

شبیه‌سازی و پیش‌بینی هیدروگراف معرف آبخوان دشت ایوانکی

حمیدرضا ناصری^{۱*} و رضا نظری^۲

۱- دانشیار دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

۲- کارشناس ارشد هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

پذیرش مقاله: ۱۳۸۹/۱۱/۲۴

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۰/۲/ ۲۸

چکیده

مدل‌سازی آب زیرزمینی به عنوان یک ابزار مدیریتی در جهت فهم رفتار سیستم آبخوان تحت تنش‌های هیدرولوژیک متفاوت به طور وسیعی مورد استفاده قرار گرفته است. آبخوان آبرفتی ایوانکی با محدوده‌ی بیلان ۱۲۶ کیلومتر مربع یکی از آبخوان‌های اصلی و مهم استان سمنان می‌باشد. برداشت بی‌رویه آب در سال‌های اخیر موجب افت تراز سطح آب زیرزمینی در این آبخوان شده است. در این تحقیق به منظور به‌دست‌آوردن پارامترهای هیدرولیکی، پیش‌بینی تراز سطح ایستابی و تهیه بیلان هیدرولوژیک آبخوان مورد مطالعه، از شیوه مدل‌سازی توسط انترفاز (Groundwater Modeling System) GMS استفاده گردید. مدل در یک دوره یک‌ماهه (مهر ۸۷)، برای حالت پایدار و در یک دوره ۱۲ ماهه (سال آبی ۸۸-۸۷) برای حالت ناپایدار، با استفاده از آمار بار هیدرولیکی چاه‌های مشاهده‌ای موجود در دشت، واسنجی و از این طریق، مقادیر پارامترهای K و S_y بهینه گردید. فرایند صحت‌سنجی (از مهر ۸۸ تا فروردین ۹۰)، مؤید اعتبار نتایج به‌دست‌آمده برای شرایط ناپایدار است. پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل، سطح آب پیزومترها تا مهر ۹۲ با شرایط فعلی آبخوان، پیش‌بینی گردید. نتایج نشان می‌دهد که با شرایط فعلی روند افت آبخوان ادامه خواهد داشت و در پایان دوره پیش‌بینی (مهر ۹۲)، سطح آب هیدروگراف معرف نزدیک به ۸۹۸/۵ متر خواهد رسید و نسبت به شروع دوره واسنجی مدل (مهر ۸۷) که ۹۰۶/۸ متر بوده است، ۸/۳ متر افت خواهد نمود. همچنین نتایج بیلان آبی مدل نشان می‌دهد که بیشترین مقدار تخلیه از آبخوان توسط چاه‌های بهره‌برداری در فصل‌های بهار و تابستان رخ داده است و چاه‌های تغذیه‌ای (مرزی) در خروجی حوضه بیشترین نقش تغذیه‌کننده به آبخوان را در طی دوره شبیه‌سازی داشته‌اند. آبخوان در طی دوره شبیه‌سازی (۸۸-۸۷) کسری مخزنی حدود پنج میلیون متر مکعب را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: هیدروگراف معرف، بیلان آبی، پارامترهای هیدرولیکی، آبخوان ایوانکی، مدل‌سازی، پیش‌بینی.

مقدمه

لوتز و همکاران^۳، (۲۰۰۸)، با اعمال سناریوهای خشک‌سالی و افزایش پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری در آبخوان Mali (غرب آفریقا)، با استفاده از کد MODFLOW در انترفاز GMS، تحمل‌پذیری آبخوان را نسبت به افزایش این تنش‌ها بررسی نمودند.

کوش‌واها و همکاران^۴، (۲۰۰۹)، با استفاده از کد MODFLOW گنجانیده‌شده در نرم‌افزار GMS، زیرحوضه Menha در شمال شرق Rajasthan هند را برای پنج سال (۲۰۰۳-۱۹۹۸) واسنجی و برای دو سال (۲۰۰۳-۲۰۰۵) صحت‌سنجی نمودند و سپس به مدت ۱۵ سال (تا سال ۲۰۲۰) پیش‌بینی کردند. نتایج بیلان مدل نشان داد که ذخیره آبخوان حوضه از ۳۴۹/۵ به ۲۲۲/۹ میلیون متر مکعب کاهش خواهد یافت.

دشت ایوانکی با وسعتی حدود ۲۰۰، و محدوده‌ی بیلان آبخوان ۱۲۶ کیلومتر مربع یکی از آبخوان‌های اصلی و مهم استان سمنان می‌باشد. این آبخوان در محدوده‌ی مطالعاتی ایوانکی و در حدود ۶۰ کیلومتری شرق تهران واقع شده است (شکل ۱). شهر ایوانکی با جمعیتی حدود ۱۰ هزار نفر در بخش شمالی این دشت قرار دارد. دشت ایوانکی به دلیل وجود اراضی کشاورزی مستعد و به‌ویژه کشت صیفی‌جات همواره مورد توجه بوده است. تاکنون گزارشات متعددی در خصوص آبخوان ایوانکی تهیه و تدوین شده است، که نتیجه بررسی‌های اولیه وجود افت سطح آب را در این آبخوان مشخص نموده است. به همین دلیل از سال آبی ۴۹-۵۰ در این دشت حفاری چاه و

یکی از اهداف بلندمدت مدیریت راهبردی منابع آب، تعادل برقرار کردن بین تقاضای آب و منابع آب موجود با کمترین هزینه ممکن می‌باشد. یکی از روش‌های مناسب مدیریت منابع آب که وابستگی زیادی به آب‌های زیرزمینی دارد، استفاده از مدل‌های عددی و نتایج بیلان آبی مدل می‌باشد. مدل ریاضی آب‌زیرزمینی شبیه‌سازی یک سیستم هیدروژئولوژیک است که از قوانین فیزیک و ریاضی کمک می‌گیرد. میزان سودمندی یا قابل استفاده بودن یک مدل وابسته به این است که معادله‌ی ریاضی، تا چه اندازه بتواند واقعیت‌های موجود در طبیعت را شبیه‌سازی کند.

تاکنون آبخوان‌های زیادی به منظور اهداف مختلف مانند تعیین پارامترهای هیدرولیکی، مقدار نفوذ مؤثر، اعمال سناریوهای مختلف مدیریتی و ... در ایران مانند آبخوان دشت چاه‌دراز سیرجان (نظری، ۱۳۸۹)، آبخوان دشت سیب‌سوران (ناصری و اسدیان، ۱۳۸۷)، آبخوان دشت فیض‌آباد (جودوی، ۱۳۸۸) و دیگر کشورها توسط GMS شبیه‌سازی است.

ال-بیه‌ری^۱، (۲۰۰۸)، و ییدانا^۲، (۲۰۱۰)، برای تعیین پارامترهای هیدرولیکی و تخمین مقادیر نفوذ مؤثر از کد MODFLOW گنجانیده شده در GMS استفاده نموده‌اند که در نتیجه آن، مقدار هدایت هیدرولیکی آبخوان کواترنری Ras Sudr در مصر بین ۳/۰۵ تا ۳/۳۵ متر بر روز و نرخ تغذیه مؤثر آبخوان^۶ ۳*۱۰ متر مکعب بر سال برآورد گردیده است.

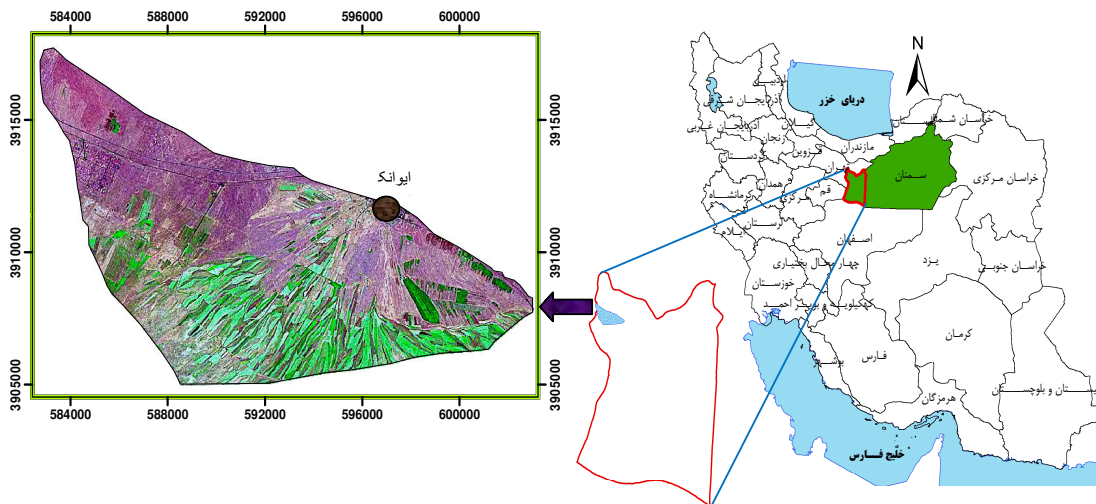
3- Lutz et al.
4- Kushvaha et al.

1- El-Bihery
2- Yidana

مسیل‌های فرعی دیگر می‌باشد که به طور عمومی در گستره سطحی از شمال به جنوب و غرب دانه ریزتر و در حاشیه جنوبی رسی می‌شود. در بخش‌های مرکزی دشت آبرفت ضخامت مناسبی دارد. عمق سطح آب در بخش‌های شمالی و مرکزی بیش از ۱۰۰ متر و در حاشیه به ویژه جنوب غربی به کمتر از ۱۰ متر می‌رسد به دلیل افت شدید در مرکز دشت جهت جریان آب زیرزمینی از چهارگوشه دشت به طرف مرکز دشت (نواحی ملک زینل و برج حیدر) تغییر جهت داده است (مهندسین مشاور پنگان آوران، ۱۳۸۹).

توسعه بهره‌برداری از آبخوان دشت ممنوع گردید. اما در سال‌های ۵۸ و ۵۹ حفاری‌های متعددی در دشت انجام شد که موجب تشدید افت و کسری مخزن آبخوان شده است. به همین دلیل از آن به بعد، این دشت ممنوعه بحرانی اعلام شده و از سال ۱۳۷۹ حدود ممنوعیت آن با انطباق بر مرز محدوده مطالعاتی به مدت پنج سال دیگر تمدید گردید (مهندسین مشاور کاو آب، ۱۳۸۵).

عمده آبرفت دشت ایوانکی حاصل آورد رسوبی حوضه نمارک، حوضه های کورس و چنداب و

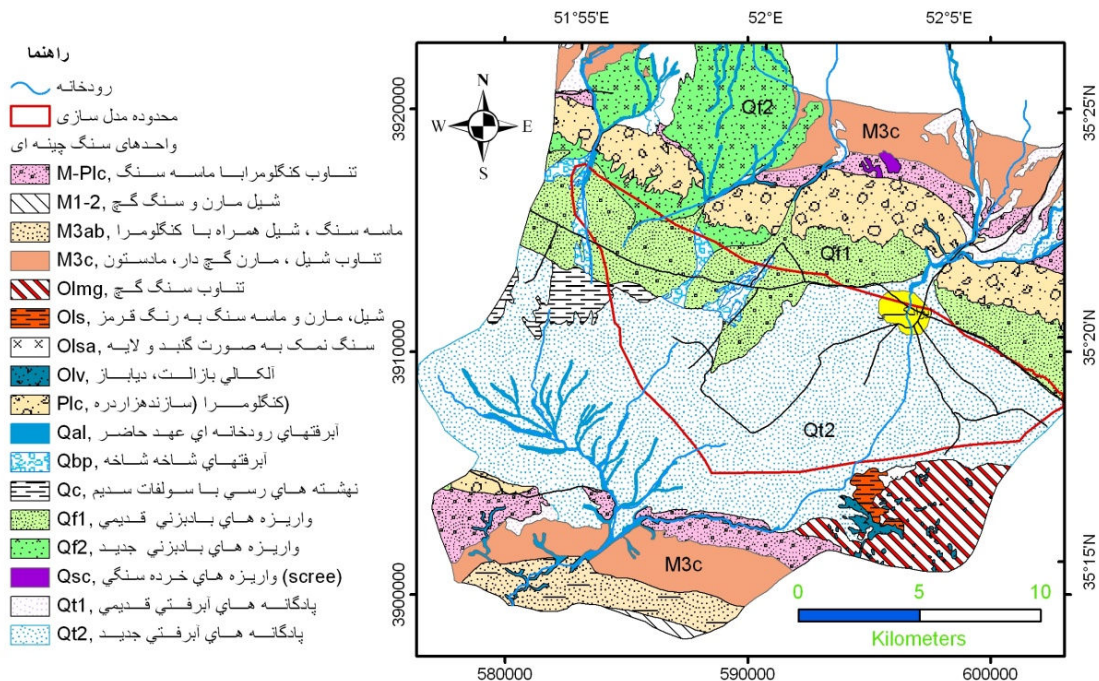


شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی در ایران و استان سمنان

جنوبی به کنگلومراهای هزار دره در مجاورت دشت ختم می‌شود. جنوب دشت به گنبد‌های نمکی و سازندهای قرمز بالایی تا زیرین متشکل از مارن و رس ماسه‌سنگ و تبخیری‌ها محدود می‌شود. به‌طور کلی حاشیه شرقی و جنوب شرقی دشت را گنبد‌های نمکی و سازندهای تبخیری محصور نموده است (شکل ۲).

- زمین‌شناسی

واحدهای زمین‌شناسی و سازندهای موجود در حاشیه دشت و نیز ساختارهای زمین‌شناسی از روند عمومی ایران مرکزی و البرز جنوبی پیروی می‌کند. حاشیه شمال دشت یک هموکلاین از واحدهای سازند قرمز بالایی است و در بخش



شکل ۲- نقشه زمین شناسی محدوده مطالعاتی (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۷۶)

می‌گرفته است ولی در چند دهه‌ی اخیر بهره‌برداری از طریق چاه‌های عمیق و نیمه عمیق گسترش فراوانی یافته است به طوری که در حال حاضر به علت بهره‌برداری بیشتر از حد ظرفیت، آبدهی آبخوان آبرفتی دشت ایوانکی به شدت کاسته شده و با توجه به خشک‌سالی‌های اخیر با بحران جدی مواجه گردیده است. در ایوانکی غنی‌ترین لایه‌های آبدار شامل رسوبات آبرفتی سست و ناهمگن کوتاه‌تر جوان (Q^{12}) و مخروطه افکنه‌های جوان و بستر مسیل‌های قدیمی و جوان آبرفت‌های عهد حاضر است (مهندسین مشاور کاوآب، ۱۳۸۵).

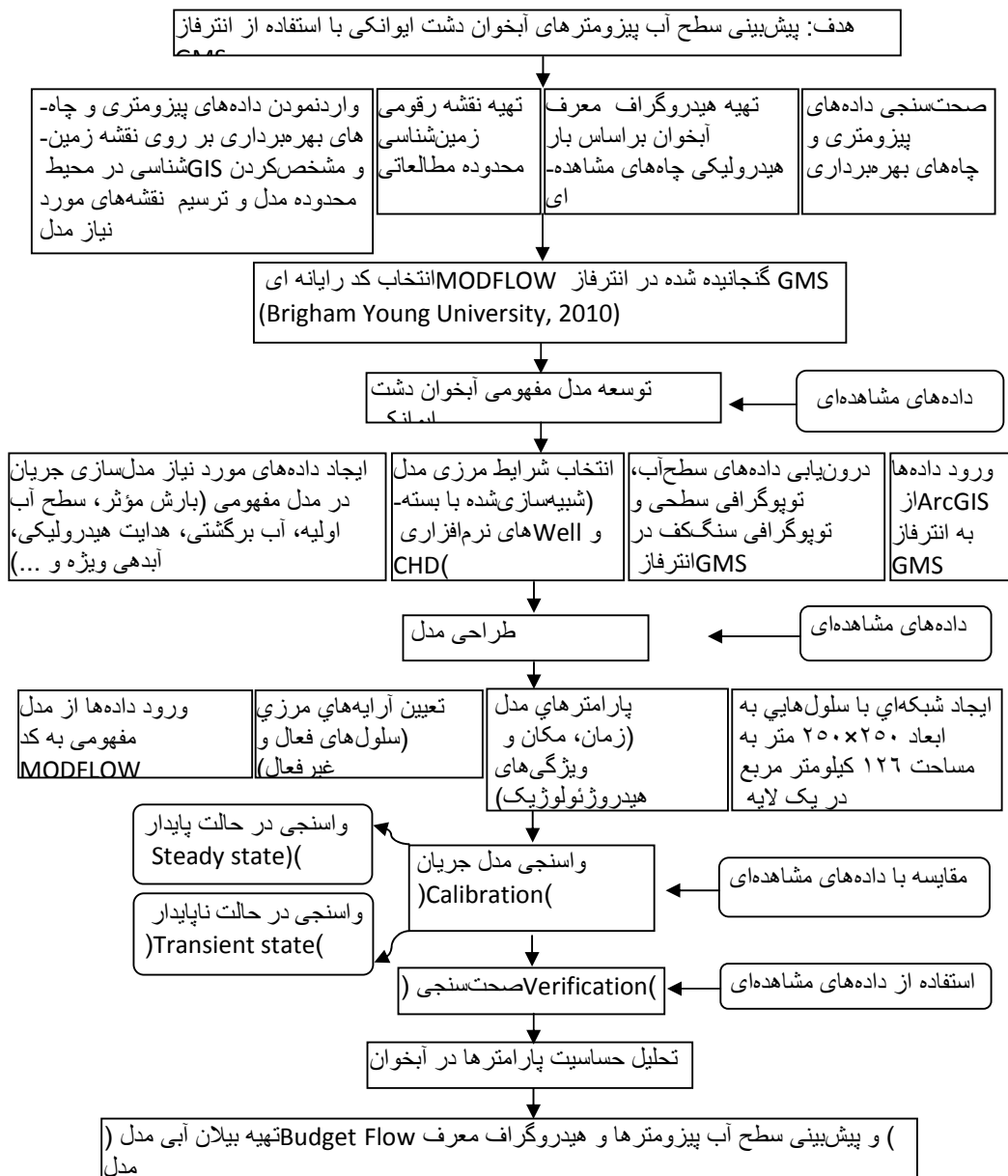
مواد و روش کار

مدل جریان و بیلان آبخوان براساس مراحل ارائه شده در نمودار گردش (شکل ۳) انجام شده است.

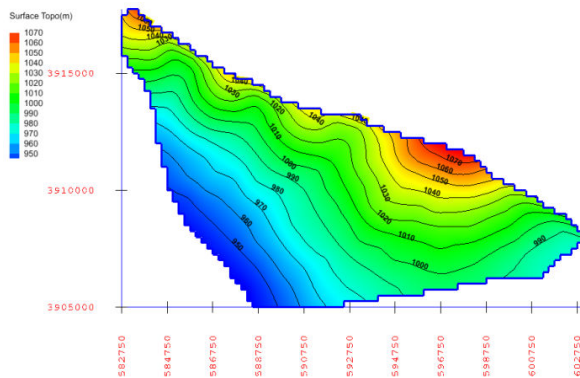
بحث

هیدروژئولوژی آبخوان دشت ایوانکی

در منطقه مورد مطالعه، آبرفت‌های کوارترنری Q^{12} ، آبخوان غنی از آب‌زیرزمینی را به وجود آورده است که تنها آبخوان اصلی و مورد اطمینان این دشت می‌باشد. بهره‌برداری از این آبخوان در زمان‌های گذشته توسط چشمه‌ها و قنوات انجام



شکل ۳- نمودار گردش (Flow chart) تهیه مدل جریان آبخوان دشت ایوانکی



شکل ۴- توپوگرافی سطح زمین در دشت ایوانکی (استخراج شده از DEM IRAN)

جنس سنگ کف دشت ایوانکی در نقاط مختلف دشت متفاوت می‌باشد. در قسمت‌های شمال دشت جنس سنگ کف کنگلومرای هزاردره می‌باشد. در قسمت‌های میانی دشت در پهنه غربی عمدتاً از مارن‌های سازند قرمز بالایی و در نیمه شرقی از لایه‌های گچی سازند قرمز پایین می‌باشد. در قسمت‌های جنوب غربی جنس سنگ کف از مارن‌های سازند قرمز بالایی و در جنوب شرق دشت نیز جنس سنگ کف از لایه های گچی سازند قرمز زیرین تشکیل شده است. سنگ کف دشت ایوانکی در قسمت‌های غربی در اثر گسل- خوردگی به صورت بالآمده می‌باشد (شرکت ژنرال ژئوفیزیک، ۱۳۴۵). توپوگرافی سنگ کف از داده‌های گزارش ژئوفیزیک آبخوان دشت ایوانکی (شرکت زمین‌کاوگستر، ۱۳۸۹) در واسنجی مدل تصحیح شده است. تراز سنگ کف از ۷۱۰ متر در غرب تا ۹۴۰ متر در شمال غربی محدوده مطالعاتی تغییر می‌کند (شکل ۵).

- چاه‌های مشاهده‌ای

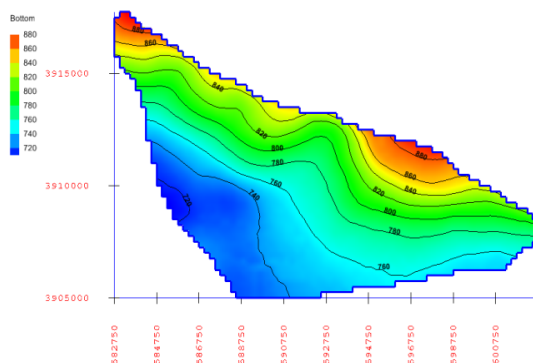
چاه‌های مشاهده‌ای آبخوان ایوانکی در سال ۱۳۶۸ به تعداد ۱۴ حلقه جهت بررسی نوسانات سطح ایستابی حفاری شده است. با گذشت زمان به علت افت شدید سطح ایستابی دشت ایوانکی به تدریج تعدادی از چاه‌ها خشک شده تا این که در سال ۸۱ چاه‌های جدیدی (نه حلقه) جایگزین چاه‌های خشک شده قدیمی شده‌اند (شرکت آب منطقه‌ای سمنان، ۱۳۸۹). تعداد چاه‌های مشاهده‌ای حفاری شده در دشت ۱۶ حلقه می‌باشد. در این پژوهش از اطلاعات ۱۳ حلقه چاه مشاهده‌ای که دارای آمار بوده‌اند، استفاده گردیده است (شکل ۸). لازم به ذکر می‌باشد که دو پیزومتر باغ اناری و پارک بخش‌داری از نیمه اول ۸۸ خشک شده‌اند و در تهیه هیدروگراف معرف داده‌های این دو پیزومتر با توجه به رفتار سایر پیزومترها بازسازی گردیده است.

- توپوگرافی سطح زمین و سنگ کف آبخوان

سطح دشت ایوانکی دارای شیب تقریباً یکنواخت و ملایم است که از سمت شمال و شمال شرق به سمت جنوب غربی و جنوب دشت از ارتفاع سطح تراز زمین کاسته می‌شود. توپوگرافی سطح زمین در محدوده مطالعاتی از ۱۰۸۰ متر در شهر ایوانکی تا ۹۴۰ متر (جنوب شرقی دشت) تغییر می‌کند (شکل ۴).

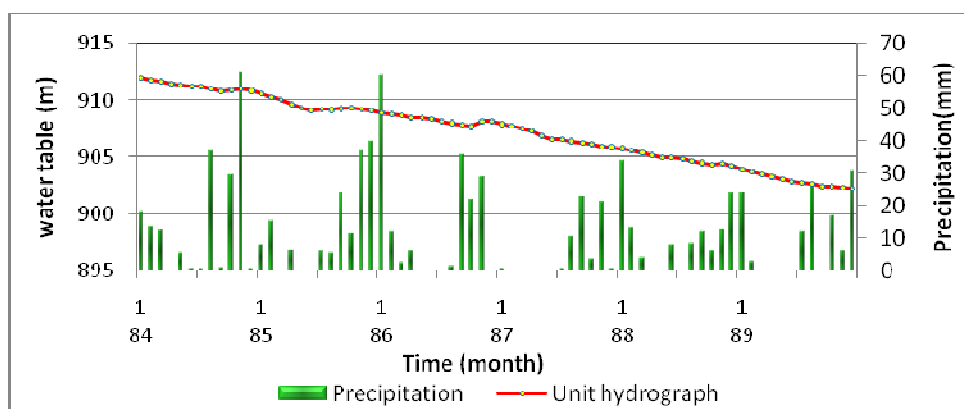
هیدروگراف معرف آبخوان با توجه به ارتفاع سطح آب زیرزمینی در ۱۳ حلقه پیزومتر تهیه شده است (شکل ۶). با شروع دوره مرطوب سطح آب به علت افزایش تغذیه بر تخلیه روند صعودی و در دوره خشک در اثر برداشت بیشتر و افزایش تخلیه بر تغذیه روند نزولی تغییرات سطح آب محسوس است.

بر اساس هیدروگراف معرف آبخوان دشت ایوانکی از سال ۱۳۸۴ تاکنون، آبخوان دچار افت پیوسته می‌باشد. به طوری که از فروردین ۸۴ تا فروردین سال ۹۰ سطح ایستابی آبخوان به میزان ۱۰ متر افت نموده است. مقدار این افت به طور متوسط سالانه ۱/۷ متر می‌باشد.



شکل ۵- توپوگرافی سنگ کف آبخوان

هیدروگراف معرف آبخوان -



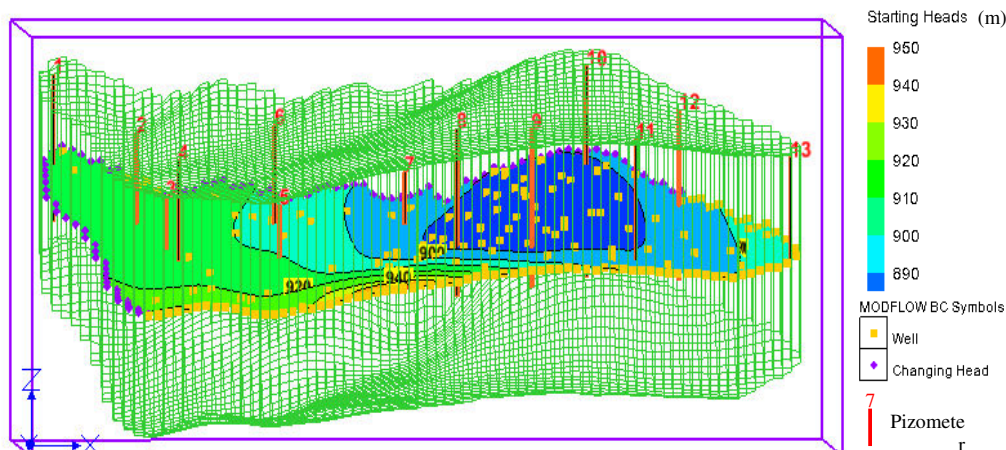
شکل ۶- هیدروگراف معرف شش ساله آبخوان دشت ایوانکی (۹۰-۸۴)

نقشه هم‌افت آبخوان -

میزان افت در دشت ایوانکی از سمت جنوبی دشت به سمت قسمت‌های میانی و شمال شرق افزایش می‌یابد (شکل ۷). بیشترین میزان افت در چاه مشاهده‌ای پارک بخشداری (شمال دشت) و کمترین میزان افت در چاه مشاهده‌ای جنوب بهشت آباد (جنوب غرب دشت) می‌باشد. افت سطح آب زیرزمینی در بخش‌های شمالی دشت به دلیل افت شدید در مرکز دشت (به علت تمرکز

بهره برداری از منابع آب زیرزمینی -

بر اساس نتایج آماربرداری انجام شده تعداد ۱۳۳ حلقه چاه عمیق، ۴۷ حلقه چاه نیمه عمیق، ۱۸ دهنه چشمه و ۱۴ رشته قنات در محدوده مطالعاتی ایوانکی وجود دارد که در سال آبی مدل (۸۷-۸۸) تعداد ۱۰۰ حلقه چاه فعال دارای تخلیه سالانه برابر با ۴۷ میلیون مترمکعب در محدوده مدل قرار گرفته اند (شکل ۷).



شکل ۹- مدل مفهومی تهیه شده آبخوان دشت ایوانکی

که در این رابطه، K_x و K_y تانسور هدایت هیدرولیکی در جهت‌های اصلی جریان در حالت دو بعدی سطحی، h بار هیدرولیکی، S_y آبدهی ویژه، t زمان و R عبارت تغذیه/ تخلیه می‌باشد. معادله (۲) فرم تفاضل محدود به روش پیشرو آبخوان ایوانکی را ارائه می‌دهد که در آن $\Delta x = \Delta y = \alpha$ و T قابلیت انتقال می‌باشد.

- معادله حاکم بر جریان آب‌زیرزمینی ایوانکی

معادله حاکم بر جریان آب‌زیرزمینی در آبخوان آبرفتی غیر محبوس ایوانکی، در حالت دو بعدی، با در نظر گرفتن عبارات تغذیه‌ای و تخلیه‌ای برای شرایط ناماندگار عبارتست از (Batu, 2006):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h^2}{\partial y} \right) = 2S_y \frac{\partial h}{\partial t} - 2R \quad (1)$$

$$h_{i,j}^{n+1} = \left(1 - \frac{4T \cdot \Delta t}{S \cdot a^2} \right) h_{i,j}^n + \left(\frac{4T \cdot \Delta t}{S \cdot a^2} \right) \frac{h_{i-1,j}^n + h_{i+1,j}^n + h_{i,j-1}^n + h_{i,j+1}^n}{4} + \frac{R_{i,j}^n \cdot \Delta t}{S} \quad (2)$$

پایدار برای مه‌ماه ۸۷ واسنجی گردید. سپس به دلیل شرایط ناپایدار (Transient) حاکم بر آبخوان، مدل برای یک سال آبی (۸۷-۸۸) براساس آمار موجود برای سطح آب مشاهده‌ای، اجرا و واسنجی شد.

- شرایط مرزی آبخوان

مرزهای مدل در سرتاسر حاشیه ارتفاعات و مناطق تغذیه- تخلیه با استفاده از بسته‌های نرم‌افزاری Well و Time Variant Specified Head شبیه‌سازی شده است.

- تنش‌ها (Stresses)

این اعمال توسط بسته‌های مختلفی (چاه، تغذیه، تبخیر و تعرق و...) شبیه‌سازی می‌شوند. آب پمپاژ

- انتخاب دوره‌های تنش (Stress Periods)

برای به دست آوردن مقادیر هدایت هیدرولیکی و جریان‌های زیرزمینی آبخوان، ابتدا مدل در حالت

شده توسط چاه‌ها مهم‌ترین مؤلفه خروجی آبخوان می‌باشد. چاه‌های بهره‌برداری به تعداد ۱۰۰ حلقه می‌باشد که بیشتر این چاه‌ها در شمال شرق دشت (محدوده‌ی شهر ایوانکی) قرار گرفته‌اند.

- تعیین مقدار تغذیه‌ی سطحی

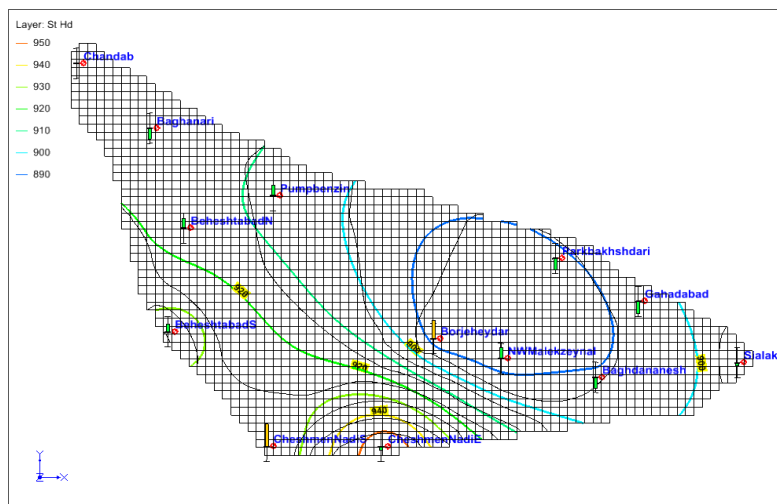
مقدار تغذیه سطحی (شامل نفوذ آب برگشتی کشاورزی و بارندگی) توسط بسته‌ی تغذیه (Recharge package) شبیه‌سازی گردید. با توجه به خصوصیات منطقه‌ی مورد مطالعه و براساس نظر کارشناسی، مقدار آب برگشتی کشاورزی بیش از ۱۰٪ و مقدار بارش مؤثر با توجه به اقلیم منطقه، شیب توپوگرافی و نفوذپذیری دشت کمتر از پنج درصد به مدل اعمال شد.

- واسنجی مدل آب زیرزمینی دشت ایوانکی

هدف از واسنجی به حداقل رساندن خطا یا معیار واسنجی (Calibration Criterion) می‌باشد. دو روش واسنجی خودکار (Automatic calibration) و واسنجی دستی (سعی و خطا)

(Trial and error calibration) در مدل‌های ریاضی به کار می‌رود (Barazzuoli et al., 2008). واسنجی خودکار با استفاده از کد PEST آغاز شد و تا رسیدن به بهترین نتیجه‌ی منطقی برای پارامتر هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه ادامه یافت و سپس تنظیم مدل به صورت دوره‌ای با تنظیم دستی هر پارامتر همراه با جریان تبدالی در مرزها تا رسیدن به بهترین تطبیق بین تراز آب محاسبه‌شده و مشاهده‌شده ادامه یافت.

در برخی از پیژومترها میله معیار واسنجی اختلاف بیشتری از بار هیدرولیکی محاسبه‌شده و مشاهده‌شده را در محدوده‌ی مجاز تعیین شده برای واسنجی نشان می‌دهند (شکل ۱۰). عدم انطباق کامل به دلایل متعددی مربوط می‌شود که مربوط به منشاءهای ایجادکننده‌ی خطاها است. علاوه بر آن‌ها در این قسمت شرایط حاکم بر آبخوان پایدار فرض شده است در حالی که شرایط آبخوان ناپایدار می‌باشد. سطح ایستابی شبیه‌سازی‌شده در محدوده‌ی مدل با مدل مفهومی سیستم جریان انطباق خوبی دارد.



شکل ۱۰- مقایسه‌ی تراز آب محاسبه‌ای (نازک) و مشاهده‌ای (ضخیم)، مهر ۸۷

- واسنجی مدل در شرایط ناپایدار (transient)

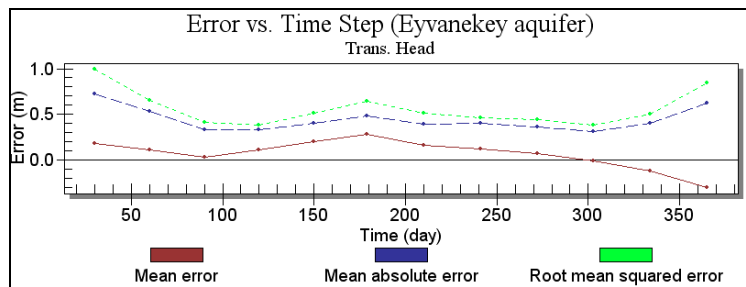
پس از واسنجی مدل در شرایط پایدار واسنجی مدل در شرایط ناپایدار و برای یک دوره ۱۲ ماهه (مهرماه ۱۳۸۷ تا شهریورماه ۱۳۸۸) انجام گرفته است. در این روش مفروضات اولیه خصوصیات آبخوان، شرایط مرزی و تنش‌ها (در یک محدوده قابل قبول) برای هر اجرای متوالی مدل تغییر داده می‌شوند تا بهترین برازش بین بارهای هیدرولیکی مشاهده‌ای و محاسبه‌ای به دست آید و بیلان

حاصل از شبیه سازی با بیلان محاسبه‌ای (دستی) مطابقت و همخوانی داشته باشد.

مقادیر انواع خطا در طول دوره واسنجی، براساس معیارهای آماری در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. مقدار خطای RMS محاسبه شده که مهمترین این معیارها به شمار می‌رود، دارای مقدار مطلوبی (۰/۵۹ متر) می‌باشد و در هر یک از گام‌های زمانی شبیه‌سازی شده مقادیر خطاها (MR, MAR و RMS) کمتر از یک متر می‌باشد (شکل ۱۲).

Error Summary (Groundwater modeling of Eyvanekey aquifer)	
Trans. Head (365 day)	
Mean Error:	0.07
Mean Abs. Error:	0.44
Root Mean Sq. Error:	0.59

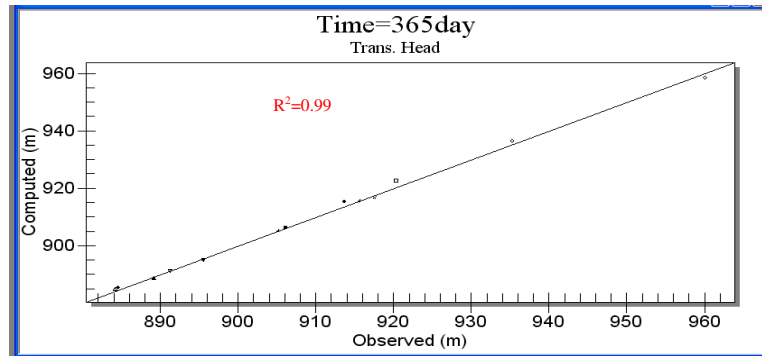
شکل ۱۱- مقادیر انواع خطا در دوره واسنجی



شکل ۱۲- مقادیر خطاها در مقابل گام‌های زمانی در طی دوره شبیه سازی

مربع ضریب همبستگی (R^2) برای خط رگرسیون نزدیک به یک است که گویای واسنجی مطلوب می‌باشد.

نمودار پراکندگی (Scattergram) در شکل ۱۳، تطابق خوب سطح آب زیرزمینی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده توسط مدل در انتهای دوره واسنجی برای شرایط ناپایدار را نشان می‌دهد.

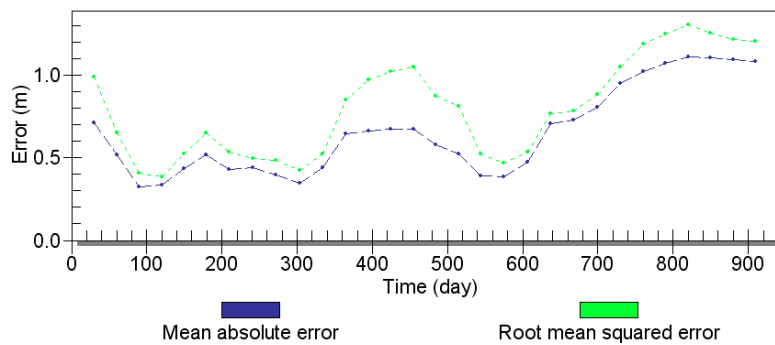


شکل ۱۳- نمودار پراکندگی برای سطح آب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در انتهای دوره واسنجی

- صحت سنجی

در این تحقیق، صحت‌سنجی برای ۱۸ ماه (مهر) ۸۸ تا فروردین (۹۰) پس از دوره واسنجی انجام شده است. در دوره صحت‌سنجی میزان بارندگی با میزان بارش دوره‌ی واسنجی تفاوت داشته است. مقادیر خطاهای MAR و RMS در طول دوره-های تنشی واسنجی و صحت‌سنجی نشان‌دهنده‌ی خطای کمتر از یک متر (به‌طور میانگین) می‌باشد که تاییدکننده مدل واسنجی شده است (شکل ۱۴).

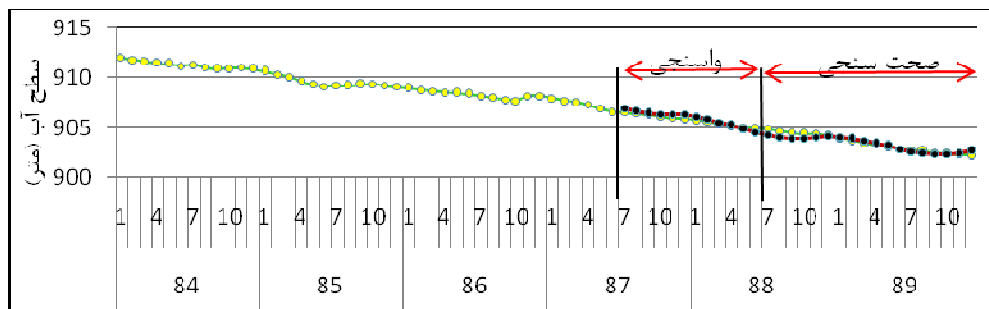
به‌علت عدم قطعیت در واسنجی، مجموعه مقادیر پارامترهای استفاده شده در مدل واسنجی شده ممکن است مقادیر صحرائی را با دقت خوبی نشان ندهد. در نتیجه امکان دارد پارامترهای واسنجی شده، سیستم را تحت شرایط مرزی و تنش‌های هیدرولوژیک مختلف بخوبی نشان ندهد. صحت سنجی مدل به حصول اطمینان بیشتر از واسنجی کمک می‌کند (Mandel, 2002).



شکل ۱۴- مقادیر خطای میانگین مطلق و RMS در دوره‌های تنشی واسنجی و صحت‌سنجی

واسنجی مطلوب مدل جریان آبخوان دشت ایوانکی می‌باشد (شکل ۱۵).

همچنین هیدروگراف حاصل از مدل در طی دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی با هیدروگراف معرف آبخوان تطابق خوبی را دارد که نشان‌دهنده

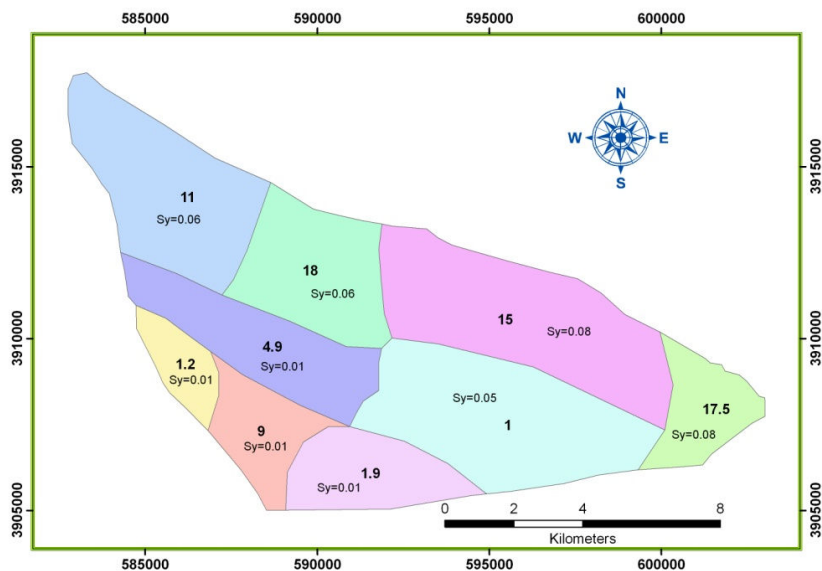


شکل ۱۵- هیدروگراف معرف مدل و هیدروگراف معرف مشاهده‌ای در طی دوره واسنجی و صحت سنجی

بیشترین مقدار هدایت هیدرولیکی در قسمت‌های شمالی آبخوان و ورودی حوضه آبریز و کمترین مقادیر آن در اطراف پیرومترهای خروجی دشت مثل جنوب چشمه نادى، شرق چشمه نادى و جنوب بهشت آباد به دست آمده است. مقادیر واسنجی شده آبدهی ویژه (S_y) نشان می‌دهد که مقدار آن بین ۰/۰۸ در ورودی حوضه تا ۰/۰۱ در خروجی حوضه متغیر می‌باشد (شکل ۱۶).

هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه واسنجی شده

براساس داده‌های موجود و مطالعات هیدروژئولوژی ابتدا مقادیر هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه (درحالت ناپایدار) به عنوان مقادیر اولیه به مدل داده شد و سپس در طی واسنجی مدل به صورت دستی و اتوماتیک (با استفاده از ابزار PEST) این مقادیر به صورت زون‌بندی تصحیح گردیدند.



شکل ۱۶- مقادیر هدایت هیدرولیکی (متر بر روز) و آبدهی ویژه واسنجی شده حاصل از مدل آبخوان ایوانکی

- بیلان آبخوان محاسبه‌شده توسط مدل جریان

هدف از محاسبه‌ی بیلان آب‌های زیرزمینی دشت ایوانکی تعیین مقادیر ورودی، مصرفی و ذخیره‌ی آب در دشت می‌باشد بدین منظور از مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی دشت با استفاده از کد MODFLOW و Flow Budget گنجانده‌شده در نرم‌افزار GMS 7.0 برای محاسبه‌ی بیلان آب

زیرزمینی برای سال آبی ۸۸-۸۷ استفاده شده است. با توجه به بیلان به دست آمده بیشترین تغذیه آبخوان از طریق جریان‌های ورودی زیرزمینی صورت می‌گیرد و سالانه حدود پنج میلیون متر مکعب کسری مخزن در آبخوان وجود دارد (جدول ۲).

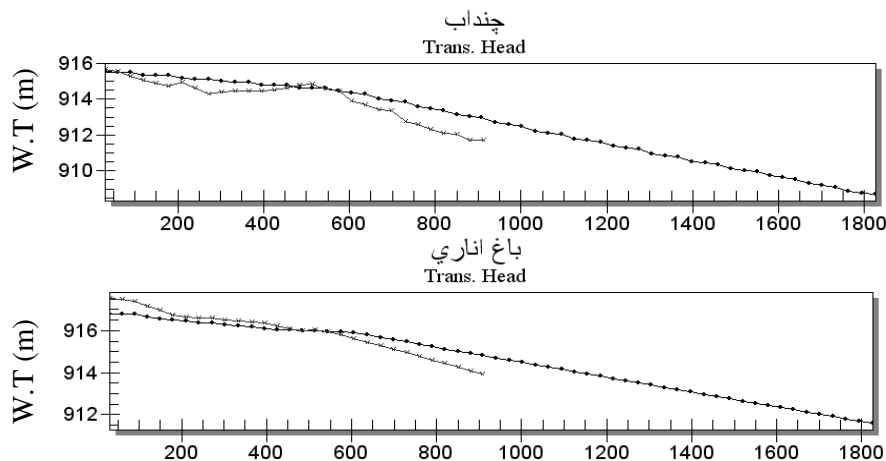
جدول ۲- بیلان حجمی شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی

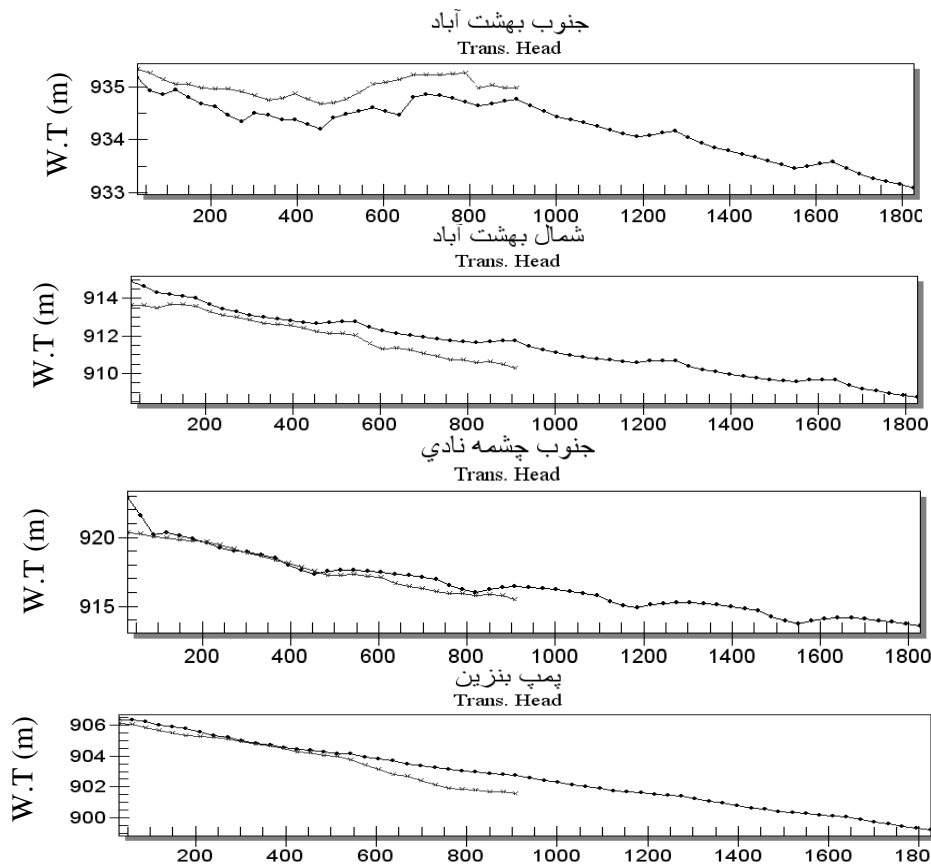
مؤلفه بیلان	حجم (MCM)
برداشت از آب‌زیرزمینی و جریان‌های خروجی	-۴۲/۷
جریان‌های ورودی زیرزمینی به وسیله چاه	۲۷/۵
تغذیه سطحی و آب برگشت کشاورزی	۱/۱
تغذیه از طریق CHD	۱۲/۳
تخلیه از طریق CHD	-۳/۳
تغییرات حجم مخزن	-۵/۲

تغییرات سطح آب مشاهده‌ای در ۱۳ حلقه پیزومتر دشت در طی دوره‌ی واسنجی و صحت سنجی و سطح آب شبیه‌سازی‌شده توسط مدل در طی دوره واسنجی (۳۶۵ روز)، صحت‌سنجی (۵۴۸ روز) و پیش‌بینی (۹۱۲ روز) آبخوان ارائه شده است.

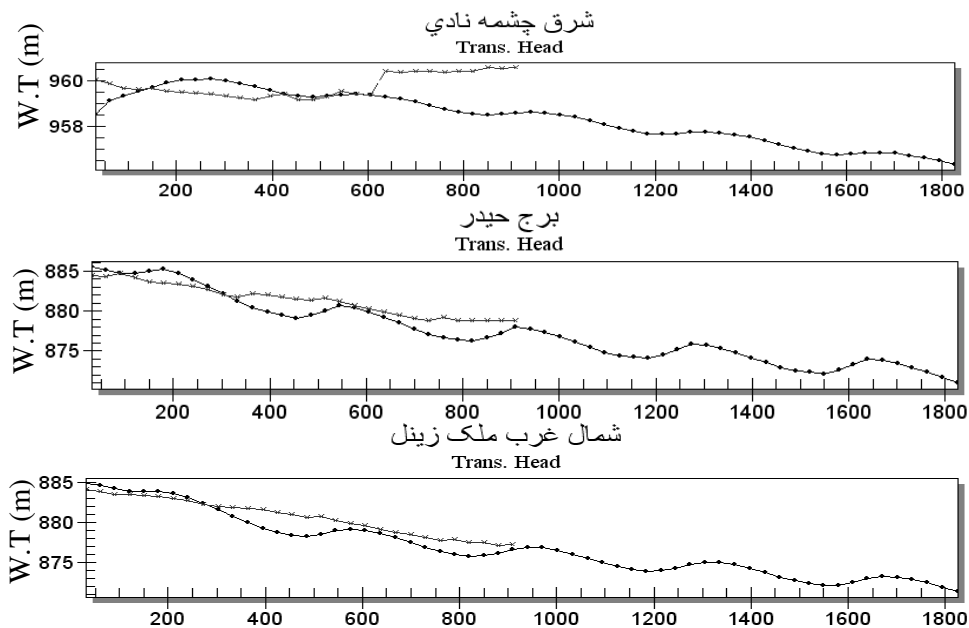
- ادامه‌ی بهره‌برداری با سیاست فعلی

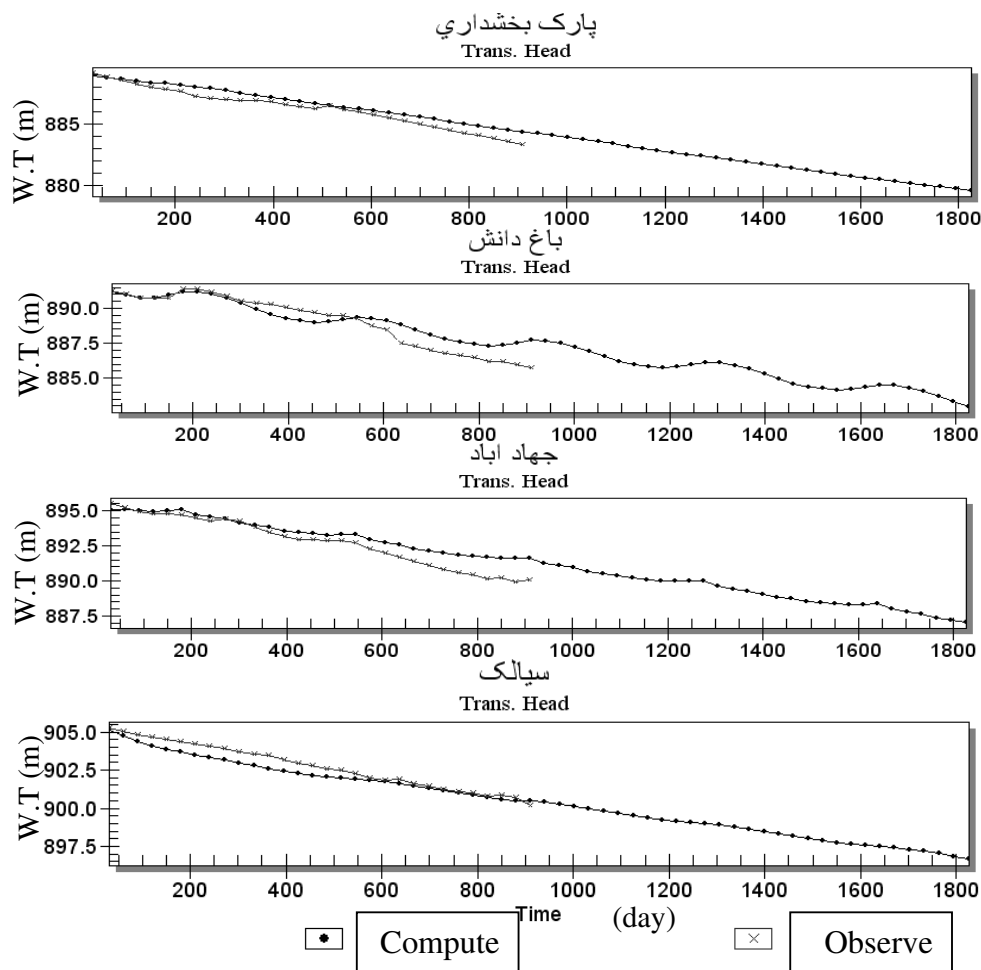
به‌منظور ارزیابی تأثیر سیاست فعلی برداشت از آب‌زیرزمینی بر آبخوان، مدل واسنجی‌شده برای یک دوره ۳۰ ماهه (پس از دوره واسنجی و صحت‌سنجی) از فروردین ۹۰ تا مهر ۹۲ اجرا شد. تنش‌های وارد بر سیستم در طی این دوره پیش‌بینی ثابت فرض شده‌اند. در شکل ۱۷





شکل ۱۷- سطح آب پیزومترهای آبخوان ایوانکی در زمان واسنجی، صحت سنجی و پیش‌بینی مدل

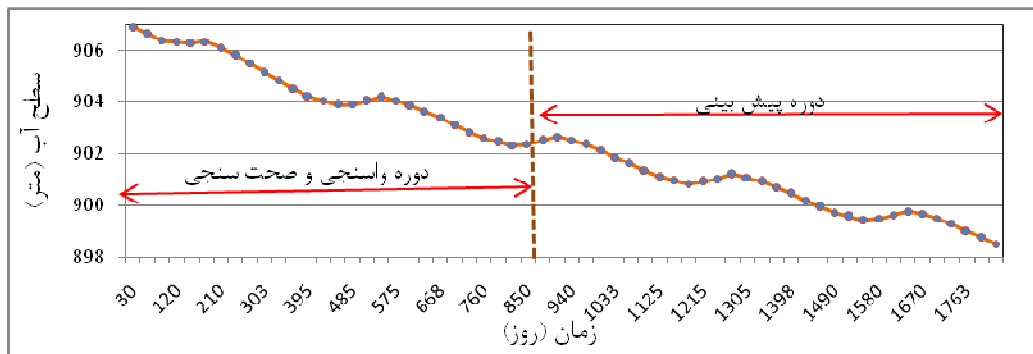




ادامه شکل ۱۷- سطح آب پیزومترهای آبخوان ایوانکی در زمان واسنجی، صحت سنجی و پیش‌بینی مدل

آبخوان ادامه خواهد داشت و در پایان دوره پیش-بینی (شهریور ۹۲)، سطح آب هیدروگراف معرف نزدیک به ۸۹۸/۵ متر خواهد رسید و نسبت به شروع دوره واسنجی مدل (مهر ۸۷) که ۹۰۶/۸ متر بوده است، ۸/۳ متر افت خواهد نمود (شکل ۱۸). لذا لازم است در جهت جلوگیری از افت آبخوان و نتایج حاصل از آن راه‌حل‌های مدیریتی (مثل کاهش بهره‌برداری، افزایش راندمان چاه‌ها، تغییر سیستم‌های آبیاری در راستای بهینه مصرف کردن، تغذیه مصنوعی و ...) در دشت اعمال گردد.

با بررسی افت آب در هر یک از پیزومترها مشخص گردید که سطح آب در پیزومترهای جنوب بهشت‌آباد و شرق چشمه‌نادی که جزو مناطق تغذیه‌کننده آبخوان می‌باشد کمترین افت (به ترتیب ۲ و ۲/۲ متر) را در طی دوره‌ی مدل‌سازی داشته است. بیشترین افت سطح آب (۱۴ متر) نیز در پیزومتر برج حیدر که در مرکز تراکم چاه‌های بهره‌برداری قرار گرفته است. هیدروگراف معرف حاصل از مدل آبخوان دشت ایوانکی نشان می‌دهد که با شرایط فعلی روند افت



شکل ۱۸- هیدروگراف معرف حاصل از مدل در زمان واسنجی، صحت سنجی و پیش‌بینی مدل

نتیجه‌گیری

حوضه از مقدار هدایت هیدرولیکی کاسته می‌شود. مقادیر واسنجی شده آبدهی ویژه (S_y) نشان می‌دهد که مقدار آن بین ۰/۰۸ در ورودی حوضه تا ۰/۰۱ در خروجی حوضه متغیر می‌باشد. بیلان شرایط ناپایدار نشان دهنده افت مخزنی حدود ۵/۲ میلیون متر مکعب در سال در آبخوان می‌باشد.

با شرایط فعلی روند افت در آبخوان ادامه خواهد داشت. لذا اعمال راه‌کارهای مناسب جهت جلوگیری از بحران ضروری می‌باشد.

بر اساس هیدروگراف معرف آبخوان دشت ایوانکی از سال آبی ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۰، آبخوان دچار افت پیوسته بوده است. به طوری که از فروردین ۸۴ تا فروردین ماه ۹۰ آبخوان به میزان ۱۰ متر افت نموده است. مقدار این افت به‌طور متوسط سالانه ۱/۷ متر می‌باشد.

با توجه به دانه‌بندی سازند آبرفتی و نتایج واسنجی در مدل ناپایدار، تغییرات هدایت هیدرولیکی بین یک تا ۱۸ متر بر روز به‌دست آمده است که از ورودی حوضه به سمت خروجی

منابع

-شرکت آب منطقه‌ای سمنان، ۱۳۸۹. منابع آب دشت ایوانکی.

-شرکت ژنرال ژئوفیزیک، ۱۳۴۵. بررسی ژئوفیزیکی دشت ایوانکی.

-مهندسین مشاور پنگان‌آوران، ۱۳۸۹. گزارش هیدروژئولوژی دشت ایوانکی، مطالعات به تعادل رساندن بیلان آب زیرزمینی دشت ممنوعه ایوانکی.

-مهندسین مشاور کاوآب، ۱۳۸۵. مطالعات نیمه تفضیلی منابع آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی ایوانکی.

-جودوی، ع.، ۱۳۸۸. بررسی امکان به تعادل رساندن آب زیرزمینی دشت فیض آباد توسط تهیه مدل ریاضی آبخوان دشت، پایان‌نامه کارشناسی ارشد آب‌شناسی، دانشگاه شیراز. ۱۶۳ صفحه.

-سازمان آب منطقه‌ای تهران، ۱۳۸۱. گزارش مطالعات ژئوفیزیک دشت ایوانکی.

-سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۷۶. نقشه زمین‌شناسی گرمسار در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰.

-نظری، ر.، ۱۳۸۹. پیش‌بینی تأثیر توسعه‌ی بهره‌برداری بر شوری آبخوان دشت چاه دراز سیرجان با استفاده از کد MT3D، پایان‌نامه کارشناسی ارشد آب‌شناسی، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۵۰ صفحه..

-ناصری، ح.ر.، و اسدیان، ف.، ۱۳۸۷. مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی بر مبنای تلفیق GIS و کد MODFLOW-۲۰۰۰ محدوده مطالعاتی سیب سوران، مجری: معاونت پژوهشی دانشگاه شهید بهشتی، کارفرما: آب منطقه‌ای سیستان و بلوچستان. ۱۵۹ صفحه..

ground-water flow process: U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, 121 p.

-Kushwaha, R.K., Pandit, M.K., and Goyal, R., 2009. MODFLOW Based Groundwater Resource Evaluation and Prediction in Mendha Sub-Basin, NE Rajasthan, Journal geology society of India, v. 74, p.449-458.

-Lutz, A., Thomas, J. M., Pohll, G., Keita, M., and McKay, W. A., 2009. Sustainability of groundwater in Mali, West Africa, Environ Geol, v. 58, p.1441-1450.

-Mandel, R., 2002. Groundwater Modeling Guidance. Michigan Department of Environmental Quality, 54p.

-Yidana, S. M., 2011. Groundwater flow modeling and particle tracking for chemical transport in the southern Voltaian aquifers, Environ Earth Sci, v. 63, p.709-721.

-Anderson, M.P., and Woessner, W.W., 1992. Applied Groundwater Modeling. Academic Press. San Diego, California, 381p.

-Barazzuoli, P., Nocchi, M. and Rigati, R., 2008. A conceptual and numerical model for groundwater management: a case study on a coastal aquifer in southern Tuscany, Hydrogeology Journal. v.16:1557-1576.

-Batu, V., 2006. Applied Flow and Solute Transport Modeling in Aquifers. Taylor & Francis Group Inc, 667p.

-Brigham Young University., 2010. GMS 7.0 Tutorials. Environmental Modeling Research Laboratory.

-El-Bihery, M.A., 2009. Groundwater flow modeling of Quaternary aquifer Ras Sudr, Egypt, Environ Geol , v.58, p.1095-1105.

-Harbaugh, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C., and McDonald, M.G., 2000. MODFLOW-2000, User guide to modularization concepts and the