بهینه تزریق حد بالای فشاری است که علاوه بر داشتن حداکثر شعاع تأثیر، توده‌سنگ را دچار شکستگی نکند. چراکه وجود شکستگی‌های جدید موجب پیدا شدن مسیرهای نفوذ جریان آب و ناکارآمدی سیستم پرده آب‌بند خواهد شد. واضح است که برای داشتن یک شعاع نفوذ ثابت در عمق‌های متفاوت نیاز به افزایش فشار متناسب با عمق است. فاصله نفوذ دوغابی که از گمانه به درزه‌ها جریان می‌یابد، به ویژگی‌های درزه‌های محیط (بازشدگی، زبری و پرکننده‌ها)، ویژگی‌های جریان دوغاب و فشار موثر در درزه‌ها بستگی دارد. هر چه فشار تزریق بالاتر باشد، شعاع تأثیر دوغاب نیز بیشتر خواهد بود. بنابراین به‌نظر می‌رسد که می‌توان با اعمال فشارهای بالا در تزریق، فاصله میان چال‌های تزریق را افزایش و هزینه‌ها را کاهش داد و پر شدن درزه‌های باریک را بهبود بخشید.



شکل ۶: مقایسه فشار تزریق بدست آمده از مدل‌سازی عددی با روابط تجربی





شکل ۹: میزان نفوذپذیری برای پرده به عمق ۴۰m با زوایای ۵، ۱۰، ۱۷، ۲۰ و ۲۵ درجه

در جدول ۵ تأثیر احداث پرده آب‌بند با زاویه ۱۷ درجه و عمق ۴۰ متر بر روی نفوذپذیری توده سنگ بستر محل احداث سد سردشت ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، احداث پرده آب‌بند تا حد قابل ملاحظه‌ای میزان نفوذپذیری توده سنگ در اعماق مختلف را کاهش داده است.

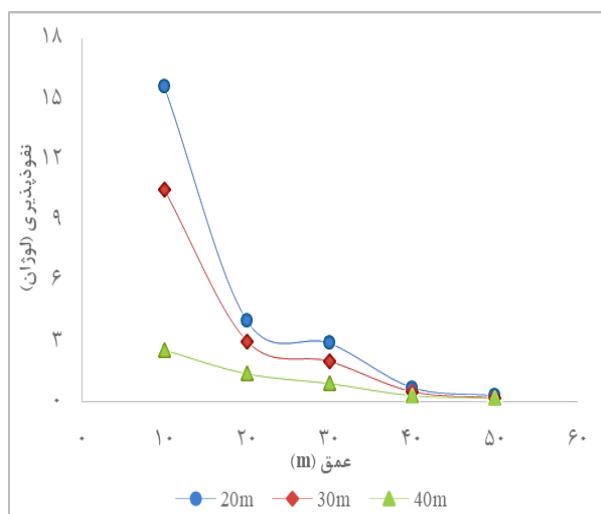
جدول ۵ تأثیر احداث پرده آب‌بند با زاویه ۱۷ درجه بر نرخ جریان

عمق (m)	نرخ جریان (m <sup>3</sup> /s/m)	
	قبل از احداث پرده آب‌بند	بعد از احداث پرده آب‌بند
۱۰	۶/۵ × ۱۰ <sup>-۴</sup>	۴/۲۸ × ۱۰ <sup>-۵</sup>
۲۰	۶/۸ × ۱۰ <sup>-۵</sup>	۲/۳ × ۱۰ <sup>-۵</sup>
۳۰	۵ × ۱۰ <sup>-۵</sup>	۱/۵ × ۱۰ <sup>-۵</sup>
۴۰	۱/۵ × ۱۰ <sup>-۵</sup>	۵ × ۱۰ <sup>-۶</sup>
۵۰	۸ × ۱۰ <sup>-۶</sup>	۳ × ۱۰ <sup>-۶</sup>

#### ۴-۴-۱- اعتبارسنجی مدل عددی

به منظور اعتبارسنجی تحلیل عددی انجام شده، نتایج به دست آمده از تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی به دست آمده در شرکت مهندسی سپاسد، مقایسه شد. همانطور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود در بیشتر موارد مقدار نفوذپذیری بدست آمده از تحلیل عددی برای پرده آب‌بند با عمق ۴۰ متر و زاویه ۱۷ درجه با نتایج آزمایشگاهی شرکت مهندسی سپاسد همخوانی دارد. شکل ۱۰ نیز مؤید این مطلب است که با افزایش عمق از میزان نفوذپذیری کاسته می‌شود، این مهم را می‌توان ناشی از افزایش تنش متناسب با عمق و بسته شدن درزه و شکافها به علت افزایش فشار محصور کننده دانست [۴۱].

در شکل ۸ نتایج حاصل از تحلیل عددی در بهینه کردن عمق پرده آب‌بند نشان داده شده است. در این شکل تأثیر عمق پرده آب‌بند بر روی میزان نشت در عمق‌های مختلف در توده سنگ ارائه شده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود، با افزایش عمق پرده آب‌بند، مقدار نفوذپذیری و در نتیجه میزان نشت آب برای اعماق مختلف در پی سد کاهش می‌یابد. اگر چه براساس نتایج مدل‌سازی‌های عددی به ازای عمق بالاتر از ۴۰ متر تغییر قابل ملاحظه‌ای در میزان نفوذپذیری توده سنگ ملاحظه نمی‌شود. همچنین به منظور تعیین زاویه مناسب تزریق، حالت‌های مایل تزریق پرده آب‌بند بررسی و چال‌های آن به صورت مایل در نظر گرفته شد. براساس نتایج بدست آمده با کاهش زاویه از حالت قائم، میزان تراوش آب از توده سنگ پی سد کاهش می‌یابد. در شکل ۹ نتایج تحلیل‌ها برای احداث پرده آب‌بند با عمق ۴۰ متر با زوایای ۵، ۱۰، ۱۷، ۲۰ و ۲۵ درجه (نسبت به محور قائم) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل نشان داده شده پرده‌ای با زاویه انحراف ۱۷ درجه، نفوذپذیری و جریان کمتری را نسبت به سایر حالات نشان می‌دهد. این تفاوت برای اعماق ۱۰ و ۳۰ متری، بهتر ملاحظه می‌شود. همانطور که در این شکل نشان داده شده، براساس نتایج مدل‌سازی عددی، احداث پرده آب‌بند با زاویه‌های بزرگتر از ۱۷ درجه، تغییر قابل ملاحظه‌ای در میزان نشت آب از پی سد ایجاد نمی‌کند.



شکل ۸: نتایج تحلیل عددی تأثیر عمق احداث پرده آب‌بند

(با عمق‌های ۲۰m، ۳۰m و ۴۰m برای اعماق مختلف در توده سنگ پی سد سردشت (برای عمق‌های ۱۰m تا ۵۰m))

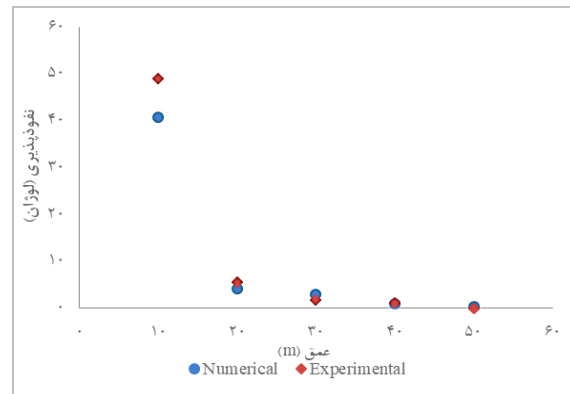
کمتر شده ولی محدوده تحت نفوذ تقارن هندسی بیشتری نشان می‌دهد. لذا عملیات تزریق به شکل مناسب‌تری اجرا خواهد شد. اما در حالتی که تعداد ناپیوستگی‌ها بیشتر باشد، شعاع نفوذ دوغاب بیشتر شده ولی انتشار دوغاب فقط در جهات خاصی صورت می‌گیرد. براساس مقایسه صورت گرفته بین روابط تجربی موجود و نتایج مدل‌سازی عددی، برای تعیین فشار بهینه تزریق، بهتر است از رابطه پیشنهادی متخصصین آمریکایی استفاده شود. علت تشابه رفتار در این دو منطقه را می‌توان ناشی از تشابه در تاریخچه زمین‌شناسی، ژنز و شرایط ژئومکانیکی توده‌سنگ‌ها دانست. براساس نتایج بدست آمده از مدل‌سازی عددی، مقادیر پیش‌بینی شده نفوذپذیری توده‌سنگ محل احداث سد سردشت با دقت ۰/۹۹۸ با قابلیت بالای مدل‌سازی عددی به روش المان مجزا در تخمین نفوذپذیری در توده‌سنگ‌ها است.

#### سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند که از شرکت مهندسی سپاسد به خاطر در اختیار قرار دادن اطلاعات مورد نیاز، تشکر و قدردانی نمایند.

#### مراجع

- [1] X. Wang and H. Zhou, 2001 "An improved hyperbola rheological model for fresh cement-clay grouts," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 16, no. 4.
- [2] E. Nonveiller, 2013, "Grouting theory and practice." Elsevier.
- [3] G. Lombardi, 2003, "Grouting of rock masses," in *Grouting and ground treatment*, pp. 164-197.
- [4] T. Carter, W. Dershowitz, D. Shuttle, and M. Jefferies, 2012, "Improved Methods of Design for Grouting Fractured Rock," presented at the International Conference on Grouting and Deep Mixing.
- [5] W. Sui, J. Liu, W. Hu, J. Qi, and K. Zhan, 2015 و "Experimental investigation on sealing efficiency of chemical grouting in rock fracture with flowing water," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 50, pp. 239-249.
- [6] L. Hassler, 1993, "Grouting of rock: Simulation and classification,".
- [7] M. Eriksson, H. Stille, and J. Anderson, 2000, "Numerical calculations for prediction of grout spread with account for filtration and varying aperture,"



شکل ۱۰: مقایسه نفوذپذیری بدست آمده از تحلیل عددی (برده آب‌بند به عمق ۴۰m و زاویه ۱۷ درجه) و نتایج آزمایشگاهی

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به کمک نرم‌افزار المان مجزای UDEC، خصوصیات ژئومکانیکی و هیدرولیکی ساختگاه سد سردشت مدل‌سازی شده و هندسه پرده آب‌بند برای پی و تکیه‌گاه‌های سد بهینه‌سازی شده است. براساس نتایج مدل‌سازی عددی برای جلوگیری از جریان سیال یا کاهش آن لازم است پرده آب‌بند به عمق ۴۰ متر در زیر بدنه سد در راستای طولی محور سد احداث شود. در مدل‌سازی عددی به منظور تعیین عمق بهینه تزریق، پرده‌های آب‌بند با عمق‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متری، بررسی شد. با افزایش عمق پرده از میزان نشست جریان کاسته شده و برای عمق بهینه ۴۰ متر شدت جریان آب از  $5 \times 10^{-6}$  تا  $1/5 \times 10^{-5}$  لوژان کاهش می‌یابد که براساس استانداردهای موجود این مقدار نشست قابل قبول است. تغییرات نشست آب با تغییر زاویه احداث پرده آب‌بند می‌تواند به علت فراهم شدن امکان تقاطع تعداد بیشتری از ناپیوستگی‌ها با راستای تزریق پرده بوده و لذا نسبت به حالت قائم، نفوذناپذیری بالاتری را نشان می‌دهد. از آنجا که زاویه احداث پرده آب‌بند بر میزان نشست آب تأثیر می‌گذارد، پرده‌های آب‌بند با زوایای ۵، ۱۰، ۱۷، ۲۰ و ۲۵ درجه بررسی شد، که از این میان پرده با زاویه ۱۷ درجه جریان کمتری را نشان داد. آرایش چال‌های تزریق در پی با توجه به شعاع نفوذ ۱/۷ متر دوغاب، از هم ۳ متر و در تکیه‌گاه‌ها با توجه به شعاع نفوذ ۲/۷ متر دوغاب، ۵ متر پیشنهاد می‌شود. شعاع نفوذ بیشتر دوغاب در تکیه‌گاه‌ها به دلیل تعداد کمتر ناپیوستگی‌ها نسبت به پی سد است. در حالتی که تعداد ناپیوستگی‌های متقاطع بیشتر شود، شعاع نفوذ دوغاب

- remeshing," International journal for numerical methods in engineering, vol. 46, no. 1, pp. 131-150.
- [21] T. Belytschko and T. Black, 1999, "Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing," International journal for numerical methods in engineering, vol. 45, no. 5, pp. 601-620.
- [22] C. Duarte, O. Hamzeh, T. Liszka, and W. Tworzydło, 1999, "The element partition method for three-dimensional dynamic crack propagation," in Fifth US National Congress on Computational Mechanics, vol. 297.
- [23] J. Pereira, C. Duarte, X. Jiao, and D. Guoy, 2009, "Generalized finite element method enrichment functions for curved singularities in 3D fracture mechanics problems," Computational Mechanics, vol. 44, no. 1, pp. 73-92.
- [24] P. Gupta and C. A. Duarte, 2014, "Simulation of non-planar three-dimensional hydraulic fracture propagation," International Journal for Numerical Analytical Methods in Geomechanics, vol. 38, no. 13, pp. 1397-1430.
- [25] B. Lecampion, 2009, "An extended finite element method for hydraulic fracture problems," Communications in Numerical Methods in Engineering, vol. 25, no. 2, pp. 121-133.
- [26] T. A. Cruse, 1969, "Numerical solutions in three dimensional elastostatics," International journal of solids structures, vol. 5, no. 12, pp. 1259-1274.
- [27] M. Hossain and M. Rahman, 2008, "Numerical simulation of complex fracture growth during tight reservoir stimulation by hydraulic fracturing," Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 60, no. 2, pp. 86-104.
- [28] M. Lak, M. F. Marji, A. Y. Bafghi, and A. Abdollahipour, 2019, "A coupled finite difference-boundary element method for modeling the propagation of explosion-induced radial cracks around a wellbore," Journal of Natural Gas Science Engineering, vol. 64, pp. 41-51.
- [29] A. Abdollahipour, M. F. Marji, A. Y. Bafghi, and J. Gholamnejad, 2016, "A complete formulation of an indirect boundary element method for poroelastic rocks," Computers and Geotechnics, vol. 74, pp. 15-25.
- [30] Z. Wilson and C. Landis, 2016, "Phase-field modeling of hydraulic fracture," Journal of the Mechanics Physics of Solids, vol. 96, pp. 264-290.
- [31] A. Abdollahipour, M. F. Marji, A. Y. Bafghi, and J. Gholamnejad, ۲۰۱۶, "On the accuracy of higher order displacement discontinuity method (HODDM) in the solution of linear elastic fracture mechanics problems," Journal of Central South University, vol. 23, no. 11, pp. 2941-2950, 2016/11/01 .
- [32] A. Abdollahipour, M. F. Marji, A. Y. Bafghi, and J. Gholamnejad, 2015, "Simulating the propagation of hydraulic fractures from a circular wellbore using the Tunnelling and underground space technology ,vol. 15, no. 4, pp. 353-364.
- [8] M. Yang, Z. Yue, P. K. Lee, B. Su, and L. Tham, 2002, "Prediction of grout penetration in fractured rocks by numerical simulation," Canadian Geotechnical Journal, vol. 39, no. 6, pp. 1384-1394.
- [9] C. Fidelibus and V. Lenti, 2012, "The propagation of grout in pipe networks," Computers & Geosciences, vol. 45, pp. 331-336.
- [10] C. Fidelibus and V. Lenti, 2012, "Short note: The propagation of grout in pipe networks," Computers and Geotechnics, vol. 45, pp. 331-336.
- [11] T. Chen, L. Zhang, and D. Zhang, 2014, "An FEM/VOF hybrid formulation for fracture grouting modelling," Computers & Geosciences, vol. 58, pp. 14-27.
- [12] H. Rahmani, 2009, "Estimation of grout distribution in a fractured rock by numerical modeling," University of British Columbia.
- [13] J. Lee, C. Bang, Y. Mok, and S. Joh, 2000, "Numerical and experimental analysis of penetration grouting in jointed rock masses," International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, vol. 37, no. 7, pp. 1027-1037.
- [14] A. Draganović and H. Stille, 2011, "Filtration and penetrability of cement-based grout: Study performed with a short slot," Tunnelling and underground space technology, vol. 26, no. 4, pp. 548-559.
- [15] Q. Liu and L. Sun, 2019, "Simulation of coupled hydro-mechanical interactions during grouting process in fractured media based on the combined finite-discrete element method," Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 84, pp. 472-486.
- [16] A. Paluszny and R. Zimmerman, 2011, "Numerical simulation of multiple 3D fracture propagation using arbitrary meshes," Computer Methods in Applied Mechanics Engineering, vol. 200, no. 9-12, pp. 953-966.
- [17] A. Paluszny, X. Tang, M. Nejati, and R. Zimmerman, 2016, "A direct fragmentation method with Weibull function distribution of sizes based on finite-and discrete element simulations," International journal of solids structures, vol. 80, pp. 38-51.
- [18] O. Omid, R. Abedi, and S. Enayatpour, 2015, "An adaptive meshing approach to capture hydraulic fracturing," in ۴۹ th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, American Rock Mechanics Association.
- [19] Q. Liu, L. Sun, X. Tang, and L. Chen, 2018, "Simulate intersecting 3D hydraulic cracks using a hybrid "FE Meshfree" method," Engineering Analysis with Boundary Elements, vol. 91, pp. 24-43.
- [20] N. Moës, J. Dolbow, and T. Belytschko, 1999, "A finite element method for crack growth without

- [38] Y. Chengzeng, Z. Hong, S. Guanhu, and G. Xiurun, 2016, "Combined finite-discrete element method for simulation of hydraulic fracturing," *Rock mechanics and rock engineering*, vol. 49, no. 4, pp. 1389-1410.
- [39] Q. Liu, D. Jiang, T. Hayat, and A. Alsaedi, 2018, "Influence of stochastic perturbation on an SIRI epidemic model with relapse," *Applicable Analysis*, pp. 1-20.
- [40] J.-P. Latham, J. Xiang, M. Belayneh, H. M. Nick, C.-F. Tsang, and M. J. Blunt, 2013, "Modelling stress-dependent permeability in fractured rock including effects of propagating and bending fractures," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 57, pp. 100-112.
- [41] S.-F. C. Partnership, 2011, "Sardasht Dam and Power Plant Design," in *Engineering Geology Report Second stage studies*, Partnership Moshanir - Karkhe Payab Co.
- [42] UDEC, Itasca C. G; UDEC 4 Manual. Minneapolis, 2004.
- [43] N. Wiler, 1996, "Injection Engineering Operations." Zayand Ab Consulting Engineers.
- [44] M. A. Karbalaee and H. Katibeh, 2009, "Cement grouting in Rocks." Tarava, (In Persian)
- Displacement Discontinuity Method," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 80, pp. 281-291.
- [33] D. O. Potyondy and P. Cundall, 2004, "A bonded-particle model for rock," *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, vol. 41, no. 8, pp. 1329-1364.
- [34] B. Park and K. Min, 2015, "Bonded-particle discrete element modeling of mechanical behavior of transversely isotropic rock," *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, vol. 76, pp. 243-255.
- [35] M. Sousani, D. Ingham, M. Pourkashanian, Y. Sheng, and I. Eshiet Kenneth, 2015, "Simulation of the hydraulic fracturing process of fractured rocks by the discrete element method," *Environmental earth sciences*, vol. 73, no. 12, pp. 8451-8469.
- [36] A. A. Munjiza, 2004, "The combined finite-discrete element method," John Wiley & Sons.
- [37] Q. Lei, J. Latham, J. Xiang, and P. Lang, 2014, "Coupled FEMDEM-DFN model for characterizing the stress-dependent permeability of an anisotropic fracture system," in *International Conference on Discrete Fracture Network Engineering*.

<sup>1</sup> Fracture Network

<sup>†</sup> Advanced Remeshing method

<sup>‡</sup> Extended Finite Element Method

<sup>§</sup> Generalized Finite Element Method

<sup>‡</sup> Displacement Discontinuity Method

<sup>§</sup> Combined Finite-Discrete Element Method

<sup>¶</sup> International Society of Rock Mechanics and Rock Engineering

<sup>^</sup> American Society for Testing and Materials