

ارزیابی نشت آب زیرزمینی در کیلومتر ۴/۶ تونل خط ۷ مترو تهران با نرم افزار SEEP/W و مقایسه نتایج با روش های تحلیلی و مشاهدات

شراره قلی زاده خاصوانی^۱، محمد نخعی^{۲*}، فرزانه مرادی^۳

۱- کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی، دانشکده علوم، دانشگاه خوارزمی

۲- استاد هیدروژئولوژی، دانشکده علوم، دانشگاه خوارزمی

۳- کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی، دانشکده علوم، دانشگاه خوارزمی

*نویسنده مسئول: nakhaeimohammad@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۲۷

چکیده:

یکی از مشکلات مهم در ساخت تونل های مترو در زیر سطح آب زیرزمینی، مشکل ورود آب به تونل است، که می تواند فعالیت تونلسازی را کاملاً تحت تاثیر قرار دهد. پیش بینی نفوذ آب زیرزمینی به تونل برای جلوگیری از مشکلات حین حفاری و کنترل آن با طراحی سیستم زهکشی موضوعی با اهمیت است. روش های متعددی جهت حل مشکلات فوق وجود دارد. به منظور پایین بردن سطح آب زیرزمینی در یک مقطع از تونل خط ۷ مترو تهران (کیلومتر ۴/۶)، از دو گالری با طول ۱۴ متر در کنار تونل استفاده شده است. مدل سازی زهکشی آب و مقایسه نتایج آن با نتایج تحلیلی و مشاهدات در این مقاله بررسی شده است. برای مدل سازی نرم افزارهای زیادی وجود دارد. جهت پی بردن به عملکرد این گونه نرم افزارها در این مقاله با مد نظر قرار دادن اطلاعات واقعی تونل خط ۷ مترو تهران، کیلومتر ۴/۶، مدلی از تونل در نرم افزار SEEP/W، شبیه سازی شد تا نرخ آب ورودی به تونل و زهکشی از آن محاسبه شود. نتایج نشان می دهد که میزان نشت محاسبه شده در روش عددی ۶۴۰ (متر مکعب بر روز) و تحلیلی ۷۴۷/۳ (متر مکعب بر روز) است که تطابق خوبی در محاسبه میزان نفوذ آب زیرزمینی به داخل تونل دارند. خطای روش المان محدود ۱۱٪ است، که نشان دهنده توانایی آن در تخمین مقدار آب ورودی و خروجی از تونل است، لذا این نرم افزار جهت مدل سازی و نیل به اهداف مورد نظر قابل اعتماد می باشد. همچنین عوامل موثر از قبیل تغییرات فواصل گالری ها از تونل و پارامترهایی نظیر نفوذپذیری و بار آبی مورد بررسی قرار گرفت، که بیشترین تاثیر را بر روی آب ورودی به تونل دارند.

واژه های کلیدی: نشت آب، تونل خط ۷ مترو تهران، گالری زهکش، نرم افزار SEEP/W، روش های تحلیلی.

مقدمه:

ثانیه رخ داده است پیش بینی ورود آب های زیرزمینی به یک تونل برای طراحی سیستم زهکشی تونل و به حداقل رساندن اثرات زیست محیطی و خطر ناپایداری تونل و آسیب رسوب گذاری مهم است. نبود یک روش دقیق و مناسب با توجه به پیچیدگی های ورود آب و زهکشی آن همواره مطرح بوده است (مهندسين مشاور ساحل، ۱۳۸۸). برای پیدا کردن روش مناسب محاسبه دبی نشت تونل تاکنون تلاش های فراوانی شده است. روش های مختلفی از جمله روش های عددی و روش های تحلیلی برای محاسبه نرخ نفوذ آب به داخل تونل ها ارائه شده اند. از این میان فرمول های تحلیلی بر

بالا بودن سطح آب زیرزمینی در پروژه های تونل سازی باعث ایجاد مشکلاتی در تونل های موجود و یا اجرای آن می گردد. یکی از چالش برانگیزترین مسائل در عملیات زیرزمینی مانند تونل سازی، جریان آب های زیر زمینی است که عواقب شدیدی مانند عدم ثبات، از دست دادن کارگران، محل سکونت و فاجعه زیست محیطی می شود (پوجاد و همکاران، ۲۰۱۲،، فرهادیان و همکاران، ۲۰۱۶، a, b). در برخی از پروژه های تونل سازی در ایران، مشکلات مربوط به جریان ورودی مانند قمرود، سمنان و کوهگران با حداکثر نرخ ورودی ۸۰، ۷۵۰ و ۱۲۰۰ لیتر بر

پروشت ۲۰۰۵، رنارد ۲۰۰۵) نیز راه حل‌هایی را ارائه دادند که اگرچه در موارد ایده‌آل محدودی بکار می‌رود ولی می‌تواند خیلی مفید می‌باشد. در زمینه حفر گالری، به منظور زهکشی در معادن کارهای متعددی صورت گرفته است بعنوان مثال مائر (۲۰۰۴) به حفر ۳۹ گالری زهکش، در معادن مختلف دنیا طی سال‌های ۱۶۰۰ تا ۱۸۹۷، اشاره کرده است، همچنین گالری زهکش، واقع در معدن بینگهام و گالری زهکش حفر شده در معدن مس اوک تدی (بیل و رد، ۲۰۱۳) کرد. نوروزی سرکار آباد و همکاران (۱۳۹۶)، با استفاده از مدلسازی عددی به بررسی تأثیر دیوار آبیند به نشت در سد سنگریزهای سبالن پرداخت.

پروژه خط ۷ متروی تهران یکی از طولانی‌ترین خطوط متروی شهر تهران است. بخش قابل توجهی از مسیر خط ۷ مترو تهران در منطقه اشباع از آب‌های زیرزمینی قرار دارد، لذا بررسی وضعیت هیدروژئولوژیکی محدوده مورد مطالعه، پیش‌بینی مقدار آب ورودی به تونل و مقدار زهکشی از تونل امری ضروری هست. روش‌های متعددی جهت حل مشکلات، کنترل و کاهش آب زیرزمینی وجود دارد. گالری‌های افقی یکی این راه‌ها برای پایین انداختن سطح آب و خارج کردن آب از تونل می‌باشد. بنابراین لازم است محل و مقدار آب ورودی به تونل پیش‌بینی و تمهیدات لازم جهت ممانعت از ورود آب به کار رفته شود تا از مشکلات بعدی در تونل جلوگیری شود. در این مقاله علاوه بر شبیه سازی و پیش بینی مقدار آب ورودی به تونل و خروجی از تونل توسط گالری‌های افقی به روش عددی و بررسی تأثیر عوامل مختلف بر روی آب ورودی به تونل، به بررسی توانایی مدل نرم افزاری *SEEP/W* و مقایسه و دقت و اعتبار سنجی نرم افزار با روش‌های تحلیلی پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

موقعیت و مشخصات محل مورد مطالعه

پروژه خط ۷ مترو تهران قطعه شرقی- غربی در مجموع دارای طولی بیش از ۱۲ کیلومتر است. تونل در آبرفت‌های کواترنری تهران قرار گرفته است. تمامی مسیر خط ۷ به صورت زیرزمینی است. بخش‌های عمیق تونل در نواحی کوهپایه‌ای و بخش‌های کم عمق آن در دشت قرار گرفته‌اند (چشمی و همکاران، ۱۳۸۵) که موقعیت مسیر تونل در نقشه تهران در شکل ۱ نشان داده شده است. قطعه شرقی خط ۷ مترو تهران در محدوده میدان سعیدی (قیام) کیلومتر ۴۶۰۰ مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور تعمیر و نگهداری دستگاه حفاری در میدان سعیدی، ساخت تانکون و پایین انداختن

اساس یک سری شرایط مرزی و فرضیات خاص ارائه شده اند که سبب محدود شدن دامنه کاربرد آن‌ها در حل مسائل پیچیده هیدروژئولوژی تونل‌ها می‌شود. در مقابل روش‌های عددی قابلیت اعمال شرایط مرزی مختلف و معرفی ویژگی‌های هیدرولیکی لایه‌های آب دار به همراه مختصات هندسی مقطع تونل را دارند و از توانایی خوبی در حل و پردازش حجم بالای داده‌ها و مدل‌سازی مسئله در حال بررسی در مدت زمان کوتاه و با حداقل هزینه برخوردار می‌باشند. به طور فزاینده‌ای، مدل‌های آب زیرزمینی عددی برای این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرند (کریستف بوچرز، ۲۰۱۲). تحقیقات نشان می‌دهد که مقدار واقعی نفوذ آب به تونل‌ها بسیار کمتر از مقدار محاسبه شده با استفاده از روش‌های تحلیلی بوده و نتایج به دست آمده بسیار وابسته به هندسه تونل و شرایط محیطی است (فرهادیان و کتیبه، ۲۰۱۷). پژوهش‌های فراوانی در زمینه نرخ آب ورودی به درون تونل انجام شده است که توسط پژوهشگران متعددی از جمله (گودمن، ۱۹۶۵، کارلسراده، ۲۰۰۱، التانی، ۱۹۹۹، ۲۰۰۳، لی، ۱۹۹۹، هاگوت، ۱۹۴۰) مورد مطالعه قرار گرفته است. میکائیل و دولتی ارده جانی (۱۳۸۷) به پیش بینی میزان نفوذ آب به داخل تونل راه کوهین با استفاده از مدل سازی عددی اجزاء محدود در نرم افزار *SEEP/W* و روابط تحلیلی پرداختند. دانیک و همکاران (۲۰۰۴) با استفاده از مدلسازی جریان آب زیرزمینی و سطحی در ارتباط با سیستم تونل عمیق در میلوآکی، ویسکانسین را شبیه سازی نمودند. نتایج حاصل میزان نشت آب زیرزمینی و حجم آب نفوذی را در قلمرو مدل تعیین کردند، مدلسازی سری زمانی را در جهت برآورد تخلیه آب زیرزمینی به سیستم مترو شهری به کار برده اند. فنگ رینگ و همکاران (۲۰۰۹) مطالعاتی برای تأثیر ساخت تونل بر محیط‌های هیدروژئولوژی در تایوان انجام دادند. نتایج نشان می‌دهد که با تخمین آب ورودی به تونل می‌توان تأثیر ساخت تونل بر رژیم منابع آب منطقه ای و محلی را بررسی کرد. فرهادیان و همکاران (۲۰۱۲) تخمین حداکثر ورودی آب‌های زیرزمینی به تونل آب کرج با استفاده از روش تحلیلی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. سورینا و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از روش عددی مدلی برای جلوگیری از نفوذ آب زیرزمینی به تونل را طراحی و مورد مطالعه قرار دادند. نوری و سلماسی (۱۳۹۶) به بررسی عددی تأثیر پتوی رسی در کاهش نشت از پی سدهای خاکی با استفاده از نرم افزار *SEEP/W* و *SPSS* پرداختند.

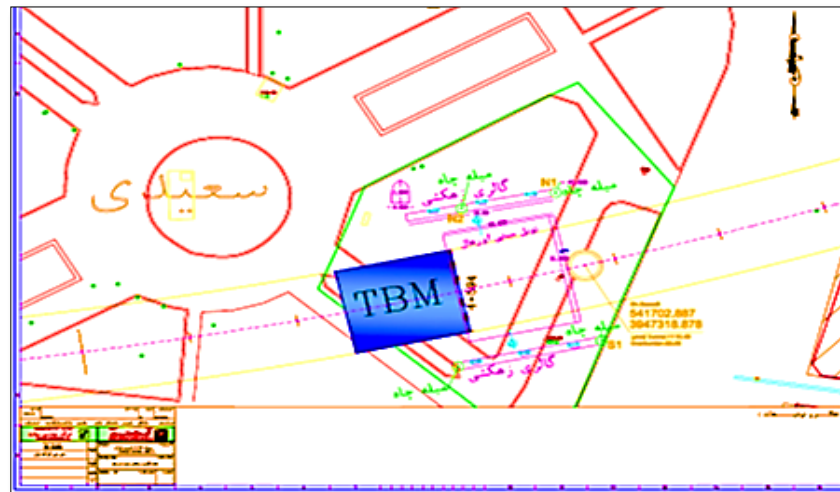
همچنین مطالعاتی برای خارج کردن سریع آب زیرزمینی توسط ژاکوب و لاهمن، ۱۹۵۲، مارشال و پروشت، ۲۰۰۳ ارائه شد.

برداشت سطح آب زیرزمینی در محدوده میدان سعیدی، حدود ۳۶ متر از سطح زمین قرار داشته است. لذا آب زیرزمینی حدود ۶ متر از کف تونل را در بر گرفته است. به همین منظور برای ارائه طرح خشک اندازی در این محدوده از دو گالری زهکش به طول ۱۴ متر مورد استفاده قرار گرفت و اطراف هر گالری زهکش مخروط افت سطح آب زیرزمینی ایجاد می شود (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۹۳).

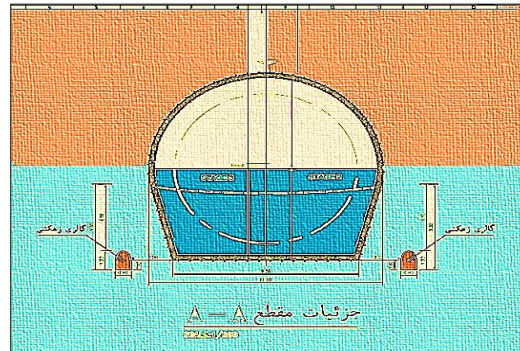
سطح آب زیرزمینی در دستور کار قرار گرفت که در شکل ۲ پلان سطحی مسیر تونل در محدوده میدان سعیدی و محل پیشنهادی توقف دستگاه را نشان می دهد و شکل ۳ مقطع عمودی تونل و گالری اطراف آن را نشان داده است. با توجه به لزوم بهینه نمودن طرح بهسازی زمین در میدان سعیدی، لازم است سطح آب زیرزمینی محدوده که در حال حاضر بالاتر از کف تونل است به پایین تر از این تراز تنزل یابد. بر اساس نتایج آخرین مرحله از



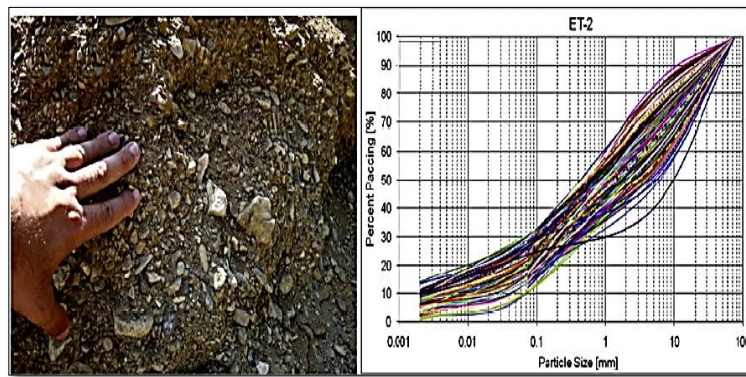
شکل ۱- موقعیت مسیر تونل در نقشه تهران.



شکل ۲- پلان مسیر تونل در محدوده میدان سعیدی و محل توقف ماشین حفاری (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۹۳).



شکل ۳. مقطع عمودی از تونل و گالری ها



شکل ۴- منحنی دانه بندی خاک های تشکیل دهنده واحد ET-2

K = ضریب نفوذپذیری، m/s ، V = سرعت جریان آب به خارج خاک، Q = حجم کل آب جمع شده در زمان t ، m^3/s ، A = سطح مقطع نمونه خاک، m^2 ، Δh = اختلاف هد کل cm ، این اختلاف هد بایستی در طول آزمایش ثابت نگهداشته شود، t = زمان انجام آزمایش یا زمانی که آب خروجی از نمونه جمع آورری می شود. در این آزمون در هر گمانه ۳ آزمایش اجرا خواهد شد. بنابراین انجام ۳۶ آزمون لوفران در کل تونل و در منطقه مورد مطالعه ۳ آزمون لوفران، پیش بینی شده است که محل و موقعیت محدوده مورد بررسی مقاله در میدان سعیدی در جدول ۱ ارائه شده است. جهت انجام آزمایش لوفران، ابتدا گمانه تا عمق مورد نظر برای آزمایش، حفاری و جدارگذاری می شود (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۹).

جدول ۱- آزمایشهای لوفران انجام شده در گمانه مربوط محدوده مورد مطالعه (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۹).

BH-4-7			گمانه
۲۵	۲۱	۱۹	عمق آزمایش (متر)
L-12	L-11	L-10	شماره آزمایش
ماسه سیلتی			لیتولوژی
4×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	تست های لوفران نفوذپذیری (m/s)

هدایت هیدرولیکی در محدوده پروژه

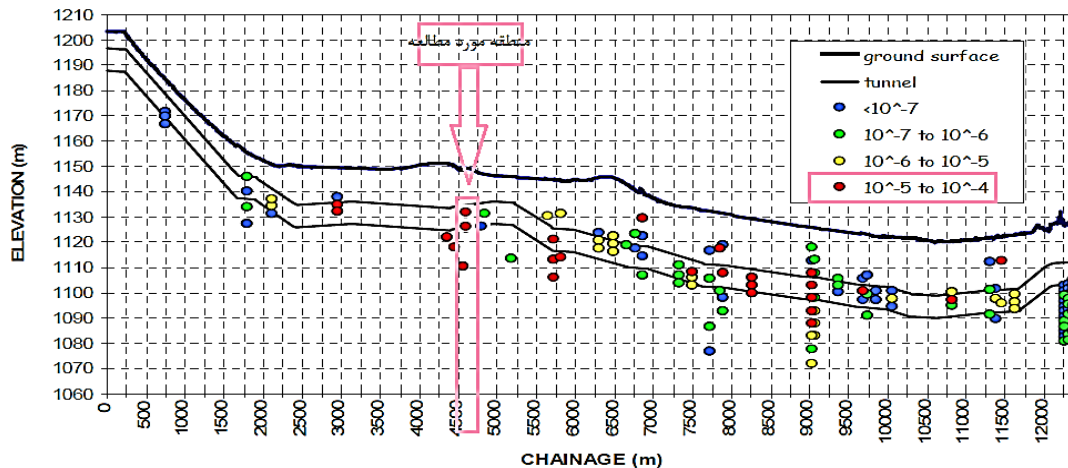
در مطالعه حاضر از مقادیر هدایت هیدرولیکی به دست آمده در مطالعات رایج خط ۷ مترو تهران از آزمایش های لوفران در گمانه های مسیر تونل استفاده شده است. با توجه به سطح آب زیرزمینی در دو یا سه روش بشرح زیر انجام شد تا بدین طریق نتایج اطمینان بخش و قابل قبولی بدست آید:

۱- بار افتان ۲- بار خیزان ۳- بار ثابت و در محدوده مورد مطالعه به دلیل دانه درشت بودن ذرات و بالا بودن سطح آب زیر زمینی از آزمایش بارتایت استفاده شد و فرمول آن در رابطه ۱ بیان شده است:

$$k = \frac{vL}{\Delta h} = \frac{QL}{\Delta hAt} \quad [1]$$

داده شده است. واحدهای خاکی تشکیل دهنده مسیر تونل عمدتاً دارای نفوذپذیری کمتر از 10^{-7} است و تنها ۹ درصد از واحدهای مسیر تونل دارای نفوذپذیری 10^{-5} تا 10^{-3} متر بر ثانیه است، به طور میانگین محدوده مورد بررسی مقدار 4×10^{-5} به دست آمده است.

نتایج آزمایش لوفران به شرح زیر است: تغییرات ضریب نفوذپذیری لایه‌های خاک در برگرفته تونل در منطقه مورد بررسی بین 10^{-4} تا 10^{-5} می‌باشد. نتایج به دست آمده این مطالعات در کل تونل بر حسب آزمایش لوفران به ۴ گروه تقسیم شده است که توزیع مکانی گروه‌های نفوذپذیری بر روی مسیر تونل در نمودار شکل ۵ نشان



شکل ۵- مقادیر نفوذپذیری خاک مسیر بر اساس آزمایش‌های لوفران انجام شده در مرحله مطالعات تونل خط ۷ مترو تهران (مهندسی مشاور ساحل، ۱۳۸۹)

میزان آب ورودی به تونل در محیط‌های آبرفتی از روابط موجود جهت تخمین آب ورودی به تونل در محیط‌های سنگی همچون روش‌های تحلیلی و تجربی تبعیت نمی‌کند. همچنین روش‌های تحلیلی علاوه بر ساده‌سازی دارای یک سری محدودیت‌هایی می‌باشند، از جمله این که برای مسائل پیچیده هیدروژئولوژی در ارتباط با تونل قادر به حل مسئله مورد نظر نمی‌باشند. معادلات حاکم بر نفوذ آب به تونل‌ها بر پایه دو قانون دارسی و بقای جرم به دست آمده اند. بر طبق قانون دارسی، میزان هجوم آب متناسب با میزان هجوم آب در حالت تعادل برابر با میزان آب بازبایی شده توسط منبع است. با در نظر گرفتن پارامترهای نظیر نفوذپذیری، ارتفاع بار آبی و شعاع تونل به تخمین میزان نرخ نفوذ آب به داخل تونل می‌پردازند. در شکل ۶ مدل مفهومی از میزان روباره و سطح آب فعلی و سطح آب مفروض برای طراحی خشک اندازی از تونل به شعاع $4/6$ متر نشان داده شده است. سطح آب زیرزمینی در حال حاضر بالاتر از کف تونل است. بر اساس نتایج آخرین مرحله از برداشت سطح آب زیرزمینی در محدوده میدان

تخمین نفوذ آب زیرزمینی به تونل

برای تخمین میزان نفوذ آب به تونل روش‌های متفاوتی وجود دارد. این روش‌ها شامل روش‌های عددی و تحلیلی می‌باشد. مدل‌های عددی بسته به نوع معادلات به انواع زیر تقسیم می‌شوند: مدل تجربی، مدل‌های احتمالی، مدل‌های علت و معلولی مدل‌های علت و معلولی بر اساس نوع روش حل ریاضی به دو گروه عمده تحلیلی و عددی تقسیم می‌شوند. پنج روش عددی به طور معمول مورد استفاده قرار می‌گیرند (تنگراجم، ۲۰۰۳). عبارتند از: تفاضل محدود^۱، اجزای محدود^۲، تفاضل محدود تلفیقی^۳، روش معادله انتگرال مرزی^۴، المان‌های تحلیلی^۵

دو روش اول در حل مسئله‌های جریان آب زیرزمینی رایج تر هستند (اندرسون و وسنر، ۱۹۹۲). در این تحقیق با استفاده از روش عددی اجزای محدود، منطقه، مورد بررسی قرار گرفت.

پیش‌بینی نرخ نفوذ آب ورودی به داخل تونل به کمک روش‌های تحلیلی

^{*} (Boundray Integral Equation Method)

^۱ (Analytic Elements)

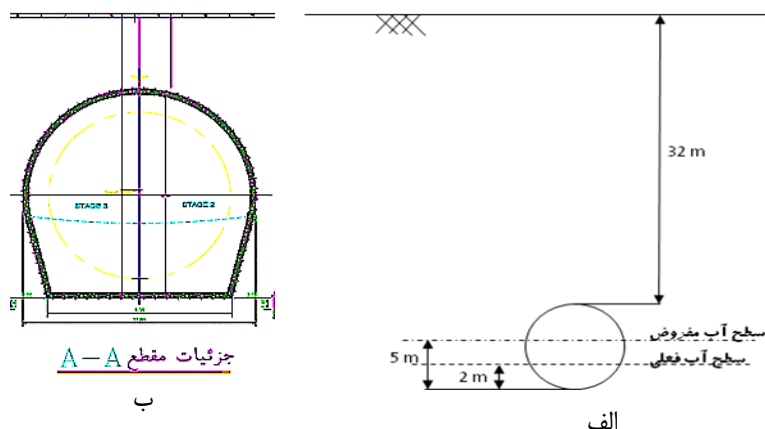
^۲ (Finite Difference)

^۳ (Finite Element)

^۴ (Intergrated Finite Element)

در جدول ۲ نشان داده شده و در جدول ۳ نرخ آب ورودی به تونل برای محدوده مورد مطالعه با استفاده از روش‌های تحلیلی نشان داده شده است.

سعیدی، حدود ۳۶ متری از سطح زمین قرار داشته است. لذا در حال حاضر آب زیرزمینی حدود ۵ متر از کف تونل دایروی شکل محدوده میدان سعیدی را در بر گرفته و در حدود ۶ متر از کف مغار این محدوده را در بر گرفته است. برخی از معادلات حاکم بر جریان آب



شکل ۶- (الف و ب) میزان روباره سطح آب فعلی و سطح آب مفروض برای طراحی خشکاندازی در تونل دایره ای شکل و مغار اطراف تونل.

جدول ۲- خلاصه ای از روابط تحلیلی.

گودمن و همکاران (۱۹۷۶)	$Q = 2\pi K \frac{H}{\ln(\frac{2H}{r} - 1)}$	این معادله دارای ۳ پیش فرض اولیه است. جریان شعاعی، عدم تغییرات قابل توجه لایه بندی، اعمال صحیح نفوذپذیری معادل محیط
فریزر و چری (۱۹۷۹)	$Q = \frac{2\pi K H_0}{\ln(\frac{2H_0}{r})}$	این پژوهشگران با جایگزینی Z به جای H_0 در رابطه گودمن آن را تصحیح کردند.
کارلسرادر (۲۰۰۱)	$Q = 2\pi K \frac{H_0}{\ln(\frac{2H_0}{r} - 1)}$	به منظور کاهش خطا در مورد تونل های ژرف و کم ژرفا (زیر سطح ایستابی) بر پایه مشاهدات میدانی تدوین شده است.
لی و همکاران (۲۰۰۸)	$Q = 2\pi K \frac{H}{\ln(\frac{H}{r} + \sqrt{(\frac{H}{r})^2 - 1})}$	در این رابطه روش گودمن با اعمال دقیق تر شرایط واقعی تصحیح شده است.
التانی (۲۰۰۳)	$Q = 2\pi K \frac{1 - 3(\frac{1}{2H})^2}{(1 - (\frac{r}{2H})^2) \ln(2H) - (\frac{r}{2H})^2}$	این پژوهشگر با بررسی میزان دقت معادلات بالا، این رابطه را به عنوان رابطه بهینه معرفی کرده است.
هاگوت (۱۹۴۰)	$q = \frac{8kHd}{L^2} + \frac{4kH^2}{L^2}$	فرمولی را برای محاسبه فاصله بین زهکشهای عمقی موازی در شرایط پایدار ارائه داده است

جدول ۳- میزان آب ورودی به تونل با استفاده از روش‌های تحلیلی.

التانی (۲۰۰۳)	گودمن و همکاران (۱۹۶۵)	کارلسرادر (۲۰۰۱)	هاگوت (۱۹۴۰)	فریزر و چری (۱۹۷۰)	لی و همکاران (۲۰۰۸)	بار آبی از کف تونل (m)	ضریب نفوذپذیری (m/day)
۷۶۷,۲	۷۳۷,۸	۲۰۳۳,۸	۳۴,۵۶	۷۳۶,۹	۱۱۳۰	۵	۳,۴۵

پیش‌بینی نرخ نفوذ آب ورودی به داخل تونل به کمک روش عددی اجزای محدود در نرم افزار SEEP/W

روش اجزای محدود: یکی از روش‌های غیرمستقیم عددی متداول است که در حل معادله حاکم بر حرکت آب‌های زیرزمینی استفاده می‌شود. در این روش ابتدا حوضه به اجزای چند ضلعی کوچک تقسیم می‌شود تا جایی که تغییرات تابع مجهول در داخل هر جز را بتوان خطی در نظر گرفت. طراحی تونل و گالری‌های افقی توسط نرم‌افزار SEEP/W که یکی از روش‌های اجزای محدود می‌باشد شبیه سازی شد.

معرفی و بررسی اعتبار SEEP/W در محاسبه دبی نشت: SEEP/W یک محصول نرم‌افزاری با المانهای متناهی است که فرمولاسیون جامع و گسترده آن امکان آنالیز مسائل ساده و بسیار پیچیده نشت آب و بررسی شرایط تراوش و جریان آب در خاک را فراهم می‌آورد. این نرم افزار روابط را بصورت تابعی پیوسته مدل‌سازی می‌کند. نرم افزار SEEP/W قابلیت این را دارد که در شرایط جریان ماندگار آنالیز انجام دهد و شرایط آب و خاک را در حالت‌های مرحله‌ای بررسی کند (جواهری و پاک‌نیت، ۱۳۸۸). این نرم‌افزار قادر است با در نظر گرفتن میزان نفوذپذیری خاک و مقدار آب موجود به عنوان تابعی از فشار حفره‌ای و با بکارگیری روابط داری در محیط اشباع و غیر اشباع و شرایط مرزی گذرا با استفاد از روش عددی اجزای محدود تحلیل نماید. در طراحی مسائل هیدروژئولوژی تونل می‌توان به مدل‌سازی تونل‌های با مقاطع هندسی مختلف اشاره کرد. از جمله محدودیت‌های این نرم افزار می‌توان به مدل‌سازی محیطی که خصوصیات هیدرولیکی آن توسط شکستگی‌ها کنترل می‌شود اشاره داشت. دبی نشت از قانون داری رابطه ۲ پیروی می‌کند.

$$q = -K_A \frac{\partial h}{\partial l} \quad [2]$$

که در آن q = دبی نشت (متر مکعب بر ثانیه)، k = ضریب نفوذپذیری (متر بر ثانیه)، A = سطح مقطع جریان آب و خاک (متر مربع)، $\frac{\partial h}{\partial l}$ = شیب هیدرولیکی جریان

معادله حاکم بر جریان آب در محیط متخلخل معادله پواسون است که شکل تعمیم یافته معادله معروف لاپلاس است.

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = q \quad [3]$$

K_x و K_y = ضرایب نفوذپذیری در جهت x و y ، H = هد هیدرولیکی، Q = دبی جریان

در واقع معادله اساسی جریان آب زیرزمینی به صورت دو بعدی و تحت شرایط اشباع و غیراشباع بودن جریان از تلفیق قانون داری و معادله پیوستگی می‌باشد (فریز و چری، ۱۹۷۹). رابطه ۳ برای جریان در شرایط پایا و خاک همگن صادق است و برای شرایط ناپایدار خواهیم داشت:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = \frac{\partial \theta}{\partial t} + Q \quad [4]$$

که در آن $\frac{\partial \theta}{\partial t}$ تغییرات حجمی رطوبت نسبت به زمان است. با استفاده از کامپیوتر می‌توان مجموعه بزرگی از معادلات جبری را به وسیله تکنیک‌هایی تحت عنوان روش‌های تکراری و یا روش‌های ماتریسی حل نمود. برای حل معادله جریان در حالت ۲ بعدی توسط نرم افزار SEEP/W از روش تقریبی گالرکین استفاده شده است، که با اعمال شرایط مرزی مناسب قادر به ارائه یک راه حل تقریبی برای معادله ۳ و ۴ می‌باشد (پیکنز و لنکس، ۱۹۷۶، پیندر و فریند، ۱۹۷۲، دولتی ارده جانی و همکاران، ۲۰۰۳).

مدل‌سازی با استفاده از نرم افزار SEEP/W

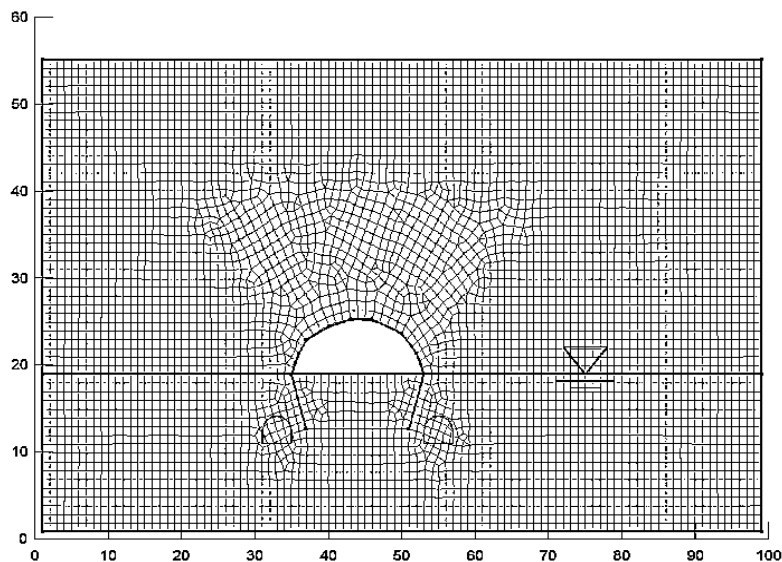
در این بخش با استفاده از روش عددی المان محدود در نرم‌افزار SEEP/W به بررسی میزان آب ورودی به تونل و گالری‌های زهکش پرداخته می‌شود. تونل مورد مطالعه شکلی به صورت نامتقارن و نعلی شکل را دارا می‌باشد، بیشینه ارتفاع آب بالای تونل ۳۶ متر از سطح زمین می‌باشد و تونل در مسیر خود از لایه‌های خاک ماسه سیلتی می‌گذرد. اولین کار، تعیین هندسه و ژئومتری آن است. آنچه در مدل‌سازی و هندسه پروژه می‌بایست مد نظر قرارگیرد، مدل می‌بایست به اندازه کافی بزرگ باشد تا تأثیر مرزها و خصوصیات آن‌ها بر پروژه به خوبی مشخص شود. همان‌طور که گفته شد هدف از این تحقیق بررسی میزان آب ورودی به تونل و گالری‌های زهکش و با مقایسه نتایج آن با نتایج حاصل از روش‌های تحلیلی، به میزان قابل‌اعتماد این روش پی برده می‌شود. با توجه به این موضوع تحلیل نتایج به‌دست‌آمده پس از اتمام مراحل ساخت در چند حالت مورد بررسی قرار می‌گیرد. با استفاده از مختصات تونل، هندسه آن در محیط نرم‌افزار رسم می‌شود، به طور تقریبی می‌توان فاصله مرزهای مدل از تونل و ابعاد آن در این مدل ۱۰۰ متر جهت x و ۶۰ متر در جهت y تونل در نظر گرفت. طراحی مدل توسط نرم‌افزار SEEP/W در ۲ مرحله تحلیل می‌شود. جدول ۴ اطلاعات لازم برای طراحی هندسه تونل در نرم‌افزار SEEP/W را نشان می‌باشد.

جدول ۴- اطلاعات لازم برای طراحی تونل در $SEEP/W$ (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۹۳).

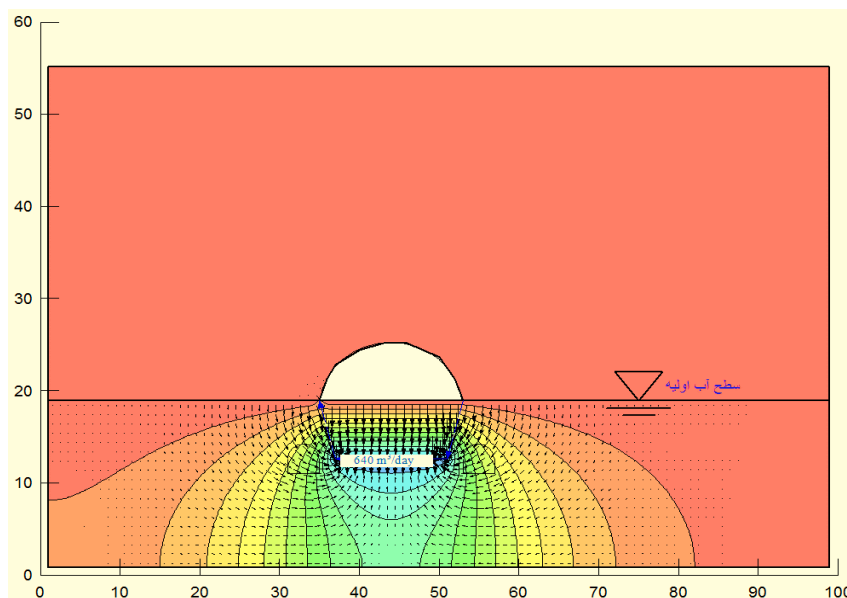
موضوع	مقدار
فاصله سطح زمین تا کف تونل (m)	۴۱,۴۶
مقدار روباره تونل (m)	۳۲,۳۱
فاصله سطح زمین تا کف مغار (m)	۴۲,۴۶
عمق اولیه سطح آب (m)	۳۶
عمق نهایی سطح آب (m)	۴۱,۶
تعداد گالری زهکش	۲ عدد
طول گالری (m)	۱۴
تخلخل	۰,۱۸
ضریب نفوذپذیری (m/day)	۳,۴۵

انجام شده است. میزان آب ورودی به ازاء واحد طول تونل به همراه بردارهای سرعت جریان و خطوط هم پتانسیل در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به بررسی های انجام شده میزان نرخ نفوذ آب به داخل تونل مورد نظر در شرایط پایا برابر ۶۴۰ متر مکعب بر روز به ازاء واحد طول برآورد شده است.

در مرحله اول به ترسیم هندسه مدل و اعمال شرایط مرزی اختصاص یافت. در این مرحله حفاری مقطع فوقانی تونل انجام شده است و پس از تحلیل مدل توسط نرم افزار $SEEP/W$ به تعادل رسید. در شکل ۷ مدل اجزای محدود تونل رسم شده توسط نرم افزار $SEEP/W$ را نشان می‌دهد. این مدل متشکل از ۵۲۸۶ گره، ۵۱۳۷ المان می‌باشد مش بندی در اطراف تونل به صورت ریزتر



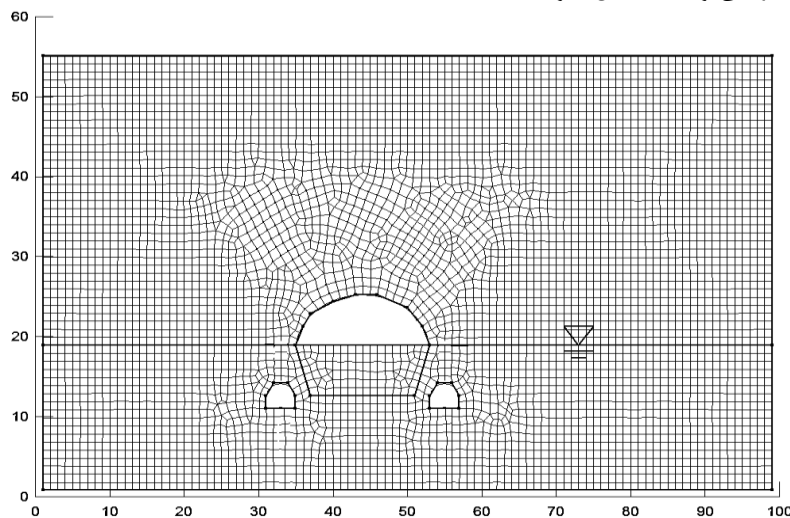
شکل ۷- مدل اجزاء محدود برای بخش نخست حفاری متشکل از ۵۲۸۶ گره و ۵۱۳۷ المان.



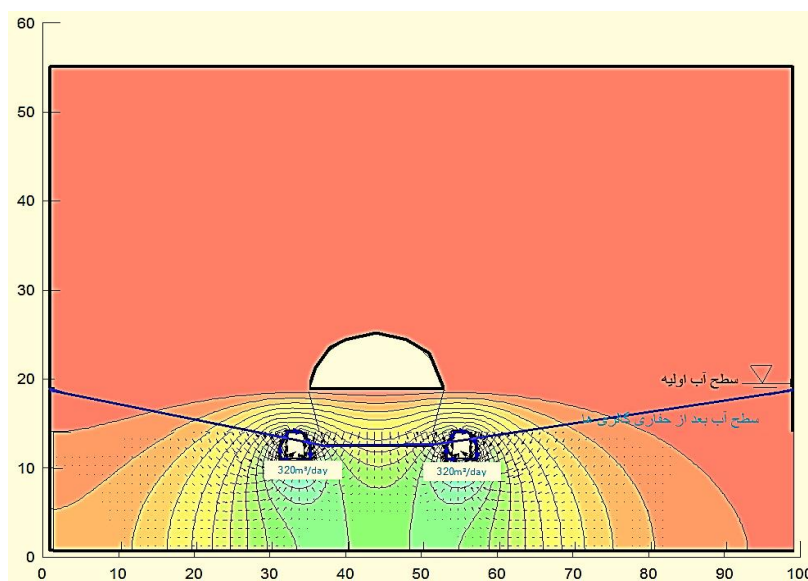
شکل ۸- میزان آب ورودی به ازاء واحد طول تونل به همراه بردارهای سرعت و خطوط هم پتانسیل برای بخش نخست حفاری در حالت پایدار .

زهکشی ۶۴۰ متر مکعب بر روز آب از تونل می‌شود. شکل ۱۰ نتایج تحلیل جریان آب را بعد از حفر گالری‌ها نشان می‌دهد. جدول ۵ نتایج حاصل از محاسبه میزان آب زهکشی از تونل توسط نرم‌افزار *SEEP/W* نشان داده است.

در مرحله دوم، حفاری گالری صورت پذیرفت و برای بار دیگر مدل تحلیل شده و به تعادل رسید. مدل ساخته شده برای بخش دوم متشکل از ۵۲۸۱ گره و ۵۱۲۹ المان می‌باشد که در شکل ۹ نشان داده شده است. باحفر گالری‌ها، آب از جایی که پتانسیل بالا دارد به سمت گالری با پتانسیل صفر می‌رود تا متعادل شود که باعث



شکل ۹- مدل اجزاء محدود برای بخش دوم حفاری متشکل از ۵۲۸۱ گره و ۵۱۲۹ المان.



شکل ۱۰- میزان آب ورودی به ازاء واحد طول تونل به همراه بردارهای سرعت جریان ۱ و خطوط هم پتانسیل در مرحله نهایی حفاری (حفر گالری) در حالت پایدار .

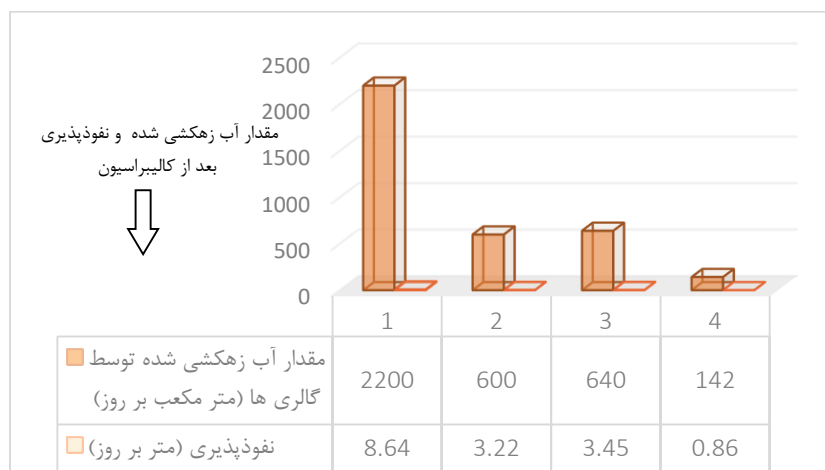
جدول ۵- میزان آب زهکشی شده توسط گالری‌ها در حال پایدار توسط نرم‌افزار SEEP/W.

نفوذپذیری (m/day)	آب زهکشی شده تونل توسط گالری‌ها (m ³ /day)		خطا (درصد)	
	(مشاهدات)		SEEP/ W	SEEP/ W
	(مهندسیین مشاور ساحل، ۱۳۹۳)			
۳/۴۵	۶۰۰		۶۴۰	۱۱٪

کالیبراسیون صورت گرفت. مقدار خطا در حالت پایدار ۱۱ درصد می‌باشد. تراز آب مشاهده در این منطقه با تراز آب محاسبه شده یکسان می‌باشد. مقدار هدایت هیدرولیکی محاسبه شده با توجه به اینکه مقدار حدودی ۰٫۸۶-۸٫۶۴ متر بر روز اندازه گیری شده با توجه به کالیبراسیون انجام شده مقدار ۳٫۲۲ متر بر روز را برای این مدل در نظر گرفته شده است که در جدول ۶ و شکل ۱۱ به همراه مقدار آب زهکشی به دست آمده توسط گالری‌ها نشان داده شده است.

کالیبراسیون و بررسی عوامل موثر بر روری آب ورودی به تونل

کالیبراسیون و صحت سنجی مدل برای هر مدل پیش بینی کننده امری ضروری است. توانایی یک مدل در شبیه‌سازی شرایط مشاهده شده اطمینان به مدل مفهومی و مدل ریاضی را فراهم می‌کند. کالیبراسیون فرآیندی برای تعدیل پارامترها یا جریان‌ها مانند هدایت هیدرولیکی و تغذیه در محدوده‌های منطقی به منظور سازگاری با شرایط مشاهده شده می‌باشد که توسط کریستف ولز (۲۰۱۲) مورد بررسی قرار گرفت. بعد از آماده شدن ورودی‌ها، مدل ابتدا در حالت پایدار اجرا و با روش آزمون و خطا تغییر پارامترها



شکل ۱۱- مقایسه ضریب نفوذپذیری مشاهده شده و محاسبه شده توسط نرم افزار $SEEP/W$ (کالیبراسیون در حالت پایدار).

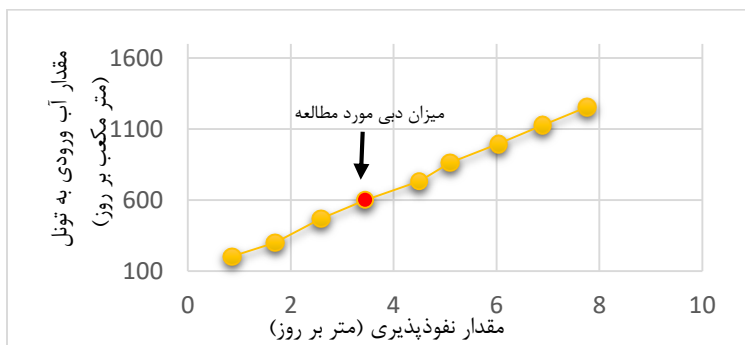
جدول ۶- میزان آب زهکشی شده بعد از کالیبراسیون در نرم افزار $SEEP/W$.

زهکش آب ورودی توسط گالری ها در نرم افزار $SEEP/W$ (m^3/day)	نفوذپذیری بعد از کالیبراسیون (m/day)
۶۰۰	۳/۲۲

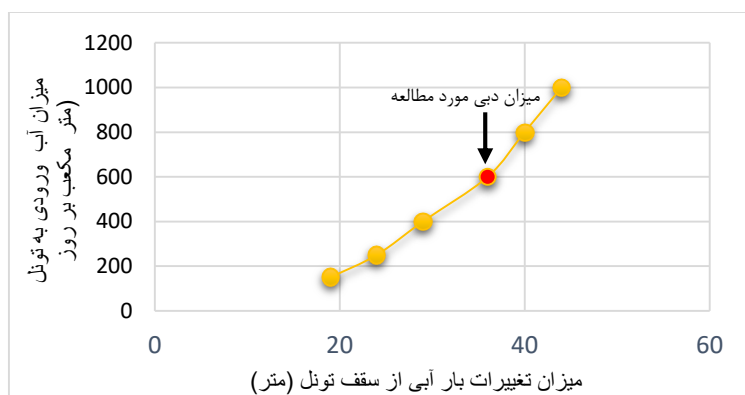
متر بر روز را نشان می دهد، که با این تغییرات مشخص شد که نرخ آب ورودی به صورت خطی با تغییر K نسبت به مدل اصلی مورد مطالعه که نفوذپذیری ۳،۲۲ متر بر روز مقدار دبی ۶۰۰ متر مکعب بر روز را نشان می دهد، کاهش یا افزایش می یابد و با توجه به اعداد به دست آمده با مقدار اندکی افزایش یا کاهش در این مقدار تاثیر زیادی بر روی نرخ آب ورودی اعمال می کند. شکل ۱۳ حساسیت مدل به میزان بار آبی را نشان می دهد، هرچه ارتفاع بار آبی از سقف تونل بیشتر باشد میزان آب ورودی به تونل نیز افزایش می یابد و تاثیر زیادی را بر نرخ آب ورودی به تونل اعمال می کند. شکل ۱۴ تغییرات فاصله گالری ها توسط نرم افزار $SEEP/W$ در محدوده مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفت و به این نتیجه دست یافته شد که با زیاد شدن عمق گالری ها و فاصله گالری ها به صورت عرضی از تونل مقدار آب ورودی به گالری ها بیشتر و مقدار بیشتری از آب را می توان زهکشی کرد.

تاثیر عوامل مؤثر بر روی نرخ آب ورودی به تونل و بررسی مقدار زهکشی توسط گالری ها در حالت پایدار

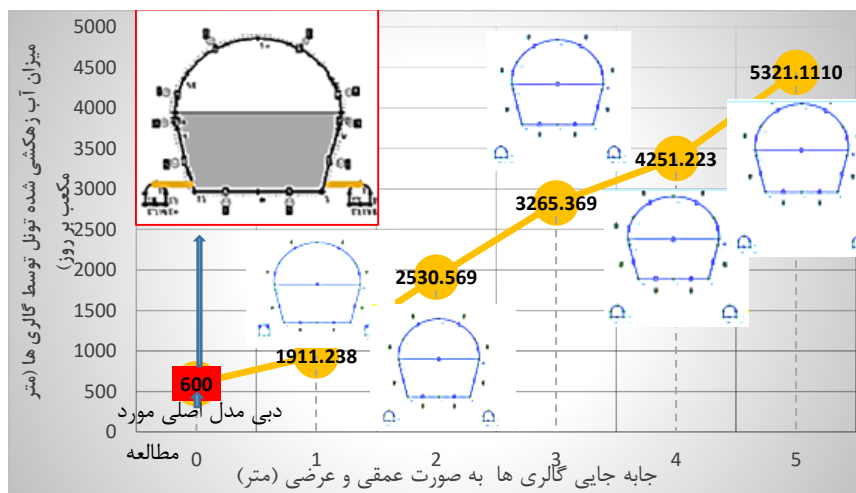
برای بررسی تاثیر عوامل مؤثر بر روی نرخ آب تحلیل حساسیت انجام داده می شود. تحلیل حساسیت روشی در به کمیت آوردن عدم قطعیت های موجود در مدل واستجی شده می باشد. تحلیل حساسیت جزء مراحل اساسی مدل سازی بوده که بوسیله تغییر پارامترهای مدل از جمله هدایت هیدولیکی، سطح آب زیرزمینی و بررسی تاثیر این تغییرات در خروجی مدل، انجام می شود. اگر تغییر در پارامتر ورودی باعث تغییر بزرگی در خروجی مدل شود، مدل به آن پارامتر حساس است. شیوه رایج در تحلیل حساسیت این است که فقط یک پارامتر ورودی تغییر داده شود (باتو، ۲۰۰۶). با توجه به تاثیر تغییرات اعمال شده در پارامترهای مورد بررسی، میزان حساسیت مدل به پارامترها و در نتیجه تاثیر آن بر روی نرخ آب ورودی به تونل مورد مطالعه، مشخص گردید. شکل ۱۲ حساسیت مدل نسبت به تغییرات هدایت هیدرولیکی را در بازه ۰/۸۶ تا ۸/۶



شکل ۱۲- حساسیت آب ورودی به تونل نسبت به تغییرات نفوذپذیری.



شکل ۱۳- حساسیت آب ورودی به تونل نسبت به تغییرات بار آبی.



شکل ۱۴- حساسیت زهکشی آب از تونل نسبت به میزان جابه جایی گالری ها.

در جدول ۷ و شکل ۱۵ نشان داده شده است. نتایج حاصل از این بررسی ها نشان می دهد که دو روش مذکور از تطابق خوبی در محاسبه میزان نرخ نفوذ آب به داخل تونل برخوردار می باشند. نتایج روش های تحلیلی به نتایج مدل نزدیک است و این مطلب صحت

بحث

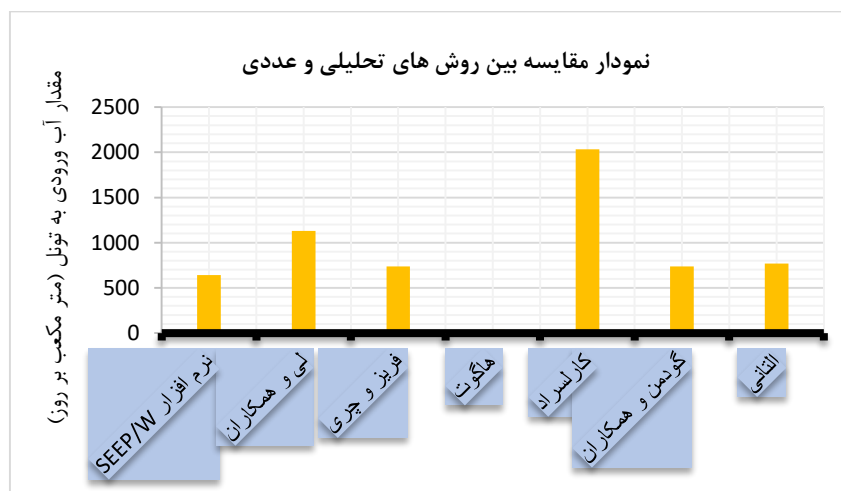
مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی عددی در پیش بینی میزان آب ورودی به داخل تونل مورد بررسی با نتایج فرمول های تحلیلی و اختلاف درصد هر کدام را با حالت کالیبره مدل و واقعیت

نتایج بیشتری به مدل دارند و این به این علت است که شرایط و فرضیات این روش‌ها به شرایط و فرضیات مدل نزدیک می‌باشد.

نتایج را بیشتر می‌کند. از روش‌های تحلیلی استفاده شده روش گودمن و همکارانش، ۱۹۶۵، التانی، ۲۰۰۳، و فریز و چری، ۱۹۷۰)

جدول ۷- مقایسه نتایج حاصل از نرم افزار $Seep/w$ و روش تحلیلی.

روش محاسبه آب ورودی به تونل	نرم افزار $Seep/w$	لی و همکاران (۲۰۰۸)	فریز و چری (۱۹۷۰)	هاگوت (۱۹۴۰)	کارلسراد (۲۰۰۱)	گودمن و همکاران (۱۹۶۵)	التانی (۲۰۰۳)
میزان محاسبه شده آب ورودی به تونل (متر مکعب بر روز)	۶۴۰	۱۱۳۰٫۹	۷۳۶٫۹	۳۴٫۵۶	۲۰۳۳٫۸	۷۳۷٫۸	۷۶۷٫۲
اختلاف روش تحلیلی نسبت به روش عددی (درصد)	-	۷۶٫۷۰	۱۵٫۱۴	۹۴٫۶	۲۱۷٫۸	۱۵٫۱	۱۹٫۸
خطا نسبت به واقعیت و بعد از کالیبراسیون مدل (درصد)	۱۱	۸۸٫۵	۲۲٫۸	۹۴٫۲	۲۳۹	۲۳	۲۷



شکل ۱۵- نمودار مقایسه بین روش های تحلیلی و عددی.

فرضیات ساده نشان دهنده صحت قابل قبول نتایج به دست آمده از نرم افزار عددی $SEEP/W$ می باشد.
- از روش‌های تحلیلی استفاده شده روش گودمن و همکاران، التانی و فریز و چری نتایج نزدیک‌تری به مدل دارند و این به این علت است که شرایط و فرضیات این روش‌ها به شرایط و فرضیات مدل نزدیک می باشد.

- بالا بودن سطح ایستابی آب زیرزمینی یکی از مسایل مهمی است که می‌تواند موجب اختلال در انجام پروژه‌های عمرانی از قبیل ساخت تونل گردد. استفاده از زهکش‌ها برای خارج کردن آب ضروری است، در این مطالعه گالری‌هایی حفر شد که مقدار آب ورودی تونل را با توجه به مدل ساخته شده خارج نمود و افتی در

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر بررسی میزان آب زهکشی شده از تونل به وسیله گالری‌های افقی که اطراف تونل حفر شده است در محدوده میدان سعیدی تونل خط ۷ مترو نشان می‌دهد که در این محدوده بر اساس نتایج به دست آمده کل حجم آبی که توسط گالری‌ها از تونل خارج می شود با استفاده از نرم افزار $SEEP/W$ برابر ۶۴۰ متر مکعب بر روز است که با تفاوت خطای ۱۱ درصد از مقدار دبی واقعی و به واقعیت نزدیک می‌باشد. نتایج حاصل از این بررسی‌ها را می‌توان چنین بیان کرد:

- خطای نسبی نسبتاً پایین میان نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و روش‌های تحلیل تحت شرایط خاص و با اعمال یک سری

Beal, G., Read, J. 2013. Guidelines for evaluating water in pit slope stability, CSIRO publishing, 614p.

Butscher, C. 2012. Steady-state groundwater inflow into a circular tunnel. Tunn Undergr Space Technol. p. 158-167.

Dunning, C. P., Feinstein, D. T., Hunt, R. J. 2004. Simulation of ground-water flow, surface-water flow, and a deep sewer tunnel system in the Menomonee Valley, Milwaukee, Wisconsin, Scientific Investigation Report, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 503 p.

Doulati Ardejani, F., Singh, R.N., Baafi, E.Y., Porter, I. 2003. 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): 39-44.

Doulati, Ardejani F., Singh, R.N., Baafi, E.Y., Porter, I. 2003. A finite element model to: 1. Predict groundwater inflow to surface mining excavations. Journal of the International Mine Water Association (IMWA), 22 (1): 31-38.

Doulati Ardejani, F., Singh, R.N. 2004. Assessment of groundwater rebound in backfilled open cut mines using the finite element method. Journal of the Rock Mechanics & Tunnelling Techniques, 10 (1): 1-16.

Eltani, M. 2003. Circular tunnel in a semi-infinite aquifer. Tunneling and Underground Space Technology, 18: 49-55.

Farhadian, H., Aalianvari, A., Katibeh, H. 2012. Optimization of analytical equations of groundwater seepage into tunnels, a case study of Amirkabir tunnel J Geol Soc India, 80: 96-100.

Farhadian, H., Katibeh, H., and Huggenberger, P., 2016a. Empirical model for estimating groundwater flow into tunnel in discontinuous rock masses. Environ Earth Sci, 75(6): 1-16.

Farhadian, H., Katibeh, H., Huggenberger, P., Butscher, C. 2016b. Optimum model extent for numerical simulation of tunnel inflow in fractured rock. Tunn. Undergr. Space Technol, 60: 21-29.

Farhadian, H., Nikvar Hassani, A., Katibeh, H. 2017. Groundwater inflow assessment to Karaj Water Conveyance tunnel, northern Iran. KSCE J. Civil Eng, 21 (6): 2429-2438.

-Feng-Rong, Y., Cheng-Haw, L., Wen-Jui, K., Hsin-Fu, Y. 2009. The impact of tunneling construction on the hydrogeological environment of Tseng-Wen Reservoir Transbasin Diversion Project in Taiwan. Engineering Geology, p39-58.

حدود ۶ متر را در سطح آب اولیه ایجاد کرد که تأثیر ویژه گالری را در فرآیند زهکشی نشان می‌دهد و توانایی مناسب مدل عددی در تخمین مقدار آب ورودی و خروجی از تونل می‌باشد.

- مدل بیشترین حساسیت را به نفوذپذیری خاک (K)، ارتفاع بار آبی در بالای تاج تونل دارد و هرچه نفوذپذیری، بار آبی بیشتر شود دبی ورودی به تونل نیز بیشتر خواهد بود.

منابع

جواهری، ا.، پاک نیت، ا. ۱۳۸۸. تحلیل استاتیکی و دینامیکی سدهای خاکی با استفاده از Geostudio، جلد اول، انتشارات نشر علم عمران، ۳۲۴ص.

چشمی، اکبر، فاخر، علی، خامه چیان، م. ۱۳۸۵. بررسی های زمین شناسی مهندسی آبرفت های تهران در مسیر خطوط ۳ و ۷ متروی شهری، دهمین همایش انجمن زمین شناسان ایران، تهران، انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۲ صفحه.

مهندسین مشاور ساحل. ۱۳۸۸. هیدروژئولوژی مسیر تونل پروژه خدمات مهندسی پروژه خط ۷ متروی تهران، قطعه شرقی- غرب، ۹۶ صفحه.

مهندسین مشاور ساحل. ۱۳۸۹. پروژه خط ۷ مطالعات زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیک مسیر تونل (قطعه شرقی- غربی)، ۹۶ ص.

مهندسین مشاور ساحل. ۱۳۹۳. پروژه خدمات مهندسی پروژه خط ۷ متروی تهران، قطعه شرقی- غربی، مطالعات مهندسی و کنترل کیفی حین ساخت، خشک اندازی، محدوده توقف دستگاه حفاری در میدان سعیدی، ۱۱ ص.

میکائیل، رضا، دولتی ارده جانی، ف. ۱۳۸۷. پیش بینی میزان نفوذ آب به داخل تونل با استفاده از مدل سازی عددی اجزاء محدود، نشریه بین المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت، جلد ۱۹، شماره ۹، ص ۷۳-۶۵.

نوری، م.، سلماسی، ف. ۱۳۹۶. بررسی عددی تأثیر پتوی رسی در کاهش نشست از پی سدهای خاکی، هیدروژئولوژی، دوره ۲، شماره ۱، ۲۵۰-۷۰.

نوروزی سرکارآبادی، سلماسی، ف.، ارونوقی، هادی. ۱۳۹۶. بررسی تأثیر دیوار آببند بر گرادیان هیدرولیکی و نشست در سد سنگریزه های سبالن با شبیه سازی عددی، هیدروژئولوژی، دوره ۲، شماره ۱۷۱- ۸۴.

Anderson, M.P., Woessner, W.W. 1992. Applied Groundwater modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press, 5(3): 381 p.

Batu, V. 2006. Applied Flow and Solute Transport Modeling in Aquifers. Taylor & Francis Group Inc, 667p.

- Lei, S., 1999. An Analytical Solution for Steady Flow into a Tunnel. *Ground Water*, 37: 23-26.
- Marechal, J.C., Perrochet, P. 2003. New analytical solution for the study of hydraulic interaction between Alpine tunnels and groundwater. *Bulletin De La Societe Geologique De France*, 174 (5): 441–448.
- Mather, J.D., 2004. 200 years of british hydrogeology, Geological Society, London, Special publication, 225: 1-13.
- Surinadu, L., GurunadhaRao, V.V.S., Choudhary, S. K., Khokher, C.S., Nandan, M.J., Verma, Y. 2015. Application of MODFLOW for Groundwater Seepage problems in the subsurface tunnels: *J.Ind. Geophys*, 19(4):422-432.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A. 1979. *Groundwater*, Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, vol. 7632, 604.
- Hooghoudt, S.B. 1940. General consideration of the problem of field drainage by parallel drains, ditches, watercourses, and channels. Publ. No.7 in the series Contribution to the knowledge of some physical parameters of the soil, Bodemkundig Instituut, Groningen, The Netherlands.
- Jacob, C.E., Lohman, S.W., 1952. Non steady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer. *Transactions of the American Geophysical Union*, 33 (4): 559–569.
- Karlsrud, K., 2001. Water control when tunneling under urban areas in the Olsoregion. NFF publication, 12 (4): 27- 33.