

Investigation of Well Deepening Effects on Aquifer Yield Using Numerical Model

M. Bijani¹, A. Moridi^{2*} and M.R. Majdzadeh
Tabatabaie³

Abstract

Iran is located in a semi-arid area with an inappropriate distribution of water. In many parts of the country, particularly arid plains, the groundwater is the main source for supplying demands. One of these areas is Aliabad plain located in Saveh catchment in which farmers have been digging deep wells for withdrawal.

Increase in withdrawal above the aquifer renewable water potential has caused a decrease in efficiency of the operation wells due to the groundwater drawdown. Decreasing in groundwater table will later lead to land settlement and environmental impacts.

In order to increase the well efficiency, well deepening has been carried out in the plain. This research simulated the effects of excessive withdrawal on operation wells efficiency using MODFLOW. The conceptual model and well deepening effect simulation were developed in GMS model. Results indicated that the north eastern and western regions of the aquifer have higher potentials for drying up and the maximum (critical) well deepening depth is about 80 meters for the whole area. The results also showed that by deepening the agricultural wells some parts of the aquifer will dry up which leads to migration.

Keywords: Well deepening, GMS, MODFLOW, Well efficiency, Ali-Abad Aquifer, Saveh Plain, Groundwater modeling.

Received: October 3, 2016

Accepted: December 22, 2016

بررسی تأثیرات کف شکنی چاهها بر پتانسیل برداشت از آبخوان با استفاده از مدل ریاضی

مرتضی بیژنی^۱، علی مریدی^{۲*} و سید محمدرضا مجدزاده
طباطبایی^۳

چکیده

کشور ایران در منطقه‌ای خشک و کم‌باران با توزیع نامناسب آب واقع شده است. در بسیاری از مناطق ایران به ویژه مناطق کویری منبع تأمین نیاز آبی، منابع زیرزمینی می‌باشند. یکی از این مناطق دشت علی‌آباد واقع در محدوده مطالعاتی ساوه است که جهت دستیابی به منابع آب زیرزمینی اقدام به حفر چاه‌های بهره‌برداری برای مصارف کشاورزی شده است. افزایش بهره‌برداری بیش از پتانسیل تجدید پذیر آبخوان باعث شده تا در اثر افت سطح آب زیرزمینی پتانسیل برداشت از آبخوان کاهش یافته و به تبع آن اقدام به کف‌شکنی چاه‌ها شده است. در اثر افت سطح ایستابی، تنش مؤثر در ذرات خاک افزایش و باعث ایجاد فرونشست در منطقه خواهد شد. در این تحقیق تأثیر برداشت بی‌رویه از چاهها بر پتانسیل بهره‌برداری از آبخوان با استفاده از مدل عددی MODFLOW بررسی شده است. بدین منظور مدل مفهومی دشت علی‌آباد ساوه و اثر کف‌شکنی چاهها با استفاده از نرم‌افزار GMS تهیه شده است. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد مناطق جنوب غربی و جنوب شرقی دشت از پتانسیل بالاتری جهت خشک شدن آبخوان برخوردار بوده و عمق بحرانی کف‌شکنی در کل منطقه مورد مطالعه ۸۰ متر برآورد شده که در قسمت جنوب غربی رخ داده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد ارائه مجوز کف‌شکنی به چاههای کشاورزی نه تنها یک آسیب جدی به آبخوان و محیط زیست دشت بوده بلکه یک رویکرد در راستای توزیع ناعادلانه آب در سطح دشت می‌باشد. در اثر کف‌شکنی چاهها ممکن است بخشهایی از دشت کاملاً از بین رفته و مهاجرتهای روستاییان آن منطقه را منجر شود.

کلمات کلیدی: کف‌شکنی چاه، MODFLOW، GMS، دشت علی‌آباد ساوه، مدل‌سازی آبخوان.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۷/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۱۰/۲

1- Graduate, Faculty of Civil Engineering, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Water and Environment, Shahid Abbaspour College, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: a_moridi@sbu.ac.ir

3- Assistant Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran..

*- Corresponding Author

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

*- نویسنده مسئول

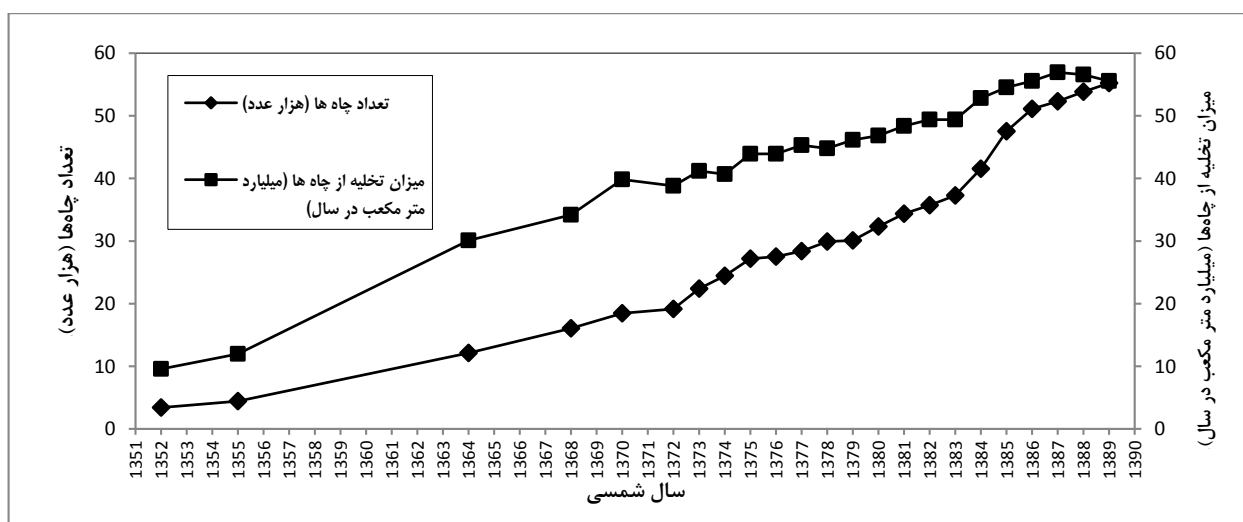
۱- مقدمه

با توجه به بحث توسعه پایدار که یکی از خط‌مشی‌های جامعه است و در آن محیط، توسعه اقتصادی و کیفیت زندگی مورد توجه قرار می‌گیرد، بهره‌برداری از منابع آب باید به‌گونه‌ای صورت گیرد که با حفظ منابع آب برای نسل‌های آینده سازگار باشد، از این‌رو مدیریت منابع آب به ویژه منابع آب زیرزمینی در توسعه پایدار نقش مهمی را ایفا می‌نماید. در دهه‌های اخیر توسعه مدیریت آب تأثیر شگرفی بر سیستم‌های هیدرولوژیکی گذاشته است. بارها گزارش‌هایی اعلام شده است که تخلیه آبخوان بر کاهش جریان پایه رودخانه، خشک شدن تالاب‌ها، تخریب اکوسیستم ساحلی و کیفیت آب، فرو نشست زمین و ترک خوردن زمین تأثیر گذاشته است (Zhou and Li, 2011).

با توجه به اهمیت منابع آب زیرزمینی و تامین آب از طریق احداث چاه‌های عمیق، ضرورت بهره‌برداری از چاه‌ها و رعایت اصول علمی و فنی در مراحل مختلف اعم از بهره‌برداری و نگهداری آن‌ها بسیار زیاد می‌باشد. چاه‌های عمیق تأمین آب تحت تأثیر عوامل متعدد تخریب می‌شوند و یا آبدهی آن‌ها کاهش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان چنین توضیح داد که در اثر کاهش شدید پتانسیل آبخوان‌ها در سطح کشور، متوسط آبدهی چاه‌ها در سال‌های اخیر کاهش یافته است به طوری که علی‌رغم افزایش تعداد چاه‌ها، میزان تخلیه از آبخوان کاهش داشته است. شکل ۱ روند رشد تعداد چاه‌ها و میزان تخلیه چاه‌ها را در کشور نمایش می‌دهد. بر اساس این شکل، در سال‌های ابتدایی دهه ۱۳۶۰، رشد بسیار سریعی در تخلیه و تعداد چاه‌های بهره‌برداری رخ داده است و پس از آن نیز روند رو به رشد

تعداد چاه‌ها هیچ‌گاه قطع نشده است. روند تخلیه چاه‌ها نیز تا حوالی سال‌های ۱۳۸۷ نسبتاً فزاینده بوده است ولی در طی سال‌های اخیر، روند تخلیه چاه‌ها (علی‌رغم افزایش چاه‌ها) متوقف شده و بعضاً کاهش نیز یافته است. دلیل این امر را می‌توان چنین توضیح داد که در اثر کاهش شدید پتانسیل آبخوان‌ها در سطح کشور، متوسط آبدهی چاه‌ها در سال‌های اخیر کاهش یافته است به طوری که علی‌رغم افزایش تعداد چاه‌ها، میزان تخلیه از منابع آب زیرزمینی کاهش داشته است (Iran Water Resources Management Company, 2013).

در سال‌های اخیر نگرانی‌ها در خصوص افت سطح آب زیرزمینی، کاهش ظرفیت مخزن آبخوان‌ها و کاهش راندمان چاه‌های آب موجب شده تا مطالعات زیادی در رابطه با تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی صورت پذیرد. (Ekrami et al. 2013) به بررسی تأثیر خشکسالی اقلیمی بر منابع آب زیرزمینی پرداختند. نتایج تحقیقات گویای این مطلب بود که علاوه بر برداشت‌های بی‌رویه از آبخوان، خشکسالی منطقه نیز بر کاهش آبدهی چاه، قنوات و چشمه‌های موجود در دشت یزد-اردکان تأثیر گذاشته و زمان تأثیر آن ۲ سال پس از وقوع خشکسالی برآورد گردیده است. (Ghafouri et al. 2013) به بررسی نقش افت سطح ایستابی در افزایش تنش‌های وارده بر لوله‌های جدار اسکرین‌های چاه آب پرداختند. تحقیقات آن‌ها نشان داد در اثر افت سطح ایستابی به تدریج تنش‌های وارده به جدار لوله چاه بیشتر شده و در افت‌های بحرانی می‌تواند موجب تخریب لوله‌های جدار اسکرین‌ها گردد.



شکل ۱- روند رشد تعداد چاه‌ها و میزان تخلیه از آب زیرزمینی در کشور

تحقیقات منابع آب ایران، سال دوازدهم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۵
Volume 12, No. 4, Winter 2017 (IR-WRR)

Ale Khamis et al. (2006) تاثیر نشست حاصل از تخلیه آب زیرزمینی بر تخریب لوله‌های جدار را با روش المان محدود در حالت دو بعدی و سه بعدی با استفاده از نرم‌افزار مدل‌سازی ژئومکانیکی ABAQUS مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مکانیسم ایجاد مخروط افت باعث پدید آمدن دو حالت گسیختگی در لوله جدار می‌گردد.

در یال این مخروط، رسوبات ماسه‌ای فوقانی می‌توانند به سمت مرکز مخروط بر روی رس‌های نرم بلغزند و باعث خمش در لوله جدار گردند. در حالت دوم، با گذشت زمان و افزایش افت سطح ایستایی، تراکم رس‌ها بیشتر و باعث نشست در مرکز مخروط افت می‌شود که در این وضعیت لوله جدار دچار کماتش می‌گردد. Saatsaz et al. (2008) دشت رامهرمز به عنوان یکی از مراکز مهم کشاورزی در جنوب غربی ایران را با استفاده از کد MODFLOW و نرم‌افزار PMWIN جهت مدیریت منابع آب زیرزمینی مدل نمودند. آن‌ها پس از تهیه مدل مفهومی ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان را با روش سعی و خطا و روش اتوماتیک PEST واسنجی کردند. مدل آن‌ها پس از صحت‌سنجی آماده بررسی سناریوهای مختلف همچون ادامه روند موجود و بررسی اثربخشی راهکارهای مختلف مانند نصب و راه‌اندازی زهکش‌هایی در مناطق با سطح بالا آب گردید. Shao et al. (2009) مدل دشتی در شمال چین در شرایط ناپایدار را تهیه کردند. این مدل منطقه‌ای به وسعت ۱۳۹۰۰۰ کیلومتر مربع با شبکه‌بندی یکنواخت ۴×۴ کیلومتر را تحت پوشش قرار داد. ضخامت آبخوان بین ۵۵۰ تا ۶۵۰ متر متغیر بوده و آبخوان با ۳ لایه شبیه‌سازی گردید. همچنین توسط داده‌های بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۳ واسنجی گردید. Benmmou and Chenini (2010) ترکیب خواص سیستم جامع اطلاعات جغرافیایی^۲ و مدل MODFLOW به بررسی مکان‌های مناسب جهت تغذیه مصنوعی آب زیرزمینی در آبخوانی در کشور تونس پرداختند. آن‌ها ابتدا با استفاده از GIS مکان‌های مناسب برای تغذیه مصنوعی را شناسایی کردند و سپس با استفاده از مدل MODFLOW اثرات تغذیه مصنوعی آبخوان در مناطق مذکور را مورد ارزیابی قرار داده و در نهایت مناسب‌ترین منطقه را برای تغذیه مصنوعی آبخوان انتخاب کردند. Rahnema-Rad et al. (2010) دشت ایران‌شهر را با هدف بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی آبخوان منطقه مدل نمودند. آن‌ها با استفاده از روش اتوماتیک و سعی و خطا پارامترها را واسنجی کردند. مقادیر بهینه شده و مناطق پهنه‌بندی شده پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان بهترین مناطق برای توسعه و برداشت از آب زیرزمینی را مشخص کرد. Xu et al. (2012) با ترکیب مدل

MODFLOW و مدل SWAP^۳ به بررسی دقیق سطح آب زیرزمینی در یک منطقه کشاورزی در شمال کشور چین پرداختند. مدل SWAP یک مدل شبیه‌سازی حرکت آب با توجه به شرایط خاک، گیاهان، آب و هوا و غیره می‌باشد. آن‌ها با توجه به اینکه مقادیر تبخیر و تغذیه سطحی در مدل MODFLOW به شکل خیلی ساده و اغلب یکنواخت در نظر گرفته می‌شود، از مدل SWAP استفاده کرده و مقادیر دقیق‌تر این پارامترها را محاسبه و در مدل MODFLOW استفاده کردند. آنها همچنین از مقادیر سطح آب زیرزمینی در مدل MODFLOW به عنوان مرز مدل SWAP استفاده کرده و توانستند نتایج دقیق‌تری در هر دو مدل نسبت به استفاده مدل‌های مذکور به صورت منفرد به دست بیاورند.

همانطور که در بالا اشاره شد یکی از مسائل و مضامین مهم در مدیریت منابع آب زیرزمینی در حال حاضر کاهش راندمان چاه و یا تخریب آن در اثر برداشت‌های بی‌رویه از آبخوان‌ها می‌باشد. در همین راستا وزارت نیرو با هدف حفظ و توسعه منابع آب زیرزمینی در سال ۱۳۹۴ اقدام به اجرای طرح احیا و تعادل‌بخشی آبخوان‌های کشور نموده است. از جمله این اقدامات بررسی اثر کف‌شکنی چاه‌های کشاورزی و حتی‌الامکان محدود نمودن آن جهت صیانت از منابع آب زیرزمینی می‌باشد. لذا در این تحقیق سعی بر آن شده است تا با استفاده از مدل‌سازی ریاضی مکان و حداکثر میزان کف‌شکنی چاه‌های کشاورزی را مشخص نماید.

۲- مواد و روش‌ها

معمولاً مسائل پیچیده عملکرد سامانه‌های طبیعی آب زیرزمینی را که راه‌حل تحلیلی ندارند به کمک مدل‌های ریاضی حل می‌نمایند. مدل ابزاری است جهت ارائه یک بیان تفهیمی یا ترسیمی از سامانه‌های فیزیکی با استفاده از معادلات ریاضی و اگر به نحو مطلوبی تنظیم و ساخته شده باشد می‌تواند وسیله‌ای قابل قبول جهت پیش‌بینی لازم به‌منظور مدیریت بهره‌برداری از منابع آب در نظر گرفته شود. این مطالعات به حدی مهم تلقی شده‌اند که آن را برای انجام تصمیم‌گیری‌های حیاتی و آنالیزهای مدیریتی لازم می‌دانند (Brewer et al. 2003). مدل‌های شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در مقیاس وسیع برای اولین بار در سال ۱۹۷۸ توسط سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا^۴ تحت برنامه‌ای با عنوان راسا^۵ به کار گرفته شد. برخی از آبخوان‌های مشهور در این برنامه، آبخوان دره مرکزی کالیفرنیا، آبخوان فلوریدا و آبخوان حوضه گریته^۶ بوده است. قسمت‌های اصلی این برنامه شامل: (۱) ایجاد پایگاه داده‌های

هیدروژئولوژی، (۲) تهیه مدل مفهومی، (۳) درک پاسخ سامانه آبخوان به تنش‌های طبیعی و فعالیت‌های بشری، تدوین اطلس جامع ملی آب زیرزمینی بوده است. در بین مدل‌های کامپیوتری، بیش‌ترین کاربرد را مدل تفاضل محدود USGS 3D و مدل USGS MODFLOW داشتند. MODFLOW از زمان انتشار خود در سال ۱۹۸۸ به علت ساختار انعطاف‌پذیر، پوشش کامل فرآیندهای هیدروژئولوژیکی آبخوان و دسترسی رایگان به عنوان استاندارد صنعتی در آب‌های زیرزمینی در سراسر دنیا تبدیل شده است. در سال ۲۰۰۰، MODFLOW-88 توسط Harbaugh et al. (2000) به نسخه MODFLOW-2000 و در سال ۲۰۰۵ توسط Harbaugh (2005) به نسخه MODFLOW-2005 به‌روزرسانی شد.

در این پژوهش جهت مدل‌سازی جریان از مدل سه‌بعدی جریان آب زیرزمینی، MODFLOW استفاده شده که از معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی برای شبیه‌سازی استفاده می‌کند:

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

K_{xx} : تانسور هدایت هیدرولیکی در جهت x بر حسب متر در روز
 K_{yy} : تانسور هدایت هیدرولیکی در جهت y بر حسب متر در روز
 K_{zz} : تانسور هدایت هیدرولیکی در جهت z بر حسب متر در روز
W: دبی حجمی تولید یا مصرف آب در واحد حجم (مترمکعب بر روز)
 S_y : ذخیره آبخوان آزاد

بررسی مطالعات انجام گرفته نشان می‌دهد که استفاده از کد MODFLOW جهت مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی در سال‌های اخیر مورد توجه محققان در سراسر دنیا قرار گرفته است. MODFLOW به علت ساختار انعطاف‌پذیرش و توانایی اضافه نمودن بسته‌های جدید باعث شده مدل‌سازی آبخوان‌ها از قابلیت‌های بیشتری در سال‌های اخیر برخوردار شود. افزایش روزافزون تعداد نرم‌افزارهای مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی بر مبنای کد MODFLOW نشان دهنده مقبولیت بالای این کد شبیه‌سازی در بین مهندسين آب‌های زیرزمینی است. یکی از نرم‌افزارهای پر کاربرد در این زمینه GMS می‌باشد که در این تحقیق نیز از آن استفاده شده است.

یکی از نقاط ضعف مدل MODFLOW این است که فرض می‌کند چاه‌های بهره‌برداری بطور کامل در لایه آبخوان حفر شده‌اند و هر لایه آبخوان یک مقدار دبی از هر چاه را می‌پذیرد. این در حالی است که در عمل چاه به صورت ناقص حفر شده و بخشی از طول چاه جریان آب را به سطح زمین هدایت می‌نماید و در صورت افت سطح آب در اثر برداشت، عملکرد چاه کاهش یافته و احتیاج به کف‌شکنی چاه و یا دیگر اقدامات مشابه جهت افزایش راندمان می‌باشد. با توجه به تحقیقاتی که تاکنون انجام شده اثر کف‌شکنی و در نظر گرفتن طول اسکرین چاه جهت بهره‌برداری بطور دقیق مورد ارزیابی قرار نگرفته است. یک مدل باید این قابلیت را دارا باشد تا بتواند شرایط و تنش‌های مختلفی که بر سامانه مورد نظر وارد می‌شود را در هر شرایطی و با تغییر سیستم شبیه‌سازی کند. زمانی که فرض شود چاهی به طور کامل در آبخوان حفر شده است دیگر امکان اینکه چاه پس از مدتی و در اثر برداشت‌های بی‌رویه خشک گردد و نیاز به افزایش عمق چاه و رسیدن به لایه‌های آبدار زیرین می‌باشد را نمی‌توان شبیه‌سازی نمود. درحالی‌که پتانسیل آبخوان در اثر افت سطح آب در حال کاهش است و لازم است این اثر در مدل‌سازی و پیش‌بینی‌ها دیده شود. در این تحقیق سعی شده است تا این معضل با استفاده از ویژگی‌های خود MODFLOW و با امکانات و توانایی‌های محدود موجود در حد امکان حل شود تا در آینده بتواند سر آغازی برای مطالعات بیشتر در این زمینه باشد. MODFLOW این قابلیت را دارد تا با استفاده از تقسیم دبی چاه‌ها به نسبت ضریب قابلیت انتقال لایه‌ها دبی را به یک آبخوان چند لایه اختصاص دهد. با این کار می‌توان عمق چاه را که قبلاً بطور کامل فرض می‌گردید به لایه‌های مختلف نسبت داد و اینگونه چاه عمق‌های مختلفی را طی شبیه‌سازی به خود می‌گیرد و می‌توان در مدل عمقی که چاه در آبخوان حفر گردیده را مشخص نمود. از این رو در این تحقیق با استفاده از این قابلیت و تبدیل آبخوان تک لایه به چند لایه اثر طول اسکرین و افزایش عمق چاه به علت برداشت بی‌رویه در منطقه مورد مطالعه شبیه‌سازی شده است.

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

دشت ساوه با وسعتی معادل ۴۰۷۰ کیلومترمربع که حدود ۲۵۱۵ کیلومترمربع آن را ارتفاعات و ۱۵۵۵ کیلومترمربع آن را دشت تشکیل می‌دهد به‌عنوان جزئی از حوضه آبریز دریاچه نمک در بخش انتهایی زیر حوضه قره‌چای در حدفاصل طول‌های جغرافیایی "۳۵° ۵۹' ۴۹" تا "۲۷° ۰۳' ۲۷" شرقی و عرض‌های جغرافیایی "۲۳° ۲۷' ۳۴" تا "۱۶° ۱۲' ۳۵" شمالی واقع شده است (شکل ۲). محدوده مورد بررسی

از جنوب به حوضه‌های آبریز کویر مغان و قمرود، از شمال به حوضه آبریز سه‌رود و از غرب به حوضه آبریز رودخانه قره‌چای (محدوده استان همدان و مرکزی) و از شرق نیز به دریاچه حوض سلطان محدود می‌شود (Markazi Regional Water, 2011).

بخش غربی دشت و بلوک B (دشت علی‌آباد) در قسمت شرقی دشت تقسیم شده است. همچنین آبخوان‌های محدوده‌های مطالعاتی خنجین، تلخاب و تفرش نیز به طور مستقیم ارتباط هیدرولوژیکی با آبخوان ساوه داشته و در واقع ورودی‌های آب زیرزمینی به بخش مرکزی ساوه هستند. محدوده آبخوان‌های بلوک B در شکل ۲ مشخص شده است (Middle East Water & Environment (MEWE), 2010)

۲-۲- شبیه‌سازی آبخوان دشت علی‌آباد

به منظور شبیه‌سازی تغییرات سطح آب زیرزمینی در دشت علی‌آباد ابتدا لازم است تا مدل مفهومی آبخوان تهیه شود. جهت توسعه مدل مفهومی با استفاده از مدول GIS و دیگر ابزارهای موجود در نرم‌افزار GIS هندسه آبخوان، مرز محدوده مدل‌سازی، میزان تخلیه چاه‌های بهره‌برداری، مشخصات چاه‌های مشاهده‌ای، ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان، توپوگرافی سطحی و سنگ کف، تغذیه آبخوان و شرایط مرزی محدوده ایجاد گردیده و خواص همه عوارض مشخص و در مدل تبیین گردیده است.

متوسط بارندگی سالانه در این منطقه به ترتیب در دشت و ارتفاعات برابر ۱۷۶ و ۲۳۷ میلی‌متر است. در این منطقه دمای متوسط سالانه به تفکیک دشت و ارتفاعات به ترتیب برابر ۱۷ و ۱۴ درجه سانتیگراد می‌باشد. همچنین بر اساس نتایج بدست آمده از ایستگاه‌های تبخیر سنجی در این منطقه، میزان تبخیر در دشت و ارتفاعات به ترتیب معادل ۲۶۳۰ و ۲۳۲۳ میلی‌متر در سال برآورد شده است. کسری ذخیره مخزن متوسط سالیانه در این محدوده ۶۵ میلیون متر مکعب است (Middle East Water & Environment (MEWE), 2010).

با توجه به شرایط زمین‌شناسی منطقه و وجود موانع خاص زیرزمینی و تغییرات سنگ کف، آبخوان یکپارچه‌ای در این محدوده وجود ندارد به طوری که دشت ساوه به دو آبخوان آزاد به اسامی بلوک A در



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی ساوه

واقعیت نزدیکتر شود. شکل ۳ برآزش مقادیر محاسباتی و مشاهداتی پیرومترها را در شرایط پایدار بعد از واسنجی مدل نشان می‌دهد.

پس از واسنجی مدل بیشترین مقدار هدایت هیدرولیکی ۳۸/۳۵ متر بر روز و کمترین مقدار آن ۵/۴۷ متر بر روز می‌باشد. روند تغییرات از شمال به جنوب افزایشی بوده است.

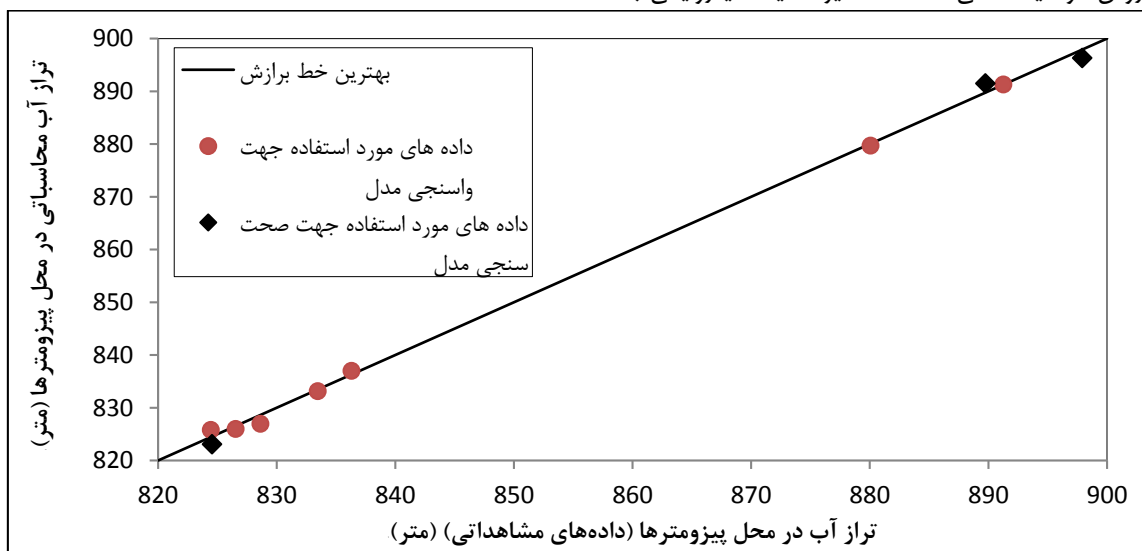
۲-۲-۲- شبیه‌سازی آبخوان در شرایط ناپایدار

از آنجایی که جریان آب زیرزمینی در طبیعت اغلب به صورت ناپایدار می‌باشد یعنی در طول زمان سطح آب زیرزمینی تحت تأثیر عوامل تغذیه و تخلیه تغییر پیدا می‌کند، لذا پس از واسنجی مدل در شرایط پایدار نیاز به شبیه‌سازی ناپایدار می‌باشد. برای شبیه‌سازی جریان در حالت ناپایدار نیاز به داده‌های زیاد در طول زمان است؛ لذا تغییرات تخلیه چاه‌های بهره‌بردار و همچنین تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی چاه‌های مشاهداتی برای سال ۱۳۸۹ و به صورت ماهیانه در نظر گرفته شده است. داده‌های چاه‌های مشاهداتی برای این دوره زمانی به صورت ماهیانه برای سال ۱۳۸۹ مرتب شده است. این داده‌ها به صورت یک فایل متنی شامل تراز سطح آب زیرزمینی به همراه ساعت و تاریخ اندازه‌گیری به مدل GMS وارد شده است. در شرایط ناپایدار پارامتر ضریب ذخیره آبخوان نیز باید مشخص شود. از آنجاییکه آبخوان در این تحقیق آزاد است به‌جای ضریب ذخیره از آبدهی ویژه استفاده شده است.

برخی از این مشخصات ابتدا در محیط نرم‌افزار GIS تهیه و از طریق زیربرنامه GIS موجود در نرم‌افزار GMS تعریف شده است و برخی از پارامترها مانند شرایط مرزی با استفاده از ابزارهای موجود در نرم‌افزار مشخص شده است. پس از جمع‌آوری و ارزیابی اطلاعات و توسعه مدل مفهومی، مدل عددی آبخوان تهیه شده است. جهت شبکه‌بندی مدل از سلول‌هایی با ابعاد ۵۰۰×۵۰۰ متر استفاده شده است.

۲-۲-۱- واسنجی و صحت سنجی مدل

همواره مطالعه بر روی جریان آب‌های زیرزمینی و پارامترهای هیدرولیکی تأثیرگذار بر آن به علت ماهیت پیچیده و همچنین هزینه بر بودن انجام آزمایشات مختلف برای درک رفتار آن، از مشکلات زیادی برخوردار بوده است. یکی از این پارامترها که از حساسیت بالایی نیز برخوردار بوده و تغییر آن تأثیر زیادی بر روی نتایج مدل داشته، هدایت هیدرولیکی می‌باشد. از این رو برای اینکه بتوان مقادیر دقیقی از این پارامتر را به مدل تخصیص داد مدل نسبت به پارامترهای معلوم واسنجی می‌گردد. بدین منظور مدل دشت مورد مطالعه در شرایط پایدار اجرا و ضریب هدایت هیدرولیکی آبخوان نسبت به مقادیر مشاهده‌ای سطح آب پیرومترها و با استفاده از کد PEST واسنجی شده است. چون نتایج قرائت شده از تراز سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای از دقت بالایی برخوردار هستند، لذا با استفاده از کاهش خطای بین مقادیر مشاهده‌ای و مقادیر محاسباتی توسط مدل به روش اتوماتیک سعی شده تا مقادیر هدایت هیدرولیکی به



شکل ۳- نمودار پراکندگی مقادیر محاسباتی و مشاهداتی چاه‌های مشاهده‌ای پس از واسنجی و صحت سنجی مدل در حالت پایدار

گرفته شده است و با افت سطح آب در هر مرحله از اجرای مدل طول اسکرین چاه به لایه‌های بعدی افزایش پیدا می‌کند. پس از تقسیم مدل اصلی به ۴ لایه، به منظور ایجاد کف‌شکنی و افزایش عمق چاه‌های بهره‌برداری بعد از سعی و خطا ۴ لایه دیگر با اعماق برابر ۲۰ متر به آن اضافه گردیده است. در نهایت مدل اصلی به یک آبخوان ۸ لایه تبدیل و در شرایط پایدار اجرا گردید.

۳- نتایج و بحث

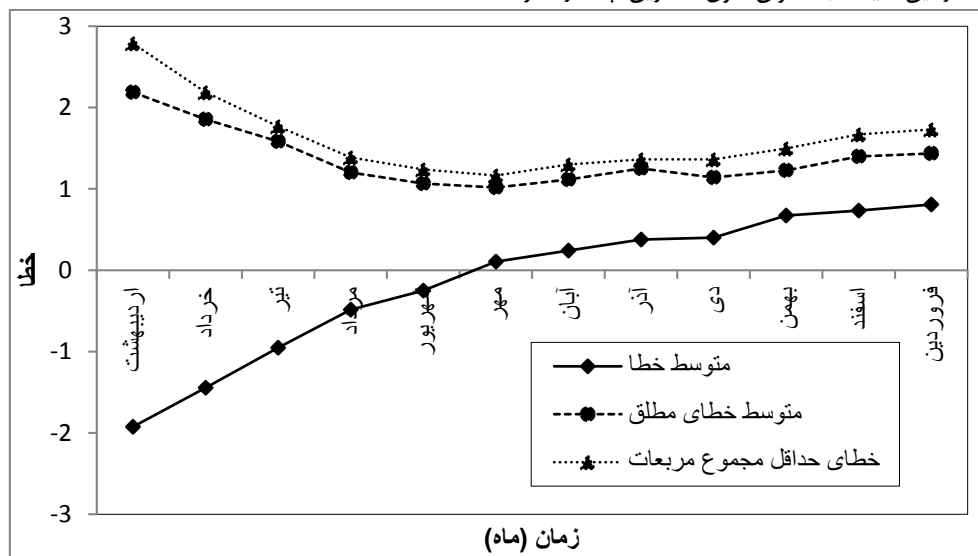
در این تحقیق از نرم‌افزار GMS به علت پشتیبانی از زیربرنامه GIS جهت تهیه مدل مفهومی استفاده شده است. لذا بسیاری از اطلاعات ورودی به نرم‌افزار ابتدا در محیط نرم‌افزار GIS تهیه و سپس به GMS تخصیص داده شده است. همانطور که اشاره شد یکی از ضعف‌های MODFLOW عدم در نظر گرفتن طول اسکرین در چاه و در نتیجه کف‌شکنی چاه در اثر افت سطح آب می‌باشد.

در طبیعت هنگامی که سطح آب در آبخوان پس از برداشت پایین می‌افتد، برای رفع نیاز آبی مصرف‌کنندگان احتیاج به تامین مجدد آب چاه‌های بهره‌برداری است که این کار از طریق کف‌شکنی و افزایش عمق چاه امکان پذیر است. این موضوع یکی از مشکلات اساسی در بحث مدیریت پایدار به‌شمار می‌رود. این در حالی است که MODFLOW چاه را بطور کامل در لایه آبخوان در نظر گرفته و دیگر امکان افزایش عمق چاه وجود ندارد.

برای این کار پوشش جدیدی در GMS با عنوان آبدهی ویژه اضافه و مقدار آن بر اساس گزارش موجود برابر ۳ درصد در نظر گرفته شده است. همچنین قبل از اجرا مدل در حالت ناپایدار از مقادیر بار هیدرولیکی واسنجی شده در شرایط پایدار به عنوان مقادیر اولیه سطح آب در حالت ناپایدار استفاده شده است. مقادیر میانگین خطا در ماه‌های مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است.

پس از واسنجی و اجرای مدل در شرایط ناپایدار، مدل آماده برای اجرای سیاست‌ها و سناریوهای مدیریتی مختلف می‌باشد. از آنجاییکه نرم‌افزار GMS ابزارهای لازم برای شبیه‌سازی اثر کف‌شکنی را در اختیار ندارد، از این رو برای آنکه بتوان چاه‌های بهره‌برداری را با نفوذ ناقص در آبخوان در نظر گرفت، آبخوان تک لایه پس از چندین مرحله آزمون سعی و خطا و بررسی شرایط مختلف به یک آبخوان هشت لایه تبدیل گردید.

روند انجام کار بدین صورت می‌باشد که پس از تقسیم آبخوان تک لایه به چند لایه مختلف ظرفیت مخزن آبخوان و همچنین میزان پمپاژ در لایه‌ها تغییر می‌کند. این تغییر به صورت افزایش ظرفیت آبخوان و پمپاژ تا لایه‌ای که دربرگیرنده شرایط فعلی آبخوان می‌باشد ادامه می‌یابد؛ اما پس از این لایه و با افزایش تعداد لایه‌ها با توجه به اینکه سطح آب زیرزمینی افت می‌کند لذا با افزایش ظرفیت مخزن و افت سطح آب زیرزمینی بخش‌هایی از آبخوان خشک گردیده است. در این تحقیق مدل اصلی به ۴ لایه و با ضخامت‌های مختلف تبدیل شده است. هر یک از این لایه‌ها به عنوان طول اسکرین چاه در نظر



شکل ۴- مقادیر خطا محاسباتی در ماه‌های مختلف (واسنجی مدل در حالت ناپایدار)

مضاعفی بر افت در این مناطق دارد. همچنین روند تغییرات ضریب هدایت هیدرولیکی از شمال به جنوب افزایشی بوده و لذا می‌توان نتیجه گرفت که در بخش‌های جنوبی به علت هدایت هیدرولیکی بالا آب با سهولت بیشتری به سمت چاه‌های بهره برداری هدایت می‌شود. این روند تا جایی ادامه می‌یابد که در اثر کفشکنی به میزان ۸۰ متر آبخوان به بیش‌ترین میزان ظرفیت خود رسیده است. با توجه به تراز سطح آب زیرزمینی طبق شکل ۵ قسمت جنوب غربی دشت و بخش‌هایی از شرق و جنوب شرق محدوده مطالعاتی خشک گردیده است. در واقع عمق بحرانی کفشکنی برای این آبخوان ۸۰ متر بوده و چنانچه میزان کفشکنی از این عمق تجاوز نماید بخش‌های وسیع‌تری از آبخوان را دچار بحران می‌کند.

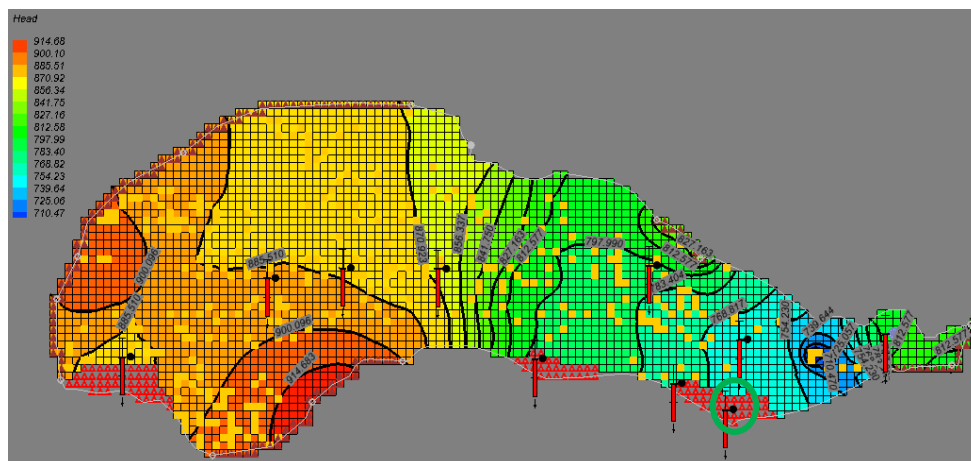
شکل ۶ تغییرات میزان پتانسیل برداشت از آبخوان در اثر افزایش عمق چاه‌های بهره‌برداری را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌گردد، نمودار دارای شکستگی در محدوده لایه چهارم دارد. دلیل کاهش نرخ افزایش پتانسیل بهره برداری از آبخوان در ازای افزایش عمق چاهها، خشک شدن برخی بخشهای آبخوان می‌باشد. از اینرو ارائه مجوز حفر چاه یا کف شکنی بیش از عمق ۴۰ متر منجر به خشک شدن چاهها در برخی مناطق دشت و به تبع آن نارضایتی‌های اجتماعی خواهد شد. از اینرو می‌توان گفت ارائه مجوز کف شکنی به چاههای کشاورزی نه تنها یک آسیب جدی به آبخوان و محیط زیست منطقه می‌باشد بلکه یک رویکرد در راستای توزیع ناعادلانه آب در سطح دشت می‌باشد. در اثر کف شکنی چاهها ممکن است بخشهایی از دشت کاملاً از بین رفته و مهاجرتهای روستاییان آن منطقه را داشته باشیم چراکه دیگر آمیدی به بازگشت آب به چاههای آن منطقه نخواهد بود. بررسی نتایج و تحلیل نمودار نشان می‌دهد که حداکثر عمق عادلانه برای برداشت از پایدار و یکسان در دشت ساوه محدوده عمق ۴۰ متر می‌باشد. اما از لایه چهارم به بعد و با شروع کفشکنی شیب این نمودار کاهش یافته که نشان می‌دهد ظرفیت آبخوان در حال کاهش است. در واقع این موضوع را می‌توان اینگونه بیان نمود که هرچند میزان طول اسکرین چاه افزایش یافته اما این افزایش تا جایی ادامه دارد که آبخوان در شرایط پایدار باشد.

برای رفع این مشکل در این تحقیق آبخوان تک لایه در نرم‌افزار GMS ابتدا به یک آبخوان ۴ لایه با ضخامت‌های مختلف تبدیل شده است تا بتوان این روش کار را صحت‌سنجی نمود. در واقع هنگامی که مدل به ۴ لایه تقسیم می‌شود و هر لایه دارای خصوصیات یکسان می‌باشند انتظار می‌رود که نتایج حاصل از اجرا مدل در این شرایط با نتایج به دست آمده از مدل در وضعیت تک لایه یکسان باشد که همین اتفاق نیز رخ داد و مشاهده گردید که نتایج تراز سطح آب با نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی آبخوان تک لایه در شرایط پایدار پس از واسنجی تقریباً مشابه است. در واقع با انجام این کار روش مورد استفاده صحت‌سنجی شده و نشان می‌دهد که با تقسیم آبخوان به ۴ لایه شرایط آبخوان اصلی تغییر نکرده است و از اطمینان خوبی برای مدل‌سازی اثر کفشکنی برخوردار است. در ادامه برای آنکه بتوان اثر کفشکنی را مشاهده نمود ۴ لایه دیگر با ضخامت برابر ۲۰ متر به عنوان کفشکنی نسبت به شرایط فعلی به ضخامت آبخوان اضافه شده است. برای مشاهده تاثیر افزایش عمق چاه بر راندمان آن مدل در هریک از این لایه‌ها اجرا شده است. جدول ۱ تغییرات سطح آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای نسبت به لایه چهارم (شرایط فعلی آبخوان) را در هر لایه نشان می‌دهد.

همانطور که از جدول ۱ مشاهده می‌شود و با توجه به نقشه‌های حاصل از اجرای مدل در هر گام کفشکنی، تغییرات محسوس افت سطح آب زیرزمینی مشاهده می‌شود. حداقل افت سطح آب بیش‌تر در مناطق شمالی و مرکزی دشت رخ داده است. کم‌ترین میزان افت سطح آب در شکل ۵ در قسمت شرقی منطقه رخ داده است. عمده تغییرات افت در مناطق جنوب غربی و جنوب شرقی دشت در پی‌زومتری که در شکل ۹ مشخص شده رخ داده است. بررسی نقشه‌های توپوگرافی و ضخامت آبخوان نشان می‌دهد که در این مناطق آبخوان کمترین ضخامت را داشته و از پتانسیل ذخیره کمتری نسبت به مناطق دیگر برخوردار است. لذا در اثر کفشکنی به شدت این مناطق حساس بوده و از ظرفیت آن‌ها کاسته شده است. از طرفی گرادبان هیدرولیکی نیز در این مناطق معکوس بوده و با افت سطح آب به سمت مناطق عمیق‌تر آب را هدایت کرده و تاثیر

جدول ۱- افت سطح آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای نسبت به لایه چهارم

افت چاه‌های مشاهده‌ای (m)	۲۰ متر کفشکنی	۴۰ متر کفشکنی	۶۰ متر کفشکنی	۸۰ متر کفشکنی
حداکثر افت	۱۳/۶	۲۷/۷	۴۳	خشک
حداقل افت	۲/۲	۴/۶	۷	-
میانگین افت	۷/۶	۱۵	۲۳	-



شکل ۵- نقشه تراز سطح آب زیرزمینی پس از ۸۰ متر کف شکنی



شکل ۶- نمودار تغییرات پتانسیل برداشت از آبخوان در برابر افزایش عمق چاههای بهره برداری

مدل موجب گردیده تا دید قابل درکی نسبت به افزایش عمق چاهها و تاثیر آن در مدیریت منابع آب زیرزمینی بدست آید. تهیه مدل مفهومی دشت علی آباد نشان دهنده وضعیت بحرانی در این منطقه می باشد. نتایج نشان می دهد که مدل نسبت به ضریب هدایت هیدرولیکی به شدت حساس است. کاهش سطح آب مخصوصا در نواحی شرقی و جنوب غربی خطرات جبران ناپذیری همچون خشک شدن چاههای بهره برداری و ایجاد نشست در این منطقه را به دنبال خواهد داشت. اگر چنانچه روند صدور پروانه حفر چاههای جدید و مجوز برای کف شکنی چاههای موجود ادامه یابد به مرور ذخیره استاتیک آبخوان از بین می رود. همچنین اضافه برداشتها باعث کاهش راندمان چاهها و در طول زمان خشک شدن تدریجی آبخوان می گردد. از اینرو می توان گفت ارائه مجوز کف شکنی به چاههای کشاورزی نه تنها یک آسیب جدی به آبخوان و محیط زیست دشت

از مقایسه این نمودار با نمودار شکل ۱ ملاحظه می گردد که این روش به خوبی توانسته تاثیر افزایش عمق و آبدهی چاه را با افزایش تعداد چاه در گذر زمان شبیه سازی نموده و نتایج قابل قبولی را ارائه دهد. با استفاده از این روش جدید برای مدل سازی اثر کف شکنی هم می توان روند افزایش عمق چاه و تاثیر آن بر افت سطح آب زیرزمینی را مشاهده و عمق بحرانی برای کف شکنی در آبخوانها را پیش بینی نمود.

۴- جمع بندی

در این تحقیق سعی بر آن بوده که به یکی از مشکلات رایج در مدیریت منابع آب زیرزمینی که در سالهای اخیر مشکلات فراوانی را در اکثر مناطق ایران به وجود آورده است پرداخته شود. استفاده از

time delay and the change in water discharge of springs qanats (case study: Yazd-Ardakan Plain). Iran-Water Resources Research 9(2):19-26 (In Persian)

Ghafouri MR, Shamohammadi A, Kazemi GA, Moradi Harsini K, Sharifi H (2013) Impact of the groundwater drawdown on the instability and deterioration of water well screens. Iran-Water Resources Research 9(2):42-51 (In Persian)

Harbaugh AW (2005) MODFLOW-2005: The US geological survey modular groundwater model, the ground-water flow process. US Department of the Interior, US Geological Survey Reston, VA, USA

Harbaugh AW, Banta ER, Hill MC, McDonald MG (2000) MODFLOW-2000: The US geological survey modular groundwater model, User guide to modularization concepts and the groundwater flow process, USGS Open-File Rep, 92p

Iran Water Resources Management Company (2013) Investigating the conditions of groundwater resources of the country. Basic Studies Office of Water Resources (In Persian)

Markazi Regional Water Company (2011) Acceptable report of reformation of saveh plain. Basic studies office of water resources (In Persian)

Rahnama-Rad J, Bavali MY, Derakhshani R (2010) Optimization of hydraulic parameters of Iranshahr alluvial aquifer, American Journal of Environmental Sciences 6 (6), 477-483.

Saatsaz M, Nor W, Sulaiman A (2008) The application of MODFLOW and PMWIN in groundwater management of Ramhormooz Plain, Iran. In: Int. Conf. Sci. Technol. Appl. Ind. Educ. (ICSTIE'08), Permatang Pauh, Penang, Malaysia, December 12-13.

Shao JL, Zhao ZZ, Cui YL, Wang R, Li CQ, Yang QQ (2009) Application of groundwater modeling system to the evaluation of groundwater resources in North China plain. Resour Sci 31(3):361-367

Middle East Water & Environment (MEWE) Engineers (2010) Updating studies of water resources balance in salt lake watershed. Tehran Regional Water Board (In Persian)

Xu X, Huang G, Zhan H, Qu Z, Huang Q (2012) Integration of SWAP and MODFLOW-2000 for modeling groundwater dynamics in shallow water table areas. J. Hydrol 412:170-181

Zhou Y, Li W (2011) A review of regional groundwater flow modeling. Geosci Front 2(2):205-214

بوده بلکه یک رویکرد در راستای توزیع ناعادلانه آب در سطح دشت می‌باشد. در اثر کف شکنی چاهها ممکن است بخشهایی از دشت کاملاً از بین رفته و مهاجرتهای روستاییان آن منطقه را داشته باشیم چراکه دیگر امیدی به بازگشت آب به چاههای آن منطقه به دلیل افت شدید تراز آب زیرزمینی در اثر کف شکنی دیگر مناطق نخواهد بود. لذا ضروری است تا با ارائه راهکارهای مدیریتی مناسب در راستای تعادل بخشی آبخوان از این خطرات و پیامدها جلوگیری شود. از جمله راهکارهای عملی در این منطقه می‌توان به ارائه راهکارهای تعادل بخشی بین منابع آب سطحی و زیرزمینی، تغییر در الگوی کشت کشاورزی جهت بکار بردن محصولات کم آب، عدم احداث و توسعه صنایع آب بر، کاهش میزان بهره‌برداری از چاهها و عدم صدور مجوز کف شکنی و حفر چاههای جدید اشاره نمود.

۵- تقدیر و تشکر

این مقاله نسخه تکمیل و داوری شده مقاله ارائه شده در ششمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران می‌باشد. این کنفرانس در اردیبهشت ماه سال ۱۳۹۵ در شهر سمنان برگزار شد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Subsidence
- 2- Geographic Information System (GIS)
- 3- Soil – Water – Atmosphere – Plant
- 4- U.S. Geological Survey (USGS)
- 5- Regional Aquifer System Analysis (RASA)
- 6- Great basin

۶- مراجع

Ale Khamis R, Kariminasab S, Aryana F (2006) Investigating the effect of land subsidence due to groundwater discharge on well casing damage. Journal of Water & Wastewater 17(4):77-88 (In Persian)

Brewer K, Fogle T, Stieve A, Barr C (2003) Uncertainty analysis with site-specific groundwater models: experiences and observations. US Dep, Energy, Oak Ridge, TN

Chenini I, Ben Mammou A (2010) Groundwater recharge study in arid region: An approach using GIS techniques and numerical modeling. Comput Geosci 36(6):801-817

Ekrami M, Ekhtesasi MR, Malekinezhad H (2013) The effects and consequences of climatic drought on