

ارزیابی خطر نشت آب و توزیع تنش وارده به ساختگاه مغار نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد کردستان به روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی

محسن افدیده^۱، محمدحسین جوکار^{۲*}، علی ارومیه‌ای^۳، علی عالی انوری^۴

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۲۵ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۱۱

چکیده

نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای نقش مؤثری در ذخیره‌سازی انرژی، پایداری و کنترل سیستم قدرت ایفا می‌کنند. یکی از چالش‌برانگیزترین و مخاطره‌آمیزترین مسائل در عملیات اجرای فضاهاى زیرزمینی، وجود آب است که هزینه‌های پروژه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. چنانچه علاوه بر فرایند نشت آب، توزیع تنش و فشار آب وارد بر پوشش آن‌ها، باید محاسبه و با توجه به آن سیستم نگهداری ضد آب و یا زهکش مناسب تعبیه گردد. بنابراین پیش‌بینی آب ورودی به فضای زیرزمینی یکی از ملزومات اساسی است که در طراحی آن باید مدنظر قرار داده شود. با توجه به اهمیت این مسئله، اقدام به برآورد میزان نشت و همچنین تأثیر حضور آب بر روی پوشش مغار نیروگاه سد آزاد کردستان در حالت‌های خشک، زهکشی شونده و بدون زهکشی با استفاده از روش‌های تحلیلی، تجربی و عددی (نرم‌افزار UDEC) گردید. نتایج پژوهش حاکی از آن بود که مقدار نشت در روش‌های تحلیلی، روش‌های تجربی SGR و SGRM، روش تجربی TIC و روش عددی به ترتیب بین ۳/۴ تا ۲۲/۱، ۳/۴ تا ۱۳/۶، ۱۸/۷ تا ۱۰۲، ۱۶ تا ۳۶ لیتر بر ثانیه، متغیر می‌باشد. همچنین با در نظر گرفتن نتایج به‌دست‌آمده از روش عددی و پیاده کردن آن بر روی نمودارهای ظرفیت، می‌توان گفت شاکریت در حالت خشک و زهکشی شونده پایدار و در حالت بدون زهکشی به دلیل قرارگیری نیروی محوری در حالت کشش ناپایدار می‌باشد. بنابراین سیستم نگهداری مغار، نیاز به طراحی زهکش دارد.

کلیدواژه‌ها: نشت، توزیع تنش، نمودار ظرفیت، مغار سد آزاد کردستان، UDEC

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران [*h.jowkar@modares.ac.ir](mailto:h.jowkar@modares.ac.ir)
۳. استاد گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۴. استاد مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، اصفهان، ایران

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

افزایش تقاضا و محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی نیاز به منابع انرژی تجدیدپذیر را دوچندان کرده است. در این میان نقش نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای به دلیل حفاظت از پایداری و استمرار شبکه برق، بسیار مهم و ضروری است (Lung et al., 2007; Kulpa et al., 2024). از آنجاکه احداث این نیروگاه‌ها مستلزم حفر و نگهداری حفره‌های زیرزمینی می‌باشد. بنابراین شناخت رفتار مهندسی توده سنگ‌های محل پروژه جهت تخمین میزان آب ورودی به مغار و ارزیابی تأثیر بار ناشی از آب‌های زیرزمینی بر پوشش بتنی آن بسیار ضروری می‌باشد. در این راستا، عوامل موثر بر میزان بار وارده توسط جریان آب بر پوشش تونل عبارتند از: ۱- صلیبیت نسبی بین محیط سنگی و پوشش تونل، ۲- نفوذپذیری نسبی بین محیط سنگی و پوشش تونل و ۳- فاکتورهای هندسی همچون عمق سطح آب زیرزمینی، فاصله تا لایه نفوذپذیر و محل منبع آب. چنانچه هر کدام از این عوامل به صورت جداگانه تأثیر خود را داشته، که به طور مثال در تونلی که پوشش نهایی آن از نفوذپذیری کمتری نسبت به خاک اطراف برخوردار است، پوشش نهایی تقریباً به صورت نفوذناپذیر عمل خواهد کرد و از طرف دیگر تونلی که به طور نسبی از محیط اطرافش نفوذپذیرتر است به صورت یک زهکش عمل می‌کند (Bilfinger, 2005). در مجموع بسته به شرایط زمین‌شناسی و ژئوهیدرولوژی منطقه، پوشش فضا‌های زیرزمینی ممکن است به صورت سازه‌های زهکشی شده (باز) یا زهکشی نشده (بسته) طراحی شوند. در پوشش زهکشی نشده، غشاء بر پایه پلیمر سیمانی و ژئوتکستایل در امتداد کل محیط فضای زیرزمینی قرار گرفته و از ورود آب زیرزمینی کاملاً جلوگیری می‌شود. در نتیجه پوشش‌های نهایی برای مقاومت در برابر فشارهای کامل هیدرواستاتیک آب در محل طراحی می‌شوند. این امر منجر به صرفه‌جویی در هزینه‌ها به دلیل حذف لوله‌های مشبک و سوراخ‌دار دیواره جانبی مغار، بتن متخلخل، لوله‌های عرضی و لایه شن (پتو زهکشی) می‌شود. همچنین در این روش معمولاً اگر محیط زمین‌شناسی و ساخت اولیه از کیفیت بالایی برخوردار باشد، هزینه‌های عملیات اجرا و

نگهداری کم است. زیرا پمپاژ کاهش می‌یابد و بدون ورود آب‌های زیرزمینی به سیستم زهکشی، رسوبات معدنی بسیار کندتر پشت زهکش تجمع می‌یابند (Hung et al., 2009; Kuyt, 2015; GEO, 2018; Shen et al., 2025). در حالی که پوشش زهکشی شده به آب زیرزمینی اجازه می‌دهد تا به صورت کنترل‌شده با یک سیستم تخلیه فشار دائمی که اطراف حفاری را احاطه کرده، به فضای زیرزمینی نفوذ کند. این سیستم معمولاً بین پوشش اولیه و پوشش دائمی نصب می‌شوند و معمولاً امکان طراحی اقتصادی‌تر را فراهم می‌کند. زیرا بار هیدرواستاتیک به میزان زیادی کاهش می‌یابد یا از بین می‌رود. همچنین سیستم زهکشی شده، شامل یک لایه زهکش دیواری (صافی الیافی) (Filter Fabric)، لوله‌های جمع‌کننده زهکشی معکوس (Invert Drainage Collector Pipes) (که در پشت دیوار و زیر کف مغار قرار گرفته‌اند)، و یک پتوی زهکشی بوده که با پوشاندن کل دیوار با یک لایه شن ایجاد می‌گردد. در روش زهکشی شده، آب در پشت پوشش جمع‌آوری شده و به لوله‌های زهکشی سوراخ‌دار دیواره جانبی که در ارتفاع معکوس و در هر طرف تونل قرار دارند، هدایت می‌شود و از آنجا آب جمع‌آوری شده از طریق لوله‌های عرضی و بدون سوراخ به زهکش اصلی منتقل می‌شود. بنابراین لوله‌ها و لایه‌های زهکشی باید باز و روان باقی بمانند تا از ایجاد فشارهای هیدرواستاتیک جلوگیری شود. بعلاوه جهت تأمین سرعت‌های مختلف جریان می‌توان از لوله یا ورق‌های هلالی شکل از جنس پلی‌اتیلن با چگالی بالا (High-density polyethylene, HDPE) در اندازه‌های مختلف استفاده کرد. در واقع این سیستم، علاوه بر کاهش هزینه‌های پمپاژ، امکان طراحی پوشش‌های نازک‌تر و سبک‌تر را فراهم می‌کنند و برای مناطق دارای ناپیوستگی و درزه کارآمدتر عمل می‌کنند (Wang et al., 2008; Hung et al., 2009; Kuyt, 2015; GEO, 2018; Liu et al., 2025). لذا در طراحی فضا‌های زیرزمینی انتخاب نهایی نوع مصالح، ضخامت‌های آن‌ها و روش طراحی زهکش باید همواره با توجه به ۱- تحلیل دقیق توزیع تنش و فشار آب، ۲- شرایط زمین‌شناسی، ۳- شرایط هیدرولوژیکی (میزان ورود آب‌های

حفری شده بود را اندازه‌گیری و اعلام کردند که سهم بزرگی از بار زمین ناشی از فشار آب بوده است و مؤلفه تنش مؤثر توده سنگ ناچیز می‌باشد. تاپا و همکاران (Thapa et al., 2005) میزان آب واقعی نشست شده به درون دو تونل را در ایالات متحده آمریکا با یکدیگر مقایسه و گزارش کردند اختلاف در مقدار نشست در نتیجه اثر جهت‌یابی درزه‌ها و گسل‌های موجود در ساختار زمین‌شناسی تونل‌ها است. پرازلی و همکاران (Perazzelli et al., 2014) با ارزیابی جبهه تونل تحت شرایط تراوش جریان آب، یک روش حل تحلیلی را جهت تخمین توزیع هد هیدرولیکی در سطح جبهه تونل ارائه دادند. فهیمی‌فر و همکاران (Fahimifar et al., 2015) برای مدل‌سازی مسئله تراوش و فشار آب منفذی در تونل‌های تحت فشار زیر سطح آب زیرزمینی چندین الگو ارائه دادند. داداشی و همکاران (Dadashi et al., 2017) با مدل‌سازی تونل تحت فشار به روش اجزای محدود گزارش کردند فشار آب داخلی بالا بر روی پوشش بتن مسلح و توده سنگ تأثیر قابل‌توجهی بر تغییر ضریب نفوذپذیری و فشار پلاستیک دارد. محمودزاده و همکاران (Mahmoodzadeh et al., 2021) ورود آب به تونل در حین ساخت را، یکی از رایج‌ترین و پیچیده‌ترین بلاای زمین‌شناسی دانستند که تأثیر زیادی بر برنامه زمان‌بندی ساخت و ایمنی دارد. آن‌ها با استفاده از شش روش شبکه عصبی حافظه کوتاه‌مدت طولانی، شبکه‌های عصبی عمیق، الگوریتم K نزدیک‌ترین همسایه، رگرسیون فرآیند گاوسی، رگرسیون بردار پشتیبان و الگوریتم درخت تصمیم به بررسی جریان آب ورودی به تونل‌ها پرداختند. فرنلوس و همکاران (Frenelus et al., 2022) مسئله ورود آب‌های زیرزمینی به تونل‌ها را یک موضوع برجسته در مباحث هیدرولیک مهندسی، هیدروژئولوژی، مکانیک سنگ و علوم وابسته دانسته و گزارش کردند اگرچه این چالش تاکنون توسط بسیاری از محققان با روش‌های متنوع مطرح شده است لیکن بررسی پیشرفته‌ای از این روش‌ها هنوز ارائه نشده است. بنابراین آن‌ها با تجزیه و تحلیل کلیه روش‌های ارائه‌شده تاکنون، محدودیت‌ها، کاربرد و دقت روش‌های پیش‌بینی ورود جریان آب زیرزمینی

زیرزمینی)، ۴- الزامات تعیین‌شده جهت کاربری مغار و ۵- هزینه گزینه‌های مختلف، بر اساس استانداردهای معتبر (BSI, 2004, 2009, 2019; ITAtech Activity Group, 2013 (SIA, 2014; ZTV-Ing Part5 (Strassenwesen, 2018) به‌گونه‌ای مورد ارزیابی قرار گیرد تا علاوه بر عمر طولانی و مقاومت مکانیکی مناسب با هرگونه نفوذ آب‌های زیرزمینی به داخل تونل مقابله کند (Pelz and Karlovšek, 2023). اهمیت این مسئله به حدی است که عدم توجه به آن عواقب شدیدی مانند عدم ثبات سازه‌ای، خرابی پوشش، ریزش تونل، از دست دادن کارگران، ماشین‌آلات و تجهیزات حفاری و فاجعه زیست‌محیطی را در پی دارد (مرسلی و همکاران، ۱۳۹۷؛ توسلی و همکاران، ۱۳۹۸؛ قلی‌زاده خاصوانی و همکاران، ۱۳۹۹). چنانچه در تونل نانشیبی (Nanshibi) چین فشار هیدرواستاتیک فراتر از ظرفیت باربری پوشش تونل بوده و بنابراین تقویت ناکافی پوشش و مسدود کردن (آب‌بندی) ناکارآمد آن منجر به افزایش مسیرهای نشست به تونل گردید. همچنین در این پروژه فشارهای هیدرواستاتیک و شعاعی آب در کنار بار سنگ، به‌ویژه در مناطق ضعیف باهم ترکیب شده و پوشش تونل را تحت فشار قرار داده به‌نحوی که در این تونل وجود لایه کارستی باعث نفوذ آب از طریق درزه‌ها شده که این عمل منجر به آسیب سازه‌ای، بالا آمدن روسازی و هجوم گل‌ولای گردید (Jiajia et al., 2022). حال آنکه پیچیدگی‌های ورود آب به فضاهای زیرزمینی به دلیل نفوذپذیری توده سنگ، شرایط رژیم جریان و همچنین زمان‌بر بودن تحقیقات میدانی، باعث چالش‌برانگیز و محدود شدن تحقیقات در این زمینه و مطرح شدن مسائل مربوط به فشار آب حفره‌ای در وهله اول به‌صورت روش‌های تحلیلی یا تجربی شده است. ولی امروزه با توجه به امکان در نظرگیری پیچیدگی‌های مسئله، روش عددی می‌تواند به‌عنوان یک ابزار جایگزین برای ارزیابی مسئله به کار گرفته شود. چنانچه در این زمینه می‌توان به پیشینه پژوهش صورت گرفته ذیل اشاره کرد. کرد.

اینوکوما و ایشیمورا (Inokuma and Ishimura, 1995) مقادیر تنش کل توده سنگ و فشار آب اطراف پوشش سگمندی بتنی با قطر ۵ متر و عمق ۳۲ متر که با سیستم سپری دوغابی

به تونل را از دیدگاه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار دادند. سو و همکاران (Su et al., 2022) بر اساس مدل شبکه شکست (Fracture Network Model) و قانون مکعب شکستگی منفرد با جریان آرام (cubic law of a single fracture with laminar flow)، روش مناسبی را برای محاسبه توزیع هد هیدرولیک و رفتارهای جریان در شکستگی‌ها ارائه کردند. این روش، با فرض ماتریس سنگ به‌عنوان یک محیط نفوذناپذیر، عبور جریان آب زیرزمینی را تنها در شبکه‌ای که توسط شکستگی‌ها و گسل‌ها تشکیل شده است، در نظر می‌گیرد. لی و همکاران (Li et al., 2024) با ارزیابی شرایط پیچیده هیدروژئولوژیکی در نواحی کارستی، یک پشتیبانی نظری و عددی را برای ساخت ایمن تونل‌های توده سنگی نسبتاً یکنواخت در مناطق کارستی فراهم کردند. هو و همکاران (Hu et al., 2024) با پیش‌بینی جریان ورودی آب به تونل گزارش کردند در نواحی کارستی هنگامی که نرخ جریان بالا باشد، آب رفتار غیرخطی پیچیده‌ای از خود نشان می‌دهند که با قانون دارسی نمی‌توان آن را به‌دقت توصیف کرد. نتایج آن‌ها نشان داد که جریان دارسی در مقایسه با جریان غیر دارسی، تقریباً ۲۵ درصد جریان آب را بیش‌ازحد برآورد می‌کند که این کار اهمیت جریان غیردارسی و شبکه‌های شکستگی را هنگام پیش‌بینی دقیق جریان آب در تونل‌ها نشان می‌دهد.

در ایران نیز، معینی رودبالی و همکاران (۱۳۹۰) به بررسی فرار آب از مخزن بالادست نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد کردستان به روش‌های عددی المان مجزا و المان محدود با نرم‌افزارهای UDEC، Seep/w و Seep/3D پرداخته و گزارش کردند برای جلوگیری از فرار آب احداث المان آب‌بند به کمک ژئوممبرین ضروری است. شمس و همکاران (۱۳۹۲) به مدل‌سازی رفتار هیدرولیکی توده سنگ و تحلیل جریان ورودی به درون حفریات زیرزمینی در محیط‌های سنگی دارای شکستگی به روش شبکه شکستگی مجزا، به‌صورت موردی در نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سیاه‌بیشه پرداخته و گزارش کردند متوسط دبی جریان آب ورودی به ازای واحد طول مغار ترانسفورمر برای مقادیر شبیه‌سازی ۰/۳۱ لیتر بر دقیقه و برای

مقادیر واقعی ۰/۳۶ لیتر بر دقیقه می‌باشد که نشان‌دهنده کارایی روش توسعه داده‌شده در مسئله تحلیل جریان است. موسی زاده و همکاران (۱۳۹۲) با مقایسه خروجی و نتایج روش عددی المان محدود (نرم‌افزار Phase2) و روش عددی المان مجزا (نرم‌افزار UDEC) در تحلیل پایداری مغار نیروگاه زیرزمینی مسجدسلیمان، اظهار داشتند که خروجی مدل ساخته‌شده توسط نرم‌افزار UDEC به نتایج ابزار دقیق و شرایط واقعی زمین نزدیک‌تر است. امیری و همکاران (۱۳۹۴) با در نظرگیری وضعیت قرارگیری تونل در زیر سطح آب زیرزمینی در شرایط زهکشی شده و رخداد وضعیت الاستوپلاستیک و با بهره‌گیری از معیار شکست موهر - کلمب، به محاسبه دقیق محدوده پلاستیک در اطراف تونل پرداخته و با رسم منحنی مشخصه زمین، پارامترهای دخیل در روابط تحلیلی ارائه‌شده را مورد حساسیت سنجی قرار دادند. عالی انوری و هاشمی جبلی (۱۳۹۶) با استفاده از روش عددی المان مجزا (نرم‌افزار UDEC) و با در نظر گرفتن ساختارهای زمین‌شناسی حاکم بر محیط از قبیل سیستم ناپیوستگی‌ها و تفاوت ویژگی‌های ژئومکانیکی توده سنگ‌ها، فاصله بهینه میان مغار ترانسفورمر و مغار نیروگاه را ۴۰ متر ذکر کردند. مرسلی و همکاران (۱۳۹۷) ورود آب به تونل انتقال آب سد امیرکبیر کرج را به روش‌های تحلیلی و تجربی مورد ارزیابی قرار داده و گزارش کردند بیشترین حجم ورود آب به تونل کرج در ساختارهای زمین‌شناسی همچون چین‌ها، گسل‌ها، دایک‌ها و درزه‌های باز صورت می‌گیرد که انطباق قابل توجهی با زمان بارندگی‌ها دارند. زارعی و همکاران (۱۳۹۷) به تحلیل پایداری مغار نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در محدوده سد آزاد کردستان در درازمدت با استفاده از نرم‌افزار Flac3D و نمودارهای ظرفیت پرداخته و گزارش کردند که سازه مغار نیروگاه برای یک دوره ۹۵ ساله با ضریب ایمنی ۱ پایدار خواهد بود. عالی انوری و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از تلفیق اطلاعات زمین‌شناسی مهندسی (برداشت‌های صحرایی و نتایج حاصل از ۳۸ گمانه اکتشافی و غیره) و نتایج حاصل از روش زمین‌آماری چند متغیره، ابتدا تغییرات نفوذپذیری در امتداد محور و تکیه‌گاه‌های سد آزاد را تخمین

است اما هنوز روش دقیقی برای پیش‌بینی آب وردی به تونل ارائه نشده است زیرا معیارهای تأثیرگذار در این زمینه بسیار زیاد و پیچیده هستند. در واقع جهت ارزیابی این مشکلات، در ابتدا می‌بایست میزان ورود آب به داخل فضای زیرزمینی را بررسی و محاسبه کرد. لیکن این بررسی‌ها با عدم قطعیت‌هایی در رابطه با پیش‌بینی بار هیدرولیکی آب و همچنین تعیین نفوذپذیری توده سنگ اطراف فضای زیرزمینی همراه است که دلیل اصلی این امر، توزیع بسیار غیریکنواخت هدایت هیدرولیکی در زمین به جهت توزیع درزه‌ها و میزان بازشدگی آن‌ها می‌باشد. بنابراین امروزه به‌منظور محاسبه میزان نشست آب به تونل‌ها و فضاها، روش‌های زیرزمینی روش‌های متنوعی اعم از روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی وجود دارد که در این میان روش‌ها و معادلات تحلیلی به دلیل بهره‌گیری از ساده‌سازی‌ها و فرضیات عملی، کاربرد زیادی در محاسبه میزان نشست آب به تونل دارند و روش‌های عددی اگرچه از دقت قابل قبولی برخوردار هستند لیکن از حجم محاسبات و پیچیدگی‌های بالاتری برخوردار هستند. در این راستا، هدف از این پژوهش تخمین میزان نشست به مغار نیروگاه سد آزاد کردستان و بررسی توزیع تنش و فشار آب حفره‌ای وارد بر مغار نیروگاه با استفاده از روش‌های مختلف تحلیلی، تجربی و عددی و مقایسه نتایج آن‌ها می‌باشد.

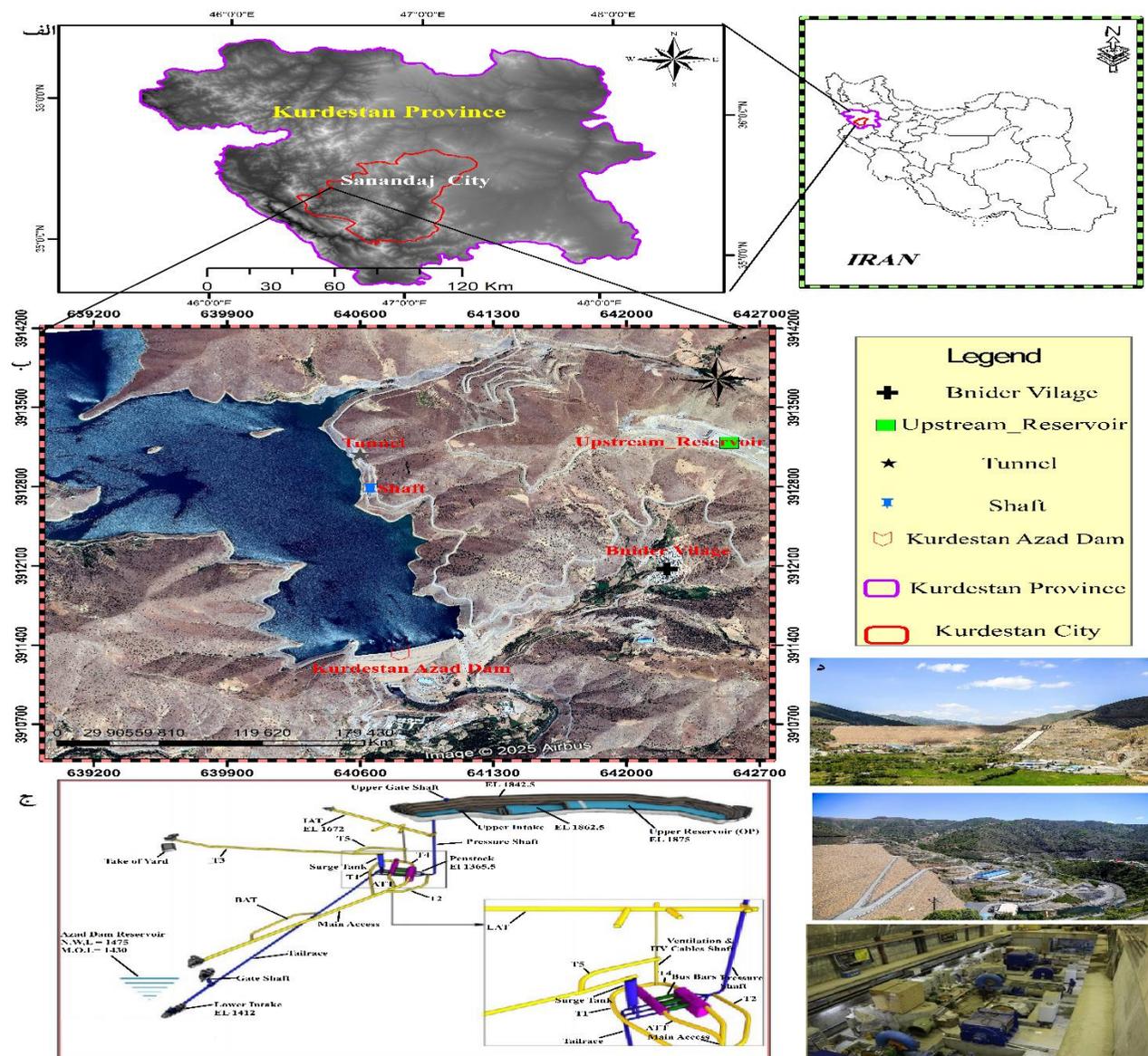
۲. موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی

نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد در استان کردستان (۷۵ کیلومتری غرب سنندج) و در مجاورت رودخانه کوماسی (چم‌گوره) از سرشاخه‌های مهم رودخانه سیروان در نزدیکی روستای بنیدر در مختصات جغرافیایی، در فاصله بین $34/75$ و $35/76$ عرض شمالی و $46/08$ و 48 طول شرقی واقع شده است (شکل‌های الف و ب). این نیروگاه به لحاظ تقسیم‌بندی زمین‌شناسی ایران، در محدوده پهنه سنندج - سیرجان قرار گرفته است. ارتفاعات منطقه ترکیبی از ماسه‌سنگ‌های کمی دگرگون‌شده به همراه لایه‌های شیست و فیلیت است که به دلیل تفاوت مقاومتی، ماسه‌سنگ‌های کمی دگرگون‌شده عمدتاً به‌صورت برجا و برجسته بوده، درحالی‌که شیست و فیلیت‌های موجود در سطح

زده و سپس با استفاده از مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار Seep/w فرار آب از پی و تکیه‌گاه‌های سد را در حدود 450 لیتر بر دقیقه ($7/5$ لیتر بر ثانیه) برآورد کردند. صداقتی و همکاران (۱۳۹۸) با مطالعه مشخصات مسیر تونل راه امامزاده هاشم (ع) تهران دبی آب وردی به تونل را به روش عددی (با استفاده از مدل FLAC2D) محاسبه کرده و سپس ریسک این مخاطره را با تحلیل فازی مورد ارزیابی قرار داده و گزارش کردند در ناحیه میانی مسیر تونل، به دلیل احتمال هجوم آب با فشار بالا همراه با تبدیل به جریان گل، ریسک تونل‌سازی زیاد است. قلی‌زاده خاصوانی و همکاران (۱۳۹۹) با مدنظر قرار دادن اطلاعات واقعی کیلومتراژ $4/6$ ، تونل خط ۷ مترو تهران، در نرم‌افزار SEEP/W، نرخ آب ورودی به تونل و زهکشی از آن را محاسبه و نشان دادند که میزان نشست محاسبه‌شده در روش عددی 640 (مترمکعب بر روز) و تحلیلی $747/3$ (مترمکعب بر روز) است که تطابق خوبی در محاسبه میزان نفوذ آب زیرزمینی به داخل تونل دارند. ملکی‌پور و همکاران (۱۳۹۹) درزه‌های ورودی تونل گردنه رخ اصفهان را با استفاده از کد نوشته‌شده در نرم‌افزار (متمتیکا (Mathematica)) با نام 3D-DFN مدل‌سازی نموده و پس از اعتبارسنجی، نتایج آن را در محیط نرم‌افزاری UDEC وارد نموده و گزارش کردند با استفاده از شبکه شکستگی مجزا (Discrete Fracture Network) می‌توان با درصد بالایی نتایج را با واقعیت تطبیق داد. مرسلی (۱۴۰۰) با استفاده از داده‌های تونل‌های کرج و کرمان، سیستم رتبه‌بندی ساختگاه تونل از نظر ورود آب SGR را مورد ارزیابی و بهینه‌سازی قرار داد. جعفرزاده و همکاران (۱۴۰۱) روش عددی بدون شبکه و الگوریتم (Differe Rential Evolution Adaptive) را جهت انجام دادن فرایند شبیه‌سازی - بهینه‌سازی هجوم آب به درون تونل انتقال آب صفارود کرمان ارائه و گزارش کردند مقادیر تخمین روش‌های تحلیلی-تجربی در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده و خروجی روش عددی بسیار کمتر است. در مجموع با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته می‌توان گفت اگرچه برای پیدا کردن روش مناسب محاسبه دبی نشست به تونل تاکنون تلاش‌های فراوانی شده

زیرزمینی و همچنین تصاویری از سد و نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد کردستان قابل مشاهده است. همچنین عمده ساختگاه مغار نیروگاه در واحدهای لایه‌بندی ماسه‌سنگ کمی دگرگون‌شده با سه دسته درزه (به شرح اطلاعات جدول ۱) واقع شده است. چنانچه تصاویر کنتر دیاگرام و استریوگرافیک آن ناپیوستگی‌ها به ترتیب در شکل‌های ۲-الف و ۲-ب قابل مشاهده است و بر آن اساس می‌توان گفت وجود درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در مسائل تحلیل پایداری و هیدروژئولوژیکی مغار (از لحاظ تراوایی) دارند.

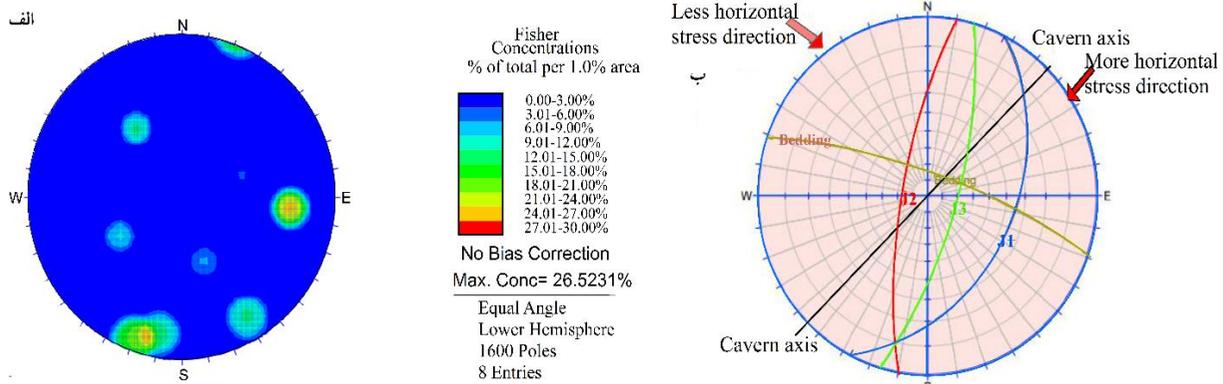
خردشده و دارای شیستوزیته بالا می‌باشند و شیب توپوگرافی در محدوده مخزن بالادست در حدود ۵۰-۴۰ درجه می‌باشد. مغار نیروگاه دارای ابعاد ۲۶/۱ متر عرض، ۴۶/۱ متر ارتفاع ۸۵ متر طول می‌باشد و بررسی سطح آب در گمانه‌های عمیق حفرشده حاکی از قرارگیری سطح آب زیرزمینی در ۱۶۴۰ متری از سطح دریا بوده که با توجه به عمق قرارگیری مغار نیروگاه و ترانسفورمر حدود ۲۴۰ متر، هد آب بالای این سازه‌ها قرار خواهد داشت (شرکت مهندسی مشاور مه‌اب قدس، ۱۳۹۳). در شکل‌های ۱-ج و ۱-د به ترتیب سازه‌های



شکل ۱. الف) موقعیت نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد در استان کردستان ایران، ب) موقعیت قرارگیری سازه‌ها و ابنیه فنی در اطراف سد، ج) سازه‌های زیرزمینی نیروگاه سد و د) تصاویری از سد و نیروگاه مورد مطالعه

جدول ۱. ویژگی‌های سیستم ناپیوستگی برداشت‌شده در موقعیت سازه‌های زیرزمینی (شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، ۱۳۹۳)

Discontinuity	Slope Direction	slope (deg)	Continuity (m)	Spacing (m)	Filling	Opening (mm)	roughness	water condition
Bedding	75 - 85	15 - 30	3 - 20	0.2 - 0.6	Calcite - iron oxide	0.1 - 0.25		Dry to Moist
J1	60 - 75	260 - 280	3 - 10				rough - flat	Dry
J2	45 - 60	125 - 150	1 - 10	0.2 - 2	Calcite	< 1		Dry to Moist
J3	45 - 65	50 - 70	1 - 3					Dry



شکل ۲. الف) نمایش کنتور دیاگرام و ب) تصویر استریوگرافیک سطوح ناپیوستگی‌های مربوط به مغار نیروگاه سد آزاد کردستان

برای تونل‌های زیر سطح ایستابی و جریان‌های حالت پایدار، ارائه گردید (رابطه ۱ (جدول ۲)). لیکن محققانی که از این معادله برای ارزیابی میزان آب به درون تونل استفاده می‌کردند معمولاً گزارش داده که مقدار نشست واقعی آب به درون تونل با آنچه از این رابطه به دست می‌آید در حدود ۴۰-۳۰ درصد متفاوت است (Hwang and Lu, 2007). بنابراین چری و فریز (Cherry and Freeze, 1979) بر پایه تغییر مفهوم بار آبی در تونل، معادله گودمن را اصلاح کردند (رابطه ۲ (جدول ۲)). سپس، لی (Lei, 1999) معادله دیگری را برای محاسبه میزان نشست آب به درون تونل‌ها برای جریان پایدار در درازمدت ارائه کرد (رابطه ۳، (جدول ۲)). در ادامه، التانی (El-Tani, 1999) با اعمال فرضیاتی نظیر، در نظر گرفتن مقطع تونل به صورت دایره‌ای و کاملاً در زیر سطح ایستابی، در نظر گرفتن افت سطح ایستابی در اطراف تونل و فرض توده سنگ به صورت همسانگرد و همگن روش تقریبی را برای حل مشکلات نشست آب به درون تونل‌هایی که عمدتاً بدون پوشش داخلی حفرشده باشد، پیشنهاد کرد (رابطه ۴ (جدول ۲)). هیوور (Heuer, 2001) با مقایسه نتایج حاصل از معادله گودمن و اندازه‌گیری‌های مستقیم در برخی تونل‌ها، گزارش

۳. روش تحقیق

۳-۱. برآورد میزان نشست آب به مغار نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد کردستان

پیش‌بینی دقیق نشست آب به تونل‌های سنگی به دلیل عدم امکان تعیین کلیه ویژگی‌ها از قبل، امکان‌پذیر نیست لیکن چون مقادیر بالای فشار و دبی آب ورودی به تونل در حین اجرا مشکلات عمده‌ای را موجب می‌شود، لازم است که قبل از شروع به اجرای تونل، تخمین کلی از میزان نفوذ آب به آن به دست آید و برای مقابله با مشکلات ناشی از نشست آب راهکارهای مناسب در نظر گرفته شود (قربانی ننه کران، ۱۳۸۸). برای تخمین میزان نفوذ آب به فضاهای زیرزمینی روش‌های متفاوتی وجود دارد که این روش‌ها، شامل روش‌های تحلیلی، تجربی و عددی می‌باشد.

۳-۱-۱. روش‌های تحلیلی برآورد میزان نشست آب به مغار

معادلات حاکم بر نشست آب به تونل‌ها در این روش، بر پایه دو قانون دارسی و بقای جرم به دست آمده است. اولین رابطه که برای برآورد میزان نشست آب به تونل‌ها مورد استفاده قرار گرفت توسط گودمن و همکاران (Goodman et al., 1965)

و همسانگرد، عدم تحت تأثیر بودن سطح آب زیرزمینی بر میزان نشت و غیره به صورت رابطه ۶ (جدول ۲) اصلاح کرد. التانی (El-Tani, 2003) مجدداً بر اساس روش تغییر شکل مویبوس (Möbius) و سری فوریه (Fourier Series) راه‌حل تحلیلی جدیدی برای محاسبه نشت جریان به داخل تونل‌ها ارائه داد (روابط ۷ و ۸ (جدول ۲)).

کرد که میزان آب ورودی در پروژه‌های موردبررسی در حدود ۵۰ درصد با نتایج به‌دست‌آمده از معادله گودمن تفاوت دارد و برای برطرف کردن این مشکل، با اعمال ضریبی (ضریب کاهش هیوور) در حدود یک‌هشتم، معادله نشت گودمن را تصحیح کرد (رابطه ۵، (جدول ۲)). کارلسرود (Karlsrud, 2001) مجدداً رابطه گودمن را برای تونل‌های کم‌عمق با اعمال فرضیاتی همچون، در نظر گرفتن توده سنگ به صورت همگن

جدول ۲. روابط تحلیلی ارائه‌شده توسط پژوهشگران مختلف جهت ارزیابی مقدار نشت ورودی به فضاهای زیرزمینی

Applicability / Remark	Governing equations and parameters	Researches	Equation
Deep Circular tunnel, Homogeneous media, Darcy flow / Mirror method used, Inflow increase slowly with increasing of tunnel diameter	$Q_L = \frac{2\pi KH_0}{Ln\left(\frac{2Z}{r}\right)}$ <p>Q_L : Groundwater inflow per unit length (m³/sec/m) , K: Hydraulic conductivity (m/s) , r : Tunnel radius (m), H_0 : Depth from the tunnels center line and water head (m), Z: Overburden thickness (m)</p>	Goodman et al (1965)	1
These researchers, have revised equation 1, by substituting Z instead h	$Q = \frac{2\pi Kh}{2.3 \log\left(\frac{2h}{r}\right)}$ <p>The parameters utilized are listed in Equation 1.</p>	Cherry and Freeze (1979)	2
Circular tunnel, Homogeneous media, Darcy flow / In this relation, Goodman method has been corrected with more exact exertion of real condition	$Q = \frac{2\pi Kh}{Ln\left(\frac{h}{r} + \sqrt{\left(\frac{h}{r}\right)^2 - 1}\right)}$ <p>The parameters utilized are listed in Equation 1.</p>	Lei (1999)	3
Square, Elliptical or Circular tunnels, varied hydraulic conductivity, Darcy flow / El-Tani has defined equation 4 as an optimum relation by considering above mentioned relations.	$Q_L = 2\pi Kh \frac{1 - 3\left(\frac{r}{2h}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{r}{2h}\right)^2\right] Ln\frac{2h}{r} - \left(\frac{r}{2h}\right)^2}$ <p>The parameters utilized are listed in Equation 1.</p>	El-Tani (1999)	4
Circular tunnel, Homogeneous media, Darcy flow / Heuer reduction coefficient (1/8) and some change in deominator has been exerted to revise equation 2.	$Q_L = \frac{2\pi KH_0}{Ln\left(\frac{2Z}{r}\right)} \times \frac{1}{8}$ <p>The parameters utilized are listed in Equation 1.</p>	Heuer (2001)	5
Circular deep- seated tunnels ($h/r \geq 3 - 4$), shallow tunnels, Homogeneous media, constant permeability, Darcy glow / semi – empirical equation, there is no influence of Seepage for the water table.	$Q_L = \frac{2\pi Kh}{Ln\left(\frac{2h}{r} - 1\right)}$ <p>The parameters utilized are listed in Equation 1.</p>	Karlsrud (20001)	6
Circular tunnels with lining, homogeneous media, Darcy flow / in this equation El – Tani, has applied Mobius transformation method and Fourier series and present a new analytival solution for flow calculation.	$Q = 2\pi K \frac{\lambda^2 - 1}{\lambda^2 + 1} \times \frac{h}{ln\lambda}$ $\lambda = \left(\frac{h}{r}\right) - \left(\frac{h^2}{r^2}\right) - 1)^{1.2}$ <p>The parameters utilized are listed in Equation 1.</p>	El-Tani (2003)	7-8

نزدیکی مناطق آسیب‌دیده از حفاری به صورت اجتناب‌ناپذیر افزایش یابد و در این شرایط ورود جریان آب‌های زیرزمینی به داخل تونل‌ها و فضا‌های زیرزمینی می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر قرار گیرد (Ataie-Ashtiani et al., 1999; Peng et al., 2022; Guo et al., 2023).

با این حال در این پژوهش جهت برآورد اولیه از مقدار نشت ورودی به مغار و مقایسه مقادیر آن با روش‌های تجربی و عددی، بر مبنای اطلاعات زمین‌شناسی مهندسی، هیدروژئولوژیکی و ابعاد پروژه (جدول ۳) میزان نشت آب به مغار نیروگاه سد آزاد کردستان در ۶ روش تحلیلی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت.

جدول ۳. پارامترهای استفاده‌شده در روش‌های تحلیلی جهت برآورد میزان نشت ورودی به مغار نیروگاه

Parameter	h : distance from the center of an underground space to the water table (m)	Z:Overburden thickness (m)	r: Equivalent radius of the cave (m)	K : Hydraulic conductivity (m/s)	Value
	263	503	19	$1 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-7}$	

تحقق فاکتور ایمنی لازم را دارد (Xu et al., 2024). در این راستا، نتایج تحلیل تنش‌های شعاعی و مماسی و فشار آب برای بهبود طراحی پوشش تونل با اطلاع‌رسانی در انتخاب مصالح و روش‌های تقویت آن بسیار مفید هستند. چنانچه تحلیل تنش شعاعی و مماسی، توزیع و بزرگی تنش را در پوشش مغار نشان می‌دهد و مناطقی را که در معرض تنش‌های کششی یا فشاری هستند، شناسایی می‌کند. به‌عنوان مثال، تنش‌های مماسی کششی در سطح داخلی می‌تواند در صورت تجاوز از مقاومت کششی ماده پوشش، باعث شکستگی‌های شعاعی شوند. بنابراین درک این تنش‌ها مهندسان را قادر می‌سازد تا موادی با مقاومت کششی و چقرمگی کافی را برای مقاومت در برابر نوسانات تنش ناشی از فشار داخلی و تغییرات دما انتخاب کنند. علاوه بر این تحلیل فشار آب نیز بسیار مهم است زیرا تغییرات فشار آب منفذی بر تنش‌های مؤثر در پوشش و سنگ اطراف تأثیر می‌گذارد. افزایش فشار آب داخلی یا خارجی می‌تواند تنش‌های کششی یا فشاری اضافی ایجاد کند و بر کرنش‌های حجمی در مواد پوشش تأثیر بگذارد و به‌طور بالقوه باعث تخریب مکانیکی یا ترک‌خوردگی شود. بنابراین طراحی مواد

در مجموع همان‌طور که در جدول ۲ اشاره‌شده است روش‌های تحلیلی عموماً راه‌حل‌های ساده و آموزنده‌ای را بر اساس فرضیات ایدئال همچون وجود جریان در حالت پایدار، همگنی در خواص توده سنگ و شرایط خاص تونل ارائه می‌دهند. بنابراین روابط این روش برای تخمین‌های اولیه مفید می‌باشند و ممکن است شرایط پیچیده نشت، مانند تغییرات در اشباع شدن محیط یا هندسه‌های نامنظم را به‌طور دقیق ارزیابی نکنند. چنانچه در تونل‌هایی که در زمین‌های کارستی و گسل دار غنی از آب واقع شده‌اند، جریان آب‌های زیرزمینی می‌تواند از ۱۰۰۰ لیتر در دقیقه بر مترمربع فراتر رود. همچنین تحت تنش زیاد، نفوذپذیری سنگ می‌تواند تا سه برابر در

۱-۲-۳. روش تحلیلی ارزیابی توزیع تنش و فشار آب بر پوشش نهایی مغار
 آب زیرزمینی نه تنها تأثیر منفی در فعالیت ساخت‌وساز دارد، بلکه بر روی پایداری تونل نیز تأثیرگذار است. اغلب تونل‌ها در زیر سطح آب زیرزمینی قرار گرفته‌اند که این امر منجر به ورود مقدار زیادی آب به داخل تونل و همچنین فشار آب منفذی بالا بر روی پوشش تونل می‌شود. تمام سازه‌ها به‌ویژه در وضعیت سطح ایستابی بالا نمی‌توانند فشار آب بسیار بالا را تحمل کنند. بنابراین وجود سطح آب زیرزمینی بالا یکی از مهم‌ترین مشکلات به هنگام طراحی، برنامه‌ریزی و حفاری تونل‌ها است که باید مورد توجه قرار گیرد (رئیس، ۱۳۹۵). هنگامی که فشار آبی که بر روی پوشش نهایی، اعمال می‌شود بالا نباشد، طراحی تونل می‌تواند به‌طور عادی و طبق استانداردهای مربوط بدون تغییر در پیکربندی مقطع تونل انجام پذیرد با افزایش فشار آب تا یک حد معین، طراحی انجام‌شده قبلی دیگر نمی‌تواند فاکتور ایمنی لازم را تحقق بخشد و در این شرایط، فشار آب به‌عنوان فشار بالا در نظر گرفته می‌شود در این صورت مقطع تونل نیاز به تغییر و بهینه‌سازی جهت

یکنواخت وارد بر دیواره مغار در نتیجه نصب پوشش می‌باشد و سایر کمیت‌ها مانند D و η_{CF} به ترتیب به‌عنوان ضریب فشردگی (Compressibility coefficient) و نسبت فشردگی - انعطاف‌پذیری (Compressibility-flexibility ratio) می‌باشد، در محیط نرم‌افزار اکسل وارد و سپس با استفاده از معادلات ریاضی و تابع تحلیلی کارنزا توریس و ژائو (Carranza-Torres and Zhao, 2009) توزیع تنش‌های شعاعی و مماسی به‌صورت کل و مؤثر در حالت‌های خشک، زهکش‌شونده و بدون زهکشی بر روی دیواره و سقف مغار نیروگاه سد آزاد کردستان جهت مقایسه با روش عددی، مورد بررسی و محاسبه قرار گرفت.

جدول ۴. پارامترهای اولیه مغار نیروگاه، جهت استفاده در رابطه تحلیلی کارنزا توریس و ژائو (Carranza-Torres and Zhao, 2009)

r^*	h (m)	vs	E_s (Pa)	t_s (m)	ν	E (Pa)	Z (m)	a (m)
5 a	263	0.2	21e9	0.25	0.25	9.5 e9	503	19

که پارامترهای آن عبارت‌اند از: S1: امتیاز فراوانی درزه‌ها و بازشدگی آن‌ها، S2: تورق سنگ، S3: عرض زون خرد شده و گسله، S4: وجود کارست، S5: ضریب نفوذپذیری خاک، S6: موقعیت تونل نسبت به سطح ایستابی یا پیزومتریک و S7: میزان و شدت بارش منطقه می‌باشد.

زارعی و همکاران (Zarei et al., 2013) سیستم رده‌بندی TIC (Tunnel inflow classification) را به‌منظور برآورد نشت آب به فضاهای زیرزمینی با در نظر گرفتن شرایط زمین‌شناسی و طبقه‌بندی توده سنگ ارائه کردند. در این روش با در نظر گرفتن پارامترهایی همچون ترکیب توده سنگ (RMC) (Rock Mass Composition)، نوع سنگ (RT) (Rock Type)، میزان رس لایه‌ها (CBC) (Clay-bearing content)، مقاومت تک‌محوری (UCS) (Unconfined Compressive Strength) و عمق تونل (TD) (Tunnel Depth) و امتیازدهی به آن‌ها (بر اساس جدول A-5)، فضاهای زیرزمینی به شش رده خیلی کم‌خطر، کم‌خطر، نسبتاً خطرناک، خطرناک، خطر بالا، خطر خیلی بالا و شدیداً خطرناک (مطابق جدول B-5) تقسیم‌بندی می‌شوند.

پوشش و تقویت‌کننده برای تحمل این تنش‌ها، دوام و یکپارچگی سازه را بهبود می‌بخشد (کارگر و همکاران، ۱۳۹۶؛ لنجانی و همکاران، ۱۴۰۰؛ Rutqvist et al., 2012; Zhao et al., 2025). با توجه به اهمیت این مسئله، در این پژوهش جهت بررسی توزیع تنش و جابه‌جایی در محیط الاستیک، تحت بارگذاری به علت حفر مغار و در نظرگیری تغییرات فشار آب در اطراف آن از روش تحلیلی کارنزا توریس و ژائو (Carranza-Torres and Zhao, 2009) استفاده گردید. بدین منظور معادلات این روش که بر اساس معادلات تابع ریاضی لامه (Lamé function) یعنی λ و G که تابعی از مدول الاستیک و نسبت پواسون محیط بوده (به شرح جدول ۴) و همچنین کمیت P_s که مربوط به فشار شعاعی

۳-۱-۲. روش‌های تجربی برآورد میزان نفوذ آب به مغار

با توجه به پیشینه ارائه شده به دلیل شرایط و فرضیات در نظر گرفته شده برای هرکدام از روابط تحلیلی، آن روش‌ها علی‌رغم محاسبات فنی گاه‌گاه تخمین و برآورد درستی از مقدار نشت آب به فضاهای زیرزمینی ارائه نمی‌کنند. بنابراین مطالعات در این زمینه در گام دوم به سمت روش‌های تجربی که وابسته به شرایط پروژه، زمین‌شناسی، مکانیک سنگ می‌باشد، سوق داده شد. بدین منظور، کتیبه و عالی‌انوری (Katibeh and Alianari, 2009) با استفاده از تجربیات به‌دست‌آمده از مطالعه ۱۰ تونل در ایران، روش کیفی و کمی جدیدی برای رده‌بندی ساختگاه تونل‌ها از دیدگاه خطر نشت آب زیرزمینی به نام (SGR) (Site Groundwater Rating) پیشنهاد کردند. در این روش مطابق رابطه ۹ بر اساس مطالعات اولیه زمین‌شناسی مهندسی و خصوصیات هیدروژئولوژیکی، ساختگاه تونل به شش دسته بی‌خطر، کم‌خطر، نسبتاً خطرناک، دارای خطر بالا و شدیداً خطرناک و بحرانی تقسیم‌بندی می‌شود و محاسبه مقدار آن به‌صورت زیر صورت می‌پذیرد.

$$SGR = [(S1 + S2 + S3 + S4) + S5]S6S7 \quad (9)$$

جدول ۵. رده‌بندی کیفی و کمی خطر نشت آب به تونل به روش تحلیلی TIC، زارعی و همکاران (Zarei et al., 2013)

A- Grouping effective factors in estimating water seepage into tunnels using TIC analytical method						
Rock Mass Composition (RMC)	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Group 5	Group 6
Score	2	1.6	11.6	3.9	2	2
Rock Type (RT)	Chemical		Chemi – Clastic		Clastic	
Score	7.1		2.9		1.1	
Uniaxial compressive strength (UCS)	UCS<25		50>UCS>25		UCS>50	
Score	0.6		2.8		5.3	
Clay Bearing Content (CBC)	CBC>35		35>CBC>5		CBC<5	
Score	1		8.8		6.5	
Tunnel Depth (TD)	TD<200		500>TD>200		TD>500	
Score	4.1		7.3		3.2	
B- Quantitative and qualitative classification water seepage risk in tunnel construction sites using the TIC analytical method						
Tunnel category	I	II	III	IV	V	VI
Tunnel Score	<10	10-25	26-40	41-60	61-80	81-100
Qualitative description of the amount of seepage into the tunnel	Very low risk	Low risk	Moderately risk	High risk	Very high risk	Extremely risk
Amount of seepage into the tunnel	<10	11-60	61-120	121-300	301-800	>800

و ویژگی‌های فضاهاى زیرزمینی می‌باشد. با این حال در این پژوهش جهت برآورد اولیه از مقدار نشت ورودی به مغار نیروگاه سد آزاد کردستان و مقایسه مقادیر آن با روش‌های تحلیلی و عددی، از روش‌های تحلیلی SGR-SGRM و TIC بر مبنای اطلاعات زمین‌شناسی، مکانیک سنگ، خصوصیات ناپیوستگی‌ها و موقعیت مغار استفاده گردید.

۳-۱-۳. روش برآورد میزان نشت آب و بررسی توزیع تنش

وارده بر پوشش نهایی مغار با استفاده از مدل‌سازی عددی پیشرفت فن‌آوری و پیچیدگی مسائل باعث شده در دهه‌های اخیر به منظور طراحی‌های مرتبط با زمین‌شناسی مهندسی و مکانیک سنگ از تحلیل‌های عددی استفاده گردد. چراکه روش‌های عددی از مدل‌های محاسباتی برای شبیه‌سازی نشت با توان اعمال شرایط مرزی پیچیده، جریان غیراشباع و محیط‌های ناهمگن استفاده می‌کنند. بنابراین روش عددی معمولاً پیش‌بینی‌های دقیق‌تری نسبت به روش‌های تحلیلی و تجربی، به‌ویژه در شرایط پیچیده زمین‌شناسی ارائه می‌دهند، اما دقت این روش به شدت به نوع مدل و نرم‌افزار مورد استفاده، پارامترهای ورودی مدل و شرایط مرزی بستگی دارد (Ataie-Ashtiani et al., 1999; Cao et al., 2021; Hu et al., 2022).

مرسلی (۱۴۰۰) با استفاده از تجارب حفاری‌های واقعی تونل‌های کرمان و کرج روش SGR را مورد صحت‌سنجی و بهینه‌سازی قرار داده و دو پارامتر از هفت پارامتر معرفی شده در روش SGR، که مربوط به نفوذپذیری خاک (S5) و اثر باران (S7) را حذف کرد. سپس جهت پیش‌بینی میزان آب ورودی به فضاهاى زیرزمینی به روش تجربی، اعمال مقدار شیب درزه‌ها در پارامتر S1، لایه‌بندی به‌جای تورق در پارامتر S2، بررسی ساختار هر گسل به‌طور جداگانه به‌جای وضعیت نوع منطقه خردشده در پارامتر S3 را به همراه استفاده از طبقه‌بندی ژئومورفولوژی مقاومت سنگ به‌جای معیارهای نسبی کارست در پارامتر S4، استفاده از ضریب ۳۰ تا ۵۰ درصد بار آب اندازه‌گیری شده در گمانه‌ها و استفاده از معیارهای طبقه‌بندی GIS در پارامتر S6 را برپایه رابطه ۱۰ پیشنهاد داد.

$$SGRM = [(SM1 + SM2 + SM3 + SM4)]SM6 \quad (10)$$

بنابراین می‌توان جمع‌بندی کرد که روش‌های تجربی با تعمیم مطالعات حفاری پروژه‌های مختلف به دست آمده و در این روش‌ها مطالعه و بررسی جریان‌های آب زیرزمینی به تونل و مغار حاصل در نظر گرفتن، ترکیب و وزندهی دقیق و جزئی ویژگی‌های زمین‌شناسی، شرایط توده سنگ، شرایط هیدرولیکی

نرم‌افزار یک تحلیل توامان مکانیکی - هیدرولیکی انجام می‌شود که در آن هدایت هیدرولیکی ناپیوستگی‌ها به تغییر شکل مکانیکی آن‌ها وابسته است و برعکس. در واقع فشار آب حفره‌ای ناپیوستگی‌ها محاسبات مکانیکی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بنابراین می‌توان از آن جهت مطالعه برهمکنش هیدرومکانیکی نشت و ورود آب به مغار استفاده و رفتار مکانیکی توده سنگ و درزه‌ها را کمک آن با جریان ترکیب کرد (Itasca Consulting Group, 2009).

بدین منظور بر پایه گزارش مطالعات توجیهی احداث پروژه (شرکت مهندسی مشاور مه‌اب قدس، ۱۳۹۳) اطلاعات ویژگی‌های ژئومکانیکی و زمین‌شناسی مهندسی توده سنگ در محدوده مغار به شرح جدول ۶ استخراج گردید. سپس برای شبیه‌سازی جریان سیال در توده‌های سنگی ناپیوسته از روش اجزا محدود و نرم‌افزار UDEC به‌عنوان ابزاری قدرتمند، جهت مدل‌سازی توده‌های سنگ به‌صورت بلوک‌های گسسته (جداشده با ناپیوستگی‌ها) استفاده گردید. چراکه در این

جدول ۶. میانگین پارامترهای به‌دست‌آمده برای توده سنگ در محدوده احداث مغار (شرکت مهندسی مشاور مه‌اب قدس، ۱۳۹۳)

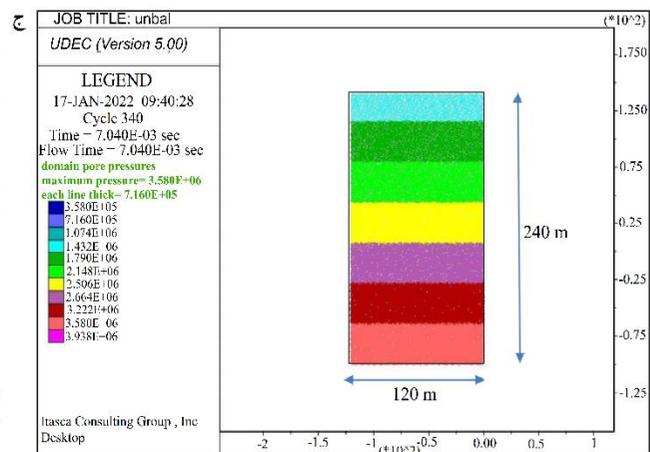
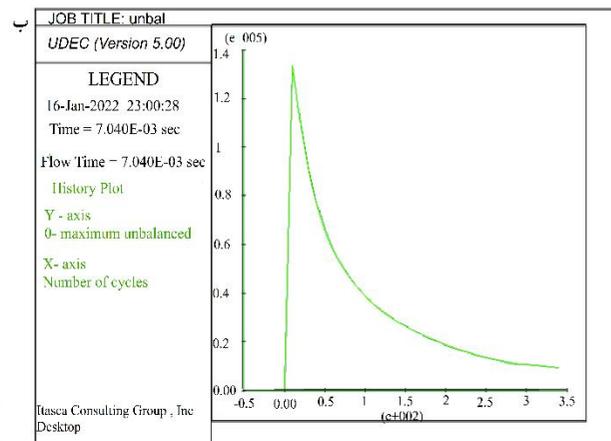
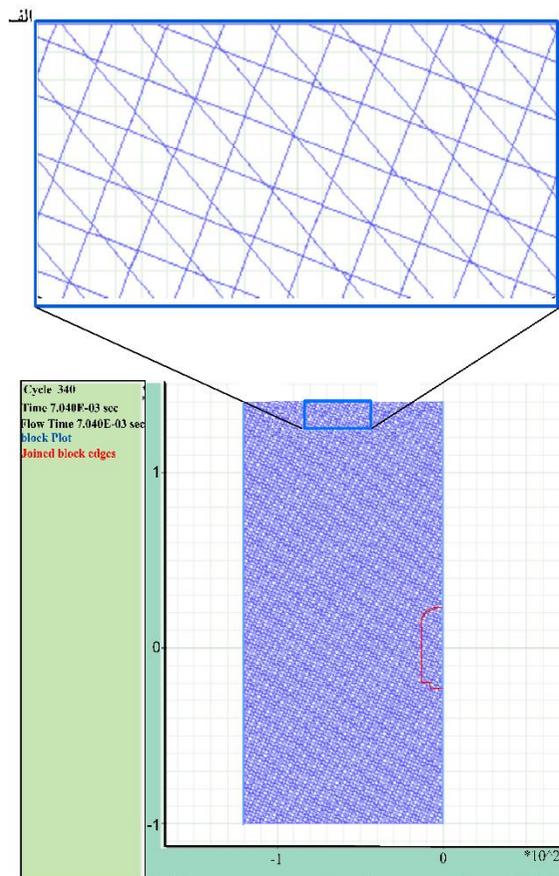
Slightly metamorphosed sandstone	Type of rock	
2.67	Dry Density (gr/cm ³)	Physical tests
2.69	Saturated Density (gr/cm ³)	
2.26	Porosity %	
69.9	compressive strength (MPa)	Uniaxial tests
62	(MPa) Saturation compressive strength	
25.2	Young's modulus (GPa)	
24.7	Saturated Young's modulus (GPa)	
0.24	Poisson's ratio	Triaxial test
13.1	cohesion (MPa)	
46	Internal friction angle (deg)	
0.2	cohesion (MPa)	seam surface shear test
35	Internal friction angle (deg)	
0.39 - 0.61	Minimum horizontal to vertical stress ratio	Hydraulic fracture test
0.71 - 1.5	Maximum horizontal to vertical stress ratio	
N 56 -93	Strike Maximum horizontal stress	
20.5	AP1 borehole	lujan's number
27.6	AP2 borehole	
3.3	AP3 borehole	
2.1	AP4 borehole	

قرار گرفت. سپس سعی بر اعمال شرایط مرزی به‌صورت مرزهای جابه‌جایی ثابت در کف و اعمال شرایط مرزی غلظتی در اطراف مدل گردید. همچنین در قسمت بالایی مدل تنش سربار معادل ۹/۵۸ مگاپاسکال اعمال گردید. بعلاوه بر اساس عمق قرارگیری محدوده مورد مطالعه در ۴۸۰ متری سطح زمین، تنش‌های برجا قائم به‌صورت حاصل ضرب وزن واحد حجم و ارتفاع روباره (تنش‌های ثقلی) معادل ۱۳/۲۷ مگاپاسکال در مرکز مدل وارد شد. همچنین تنش برجای افقی در راستای X (عمود بر محور) به‌صورت حاصل ضربی از تنش برجا قائم و بر اساس نتایج حاصل از آزمایش شکست

جهت انجام مدل‌سازی عددی در این پژوهش، ابتدا مغار در حالت بدون آب و خشک در نرم‌افزار UDEC مدل‌سازی شده و سیستم نگهداری موردنظر بر آن اعمال و تحلیل پایداری آن انجام گردید. بدین منظور هندسه مدل مطابق با ابعاد مغار (۲۶/۱ متر عرض، ۴۶/۱ متر ارتفاع و ۸۵ متر طول) ساخته شد و سپس شیب‌های اصلی سه دسته‌درزه اصلی موجود در ساختگاه مغار به شیب ظاهری تبدیل شده و در مدل اعمال گردیدند (شکل ۳-الف). همچنین جهت شناخته‌شدن مغار در حالت بدون زهکشی به‌عنوان مرز و کاهش زمان اجرای نرم‌افزار، نیمی از مقطع مغار در این مرحله مورد مدل‌سازی

جابه‌جایی‌ها پس از حل، کمینه شدن نیروهای نامتعادل کننده به ۰/۱ مقدار اولیه و یکنواخت شدن کنتورهای تنش برجا در مدل ساخته‌شده مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۳-ب قابل مشاهده است نیروی نامتعادل کننده قبل از حفر به عدد صفر همگرا شده است.

شایان ذکر است مرزهای هیدرولیکی نیز به‌صورت جداگانه نسبت به مرزهای مکانیکی در مدل بسته شد. چنانچه در مرز راست مدل مغار وجود دارد و مرز پایینی مدل نفوذناپذیر در نظر گرفته شد و در مرز چپ و بالایی مدل فشار آب اعمال شد (شکل ۳-ج).



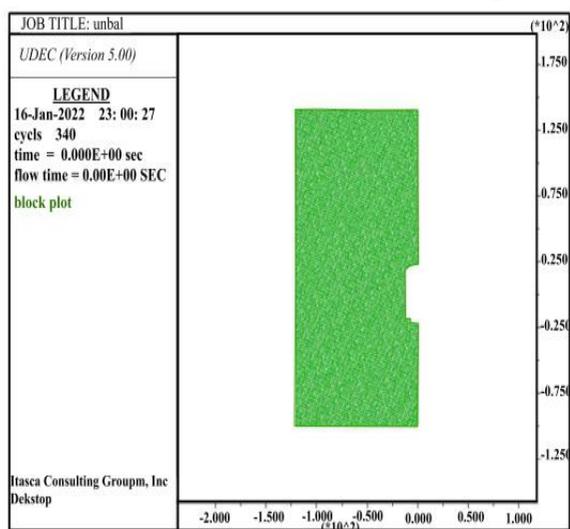
شکل ۳. الف) اعمال دسته‌درزه‌ها در محدوده مغار به مدل، ب) بررسی تعادل اولیه مدل و ج) اعمال فشار هیدرولیکی به مدل بعد از تعادل اولیه (برحسب پاسکال)

نتایج آزمایشگاهی و داده‌های صحرائی با استفاده از عوامل کرنش مجاز، مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول یانگ

هیدرولیکی به مدل اعمال گردید. چنانچه نسبت تنش افقی به قائم در جهت X برابر با ۰/۶۵ می‌باشد. سپس مدل رفتاری الاستیک - پلاستیک کامل موهر - کلمب برای مواد سنگی و مدل لغزش کلمب تماس سطحی برای درزه‌ها در نظر گرفته شد. در ادامه خصوصیات تغییر شکل‌پذیری و مقاومتی مصالح و ناپیوستگی‌ها به شرح جدول ۶ در نرم‌افزار وارد شد. بعد از ساخت هندسه مدل و اعمال شرایط مرزی، پیش از اینکه حفر مدل شروع شود، تعادل مدل مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور به مدل اجازه داده شد تا نیروهای نامتعادل کننده‌ای که به آن وارد می‌شود را حذف کند. بنابراین برای اطمینان از صحیح بودن مدل‌سازی صورت گرفته، ثابت شدن

بعد از بررسی تعادل اولیه، مساحت مفید مغار بر اساس معیار ساکورایی (Sakurai, 1981) حفر گردید. این معیار بر اساس

از آنجا که تراز خطر III میزان جابه‌جایی را که باید قبل از اعمال نگه‌دارنده آزاد شود نشان می‌دهد بنابراین میزان جابه‌جایی که بایستی قبل از اعمال نگه‌دارنده آزاد شود، ۲۸ میلی‌متر می‌باشد. سپس برای تقویت توده سنگ و پایدارسازی فضای حفاری‌شده از اجزا سازنده‌ای برای مدل‌سازی سیستم نگهداری در نرم‌افزار استفاده گردید. بدین منظور المان شاتکریت با استفاده از فرمان لاینر (Liner) و المان پیچ سنگ و انکر با استفاده از فرمان کابل (Cable) در نرم‌افزار مدل شد. جدول ۸ تا ۱۰ خصوصیات شاتکریت مسلح، انکر پیش‌تنیده شده و پیچ سنگ به کاررفته در مدل‌سازی را نشان می‌دهد.



شکل ۴. هندسه مدل پس از حفاری مغار نیروگاه سد آزاد

کردستان در نرم‌افزار UDEC

جدول ۷. مقادیر کرنش بحرانی و جابه‌جایی مجاز مغار نیروگاه در ترازهای مختلف معیار ساکورائی (Sakurai, 1981)

Risk level III		Risk level II		Risk level I		The equivalent radius of the cavern is (m)
Displacement (cm)	Critical strain (%)	Displacement (cm)	Critical strain (%)	Displacement (cm)	Critical strain (%)	
2.8	0.15	6.4	0.34	15	0.8	19

جدول ۸. خصوصیات شاتکریت مسلح با مش فولادی به کار گرفته‌شده در مدل

Density (kg/m ³)	Poisson's ratio	Young's modulus (Gpa)	Thickness (m)
2500	0.2	21	0.25

جدول ۹. خصوصیات انکر پیش‌تنیده شده به کار گرفته‌شده در مدل

Modul (Gpa)	Density (Kg/m ³)	Prestressing (kN)	Mesh	A (mm ²)	length (m)	diameter (mm)	Characteristic
200	7800	450	2×2	1018	8	36	Roof
200	7800	450	3×3	1018	20	36	Wall

تنظیم‌شده و غالباً به‌عنوان روشی استاندارد جهت کنترل کرنش بحرانی در حین حفاری به شرح روابط ۱۱ تا ۱۳ به‌عنوان ترازهای هشدار خطر I, II و III استفاده می‌گردد.

$$\text{Log } \varepsilon = -0.25 \text{ log } E - 0.85 \quad (11)$$

$$\text{Log } \varepsilon = -0.25 \text{ log } E - 1.22 \quad (12)$$

$$\text{Log } \varepsilon = -0.25 \text{ log } E - 1.59 \quad (13)$$

که در این روابط، E مدول تغییر شکل‌پذیری توده سنگ (کیلوگرم نیرو بر سانتیمتر مربع) و ε کرنش بحرانی برحسب درصد می‌باشد.

در شرایط تراز هشدار خطر I تونل مشکل ناپایداری ندارد. کرنش بحرانی حاصل از تراز هشدار خطر II به‌عنوان مبنای طراحی نگهداری تونل‌های مهندسی پیشنهاد شده است و تراز هشدار خطر III پایداری کوتاه‌مدت را نشان می‌دهد. در ادامه با تعیین کرنش مجاز و استفاده از رابطه ۱۴، جابه‌جایی مجاز در ترازهای مختلف به دست می‌آید.

$$\varepsilon_c = \frac{U_c}{a} \quad (14)$$

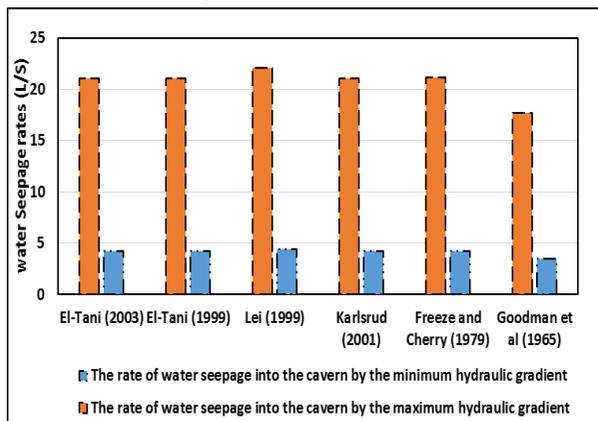
در این رابطه a شعاع معادل مغار و U_c میزان جابه‌جایی می‌باشد.

بنابراین در این پژوهش با حفر مساحت مفید مغار براساس معیار ساکورائی (مطابق شکل ۴) در نرم‌افزار UDEC، مقادیر درصد کرنش بحرانی و جابه‌جایی مجاز در سه تراز خطر ساکورائی مطابق جدول ۷ محاسبه گردید.

جدول ۱۰. خصوصیات پیچ سنگ به کار گرفته شده در مدل

Modul (Gpa)	Density (Kg/m ³)	Mesh	A (mm ²)	length (m)	diameter (mm)	Characteristic
200	7800	1.5×1.5	804	6	32	Roof
200	7800	3×3	491	6	25	Wall

روابط مختلف تحلیلی به دلیل قرارگیری مغار نیروگاه در عمق زیاد، تقریباً برابر بوده و اختلاف ناچیزی دارد و مغار نیروگاه از لحاظ نشست به روش تحلیلی در رده کم‌خطر قرار می‌گیرد.



شکل ۵. میزان نشست ورودی به مغار نیروگاه سد آزاد کردستان

به روش‌های تحلیلی مختلف

۴-۱-۲. نتایج و بحث روش‌های تجربی:

۴-۱-۲-۱. برآورد میزان نشست به مغار به روش‌های SGR و

SGRM

برای به دست آوردن مقدار نشست آب به مغار به روش‌های SGR و SGRM، همان‌طور که در جدول ۱۱ قابل مشاهده است امتیاز هر کدام از گروه‌ها بر مبنای اطلاعات زمین‌شناسی، مکانیک سنگ، خصوصیات ناپیوستگی‌ها و موقعیت مغار مورد بررسی و محاسبه قرار گرفت. در این روش‌ها، نیز چون مقدار فاصله‌داری درزه‌ها متفاوت بود، برای آن بازه در نظر گرفته شد. همچنین از آنجاکه به دلیل ماهیت مکانیک سنگ زمین‌شناسی منطقه در این روش‌ها امتیازی به زون‌های خردشده، کارستی شده و نفوذپذیری خاک تعلق نمی‌گیرد بنابراین امتیاز SGR و SGRM برابر می‌باشد. در مجموع نتایج امتیازدهی این روش حاکی از آن بود که میزان نشست آب به درون مغار در رده کم‌خطر تا نسبتاً خطرناک قرار می‌گیرد (جدول ۱۱).

در نهایت جهت ارزیابی توزیع تنش در شرایط مختلف ضمن انجام تمام مراحل قبل، برای مطالعه شرایط زهکشی شده، فشار آب حفره‌ای در امتداد محیط مغار برابر با صفر قرار داده شد و جریان پایا برای تمامی گره‌ها اختصاص داده شد. همچنین برای مطالعه شرایط بدون زهکشی نیز، فشار آب حفره‌ای در امتداد محیط مغار برابر فشار هیدرواستاتیک در نظر گرفته شد. سپس نتایج در قالب تغییرات توزیع تنش کل، تنش مؤثر و فشار آب حفره‌ای در زمین اطراف مغار به روش عددی (نرم‌افزار UDEC) برای هر کدام از شرایط خشک، زهکشی کامل و بدون زهکشی جهت مقایسه با روش تحلیلی کارنزا-تورس و ژائو (Carranza-Torres and Zhao, 2009) ارائه گردید.

علاوه بر این در این پژوهش، نیروهای داخلی ایجادشده در شاتکریت، همچون نیروی محوری و لنگر خمشی ایجاد شده در پوشش بتنی به همراه نمودار ظرفیت هر کدام از شرایط خشک، زهکشی کامل و بدون زهکشی مغار نیروگاه سد آزاد کردستان با استفاده از نرم‌افزار تحلیل سازه‌ای SAP ترسیم شد.

۴. نتایج و بحث

۴-۱. برآورد مقدار نشست به مغار

۴-۱-۱. نتایج و بحث روش‌های تحلیلی

بر مبنای اطلاعات زمین‌شناسی مهندسی، هیدروژئولوژیکی و ابعاد پروژه (جدول ۳) میزان نشست آب به مغار نیروگاه سد آزاد در ۶ روش تحلیلی مورد بررسی قرار گرفت. به دلیل اینکه تخمین میزان نفوذپذیری در محیط پیوسته، مشکل و غیرقابل اعتماد است بنابراین برای این پارامتر بازه‌ای در نظر گرفته شد و میزان نشست به روش‌های تحلیلی مختلف برآورد گردید. همان‌طور که در شکل ۵ قابل مشاهده است، نتایج

جدول ۱۱. امتیازهای نهایی گروه های موثر در تخمین نشت آب به مغار نیروگاه به روش های SGR و SGRM

SGR-SGRM										
Range	water Seepage rates (L/S)	Rate of Seepage per unit length	Score	S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1
Low to moderately dangerous	3.4 – 13.6	0.04 – 0.16	208-478	1	47.2	0	0	0	2.5	1.91-7.63

پارامترهای این روش امتیاز داد شد که نتایج نهایی مطابق جدول ۱۲ حاکی از آن بود که در این روش مغار نیروگاه در رده II و محدوده کم‌خطر قرار می‌گیرد.

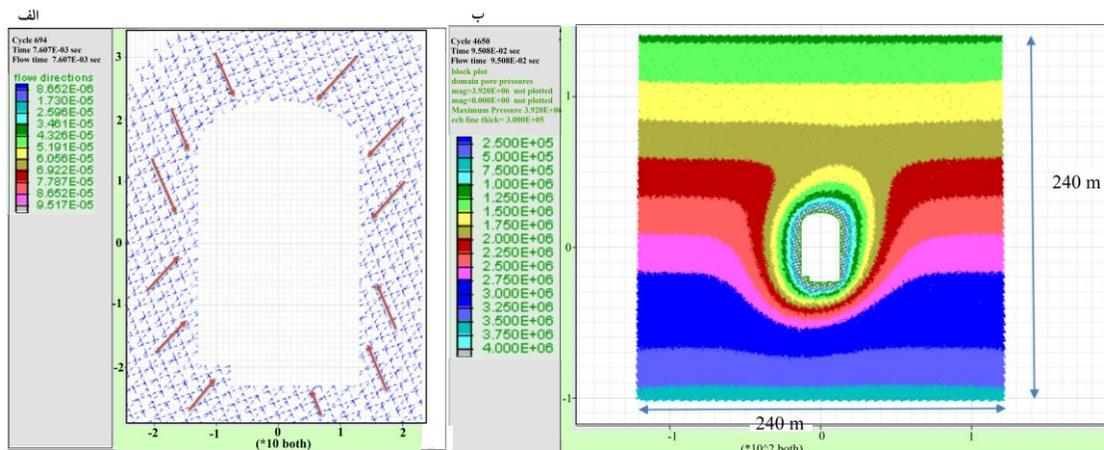
۲-۱-۴ برآورد میزان نشت به مغار به روش *TIC* جهت برآورد میزان نشت آب به مغار براساس روش *TIC* براساس جدول ۵، بر مبنای اطلاعات زمین‌شناسی مهندسی و ویژگی‌های ساختگاه مغار نیروگاه سد آزاد به هرکدام از

جدول ۱۲. امتیازهای نهایی عوامل مؤثر در ورود آب به مغار نیروگاه سد آزاد به روش *TIC*

Range	water Seepage rates (L/S)	Cavern category	total	TD	CBC	UCS (MPa)	RT	RMC	Factors
low risk	18.7- 102	II	22.3	D> 500	CC> 35	Resistant	UCS>50	Group 3	Characteristics
				3.2	8.8	5.3	1.1	3.9	Score

میزان دبی ورودی به مغار گزارش می‌کند (شکل ۶-الف). بنابراین در این مرحله جهت برآورد و تخمین مقدار نشت به مغار، هند سه مدل به صورت تمام مقطع لحاظ و میزان نشت آب به مغار بین ۳۶-۱۶ لیتر بر ثانیه برآورد گردید (شکل ۶-ب). این مقدار نشت خطر کمی را به لحاظ ورود آب به مغار ایجاد می‌کند که به دلیل نفوذپذیری پایین توده سنگ ساختگاه مغار می‌باشد.

۳-۱-۴. برآورد میزان نشت آب به مغار با استفاده از روش عددی همانطور که در قسمت روش تحقیق ذکر شد، فرایند به دست آوردن میزان نشت در نرم‌افزار UDEC بدین صورت است که میزان دبی هر ناپیوستگی که دیواره مغار را قطع کرده و آب از طریق آن به سمت مغار نیروگاه حرکت می‌کند را به دست آورده و باهم تجمیع و درنهایت مقدار نهایی آن را به عنوان



شکل ۶. الف) جهت حرکت آب در اطراف مغار نیروگاه، در حالت زهکشی شده (تمام مقطع) و (ب) هندسه و کانتور فشار آب در حالت زهکشی شده و تمام مقطع مغار نیروگاه

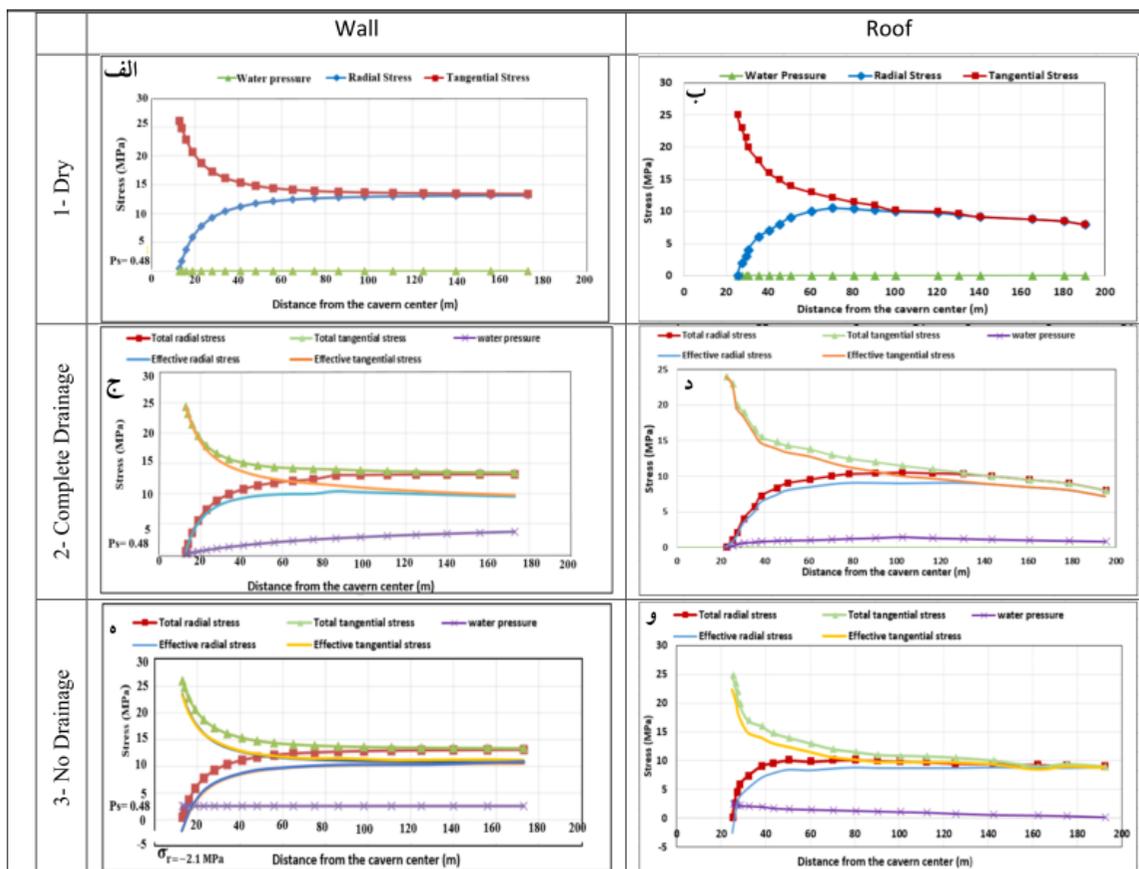
ثابت می‌رسد. از طرفی تنش‌های شعاعی مؤثر و کل نیز برابر بوده و با افزایش فاصله از مغار افزایش می‌یابند تا به مقدار ثابت تنش مؤثر قبل از حفر مغار می‌رسد. همچنین مقدار تنشی که در نتیجه نصب نگه‌دارنده اعمال می‌شود $Ps = 0.48$ مگاپاسکال می‌باشد. البته این نکته را باید در نظر داشت که این رابطه با فرض نسبت تنش افقی به قائم برابر یک می‌باشد. روند نتایج روی سقف مغار در این حالت نیز همانند دیواره مغار می‌باشد با این تفاوت که تنش برجا و فشار آب قبل از حفر با فاصله از سقف مغار کاهش می‌یابد (شکل ۷-ب). در حالت زهکشی شونده همان‌طور که در شکل‌های ۷-ج، د مشخص است فشار آب روی دیواره و سقف صفر می‌باشد و با افزایش فاصله از دیواره و سقف مغار افزایش می‌یابد تا به مقدار ثابت فشار آب قبل از حفر مغار می‌رسد. تنش شعاعی نیز در این حالت در نزدیک دیواره و سقف مغار صفر و با فاصله از دیواره و سقف افزایش پیدا می‌کند. همان‌طور که در شکل‌های ۷-ه، و مشخص است در حالت بدون زهکشی با افزایش فاصله از دیواره مغار، فشار آب ثابت است ولی تنش‌های شعاعی مؤثر با افزایش فاصله از دیواره مغار افزایش می‌یابد. در واقع تنش شعاعی مؤثر در دیواره مغار به دلیل اینکه فشار آب بیشتر از Ps می‌باشد منفی شده و به صورت کششی به شاتکریت وارد می‌شود و چون از مقاومت کششی شاتکریت بالاتر می‌باشد لذا در این حالت شاتکریت پایدار نخواهد بود (مقاومت کششی شاتکریت برابر با ۱ مگا پاسکال و تنش شعاعی وارد به شاتکریت برابر با ۲/۱- مگا پاسکال می‌باشد). بنابراین در مجموع می‌توان گفت با افزایش فاصله از دیواره مغار، مقدار جابه‌جایی در سه حالت خشک، زهکشی شونده و بدون زهکشی کاهش یافته و به صفر نزدیک می‌شود.

با توجه به عدم قطعیت مدل‌های پیش‌بینی نشست آب به فضاهای زیرزمینی، برای اطمینان از صحت برآورد مقدار نشست آب به مغار، مقدار آن جهت اعتبارسنجی در غیاب داده‌های کرنش‌سنج، ژئوفیزیکی و لرزه‌ای با نتایج آزمایش نفوذپذیری (لوژان) و رفتار نگاری توده سنگ (انجام شده توسط شرکت مهندسی مشاور مه‌آب قدس، ۱۳۹۳) مقایسه گردید. نتایج حاکی از همخوانی داده‌ها با یکدیگر بود. چنانچه انجام بالغ‌بر ۶۰ آزمایش لوژان در اعماق مختلف ۴ گمانه در محدوده سازه‌های زیرزمینی نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد کردستان، که میانگین کل اعداد لوژان آن در جدول ۶ ذکر شده، مشخص گردید توده سنگ در محدوده قرارگیری سازه‌های زیرزمینی در رده نفوذپذیری کم تا متوسط قرار می‌گیرد. بنابراین نفوذپذیری پایین فشار آب را در اطراف مغار بالا نگه‌داشته و ایجاد خطر می‌کند. در واقع در خصوص مغار نیروگاه، فشار آب از اهمیت بالاتری نسبت به نشست آب به درون مغار برخوردار است.

۲-۴. بررسی توزیع تنش در دیواره و سقف مغار نیروگاه سد آزاد در شرایط خشک، زهکشی کامل و بدون زهکشی

۱-۲-۴. روش تحلیلی

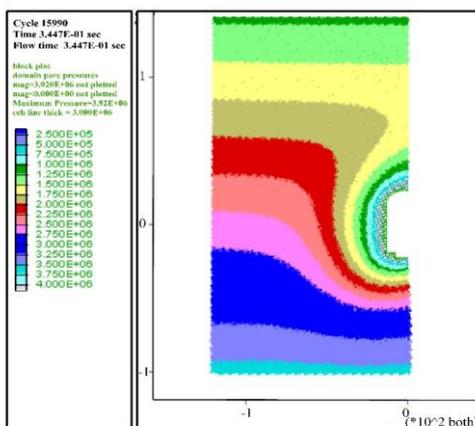
جهت ارزیابی توزیع تنش مغار نیروگاه سد آزاد کردستان از پارامترهای جدول ۴ استفاده و با جایگذاری آن‌ها در معادلات ریاضی و تابع تحلیلی کارنزا-تورس و ژائو (Carranza-Torres and Zhao, 2009) توزیع تنش روی دیواره و سقف مغار در شرایط خشک، زهکشی شونده و بدون زهکشی مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۷-الف قابل مشاهده است در حالت خشک، تنش‌های مماسی مؤثر و کل برابر بوده و با افزایش فاصله از دیواره مغار کاهش پیدا کرده تا به مقدار



شکل ۷. روند نتایج توزیع تنش نسبت به فاصله از مرکز مغار بر اساس روش تحلیلی کارنزا-تورس و ژائو (Carranza-Torres and Zhao, 2009)، در الف) دیواره و ب) سقف مغار در حالت خشک، ج) دیواره و د) سقف مغار در حالت زهکشی کامل و ه) دیواره، و) سقف مغار در حالت بدون زهکشی

در نهایت نتایج و خروجی مدل جهت مقایسه وضعیت توزیع تنش با روش تحلیلی، مطابق شکل ۹ در شرایط خشک، زهکشی کامل و بدون زهکشی برای دیواره و سقف مغار مورد جمع‌بندی قرار گرفت.

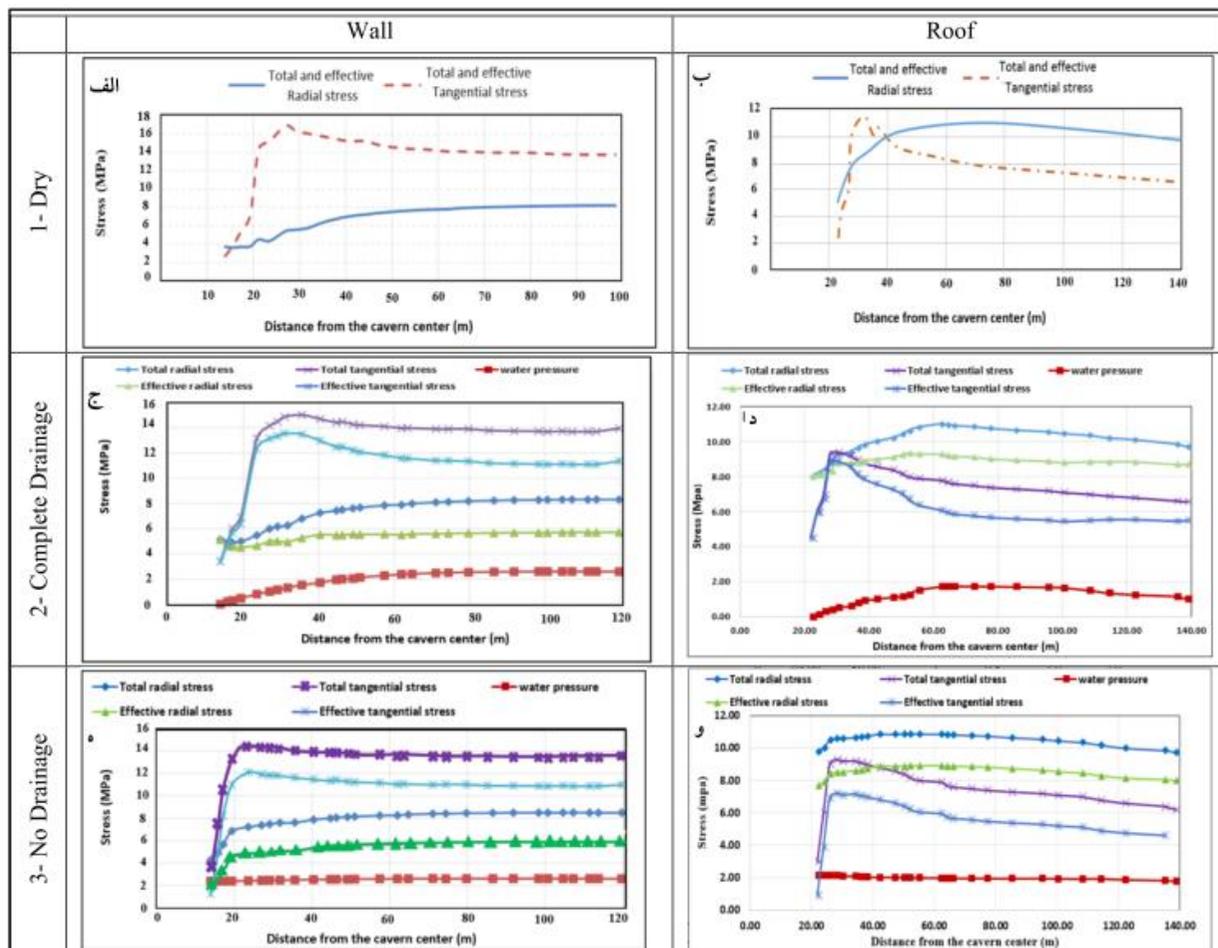
۴-۲. نتایج تحلیل عددی توزیع تنش در اطراف مغار به منظور بررسی توزیع تنش در روش عددی، مدل‌سازی در نرم افزار UDEC در شرایط زهکشی کامل و بدون زهکشی مشابه شرایط خشک به شرح ذکر شده در روش تحقیق، مجدداً تکرار گردید با این تفاوت که در حالت خشک فشار آب حفره‌ای صفر و در حالت زهکشی شده، فشار آب حفره‌ای در امتداد مغار برابر صفر قرار داده شد تا جریان پایدار به تمامی گره‌ها اختصاص داده شود. چراکه در حالت زهکشی شونده آب به سمت مغار حرکت می‌کند و به درون مغار زهکشی می‌شود در این حالت فشار آب به دلیل زهکشی در نزدیکی مغار به صفر می‌رسد (شکل ۸). در حالت بدون زهکشی فشار آب تقریباً ثابت و فشار آب حفره‌ای در امتداد محیط مغار برابر با فشار هیدرواستاتیک در نظر گرفته شد.



شکل ۸. کانتورهای فشار آب در حالت زهکشی شونده مغار

دیواره مغار، فشار افزایش یافته و به مقدار اولیه می‌رسد. از طرف دیگر تنش شعاعی و مماسی کل مانند حالت خشک می‌باشد، بدین صورت که تنش شعاعی با فاصله گرفتن از مرکز مغار افزایش می‌یابد و تنش مماسی کل با فاصله گرفتن از مرکز مغار ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد و به مقدار اولیه می‌رسد اما تنش شعاعی و مماسی مؤثر در این حالت به اندازه فشار آب در هر نقطه از تنش شعاعی و مماسی کل کمتر می‌شود لیکن روند آن تقریباً شبیه تنش کل می‌باشد. همچنین مانند حالت خشک در این حالت نیز تنش‌ها به دلیل کاهش سربار در سقف در فاصله دور از مرکز مغار در حال کاهش یافتن می‌باشند.

چنانچه در حالت خشک همان‌طور که در شکل‌های ۹-الف و ب مشخص است، تنش شعاعی و مماسی کل برابر با تنش شعاعی و مماسی مؤثر می‌باشد. به نحوی که تنش شعاعی در نزدیک مغار کمترین مقدار بوده و با فاصله گرفتن از مغار افزایش می‌یابد تا به مقدار تنش اولیه برسد. تنش مماسی نیز به دلیل تریخس تنش در نزدیکی مغار مقدار آن کم بوده و با فاصله گرفتن از مغار ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد تا به مقدار تنش اولیه برسد. همچنین تنش‌های شعاعی و مماسی در فاصله دور از مغار به دلیل کم شدن سربار با افزایش فاصله از مغار در حال کاهش یافتن می‌باشند. در حالت زهکشی شده همان‌طور که در شکل‌های ۹-ج و د مشخص است فشار آب حفره‌ای در دیواره صفر می‌باشد و به تدریج با دور شدن از



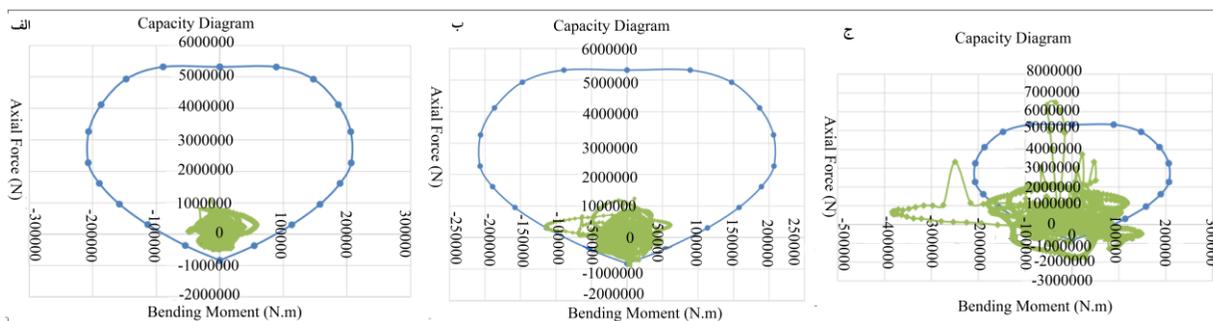
شکل ۹. روند نتایج توزیع تنش نسبت به فاصله از مرکز مغار براساس روش عددی در، الف) دیواره و ب) سقف مغار در حالت خشک، ج) دیواره و د) سقف مغار در حالت زهکشی کامل و ه) دیواره، و) سقف مغار در حالت بدون زهکشی

نیوتون می‌باشد و با توجه به اینکه اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمش در محدوده نمودار ظرفیت قرار دارد لذا شاتکریت در این حالت پایدار خواهد بود. در حالت زهکشی شونده (شکل ۱۰-ب) به دلیل حضور آب، نیروی محوری و لنگر خمشی بیشتری روی شاتکریت قرار دارد اما در این حالت نیز شاتکریت پایدار خواهد بود. البته ضریب اطمینان این حالت کمتر از حالت خشک می‌باشد و در این حالت نیز نیروی محوری کششی و فشاری افزایش یافته است. در حالت بدون زهکشی (شکل ۱۰-ج) نیروی محوری و لنگر خمشی نسبت به دو حالت قبل به مراتب افزایش یافته است. در این حالت به دلیل نیروی محوری و لنگر خمشی بالا و خارج شدن از محدوده نمودار ظرفیت به جهت بالا بودن فشار در پشت شاتکریت پایدار نخواهد بود. البته ذکر این نکته ضروری است که امکان بهینه‌سازی بیشتر هنوز امکان‌پذیر است و میزان توجه این بهینه‌سازی به سطح اطمینان طراح به اطلاعات ورودی در مورد خواص توده سنگ، تنش‌های برجا و میزان قابلیت پیاده‌سازی طرح برای بازتولید نتایج طراحی بستگی دارد به نحوی که بتواند ایمنی بیشتر را تضمین کند و منجر به سنگینی بیش از حد هزینه‌های اقتصادی نشود.

در حالت بدون زهکشی نیز مطابق شکل‌های ۹-ه، و تنش‌های شعاعی و مماسی کل مانند حالت بدون زهکشی می‌باشد اما فشار آب در فاصله‌های مختلف به دلیل کاهش هد آب تقریباً ثابت می‌باشد. همچنین تنش شعاعی و مماسی مؤثر در این حالت به دلیل فشار آب بیشتر، کمتر از حالت بدون زهکشی می‌باشد. تنش مماسی کل در دو حالت زهکشی شونده و بدون زهکشی تقریباً برابر و تنش شعاعی کل نیز در نزدیکی مغار در حالت بدون زهکشی بیشتر از حالت زهکشی شونده است. در مجموع نکته قابل توجه، متفاوت بودن مقدار اولیه تنش شعاعی و مماسی در سقف و دیواره مغار در هر سه حالت خشک، زهکشی شونده و بدون زهکشی به دلیل تنش قائم بودن، تنش مماسی در دیواره و در سقف، تنش مماسی می‌باشد.

۳-۴. تحلیل پایداری شاتکریت مغار

به منظور بررسی نیروهای داخلی ایجادشده در شاتکریت، براساس نیروی محوری و لنگر خمشی ایجادشده در پوشش بتنی، نمودار ظرفیت در شرایط مختلف خشک، زهکشی شده و بدون زهکشی با استفاده از نرم‌افزار تحلیل سازه SAP ترسیم گردید. همان‌طور که در شکل ۱۰-الف مشخص است حداکثر نیروی محوری روی شاتکریت در حالت خشک ۱/۲۳ مگا



شکل ۱۰. نمودار اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی روی شاتکریت در حالت‌های: الف) خشک، ب) زهکشی شونده، و ج) بدون زهکشی

هیدروژئولوژیکی، رفتار هیدرودینامیکی مغار به روش‌های تحلیلی، تجربی و عددی مختلف مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. چنانچه مقدار نشست در روش‌های تحلیلی، روش‌های تجربی SGR و SGRM، روش تجربی TIC و روش عددی به ترتیب بین ۳/۴ تا ۲۲/۱، ۳/۴ تا ۱۳/۶، ۱۸/۷ تا ۱۰۲/۱، ۱۶ تا ۳۶ لیتر بر

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش جهت افزایش دقت در تخمین مقدار نشست آب به مغار نیروگاه سد آزاد کردستان، حصول اطمینان از مقدار آن و همچنین پیشگیری از ناپایداری یا آسیب به مغار بر اثر ناهمسانگردی تنش‌ها و فشار آب در اطراف پوشش آن، با ادغام داده‌های زمین‌شناسی، مکانیک سنگ و

نتایج حاصل از روش عددی بیشترین مقدار فشار وارد به شاتکریت در سه حالت خشک، زهکشی‌شونده و بدون زهکشی مربوط به حالت بدون زهکشی می‌باشد. مطابق نتایج به‌دست‌آمده از روش عددی (نیروی محوری و لنگر خمشی القاشده در شاتکریت) و پیاده کردن آن بر روی نمودار اندرکنش، شاتکریت در حالت خشک و زهکشی‌شونده پایدار و در حالت بدون زهکشی به دلیل قرارگیری نیروی محوری در حالت کشش ناپایدار می‌باشد. در نهایت می‌توان گفت بر اساس نتایج روش عددی ساختگاه مغار سد آزاد کردستان به طراحی زهکش در پشت شاتکریت و سیستم نگهداری مغار، نیاز دارد.

۶. راهکارهای اجرایی پیشنهادی

با توجه به تحلیل توزیع تنش در محدوده مغار نیروگاه سد آزاد کردستان و ناپایدار بودن شاتکریت در حالت بدون زهکشی، جهت تضمین ایمنی و بهینه‌سازی پایداری مغار، تدابیر و راهکارهای اجرایی زیر پیشنهاد می‌گردد: ۱- ارزیابی دقیقی از شرایط هیدروژئولوژیکی و تأثیراتی که هرگونه افت قابل توجه سطح آب زیرزمینی بر مناطق اطراف خواهد داشت را هم برای سناریوی کوتاه‌مدت (در طول ساخت‌وساز) و هم برای سناریوی بلندمدت (مرحله بهره‌برداری) در حداقل یک فصل خشک و یک فصل مرطوب به‌منظور مدیریت و کنترل رژیم هیدروژئولوژیکی جریان در منطقه (با حداقل اثر زیست‌محیطی) انجام گیرد. ۲- با استفاده از تحلیل سازه‌ای و انجام شبیه‌سازی عددی ضخامت پوشش در امتداد مغار بر اساس مدل توزیع تنش و فشار آب به‌گونه‌ای تعیین شود که توزیع تنش مماسی و شعاعی در ضخامت‌های مختلف، از حد مجاز تجاوز نکند. ۳- انجام توجه اساسی به موقعیت‌های ناپیوستگی‌ها و درزه‌ها در مسیر حفاری، چرا که جریان ورودی اولیه معمولاً به دلیل اختلاف فشار هیدرو استاتیک بسیار بیشتر است و باگذشت زمان مقدار جریان ورودی به نفوذ سطحی و منابع آب مجاور بستگی دارد. در مناطق با پتانسیل بالا از جریان‌های آب ورودی به‌خصوص قبل از شروع حفاری می‌توان با ایجاد پوشش بتنی آب‌بند با استفاده از دوغاب سیمان

ثانیه، متغیر بود که بر این اساس مغار نیروگاه به لحاظ خطر نشست در محدوده کم‌خطر تا نسبتاً خطرناک قرار می‌گیرد. این نتیجه با نتایج آزمایش نفوذپذیری و عدد لوژان به دست آمده از توده سنگ ساختگاه مغار اعتبار سنجی گردید. به نحوی که به لحاظ نفوذپذیری نیز، توده سنگ اطراف مغار در رده نفوذپذیری کم تا متوسط قرار می‌گیرد. علیهذا با مقایسه نتایج نشست مربوط به روش‌های تحلیلی و تجربی با روش عددی به نظر می‌رسد روش تحلیلی در اعماق زیاد نتایج مناسبی ارائه می‌دهند.

در مجموع عواملی که باعث تفاوت در مقدار نشست ورودی به مغار نیروگاه در روش‌های تحلیلی، تجربی و عددی شده را می‌توان به دلایل زیر عنوان کرد: ۱- ساده‌سازی شدن فرضیات در مدل‌های تحلیلی (فرض حالت پایدار جریان و همگن بودن توده سنگ)، ۲- تاکید روش‌های تجربی بر ویژگی‌های مختلف منطقه همچون: شرایط توده سنگ (اعم از ساختار توده سنگ، مقاومت توده سنگ، در صد رس و نوع سنگ)، زمین‌شناسی (اعم از توپوگرافی و وجود گسل، چین‌خوردگی و ناپیوستگی) و هیدروژئولوژیکی (اعم از سطح تغذیه آبخوان، هد هیدرولیکی و حضور کارست و چشمه‌ها) و مشخصات تونل (اعم از قطر و عمق تونل) و ۳- دقت پارامترهای ورودی به مدل، نوع مدل رفتاری انتخاب شده و نحوه اعمال شرایط مرزی مکانیکی و هیدرولیکی در روش عددی.

در ادامه پژوهش، جهت بهینه‌سازی مقاومت پوشش، به حداقل رساندن خطر شکستگی و افزایش عمر مفید پوشش مغار، ناهمسانگردی و توزیع تنش‌های شعاعی، مماسی و فشار آب بر پوشش مغار نیروگاه سد آزاد کردستان مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. به نحوی که نتایج حاکی از آن بود مغار سد آزاد کردستان در حالت خشک و زهکشی‌شونده پایدار و در حالت بدون زهکشی ناپایدار می‌باشد. چنانچه بر اساس روش تحلیلی کارانزا-تورس و ژائو تنش شعاعی مؤثر وارد بر شاتکریت در حالت بدون زهکشی منفی و به صورت کششی می‌باشد که این امر باعث ناپایداری آن می‌گردد. بر اساس

رطوبت و ژئوتکستایل‌ها در مواردی که جریان آب خیلی زیاد نیست و در نقاط و یا درزه‌های خاص متمرکز است، در این حالت، کف‌پوش‌ها روی موقعیت نشی‌ها قرار می‌گیرند و با بتن پاشیده می‌شوند. آب از طریق لوله‌ها یا شیارها به سیستم زهکشی تونل هدایت می‌شود. این ژئوتکستایل و پارچه‌های ژئوتکنیکی را می‌توان در کل محیط تونل یا اغلب به صورت نوارهایی با الگوی مشخص درجایی که نشی رخ می‌دهد، استفاده کرد. ۸- انجام آزمایش کنترل کیفیت پس از نصب زهکش و پوشش جهت اطمینان از عملکرد مطلوب زهکش، ۹- پایش و بررسی عملکرد سیستم زهکشی به دلیل وجود نگرانی مبنی بر اینکه سیستم‌های زهکشی ممکن است در طول عمر طراحی سازه به‌طور مؤثری که در طراحی فرض شده است، به دلیل تغییر رژیم هیدروژئولوژیکی عمل نکنند. بنابراین این تدبیر امکان اقدامات اصلاحی به‌موقع را فراهم می‌کند و ۱۰- نظارت بر عملکرد مغار پس از ساخت‌وساز، با استفاده از

نتایج ابزار دقیق

تقدیر و تشکر

از آنجاکه این پژوهش بخشی از دستاوردهای پایان نامه کارشناسی ارشد نویسنده ردیف اول می‌باشد بنابراین در پایان از دانشگاه تربیت مدرس و شرکت مهندسی مشاور مه‌اب قدس که امکان انجام این پژوهش را فراهم آورده و ما را در انجام آن یاری نموده تشکر و قدردانی می‌گردد.

میکرو پایدار با ویسکوزیته پایین، عملیات آب‌بندی را انجام داد. البته با توجه به نفوذپذیری پایین لایه‌ها و عدم تزریق پذیری (نتایج آزمایش لوژان گمانه‌ها)، در محدوده سازه‌های زیرزمینی نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد کردستان به نظر می‌رسد تزریق و ایجاد پرده آب‌بند پیرامون سازه‌ها چندان مثمر ثمر نخواهد بود. ۴- طراحی و احداث گالری زهکش (به عنوان گزینه اصلی پیشنهادی در محل پروژه) با قطر و عمق مناسب، فاصله بهینه (وابسته به مقدار نفوذپذیری و دبی ورودی آب)، شیب ملایم (جهت ایجاد جریان ثقلی) و مصالح و پوشش‌های زهکشی استاندارد همچون ژئوتکستایل‌ها پیرامون دیواره مغار و همچنین با طول سرتاسری در امتداد مغار به‌نحوی که احداث آن بتواند جریان آب با دبی پیش‌بینی‌شده را بدون ایجاد فشار اضافی و ایجاد رسوب و گرفتگی عبور و فشار هیدرواستاتیک اطراف مغار را کاهش دهد. ۵- استفاده از توری‌های چکه‌ای (Drip Screens) با توجه به نصب آسان و سریع، قیمت ارزن، نمای زیبای آن‌ها، ۶- استفاده از سیستم آب‌بندی ژئوممبران PVC به ترتیب نصب از: سنگ و خاک، سیستم نگهداری اولیه، ژئوتکستایل زهکش و محافظ، دیسک‌های اتصال، ژئوممبران PVC و پوشش داخلی ساخته‌شده از بتن مسلح، به دلایل ضد آب بودن ۱۰۰ درصد، امکان تطبیق فنی بسیار خوب نسبت به سطوح آب‌بندی با سرعت پیشرفت کار متغیر، امکان نصب بر روی سطوح خیس و نمناک، جوش‌پذیری ایدئال، امکان تعمیر آسان و سریع در صورت بروز آسیب توسط عوامل ساخت قبل از اجرای پوشش بتنی، ۷- استفاده از کف‌پوش‌های جاذب

منابع

- امیری، س.، محمدی قلعه عزیز، و.، صباغ کرمانی، ر.، فهیمی فر، ا.، ۱۳۹۴. بهبود روابط نظری برای رسم منحنی مشخصه زمین در تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی با در نظر گرفتن شرایط زهکشی شده، نشریه مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی، دوره ۴، شماره ۱، صفحات ۱۲-۱.
- توسلی، ا.، مختارپور، ا.، عساکره، ع.، پی‌شکاری، ع.، ۱۳۹۸. بررسی تأثیر هم‌زمان فشار داخلی آب و نیروی تراوش بر پوشش تونل‌های آب بر تحت‌فشار، نشریه سد و نیروگاه‌های برق‌آبی، سال ۶، شماره ۲۳، صفحات ۱۲-۲.
- جعفرزاده، ا.، صابری نصر، ا.، هاشم نژاد، آ.، ۱۴۰۱. ارزیابی عملکرد روش بدون شبکه در شبیه‌سازی عددی هجوم آب به درون تونل، نشریه علوم و فنون سازندگی، دوره ۳، شماره ۳، صفحات ۴۷-۳۷.
- رئیس‌سی، ح.، ۱۳۹۵. بررسی تأثیر فشار آب زیرزمینی بر روی سیستم نگهداری موقت تونل - مطالعه موردی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس.

زارعی، ه.، احمدی، م.، شاهوردیلو، م.، ر.، ۱۳۹۷. بررسی پایداری درازمدت مغار نیروگاه سد آزاد با استفاده از نتایج ابزار دقیق، نشریه مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی، دوره ۷، شماره ۱، صفحات ۶۲-۴۲.

شمس، ق.، شریف‌زاده، م.، جوادی اصطهباناتی، م.، ۱۳۹۲. شناسایی مسیرهای اصلی جریان سیال اطراف حفریات زیرزمینی با استفاده از روش ترکیبی شبکه شکستگی مجزا و اتومات سلولی، نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن، دوره ۸، شماره ۲۱، صفحات ۷۵-۶۶.

صداقتی، ز.، میکائیل، ر.، بخت آور، ع.، محمدنژاد، م.، ۱۳۹۸. تحلیل فازی و مدیریت ریسک هجوم آب زیرزمینی در تونل راه امام‌زاده هاشم (ع)، با رویکرد تحلیل عددی و FMEA در شرایط عدم قطعیت، نشریه روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، ۱۳۹۸، شماره ۱۹، صفحات ۱-۱۶.

عالی انوری، ع.، سلطانی محمدی، س.، میری، م.، ۱۳۹۸. برآورد فرار آب از پی و تکیه‌گاه‌های سد آزاد کردستان با استفاده از روش زمین‌آماري شاخص چندگانه و مقایسه آن با مقادیر طبیعی، نشریه علوم زمین، دوره ۲۸، شماره ۱۱۱، صفحات ۲۰۲-۱۹۵.

عالی انوری، ع.، هاشمی جبلی، س.، م.، ۱۳۹۶. جانمایی بهینه افقی میان فضاهای بزرگ‌مقیاس در سنگ‌های با تناوب سخت و ست - مطالعه موردی فضاهای زیرزمینی نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد کردستان، نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق‌آبی، سال ۴، شماره ۱۲، صفحات ۵۲-۴۵.

قربانی ننه کران؛ ص.، ۱۳۸۸. تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری تونل‌های البرز در محدوده تحت فشار آب زیرزمینی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

قلی زاده خاصوانی، ش.، نعی، م.، مرادی، ف.، ۱۳۹۹. ارزیابی نشت آب زیرزمینی در کیلومتر ۶/۴ تونل خط ۷ مترو تهران با نرم‌افزار SEEP/W و مقایسه نتایج با روش‌های تحلیلی و مشاهدات، نشریه هیدروژئولوژی، دوره ۵، شماره ۲، صفحات ۱۵-۱.

کارگر، ع.، ر.، رحمان نژاد، ر.، حاج عباسی، م.، ع.، ۱۳۹۷. تحلیل پارامتری تونل‌های هیدرولیکی با مقطع نعل اسبی نسبت به عوامل مؤثر در طراحی لاینینگ بتنی با استفاده از توابع پتانسیل مختلط، نشریه مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی، دوره ۶، شماره ۱، صفحات ۵۶-۴۴.

لنجانی، م.، آل محمد، س.، م.، ص.، رابطی مقدم، م.، ۱۴۰۰. توزیع تنش اطراف تونل‌های نیم‌دایره‌ای به روش تحلیلی (توابع مختلط) و مقایسه با نتایج تحلیل عددی، نشریه مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی، دوره ۱۰، شماره ۴، صفحات ۴۱۲-۳۹۱.

مرسلی، م.، ۱۴۰۰. تکمیل روش SGR با داده‌های واقعی در برآورد آب وردی به تونل‌های سنگی، نشریه علمی پژوهشی مکانیک سنگ، دوره ۵، شماره ۴، صفحات ۵۳-۶۲.

مرسلی، م.، نعی، م.، رضایی، م.، ناصری، ح.، ر.، حسن‌پور، ج.، ۱۳۹۷. مقایسه روش‌ها و متغیرهای مؤثر در آب ورودی به تونل‌های سازندهای سخت، تونل انتقال آب سد کرج به تهران، نشریه علوم زمین، سال ۲۷، شماره ۱۰۷، صفحات ۱۲۲-۱۱۳.

معینی رودبالی، ه.، کتیبه، ه.، گلابتونچی، ا.، ۱۳۹۰. تحلیل نشت مخزن ذخیره آب نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد و گزینش روش بهینه آب‌بندی، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۴۳، شماره ۲، صفحات ۴۱-۳۵.

ملکی پور، ا.، امامی میبدی، ع.، ا.، مشرفی فر، م.، ر.، اجل لوییان، ر.، ۱۳۹۹. بررسی روند نشت آب با استفاده از روش شبکه شکستگی‌های مجزا (مطالعه موردی: تونل گردنه رخ)، نشریه مهندسی عمران مدرس، دوره ۲۰، شماره ۱، صفحات ۱۵۹-۱۴۷.

موسی زاده، س.، ا.، گشتاسبی، ک.، قزوینیان، ع.، ا.، ۱۳۹۲. مقایسه روش‌های عددی در تحلیل پایداری مغار نیروگاه زیرزمینی مسجدسلیمان، نشریه روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، شماره ۵، صفحات ۹۸-۸۹.

Ataie-Ashtiani, B., Volker, R.E., Lockington, D.A., 1999. Numerical and experimental study of seepage in unconfined aquifers with a periodic boundary condition. *Journal of Hydrology*, 222(1-4): 165-184.

Bilfinger, W., 2005. Design procedures for ground water loads on tunnel linings. *Symposium on Waterproofing of Underground Structures (P. 61-70)*, San Paulo, Brazil.

BSI (British Standards Institution), 2004. BS EN-1062-7:2004 Paints and Varnishes - Coating materials and coating systems for exterior masonry and concrete, Part 7: Determination of crack bridging properties.

BSI (British Standards Institution), 2009. Code of practice for protection of below ground structures against water from the ground.

- BSI (British Standards Institution), 2019. BS EN 12390-8:2019 Testing hardened concrete depth of penetration of water under pressure.
- Cao, C., Xu, Z., Chai, J., Qin, Y., Cao, J., 2021. Determination method for influence zone of pumped storage underground cavern and drainage system. *Journal of Hydrology*, 595, 126018.
- Carranza-Torres, C., Zhao, J., 2009. Analytical and numerical study of the effect of water pressure on the mechanical response of cylindrical lined tunnels in elastic and elasto-plastic porous media. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(3): 531-547.
- Cherry, J.A., Freeze, R.A., 1979. *Groundwater* (P. 370). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Dadashi, E., Noorzad, A., Shahriar, K., Goshtasbi, K., 2017. Hydro-mechanical interaction analysis of reinforced concrete lining in pressure tunnels. *Tunneling and Underground Space Technology*, 69: 125-132.
- EL TANI, M., 1999. Water inflow into tunnels. *Proceedings of the World Tunnel Congress ITA-AITES* (P. 61-70).
- EL TANI, M., 2003. Circular tunnel in a semi-infinite aquifer. *Tunneling and underground space technology*, 18(1): 49-55
- Fahimifar, A., Ghadami, H., Ahmadvand, M., 2015. An elasto-plastic model for underwater tunnels considering seepage body forces and strain-softening behaviour. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 19(2): 129-151.
- Frenelus, W., Peng, H., Zhang, J., 2021. Evaluation methods for groundwater inflows into rock tunnels: a state-of-the-art review. *International Journal of Hydrology*, 5(4): 152-168
- GEO (Geotechnical Engineering Office), civil engineering department the government of the Hong Kong special administrative region, 2018. *Guide to cavern engineering. Geoguide 4, Second Edition* (P. 265).
- Goodman, R.E., Moye, D.G., Van Schalkwyk, A., Javandel, I., 1965. Ground water inflows during tunnel driving, *Engineering Geology*, 2(1), 39-56.
- Guo, Y.F., Wang, H.N., Jiang, M.J., 2023. An exact analytical approach for determining the seepage field around underwater twin tunnels with linings. *Transportation Geotechnics*, 42, 101050.
- Heuer, R., 2001. *Estimating Rock tunnel water inflow*. Geotechnical consulting McHenry.
- Hu, H., Kikumoto, H., Ooka, R., Lin, C., Zhang, B., 2022. Comprehensive validation of experimental and numerical natural ventilation predictions based on field measurement with experimental house. *Building and Environment*, 207, 108433.
- Hu, K., Yao, L., Liao, J., Wang, H., Luo, J., Xu, X., 2024. Predicting Water Inflow in Tunnel Construction: A Fracture Network Model with Non-Darcy Flow Considerations. *Water*, 16(13), 1885.
- Hung, C.J., Wisniewski, J., Monsees, J., Munfah, N., 2009. *Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels-Civil Elements* (No. FHWA-NHI-10-034). National Highway Institute (US).
- Hwang, J.H., Lu, C.C., 2007. A semi-analytical method for analyzing the tunnel water inflow. *Tunneling and Underground Space Technology*, 22(1): 39-46.
- Inokuma, A., Ishimura, T., 1995. Earth pressure acting on shield driven tunnels in soft ground. In *Underground construction in soft ground* (P. 221-224).
- Itasca Consulting Group, 2009. UDEC – Universal Distinct Element Code, Version 4.0. Minneapolis: Itasca.
- Karlsrud, K., 2001. Control of water Seepage when tunneling under urban areas in the Oslo region. *NFF Publication*, 12(4): 27-33
- Katibeh, H., Aalianvari, A., 2009. Development of a New Method for Tunnel Site Rating from. *Journal of applied sciences*, 9(8): 1496-1502.
- Kulpa, J., Kopacz, M., Stecula, K., Olczak, P., 2024. Pumped Storage Hydropower as a Part of Energy Storage Systems in Poland-Młoty Case Study. *Energies*, 17(8): 1-23.
- Kuyt, J. 2015. *Observed loading behavior during cross passage construction for Brisbane airport link project*. Colorado School of Mines (Master's thesis).
- Lei, S., 1999. An analytical solution for steady flow into a tunnel. *Groundwater*, 37(1): 23-26.
- Li, Z., Xiao, J., Wan, J., Cheng, J., Feng, H., Zhan, H., Huang, K., 2024. A dynamic modeling approach to predict water inflow during tunnel excavation in relatively uniform rock masses. *Tunneling and Underground Space Technology*, 146: 105668.

- Liu, J., Gokdemir, C., Li, X., Xi, Y., 2025. Experimental and Analytical Study on the External Water Pressure of a Composite Lining Considering the Waterproofing and Drainage System. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 58(1): 1099-1115.
- Lung, J.K., Lu, Y., Hung, W.L., Kao, W.S., 2007. Modeling and dynamic simulations of doubly fed adjustable-speed pumped storage units. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22(2): 250-258.
- Jiajia, S., Hu, Z., Li, W., Changan, Z., Xing, S., Zhanquan, L., Jie, S., 2022. Causes of tunnel diseases in a karst stratum and remediation measures: a case study. *Frontiers in Earth Science*, 10: 882058.
- Mahmoodzadeh, A., Mohammadi, M., Noori, K. M.G., Khishe, M., Ibrahim, H.H., Ali, H.F.H., Abdulhamid, S.N., 2021. Presenting the best prediction model of water inflow into drill and blast tunnels among several machine learning techniques. *Automation in Construction*, 127, 103719.
- Pelz, U., Karlovšek, J., 2023. Spray-applied waterproofing membranes in tunnelling: A construction perspective. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 142, 105409.
- Peng, H., Frenelus, W., Zhang, J., 2022. Key factors influencing analytical solutions for predicting groundwater inflows in rock tunnels. *Water Supply*, 22(11): 7982-8013.
- Perazzelli, P., Leone, T., Anagnostou, G., 2014. Tunnel face stability under seepage flow conditions. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 43: 459-469.
- Rutqvist, J., Kim, H.M., Ryu, D.W., Synn, J.H., Song, W.K., 2012. Modeling of coupled thermodynamic and geomechanical performance of underground compressed air energy storage in lined rock caverns. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 52: 71-81.
- Sakurai, S., 1981. Direct strain evaluation technique in construction of underground opening. In *ARMA US Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium (P. ARMA-81)*. ARMA.
- Shen, J., Bao, X., Chen, X., Bao, Z., Cui, H., 2025. Study on effect of fibers reinforcement on sand soil liquefaction mitigation and shield tunnel stability under seismic conditions. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 163, 106765.
- SIA (Swiss Engineer and Architect Association), 2014. *Swiss Norm SIA 270 Waterproofing and Drainage - General Basis and Differentiations*.
- Strassenwesen, B.F., 2018. *ZTV-ING Part 5 Tunnel construction, Chapter 5 Sealing of road tunnels with synthetic liners Additional technical terms of contract and guidelines for civil engineering works (German designation: ZTV-ING)*.
- Su, Y., Huang, Y., Shen, H., Jiang, Y., Zhou, Z., 2022. An analytical method for predicting the groundwater inflow to tunnels in a fractured aquifer. *Hydrogeology Journal*, 30(4): 1279-1293.
- ITAtch Activity Group (International Tunnelling and Underground Space Association Activity Group), Melbye, T., Babendererde, T., Bonin, K., Dimmock, R., Greensted, S., Gregory, F., Haig, B., Kothe, T., Maslev, K., Reinhold, M., Saraiva, E., Tansini, G., Wetzig, V., 2013. *ITAtch Design Guidance for Spray Applied Waterproofing Membranes*, ISBN 978-2-9700858-1-2 2013 64.
- Thapa, B.B., Nolting, R.M., Teske, M.J., McRae, M.T., 2005. Predicted and observed groundwater inflows into two rock tunnels. *RECT proceedings (P. 556-567)*.
- Wang, X., Wang, M., Zhang, M., Ming, H., 2008. Theoretical and experimental study of external water pressure on tunnel lining in controlled drainage under high water level. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(5): 552-560.
- Xu, Y., Bao, T., Yuan, M., Liu, Y., Zhang, S., 2024. Analytical Solution for Lined Circular Water Conveyance Tunnels under the Action of Internal and External Hydraulic Pressure. *Applied Sciences*, 14(17), 7443 .
- Zarei, H.R., Uromeihy, A., Sharifzadeh, M., 2013. A new tunnel inflow classification (TIC) system through sedimentary rock masses. *Tunneling and underground space technology*, 34: 1-12.
- Zhao, C., Yu, H., Zhang, Z., Lei, Q., 2025. Modelling lined rock caverns subject to hydrogen embrittlement and cyclic pressurisation in fractured rock masses. *International Journal of Hydrogen Energy*, 150027.