

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

شراره قلی زاده خاصوانی^۱، محمد نخعی^{۲*}، صادق طریق ازلی^۳

۱- کارشناسی ارشد 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 کیلومتر 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 $4/5 \times 10^{-5}$ و $3/6 \times 10^{-5}$ 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.

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 (مهندسیین مشاور ساحل، ۱۳۹۳). در حال حاضر به طور وسیع از روش‌های 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 پرهزینه بوده و ما اگر تعداد زیادی آزمایش برجا برای اندازه‌گیری مستقیم خصوصیات هیدرولیکی انجام دهیم، هزینه و زمان زیادی صرف خواهد شد که 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 (جنون 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

محدوده مورد مطالعه

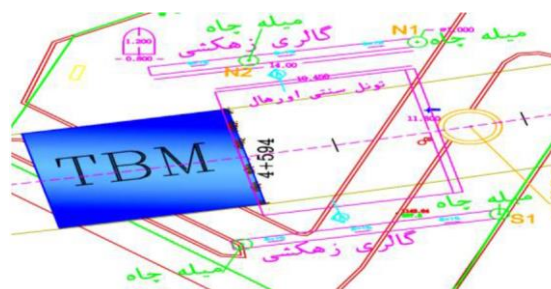
پروژه خط هفت مترو تهران قطعه شرقی-غربی حدفاصل ایستگاه a7 تا ایستگاه n7 در مجموع دارای طولی بیش از ۱۲ کیلومتر است قطعه شرقی این پروژه کیلومتراژ ۴۵۰۰-۴۶۰۰ در محدوده میدان سعیدی مورد مطالعه قرار گرفت. در (شکل ۱) موقعیت مسیر تونل در نقشه تهران نشان داده شد. با توجه به لزوم بهینه نمودن طرح بهسازی زمین در میدان سعیدی، لازم است سطح آب زیرزمینی محدوده که در حال حاضر بالاتر از تراز کف تونل است به پایین تر 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 بر گرفته 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 محدوده 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 (مهندسی مشاور ساحل، ۱۳۸۹).

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 رینگ 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 مائر به حفر ۳۹، گالری زهکش، در معادن مختلف دنیا طی سال‌های ۱۶۰۰ تا ۱۸۹۷، اشاره کرده است (مائر، ۲۰۰۴).

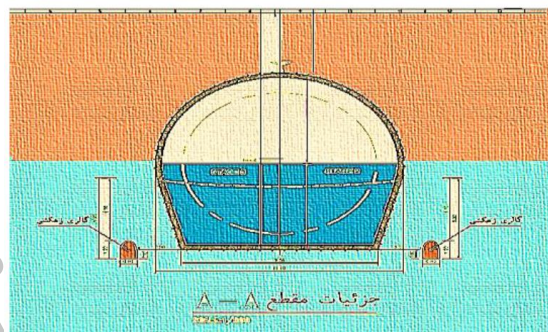
هم‌چنین گالری زهکش، واقع در معدن بینگهام و گالری زهکش حفر شده در معدن مس اوک تدی (بیل و رد، ۲۰۱۳).



شکل ۱: موقعیت مسیر تونل در نقشه تهران



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



شکل ۳: مقطع عمودی از تونل و گالری‌ها

مواد و روش‌ها

روش‌های اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری ضریب نفوذپذیری (K) و روش‌های مختلف اندازه‌گیری 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 صحرائی نظیر آزمون پمپاژ، ردیابی رنگی و اوگر و ۴- به کمک مدل‌های ریاضی آب‌های زیرزمینی (مدلسازی معمولی، مدلسازی تحلیل برگشتی).

در زمان t ، $A = \text{سطح مقطع نمونه خاک}$ ، 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 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 (مهندسیین مشاور ساحل، ۱۳۸۹).

هدایت هیدرولیکی در محدوده پروژه: در مطالعه حاضر از مقادیر هدایت هیدرولیکی به دست 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 بار ثابت استفاده شد و فرمول آن در رابطه ۱ بیان شده است:

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

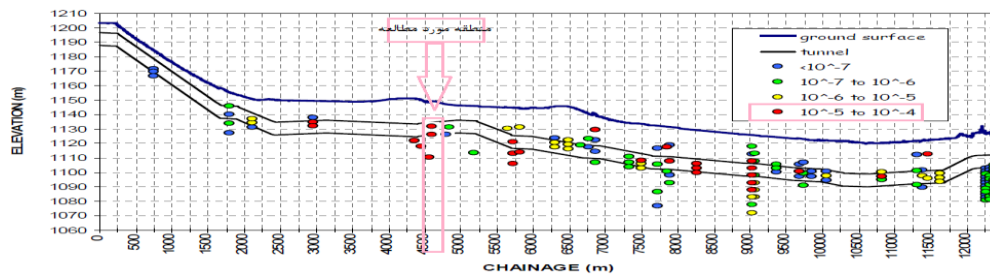
K = ضریب نفوذپذیری، m/s ، V = سرعت جریان آب به خارج خاک، Q = حجم کل آب جمع شده

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

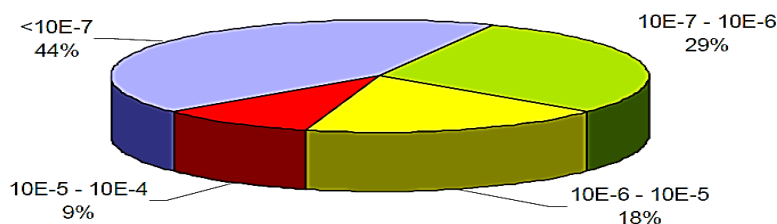
BH-4-7			گمانه
۲۵	۲۱	۱۹	عمق آزمایش (متر)
L-12	L-11	L-10	شماره آزمایش
ماسه سیلتی			لیتولوژی
4×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	تست‌های لوفران نفوذپذیری (متر بر ثانیه)

ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌گردد واحدهای خاکی تشکیل دهنده مسیر تونل عمدتاً دارای نفوذپذیری کمتر از 10^{-7} هست و تنها ۹ درصد از واحدهای مسیر تونل دارای نفوذپذیری 10^{-5} تا 10^{-3} متر بر ثانیه هست که محدوده مورد مطالعه ما نیز در این محدوده قرار می‌گیرد (مهندسیین مشاور ساحل، ۱۳۸۹).

نتایج آزمایش لوفران (مقدار هدایت هیدرولیکی) به شرح زیر است: تغییرات نفوذپذیری لایه های خاک در برگزیده تونل در منطقه مورد بررسی بین 10^{-4} تا 10^{-5} متر بر ثانیه می‌باشد. نتایج به دست 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 هر یک از آنها در نمودار شکل ۵



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).

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 عموماً به عنوان روشی تعریف می‌شود که می‌تواند پارامترهای کنترل‌کننده سیستم را به کمک رفتار خروجی آن تامین کند. در تحلیل برگشتی می‌توان به دو روش عمل کرد، روش معکوس و روش مستقیم (جنون 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

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. روش اول در حل مسئله‌های جریان آب زیرزمینی رایج‌تر هستند (اندرسون و وسنر، ۱۹۹۲). روش‌های عددی که در این تحقیق مورد

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 مقدار دبی محاسبه شده و Q_k^* مقدار دبی اندازه‌گیری شده و مقدار محاسبه در نقطه K است.

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).

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 سیلنتی می‌باشد که به نام ET-2 در خط ۷ مترو نام‌گذاری شده است

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 رابطه ۲)

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

در این روش با انتخاب یک مقدار اولیه (x_i) ، 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 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

مدلسازی می‌شود. به منظور انجام تحلیل‌ها از مدل رفتاری موهر-کولمب در رفتار مواد استفاده شده است. مدل موهر-کولمب یکی از مرسوم‌ترین مدل‌های رفتاری مکانیک خاک به شمار می‌رود. جداول ۲ و ۳ اطلاعات مربوط به مصالح به کار رفته در دو نرم‌افزار می‌باشد.

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 سیلنتی حفاری شده است و فشار آب به صورت هیدرو استاتیکی در نظر گرفته می‌شود. بعد از مدلسازی تونل در دو طرف آن گالری‌های افقی برای زهکشی آب

جدول ۲: اطلاعات خاک در برگرفته تونل

واحد	لایه	نشانه	پارامتر
-	موهر-کولمب	Model	مدل مواد
-	زهکشی شده	Type	نوع رفتار مواد
KN/m ³	۱۸	$\gamma_{\text{شیب}}$	وزن مخصوص غیراشباع
KN/m ³	۱۹	$\gamma_{\text{شکل}}$	وزن مخصوص اشباع
M/s	4×10^{-5}	K_x	نفوذپذیری قائم
M/s	4×10^{-5}	K_y	نفوذپذیری افقی
KN/m ²	۷۰۰۰۰	Eref	مدول یانگ
-	۰/۳	γ	نسبت پواسون
KN/m ²	۱۵	Cref	چسبندگی
-	۰/۵۴	Rinter	ضریب کاهش مقاومت

جدول ۳: مشخصات لاینینگ دور تونل و گالری‌ها

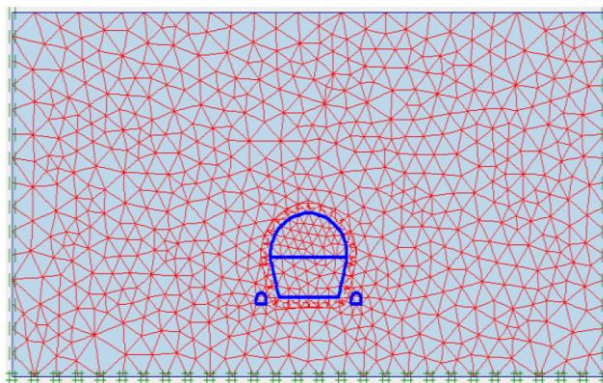
واحد	T تونل و گالری	نشانه	پارامتر
-	الاستیک	Material type	نوع رفتار مواد
KN/m	$1/4 \times 10^{-7}$	EA	سختی نرمال
KN/m ² /m	$1/43 \times 10^{-5}$	EI	سختی خمشی
M	۰/۳۵۰	D	ضخامت معادل
KN/m/m	۸/۴۰۰	W	وزن

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

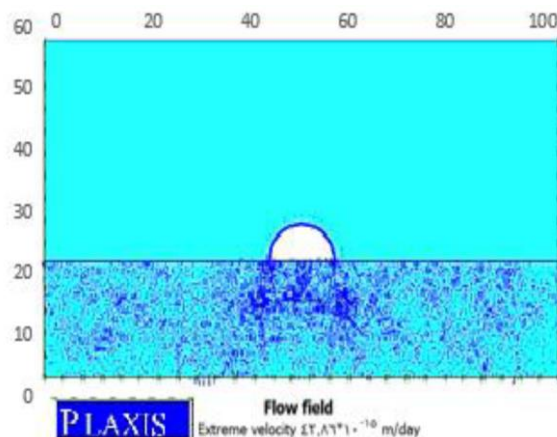
نرم‌افزار PLAXIS: نرم‌افزار PLAXIS که بر مبنای اجزاء محدود است، یکی از خصوصیات این نرم‌افزار توانایی آن در مدل‌سازی و شبیه‌سازی آب زیرزمینی است که با مقایسه نتایج آن با نتایج حاصل از روش‌های تحلیلی، به میزان قابل اعتماد این روش پی برده می‌شود. اساس کار این نرم‌افزار بر مبنای معادلات داری و قانون جرم است. در

مش بندی بر اساس روش کرنش صفحه‌ای و با المان مثلثی ۱۵ گره‌ای انجام شد، که نرم‌افزار به صورت 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 لاینینگ 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 مقدار آبی 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 در حالت پایدار نشان داده است.

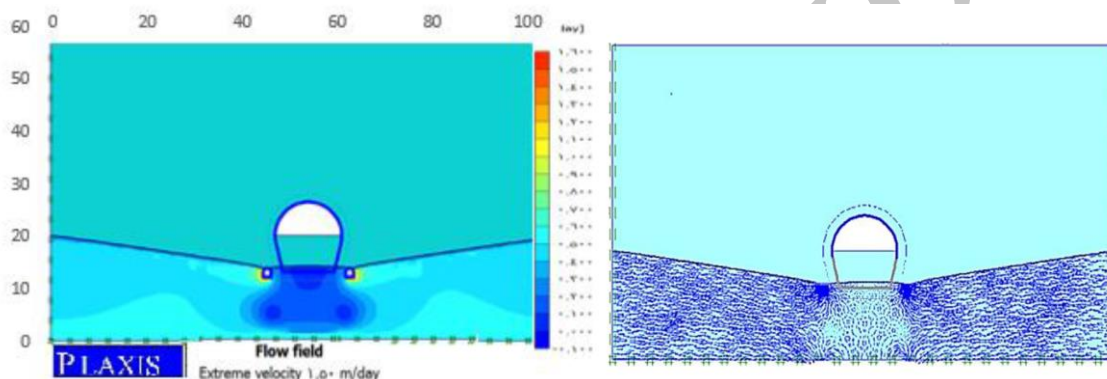
نامتقارن و نعلی شکل می‌باشد، بیشینه ارتفاع آب بالای تونل ۳۶ متر از سطح زمین می‌باشد و تونل در مسیر خود از لایه‌های خاک ماسه سیلتی می‌گذرد. اولین کار، تعیین هندسه و ژئومتری آن است. آنچه در مدلسازی و هندسه پروژه می‌بایست مدنظر قرار گیرد مدل می‌بایست به اندازه کافی بزرگ باشد تا تأثیر مرزها و خصوصیات آن‌ها 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 و همکاران، ۱۳۹۲)، بنابراین ابعاد در نظر گرفته شده در این مدل ۱۰۰ متر جهت x و ۶۰ متر در جهت y - تونل می‌باشند و پس از اعمال شرایط مرزی و بسته شدن اطراف مدل مش بندی المان محدود به صورت خیلی ریز انجام می‌شود. عملیات



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



شکل ۷: مدل اولیه تونل در نرم افزار PLAXIS



شکل ۸: (الف و ب) تصویر رسم شده توسط نرم افزار برای جریان آب ورودی به گالری ها در حالت پایدار.

جدول ۴: نتایج حاصل از محاسبه آب زهکشی توسط گالری ها در حالت پایدار توسط نرم افزار PLAXIS

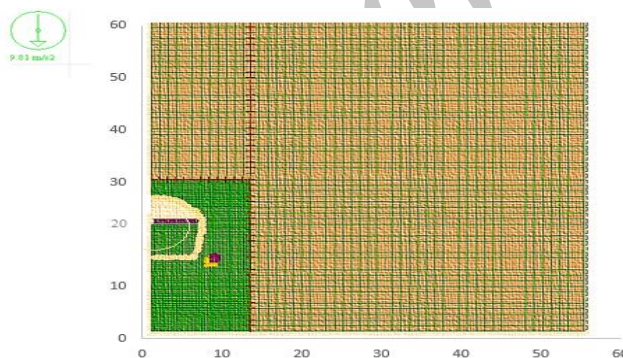
خطا	آب زهکشی شده تونل توسط گالری ها برحسب (متر مکعب بر روز)	بار آبی از کف تونل (متر)	نفوذپذیری (متر بر ثانیه) (مهندسیین مشاور ساحل، ۱۳۹۳)	واحد زمین شناسی
PLAXIS	PLAXIS	(واقعیت) (مهندسیین مشاورین ساحل، ۱۳۹۳)		
۱۲٪	۵۲۷	۶	4×10^{-5}	ماسه سیلتی (ET-2)

را حل کرد. در مسائل مهندسی که با معادلات دیفرانسیل مطرح می شوند (تحکیم، مسائل مربوط به آب و غیره)، تئوری تفاضل محدود وسیله ای برای استنتاج تقریب هایی در نقاط مشخص برای مشتقات برحسب پارامترهای مجهول در این نقاط و نقاط مجاور ارائه می دهد. در محاسبات جریان

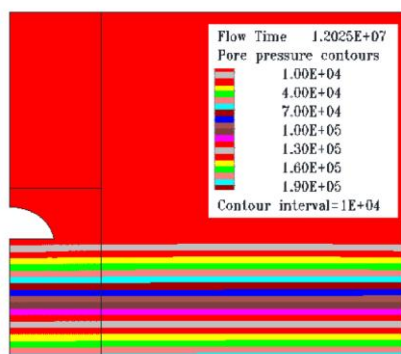
نرم افزار **FLAC**: در ریاضیات، روش تفاضل محدود که یکی از روش های عددی به شمار می رود، به منظور تقریب زدن حل معادلات دیفرانسیل با استفاده از معادلات تفاضل محدود به عنوان تقریبی از مشتقات به کار می رود. با استفاده از روش تفاضل محدود می توان بسیاری از مسائل مهندسی

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.

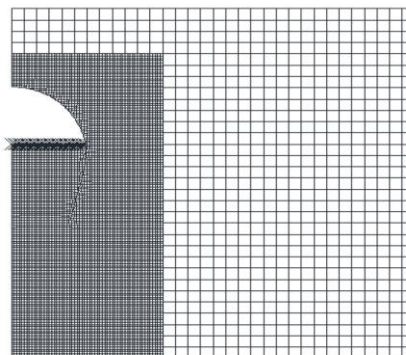
آب زیر زمینی می‌توان با استفاده از متغیر *gflow* در زبان برنامه نویسی *Fish*، مقدار کل جریان (برحسب حجم/زمان) به داخل و خارج مدل را به دست آورد و دبی به صورت تابعی از زمان محاسبه می‌شود که می‌توان تغییرات آن لحظه شروع حرکت جریان در لحظه حفر تونل تا لحظه‌ای که جریان به حالت پایدار می‌رسد مشاهده کرد. طراحی 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



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

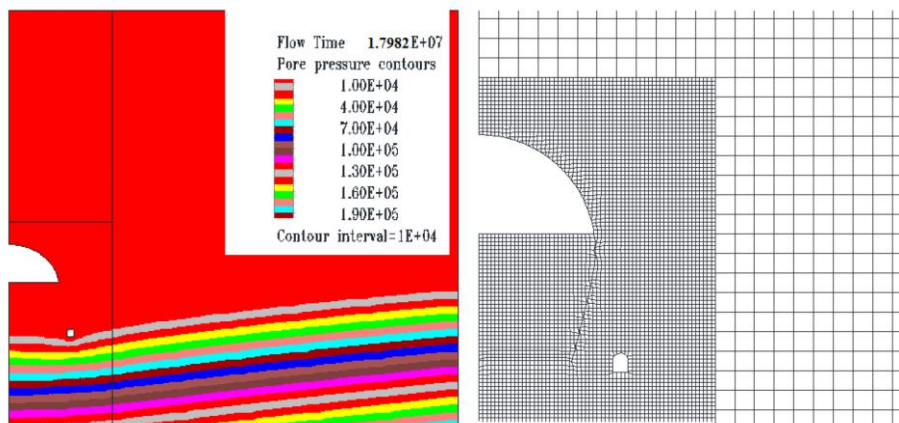


ب) تغییرات فشار حفره‌ای در مرحله دوم



الف) هندسه مدل در مرحله دوم

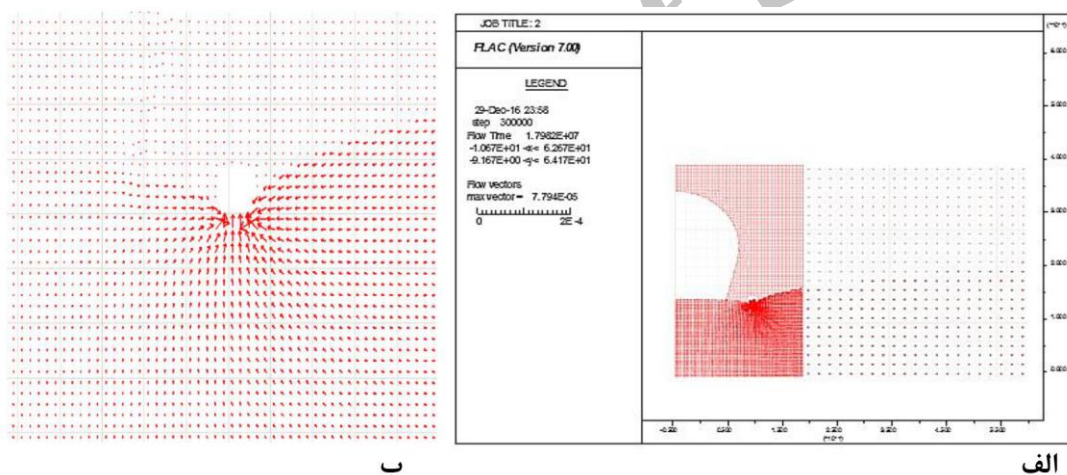
شکل ۱۰: الف و ب) مدل رسم شده در حالت پایدار و مرحله حفاری قسمت تاج تونل توسط نرم‌افزار *FLAC*



الف) هندسه مدل در مرحله نهایی
 ب) تغییرات فشار حفره‌ای مرحله نهایی
 شکل ۱۱: (الف و ب) مدل رسم شده در حالت پایدار و مرحله نهایی توسط نرم‌افزار FLAC (حفاری گالری)

در اطراف گالری بردارهای بزرگتری وجود دارد که ورود جریان آب را به آن را نمایش می‌دهد.

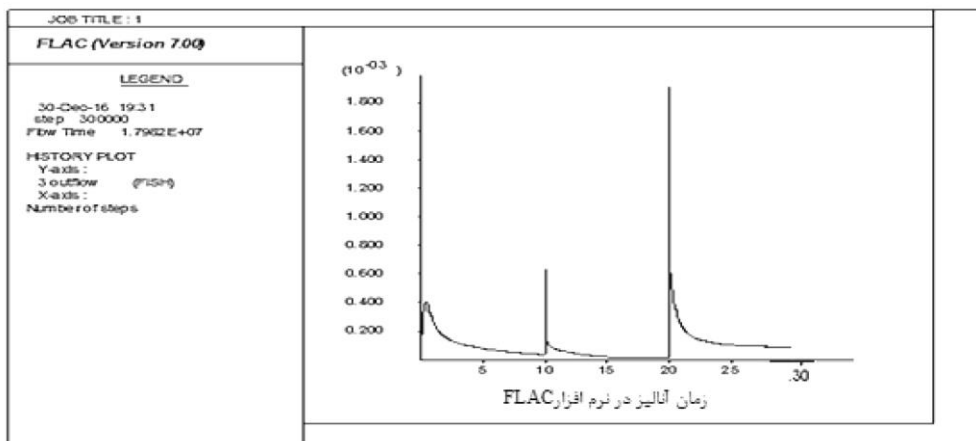
شکل ۱۲ بردارهای جریان را در حالت پایدار بعد از حفر گالری نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که



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

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.

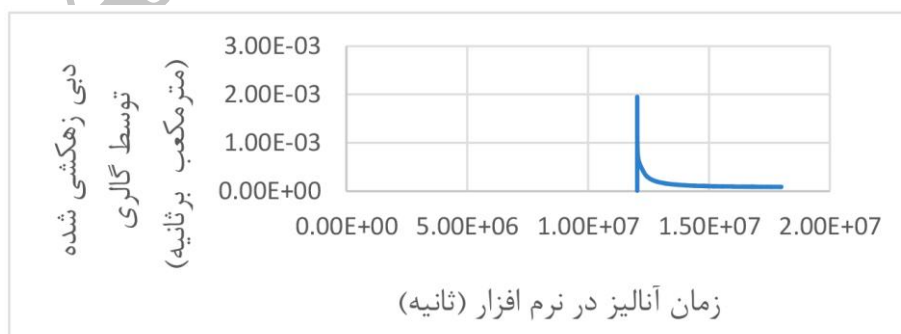
شکل ۱۳ نمودار دبی خروجی رسم شده توسط نرم‌افزار FLAC از مدل را به صورت تابعی از زمان نشان می‌دهد. نظر به مدلسازی نیمی از هندسه مدل به علت تقارن، برای دستیابی به مقدار واقعی دبی، مقادیر نمودار باید دو برابر گردند. این



شکل ۱۳: نمودار دبی خروجی - زمان در حالت پایدار در نرم افزار FLAC

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 در واقع 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 4×10^{-4} متر بر ثانیه برای یک گالری است. جدول ۵ نتایج حاصل از محاسبه میزان آب زهکشی از تونل توسط نرم افزار FLAC نشان داده است.

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 این که با حفاری تاج تونل به سطح آب زیرزمینی می‌رسیم ولی پایین‌تر از تراز آب زیرزمینی نمی‌رویم، در شکل مشاهده می‌شود که نقطه اوج ارتفاع چندانانی ندارد، یعنی آب کمی از قسمت حفاری شده خارج می‌شود. دقت شود که سقوط نمودار به تندی صورت می‌پذیرد، یعنی ایجاد حفره تاج تونل فضای مناسبی برای خروج آب



شکل ۱۴: نمودار دبی خروجی در حالت پایدار در نرم افزار 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) (واقعیت) (مهندسين مشاور ساحل، ۱۳۹۳)		بار آبی از کف تونل (متر)	نفوذپذیری (متر بر ثانیه) (مهندسين مشاور ساحل، ۱۳۹۳)	واحد زمین‌شناسی
	FLAC	FLAC			
۴/۸٪	۶۲۹	۶۰۰	۶	4×10^{-5}	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 $4/5 \times 10^{-5}$ انتخاب می‌شود با خطای صفر درصد برای دبی بهینه که از تونل خارج شده است برابر است؛ و با استفاده از نرم‌افزار FLAC مقدار $3/6 \times 10^{-5}$ 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 قبلاً اشاره نمودیم محاسبه می‌نماییم.
تفاوت‌های بین دو نرم‌افزار:
۱- PLAXIS یکی از نرم‌افزارهای المان محدود هست در صورتی‌که 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 در PLAXIS 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 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 نرم افزار PLAXIS

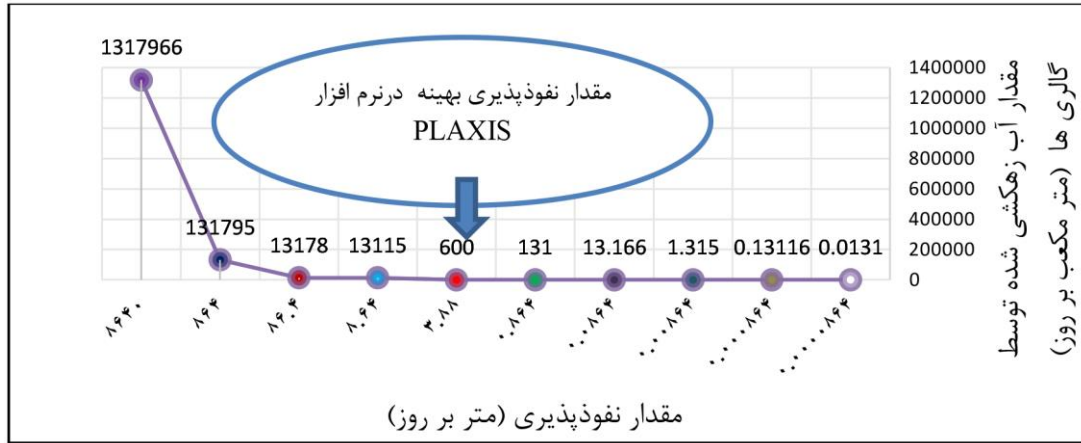
ردیف	خطای کل	میزان دبی (Q) (متر مکعب بر روز)	نفوذپذیری (K) (متر بر ثانیه)	مقدار قابلیت انتقال (T) (مترمربع بر روز)
۱	٪۲۱۹۵۶	۱۳۱۷۹۶۶	۰/۱	۴۷۵۲۰۰
۲	۲۱۸۶۵	۱۳۱۷۹۵	۰/۰۱	۴۷۵۲۰
۳	٪۲۰۹۶	۱۳۱۷۸	۰/۰۰۱	۴۷۵/۲
۴	٪۱۱۹	۱۳۱۵	۰/۰۰۰۱	۴۷۵
۵	٪۹۷	۱۱۸۷	۰/۰۰۰۰۹	۴۲۸
۶	٪۷۵	۱۰۵۵	۰/۰۰۰۰۸	۳۸۰
۷	٪۵۳	۹۲۳	۰/۰۰۰۰۷	۳۳۲
۸	٪۳۱	۷۹۱	۰/۰۰۰۰۶	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	۰/۰۰۰۰۰۰۰۱	۰/۰۰۴۷۵۲

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

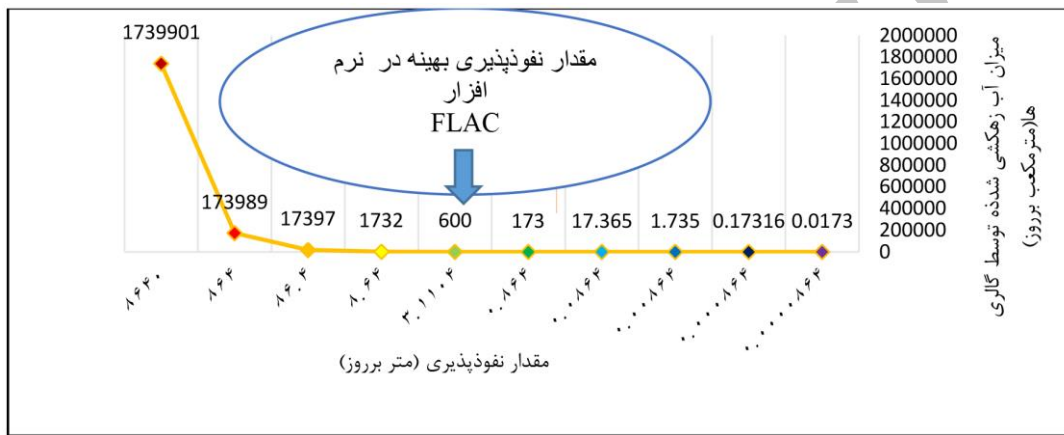
ردیف	خطای کل	میزان دبی (Q) (مترمکعب بر روز)	نفوذپذیری (K) (متر بر ثانیه)	مقدار قابلیت انتقال (T) (مترمربع بر روز)
۱	٪۲۸۹۸۸۳	۱۷۳۹۹۰۱	۰/۱	۴۷۵۲۰۰
۲	٪۲۸۸۹۸	۱۷۳۹۸۹	۰/۰۱	۴۷۵۲۰
۳	٪۲۷۹۹	۱۷۳۹۷	۰/۰۰۱	۲/۴۷۵
۴	٪۱۸۸	۱۷۳۲	۰/۰۰۰۱	۴۷۵
۵	٪۱۵۹	۱۵۵۷	۰/۰۰۰۰۹	۴۲۸
۶	٪۱۳۰	۱۳۸۳	۰/۰۰۰۰۸	۳۸۰
۷	٪۱۰۱	۱۲۰۸	۰/۰۰۰۰۷	۳۳۲
۸	٪۷۲	۱۰۳۳	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	۰/۰۰۰۰۰۰۰۱	۰/۰۰۴۷۵

مختلف را طی تحلیل برگشتی توسط نرم افزار
FLAC و PLAXIS نشان می دهد.

شکل های ۱۵ و ۱۶ نمودار مربوط به دبی های به
دست آمده در حالت پایدار توسط نفوذپذیری های



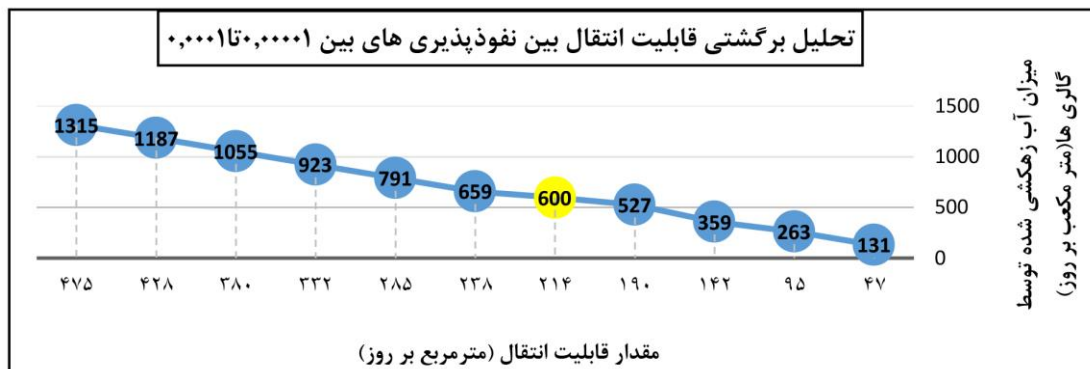
شکل ۱۵: نمودار تحلیل برگشتی مقدار نفوذپذیری بین 1×10^{-2} تا 1×10^{-9} توسط نرم افزار PLAXIS



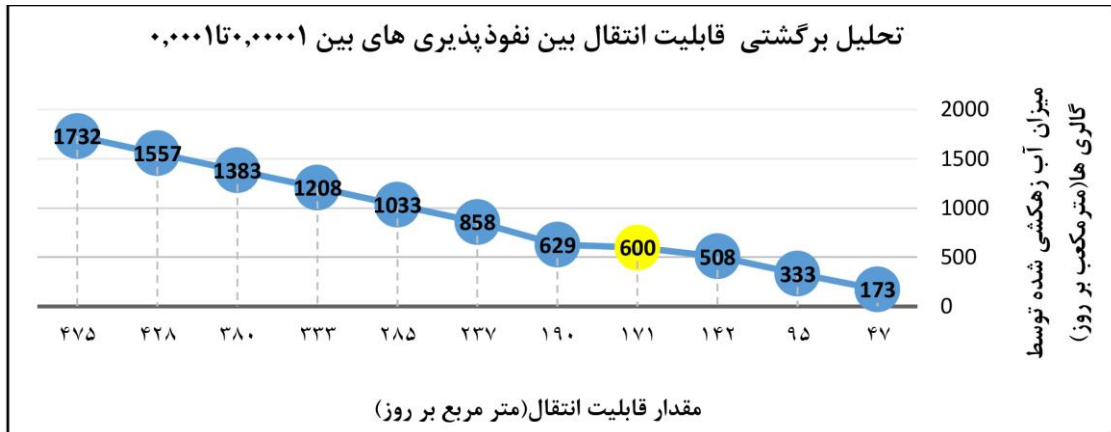
شکل ۱۶: نمودار تحلیل برگشتی مقدار نفوذپذیری بین 1×10^{-2} تا 1×10^{-9} در نرم افزار FLAC

این محدوده، ۱۷۱ الی ۲۱۴ متر مربع بر روز را نشان می دهد.

شکل های ۱۷ و ۱۸ نمودار مربوط به T را طی تحلیل برگشتی نشان می دهد که با توجه به عددهای به دست آمده بهترین قابلیت انتقال در



شکل ۱۷: تحلیل برگشتی پارامتر T بین نفوذپذیری های 1×10^{-4} تا 1×10^{-5} توسط نرم افزار PLAXIS



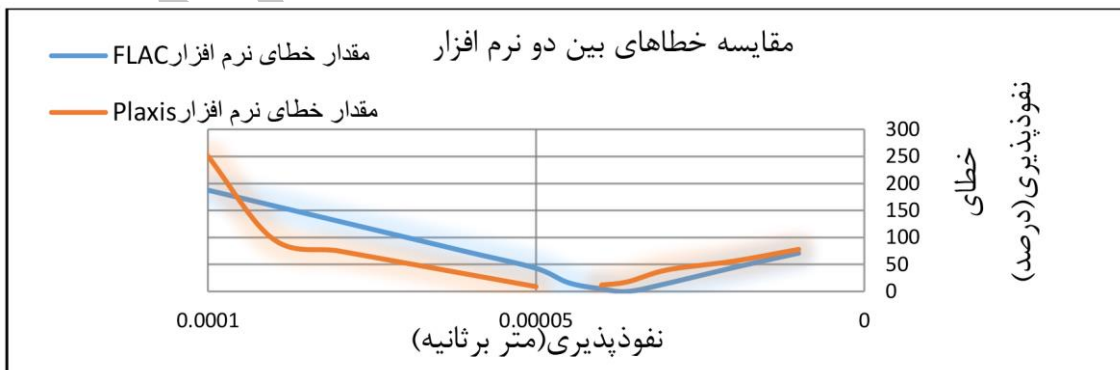
شکل ۱۸: تحلیل برگشتی پارامتر T بین نفوذپذیری های 1×10^{-5} تا 1×10^{-4} توسط نرم افزار FLAC

جدول ۸: مقایسه اعداد به دست آمده از تحلیل برگشتی در حالت پایدار بین دو نرم افزار PLAXIS و FLAC

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

۶- از مقایسه روش ها با توجه به نمودار شکل ۱۹ می توانیم نتیجه بگیریم که مقادیر به دست آمده از نرم افزار FLAC بیش از مقادیر مشابه حاصل از نرم افزار PLAXIS است و خطای به دست آمده در تحلیل برگشتی پارامتر نفوذپذیری در

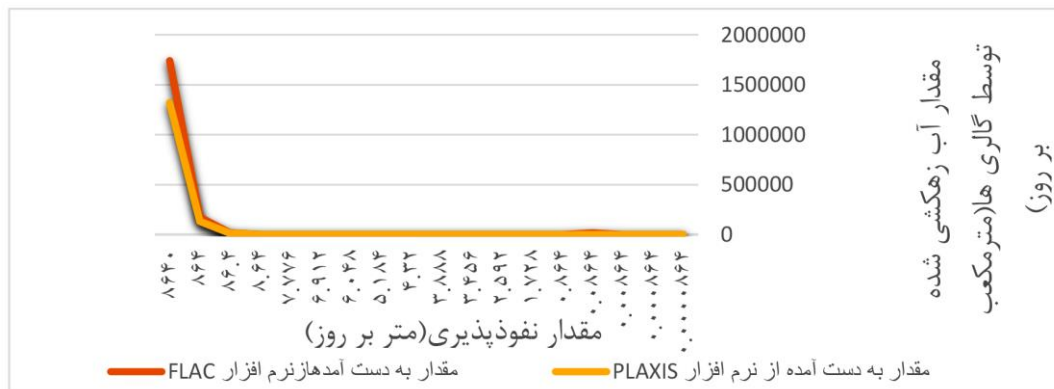
نمونه های کمتر از مقدار 5×10^{-5} خطای کمتری را نشان می دهد و در نفوذپذیری های بالاتر از مقدار 5×10^{-5} خطای بیشتری را نشان می دهد.



شکل ۱۹: مقایسه خطای بین دو نرم افزار PLAXIS و FLAC

و PLAXIS طی تحلیل برگشتی را نشان می‌دهد.

شکل ۲۰ مقایسه‌ای بین اعداد به دست آمده طی تحلیل برگشتی طی تکرار مدل دو نرم‌افزار FLAC



شکل ۲۰: مقایسه دبی بین دو نرم‌افزار PLAXIS و FLAC

نتیجه گیری

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 آفتی 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 آنجایی که در تحلیل برگشتی نتایج منحصر به فردی را نمی‌توان به دست آمده آورد، همواره با

هدف از مطالعه حاضر بررسی میزان آبی زهکشی شده از تونل به وسیله گالری‌های افقی که اطراف تونل حفر شده است در محدوده میدان سعیدی تونل خط هفت متر در این محدوده بر اساس نتایج به دست 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 $4/5 \times 10^{-5}$ به دست آمده از نرم‌افزار PLAXIS و مقدار $3/6 \times 10^{-5}$ با استفاده از نرم‌افزار FLAC می‌باشد.

مقادیر به دست 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 به دست 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 هدایت هیدرولیکی به دست آمده از آزمایشگاه از مقادیر بهینه شده توسط مدل عددی

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 تقریباً یکسان است. در نتیجه کالیبره شده و آماده استفاده برای تحقیقات دیگر.

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

منابع

- 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.
- مهندسين مشاور ساحل، ۱۳۸۸. هیدروژئولوژی مسیر تونل پروژه خدمات مهندسی پروژه خط ۷ متروی تهران، قطعه شرقی-غربی.
- مهندسين مشاور ساحل، ۱۳۸۹. پروژه خط ۷ مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک مسیر تونل (قطعه شرقی-غربی).
- مهندسين 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.
- 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.
- شريفزاده، م.، قربانی، م.، مسعودی، ر. و شریفی، م.، ۱۳۸۸. تحلیل برگشتی مبتنی بر جابه‌جایی مغار نیروگاه تلمبه‌ی ذخیره سیاه‌پیشه با استفاده از روش اجزاء مجزا، مجله علمی و پژوهشی شریف، شماره ۴۷، ص ۴۹-۵۷.
- کتیبیه، 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.
- Anderson, M.P. and Woessner, W.W. 1992, Applied Groundwater Modeling Simulation of Flow and Advective Transport, Academic Press, 381 p.
- Bnoui, 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, September 2015, 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 Okerefor, 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.