پژوهشی

مدل‌سازی نوسانات سطح آب زیرزمینی در محدوده‌ی مرکزی طرح متروی اصفهان

(دریافت ۸۱/۱۰/۲۲ پذیرش ۸۲/۵/۲۳)

همایون کتیبه* علی طاهری** اکبرابوطالبی میرصالح***

چکیده

در این مطالعه، به بررسی ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی آبخوان آزاد شهر اصفهان و تأثیر عملیات احداث تونل متروی این شهر بر رژیم آب زیرزمینی پرداخته شده است. با توجه به این که سطح آب زیرزمینی اصفهان به دلیل تغذیه زاینده رود نسبتاً بالا بوده و ساخت و سازهای زیرزمینی می‌توانند بر سطح آب زیرزمینی اثرگذاشته و مشکلاتی چون بالا آمدن سطح آب زیرزمینی ومستغرق شدن تأسیسات شهری، ویا بالعکس پایین رفتن سطح آب زیرزمینی و نشست تأسیسات شهری را به دنبال داشته باشند، لذا می‌بایست قبل از احداث تونل مترو، اطلاعات زیرسطحی از قبیل زمین‌شناسی،خواص ژئوتکنیکی و هیدرودینامیکی آبخوان به طور کامل مورد تجزیه وتحلیل قرار گیرند.

در این تحقیق ابتدا آمار سطح آب پیزومترهای موجود طی یک دوره ٤/٥ ساله (١٣٨٠- ١٣٧٦)، و نتایج تست پمپاژ، توپوگرافی سطح شهر و اطلاعات مربوط به ضخامت و جنس لایه‌ها تهیه شدند. سپس کلیه اطلاعات در سیستم‌های(AUTOCAD (2002, GIS(Idrisi 2), WINSURFER(7.1) پردازش شده و آن گاه در مدل ریاضی سه بعدی با روش تفاضل محدود به کمک نرم افزار PMwin (نسخه 5.1) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. از آنجا که مدل در واسنجی از دقت مناسب (٩٤ درصد) برخوردار بوده، انتظار می‌رود که نتایج به دست آمده به واقعیت نزدیک باشند.

در این تحقیق، ابتدا پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان که به وسیله تعداد محدودی آزمایش پمپاژ تهیه شده به کمک شبیه‌سازی در حالت پایدار تصحیح و تعدیل گردیده و سپس نتایج حاصله در مرحله بعد در شبیه‌سازی آبخوان در حالت ناپایدار به کار گرفته شدندتا نوسان سطح ایستابی آب زیرزمینی در طی زمان و تحت تأثیر عملیات احداث تونل و دیواره نفوذ ناپذیر دو سمت آن (در محدوده رودخانه زاینده رود) پیش‌بینی گردد.

مطالعات نشان می‌دهند که احداث دو تونل به قطر ٦ متر به موازات یکدیگر (گزینه اول) و یا احداث تنها یک تونل به قطر ٩ متر (گزینه دوم) تأثیر به سزایی بر نوسان سطح ایستابی آب زیرزمینی نخواهند داشت. هم‌چنین شبیه‌سازی آبخوان در طی احداث مترو آشکار می‌سازد که ایجاد مدخل عبور آب مابین دو دیواره نفوذ ناپذیر دو سمت تونل مترو در محدوده زاینده‌رود، موجب کاهش قابل ملاحظه‌ای در نوسان سطح ایستابی دو سمت دیواره‌ها شده و از خطرات احتمالی در نشست زمین ویا غرقاب شدن آن می کاهد.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی آب زیرزمینی، روش تفاضل محدود، طرح متروی اصفهان.

Modeling of Groundwater Fluctuations in the Central Area of Isfahan Metro Project

Katibeh, H., (Ph.D), Taheri, A., (MSc.)
Aboutalebi, A., (MSc. Student),
Mining Dept. , Amir Kabir University

Abstract

In this paper, the hydrogeological characteristics of Isfahan unconfined aquifer have been studied. The effect of metro tunnelling operations on groundwater regime also has been investigated. Since, due to recharge from Zayandehroud river, the water level in Isfahan aquifer is high and tunnelling operations can rise this water level more, so the probable effects of groundwater fluctuations had to be investigated.

* استادیار دانشکده معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
** استاد مدعو، دانشکده معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
*** دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

In this study, the data due to water level in piezometers during 4.5-year period (1376 – 1380) and pumping test results, along with characteristics of aquifer and topography of the area have been collected. All the above mentioned data were processed in GIS(Idrisi 2), WINSURFER(7.1), AUTOCAD2002, and the obtained data was fed into 3D PMwin (5.1) in order to model the aquifer behavior. Calibration of the model shows 95% accuracy when comparing the calculated water level from the model with observed water levels in piezometers.

In this study, the hydrodynamic parameters obtained from few pumping tests have been adjusted using steady state modeling and then obtained results were used in unsteady state modeling in order to calculate the effect of metro tunnelling operations on groundwater level. Studies show that in case of twins tunnelling (with 6 meter diameter for each tunnel), like the another case (means single tunneling with 9 meter diameter), there is no significant effect on groundwater level. Moreover, model indicates that construction of water passage between two unpermeable wall around the metro tunnel (near Zayandehroud river), results in considerable reduction in groundwater fluctuations.

مقدمه

از اواخر دهـه ۱۹۶۰ امکـان حـل معـادلات پیچیـده بـا روش‌های عددی به وسیله کامپیوتر فراهم شد و بـه دنبـال آن مدل‌سازی کامپیوتری همراه با پیشـرفت کـامپیوتر رشـد فوق‌العاده ای پیدا کرد. امروزه نرم‌افزارهـای بسـیار قـوی و کاملاً تخصصی در اکثر زمینه‌هـای شـبیه سـازی از جملـه، شبیه‌سازی آبخوان یافت می‌شود که ابزار کـار مـدل‌سـازان محسـوب مـی‌شـوند. از میـان ایـن نـرم افزارهـا، نـرم‌افـزار PMwin از جایگـاه خاصـی نـزد مـدل‌سـازان برخوردار است. ایـن نـرم‌افـزار بـر اسـاس روش تفاضـل محدود استوار است.

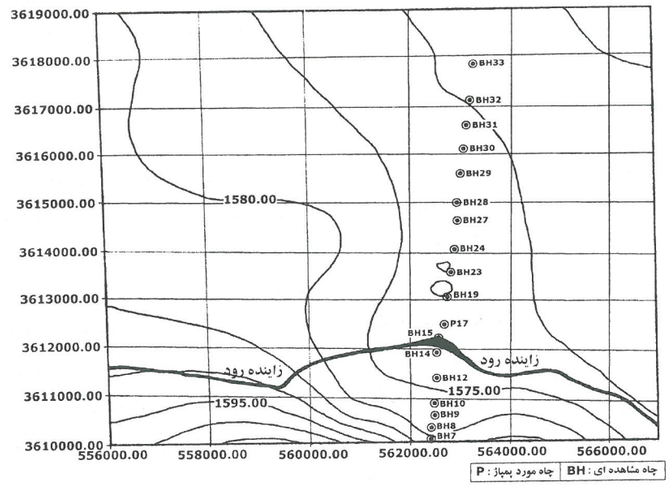
آنچه مسلم است این شاخه از علم نیز یک‌سری مراحل تکاملی را طی کرده است. درحقیقت دانـش کـاربرد روش مدل‌سازی برای حل مسـائل آب‌هـای زیرزمینـی، طـی ۳۰ سال اخیر و همزمان با پیشرفت کامپیوترها تکمیـل شـده و از یک مقوله صرفاً تحقیقـاتی وارد مرحلـه کـاربردی شـده است.

محدوده مورد مطالعه

دشـت اصـفهان بـین طـول هـای جغرافیـایی ۵۱,۳۰ و ۵۱,۵۰ شرقی و عرض‌های ۳۵ ,۳۲ و۴۵ ,۳۲ شـمالی واقـع گردیده است. این دشت، از جنوب به ارتفاعات کوه صـفه با بلندی ۲۲۳۲ متر از سطح دریا واز سمت غـرب وشـمال به ترتیب به دشت‌هـای نجـف آبـاد وبرخـوار و از سـمت شرق به ارتفاعات دیوسلام وگورت با ارتفاع ۲۰۲۱ محدود می‌شود. دشت مذکور، از زیر حوزه‌های باتلاق گـاوخونی می‌باشد. آبخوان مورد مطالعه از نـوع آزاد بـوده و قسـمت مرکزی شهر اصفهان به وسـعت ۹۹ کیلومترمربـع را در بـر می‌گیرد. این محدوده از شمال به منطقه خانـه اصـفهان، از جنوب به خیابان شریعتی، از غرب به منارجنبان و از شـرق به ترمینال جی محدود می‌شود.

از نظر توپوگرافی (شکل۱)، منطقه مورد مطالعـه بـه دو ناحیه شمال وجنوب رودخانه زاینده رود تقسیم می‌گـردد. قسمت جنـوبی از دامنـه ارتفاعـات کـوه صـفه بـا ارتفـاع ۱۶۰۰متر از سطح دریا شروع شده ودر ساحل زاینـده رود به ارتفاع حدودا ۱۵۷۰ متر می‌رسد. شیب منطقه در قسمت جنوبی زاینده رود درحدود ۲۰در هزار (از جنوب به سمت شـمال) و در قسـمت شـمالی زاینـده رود در حـدود ۵ در هزار (از جنوب به سمت شمال) می‌باشد. هم‌چنـین شـیب عمومی منطقه از غرب به سمت شـرق حـدودا برابـر ۲ در هزار می باشد.

دشت آبرفتی شهر اصفهان به دلیل تغذیه طبیعی، توسط زاینده‌رود دارای سطح آب زیرزمینی بالایی می‌باشد. هدف از این تحقیق، شبیه‌سازی بخشی از آبخوان شهر اصفهان، تعیین دقیق پارامترهای هیدرودینامیکی آن، پیش بینی و مقایسه نوسانات سطح آب زیرزمینی، قبل وبعد از احداث تونل، به منظور بررسی تأثیر این تغییرات بر سازه‌های شهری می‌باشد.



شکل ۱- نقشه توپوگرافی محدوده‌ی مورد مطالعه و موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای و پمپاژ شده

مدل‌سازی آب زیر زمینی

در انجام هر تحقیق، وجود اطلاعات اولیه صحیح و کافی امری ضروری می‌باشد. مدل‌سازی نیز از این امر مستثنی نبوده و به منظور شروع کار وجود داده های پایه ضروری است. برای تهیهٔ اطلاعات مورد نیاز مدل‌سازی آب زیرزمینی، لازم است که از خواص فیزیکی و پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان اطلاعات نسبتاً صحیح و کافـی داشته باشیم. در واقع هـر چه اطلاعات کامـل‌تر و دقیق‌تر باشد، مدل‌سازی نیز به واقعیت نزدیک‌تر بوده و به نتایج آن بیشتر می‌توان اعتماد کرد.

مشخصـات فیزیکـی آبخـوان، ـ مـوارد متعـددی مانند:موقعیت، گستردگی مکانی، ضـ ـ لایه‌هـا، شـرایط مرزی، توپوگرافی منطقه، عوامل زمیـ ـ ـی و تکتـونیکی، آب‌های سطحی (دریاچه ها ، رودخـ ـ ـا ، نهرهـا و....)، موقعیت سیستم‌های زهکشی و چاه‌ها بـوده و پارامترهـای هیـدرودینامیکی آبخـوان شـامل ضـریب انتقـال، ضـریب نفوذپذیری، تخلخل و ضریب ذخیره مـی‌باشـد. هـم‌چنـین عواملی نظیر ارتباط هیـدرودینامیکی بـین آب زیرزمینـی و آب سطحی، آبدهی ویژه، میزان تغذیـهٔ مصـنوعی و میـزان تخلیهٔ آبخوان نیز از طریـق چـاه‌هـا در مـدل مـدنظر قـرار می‌گیرد.

در مـدل‌سازی، به منظور در نظر گرفتن تنش‌های وارده بر یک سیستم جریان آب زیرزمینی، می‌بایسـتی اطلاعـات کافی از موقعیت، نوع و زمان هر نوع تغذیـهٔ طبیعـی ماننـد نفوذ مستقیم باران از سطح زمین و یا نفوذ از طریـق بسـتر رودخانه‌ها و نیز مسیل‌ها، و تغذیه مصـنوعی ماننـد تغذیـه ناشی از پخش سیلاب، حوضـچه‌هـای تغذیه، چاه هـا یـا جریان برگشتی از آبیاری را داشت. هم‌چنین می‌بایسـت از مقدار و زمان افت آب زیرزمینی در چاه‌های بهـره بـرداری یا مشاهده‌ای، تغییر در مقدار جریان آب نهرهـا و تغییـرات سطح آب در اجزای آب سطحی اطلاع داشت.

به طور کلی اطلاعات و آمار آبخوان‌ها را می‌توان به دو دسته تقسیم نمود. دستهٔ اول اطلاعات و آماری هسـتند کـه شناسـایی آن‌هـا مشـکل اسـت، امـا دسـتهٔ دوم اطلاعـاتی می‌باشند که شناسایی کامل آن‌ها نسبتاً آسـان مـی‌باشـد. بـا توجه به این که اطلاعات دقیق دستهٔ اول موجـود نیسـت، تصحیح مدل در دو مرحله صورت می‌گیرد که مرحلـهٔ اول آن کالیبره کردن مدل در حالت پایدار است. در این مرحلـه براساس روش آزمون و خطا مقادیر تخلخل و نیز ضـرایب هیدرودینامیکی و مشخصات زهکش یا تغذیه کننده اصـلی دشت به گونه‌ای تغییر داده می‌شود تـا ایـن کـه سـطح آب محاسبه شده به کمک مدل، با سطح آب واقعی اندازه‌گیری شده در پیزومترها، انطباق لازم را بیابـد. حسـن ایـن روش

این است که، ضرایب هیدرودینامیکی که از تعداد محدودی آزمایش پمپاژ به دست می آیند، به تمامی قسمت‌های آبخوان تعمیم داده می‌شوند. این امر باعث خواهد شد که تصحیح مدل در حالت ناپایدار مطمئن‌تر و دقیق‌تر انجام گیرد.

مرحلهٔ دوم، شبیه‌سازی حالت ناپایدار می باشد. از آنجا که ضریب ذخیره سفره در حالت پایدار به کار برده نمی‌شود، لذا تطبیق این ضریب بایستی در تأیید مدل برای حالت ناپایدار انجام شود. در حالت ناپایدار برای هر دوره، میزان تخلیه و تغذیه متفاوتی اختصاص داده می‌شود و پس از کالیبره کردن در حالت ناپایدار، برای اطمینان از این که کالیبراسیون در حالت پایدار هنوز به قوت خود باقیست، مدل در حالت پایدار بار دیگر حل و نتایج آن کنترل می‌شود.

بایستی توجه داشت که هیچ یک از مدل‌های عددی به شکل خارق العاده‌ای کاربرانشان را از مسئولیتی که برای مطالعهٔ دقیق آب زیر زمینی بر عهده دارند، رها نخواهد کرد و می‌بایست کاربر درگردآوری اطلاعات وپردازش اطلاعات و کالیبراسیون مدل در حالت پایدار و ناپایدار دقت و درک صحیحی داشته باشد.

اطلاعات مورد نیاز برای مدل عددی PMwin به طور خلاصه عبارتند از:

۱- اطلاعات مربوط به تقسیم بندی زمانی
۲- توپوگرافی سطح زمین و سنگ کف آبخوان
۳- تعیین شبکه بندی آبخوان ولایه های مختلف آن
٤- تعریف شرایط مرزی آبخوان
۵- اطلاعات مربوط به پارامترهای هیدرودینامیکی مشخص
٦- تخمین پارامترهای هیدرودینامیکی نامشخص
۷- تعیین ضرایب تغذیه و تخلیه شبکه در هر یک از دوره‌های زمانی.

تقسیم زمان به دوره‌های زمانی در مدل

در مدل Pmwin، از روش عددی تفاضل محدود استفاده می‌شود. چنانچه می‌دانیم در طرف راست معادلهٔ دیفرانسیل جریان آب‌های زیر زمینی در حالت ناپایدار، پارامتر $\frac{\partial h}{\partial t}$ قرار دارد که محاسبات مربوطه به کمک رابطهٔ زیر صورت می‌گیرد:

$$\frac{\partial h}{\partial t} \approx \frac{h(t_2) - h(t_1)}{\Delta t}$$

که در آن :

$h(t_1)$: ارتفاع آب در زمان t_1 ،

$h(t_2)$: ارتفاع آب در زمان t_2 ،

Δt : اختلاف t_1 و t_2 می باشد.

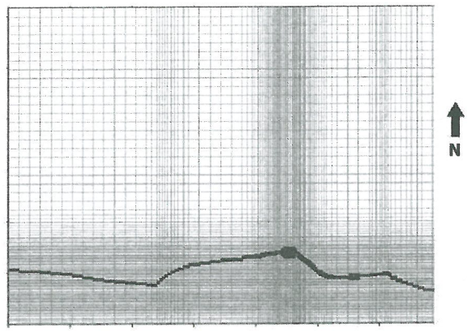
در نتیجه برای محاسبات بالا لازم است زمان مورد مطالعه (t) را به اجزاء کوچک‌تر تقسیم کرد. .هرچه Δt کوچک‌تر باشد، دقت محاسبات بیشتر می‌شود. اما باید در نظر داشت که هر قدر Δt کوچک‌تر باشد ، حجم محاسبات زیادتر خواهد شد. در شبیه سازی آب زیر زمینی به این جزء زمانی دورهٔ تنش[1] گفته می‌شود و معمولاً بین ۳ تا ۱۲ ماه در نظر گرفته می‌شود . هر دوره تنش شامل یک یا چند گام زمانی[2] می‌باشد.

آمار برداری و اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی شهر اصفهان در مسیر احداث خط مترو، از سپتامبر ۱۹۹۷ شروع شد و تاکنون به صورت ماهیانه اندازه‌گیری می‌شود. در این مدل کل مدت زمان مورد مطالعه به ٥٤ دوره تنش تقسیم شده که هر دوره شامل یک گام زمانی به طول یک ماه می‌باشد.

شبکه بندی آبخوان شهر اصفهان

چنانچه می‌دانیم برای حل معادلات دیفرانسیل جریان آب زیرزمینی، در روش تفاضل محدود، لازم است پس از مشخص کردن محدودهٔ آبخوان ، آن را به صورت سلول‌های مستطیلی و مربعی تقسیم بندی کرد . این سلول‌ها توسط خطوط موازی با محورهای x , y تنظیم می‌شوند که اندازهٔ سلول‌ها بر اساس دقت و اهمیت، ممکن است در مناطق مختلف به صورت متفاوت انتخاب شود. هر کدام از شبکه‌ها یک واحد مجرد را تشکیل داده که معرف آن واحد نقطه‌ای مرکزی به نام گره می باشد (در شبکه مرکز بلوک). در محاسبات ، تغذیه ، تخلیه و ارتفاع سطح ایستابی و... برای همان گره در نظر گرفته می شود.

[1] Stress Period
[2] Time Step



شکل ۲- شبکه بندی محدوده مورد مطالعه

با توجه به اهمیت محاسبات، ابعاد سلول‌ها در مسیر مترو و در حاشیه زاینده رود کوچک‌تر از بقیه سفره در نظر گرفته شدند. سلول‌ها به صورت مربع و مستطیل با اضلاع متغیر بین ۲۵ الی ۲۵۰ متر بوده که حاصل آن ۱۱۳ سلول در راستای x (شرقی- غربی) و ۱۲٤ سلول در راستای y (شمالی- جنوبی) است به عبارتی ۱۱۳ ستون و ۱۲٤ سطر. در شکل ۲ شبکه بندی محدوده مورد مطالعه در مدل PMwin دیده می‌شود. سلول‌های کوچک‌تر در این شکل دقیقاً در مسیر احداث تونل مترو واقع شده‌اند.

شرایط مرزی

همان طور که قبلاً گفته شد، این مطالعه در راستای مطالعات جامع طرح مترو اصفهان می‌باشد. این طرح در مسیر ترمینال کاوه به سمت دروازه شیراز با امتداد تقریباً شمالی – جنوبی اجرا خواهد شد. با توجه به این که دشت اصفهان، دارای وسعت زیادی است و در نزدیکی محدودهٔ اجرای طرح، مرز فیزیکی وجود ندارد، شبکه‌ای در قسمت شهری دشت اصفهان به صورت مستطیل با طول ۱۱ کیلومتر در امتداد شرقی ـ غربی و عرض ۹ کیلومتر در امتداد شمالی ـ جنوبی تعریف گردید. مرزهای این شبکه همگی به صورت هیدروژئولوژیکی در نظر گرفته شده اند به طوری که مرز شمالی با توجه به اطلاعات موجود، به صورت هد ثابت و زاینده رود به عنوان زون تغذیه و تخلیه و بقیه با هد متغیر می باشند.

فرض هد ثابت برای مرز شمالی، از نظر هیدروژئولوژیکی دقیق نبوده ولی با توجه به فاصله زیاد آن از محل اجرای طرح، این مرز خارج از شعاع تاثیر کارهای خشک اندازی مسیر طرح مترو فرض شده ودر عمل مشکلی در مدل‌سازی ایجاد نمی نماید.

اطلاعات ورودی به مدل

قبل از مدل‌سازی می‌بایست اطلاعات مورد نظر را به گونه‌ای گردآوری و پردازش کرد که بتوان در نرم‌افزار PMwin استفاده کرد.

توپوگرافی سطح زمین

واحد معماری و شهرسازی اصفهان، از کل سطح شهر، نقاط ارتفاعی به طور دقیق تهیه کرده است. بنابراین از این نقاط به منظور رسم توپوگرافی بوسیله نرم افزار WINSURFER(7.1) استفاده شد.

توپوگرافی سنگ کف آبخوان

در مطالعاتی که در مورد زمین‌شناسی شهر اصفهان انجام گردید، با استفاده از چاه‌ها و ترانشه‌های اکتشافی، جنس، تعداد و ضخامت لایه‌ها مشخص شده و با استفاده از آن‌ها، نقشه‌ای تهیه گردید که در آن ضخامت و جنس لایه‌ها مشخص می‌باشند. بنابراین ابتدا ضخامت لایه ها در نقاط مختلف شهر به صورت شبکهٔ منظم مشخص شد و نقشه جدیدی به صورت یک سطح پیوسته از آن‌ها تهیه

گردید. در نهایت نقشهٔ هم ارتفاع سنگ کف با کم کردن ضخامت لایه آبرفتی از نقشه توپوگرافی سطح زمین، به دست آمد.

نقشهٔ ارتفاعی سطح ایستابی

در شهر اصفهان تعدادی پیزومتر در امتداد خیابان چهارباغ از شمال به سمت جنوب وجود دارد که آمار سطح ایستابی ۲۲ حلقه از آن‌ها، از شهریور ۱۳۷٦ به بعد، به صورت ماهیانه تهیه شده است. به دلیل این که این پیزومترها فقط در یک امتداد قرار دارند از آمار ۲۰ حلقه چاه بهره‌برداری که در سطح شهر پراکندگی یکنواختی دارند، استفاده شد، و به وسیله نرم افزار WINSURFER(7.1) نقشه ارتفاعی سطح ایستابی تهیه گردید. بدیهی است که سطح آب مربوط به چاه‌های بهره‌برداری در حالتی اندازه‌گیری می‌گردد که حداقل چند روزی از آخرین آبکشی از چاه گذشته باشد. خاطر نشان می‌سازد با توجه به این که آمار سطح ایستابی پیزومترها از سال ۱۳۷٦ به بعد در دست بوده، لذا مدل‌سازی نیز به همین دوره محدود گردیده است. توجه به این نکته ضروری است که در بعضی از ماه‌های سال ۱۳۷۸ و ۱۳۷۹، زاینده‌رود با خشکی مواجه شده است. در حالی که در بعضی سال‌های آماری دیگر، ممکن است سطح آب در زاینده‌رود بالاتر از حد نرمال باشد. البته در دوره‌ی زمانی مدل‌سازی، که در آن دوره اطلاعات سطح ایستابی پیزومترها به مدل اعمال گردیده‌اند، افزایش سطح آب در زاینده‌رود بیش از حد نرمال به وقوع پیوسته است. افزایش دوره آماربرداری از پیزومترها کمک می‌نماید که مدل‌سازی به دوره‌هایی که سطح آب رودخانه بیش از حد نرمال نیز باشد، تعمیم داده شود.

تعیین ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان

آبخوان ها با ضرایب مشخصی که به ضرایب هیدرودینامیکی معروف‌اند، توصیف می شوند. این ضرایب شامل ضریب نفوذ پذیری (K)، ضریب قابلیت انتقال (T)، تخلخل و ضریب ذخیره (S) می‌باشند. پیش بینی درست نوسانات سطح آب زیرزمینی در یک مدل قبل از هر چیز بستگی به آن دارد که تا چه حد پارامترهای هیدرودینامیکی یک آبخوان به طور دقیق برآورد شده باشند. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری ضرایب هیدرودینامیکی وجود دارد که مهمترین وکاربردی‌ترین آن‌ها در مطالعات آب زیرزمینی استفاده از آزمایش‌های پمپاژ است.

در محدودهٔ شهر اصفهان بعد از مطالعه و بررسی چاه‌های مختلف، ۵ چاه انتخاب شده و مورد آزمایش پمپاژ قرار گرفتند. قبل از انجام آزمایش، در هر منطقه هماهنگی لازم با مالکین چاه‌های مجاور که در حریم چاه مورد آزمایش قرار داشتند انجام شد، تا پمپاژ چاه‌های اطراف متوقف و از تاثیرگذاری آن‌ها بر تراز سطح آب اندازه‌گیری در طول آزمایش جلوگیری گردد . در نهایت ضرایب نفوذپذیری چاه و آبخوان براساس تجربیات قبلی و شواهد موجود برای لایه اول، حدود۶/۳ متر در روز و برای لایه دوم حدود ۱۹۸/۷ متر در روز محاسبه شده اند[۱].

کالیبراسیون مدل

کالیبراسیون مدل در حالت پایدار

چنانچه گفته شد، اولین مرحله، کالیبراسیون مدل در حالت پایدار می‌باشد. حالت پایدار معرف وضعیتی است که سیستم تغذیه و تخلیه آبخوان در حالت تعادل بوده وتغییر بار هیدرولیکی نسبت به زمان صفر باشد.

چون آمار دقیق سطح آب زیرزمینی فقط از سال‌های ۱۳۷٦ به بعد موجود می‌باشد، بنابراین آمار سطح ایستابی سال ۱۳۷٦ برای کالیبراسیون مدل در حالت پایدارانتخاب گردید.

در حالت پایدار، مقادیر پارامترهای ورودی شامل ضریب نفوذپذیری و میزان زهکشی سفره به وسیله رودخانه زاینده‌رود، محاسبه و تخمین زده شد و برای مدل تعریف گردید. سپس بر اساس روش سعی و خطا این مقادیر مرتبا تغییر داده شده و مدل اجرا شد تا تطبیق تاریخی برای سطح ایستابی به دست آمد. بدیهی است که دقت هر چه بالاتر مدل به دقت در تعیین پارامترهای ورودی و شرایط مرزی بستگی دارد و لذا بنا به امکانات موجود و اطلاعات و آمار در دسترس، سعی شده که با بالاترین دقت ممکنه پارامترهای ورودی و شرایط مرزی به مدل اعمال گردد.

با توجه به این که از نظر اقلیمی اصفهان جزو نواحی خشک و نیمه خشک کشور بوده و متوسط بارش سالانه از سال ۱۳۷۰ الی ۱۳۷٦، ۱۲٤ میلی‌متر و حداکثر بارش

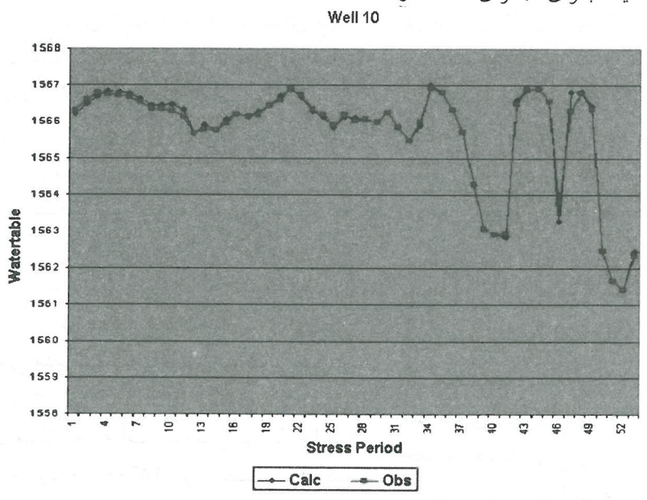
ماهیانه ۲۰ میلی‌متر است و با توجه به جنس رسی و سیلتی لایه بالایی سطح شهر و مقدار کم بارش روزانه، با دقت خوبی می‌توان گفت که آب حاصل از بارندگی فقط سطح بالای خاک را مرطوب کرده و بنابراین مقدار تغذیه سفره آب زیرزمینی ناشی از بارش باران صفر در نظرگرفته شد.

کالیبراسیون مدل در حالت ناپایدار

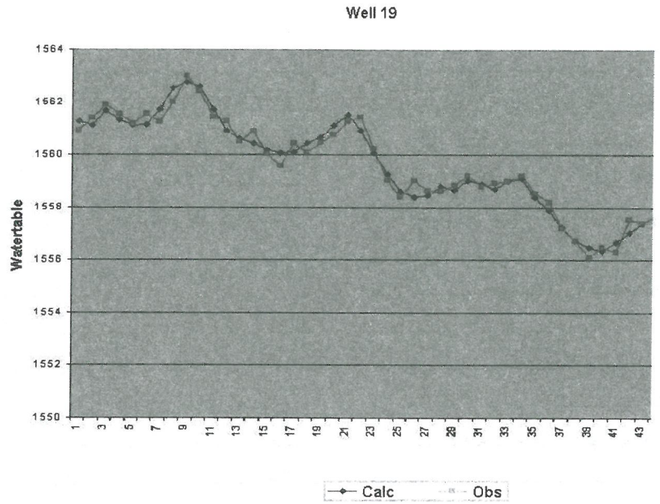
با توجه به این که آمار موجود از نوسانات سطح ایستابی آبخوان شهر اصفهان، مربوط به مهر سال ۱۳۷٦ تا آخر سال ۱۳۸۰ می‌باشد، بنابراین کل دوره‌های زمانی، ٥٤ دوره تنش و هر دوره تنش شامل یک گام زمانی به مدت یک ماه انتخاب گردید. هدف از مدل‌سازی در حالت ناپایدار، شبیه‌سازی تغییرات سطح ایستابی در طی سال‌های بهره‌برداری از آبخوان می‌باشد. بنابراین عواملی چون میزان ضریب نفوذپذیری، تخلخل، شرایط زهکشی و تغذیه و غیره که در حالت پایدار تعیین شده‌اند، در حالت ناپایدار، ثابت فرض شده، ولی برای هر دوره تنش تغذیه ناشی از زاینده رود و تخلیه چاه‌ها، به دفعات در مدل تغییر داده شد و مدل اجرا گردید؛ تا این که در نهایت ارتفاع سطح ایستابی به دست آمده از مدل، با میزان ارتفاع اندازه‌گیری شده در پیزومترها به اندازه کافی نزدیک شد. این کار به صورت مرحله به مرحله انجام گردیده و پس از نزدیک شدن نتایج به دست آمده از هر مرحله، با مقادیر اندازه‌گیری شده، اطلاعات جدید برای اجرای مدل در مرحله بعد وارد شده است. در حالت ناپایدار، ضریب ذخیره آبخوان، میزان تغذیه و تخلیه آبخوان محاسبه شده اند. برای کنترل و محاسبه دقت مدل در سال‌های شبیه سازی، با استفاده از نرم افزار Excel 2000 برازش سطح آب حقیقی و سطح آب شبیه‌سازی شده برای هر یک از پیزومترها انجام گرفته و با استفاده از قابلیت آماری این نرم افراز ضریب همبستگی آنها محاسبه شده است که در شکل‌های ۳ و ٤ به عنوان مثال آورده شده اند. نتایج حاصل، ضریب همبستگی بین ۸۸ تا ۹٦ درصد را نشان می‌دهد که با توجه به تعداد پیزومترهایی که برازش در آنها صورت گرفته ، به طور متوسط ضریب همبستگی ۹٤ در صد در دقت محاسبات فرض می شود. در شکل ۳ برای تمامی نقاط مشاهده‌ای، سطح ایستابی محاسبه شده و لیکن به علت تطابق بسیار نزدیک، در بعضی از نقاط این شکل، رنگ آبی که معرف سطح ایستابی محاسبه شده می‌باشد، زیر رنگ قرمز قرارگرفته و مشخص نمی‌باشد.

خروجی‌های مدل

وجود دقت ۹٤ درصد در شبیه سازی، نشانگر دقت مناسب مدل‌سازی می باشد. به طور کلی خروجی‌های مدل را می‌توان شامل مواردی مانند : خلاصه بیلان آبی، نوسانات سطح ایستابی در تمام نقاط آبخوان ، تعیین میزان تغذیه در ناحیه‌ای دلخواه و پیش بینی سطح ایستابی در



شکل ۳- نمودار نوسانات سطح ایستابی در پیزومتر شماره ۱۰

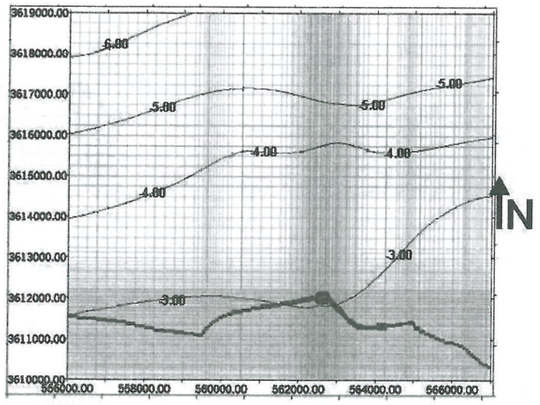


شکل ٤- نمودار نوسانات سطح ایستابی در پیزومتر شماره ۱۹

سال‌های آینده ذکر کرد. بر اساس نتایج حاصل از کالیبراسیون مدل در یک دوره پایدار (۷۷-۱۳۷٦)، ضریب هدایت هیدرولیکی لایه اول همان ٦/۳ متر در روز تثبیت شد. در حالی که ضریب نفوذپذیری لایه دوم به مقدار ۲۱۱/۷ متر در روز تصحیح گردید. مقدار تعدیل شده ضریب نفوذپذیری لایه دوم در حین کالیبراسیون مدل در حالت پایدار بوده و با مقدار به دست آمده در طی آزمایش‌های پمپاژ اندکی متفاوت می‌باشد. هم‌چنین بر اساس نتایج حاصل از کالیبراسیون در یک دوره ۵ ساله ناپایدار، ضریب ذخیره برای لایه اول ۰/۰۱ و برای لایه دوم ۰/۱۵ به دست آمده است. یکی دیگر از خروجی‌های مدل، بیلان آبی آبخوان است. به طور کلی بیلان آبی تفاضل دو پارامتر، میزان آب ورودی و میزان آب خروجی می‌باشد. هر یک از پارامترهای ورودی و خروجی، خود از پارامترهای دیگری تشکیل می‌شوند. بدیهی است که اندازه‌گیری تمام پارامترهای ورودی و خروجی یک آبخوان کاری مشکل است، ولی می‌توان با صرف نظر از اجزایی که تاثیر چندانی در معادله بیلان ندارند و در نظر گرفتن دوره زمانی مناسب که باعث حذف برخی از پارامترها می‌شود، بیلان آبی آبخوان را مشخص کرد. در مورد شهر اصفهان میزان تخلیه آب زیرزمینی توسط چاه‌ها در سال ۱۳۷٦ در حدود ۲۵٦۰۰۰۰۰ متر مکعب بوده که به دلیل وجود خشکسالی در سال‌های اخیر و کمبود آب در زاینده‌رود، میزان تخلیه در سال ۱۳۸۰ به حدود ۲۷۸۰۰۰۰۰ متر مکعب بالغ شده است. خروجی دیگر مدل آب زیرزمینی، نقشه‌های افت سطح ایستابی در هر دوره زمانی با فرض سطح ایستابی آبخوان در حالت پایدار به عنوان سطح مبنا می‌باشد. به دلیل وجود این قابلیت، می‌توان وضعیت سطح ایستابی دوره‌های زمانی خاص را با هم مقایسه کرد و اختلاف بین سطح ایستابی در یک دوره زمانی خاص با وضعیت سطح ایستابی در ابتدای زمان شبیه سازی را محاسبه کرد. شکل ۵ میزان افت سطح ایستابی در دوره زمانی از اول مهر ۱۳۷٦ تا اول شهریور ۱۳۸۰ را نشان می دهد. همان طور که از شکل مشخص است ،حداکثر میزان افت سطح ایستابی٦/۵ متر می‌باشد. علت اصلی این افت وجود خشکسالی چند سال اخیر و به تبع آن خشک شدن زاینده‌رود در چند ماه از سال و افزایش استخراج آب از سفره توسط چاه‌های بهره‌برداری بوده است.

بررسی تأثیر پروژه متروی اصفهان بر رژیم آب زیرزمینی شهر اصفهان

همان طور که قبلا ذکر شد، بطور کلی هدف از مدل‌سازی آبخوان شهر اصفهان، بررسی اثرات ناشی از حفر و احداث تونل زیرزمینی مترو بوده است. در این رابطه ابتدا با استفاده از مدل‌سازی ،پارامترهای



شکل ۵- افت سطح ایستابی در پایان شهریور ۱۳۸۰ نسبت به اول مهرماه ۱۳۷۶

هیدرودینامیکی آبخوان که توسط پمپاژ چندین چاه تعیین شده بود، تعدیل و تصحیح شد.

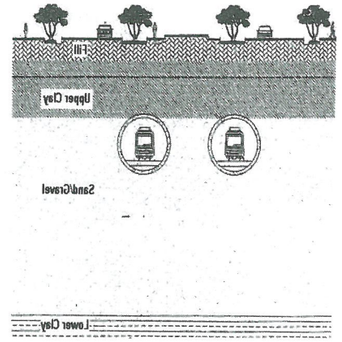
مطالعات متروی اصفهان از چندین سال قبل پیگیری شده است. چنانچه اشاره شد در این طرح تونل مترو از ترمینال کاوه در شمال شهر شروع شده و با عبور از زیر زاینده‌رود در دروازه شیراز خاتمه می‌یابد. حساسیت طرح به دلیل بالا بودن سطح آب زیرزمینی و از همه مهم‌تر عبور آن از زیر زاینده‌رود می باشد. به همین دلیل طرح‌های مختلفی به منظور نحوه حفر، نگهداری و مهار آب زیرزمینی ارائه شده است. که بعد از بررسی و مطالعه طرح‌های مختلف در حال حاضر دو طرح نسبت به بقیه طرح‌ها برتری دارند.

در طرح اول پیشنهاد شده که برای مسیر رفت و برگشت، دو تونل جداگانه حفر شود. قطر این تونل‌ها هر کدام ٦ متر بوده و فاصله سقف تونل‌ها تا سطح زمین ٦ متر می باشد. در شکل ٦ این دو تونل نشان داده شده‌اند.

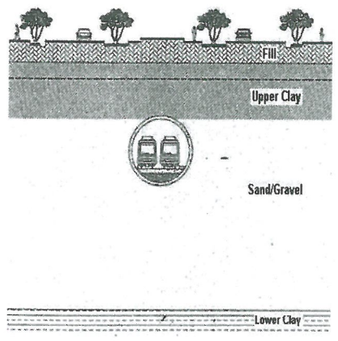
در طرح دوم پیشنهاد شده است که به جای دو تونل با قطر کم، یک تونل با قطر بزرگ‌تر حفر شود. برای این تونل قطر ۹ متر و فاصله ۹ متر بین سقف تونل تا سطح زمین پیشنهاد شده است. در شکل ۷ این تونل با مقیاس تقریبی نشان داده شده است.

هم‌چنین در هر دو طرح به منظور جلوگیری از هجوم آب رودخانه زاینده‌رود به داخل تونل ،احداث دو دیواره نفوذناپذیر به ضخامت۰/۸ متر وطول تقریبی ۲کیلومتر در دو طرف آنها پیشنهاد شده است. شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب دو مقطع طولی و عرضی دیواره های آب بند را نشان می‌دهند. دیوار نفوذ ناپذیر تونل مترو به عنوان یک ساخت زیرزمینی می‌تواند بر سطح آب زیرزمینی اثر بگذارد و باعث بالا آمدن سطح ایستابی در یک طرف و پایین آمدن سطح ایستابی در طرف دیگر شود. این تغییرات در سطح ایستابی باعث بروز مشکلاتی همچون مستغرق شدن یا نشست تاسیسات شهری می شود. بنابراین می‌بایست بین طرح‌های پیشنهادی، طرح‌هایی را انتخاب کرد که کمترین اثر را بر آب زیر زمینی داشته باشد.در این رابطه در ادامه به بررسی دو طرح منتخب می پردازیم.

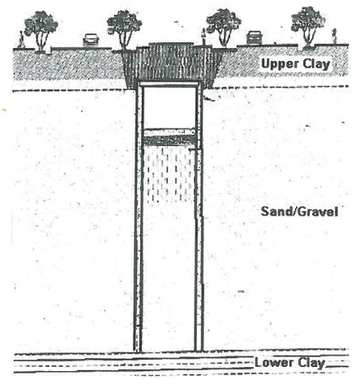
به دلیل وجود خشکسالی در طی چند سال اخیر سطح آب زیرزمینی افت کرده و هر چند با بارندگی های زمستان سال ۱۳۸۰ وضعیت آب زاینده‌رود بهتر از سال‌های قبل شد و در بالا آمدن سطح آب زیرزمینی شهر مؤثر بوده، ولی هنوز هم سطح ایستابی آبخوان شهر اصفهان پایین‌تر از سال ۱۳۷۷ می‌باشد. بنابراین با توجه به این که هر چه سطح آب زیرزمینی بالاتر باشد، تغییرات در سطح آن بر اثر احداث تونل بیشتر خواهد بود، برای بررسی دو طرح منتخب از سطح آب زیرزمینی در دوازدهم فروردین سال ۱۳۷۷ که بالاترین سطح را در بین سال‌های مختلف دارد، استفاده شد.



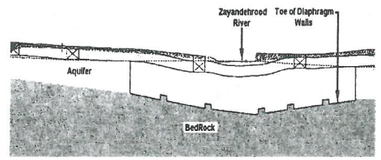
شکل ۶- مقطعی از دو تونل جداگانه مسیر رفت و برگشت با مقیاس تقریبی [۲]



شکل ۷- مقطعی از یک تونل جداگانه مسیر رفت و برگشت با مقیاس تقریبی [۲]



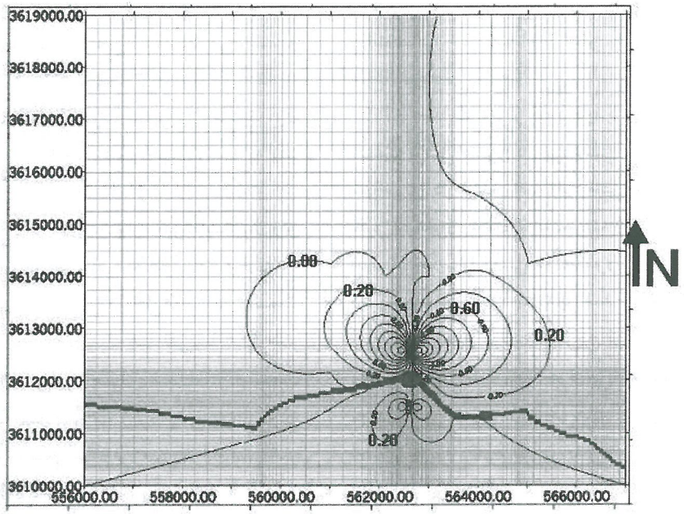
شکل ۸- مقطع عرضی از دیواره‌ی نفوذ ناپذیر [۲]



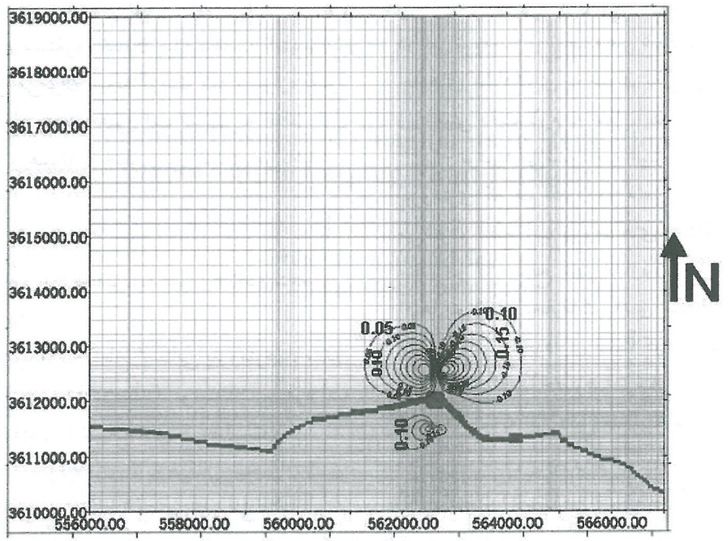
شکل ۹- مقطع طولی از دیواره‌ی نفوذ ناپذیر [۲]

به منظور بررسی اثرات احداث تونل ودیوار نفوذ ناپذیر، ابتدا به طور جداگانه تونل‌ها به قطرهای ٦ و ۹ متر، به صورت یک سد نفوذ ناپذیر زیرزمینی وارد مدل شدند. ولی با این که در قسمت‌های جنوبی شهر و محل تلاقی مسیر خط تونل و زاینده‌رود، تونل‌ها به طور کامل در زیر سطح ایستابی آب زیرزمینی قرار گرفته و در قسمت شمالی شهر قسمتی از تونل‌ها در آب می‌باشند، مدل تغییر محسوسی در سطح آب زیرزمینی را نشان نمی دهد. می‌توان دو علت برای این عدم تغییر بیان کرد. اول این که ضریب نفوذپذیری لایه آبدار دوم (زیرین) نسبتا زیاد می‌باشد. دوم این که هر چند در بعضی مقاطع، تمام قطر تونل در آب قرار گرفته، ولی با توجه به این که ضخامت لایه آبدار زیرین بین ۱۵ تا ۳۰ متر متغیر است، احداث تونل با قطرهای مذکور در برابر این ضخامت، تغییر محسوسی در سطح آب زیرزمینی ایجاد نمی نماید.

همان طور که گفته شد بر طبق این طرح، به منظور جلوگیری از نفوذ آب زاینده‌رود به عملیات احداث تونل، می‌بایست دو دیوار نفوذ ناپذیر به ضخامت ۰/۸ متر تا لایه نفوذ ناپذیر (سنگ کف آبخوان) به طول تقریبی ۲ کیلومتر در محل تلاقی مسیر احداث تونل مترو و زاینده‌رود احداث شود. این موضوع به دو صورت بررسی شد:



شکل ۱۰- تغییر سطح آب زیر زمینی بر اثر احداث دیوار نفوذ ناپذیر بدون مدخل



شکل ۱۱- تغییر سطح آب زیر زمینی بر اثر احداث دیوار نفوذ ناپذیر با مدخل

الف- در حالت اول این دیوار به طور پیوسته و بدون وجود مدخلی برای عبور آب زیرزمینی از سمت دیواره غربی به شرقی، در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از مدل در این حالت در شکل ۱۰ نشان داده شده است. محاسبات مؤید آنند که دیوار نفوذناپذیر تغییرات محسوسی در سطح آب زیرزمینی ایجاد کرده است. در سمت غرب دیوار، سطح آب زیرزمینی بالا آمدگی معادل ۱/۵ متر از سطح اولیه را نشان می دهد، در حالی که در طرف مقابل آن یعنی شرق دیواره شرقی، ۱/۷ متر افت سطح آب زیرزمینی نسبت به سطح اولیه مشاهده می‌شود. با توجه به این که در

محل‌هایی که سطح آب زیرزمینی افزایش یا کاهش یافته، سطح آب زیرزمینی هم به طور طبیعی نسبتا بالا می‌باشد و این موضوع می‌تواند باعث بروز مشکلاتی مانند نشست یا مستغرق شدن تاسیسات شهری شود، بنابراین حالت اول یعنی ایجاد دو دیواره بدون مدخل عبور آب مناسب به نظر نمی‌رسد.

ب- درحالت دوم در پایین دو دیواره نفوذناپذیر(روی سطح فوقانی سنگ کف)، مدخل‌هایی به طول ۵۰ و ارتفاع ۳ متر در نظر گرفته شد. فاصله این مدخل‌ها در دو سمت رودخانه ۳۵۰ متر و در سایر قسمت ها تقریبا ۲۰۰ متر می‌باشد. در این حالت پس از اجرای مدل، در قسمت غرب دیواره غربی، بالا آمدگی آب زیرزمینی به ارتفاع حداکثر ۰/۵ متر بالاتر از سطح آب زیرزمینی اولیه مشاهده می‌شود و در طرف مقابل سطح آب زیرزمینی ۰/۵ متر پایین‌تر از سطح آب اولیه قرار می گیرد. در شکل ۱۱ این تغییرات نشان داده شده اند.چنانچه دیده می شود در حالت دوم تغییرات سطح آب زیرزمینی بسیار کمتر از آن است که مشکلی در مورد مستغرق شدن یا نشست تاسیسات پیش بیاید. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که دیواره نفوذ ناپذیر به طریق ایجاد مدخل عبور آب نسبت به حالت اول برتری کامل داشته و همراه با خطر زایی کمتری می‌باشد.

نتیجه‌گیری

با توجه به اهداف این تحقیق، به طور خلاصه نتایج زیر را می توان بر شمرد:

۱- با توجه به نوسانات سطح ایستابی پیزومترها، مدل PMwin با دقت بالایی (۹۴ درصد)، نوسانات سفره آب زیرزمینی دشت اصفهان را شبیه سازی کرده است.

۲- میزان ضریب نفوذپذیری لایه فوقانی آبخوان شهر اصفهان ۶/۳ و لایه زیرین ۲۱۱/۷ متر بر روز می‌باشد.

۳- مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی نشان می‌دهد که هر دو گزینه احداث دو تونل با قطر ۶ متر و یا یک تونل با قطر ۹ متر، تأثیر چندانی بر جریان آب زیرزمینی نداشته و انتخاب هر کدام از این گزینه ها از این دیدگاه علی‌السویه می‌باشد.

۴- احداث دیوار نفوذ ناپذیر بدون مدخل آب در دو سمت تونل مترو در نزدیکی زاینده‌رود، سبب نوسان ۱/۵متری در سطح آب زیرزمینی شده و می‌تواند مشکلاتی نظیر مستغرق شدن یا نشست را برای تأسیسات شهری ایجاد نماید؛ ولی در صورتی که در قسمت پایین دیواره‌های نفوذ ناپدیر مدخل‌هایی برای عبور آب زیرزمینی تعبیه گردد، کمترین نوسان سطح آب زیرزمینی (حداکثر ۰/۵ متر) به وجود می‌آید. بنابراین احداث دیوار نفوذ ناپذیر همراه با مدخل‌های عبور آب نسبت به حالت احداث دیوار نفوذ ناپذیر بدون مدخل عبور آب ارجحیت دارد.

بر اساس نتایج تحقیق انجام شده، موارد ذیل پیشنهاد می شود:

۱- با توجه به اهمیت صحت اطلاعات اولیه ورودی در امر شبیه‌سازی توصیه می شود در اندازه‌گیری اطلاعات چاه‌های مشاهده‌ای به عنوان یکی از پارامترهای مهم آب زیرزمینی دقت لازم به عمل آید.

۲- توصیه می‌شود به غیر از اندازه‌گیری چاه‌های پیزومتری که هم اکنون در مسیر چهار باغ اندازه گیری می‌شود، سطح آب پیزومترهای مختلف به صورت شبکه‌ای منظم در کل سطح شهر اندازه‌گیری شود تا در آینده از آن‌ها بتوان در تحقیقات بعدی استفاده نمود. هم‌چنین طول مدت زمان آماربرداری نسبتاً کوتاه بوده و بنابراین تاثیر شرایط مختلف (خصوصاً ترسالی) در مدل به خوبی آشکار نشده است. به این دلیل مناسب است که طول مدت زمان آمار برداری از پیزومترها طولانی‌تر بوده تا بتوان کالیبراسیون مدل را با دقت بالاتر و در شرایط مختلف صورت داد.

منابع و مراجع

1- Taheri, A. & Associates,(1999)." *Esfahan Metro Project*", GEOTECHNICAL INVESTIGATIONS, Geotechnical Consulting Engineers.

2- PPK Environment & Infrastructure Pty Ltd, (1998)." *Esfahan Mass Rapid Transit Priority Line Preliminary Design*" , Appendix PA North – South Line – Geotechnical Assessment and Tunnel Design.