

Investigation on Urban Groundwater Flow and Construction of Subsurface Concrete Cutoff Walls Interaction Using a Numerical Modeling Approach (Case Study: Karbala City, Iraq)

H. Ketabchi^{1*}, D. Mahmoodzadeh², and H.R. Elahi³

Abstract

In urban development projects, it is important the interaction of groundwater-flow and subsurface-structures, including cutoff-walls. Using a modeling approach to investigate these interactions can be helpful in planning to implement and strategies to reduce the adverse-effects. In this study, the numerical-code MODFLOW has been used with HFB package to simulate the three-dimensional groundwater-system of an urban area in Iraq, taking into account the geological layering and heterogeneity and the constructed cutoff-walls. These 40-meter-deep concrete cutoff-walls have been constructed with the aim of locally groundwater-level reduction to provide an ability to build the designed constructions under ground-level. For calibration and validation of model, the measured data of groundwater-level in 28 observation wells from February 2016 to September 2018 have been used. The aim is to investigate the interaction between the construction of subsurface concrete cutoff-walls and groundwater-system based on development plans. The results show that in the development of considered phases, an increase or decrease in groundwater-level can occur up to more than one-meter compared to pre-development conditions next to cutoff-walls. For example, under the constructed phase condition, the groundwater level changes are between -0.55 (maximum drop) to 0.44 meters (maximum increase) while with the completion of all phases, these changes are between -0.06 (maximum drop) to 0.14 meters (maximum increase), respectively. Preventing the water entering to the lower parts of constructions and maintaining the stability of adjacent structures are some of the issues, which should be observed considering the technical and managerial solutions suggested in this study.

Keywords: Numerical Simulation, Groundwater, Concrete Cutoff Walls, Subsurface Structure, Aquifer Heterogeneity.

Received: June 1, 2020

Accepted: August 18, 2020

بررسی اندرکنش جریان آب زیرزمینی شهری و ساخت دیوارهای آببند بتنی زیرسطحی با رویکرد مدل سازی عددی (مطالعه موردی: شهر کربلا، عراق)

حامد کتابچی^{۱*}، داود محمودزاده^۲ و حمیدرضا الهی^۳

چکیده

در طرح‌های عمرانی شهری، اندرکنش جریان آب‌های زیرزمینی و سازه‌های زیرسطحی از جمله دیوارهای آببند، حائز اهمیت است. استفاده از رویکرد مدل‌سازی برای بررسی این اندرکنش‌ها می‌تواند در برنامه‌ریزی برای اجرا و پیش‌بینی راهکارهای کاهش اثرات نامطلوب راهگشا باشد. در این مطالعه، کد عددی MODFLOW با بسته HFB جهت شبیه‌سازی سه‌بعدی سیستم آب زیرزمینی یک محدوده شهری واقع در شهر کربلا، کشور عراق، با در نظر گرفتن لایه‌بندی و ناهمگنی زمین‌شناسی منطقه و دیوارهای آببند ساخته شده، به کار رفته است. دیوارهای آببند بتنی با عمق ۴۰ متر با هدف کاستن موضعی سطح تراز آب زیرزمینی برای ساخت اماکن در زیر سطح زمین اجرا شده‌اند. در فرآیند واسنجی و اعتبارسنجی، از داده‌های اندازه‌گیری سطح تراز آب زیرزمینی در ۲۸ چاه مشاهداتی از بهمن‌ماه ۱۳۹۵ تا مهرماه ۱۳۹۷ استفاده شده است. هدف مورد نظر، بررسی اندرکنش جریان آب‌های زیرزمینی و ساخت آببندهای بتنی مبتنی بر طرح‌های توسعه است. نتایج نشان می‌دهد که در توسعه فازهای موردنظر، تغییرات سطح تراز آب زیرزمینی تا بیش از یک متر نیز نسبت به شرایط قبل از توسعه در پشت دیوارهای آببند رخ می‌دهد. برای نمونه، در شرایط فاز ساخته شده، تغییرات سطح تراز آب زیرزمینی بین -۰/۵۵ (حد اکثر افت) تا ۰/۴۴ (حد اکثر افزایش) می‌باشد در حالی که با تکمیل کامل فازها، این تغییرات بین -۱/۰۶ (حد اکثر افت) تا ۰/۱۴ (حد اکثر افزایش) خواهد شد. ممانعت از ورود آب به بخش‌های تحتانی اماکن و حفظ پایداری سازه‌های مجاور از مواردی است که باید با اتخاذ راهکارهای فنی و مدیریتی پیشنهاد شده در این مطالعه مدنظر قرار گیرد.

کلمات کلیدی: شبیه‌سازی عددی، آب‌های زیرزمینی، دیوارهای آببند بتنی، سازه زیرسطحی، ناهمگنی آبخوان.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۳/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۵/۲۸

1- Assistant Professor, Water Engineering and Management Deptment, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: h.ketabchi@modares.ac.ir

2- Researcher, Water Engineering and Management Research Institute, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

3- Geotechnical Engineer, Samanpey Soil Improvement Services Company, Tehran, Iran.

*- Corresponding Author

۱- استادیار، گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲- پژوهشگر، پژوهشکده مهندسی و مدیریت آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۳- مهندس ژئوتکنیک، شرکت خدمات بهسازی خاک سامان‌پی، تهران، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پائیز ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

در برخی مطالعات مانند (Dassargues (1997), Jiao et al. (2006), Shen et al. (2011), Font-Capo et al. (2019), Sun et al. و (2020) از خود مدل شبیه‌سازی با تغییر ضریب هدایت هیدرولیکی سلول‌های محاسباتی (مثلاً کوچک کردن آن و نفوذناپذیر شدن آن جهت شبیه‌سازی دیوار) استفاده شده است. برای نمونه در مطالعه (Font-Capo et al. (2011)، اثر ساخت خط مترو در شهر بارسلونای اسپانیا بر روی منابع آب زیرزمینی با استفاده از کد عددی TRANSIN برای مدل‌سازی سه‌بعدی محدوده مطالعه، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که مدل (با توجه به داده‌های اندازه‌گیری) تغییرات سطح تراز آب و شدت جریان ورودی به تونل را برآورد نموده است.

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود در مطالعات محدودی از جمله (Jiao et al. (2006), Epting et al. (2008), Font-Capo et al. (2011) و (Pujades et al. (2012) از اندازه‌گیری منظم تراز آب زیرزمینی برای مدل‌سازی یک منطقه واقعی و واسنجی و اعتبارسنجی مدل استفاده نموده‌اند. همچنین در مطالعات اخیر (Sun et al. (2019), Chang et al. (2019) و (Shen et al. (2020) از مدل‌های آزمایشگاهی (کوچک‌مقیاس و بزرگ‌مقیاس) و عددی برای مطالعه اثر سازه‌های زیرسطحی (دیوار آب‌بند و سد زیرسطحی) بر آب‌های زیرزمینی استفاده نموده‌اند که اهمیت این موضوع را نشان می‌دهد که در حال حاضر نیز این مسأله یکی از چالش‌های مهم در مطالعات اخیر بوده است. البته در این مطالعات لایه‌بندی و ناهمگنی آبخوان که می‌تواند در این حوزه تأثیرگذار باشد در نظر گرفته نشده است.

در این مطالعه، تمرکز اصلی بر روی سطح تراز آب زیرزمینی در شهر کربلا واقع در کشور عراق است که تقریباً در عمق حدود ۳ تا ۵ متری از سطح زمین قرار دارد (Dewan, 2014). بنابراین در پیاده‌سازی طرح‌های توسعه زیرسطحی در این شهر و انجام فعالیت‌های سازه‌ای باید اندرکنش این فعالیت‌ها با آب‌های زیرزمینی، مطالعه دقیق شده و اثرات آنها از جمله تغییر رژیم جریان آب زیرزمینی و نیز اندرکنش آن با سازه‌های ساخته شده، تعیین گردد (TJCEI, 2015). بررسی اندرکنش فعالیت‌های توسعه‌ای و ساخت آب‌بندهای بتنی زیرسطحی در طرح توسعه صحن عقيله بنی‌هاشم (س) و آب‌های زیرزمینی شهری در شهر کربلا با بهره‌گیری از مدل ریاضی سیستم آب زیرزمینی محدوده مورد مطالعه (با امکانات بررسی گستره مشخصی از سناریوهای مختلف مبتنی بر طرح‌های توسعه)، هدف اصلی این مطالعه است. پیاده‌سازی ۴ فاز توسعه مختلف در طرح مورد نظر، مدل‌سازی سیستم آب زیرزمینی چندلایه با استفاده از یک مدل عددی و شبیه‌سازی دیوارهای آب‌بند بتنی زیرسطحی به عنوان اثر موانع

در اجرای طرح‌های عمرانی شهری، برنامه‌ریزی‌ها و توجهات کافی به آثار متعدد جانبی باید مدنظر قرار گیرد. در بسیاری از طرح‌های توسعه، تأثیرات جانبی این طرح‌ها از دیدگاه تصمیم‌گیران پنهان بوده و بسیاری از آنها بدون توجه به ملاحظاتمانند تغییرات وضعیت آب‌های زیرزمینی و اندرکنش آن با سازه‌های ساخته شده، طراحی و بهره‌برداری گردیده‌اند. پیامدهای چنین اقداماتی می‌تواند طرح‌های توسعه را نیز متأثر سازد و موجب بروز تغییرات در وضعیت جهت جریان، تخریب منابع محیطی از جمله آب‌های زیرزمینی، آثار نامطلوب بر روی اماکن و عناصر مهم راهبردی اطراف گردد (Ding et al., 2008; Ketabchi and Ataie-Ashtiani, 2015; Attard et al., 2016; Mahmoodzadeh, 2020). در دهه‌های اخیر، در مطالعات متعددی با اهداف مختلف از جمله اندرکنش سازه و آب‌های زیرزمینی، تغییر جهت منابع آب زیرزمینی، پایداری سازه‌ها و بررسی اثرات راهبردهای مدیریتی (دلیل طرح‌های توسعه) بر سطح تراز آب زیرزمینی و کیفیت آب در مقیاس کوچک، از مدل‌های شبیه‌سازی آب زیرزمینی استفاده شده و به توسعه این مدل‌ها پرداخته شده است.

در جدول ۱ خلاصه و جمع‌بندی از مطالعات انجام شده در زمینه اندرکنش آب‌های زیرزمینی و سازه آمده که در ادامه تشریح شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود از MODFLOW در مطالعات (Dassargues (1997), Bonomi and Bellini (2003), Epting et al. (2008) و (Deveughèle et al. (2010) استفاده شده است. برای نمونه در مطالعه (Boukhemacha et al. (2015) به جهت بررسی تغییرات سطح تراز آب زیرزمینی بر اثر ساخت یک تونل برای قطار شهری در شهر فلورانس ایتالیا، از MODFLOW به صورت دوبعدی استفاده شد. در این مطالعه تونل به شکل مانعی نفوذناپذیر مدنظر بوده و افزایش ۶ متری سطح تراز آب زیرزمینی در پایان دوره ۲۰ ساله مدل‌سازی، نشان داده شد. همچنین بررسی وضعیت کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی شهر بازل در سوییس، به دلیل پمپاژ آب از چاه‌های حفر شده در اثر ساخت تونل و بزرگراه در مطالعه (Epting et al. (2008) با MODFLOW به صورت سه‌بعدی مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود با توجه به اهداف مدنظر در مطالعات (Bonomi and Bellini (2003) و (Boukhemacha (2015) از بسته HFB¹ جهت در نظر گرفتن سازه‌های زیرسطحی استفاده شده است.

صفحه‌ای با نفوذپذیری معین در مقابل جریان افقی آب زیرزمینی، از نوآوری‌های این مطالعه بوده که آن را در مقایسه با کارهای قبلی متمایز می‌سازد. برای پوشش این هدف، بر اساس اندازه‌گیری سطح تراز آب زیرزمینی محدوده مورد مطالعه، از رویکرد مدل‌سازی عددی سه‌بعدی با در نظر گرفتن لایه‌بندی و ناهمگنی زمین‌شناسی منطقه بهره گرفته شده است. در ادامه ضمن معرفی محدوده جغرافیایی مورد مطالعه و مشخصات آن، به اندازه‌گیری‌های انجام شده، توسعه ابزار شبیه‌سازی و نیز سناریوهای مورد نظر برای پوشش اهداف مطالعه، پرداخته می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- محدوده مورد مطالعه

محدوده مطالعه حاضر در شهر کربلا واقع در کشور عراق است و مرتبط با طرح توسعه حرم امام حسین (ع) می‌باشد. در این محدوده با توجه به اهداف طرح توسعه اشاره شده، مساحتی حدود ۳۵ هکتار برای اهداف ساخت‌وساز در نظر گرفته شده است که فاز اول، محدوده حدود ۸ هکتاری است که با نام صحن عقیله بنی‌هاشم (س) طراحی گردیده و بخش اعظم آن (۵ هکتار) در حال ساخته شدن و اجرا است. در این راستا، دیوارهای آب‌بند بتنی زیرسطحی به عمق ۴۰ متر و طول دیوار دیافراگمی حدود ۱۷۱۶ متر ساخته شده که عملیات اجرایی آن در اردیبهشت ۱۳۹۷ به اتمام رسیده است. این دیوارها جهت کاستن موضعی سطح تراز آب زیرزمینی در این محدوده ساخته شده‌اند تا امکان توسعه اماکن زیرسطحی فراهم شود (TJCEI, 2015). شکل ۱ محدوده مورد مطالعه و چهار فاز مد نظر را نشان می‌دهد.

برای محدوده مورد مطالعه، تراکم جمعیت بین ۲۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰ نفر در هر کیلومترمربع گزارش شده است (Obaid et al., 2015) و (Hussein et al., 2016). علاوه بر جمعیت ساکن شهر در این محدوده، میلیون‌ها زائر سالانه در این شهر برای زیارت حضور می‌یابند و باعث می‌شود که جمعیت این محدوده به‌طور قابل ملاحظه‌ای در یک دوره زمانی خاص افزایش یابد. تراکم جمعیت در دوران حضور زائران بین ۵۰۰۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰۰۰ نفر در هر کیلومترمربع برآورد شده است (Obaid et al., 2015). این افزایش زیاد جمعیت، فشار وارد بر زیرساخت‌های شهری را افزایش می‌دهد.

از نظر موقعیت جغرافیایی، محدوده مورد مطالعه بین طول جغرافیایی $51^{\circ} 12' 12''$ و $45^{\circ} 59' 12''$ و عرض شرقی $44^{\circ} 04' 27''$ و $32^{\circ} 28' 32''$ و $51^{\circ} 33' 32''$ شمالی قرار دارد. نزدیک‌ترین نواحی مرتفع، تپه‌های رزازه است که در شمال‌غربی شهر قرار گرفته است. همچنین در قسمت

غربی محدوده، دریاچه رزازه به فاصله حدود ۱۵ کیلومتری قرار دارد. رودخانه‌های دجله و فرات از مهم‌ترین منابع تأمین آب هستند که از کشور عراق عبور می‌نمایند. نزدیک‌ترین رودخانه به این محدوده، رودخانه فرات در ۱۰ کیلومتری شرق این محدوده قرار دارد. همچنین رودخانه حسینی که در شمال محدوده مطالعاتی قرار دارد زهکش رودخانه فرات بوده و برای آبیاری زمین‌ها و نخلستان‌ها منطقه استفاده می‌شود. آب و هوای شهر کربلا دارای زمستان‌های سرد و تابستان‌های گرم و خشک و طولانی است. متوسط بارندگی این محدوده ۹۵/۵ میلی‌متر می‌باشد (TJCEI, 2016; Dewan, 2014).

سازندهای مهم موجود در محدوده شهر کربلا و اطراف آن شامل رسوبات کواترنری، سازند دبییدیا و اینجانا است. سازند اینجانا در بردارنده فارس میانی است و نهشته‌های پیش از مولاس را شامل می‌شود. این سازند ابتدا در محیط‌های ساحلی و سپس در سامانه رودخانه‌ای-دریاچه‌ای انباشته شده است. سازند دبییدیا شامل ماسه و شن حاوی قلوه‌سنگ‌های آذرین و کوارتزیت سفید است که در اثر سیمانی شدن به درشت ماسه سنگ تبدیل شده‌اند. بر اساس مطالعات زمین‌شناسی کشور عراق در محدوده شهر کربلا و بر اساس سازندهای تشکیل‌دهنده، دو آبخوان در محدوده مورد مطالعه وجود دارد که لایه‌های مختلف خاک در آنها قابل مشاهده است (TJCEI, 2016).

آبخوان اول در رسوبات کواترنر گسترش یافته است که با حفر حدود سه متری در آن، در اکثر مواقع به سطح تراز آب زیرزمینی می‌توان رسید. این سازند در ناحیه‌ای رخ می‌دهد که از مرز گذرنده از نواحی غربی و شمال غربی شهر کربلا آغاز و تا رودخانه فرات در شرق ادامه می‌یابد. ضخامت این رسوبات از حدود ۱ متر در غرب شهر کربلا به حدود ده‌ها متر در سمت رودخانه فرات افزایش می‌یابد. این رسوبات شامل ماسه، سیلت و رس هستند. این آبخوان از طریق بارندگی، پساب آبیاری، نشت از سیستم لوله‌کشی آب شهری و فاضلاب تغذیه می‌شود. آبخوان دوم در زیر رسوبات کواترنر و در سازند دبییدیا قرار دارد و شامل رس، لایه‌های سیلتی، ماسه با دانه‌بندی ریز تا متوسط زردرنگ همراه با ساختارهای عدسی‌وار محلی متشکل از ماسه درشت‌دانه سخت سمته شده و شن است. این آبخوان مستقل از آبخوان بالایی نبوده و ارتباط هیدرولیکی بین آنها برقرار است. بنابراین آبخوان محبوسی در این محدوده وجود ندارد (TJCEI, 2016).

۲-۲- سطح تراز آب زیرزمینی

به جهت تحلیل سطح تراز آب زیرزمینی محدوده مورد مطالعه، عوامل مهمی از جمله توپوگرافی، خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوان و

Table 1- Summary of the studies of groundwater and subsurface structures interaction

جدول ۱ - خلاصه مطالعات اندرکنش بین آب‌های زیرزمینی و سازه‌های زیرسطحی

Referenses	Study area		Method	Simulation tools and dimentions	Simulation time	Groundwater level measurement	Subsurface structure
	Location	Area					
Dassargues (1997)	Liège (Belgium)	1.7 km ²	FDM ²	MODFLOW-2D	Unsteady	No	Tunnel
Merrick and Jewell (2003)	Sydney (Australia)	12 km ²	FEM ³	Numerical code-2D	Steady state	No	Tunnel
Bonomi and Bellini (2003)	Florence (Italy)	36 km ²	FEM	MODFLOW-2D HFB	Unsteady	No	High speed train tunnel
Jiao et al. (2006)	Hong Kong (China)	1.4 km ²	FDM	Numerical code-2D	Unsteady	Yes	Deep foundation
Ricci et al. (2007)	Turin (Italy)	18 km ²	FDM	Visual-3D TRANSIN	Steady state	No	Metero line
Epting et al. (2008)	Basel (Switzerland)	9 km ²	FDM	MODFLOW-3D MODPATH	Unsteady	Yes	Tunnel and highway
Deveughèle et al. (2010)	-	85 m ²	FDM	MODFLOW-2D	Steady state	No	Tunnel
Ducommun (2010)	Neuchâtel (Switzerland)	0.22 km ²	FEM	FEFLOW-2D	Steady state	No	Deep structures
Font-Capo et al. (2011)	Barcelona (Spain)	1 km ²	FEM	Visual-3D TRANSIN	Unsteady	Yes	Metero line
Pujades et al. (2012)	Barcelona (Spain)	200 m ²	FEM	Visual-2D TRANSIN	Steady state	Yes	Tunnel and train station
Boukhemacha et al. (2015)	Bucharest (Romania)	9 km ²	FDM	MODFLOW-2D HFB	Steady state	No	Urban train tunnels/water collection networks
Sun et al. (2019)	Lab-scale model	0.4 m ² and 0.6 m ²	FDM	Laboratory model, FEFLOW and numerical code-2D	Steady state	No	Cutoff walls
Chang et al. (2019)	Lab-scale model	0.24 m ²	FDM	Laboratory model and SEAWAT-2D	Unsteady	No	Cutoff walls, Subsurface dam, Semi-pervious subsurface barrier
Shen et al. (2020)	Lab-scale model Large-scale model	1.54 m ² 616 m ²	FEM	Laboratory model SUTRA-2D	Unsteady	No	Cutoff walls

تغییرات صورت گرفته در ناحیه شهری به صورت موضعی بوده اما جهت عمومی جریان با مشاهدات موجود در مراجع پیشین مانند (2001) Al-Khateeb مطابقت دارد و از سمت شمال و شمال شرقی به سمت جنوب و جنوب غربی است.

۲-۳- رویکرد شبیه‌سازی

۲-۳-۱- شبیه‌سازی عددی سیستم آب زیرزمینی

MODFLOW، برای اولین بار در سال ۱۹۸۴، توسط Harbaugh و McDonald توسعه داده شد و در حال حاضر برای مدل‌سازی عددی آبخوان مطالعه حاضر از ویرایش ۲۰۰۵ مورد استفاده قرار می‌گیرد.

موقعیت مکانی و زمانی عوامل تغذیه و تخلیه کننده نقش دارند که جهت تعیین آن و نیز بهره‌گیری از این اطلاعات در شبیه‌سازی عددی سیستم آب زیرزمینی در این مطالعه، اندازه‌گیری سطح تراز آب زیرزمینی در ۲۸ چاه مشاهداتی در محدوده مدنظر قرار گرفت. اندازه‌گیری سطح تراز آب زیرزمینی در این چاه‌ها، به‌طور متوسط ۶ بار در ماه انجام شده و این اندازه‌گیری‌ها از فروردین‌ماه ۱۳۹۵ شروع شده (TCE, 2017) و از خردادماه ۱۳۹۶ به صورت منظم تا مهرماه ۱۳۹۷ ادامه داشته است. جهت بررسی تغییرات سطح تراز آب زیرزمینی و با بهره‌گیری از اطلاعات ثبت شده در چاه‌های مشاهداتی اشاره شده، نقشه هم‌تراز و جهت جریان آب زیرزمینی به‌صورت متوسط دوره اندازه‌گیری در شکل ۲ نشان داده شده است. جهت جریان متأثر از

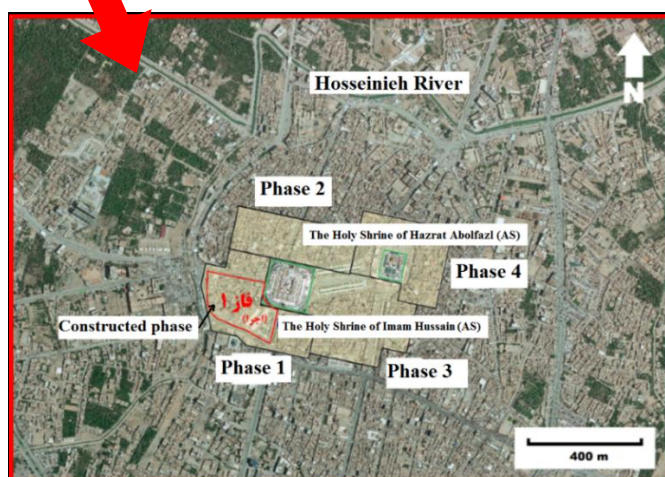
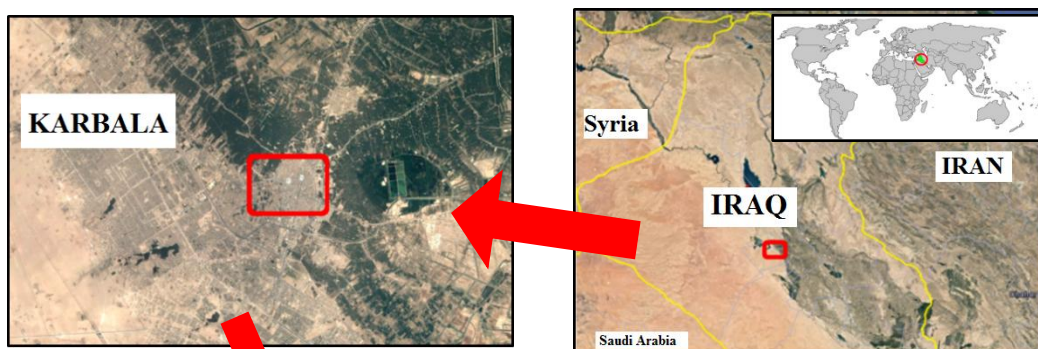


Fig. 1- Location of the study area and the constructed phase
 شکل ۱- موقعیت محدوده مورد مطالعه و فاز اول (ساخته شده)

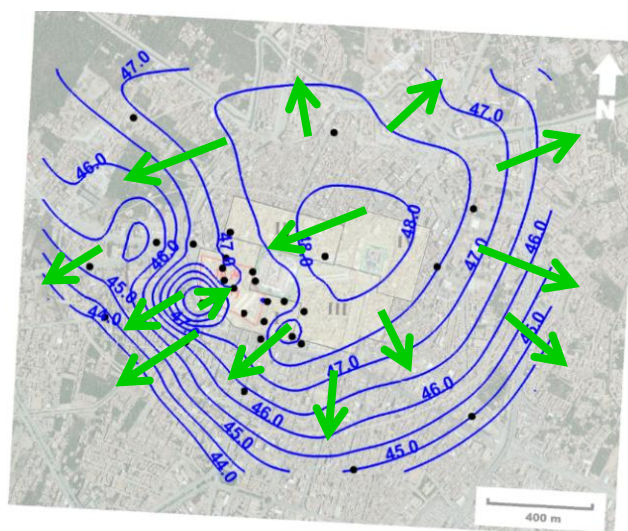


Fig. 2- Groundwater level map and groundwater direction (based on mean of measurement data from 2016 to 2018)

شکل ۲- نقشه هم تراز و جهت جریان آب زیرزمینی (بر اساس متوسط داده‌های اندازه‌گیری شده از ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۷)

جریان آب زیرزمینی در محیط متخلخل با رابطه دیفرانسیل جزئی زیر توصیف می‌شود که مبنای شبیه‌سازی MODFLOW نیز بر اساس

این مدل جریان را به صورت سه‌بعدی و به روش تفاضل محدود برای حالت ماندگار و غیرماندگار شبیه‌سازی می‌کند. معادله عمومی حاکم بر

این معادله می‌باشد (Harbaugh, 2005):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{yy} h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{zz} h \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

که به این رویکرد در (Mahmoodzadeh and Karamouz (2019) و (Ketabchi and Jahangir (2019) هم اشاره شده است. لایه‌ها تا عمق حدود ۴۰ متر از سطح زمین، محل برخورد به لایه سفت رسی، ادامه دارد. در شکل ۳، شمایی از لایه‌بندی و برش‌های دوبعدی مشخص شده نشان می‌دهد.

۲-۴-۱- شبکه‌بندی و شرایط مرزی

در این مطالعه با استفاده از روش تفاضل محدود، محدوده مدل‌سازی به عناصر مربع یا مستطیل تقسیم می‌شوند. تقسیم‌بندی و اندازه شبکه بر اساس میزان دقت موردنیاز، شکل منطقه و سایر مؤلفه‌های هیدرولوژیکی حاکم بر منطقه تعیین می‌شود. ابعاد شبکه، ۲۰ متر در ۲۰ متر (شکل ۴) انتخاب شده است. رعایت پایداری حل عددی بر حسب گسسته‌سازی زمانی و مکانی، نیازهای طرح، توجه به کارهای پیشین انجام شده در مقیاس محدوده حاضر و زمان محاسبات در این انتخاب مدنظر بوده است. شبکه‌بندی دارای ۸۴ سطر، ۱۰۲ ستون و ۱۰ لایه است.

تعداد کل گره‌ها ۹۶۳۰۵ و تعداد کل شبکه‌ها ۸۵۶۸۰ است که از این تعداد شبکه، ۴۳۷۶۶ شبکه فعال و ۴۱۹۱۴ شبکه غیرفعال در مدل‌سازی (خارج از محدوده مدل) می‌باشند. دیوارهای آب‌بند بتنی در این مطالعه با عمق ۴۰ متر به جهت تحقق اهداف توسعه مدنظر و به منظور کاستن موضعی سطح تراز آب زیرزمینی برای ساخت اماکن در زیر سطح زمین ساخته می‌شوند. همچنین براساس نقشه‌های طراحی دیوار آب‌بند زیرسطحی؛ کلیه دیوارها با ضخامت ثابت یک متر و بتن با نفوذپذیری 10^{-8} متر بر روز (جهت غیرقابل نفوذ شدن دیوار بتنی) در نظر گرفته شده است. بنابراین ضریب هدایت برای دیوارهای آب‌بند ثابت است. در جدول ۲، خلاصه‌ای از مشخصه‌های عددی استفاده شده در این مطالعه آمده است. شرایط مرزی مدنظر در این مطالعه در شکل ۴ نمایش داده شده است. در این شکل منحنی‌های ضخیم بیانگر مرزهای هد است که به صورت مقدار مشخص وابسته به زمان اعمال شده است. منحنی‌های باریک مرزهای منطبق بر خطوط جریان هستند. آب زیرزمینی از طریق مرزهای هد، امکان ورود و خروج از محدوده را دارد و مرزهای منطبق بر خطوط جریان، شبیه مرزهای نفوذناپذیر رفتار می‌کنند و منطبق بر خطوط جریان هستند. جریان آب زیرزمینی عمود بر این خطوط نمی‌تواند حرکت کند. تراز مرزهای هد از روی نقشه سطح تراز آب زیرزمینی برداشت شده و در مدل عددی قرار می‌گیرد.

در این رابطه h سطح تراز آب زیرزمینی W ، میزان تخلیه از آبخوان، S_s ، ضریب ذخیره مخصوص و t زمان است. معادله فوق جریان آب زیرزمینی را در یک محیط غیرهمگن و تحت شرایط غیرماندگار در راستای در معادله فوق K_{xx} ، K_{yy} و K_{zz} ضرایب هیدرولیکی در راستاهای x ، y و z هستند.

۲-۳-۲- شبیه‌سازی اثر دیوار آب‌بند بتنی

HFB^4 یکی از بسته‌های شبیه‌سازی جریان با قابلیت تلفیق با MODFLOW می‌باشد که برای بررسی اثر دیوار آب‌بند زیرسطحی ساخته شده و سیستم آب زیرزمینی در شرایط قبل توسعه و بعد از توسعه استفاده می‌شود. این بسته برای شبیه‌سازی اثر موانع صفحه‌ای با نفوذپذیری متغیر در مقابل جریان افقی آب زیرزمینی استفاده می‌گردد. در این رویکرد، سطح تماس سلول‌های محاسباتی منطبق با محل دیوار مدنظر قرار گرفته و ضریب هدایت^۵ مانع در این صفحه از تقسیم هدایت هیدرولیکی مصالح دیوار به ضخامت آن برآورد می‌شود.

۲-۳-۳- رویکرد واسنجی و اعتبارسنجی

در این مطالعه جهت واسنجی و تخمین پارامترهای مورد استفاده در مدل‌سازی، از روش‌های آزمون و خطای دستی و کد PEST بهره گرفته می‌شود. PEST یک کد غیرخطی است که برای عملیات بهینه‌سازی غیرخطی استفاده می‌شود. در این کد، پارامترهای مدنظر واسنجی به گونه‌ای حساب می‌شوند که تابع هدف وزنی کوچک‌ترین مربعات تعریف شده در PEST حداقل شود (Doherty, 2005; Saghi-Jadid and Ketabchi., 2019).

۲-۴-۲- شبیه‌سازی سیستم آب زیرزمینی

برای انجام شبیه‌سازی عددی در این مطالعه از رابط گرافیکی GMS برای به‌کارگیری MODFLOW، HFB و PEST استفاده شده است. در ادامه روند تهیه مدل مفهومی و برپایی مدل عددی مورد نظر، ارائه شده است. مدل‌سازی آب زیرزمینی آبخوان مورد مطالعه به صورت سه‌بعدی مدنظر است. محدوده مدل‌سازی و دامنه آن در شکل ۳ نشان داده شده است. براساس اطلاعات مرجع (TJCEI, 2016) از گمانه‌های اکتشافی، محدوده مورد مطالعه را در ۱۰ لایه می‌توان مفهوم‌سازی کرد که نام هر لایه در شکل ۳ نشان داده شده است. ناهمگنی زمین‌شناسی با بهره‌گیری از این لایه‌ها مدنظر قرار گرفته

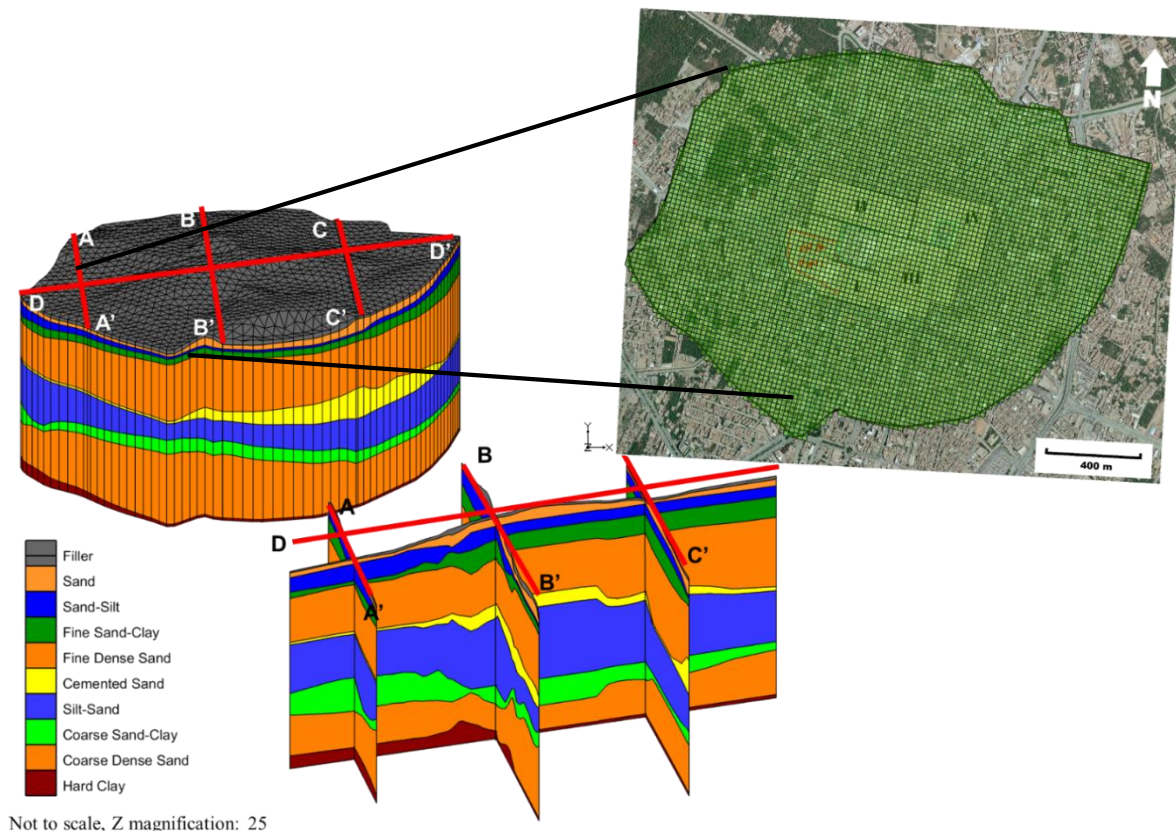


Fig. 3- Modeling area with layering and geological heterogeneity of the media

شکل ۳- محدوده مدل سازی به همراه لایه بندی و ناهمگنی زمین شناسی منطقه

Table 2- Summary of numerical model characteristics

جدول ۲- خلاصه ای از مشخصه های مدل عددی

Characteristics	Description
Simulation setup	
Groundwater flow modeling	MODFLOW (Harbaugh, 2005)
Barrier modeling	HFB
Dimension	Three dimensional
Porous media	Heterogeneous media (Layered)
Simulation mode	Steady-state and transient flow
Stress period	1 month (For transient flow)
Transient simulation time	5 years
Hydraulic conductance of barriers	10^{-8} day^{-1}
Model characteristics	
FLOW package	LPF (Layer Property Flow)
Interblock transmissivity	Harmonic Mean
Maximum number of outer iterations	100
Number of inner iterations	50
Matrix preconditioning method	Modified incomplete Cholesky
Head change criterion for convergence	0.001
Residual criterion for convergence	0.001
Relaxation parameter	1

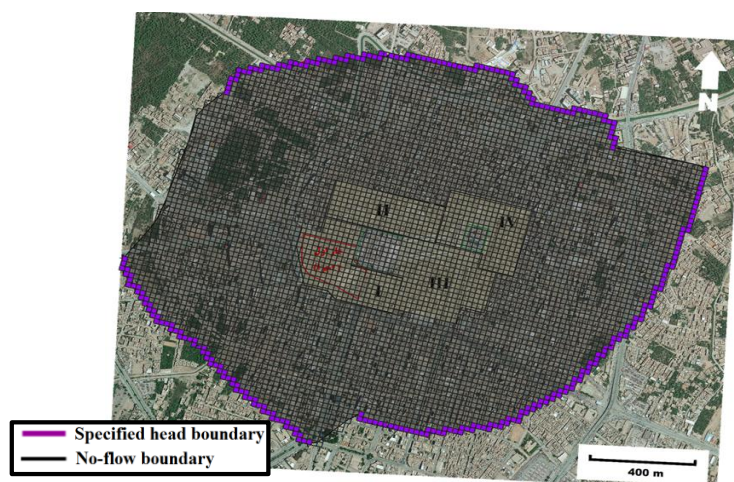


Fig. 4- Model boundary condition area and the constructed phase
شکل ۴- شرایط مرزی محدوده مدل و موقعیت فاز اول (ساخته شده)

در حالت ماندگار برای پارامتر هدایت هیدرولیکی و لایه‌های مختلف آبخوان به همراه بازه حداقل و حداکثر مجاز آن (TJCEI, 2015) ارائه شده است. بر اساس نتایج واسنجی مدل، بیشترین مقدار هدایت هیدرولیکی مربوط به لایه سوم، ۱۱ متر بر روز می‌باشد. حداقل هدایت هیدرولیکی نیز مربوط به لایه ششم و دهم می‌باشد که مقادیر آن به ترتیب برابر با ۰/۱۱ و ۰/۰۰۴ متر بر روز است.

در این مطالعه، تغذیه به صورت خالص (تغذیه منهای برداشت) مدنظر است. برای اعمال تغذیه خالص از سطح به آبخوان، با استفاده از نقشه‌های پهنه آبی، شبکه فاضلاب، شبکه جمع‌آوری باران/بارش، شبکه آبرسانی، فعالیت‌های عمرانی شهری، کاربری زمین و برداشت از آب‌های زیرزمینی، محدوده مدنظر برای مدل‌سازی به ۶۳ ناحیه تغذیه تقسیم‌بندی شده که در شکل ۵ به همراه مقادیر واسنجی شده در حالت ماندگار نشان داده شده است. بر اساس نتایج واسنجی مدل، نرخ تغذیه خالص بیشتر مربوط به پهنه‌های آبی، کاربری‌های پوشش گیاهی و فضای سبز و نواحی با نشت زیاد شبکه آبرسانی و فاضلاب می‌باشد. حداقل نرخ تغذیه نیز مربوط به کاربری‌های متراکم شهری و عموماً با ساخت و ساز جدید است. برای ناهمسانی محیط مقادیر استخراج شده از مراجع (Domenico and Miffin (1965) و نیز (Bear (1979) و (Ataie-Ashtiani and Ketabchi (2014) گرفته شده در محدوده شهر کربلا مدنظر قرار گرفته و در مرحله واسنجی مورد تدقیق قرار گرفته است. مقدار حداقل و حداکثر این ضریب بین ۰/۱۲۵ تا ۰/۵ برای همه لایه‌ها ملحوظ شده که براساس نتیجه واسنجی مدل، ۰/۱۷۴ به‌دست آمده است.

۲-۴-۲- دوره زمانی مدل‌سازی

دوره زمانی مدل‌سازی بر اساس داده و اطلاعات اندازه‌گیری شده از بهمن‌ماه ۱۳۹۵ تا مهرماه ۱۳۹۷ است. داده‌های یک ساله، بهمن‌ماه ۱۳۹۵ تا دی‌ماه ۱۳۹۶ برای واسنجی و به جهت اعتبارسنجی نیز دوره زمانی از بهمن‌ماه ۱۳۹۶ تا مهرماه ۱۳۹۷ استفاده شده است. مدل در حالت ماندگار بر اساس متوسط اطلاعات دوره مدل‌سازی توسعه یافته و مدل در حالت غیرماندگار ضمن واسنجی و اعتبارسنجی در بازه‌های زمانی اشاره شده، برای بررسی اثر دیوارهای آب‌بند در طول ۵ سال، اجرا و بررسی شده است.

۲-۵-۱- اجرای مدل و واسنجی آن

۲-۵-۱-۱- حالت ماندگار

پس از ساخت ویژگی‌های هندسی مدل و آماده شدن آن برای اجرا، مشخصات دوره بیلان برای اجرای مدل در حالت ماندگار تهیه شد و متوسط داده‌های تغذیه و متوسط سطح تراز آب زیرزمینی (استفاده از حداکثر داده‌ها از بهمن ۱۳۹۵ تا زمان تأثیر ساخت دیوارهای آب‌بند)، برای واسنجی مدل، مورد استفاده قرار گرفت. برای انجام واسنجی با استفاده از برنامه PEST، پارامترهای هدایت هیدرولیکی، تغذیه از سطح و همچنین نسبت ناهمسانی محیط (نسبت هدایت هیدرولیکی قائم به هدایت هیدرولیکی افقی) انتخاب شده و مقادیر اولیه آنها بر اساس برآوردهای اولیه و همچنین واسنجی دستی صورت گرفته، به مدل وارد شد. سپس با معرفی مقادیر حداقل و حداکثر مجاز برای هر یک از پارامترها و اعمال سایر تنظیمات در برنامه PEST عملیات واسنجی خودکار انجام گردید. در جدول ۳، مقادیر واسنجی شده مدل

Table 3- Minimum and maximum values of the hydraulic conductivity and the calibrated value for the model under steady state condition

Layer number	Soil type	Layer thickness (m)	Depth from the ground level (m)	Hydraulic conductivity (m/day)		
				Minimum	Maximum	Calibrated value
1	Filler	0.24 to 3.7	0.0 to 3.7	4.0	8.0	4.91
2	Sand	0.22 to 5.0	0.24 to 5.5	4.0	11.0	7.41
3	Sand-silt	0.51 to 4.0	0.78 to 7.5	3.0	11.0	11.0
4	Fine sand-clay	0.5 to 6.0	1.8 to 10	1.5	7.0	1.59
5	Fine dense sand	6.5 to 13.6	3.0 to 22.0	0.3	4.0	0.31
6	Cemented sand	0.3 to 6.5	13.6 to 23.8	0.1	1.0	0.11
7	Silt-sand	3.6 to 14.5	14.1 to 33.5	3.0	7.0	4.93
8	Coarse sand-clay	0.5 to 6.6	19.0 to 38.5	3.0	7.0	6.86
9	Coarse dense sand	0.5 to 15.4	22.0 to 43.1	0.3	4.0	1.01
10	Hard clay	0.5 to 4.7	35.0 to 43.6	0.0001	0.01	0.004

آزمون پمپاژ در مطالعات قبلی و تلفیق آن با بیلان آب زیرزمینی بدست آمده است. در جدول ۴، این بازه‌ها آورده شده است. این پارامتر برای لایه‌های خاک در مدل‌سازی مطالعه حاضر از طریق واسنجی تدقیق شده و مقدار آن در جدول اشاره شده، ملاحظه می‌شود.

۲-۶- سناریوهای شبیه‌سازی

در جدول ۵، سناریوهای مورد نظر برای بررسی توسط مدل عددی تهیه شده خلاصه شده است که معطوف به بررسی اثرات دیوارهای آب‌بند زیرسطحی ساخته شده در فازهای مختلف طرح و اندرکنش سازه و آب‌های زیرزمینی در شرایط مختلف محیطی است.

۲-۵-۲- حالت غیرماندگار

چارچوب مدل در حالت غیرماندگار بر پایه حالت ماندگار واسنجی شده بوده و مقادیر هدایت هیدرولیکی و نسبت ناهمسانی در آن، طی چندین بار ارزیابی مقادیر واسنجی شده در هر دو مدل در حالت ماندگار و غیرماندگار نهایی شد. همچنین تغییرات نرخ تغذیه خالص در بازه ۰/۷ تا ۱/۵ برابر نرخ متوسط آن، بر اساس تغییرات درون‌سالی مشاهده شده در چاه‌های مشاهداتی دوره واسنجی، به صورت ماهیانه تنظیم شده است. مقادیر حداقل و حداکثر ضریب ذخیره آبخوان نیز که توانایی ذخیره‌سازی آب نفوذ یافته به آبخوان را نشان می‌دهد، بر اساس بازه تغییرات گزارش شده در مراجع (مانند Domenico and Miffin, 1965 و Ataie-Ashtiani and Ketabchi, 2014)، نتایج

Zone number	Calibrated value (mm/day)
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	2.0
8, 10, 15, 19, 20, 23, 27, 41	1.24
9, 11, 17, 29, 33, 50	0.38
32, 25, 24, 22, 16	0.0007
12, 14, 35, 39, 40, 43, 45, 63	0.0001
13, 18, 26, 31, 36	1.77
21, 28, 30	1.95
34, 49, 51, 61	0.0097
37, 38, 53, 58	0.0061
52, 54, 56, 59, 60, 62	1.03
42, 44, 46, 47, 48, 57	2.79
55	0.98

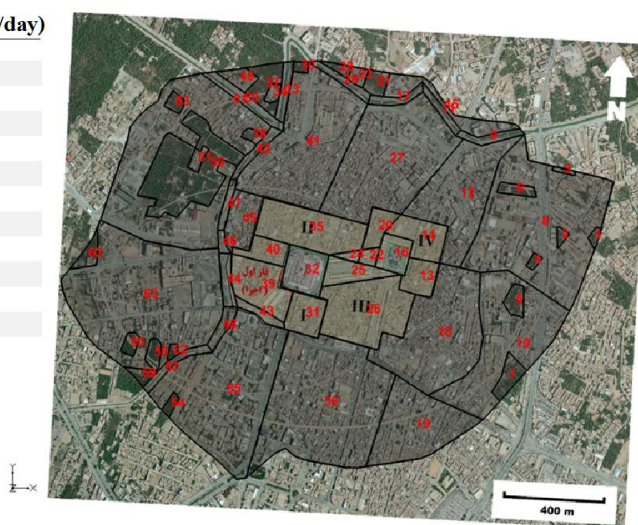


Fig. 5- Recharge zones to implement the net recharge rate and the calibrated values for the model under steady state condition

شکل ۵- نواحی تغذیه برای اعمال نرخ تغذیه خالص و مقادیر واسنجی شده مدل در حالت ماندگار

Table 4- Minimum and maximum ranges and the calibrated values of storage coefficient

جدول ۴- بازه حداقل و حداکثر و مقادیر واسنجی شده ضریب ذخیره خاک

Layer number	Soil type	Minimum	Maximum	Calibrated storage coefficient (-)
1	Filler	0.01	0.15	0.02
2	Sand	0.01	0.15	0.03
3	Sand-silt	0.01	0.15	0.035
4	Fine sand-clay	0.001	0.01	0.05
5	Fine dense sand	0.001	0.01	0.02
6	Cemented sand	0.0001	0.01	0.001
7	Silt-sand	0.01	0.1	0.02
8	Coarse sand-clay	0.01	0.1	0.025
9	Coarse dense sand	0.001	0.01	0.006
10	Hard clay	0.0001	0.001	0.0001

Table 5- Scenarios

جدول ۵- سناریوها

Scenario number	Content	Description
1	The effect of cutoff wall in the constructed phase	
2	The effect of cutoff wall in Phase 1	Investigation on the effect of constructing cutoff walls on the groundwater level and the direction of flow in comparison with the pre-development condition
3	The effect of cutoff wall in Phases 1 and 2	
4	The effect of cutoff wall in Phases 1, 2, and 3	
5	The effect of cutoff wall in Phases 1, 2, 3, and 4	
6	The effect of concrete permeability of cutoff wall in the constructed phase	Investigation on the effect of the variation of the concrete permeability of cutoff walls on the groundwater condition in the study area

۳- نتایج و بحث

۳-۱- دقت مدل پایه در حالت ماندگار

سانتیمتر (معادل خطای نسبی ۰/۴ درصد) برآورد شده است. همچنین مقدار ضریب تبیین برابر ۰/۹۰۷ و مقدار جذر میانگین مربعات خطا برابر ۲۸ سانتیمتر (معادل ۶/۶ درصد مقدار جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده) بدست آمده است. بررسی بیلان آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی نشان می‌دهد که ورودی به آبخوان از طریق مرزهای هد مشخص و تغذیه خالص از سطح محدوده صورت می‌گیرد که به ترتیب ۱۳/۵ و ۷۶۸/۸ هزار مترمکعب بر سال می‌باشد. خروجی از مرزهای محدوده نیز ۷۸۲/۳ هزار مترمکعب بر سال است.

در شکل ۶ مقایسه مقادیر سطح تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده تراز آب زیرزمینی و دقت محاسبات براساس مدل پایه در حالت ماندگار نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل پایه واسنجی شده از دقت مناسبی برخوردار است. مقدار خطای متوسط برابر ۰/۳ سانتیمتر و متوسط خطای مطلق برابر با ۲۰/۱

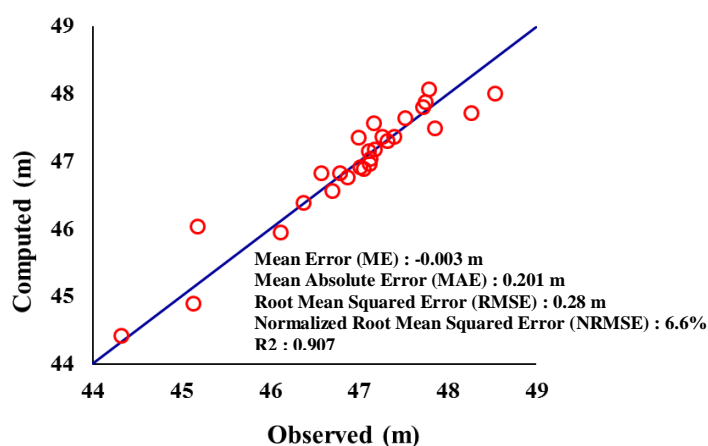


Fig. 6- Comparison of observed and simulated groundwater level values for the model under steady state condition

شکل ۶- مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده (محاسباتی) و اندازه‌گیری، برای سطح تراز آب زیرزمینی برای مدل در حالت ماندگار

۳-۲- دقت مدل در حالت غیرماندگار

هیدروگراف آبخوان بر اساس سطح تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در شکل ۷ ارائه شده است. برای رسم این هیدروگراف‌ها از شبکه تیسن بر اساس چاه‌های مشاهداتی در هر ماه استفاده شده است. این هیدروگراف نشان می‌دهد که در دوره زمانی مورد بررسی، رفتار مدل مطلوب بوده و اختلاف ناچیزی بین داده‌های محاسباتی و مشاهداتی وجود دارد. مقدار متوسط خطای مطلق حدود ۳/۵ سانتیمتر (معادل خطای نسبی ۰/۰۷ درصد) برای دوره واسنجی است. مقدار جذر میانگین مربعات خطا نیز برابر ۴/۲ سانتیمتر (معادل ۱۷/۲ درصد مقدار جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده) برای این دوره برآورد شده است که مناسب ارزیابی می‌شود.

مقادیر هدایت هیدرولیکی، ضریب ذخیره و همچنین تغذیه خالص دوره واسنجی برای دوره اعتبارسنجی نیز در نظر گرفته شده و شبیه‌سازی از بهمن ۱۳۹۶ تا مهر ۱۳۹۷ ادامه یافته است. همچنین مقدار برداشت آب زیرزمینی در محدوده فاز اول (ساخته شده) بر اساس پیشرفت مراحل اجرای دیوار آب‌بند و نتایج دوره واسنجی اعمال شده است. مقدار متوسط خطای مطلق حدود ۱۱ سانتیمتر (معادل خطای نسبی ۰/۲۳ درصد) و مقدار جذر میانگین مربعات خطا برابر ۱۱/۵ سانتیمتر (معادل ۵۰/۸ درصد مقدار جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده) برای دوره اعتبارسنجی برآورد شده است. مطابق با هیدروگراف ارائه شده در شکل ۸، حداکثر و حداقل سطح تراز آب زیرزمینی برابر با ۴۷/۱۹ و ۴۶/۹۲ متر بدست آمده است. متوسط تراز آب زیرزمینی در محدوده ۴۷/۰۷ متر است. بررسی دوره اعتبارسنجی نشان می‌دهد که اگر چه تغییرات زیادی ناشی از فعالیت‌های انجام شده (نظیر ساخت بخش‌های مختلف دیوار، خاکبرداری، پمپاژهای متغیر در مکان‌های مختلف داخل دیوار و غیره) در محدوده فاز اول (ساخته شده) وجود

دارد اما رفتار سیستم آب زیرزمینی در محدوده بیرون از دیوار آب‌بند با مدل، به صورت مطلوبی قابل شبیه‌سازی است هر چند که دقت حاصل شده به دلیل موارد ذکر گردیده، خیلی دقیق ارزیابی نمی‌شود.

۳-۳- نتایج سناریوها

در شکل ۸، نتایج اثرگذاری شرایط تشریح شده در سناریوهای جدول ۶ به صورت نقشه هم‌تغییرات سطح تراز آب زیرزمینی بر اساس مقایسه شرایط مدل پایه (قبل از توسعه) و وضعیت بعد از ۵ سال از اجرای دیوار آب‌بند ارائه شده است. سناریو ۱ برای اجرای دیوار آب‌بند در فاز اول (ساخته شده) با تحلیل بررسی اثر آن بر روی سطح تراز و عمق آب زیرزمینی انجام شده است. در این حالت مقدار متوسط سالانه برداشت آب از محدوده به جهت حفظ تراز آب در عمق حدود ۱۵ متری از سطح زمین (تراز فونداسیون ساخت و ساز طرح توسعه) که معادل نشت اتفاق افتاده از لایه زیرین در دوره بهره‌برداری است، حدود ۲۳۰۰ مترمکعب بر سال برآورد شده است.

تغییرات سطح تراز آب زیرزمینی نشان می‌دهد که تغییرات آن بین ۰/۵۵- متر (حداکثر افت سطح تراز آب زیرزمینی) تا ۰/۴۴ متر (حداکثر افزایش سطح تراز آب زیرزمینی) می‌باشد که موقعیت آنها بر روی شکل ۸ نشان داده شده است. اثر افزایش سطح تراز آب زیرزمینی در ضلع شمالی و شمال شرقی و اثر افت سطح آن بیشتر در ضلع جنوب غربی فاز ۱ ساخته شده ملاحظه می‌گردد. بر اساس شبیه‌سازی در حالت غیرماندگار، اثر دیوار طی ۳ الی ۴ ماه پس از بسته شدن دیوار، بر روی وضعیت آب زیرزمینی پشت دیوار تثبیت می‌شود به طوری که سطح تراز آب زیرزمینی در ماه‌های مختلف دارای اختلاف ناچیزی است.

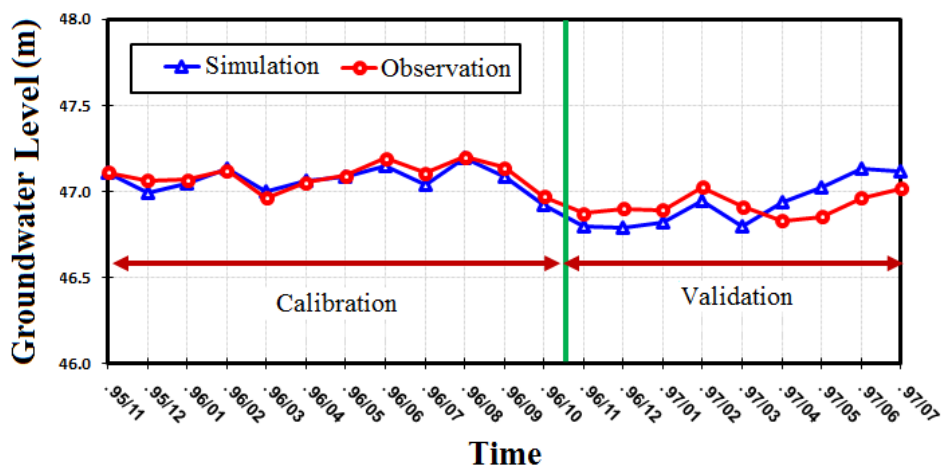


Fig. 7- Calibrated and validated aquifer hydrograph

شکل ۷- هیدروگراف آبخوان در حالت واسنجی و اعتبارسنجی

با تکمیل اجرای کامل فاز ۱ طرح، به جهت حفظ تراز آب در عمق حدود ۱۵ متری از سطح زمین، متوسط سالانه برداشت آب از محدوده که معادل نشت اتفاق افتاده از لایه زیرین در دوره بهره‌برداری است، حدود ۶۳۰۰ مترمکعب بر سال برآورد شده است. در شکل ۸، نقشه اثرگذاری اجرای کامل فاز ۱ طرح در قالب سناریو ۲ ارائه شده است. برای این حالت مقایسه نتایج این سناریو با سناریو مدل پایه نشان می‌دهد که تغییرات تراز آب زیرزمینی بین ۰/۸۴- متر (حد اکثر افت سطح تراز آب زیرزمینی) تا ۰/۵۸ متر (حد اکثر افزایش سطح تراز آب زیرزمینی) می‌باشد که موقعیت آنها بر روی شکل ۸ نشان داده شده است.

متوسط سالانه برداشت آب از محدوده به جهت حفظ تراز آب در عمق ۱۵ متری که معادل نشت اتفاق افتاده از لایه زیرین در دوره بهره‌برداری است با اجرای فاز ۱ و ۲، حدود ۷۲۰۰ مترمکعب بر سال برآورد شده است. متوسط سالانه برداشت برای فاز ۱ و ۲ به تفکیک برابر با ۶۰۰۰ و ۱۲۰۰ مترمکعب بر سال محاسبه شده است. مقایسه نتایج برای این سناریو (سناریو ۳) نشان می‌دهد که تغییرات سطح تراز آب زیرزمینی بین ۰/۹۳- متر (حد اکثر افت سطح تراز آب زیرزمینی) تا ۰/۹۵ متر (حد اکثر افزایش سطح تراز آب زیرزمینی) می‌باشد که موقعیت آنها بر روی شکل ۸ نشان داده شده است. با تکمیل اجرای کامل فاز ۱، ۲ و ۳ طرح، متوسط سالانه برداشت آب از محدوده به جهت حفظ تراز آب در عمق ۱۵ متری که معادل نشت اتفاق افتاده از لایه زیرین در دوره بهره‌برداری است حدود ۷۰۰۰ مترمکعب بر سال برآورد شده است. متوسط سالانه برداشت برای فاز ۱ و ۲ و ۳ به تفکیک برابر با ۵۲۰۰ و ۱۰۰۰ و ۸۰۰ مترمکعب بر سال محاسبه شده است.

برای این حالت مقایسه نتایج این سناریو (سناریو ۴) با سناریو مدل پایه نشان می‌دهد که تغییرات تراز آب زیرزمینی بین ۱/۰۵- تا ۰/۱۷ متر می‌باشد. در حالتی که همه فازها تکمیل شود، متوسط سالانه برداشت آب از محدوده به جهت حفظ تراز آب در عمق ۱۵ متری که معادل نشت اتفاق افتاده از لایه زیرین در دوره بهره‌برداری است حدود ۶۹۰۰ مترمکعب بر سال برآورد شده است. متوسط سالانه برداشت برای فاز ۱، ۲، ۳ و ۴ به تفکیک برابر با ۵۲۰۰، ۹۱۰، ۳۹۰ و ۴۰۰ مترمکعب بر سال محاسبه شده است. نتایج سناریو ۵ نشان می‌دهد که تغییرات سطح تراز آب زیرزمینی بین ۱/۰۶- تا ۰/۱۴ متر می‌باشد. به جهت بررسی سطح نفوذپذیری بتن، ابتدا مدل برای فاز ۱ (ساخته شده) با نفوذپذیری حدود 10^{-8} متر بر روز در نظر گرفته شده است که شرایط معمول در اجرای مطلوب است و از نفوذ آب از داخل دیوار بتنی ممانعت می‌کند. نتایج در سناریو ۱ نشان داده شده است. به جهت بررسی اثر نفوذپذیری بتن بر سطح تراز آب زیرزمینی، نفوذپذیری بتن به شرایط

ضعیف تا متوسط و حدود 10^{-4} متر بر روز تغییر داده شده و نتایج حاصل در قالب سناریو ۶ در شکل ۸ آمده است. اثر ناچیز در اطراف دیوار و سطح تراز آب زیرزمینی قابل مشاهده است اما با کاهش سطح نفوذپذیری بتن که در اثر اجرای ضعیف است، آب به داخل فاز ۱ (ساخته شده) نفوذ خواهد داشت و تمهیدات کنترل آن لازم است. در جدول ۶ خلاصه‌ای از نتایج بدست آمده در این بخش ارائه شده است. تراز آب زیرزمینی محاسباتی برای سناریوهای تعریف شده در شش محل مشخص شده است. در توسعه فازهای توسعه مورد بررسی قرار گرفته در محدوده مورد مطالعه، یکی از موارد مهم، حفظ پایداری سازه‌های مجاور طرح توسعه است. ساخت دیوار آب‌بند در پایان فاز ۲ (تکمیل فازهای ۱ و ۲)، منجر به بالا آمدن تراز آب زیرزمینی تا حدود ۱ متر خواهد شد. بالا آمدن سطح تراز آب زیرزمینی در محدوده حرم، می‌تواند باعث بروز تغییر شکل در ساختمان اماکن اطراف محدوده توسعه و یا نفوذ آب و تخریب سازه زیرزمینی آن شود که باید در فرآیند اجرای این فازها، با اتخاذ راهکارهایی مانند تغییر توالی ساخت فازهای توسعه، نصب تجهیزات زهکشی در بیرون دیوار آب‌بند، تغییر طراحی‌های سازه‌ای، پمپاژ آب زیرزمینی بالا آمده نسبت به رفع این خطر، اقدام شود. همچنین در قسمت‌هایی که از سطح تراز آب زیرزمینی کاسته می‌شود، خطرانی مانند فرونشست‌های تحکیمی ناشی از افت تراز آب زیرزمینی محتمل است که با توجه به حساسیت محیط شهری و اماکن موجود در محدوده لازم است پیش‌بینی‌های لازم انجام شود.

۴- خلاصه و نتیجه‌گیری

دیوارهای آب‌بند بتنی در این مطالعه با عمق ۴۰ متر به جهت تحقق اهداف توسعه مدنظر و به منظور کاستن موضعی سطح تراز آب زیرزمینی برای ساخت اماکن در زیر سطح زمین ساخته می‌شوند. همچنین به جهت افزایش دقت مدل‌سازی منطقه از داده‌های اندازه‌گیری شده سطح تراز آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهداتی بهره گرفته شده است. در این مطالعه به جهت بررسی اندرکنش آب‌های زیرزمینی و دیوارهای آب‌بند بتنی زیرسطحی، ۶ سناریو شامل فازهای ساخت دیوارهای آب‌بند بتنی و میزان نفوذپذیری این دیوارها مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه مقادیر سطح تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده تراز آب زیرزمینی و دقت محاسبات براساس مدل پایه در حالت ماندگار نشان می‌دهد که مدل تهیه شده از دقت مناسبی برخوردار است و مقدار متوسط خطای مطلق برابر ۲۰/۱ سانتیمتر برآورد شده است. همچنین در رابطه با مدل پایه در حالت غیرماندگار، بررسی هیدروگراف آبخوان در حالت واسنجی و اعتبارسنجی نشان می‌دهد که در دوره زمانی مورد بررسی (بهمین ماه

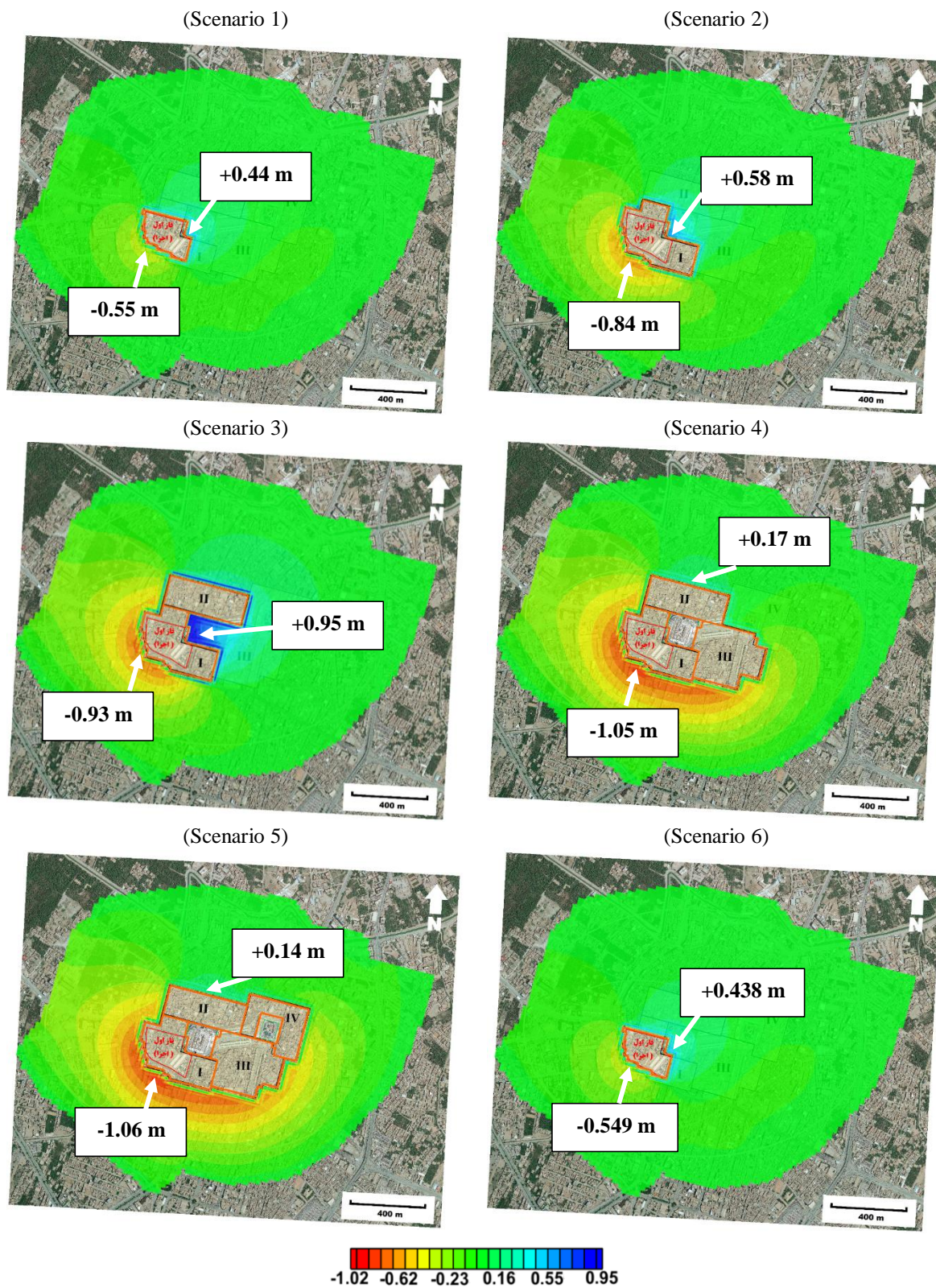
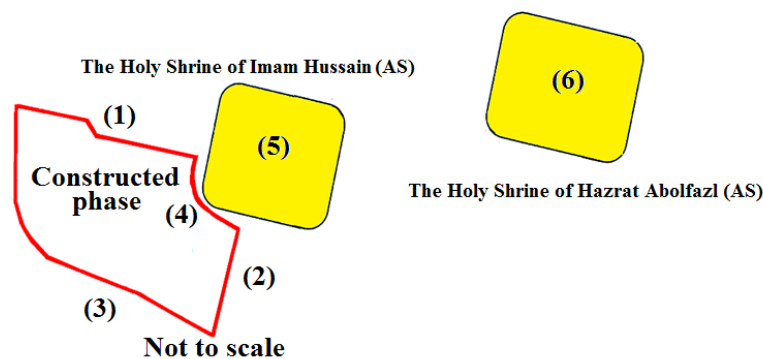


Fig. 8- The groundwater level changes (m) map compared to the pre-development condition
 شکل ۸- نقشه هم تغییرات سطح تراز آب زیرزمینی (بر حسب متر) نسبت به شرایط قبل از توسعه

Table 6- Summary of the results

جدول ۶- خلاصه‌ای از نتایج



Scenario number	Description	Groundwater level value (m)					
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
-	The simulated groundwater level for the steady state model	46.87	47.18	46.34	47.26	47.44	47.76
1	The effect of cutoff wall in the counstructed phase	46.98	47.48	45.84	47.60	47.64	47.78
2	The effect of cutoff wall in Phase 1	-	-	45.52	47.74	47.73	47.80
3	The effect of cutoff wall in Phases 1 and 2	-	-	45.42	48.12	48.12	47.93
4	The effect of cutoff wall in Phases 1, 2, and 3	-	-	45.35	-	-	47.70
5	The effect of cutoff wall in Phases 1, 2, 3, and 4	-	-	45.34	-	-	-
6	The effect of concrete permeability of cutoff wall in the counstructed phase	47.01	47.56	45.88	47.66	47.71	47.85

۵- فهرست علائم

h	سطح تراز آب زیرزمینی (L)
W	میزان تغذیه/تخلیه آبخوان (1/T)
S _s	ضریب ذخیره مخصوص (1/L)
t	زمان (T)
K _{xx}	هدایت هیدرولیکی در راستای x (L/T)
K _{yy}	هدایت هیدرولیکی در راستای y (L/T)
K _{zz}	هدایت هیدرولیکی در راستای z (L/T)

۱۳۹۵ تا مهرماه ۱۳۹۷)، رفتار مدل مطلوب بوده است و مقدار متوسط خطای مطلق حدود ۳/۵ سانتیمتر برای دوره واسنجی است. نتایج سناریوهای بررسی شده نشان می‌دهد که در تکمیل و توسعه فازهای پیش‌بینی شده، سطح تراز آب زیرزمینی تا بیش از یک متر نسبت به شرایط قبل از توسعه می‌تواند افزایش و یا کاهش را در پشت دیوارهای آب‌بند داشته باشد. از این رو لازم است از ورود آب به بخش‌های تحتانی اماکن موجود به جهت حفظ پایداری سازه‌های مجاور و کنترل تغییر شکل ساختمان‌ها به دلیل فرونشست‌های تحکیمی جلوگیری نمود.

۶- تشکر

نویسندگان این مقاله از پژوهشکده مهندسی آب دانشگاه تربیت مدرس، مؤسسه مهندسی مشاور طرح جامع و شرکت خدمات بهسازی خاک سامان‌پی به جهت در اختیار قرار دادن بخشی از مراجع، داده‌ها و اطلاعات مورد استفاده در این مطالعه و همچنین حمایت مالی طرح، کمال تشکر و سپاس را دارند.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Horizontal Flow Barrier Package
- 2- Finite-Difference Methods
- 3- Finite-Element Methods

در این راستا راهکارهایی از جمله (۱) تغییر توالی ساخت فازها، (۲) تغییر طراحی‌های سازه‌ای و (۳) نصب زهکش یا تخلیه آب پشت دیوار آب‌بند قابل بررسی است. همچنین به جهت بررسی اثر نفوذپذیری بتن بر سطح تراز آب زیرزمینی، نفوذپذیری بتن به شرایط ضعیف تا متوسط تغییر داده شد که نتایج به دست آمده، اثر بسیار ناچیز در اطراف دیوار و سطح تراز آب زیرزمینی را نشان داد. با کاهش سطح نفوذپذیری بتن، آب به داخل فاز اول (ساخته شده) نفوذ خواهد داشت که در این راستا لازم است بتن با نفوذپذیری مطلوب جهت عدم امکان نفوذ آب از دیوار بتنی (حدود ۱۰^{-۸} متر بر روز) مورد توجه قرار گیرد.

- Domenico P A, Mifflin M D (1965) Water from low-permeability sediments and land subsidence. *Water Resources Research* 1(4):563-576
- Ducommun R (2010) Estimation et cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines en milieu urbain. Ph.D. Thesis, Université de Neuchâtel
- Epting J, Huggenberger P, Rauber M (2008) Integrated methods and scenario development for urban groundwater management and protection during tunnel road construction: A case study of urban hydrogeology in the city of Basel, Switzerland. *Hydrogeology Journal* 16(3):575-591
- Font-Capó J, Vázquez-Suñé E, Carrera J, Martí D, Carbonell R, Pérez-Estaun A (2011) Groundwater inflow prediction in urban tunneling with a tunnel boring machine (TBM). *Engineering Geology* 121:46-54
- Harbaugh AW (2005) MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water model. the groundwater flow process: US Department of the Interior, US Geological Survey Reston VA, USA
- Hussein AO, Shahid S, Basim KN, Chelliapan S (2016) Modeling sewer flow in a pilgrimage city. *Journal of Environmental Engineering* 142:05016005
- Jiao JJ, Wang XS, Nandy S (2006) Preliminary assessment of the impacts of deep foundations and land reclamation on groundwater flow in a coastal area in Hong Kong, China. *Hydrogeology Journal* 14(1-2):100-114
- Ketabchi H, Ataie-Ashtiani B (2015) Review: Coastal groundwater optimization - advances, challenges, and practical solutions. *Hydrogeology Journal* 23(6):1129-1154
- Ketabchi H, Jahangir MS, (2019) Probabilistic numerical assessment of seawater intrusion overshoot in heterogeneous coastal aquifers. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 33:1951-1968
- Mahmoodzadeh D (2020) Risk-based sustainable management of coastal groundwater resources. Ph.D. Thesis, School of Civil Engineering, University of Tehran (In Persian)
- Mahmoodzadeh D, Karamouz M (2019) Seawater intrusion in heterogeneous coastal aquifers under flooding events. *Journal of Hydrology* 568:1118-1130
- Merrick NP, Jewell CM (2003) Modelling of the groundwater impact of a sunken urban motorway in Sydney, Australia. *Materials and Geoenvironment* 50:229-232
- 4- Horizontal Flow Barrier (HFB)
5- Hydraulic Conductance (HC)
- ۷- مراجع
- Al-Khateeb HMM (2001) Problem of shallow groundwater level in the center of Kerbala city evaluation and simulation. Ph.D. Thesis, Ministry of Higher Education and Scientific Research Al-Mustansiria University
- Ataie-Ashtiani B, Ketabchi H (2014) Groundwater hydraulics and contamination. Sharif University of Technology Publication, 1030p (In Persian)
- Attard G, Winiarski T, Rossier Y, Eisenlohr L (2016) Impact of underground structures on the flow of urban groundwater. *Hydrogeology Journal* 24(1):5-19
- Bear J (1979) *Hydraulics of groundwater* McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering. New York, 463p
- Boukhemacha MA, Gogu CR, Serpescu I, Gaitanaru D, Bica I (2015) A hydrogeological conceptual approach to study urban groundwater flow in Bucharest city, Romania. *Hydrogeology Journal* 23(3):437-450
- Chang Q, Zheng T, Zheng X, Zhang B, Sun Q, Walther M (2019) Effect of subsurface dams on saltwater intrusion and fresh groundwater discharge. *Journal of Hydrology* 576:508-519
- Dassargues A (1977) Groundwater modelling to predict the impact of a tunnel on the behaviour of a water table aquifer in urban conditions. In *Groundwater in the Urban Environment: Problems, Processes and Management*, Proc. of XXVII IAH Congress 225-230. Balkema
- Deveughèle M, Zokimila P, Cojean R (2010) Impact of an impervious shallow gallery on groundwater flow. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 69(1):143-152
- Dewan (2014) The urban renewal of the city center of holy Karbala (The old town). Comprehensive Master Plan Report
- Ding G, Jiao JJ, Zhang D (2008) Modelling study on the impact of deep building foundations on the groundwater system. *Hydrological Processes* 22(12):1857-1865
- Doherty J (2005) PEST: model independent parameter estimation, user manual, 5th edn. Watermark Numerical Computing, Brisbane

- Sun Q, Zheng T, Zheng X, Chang Q, Walther M (2019) Influence of a subsurface cut-off wall on nitrate contamination in an unconfined aquifer. *Journal of Hydrology* 575:234-243
- Tosee Consulting Engineers Corporation (TCE) (2017) Monitoring and field measurement plan, The Imam Hussain (AS) holy shrine development plan (Aqila Bani-Hashem Sahn). Tosee Consulting Engineers Company (In Persian)
- Tarh-e-Jameh Consulting Engineering Institute (TJCEI) (2015) Structure design studies (First phase), Assessment on the results of geotechnical experiments and material strength. The Imam Hussain (AS) holy shrine development plan (Aqila Bani-Hashem Sahn) (In Persian)
- Tarh-e-Jameh Consulting Engineering Institute (TJCEI) (2016) Geotechnical studies, Assessment on the results of geotechnical experiments and material strength. The Imam Hussain (AS) holy shrine development plan (Aqila Bani-Hashem Sahn) (In Persian)
- Obaid HA, Shahid S, Basim KN, Chelliapan S (2015) Modeling of wastewater quality in an urban area during festival and rainy days. *Water Science and Technology* 72(6):1029-1042
- Pujades E, López A, Carrera J, Vázquez-Suñé E, Jurado A (2012) Barrier effect of underground structures on aquifers. *Engineering Geology* 145:41-49
- Ricci G, Enrione R, Eusebio A, Crova R (2007) Numerical modelling of the interference between underground structures and aquifers in urban environment. The Turin subway line 1. *Underground Space*. Taylor and Francis Group, London 1323-1329
- Saghi-Jadid M, Ketabchi H (2019) Restoration management of groundwater resources using the combined model of numerical simulation–evolutionary ant colony optimization. *Iran-Water Resources Research* 15(2):119-133 (In Persian)
- Shen Y, Xin P, Yu X (2020) Combined effect of cutoff wall and tides on groundwater flow and salinity distribution in coastal unconfined aquifers. *Journal of Hydrology* 581:124444