

بررسی ویژگی‌های هیدرولیکی آبخوان واقع در مسیر قطعه شرقی - غربی خط هفت تونل مترو تهران در زمان انجام حفاری مکانیزه با نگرشی بر میزان آب ورودی به تونل

حمیدرضا ناصری^{۱*}، سهراب زارع^۲، جعفر حسن پور^۳، مسعود مرسلی^۴

پذیرش مقاله: ۹۱/۳/۳

دریافت مقاله: ۹۰/۵/۵

چکیده

تأثیر وجود آب‌های زیرزمینی بر روی حفاری تونل از جهت تأثیر بار هیدرولیکی آب زیرزمینی بر روی شرایط حفر تونل و در نتیجه میزان آب ورودی به تونل، مسئله بسیار مهم در حفاری مکانیزه در محیط‌های شهری است. نفوذ آب به تونل می‌تواند منجر به وارد شدن خساراتی به تجهیزات ساخت تونل، پرسنل و روند اجرای کار شود. لذا جهت طراحی سیستم ایمنی تونل و پیش‌بینی تمهیدات ایمنی قبل از شروع عملیات حفاری، بررسی وضعیت هیدروژئولوژی مسیر تونل ضروری است. آگاهی از میزان نشست آب به تونل می‌تواند در انتخاب روش حفاری مناسب و همچنین شرایط طراحی و نوع پمپ مورد نیاز، برای خروج آب از تونل مؤثر باشد.

در این مقاله با استفاده از روش مدل‌سازی عددی تفاضل محدود (با استفاده از نرم‌افزار GMS7.0 و کد MODFLOW) و روش‌های تحلیلی میزان دبی آب زیرزمینی به قطعه شرقی - غربی خط هفت تونل متروی تهران تخمین زده شده است. داده‌های مورد استفاده شامل تراز آب زیرزمینی در سال آبی ۸۷-۸۸، میزان پمپاژ چاه‌ها، آب برگشتی چاه‌های فاضلاب، بارش و تغییرات میزان هدایت هیدرولیکی در طول مسیر تونل می‌باشد. میانگین مقدار دبی بدست آمده برای کل ۱۲ کیلومتر قطعه شرقی - غربی خط هفت متروی تهران در روش تحلیلی ۳۴۵ لیتر بر ثانیه و در روش مدل‌سازی عددی ۲۹۵ لیتر بر ثانیه است. در پایان، نتایج مدل‌سازی تفاضل محدود و روش‌های تحلیلی برای زون‌های مختلف مسیر تونل با هم مقایسه شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که میزان نفوذ به دست آمده از روابط تحلیلی به نتایج مدل نزدیک است.

کلید واژه‌ها: مدل‌سازی، تفاضل محدود، کد MODFLOW، روش‌های تحلیلی، تونل، نشست آب زیرزمینی

۱. عضو هیئت علمی دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید بهشتی، تهران h-nassery@sbu.ac.ir

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

۳. دکتری زمین شناسی مهندسی، مدیر پروژه‌های زیرزمینی، مهندسی مشاور ساحل

۴. دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، دانشکده علوم، دانشگاه تربیت معلم، کرج

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

مطالعه آب‌های زیرزمینی از دو دیدگاه محیطی و تکنیکی مهم است. دیدگاه تکنیکی در واقع دیدگاه کیفیتی و بررسی خصوصیات درونی خاک، مشخصات آبخوان و محیط متخلخل است. دیدگاه محیطی یا دیدگاه کمی شناسایی منابع آب و بررسی پتانسیل تخریب در طی حفاری تونل می‌باشد (Guglielmetti et al., 2008).

پروژه خط هفت مترو تهران به لحاظ مطالعات آب‌شناختی در محدوده مطالعاتی تهران- کرج واقع شده است. آبخوان تهران - کرج از شرق تهران تا حوالی کرج بین عرض‌های ۳۸۸۵۰۰۰ تا ۴۰۰۵۰۰۰ و طول‌های ۴۷۵۰۰۰ تا ۵۶۳۰۰۰ در سیستم شبکه‌بندی UTM واقع می‌باشد. خط هفت مترو تهران از شهرک امیرالمومنین در شرق تهران شروع می‌شود و پس از عبور از بزرگراه بسیج در طول بزرگراه شهید محلاتی ادامه می‌یابد و پس از اتصال به میدان قیام و امتداد خیابان مولوی و هلال‌احمر به بزرگراه شهید نواب صفوی می‌رسد، و پس از آن در امتداد جنوب به شمال تا میدان کاج سعادت‌آباد ادامه می‌یابد. قطعه شرقی- غربی خط هفت مترو تهران حد فاصل ایستگاه A7 در مجاورت شهرک امیرالمومنین تا ایستگاه N7 واقع در تقاطع خیابان قزوین و بزرگراه نواب که در مجموع دارای طول ۱۲ کیلومتر است، در این تحقیق بررسی شده است (شکل ۱).

تراکم ساختمانی در منطقه و وجود چاه‌های برداشت آب و فاضلاب در مسیر حفاری تونل شرایط پیچیده و ناپایداری را به لحاظ آب‌های زیرزمینی به وجود آورده است. بیش از ۴۰ گمانه با پراکندگی مناسب در کل مسیر تونل و ایستگاه‌های مترو با هدف شناسایی لایه‌های خاک، خصوصیات و پارامترهای زمین‌شناسی مهندسی و نیز وضعیت آب‌های زیرزمینی مسیر تونل حفر شده‌اند.

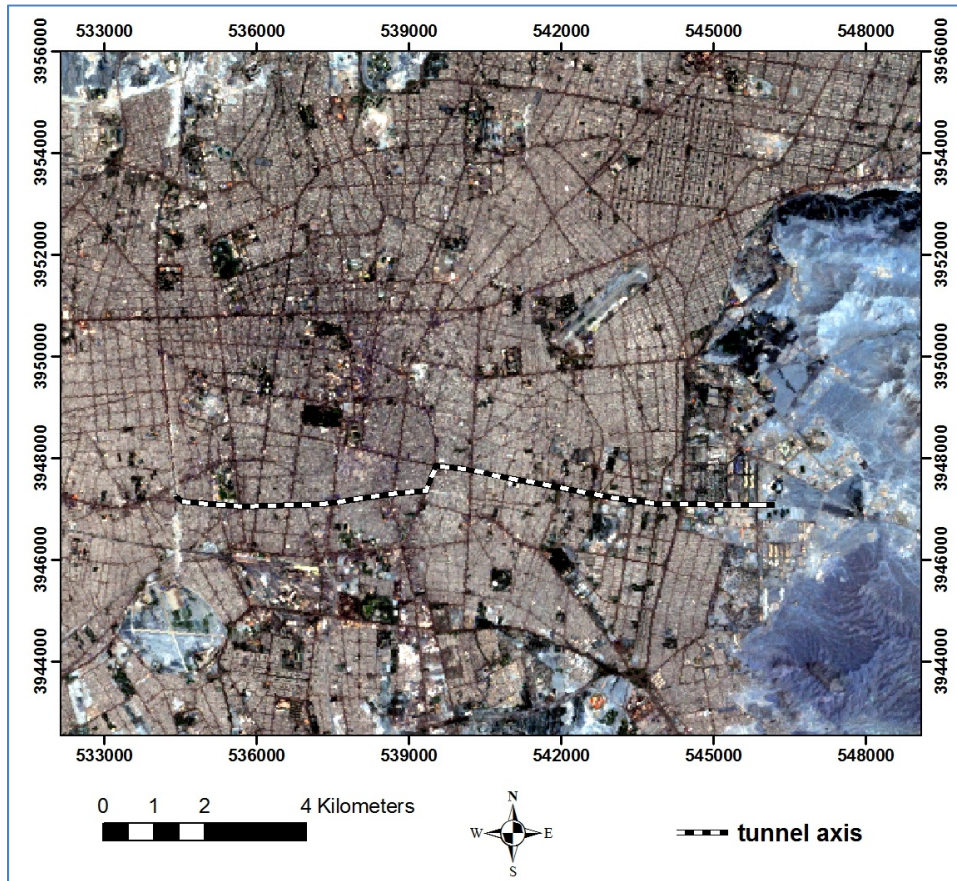
عمق حفاری اکثر گمانه‌ها ۳۰ الی ۴۰ متر از سطح زمین است (شرکت مهندسی مشاور ساحل، ۱۳۸۸). تراز محور تونل در نواحی شرقی محدوده پروژه، بالاتر از تراز سطح آب زیرزمینی است و در نواحی مرکزی و انتهایی پایین‌تر از آن می‌باشد. بنابراین به جز نواحی شرقی مسیر تونل (از متر ۴۳۰۰ صفر الی ۴۳۰۰ متر)، حفاری تونل با ورود آب همراه خواهد بود.

در این مطالعه با استفاده از روش مدل‌سازی عددی تفاضل محدود (با استفاده از نرم‌افزار GMS7.0 و کد MODFLOW) و روش‌های تحلیلی میزان نفوذ آب زیرزمینی به قطعه شرقی - غربی خط هفت تونل متروی تهران تخمین زده شده است. مطالعاتی در زمینه نشت به تونل توسط کیم و همکاران (Kim et al., 2005) صورت گرفته است.

آن‌ها مدل‌سازی سری زمانی را جهت برآورد تخلیه آب زیرزمینی به سیستم مترو شهری به کار برده‌اند. مدل تهیه شده نشان‌گر همبستگی بین بارش و میزان نشت آب زیرزمینی بوده است.

ناصری و اسدیان (۱۳۸۱) روابط تحلیلی را به منظور تخمین میزان جریان آب زیرزمینی ورودی به میله‌های قنات، مورد استفاده قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که اعتبار رابطه مذکور تنها در حالتی است که تمام میله در قسمت اشباع حفر شده باشد.

یانگ و همکاران (Yang et al., 2009) با استفاده از نرم‌افزار GMS (کدهای MODFLOW و FEMWATER) تأثیر حفاری تونل تسن و نگ در تایوان بر محیط آبخوان و چشمه‌های آب گرم محلی اطراف تونل را بررسی نموده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که با تخمین آب ورودی به تونل می‌توان تأثیر ساخت تونل را بر رژیم منابع آب منطقه‌ای و محلی را بررسی کرد.



شکل ۱. موقعیت پروژه بر روی تصویر ماهواره‌ای شهر تهران

میزان جریان ورودی به تونل ۲/۵ تا ۱۰ مترمکعب بر ساعت پیش‌بینی شده است. دانینگ و همکاران (Dunning et al., 2004) جریان آب زیرزمینی و آب سطحی را به یک تونل فاضلاب عمیق در دره منومونی در میلواکی ویسکانسین با استفاده از MODFLOW شبیه‌سازی کرده‌اند. لونی (loney, 2001) اثر زهکشی سنگ کف تونل بر افت آبخوان را با استفاده از کد MODFLOW مطالعه کرده است و نتایج یک کالیبراسیون خوب را برای افت و نرخ جریان ارائه می‌دهد. بونومی و همکاران (Bonomi et al., 2003) اثر ساخت تونل بر سطح آب زیرزمینی را با استفاده از کد MODFLOW مطالعه کرده‌اند.

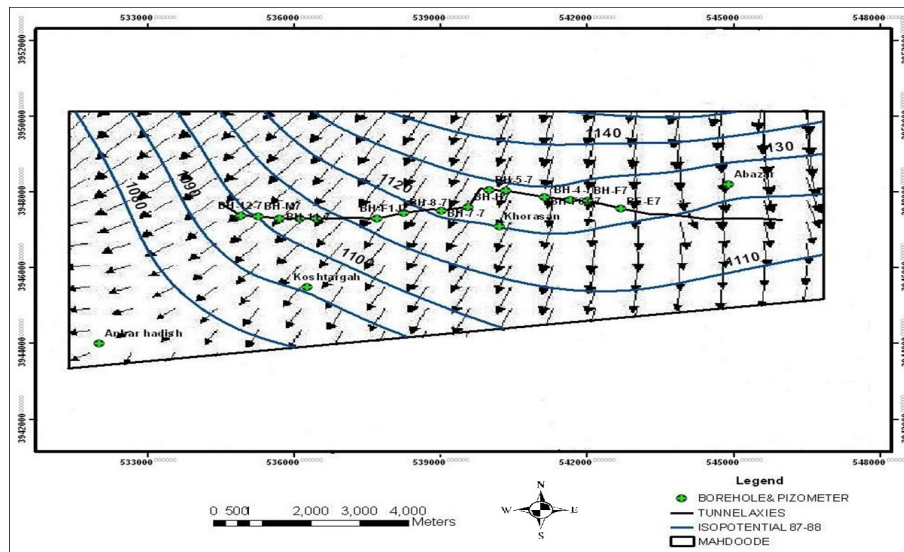
زایدل و همکاران (Zaidel et al., 2009) نشت به تونل‌ها و شفت‌های یک معدن فرضی را شبیه‌سازی نموده‌اند. برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در سنگ بستر آبخوان و برآورد نشت آب از کد MODFLOW و بسته نرم‌افزاری زهکش استفاده شده است. شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که پیش‌بینی دقیق میزان نشت آب می‌تواند با به کارگیری فواصل شبکه‌ی کوچکتر از نسبت قطر/ عرض بازشدگی‌های شبیه‌سازی شده به دست آید. رونی (Roony, 2002) با استفاده از کد MODFLOW و بسته نرم‌افزاری، زهکش جریان آب به تونل دوبلین- پرت در ساحل شرقی ایرلند را شبیه‌سازی کرده است.

برگشتی فاضلاب به همراه تغذیه از بارش در مدل، در نظر گرفته شده است.

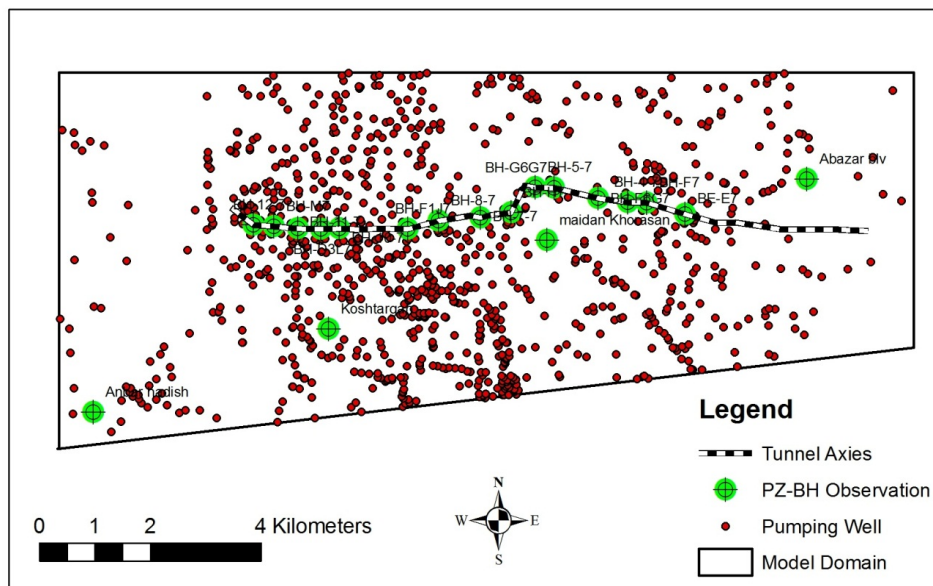
برای بررسی تغییرات ارتفاعی سطح ایستابی در آبخوان محدوده، نقشه‌ی هم‌تراز آب زیرزمینی به کمک داده‌های میانگین سطح آب گمانه‌ها و پیزومترها برای سال آبی ۸۷-۸۸ رسم شده است (شکل ۲). با توجه به این نقشه، بیشترین تراز آب زیرزمینی در نواحی شمال محدوده و کمترین آن در جنوب محدوده مشاهده می‌شود. به طور کلی با توجه به نقشه‌های تراز تهیه شده می‌توان استنباط نمود که جهت جریان آب‌های زیرزمینی در محدوده مسیر پروژه خط هفت تهران، از شمال-شمال شرق به سمت جنوب جنوب غرب می‌باشد.

چاه‌های پمپاژ نسبتاً زیادی در اطراف محدوده پروژه قرار دارد. اکثر این چاه‌ها جهت مصارف شرب مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. تراکم چاه‌ها در اطراف تونل نسبتاً بالا است (شکل ۳). با توجه به آنکه در اطراف هر چاه بهره‌برداری مخروط افت سطح آب زیرزمینی ایجاد می‌شود و سطح ایستابی به صورت محلی افت می‌کند، چاه‌های بهره‌برداری حائز اهمیت هستند. بنابراین اثر آن‌ها بر مدل، اعمال شده است.

دشت تهران از آبرفت‌های سازند هزاردره (بخش A، B، C و D) تشکیل شده است. آبرفت‌های قدیمی هزار دره (بخش A) با توجه به قدمت، جنس و فشرده شدن در اثر چین‌خوردگی‌ها، از تخلخل پائینی برخوردار است. این سازند به عنوان بخش وسیعی از سنگ کف آبخوان تهران عمل می‌کند. البته در بعضی مناطق به علت هوازدگی و گسله شدن، ممکن است در تشکیل آبخوان نقش داشته باشد. اما در مجموع نقش اساسی در تشکیل آبخوان را رسوبات جدیدتر آبرفتی (B، C و D) به عهده دارند که از تراکم کمتر و تخلخل و نفوذپذیری بالاتری برخوردارند (آقائباتی، ۱۳۸۵). آبخوان اصلی تهران به طور عمده از آبرفت‌های C و B با نفوذپذیری زیاد تا متوسط تشکیل شده است. در برخی از بخش‌های این آبخوان، آبرفت D قرار دارد که دارای دانه‌بندی درشت است و از تراوایی نسبتاً بالاتری برخوردار است. آبرفت تشکیل دهنده سطح مسیر طرح نیز از آبرفت‌های D تشکیل شده است. تغذیه اصلی آبخوان تهران-کرج از رودخانه‌ها و مسیل‌های ارتفاعات شمالی شامل رودخانه‌های کرج، کن، چیتگر، درکه، دارآباد، دربند، و حصارک صورت می‌گیرد. در آبخوان مورد مطالعه که یک آبخوان شهری است تغذیه از طریق برگشتی فاضلاب نیز صورت می‌گیرد. تأثیر



شکل ۲. نقشه میانگین تراز سطح ایستابی و جهت جریان آب زیرزمینی در سال آبی ۸۷-۸۸



شکل ۳. پراکندگی چاه‌های پمپاژ، گمانه‌ها و پیزومترها در محدوده مدل

۲. مواد و روش‌ها

مدارک مورد استفاده در این تحقیق شامل نقشه‌ی زمین شناسی منطقه (ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ تهران)، عکس‌های ماهواره‌ای لندست، سنجنده‌ی ETM^+ ، مختصات جغرافیایی پیزومترها، چاه‌های بهره‌برداری و گمانه‌های نزدیک به مسیر تونل، داده‌های سطح آب چاه‌های پیزومتری و گمانه‌ها، داده‌های چاه‌های بهره‌برداری (دبی پمپاژ، عمق حفاری، اسکرین‌گذاری)، نقشه‌ی سنگ‌کف آبخوان، کد MODFLOW و داده‌های هدایت هیدرولیکی به دست آمده از آزمایش لوفران در گمانه‌ها است.

۱-۲. برآورد میزان دبی آب زیرزمینی به تونل با استفاده از مدل‌سازی تفاضل محدود

در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار GMS7.0 (Brigham Young University, 2010) و کد مادفلو

۲. مواد و روش‌ها

مدارک مورد استفاده در این تحقیق شامل نقشه‌ی زمین شناسی منطقه (ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ تهران)، عکس‌های ماهواره‌ای لندست، سنجنده‌ی ETM^+ ، مختصات جغرافیایی پیزومترها، چاه‌های بهره‌برداری و گمانه‌های نزدیک به مسیر تونل، داده‌های سطح آب چاه‌های پیزومتری و گمانه‌ها، داده‌های چاه‌های بهره‌برداری (دبی پمپاژ، عمق حفاری، اسکرین‌گذاری)، نقشه‌ی سنگ‌کف آبخوان، کد MODFLOW و داده‌های هدایت هیدرولیکی به دست آمده از آزمایش لوفران در گمانه‌ها است.

جهت تخمین میزان دبی ورودی به تونل در این تحقیق از روش مدل‌سازی تفاضل محدود و روابط تحلیلی استفاده شده است.

۲. مواد و روش‌ها

مدارک مورد استفاده در این تحقیق شامل نقشه‌ی زمین شناسی منطقه (ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ تهران)، عکس‌های ماهواره‌ای لندست، سنجنده‌ی ETM^+ ، مختصات جغرافیایی پیزومترها، چاه‌های بهره‌برداری و گمانه‌های نزدیک به مسیر تونل، داده‌های سطح آب چاه‌های پیزومتری و گمانه‌ها، داده‌های چاه‌های بهره‌برداری (دبی پمپاژ، عمق حفاری، اسکرین‌گذاری)، نقشه‌ی سنگ‌کف آبخوان، کد MODFLOW و داده‌های هدایت هیدرولیکی به دست آمده از آزمایش لوفران در گمانه‌ها است.

جهت تخمین میزان دبی ورودی به تونل در این تحقیق از روش مدل‌سازی تفاضل محدود و روابط تحلیلی استفاده شده است.

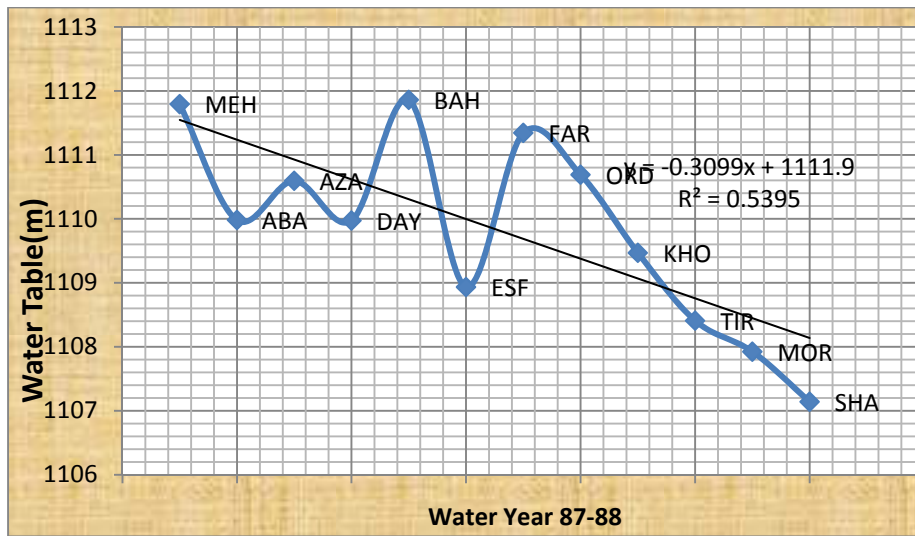
۲. مواد و روش‌ها

مدارک مورد استفاده در این تحقیق شامل نقشه‌ی زمین شناسی منطقه (ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ تهران)، عکس‌های ماهواره‌ای لندست، سنجنده‌ی ETM^+ ، مختصات جغرافیایی پیزومترها، چاه‌های بهره‌برداری و گمانه‌های نزدیک به مسیر تونل، داده‌های سطح آب چاه‌های پیزومتری و گمانه‌ها، داده‌های چاه‌های بهره‌برداری (دبی پمپاژ، عمق حفاری، اسکرین‌گذاری)، نقشه‌ی سنگ‌کف آبخوان، کد MODFLOW و داده‌های هدایت هیدرولیکی به دست آمده از آزمایش لوفران در گمانه‌ها است.

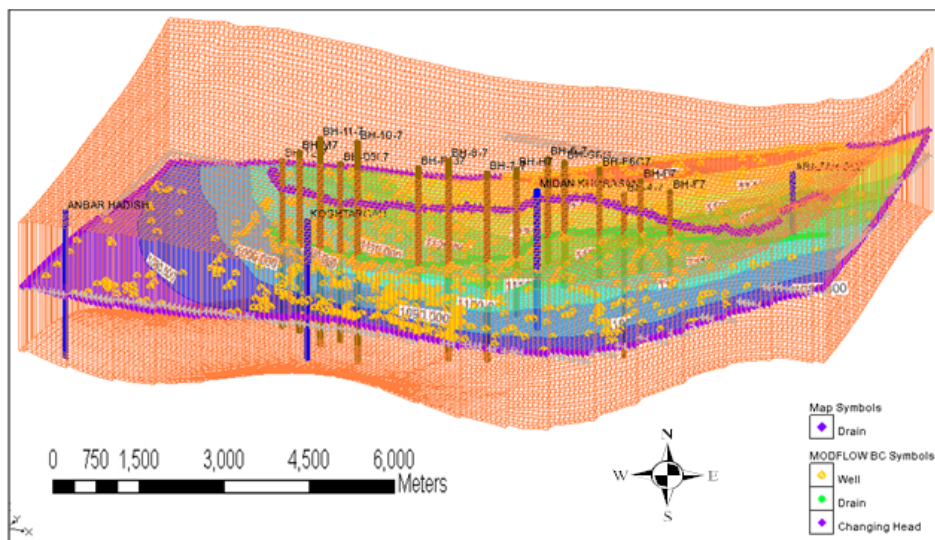
جهت تخمین میزان دبی ورودی به تونل در این تحقیق از روش مدل‌سازی تفاضل محدود و روابط تحلیلی استفاده شده است.

و ۹ چاه پیزومتری) و ۹۷۴ حلقه چاه بهره‌برداری در محدوده‌ی مدل قرار گرفته‌اند (شکل ۵).
محدوده مدل‌سازی بر اساس زمان و مکان گسسته شده است. گسسته‌سازی مکانی مسیر تونل، جهت مطالعه دقیق‌تر، با سلول‌هایی با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰ متر صورت گرفته است. بر اساس زمان، دوره مدل‌سازی (سال آبی ۸۷-۸۸) به چهار دوره تنش (Stress period) و چهار گام زمانی (Time step) تقسیم شده است.

قبیل هدایت هیدرولیکی، مرزهای مدل و اطلاعات دیگر مورد نیاز برای مدل‌سازی در سطح مدل مفهومی به نرم‌افزار وارد شد، سپس شبکه ایجاد و مدل مفهومی به مدل شبکه‌ای (Grid model) تبدیل شد. در مدل مفهومی محدوده مورد مطالعه، موقعیت چاه‌های بهره‌برداری، پیزومتری و محدوده‌ی تغذیه سطحی به مدل وارد شد. تعداد ۱۹ حلقه چاه مشاهده‌ای (۱۵ گمانه



شکل ۴. آبنمود معرف محدوده مورد مطالعه برای سال آبی ۸۷-۸۸



شکل ۵. مدل مفهومی محدوده مورد مطالعه

این مقادیر طی مرحله‌ی واسنجی تا رسیدن به خطای قابل قبول، مورد تصحیح قرار گرفته‌اند. مرزهایی که با بسته‌ی نرم‌افزاری CHD شبیه‌سازی شده‌اند، بار آبی در مرز را که از درون‌یابی سطح ایستابی اولیه حاصل شده است، در هر گام زمانی، به مدل اعمال نموده است.

بر اساس آن که مسیر تونل با بسته نرم‌افزاری زهکشی (Drain package) شبیه‌سازی شده است، میزان زهکشی در بیلان محاسباتی مدل به عنوان دبی ورودی به تونل در نظر گرفته شده است. با توجه به گسسته سازی مکانی و زمانی مدل، نتایج میزان دبی ورودی به تونل، بر اساس مکان و زمان در بیلان مدل ارائه می‌شود.

جهت مطالعه بهتر مسیر تونل، زون‌بندی مسیر تونل بر اساس تغییر خصوصیات مسیر (تغییرات سطح ایستابی، میزان پمپاژ و تراکم چاه‌ها و نفوذپذیری) صورت گرفته است (شکل ۷). میزان دبی ورودی به تونل برای زون‌ها و زمان‌های مختلف در بیلان محاسباتی مدل برای زون‌ها و زمان‌های مختلف نشان داده می‌شود. میزان دبی ورودی به تونل محاسبه شده توسط مدل در جدول ۱ نشان داده شده است.

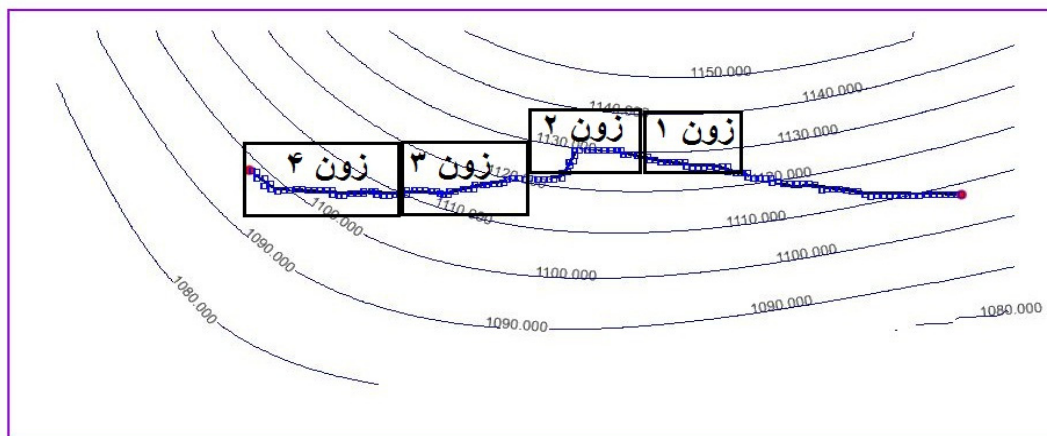
این تقسیم‌بندی بر اساس چهار فصل سال (بهار، تابستان، پاییز و زمستان) صورت گرفته است. با اعمال تنش‌های هر دوره (نظیر بارندگی، سطح آب پی‌زومترها، میزان پمپاژ چاه‌ها و میزان برگشتی فاضلاب) نتایج مدل بررسی شده است (شکل ۶).

Start	Length	Num Time Steps	Multiplier	Steady state
0.0	90.0	1	1.0	<input checked="" type="checkbox"/>
90.0	89.0	1	1.0	<input type="checkbox"/>
179.0	93.0	1	1.0	<input type="checkbox"/>
272.0	93.0	1	1.0	<input type="checkbox"/>
End	365.0			

شکل ۶. گام‌های زمانی تعریف شده در محدوده مدل سازی

در شبیه‌سازی دبی ورودی به تونل، سلول‌های مسیر تونل با Drain Package شبیه‌سازی شده است. اطلاعات ورودی به این Package ارتفاع کف تونل و میزان Conductance می‌باشد. میزان Conductance به جنس رسوبات کف تونل وابسته است.

مرزهای مدل در محدوده مورد مطالعه با استفاده از بسته‌های نرم‌افزاری Well و Time Variant Specified Head شبیه‌سازی شده است. مرزهای ورودی و خروجی آبخوان که با بسته‌ی نرم‌افزاری Well شبیه‌سازی شده، مقدار جریان، به هر سلول (m^3/d) وارد شده است که



شکل ۷. زون‌بندی قطعه شرقی - غربی مسیر خط هفت تونل مترو تهران

جدول ۱. میزان دبی ورودی به تونل با استفاده از مدل سازی تفاضل محدود

مشخصات مسیر تونل			دبی (لیتر بر ثانیه)				
زون	از مترائز	تا مترائز	طول(متر)	پاییز	زمستان	بهار	تابستان
۱	۴۳۰۰	۵۶۰۰	۱۳۰۰	۱۱۴	۱۱۵/۹	۱۲۱/۶	۸۶/۹
۲	۵۶۰۰	۷۰۰۰	۱۴۰۰	۱۶۴/۵	۱۶۷/۷	۱۶۸/۶	۱۴۸/۶
۳	۷۰۰۰	۹۰۰۰	۲۰۰۰	۸/۲	۹/۸	۱۲/۴	۸/۳
۴	۹۰۰۰	۱۲۲۰۰	۳۲۰۰	۱۲/۳	۱۳/۸	۱۶/۴	۱۱/۷
کل			۷۹۰۰	۲۹۹	۳۰۷/۲	۳۱۹	۲۵۵/۵

$$Q = \frac{2\pi KH_0}{\ln\left(\frac{2H_0}{r} - 1\right)} \quad (1)$$

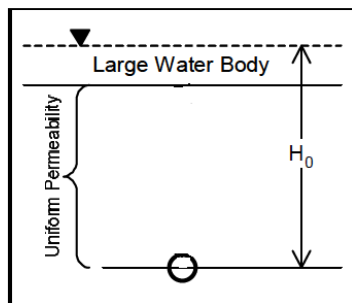
H_0 : فاصله مرکز تونل تا سطح ایستابی (m)

r : شعاع تونل (m)

K : نفوذپذیری معادل در امتداد تونل (m/s)

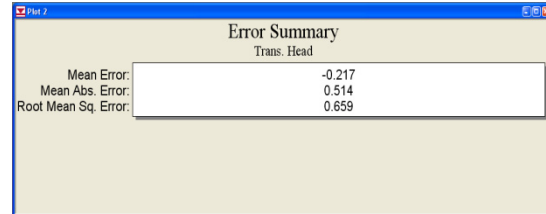
Q میزان دبی ورودی در واحد طول تونل ($m^3/sec/m$)

نفوذپذیری معادل، مهم ترین پارامتر مؤثر بر دبی ورودی است که تخمین آن بایستی با دقت کافی انجام شود. مقدار H_0 می تواند متغیر باشد. حالت حداکثر، اختلاف میان مرکز تونل و بالاترین سطح ایستابی اطراف تونل است. حالت حداقل، برابر با اختلاف میان تراز پایین سطح ایستابی و مرکز تونل است. شکل ۱۰ مدل گودمن را برای تونل های موجود در زیر سطح ایستابی نشان می دهد.

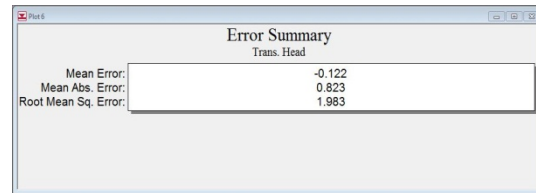


شکل ۱۰. مدل گودمن (Goodman et al., 1965)

صحت سنجی مدل برای سال ۸۸-۸۹ انجام شده است. میزان خطا در مرحله صحت سنجی مدل نسبت به دوره شبیه سازی (۸۷-۸۸) افزایش یافته ولی نتایج آن تایید کننده واسنجی مدل جریان است (شکل های ۸ و ۹).



شکل ۸. نتایج واسنجی مدل در دوره شبیه سازی



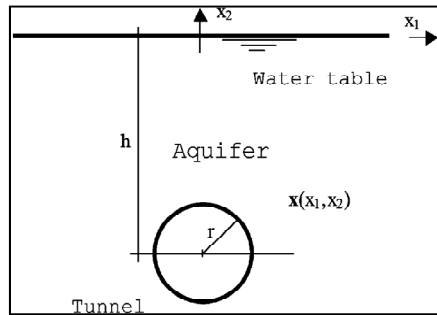
شکل ۹. نتایج واسنجی مدل در دوره صحت سنجی

۲-۲. تخمین دبی ورودی آب زیرزمینی به تونل با استفاده از روش های تحلیلی

روش های تحلیلی متعددی برای تخمین میزان آب ورودی به تونل مطرح است. در این مقاله از چندین روش استفاده شده است که در ذیل به شرح آنها پرداخته می شود.

معادله گودمن

گودمن و همکاران (Goodman et al., 1965) برای تونل هایی که زیر سطح ایستابی قرار دارند، رابطه ۱ را ارائه نموده اند.



شکل ۱۱. تونل حلقوی در یک آبخوان نیمه محبوس با سطح ایستابی افقی (Eltani, 1999)

اصلاح فریز و چری بر معادله گودمن

محققانی که از معادله گودمن برای تخمین میزان دبی ورودی به درون تونل‌ها استفاده کرده‌اند، معمولاً گزارش می‌دهند که مقدار دبی واقعی آب ورودی به درون تونل معمولاً با آنچه از طریق رابطه گودمن به دست می‌آید، متفاوت است. فریز و چری (Freeze and Cherry, 1979) با مطالعه بر روی میزان دبی ورودی به تونل‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که میزان دبی واقعی آب در حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد با آنچه از رابطه گودمن به دست می‌آید، متفاوت است. آن‌ها رابطه گودمن را به صورت زیر تصحیح کردند:

$$Q = 2\pi K \left(\frac{H}{2.3 \log\left(\frac{2H}{r}\right)} \right) \quad (4)$$

H: فاصله مرکز تونل تا سطح ایستابی (m)

K: نفوذپذیری معادل در امتداد طول تونل (m/s)

Q: میزان دبی ورودی در واحد طول تونل (m³/s/m)

r: شعاع تونل (m)

در واقع در این حالت سطح ایستابی به عنوان یک منبع تغذیه بی‌نهایت مدل‌سازی شده و تخمینی که از این رابطه به دست می‌آید پایین‌تر از تخمین مدل گودمن

معادله لی

لی (Lei, 1991) رابطه ۲ را برای محاسبه میزان دبی آب ورودی به درون تونل‌ها برای جریان پایدار درازمدت ارائه کرد:

$$Q = \left(\frac{2\pi K H_0}{\ln\left(\frac{H_0}{r} + \sqrt{\left(\frac{H_0}{r}\right)^2 - 1}\right)} \right) \quad (2)$$

Q: دبی ورودی به داخل تونل در واحد طول

(m³/sec/m)

r: شعاع تونل (m)

K: نفوذپذیری معادل در امتداد تونل (m/s)

H₀: فاصله مرکز تونل تا سطح ایستابی (m)

معادله التانی

التانی (Eltani, 1999) رابطه‌ای را برای تخمین دبی آب ورودی به تونل‌های حفر شده پیشنهاد نموده است (رابطه ۳). این رابطه عمدتاً برای تونل‌های بدون پوشش داخلی به کار برده می‌شود. فرضیاتی که در این رابطه در نظر گرفته می‌شوند عبارتند از:

جریان به صورت دو بعدی و مقطع تونل به صورت دایره‌ای، محیط خاک یا سنگ به صورت ایزوتروپ و هموژن است و افت سطح ایستابی در اطراف تونل رخ نمی‌دهد و مقطع تونل نیز زیر سطح ایستابی قرار دارد.

$$Q = 2\pi kh \left(\frac{1 - 3\left(\frac{r}{2h}\right)^2}{\left(1 - \left(\frac{r}{2h}\right)^2\right) \ln \frac{2h}{r} - \left(\frac{r}{2h}\right)^2} \right) \quad (3)$$

h: فاصله محور تونل تا سطح ایستابی (m)

K: نفوذپذیری معادل توده سنگ اطراف تونل (m/s)

Q: میزان دبی ورودی در واحد طول تونل (m³/sec/m)

r: شعاع تونل (m)

شکل ۱۱ نشان دهنده پارامترهای استفاده شده در رابطه

۳ است.

۲- وجود چاه‌های پمپاژ با میزان برداشت خیلی کم و همچنین تراکم کم چاه‌های پمپاژ در زون‌های ۱ و ۲
 ۳- نزدیک بودن مسیر تونل در این دو زون به محل ورودی محدوده که گواهی بر میزان نفوذپذیری زیاد و میزان تغذیه (ورودی زیرزمینی) بیشتر می‌باشد.
 علت پایین بودن میزان دبی ورودی در زون‌های ۳ و ۴ را می‌توان به پایین بودن تراز آب زیرزمینی، وجود چاه‌های با برداشت زیاد (چاه‌های شرب با دبی برداشت بسیار بالا) و همچنین تراکم زیاد چاه‌ها در این دو زون و میزان نفوذپذیری بسیار کم (نزدیک به خروجی دشت تهران) اشاره کرد.

است، چون معادله به صورت لگاریتمی مورد بررسی قرار می‌گیرد.
 با استفاده از روش‌های ذکر شده مقدار دبی ورودی به تونل قطعه شرقی- غربی خط هفت مترو تهران محاسبه شده است (جدول ۲).
 در شکل ۱۲ مقادیر دبی ورودی به دست آمده از روش‌های مدل‌سازی و تحلیلی با هم مقایسه شده است. با توجه به نتایج در هر دو روش تحلیلی و مدل‌سازی بیشترین میزان آب ورودی به تونل در زون‌های ۱ و ۲ مسیر تونل دیده شده است که دلایل مختلفی می‌توان برای آن ذکر کرد:

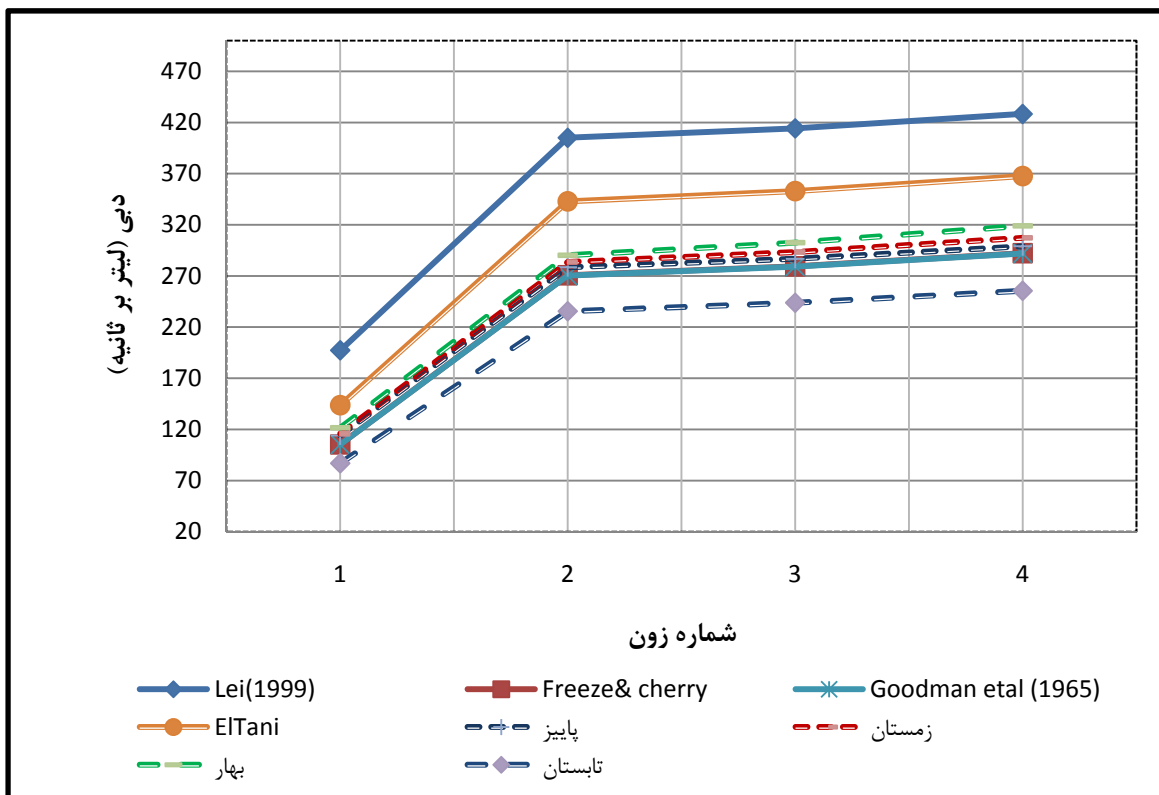
۱- بالا بودن سطح آب زیرزمینی در زون‌های ۱ و ۲

جدول ۲. میزان دبی ورودی به تونل برای زون‌های مختلف مسیر تونل با استفاده از روش‌های تحلیلی

زون	از زون	تا زون	طول (متر)	سطح ایستابی (متر)	نفوذپذیری (متر بر ثانیه)	شعاع تونل (متر)	Lei (1999)		Freeze & Cherry 1979		Goodman et al (1965)		El Tani (1999)	
							q(l/s/m)	q(l/s)	q(l/s/m)	q(l/s)	q(l/s/m)	q(l/s)	q(l/s/m)	q(l/s)
1	4300	5600	1300	5	0.000002	4.6	0.152	197.210	0.081	105.300	0.081	105.170	0.110	143.7
2	5600	7000	1400	6	0.000003	4.6	0.148	207.880	0.118	165.340	0.118	165.200	0.142	199.2
3	7000	9000	2000	11	1E-07	4.6	0.005	9.200	0.004	8.800	0.004	8.800	0.005	10
4	9000	12200	3200	8	1E-07	4.6	0.004	14.080	0.004	12.800	0.004	12.800	0.005	14.72
Total			7900					428.37		292.24		291.97		367.6

۳. نتیجه‌گیری
 با توجه به نتایج، میزان دبی آب ورودی به تونل با زمان تغییر می‌کند که بستگی به میزان بارش و پمپاژ چاه‌ها در طی فصل‌های مختلف دارد. در فصل تابستان بیشترین پمپاژ و کمترین بارش صورت می‌گیرد. در نتیجه میزان دبی ورودی نیز نسبت به دیگر فصول کمتر است. به همین ترتیب برای دیگر فصول، میزان دبی ورودی تغییر می‌کند. نتایج روش‌های تحلیلی به نتایج مدل نزدیک است و این مطلب احتمال صحت نتایج را بیشتر می‌کند. البته جهت ارزیابی بهتر نتایج، پیشنهاد می‌شود دبی آب ورودی به تونل در حین حفاری اندازه‌گیری شود.

به طور کلی عوامل مؤثر بر میزان دبی آب ورودی به تونل، که در مدل نیز لحاظ شده است عبارتند از: ۱- بار آبی روی محور تونل در طول مسیر که از سطح آب گمانه‌های مسیر تونل و پیژومترهای موجود در محدوده استفاده شده است. ۲- میزان پمپاژ و تراکم چاه‌های پمپاژ ۳- میزان فاضلاب ۴- میزان بارش ۵- نفوذپذیری آبرفت‌های مسیر که از آزمایش لوفران در گمانه‌های مسیر تونل به دست آمده است.



شکل ۱۲. مقایسه میزان دبی ورودی به تونل در روش مدل‌سازی و روابط تحلیلی

منابع

- آقاباتی، س.ع. ۱۳۸۵. زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- ناصری، ح. ر. اسدیان، ف.، ۱۳۸۱. شبیه‌سازی هیدرولیک قنات. مجله علوم زمین، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، شماره‌های ۸ و ۹.
- شرکت مهندسی مشاور ساحل. ۱۳۸۸. مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک، مسیر مترو خط هفت تهران.
- Bonomi, T., Bellini, R., 2003. The tunnel impact on the groundwater level in an urban area: A modeling approach. *J. of Material and Geoenvironment*, 50(1): 45-48.
- Brigham Young University, 2010. GMS7.0 Tutorials. Environmental Modeling Research Laboratory.
- Dunning, C.P., Feinstein, D.T., Hunt, R.J., Krohelski, J.T., 2004. Simulation of ground-water flow, surface-water flow, and a deep sewer tunnel system in the Menomonee valley, Milwaukee, Wisconsin", Scientific Investigations Report, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, No. 5031.
- Eltani, M, 1999. Circular tunnel in a semi-infinite aquifer, *Tunneling and Underground Space Technology*, 18: 49-55.

- Yang, F.R., Lee, C.H., Kung, W.J., Yeh, H.F., 2009. The impact of tunneling construction on the hydrogeological environment of Tseng-Wen Reservoir Transbasin Diversion Project" in Taiwan, *Engineering Geology*, 101: 39-58.
- Freeze, R.A., Cherry, J. A., 1979. *Ground Water*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Goodman, R.E., Moye, D.G., Van schalkwyk, A., Javandel, I., 1965. Ground water inflows during tunnel driving, *Engineering Geology*, 1(1): 39-56.
- Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., Xu, S., 2008. *Mechanized Tunneling in Urban Areas*. Taylor & Francis Publication.
- Kim, S., Hyun, Y., and Lee, K., 2005. Time series modeling for evaluation of groundwater discharge rates into an urban subway system, *Geoscience Journal*, 9(1): 15-22.
- Lei, S., 1999. An analytical solution for steady flow into a tunnel. *Ground Water*, 37: pp. 23-26.
- Loney, B., 2001. Simulation Of De Watering During Construction Of A Bedrock Tunnel, Nepean, Ontario", A Thesis of M.Sc. in Earth Sciences, University of Ottawa, Canada.
- Rooney, O. T., 2002. Hydrogeological, Three Dimensional, Numerical Flow Modelling Of The Dublin Port Tunnel And Region. A Thesis of M.Sc. in Geosciences, Department of Geosciences, The Pennsylvania State University.
- Zaidel, J., Markham, B., Bleiker, D., 2009, Simulating seepage into mine shafts and tunnels with MODFLOW. *Ground Water*, 48: 390-400