

برآورد هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره آبخوان دشت شبستر با استفاده از مدل عددی

محمد خالدی علمداری^۱، ابوالفضل مجنونی هریس^{۲*}، احمد فاختری فرد^۳

۱- کارشناس ارشد آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

* نویسنده مسئول: majnooni@tabrizu.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۳۰

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۲۷

چکیده

ضریب هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره آبخوان، از جمله مهم‌ترین ویژگی‌های هیدرولیکی آبخوان‌ها محسوب می‌شوند. امروزه با توجه به پیشرفت‌های نرم‌افزاری، استفاده از مدل‌های عددی در بهره‌برداری از آبخوان‌های آب زیرزمینی گسترش یافته است. مدل‌سازی، یکی از بهترین ابزارها برای بررسی و شبیه‌سازی وضعیت منابع آب است. از مزایای مدل‌سازی می‌توان به تعیین هم‌زمان چند پارامتر مثل بار هیدرولیکی، مسیر جریان و غیره اشاره کرد. همچنین با استفاده از مدل‌سازی، می‌توان عکس‌العمل حوضه را در مقابل تغییراتی از قبیل تغذیه طبیعی یا مصنوعی و میزان پمپاژ شبیه‌سازی نموده و با اعمال راهکارهای مناسب، بهترین عملکرد سیستم را تعیین و در جهت مدیریت حوضه از آن استفاده کرد. در مطالعه حاضر، با استفاده از مدل عددی MODFLOW و رابط کاربری GMS برای شبیه‌سازی و واسنجی مدل، خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوان دشت شبستر به صورت منطقه‌ای ارزیابی شد. پس واسنجی مدل مفهومی تولیدشده، ضرایب هیدرودینامیکی استخراج شد. بر این اساس مقادیر RMSE مربوط به بار هیدرولیکی برای حالت‌های ماندگار و غیرماندگار به ترتیب ۰/۵۹ و ۰/۹۵ حاصل گردید. نتایج مستخرج از شبیه‌سازی بیانگر این بود که هرچه آبخوان ناهمگن‌تر باشد، ضرایب هیدرودینامیکی نیز به تبع آن متنوع خواهد بود و این تنوع به علت وجود آبرفت‌هایی با منشأ سازندهای زمین‌شناسی متنوع و تخلخل و نفوذپذیری مختلف، از روند خاصی پیروی نکرده و حتی ممکن است که در دونقطه نزدیک به هم، تفاوت‌های چشمگیری وجود داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: آبخوان، ضرایب هیدرودینامیکی، مدل‌سازی، قابلیت انتقال.

مقدمه

بهینه‌سازی منابع آب زیرزمینی با در نظر گرفتن مطلوبیت‌ها و تضادهای تأثیر پذیرندگان این سیستم‌ها و همچنین با توجه به جنبه‌های زیست‌محیطی و معیارهای اجتماعی از جمله عدالت، به یکی از مباحث مهم در بهره‌برداری از منابع آب تبدیل شده است. در کشور ایران وجود بیش از ۷۷۰ هزار حلقه چاه در آبخوان‌های آبرفتی و سازند سخت و حجم قابل توجه برداشت از منابع آب زیرزمینی از طریق این چاه‌ها، بیانگر نقش مهم و انکارناپذیر منابع آب زیرزمینی در توسعه زیرساخت‌ها در بخش‌های مختلف از جمله کشاورزی، شرب، بهداشت و

آب‌های زیرزمینی از منابع بسیار مهم در جهان به شمار رفته و جایگاه ویژه‌ای در صنعت و زندگی بشر به خصوص در مناطق اقلیمی خشک و نیمه‌خشک دارد. امروزه با پیشرفت تکنولوژی و توسعه شهرها نیاز به استفاده از این منابع زیرزمینی روزبه‌روز بیشتر می‌شود (آبایی و همکاران، ۱۳۹۰). با توجه به چالش‌های فراوان بخش منابع آب زیرزمینی و این واقعیت که برخی مناطق کشور معمولاً در شرایط خشک‌سالی یا کمبود شدید آب به سر می‌برند، بهره‌برداری و تخصیص

عابدی و گلابچیان (۱۳۹۴) ضرایب هیدرودینامیک منابع آب زیرزمینی حوضه آبخیز کوهپایه - سگری را با استفاده از مدل MODFLOW برآورد کردند. ایشان پس از تهیه لایه‌های ورودی به مدل، متغیرهای مؤثر در مدل‌سازی شرایط مرزی و شبکه‌بندی آبخوان، اقدام به اجرا و واسنجی مدل در حالت ماندگار و غیرماندگار نموده و هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه (ضریب ذخیره) آبخوان را محاسبه کردند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، مقادیر تراز هیدرولیکی محاسبه‌شده توسط مدل با مقادیر مشاهده‌شده در محل کلیه پیزومترها مطابقت خوبی داشتند. آبدار اصفهانی و کلانتری (۱۳۹۲) برای بررسی هیدروژئولوژیکی آبخوان دشت قم، ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان (S و T) را اندازه‌گیری و تغییرات این ضرایب را در بخش‌های مختلف دشت بررسی کردند. دواندل و همکاران با انجام آزمایش‌های هیدرولیکی بر روی آبخوانی در منطقه کالوندینای جدید، ضمن ارائه نقشه هدایت هیدرولیکی و مشخص نمودن ناهمگونی این آبخوان، نقشه‌ای برای قابلیت انتقال این منطقه ارائه نمودند که از این نقشه‌ها می‌توان به‌عنوان اطلاعات اولیه‌ای برای مدل‌سازی این منطقه استفاده نمود (Dewandel et al., 2017). ونگ و همکاران با محاسبه هدایت هیدرولیکی افقی و عمودی اشباع نمونه‌های لس برداشت‌شده از شیب‌های شمال فلات جینگ‌یانگ به‌وسیله آزمایش با بار متغیر، به بررسی تنوع فضایی این پارامتر که منجر به نفوذ آب و ایجاد لغزش در این محل می‌شود پرداختند (Wang et al., 2018). جورج و همکاران در منطقه ایالت اوبولوی شرقی در نیجریه، به تخمین پارامترهای هیدرولیکی به‌وسیله سونداژ الکتریک پرداختند (George et al., 2017). مرادی و اسپهند (۱۳۹۰) طی تحقیقی وضعیت هیدروژئولوژی دشت جایدرد در لرستان را برای تعیین خصوصیات هیدرودینامیکی سفره آب زیرزمینی این منطقه بررسی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها پردازش داده‌ها و اطلاعات برداشت‌شده جهت تعیین خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوان منطقه جایدرد بوده است. در پژوهشی دیگر نخعی و حسن نیا (۱۳۹۸)، با بررسی لاگ‌های حفاری دشت اوآن در شهرستان اندیمشک و همچنین آزمون‌های پمپاژ و جنس رسوبات با ایجاد مدل استنتاج فازی، ضرایب هیدرودینامیکی منطقه ازجمله هدایت هیدرولیکی و همچنین ضریب ذخیره را استخراج نمودند. نتایج

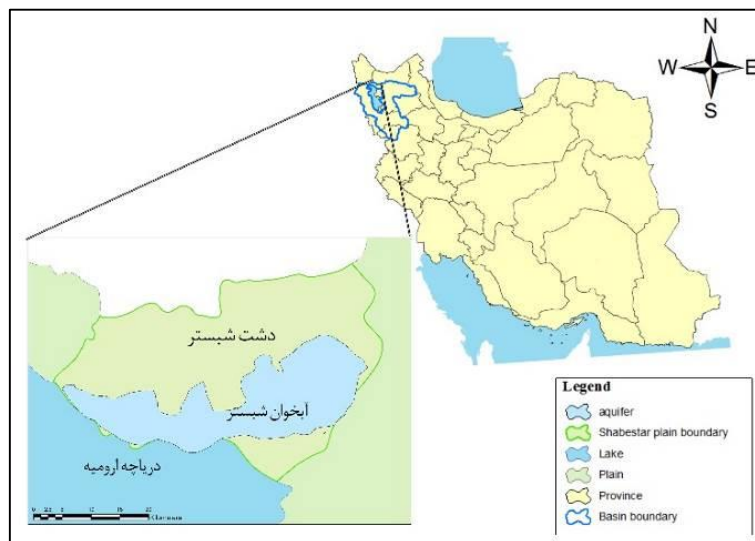
صنعت می‌باشد (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی، ۱۳۹۲). برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی، مشکلاتی از قبیل کاهش سطح آب در آبخوان‌ها، تداخل آب‌شور و شیرین، خشک شدن قنات‌ها و فرونشست زمین را در پی دارد. تعادل پایدار آب زیرزمینی بستگی به دو عامل شامل فعالیت‌های انسانی و پارامترهای هیدروژئولوژیکی دارد. جهت بررسی و تصمیم‌گیری در مورد آب‌های زیرزمینی، یکی از مهم‌ترین موارد، شناخت آبخوان است که این خود مستلزم به‌دست آوردن ویژگی‌های هیدرولیکی آبخوان و شرایط ژئوفیزیکی آن می‌باشد. از مهم‌ترین ویژگی‌های هیدرولیکی آبخوان، ضریب هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره آبخوان است. متأسفانه برداشت از آب‌های زیرزمینی به‌دلیل عدم اطلاعات کافی بهره‌برداران از وضعیت آبخوان، با تغذیه آن تطابق نداشته و خسارات جبران‌ناپذیری را بر وضعیت آب زیرزمینی و در آینده بر معیشت کشاورزان و بهره‌برداران وارد خواهد نمود. به‌منظور بررسی و شبیه‌سازی وضعیت منابع آب مدل‌سازی یکی از مهم‌ترین ابزارها می‌باشد. مدل‌های ریاضی آب زیرزمینی از سال‌های ۱۸۰۰ میلادی مورد استفاده قرار گرفته است. به‌تازگی مدل‌های ریاضی جریان آب زیرزمینی با روش‌های بهینه‌سازی مختلف برای تعیین خط‌مشی مدیریت منابع آب و بهترین مجموعه جواب با توجه به تابع هدف و محدودیت‌ها ترکیب شده‌اند (Ahlfeld et al., 2005). از مزایای مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی، می‌توان به تعیین هم‌زمان چند پارامتر مثل بار هیدرولیکی، مسیر جریان و غیره اشاره کرد. همچنین با استفاده از مدل‌سازی، می‌توان عکس‌العمل حوضه را در مقابل تغییر متغیرها از قبیل تغذیه طبیعی یا مصنوعی، میزان پمپاژ و غیره نشان داده و با اعمال راهکارهای مناسب، بهترین عملکرد سیستم را تعیین و در جهت مدیریت یک حوضه از آن استفاده کرد. مدل‌های عددی آب زیرزمینی که شرایط زمانی و مکانی جریان آب زیرزمینی را نشان می‌دهند به‌عنوان بهترین روش برای مدیریت و رسیدن به تعادل پایدار آب‌های زیرزمینی هستند (Lubezynski, 2006). پژوهشگران متعددی با مدل‌سازی آب زیرزمینی به بررسی و مدیریت این منابع ارزشمند پرداخته‌اند (دهقانی و همکاران، ۱۳۹۵؛ رضایی و همکاران، ۱۳۹۶؛ Wang et al., 2008؛ Tetreault and Hulley, 2011؛ Sinton et al., 2011).

مواد و روش‌ها منطقه مورد مطالعه

دشت شبستر در غرب استان آذربایجان شرقی و یکی از زیرحوضه‌های ۲۵ گانه حوضه آبریز دریاچه ارومیه است که در ۶۰ کیلومتری غرب شهرستان تبریز واقع شده است. مساحت کلی این محدوده ۱۲۵۴/۷ کیلومترمربع می‌باشد که حدود ۲/۴۲ درصد کل حوضه آبریز دریاچه ارومیه را در برمی‌گیرد. از این میزان، ۶۳۸ کیلومترمربع مربوط به وسعت دشت و ۶۱۶/۷ کیلومترمربع را نیز ارتفاعات تشکیل می‌دهند. این محدوده، از طرف شمال به حوضه زلیبرچای مرنده، از غرب به محدوده مطالعاتی تسوج، از شرق به تبریز و از جنوب به دریاچه ارومیه و پهنه‌های نمکی - رسی محدود می‌شود. طبق مطالعات انجام‌گرفته، آبخوان این دشت از نوع آزاد بوده و به وسعت ۴۸۴/۶ کیلومترمربع در قسمت جنوبی این دشت گسترش یافته است (بی‌نام، ۱۳۹۳). در شکل ۱ موقعیت دشت شبستر در کشور و استان نشان داده شده است.

تحقیق ایشان نشان داد که در مناطق مختلف آبخوان، ضریب قابلیت انتقال به دلیل تغییرات در میزان رسوبات و تراکم صورت گرفته در آن‌ها نسبت به ضریب ذخیره تغییرات بیشتری دارد.

یکی از دشت‌های بحرانی از نظر آب زیرزمینی در حوضه دریاچه ارومیه، دشت شبستر می‌باشد. با شناخت خصوصیات هیدرودینامیکی این آبخوان می‌توان با ابزارهای موجود از جمله مدل‌سازی درصدد مدیریت آبخوان به صورت پایدار برآمد. لذا در مطالعه حاضر، به منظور برآورد خصوصیات هیدرودینامیک آبخوان دشت شبستر شامل ضریب هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره آبخوان، از مدل عددی MODFLOW برای شبیه‌سازی و رابط کاربری GMS برای واسنجی مدل استفاده شد.



شکل ۱- موقعیت دشت شبستر در استان و کشور.

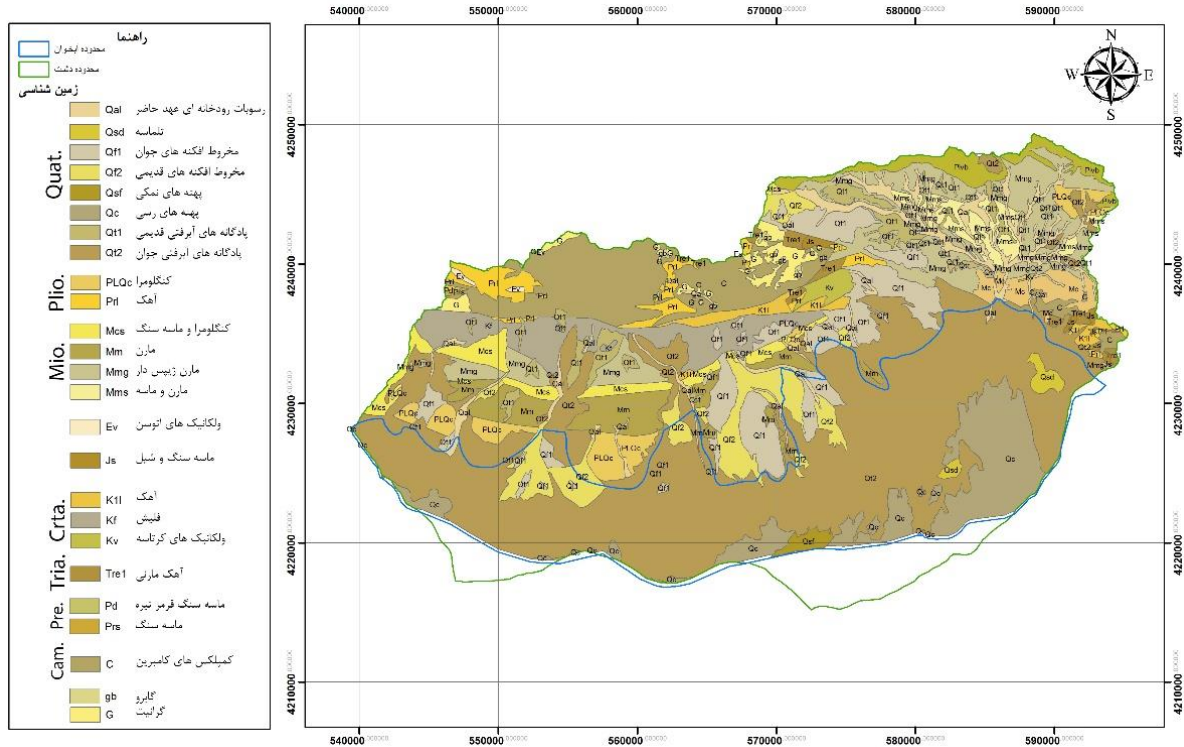
تشکیل شده که ناتراوا و یا دارای تراوایی کم هستند. رواناب‌های سطحی کوه میشو از طریق تعدادی رودخانه، مسیل و آبراهه به سمت دشت شبستر- صوفیان و در آخر به سمت دریاچه ارومیه جریان می‌یابند. همراه این رواناب‌های سطحی، آبرفت به این دشت وارد و در نقاط مختلف آن ته‌نشین گردیده‌اند و تحت‌تأثیر فرسایش ناشی از این رواناب‌ها، تعدادی دره آبرفتی

ساختار آبخوان

با توجه به نقشه زمین‌شناسی ارائه‌شده در شکل ۲، محدوده مطالعاتی شبستر- صوفیان نشان می‌دهد که این محدوده در بین رشته‌کوه میشو و شوره‌زاری قرار گرفته که جداکننده آن از دشت تبریز می‌باشد. بیشتر سازندهای زمین‌شناسی پیرامون این دشت از مارن و ماسه‌سنگ

۱۱۷ کیلومترمربع مربوط به واحد سنگ رس-سنگ آهک ماسه‌ای و کنگلومرا می‌باشد. در ارتفاعات محدوده مطالعاتی با وسعت ۵۴۲ کیلومترمربع سازندهایی که امکان ذخیره آب در آن‌ها ایجاد شده شامل سنگ‌های آهکی کرتاسه، سازند الیکا، سازند روته و سازند تیزکوه است. رسوبات تبخیری متعلق به میوسن با وسعت ۱۰۷ کیلومترمربع باعث کاهش کیفیت منابع آب موجود در این محدوده مطالعاتی گردیده‌اند.

درون سازندهای زمین‌شناسی به وجود آمده که می‌توان به دره‌های دریان، شانجان و سپس اشاره نمود (بی‌نام، ۱۳۹۳). وسعت رسوبات ناپیوسته در سطح محدوده مطالعاتی مذکور ۷۸۱ کیلومترمربع و وسعت سازندهای سخت در این محدوده مطالعاتی ۴۷۴ کیلومترمربع می‌باشد. قدیمی‌ترین سنگ‌های محدوده مطالعاتی مربوط به شیل و اسلیت سازند کهر متعلق به پرکامبرین می‌باشد. وسیع‌ترین واحد زمین‌شناسی با وسعت



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی دشت شبستر.

ضریب ذخیره به‌دست‌آمده از آزمایش‌های پمپاژ، به‌علت عدم دقت در انجام این آزمایش‌ها، از دقت کافی برخوردار نمی‌باشند. راهکار دیگری که به‌منظور تخمین ضریب ذخیره به کار می‌رود، استفاده از دانه‌بندی لاگ زمین‌شناسی برای مناطق مختلف می‌باشد که به علت ناهمگونی شدید در ساختار آبخوان‌ها، این مقادیر نیز قابل‌انکار نمی‌باشند. با این حال به‌عنوان نقطه شروع محاسبات می‌توان از یکی از روش‌های فوق در مبحث مدل‌سازی استفاده نمود. برای آبخوان دشت شبستر مقادیر ضریب ذخیره ویژه با عمده سازندهای رس و همچنین شن و ماسه بین ۵/۵ الی ۱۶ درصد متغیر می‌باشد (Todd and Mays, 2005).

ضریب ذخیره

ضریب ذخیره به حجم آبی که در اثر پایین یا بالا آمدن سطح آب به اندازه یک واحد از واحد سطح سفره خارج شده و یا به ذخیره آن افزوده می‌شود، اطلاق می‌گردد. در آبخوان‌های آزاد، میزان ضریب ذخیره برابر با آبدهی ویژه آبخوان می‌باشد و با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌گردد.

$$S_y = \frac{V_y}{A \times h} \times 100 \quad (1)$$

که در آن S_y ضریب ذخیره، V_y حجم آب مبادله شده، A مساحت حوضه، h ارتفاع سطح آب حاصل از افزایش یا کاهش ذخیره می‌باشد.

هدایت هیدرولیکی

مرحله راه‌اندازی مدل، کمبود آمار مشکل‌ساز شود. بدیهی است که هرچقدر آمار و اطلاعات بیشتری از آبخوان موجود باشد، مدل تهیه‌شده از دقت بیشتری برخوردار خواهد بود. در این رابطه، دشت شبستر مستثنا از این موضوع نبوده و کمبود داده‌های موجود و به‌خصوص وجود داده‌های غیرقابل‌اعتماد از نظر مدل‌سازی، فرآیند تهیه و اجرای مدل را دشوار نموده است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، مدل‌های عددی آب زیرزمینی ابزاری ریاضی است که به‌منظور تجزیه‌وتحلیل و پیش‌بینی رفتار آبخوان‌ها در مقیاس و شرایط مختلف به کار می‌روند. این ابزار به ما کمک می‌کند تا یا استفاده از معادله جریان آب زیرزمینی (رابطه ۲)، تأثیر سناریوهای مختلف را بر آبخوان موردبررسی قرار دهیم.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z h \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

که در آن K_x ، K_y و K_z اجزای تانسور هدایت هیدرولیکی، W شار حجمی مربوط به تغذیه و یا تخلیه، S_y ضریب ذخیره و h بار هیدرولیکی می‌باشد. به‌منظور اعمال شرایط مرزی، مرزهای خارجی مانند مرزهای با بار عمومی و یا ثابت و مرزهای داخلی مانند چاه‌ها، نفوذ از بارندگی و موارد دیگر وارد می‌شوند. در این پژوهش به‌منظور اعمال شرایط مرزی خارجی برای از پکیج بار عمومی (GHB^1) استفاده شده، چراکه میزان جریان ورودی از مرزها در گذر زمان متغیر بوده و این تغییرات از عوامل متعددی از جمله تغذیه و تخلیه و همچنین قابلیت انتقال تأثیر می‌پذیرد. از نظر تئوری در شرایط پایدار وقتی از روش‌های مستقیم برای حل معادلات جبری استفاده می‌شود، نیازی به شرایط اولیه نیست. ولی در شرایط غیرماندگار از هر روش حلی که استفاده شود به وجود شرایط اولیه نیاز می‌باشد. از آنجایی که معمولاً مدل‌های توسعه داده‌شده قادر به حل هر دو روش ماندگار و غیرماندگار می‌باشند و در این حالت برنامه باید برای هر دو شرایط نوشته شود معمولاً از روش‌های حل تکرار استفاده می‌شود که در هر دو حالت به شرایط اولیه نیازمند است. شرایط اولیه یعنی مشخص کردن یک مقدار اولیه برای بار هیدرولیکی همه المان‌های فعال به‌عنوان بار هیدرولیکی اولین مرحله تکرار می‌باشد. این مقدار در شرایط غیرماندگار معمولاً از درون‌یابی بار هیدرولیکی چاه‌های مشاهده‌ای برای

هدایت هیدرولیکی (K) توانایی یک محیط متخلخل برای عبور آب را نشان می‌دهد. یکی از ویژگی‌های مهم رسوبات و سنگ‌ها از نظر حرکت آب‌های زیرزمینی و تشکیل لایه‌های آبدار ضریب هدایت هیدرولیکی آن‌هاست. مقدار این ضریب در رسوبات و سنگ‌ها به اندازه و تعداد فضاهای خالی و نحوه آرایش آن‌ها بستگی دارد (چیت‌سازان و کشکولی ۱۳۸۱). مقادیر ارائه‌شده بر اساس نوع رسوبات (صفوی، ۱۳۹۰) به نحوی بوده که بازه‌ی گسترده‌ای از مقادیر را برای سازندهای مختلف در برمی‌گیرد، بر اساس این مقادیر برای سازندهای آبخوان شبستر که عمدتاً از رس و ترکیبی از شن و ماسه تشکیل شده است مقادیر ۰/۵ تا ۳۰ متر بر روز تخمین زده می‌شود.

تهیه مدل مفهومی

منظور از مدل مفهومی، ساده کردن شرایط روی زمین و وضعیت موجود، چه از نظر فیزیکی و چه از نظر هیدروژئولوژیکی است. این ساده‌سازی کمک بسیار مؤثری به فهم فیزیک محل و تغییرات مربوط به آن می‌نماید؛ ولی نباید به نحوی انجام پذیرد که مسئله از حالت واقعی خارج گردد. مدل مفهومی یک آبخوان شامل چارچوب فیزیکی و هیدروژئولوژیکی آن است. در چارچوب فیزیکی، ابتدا محدوده مرزی آبخوان مورد مطالعه تعیین و سپس توپوگرافی سطوح بالا و پایین لایه‌ها مشخص می‌شود. در چارچوب هیدروژئولوژیکی، نوع رسوبات تشکیل‌دهنده آبخوان و عوامل بیلان از قبیل دریاچه‌ها، رودخانه‌ها، زهکش‌ها، چاه‌ها، مناطق تخلیه و تغذیه، مرزهای ورودی و خروجی به‌طور شماتیک مشخص می‌شوند.

طراحی مدل کمی آبخوان

یکی از مراحل مهم در مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی، راه‌اندازی مدل با استفاده از داده‌ها و اطلاعات موجود آبخوان می‌باشد. به‌طور کلی به‌دلیل پیچیدگی در ساختار زمین‌شناسی و گستردگی از نظر سطح، معمولاً آمار و اطلاعات کافی از سیستم آب‌های زیرزمینی وجود ندارد. هزینه‌های گزاف ایجاد شبکه وسیع چاه‌های مشاهده‌ای، اکتشافی و آزمایش پمپاژ باعث شده است که در اکثر سفره‌های آب زیرزمینی ایران در

¹ General-Head Boundary

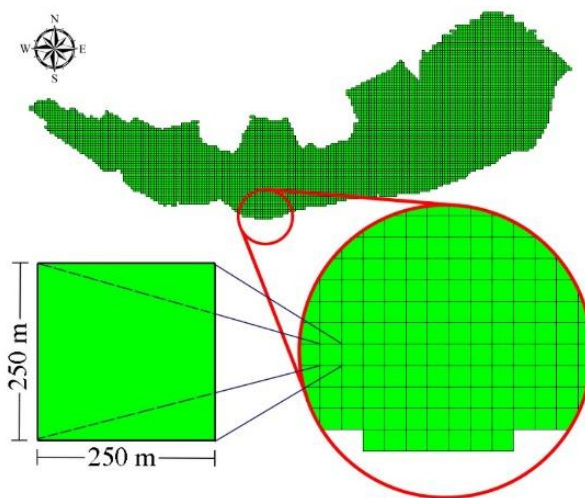
آبخوان می‌باشد که سلول‌های فعال در شکل ۳ آورده شده است.

همچنین برای تراز سطح زمین مدل رقومی ارتفاع (DEM^۲) و برای تراز سنگ کف از اطلاعات سونداژ و همچنین لاگ‌های حفاری منطقه بهره‌گیری شده است. شکل ۴، تراز سطح زمین و همچنین سنگ کف را در مدل توسعه داده شده نمایش می‌دهد در این شکل تغییرات تراز سطح زمین از ۱۲۷۵ متر تا ۱۴۴۳ متر و تغییرات تراز سنگ کف از ۱۱۴۵ متر تا ۱۳۶۳ متر از سطح دریا متغیر می‌باشد.

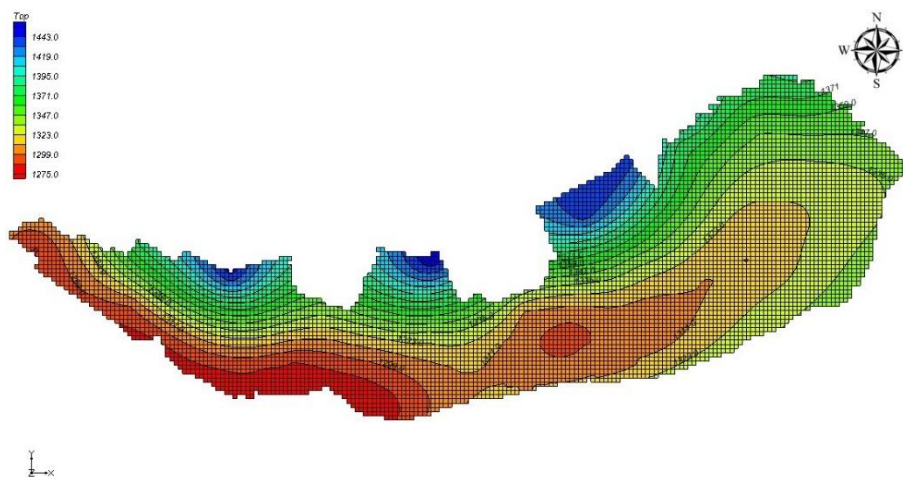
اولین روز شروع شبیه‌سازی به‌دست می‌آید (Anderson and Woessner, 1992).

مدل‌سازی دشت شبستر

به‌منظور مدل‌سازی آبخوان دشت شبستر، از محدوده آبخوان که توسط شرکت آب منطقه‌ای ارائه شده و همچنین توسط لاگ‌های حفاری و سونداژ تدقیق گردیده است استفاده شده که در شبکه ۲۵۰ متر در ۲۵۰ متر گسسته‌سازی شده است. حاصل این امر، ایجاد ۲۱۰۶۰ سلول برای کل

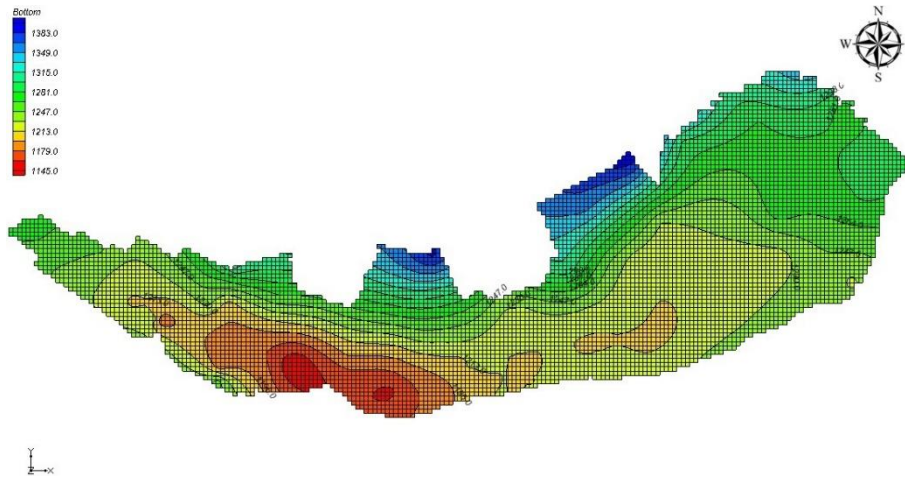


شکل ۳- گسسته‌سازی آبخوان دشت شبستر با سلول‌های ۲۵۰ در ۲۵۰ متری.



الف: تراز سطح زمین

^۲ Digital elevation model



ب: تراز سنگ کف

شکل ۴- تراز سطح زمین و سنگ کف آبخوان واردشده به مدل.

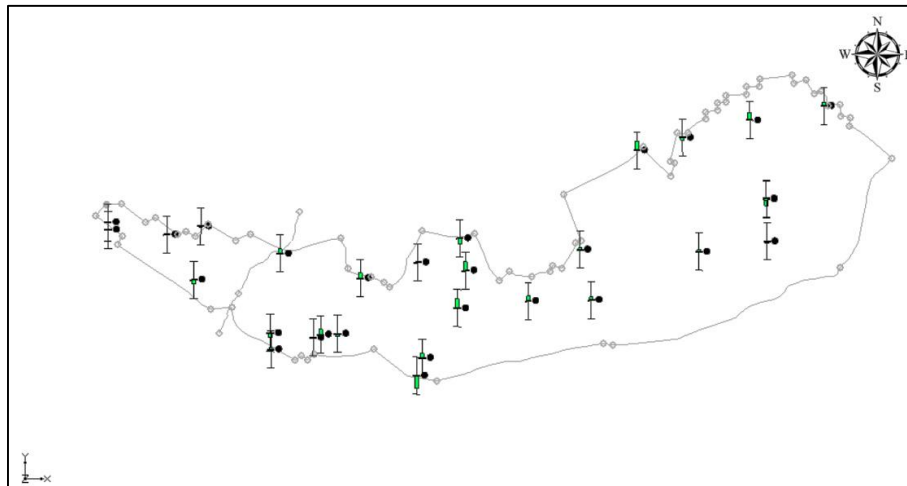
و ضرایب ذخیره اولیه در نقاط مربوط به لاگ حفاری محاسبه شدند که این مقادیر به ترتیب در بازه ۰/۵ الی ۳۰ متر در روز و ۵/۵ الی ۱۶ درصد قرار دارند.

نتایج و بحث

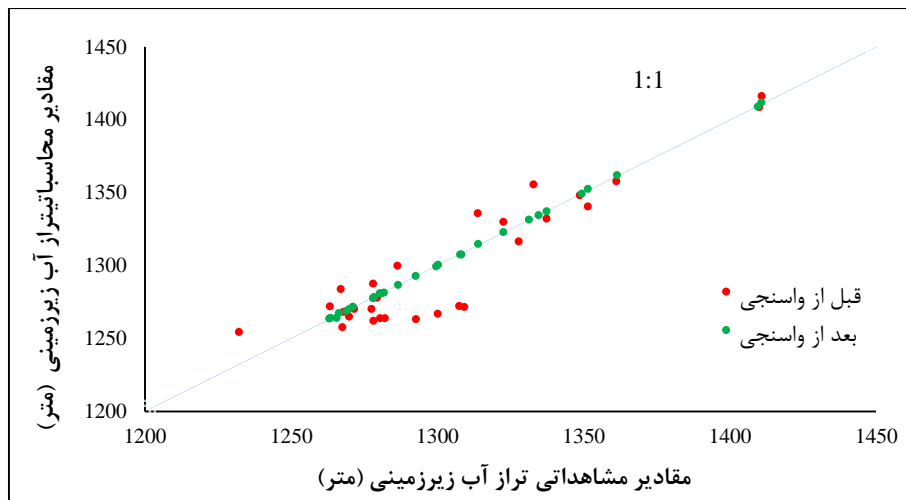
نتایج به دست آمده از مدل سازی در حالت ماندگار و غیرماندگار در ۳۶ گام زمانی ماهانه که شامل ۳ سال آبی می-شود، بیانگر کیفیت مطلوب مدل سازی در هر دو شرایط مذکور می باشد. گام زمانی اول، مربوط به حالت ماندگار مدل سازی بوده که در ادامه و با ورود به حالت غیرماندگار، گام دوم نیز به عنوان شروع شرایط غیرماندگار می باشد. واسنجی مدل به منظور دقت عمل در بخش های مختلف با توجه به نوع سازندهای متفاوت آبخوان و همچنین شرایط متفاوت حاکم بر روی این آبخوان به صورت دستی انجام شده و نهایتاً به منظور آنالیز حساسیت مدل مذکور توسط موتور محاسباتی PEST در گام نهایی واسنجی شده است. همبستگی بالا و همچنین RMSE بسیار پایین به دست آمده از مدل واسنجی شده، بیانگر کیفیت بالای مدل سازی و همچنین قابل اعتماد بودن مدل از لحاظ ارائه پارامترهای هیدروژئولوژیکی آبخوان می باشد. این نتایج در شکل ۵ و ۶ ارائه شده اند که در این شکل واسنجی مطلوب، توسط شمعک های سبزرنگی که نزدیکی تراز آب زیرزمینی محاسباتی را به مشاهداتی بیان می کند، نمایش داده شده است. در نرم افزار GMS این شمعک ها در سه رنگ سبز، زرد و قرمز که به ترتیب بیانگر واسنجی مطلوب، متوسط و بد در مدل سازی می باشد نمایش داده می شوند. مقادیر

تمامی برداشت های موجود بر روی آبخوان، اعم از چاه های مجاز و غیرمجاز، چشمه ها و فنوت موجود که هر مورد، بر روی لایه ای مجزا که از نظر شرب و صنعت و کشاورزی تفکیک شده بودند بر روی مدل اعمال گردید. هدایت هیدرولیکی نیز بر اساس اطلاعات موجود که از بررسی های زمین شناسی و آزمایش های پمپاژ منطقه ارائه شده در مدل مورداستفاده قرار گرفت که برخی از آزمایش های پمپاژ در چاه های موجود در منطقه صورت گرفته و پس از اصلاح در این پژوهش مورداستفاده واقع شدند (خالدی و همکاران، ۱۳۹۷). شایان ذکر است که هرچه پارامترهای اولیه از لحاظ کیفیت اطلاعات درجه مطلوبی داشته باشند، مدل سازی سریع و نتایج به واقعیت نزدیک تر خواهد بود. مرزهای ورودی و خروجی نیز بر اساس اطلاعات پیژومترها در سال بیلان که مدل بر آن اساس ایجاد شده، لحاظ و سایر پارامترهای مورد نیاز از جمله نفوذ از سطح دشت و رودخانه با پکیج های مربوط به مدل معرفی گردید. همچنین مجموعاً تعداد ۲۸ پیژومتر و چاه مشاهده ای در فرآیند مدل سازی مورداستفاده قرار گرفت که مقادیر تراز آب زیرزمینی اولیه وارده به مدل در مهرماه ۱۳۸۹ در بازه ۱۲۷۳ الی ۱۳۹۸ متر متغیر بوده و متوسط آن در تاریخ مذکور ۱۳۰۷ متر برآورد می گردد. با توجه به تراز سطح زمین و کف آبخوان، ضخامت آبخوان دشت شبستر از ۳۰ الی ۳۰۰ متر متغیر می باشد که به طور متوسط این آبخوان دارای ضخامتی در حدود ۹۰ متر است. همان طور که در بخش قبلی به آن اشاره شد با بهره گیری از ۴۱ لاگ حفاری، هدایت هیدرولیکی

مربوط به پارامترهای ارزیابی MR ، R^2 ، MAE ، $RMSE$ و مقادیر مربوط به مدل‌سازی در شرایط ناماندگار به صورت کلی در شرایط ماندگار به ترتیب برابر $0/59$ متر، $0/45$ متر، $0/99$ ، $-0/07$ متر و $0/03$ درصد می‌باشد. همچنین برای $RMSE$ ، MAE و MR به ترتیب برابر $0/95$ ، $0/65$ و $-0/04$ متر حاصل گردید.



شکل ۵- شمعک‌های واسنجی شده تراز آب زیرزمینی.



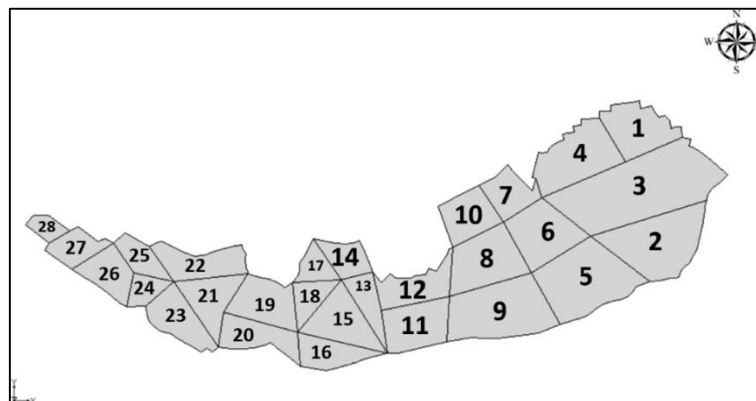
شکل ۶- همبستگی مقادیر مشاهداتی و محاسباتی تراز آب زیرزمینی.

که قبلاً اشاره شد، از مهم‌ترین پارامترهای ورودی به مدل، هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره آبخوان می‌باشد که طبق منطقه‌بندی شکل ۷ به مدل وارد شده و مقادیر ابتدایی محاسبه شده در روند واسنجی تدقیق شده‌اند. هدایت هیدرولیکی به دست آمده برای هر منطقه و مقادیر ضریب ذخیره برای مناطق مختلف در جدول ۲ آورده شده است.

همچنین پارامترهای بیلان استخراج شده از مدل به تفکیک در جدول ۱ آورده شده است که بیشترین حجم خروجی مربوط به برداشت از آب‌های زیرزمینی توسط چاه‌های بهره‌برداری و بیشترین حجم ورودی از طریق جریان آب زیرزمینی برآورد شده است. با اعتماد بر مدل توسعه داده شده بر اساس نتایج مطلوب می‌توان اذعان داشت که ورودی‌های مدل پس از واسنجی، دارای دقت بالایی بوده و نزدیک به واقعیت می‌باشند. همان‌طور

جدول ۱- گزارش بیلان خروجی از مدل در حالت ماندگار و غیرماندگار تجمعی.

نوع	عنوان	ماندگار (مترمکعب در روز)	غیرماندگار (تجمعی سالانه) (مترمکعب)
ورودی	چاه‌ها	۰	۰
	تغذیه رودخانه	۱۱۴۱۹/۷۹	۴۱۱۱۱۲۴/۴۰
	جریان آب زیرزمینی	۲۰۴۶۵۱/۶۰	۷۸۴۱۲۰۱۷/۰۰
	بارندگی	۱۴۷۸۰/۵۵	۷۳۱۰۱۴۴/۱۰
	ذخیره آبخوان	-	۵۳۸۲۵۸۳۳/۵۰
	مجموع کل تغذیه	۲۳۰۸۵۱/۹۴	۱۴۳۶۵۹۱۱۹
خروجی	چاه‌ها	۱۱۹۹۲۸/۸۰	۵۶۴۴۰۶۹۵/۶۰
	زهکشی رودخانه	۵۳۶۱/۰۲	۱۹۲۹۹۶۸/۶۴
	جریان آب زیرزمینی	۱۰۵۶۱۹/۹۰	۵۰۹۸۰۶۶۲/۰۰
	تبخیر	۰/۰۰	۰/۰۰
	ذخیره آبخوان	-	۳۴۳۳۸۱۷۵۵/۴۰
	مجموع کل تخلیه	۲۳۰۹۰۹/۷۰	۱۴۳۶۹۰۰۷۹/۰۰
	تفاضل تغذیه از تخلیه	-۵۷/۷۶	-۳۰۹۶۰
	درصد اختلاف	-۰/۰۲	-۰/۰۲



شکل ۷- منطقه‌بندی به‌کاررفته در مدل برای هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره آبخوان.

جدول ۲- هدایت هیدرولیکی مناطق مختلف در آبخوان شبستر.

شماره محدوده	Sy (%)	K (m/day)	شماره محدوده	Sy (%)	K (m/day)
۱	۵/۵	۲/۵	۱۵	۱۴/۸	۰/۴
۲	۵/۵	۱/۲	۱۶	۱۰	۵/۰
۳	۱۲	۱۴/۱	۱۷	۷	۲/۰
۴	۷	۲	۱۸	۱۲	۱/۱
۵	۱۵	۰/۸	۱۹	۵/۵	۱/۵
۶	۱۶	۱/۸	۲۰	۷	۰/۹
۷	۸	۲۸	۲۱	۱۱	۵/۳
۸	۱۲	۱۶	۲۲	۱۵	۴/۱
۹	۱۱	۵/۸	۲۳	۱۰	۲/۴
۱۰	۱۰	۳/۸	۲۴	۱۲	۱/۷
۱۱	۸	۱۱	۲۵	۱۴/۸	۲/۸
۱۲	۱۰/۷	۱/۰	۲۶	۱۱	۳/۹
۱۳	۱۰	۰/۴	۲۷	۱۰/۷	۵/۵
۱۴	۵	۴/۰	۲۸	۱۳/۸	۴/۲

و هدایت هیدرولیکی دارند، از مقادیر مختلف به دست آمده از این پژوهش که در جداول مربوط بخش پیشین ارائه شده، استفاده نمود. هر چه آبخوان ناهمگون تر باشد، ضرایب هیدرودینامیکی نیز به طبع آن تنوع خواهد داشت و این تنوع به علت وجود سازندهای زمین‌شناسی، تراکم و تخلخل سازندها و غیره از روند خاصی پیروی ننموده و حتی ممکن است که در دو نقطه نزدیک به هم، شاهد تفاوت‌های چشمگیری در این ضرایب باشیم؛ بنابراین به منظور تحلیل و بررسی آبخوان‌ها و برنامه‌ریزی بر روی ذخایر و همچنین مدیریت آن‌ها بایستی از ضرایب هیدرودینامیکی مورد اعتماد و دقیقی استفاده نمود که به علت هزینه‌بر بودن روش‌های اندازه‌گیری صحرائی و همین‌طور مدل‌های فیزیکی، پیشنهاد می‌شود با بهره‌گیری از مدل‌های عددی و دقت ثابت شده آن‌ها در بخش شبیه‌سازی آبخوان‌ها، اقدام به محاسبه و یا تدقیق اطلاعات هیدرودینامیکی این رسوبات آبرفتی و منابع آبی ارزشمند نمود.

منابع

- آبایی، ع.، قاهری، ع. و سعیدی، م.، ۱۳۹۰. تهیه الگوریتم بهره‌برداري بهینه از آبخوان به منظور تعدیل غلظت آلاینده‌ها. فصلنامه آب و فاضلاب، ۲۲(۴): ۱۳۲-۱۳۸.
- آبدار اصفهانی، س.، کلانتری، ن.، ۱۳۹۲. بررسی هیدروژئولوژیکی سفره آب زیرزمینی دشت قم. سی و دومین گردهمایی و نخستین کنگره بین‌المللی تخصصی علوم زمین. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور. ۲۷ بهمن ۱۳۹۲، تهران.
- بانژاد، ح.، محب زاده، ح.، قبادی، م.، حیدری، م.، ۱۳۹۲. شبیه‌سازی عددی جریان و انتقال آلودگی در آب‌های زیرزمینی مطالعه موردی: آبخوان دشت نهاوند. دانش آب‌و‌خاک، ۲۳(۲): ۴۳-۵۷.
- چیت‌سازان، م.، کشکولی، ح.ع.، ۱۳۸۱. مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی و حل مسائل هیدروژئولوژی. انتشارات دانشگاه چمران اهواز.
- خالدی علمداری، م.، مجنونی هریس، ا.، فاخری فرد، ا.، ۱۳۹۷. تعیین هدایت هیدرولیکی بر اساس قابلیت انتقال

در مطالعه حاضر، ضرایب هیدرودینامیکی با استفاده از مدل‌سازی بر پایه اطلاعات مستخرج از آزمون پمپاژ و اصلاح آن‌ها به دست آمد. همچنین با توجه به اینکه لاگ حفاری، مقادیر هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره را بر اساس ساختار و جنس تشکیلات منطقه حفاری شده با دقت بالایی ارائه می‌دهد؛ لذا مقایسه نتایج به دست آمده از مدل‌سازی با نتایج مستخرج از لاگ حفاری حاکی از دقت بالای مدل‌سازی می‌باشد. به دست آوردن ضرایب ذخیره از طریق بیلان جزء به جزء هر چند می‌تواند مقداری نسبتاً قابل قبول برای کل آبخوان ارائه دهد، ولی این مقدار قابل تفکیک برای مناطق ناهمگن مختلف نبوده و صرفاً یک عدد برای کل آبخوان می‌باشد. مزیت قابل توجه مدل‌سازی در تخمین پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان، ارائه این ضرایب به صورت منطقه‌ای بوده و مشکلات درون‌یابی را به حداقل خواهد رساند. قشقایی نژاد و همکاران (۱۳۹۵) نیز بر اساس مطالعات ژئوفیزیک نسبت به تعیین منطقه‌ای ضریب ذخیره با تغییرات مکانی آن اقدام نموده‌اند که نتایج به دست آمده همخوانی بالایی با سازندهای منطقه داشته و نتایج به دست آمده این تحقیق را تأیید می‌نماید. در رابطه با هدایت هیدرولیکی به دست آمده از مدل‌سازی، می‌توان اذعان داشت که مدل با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر در هدایت هیدرولیکی، در صورت واسنجی مناسب، مقادیر مورد اعتمادی را ارائه خواهد نمود. در پژوهشی که بانژاد و همکاران (۱۳۹۲) در رابطه با مدل‌سازی دشت نهاوند به عمل آوردند، با توجه به مناطقی که این آبخوان با دشت شبستر از لحاظ زمین‌شناسی مشابهت‌هایی داشته، مقادیر به دست آمده پس از واسنجی بسیار نزدیک به پژوهش حاضر می‌باشد. نتایج به دست آمده از مدل‌سازی آبخوان شبستر، می‌تواند در بررسی‌های آتی از لحاظ بررسی و اعمال سناریوهای مدیریتی بر روی این آبخوان مورد استفاده قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

ضرایب ذخیره و هدایت هیدرولیکی به دست آمده از واسنجی مدل، بیانگر متفاوت بودن این مقادیر در مناطق مختلف آبخوان بوده و نمی‌توان یک عدد کلی برای هر یک از این پارامترها برای این‌چنین آبخوان نسبتاً ناهمگونی اعلام نمود؛ بنابراین بهتر است در محاسباتی که نیاز به ضریب ذخیره

- وزارت نیرو، ۱۳۹۳. گزارش بیلان منابع آب محدوده مطالعاتی شبستر-صوفیان. مهندسين مشاور آب و توسعه پایدار، وزارت نیرو.
- Ahlfeld, D.P., Barlow, P.M. and Mulligan, A.E., 2005. GWM-A ground-water management process for the U.S. Geological Survey modular ground-water model (MODFLOW-2000). U.S. Geological Survey Open-File Report, 2005-1072. 124 p.
- Anderson, M., and Woessner, W., 1992. Applied groundwater modeling flow and adjective transport. Academic Press, San Diego, 381 p.
- Dewandel, B., Jeanpert, J., Ladouche, B., Join, J.L. and Marechal, J.C., 2017. Inferring the heterogeneity, transmissivity and hydraulic conductivity of crystalline aquifers from a detailed water-table map. Journal of Hydrology. 550: 118-129.
- George, N.J., Atat, J.G., Umoren, E.B. and Etebong, I., 2017. Geophysical exploration to estimate the surface conductivity of residual argillaceous bands in the groundwater repositories of coastal sediments of EOLGA. Nigeria. NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics.
- Lubezyski, M.W., 2006. Sustainability of groundwater resources and its indicators. IAHS, 1:1-67.
- Sinton, P., Flynn, J., Dixon, R., Bonton, D., Smith, L. and Moreno, J., 2011. Modflow and more 2011-Integrated Hydrologic Modeling. International Groundwater Modeling Center (IGWMC). 4-7 Jun 2011, Golden, United States.
- Tetreault, M., and Hulley, M., 2011. Modflow and more 2011-Integrated Hydrologic Modeling. International Groundwater Modeling Center (IGWMC). 4-7 Jun 2011, Golden, United States.
- Todd, D.K. and Mays, L.W., 2005. Groundwater Hydrology. John Willey & Sons (Ed), 3:413-448
- Wang, S., Shao, J., Song, X., Zhang, Y., Huo, Z. and Zhou, X., 2008. Application of MODFLOW and geographical information system to groundwater flow Simulation in North Plain, China". Environmental geology, 55:1449-1462.
- Wang, W., Wang, Y., Sun, Q., Zhang, M., Qiang, M.L., 2018. Spatial variation of saturated hydraulic conductivity of a loess slope in the South Jingyang Plateau, China. Engineering Geology, 236: 70-78.
- تصحیح شده و تأثیر تراکم چاه‌ها و مازاد برداشت آب بر آبخوان دشت شبستر. هیدروژئولوژی. ۳(۲):۱۹-۳۲.
- دهقانی، ر.، پورحقی، ا.، ترابی، ح.، ۱۳۹۵. پیش‌بینی سطح نوسانات آب‌های زیرزمینی با شبکه‌های بیزین (مطالعه موردی). فضای جغرافیایی. ۱۶(۵۶):۱۸۵-۲۰۰.
- رضایی بنفشه، م.، جلالی عنصرودی، ط.، حسن‌پور اقدم بگلو، م.، ۱۳۹۶. تحلیل و مدل‌سازی تغییرات سطح آب زیرزمینی حوضه آبریز تسوج با استفاده از فرآیند اتورگرسیو میانگین متحرک. فضای جغرافیایی، ۱۷(۵۷):۲۷۳-۲۸۷.
- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی، ۱۳۹۲. دستورالعمل تعیین محل و نظارت بر حفر چاه‌های آب در آبرفت و سازندهای سخت، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی، نشریه شماره ۵۵۷.
- صفوی، ح.ر.، ۱۳۹۰. هیدروژئولوژی مهندسی. چاپ سوم. انتشارات ارکان دانش.
- عابدی، ج.، گلابچیان، م.، ۱۳۹۴. برآورد ضرایب هیدرودینامیک منابع آب زیرزمینی حوضه آبخیز کوهپایه سگری با استفاده از مدل MODFLOW. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، شماره ۷۲، ۲۸۱-۲۹۲.
- قشقایی نژاد، س.، چیت‌سازان، م. و میرزایی، س.ی.، ۱۳۹۵. تخمین پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان با استفاده از مطالعات ژئوالکتریکی (مطالعه موردی: آبخوان گلگیر، خوزستان). هیدروژئولوژی، ۱(۲):۲۴-۳۷.
- مرادی، ک.، اسپهبد، م.ر.، ۱۳۹۰. بررسی هیدروژئولوژیکی دشت جایدرد به منظور تعیین خصوصیات هیدرودینامیکی سفره آب. سی و مین گردهمایی علوم زمین. دانشگاه آزاد واحد تهران شمال. ۱۴۶-۱۵۸.
- نخعی، م.، حسن‌نیا، ا.، ۱۳۹۸. تخمین پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان دشت اوان در نقاط نامشخص با استفاده از منطق فازی. هیدروژئولوژی، ۴(۱):۱-۱۳.