

آنالیز وضعیت بیلان منابع آب زیرزمینی به منظور بررسی تنش وارد شده بر آبخوان در مناطق خشک

سید حسن علوی نیا*، استادیار علوم و مهندسی آبخیزداری-دانشگاه کاشان

سید جواد ساداتی نژاد، دانشیار هیدرولیک و مهندسی هیدرولوژی-دانشگاه تهران

آرش ملکیان، دانشیار علوم و مهندسی آبخیزداری-دانشگاه تهران

هدی قاسمیه، دانشیار علوم و مهندسی آبخیزداری-دانشگاه کاشان

چکیده

با توجه به خشک‌سالی‌های اخیر و کاهش ریزش‌های جوی، برداشت‌های بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و فشار بر آبخوان‌ها افزایش یافته است. در این مطالعه به بررسی وضعیت تغذیه و تخلیه‌ی آبخوان اصفهان-برخوار پرداخته شده است. این امر به مدیریت بلندمدت آبخوان می‌انجامد و موجب تصمیم‌گیری مناسب توسط برنامه‌ریزان می‌شود. با بررسی‌های صورت گرفته و با رسم آبنمود آبخوان موردنظر مشخص گردید که سطح تراز ایستابی در طول دوره‌ی آماری منتخب به‌طور دائم سیر نزولی دارد و به ازای هر سال، معادل ۰/۴۶ متر سطح آب سفره کاهش یافته که بیان‌کننده‌ی این واقعیت است که آبخوان در شرایط بحرانی به سر می‌برد. در این مطالعه با استفاده از مدل سه‌بعدی آب زیرزمینی تفاضل محدود MODFLOW در حالت پایدار، میزان تغذیه توسط سه عامل نشت از رودخانه، نفوذ از بارندگی و تغذیه توسط پساب آبیاری کشاورزی تعیین گردید و ضریب همبستگی بالای ۹۷ درصد نشان‌دهنده‌ی دقت بالای شبیه‌سازی بود. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، مشخص شد که از کل میزان تغذیه توسط بارش و پساب کشاورزی، بیش‌ترین سهم مربوط به پساب آبیاری کشاورزی بوده است (حدود ۳۲ درصد کل آب آبیاری) که این امر به دلیل نوع آبیاری در منطقه (آبیاری از نوع کرتی) بوده و پس‌از آن، نفوذ از طریق بارش صورت می‌گیرد (حدود ۱۰ درصد کل حجم بارندگی دشت) که سهم کم‌نفوذ از این بخش به دلیل نرخ بالای تبخیر در سطح منطقه است. بدین ترتیب، می‌توان نتیجه گرفت که مهم‌ترین منبع تغذیه‌ی آبخوان، پساب ناشی از آبیاری کشاورزی است که لازم است در مطالعات مدل‌سازی هیدروژئولوژیکی منطقه به‌طور دقیق با توجه به نوع محصول، نوع آبیاری، ویژگی‌های خاک و شرایط آب و هوایی محدوده‌ی مطالعاتی محاسبه گردد. در محدوده‌ی مطالعاتی اصفهان-برخوار با توجه به کاهش مداوم سطح تراز آب زیرزمینی که در آبنمود آبخوان به‌وضوح مشهود است و نیز بیلان منفی منابع آب زیرزمینی، امکان توسعه‌ی بهره‌برداری از آبخوان وجود ندارد.

واژگان کلیدی: آب زیرزمینی، مدل‌سازی، مدل MODFLOW، آبخوان اصفهان-برخوار.

۱- مقدمه

خشک‌سالی و کمبود آب، یکی از اساسی‌ترین مشکلات سال‌های اخیر در بسیاری از نقاط جهان است. توسعه‌ی منابع آب و استفاده روزافزون از آن‌ها، اثرات بسیار زیادی بر سیستم‌های هیدرولوژیکی در مقیاس منطقه‌ای دارد. آب‌های زیرزمینی، یکی از مهم‌ترین منابع آب طبیعی در سرتاسر جهان است که برای اهداف شرب، کشاورزی و صنعت استفاده می‌گردد. سیستم‌ها و وقایع جهان را می‌توان در مدل‌های مفهومی به‌عنوان نسخه‌ای ساده‌شده از واقعیت نشان داد (Anderson and Woessner, 2015: 34). مدل‌های مفهومی توسط فرآیندهای فیزیکی اصلی که در شکل‌گیری شرایط مرزی سیستم‌های آب زیرزمینی مؤثر هستند، کالیبره می‌شوند. باین‌حال، سیستم‌های آبخوان بسیار پیچیده هستند و این امر منجر به تفسیرها و آنالیزهای متعدد می‌گردد (Poeter and Anderson, 2005: 599). عدم قطعیت در مدل‌های مرتبط با آب زیرزمینی می‌تواند دلایل زیادی داشته باشد (Hill and Tiedeman, 2007: 86) که شامل بی‌دقتی در اندازه‌گیری مقادیر پارامترها، شرایط مرزی، نبود داده‌های کافی، انتخاب نامناسب مدل موردنظر، تنش‌های هیدرولوژیکی و عدم قطعیت در پیش‌بینی‌های اقلیمی می‌باشند. نتایج تحقیقات سال‌های اخیر نشان می‌دهد که بزرگ‌ترین پیش‌بینی‌های عدم قطعیت مربوط به سیستم‌های آبخوان است (Bredehoeft, 2005: 41; Hojberg and Refsgaard, 2005: 179; Rojas et al. 2010: 432).

آب زیرزمینی؛ به میزان آبی که در مناطق اشباع وجود دارد، گفته می‌شود (Berhanu et al. 2014: 101; Fitts, 2002: 56). پایداری منابع آب زیرزمینی، یکی از اساسی‌ترین مسائل حال حاضر جهان است (Alley et al. 2002: 22; Gleeson et al. 2012: 3; Hiscock et al. 2002: 3; 1987). که در مقابل افزایش تقاضای آب برای مصارف صنعت، کشاورزی و خانگی جمعیت روبه‌رشد جهان که طبق پیش‌بینی سازمان ملل تا سال ۲۰۵۰ به ۹/۵ میلیارد نفر می‌رسد (United Nation, 2012) باید در نظر گرفته شود؛ این در حالی است که روزانه گزارش‌های تأسف‌باری از کاهش سطح آبخوان‌ها، کاهش کیفیت منابع آب زیرزمینی، ترک خوردن زمین و نشست زمین^۱، به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک ارائه می‌گردد. به‌منظور ارائه‌ی تعریفی مناسب از برداشت مناسب و پایدار منابع آب زیرزمینی، درکی مناسب از رفتار منابع آب زیرزمینی و میزان تخلیه و تغذیه‌ی آن‌ها نیازمند است (Carrera-Hernandez and Gaskin, 2006: 804; Ben Mammou and Chenini, 2010: 341). آن‌گونه که قبلاً ذکر شد، با توجه به اینکه سیستم‌های آب زیرزمینی به دلیل تغییرات مکانی زمین‌شناسی و فرآیندهای متفاوت جریان، پیچیده می‌باشند، برای ساده‌سازی این سیستم‌ها نیازمند مدل‌های آب زیرزمینی است. این ساده‌سازی باید به‌گونه‌ای باشد که از یک‌سو تمام فاکتورهای مرتبط با سیستم‌های واقعی در مدل مفهومی گنجانده شوند و از سوی دیگر پارامترهایی که ارتباطی با دنیای واقعی ندارند، حذف گردند. به‌طورمعمول، داده‌های کافی برای بررسی دقیق سیستم‌های آب زیرزمینی موجود نیست و این امر باعث پیچیدگی در انتخاب یک مدل مفهومی برای بررسی آبخوان می‌گردد (Bredehoeft, 2005: 39)؛ بنابراین مدل‌های مفهومی جایگزین را می‌توان بر اساس مجموعه‌ای متفاوت از پارامترهای ساده‌شده توسعه داد (Hojberg and Refsgaard, 2005: 179; Poeter and Anderson, 2005: 598) و این پارامترها را با انتخاب دقیق و مناسب مدل‌ها برای ارزیابی منابع آب زیرزمینی بررسی کرد (Poeter and Anderson, 2005: 598).

در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی توسط مدل‌هایی از قبیل Visual MODFLOW، SEAWAT، GMS، WinFlow، PEST، GSFlow و غیره بر روی سیستم‌های آب زیرزمینی صورت گرفته است. یکی از مدل‌های عددی جریان آب زیرزمینی که به‌طور بسیار گسترده‌ای استفاده می‌گردد، مدل سه‌بعدی تفاضل محدود است که Visual MODFLOW نامیده می‌شود. Visual MODFLOW به‌طور گسترده‌ای برای پیش‌بینی جریان آب زیرزمینی و نوسانات سطح ایستابی و شبیه‌سازی سیستم‌های آب زیرزمینی استفاده می‌گردد. به دلیل قابلیت‌های مناسب

MODFLOW از آن برای شبیه‌سازی مسائل متنوع مرتبط با آب زیرزمینی در مناطق مختلف جغرافیایی، مانند مناطق خشک و نیمه‌خشک و گرمسیری به‌طور وسیعی استفاده می‌گردد و به‌این‌علت، مدلی شناخته‌شده در زمینه آب‌های زیرزمینی است (Al. Hassoun and Mohammad, 2011:1987). MODFLOW این قابلیت را دارد که تنش‌های مرتبط با جریان‌های زیرزمینی از قبیل تخلیه، مناطق تغذیه، تبخیر و تعرق، زهکش و رودخانه و موارد مرتبط دیگر را شبیه‌سازی کند (Harbaugh, 2005: 17; Harbaugh et al. 2000: 141). بر این اساس، بسته‌های مدل ریاضی مذکور می‌تواند شامل سه دسته لایه‌های نقطه‌ای (برای مثال چاه‌ها)، خطی (شامل بسته‌ی رودخانه، مرز آبخوان و خط تراز سطح آبخوان) و منطقه‌ای (برای مثال منطقه‌ی بارش، تبخیر مستقیم و تعرق از گیاه) باشند.

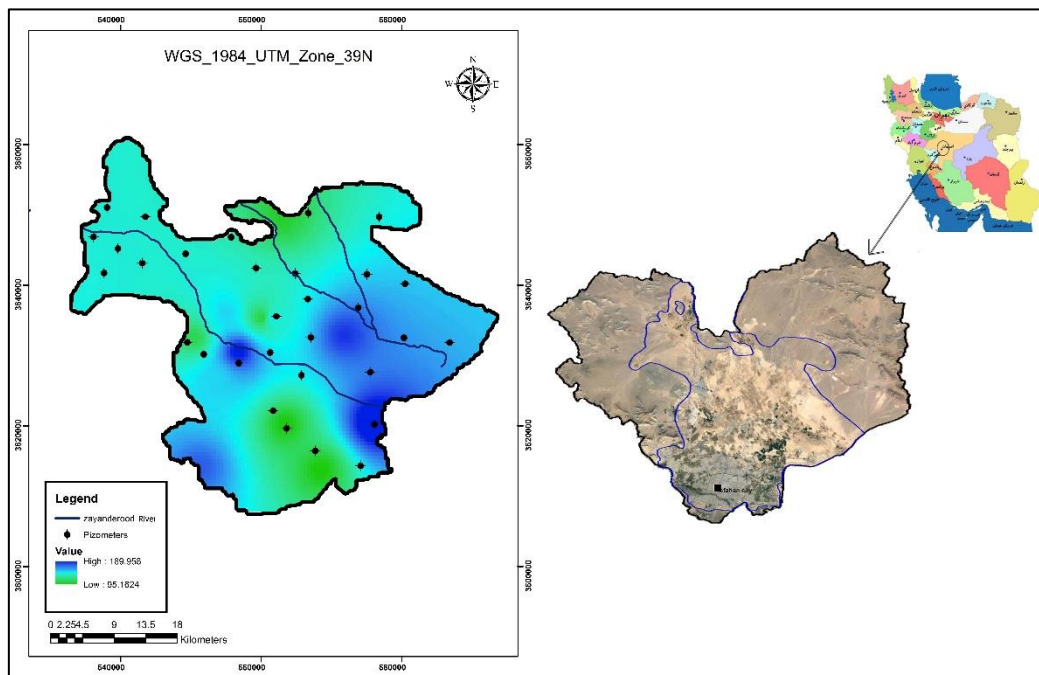
به‌طور کلی، وجود آب در سیستم‌های آب زیرزمینی آبخوان تحت تأثیر چندین فاکتور زیست محیطی-ژئولوژیکی^۲ واقع می‌گردد. این فاکتورها شامل توپوگرافی، ساختار زمین‌شناسی، وجود درز و شکاف و ارتباط و پیوستگی آن‌ها با یکدیگر، تخلخل ثانویه، ارتفاع و نحوه‌ی توزیع سطح آب زیرزمینی، شیب زمین، الگوی زهکشی، شکل زمین، شرایط آب و هوایی و کاربری اراضی می‌باشند (Mukherjee, 1996: 56).

در مطالعه‌ای که توسط اروچی و ایلدرامی (۱۳۹۴) برای بررسی کیفیت آب زیرزمینی دشت اصفهان-برخوار صورت گرفت، مشخص شد که عوامل زمین‌شناسی، مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار در شرایط منطقه بوده است و رسوبات قدیمی که در نواحی شمال شرقی آبخوان قرار داشتند، با فرونشست کانی‌های تبخیری و نمک‌ها و انتقال آن‌ها به سفره‌ی آب زیرزمینی باعث شوری آب زیرزمینی شده‌اند. همچنین با افت سطح تراز آبخوان، جبهه‌ی آب شور به‌طرف آب شیرین پیشروی کرده و محیط زیست منطقه را دچار مشکل نموده است. در این منطقه پس از کشاورزی، فعالیت‌های انسانی به‌عنوان عامل دوم کاهش کیفیت آب زیرزمینی مطرح است. همچنین در پژوهش دیگری که توسط اصغری و همکاران (۱۳۸۴) در آبخوان برخوار انجام گرفت، مشخص شد که تراز سفره‌ی آب زیرزمینی بین سال‌های ۹۰-۱۳۸۰ دارای افتی معادل ۴۸ متر است. در این مطالعه با اعمال سناریوی کاهش ۳۰ درصدی دبی تخلیه‌ی چاه‌ها مشخص گردید که افت سطح آب ۲۶ درصد کم‌تر افت می‌نماید. در مطالعه‌ی دیگری تغییرات زمانی و مکانی سطح آب زیرزمینی و ارتباط آن با تغییرپذیری بارندگی سالانه در سه دشت اصفهان-برخوار، نجف‌آباد و چادگان در دوره‌ی آماری ۲۵ ساله بین سال‌های ۱۹۹۰-۲۰۱۵ بررسی گردید. نتایج حاصل‌شده حاکی از افت سطح آب زیرزمینی در همه‌ی دشت‌هاست؛ به‌طوری‌که متوسط کاهش سطح ایستابی در دشت‌های اصفهان-برخوار، نجف‌آباد و چادگان به ترتیب معادل ۰/۴۶۸، ۱/۱۲ و ۰/۶۳۸ متر در سال بوده است. با توجه به اینکه در منطقه‌ی اصفهان-برخوار طی سال‌های گذشته، آب رودخانه‌ی زاینده‌رود در مواقعی کاهش یا به‌طور کامل از منابع مصرفی حذف و فشار روزافزونی بر منابع آب زیرزمینی وارد شده است، در این مطالعه سعی بر آن است که به بررسی وضعیت آبخوان اصفهان-برخوار پرداخته شود و از مدل سه‌بعدی تفاضل محدود برای شبیه‌سازی آبخوان و برآورد بیلان سفره‌ی آبخوان استفاده شود تا اثرات نامطلوب استفاده‌ی بی‌رویه از آبخوان و فشار بیش‌ازحد به منابع آب زیرزمینی مشخص گردد.

۲- منطقه‌ی مورد مطالعه

استان اصفهان جزء حوضه‌ی اصلی آبریز فلات مرکزی و بخشی از حوضه تلیقی گاوخونی است. در استان اصفهان ۸ دشت ممنوعه و بحرانی به لحاظ منابع آبی زیرزمینی وجود دارد که آبخوان این دشت‌ها به‌شدت تحت تأثیر تنش آبی قرار دارند و در برخی موارد باعث فرونشست زمین شده است (صالحی و همکاران، ۱۳۹۲: ۴۸). یکی از مهم‌ترین این دشت‌ها دشت ممنوعه و بحرانی اصفهان-برخوار است که مرکز کلان‌شهر اصفهان در جنوب این آبخوان واقع شده است و بین عرض جغرافیایی "۲۸' ۳۴" تا "۰۴' ۱۷" ۳۳° و طول جغرافیایی "۱۲' ۰۶" ۵۱° تا "۲۳' ۰۶" ۵۲° قرار دارد (شکل ۱). مساحت دشت مورد مطالعه ۳۷۷۵/۶ کیلومتر مربع و مساحت آبخوان آن ۱۶۰۶ کیلومتر مربع است که ۴۲/۵

درصد کل دشت را شامل می‌شود. بلندترین نقطه‌ی این محدوده‌ی مطالعاتی، ۲۶۵۲ متر و کم‌ترین آن ۱۵۳۳ متر از سطح دریاست که به ترتیب در ارتفاعات شمالی و جنوب خاوری دشت قرار دارند. در ارتفاعات محدوده‌ی مطالعاتی سازندهایی که امکان ذخیره‌ی آب در آن‌ها ایجاد شده شامل سازندهای کربناته و برخی سازندهای غیرکربناته (با حجم ذخیره کم) وجود دارد. میزان دمای متوسط سالانه‌ی ارتفاعات و دشت این محدوده‌ی مطالعاتی به ترتیب ۱۳/۷ و ۱۵/۰ درجه‌ی سانتی‌گراد ارزیابی شده است. همچنین میزان بارش سالانه‌ی ارتفاعات و دشت محدوده‌ی مطالعاتی اصفهان-برخوار به ترتیب ۱۵۹ و ۱۳۴ میلی‌متر است. علاوه بر این، میزان تبخیر سالانه ارتفاعات و دشت به ترتیب ۲۲۷۱ و ۲۴۶۱ میلی‌متر ارزیابی گردید (مهندسی مشاور آب و توسعه‌ی پایدار، ۱۳۸۹: ۱۷).



شکل ۱: موقعیت دشت و آبخوان و چاه‌های پیزومتری اصفهان-برخوار و نقشه‌ی هدایت هیدرولیکی

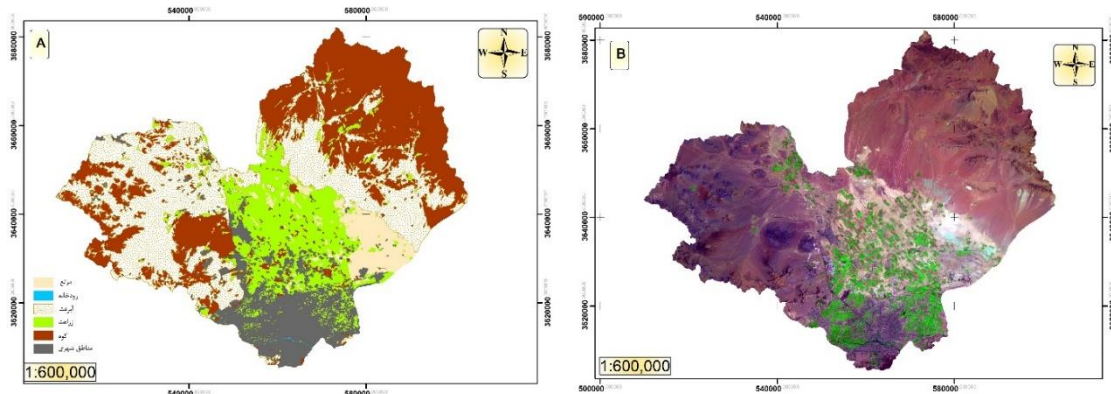
وضعیت پوشش گیاهی دشت اصفهان-برخوار شامل ۶/۳۲ کیلومترمربع مرتع متوسط (۰/۲ درصد)، ۱۶۶۲/۷۰ کیلومترمربع مرتع فقیر (۴۹/۱ درصد)، ۶۷۵/۱۰ کیلومترمربع کشاورزی آبی (۱۹/۴ درصد)، ۲/۸۶ کیلومترمربع (۰/۱ درصد) باغات و اراضی فاقد پوشش گیاهی شامل ۸۱۴/۲۰ کیلومترمربع (۲۴/۱ درصد) رخنمون‌های سنگی و پرشیب، ۲۴۱/۷۰ (۷/۱ درصد) کفه‌ها و شوره‌زارها می‌باشند. از نظر زمین‌شناسی تمام سطح آبخوان و بخش‌های وسیعی از دشت از رسوبات آبرفتی کواترنری پوشیده شده است (مهندسی مشاور آب و توسعه‌ی پایدار، ۱۳۸۹: ۱۳۷)، (شکل ۲).

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- داده‌های مورد استفاده

در دشت مورد مطالعه از نتایج آزمایش پمپاژ، تعداد ده چاه اکتشافی و نیز دو چاه بهره‌برداری استفاده گردید که حداکثر عمق این چاه‌ها ۱۹۰ متر است. حداکثر و حداقل ضریب قابلیت انتقال به ترتیب ۲۲۰۰ و ۱۲۰ مترمربع در روز است. نتایج مربوط به چاه‌های اکتشافی نیز نشان‌دهنده‌ی حداکثر آبدهی مجاز ۱۱۸ لیتر در ثانیه و میزان افت ۱۴ متر است. علاوه بر این، ۳۱ حلقه چاه پیزومتری موجود بوده که عمق ۸ حلقه از این چاه‌ها به سنگ کف رسیده است.

تراز آب زیرزمینی توسط این چاه‌ها برای دوره‌ی آماری ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۱ به دست آمد. همچنین از داده‌های بارش ایستگاه‌های هواشناسی در این محدوده‌ی مطالعاتی استفاده شد و بارندگی منطقه در این محدوده‌ی زمانی به دست آمد. به علاوه، از نقشه‌های توپوگرافی، مدل رقمی ارتفاع^۳، زمین‌شناسی و تصاویر ماهواره‌ای (شکل ۲) منطقه استفاده گردید. برای تهیه‌ی شکل (۲) با توجه به اینکه ممکن است در تصاویر، انحراف‌هایی شامل جابه‌جایی پستی و بلندی‌ها، انحنای زمین و... باشد، از تصحیح هندسی با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ و نیز روش نقاط کنترل زمینی استفاده گردید.



شکل ۲: نقشه‌ی کاربری اراضی (A) و تصویر ماهواره‌ای منطقه‌ی مورد مطالعه (B)

۳-۲- روش کار با مدل ریاضی سه‌بعدی

در این مطالعه از مدل ریاضی تفاضل محدود سه‌بعدی (MODFLOW) استفاده گردید. مزایای استفاده از مدل MODFLOW شامل امکانات مدل برای آماده‌سازی داده‌ها، تبادل آسان داده‌ها با گروه‌های نرم‌افزاری GIS مینا، کاربرد وسیع این مدل در سطح جهانی، توسعه‌ی روزافزون و در دسترس قرار گرفتن کدهای منبع (source code) است. این مدل، قابلیت شبیه‌سازی آب زیرزمینی و تعاملات آب سطحی و همچنین محاسبه‌ی تغییرات شیمیایی آب‌های زیرزمینی را دارد و در حال حاضر تمام ابزارهای لازم برای انجام امور مرتبط با کمیت و کیفیت آب‌های زیرزمینی و حفاظت از آن‌ها را دارا است (Qingchun Yang a et al. 2011: 640). MODFLOW یک مدل کامپیوتری است که معادله‌ی جریان آب زیرزمینی سه‌بعدی را به‌طور عددی برای یک محیط متخلخل با استفاده از روش تفاضل محدود مطابق زیر حل می‌کند (McDonald and Harbaugh, 1988: 78):

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

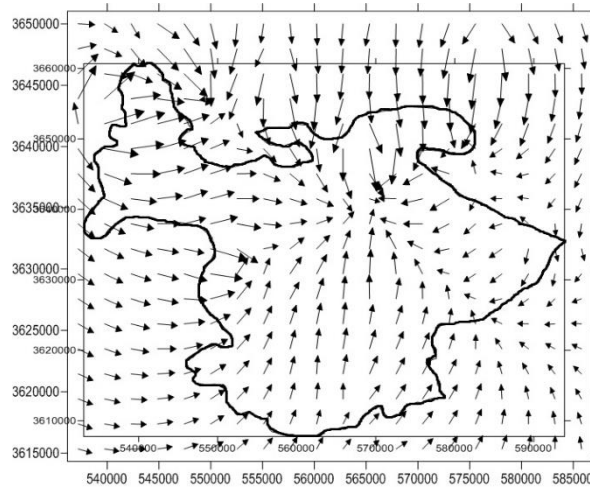
که در آن K_{xx} و K_{yy} و K_{zz} به ترتیب مقادیر هدایت هیدرولیکی به متر در روز در امتداد محورهای x و y و z هستند (که در آبخوان‌های هم‌روند این مقادیر با یکدیگر برابر می‌باشند)، h هد پتانسیل (ارتفاع آب) به متر، w جریان حجمی در واحد حجم به مترمکعب در روز به نمایندگی از منبع، S_s ذخیره ویژه از مواد متخلخل (d^{-1}) و t زمان به روز است. در MODFLOW، بسته‌های تغذیه^۴ و تبخیر و تعرق به‌طور گسترده‌ای برای مشخص کردن جریان منطقه غیراشباع استفاده می‌گردد (Xu et al. 2011: 2039)؛ این در حالی است که تبخیر و تعرق به ارتفاع آب زیرزمینی نسبت به سطح زمین وابسته است. همچنین میزان تبخیر و تعرق به نوع خاک، استفاده از زمین و شیوه‌های مدیریت آب بستگی دارد.

در فرآیند محاسبات مدل ریاضی MODFLOW، منطقه‌ی مطالعاتی به شبکه‌بندی مربعی (سلول) تبدیل گردید. در ابتدا تعداد لایه‌های آبخوان و سطر و ستون در مدل ریاضی تعیین شد، سپس نوع سفره‌ی آبخوان مشخص گردید که

3- Digital Elevation Model (DEM)

4- Recharge

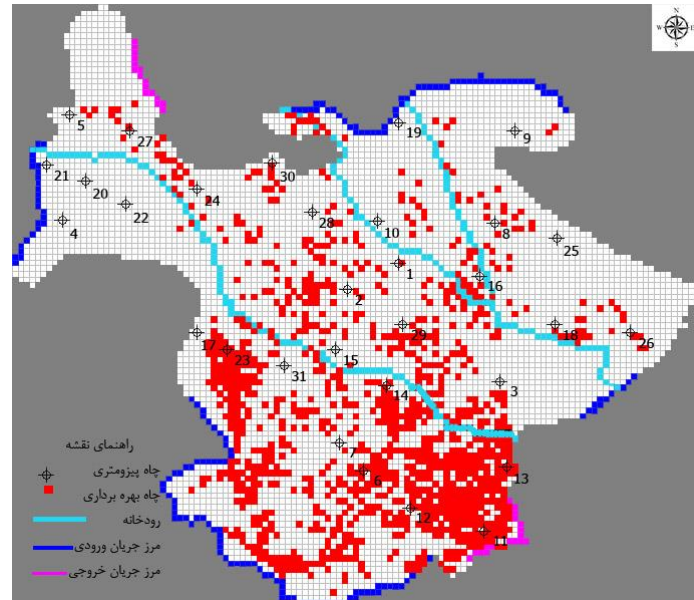
از نوع محصور و یا محصور نشده است. در ادامه، شرایط مرزی و محدوده‌ی آبخوان وارد مدل می‌شود که هر سلول دارای یک کد است. سطح بالای آبخوان نیز به‌عنوان ورودی مدل با کمک عمق چاه‌های پیژومتری وارد مدل می‌گردد. به‌طور کلی لایه‌ی سنگ کف نشان‌دهنده‌ی غیرقابل نفوذ بودن لایه برای آبخوان‌های محصور نشده و حد نهایی برای آبخوان‌های تحت فشار است (Malik et al. 2012: 3992). برای تعیین شرایط مرزی آبخوان و جهت جریان ورودی و خروجی به آبخوان از داده‌های هد هیدرولیکی و نرم‌افزار SURFER استفاده گردید. جهت جریان آب ورودی (شکل ۳) به آبخوان مطالعاتی جنوب و جنوب شرق و جهت جریان خروجی شمال و شمال غرب است. مرزهای جریان ورودی به آبخوان در حدود ۸۴/۸ کیلومتر و مرزهای جریان خروجی از آبخوان حدود ۴/۵ کیلومتر را شامل می‌شوند.



شکل ۳: جهت جریان‌های ورودی و خروجی به آبخوان مورد مطالعه

در مدل ریاضی MODFLOW شرایط ابتدایی در حالت جریان پایدار به‌عنوان یک فرض انتخاب می‌گردد. با در نظر گرفتن شرایط مرزی نسبت به سلول‌های داخلی، مدل می‌تواند مقادیر سطح آب را با استفاده از معادله‌های خاصی محاسبه کند (Anderson and Woessner, 1992: 46). همچنین در گام‌های بعدی، سطح تراز ایستابی در چاه‌های پیژومتری در ماه مورد نظر سال مبنا قرار می‌گیرد و اطلاعات مربوط به ویژگی‌های فیزیکی لایه‌های خاکی از قبیل هدایت هیدرولیکی، قابلیت انتقال و تخلخل مؤثر لازم است که از داده‌های آزمایش پمپاژ در چاه‌های بهره‌برداری استخراج می‌گردد. در بسته‌های مدل MODFLOW سلول‌هایی که جریان در آن‌ها جاری است و فعال هستند، با کد یک و سلول‌هایی که غیرفعال هستند، با کد صفر شناسایی می‌شوند. در این مطالعه، مقادیر هدایت هیدرولیکی در مهرماه ۱۳۷۰ به‌عنوان سال مبنا برای شرایط جریان پایدار در نظر گرفته شد. همچنین مدل برای شبیه‌سازی دوره‌ی سالانه تنظیم گردید؛ بدین معنی که هر دوره به ۳۶۵ مرحله (روز) تقسیم می‌گردد. به‌علاوه، مقادیر ضریب ذخیره توسط داده‌های چاه‌های اکتشافی موجود در منطقه به دست آمد و نقشه‌ی مورد نیاز مدل برای کل منطقه توسط درون‌یابی در محیط GIS تهیه گردید. نرخ هدایت هیدرولیکی نیز با استفاده از لایه‌ی ضخامت آبرفت و ضریب قابلیت انتقال برای آبخوان در محیط GIS تهیه و به مدل وارد شد. بسته‌ی نفوذ در مدل MODFLOW شامل نفوذ از سطح آبخوان و نفوذ از آبخوان‌های مجاور (قبلاً ذکر شد) است. در این مطالعه، نفوذ از سطح شامل نفوذ از بارندگی و نفوذ ناشی از پساب کشاورزی است. تمام اطلاعات مورد نیاز برای مدل شامل داده‌های هیدرولوژی، هواشناسی، زمین‌شناسی، توپوگرافی، هیدروژئولوژی و تصاویر ماهواره‌ای در محیط GIS پردازش گردیده و به مدل وارد می‌شود. برای شبیه‌سازی با دقت بالا و بهینه‌سازی عوامل دخیل در مدل، آبخوان آبرفتی اصفهان-برخوار در سیستم شبکه‌بندی مدل تفاضل محدود سه‌بعدی آب زیرزمینی در ابعاد سلولی ۵۰۰ در ۵۰۰ وارد گردید که با احتساب مساحت ۱۶۰۶ کیلومترمربعی آبخوان مذکور تعداد

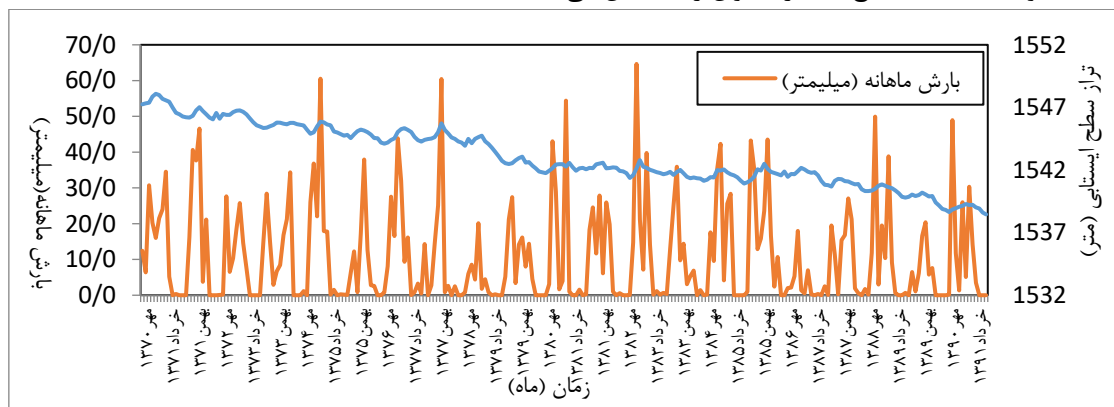
۱۲۲ ستون و ۱۰۶ سطر به دست آمد. این بدین معنی است که محدوده‌ی مطالعاتی دارای ۶۴۴۴ سلول فعال با کد یک است (شکل ۴). با توجه به شرایط همگن و هم‌روند رسوبات، محدوده‌ی مطالعاتی به‌عنوان یک‌لایه در مدل منظور گردید. همچنین با بررسی داده‌های آزمایش‌های پمپاژ چاه‌های اکتشافی مشخص شد که این لایه از نوع آبخوان آزاد است.



شکل ۴: شبکه‌بندی و پردازش منطقه‌ی مورد مطالعه توسط مدل MODFLOW

۴- بحث و نتایج

آب‌نمود آبخوان، معرف تغییرات سطح آب زیرزمینی است و در سال‌های پربارش که تغذیه‌ی آبخوان بیش‌تر است، حالت بالاروندگی را نشان می‌دهد. همچنین در سال‌های خشک که از تغذیه‌ی آبخوان توسط بارش کاسته می‌شود و معمولاً بهره‌برداری از آب زیرزمینی هم برای جایگزینی کمبود آب مصرفی سطحی افزایش می‌یابد، حالت پایین‌رفت یا افت را نشان می‌دهد. همچنین شکل نوسانات سالانه‌ی آب‌نمود برای ماه‌های مرطوب (پربارش)، حالت بالاروندگی را نشان می‌دهد. در طولانی‌مدت، صرف‌نظر از سال‌های خشک و مرطوب، چنانچه هیدروگراف معرف تغییرات سطح آب زیرزمینی یک آبخوان در یک ماه معین برای اولین سال و آخرین سال دوره‌ی آماری منتخب یکسان باشد و یا تغییرات جزئی داشته باشد، آب‌نمود حالت متعادل بودن سطح آب زیرزمینی را نشان می‌دهد و اگر در طول زمان کاهش تدریجی داشته باشد، آب‌نمود حالت افت سطح آب در آبخوان را مشخص می‌نماید.



شکل ۵: میانگین ماهانه‌ی بارش و سطح تراز سطح ایستابی آبخوان اصفهان-برخوار در طول دوره‌ی آماری

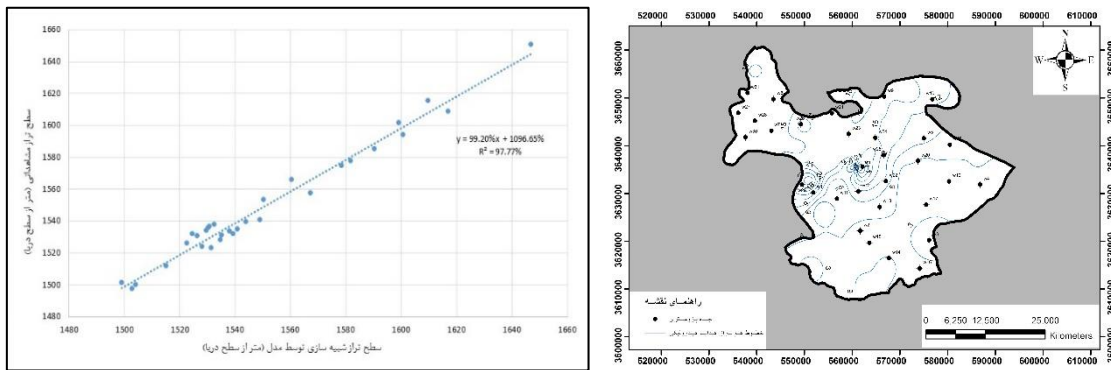
با استفاده از سطح تراز ایستابی چاه‌های پیژومتری، آبنمود آبخوان در طول مدت دوره‌ی آماری رسم گردید که تطابق آن با نمودار بارشی منطقه حاکی از این واقعیت دارد که حتی در سال‌هایی که بارش مناسب صورت گرفته است، سطح آبخوان سیر نزولی داشته و تخلیه بیش از تغذیه‌ی سفره بوده است (شکل ۵). شکل آبنمود نشان‌دهنده‌ی این است که در ۲۱ سال دوره‌ی منتخب آماری، سطح تراز ایستابی به میزان ۹/۳۶ متر کاهش داشته و به‌طور میانگین در هر سال با کاهش معادل ۰/۴۶ متر همراه بوده است. در ادامه‌ی آنالیز حساسیت به روش حذف پارامتر برای شرایط پایدار در رابطه با پارامترهای هدایت هیدرولیکی، رسانایی هیدرولیکی مرز و نیز تغذیه، تخلیه، تخلخل مؤثر صورت پذیرفت. مدل آب زیرزمینی سه‌بعدی موردنظر به افزایش درصد هدایت هیدرولیکی نسبت به سایر پارامترها حساسیت بیش‌تری نشان داد و با کاهش مقادیر این پارامتر حساسیت مدل کاهش یافت. پس از هدایت هیدرولیکی، تغذیه و تخلخل مؤثر در اولویت‌های بعدی حساسیت قرار داشتند. با توجه به حساسیت بالای مدل نسبت به هدایت هیدرولیکی و تأثیر زیاد آن در محاسبات شبیه‌سازی این نیاز ایجاد شد تا هدایت هیدرولیکی در بخش‌های متفاوت آبخوان تصحیح و بهینه‌سازی گردد. این عمل طی چند مرحله انجام و مدل اجرا گردید و مقادیر مشاهداتی سطح تراز آبخوان با مقادیر شبیه‌سازی‌شده توسط مدل در حالت پایدار با یکدیگر مقایسه شد. میزان هدایت هیدرولیکی واسنجی شده‌ی آبخوان مورد مطالعه از حدود یک متر در روز در جنوب شرقی آبخوان (اطراف چاه پیژومتری شماره‌ی ۳) تا حدود ۳۰ متر در روز در مرکز آبخوان (اطراف چاه‌های پیژومتری شماره‌ی ۶ و ۲۹) متغیر است (شکل ۶).

جدول ۱: برآورد بیلان آبی در شرایط پایدار آبخوان اصفهان-برخوار توسط مدل MODFLOW

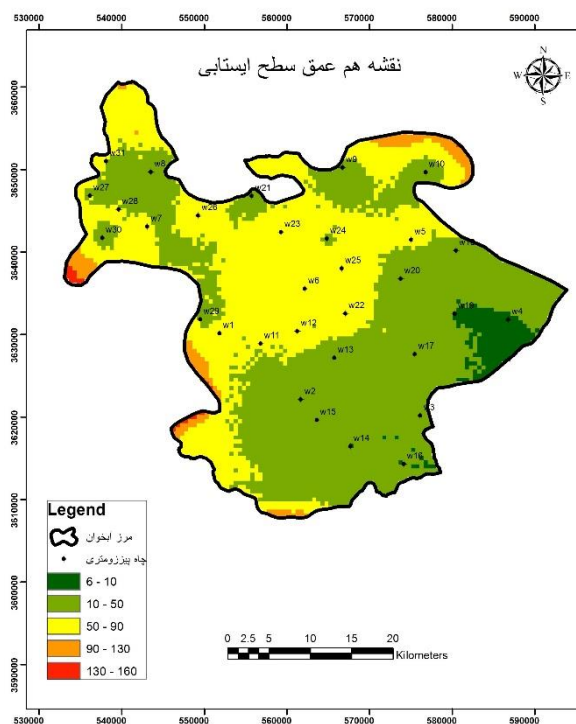
مجموع	جریان مرزی	نشت رودخانه	تغذیه (بارندگی، جریان سطحی و سیلاب، آب برگشتی کشاورزی)	تخلیه از چاه بهره‌برداری	نوع جریان
۸۱۴۴۱۷/۷۶	۱۰۲۷۱۲/۱۲	۵۳۸۴/۸۴	۰	۷۰۶۳۴۰/۸	خروجی (m ³ /day)
۸۱۴۴۱۴/۷۷	۱۳۰۳۴۶/۳	۴۱۲۶۷/۴۷	۶۴۲۸۰۰	۰	ورودی (m ³ /day)
-۲/۹۹	+۲۷۶۳۴/۱۸	+۳۵۹۰۳/۶۳	+۶۴۲۸۰۰	-۷۰۶۳۴۰/۸	بیلان ورودی و خروجی (m ³ /day)

Discrepancy (%): ۰/۳۴ (اختلاف)

با محاسبه‌ی بیلان، وضعیت پتانسیل آب در محدوده‌ی مطالعاتی آبخوان مشخص می‌گردد و بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از بیلان می‌توان امکان توسعه‌ی بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی را برآورد نمود. به‌علاوه می‌توان در محدوده‌های دارای بیلان منفی چگونگی کنترل بیلان منفی را بررسی نمود. پتانسیل یا توانایی منابع آب زیرزمینی در یک محدوده‌ی مطالعاتی یا آبخوان با برقراری بیلان برای یک سال در حالت متوسط و بر اساس اطلاعات طولانی‌مدت میسر می‌گردد. به‌عبارت‌دیگر با توجه به هدف دستیابی به پتانسیل آب در محدوده‌ی آبخوان مورد مطالعه، باید بیلان آبی برای یک سال با وضعیت متوسط محاسبه گردد. نفوذ از پساب کشاورزی یا تغذیه از آبیاری مزارع به نوع آبیاری، دانه‌بندی خاک، کرت‌بندی مزرعه و حتی کیفیت آب مصرفی نیز بستگی دارد. بر اساس تحقیقات تجربی سازمان خواروبار جهانی (FAO) که در نقاط مختلف آب و هوایی و با شیوه‌های متفاوت آبیاری از طریق استفاده از لایسیمتر انجام گرفته، نفوذ عمقی از مصرف آب آبیاری را طبق جدولی با توجه به روش آبیاری، نحوه‌ی انجام آبیاری و وضعیت مزرعه، راندمان آبیاری و بافت خاک می‌توان به درصد به دست آورد (نشریه‌ی شماره‌ی ۳۸ فائو). قابل‌ذکر است که در محدوده‌ی مطالعاتی اصفهان-برخوار جمع مصارف سالانه‌ی آب ۸۱۶/۴۵ میلیون مترمکعب است که حدود ۴۹ درصد آن از جریانات سطحی و چشمه‌های ارتفاعات تأمین می‌گردد و ۵۱ درصد آن از منابع آب زیرزمینی شامل چاه و قنات است (شرکت مهندسی مشاور آب و توسعه‌ی پایدار، ۱۳۸۹: ۳۵).



شکل ۶: نمودار سطح تراز ایستایی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده و هدایت هیدرولیکی بهینه‌سازی شده‌ی آبخوان



شکل ۷: عمق سطح ایستایی در آبخوان اصفهان-برخوار

در دشت‌ها میزان نفوذ به وسعت دشت، نفوذپذیری آبرفت و وجود آبراهه‌ها تفاوت دارد. در محدوده‌ی مورد مطالعه، بیش‌تر بارش در طول دوره‌ی آماری در ماه‌های دی و اسفند اتفاق می‌افتد. همچنین بیش‌ترین سطح آب زیرزمینی بین ماه‌های اسفند تا فروردین و کم‌ترین سطح آب در شهریورماه و مهرماه اتفاق افتاده است. مدل شبیه‌سازی آب زیرزمینی توسط داده‌های هدایت هیدرولیکی و سطح تراز ایستایی در سال مبنا (۱۳۷۰) صحت‌سنجی و اعتبارسنجی گردید (شکل ۶). با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در شکل (۷)، ارتباط بسیار معناداری بین سطح تراز ایستایی واقعی و شبیه‌سازی شده وجود دارد که نشان از واسنجی شده‌ی مناسب مدل و دقت بالای مدل‌سازی برای آبخوان اصفهان-برخوار است ($R^2 = 0.9777$).

۵- نتیجه‌گیری

در محدوده‌ی آبخوان مورد مطالعه، با توجه به اینکه سطح آب زیرزمینی بیش از ۵ متر است، تبخیر از سطح آبخوان صورت نمی‌گیرد (مهندسین مشاور آب و توسعه‌ی پایدار، ۱۳۸۹: ۳۸) (شکل ۷). تغییر در ذخیره‌ی آبخوان از مجموع حاصل ضرب تغییرات بلندمدت سطح تراز ایستابی در متوسط ضریب ذخیره و مساحت آبخوان به دست می‌آید. در مورد آبخوان اصفهان-برخوار، همان‌طور که در قبل بیان گردید، میزان متوسط کاهش سطح تراز آبخوان در طول دوره‌ی آماری منتخب ۲۱ ساله معادل ۰/۴۶ متر در سال بوده است (شکل ۵). همچنین متوسط ضریب ذخیره با استفاده از داده‌های چاه‌های اکتشافی در منطقه به دست آمد که برابر ۱۱ درصد است؛ بنابراین با توجه به مساحت ۱۶۰۶ کیلومترمربعی آبخوان، تغییرات حجم ذخیره یا به عبارت دیگر بیلان منفی آبخوان معادل ۸۱/۲۶ میلیون مترمکعب در سال است که در مقایسه با مطالعات گذشته بیش از ۱/۵ برابر افزایش نشان می‌دهد (شرکت مهندسین مشاور آب و توسعه‌ی پایدار، ۱۳۸۹: ۳۵). با توجه به وسعت دشت و نوع آبیاری مزارع که از نوع کرتی است، در حالت پایدار از میزان حدود ۲۳۴/۶۲ میلیون مترمکعب تغذیه در سال، ۴۷ میلیون مترمکعب در سال بارش مفید (بارشی که به سفره‌ی آب زیرزمینی می‌رسد) که معادل ۱۰ درصد کل بارندگی است، به آبخوان وارد می‌شود و با نتایج مطالعات گذشته که نفوذ از بارندگی را ۱۴ درصد بیان می‌کند، متفاوت است (شرکت مهندسین مشاور آب و توسعه‌ی پایدار، ۱۳۸۹: ۳۶). همچنین حدود ۱۸۷/۵ میلیون مترمکعب از تغذیه‌ی سفره‌ی آب زیرزمینی توسط جریان بازگشتی آبیاری کشاورزی تأمین می‌گردد. این میزان معادل ۳۲ درصد کل آب مصرفی کشاورزی است که در مقایسه با نتایج مطالعات گذشته که تغذیه از طریق پساب کشاورزی را ۴۰ درصد بیان می‌کند (شرکت مهندسین مشاور آب و توسعه‌ی پایدار، ۱۳۸۹: ۳۶)، تفاوت دارد. همچنین نشت رودخانه شامل حدود ۱۵ میلیون مترمکعب در سال تغذیه و ۲ میلیون مترمکعب در سال تخلیه است که گویای تأثیر مثبت رودخانه بر منابع آب زیرزمینی است.

در محدوده‌ی مطالعاتی آبخوان اصفهان-برخوار، بارش و به‌ویژه آب بازگشتی از مصارف کشاورزی، مهم‌ترین عوامل تغذیه‌ی آبخوان می‌باشند. با توجه به اینکه این منطقه جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران محسوب می‌شود و بارندگی در این مناطق با شدت زیاد و دوام کم همراه است، سهم تغذیه‌ی آبخوان از طریق بارش کم است. همچنین با توجه به وسعت زیاد منطقه و نوع بارش‌ها اجرای پروژه‌های پخش سیلاب در منطقه می‌تواند کمک شایانی به تغذیه‌ی آبخوان کند و سهم چشم‌گیری در نفوذ جریان‌های سطحی داشته باشند. این یافته در نتایج برخی محققان مورد تأیید قرار می‌گیرد (Kowsar, 1992: 86; Hashemi et al. 2013: 648). در مطالعات مشابهی در مورد عوامل تغذیه‌ی آب زیرزمینی، هاشمی و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که در یک سال معمولی و بدون وقوع وقایع حدی، سیستم‌های پخش سیلاب، عامل اصلی تغذیه‌ی آبخوان در مناطق خشک ایران می‌باشند. همچنین نتایج مطالعات ارشد و همکاران (۲۰۰۵) در کشور پاکستان و Shukla و Jaber (۲۰۰۶) در فلوریدا گویای این واقعیت است که جریان آب بازگشتی از کشاورزی، منبع اصلی تغذیه‌ی آب زیرزمینی است که با نتایج مطالعه‌ی حاضر هم‌خوانی دارد. نتایج پژوهش حاضر با مطالعه غفاری و همکاران (۱۳۹۷) مطابقت دارد؛ چراکه بر طبق بررسی‌های آن‌ها در دشت اصفهان-برخوار مشخص شد که متوسط افت سطح آب زیرزمینی طی دوره‌ی آماری ۲۰۱۵-۱۹۹۰ برابر با ۰/۴۶۸ متر در سال است. همچنین اصغری و همکاران (۱۳۸۴) گزارش کردند که طی سال‌های ۱۳۹۰-۱۳۸۰ سطح تراز آبخوان دشت برخوار افتی برابر ۴۸ متر داشته است که با کاهش سطح تراز ایستابی آبخوان اصفهان-برخوار در این مطالعه نیز هم‌خوانی دارد. محدودیت در توسعه‌ی بهره‌برداری از آبخوان‌ها می‌تواند هم به لحاظ کمی و هم از نظر کیفی در نظر گرفته شود. محدودیت‌های کمی مربوط به بیلان منفی منطقه است. در آبخوان اصفهان-برخوار با توجه به بیش‌تر بودن حجم جریان‌های خروجی نسبت به ورودی و در نتیجه بیلان منفی سفره، نه تنها امکان توسعه‌ی بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی وجود ندارد، بلکه می‌بایست از مقدار بهره‌برداری حال حاضر نیز کاسته شود تا وضعیت آبخوان به شرایط پایدار نزدیک گردد و بیلان متعادل شود تا فجایی از قبیل نشست زمین به وقوع نپیوندد. مطابق با این نتیجه که بیش‌ترین حجم تغذیه‌ی آبخوان از پساب کشاورزی تأمین می‌گردد و جریان بازگشتی از آبیاری کشاورزی مهم‌ترین منبع ورودی به سفره‌ی آب زیرزمینی است، این بخش

از تغذیه می‌بایست با توجه به انواع کشت در منطقه و نحوه‌ی آبیاری در مطالعات هیدروژئولوژیکی منطقه با محاسبات دقیق برآورد و در مدل‌سازی‌ها استفاده گردد.

۶- منابع

۱. اروچی، بلال، ایلدرمی، علیرضا (۱۳۹۴). ارزیابی کیفی آب‌های زیرزمینی دشت برخوار اصفهان، کنفرانس ملی مهندسی و مدیریت محیط زیست، تهران، مرکز تحقیقات مهندسی محیط زیست مازند آب، صص ۱۷-۱.
۲. صالحی، رضا، غفوری، محمد، لشکری پور، غلامرضا، دهقانی، مریم (۱۳۹۲). بررسی فرونشست دشت مهیار جنوبی با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری. فصلنامه‌ی علمی پژوهشی آبیاری و آب ایران، سال سوم، شماره‌ی یازدهم، صص ۵۷-۴۷.
۳. غفاری، صدیقه مرادی، حمیدرضا، مدرس، رضا (۱۳۹۷). مقایسه‌ی تغییرات زمانی و مکانی سطح آب زیرزمینی دشت‌های اصفهان-برخوار، نجف‌آباد و چادگان، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره‌ی ۵۰، شماره‌ی ۱، صص ۱۶۰-۱۴۱.
۴. اصغری، کیوان، سوری‌نژاد، جبار، ذوالانوار، عبدالرحیم (۱۳۸۴). پیش‌بینی عملکرد بهینه‌ی آبخوان دشت برخوار به روش شبیه‌سازی-بهینه‌سازی، نشریه‌ی علوم آب‌و‌خاک، جلد ۹، شماره‌ی ۳، صص ۲۵-۱۳.
۵. مهندسین مشاور آب و توسعه‌ی پایدار، (۱۳۸۹). مطالعات بهنگام‌سازی اطلس منابع آب محدوده‌های مطالعاتی حوضه‌ی آبریز گاوخونی، جلد سوم، بخش پنجم، پیوست شماره‌ی ۲، بیان آب محدوده‌ی مطالعاتی اصفهان-برخوار، شرکت آب منطقه‌ای اصفهان، شرکت مدیریت منابع آب، صص ۶۹-۱.
6. Al-Hassoun, Saleh A., and Thamer Ahmed Mohammad, (2011). "Prediction of water table in an alluvial aquifer using modflow." *Petranika J. Sci. & Technol* 19, no. 1: pp. 45-55.
7. Alley, William M., et al. "Flow and storage in groundwater systems." *science* 296.5575: pp. 1985-1990.
8. Alley, W.M., Healy, R.W., LaBaugh, J.W. and Reilly, T.E., (2002). Flow and storage in groundwater systems. *science*, 296(5575), pp.1985-1990.
9. Anderson, M. P., & Woessner, W. W. (1992). *Applied ground water modeling: Simulation of flow and advective transport*. Academic Press. Inc., New York, NY.
10. Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J. (2015). *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*. Academic press.
11. Berhanu, Belete, Yilma Seleshi, and Assefa M. Melesse, (2014). "Surface water and groundwater resources of Ethiopia: potentials and challenges of water resources development." In *Nile River Basin*, pp. 97-117. Springer, Cham.
12. Bredehoeft, J., (2005). The conceptualization problem—surprise. *Hydrogeology journal*, 13(1), pp.37-46.
13. Carrera-Hernandez, J. J., & Gaskin, S. J. (2006). The groundwater modeling tool for GRASS (GMTG): open source groundwater flow modeling. *Computers & Geosciences*, 32(3), 339-351.
14. Chenini, I., & Mammou, A. B. (2010). Groundwater recharge study in arid region: an approach using GIS techniques and numerical modeling. *Computers & Geosciences*, 36(6), pp. 801-817.
15. Dieleman, P. J., & Trafford, B. D. T. (1980). *Drainage design factors: 28 questions and answers based on the expert consultation on drainage design factors Rome, 22-29 October 1979*.
16. Fitts, C. R. (2002). *Groundwater science*. Elsevier.
17. Foody, G. M. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote sensing of environment*, 80(1), pp. 185-201.
18. Gleeson, T., Alley, W. M., Allen, D. M., Sophocleous, M. A., Zhou, Y., Taniguchi, M., & VanderSteen, J. (2012). Towards sustainable groundwater use: setting long-term goals, backcasting, and managing adaptively. *Groundwater*, 50(1), pp. 19-26.
19. Harbaugh, A. W. (2005). *MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular groundwater model: the ground-water flow process* (pp. 6-A16). Reston, VA: US Department of the Interior, US Geological Survey.

20. Harbaugh, A. W., Banta, E. R., Hill, M. C., & McDonald, M. G. (2000). MODFLOW-2000, The U. S. Geological Survey Modular Ground-Water Model-User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process. Open-file Report. U. S. Geological Survey, (92), 134.
21. Hashemi, H., Berndtsson, R., Kompani-Zare, M., & Persson, M. (2013). Natural vs. artificial groundwater recharge, quantification through inverse modeling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(2), pp. 637-650.
22. Hill, M. C., & Tiedeman, C. R. (2007). Effective groundwater model calibration with analysis of data, sensitivities, and uncertainty.
23. Hiscock, K. M., Rivett, M. O., & Davison, R. M. (2002). Sustainable groundwater development. Geological Society, London, Special Publications, 193(1), 1-14.
24. Højberg, A. L., & Refsgaard, J. C. (2005). Model uncertainty-parameter uncertainty versus conceptual models. *Water Science and Technology*, 52(6), pp. 177-186.
25. Kowsar, A. (1992). Desertification control through floodwater spreading in Iran. Unasylva (FAO).
26. Malik, V. S., Singh, S. K., & Singh, R. K. (2012). Application of "Processing MODFLOW for Windows (Pmwin)" for sustainable ground water resources study for Gurgaon District, Haryana, India. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 4(9), pp. 3988-4002.
27. McDonald, M. G., & Harbaugh, A. W. (1988). A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model (Vol. 6, p. A1). Reston, VA: US Geological Survey.
28. Mukherjee, S., (1996). Targeting saline aquifer by remote sensing and geophysical methods in a part of Hamirpur-Kanpur, India. *Hydrogeol. J*, 19, pp.53-64.
29. Poeter, E., & Anderson, D. (2005). Multimodel ranking and inference in ground water modeling. *Groundwater*, 43(4), pp. 597-605.
30. Rojas, R., Kahunde, S., Peeters, L., Batelaan, O., Feyen, L., & Dassargues, A. (2010). Application of a multimodel approach to account for conceptual model and scenario uncertainties in groundwater modelling. *Journal of Hydrology*, 394(3-4), pp. 416-435.
31. Shukla, S., & Jaber, F. H. (2006). Groundwater recharge from agricultural areas in the flatwoods region of south Florida. University of Florida. IFAS Fact Sheet ABE370 EDIS Web Site at <http://edis.ifas.ufl.edu>.
32. United Nations. World Population Prospects: 2012 Revision Population Database online. <http://www.un.org/esa/population/unpop.htm>, 2012. [Accessed on 19th July 2013].
33. Xu, X., Huang, G., Qu, Z., & Pereira, L. S. (2011). Using MODFLOW and GIS to assess changes in groundwater dynamics in response to water saving measures in irrigation districts of the upper Yellow River basin. *Water resources management*, 25(8), pp. 2035-2059.
34. Yang, Q., Lun, W., & Fang, Y. (2011). Numerical modeling of three-dimension groundwater flow in Tongliao (China). *Procedia Engineering*, 24, pp. 638-642.