تحلیل برگشتی پارامترهای هیدرودینامیکی محیط متخلخل پیرامون بخش شرقی تونل ۷ مترو تهران با استفاده ازگالری‌های زهکش در نرم‌افزار PLAXIS و FLAC

شراره قلی زاده خاصوانی [۱]، محمد نخعی*[۲]، صادق طریق ازلی [۳]

۱-کارشناسی‌ارشد زمین‌شناسی هیدروژئولوژی، دانشگاه خوارزمی
۲-استاد گروه زمین‌شناسی، دانشگاه خوارزمی
۳-دکتری زمین‌شناسی مهندسی، مهندسین مشاور ساحل

پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱/۲۹
تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۷/۸/۱۱

چکیده

بالا بودن سطح آب زیر زمینی یکی از مسائل مهمی است که می‌تواند موجب اختلال در ساخت تونل شود. پیش‌بینی نفوذ آب زیرزمینی به تونل برای جلوگیری از مشکلات حین حفاری و طراحی سیستم زهکشی موضوعی بسیار مهم است؛ بنابراین لازم است مقدار جریان آب و مدل زهکشی آن پیش‌بینی و در طراحی‌ها لحاظ گردد. به همین منظور برای ارائه طرح خشک اندازی در قسمت شرقی خط ۷ مترو تهران، در مقطع کیلومتراژ ۴+۵۰۰ تا ۴+۶۰۰ از دو گالری زهکش به طول ۱۴ متر استفاده می‌شود. مدلسازی و تخمین آب ورودی به تونل نیازمند اطلاعات تکمیل و دقیق خصوصیات هیدرودینامیکی خاک می‌باشد. هم‌چنین بررسی صحت مدلسازی و آنالیز عددی و مقایسه با شرایط واقعی جهت بهینه‌سازی طرح دارای اهمیت زیاد می‌باشد. یکی از بهترین روش‌های ارزیابی این پارامترها در مقیاس توده زمین انجام تحلیل برگشتی بر اساس نتایج آزمایشگاهی است. با استفاده از روش‌های المان محدود و تفاضل محدود در نرم‌افزارهای PLAXIS و FLAC، میزان نفوذ آب زیرزمینی به دو گالری در کل طول آن در حالت پایدار محاسبه شد و از داده‌های به دست آمده از آزمایش لوفران مقدار پارامترهای هیدرودینامیکی خاک به روش تحلیل برگشتی تخمین زده شد. نتایج بدست آمده حاکی از امتیاز روش حل تحلیل برگشتی نسبت به روش آزمایش لوفران برای اندازه‌گیری نفوذپذیری با احتساب داده‌های یکسان می‌باشد. میزان نفوذ آب زیرزمینی در آزمایش‌های میدانی ۶۰۰ متر مکعب بر روز برآورد شده است و خطای دو روش تفاضل محدود و اجزای محدود به ترتیب برابر ۱۲ درصد و ۴/۸ درصد است که به خوبی موافق مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشند و مقدار پارامتر نفوذپذیری بهینه حاصل از تحلیل برگشتی به ترتیب برابر $۴/۵\times۱۰^{-۵}$ و $۳/۶\times۱۰^{-۵}$ متر بر ثانیه و نیز قابلیت انتقال بهینه به ترتیب معادل ۱۱۷ و ۲۱۴ متر بر روز برای این منطقه تعیین شد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل برگشتی، پارامترهای هیدرودینامیکی، خط هفت مترو تهران، گالری زهکش، نرم‌افزارهای PLAXIS و FLAC.

*- نویسنده مسئول: ۰۹۱۲۶۲۰۳۳۸۲ Email: nakhaeimohammad@gmail.com

مقدمه

جریان آب و بالا بودن سطح تراز آب زیرزمینی در تونل‌های درحال ساخت یکی از مسائلی است که می‌تواند مشکلات زیادی در حین اجرا و آثار مخرب فراوانی در مرحله بهره‌برداری بر طرح داشته باشد؛ بنابراین لازم است محل و مقدار جریان آب و مدل زهکشی آن پیش‌بینی و در طراحی‌ها لحاظ گردد. گالری زهکش یکی از این راه‌ها برای پایین انداختن سطح آب و خارج کردن آب از تونل می‌باشد (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۹۳). در حال حاضر به طور وسیع از روش های عددی برای طراحی تونل و تخمین آب ورودی به آن استفاده می‌شود. اصولاً تخمین دقیق حجم آب نفوذی به درون تونل‌ها به وجود داده‌ها و پارامترهای مورد نیاز، دقت و صحت عوامل مذکور و چگونگی تعمیم این عوامل نقطه‌ای به بخش‌های مختلف مسیر تونل وابسته است، فقر اطلاعاتی و دقت پایین پارامترهای اندازه‌گیری شده به تفسیر اشتباه از وضعیت منطقه مورد مطالعه می‌انجامد. بررسی صحت مدل‌سازی و آنالیز عددی و مقایسه آن با شرایط واقعی جهت بهینه‌سازی دارای اهمیت زیادی می‌باشد، بنابراین در این نوع مقایسه‌ها، آنالیزهای عددی نتایج بسیار مهمی را به دست می‌دهند (ساکورایی، ۱۹۹۳). تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک مانند نفوذپذیری برای بررسی و مدلسازی بسیاری از مسائل آب و خاک ضروری می‌باشد. جهت برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک از روش‌های مستقیم و غیر مستقیم استفاده می‌شود. بر اساس نظر ساکستون و همکاران (۱۹۸۶) روش‌های مستقیم وقت گیر و پر هزینه بوده و ما اگر تعداد زیادی آزمایش برجا برای اندازه‌گیری مستقیم خصوصیات هیدرولیکی انجام دهیم، هزینه و زمان زیادی صرف خواهد شدکه توجیه اقتصادی ندارد. استفاده از روش‌های غیرمستقیم تخمین خواص هیدرولیکی محیط متخلخل جایگزینی مناسب برای روش‌های وقت‌گیر و پرهزینه مستقیم است. در نتیجه به راه‌های جدید برای حل این مسئله نیاز است مانند تحلیل برگشتی، با این روش می‌توان اطلاعات زمین‌شناسی و آزمایشگاهی و پارامترهای هیدرودینامیکی ورودی را مورد ارزیابی مجدد قرار داد (ساکورایی، ۱۹۹۳) و اختلاف بین مقدار واقعی و پیش‌بینی شده مورد نظر را به حداقل رساند. این روش به‌طور پیوسته در دهه اخیر استفاده شده است (جئون و یانگ، ۲۰۰۴). بخش قابل توجهی از مسیر خط ۷ مترو تهران در منطقه اشباع از آب‌های زیرزمینی قرار دارد، لذا بررسی وضعیت هیدرولوژیکی محدوده مورد مطالعه، پیش‌بینی مقدار آب ورودی به تونل و مقدار زهکشی از تونل و صحت و دقت پارامترهای ورودی با استفاده از تحلیل برگشتی امری ضروری می‌باشد. پژوهش‌های فراوانی در زمینه‌ی تخمین پارامترهای هیدرولیکی محیط متخلخل انجام شده است که در هر یک از این بررسی‌ها روش مختلفی ارزیابی شده است (وو و همکاران ۲۰۰۷؛ قنبریان و هانت، ۲۰۱۲). یکی از جدیدترین بررسی‌هایی که در نیجریه با استفاده از روش سونداژ ژئوالکتریکی به بررسی و تعیین خصوصیات هیدرولیکی خاک پرداخته شده است، از داده‌های به دست آمده از ۲۴ سونداژ الکتریکی قائم برداشت شده برای تعیین هدایت هیدرولیکی خاک استفاده شد (اپرا و همکاران، ۲۰۱۲). مطالعاتی در رابطه با تحلیل برگشتی پارامترهای خاک انجام شده که از آن جمله می‌توان به مطالعات: میراندا و همکاران (۲۰۱۱)، مویرا و همکاران (۲۰۱۳)، ژائو و همکاران (۲۰۱۵) اشاره کرد. هدف از مطالعات مویرا و همکاران ارزیابی

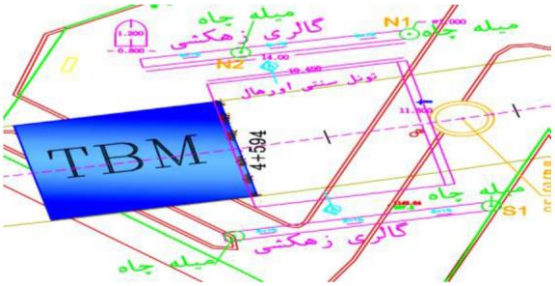
عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی در تحلیل برگشتی پارامترهای ژئومکانیکی در سازه‌های زیرزمینی بود. این تحلیل با مطالعه پارامتریک یک تونل در حال ساخت انجام شد. ژانو و همکاران (۲۰۱۵) از روش اجزا محدود برای مدلسازی دو بعدی و سه بعدی تونل در وست شلد در هلند استفاده نمودند. در این مطالعه با آنالیز حساسیت و تخمین پارامترها، کالیبراسیون مدل انجام شد. آنالیز حساسیت نسبت به هر کدام از پارامترها انجام شد، سپس با استفاده از تحلیل برگشتی مقادیر هرکدام از پارامترها تدقیق گردید. در رابطه با پیش‌بینی نرخ آب ورودی به درون تونل پژوهشگران متعددی از جمله کیم و همکاران (۲۰۰۵) مدلسازی سری زمانی را در جهت برآورد تخلیه آب زیرزمینی به سیستم مترو شهری به کار برده‌اند. فنگ رونگ و همکاران (۲۰۰۹) مطالعاتی برای تاثیر ساخت تونل بر محیط‌های هیدروژئولوژی در تایوان انجام دادند که نتایج نشان می‌دهد که با تخمین آب ورودی به تونل می‌توان تاثیر ساخت تونل بر رژیم منابع آب منطقه‌ای و محلی را بررسی کرد. در زمینه حفر گالری، به منظور زهکشی در معادن کارهای متعددی صورت گرفته است به عنوان مثال ماثر به حفر ۳۹، گالری زهکش، در معادن مختلف دنیا طی سال‌های ۱۶۰۰ تا ۱۸۹۷، اشاره کرده است (ماثر، ۲۰۰۴).

هم‌چنین گالری زهکش، واقع در معدن بینگهام و گالری زهکش حفر شده در معدن مس اوک تدی (بیل و رد، ۲۰۱۳).

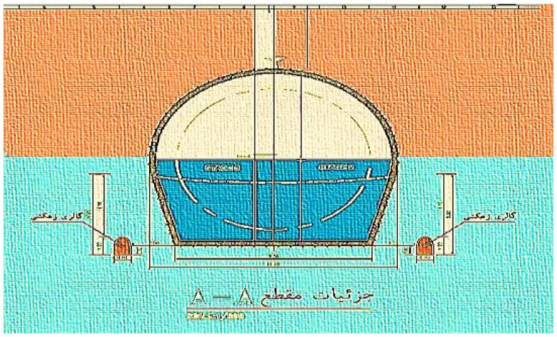
محدوده مورد مطالعه

پروژه خط هفت مترو تهران قطعه شرقی–غربی حدفاصل ایستگاه a7 تا ایستگاه n7 در مجموع دارای طولی بیش از ۱۲ کیلومتر است قطعه شرقی این پروژه کیلومتراژ ۴۵۰۰-۴۶۰۰ در محدوده میدان سعیدی مورد مطالعه قرار گرفت. در (شکل ۱) موقعیت مسیر تونل در نقشه تهران نشان داده شد. با توجه به لزوم بهینه نمودن طرح بهسازی زمین در میدان سعیدی، لازم است سطح آب زیرزمینی محدوده که در حال حاضر بالاتر از تراز کف تونل است به پایین‌تر از این تراز تنزل یابد. بر اساس نتایج آخرین مرحله از برداشت سطح آب زیرزمینی در میدان سعیدی حدود ۳۶ متری از سطح زمین قرار داشته است. لذا، در حال حاضر آب زیرزمینی حدود ۶ متر از کف تونل را در برگرفته است. به همین منظور، برای ارائه طرح خشک اندازی در این محدوده با توجه به اینکه دستگاه حفاری برای تعمیر متوقف شده است، در این محددوه از دو گالری زهکش به طول ۱۴ متر استفاده می‌شود. در (شکل ۲) پلان افقی و سطحی مسیر تونل در میدان سعیدی و قرارگیری گالری‌ها و محل پیشنهادی توقف دستگاه حفاری نشان داده شده است. (شکل ۳) مقطع عمودی تونل و گالری اطراف آن را نشان داده است (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۹).

شکل ۱: موقعیت مسیر تونل در نقشه تهران



شکل ۲: پلان سطحی مسیر تونل در میدان سعیدی و محل توقف دستگاه حفاری



شکل ۳: مقطع عمودی از تونل و گالری‌ها

مواد و روش‌ها

روش‌های اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری

ضریب نفوذپذیری (K) و روش‌های مختلف اندازه گیری آن: هدایت هیدرولیکی اشباع خاک یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی خاک است و تخمین آن در مطالعات خاک اهمیت زیادی دارد (مشعل و همکاران، ۱۳۹۰)، که در چهار دسته کلی زیر تقسیم می‌شوند: ۱-روش‌های تجربی مثل استفاده از منحنی دانه‌بندی رسوبات، ۲-روش‌های اندازه‌گیری آزمایشگاهی مثل روش بار ثابت و بار افتان، ۳-روش‌های اندازه‌گیری صحرایی نظیر آزمون پمپاژ، ردیابی رنگی و اوگر و ۴-به کمک مدل‌های ریاضی آب‌های زیرزمینی (مدلسازی معمولی، مدلسازی تحلیل برگشتی).

هدایت هیدرولیکی در محدوده پروژه: در مطالعه حاضر از مقادیر هدایت هیدرولیکی به‌دست آمده از آزمایش‌های لوفران و با توجه به سطح آب زیرزمینی در دو یا سه روش به شرح 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 بارثابت استفاده شد و فرمول آن در رابطه ۱ بیان شده است:

رابطه ۱)

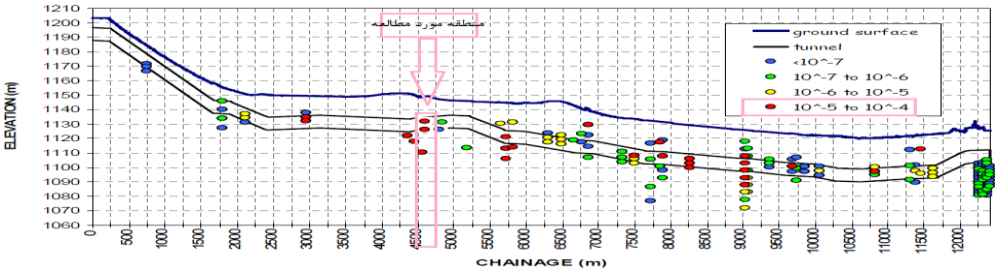
$$k = \frac{vL}{\Delta h} = \frac{QL}{\Delta hAt}$$

K = ضریب نفوذپذیری، m/s، V= سرعت جریان آب به خارج خاک، Q= حجم کل آب جمع شده در زمان ،m^3/s، A=سطع 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 جمع‌آوری می‌شود، S 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، پیش‌بینی 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 می‌شود (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۹).

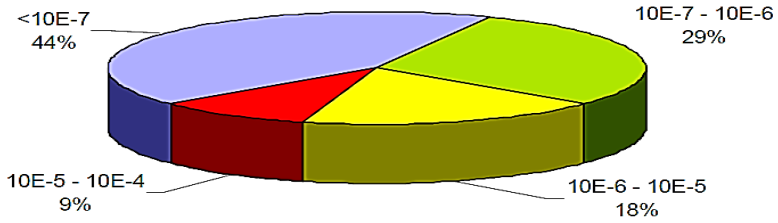
جدول ۱: آزمایشهای لوفران انجام شده در گمانه مربوط محدوده مورد مطالعه (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۹)

گمانه	BH-4-7		
عمق آزمایش(متر)	۱۹	۲۱	۲۵
شماره آزمایش	L-10	L-11	L-12
لیتولوژی		ماسه سیلتی	
تستهای لوفران نفوذپذیری (متر برثانیه)	۱×۱۰^{-۵}	۱×۱۰^{-۵}	۴×۱۰^{-۵}

نتایج آزمایش لوفران (مقدار هدایت هیدرولیکی) به شرح زیر است: تغییرات نفوذپذیری لایه های خاک در برگیرنده تونل در منطقه مورد بررسی بین $۱۰^{-۴}$ تا $۱۰^{-۵}$ متر بر ثانیه می‌باشد. نتایج به‌دست آمده این مطالعات در کل تونل برحسب آزمایش لوفران به ۴ گروه تقسیم شده است و توزیع مکانی گروه‌های نفوذپذیری بر روی مسیر تونل در نمودار شکل ۴ نشان داده شده است و درصد فراوانی هریک از آن‌ها در نمودار شکل ۵ ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌گردد واحدهای خاکی تشکیل دهنده مسیر تونل عمدتاً دارای نفوذپذیری کمتر از $۱۰^{-۷}$ هست و تنها ۹ درصد از واحدهای مسیر تونل دارای نفوذپذیری $۱۰^{-۵}$ تا $۱۰^{-۳}$ متر بر ثانیه هست که محدوده مورد مطالعه ما نیز در این محدوده قرار می‌گیرد (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۹).



شکل ۴: مقادیر نفوذپذیری خاک مسیر بر اساس آزمایش‌های لوفران انجام شده در مرحله مطالعات تونل خط ۷ مترو تهران (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۹).



شکل ۵: نمودار درصد فراوانی تغییرات نفوذپذیری از آزمایش لوفران تونل خط ۷ مترو تهران (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۹).

تخمین نفوذ آب زیرزمینی به تونل

برای تخمین میزان نفوذ آب به تونل روش‌های متفاوتی وجود این روش‌ها شامل روش‌های عددی و تحلیلی می‌باشد. در این تحقیق از روش‌های عددی برای این منظور استفاده شد. 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 به‌طور معمول مورد استفاده قرار می‌گیرند (تانگراجم، ۲۰۰۳)، عبارتند از: ۱-تفاضل محدود، ۲-اجزای محدود، ۳-تفاضل محدود تلفیقی، ۴-روش معادله انتگرال مرزی، ۵-المان‌های تحلیل. ۲ روش اول در حل مسئله‌های جریان آب زیرزمینی رایج‌تر هستند (اندرسون و وسنر، ۱۹۹۲). روش‌های عددی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت عبارت‌اند از روش تفاضل محدود، روش اجزای محدود.

روش‌های تحلیل برگشتی

استفاده از روش‌های غیرمستقیم تخمین خواص هیدرولیکی محیط متخلخل جایگزینی مناسب برای روش‌های وقت‌گیر و پرهزینه مستقیم می‌باشد (بنونی و همکاران، ۲۰۱۰). تحلیل برگشتی عموما به عنوان روشی تعریف می‌شود که می‌توا ند پارامترهای کنترل کننده‌ی سیسیتم را به کمک رفتار خروجی آن تامین کند. در تحلیل برگشتی می‌توان به دو روش عمل کرد، روش معکوس و روش مستقیم (جئون و یانگ ۲۰۰۴؛ کاراکس و فوول ۲۰۰۵). اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولیکی با روش‌های مستقیم معمولاً کاری دشوار، وقت‌گیر و گران‌قیمت است. در این مقاله سعی شده با استفاده از اطلاعات برداشت شده به‌وسیله آزمایش لوفران میزان پارامترهای هیدرولیکی خاک به

روش تحلیل برگشتی با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS و FLAC تخمین زده شود.

تحلیل برگشتی مستقیم: روش مستقیم بر اساس تکرار و خطا و حداقل سازی تابع خطا انجام می‌شود، از مزایای این روش قابلیت کاربرد مقدار اختلاف بین مقدار دبی اندازه‌گیری شده یا دبی محاسبه شده از تحلیل عددی معمول با فرض پارامترهای مجهول استوار است (زنگ و یانگ، ۲۰۰۶). این عمل توسط تابعی موسوم به تابع خطا انجام می‌شود که به‌عنوان رابطه ۲ نشان داده شده‌اند؛ در این مدل Q_K مقدار دبی محاسبه شده و Q_k^* مقدار دبی اندازه‌گیری شده و مقدار محاسبه در نقطه K است.

رابطه ۲)

$$Error = \frac{Q_K - Q_K^*}{Q_K^*} * 100$$

در این روش با انتخاب یک مقدار اولیه (xi)، تحلیل معمولی انجام می‌شود؛ سپس تابع هدف که با رابطه ۲ تعریف شده است محاسبه می‌شود و هم‌گرایی تابع هدف بررسی می‌شود. در صورت همگرایی گام محاسباتی پایان می‌یابد. در غیر این صورت مقدار جدید پارامتر مجهول با رابطه ۳ تعریف می‌شود و دوباره تابع هدف و همگرایی آن بررسی می‌شود. این کار تا همگرا شدن تابع هدف انجام می‌گیرد (ساکورایی و تاکئوچی، ۱۹۸۳).

رابطه ۳)

$$x_{i+1} = x_i + \lambda_i^* s$$

λ_i^*: طول گام محاسباتی، s_i: جهت جستجو روش مستقیم مستلزم صرف وقت بیشتری برای انجام تکرارهای متوالی در محاسبات است که این روش را برای تصمیم‌گیری‌های سریع نامناسب می‌سازد (ابن حداد، ۱۳۹۰). به‌طورکلی سه الگوریتم مختلف برای تحلیل برگشتی مستقیم وجود دارد: روش تک متغیره، روش چندمتغیره، روش تک متغیره متناوب (جئون و یانگ، ۲۰۰۴). در روش تک متغیره، در هر مرحله فقط یک پارامتر را تغییر می‌دهیم و سایر پارامترها ثابت‌اند. پس از بهینه‌سازی یک پارامتر در مرحله‌ی بعد پارامتر دیگری را تغییر می‌دهیم و سایر پارامترها را ثابت نگه می‌داریم. این عمل را تا زمانی که مقادیر بهینه‌ی تمام پارامترها به‌دست آیند ادامه می‌دهیم. در روش چندمتغیره، برخلاف روش تک متغیره، بهینه‌سازی پارامترها به صورت هم‌زمان انجام می‌گیرد. بدین ترتیب مدلی که کمترین خطا را داشته باشد «مدل بهینه» و پارامترهای متناظر با آن را «پارامترهای بهینه» می‌نامیم. روش تک متغیره متناوب، شکل توسعه‌یافته‌ی روش تک متغیره است؛ که آن را بهبود می‌بخشد. در این روش پس از پایان مقادیر بهینه‌ی پارامترها طبق روش تک متغیره، در مرحله‌ی بعد تمامی پارامترها به‌صورت هم‌زمان تغییر داده می‌شود. تغییر هم‌زمان پارامترها تا زمانی که تابع هدف به مقدار موردنظر برسد، ادامه می‌یابد (ساکورایی و تاکئوچی، ۱۹۸۳).

انتخاب روش عددی مناسب: به منظور تحلیل عددی مغار تونل قسمت شرقی خط ۷ مترو در میدان سعیدی در حالت پایدار و تطبیق هرچه سریعتر مدل با طبیعت از نرم‌افزار PLAXIS و FLAC مورد استفاده قرار گرفت. خاک مورد استفاده در این تحقیق، ماسه سیلتی می‌باشد که به نام ET-2 در خط ۷ مترو نام‌گذاری شده است

که در رده خاک‌های درشت‌دانه قرار می‌گیرد؛ و جنس آن عمدتاً از ماسه به همراه سیلت و رس تشکیل شده است (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۸). این تونل در خاک ماسه سیلتی حفاری شده است و فشار آب به‌صورت هیدرو استاتیکی در نظر گرفته می‌شود. بعد ازمدلسازی تونل در دو طرف آن گالری‌های افقی برای زهکشی آب مدلسازی می‌شود. به‌منظور انجام تحلیل‌ها از مدل رفتاری موهر–کولمب در رفتار مواد استفاده شده است. مدل موهرکولمب یکی از مرسوم‌ترین مدل-های رفتاری مکانیک خاک به شمار می‌رود. جداول ۲ و ۳ اطلاعات مربوط به مصالح به کار رفته در دو نرم‌افزار می‌باشد.

جدول ۲: اطلاعات خاک در برگیرنده تونل

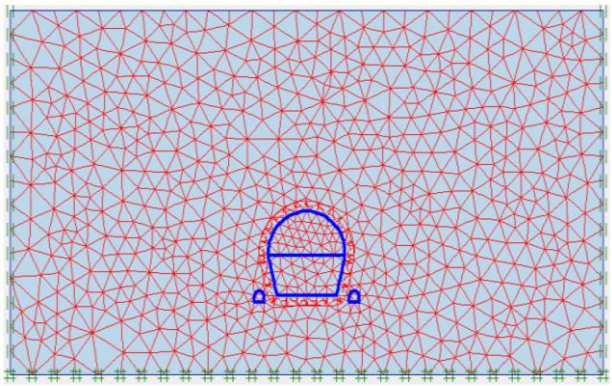
پارامتر	نشانه	لایه	واحد
مدل مواد	Model	موهر-کولمب	-
نوع رفتار مواد	Type	زهکشی شده	-
وزن مخصوص غیراشباع	γ_{unsat}	۱۸	KN/ m^3
وزن مخصوص اشباع	γ_{sat}	۱۹	KN/ m^3
نفوذپذیری قائم	K_X	۴×۱۰^{-۵}	M/s
نفوذپذیری افقی	K_y	۴×۱۰^{-۵}	M/s
مدول یانگ	Eref	۷۰۰۰۰	KN/m^2
نسبت پواسون	γ	۰/۳	-
چسبندگی	Cref	۱۵	KN/m^2
ضریب کاهش مقاومت	Rinter	۰/۵۴	-

جدول ۳: مشخصات لاینینگ دور تونل و گالری‌ها

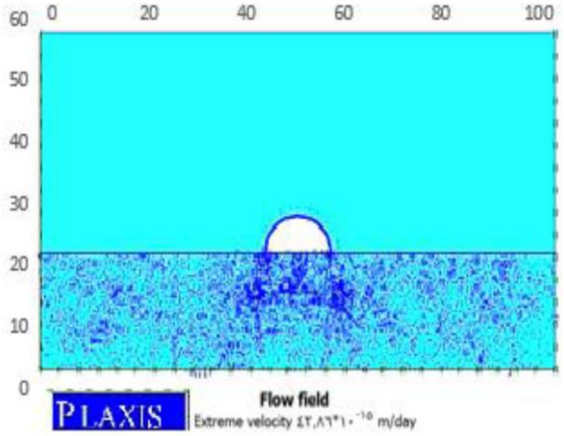
پارامتر	نشانه	T تونل و گالری	واحد
نوع رفتار مواد	Material type	الاستیک	-
سختی نرمال	EA	$۱/۴\times۱۰^{-۷}$	KN/m
سختی خمشی	EI	$۱/۴۳\times۱۰^{-۵}$	$KN/m^2/m$
ضخامت معادل	D	۰/۳۵۰	M
وزن	W	۸/۴۰۰	KN/m/m

نرم‌افزار PLAXIS: نرم‌افزار PLAXIS که بر مبنای اجزاء محدود است، یکی از خصوصیات این نرم‌افزار توانایی آن در مدل‌سازی و شبیه‌سازی آب زیرزمینی است که با مقایسه نتایج آن با نتایج حاصل از روش‌های تحلیلی، به میزان قابل اعتماد این روش پی برده می‌شود. اساس کار این نرم‌افزار بر مبنای معادلات دارسی و قانون جرم است. در این نرم‌افزار با ارائه شرایط مرزی (مرزهای هد ثابت، جریان ثابت و یا فاقد جریان) و معرفی ویژگی‌های هیدرودینامیکی لایه آب‌دار و نیز مختصات هندسی لایه‌ها و موقعیت تونل و مقطع آن، میزان هد آب زیرزمینی در نقاط مختلف لایه آبدار و میزان آب زهکشی شده از تونل قابل محاسبه خواهد بود. تونل مورد نظریه صورت

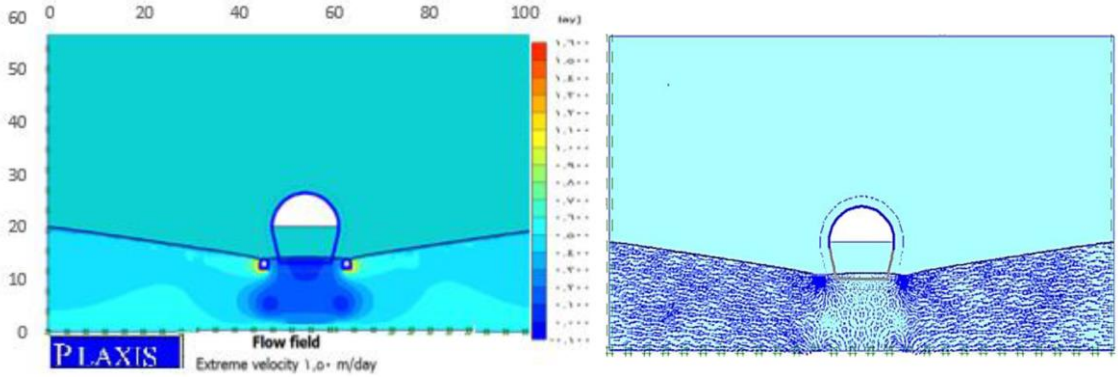
نامتقارن و نعلی شکل می‌باشد، بیشینه ارتفاع آب بالای تونل ۳۶ متر از سطح زمین می‌باشد و تونل در مسیر خود از لایه‌های خاک ماسه سیلتی می‌گذرد. اولین کار، تعیین هندسه و ژئومتری آن است. آنچه در مدلسازی و هندسه پروژه می‌بایست مدنظر قرار گیرد مدل می‌بایست به اندازه کافی بزرگ باشد تا تأثیر مرزها و خصوصیات آن‌ها بر پروژه به خوبی مشخص شود. همان‌طور که گفته شد هدف از این تحقیق بررسی میزان آب ورودی به تونل و گالری‌های زهکش و تحلیل برگشتی پارامتر نفوذپذیری و قابلیت انتقال است. با توجه به این موضوع تحلیل نتایج به دست آمده پس از اتمام مراحل ساخت در چند حالت مورد بررسی قرار می‌گیرد. بر اساس نقشه‌های رسم شده در محیط نرم‌افزار با استفاده از مختصات تونل هندسه آن در محیط نرم‌افزار رسم می‌شود به‌طور تقریبی می‌توان فاصله مرزهای مدل از تونل را از طریق رابطه کرش مشخص کرد. بر طبق این رابطه فاصله مرزهای کناری از مرکز تونل ۱۰ برابر شعاع متوسط تونل در نظر گرفته می‌شود (کردستانی وهمکاران، ۱۳۹۲)، بنابراین ابعاد در نظر گرفته شده در این مدل ۱۰۰ متر جهت x و ۶۰ متر درجهت –y تونل می‌باشند و پس از اعمال شرایط مرزی و بسته شدن اطراف مدل مش بندی المان محدود به‌صورت خیلی ریز انجام می‌شود. عملیات مش بندی بر اساس روش کرنش صفحه‌ای و با المان مثلثی ۱۵ گره‌ای انجام شد، که نرم‌افزار به‌صورت خودکار مش بندی را برای آن انجام می‌دهد. برای محاسبه مقادیر نفوذ آب به درون تونل و گالری به دو داده ارتفاع آب بالای تونل و ضریب نفوذپذیری خاک نیاز است (کتیبه و عالی انوری، ۱۳۸۵). در شکل ۶ مدل اولیه تونل و گالری‌های اطراف آن به همراه وضعیت مش بندی المان محدود در اطراف مدل نشان داده شده است. شکل ۷ مدل اولیه ساخته شده توسط نرم‌افزار قبل از حفاری گالری‌ها را نشان می‌دهد در این فاز قسمت بالایی تونل را حفاری و لایینگ اطراف تونل نصب می‌شود. هنوز افت آبی اتفاق نیفتاده است و آب درون تونل می‌باشد. شکل ۸ مدل نهایی اجزا محدود ساخته شده توسط این نرم‌افزار را نشان می‌دهد. در این فاز گالری‌های افقی در دو طرف تونل حفاری می‌شود و لاینینگ‌های دورگالری‌ها نصب می‌شود مقدارآبی که گالری‌ها می‌توانند از تونل زهکش کنند نیز محاسبه می‌شود. با حفر گالری‌ها آب درون تونل زهکشی می‌شود و افت آب اتفاق می‌افتد و آب از تونل خارج می‌شود. جدول ۴ نتایج حاصل از محاسبه میزان آب زهکشی از تونل توسط نرم‌افزار PLAXIS درحالت پایدار نشان داده است.



شکل ۶: هندسه مدل و وضعیت مش بندی المان محدود تونل و گالری‌های اطراف در نرم‌افزار PLAXIS



شکل ۷: مدل اولیه تونل در نرم‌افزار PLAXIS



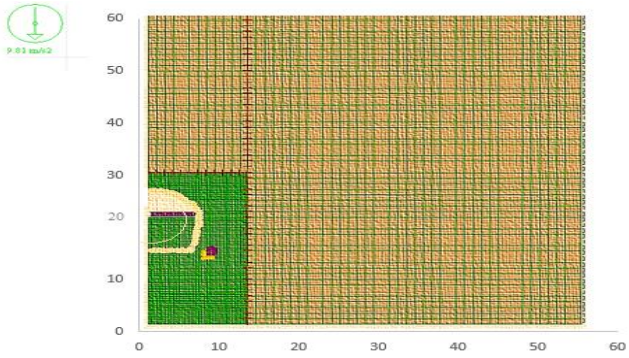
شکل ۸: (الف و ب) تصویر رسم شده توسط نرم‌افزار برای جریان آب ورودی به گالری‌ها در حالت پایدار.

جدول ۴: نتایج حاصل از محاسبه آب زهکشی توسط گالری‌ها درحالت پایدار توسط نرم‌افزار PLAXIS

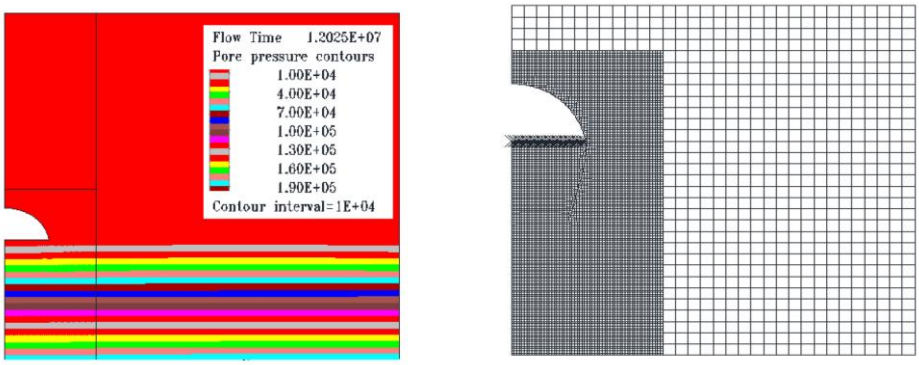
خطا	آب زهکشی شده تونل توسط گالری‌ها برحسب (متر مکعب بر روز)		بار آبی از کف تونل (متر)	نفوذپذیری (متر بر ثانیه) (مهندسین مشاور ساحل ، ۱۳۹۳)	واحد زمین‌شناسی
PLAXIS	PLAXIS	(واقعیت)(مهندسین مشاورین ساحل، ۱۳۹۳)			
٪۱۲	۵۲۷	۶۰۰	۶	۴×۱۰^{-۵}	ماسه سیلتی (ET-2)

نرم‌افزار FLAC: در ریاضیات، روش تفاضل محدود که یکی از روش‌های عددی به شمار می‌رود، به‌منظور تقریب زدن حل معادلات دیفرانسیل با استفاده از معادلات تفاضل محدود به‌عنوان تقریبی از مشتقات به کار می‌رود. با استفاده از روش تفاضل محدود می‌توان بسیاری از مسائل مهندسی را حل کرد. در مسائل مهندسی که با معادلات دیفرانسیل مطرح می‌شوند (تحکیم، مسائل مربوط به آب و غیره)، تئوری تفاضل محدود وسیله‌ای برای استنتاج تقریب‌هایی در نقاط مشخص برای مشتقات برحسب پارامترهای مجهول در این نقاط و نقاط مجاور ارائه می‌دهد. در محاسبات جریان

آب زیر زمینی می‌توان با استفاده از متغیرgflow در زبان برنامه نویسی Fish، مقدار کل جریان (برحسب حجم/زمان) به داخل و خارج مدل را به دست آورد و دبی به صورت تابعی از زمان محاسبه می‌شود که می‌توان تغییرات آن لحظه شروع حرکت جریان در لحظه حفر تونل تا لحظه‌ای که جریان به حالت پایدار می‌رسد مشاهده کرد. طراحی مدل توسط نرم‌افزار FLAC در ۳ مرحله تحلیل شد. شکل ۹ مدل رسم شده توسط نرم‌افزار FLAC را نشان می‌دهد و هم‌چنین مش بندی اطراف مدل که به صورت مربعی می‌باشند و اطراف تونل و گالری به صورت ریزتر مش بندی شده، مرحله اول به ترسیم هندسه مدل و اعمال شرایط مرزی اختصاص یافت. در مرحله دوم مقطع فوقانی تونل حفر شد و پس از اجرای فرمان تحلیل مدل به تعادل رسید که به همراه تغییرات فشار حفره‌ای آب در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در مرحله سوم حفاری گالری صورت پذیرفت و مدل برای بار دیگر تحلیل شد و به تعادل رسید که به همراه تغییرات فشار حفره‌ای آب در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در مرحله اول و دوم، هنوز حفاری صورت نگرفته است و در نتیجه افت آبی اتفاق نیفتاده است آب هنوز افت نکرده است به صورت سطح همواری می‌باشد که در مرحله سوم این سطح به دلیل حفر گالری‌ها افت کرده است. با حفر گالری‌ها پتانسیل ناحیه گالری صفر می‌شود و آب از جایی که پتانسیل بالا دارد به سمت گالری با پتانسیل صفر می‌رود تا متعادل شود.

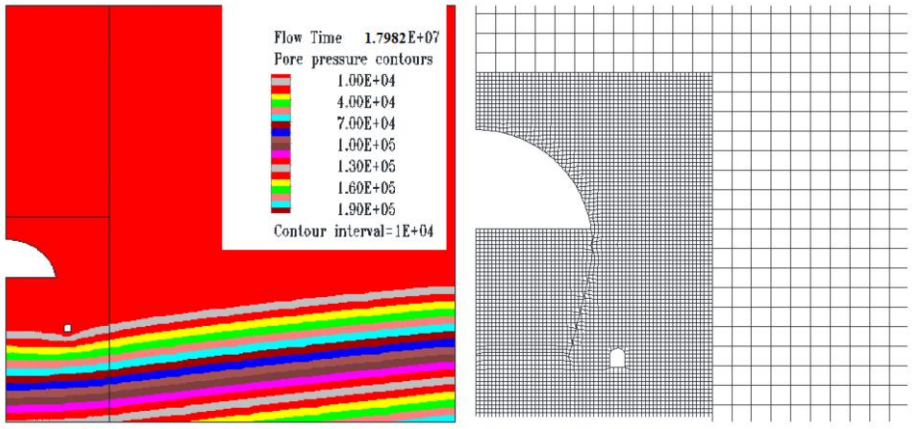


شکل ۹: هندسه مدل و وضعیت مش بندی تفاضل محدود تونل و گالری‌های اطراف در نرم‌افزار FLAC



الف)هندسه مدل در مرحله دوم ب)تغییرات فشار حفره‌ای در مرحله دوم

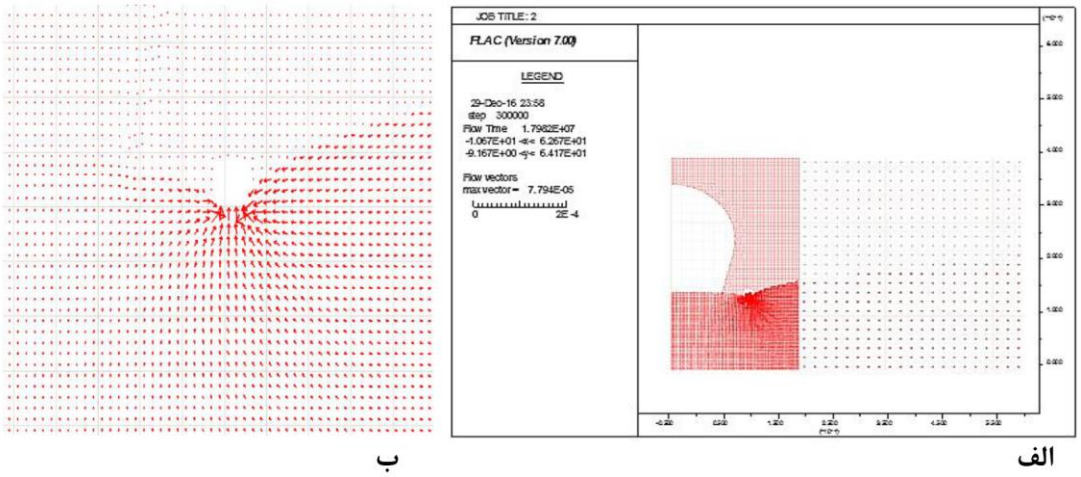
شکل ۱۰: (الف و ب) مدل رسم شده در حالت پایدار و مرحله حفاری قسمت تاج تونل توسط نرم‌افزار FLAC



الف)هندسه مدل در مرحله نهایی ب)تغییرات فشار حفره‌ای مرحله نهایی

شکل ۱۱: (الف و ب) مدل رسم شده درحالت پایدار و مرحله نهایی توسط نرم‌افزار FLAC (حفاری گالری)

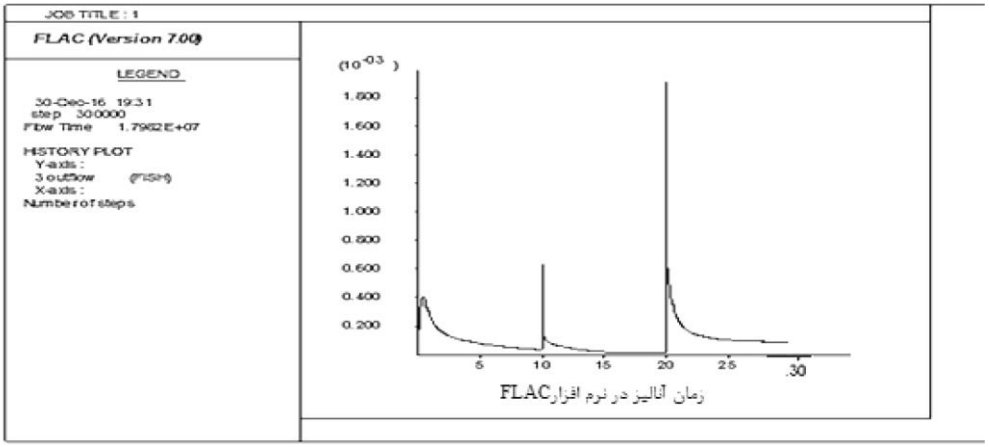
شکل ۱۲ بردارهای جریان را در حالت پایدار بعد از حفر گالری نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در اطراف گالری بردارهای بزرگتری وجود دارد که ورود جریان آب را به آن را نمایش می‌دهد.



ب الف

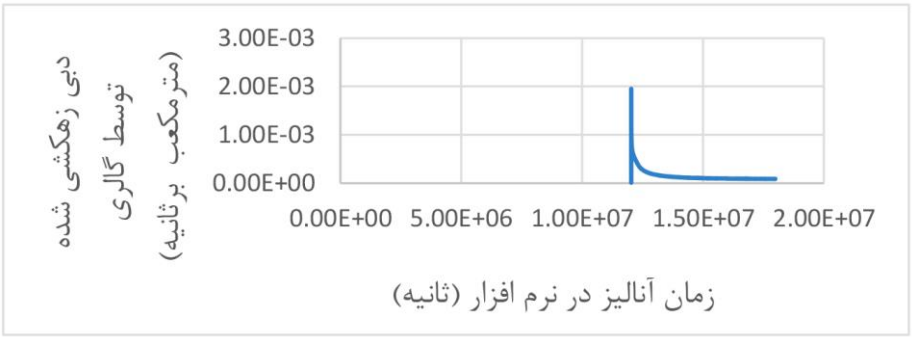
شکل ۱۲: الف) بردارهای جریان در حالت پایدار اطراف مدل، ب) نمای نزدیک از بردارهای اطراف گالری

شکل ۱۳ نمودار دبی خروجی رسم شده توسط نرم‌افزار FLAC از مدل را به صورت تابعی از زمان نشان می‌دهد. نظر به مدلسازی نیمی از هندسه مدل به علت تقارن، برای دست‌یابی به مقدار واقعی دبی، مقادیر نمودار باید دو برابر گردند. این مدل دو بعدی بوده و برای طول واحد گالری صادق است. این امر بدان معناست که در محاسبه دبی واقعی، طول واقعی گالری می‌بایست منظور گردد که در این مطالعه هر گالری هرکدام به طول ۱۴ متر می‌باشد.



شکل ۱۳: نمودار دبی خروجی – زمان در حالت پایدار در نرم‌افزار FLAC

در این نمودار قسمت اول نمودار مربوط به تعادل رسیدن مدل می‌باشد در واقع اولین اوج نمودار مربوط به قسمت اول مدسازی است که معنای آن به تعادل رسیدن محیط است. قسمت دوم نمودار مرحله اول حفاری یعنی حفر تاج تونل، اوج دوم شکل مربوط به این مرحله است، با توجه به این‌که با حفاری تاج تونل به سطح آب زیرزمینی می‌رسیم ولی پایین‌تر از تراز آب زیرزمینی نمی‌رویم، در شکل مشاهده می‌شود که نقطه اوج ارتفاع چندانی ندارد، یعنی آب کمی از قسمت حفاری‌شده خارج می‌شود. دقت شود که سقوط نمودار به تندی صورت می‌پذیرد، یعنی ایجاد حفره تاج تونل فضای مناسبی برای خروج آب حفره‌ای در محل حفاری شده صفر می‌شود و آب از مناطق دیگر که پتانسیل بیشتری دارند به طرف تاج حفاری شده که پتانسیل صفر دارد، سرازیر می‌شود. قسمت سوم نمودار مربوط به حفر گالری است که درواقع دبی زهکشی شده توسط گالری‌ها این مرحله محاسبه می‌شود نمودار شکل ۱۴ دبی را در برابر زمان نشان می‌دهد، در نتیجه مقدار دبی گالری برابر میانگین مقادیر دبی در طول زمان مذکور در مرحله سوم است، این مقدار برابر ۳E-۴/ ۱ متر برثانیه برای یک گالری است. جدول ۵ نتایج حاصل از محاسبه میزان آب زهکشی از تونل توسط نرم‌افزار FLAC نشان داده است.



شکل ۱۴: نمودار دبی خروجی در حالت پایدار در نرم‌افزار FLAC

جدول ۵: نتایج حاصل از محاسبه آب زهکشی توسط گالری‌ها در حالت پایدار توسط نرم‌افزار FLAC

خطا (درصد)	آب زهکشی شده تونل توسط گالری‌ها (متر مکعب بر روز)		بار آبی از کف تونل (متر)	نفوذپذیری (متر بر ثانیه) (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۹۳)	واحد زمین‌شناسی
FLAC	FLAC	(واقعیت) (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۹۳)			
٪۴/۸	۶۲۹	۶۰۰	۶	۴×۱۰^{-۵}	ماسه سیلتی(ET-2)

نتایج

تحلیل برگشتی پارامترهای خط ۷ مترو تهران در میدان سعیدی با استفاده از داده‌های نرم‌افزار: هدف از تحلیل برگشتی، کالیبراسیون تخمین‌های اولیه از پارامترهای محیط متخلخل از روی دبی به‌دست آمده و اندازه‌گیری شده با استفاده از مدل‌های عددی است (اورسته، ۲۰۰۴). جهت تعیین دقیق مقادیر صحیح پارامتر مجهول، اندازه‌گیری‌های موجود باید نیازهای مختلفی را برآورده سازند. در گام اول با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS برای منطقه مورد نظر چند مدل عددی ساخته می‌شود به‌طوری‌که پارامترهای اولیه در محدوده فوق قرار گیرند سپس خطای تک‌تک مدل‌ها محاسبه می‌شود که در این حالت بهترین نفوذپذیری $۴/۵\times۱۰^{-۵}$ انتخاب می‌شود با خطای صفر درصد برای دبی بهینه که از تونل خارج شده است برابر است؛ و با استفاده از نرم‌افزار FLAC مقدار $۳/۶\times۱۰^{-۵}$ انتخاب می‌شود؛ و بقیه نفوذپذیری‌ها خطای بسیاری را نشان می‌دهند پس قابل قبول نیستند. این مقادیر همراه با خطای کل هر مدل به ترتیب در جدول ۶ و ۷ ارائه شده است؛ که خطا را با استفاده از رابطه ۲ که قبلا اشاره نمودیم محاسبه می‌نماییم.

تفاوت‌های بین دو نرم‌افزار:

۱-PLAXIS یکی از نرم‌افزارهای المان محدود هست درصورتی‌که FLAC یکی از نرم‌افزارهای تفاضل محدود می‌باشد و یک نرم‌افزار قوی برای آنالیز عددی. ۲-زمان آنالیز آب ورودی به گالری‌ها در نرم‌افزار FLAC بسیار بیشتر از زمان تحلیل نرم‌افزار PLAXIS است. ۳-مش بندی در FLAC به‌صورت مربع می‌باشد اما درPLAXIS به‌صورت مثلثی است. ۴-کار در محیط به PLAXIS نسبت به FLAC جذاب‌تر و راحت‌تر است. ۵-نتایج حاصل از نرم‌افزار FLAC نسبت به نرم‌افزار PLAXIS در مورد محاسبه دبی و به دست آوردن پارامترها به واقعیت نزدیک‌تر است. جدول ۸ مقادیر به‌دست آمده برای آب زهکشی شده از تونل توسط گالری‌ها با ا استفاده از FLAC و PLAXIS و هم‌چنین مقدار نهایی بهینه‌شده ضریب نفوذپذیری (K) و مقدار بهینه قابلیت انتقال آب (T) را نشان می‌دهد.

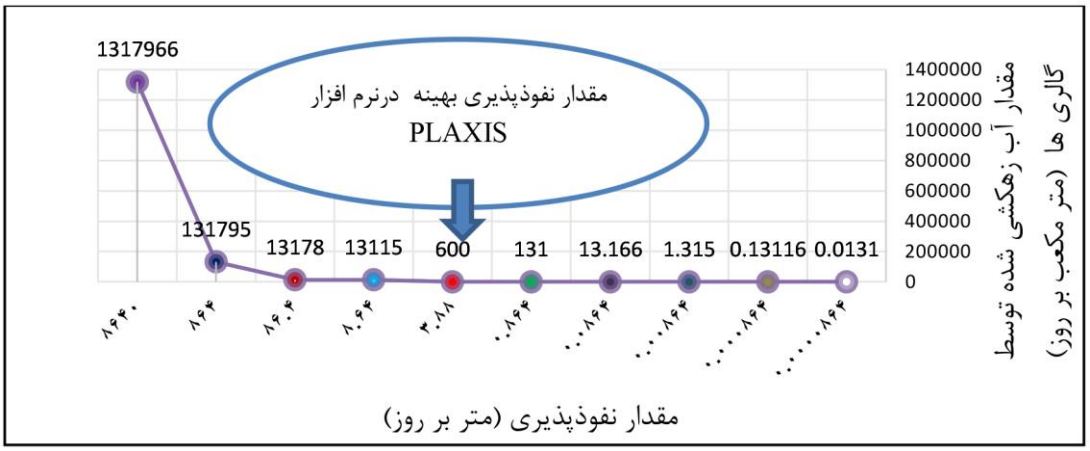
جدول ۶: تحلیل برگشتی پارامتر نفوذپذیری و قابلیت انتقال با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS

ردیف	خطای کل	میزان دبی (Q) (متر مکعب بر روز)	نفوذپذیری (K) (متر بر ثانیه)	مقدار قابلیت انتقال (T) (مترمربع بر روز)
۱	٪۲۱۹۵۶۱	۱۳۱۷۹۶۶	۰/۱	۴۷۵۲۰۰
۲	۲۱۸۶۵	۱۳۱۷۹۵	۰/۰۱	۴۷۵۲۰
۳	٪۲۰۹۶	۱۳۱۷۸	۰/۰۰۱	۴۷۵/۲
۴	٪۱۱۹	۱۳۱۵	۰/۰۰۰۱	۴۷۵
۵	٪۹۷	۱۱۸۷	۰/۰۰۰۰۹	۴۲۸
۶	٪۷۵	۱۰۵۵	۰/۰۰۰۰۸	۳۸۰
۷	٪۵۳	۹۲۳	۰/۰۰۰۰۷	۳۳۲
۸	٪۳۱	۷۹۱	۰/۰۰۰۰۶	۲۸۵
۹	٪۹	۶۵۹	۰/۰۰۰۰۵	۲۳۸
۱۰	٪۰	۶۰۰	۰/۰۰۰۰۴۵	۲۱۴
۱۱	٪۱۲	۵۲۷	۰/۰۰۰۰۴	۱۹۰
۱۲	٪۴۰	۳۵۹	۰/۰۰۰۰۳	۱۴۲
۱۳	٪۵۶	۲۶۳	۰/۰۰۰۰۲	۹۵
۱۴	٪۷۸	۱۳۱	۰/۰۰۰۰۱	۴۷
۱۵	٪۹۷	۱۳/۱۶۶	۰/۰۰۰۰۰۱	۴/۷۵۲
۱۶	٪۹۹	۱/۳۱۵	۰/۰۰۰۰۰۰۱	۰/۴۷۵۲
۱۷	۹۹/۹۵٪	۰/۱۳۱۱۶	۰/۰۰۰۰۰۰۰۱	۰/۰۴۷۵۲
۱۸	۹۹/۹۸٪	۰/۰۱۳۱	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۱	۰/۰۰۴۷۵۲

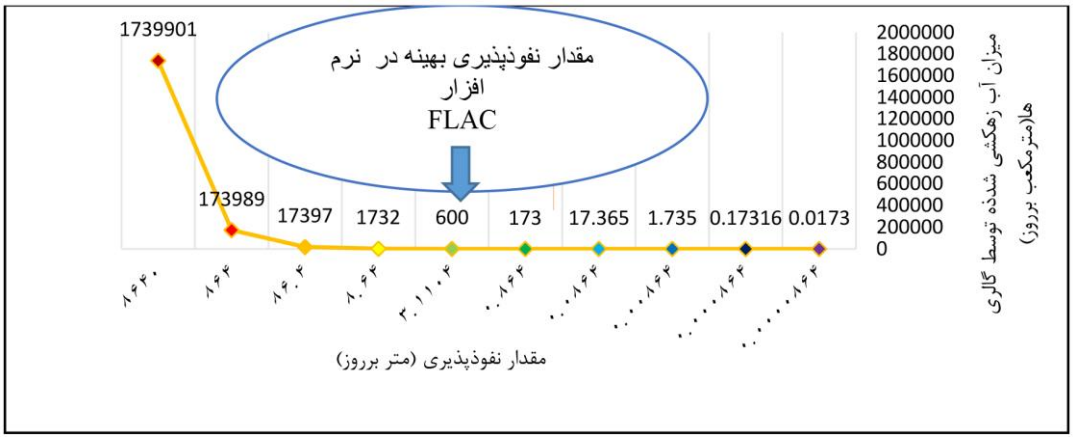
جدول ۷: تحلیل برگشتی پارامتر نفوذپذیری و قابلیت انتقال با استفاده از نرم‌افزار FLAC

ردیف	خطای کل	میزان دبی Q(مترمکعب بر روز)	نفوذپذیری K(متر بر ثانیه)	مقدار قابلیت انتقال T(مترمربع بر روز)
۱	٪۲۸۹۸۸۳	۱۷۳۹۹۰۱	۰/۱	۴۷۵۲۰۰
۲	٪۲۸۸۹۸	۱۷۳۹۸۹	۰/۰۱	۴۷۵۲۰
۳	٪۲۷۹۹	۱۷۳۹۷	۰/۰۰۱	۲/۴۷۵
۴	٪۱۸۸	۱۷۳۲	۰/۰۰۰۱	۴۷۵
۵	٪۱۵۹	۱۵۵۷	۰/۰۰۰۰۹	۴۲۸
۶	٪۱۳۰	۱۳۸۳	۰/۰۰۰۰۸	۳۸۰
۷	٪۱۰۱	۱۲۰۸	۰/۰۰۰۰۷	۳۳۲
۸	٪۷۲	۱۰۳۳	۰/۰۰۰۰۶	۲۸۵
۹	٪۴۳	۸۵۸	۰/۰۰۰۰۵	۲۳۷
۱۰	۴/۸٪	۶۲۹	۰/۰۰۰۰۴	۱۹۰
۱۱	٪۰	۶۰۰	۰/۰۰۰۰۳۶	۱۷۱
۱۲	٪۱۵	۵۰۸	۰/۰۰۰۰۳	۱۴۲
۱۳	٪۴۴	۳۳۳	۰/۰۰۰۰۲	۹۵
۱۴	٪۷۱	۱۷۳	۰/۰۰۰۰۱	۴۷
۱۵	٪۹۷	۱۷/۳۶۵	۰/۰۰۰۰۰۱	۴/۷۵
۱۶	۹۹/۷۱٪	۱/۷۳۵	۰/۰۰۰۰۰۰۱	۰/۴۷۵
۱۷	۹۹/۹۷٪	۰/۱۷۳۱۹	۰/۰۰۰۰۰۰۰۱	۰/۰۴۷۵
۱۸	۹۹/۹۹٪	۰/۰۱۷۳	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۱	۰/۰۰۴۷۵

شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نمودار مربوط به دبی‌های به دست آمده در حالت پایدار توسط نفوذپذیری های مختلف را طی تحلیل برگشتی توسط نرم‌افزار PLAXIS و FLAC نشان می‌دهد.

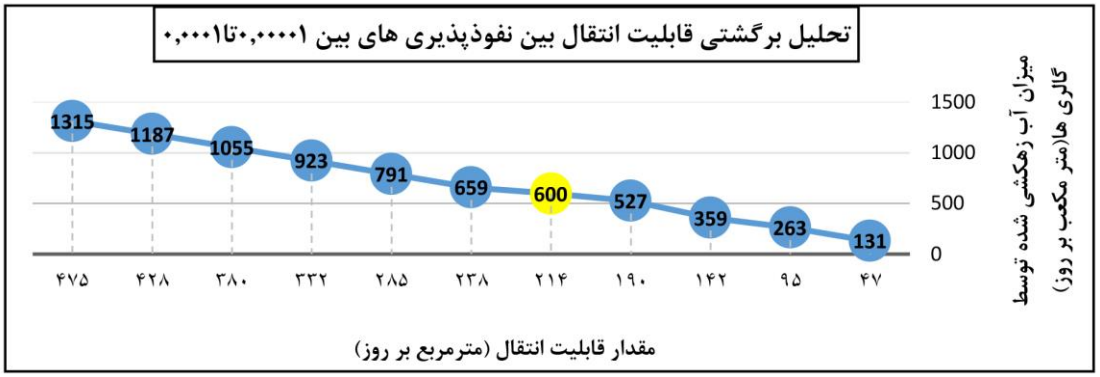


شکل ۱۵: نمودار تحلیل برگشتی مقدار نفوذپذیری بین ۱×۱۰^{-۹} تا ۱×۱۰^{-۲} توسط نرم‌افزار PLAXIS

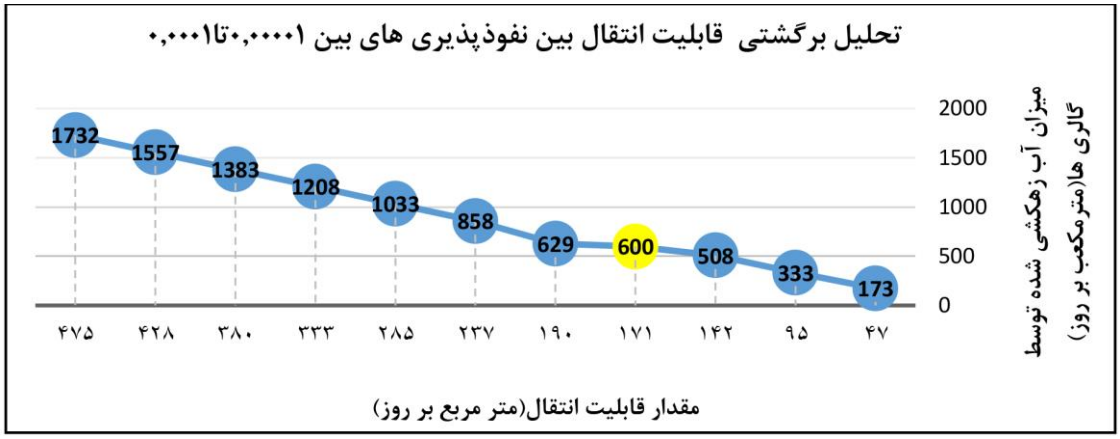


شکل ۱۶: نمودار تحلیل برگشتی مقدار نفوذپذیری بین ۱×۱۰^{-۹} تا ۱×۱۰^{-۲} در نرم‌افزار FLAC

شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نمودار مربوط به T را طی تحلیل برگشتی نشان می‌دهد که با توجه به عددهای به‌دست آمده بهترین قابلیت انتقال در این محدوده، ۱۷۱ الی ۲۱۴ متر مربع بر روز را نشان می‌دهد.



شکل ۱۷: تحلیل برگشتی پارامتر T بین نفوذپذیری‌های ۱×۱۰^{-۵} تا ۱×۱۰^{-۴} توسط نرم‌افزار PLAXIS

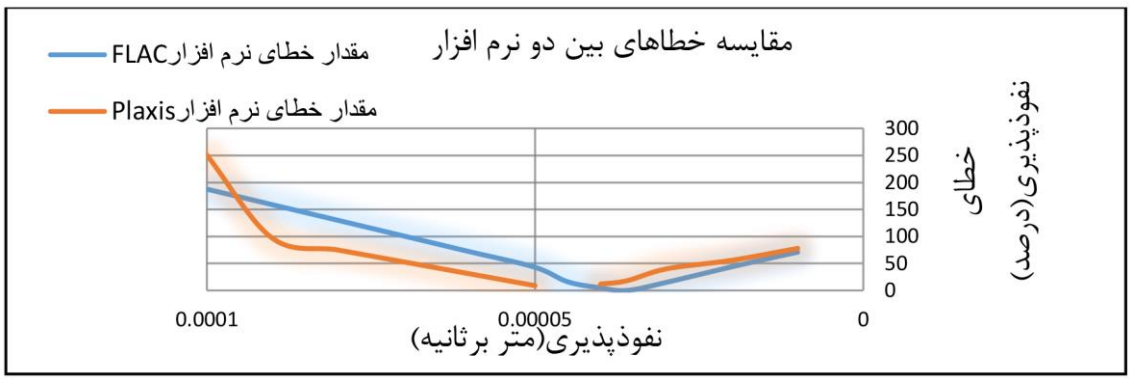


شکل ۱۸: تحلیل برگشتی پارامتر T بین نفوذپذیری‌های ۱×۱۰^{-۵} تا ۱×۱۰^{-۴} توسط نرم‌افزار FLAC

جدول ۸: مقایسه اعداد به‌دست آمده از تحلیل برگشتی در حالت پایدار بین دو نرم‌افزار PLAXIS و FLAC

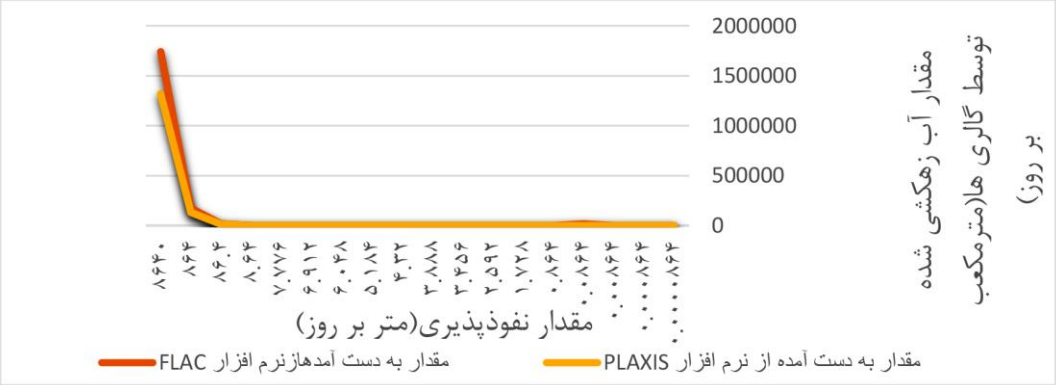
(واقعیت) (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۹۳)		(FLAC)				(PLAXIS)			
K m/day	Q m^3/day	خطا (٪)	T بهینه (m^2/day)	K بهینه (m/day)	Q m^3/day	خطا (٪)	T بهینه (m^2/day)	K بهینه (m/day)	Q m^3/day
۳/۴۵	۶۰۰	۴/۸	۱۷۱	۳/۱۱	۶۲۹	۱۲	۲۱۴	۳/۸۸	۵۲۷

۶-از مقایسه روش‌ها با توجه به نمودار شکل ۱۹ می‌توانیم نتیجه بگیریم که مقادیر به‌دست آمده از نرم‌افزار FLAC بیش از مقادیر مشابه حاصل از نرم‌افزار PLAXIS است و خطای به‌دست آمده در تحلیل برگشتی پارامتر نفوذپذیری در نفوذپذیری‌های کمتر از مقدار ۵×۱۰^{-۵} خطای کمتری را نشان می‌دهد و در نفوذپذیری‌های بالاتر از مقدار ۵×۱۰^{-۵} خطای بیشتری را نشان می‌دهد.



شکل ۱۹: مقایسه خطای بین دو نرم‌افزار PLAXIS و FLAC

شکل ۲۰ مقایسه‌ای بین اعداد به‌دست آمده طی تحلیل برگشتی طی تکرار مدل دو نرم‌افزار FLAC وPLAXIS طی تحلیل برگشتی را نشان می‌دهد.



شکل ۲۰: مقایسه دبی بین دو نرم‌افزار PLAXIS و FLAC

نتیجه گیری

-هدف از مطالعه حاضر بررسی میزان آبی زهکشی شده از تونل به‌وسیله گالری‌های افقی که اطراف تونل حفر شده است در محدوده میدان سعیدی تونل خط هفت متر در این محدوده بر اساس نتایج به‌دست آمده کل حجم آب که توسط گالری‌های از تونل خارج می‌شود در حدود ۶۰۰ مترمکعب بر روز است و بر اساس تحلیل برگشتی بهترین نفوذپذیری برای این منطقه $۴/۵\times۱۰^{-۵}$ به‌دست آمده از نرم‌افزار PLAXIS و مقدار $۳/۶\times۱۰^{-۵}$ با استفاده از نرم‌افزار FLAC می‌باشد.

-مقادیر به‌دست آمده آب زهکشی شده توسط گالری‌ها با نرم‌افزار FLAC با داده‌های واقعی اختلاف کمی داشته و به واقعیت نزدیک‌تر هست و می‌توان جهت مدل کردن برای رسیدن به اهداف موردنظر به این نرم‌افزار اعتماد کرد. نتایج به‌دست آمده از PLAXIS نسبت به FLAC با خطای بیشتری همراه می‌باشد با توجه به آنالیز دبی در حالت دائم میانگین آب زهکشی شده توسط گالری‌ها حدود ۶۰۰ مترمکعب بر روز بعد از کالیبراسیون به دست آمد.

-مقدار هدایت‌هیدرولیکی به‌دست آمده از آزمایشگاه از مقادیر بهینه شده توسط مدل عددی کمتر می‌باشد، که علت آن به خاطر عدم شستشوی چاه گمانه بعد از حفاری است. در حقیقت در تعیین نفوذپذیری در امتداد تونل، ارائه آرایش مناسب گمانه‌ها و تست‌های فشار آب، نقش اساسی را در استفاده از این روش برای تخمین مقدار جریان آب به داخل تونل دارد. عدم رعایت این موضوع می‌تواند خطای بسیاری را در تخمین ضرایب نفوذپذیری و یا نتایج تخمین میزان نفوذ آب زیرزمینی به تونل ایجاد کند.

-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 زهکش‌های برای خارج کردن آب ضروری است در اینجا گالری‌هایی حفر شد. در حقیقت طراحی بهینه این سیستم نقش مهمی در کاهش هزینه‌های پروژه خواهد داشت. حفر گالری‌ها می‌تواند موجب زهکشی آب تونل باشد و افتی در حدود ۶ متر را در سطح آب اولیه ایجاد کند.

-تحلیل برگشتی از لحاظ اقتصادی نسبت به دیگر روش‌ها مناسب‌تر است و دقت آن بیشتر می‌باشد. از آن‌جایی‌که در تحلیل برگشتی نتایج منحصر به فردی را نمی‌توان به‌دست آمده آورد، همواره با

محدوده‌ای از نتایج روبه‌رو هستیم؛ بنابراین برای به دست آوردن نتایج نزدیک به واقعیت نیاز به توجه بیشتری در مدلسازی است.

مدل کردن تا حد ممکن باید دقیق باشد تا رفتار واقعی خاک را منعکس کند. در این مقاله، الگوریتم روش تک متغیره با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS و FLAC برای تحلیل برگشتی تونل متروی خط هفت تهران مورد استفاده قرار گرفت و پارامترهای اصلی طراحی یعنی k و T تعیین شدند. به کمک داده‌های آزمایشگاه و پس از چندین بار تکرار مدل، تابع خطای تعریف شده به حداقل است. نتایج نشان داد که پارامتر مذکور به آنچه توسط شرکت مشاور ارائه شده بود تقریبا یکسان است. در نتیجه کالیبره شده و آماده استفاده برای تحقیقات دیگر.

منابع

-ابن حداد، ع.، رحمانیان، م. و رحمانی فر، م.ح.، ۱۳۹۰. مطالعه روش‌های تحلیل برگشتی و نقش آن‌ها در برآورد پارامترهای مقاومتی توده‌های سنگی و خاکی، سومین همایش زمین‌شناسی فلات ایران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات فارس.

-شریف‌زاده، م.، قربانی، م.، مسعودی، ر. و شریفی، م.، ۱۳۸۸. تحلیل برگشتی مبتنی بر جابه‌جایی مغار نیروگاه تلمبه‌ی ذخیره سیاه‌بیشه با استفاده از روش اجزاء مجزا، مجله علمی و پژوهشی شریف، شماره ۴۷، ص ۴۹-۵۷.

-کتیبه، ه. و عالی انوری، ع.، ۱۳۸۵. تخمین میزان نفوذ آب به تونل انتقال آب قمرود به کمک نرم‌افزار Plaxis، ششمین همایش ایمنی، بهداشت و محیط‌زیست در معادن و صنایع معدنی، تهران، شرکت معدنی و صنعتی چادرملو.

-مشعل، م.، سهرابی، ح.، وراوی پور، م. و زارعی، ق.، ۱۳۹۰. اثر روش‌های مختلف تعیین عامل شکل چاهک بر نتایج اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به روش گلف، مجله مدیریت آب و آبیاری، دوره ۱، شماره ۱، ص ۵۵-۶۸.

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

-مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۹. پروژه خط ۷ مطالعات زمین‌شناسی مهندسی وژئوتکنیک مسیر تونل (قطعه شرقی_غربی).

-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.

-Anderson, M.P. and Woessner, W.W. 1992, Applied Groundwater Modeling Simulation of Flow and Advective Transport, Academic Press, 381 p.

-Bnouni, C. J. Sghaier, H. Sammouda and F. Lehmann. 2010. Parameter Estimation of Soil Hydraulic Functions for Unsaturated Porous Media Using an Inverse Problem and Multistep Outflow Experiment, J. Porous Media, v. 8, p. 2-16.

-Beal, G. and Read, J., 2013. "Guidelines for evaluating water in pit slope stability", CSIRO publishing, 680 p.

-Zhao, Ch., Alimardani Lavasan, A., Barciaga, T., Zarev, V., Datcheva, M., Schanz, T., 2015. "Model validation and calibration via back analysis for

mechanized tunnel simulations The Western Scheldt tunnelcase", Computers and Geotechnics, v. 69, September2015, p. 601-614.
-Erdal, D., Neuweiler, I. and Huisman, J.A., 2012. Estimating effective model parameters for heterogeneous unsaturated flow using error models for bias correction, Water Resour, Res. 48, W06530, doi:10.1029/2011WR011062
-Yang, F.R., Lee, Ch.H., Kung, W.J. and Yeh, H.F., 2009. The impact of tunneling construction on the hydrogeological environment of Tseng-Wen Reservoir Transbasin Diversion Project" in Taiwan, Engineering Geology, v.101, p. 39-58.
-Ghanbarian-Alavijeh, B. and Hunt, A.G., 2012. "Unsaturated hydraulic conductivity in porous media: Percolation theory", Geoderma, v.187-188, p.77-84.
-Jeon, Y.S. and Yang, H.S., 2004. "Development of a back analysis algorithm using flac", Int J of Rock Mech. & Mining Sci. v. 41(3), p. 22–29.
-Karakus, M. and Fowell, R.J., 2005. "Back analysis for tunnelling induced ground movements and stress redistribution", Tunnelling and Underground Space Technology, v. 20(6), p. 514-524.
-Kim, S., Hyun, Y. and Lee, K., 2005. Time series modeling for evaluation, of groundwater discharge rates into an urban subway system, v. 9, p. 15-22.
-Miranda, T., Dias, D., Eclaircy-Caudron, S., Gomes Correia, A. and Costa, L., 2011. "Back analysis of geomechanical parameters by optimisation of a 3D model of an underground structure ", Tunnelling and Underground Space Technology, v. 26(6), p. 659-673.
-Moreira, N., Miranda, T., Pinheiro, M., Fernandes, P., Dias, D., Costa, L. and Sena- Cruz, J., 2013. "Back analysis of geomechanical parameters in underground, Tunnelling And Underground Space Technology, v.33, p. 143-158.
-Opara, A.I., Onu, N.N. and Okereafor, D.U., 2012. "Geophysical Sounding for the Determination of Aquifer Hydraulic Characteristics from Dar- Zurrock Parameters: Case Study of NgorOkpala, Imo River Basin, Southeastern Nigeria, The Pacific Journal of Science and Technology, v. 13 (1), p. 590-603.
-Oreste, P., 2004. \Back-analysis techniques for the improvement of the understanding of rock in underground constructions", Tunnelling and Underground Space Technology, v. 20(1), p. 7-21.
-Sakurai, S., 1993. "Back Analysis in Rock Engineering Comprehensive Rock Engineering", v. 4, p. 543- 568.
-Saxton, k.e., Rawls, w.j., Romberger, j.s. and Papendick, r.i., 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture, Soil Science Society of America Journal, v. 50, p. 1031-1036.
-Thangarajan Regional, M., 2003. Regional Groundwater Modeling, Capital Publishing Company, New Delhi, 340 p.
-Wu, C.L., Chau, K.W., Huang, J.S., 2007. "Modeling coupled water and heat transport in a soil–mulch-plant–atmosphere continuum (SMPAC) system", Applied Mathematical Modeling, v. 31, p. 152-169.
-Zhang, L.Q., Yue, Z.Q., Yang, Z.F., Qi, J.X. and Liu, F.C., 2006. A displacement-based back-analysis method for rock mass modulus and horizontal in situ stress in tunneling-Illustrated with a case study", Tunnelling and Underground Space Technology, v. 21(6), p. 639-649.