

**R. Mikaeil\***

Faculty of Mining and  
Metallurgical Engineering,  
Urmia University of  
Technology.

**e-mail:** Reza.mikaeil@gmail.com

**M. Ataei**

Faculty of Mining, Petroleum  
and Geophysics, Shahrood  
University of Technology.

**e-mail:** Ataei@shahroodut.ac.ir

**F. Sereshki**

Faculty of Mining, Petroleum  
and Geophysics, Shahrood  
University of Technology.

**e-mail:** F.sereshki@gmail.com

**A. Jafarpour**

Department of Mining and  
Metallurgical Engineering,  
Yazd University.

**e-mail:**  
Amir.jafarpour@stu.yazd.ac.ir

## **Evaluation of the Environmental Impacts of Groundwater Levels Drop Due to the Excavation of Large-Scale Tunnels (Case Study: Kouhin Rail-Way Tunnel)**

*Today, one of the challenges in safety management of underground excavations is the water inflow into them. The tunnels and underground constructions are causing to remove a pile of soil and rock area and significant changes in the state of tension it's around environment. Invasion of groundwater into the excavation area is a major problem in excavation of tunnels that is located below the hydrostatic levels. The underground-water inflow into the tunnels is an important issue in the tunnel engineering. The subsidence of the ground in hydrostatic levels, reduce the aqueduct water resources and springs that are located in downstream of the tunnel, are environmental problems of the tunnel excavation operations. In the present study, the groundwater inflow into the Kouhin tunnel railway is modeling with FLAC<sup>2D</sup> software. The effects of groundwater inflows in the tunnel that while excavation are studied by numerical model. In other hands, initially investigated the adverse environmental effects caused by the Kouhin railway tunnel excavation (subsidence the ground water levels and changes in the groundwater inflow in the region) and then provide some strategies for reducing these effects. The strategies that can be used in prevention of groundwater flow into the underground tunnels are: Underground water level recovery with application of concrete sealing operations without drainage and simultaneous use of forepoling methods that to be presented as a solution to reduce environmental impact. Doing this requires using of concrete lining with high strength properties to withstand hydrostatic pressure of water collected on the back cover.*

**Keywords:** Safety Management, Environmental Impact, Ground Subsidence, Groundwater Level, FLAC<sup>2D</sup>

---

\* Corresponding author

Received 05 May 2019, Revised 21 August 2019, Accepted 09 September 2019.  
DOI: 10.22091/cer.2019.4328.1150

## تحلیل عددی حفر تونل‌های بزرگ مقطع و ارزیابی اثرات زیست‌محیطی ناشی از افت سطح آب زیرزمینی (مطالعه موردی: تونل راه آهن کوهین محور قزوین-رشت)

امروزه یکی از چالش‌های مدیریت ایمنی فضاهای زیرزمینی در حال ساخت، جریان یافتن آب به داخل این تونل است. این موضوع یکی از مهم‌ترین مسائلی محسوب می‌شود که آثار مخربی بر روند عملیات حفر تونل و فعالیت‌های جنبی بعد از آن (نصب سامانه نگهداری) دارد؛ بنابراین محاسبه میزان نرخ نفوذ آب به داخل تونل به‌منظور پیش‌بینی تمهیدات ایمنی، قبل از شروع عملیات تونل‌زنی اهمیت بسزایی دارد. علاوه‌بر اثرات نامطلوب زیست‌محیطی ناشی از افت سطح آب زیرزمینی، رخ دادن پدیده نشست در سطح بالای تونل و سطح ایستابی و تغییر روند جریان آب زیرزمینی در منطقه، از جمله مواردی است که در صورت عدم توجه به آنها، حوادث و سوانح غیرقابل جبرانی اتفاق می‌افتد. بنابراین باید تمهیدات لازم برای کاهش وقوع این حوادث در نظر گرفته شود. در این پژوهش، اثرات نامطلوب زیست‌محیطی ایجاد شده در اثر حفر تونل راه آهن کوهین مورد بررسی قرار گرفته است که شامل نشست زمین در سطح ایستابی و تغییر در روند جریان آب زیرزمینی در منطقه می‌شود. راهکارهایی برای کاهش این اثرات ارائه شده است که می‌توان به بازیابی سطح آب زیرزمینی با استفاده از پوشش بتنی آب‌بند بدون انجام عملیات زکشی و به کارگیری همزمان روش فورپولینگ اشاره کرد. به کارگیری این موارد، مستلزم استفاده از پوشش بتنی با خصوصیات مقاومتی بالا جهت تحمل فشار هیدرولاستاتیکی آب جمع شده در پشت پوشش است.

**وازگان کلیدی:** مدیریت ایمنی، نشست زمین، سطح آب زیرزمینی، FLAC<sup>2D</sup>.

نوع از فضاهای زیرزمینی، نشست سطح زمین از جمله مسائل بسیار مهمی است که باید توجه ویژه‌ای را بدان معطوف کرد [1]. حفر تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی، منجر به حذف توده‌ای از خاک و سنگ محل شده و باعث ایجاد تغییرات قابل ملاحظه‌ای در وضعیت تنش‌های برجای اطراف این سازه‌ها می‌شود. از سوی دیگر، حفر تونل باعث تغییر شرایط و وضعیت تنش‌های مؤثر و برجا در زمین می‌شود که موجب تغییر شکل‌هایی در آن خواهد شد؛ به این ترتیب که تاج تونل در اثر فرآیند حفر نشست

رضا میکائیل\*

دانشیار، دانشکده مهندسی معدن  
و مواد، دانشگاه صنعتی ارومیه.  
پست الکترونیک:  
Reza.mikaeil@gmail.com

محمد عطا‌ایی

استاد، دانشکده مهندسی معدن،  
ژئوفیزیک و نفت، دانشگاه صنعتی  
شهرورد.  
پست الکترونیک:  
Ataei@shahroodut.ac.ir

فرهنگ سرشكى

استاد، دانشکده مهندسی معدن،  
ژئوفیزیک و نفت، دانشگاه صنعتی  
شهرورد.  
پست الکترونیک:  
F.sereshki@gmail.com

امیر جعفرپور

دانشجوی دکتری، دانشکده  
مهندسی معدن و متالورژی،  
دانشگاه یزد.  
پست الکترونیک:  
Amir.jafarpour@stu.yazd.ac.ir

### ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، احداث تونل برای اهداف مختلف در مناطق شهری، جاده‌ای و معدنی افزایش چشمگیری داشته است. با توجه به توسعه روزافزون به کارگیری این

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۵/۰۲/۱۳۹۸، بازنگری ۳۰/۰۵/۱۳۹۸، پذیرش ۱۸/۰۶/۱۳۹۸.  
DOI: 10.22091/cer.2019.4328.1150

شده است که در ادامه، به برخی از آنها به اختصار اشاره می‌شود.

کسانو<sup>۱</sup> و همکاران، پارامترهای تنظیم‌کننده ورود آب‌های زیرزمینی به تونل‌های حفاری شده در سنگ‌های سخت را با استفاده از مطالعات آماری و عددی ارزیابی کردند و تونل بولمن<sup>۲</sup> (واقع در جنوب سوئد) را در قالب مطالعه موردي بررسی کردند [۵]. لی و نام<sup>۳</sup> نیز در پژوهش خود به مطالعه نیروهای ناشی از نشت آب‌های زیرزمینی در تونل‌های کم‌عمق پرداختند و با استفاده از روش‌های عددی، نقش سامانه نگهداری فعال تونل را تحلیل کردند [۶]. محققان دیگری در قالب یک مطالعه موردي، به بررسی عملیات حفاری تونل‌های سنگی در حین مواجهه با آب‌های زیرزمینی پرداختند. این پژوهشگران، مطالعه خود را بر روی تونل‌های تایوان انجام دادند [۷]. همچنین در پژوهشی دیگر، تحلیل عددی تأثیر جریان آب‌های زیرزمینی بر رفتار بلندمدت تونل‌ها بررسی شده و نتایج پژوهش با شرایط واقعی حفر تونل اعتبارسنجی گردید [۸]. مالینزو<sup>۴</sup> و همکاران نیز در مطالعه‌ای به مدل‌سازی عددی پاسخ هیدرولوژیکی گذرا که توسط حفاری تونل در سنگ بستر خردشده ایجاد می‌شود، پرداختند [۹]. پژوهشگران در تحقیقی، رویکردهای مدل‌سازی عددی جایگزین برای جریان آب زیرزمینی در سنگ‌های شکننده و درزهای را مقایسه کردند [۱۰]. در مطالعه مارشال و پرچت<sup>۵</sup>، راه حل تحلیلی- عددی نوینی برای ارزیابی تعامل هیدرولیکی بین تونل‌ها و آب‌های زیرزمینی معرفی شده است [۱۱]. تأثیر تونل بر سطح آب‌های زیرزمینی توسط بونومی و بلینی<sup>۶</sup> مورد بررسی قرار گرفت و یک روش مدل‌سازی عددی نیز برای پیش‌بینی آن ارائه شد [۱۲]. در پژوهشی دیگر،

می‌کند و امکان دارد در نهایت به نشست سطح زمین منجر شود [۲].

هجوم آب به داخل فضای حفرشده، یکی دیگر از مشکلات اساسی در حفر تونل‌های واقع در زیر سطح ایستابی است [۳]. این عامل نیز مهندسین طراح را در تعیین دقیق سرعت پیشروی و طراحی سامانه نگهداری در حین برنامه‌ریزی و طراحی پروژه دچار مشکل می‌کند. بنابراین به دلیل تأثیر مستقیم این پدیده‌ها بر سایر مراحل عملیات حفر، محاسبه میزان نرخ نفوذ آب به داخل تونل و مدیریت ریسک مخاطرات حاصل از آن، بسیار ضروری است. از جمله مواردی که در این زمینه موجب بروز مشکلات زیستمحیطی می‌شود، عدم مدیریت لازم برای کنترل نشت آب ورودی به تونل است [۴]: به طوریکه عدم مدیریت لازم، در برخی موارد موجب توقف کامل عملیات حفر، نشست در سطح ایستابی و خشک شدن قنات‌ها و چشم‌های پایین‌دست محدوده حفر تونل می‌شود که عدم توجه به این مسائل، پیامدهای ناگواری را در پی دارد.

به‌منظور پیشگیری از این عوارض مخرب، ضروری است که با انجام محاسبات و تحلیل مدل‌های متعدد، جنبه‌های مختلف آنها مشخص شده و در راستای جلوگیری از سوانح آتی و کاهش صدمات احتمالی نیز گام‌های سازنده‌ای برداشته شود. در پژوهش حاضر، سعی شده است تا به تحلیل و ارزیابی اثرات مخرب زیستمحیطی ناشی از افت سطح آب زیرزمینی پرداخته و همچنین راهکارهایی برای کاهش این اثرات در تونل بزرگ‌مقطع راه‌آهن کوهین (محور قزوین- رشت) ارائه شود.

## ۲- پیشینه پژوهش

در خصوص تحلیل عددی حفر تونل‌های واقع در زیر سطح ایستابی و نیز ارزیابی اثرات مخرب زیستمحیطی این نوع سازه‌ها، مطالعات ارزندهای انجام

<sup>۱</sup>- Cesano

<sup>۲</sup>- Bolmen tunnel

<sup>۳</sup>- Lee and Nam

<sup>۴</sup>- Molinero

<sup>۵</sup>- Maréchal and Perrochet

<sup>۶</sup>- Bonomi and Bellini

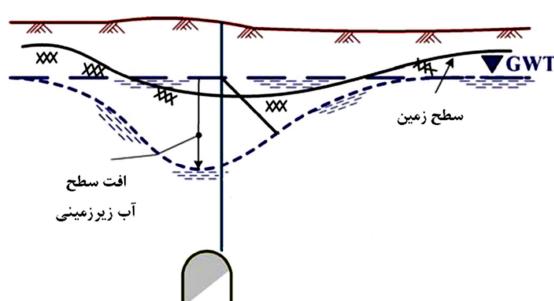
زیرزمینی با حالت پایدار به تونل متروی تبریز (خط ۲) با در نظر گرفتن ویژه ابعاد مدل پرداختند [۲۴]. در پژوهشی دیگر نیز، رویکرد تحلیلی- عددی جدیدی برای جریان آبهای زیرزمینی (با توجه به فاکتور زمان) در تونل‌هایی که توسط سپر در زیر سطح ایستابی حفاری می‌شوند، ارائه شد [۲۵].

### ۳- اثرات مخرب زیستمحیطی ناشی از افت سطح آب زیرزمینی در اثر حفر تونل

در این پژوهش، اثرات مخرب زیستمحیطی ناشی از افت سطح آب زیرزمینی در اثر حفر تونل‌های بزرگ‌قطعه که شامل دو پدیده نشست سطح زمین در سطح ایستابی و خشک شدن یا کم‌آب شدن چشممه‌ها و قنات‌های پایین‌دست محدوده حفر در اثر خروج آب از تونل حین حفر می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفته است.

#### ۱-۳- نشست زمین در سطح ایستابی

از جمله مشکلات موجود در حفر تونل‌های واقع در زیر سطح ایستابی می‌توان به کاهش ضریب پایداری ساختاری توده‌سنگ و افت سطح ایستابی در لایه‌های روباره تونل اشاره کرد که باعث نشست تحکیمی می‌شود. با پایین آمدن تراز آب زیرزمینی، نشستی در سطح زمین و بسته به نوع خاک و سنگ به صورت آنی یا تدریجی رخ می‌دهد. نمای شماتیک تونل و افت سطح آب زیرزمینی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- نمای شماتیک تونل واقع در زیر سطح ایستابی و افت سطح آب زیرزمینی [۲۶]

اثرگذاری نرخ پیشروی حفاری تونل بر تنش‌های واردۀ ناشی از نشت جریان آب به داخل تونل مطالعه شد [۱۳].<sup>۷</sup> کولیمباس و واگنر<sup>۸</sup>، نشت آبهای زیرزمینی به تونل‌ها را به روش تحلیلی محض مورد بررسی قرار دادند [۱۴]. یک روش نیمه‌تحلیلی- نیمه‌عددی نیز به منظور تحلیل اثرات جریان آب به داخل تونل ارائه شد [۱۵]. همچنین، مطالعات مرتبط با ورود جریان‌های آب زیرزمینی به داخل تونل‌ها مطالعه شده و یک سامانه جدید جمع‌آوری آب برای زهکشی از تونل‌ها معرفی گردید [۱۶]. مون و فرناندرز<sup>۹</sup> نیز تأثیر افت سطح آب زیرزمینی ناشی از خاکبرداری بر جریان ورودی تونل در یک توده‌سنگ درزه‌دار را تحلیل کردند [۱۷].

زارعی و همکاران، اثرگذاری جریان آبهای زیرزمینی فوق محلی به یک تونل سنگی را با توصیف ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه مورد ارزیابی قرار دادند [۱۸]. تحلیل احتمالی خطرات مربوط به آبهای زیرزمینی در تونل‌های در حال حفاری واقع در زیر سطح ایستابی منطقه نیز در مطالعه‌ای دیگر مورد بررسی قرار گرفت [۱۹]. همچنین ورود آبهای زیرزمینی با حالت پایدار به یک تونل با مقطع دایروی مطالعه و ارزیابی گردید [۲۰]. در پژوهشی دیگر، ارزیابی ریسک نفوذ آب در تونل‌های کارستی به روش‌های عددی بررسی شد [۲۱]. فونت‌کاچو<sup>۹</sup> و همکاران نیز ارزیابی اثر مانع ناشی از ساخت‌وسازهای زیرزمینی بر آبخوان‌های زیرزمینی متخالخل با شبیه‌هیدرولیک کم را انجام داده و در قالب یک مطالعه موردي، حفاری تونل متروی بارسلون (واقع در اسپانیا) را مورد تحلیل قرار دادند [۲۲]. در مطالعه‌ای دیگر که در سال ۲۰۱۶ انجام گرفت، اثرگذاری سازه‌های زیرزمینی بر جریان آبهای زیرزمینی شهری مرور شد [۲۳]. حسنی و همکاران، به تحلیل عددی ورود آبهای

<sup>7</sup>- Kolymbas and Wagner

<sup>8</sup>- Moon and Fernandez

<sup>9</sup>- Font-Capo

نشست ارائه کرد که نمونه‌ای از این کار توسط اوثنو انجام شد. ملیس نیز با به کارگیری اکثر روش‌های مورد اشاره، روش مدل‌سازی، میزان نشست سطحی را پیش‌بینی کرد [۲۹]. مقدار عمدۀ نشست سطح زمین در حفر تونل‌ها در اثر سست شدن توده خاک و در برخورد با لایه آبدار پدید می‌آید که با پایین انداختن تراز آب زیرزمینی این مقدار افزایش می‌یابد. محاسبه نشست زمین به این دلیل حائز اهمیت است که علاوه‌بر خسارات واردۀ بر سازه‌های واقع در سطح زمین، ممکن است باعث ایجاد خسارت برای بخش‌های زیرزمینی نیز شود و در نظر نگرفتن این پدیده در محاسبات و طراحی، می‌تواند خطاهای و خطرات غیرقابل قبولی را در بر داشته باشد [۳۰].

چنانچه در طول عملیات حفر تونل به لایه آبدار برخورد شود، در این صورت باید تراز آب در آن منطقه به صورت موقتی یا دائمی و با احداث شبکه زهکش پایین انداخته شود. اگر تراز آب به صورت دائمی پایین انداخته شود، نشست زمین به دلیل کاهش یافتن فشار آب حفره‌ای تبدیل شدن تمام تنش به تنش مؤثر و اگر به صورت موضعی این عمل صورت پذیرد، مشکلاتی همچون عمل کردن خود تونل به عنوان زهکش و یا شکل‌گیری و آرایش مجدد دانه‌های رس (در لایه‌های رسی) بر اثر بالا آمدن دوباره تراز آب زیرزمینی به وجود آید که خود این عوامل باعث نشست زمین می‌شود. در نهایت، یک قسمت یا تمام این نشست‌ها به سطح زمین منتقل شده و مشکلاتی را برای سازه‌های واقع در سطح زمین به وجود می‌آورد [۳۱]. در مبحث تحکیم خاک می‌توان به نشست و یا جابه‌جایی تدریجی خاک در اثر حذف تدریجی فشارهای منفذی اشاره کرد؛ به طوریکه تغییر فشار منفذی سبب تغییر فشار مؤثر می‌شود که به تبع آن پاسخ خاک را تغییر می‌دهد. این پدیده به همراه افت فشارهای منفذی باعث نشست در سطح ایستابی می‌شود که خود باعث تغییر در جریان آب زیرزمینی در منطقه می‌شود.

## ۲-۳- خشک شدن یا کم آب شدن قنات‌ها و چشمه‌های پایین‌دست محدوده حفر تونل

محیط زمین در ابتدا تحت تنش ناشی از تنش‌های طبیعی زمین است که بر اثر حفر تونل یا سایر سازه‌های زیرزمینی، وضعیت تنش و توزیع آن در زمین تغییر می‌کند. این امر موجب انقباض دهانه تونل و تغییر‌شکل‌هایی در مقطع زمین و در نهایت، منجر به نشست سطح زمین می‌شود. مسأله نشست سطحی زمین ناشی از حفر تونل با توجه به اهمیتی که دارد، همواره از سوی پژوهشگران مورد بررسی قرار گرفته است تا با اتخاذ شیوه‌های مناسب میزان آن را قبل از شروع عملیات ساخت برآورد کنند [۲۷].

در حالت کلی، روش‌های محاسبه نشست به سه گروه اصلی تقسیم می‌شوند که عبارتنداز: روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی. در روش تجربی برای حالت‌های مختلف شکل و ابعاد فضای حفرشده، نمودار و جدول‌هایی تهیه شده است که براساس آن نشست سطح زمین را پیش‌بینی می‌کنند. از جمله مهم‌ترین روش‌های تحلیلی برآورد نشست زمین نیز می‌توان به روش<sup>۱۰</sup> NCB اشاره کرد [۲۸]. روش‌های بابت<sup>۱۱</sup>، اوثنو و مویا<sup>۱۲</sup>، گونزالز و ساگاستا<sup>۱۳</sup>، لوگانathan و پولوس<sup>۱۴</sup>، پارک<sup>۱۵</sup>، ورویجت و بوکر<sup>۱۶</sup> و ملیس<sup>۱۷</sup> نیز از دیگر روش‌های تحلیلی محاسبه نشست محسوب می‌شوند [۲۹]. از سوی دیگر، روش‌های پیش‌بینی نشست به سه دسته، روش‌های تجربی، تابع تأثیر و تابع پروفیل تقسیم شده‌اند. روش‌های تابع تأثیر و تابع پروفیل جزو روش‌های ریاضیاتی محسوب می‌شوند که در آنها با به کارگیری توابع مختلف (تابع نمایی و تابع اثراًت هایپربولیک)، مقدار نشست محاسبه می‌شود. با در دست داشتن پارامترهای ژئومکانیکی، می‌توان با مدل‌سازی در نرم‌افزارهای عددی، پیش‌بینی دقیق‌تری از

<sup>10</sup>- National Coal Board

<sup>11</sup>- Bobet

<sup>12</sup>- Oteo and Moya

<sup>13</sup>- Gonzalez and Sagaseta

<sup>14</sup>- Loganathan and Poulos

<sup>15</sup>- Park

<sup>16</sup>- Verruijt and Booker

<sup>17</sup>- Melis

مذکور در ژئوممبران‌ها باعث شده است تا این فرآورده به عنوان گزینه‌ای مناسب در پوشش تونل‌ها به کار برده شود و با کاهش هزینه‌های نگهداری و افزایش عمر مفید سبب دستیابی به محیط خشک شود [۳۲]

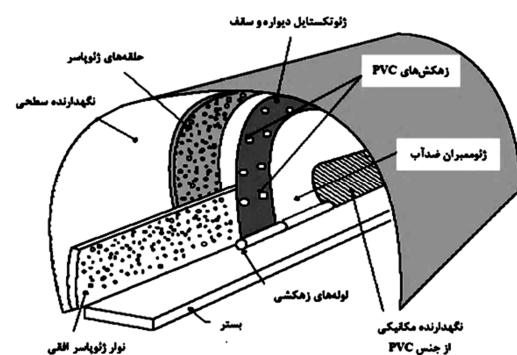
این پوشش‌ها با توجه به خصوصیات منحصر به‌فردی که دارند، موجب هدایت جریان آب به سمت کanal‌های تعییش‌شده در پایین تونل شده و از تجمع آب در پشت پوشش جلوگیری می‌کنند. در صورت استفاده از چنین پوشش‌هایی به همراه کanal‌های زهکشی بهمنظور خروج آب جمع‌شده در پشت پوشش نهایی تونل راه‌آهن کوهین، جهت جریان آب زیرزمینی در منطقه تغییر کرده و به دنبال آن باعث خشک و یا کم‌آب شدن قنات‌ها و چشمه‌های پایین‌دست می‌شود. رودخانه ملاعی و سرشاخه‌های آن که در بخش شمالی ساختگاه تونل، به عنوان زهکش اصلی منطقه در تراز پایین‌تری نسبت به کف تونل قرار دارد و همچنین چند رشته قنات کوچک که در روستای یزدروود به فاصله سه کیلومتری از جنوب ساختگاه تونل واقع می‌باشد، از جمله مواردی هستند که تحت تأثیر این پدیده قرار خواهند گرفت.

### ۳-۳- محاسبه نرخ نفوذ آب به داخل تونل در حال حفر

یکی از مهم‌ترین مسائل و مشکلات پیش‌رو در عملیات تونل‌زنی در مقاطع سنگی، جریان یافتن آب به درون محیط تونل در حال حفر است که از طریق ناپیوستگی‌های اولیه و ایجاد شده در دیواره تونل صورت می‌پذیرد. جریان آب و هجوم آن به محیط تونل حين حفر، آثار محرابی بر روند عملیات حفر داشته و می‌تواند فعالیت تونل‌سازی را کاملاً تحت تأثیر قرار دهد. این مسئله بعضاً به توقف عملیات نیز منجر می‌شود. از جمله مهم‌ترین مشکلاتی که به علت نشت آب به درون محیط تونل گریبانگیر عملیات می‌شود، می‌توان به مواردی همچون کاهش پایداری توده‌سنگ اطراف تونل، اعمال فشار مازاد بر سامانه نگهداری موقت و دائم، تأثیرات تخریبی بر وضعیت ژئومکانیکی سنگ و متعاقباً ایجاد

به منظور کنترل آب ورودی به خارج از تونل می‌توان از پوشش‌های ناتراوا موسوم به ژئوستنتیک‌ها (ژئومبران‌ها<sup>۱۸</sup> و ژئوکمپوزیت‌ها<sup>۱۹</sup>) بهره برده و این فرآورده‌های پلیمری را به همراه کanal‌هایی در پایین دو طرف دیواره تونل در پشت پوشش نهایی استفاده کرد (شکل ۲). ژئومبران‌ها و ژئوکمپوزیت‌ها صفحات یکپارچه ساخته شده از پلیمر هستند. این فرآورده‌های ورقه‌ای به طور نسبی نفوذناپذیر و مصنوعی می‌باشند که از مصالحی با نفوذپذیری پایین ساخته شده‌اند تا به صورت یک حاصل، روکش یا آستر از عبور آب جلوگیری نمایند [۳۲].

ضریب نفوذپذیری بسیار اندک این غشاها که در حدود  $2/7 \times 10^{-13}$  سانتی‌متر در ثانیه است، باعث می‌شود این فرآورده جایگزین آسترها قدمی متخلخل و نفوذپذیر شود. ورقه‌های ژئومبران در مقابل قارچ‌ها و کپک‌ها کاملاً مقاوم بوده و اشعه ماورای بنفش و سایر عوامل محیطی هیچگونه تأثیر منفی کیفی بر آنان ندارد.



شکل ۲- نحوه نصب ژئومبران‌ها در تونل‌های در حال حفر [۳۳]

ورقه‌های ژئومبران پلی‌اتیلنی که با روش‌های دobar تزریق ساخته می‌شوند، ورقه‌های یکپارچه انعطاف‌پذیر و نرمی هستند که ضمن آب‌بند کردن محیط اطراف تونل، به دلیل مقاومت بالا در برابر عوامل سوراخ‌کننده (مانند حمله جوندگان و ریزیستواره‌ها) پایدار می‌مانند. قابلیت

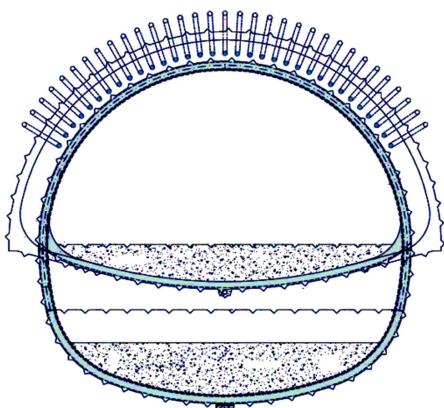
<sup>18</sup>- Geomembrane

<sup>19</sup>- Geocomposite

پس از حفر تونل تا قبل از نصب پوشش نهایی، سطح آب زیرزمینی به‌علت نشت از دیواره‌ها تا ابتدای قوس فوقانی تونل افت می‌کند؛ ولی در ادامه، بعد از نصب پوشش نهایی، به‌علت آب‌بند بودن پوشش، مجددًا سطح آب با گذشت زمان تا مقدار اولیه بالا می‌رود و در پشت پوشش جمع می‌شود. این امر علاوه‌بر بازیابی مجدد سطح ایستابی باعث اعمال فشار قابل توجه به پوشش نهایی خواهد شد.

#### ۴-۲- استفاده از روش لوله‌رانی (فورپولینگ)

برای حفاری یک تونل در شرایط بد زمین، پایدار نگه داشتن جبهه کار تونل و جلوگیری از نشت آب به داخل تونل از پیرامون مقطع آن، امری بسیار ضروری است. امروزه فورپولینگ<sup>۲۰</sup> که به یکی از روش‌های پرکاربرد در نگهداری حفریات بزرگ‌مقیاس تبدیل شده است، در خاک‌های سست، ضعیف و متخلخل و همچنین در مواردی که نشست سطح زمین مجاز نباشد، کاربرد دارد. در این روش، یک پوسته قوس‌مانند چتری بالای جبهه کار و اطراف مقطع تونل قبل از حفر ایجاد می‌شود تا عملیات به‌طور ایمن و سریع انجام شود. روش‌های مختلف شامل تزريق فشار<sup>۲۱</sup>، لوله‌رانی در سقف<sup>۲۲</sup> و مهارگذاری در جبهه کار<sup>۲۳</sup> می‌باشند [۳۷]. در شکل‌های ۳ و ۴، نمایی از روش لوله‌رانی نشان داده شده است.



شکل ۳- مقطعی از تونل نگهداری شده به روش لوله‌رانی [۲۸]

<sup>20</sup>- Forepoling

<sup>21</sup>- Jet Grouting

<sup>22</sup>- Pipe Roof

<sup>23</sup>- Spiling

خطرات جانی و مالی اشاره کرد [۳۴]. مسئله نشت و کنترل جریان آب زیرزمینی، از مشکلات اساسی حفر تونل‌های عمیق است که باید از قبیل پیش‌بینی شده و به دقت مورد بررسی قرار گیرد [۳۵].

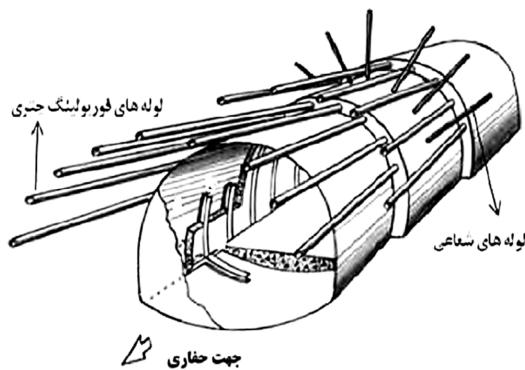
#### ۴- راه‌های کاهش اثرات نامطلوب زیست‌محیطی

به‌طور کلی، برای کنترل آب زیرزمینی دو روش آبکشی و جلوگیری از ورود آب به درون تونل وجود دارد. روش‌های آبکشی اغلب به فنون جمع‌آوری و انتقال آب بر می‌گردند که روش‌های قدیمی‌تر و معمول‌تری در کنترل آب زیرزمینی هستند. در این روش‌ها اجازه ورود آب به تونل داده می‌شود و سپس آب را از تونل خارج می‌کنند. به همین دلیل به این روش‌ها، روش‌های داخلی نیز گفته می‌شود. پمپاژ منبع باز، پمپاژ چاهها، بالا بردن نقاط چاهی و استفاده از مکنده‌های ونتوری از مرسوم‌ترین روش‌های آبکشی هستند. در روش دیگر کنترل آب زیرزمینی، از ورود آب به درون تونل ممانعت می‌شود. از این‌رو این روش‌ها را خارجی می‌نامند. روش‌های خارجی شامل مواد تزریقی سیمانی و شیمیایی و نیز انجام دادن است [۳۶]. بازیابی مجدد سطح آب زیرزمینی می‌تواند یکی از راه‌های کاهش اثرات نامطلوب زیست‌محیطی در ساختگاه تونل کوهین باشد؛ به‌طوری که با استفاده از یک پوشش آب‌بند بدون زهکش می‌توان از افزایش نشست در سطح ایستابی در درازمدت و تغییر در روند جریان آب زیرزمینی در منطقه جلوگیری کرد.

#### ۴-۱- بازیابی مجدد سطح آب زیرزمینی با استفاده از پوشش آب‌بند بدون زهکشی

استفاده از پوشش‌های آب‌بند بدون زهکشی به‌منظور کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی، مستلزم به کارگیری سامانه نگهداری با خصوصیات بالای مقاومتی می‌باشد؛ زیرا در پی بازیابی مجدد سطح آب زیرزمینی، آب در پشت پوشش نهایی جمع شده و در درازمدت باعث اعمال فشار هیدرواستاتیکی قابل توجهی به پوشش می‌شود. به‌طوری که،

متربع، یکی از تونل‌های بزرگ مقطع کشور محسوب می‌شود. این تونل به منظور ایجاد راه ریلی بین شهرهای یادشده در قسمت غربی رشت‌کوه البرز احداث می‌شود. قرارگیری کوههای مرتفع در طول مسیر، ساختار ناهموار و کوهستانی منطقه و دارا بودن شیب طولی حداقل به همراه حداقل شعاد شاعر، طراحی و اجرای این پروژه را با چالش‌های جدی روبرو کرده است [۳۹]. شکل‌های ۵ و ۶ نقشه زمین‌شناسی قطعه اول محور قزوین-رشت و منطقه اجرای طرح را نشان می‌دهد. با انجام عملیات حفاری گمانه‌های اکتشافی و شناسایی لایه‌های مختلف زمین با مغزه‌های حاصل از آن، آزمایش‌های لازم برای تعیین مشخصات ژئومکانیکی توده‌سنگ دربرگیرنده تونل بر روی نمونه‌های اکتشافی از اعمق مختلف زمین صورت گرفته است. ویژگی‌های ژئومکانیکی منطقه یادشده مورد نیاز برای انجام فرآیند مدل‌سازی عددی شرایط تونل مذکور، در جدول ۱ نشان داده شده است. نتایج حاصل آزمایش‌های مکانیک‌سنگی، نشان‌دهنده پایین بودن ویژگی‌های ژئومکانیکی و متوسط بودن نفوذ‌پذیری لایه‌های پوشاننده (روباره) تونل است.

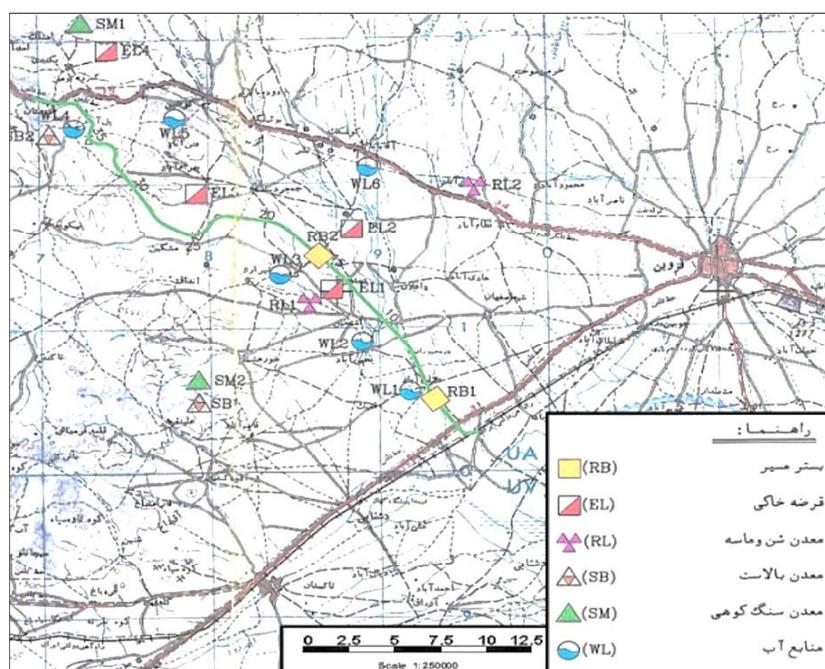


شکل ۴- نمایی از روش لوله‌رانی [۲۶]

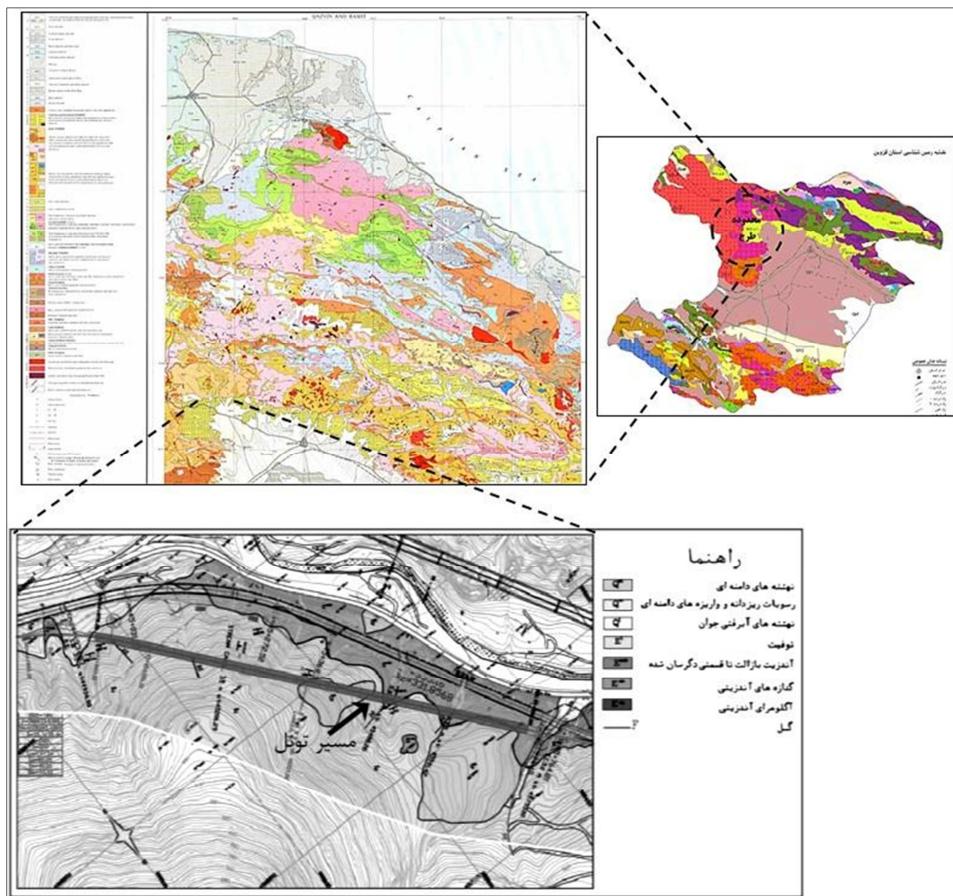
فورپولینگ‌ها، لوله‌هایی هستند که در داخل چال‌هایی که جلوتر از سینه‌کار حفاری شده‌اند، قرار گرفته و از داخل آنها تزریق دوغاب صورت می‌گیرد. این روش در تونل‌سازی، یکی از شیوه‌های بسیار مؤثر افزایش خصوصیات ژئومکانیکی توده‌سنگ‌ها و جلوگیری از نشست زمین در سازه‌های زیرزمینی و نیز پیشگیری از نفوذ جریان‌های آب زیرزمینی به داخل تونل می‌باشد [۳۸].

## ۵- معرفی ساختگاه تونل راه‌آهن کوهین

تونل راه‌آهن کوهین واقع در قطعه اول راه‌آهن قزوین-رشت-بندرانزلی با طول ۱۶۳۵ متر و مقطع ۱۲۱



شکل ۵- موقعیت جغرافیایی تونل کوهین واقع در قطعه اول راه‌آهن قزوین-رشت-بندر انزلی [۴۰]



شکل ۶- نقشه زمین‌شناسی قطعه اول محور قزوین-رشت-انزلی و منطقه اجرای طرح [۴۱]

مجموعه‌ای از عوامل زمین‌شناسی میسر خواهد شد که مهم‌ترین آنها شامل وضعیت هیدروژئولوژی، جنس سنگ‌ها و خصوصیات ساختاری منطقه است.

## ۲-۵- مشخصات زمین‌شناسی و زئوتکنیکی ساختگاه تونل

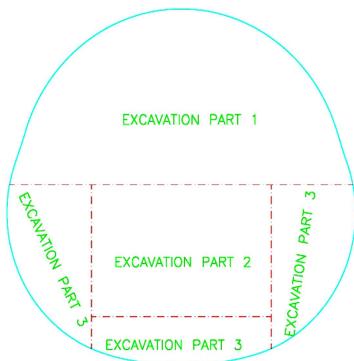
ساختگاه تونل در محدوده کوهین در بخش جنوبی ناحیه رسوی ساختاری البرز مرکزی قرار دارد. در این منطقه، رسوبات تخریبی-آبرفتی در دامنه ارتفاعات البرز به صورت کنگلومرا و نهشته‌های آبرفتی انباسته شده‌اند که نشانگر بالآمدگی زمین و وجود محیط رسوی قاره‌ای می‌باشد. در مطالعات حاصل از گمانه‌های اکتشافی عمقی، مشخص شده است که این تونل در رسوبات سازند هزارده رس قرار گرفته و جنس زمین پوشاننده آن از تناوب لایه‌های ماسه‌سنگ رس‌دار (کنگلومرا ریزدانه) فشرده نشده، ماسه رس‌دار بهمراه مقداری شن و رس‌سنگ تشکیل شده

جدول ۱- خصوصیات ژئومکانیکی ساختگاه تونل کوهین [۳۹]

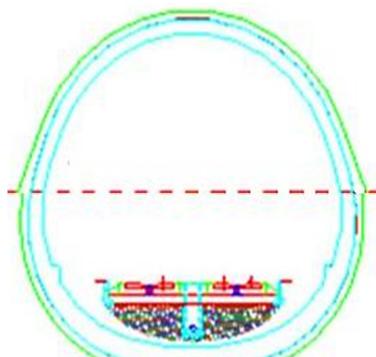
پارامتر	واحد	مقدار
وزن مخصوص ( $\rho$ )	$\text{kg/m}^3$	۲۰۵۰
مدول الاستیسیته ( $E_m$ )	Pa	$۳\times 10^8$
مدول برشی ( $G_m$ )	Pa	$۱/۰۷۱\times 10^8$
زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ )	درجه	۳۴
چسبندگی ( $C$ )	Pa	$۲\times 10^{-۵}$
نسبت پوآسون	-	۰/۴

## ۱-۵- خصوصیات هیدروژئولوژی ساختگاه تونل

قرارگیری بخش اعظم تونل در زیر سطح ایستابی و بزرگی مقطع تونل، از مهم‌ترین ویژگی‌های فنی و مهندسی این تونل محسوب می‌شود. وجود آب‌وهوای نیمه‌گرم و خشک و نیز معتدل تا شدیداً سرد طی فصول مختلف، موجب فرسایش سنگ‌ها و تشکیل لایه هوازده خاک رس به صورت یک پوشش کلی در منطقه شده است [۳۹]. مطالعه هیدروژئولوژی منطقه با در نظر گرفتن اثرات



شکل ۷- مقطع شماتیک تونل کوهین [۴۰]



شکل ۸- مقطع تونل پس از نصب سامانه نگهداری و تجهیزات [۴۰]

## ۶- معرفی ساختگاه تونل راه آهن کوهین

در این پژوهش، به منظور پیش‌بینی میزان نشت و مقدار نفوذ آبده‌ی زیرزمینی به تونل از نرمافزار FLAC<sup>2D</sup> استفاده شده است که اساس آن روش عددی تفاضل محدود می‌باشد. این نرمافزار دارای مدل‌های رفتاری پیشرفته و شناخته شده ژئوتکنیکی نظری مدل غیرخطی موهر- کولمب، مدل دراگر، مدل‌های نرم‌شونده، سخت‌شونده و غیره می‌باشد و قادر است در محیط‌های خاکی و سنگی با تحلیل مدل‌های ساخته شده، جابه‌جایی افقی و قائم نقاط مختلف محیط را تعیین کند. همچنین مدل‌سازی و انجام تحلیل، با فرض رفتار همگن توده‌سنگ و در یک محیط پیوسته انجام شده است.

در مدل‌سازی، ابعاد مدل‌ها به اندازه‌ای در نظر گرفته شد که محدوده تونل‌ها تحت اثرات ناشی از مرزها قرار نگیرند. به عبارت بهتر، براساس استانداردهای مدل‌سازی موجود، چهار برابر ابعاد تونل، برای محیط مدل‌سازی در

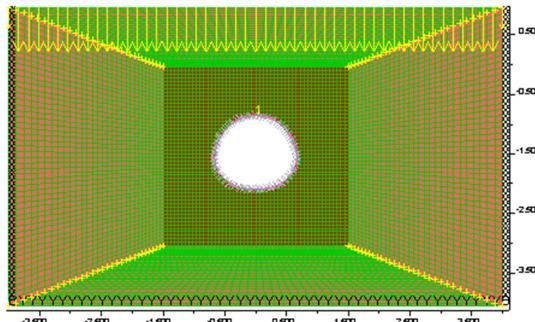
است. خاک‌های سطحی منطقه، بر اثر هوازدگی، حاوی سنگ‌های ماسه‌ای و رسی هستند که به لحاظ دانه‌بندی، ماسه ریزدانه رس‌دار محسوب می‌شوند. داده‌های مغزه‌های اکتشافی حاکی از آن است که کل تونل از تناوب لایه‌های ماسه‌سنگ رس‌دار سست، هوازده و فشرده‌نشده، ماسه رس‌دار به همراه مقداری شن، رس و ماسه لای‌دار و ماسه مارنی همراه شن و رس تشکیل شده است [۴۲]. سنگ‌های دربرگیرنده تونل اکثراً شامل توفیت، آندزیت- بازالت است. واحد آندزیت- بازالتی تمام تونل را در میان گرفته است. ضخامت لایه‌های آن به طور عمومی بین ۳۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر است. واحد توفیت نیز به ضخامت حدود ۳۰ متر بر روی آندزیت قرار دارد [۴۳].

ضع جنوبی ارتفاعات دربرگیرنده ساختگاه تونل، متاثر از شرایط لایه‌بندی، دارای شیب ملایمی به سوی جنوب می‌باشد که بخش شمالی آن نسبت به سمت مقابل، شیب تندتری دارد. رودخانه ملاعلی و سرشاخه‌های آن که در بخش شمالی ساختگاه تونل به عنوان زهکش اصلی منطقه در تراز پایین‌تری نسبت به کف تونل قرار دارد، دارای جریان زیرسطحی یا سطحی است. با توجه به حفاری‌های انجام شده در منطقه، ارتفاع سطح ایستابی از خط پروژه تونل برای مقطع ۴۰ متری تونل کوهین برابر با ۲۲/۵ متر برآورد شده است [۴۳].

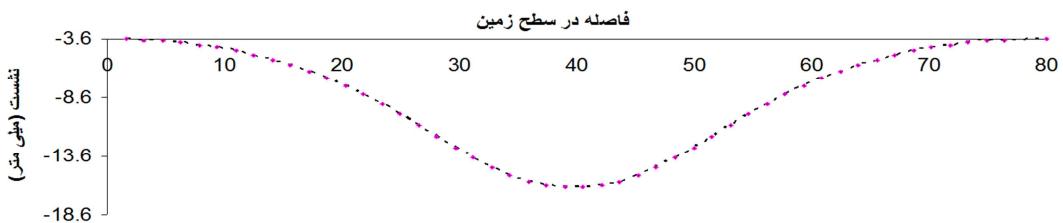
## ۵-۳- عملیات حفر تونل

تونل کوهین با سطح مقطعی به شکل نعل اسپی با عرض ۱۳ متر و ارتفاع ۶/۹ متر و طول ۱۶۳۵ متر، جزو بروزه‌های تونل‌زنی مهم کشور محسوب می‌شود. به دلیل بزرگ بودن مقطع تونل، عملیات حفر به چند بخش تقسیم شده است: حفر طاق تونل، پاطاق میانی و حفر پاطاق‌های کناری و کف تونل (شکل‌های ۷ و ۸). به منظور حفاری نیز از ماشین‌آلات متداول تونل‌زنی سنتی (بیل مکانیکی و لودر) استفاده می‌شود. علاوه‌بر سامانه نگهداری موقت که شامل شاتکریت و بعضی پیچ‌سنگ است، از بتن مسلح به عنوان سامانه نگهداری اصلی تونل استفاده می‌شود.

موجود و نیز تنش‌های قائم اعمالی ناشی از وزن مواد روباره، اثرات خود را در مدل اعمال کنند. سپس بخش داخلی تونل در مقطع ۴۰ متری در چند فاز مختلف (مطابق با عملیات حفر تونل) حذف شد تا شرایط حفر تونل به صورت دقیق مدل‌سازی شود. براساس تحلیل‌های حساسیت انجام شده مقدار  $K=0/5$  (نسبت تنش افقی به قائم) در نظر گرفته شده است. برمبانی این تحلیل‌ها، به‌ازای مقادیر مختلف  $K$ ، مدل ساخته‌شده اجرا گردید و خروجی‌های حاصل از آنها، با توجه به وزن مخصوص سنگ‌های روباره تونل، ارتفاع روباره و عمق تونل مورد ارزیابی قرار گرفتند. شکل‌های ۹ و ۱۰ به‌ترتیب مدل ساخته‌شده در نرم‌افزار FLAC<sup>2D</sup> برای مقطع ۴۰ متری (۴۰ متر روباره از مرکز تونل تا سطح زمین) با ارتفاع سطح ایستایی  $22/5$  متر از خط پروژه و میزان نشست در سطح ایستایی را نشان می‌دهند. میزان نشست بعد از اتمام عملیات حفر و نصب پوشش نهایی تونل،  $1/627$  سانتی‌متر برآورد شده است.



شکل ۹- مدل ساخته‌شده در نرم‌افزار FLAC<sup>2D</sup> برای مقطع ۴۰ متری با ارتفاع سطح ایستایی  $22/5$  متر



شکل ۱۰- میزان نشست بعد از اتمام حفاری و نصب پوشش نهایی تونل

داخل تونل راه‌آهن کوهین در سه فاز (مطابق با عملیات حفر تونل) بررسی شده است. شکل ۱۱، نمودار تغییرات دبی آب ورودی نسبت به سیکل محاسباتی و شکل ۱۲، کنتورهای جریان بهمراه فشارهای منفذی در بخش‌های مختلف حفر تونل را نشان می‌دهند. با توجه به بررسی‌های

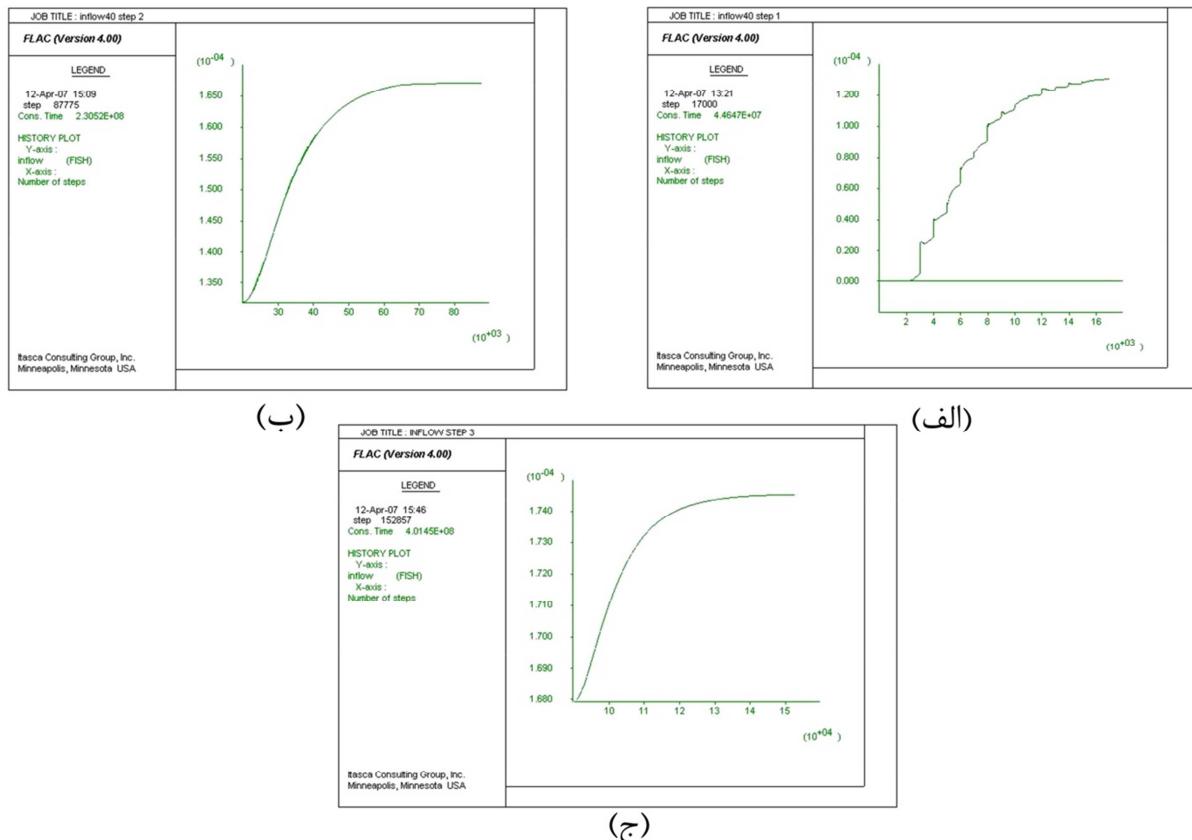
نظر گرفته شده است. در حالت کلی، در توده‌سنگ‌های موجود در اعماق زمین تنش‌هایی موسوم به تنش‌های برجا اثر می‌کنند. عامل اصلی این تنش‌ها، وزن طبقات و فعالیت‌های تکتونیکی منطقه است. نسبت تغییرات ابعاد مش‌ها در دو راستای افقی ( $i$ ) و عمودی ( $j$ ) نیز برابر یک در نظر گرفته شد. برای ساخت هندسه تونل، نقشه دقیق مقطع تونل که در نرم‌افزار AutoCAD تهیه شده، وارد محیط نرم‌افزار FLAC<sup>2D</sup> شد [۴۲].

به‌منظور بررسی تغییرات مدل، پیش از اجرای نرم‌افزار، شرایط مرزی اولیه مدل برای حل به روش محدود کردن جایه‌جایی‌ها بسته شدند. در این روش، معمولاً مرز پایینی مدل در دو راستای افقی و عمودی و مرزهای جانبی در راستای عمودی محدود می‌شوند. خواص مواد و مصالح مورد نیاز در مدل نیز مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شد. ابتدا پیش از مدل‌سازی حفر تونل، بارگذاری بر مدل اعمال شد تا تنش‌های برجای منطقه براساس مؤلفه‌های مهندسی

پیش‌بینی نرخ نفوذ آب نیز به داخل تونل راه‌آهن کوهین برای مقطع ۴۰ متری با سطح ایستایی  $22/5$  متر از خط پروژه انجام شد. با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته، پارامترهای لازم برای تحلیل جریان سیال برای مقاطع مورد نظر در جدول ۲ درج شده است. میزان نرخ نفوذ آب به

تونل برآورد شده است. بنابراین در چنین شرایطی مدیریت و کنترل آب خروجی امری ضروری است.

به عمل آمده و با توجه به جدول ۳، میزان دبی آب ورودی برای مقطع ۴۰ متری برابر با  $1/767$  مترمربع در واحد طول



شکل ۱۱- نمودار تغییرات دبی آب ورودی به سیکل محاسباتی برای مقطع ۴۰ متری تونل در بخش‌های (الف) نخست، (ب) دوم و (ج) بعد از تمام عملیات حفر تونل

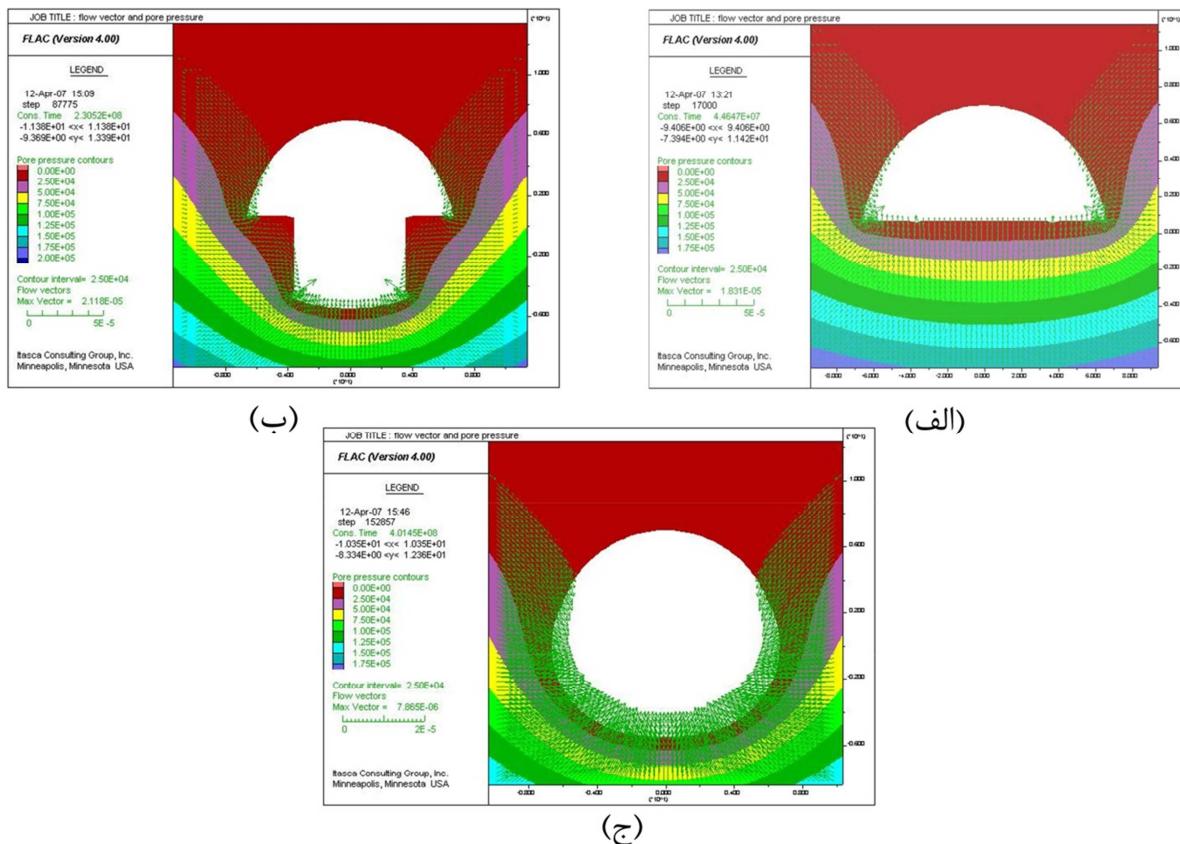
جدول ۳- نتایج دبی آب ورودی در بخش‌های مختلف حفر برای مقطع ۴۰ متری تونل

FLAC <sup>2D</sup> ( $m^2/s$ )	مراحل مختلف حفر
مقطع ۴۰ متری	
$1/313 \times 10^{-4}$	حفر طاق تونل
$1/674 \times 10^{-4}$	حفر پاطاق میانی
$1/767 \times 10^{-4}$	حفر پاطاق کناری

مدل ساخته شده در نرم افزار را نشان می‌دهد. با توجه به نیروها و گشتاور خمی اعمال شده لازم است تا از پوشش نهایی با مقاومت بالاتری در مقایسه با روش قبل استفاده شود که این امر موجب بالا رفتن هزینه نگهداری می‌شود.

جدول ۴ و شکل ۱۳ به ترتیب نیروها و گشتاور خمی ایجاد شده در پوشش نهایی تحت تأثیر فشار آب جمع شده در فضای مابین پوشش نهایی و پوشش اولیه<sup>۲۴</sup> که توسط نرم افزار FLAC<sup>2D</sup> مدل سازی شده است، به همراه

<sup>24</sup>- Gap Pressure



شکل ۱۲- بردارهای جریان بهمراه فشارهای منفذی برای مقطع ۴۰ متری تونل در بخش‌های (الف) نخست، (ب) دوم و (ج) بعد از اتمام عملیات حفر تونل

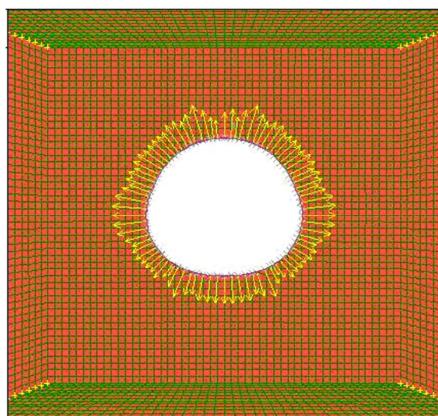
جدول ۴- نیروها و گشتاور خمی واردہ بر نقاط مختلف پوشش تحت تأثیر فشار آب جمع شده در فضای مابین پوشش نهایی و پوشش اولیه

$V_{max}$ (ton)	$M_{max}$ (ton-m)	$T_{max}$ (ton)	نقاط مختلف پوشش
۹/۳	۱/۸	۱۵۶/۲	بالای قوس فوقانی
۱/۵۷	۱/۰۵	۱۷۱/۳	۱/۴ قوس فوقانی
۸/۸	۵/۹	۱۷۳/۷	ابتداي قوس فوقانی
۴/۱۶	۲۸/۲	۱۸۷	۱/۴ قوس تحتانی
۱۰/۶۷	۴۷/۲	۱۸۰/۵۲	وسط قوس تحتانی

در این پژوهش، نشست در سطح ایستابی، خشک و کم آب شدن قنات‌ها و چشمهدانی پایین‌دست در ساختگاه تونل راه‌آهن کوهین به عنوان اثرات نامطلوب زیستمحیطی ناشی از افت سطح آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه، بازیابی سطح آب زیرزمینی با استفاده از پوشش بتنی آب‌بند بدون انجام عملیات زهکشی و نیز به کارگیری همزمان روش فورپولینگ، به عنوان راه حلی برای کاهش اثرات زیستمحیطی ارائه شد که انجام این امر مستلزم

## ۶- نتیجه‌گیری

حفر تونل‌ها در زمین‌های آبدار، مشکلات عدیدهای را به دنبال خواهد داشت. از جمله این مشکلات، می‌توان به کاهش ضریب پایداری ساختاری توده‌سنگ، فرسایش و یا تخریب سامانه‌های نگهدارنده بتنی، ایجاد فشار آب اضافه بر روی پوشش نهایی و افت سطح پیزومتری در لایه‌های خاکی روبرویه که باعث نشست تحکیمی می‌شود، اشاره کرد.



شکل ۱۳- فشار آب جمع شده در فضای مابین پوشش نهایی و پوشش اولیه تونل در مدل ساخته شده در نرم افزار FLAC<sup>2D</sup>

استفاده از پوشش بتنی با خصوصیات مقاومتی بالا به منظور تحمل فشار هیدرولاستاتیکی آب جمع شده در پشت پوشش است.

## مراجع

- [1] Roccheggiani, M., Piacentini, D., Tirincanti, E., Perissin, D., & Menichetti, M. (2019). “Detection and monitoring of tunneling induced ground movements using Sentinel-1 SAR Interferometry”, *Remote Sensing*, 11(6), 639.
- [2] Gu, S. C., Sun, W., & Wang, B. (2019). “Study on the subdivision support and rapid tunneling technology of coal mine roadway”, In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 242, No. 2, p. 022018). IOP Publishing.
- [3] Yang, S. Y., & Yeh, H. D. (2007). “A closed□form solution for a confined flow into a tunnel during progressive drilling in a multi□layer groundwater flow system”, *Geophysical research letters*, 34(7).
- [4] Zaidel, J., Markham, B., & Bleiker, D. (2010). “Simulating seepage into mine shafts and tunnels with MODFLOW”, *Groundwater*, 48(3), 390-400.
- [5] Cesano, D., Olofsson, B., & Bagtzoglou, A. C. (2000). “Parameters regulating groundwater inflows into hard rock tunnels—a statistical study of the Bolmen tunnel in southern Sweden”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15(2), 153-165.
- [6] Lee, I. M., & Nam, S. W. (2001). “The study of seepage forces acting on the tunnel lining and tunnel face in shallow tunnels”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16(1), 31-40.
- [7] Tseng, D. J., Tsai, B. R., & Chang, L. C. (2001). “A case study on ground treatment for a rock tunnel with high groundwater ingress in Taiwan”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16(3), 175-183.
- [8] Shin, J. H., Addenbrooke, T. I., & Potts, D. M. (2002). “A numerical study of the effect of groundwater movement on long-term tunnel behaviour”, *Geotechnique*, 52(6), 391-403.
- [9] Molinero, J., Samper, J., & Juanes, R. (2002). “Numerical modeling of the transient hydrogeological response produced by tunnel construction in fractured bedrocks”, *Engineering Geology*, 64(4), 369-386.
- [10] Selroos, J. O., Walker, D. D., Ström, A., Gylling, B., & Follin, S. (2002). “Comparison of alternative modelling approaches for groundwater flow in fractured rock”, *Journal of Hydrology*, 257(1-4), 174-188.
- [11] Maréchal, J. C., & Perrochet, P. (2003). “Nouvelle solution analytique pour l'étude de l'interaction hydraulique entre les tunnels alpins et les eaux souterraines”, *Bulletin de la Société Géologique de France*, 174(5), 441-448.
- [12] Bonomi, T. U. L. L. I. A., & Bellini, R. O. B. E. R. T. A. (2003). “The tunnel impact on the groundwater level in an urban area: a modelling approach to forecast it”, *Materials and Geoenvironment*, 50, 45-48.
- [13] Lee, I. M., & Nam, S. W. (2004). “Effect of tunnel advance rate on seepage forces acting on the underwater tunnel face”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 19(3), 273-281.
- [14] Kolymbas, D., & Wagner, P. (2007). “Groundwater ingress to tunnels—the exact analytical solution”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22(1), 23-27.
- [15] Hwang, J. H., & Lu, C. C. (2007). “A semi-analytical method for analyzing the tunnel water inflow”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22(1), 39-46.
- [16] Li, D., Li, X., Li, C. C., Huang, B., Gong, F., & Zhang, W. (2009). “Case studies of groundwater flow into tunnels and an innovative water-gathering system for water drainage”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(3), 260-268.
- [17] Moon, J., & Fernandez, G. (2010). “Effect of excavation-induced groundwater level drawdown on tunnel inflow in a jointed rock mass”, *Engineering Geology*, 110(3-4), 33-42.

- [18] Zarei, H. R., Uromeihy, A., & Sharifzadeh, M. (2011). "Evaluation of high local groundwater inflow to a rock tunnel by characterization of geological features", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(2), 364-373.
- [19] Jurado, A., De Gaspari, F., Vilarrasa, V., Bolster, D., Sánchez-Vila, X., Fernández-García, D., & Tartakovsky, D. M. (2012). "Probabilistic analysis of groundwater-related risks at subsurface excavation sites", *Engineering Geology*, 125, 35-44.
- [20] Butscher, C. (2012). "Steady-state groundwater inflow into a circular tunnel", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 32, 158-167.
- [21] Li, S. C., Zhou, Z. Q., Li, L. P., Xu, Z. H., Zhang, Q. Q., & Shi, S. S. (2013). "Risk assessment of water inrush in karst tunnels based on attribute synthetic evaluation system", *Tunnelling and underground space technology*, 38, 50-58.
- [22] Font-Capo, J., Pujades, E., Vázquez-Suñé, E., Carrera, J., Velasco, V., & Montfort, D. (2015). "Assessment of the barrier effect caused by underground constructions on porous aquifers with low hydraulic gradient: A case study of the metro construction in Barcelona, Spain", *Engineering geology*, 196, 238-250.
- [23] Attard, G., Winiarski, T., Rossier, Y., & Eisenlohr, L. (2016). "Impact of underground structures on the flow of urban groundwater", *Hydrogeology journal*, 24(1), 5-19.
- [24] Hassani, A. N., Katibeh, H., & Farhadian, H. (2016). "Numerical analysis of steady-state groundwater inflow into Tabriz line 2 metro tunnel, northwestern Iran, with special consideration of model dimensions", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(4), 1617-1627.
- [25] Liu, X. X., Shen, S. L., Xu, Y. S., & Yin, Z. Y. (2018). "Analytical approach for time-dependent groundwater inflow into shield tunnel face in confined aquifer", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 42(4), 655-673.
- [26] Yoo, C., Kim, S. B., Kim, J. W., & Yoo, K. H. (2008). "Influencing factors on groundwater drawdown induced ground settlement during tunneling", In: *World Tunneling Congress*, 863-871.
- [27] Pakbaz, M., & Heydarizadeh, Y. (2008). "Investigation of soil subsidence in excavation of Ahwaz urban tunnel", 4<sup>th</sup> National Congress of Civil Engineering. University of Tehran. Tehran.
- [28] National Coal Board. (1975). Subsidence Engineering Handbook. National Coal Board mining Department, London, 1975.
- [29] Rostami, A.R., Rostamabadi, S.A., Hosseini, N., & Khosrowash, M. (2011). "Numerical and analytical estimating of ground subsidence and comparison with the result of observational and instrumental method (case study: second line of Karaj subway tunnel)", *Journal of Earth and Resources*. 4, 3(12), 33-40.
- [30] Ahmadvand, M., Azadi, M.A., & Soltani, J. (2012). "Groundwater modeling due to groundwater level drop (case study: sewage tunnel drainage of East-Tehran)", 1<sup>th</sup> National Conference on Sustainable Development Solutions. Tehran.
- [31] Honestly, B., Shahriar, K., & Khoshravan Azar, A.S. (2004). "Analytical estimation of tunneling in urban areas (case Study: first phase of Tabriz metro)", 2<sup>nd</sup> Conference of Iranian Rock Mechanics.
- [32] Setayesh, A.S. (2011). Introduction to Geosynthetics. Academic Center for Education, Culture and Research publications (Jahad-e Daneshgahi) First edition. Tehran.
- [33] Mahuet, G.L. (2005). Guidelines on Waterproofing and Drainage of Underground Structures. Version 1 – approved by Technical Committee. Tunneles et Souterrains – HORS-SERIE N2.
- [34] A'li Anvari, A., Katibeh, H., & Mahmoudabadi, H. (2008). "Estimation of equivalent permeability along the axis of the Amir-Kabir tunnel using artificial neural network", 2<sup>nd</sup> Conference of Iranian Mining Engineering. University of Tehran. Tehran.
- [35] Sadeghpour, A.H., & Fadaei, M. (2009). "Investigation of subsidence control methods in excavation operations adjacent to groundwater level", 8<sup>th</sup> International Congress of Civil Engineering. Shiraz University. Shiraz.
- [36] Qasemi ghodrat, M., & Kazemi, M. (2012). "Methods for controlling water entry into the tunnel and its drainage (Case study: Amir-Kabir water transmission tunnel)", 4<sup>th</sup> Conference of Iranian Mining Engineering. University of Tehran. Tehran.
- [37] Rahimi Dizaji, M., & Pourrahimian, Y. (2006). "Study and simulation of the forepoling method in tunnel excavation", 5<sup>th</sup> Student Conference on Mining Engineering.
- [38] Dezianin, H.R., & Daray, R. (2009). "Using forepoling method for digging of 2-A part of Shibli tunnel with view on geotechnical characteristics of the tunnel site", 6<sup>th</sup> Conference of Iranian Geological Engineering and Environmental.
- [39] Haraz Rah Consulting Engineers. (2004). 2<sup>nd</sup> report of Kouhin railway tunnel in Qazvin-Rasht-Bandar Anzali (Technical Report).
- [42] Hedayat-nasab, K., Adib, A., Goshtasebi, K., & Monjezi, M. (2013). "Validation of geotechnical data of Qazvin-Rasht railway tunnel using recursive analysis of monitoring data", *Journal of Engineering Geology*. 7(1), 1725-1742.
- [41] Rahimi, B., Shahriar, K., & Sharifzadeh, M. (2008). "The process of selecting underground design methods", *Journal of Iranian Tunnel Association Magazine*. 5, 9-17.

- [42] Haraz Rah Consulting Engineers (2008). Report of the part 1 of Qazvin-Rasht railway infrastructure operation. Vol. 2. Part 2. Tunnel private technical specifications. 121 p.
- [43] Haraz Rah Consulting Engineers. (2006). Number 1 report of general, tectonic and engineering geological of Qazvin-Rasht railway. (Technical Report).