

## پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی تحت سناریوهای مختلف مدیریتی با استفاده از مدل MODFLOW

روح‌اله یاری<sup>۱</sup>، عبدالله درزی نفت‌چالی<sup>۲</sup>

تاریخ ارسال: ۱۳۹۵/۱۱/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۱۸

### چکیده

به علت خشکسالی‌های اخیر و برداشت بیش از اندازه از منابع آب زیرزمینی، سطح ایستابی آبخوان قم دچار افت شدیدی شده است که نتیجه آن پیشروی آب شور به این آبخوان و تشدید پدیده فرونشست بود. به منظور جلوگیری از وقوع این بحران، مدیریت بهره‌برداری از منابع آب باید به عنوان یک اصل در برنامه ریزی‌های کشور مد نظر قرار گیرد. مدل‌های شبیه‌سازی ابزارهای مناسبی برای مدیریت کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی می‌باشند. در این تحقیق، کارایی مدل سه بعدی و تفاضل محدود MODFLOW برای شبیه‌سازی سطح ایستابی آبخوان قم با استفاده از داده‌های یک دوره دوساله (مهر ۱۳۸۲ تا شهریور ۱۳۸۴) ارزیابی شد. مدل به‌ترتیب به پارامترهای آبدهی ویژه، هدایت هیدرولیکی، تغذیه و تخلیه بیشترین حساسیت را نشان داد. ضریب همبستگی و جذر میانگین مربعات خطا در مرحله واسنجی، به ترتیب بین ۰/۲۴ تا ۰/۹۹ و ۰/۰۱ تا ۰/۱۴ متر متغیر بود. تغییرات ضریب همبستگی و جذر میانگین مربعات خطا در مرحله صحت‌سنجی به ترتیب بین ۰/۵۲ تا ۰/۹۷ و ۰/۰۲ تا ۱/۱۴ بود. برای ارزیابی عکس‌العمل آبخوان به تنش‌های مختلف، شش سناریو مدیریتی (ادامه روند موجود بهره‌برداری از چاه‌ها و تغذیه به منابع آب زیرزمینی، کاهش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصدی و کاهش پلکانی از برداشت منابع آب زیرزمینی و ادامه برداشت در شرایط موجود و تغذیه مصنوعی سفره آب زیرزمینی با استفاده از پساب شهری) تا افق ۱۴۰۰ تعریف و بررسی گردید. بر اساس نتایج مدل، بهترین سناریو برای تعادل بخشی و احیاء آب زیرزمینی، تغذیه مصنوعی با استفاده از پساب تا افق ۱۴۰۰ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: بیان آب، صحت‌سنجی، ضرایب هیدرودینامیکی، مدیریت آبخوان، واسنجی.

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری علوم مهندسی آبیاری، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران، ۹۱۲۲۵۳۰۷۳۴، Ryari10@gmail.com

<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران، ۰۹۱۱۹۲۶۲۵۹۸، Abdullahdarzi@yahoo.com (نویسنده مسئول)

## مقدمه

افزایش بی‌رویه جمعیت در سال‌های اخیر، محدودیت منابع آب‌های سطحی و در نتیجه فشار بیش از اندازه به سفره‌های آب زیرزمینی باعث خسارات جبران ناپذیری به منابع آب زیرزمینی کشور شده است. به منظور جلوگیری از ادامه این بحران و تعادل بخشی و احیاء آب زیرزمینی، مدیریت بهره‌برداری از منابع آب باید به‌عنوان یک اصل در برنامه‌ریزی‌های کشور مد نظر قرار گیرد. مهمترین بخش در فرآیند مدیریت، آگاهی از پاسخگویی سیستم در قبال تصمیم‌های اتخاذ شده قبل از اجرای آن می‌باشد. در این راستا، مدیریت سیستم آب‌های زیرزمینی که در آن اخذ هر گونه تصمیمی با در نظر گرفتن دو معیار کمیت و کیفیت آب مطرح می‌باشد، نیاز به ابزاری دارد تا بتواند با توجه به اطلاعات فعلی و متغیرهای تصمیم‌گیری، وضعیت سفره را در آینده پیش‌بینی کند (خلقی، ۱۳۸۰). یک مدل آب زیرزمینی در واقع فرم ساده شده‌ای از یک سیستم واقعی آب‌های زیرزمینی است که به طور تقریبی همبستگی بین عمل و عکس‌العمل هیدرودینامیکی در یک سیستم را ارائه می‌کند (Anderson, 1992, Arnold, 2013). مدل‌های شبیه‌سازی آب زیرزمینی در صورتی که به خوبی کالبره شده باشند، ابزار اکتشافی و پیش‌بینی مناسبی خواهند بود (Scibek and Allen, 2006).

یکی از معروف‌ترین مدل‌های آب زیرزمینی برای توصیف و پیش‌بینی رفتار آبخوان‌ها، مدل سه بعدی MODFLOW می‌باشد. این مدل توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا توسعه داده شد و قادر است به خوبی معادله‌های جریان آب زیرزمینی را بر پایه روش تفاضل‌های محدود حل نماید (Harbaugh et al., 2000). با استفاده از مدل MODFLOW می‌توان تأثیر چاه‌ها، رودخانه‌ها، زهکش‌ها، مرزهای با هد متغیر، تغذیه و تبخیر-تعرق بر رفتار آبخوان را شبیه‌سازی نمود. از این مدل برای شبیه‌سازی آب زیرزمینی آبخوان استفاده شد و نتیجه گرفته شد که مدل قادر است به خوبی سطح ایستابی را پیش‌بینی نماید (ابریشمی و همکاران، ۱۳۸۰). همچنین، وضعیت آب زیرزمینی دشت هشتگرد را با استفاده از

مدل MODFLOW مورد بررسی قرار دادند و مقادیر بهینه ضرایب هیدرودینامیکی و توزیع مکانی و زمانی تغذیه و تخلیه آبخوان را در دو حالت رژیم ماندگار و غیرماندگار تعیین کردند و پس از واسنجی مدل، وضعیت کمی آبخوان را برای سه دوره هیدرولوژیکی ۵ ساله خشک، عادی و مرطوب، پیش‌بینی شد (رویا، ۱۳۸۱). نتیجه این مطالعه حاکی از افزایش سطح آب زیرزمینی به میزان ۱/۳ متر در دوره ۵ ساله خشک، ۱/۳۹ متر در دوره ۵ ساله نرمال و ۱/۴ متر در دوره ۵ ساله مرطوب بود. مدل MODFLOW برای پیش‌بینی عکس‌العمل آبخوان تحت سناریوهای مختلف مدیریتی مورد استفاده قرار گرفت که نتایج رضایت‌بخشی در برداشت (Pisinaras et al., 2007, Rojas and Dassargues, 2007)

توانایی مدل MODFLOW در شرایط مختلف ژئولوژیکی و هیدروشیمیایی نیز بررسی شد. به عنوان مثال، این مدل برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در آبخوان‌های کارستی (Karaya and Hajnala, 2015) و تجاوز آب شور به آبخوان به کار گرفته شد (Priyanka and Maheshab, 2015). جامعیت مدل MODFLOW در شبیه‌سازی آب زیرزمینی، باعث افزایش کاربری آن در سایر بخش‌های مرتبط نیز شد. امروزه این مدل برای بررسی اندرکنش آب‌های زیرزمینی و آب‌های سطحی، با مدل‌های ریاضی مختلف جفت می‌گردد (Kim et al., 2008). در برخی تحقیقات، برای پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر آب زیرزمینی، مدل MODFLOW در ترکیب با برخی مدل‌های اقلیمی مورد استفاده قرار گرفت (Scibek and Allen, 2006). همچنین، این مدل برای بررسی تغییرات کاربری اراضی و تغذیه منابع آب زیرزمینی کاربرد فراوان دارد (Zhang and Hiscock, 2010).

مرور تحقیقات انجام شده نشان از جامعیت مدل MODFLOW در شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی دارد. با این وجود، کارایی مدل در آبخوان‌های ممنوعه-بحرانی که دچار اضافه برداشت‌های روزافزون و افت شدید سطح ایستابی می‌باشند، بررسی نشده است. با توجه به اهمیت مدیریت آبخوان و پیش‌بینی

طول شرقی و "۵۲' ۲۴" ۳۴° تا "۷' ۳۴" ۳۴° عرض شمالی قرار دارد. وسعت کل این محدوده حدود ۱۸۱۵ کیلومتر مربع است که ۱۱۳۶ کیلومتر مربع از آن را دشت‌ها و مابقی را ارتفاعات منطقه پوشش می‌دهند (بی نام، ۱۳۷۹). موقعیت استان قم در کشور و موقعیت منطقه مطالعه در این استان در شکل (۱) آرایه شد.

عکس‌العمل سفره آب زیرزمینی در اثر تنش‌های وارده به آبخوان دشت ممنوعه-بحرانی قم، در این تحقیق، عکس‌العمل آبخوان به پنج سناریو مدیریتی با استفاده از مدل MODFLOW بررسی می‌شود.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعه در قسمت غربی دریاچه نمک و در جنوب استان قم بین "۳۷' ۴۷" ۵۰° تا "۱۵' ۵۰" ۵۱°



شکل (۱): موقعیت استان قم در کشور و منطقه مطالعه در این استان (الف) - موقعیت آبخوان در منطقه مطالعه (ب).

برای شبیه‌سازی از اطلاعات آماربرداری سال‌های ۱۳۸۲-۱۳۸۴ استفاده شد. دوره‌های زمانی شبیه‌سازی از مهر ۱۳۸۲ شروع و در شهریور ۱۳۸۴ خاتمه می‌یابد. هر سال به ۱۲ دوره تنش ماهانه تقسیم گردید. دوره‌های تنش به گام زمانی کوچکتری نیز تقسیم می‌گردند که به صورت روزانه تعریف شد. بنابراین، در فصول بهار و تابستان هر دوره تنش ۳۱ روز و پاییز و زمستان ۳۰ روزه می‌باشند. ماه مهر سال ۱۳۸۲ به‌عنوان ماه تعادل در نظر گرفته شد. از اطلاعات این ماه برای واسنجی مدل در حالت پایدار، و برای حالت ناپایدار نیز از اطلاعات موجود تا شهریور ماه ۱۳۸۳ استفاده شد. آبخوان مورد مطالعه با وسعت ۴۲۳ کیلومترمربع به شبکه‌های مربع شکل با ابعاد ۵۰۰×۵۰۰ مترمربع تقسیم گردید. شبکه‌بندی آبخوان قم دارای ۷۴ ستون و ۶۰ ردیف است که تشکیل ۴۴۴۰ سلول را می‌دهند. ارتفاع لایه پایینی آبخوان به مدل وارد گردید. لایه پایین که همان سنگ کف می-

### شبیه‌سازی سطح ایستابی آب زیرزمینی

مدل MODFLOW یک مدل سه بعدی جریان آب زیرزمینی است که به طور گسترده در شبیه‌سازی آبخوان در سطح جهانی استفاده می‌گردد (Chiang, 2005, McDonald and Harbaugh, 1988). مدل از روش تفاضل‌های محدود برای حل معادلات جریان آب زیرزمینی استفاده می‌کند (Conan et al., 2002, Kim et al., 2008, Sophocleous et al., 1999). آبخوان قم از نوع آزاد و دارای یک لایه می-باشد. برای تعیین مدل مفهومی آبخوان و شرایط مرزی، نقشه هم تراز سطح آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های ماهانه ۱۶ پیزومتر موجود در منطقه مطالعه تهیه شد. این نقشه برای شناخت تغییرات سطح آب، جهت جریان آب زیرزمینی، تعیین مناطق ورود و خروج آب زیرزمینی و محاسبه شیب متوسط آب زیرزمینی استفاده گردید. با توجه به اینکه آمار برداشت از چاه‌ها در سال‌های اخیر موجود نبود، لذا

حساسیت مقادیر آبدهی ویژه، هدایت هیدرولیکی، تغذیه و تخلیه در بازه  $\pm 0.35$  به صورت دستی تغییر داده شدند و میزان تغییرات سطح ایستابی شبیه سازی بررسی شد.

### واسنجی و صحت سنجی مدل

برای افزایش دقت مدل، دوره های واسنجی و صحت-سنجی باید شامل یک دوره کامل زمانی (تمام فصول سال) باشد تا کلیه شرایط زمانی و محیطی در نظر گرفته شود. بر این اساس، دوره زمانی مدل به دو دوره واسنجی (مهر ۱۳۸۲ تا شهریور ۱۳۸۳) و صحت-سنجی (مهر ۱۳۸۳ تا شهریور ۱۳۸۴) تقسیم بندی شد. در دوره واسنجی، نتایج شبیه سازی با آمار ۱۶ چاه مشاهده ای و بیلان آب زیرزمینی مقایسه شد و پارامترهای مدل مانند جریان های ورودی و خروجی و ضرایب هیدرودینامیکی بازنگری و اصلاح گردید تا مدل با دقت مناسب رفتار آبخوان را شبیه سازی نماید. در فرایند واسنجی و صحت سنجی، از معیارهای جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی (R) استفاده شد. هر چه مقدار RMSE و خطا کاهش یابد، عملکرد مدل بهتر است، اما نمی تواند دلیلی بر دقت مدل باشد. RMSE جهت تغییرات خروجی مدل را نشان نمی دهد (Kashaigili et al., 2003) لذا، برای رفع این مشکل از ضریب همبستگی استفاده گردید. این معیارها با استفاده از روابط زیر برآورد شدند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (h_m - h_s)_i^2}{N}} \quad (1)$$

$$R = \frac{\sum (h_m - h_a)(h_s - h_a)}{\sqrt{(\sum (h_m - h_a))^2 \sum (h_s - h_a)^2}} \quad (2)$$

که در آنها،  $h_m$  سطح ایستابی مشاهده ای (متر)،  $h_s$  سطح ایستابی محاسبه شده (متر)،  $h_a$  میانگین مربوطه (متر) و  $N$  تعداد داده ها می باشد. علاوه بر این، از نمودار سری زمانی مقادیر شبیه سازی و اندازه گیری شده که روش مناسبی برای نشان دادن نتایج واسنجی

باشد با استفاد از مطالعات ژئوفیزیک منطقه تعیین گردید. سپس نقشه سنگ کف با استفاده از روش کریجینگ به تمام سلول های فعال تعمیم داده شد. در این تحقیق فرض شد که محیط آبخوان همگن و همسان می باشد لذا هدایت هیدرولیکی در جهات مختلف آبخوان یکسان در نظر گرفته شد. طبق مطالعات نیمه تفصیلی منطقه، قابلیت انتقال آبخوان بین ۸۵۱ تا ۴۰۰۰ متر مربع در روز و میزان ضریب ذخیره بین ۱-۱/۴ و ۴-۷/۱ تغییر می کند (صادقی راد، ۱۳۸۶). مقادیر ارتفاع پیزومتری در چاه های مشاهده ای در مهر ماه سال ۱۳۸۲ به عنوان شرایط اولیه حل معادله های جریان آب زیرزمینی تعریف گردید و به وسیله روش کریجینگ به سایر سلول های فاقد داده، تعمیم داده شد. در گام بعدی، مقادیر قابلیت انتقال و ارتفاع پیزومتری در سلول های مرز با جریان مشخص (GHB) وارد شد. مهمترین عوامل ایجاد تنش در آبخوان مقادیر تغذیه و تخلیه می باشند. چاه های بهره برداری به عنوان مهمترین عامل تخلیه به صورت پراکنده و به تعداد زیاد در تمام آبخوان وجود دارند. بر اساس مطالعات نیمه تفصیلی منطقه، مقدار برداشت از آب زیرزمینی در سال های ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۴ معادل ۱۱۸/۲۹ میلیون متر مکعب از طریق ۸۸۶ حلقه چاه عمیق و نیمه عمیق، ۶۱/۰۹ میلیون متر مکعب از طریق ۱۹۱ رشته قنات و ۳/۵۹ میلیون متر مکعب از طریق ۴۱ دهنه چشمه و در مجموع به میزان ۱۸۲/۹۷ میلیون متر مکعب می باشد (بی نام، ۱۳۸۶) که به صورت ماهانه به شبکه های مدل وارد گردید. میزان تغذیه از طریق بارندگی و رواناب که در کل سطح آبخوان صورت می گیرد، برای هر ماه به سلول های مدل وارد شد. تغذیه از طریق چاه های جذبی نیز در منطقه مسکونی آبخوان لحاظ شد.

### آنالیز حساسیت

آنالیز حساسیت روشی برای ارزیابی و واسنجی مدل های ریاضی است. این روش تاثیرپذیری مدل و شرایط واقعی را از داده های ورودی مورد بررسی قرار می دهد (Hill and Tiedeman, 2007). برای آنالیز

و صحت سنجی در حالت ناپایدار می‌باشد (Anderson, 1992)، استفاده شد.

### سناریوهای مدیریتی

مدل برای شش سناریو مدیریتی بهره برداری و تغذیه مصنوعی تا افق ۱۴۰۰ اجرا گردید. اعمال سناریوهای مختلف از ابتدای سال ۱۳۹۴ شروع و تا سال ۱۴۰۰ ادامه یافت. سناریو پنجم به تغذیه مصنوعی با استفاده از پساب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری استان قم تخصیص داده شد. سناریوهای اعمال شده به شرح ذیل می‌باشند:

سناریو صفر (S0): ادامه روند موجود بهره برداری از چاه‌ها و تغذیه به منابع آب زیرزمینی تا افق ۱۴۰۰

سناریو یک (S1): کاهش ۱۰ درصدی از برداشت منابع آب زیرزمینی و ثابت بودن تغذیه به آبخوان تا افق ۱۴۰۰

سناریو دو (S2): کاهش ۲۰ درصدی از برداشت منابع آب زیرزمینی و ثابت بودن تغذیه به آبخوان تا افق ۱۴۰۰

سناریو سه (S3): کاهش ۳۰ درصدی از برداشت منابع آب زیرزمینی و ثابت بودن تغذیه به آبخوان تا افق ۱۴۰۰

سناریو چهار (S4): کاهش پلکانی از برداشت منابع آب زیرزمینی که به صورت ۱۰ درصد در دو سال اول، ۲۰ درصد در دو سال دوم و ۳۰ درصد در دو سال سوم اعمال گردید و با شرط ثابت بودن تغذیه به آبخوان تا افق ۱۴۰۰

سناریو پنج (S5): ادامه برداشت در شرایط موجود و تغذیه مصنوعی سفره آب زیرزمینی با استفاده از پساب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری تا افق ۱۴۰۰ که در این سناریو برداشت از چاه‌های بهره برداری کاهش نمی‌یابد لکن پساب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب‌های شهری طرح‌های اضطراری و جامع استان قم، به عنوان تغذیه به آبخوان وارد می‌گردد. سناریوهای مدیریتی به

دو روش هیدروگراف واحد و تغییرات مکانی و زمانی سطح ایستابی مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای این منظور هیدروگراف سطح ایستابی آبخوان در سال‌های مختلف با استفاده از روش تیسن ترسیم گردید. همچنین تغییرات مکانی و زمانی سطح ایستابی با استفاده از روش کریجینگ و GIS بررسی شد و نقشه پهنه بندی سطح ایستابی ترسیم گردید.

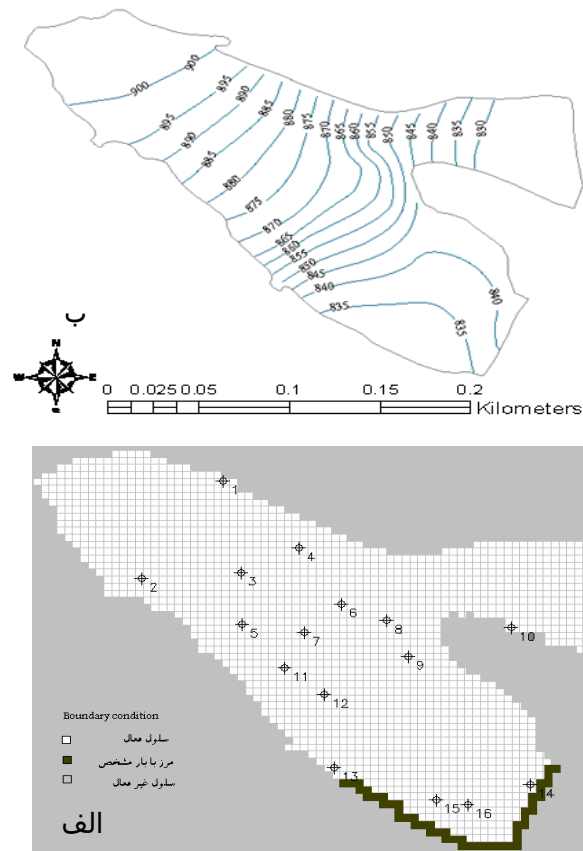
### نتایج و بحث

#### مدل مفهومی

شکل‌های (۲ الف و ب) به ترتیب منحنی‌های تراز سطح آب زیرزمینی و مدل مفهومی منطقه مطالعه را نشان می‌دهد. در آبخوان قم، منحنی‌های تراز سطح آب زیرزمینی از شمال غرب به سمت جنوب شرق و شمال شرق، سیر نزولی دارد. با استفاده از منحنی‌های تراز سطح ایستابی، جریان‌های ورودی و خروجی محاسبه شد. با تفسیر منحنی‌های تراز می‌توان دریافت که مرزهای شمالی، غربی و جنوبی از نوع نفوذ ناپذیر می‌باشند. این شرایط حاکی از وجود لایه غیرقابل نفوذ نیست بلکه این مرزها خطوط جریان می‌باشند. همچنین، مرز شمال شرقی مجاور دشت دریاچه نمک و مرز جنوب شرقی به سمت کاشان نیز مرز با جریان ثابت می‌باشد.

#### آنالیز حساسیت

مدل به پارامترهای آبدهی ویژه، هدایت هیدرولیکی، تغذیه و تخلیه به ترتیب بیشترین حساسیت را نشان داد. آنچه که به طور مشترک در اکثر تحقیقات انجام شده در این زمینه مورد تایید واقع شده است، اهمیت پارامترهای تغذیه، هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه است (Laura and Siegel, 2006, Hill and Tiedeman, 2007). لذا، در این مطالعه نیز پارامترهای مذکور برای واسنجی به کار گرفته شدند. پس از واسنجی مدل، میزان تغییرات هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه در بخش‌های مختلف آبخوان به ترتیب بین ۰/۰۰۵ تا ۱۸۰ متر در روز و ۰/۰۷ تا ۰/۴ به دست آمد.



شکل (۲) مدل مفهومی (الف) و منحنی های تراز از سطح ایستایی ابخوان قم (ب)

### شبیه سازی سطح ایستابی

دقت مدل در شبیه سازی سطح ایستابی در حالت ناپایدار، در ۱۶ چاه مشاهده ای انتخابی برای واسنجی و صحت سنجی، با استفاده از معیارهای RMSE و ضریب همبستگی مورد ارزیابی قرار گرفت. مقادیر این معیارها در جدول (۱) ارائه شد. ضریب همبستگی در مرحله واسنجی، بین ۰/۲۴ تا ۰/۹۹ متغیر بود که حاکی از عملکرد بالای مدل در اکثر نقاط می باشد؛ همچنین جذر میانگین مربعات خطا در این مرحله، بین ۰/۰۱ تا ۰/۱۴ متر بود که نشان دهنده واسنجی

خوب مدل می باشد. تغییرات ضریب همبستگی و جذر میانگین مربعات خطا در مرحله صحت سنجی به ترتیب بین ۰/۵۲ تا ۰/۹۷ و ۰/۰۲ تا ۱/۱۴ بود. این یافته، صحت پارامترهای واسنجی شده و عملکرد مطلوب مدل در فرآیند شبیه سازی را به اثبات می رساند. با این وجود، در چاه های مشاهده ای (۱)، (۸) و (۹) مدل عملکرد ضعیفی داشت. روند تغییرات سطح ایستابی مشاهده ای و شبیه سازی شده در این چاه ها در مراحل واسنجی و صحت سنجی در شکل (۳) ارائه شد.

جدول ۱- معیارهای ارزیابی عملکرد مدل

R	RMSE (m)	چاه مشاهده‌ای	R	RMSE (m)	مرحله	چاه مشاهده‌ای
۰/۲۴	۰/۱۴۵	۹	۰/۹۲	۰/۰۱	واسنجی	۱
۰/۸۷	۰/۱۷۱		۰/۵۲	۰/۰۱۱	صحت‌سنجی	
۰/۹۷	۰/۱۷۴	۱۰	۰/۹۷	۰/۰۳۶	واسنجی	۲
۰/۹۷	۱/۱۴۵		۰/۹۲	۰/۱۲۱	صحت‌سنجی	
۰/۹۳	۱/۱۴۵	۱۱	۰/۹۱	۰/۰۶۱	واسنجی	۳
۰/۸۷	۰/۰۱۱		۰/۸۱	۰/۲۱۸	صحت‌سنجی	
۰/۹۲	۰/۰۱۲	۱۲	۰/۷۶	۰/۰۳۲	واسنجی	۴
۰/۹۷	۰/۰۸۶		۰/۸۸	۰/۱۸۳	صحت‌سنجی	
۰/۸۷	۰/۰۹	۱۳	۰/۸۴	۰/۰۲۹	واسنجی	۵
۰/۹۷	۰/۰۰۲		۰/۹۵	۰/۴۳۳	صحت‌سنجی	
۰/۹۳	۰/۰۴	۱۴	۰/۹۷	۰/۰۱۹	واسنجی	۶
۰/۹۶	۰/۱۵۵		۰/۸۰	۰/۵۹۳	صحت‌سنجی	
۰/۹۹	۰/۲۰۲	۱۵	۰/۹۳	۰/۶۶۳	واسنجی	۷
۰/۹۲	۰/۰۷۵		۰/۹۱	۰/۶۴۷	صحت‌سنجی	
۰/۹۸	۰/۰۷۷	۱۶	۰/۹۵	۰/۶۴۸	واسنجی	۸
۰/۹۵	۰/۱۰۶		۰/۵۹	۰/۰۰۴	صحت‌سنجی	

واسنجی، مقدار آن در مرحله صحت‌سنجی افزایش داشت و مقدار خطا نیز در حد قابل قبول بود. علت عملکرد ضعیف مدل در نواحی مربوط به چاه‌های مشاهده‌ای ۱، ۸ و ۹ را می‌توان به موقعیت چاه مشاهده‌ای مرتبط دانست. چاه مشاهده‌ای (۱) در نزدیکی مرز غیرقابل نفوذ و منطقه شهری که دارای ارتفاع پیزومتری حداکثر نیز می‌باشد، قرار دارد و چاه‌های مشاهده‌ای (۸) و (۹) در منطقه‌ای قرار دارند که طبق منحنی همتراز سطح ایستابی، تغییراتگرادیان هیدرولیکی شدید بوده و جهت جریان آب زیرزمینی تغییر می‌نماید. نقشه‌های زمین‌شناسی این مناطق مورد بررسی قرار گرفت و عدم وجود گسل و پدیده کارستی به اثبات رسید لذا تراکم چاه‌های بهره‌برداری و برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی مهمترین

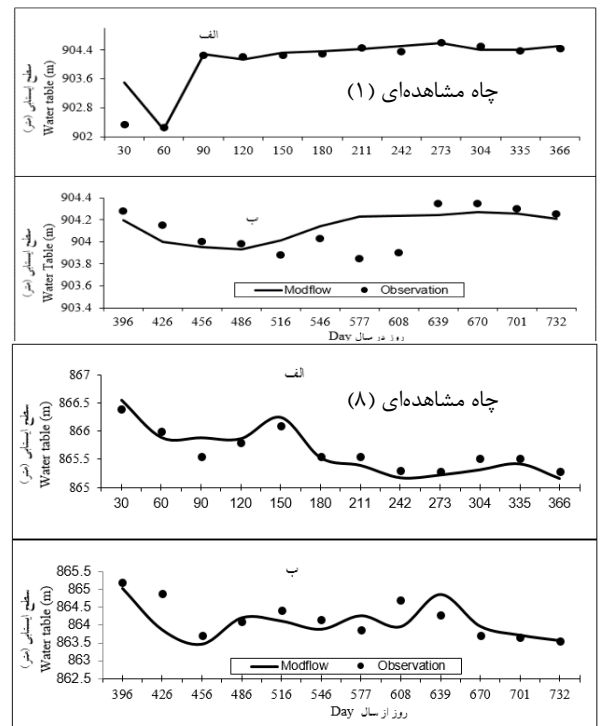
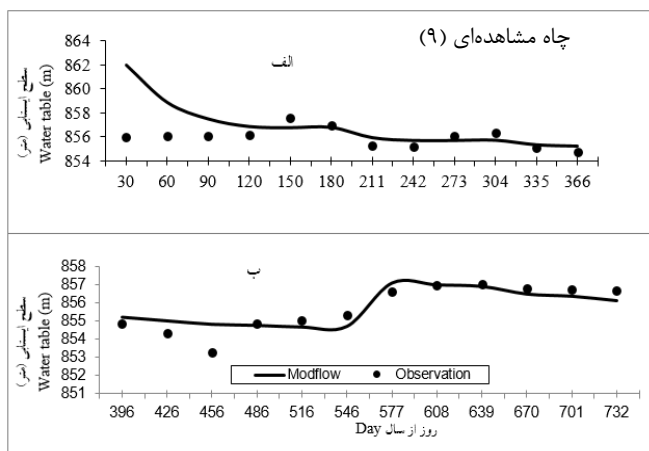
برای چاه مشاهده‌ای شماره (۱) که در شمال غربی آبخوان و در مجاورت مرز غیر قابل نفوذ واقع است، مقدار ضریب همبستگی در مرحله صحت‌سنجی کاهش یافت در صورتی که مقدار جذر میانگین مربعات خطا قابل قبول است. برای رفع تردید در این مورد، معنی‌داری ضریب همبستگی مورد آزمون قرار گرفت (Nobre et al., 2007). نتیجه آزمون پیرسون حاکی از معنی‌داری R می‌باشد لذا عملکرد مدل در این نقطه نیز قابل قبول می‌باشد. حالتی مشابه در چاه مشاهده‌ای شماره (۸) مشاهده می‌شود که در آن علی‌رغم کاهش ضریب همبستگی، مقدار خطا به شدت کاهش یافت. این چاه مشاهده‌ای در قسمت شرقی آبخوان قرار دارد. علی‌رغم کاهش مقدار ضریب همبستگی چاه مشاهده‌ای شماره (۹) در مرحله

در سناریو یک، دو، سه، چهار و پنج با سناریو صفر، ۰/۶، ۱/۲، ۱/۸، ۱ و ۴/۹ متر می‌باشد. تغییرات سطح ایستابی در آبخوان در سناریوهای مختلف شیب نزولی دارد و روند کاهشی سطح ایستابی با وجود کاهش برداشت از آب زیرزمینی، ادامه دارد. سطح ایستابی در سناریو پنجم کمترین افت را دارد.

عوامل تشدید تغییرات گرادیان هیدرولیکی می‌باشند که عملکرد مدل را تحت الشعاع قرار می‌دهد ( Rejani et al., 2008, Flores et al., 2006 )

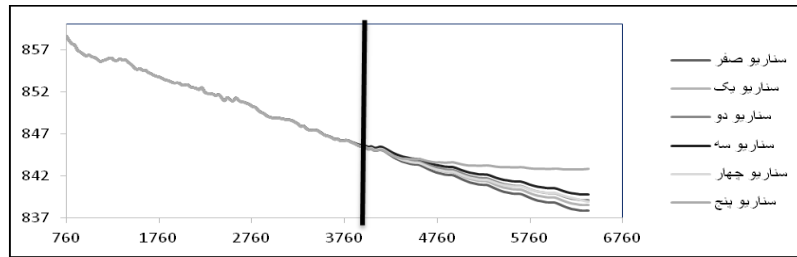
### سناریوهای مدیریتی

پس از اطمینان از دقت مدل، مدل تحت سناریوهای مختلف تعریف شده، تا افق ۱۴۰۰ اجرا گردید. هیدروگراف سطح ایستابی تحت سناریوهای مدیریتی در شکل (۴) ارائه شد. به توجه به هیدروگراف سطح ایستابی آبخوان، اختلاف سطح ایستابی در افق ۱۴۰۰



شکل (۳): تغییرات سطح ایستابی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مراحل واسنجی (الف) و صحت سنجی (ب) در چاه مشاهده‌ای ۱، ۸ و ۹.

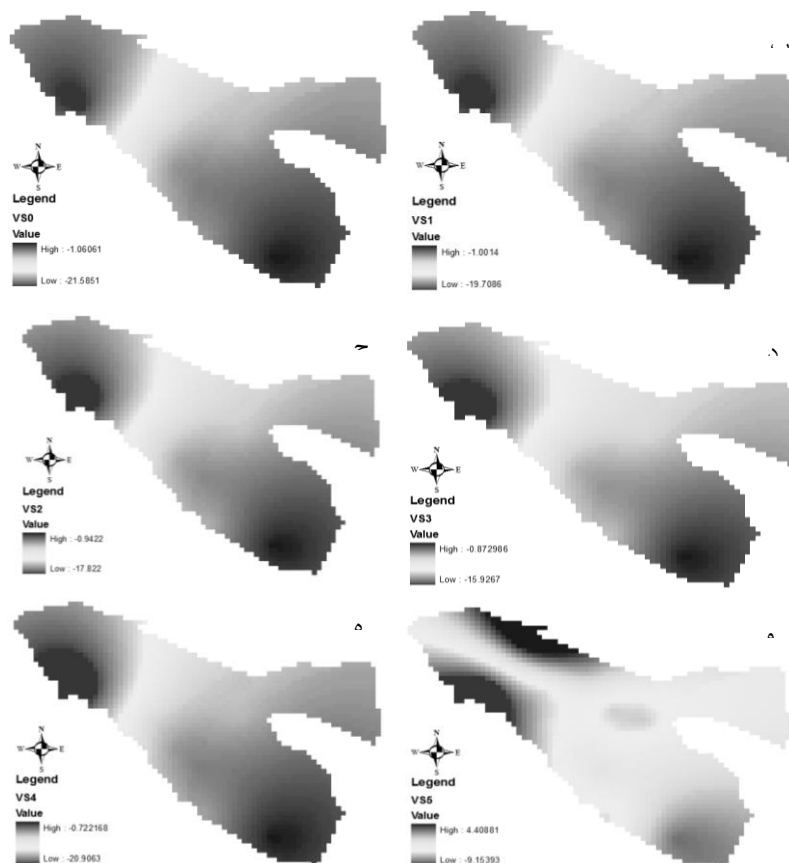




شکل (۴): هیدروگراف سطح ایستایی تحت سناریو مختلف مدیریتی

جنوب شرقی است. بیشترین افت در سناریوهای دو، سه و چهار به ترتیب ۱۷/۸، ۱۵/۹ و ۲۰/۹ متر در قسمت شمال غربی آبخوان رخ خواهد داد. در سناریو پنجم که تغذیه مصنوعی صورت می‌گیرد، بیشترین افت به ۹/۱۵ متر رسیده است که در برخی از مناطق شمال غربی آبخوان مشاهده می‌شود لکن در مناطقی که نزدیک به تصفیه خانه‌های فاضلاب واقع شده‌اند، سطح ایستایی به میزان حداکثر ۴/۴ متر خیز داشته است. لذا بر اساس این نتایج، برای تعادل بخشی و احیاء آب زیرزمینی در آبخوان قم باید طبق سناریو پنج تغذیه مصنوعی با استفاده از پساب صورت گیرد.

برای درک بهتر پراکنش مکانی و زمانی تغییرات سطح ایستایی، نقشه پهنه‌بندی سطح ایستایی در سال ۱۳۹۴ و ۱۴۰۰ در سناریوهای مختلف ترسیم شد. تفاضل نقشه‌های پهنه‌بندی در سال‌های مختلف در شکل (۵) ارائه شد که نشان از تغییرات سطح ایستایی در بعد مکان و زمان می‌باشد. در سناریو صفر سطح ایستایی تا افق ۱۴۰۰ بین ۲۱/۵ متر در شمال غربی و ۱ متر در جنوب شرقی تغییر می‌نماید که محدوده شهری قم شاهد بیشترین افت در سال ۱۴۰۰ خواهد بود. در سناریو یک این تغییرات به ۱۹/۷ و ۱ متر کاهش می‌یابد و جهت تغییرات نیز شمال غربی-



الف

شکل (۵) تغییرات مکانی و زمانی سطح ایستابی در آبخوان قم، الف- سناریو صفر، ب- سناریو یک، ج- سناریو دو، د- سناریو سه، ه- سناریو چهار، و- سناریو پنج

است که به نظر می‌رسد از نقاط ضعف مدل می‌باشد چرا که در برخی از تحقیقات نیز به آن اشاره شده است. با انجام آنالیز حساسیت مشخص گردید که مهمترین پارامترها برای شبیه‌سازی سطح ایستابی به ترتیب آبدهی ویژه، هدایت هیدرولیکی، تغذیه و تخلیه می‌باشند. بر اساس نتایج سناریوهای اعمال شده، برای تعادل بخشی و احیاء آب زیرزمینی در آبخوان قم باید طبق سناریو پنج تغذیه مصنوعی با استفاده از پساب صورت گیرد.

### نتیجه گیری

مدل برای یک دوره دو ساله از مهر ۱۳۸۲ تا شهریور ۱۳۸۴ واسنجی و صحت‌سنجی گردید. دوره‌های تنش ماهانه، و گام زمانی به صورت روزانه در نظر گرفته شد. مدل در اکثر نقاط آبخوان توانست بخوبی سطح ایستابی آب زیرزمینی را شبیه‌سازی نماید. لکن در نقاطی که تغییرات هدایت هیدرولیکی شدید باشد و همچنین جهت خطوط هم‌تراز سطح ایستابی تغییر نماید دارای عملکرد پایین‌تری نسبت به سایر نقاط

## منابع

- ابریشمی ج، س. علوی مقدم، م. ر. و بهرامی جوینی. ۱۳۸۰. مدل کمی آب‌های زیرزمینی غرب کویر طبس. مجموعه مقالات سومین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ایران.
- بی نام. ۱۳۷۹. آرشو گروه آمار و اطلاعات پایه منابع آب، شرکت آب منطقه‌ای قم، ایران.
- بی نام. ۱۳۸۶. آرشو گروه آمار و اطلاعات پایه منابع آب، شرکت آب منطقه‌ای قم، ایران.
- خلقی م. ۱۳۸۰. مدل‌های ریاضی در جریان آب‌های زیرزمینی از تئوری تا کاربرد، انتشارات دانشگاه تهران. ۶۷ صفحه.
- رویاع. ر. ۱۳۸۱. ارزیابی آب‌های زیرزمینی دشت هشتگرد و تهیه مدل ریاضی آن. عمران محیط زیست. دانشکده عمران دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی. تهران، پایان نامه کارشناسی ارشد.
- صادقی راد م. ع. ۱۳۸۵. طرح مطالعات کیفی و آلودگی منابع آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی قم. جلد سوم، مطالعات هیدروژئولوژی، شرکت سهامی آب منطقه‌ای قم، ایران.
- Anderson M P. 1992. Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport. Academic California. USA. 381p.
- Arnold T R. 2013. Procedural knowledge for integrated modelling: towards the modelling playground. Environmental Modelling & Software. 39:135-148.
- Chiang W H. 2005. 3D-Groundwater Modeling with PMWIN, A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Transport Processes. Springer. USA. 435p.
- Conan C, Bouraoui F, Turpin N, de Marsily G and Bidoglio G. 2002. Modeling flow and Nitrate Fate at Catchment scale in Brittany. (France). Environmental Quality. (32): 2026-2032.
- Flores M, Jiménez G S, Martínez R, Chávez R and Silva-Pérez D. 2006. Study of geothermal water intrusion due to groundwater exploitation in the Puebla Valley aquifer system. Mexico Hydrogeology. (14): 1216-1230.
- Harbaugh A W, Banta E R, Hill M C and McDonald M. 2000. MODFLOW-2000, the US Geological Survey modular ground-water models; user guide to modularization concepts and the ground-water flow process. U. S. Geological Survey, 121 p.
- Hill M C and Tiedeman C R. 2007. Effective groundwater model calibration Wiley Interscience USA, New York, 455 p.
- Karaya G and Hajnala G. 2015. Modelling of groundwater flow in fractured rocks. Proceedings of the 7th Groundwater Symposium of the International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR). Procedia Environmental Sciences, Netherlands.
- Kashaigili J J, Mashauri D A and Abdo G. 2003. Groundwater management by using mathematical modeling: case of the Makutupora groundwater basin in dodoma Tanzania. Botsw Technology Transfer. (12):19-24.
- Kim N W, Chung I M, Won Y S, Arnold J G. 2008. Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model. Hydrology. (356): 1-16.
- Laniak G F, Olchin G, Goodall J, Voinov A, Hill M, Glynn P, Whelan G, Geller G, Quinn N, Blind M, Peckham S, Reaney S, Gaber N, Kennedy R and Hughes A. 2013. Integrated environmental modeling: a vision and roadmap for future. Environmental Modelling & Software. (39): 3-23.
- Laura K and Siegel I. 2006. Modeling surface and ground water mixing in the hyporheic zone using MODFLOW and MT3D, Advances in Water Resources. (29): 1618-1633.
- McDonald M G, Harbaugh A W. 1988. Modular three-dimensional finite difference ground-water flow model. Reston. US Geological Survey, 586 p
- Nobre R C M, Filho O C R, Mansur W J and Cosenza C A N. 2007. Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool. Contaminant Hydrology. (94): 277-292

Pisinaras V, Petalas C, Tsihrintzis V A and Zagana E. 2007. A groundwater flow model for water resources management in the Ismarida plain, North Greece. *Environmental Modeling and Assessment*. (12): 75-89.

Priyanka B N and Maheshab A. 2015. Parametric Studies on Saltwater Intrusion into Coastal Aquifers for Anticipate Sea Level Rise. *Proceedings of the INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER RESOURCES, COASTAL AND OCEAN ENGINEERING (ICWRCOE)*, India.

Rejani R, Madan K, Panda S N and Mull R. 2008. Simulation modeling for efficient groundwater management in Balasore coastal basin, India. *Water Resources Management*. (22):23-50.

Rojas R and Dassargues A. 2007. Groundwater flow modelling of the regional aquifer of the Pampa del Tamarugal, northern Chile. *Hydrogeology*. (15): 537-551.

Scibek J, Allen D M. 2006. Modeled impacts of predicted climate change on recharge and groundwater levels. *Water Resources Research*. (42): w11405.

Sophocleous M A, Koelliker J K, Govindaraju R S, Birdie T, Ramireddygar S R and Perkins S P. 1999. Integrated numerical modeling for basin-wide water management: the case of the Rattlesnake Creek basin in south-central Kansas. *Hydrology*. (214): 179-196.

Zhang H and Hiscock K M. 2010. Modelling the impact of forest cover on groundwater resources: a case study of the Sherwood Sandstone aquifer in the East Midlands,UK. *Hydrology*. (392): 136-149.

## Predicting Groundwater Table Fluctuations under Different Management Scenarios by MODFLOW Model

Ruhullah Yari<sup>1</sup>, Abdullah Darzi-Naftchali<sup>2\*</sup>

### Abstract

Due to recent droughts and excessive extraction of groundwater resources, water table of Qom aquifer has had sharp drop resulted in intrusion of saline water into the groundwater and land subsidence. In order to prevent the crisis, operation management of water resources should be a principle in country planning. Simulation models are suitable tools for management and qualitative and quantitative conservation of groundwater resources. In this study, a two-year period data (September 2003- September 2005) were used for evaluating MODFLOW model to simulate the aquifer water table. The model showed the most sensitivity to specific yield, hydraulic conductivity, recharge and discharge, respectively. The correlation coefficient and root mean square error in the calibration stage varied from 0.24 to 0.99 and 0.01 to 0.14 m, respectively. The correlation coefficients and root mean square error in the verification step change between 0.52 to 0.97 and 0.002 to 1.14, respectively. To assess the aquifer response to various stresses, six management scenarios (continued current extraction of groundwater and recharge to groundwater resources, decrease by 10, 20 and 30% and reducing step by step of groundwater extraction, continued current extraction of groundwater and artificial recharge of groundwater using urban wastewater) were defined up to 2020. Based on the model results, the best scenario for restoring and balancing the groundwater is artificial recharge scenario using wastewater up to 2020.

**Keywords:** Aquifer management, Calibration, Hydrodynamic coefficients, Verification, Water balance

<sup>1</sup> PhD student, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.

<sup>2</sup> Assistant Professor, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (Corresponding author: [abdullahdarzi@yahoo.com](mailto:abdullahdarzi@yahoo.com)).