تحقیقات آب و خاک ایران، دورهٔ ۴۸، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۳۹۶ (ص ۴۲۸-۴۱۷)

مدل‌سازی عددی آبکشی محل اجرای حوضچه پمپاژ در روش آبگیری باز از دریاها با استفاده از نرم‌افزار MODFLOW

مرتضی زنگانه [۱*]، سید حامد معراجی [۲]

۱. استادیار، بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گلستان، گرگان

۲. استادیار، بخش مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۴/۱۵- تاریخ بازنگری: ۲۵/ ۶/ ۱۳۹۵- تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۷/۳)

چکیده

حوضچه پمپاژ، یکی از مهمترین سازه‌ها در روش آبگیری باز از دریاها بوده که اجرای آن مستلزم پایین آوردن تراز آب زیرزمینی با رویکرد عدم نفوذ آب دریا به محل اجرای آن می‌باشد. در این مقاله دو رویکرد متداول کاهش تراز آب زیرزمینی به‌وسیله چاه‌های آبکش بزرگ و چاه‌های آبکش نقطه‌ای جهت اجرای حوضچه پمپاژ کارخانه آب‌شیرین‌کن شهر بوشهر، با کمک نرم‌افزار MODFLOW به‌عنوان شبیه‌ساز، مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق با در نظر گرفتن تعداد ۲۶ عدد چاه آبکشی بزرگ (با دبی برداشت ۰/۵ تا ۵/۵ لیتر بر ثانیه) و ۱۱۹ عدد چاه نقطه‌ای (با دبی برداشت ۰/۱ تا ۱/۰ لیتر بر ثانیه)، نتایج نشان‌دهنده کارایی هر دو روش بوده و همچنین با آنالیز حساسیت نسبت به میزان نفوذپذیری خاک محل به‌عنوان پارامتر متغیر در زمان و مکان، مشخص شد در مواقع عدم قطعیت نسبت به پارامتر نفوذپذیری، سیستم آبکشی نقطه‌ای دارای کارایی بهتری می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آبکشی، چاه‌های آبکش بزرگ، چاه‌های آبکشی نقطه‌ای، سواحل بوشهر

مقدمه

استفاده از حوضچه‌های پمپاژ به‌منظور پیش‌تصفیه آب‌های ورودی به کارخانه‌های آب‌شیرین‌کن و سیستم خنک‌کننده نیروگاه‌ها از اهمیت زیادی جهت جلوگیری از آسیب ناشی از ورود رسوبات به این تأسیسات برخوردار می‌باشد. ازآنجایی‌که این سازه‌ها در کنار سواحلی اجرا می‌شوند که دارای تراز آب زیرزمینی بالایی می‌باشند، تعبیه و طراحی یک سیستم آبکشی با کارایی بالا به‌منظور کاهش تراز آب زیرزمینی جهت اجرای این سازه‌ها امری اجتناب‌ناپذیر هست. یکی از راه‌کارهای کاهش تراز آب در محل اجرای این سازه‌ها، استفاده از چاه‌های آبکشی می‌باشد. هدف از این مقاله ارائه روشی به‌منظور مدل‌سازی آبکشی محل اجرای حوضچه پمپاژ به‌وسیله چاه‌های آبکش با استفاده از نرم‌افزار مبتنی بر روش عددی تفاضل‌های محدود محیط‌های متخلخل MODFLOW می‌باشد. این نرم‌افزار تاکنون توسط پژوهشگران زیادی جهت مدل‌سازی کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته است (Mashhadi and Baghvand, 2010). مدل سه‌بعدی تفاضل محدود MODFLOWتوسط McDonald و Harbaugh در سال 1988 ارائه شده است. این نرم‌افزار در مدل‌سازی جریان‌های غیرماندگار در محیط متخلخل اشباع، غیراشباع، غیر همگن و غیر ایزوتروپ به‌طور گسترده‌ای در سراسر دنیا مورد استفاده بوده است (Kalantari, Chitsazan and Kashkoli, 2002، 1998). در ادامه بخشی از کاربردهای نرم‌افزار MODFLOW جهت مدل‌سازی فرآیندهای مختلف آب‌های زیرزمینی ارائه می‌شود.

نرم‌افزار MODFLOW به همراه نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) به‌منظور مدل‌سازی سه‌بعدی آب‌های زیرزمینی در حوضه آبریز نیمه‌خشک Zéramdine–Béni Hassen (ZBH) کشور تونس استفاده شد(Fethi *et al.*, 2012). نتایج نشان از حساسیت زیاد حوضه مذکور نسبت به نفوذ آب سطحی و نفوذپذیری می‌دهد. نرم‌افزار MODFLOW برای مدل‌سازی حرکت آلودگی در آبخوان‌های غیرمحصور در اثر دفن زباله نیز استفاده شده است (Saghravani and Mustapha, 2011). Derakhshandehro *et al.* (2009) نیز با استفاده از نرم-افزار MODFLOW به شبیه‌سازی حرکت آب‌های زیرزمینی در حوضه رودخانه بشار اقدام کردند. در تحقیق دیگری در ایران نیز با استفاده از این نرم‌افزار به مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی در نزدیک معدن سنگ‌آهن سه چاهون پرداخته شد. نتایج نشان داد که استفاده از چاه‌های آبکش در اطراف منطقه طرح می‌تواند در کاهش تراز آب زیرزمینی کارساز باشد (Mohamadkhani

* نویسنده مسئول : m.zanganeh@gu.ac.ir

Hossiensarbazi and Esmaeili (2013) .and Katibeh, 2004) اخیراً نیز به مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی در دشت نیشابور با استفاده از نرم‌افزار MODFLOW پرداختند. نتایج نشان داد که منطقه موردنظر دارای پتانسیل مناسبی جهت تغذیه آب زیرزمینی می‌باشد. با توجه به اهمیت آب در توسعه اقتصادی-اجتماعی و همچنین محدودیت منابع آبی موجود در مناطق خشکی مانند استان یزد در تحقیق دیگری (2010) Barani *et al.* جهت مطالعه تغییرات سطح ایستایی آب زیرزمینی و اعمال مدیریت بهینه در منطقه موردنظر از نرم‌افزارMODFLOW استفاده کردند. Hashemi *et al.* (2012) با استفاده از نرم‌افزار MODFLOWبه سنجش سیستم منابع آب زیرزمینی در شبکه آبیاری و زهکشی البرز به‌وسیله داده‌های چاه‌های مشاهداتی برای دوره زمانی ۵ ساله پرداختند. آنها با استفاده از این مدل‌سازی به بررسی اثرات آینده احداث شبکه آبیاری و زهکشی بر رفتار آب‌های زیرزمینی منطقه پرداختند. Zeighaminezhad *et al.* (2015) با استفاده از نرم‌افزار MODFLOW به تعیین حریم بهداشتی چاه‌های آب شرب در دشت کرمان مبادرت کردند. Derakhshandehro and Barani (2015) در تحقیق دیگری اثر تغذیه مصنوعی را بر روی آبخوان دشت امامزاده جعفر گچساران با کمک مدل ریاضی و با استفاده از مدل عددی MODFLOW بررسی کردند. همچنین Alavimoghdam Janparvar and (2015) با استفاده از نرم‌افزار MODFLOW به بررسی اثر چاه‌های بهره‌برداری بر روی روند افت سطح آب زیرزمینی دشت هومند آبسرد پرداختند. Torshizi *et al.* (2015). به شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در دشت سروستان با استفاده از نرم‌افزار MODFLOW پرداختند و مشخص کردند دوره ترسالی و خشک‌سالی تأثیری زیادی بر تراز آب زیرزمینی در آن دشت ندارد.

به غیر از کارهایی که در ایران انجام شده، برای مشخص کردن محدوده تغذیه‌کننده آب‌های زیرزمینی در ویسکانسین آمریکا، محدوده چاه‌های آب شرب شهر استروگن‌بای این منطقه با نرم‌افزار MODFLOW شبیه‌سازی شد. مدل مذکور را در دو حالت ماندگار و غیرماندگار اجرا شد و در نهایت با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از مدل و مقایسه آن‌ها با داده‌های مشاهداتی این نتیجه حاصل شد که برای منطقه مذکور اجرای این مدل در حالت غیر ماندگار، بازتاب بهتری از رفتار آبخوان ارائه می‌دهد (Todd and Kenneth, 2001). همچنین از نتایج اجرای مدل مشخص شد که ناحیه تغذیه‌کننده چاه‌ها، در فاصله ۱۰ کیلومتری شمال شهر تا ۷ کیلومتری جنوب شهر قرار داشته و زمان پیمایش آب از نواحی تغذیه تا همه چاه‌ها عموماً کمتر از یک سال می‌باشد.

اخیراً نیز آب‌های زیرزمینی شهر کریس جرج در زلاندنو با استفاده از نرم‌افزار MODFLOW مدل‌سازی شد. در این تحقیق برای مدل‌سازی از داده‌های ماهیانه ۱۵۷ چاه تأمین آب شرب شهر استفاده کردند و با استفاده از روش مدل‌سازی معکوس و نرم‌افزار PEST پارامترهای هدایت هیدرولیکی و میزان تغذیه تخمین زده شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار MODPATH و داده‌های ۳۱ چاه انتخابی خطوط جریان آب زیرزمینی شبیه-سازی شد (Thorley and Callander, 2005).

مدل‌سازی فرآیند آبکشی با چاه‌های آبکش با استفاده از نرم‌افزار MODFLOW چندان مورد توجه محققان در دنیا و کشور ایران نبوده، بنا بر اهمیت موضوع مذکور در این مقاله به آن پرداخته می‌شود.

به طور کلی استفاده از چاه‌های ساحلی در آبگیری از دریاها می‌تواند به دو صورت مورد توجه قرار گیرد. حالت اول مربوط به استفاده از این چاه‌ها جهت تأمین آب کارخانه‌های آب‌شیرین‌کن با دبی کم تولید آب شیرین (حداکثر ۲۰۰۰۰ مترمکعب در روز) می‌باشد. در این رویکرد آب‌گرفته شده از دریا دارای کیفیت مناسبی می‌باشد. اشکالی که در این نوع سیستم آبگیری وجود دارد عدم تأمین دبی زیاد آب جهت شیرین‌سازی بوده که مهندسان طراح را به سمت استفاده از سیستم آبگیری باز سوق می‌دهد. یکی از سازه‌هایی که در روش آبگیری باز از دریاها مورد استفاده قرار می‌گیرد حوضچه پمپاژ می‌باشد که طراحی و اجرای آن مستلزم طراحی و اجرای سیستم آبکشی متناسب با محل پروژه می‌باشد. این مسئله منجر به ایجاد رویکرد دیگری در استفاده از چاه‌ها آبکش جهت کاهش تراز آب زیرزمینی در محل اجرای این حوضچه‌ها شده است. با توجه به موارد یادشده، هدف از این مقاله مدل‌سازی عددی و بررسی رویکرد دوم استفاده از چاه‌های ساحلی با استفاده از نرم‌افزار MODFLOW بوده که اهمیت بسزایی در اجرای مناسب حوضچه‌های پمپاژ موردنظر دارد.

مواد و روش‌ها

الف) انواع چاه‌های آبکشی

استفاده از چاه‌های آبکش به‌منظور کاهش تراز آب محل اجرای پروژه با دو رویکرد مورد توجه قرار می‌گیرد. رویکرد اول مبتنی بر استفاده از چاه‌های آبکش با قطرهای بزرگتر از ۶ اینچ (۱۵ سانتی‌متر) بوده که به طور کلی در خاک‌های ماسه‌ای و یا خاک‌های با ترکیب ماسه و شن با نفوذپذیری زیاد مورد استفاده قرار می‌گیرند (شکل ۱). در این سیستم آبکشی فاصله بین

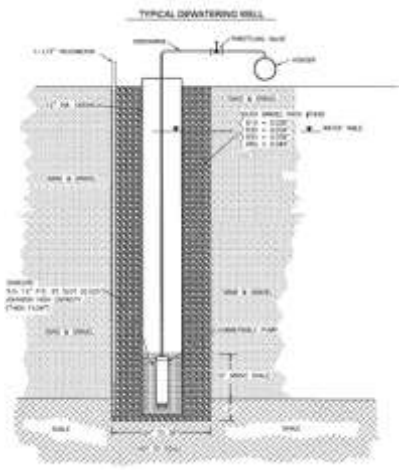
چاه‌های آبکش از ۱۰ تا ۱۵ متر انتخاب شده و چاه‌ها معمولاً در لایه رسی پایینی به اندازه حدود ۶۰ سانتی‌متر ادامه داده می‌شوند.

حالت دیگر آبکشی محل اجرای حوضچه پمپاژ استفاده از چاه‌های نقطه‌ای (well points) با تعداد زیاد در فواصل کم از یکدیگر (۶۰ سانتی‌متر تا ۳ متر) بوده که با اتصال پمپی قوی به آن‌ها سعی در آبکشی منطقه طرح با استفاده از آن‌ها می‌شود (شکل ۲ و ۳). استفاده از این سیستم آبکشی مختص مناطق دارای ترکیب خاک رس و سیلت می‌باشد. عمق آبکشی در این چاه‌ها معمولاً به ۷/۵ متر محدود می‌شود. همچنین این سیستم آبکشی علاوه بر حالت یک مرحله‌ای به‌صورت چندمرحله‌ای نیز می‌تواند باشد (شکل ۴). در این سیستم آبکشی ضخامت صافی چاه از بین ۰/۱ تا ۱/۰ متر بوده و تا عمقی معادل ۱ متر در داخل لایه زیرین فرو برده می‌شود.

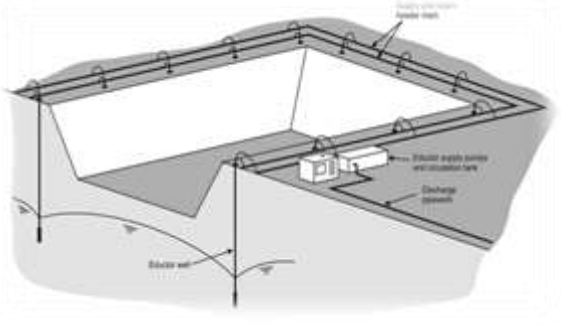
ب) مطالعه موردی

به‌منظور بررسی و مدل‌سازی روش‌های متداول آبکشی موردنظر از مطالعه موردی آماده‌سازی محل احداث حوضچه پمپاژ کارخانه آب‌شیرین‌کن شهر بوشهر استفاده می‌شود. محل احداث این حوضچه در نزدیک شهر بوشهر (شکل ۵) بوده و دارای ارتفاع ۱۰/۷ متر می‌باشد. بر اساس مطالعات ژئوتکنیک منطقه طرح شیب گودبرداری محل احداث آن با توجه به مجاورت با دریای خلیج فارس ۱ عمودی به ۱/۵ افقی می‌باشد. همچنین با توجه به متغیر بودن ضریب نفوذپذیری در مکان‌های مختلف محل پروژه سعی شده که امکان تعبیه یک مرحله دیگر از آبکشی در صورت برخورد با خاک‌های با نفوذپذیری متفاوت وجود داشته باشد که در شکل (۶) چگونگی گودبرداری محل پروژه نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که منطقه طرح دارای ابعاد ۵۴/۵ متر در ۷۹/۵ متر می‌باشد.

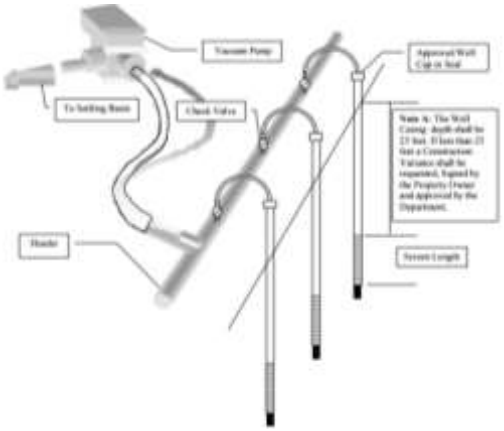
باید توجه داشت محل آبکشی دارای دو لایه ماسه‌ای (از ۰ تا ۶ متر) و رس (از ۶ تا ۱۱ متر) بوده که لایه بالایی ماسه لای‌دار می‌باشد. ضخامت این لایه حدود ۶ متر بوده و تراز آب زیرزمینی نیز در محل احداث حوضچه بر اساس مطالعات ژئوتکنیک در منفی ۲ متر نسبت به تراز زمین واقع شده است (شکل ۷).



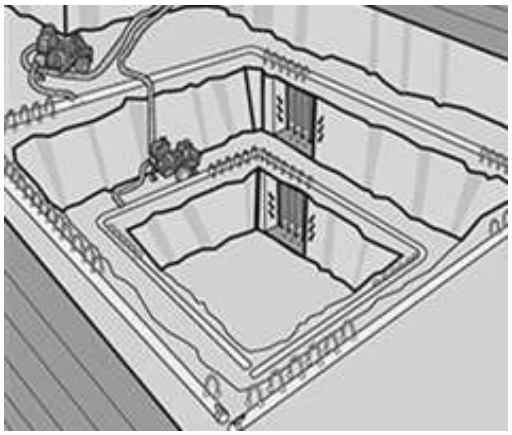
شکل ۱. نمونه چاه آبکشی بزرگ در منطقه موردنظر (Nemati, 2007)



شکل ۲. چاه‌های آبکش نقطه‌ای یک مرحله‌ای
(www.groundwatereng.com)



شکل ۳. نحوه اجرای چاه‌های آبکشی نقطه‌ای و اتصال آن به پمپ مرکزی تخلیه آب (THCDWAI, 2012)

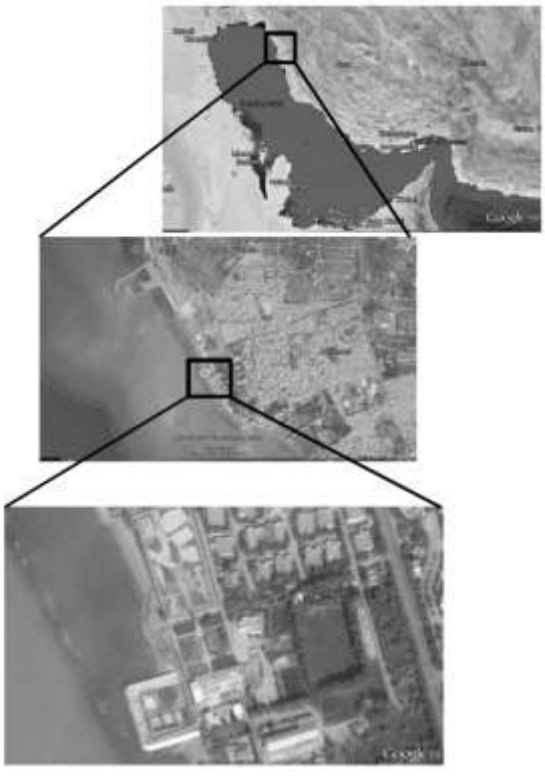


شکل ۴. چاه‌های آبکشی نقطه‌ای چند مرحله‌ای
(www.khansahebsykes.com)

نکته جالب‌توجه این می‌باشد که بر اساس آزمایش‌های لوفران خاک در محل احداث پروژه میزان نفوذپذیری لایه ماسه برابر ۰/۰۰۰۱ متر بر ثانیه می‌باشد (جدول ۱). هدف از این مطالعه بررسی کیفیت روش‌های آبکشی متداول با چاه‌ها در کنترل تراز آب در منطقه موردنظر بوده که تاکنون پژوهشگران زیادی، به‌ویژه در کشور ایران، به شبیه‌سازی عددی آن‌ها مبادرت نکرده‌اند. همچنین با توجه به محدودیت‌های اجرایی آزمایش تعیین میزان نفوذپذیری بر جای خاک، در این مقاله با در نظر گرفتن دامنه تغییرات محتمل ضریب نفوذپذیری به بررسی کارایی روش‌های مختلف آبکشی در منطقه طرح پرداخته می‌شود و از این طریق سعی در ارائه طرحی با اطمینان‌پذیری بالا و پایدار در مقابل سناریوهای مختلف نفوذپذیری خاک مبتنی بر عدم قطعیت این پارامتر در محل اجرای حوضچه می‌شود.

ج) مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی در محل اجرای پروژه

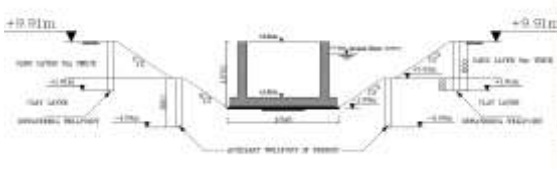
در این قسمت از مقاله به طراحی و شبیه‌سازی چاه‌های آبکش موردنیاز از منظر فاصله و دبی برداشتی پرداخته شده تا بتوان از نفوذ آب دریای خلیج فارس به محل اجرای حوضچه پمپاژ جلوگیری کرد. در طراحی این چاه‌ها و شبیه‌سازی حرکت آب در محیط متخلخل محل پروژه از نرم‌افزار مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی MODFLOW استفاده می‌شود.



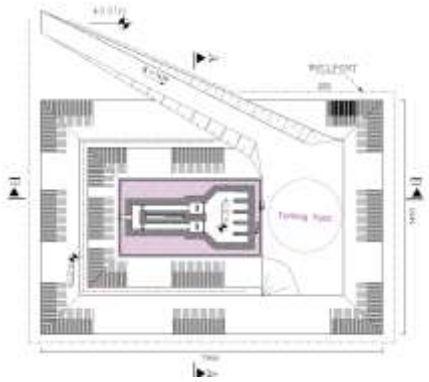
شکل ۵. محل جانمایی ایستگاه پمپاژ در کنار ساحل بوشهر

معرفی نرم‌افزار MODFLOW

نرم‌افزار MODFLOW یکی از معروف‌ترین نرم‌افزارها در مدل‌سازی سه‌بعدی حرکت آب‌های زیرزمینی و حرکت توده-های آلودگی در زیرزمین می‌باشد. در سال‌های اخیر این نرم‌افزار به‌طور گسترده‌ای به‌منظور مدل‌سازی نوسان‌های تراز آب‌های زیرزمینی ناشی از تغذیه‌های مصنوعی و چاه‌های برداشت مورد استفاده قرار گرفته است. پژوهشگران زیادی مدل سه‌بعدی شبیه‌ساز جریان آب زیرزمینی (نرم‌افزار MODFLOW) را که توسط McDonald و Harbaugh (1988) تهیه شده است، به‌عنوان قابل‌اعتمادترین، تأییدشده‌ترین و قابل‌استفاده‌ترین مدل موجود در ارتباط با مدل‌سازی جریان آب‌های زیرزمینی مورد ملاحظه قرار داده‌اند. این مدل توسط سازمان زمین‌شناسی ایالات‌متحده توسعه داده شده و به‌صورت رایگان در اختیار کاربران قرار داده شده است. نرم‌افزار MODFLOW پس از آزاد شدن اولیه، با بسته‌های جدید گوناگون تکمیل گردید. بسته‌های نرم‌افزاری خاصی برای نرم‌افزار MODFLOW وجود دارد که واردکردن داده‌ها و به تصویر درآوردن نتایج را به‌صورت نقشه و گراف آسان می‌سازند. نرم‌افزار MODFLOW با حل عددی معادلهٔ حاکم بر جریان آب زیرزمینی، عبور آب را از یک محیط متخلخل مدل‌سازی می‌کند. معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی را می‌توان به‌صورت زیر تبیین کرد:



الف) مقطع A-A



ب) پلان خاکبرداری

شکل ۶. نحوه گودبرداری محل حوضچه پمپاژ و جانمایی چاه‌های آبکشی

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial x}\left[K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right]-W=S_s\frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{(رابطه ۱)}$$

که در آن K_{xx}، K_{yy} و K_{zz} به ترتیب نفوذپذیری در جهت‌های x، y و z می‌باشند، W، میزان ورودی و یا خروجی آب به حجم واحد سفره آب زیرزمینی، S_s ضریب ذخیره و h بار هیدرولیکی در سفره آب زیرزمینی می‌باشد.

مختصات گمانه های حفری شده در دستگاه UTM

شماره گمانه	X	Y	متراژ حفری شده (m)	عمق تقریبی برخورد با آب زیرزمینی (m)
B.H-1	0482198	3197886	10.0	-3.3
B.H-2	0482172	3197877	20.0	-3.0
B.H-3	0482131	3197862	30.0	-2.0

شکل ۷. مشخصات گمانه‌های احداثی (Norvijeh, 2015)

جدول ۱. مشخصات خاک منطقه احداث ایستگاه پمپاژ (Norvijeh, 2015)

عمق (متر)	نوع خاک	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	ضریب نفوذپذیری خاک (متر بر ثانیه)
۶-۰	ماسه لای دار	۲۸	۰/۰۰۰۱
۱۱-۶	رس با خاصیت خمیری کم	۲۸	۰/۰۰۰۰۰۱

در استفاده از مدل-های آب‌های زیرزمینی به‌منظور مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی در سیستم آبکشی محل اجرای حوضچه پمپاژ ۸ مرحله زیر باید موردتوجه قرار گیرد:

۱. انتخاب مدلی که بتواند تمامی فاکتورهای تأثیرگذار بر روی محل آبکشی را لحاظ کند.
۲. تعریف هندسی مدل شامل گسترش جانبی و طولی محل احداث حوضچه پمپاژ، مرزهای مدل و تعداد لایه‌های موجود.
۳. تعریف آرایه‌های مرزی شامل سلول‌های محاسباتی و نوع آنها از منظر فعال بودن و غیرفعال بودن.
۴. واردکردن پارامترهای هیدرولوژیک نظیر هدایت هیدرولیکی، قابلیت انتقال، ضریب ذخیره و تخلخل.
۵. مشخص کردن شرایط مرزی (مرزها با بار هیدرولیکی و یا جریان معلوم مانند ثابت بودن تراز آب دریا).
۶. مشخص کردن شرایط اولیه نظیر تراز آب در ابتدای دوره شبیه‌سازی و تراز آب خلیج فارس
۷. مشخص کردن تنش-های عمل‌کننده بر سیستم نظیر تغذیه ناشی از بارندگی، تبخیر و تعرق، چاه پمپاژ، چشمه‌ها و غیره.
۸. اجرای مدل که شامل انتخاب روش حل معادلات ریاضی، معیار تکرار و معیار خطای قابل‌قبول جهت خاتمه شبیه-سازی می‌باشد.

نتایج و بحث

الف) شبیه‌سازی محل پروژه در گزینه ۱ آبکشی محل اجرای حوضچه با استفاده از چاه‌های آبکش بزرگ

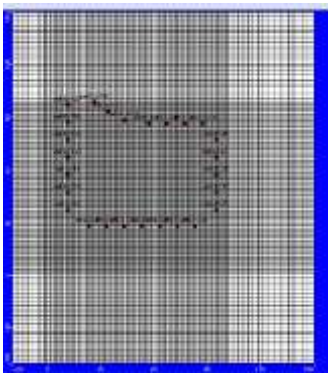
پس از معرفی نرم‌افزار MODFLOW از این نرم‌افزار به‌منظور شبیه‌سازی تغییرات تراز آب زیرزمینی در صورتی که چاه‌های آبکشی در اطراف محل اجرای حوضچه به‌منظور کاهش تراز آب زیرزمینی تا لایه رسی (۶ متر کاهش تراز آب) ادامه داده شوند، استفاده می‌شود. به همین منظور، دامنه محاسباتی معادل ۲۰۰ متر در ۱۷۰ متر با ابعاد مش حدود ۱ متر در ۱ متر تا ۵ متر در ۵ متر برای مدل‌سازی آبکشی محل احداث حوضچه پمپاژ موردنظر در نظر گرفته شد (شکل ۸). سپس با اعمال خواص خاک محل به تعیین تعداد چاه‌های موردنیاز برای برداشت آب از منطقه پرداخته شد و همچنین دبی‌های قابل‌برداشت از این چاه‌ها نیز بدست آمد. نکته مهمی که باید در این‌گونه طرح‌ها موردتوجه قرار گیرد خشک نگه‌داشتن جاده دسترسی به پایین محل اجرای حوضچه بوده که با توجه به شیب جاده موردنظر و خیس شدن آن ممکن است تردد وسایل نقلیه را با چالش مواجه کند. بنابراین، این بخش از زیرساخت نیز در محدوده‌ای که باید آبکشی شود، موردتوجه قرار می‌گیرد. به‌منظور مدل‌سازی و تعیین تعداد بهینه چاه‌های آبکش بزرگ، تغییرات تراز آب منطقه طرح در مقابل تعداد چاه‌های آبکش بررسی می-شود. با بررسی و آنالیز حساسیت تراز موردنظر آب در محل اجرای ایستگاه پمپاژ در مقابل چاه‌های آبکش با تعداد ۴، ۹، ۱۳ و ۲۶ عدد مشخص شد که تعداد ۲۶ عدد چاه آبکش (شکل ۹) تعداد مناسبی برای رسیدن تراز آب به تراز آب کمتر از ۲۴ متر موردنظر برای شروع اجرای عملیات گودبرداری می‌باشد. بنابراین این ۲۶ عدد چاه با توجه به شرایط منطقه موردنظر به‌عنوان

گزینه‌ای نهایی تعداد چاه‌های آبکش انتخاب می‌شود. شکل (۱۰) چگونگی تراز آب را در محل اجرای حوضچه پمپاژ نمایش می‌دهد. در سایر موارد به غیر از ۲۶ عدد چاه، همان‌طور که در شکل (۱۰) نمایش داده شده مشاهده می‌شود که تراز آب در محل ساخت حوضچه از تراز ۲۴ متر لایه ماسه‌ای بالاتر می‌باشد. به طور مثال برای تعداد چاه ۴ عدد تراز آب زیرزمینی قابل وصول برابر ۲۶/۴۲ متر می‌باشد. این در حالی است که این تراز آب برای تعداد ۹ و ۱۳ عدد چاه به ترتیب برابر ۲۵/۸۵ و ۲۴/۹۶ متر می‌باشد (شکل ۱۱). لازم به ذکر است که این ترازهای آب در صورت تغییر میزان نفوذپذیری خاک محل ممکن است دارای وضعیت بدتری شوند. باید توجه داشت نحوه مدل‌سازی چاه‌ها به این صورت بوده که تمامی ۲۶ عدد چاه موجود در دامنه محاسبات لحاظ شده و فقط در مرحله اجرای مدل تعداد آن‌ها از طریق غیرفعال کردن آن‌ها برای موارد ۴، ۹ و ۱۳ عدد چاه کنترل می‌شود.

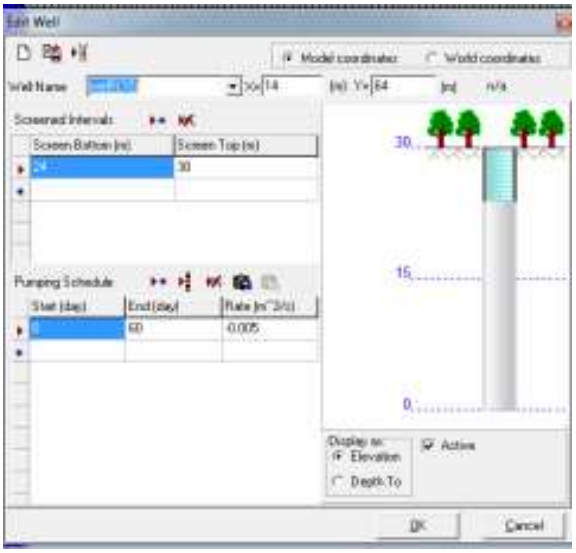
نکته‌ای که در رابطه با استفاده از این ۲۶ عدد چاه آبکش می‌باشد، عدم قطعیت میزان نفوذپذیری خاک محل بوده که ممکن است کارایی سیستم آبکشی موردنظر را مختل کند. این مسئله با افزایش مساحت محل اجرای پروژه و گسترش تنوع میزان نفوذپذیری ممکن است تشدید شده و چاه‌های آبکشی توانایی خود را برای کارایی موردنظر از دست بدهند. علاوه بر آن، با توجه به اینکه در این نوع پروژه‌ها کالیبره کردن مدل عددی مبتنی بر داده‌های میدانی محل رویکردی جهت اطمینان بخشی نسبت به استفاده از مدل مذکور می‌باشد، بر این اساس، کارایی سیستم آبکشی با ۲۶ عدد چاه آبکش در مقابل مقادیر مختلف ضریب نفوذپذیری به‌عنوان اصلی‌ترین پارامتر متغیر موردنظر در معادلات حاکم بر جریان آب زیرزمینی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همان‌طور که در جدول (۲) و شکل (۱۲) نمایش داده شده، برای مقادیر مختلف میزان نفوذپذیری می‌توان آبکشی محل اجرای حوضچه پمپاژ را تا تراز آب زیرزمینی ۲۴ متر نیز بدست آورد. نکته قابل‌توجه در شکل (۱۰) نوسانی بودن میزان تغییرات تراز آب زیرزمینی در برابر تغییرات میزان نفوذپذیری خاک محل می‌باشد. این مسئله به دلیل تغییرات دبی‌های برداشت از چاه‌های آبکشی محل می‌باشد. شکل (۱۳ و ۱۴) به ترتیب خطوط تراز و منحنی‌های میان‌تراز آب زیرزمینی را برای مقدار نفوذپذیری ۰/۰۰۰۱ متر بر ثانیه لایه نفوذپذیر ماسه‌ای منطقه طرح نمایش می‌دهد.

ب) شبیه‌سازی محل پروژه در گزینه ۲ آبکشی محل اجرای حوضچه با استفاده از چاه‌های نقطه‌ای

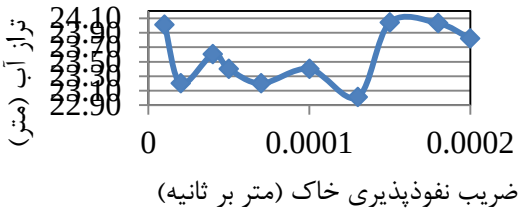
ازآنجایی‌که آبکشی با استفاده از چاه‌های آبکش بزرگ مستلزم شناخت دقیق لایه‌های خاک و میزان نفوذپذیری آن‌ها می‌باشد، استفاده از این سیستم آبکشی دارای عدم قطعیت زیادی به‌منظور خشک نگه‌داشتن محل پروژه می‌باشد. به‌طوری‌که با انتخاب میزان نفوذپذیری معادل ۰/۰۰۰۰۱ متر بر ثانیه تراز آب زیرزمینی به ۲۴/۰۱ متر می‌رسد که این مسئله عدم اطمینان به سیستم آبکشی با چاه‌های بزرگ را در صورت تغییرات ضریب نفوذپذیری محل حوضچه تشدید می‌کند. به همین منظور، استفاده از چاه‌های آبکش نقطه‌ای به‌عنوان یکی دیگر از ابزارهای آبکشی، راهکار مناسبی جهت آبکشی محل اجرای حوضچه پمپاژ می‌باشد. این گزینه عموماً در منطقه موردنظر اجرا می‌شود و بر اساس تجربیات محل موردنظر گزینه مناسبی برای آبکشی می‌باشد. در این مرحله نیز به‌منظور مدل‌سازی سیستم آبکشی نقطه‌ای دامنه محاسباتی معادل ۲۰۰ متر در ۱۷۰ متر با ابعاد مش حدود ۱ متر در ۱ متر تا ۵ متر در ۵ متر در نظر گرفته شد (شکل ۱۵). سپس با اعمال خواص خاک محل به تعیین تعداد چاه‌های موردنیاز برای آبکشی محل احداث پروژه مبادرت شد.



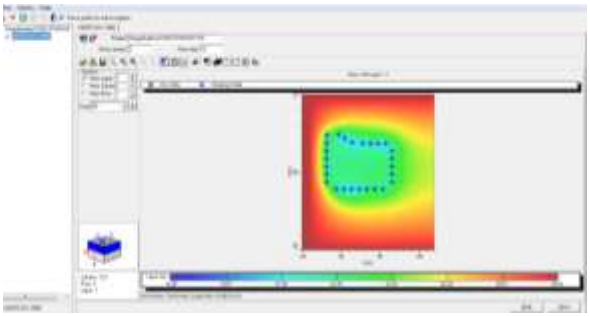
شکل ۸. دامنه محاسباتی در نظر گرفته‌شده جهت کاهش تراز آب محل پروژه



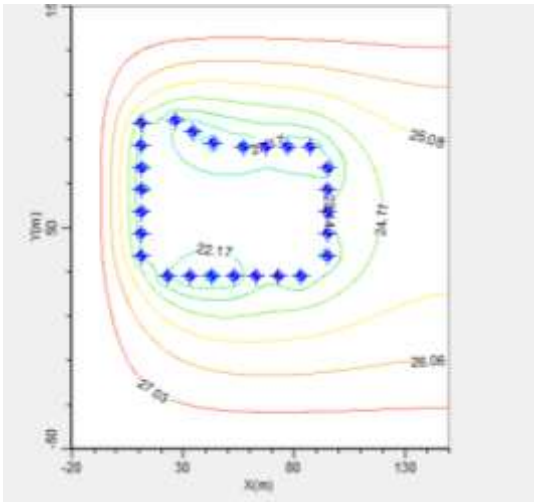
شکل ۹. چاه در نظر گرفته‌شده در محل پروژه



شکل ۱۲. آنالیز حساسیت تراز آب در محل چاه‌های آبکش

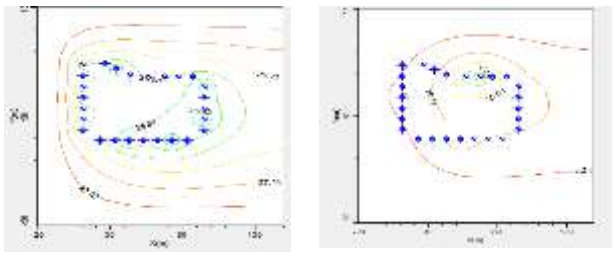


شکل ۱۳. کاهش تراز آب زیرزمینی در محل پروژه با احداث ۲۶ چاه آبکش بزرگ

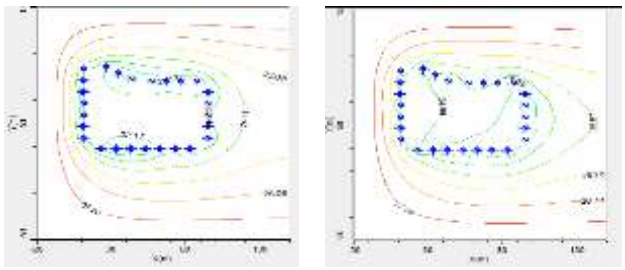


شکل ۱۴. خطوط تراز آب زیرزمینی بدست آمده پس از شبیه‌سازی آب زیرزمینی به همراه ۲۶ چاه‌های آبکش

پس از مدل‌سازی محل موردنظر در ابعاد در نظر گرفته‌شده، مشخص شد که با ایجاد تعداد ۱۱۹ چاه با ارتفاع ۸ متر (دو متر داخل لایه رسی) که هر یک قابلیت برداشت دبی حدود ۱ لیتر بر ثانیه را دارا بوده می‌توان تراز آب زیرزمینی محل حوضچه را به تراز لایه رس در عمق ۶ متری از تراز زمین رساند (شکل ۱۶ و ۱۷). شکل (۱۸) چاه در نظر گرفته‌شده در نرم‌افزار و همچنین مقطع چاه موردنظر جهت اجرا در محل پروژه را نمایش می‌دهند. لازم به ذکر است که مدت شبیه‌سازی در این نوع سیستم آبکشی به‌منظور رسیدن به حالت پایدار ۲ ماه می‌باشد.

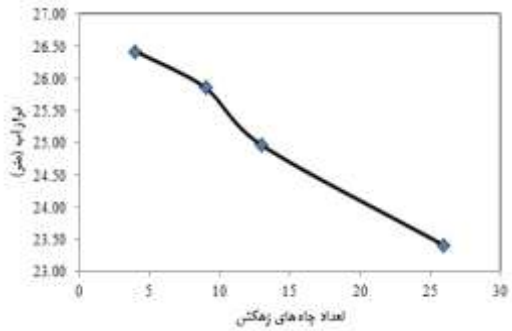


الف) تعداد چاه‌های فعال ۴ عدد ب) تعداد چاه‌های فعال ۹ عدد



ج) تعداد چاه‌های فعال ۱۳ عدد د) تعداد چاه‌های فعال ۲۶ عدد

شکل ۱۰. ترازهای آب حاصل‌شده برای تعداد چاه‌های آبکش مختلف (متر)



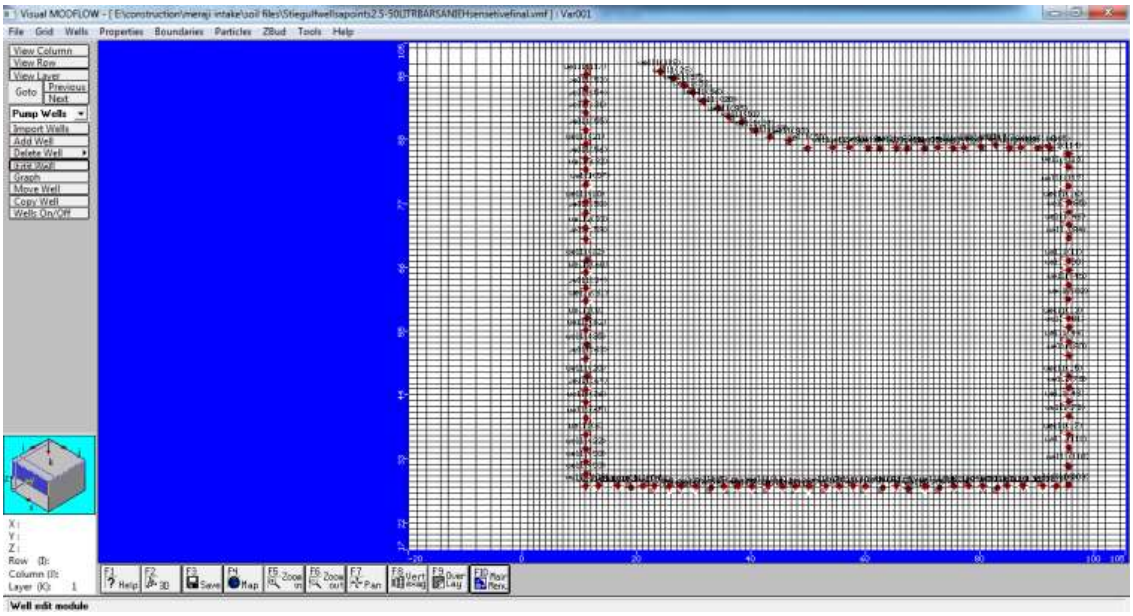
شکل ۱۱. دامنه محاسباتی در نظر گرفته‌شده جهت کاهش تراز آب محل پروژه

جدول ۲. آنالیز حساسیت میزان نفوذپذیری در برابر تراز آب بدست آمده توسط چاه‌های آبکش

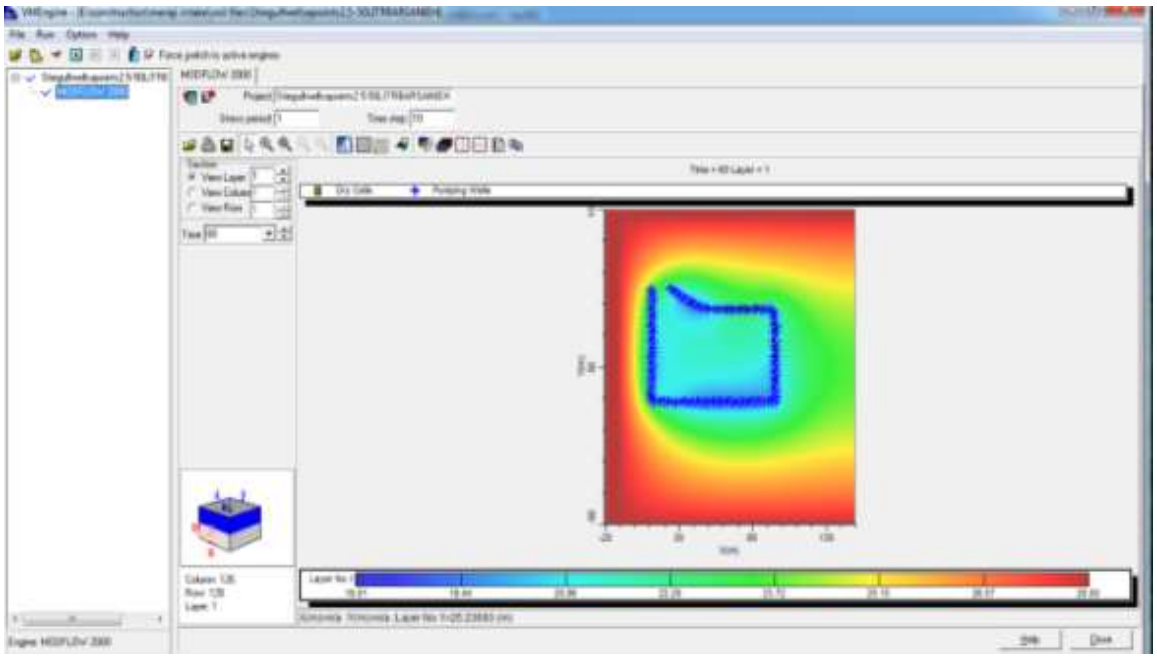
دبی (لیتر بر ثانیه)	تراز (متر)	نفوذپذیری (متر بر ثانیه)
۰/۵	۲۴/۰۱	۰/۰۰۰۰۱
۰/۵	۲۳/۲۰	۰/۰۰۰۰۲
۱/۰	۲۳/۶۰	۰/۰۰۰۰۴
۲/۰	۲۳/۴۰	۰/۰۰۰۰۵
۲/۰	۲۳/۲۰	۰/۰۰۰۰۷
۳/۰	۲۳/۴۰	۰/۰۰۰۱
۴/۰	۲۳/۰۱	۰/۰۰۰۱۳
۶/۰	۲۳/۰۴	۰/۰۰۰۱۵
۶/۰	۲۳/۰۳	۰/۰۰۰۱۸
۶/۰	۲۳/۸۲	۰/۰۰۰۲

با مقایسه دو سیستم آبکشی این‌گونه می‌توان استنباط کرد که گزینه چاه نقطه‌ای با توجه به عدم شناخت خاک منطقه و عدم تخمین دقیق نفوذپذیری آن گزینه مناسب‌تری می‌باشد. این در حالی است که در این گزینه آبکشی محوطه گودبرداری شده از نفوذهای ناخواسته و غیرقابل پیش‌بینی آب دریا بهتر در امان می‌ماند. بنابراین این گزینه به‌عنوان گزینه نهایی آبکشی محل پروژه انتخاب می‌شود. همان‌طور که در شکل مربوط به تراز آب و خطوط تراز آب زیرزمینی نمایش داده‌شده مشاهده می‌شود که چاه‌های نقطه‌ای امکان پایین آوردن تراز آب تا تراز ۲۱ متر را نیز دارا می‌باشند. این مسئله مبین کارایی سیستم آبکشی نقطه‌ای به‌منظور آماده‌سازی محل پژوه موردنظر می‌باشد.

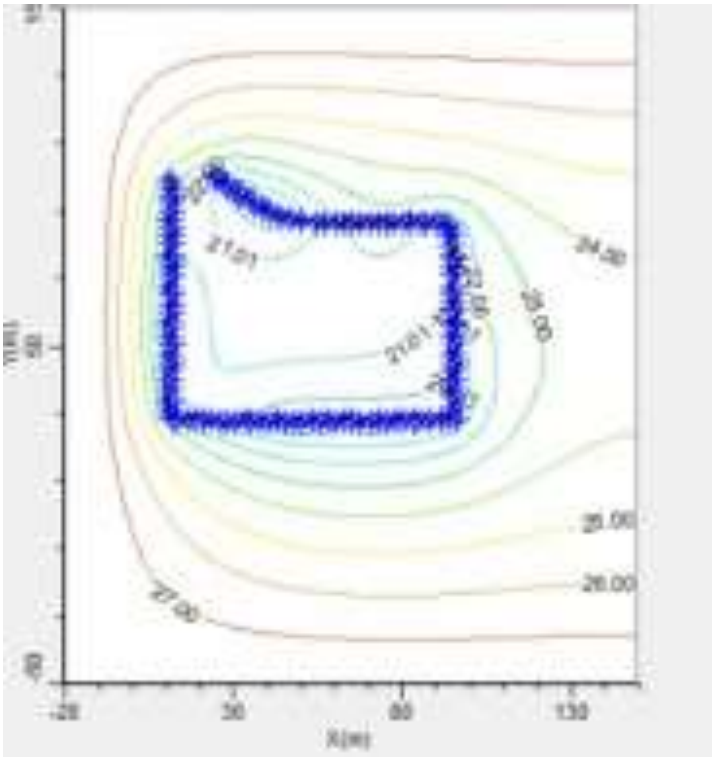
در این نوع سیستم آبکشی هم آنالیز حساسیت نسبت به میزان نفوذپذیری نشان از کارایی مدل در مقادیر مختلف نفوذپذیری می‌دهد (شکل ۱۹ و جدول ۳). بر اساس این نتایج نیز مشخص شد که ترازهای آب بدست آمده توسط چاه‌های آبکش نقطه‌ای با فاصله ۲/۵ متر از هم نیز از ترازهای آب حاصل‌شده توسط چاه‌های آبکش بزرگ پایین‌تر می‌باشد.



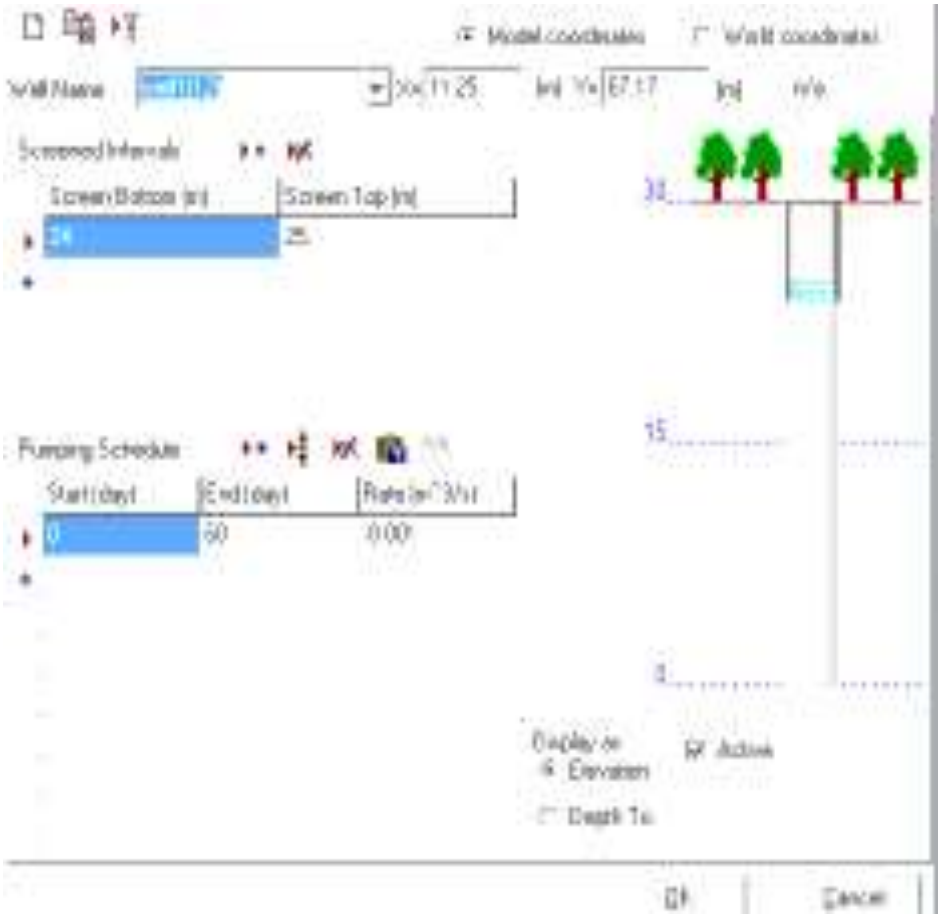
شکل ۱۵. دامنه محاسباتی در نظر گرفته‌شده محل پروژه به همراه چاه¬های نقطه¬ای



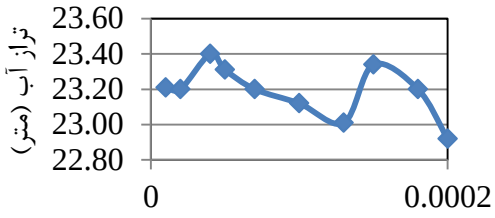
شکل ۱۶. کاهش تراز آب زیرزمینی در محل پروژه با احداث ۱۱۹ چاه نقطه¬ای



شکل ۱۷. خطوط تراز آب زیرزمینی بدست آمده پس از شبیه‌سازی آب زیرزمینی به همراه چاه‌های آبکش نقطه‌ای



شکل ۱۸. چاه نقطه‌ای در نظر گرفته‌شده در محل پروژه



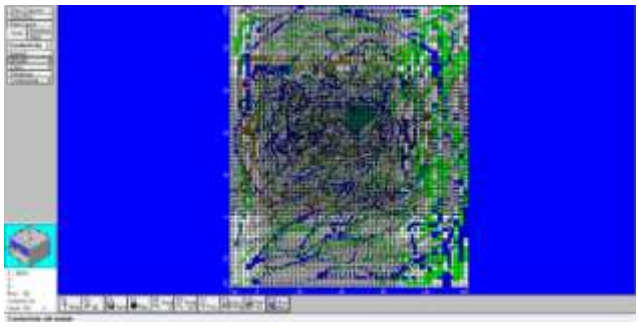
شکل ۱۹. آنالیز حساسیت تراز آب در برابر نفوذپذیری محل پروژه

جدول ۳. آنالیز حساسیت میزان نفوذپذیری در برابر تراز آب حاصل‌شده

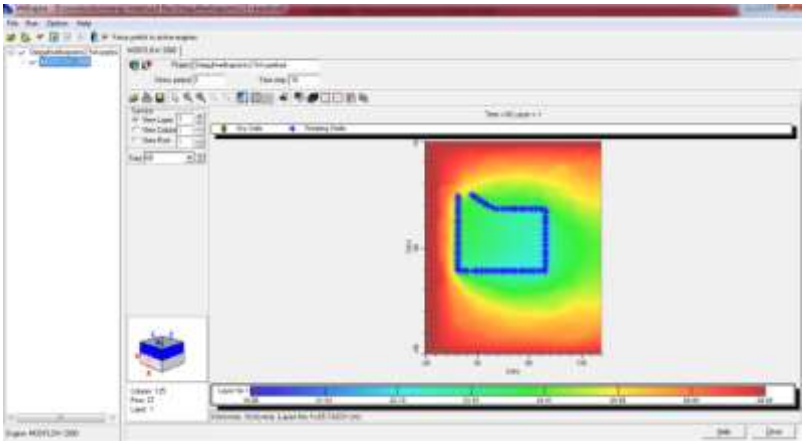
دبی (لیتر بر ثانیه)	تراز (متر)	نفوذپذیری (متر بر ثانیه)
۰/۱	۲۳/۲۱	۰/۰۰۰۰۱
۰/۱	۲۳/۲۰	۰/۰۰۰۰۲
۰/۲	۲۳/۴۰	۰/۰۰۰۰۴
۰/۲۱	۲۳/۳۱	۰/۰۰۰۰۵
۰/۵	۲۳/۲۰	۰/۰۰۰۰۷
۰/۵	۲۳/۱۲	۰/۰۰۰۱
۰/۷۵	۲۳/۰۱	۰/۰۰۰۱۳
۰/۷۵	۲۳/۳۴	۰/۰۰۰۱۵
۰/۸۵	۲۳/۲۰	۰/۰۰۰۱۸
۱/۰	۲۲/۹۰	۰/۰۰۰۲

ج) شبیه‌سازی محل پروژه در گزینه ۲ آبکشی محل اجرای حوضچه با استفاده از چاه‌های نقطه‌ای در حالت غیریکنواخت مکانی نفوذپذیری

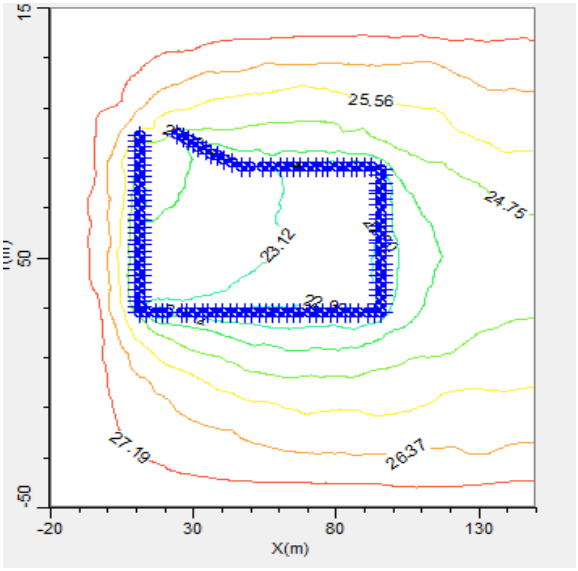
نکته دیگری که می‌توان در رابطه با آنالیز حساسیت چاه‌های نقطه‌ای انجام داد آنالیز حساسیت تغییرات تراز آب در محل اجرای پروژه در برابر تغییرات مکانی نفوذپذیری می‌باشد. علت در نظر گرفتن این نگرش را می‌توان در وسعت منطقه آبکشی جستجو کرد که ممکن است میزان نفوذپذیری خاک محل با فاصله از محل اجرای آزمایش برجای نفوذپذیری خاک دستخوش تغییراتی باشد. به همین منظور، در این مرحله با در نظر گرفتن مقادیر تصادفی ضریب نفوذپذیری کارایی ۱۱۹ چاه نقطه‌ای انتخابی در آبکشی محل پروژه در حالت تغییرات مکانی نفوذپذیری مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این نگرش در طراحی سیستم‌های آبکشی زمانی می‌تواند موضوعیت پیدا کند که نفوذپذیری خاک محل به دلیل رگه‌های مختلف خاک دچار تغییرات مکانی شود. شکل (۲۰) تغییرات تصادفی نفوذپذیری محل را که در آن میزان نفوذپذیری بین ۰/۰۰۰۰۱ تا ۰/۰۰۰۲ متر بر ثانیه متغیر بوده را نمایش می‌دهد. پس از آماده‌سازی داده‌های ورودی، مدل مذکور نیز برای مدت زمان ۲ ماه با تعداد ۱۱۹ چاه با دبی ۱ لیتر بر ثانیه اجرا گردید که تراز آب زیرزمینی بدست آمده در محل پروژه در شکل (۲۱ و ۲۲) به ترتیب در حالت خطوط تراز و منحنی‌های میزان نمایش داده‌شده است. توجه به این اشکال کماکان توانایی چاه‌های آبکش نقطه‌ای را در رساندن تراز آب زیرزمینی به مقدار موردنظر ۲۳/۱۲ متر نمایش می‌دهد.



شکل ۲۰. مدل آب زیرزمینی در نظر گرفته‌شده در منطقه طرح با فرض غیریکنواخت بودن میزان نفوذپذیری خاک



شکل ۲۱. کاهش تراز آب زیرزمینی در محل پروژه با احداث ۱۱۹ چاه نقطه‌ای در حالت تغییرات مکانی نفوذپذیری



شکل ۲۲. خطوط تراز آب زیرزمینی پس از شبیه‌سازی آب زیرزمینی به همراه چاه‌های آبکش نقطه‌ای در حالت تغییرات مکانی نفوذپذیری

نتیجه‌گیری

یکی از مهمترین مراحل طراحی حوضچه پمپاژ سیستم آبگیر عمقی کارخانه‌های آب‌شیرین‌کن کنار دریا، طراحی سیستم آبکشی محل اجرای حوضچه پمپاژ می‌باشد. در این مقاله به بررسی دو روش آبکشی محل اجرای حوضچه پمپاژ جهت احداث حوضچه‌ای با ارتفاع ۱۰/۷ متر در منطقه بوشهر پرداخته شد. همچنین طراحی سیستم آبکشی محل اجرای حوضچه پمپاژ مشخص کرد که با تعبیه ۲۶ عدد چاه آبکش با دبی برداشت حدود ۵ لیتر بر ثانیه تراز آب زیرزمینی به اندازه ۶ متر دچار افت می‌شود. در طراحی این قسمت نیز از نرم‌افزار مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی MODFLOW به همراه چاه‌های آبکشی استفاده شد. علاوه بر این، در این مقاله عملکرد چاه‌های نقطه‌ای نیز به‌منظور کاهش تراز آب زیرزمینی برای مقادیر مختلف نفوذپذیری بررسی شد. نتایج نشان داد که مدل چاه‌های نقطه‌ای با تعداد چاه آبکش ۱۱۹ عدد عملکرد مناسب‌تری نسبت به چاه‌های آبکش بزرگ با فاصله زیادتر در منطقه موردنظر دارد. علاوه بر این مشخص شد که در مواقع عدم قطعیت مکانی و زمانی ضریب نفوذپذیری خاک محل سیستم چاه‌های نقطه‌ای دارای کارایی بیشتری نسبت به چاه‌های بزرگ می‌باشند.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله نویسندگان مقاله مراتب تشکر خود را از شرکت سرمایه‌گذاری، اجرا و بهره‌برداری نورویژه به جهت در اختیار قراردادن مطالعات ژئوتکنیک محل احداث کارخانه آب‌شیرین‌کن بوشهر اعلام می‌دارند.

نمادها

h: بار هیدرولیکی در سفره آب زیرزمینی

K_{xx}: نفوذپذیری در جهت x

K_{yy}: نفوذپذیری در جهت y

K_{zz}: نفوذپذیری در جهت z

Q: دبی برداشت آب از چاه‌های زهکش

S_s: ضریب ذخیره

W: میزان ورودی و یا خروجی آب به حجم واحد سفره آب زیرزمینی

REFERENCES

Barani, S., Shafiei, S., Malekinezhad, H. and Nezhadkoraki F. (2010). Modeling of ground water in Morost aquifer via MODFLOW and Pest, *1th international conference on plant, water, soil and weather modeling.* (In Farsi)

Chitsazan, M. and Kashkoli H.A. (2002). Groundwater modeling and problems, *Shahid Chamran University publishing*, Ahwaz (In Farsi)

Derakhshandehro, G., Vaghefi, M. and Saeidi G.R. (2009). Determination of groundwater storage and velocity head via the MODFLOW (Case study: Bashar River watershed), *10th national irrigation and evaporation conference.* (In Farsi)

Derakhshandehro and Barani G.A., (2015). Evaluation of Artificial inchagre on Gachsaran Emamzadeh Jafar aquifer by Mathematical model and MODFLOW. *International Conference of Science and Technology* (In Farsi).

Fethi L., Ammar M., Mourad B., Jamila T., Christian L. (2012). Implementation of a 3-D groundwater flow model in a semi-arid region using MODFLOW and GIS tools: The Zéramdine–Béni Hassen Miocene aquifer system (east-central Tunisia). *Computers & Geosciences*, Volume 48, November, Pages 187-198

Hossiensarbazi A. and Esmaeili K. (2012). Modeling of groundwater (Case study: Nishabor Aquifer). *Journal of Science and Irigation*, P.P. 66, No. 4. (In Farsi).

Janparvar M. and Alavimoghadam M.R. (2015). Estimating water discharge decreasing of Ghazvin Aquifer to have an equilibrium condition. *First National Conference on Agriculture, Ardebil* (In Farsi).

Kalantari, N.(1998). Groundwater Hydrogeology, *3th publishing, Shahid Chamran University publishing*, Ahwaz (In Farsi).

Mashhadi, L. and Baghvand A. (2010). Evaluation and modeling of burial waste load contamination effects over groundwater resources (Case study: Amanabad Aquifer) . *4th conference and exhibition of environmental engineering*.

Norvijeh, Geotechnical Report for Bushehr Desalination factory, (2015), *Geotechnical Lab for Iran transportation ministry*.

McDonald, J. M., & Harbaugh, A. W. (1988). MODFLOW, a modular 3D finite difference ground-water flow model. *US Geological Survey*, Open File Report, 83-875

Mohamadkhani M. and Katibeh H. (2004). Modeling of groundwater in Sechahoon mine by MODFLOW, *Mineral Engineering Conference* (In Farsi).

Nemati, K. M. (2007), Temporary Structures, Construction Dewatering and Ground Freezing, *UNIVERSITY OF WASHINGTON, DEPARTMENT OF CONSTRUCTION MANAGEMENT*

Saghravani S. R. and Mustaph S. (2011). A Prediction of Contamination Migration in an Unconfined Aquifer. with Visual MODFLOW: A Case Study, *World Applied Sciences Journal* 14 (7): 1102-1106, 2011.

THCDWAI (Temporary High Capacity Dewatering Well Application Instructions) (2012). Department of Natural Resources, State of Wisconsin.

Todd W. R. and R. B. Kenneth. (2001). Report: Delineation of capture zones for municipal wells in fractured dolomite, Sturgeon Bay, Wisconsin, USA. *Hydrogeology Journal*, 9:432–450. M.

Torshizi, S., Haghighatjoo, P., R., Sheibanian, A., R. and Roeintan, S. (2015). Modeling of Sarvestan aqueifer groundware via MODFLOW package. *Water engineering conference and exhibition* (In Farsi).

Thorley, M. and P. Callander. (2005). Christchurch city groundwater model. *Environment Canterbury Report*, Vol. 05/53,

Zeighaminezhad, M., Ghazanfarimoghadam, M.S. and Barani. G.A. (2015). Determintion of freshwater well restriction by MODFLOW model. *2 th Conference of Agriculture, Natural resources and environment of Iran*. (In Farsi)

www.groundwatereng.com.

www.khansahebsykes.com.