

PREDICTION OF GROUNDWATER INFLOW INTO TUNNEL USING NUMERICAL MODEL; A PRACTICAL CASE STUDY: KUHIN RAILWAY TUNNEL, QAZVIN- RASHT, IRAN

F. Doulati Ardejani

F. Doulati Ardejani, Faculty of Mining and Geophysics,
Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

R. Mikaeil

R. Mikaeil, Faculty of Mining and Geophysics, Shahrood
University of Technology, Shahrood, Iran

Abstract: Water inflow into underground spaces is one of the serious challenges in safety management which could lead to undesirable effects on excavation process. Therefore, determination of the groundwater inflow into tunnel is necessary to design dewatering systems and predict safety arrangements. In this paper, the groundwater inflow into Kuhin railway tunnel (with 100m overburden and 55m water table from project line) was modeled by SEEP/W software (based on the finite element method) for different excavation stages. The results showed that the water inflow into the Kuhin tunnel in full excavated state is equal $2.194 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}^2$.

پیش بینی میزان نفوذ آب به داخل تونل با استفاده از مدل سازی عددی اجزاء محدود

رضا میکائیل و فرامرز دولتی ارده جانی

چکیده: یکی از چالش های جدی در مدیریت ایمنی فضاهای زیرزمینی، جریان آب به داخل این فضاها می باشد که ممکن است آثار مخربی بر روند عملیات حفاری و فعالیت جنبی بعد از آن داشته باشد. لذا ضرورت دارد جهت طراحی سیستم آگیری تونل و پیش بینی تمهیدات ایمنی قبل از شروع عملیات حفاری، میزان نرخ نفوذ آب به داخل تونل محاسبه شود. در این مقاله با استفاده از مدلسازی عددی اجزاء محدود (نرم افزار SEEP/W) به بررسی و تعیین میزان آب ورودی به داخل تونل راه آهن کوهین (با روباره ۴۰ متر و سطح ایستابی ۲۵ متر از خط پروژه) در بخش های مختلف حفاری پرداخته شد. نتایج مدلسازی نشان داد که میزان آب ورودی به داخل تونل راه آهن کوهین بعد از اتمام مراحل مختلف حفاری، 2.194×10^{-4} متر مکعب بر ثانیه به ازای واحد طول تونل می باشد.

واژه های کلیدی: SEEP/W، جریان آب زیرزمینی، مدل عددی، تونل راه آهن کوهین

تاریخ وصول: ۸۷/۱/۲۱

تاریخ تصویب: ۸۷/۱۱/۱

رضا میکائیل، دانشکده مهندسی معدن، ژئوفیزیک و نفت، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، reza.mikaeil@gmail.com

دکتر فرامرز دولتی ارده جانی، دانشکده مهندسی معدن، ژئوفیزیک و نفت، دانشگاه صنعتی شاهرود، fdoulati@shahroodut.ac.ir

۱. مقدمه

حفر تونل‌ها در زمین‌های آبدار مشکلات زیادی را به دنبال خواهد داشت. از جمله این مشکلات می‌توان به سختی کار در شرایط آبدار برای پرسنل و در برخی مواقع توقف کامل عملیات حفاری اشاره کرد. لذا در طراحی این قبیل تونل‌ها پیش‌بینی دقیق میزان آبدهی تونل در طول مسیر می‌تواند در زمان اجرا تأثیر مهمی در روند حفاری داشته باشد. روش‌های مختلفی (همچون روش‌های عددی و روش‌های تحلیلی) برای محاسبه نرخ نفوذ آب به داخل تونل‌ها ارائه شده‌اند که از این میان روش‌های تحلیلی با تکیه بر معادلات حاکم بر جریان آب و با در نظر گرفتن پارامترهایی نظیر نفوذپذیری، ارتفاع سطح ایستابی و شعاع تونل به تخمین میزان نرخ نفوذ آب به داخل تونل‌ها می‌پردازند.

علاوه بر آن فرمول‌های تحلیلی براساس یک‌سری شرایط مرزی و فرضیات خاص ارائه شده‌اند که سبب محدود شدن دامنه کاربرد آن‌ها در حل مسائل بسیار پیچیده هیدروژئولوژی تونل‌ها می‌شود. در مقابل مدل‌های عددی خصوصاً نرم‌افزارهای تجاری که بر مبنای معادله داری و قانون بقای جرم طراحی شده‌اند و قابلیت اعمال شرایط مرزی مختلف و معرفی ویژگی‌های هیدرودینامیکی لایه‌های آبدار به همراه مختصات هندسی مقطع تونل را دارند و از توانایی خوبی در مش‌بندی مسئله در حال بررسی برخوردار می‌باشند، می‌توانند میزان تراوش آب به داخل تونل‌ها را با دقت مناسب پیش‌بینی نمایند.

در بحث پیش‌بینی میزان نرخ نفوذ آب به داخل تونل‌ها تحقیقات نسبتاً وسیعی انجام شده است [۱ - ۱۲]. از جمله می‌توان به ارائه فرمول‌های تحلیلی، مدل‌های عددی و همچنین بررسی عوامل تأثیرگذار بر روی میزان نرخ نفوذ آب به داخل فضاهای حفاری شده اشاره کرد.

مطالعات سیزانو و همکارانش [۷] در خصوص میزان آب ورودی به داخل یک تونل در سنگ‌های سخت با استفاده از روش‌های آماری برای تحلیل پارامترهای مؤثر بر میزان نرخ نفوذ آب به داخل تونل، مطالعات مولینرو و همکارانش [۹] در خصوص ارائه یک مدل عددی جهت بررسی مسائل هیدروژئولوژیکی در سنگ‌های خردشده تحت شرایط ناپایای جریان آب، از جمله این مطالعات می‌باشند. در این تحقیق سعی شده است تا علاوه بر اعتبار سنجی نرم افزار SEEP/W با روش‌های تحلیلی، به ارائه مدل‌های عددی و پیش‌بینی مقدار آب ورودی به داخل فضای حفاری برای تونل راه آهن کوهین در مراحل مختلف پیشروی پرداخته شود.

۲. معرفی و بررسی اعتبار SEEP/W در پیش‌بینی نرخ

نفوذ آب به داخل تونل

نرم‌افزار SEEP/W برای تحلیل جریان آب در محیط‌های متخلخل تهیه شده است. این نرم افزار قادر است تا شرایط مختلف جریان از

قبیل اشباع یا غیراشباع و محصور یا غیرمحصور بودن سفره با فرض این که ضرائب تراوایی و آب محتوی به صورت تابعی از فشار آب منفذی باشند را در حالت دوبعدی با استفاده از روش عددی اجزاه محدود تحلیل نماید. دامنه کاربرد این نرم‌افزار پروژه‌های مختلف ژئوتکنیکی، هیدروژئولوژیکی، زمین‌شناسی و معدن می‌باشد [۱۳-۱۹] و از قابلیت‌های آن در طراحی مسائل هیدروژئولوژی تونل می‌توان به مدلسازی تونل‌هایی با مقاطع هندسی مختلف و مدلسازی لایه‌های مختلف زمین‌شناسی با خصوصیات هیدرولیکی متفاوت برای محیط اطراف تونل اشاره کرد و همچنین از محدودیت‌های این نرم افزار می‌توان به مدلسازی در محیط‌هایی که خصوصیات هیدرولیکی و تراوایی توسط شکستگی‌ها کنترل می‌شود، اشاره نمود. معادله اساسی جریان آب زیرزمینی به صورت دوبعدی و تحت شرایط اشباع و غیراشباع بودن جریان از تلفیق قانون داری و معادله پیوستگی به صورت زیر به دست می‌آید [۲۰].

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = C \frac{\partial}{\partial t} (h) + Q \quad (1)$$

در این رابطه:

K_x و K_y : به ترتیب ضرائب نفوذپذیری در جهات X و Y

h: هد هیدرولیکی

t: زمان

X و Y: مختصات دکارتی

C: شیب منحنی مشخصه رطوبت

Q: یک منبع جریان مانند پمپاژ، تغذیه و...

هد هیدرولیکی با استفاده از رابطه ۲ با آب محتوی حجمی (θ) مرتبط می‌شود:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = C \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

در نرم‌افزار SEEP/W برای حل معادله جریان در حالت دوبعدی از روش تقریبی گالرکین استفاده شده است. این روش با در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب قادر به ارائه یک راه حل تقریبی برای معادله (۱) می‌باشد [۱۳ و ۲۱]. معادله (۱) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$L(h) = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) - C \frac{\partial}{\partial t} (h) - Q = 0 \quad (3)$$

در این رابطه L یک تابع عملگر می‌باشد که در سیستم جریان آب زیرزمینی تعریف می‌شود. برای حل رابطه (۳) با استفاده از روش گالرکین به رابطه زیر که حل با سعی و خطا معروف است، نیاز می‌باشد.

$$H_{ij} = \iint CN_i N_j dx dy \quad (10)$$

$$h \approx h(x,y,t) = \sum_{i=1}^n h_i(t) N_i(x,y) \quad (4)$$

{F} بردار جریان بوده و به صورت زیر بیان می شود:

در این رابطه:

$h_i(t)$: هد هیدرولیکی در گره i

N : تعداد کل گره ها

$N_i(x, y)$: توابع شکل^۱

با ترکیب روابط (۳) و (۴) رابطه زیر به دست می آید:

$$C_i = - \iint_D Q N_i dx dy - \int_{\beta} N_i \sum_{j=1}^n [K_x \frac{dN_j}{dx} l_x + K_y \frac{dN_j}{dy} l_y] h_j d\beta \quad (11)$$

$$L[h(x,y,t)] = R \quad (5)$$

در ادامه به منظور بررسی اعتبار نرم افزار SEEP/W، مقایسه ای بین روش های تحلیلی ارائه شده در این زمینه با نتایج مدل سازی عددی نرم افزار SEEP/W انجام می شود.

در این رابطه:

R : مقدار باقی مانده یا مقدار خطا می باشد.

اگر مقدار R برای تمامی گره ها صفر شود جواب دقیق حاصل می شود، یعنی:

۲-۱. پیش بینی نرخ نفوذ آب به داخل تونل های دایره ای به کمک روش های تحلیلی

روش های تحلیلی با تکیه بر معادلات حاکم بر جریان آب و با در نظر گرفتن پارامترهایی نظیر نفوذپذیری، ارتفاع سطح ایستابی و شعاع تونل به تخمین میزان نرخ نفوذ آب به داخل تونل می پردازند. برخی از معادلات حاکم بر جریان آب در جدول ۱ نشان داده شده است. شکل ۱ تونل دایره ای شکل به شعاع r درون یک سفره نامحدود با سطح ایستابی به ارتفاع h را نشان می دهد.

$$\int_D RW_i dD = 0 \quad i=1,2,\dots,n \quad (6)$$

در رابطه (۶):

W_i : توابع وزنی روی دامنه D که در روش گالرکین توابع وزنی با توابع شکل برابر می شوند. در تکنیک گالرکین $L(h)$ به تمامی توابع شکل ارتوگونال می باشد. یعنی:

$$\iint L[h(x,y,t)] N_i(x,y) dx dy = 0 \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (7)$$

توابع شکل N_i طوری انتخاب می شوند تا مقدار واحد در گره i و مقدار صفر برای سایر گره ها داشته باشند در این صورت $h_i(t)$ برابر h در n گره از دامنه D می باشد.

با جایگزین نمودن رابطه (۴) در رابطه (۷)، n معادله به صورت زیر (به شکل ماتریسی) به دست می آید.

$$[G]\{h\} + [H]\left\{\frac{dh}{dt}\right\} + \{F\} = 0 \quad (8)$$

در آن $[G]$ و $[H]$ ماتریس های n در n بوده که n معرف تعداد گره ها می باشد. این ماتریس ها به صورت زیر می باشند.

$$G_{ij} = \iint_D [K_x \frac{dN_i}{dx} \frac{dN_j}{dx} + K_y \frac{dN_i}{dy} \frac{dN_j}{dy}] dx dy \quad (9)$$

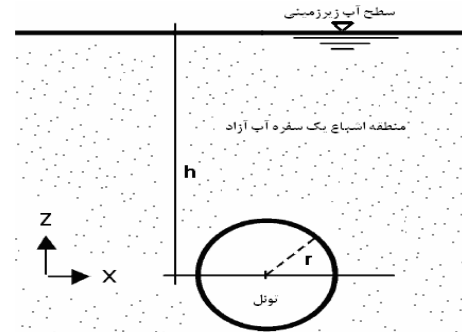
جدول ۱. معادلات تحلیلی حاکم بر جریان آب به داخل تونل ها

معادلات تحلیلی	مرجع
$Q = 2\pi K \frac{h}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right)}$	[۱]
$Q = 2\pi K \frac{h}{\ln\left(\frac{h}{r} + \sqrt{\frac{h^2}{r^2} - 1}\right)}$	[۵]
$Q = 2\pi k \frac{\lambda^2 - 1}{\lambda^2 + 1} \times \frac{h}{\ln \lambda} \ \& \ \lambda = \frac{h}{r} - \sqrt{\frac{h^2}{r^2} - 1}$	[۶]
$Q = 2\pi K \frac{h}{\ln\left(\frac{2h-1}{r}\right)}$	[۸]

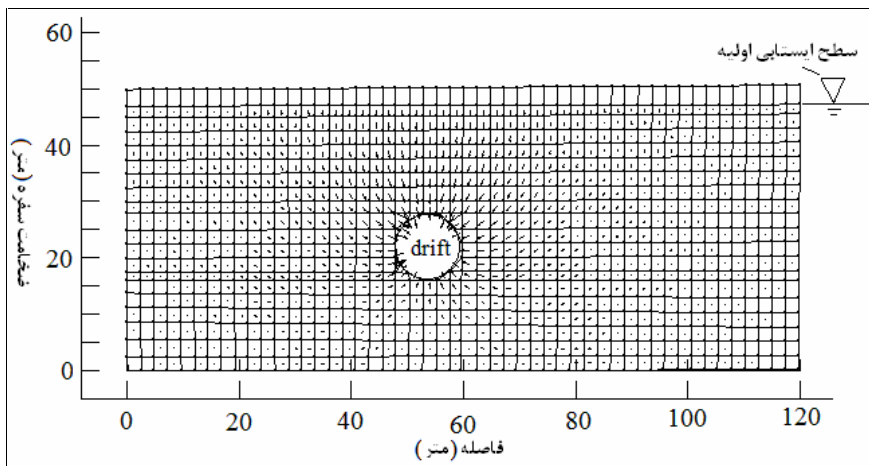
^۱. Shape function

۲-۲. مدل سازی به کمک نرم افزار SEEP/W

در این بخش به کمک نرم افزار SEEP/W به بررسی و پیش بینی نرخ نفوذ آب به داخل یک تونل دایره ای پرداخته می شود. شکل ۲ مدل اجزاء محدود تونل دایره ای شکل به شعاع ۶ متر درون یک سفره نامحدود با سطح ایستابی به ارتفاع ۲۵ متر از مرکز تونل را نشان می دهد.



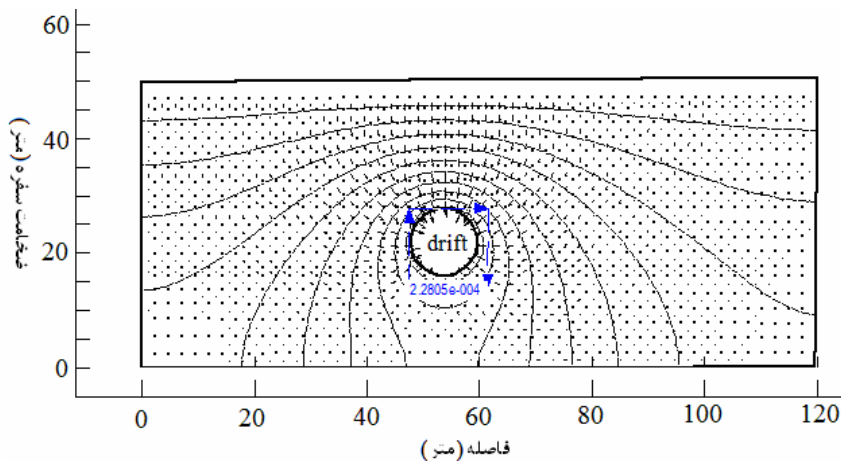
شکل ۱. تونل دایره ای درون سفره ی نامحدود با سطح ایستابی افقی



شکل ۲. مدل اجزاء محدود برای تونل دایره ای به همراه سطح ایستابی و بردارهای سرعت جریان آب

واحد طول تونل به همراه بردارهای سرعت جریان و خطوط هم پتانسیل نشان داده شده است. با توجه به بررسی های انجام شده میزان نرخ نفوذ آب به داخل تونل مورد نظر در شرایط پایا برابر با $2/28 \times 10^{-4}$ متر مربع بر ثانیه به ازاء واحد طول تونل برآورد شده است.

این مدل متشکل از ۱۰۶۵ گره، ۹۹۴ المان به همراه ۲۰ لایه (هر کدام به ضخامت ۲/۳ متر) می باشد. میانگین ضریب نفوذ پذیری و تخلخل سفره نامحدود به ترتیب $3/06 \times 10^{-6}$ متر بر ثانیه و ۰/۳ در مدل به کار برده شده است. شکل ۳ نتایج تحلیل جریان آب با استفاده از مدل را بعد از ۵۰ بار تکرار نشان می دهد. در این شکل میزان آب ورودی به ازاء



شکل ۳. میزان آب ورودی به ازاء واحد طول تونل به همراه بردارهای سرعت جریان و خطوط هم پتانسیل

قطعه اول راه آهن مذکور از ایستگاه سیاه چشمه در کیلومتر ۱۵ راه آهن قزوین-زنجان با ارتفاع ۱۲۵۰ متر نسبت به سطح دریا شروع شده و با راستای تقریباً شمالی-جنوبی و طول ۱۷۲+۴۴ کیلومتر از کنار روستاهای دولت آباد، دستجرد، کندر، مشکین و یل آباد عبور می‌نماید. انتهای قطعه مذکور در نقطه‌ای با مختصات جغرافیایی ۲۲°، ۴۹' طول شرقی و ۱۲°، ۳۶' عرض شمالی، که دارای ارتفاعی معادل ۱۳۰۰ متر از سطح آب‌های آزاد می‌باشد، قرار داشته که نسبت به نقطه شروع خود ۵۰ متر بلندتر است.

مطالعات انجام شده در ساختگاه تونل نشان می‌دهد که تونل در رسوبات سازند هزار دره قرار داشته و جنس زمین پوشاننده آن از تناوب لایه‌های مختلفی برخوردار می‌باشد.

نتایج حاصل از آزمایشات انجام شده بر روی گمانه‌های اکتشافی نشان دهنده پائین بودن ویژگی‌های ژئومکانیکی و متوسط بودن نفوذپذیری توده سنگی پوشاننده تونل می‌باشد. خصوصیات هیدروژئولوژیکی منطقه برای تحلیل جریان سیال در جدول ۳ آورده شده است.

همانطوری که در بخش ۱-۲ به آن اشاره شد فرمول‌های تحلیلی بر اساس یک سری فرضیات طراحی شده‌اند و قادر نیستند تا شرایط دقیق هیدروژئولوژیکی را در ارتباط با تونل شبیه سازی نمایند. بنابراین ارائه یک مدل عددی برای پیش بینی نرخ آب ورودی به داخل تونل، امری ضروری می‌باشد. در این بخش نرخ نفوذ آب به داخل تونل راه آهن کوهین برای مقطعی از تونل با روباره ۴۰ متر و سطح ایستابی ۲۵ متر از خط پروژه توسط نرم افزار SEEP/W مدل سازی می‌شود.

مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی عددی در پیش بینی میزان آب ورودی به داخل تونل مورد نظر با نتایج فرمول‌های تحلیلی، در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج حاصل از این بررسی‌ها نشان داد که دو روش مذکور از توافق خوبی در محاسبه میزان نرخ نفوذ آب به داخل تونل برخوردار می‌باشند.

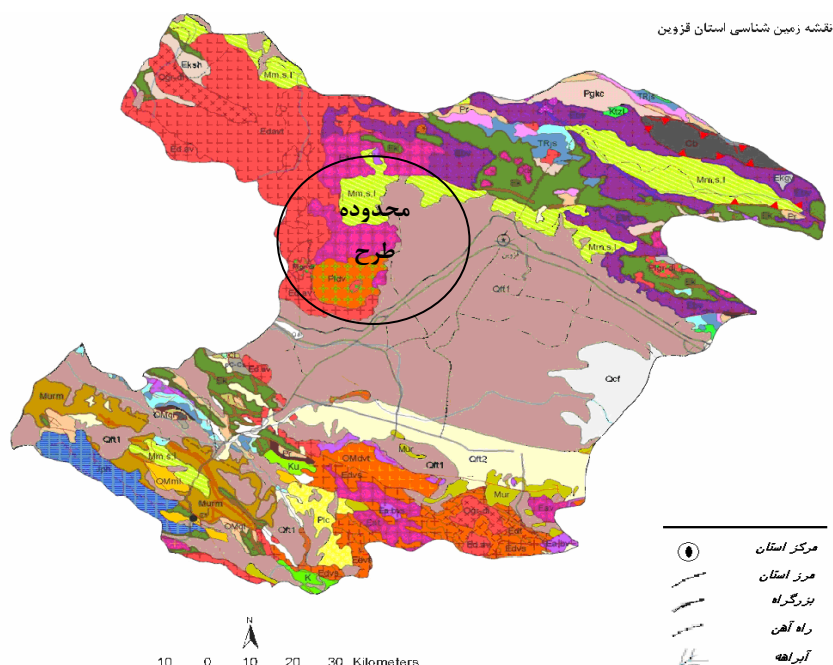
جدول ۲. مقایسه نتایج مدل SEEP/W با روش‌های تحلیلی

روش‌های تحلیلی و عددی	Q (m ² /s)	درصد اختلاف
SEEP/W	۲/۲۸×۱۰ ^{-۴}	-----
Muskat	۲/۲۷×۱۰ ^{-۴}	۰/۴۴
Karlsrud	۲/۴۱×۱۰ ^{-۴}	۵/۷
Lei	۲/۲۸×۱۰ ^{-۴}	۰
El Tani	۲/۲۲×۱۰ ^{-۴}	۲/۶

۳. محاسبه نرخ نفوذ آب در مراحل مختلف حفاری تونل راه آهن کوهین

تونل راه آهن کوهین واقع در قطعه اول راه آهن قزوین-رشت با طول و مقطعی معادل با ۱۶۳۵ متر و ۱۱۰ متر مربع، یکی از تونل‌های بزرگ مقطع در حال اجراء در کشور می‌باشد.

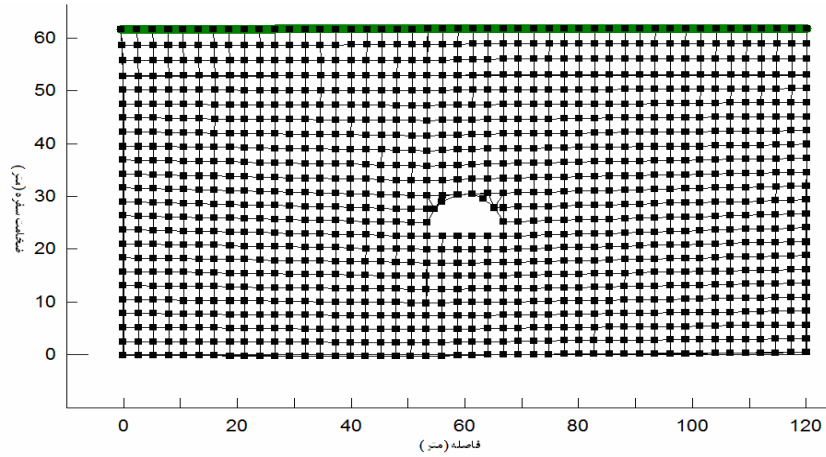
این تونل به منظور ایجاد راه ریلی بین شهرهای یاد شده در قسمت غربی رشته کوه البرز طراحی شده است. شکل ۴ نقشه زمین شناسی قطعه اول راه آهن و منطقه‌ی اجرای طرح را نشان می‌دهد.



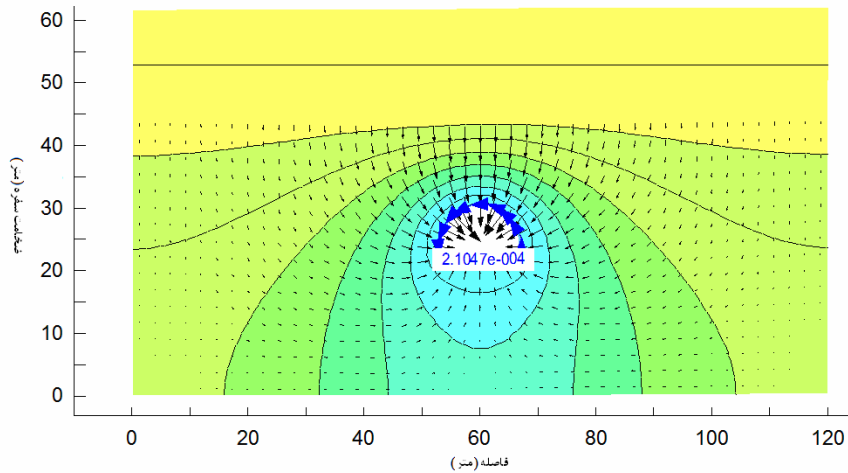
شکل ۴. زمین شناسی قطعه اول محور قزوین-رشت-انزلی و منطقه طرح [۲۱]

جدول ۳. خصوصیات هیدروژئولوژی منطقه برای تحلیل جریان سیال [۲۱]

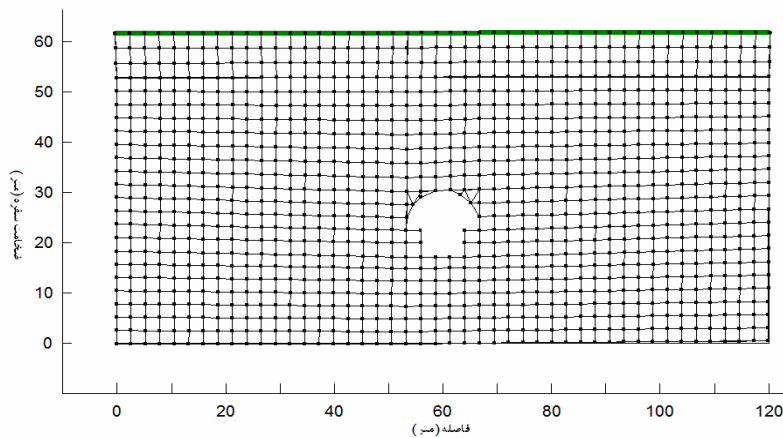
ضریب نفوذ پذیری K (m/s)	تخلخل -	مقاومت کششی سیال (Pa)	مدول حجمی سیال (Pa)	دانسیته سیال $\rho(\text{kg/m}^3)$
$3/0.6 \times 10^{-6}$	۰/۳	۰	1×10^4	1×10^3



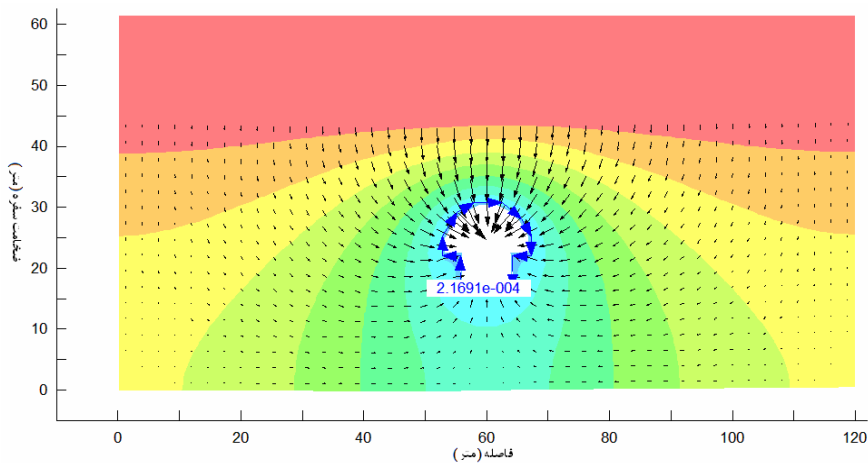
شکل ۵. مدل اجزاء محدود برای بخش نخست حفاری متشکل از ۱۱۰۰ گره و ۱۰۳۰ المان



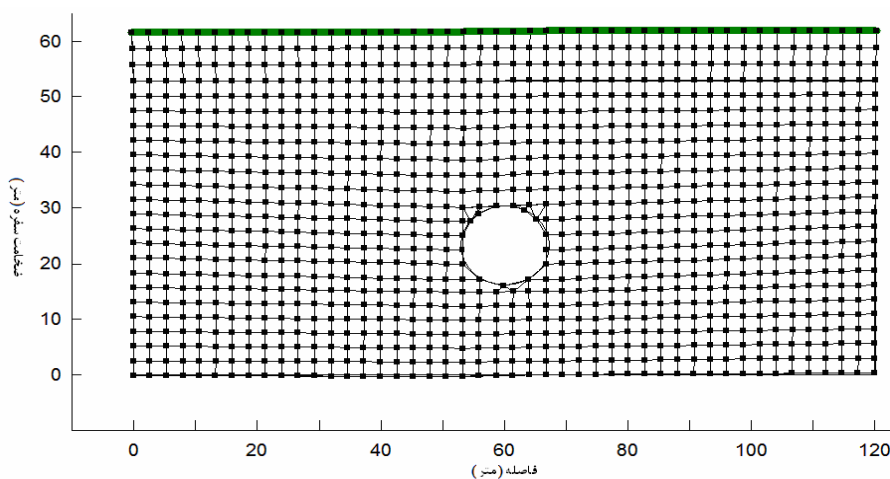
شکل ۶. میزان آب ورودی به ازاء واحد طول تونل به همراه بردارهای سرعت جریان و خطوط هم پتانسیل برای بخش نخست حفاری



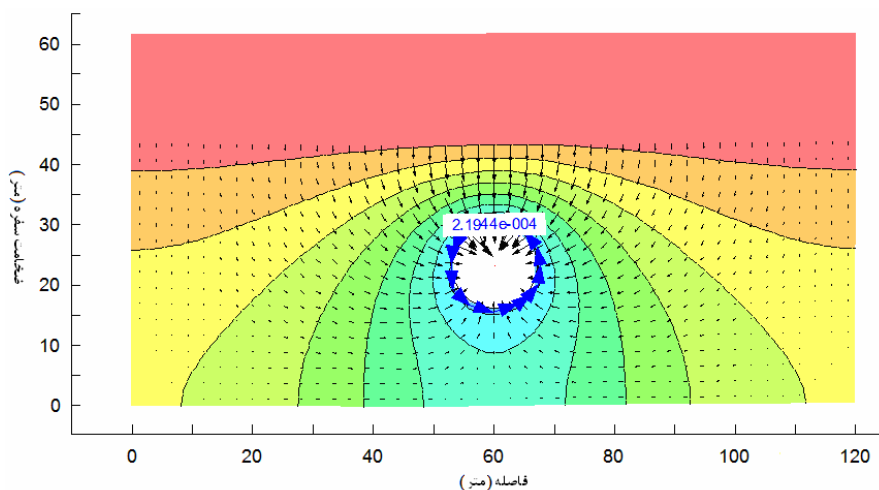
شکل ۷. مدل اجزاء محدود برای بخش دوم حفاری متشکل از ۱۰۹۶ گره و ۱۰۲۴ المان



شکل ۸. میزان آب ورودی به ازاء واحد طول تونل به همراه بردارهای سرعت جریان و خطوط هم پتانسیل برای بخش دوم حفاری



شکل ۹. مدل اجزاء محدود بعد از اتمام حفاری متشکل از ۱۰۹۱ گره و ۱۰۲۳ المان



شکل ۱۰. میزان آب ورودی به ازاء واحد طول تونل به همراه بردارهای سرعت جریان و خطوط هم پتانسیل بعد از اتمام حفاری

برای بخش نخست حفاری متشکل از ۱۱۰۰ گره و ۱۰۳۰ المان، بخش دوم حفاری متشکل از ۱۰۹۶ گره و ۱۰۲۴ المان و برای آخرین بخش حفاری مدل ساخته شده متشکل از ۱۰۹۱ گره و

شکل های ۵ تا ۱۰ مدل های اجزاء محدود ساخته شده با نرم افزار SEEP/W به همراه بردارهای سرعت جریان و خطوط هم پتانسیل را برای بخش های مختلف حفاری نشان می دهند. مدل ساخته شده

- [2] Meiri, D., "Unconfined Groundwater Flow Calculation Into a Tunnel". Journal of Hydrology, Volume 82, Issues 1-2, 30, 1985, pp. 69-75.
- [3] AFTES., *Recommendations for the Treatment of Water Inflows and Outflows in Operated Underground Structures*. Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 4, Issue 3, 1989, pp. 343-407.
- [4] Zhang, L., Franklin, J.A., *Prediction of Water Flow into Rock Tunnels: an Analytical Solution Assuming an Hydraulic Conductivity Gradient*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, Volume 30, Issue 1, 1993, pp. 37-46.
- [5] Lei, S., *An Analytical Solution for Steady Flow into a Tunnel*. Ground Water 37: 1999, 23-26.
- [6] El Tani, M., *Water Inflow into Tunnels*. Proceedings of the World Tunnel Congress ITA-AITES 1999, Oslo, Balkema, pp. 61-70.
- [7] Cesano, D., B. Olofsson, A.C., *Bagtzoglou Parameters Regulating Groundwater Inflows into Hard Rock Tunnels--a Statistical Study of the Bolmen Tunnel in Southern Sweden*. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 15, No. 2, 2000, pp. 153-165
- [8] Karlsrud, K., *Water Control When Tunnelling Under Urban Areas in the Oslo Region*. NFF publication No. 12, 4: 27-33, NFF, 2001.
- [9] Molinero, J., Samper, J., Juanes, R., *Numerical Modeling of the Transient Hydrogeological Response Produced by Tunnel Construction in Fractured Bedrocks*. Engineering Geology 64, 2002, pp. 369-386.
- [10] Cesano, D., Bagtzoglou, A.C., Olofsson, B., *Quantifying Fractured Rock Hydraulic Heterogeneity and Groundwater inflow Prediction in Underground Excavations: the Heterogeneity Index*. Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 18, Issue 1, 2003, pp. 19-34.
- [11] Hwang, J., Lu, C., *A Semi-Analytical Method for Analyzing the Tunnel Water Inflow*. Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 22, Issue 1, January, 2003, pp. 39-46.
- [12] Park, K., Owatsiriwong, A., Lee, J., *Analytical Solution for Steady-State Groundwater Inflow into a Drained Circular Tunnel in a Semi-Infinite Aquifer: A Revisit*. Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 23, Issue 2, 2008, pp. 206-209.
- [13] Doulati Ardejani, F., Singh, R.N., Baafi, E.Y., Porter, I., *A Finite Element Model to: 1. Predict Groundwater inflow to Surface Mining Excavations*. Journal of the International Mine Water Association (IMWA), 22 (1), 2003, pp.31-38.
- [14] Doulati Ardejani, F., Singh, R.N., Baafi, E.Y., Porter, I., *A Finite Element Model to: 2. Simulate Groundwater Rebound Problems in Backfilled Open Cut Mines*. Journal of the International Mine Water Association (IMWA), 22 (1), 2003, pp.39-44.

۱۰۲۳ المان می‌باشد. میانگین ضریب نفوذپذیری و تخلخل سفره نامحدود به ترتیب $۳/۰۶ \times 10^{-۶}$ متر بر ثانیه و $۰/۳$ در مدل به کار برده شده است. میزان نرخ نفوذ آب به داخل تونل راه‌آهن کوهین (به ازاء واحد طول تونل) در مراحل مختلف حفاری برای مقطع ۴۰ متری در جدول ۴ درج شده است.

جدول ۴. پیش بینی مدل SEEP/W برای تعیین نرخ نفوذ

آب به داخل تونل کوهین

مراحل مختلف حفاری	نرخ نفوذ آب (m^3/s)
حفر طاق تونل	$۲/۱۰۵ \times 10^{-۴}$
حفر پاتاق میانی	$۲/۱۷ \times 10^{-۴}$
حفر پاتاق کناری	$۲/۱۹۴ \times 10^{-۴}$

۴. نتیجه گیری

یکی از مشکلات اساسی در حفر تونل های مدفون در زیر سطح ایستایی، هجوم آب به داخل فضای حفاری می باشد. این عامل مهندس طراح را در تعیین دقیق سرعت پیشروی، طراحی سیستم نگهداری، آبگیری و ... در هنگام برنامه ریزی و طراحی پروژه دچار مشکل می‌کند. لذا به دلیل تأثیر مستقیم این پدیده بر سایر عملیات، محاسبه آن الزامی می‌باشد. در طرح حاضر ابتدا اعتبار نرم افزار عددی SEEP/W در تعیین نرخ نفوذ آب به داخل تونل دایره‌ای با کمک روش‌های تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته و در ادامه مقدار نرخ نفوذ آب به داخل تونل راه آهن کوهین در طی مراحل مختلف حفاری مورد محاسبه قرار گرفت. نتایج حاصل از این بررسی ها را می‌توان چنین بیان کرد:

۱- خطای نسبی نسبتاً پائین میان نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و روش‌های تحلیلی تحت شرایط خاص و با اعمال یک سری فرضیات ساده، نشان دهنده صحت قابل قبول نتایج به دست آمده از نرم افزار عددی SEEP/W می‌باشد.

۲- فرمول‌های تحلیلی بر اساس ساده سازی مسئله و با توجه به یک‌سری فرضیات طراحی شده‌اند و قادر نیستند تا شرایط دقیق هیدروژئولوژیکی را در ارتباط با تونل شبیه سازی نمایند بنابراین مدل‌سازی با توجه به شرایط هیدروژئولوژیکی حاکم بر مسئله و همچنین غیر دایروی بودن شکل مقطع تونل کوهین، با کمک نرم افزار SEEP/W انجام شد. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد که میزان آب ورودی به داخل تونل راه‌آهن کوهین بعد از اتمام مراحل مختلف حفاری، $۲/۱۹۴ \times 10^{-۴}$ متر مکعب بر ثانیه به ازای واحد طول تونل می‌باشد.

مراجع

- [1] Muskat, M., "The flow of Homogeneous Fluid Through Porous Media", McGraw Hill, 1937, pp. 175-181.

- [15] Doulati Ardejani, F., Singh, R.N., *Assessment of Ground Water Rebound in Backfilled Open Cut Mines using the Finite Element*. Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Technology, 10 (1), 2004, pp. 1-16.
- [16] Doulati Ardejani, F., Singh, R.N., Sereshki, F., Ataei, M. Mikaeil, R., *Prediction of Groundwater Inflow into Underground Mines Using Analytical and Numerical Models*. 2007 International Conference on Coal Science and Technology, 28th - 31st August 2007, East Midlands Conference Centre, the University of Nottingham, UK., 2007, p. 37 (on CD).
- [17] Doulati Ardejani, F., Baafi, E.Y., Shafaei, S. Z., *Modelling of Groundwater Recovery Process for Prediction of Land Settlement in Surface Mines*. International Journal of Mining, Reclamation and Environment 21 (4), 2007, pp. 271-281.
- [18] Doulati Ardejani, F., Singh, R.N., *Simulation and Numerical Modelling of Groundwater Rebound After Opencast Mine Closure and its Relationship with Backfill Settlement in a Shallow Aquifer*. Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Technology (In press), 2008.
- [19] GEO-SLOPE International, Ltd., *SEEP/W for Finite Element Seepage Analysis*, Available online at: <http://www.geo-slope.com/products/seepw.asp>, 2006.
- [20] Freeze, R.A., Cherry, J.A., *Groundwater*, Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs NJ, 604 pp, 1979.
- [21] Pinder, G.F., Frind, E.O., *Application of Galerkin Procedure to Aquifer Analysis*, Water Resources Research 8(1), 1972, pp.108-120.
- [۲۲] مهندسیین مشاور هرازراه. « دومین گزارش تونل راه آهن کوهین محور قزوین - رشت - بندرانزلی ». ۱۳۸۳.