

برآورد تغذیه طبیعی آبخوان دشت اردبیل با استفاده از روش CRD

حسین غفاری^۱، علی رسولزاده^{۲*}، مجید رئوف^۳، اباذر اسمعیلی عوری^۴

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبخیزداری دانشگاه محقق اردبیلی و کارشناس ارشد آبخیزداری اداره منابع طبیعی و آبخیزداری پارس‌آباد
^۲ استاد گروه مهندسی آب و عضو پژوهشکده مدیریت آب دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی
^۳ دانشیار گروه مهندسی آب و عضو پژوهشکده مدیریت آب دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی
^۴ استاد گروه مرتع و آبخیزداری و عضو پژوهشکده مدیریت آب دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

دریافت: ۹۸/۱۰/۱۳، بازنگری: ۱۴۰۰/۶/۱۹، پذیرش: ۱۴۰۰/۶/۲۷، نشر آنلاین: ۱۴۰۰/۶/۲۷

چکیده

کمی کردن مقدار تغذیه آب زیرزمینی از پیش‌نیازهای ابتدایی مدیریت منابع آب زیرزمینی می‌باشد. در این پژوهش، روش حرکت تجمعی بارش، CRD (Cumulative Rainfall Departure) که بر اصل بیلان آب استوار است، به‌منظور برآورد تغذیه آب زیرزمینی آبخوان اردبیل مورد استفاده قرار گرفته است. در آبخوان اردبیل به‌دلیل وجود مزارع بسیار، به‌جز بارش، آب آبیاری منبع مهم دیگری برای تغذیه آبخوان به‌شمار می‌آید. بنابراین، لزوم پی‌بردن به نقش هرکدام از این عوامل در مدیریت منابع آب زیرزمینی منطقه احساس می‌شود. در این روش با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی با کمینه‌کردن میانگین مربعات خطا، RMSE (Root Mean Square Error) بین تراز آب زیرزمینی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده مقادیر تغذیه برآورد می‌گردد. نتایج نشان داد که در دوره آماری ده‌ساله (مهر ۱۳۸۰ تا شهریور ۱۳۹۰) میزان متوسط آب‌دهی ویژه برای آبخوان اردبیل ۰/۱ و کسری از آب بارندگی و آبیاری که موجب تغذیه آبخوان می‌گردد به‌ترتیب برابر ۱۶/۱۹ و ۱۷/۴۶ درصد می‌باشد. به‌طور کلی میزان تغذیه آب زیرزمینی با روش CRD، ۱۷۲ میلیون مترمکعب در سال به‌دست آمد که حداقل مقدار تغذیه در سال آبی ۸۷-۱۳۸۶ با ۱۵۸ میلیون مترمکعب و حداکثر آن در سال آبی ۸۲-۱۳۸۱ با ۱۸۳ میلیون مترمکعب بود. در این پژوهش شاخص‌های کمی به‌صورت ترکیبی برای واسنجی مدل CRD در آبخوان دشت اردبیل استفاده و سپس ارزیابی و اعتبارسنجی شد. به‌طور کلی، سادگی، ارزانی، سهولت استفاده و نیاز اندک به داده‌های غیرقطعی (مانند میزان آبیاری و پمپاژ) از مزایای این مدل است.

کلیدواژه‌ها: روش CRD، آب‌دهی ویژه، کسر بارندگی، کسر آبیاری، آبخوان دشت اردبیل.

۱- مقدمه

برآورد تغذیه در هرگونه سیستم‌های آب زیرزمینی و اثرات استحصال محلی آب یک ضرورت به‌شمار می‌آید، هرچند که به کمیت در آوردن آن بسیار دشوار است. روش‌های متعددی به‌منظور برآورد تغذیه بیان‌شده که هر یک دارای نقاط ضعف و قوت هستند. روش حرکت تجمعی بارش (CRD) یکی از روش‌های پرکاربرد محاسبه تغذیه آب‌های زیرزمینی است. این روش مبتنی بر قاعده کلی بیلان آب بوده و اغلب به‌منظور شبیه‌سازی نوسانات سطح آب به‌کار می‌رود و به‌دلیل سادگی و نیاز کم این روش به داده‌های مکانی، به‌طور گسترده برای تخمین تغذیه و ذخیره مؤثر آبخوان در آفریقای جنوبی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Van و Xu، ۲۰۰۱).

تغذیه آب‌های زیرزمینی از طریق بارندگی و آبیاری مزارع کشاورزی، منبع اصلی تغذیه آبخوان در دشت اردبیل است و با توجه به وضعیت ژئومورفولوژیکی^۱ و وجود مزارع کشاورزی در منطقه عملاً امکان ایجاد مناطق تغذیه مصنوعی وجود ندارد. بنابراین با برداشت بیش‌ازحد مجاز از آبخوان اردبیل سطح آب زیرزمینی هر ساله می‌تواند پایین‌تر رفته و مشکلات عدیده‌ای همچون خشک شدن قنوات و چاه‌های کم‌عمق را به وجود آورد و تغذیه طبیعی از طریق بارندگی و یا نفوذ قسمتی از آب‌های آبیاری و سطحی جواب‌گوی جبران این کاهش نباشد.

1. Geomorphology

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۹۱۴-۱۵۶۵۳۱۳

Ahmadi و همکاران (۲۰۱۵) تغذیه آب‌های زیرزمینی آبخوان نیشابور را با استفاده از دو روش CRD و RIB محاسبه کردند. نتایج نشان داد که براساس روش CRD مقدار ۱۳ و ۲۷ درصد از بارش جمعی و آب‌های برگشتی به آبخوان موجب تغذیه شده است که این مقادیر با روش RIB به ترتیب ۱۱ و ۱۹ درصد بوده است. در این پژوهش، مقدار محاسبه شده متوسط سالانه تغذیه با استفاده از روش‌های CRD و RIB برای آبخوان نیشابور به ترتیب برابر ۱۶۴ و ۱۶۰ میلی‌متر به دست آمد.

با توجه به این که آب‌های زیرزمینی و تغییرات آن‌ها همانند آب‌های سطحی به‌طور مستقیم قابل مشاهده نمی‌باشد، محققان با توجه به اطلاعات قابل دسترس به مطالعه این آب‌ها از طریق مدل‌سازی پرداختند و در این راستا به نتایج بسیاری دست یافته‌اند. از روش‌های مورداستفاده در این راستا روش CRD بوده که از جمله روش‌هایی است که از مزیت‌های مهم آن می‌توان به نیاز داشتن به داده‌های غیرقطعی کم‌تر اشاره کرد. لذا هدف این پژوهش برآورد مقدار تغذیه آب زیرزمینی دشت اردبیل در اثر بارندگی و آب برگشتی آبیاری با استفاده از روش CRD می‌باشد. با توجه به این که مقدار تغذیه، متغیر مکانی است، لذا پهنه‌بندی تغذیه در اثر بارندگی و آب برگشتی آبیاری در سطح دشت، از اهداف این پژوهش می‌باشد. همچنین در این پژوهش به تأثیر پوشش گیاهی و به‌طور کلی کاربری اراضی بر روی میزان تغذیه آبخوان بیشتر توجه شد که در پژوهش‌های دیگر در این زمینه، کم‌تر بدان پرداخته شده است.

۲- مواد و روش

۲-۱- موقعیت و خصوصیات منطقه

آبخوان دشت اردبیل با مساحت ۱۲۱۷/۱۸ کیلومتر مربع در محدوده‌ای بین "۴۵' ۰۸" تا "۴۸' ۳۰" طول شرقی و "۱۵' ۰۲" تا "۳۸' ۰۰" عرض شمالی در استان اردبیل و در زون ۳۹ واقع شده است (شکل (۱)). از مراکز مهم جمعیتی که در داخل مرز این آبخوان قرار گرفته است، شهرستان اردبیل می‌باشد.

براساس روش آمبرژه^۴ اقلیم دشت نیمه‌خشک سرد با پوشش گیاهی استپی می‌باشد (سایت هواشناسی اردبیل). در این پژوهش، از شش ایستگاه هواشناسی موجود در داخل مرز آبخوان با آمار کافی استفاده گردید (جدول (۱)). متوسط سالانه بارندگی در این آبخوان (از مهرماه سال ۸۰ تا شهریور سال ۹۰) ۲۷۹/۸ میلی‌متر و حداکثر بارش ماهانه ۱۳۸/۵ میلی‌متر بوده و مربوط به اردیبهشت‌ماه سال ۱۳۸۹ ایستگاه هیر می‌باشد و همچنین حداکثر

مطالعات زیادی در سراسر دنیا با استفاده از این روش صورت گرفته است. Baalousha (۲۰۰۵) در مطالعه‌ای، روش CRD را برای تخمین مقدار تغذیه آب زیرزمینی نوار غزه در فلسطین به‌کاربرده و نتایج را با نتایج دیگر تحقیقات مقایسه کرد. از نظر این پژوهشگر با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه در ناحیه نیمه-خشک که تغذیه آب‌های زیرزمینی با تأخیر از زمان نفوذ آب‌ها از سطح خاک به درون زمین همراه است، واقع بوده و بارندگی اصلی‌ترین عامل تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی می‌باشد، روش CRD که در مقابله با روش‌های دیگر به داده‌های کم‌تر نیاز داشته و سهولت بیشتری دارد مناسب این منطقه مطالعاتی می‌باشد و نتایج آن نیز بسیار نزدیک به روش‌های عینی است. براساس این پژوهش، مقدار تغذیه آب زیرزمینی ناشی از بارندگی در نوار غزه، ۴۳ میلیون مترمکعب به دست آمد. Whitaker و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از روش CRD پمپاژ آب زیرزمینی را در یک آبخوان دولومیتی^۲ واقع در آفریقای جنوبی ارزیابی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که روش CRD یک روش مناسب برای جدا کردن تأثیر پمپاژ در طول زمان خشک‌سالی بر روی کاهش سطح آب زیرزمینی که ناشی از کاهش تغذیه است، می‌باشد.

Rasoulzadeh و Moosavi (۲۰۰۷)، روش CRD را با استفاده از برنامه GREM نوشته شده در زبان برنامه‌نویسی ویژوال بیسیک^۳ برای تخمین مقدار تغذیه آب زیرزمینی مناطق مجاور دریاچه طشک استفاده کرده‌اند. نتایج این پژوهش نشان که میزان تغذیه طبیعی برای جبران میزان آب زیرزمینی خارج شده از منطقه (۰/۴ میلی‌متر در سال) کافی نمی‌باشد. آن‌ها مقدار تغذیه طبیعی در اثر بارش را ۳۳/۶ درصد برآورد کردند.

Abedi و Soltani (۱۳۸۹) در مطالعه‌ای به منظور تخمین تغذیه آب زیرزمینی زیرحوزه کرون در منطقه اصفهان از روش CRD استفاده کرده‌اند و بیان نمودند که این مدل، روشی کارآمدتر و سهل‌تر نسبت به دیگر روش‌ها برای مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌باشد که تنها عامل تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی بارندگی می‌باشد. تحلیل حساسیت در این پژوهش نشان داد که نتایج این روش به ضریب ذخیره نسبت به بقیه پارامترها حساس‌تر است. نتیجه کمی این روش در تخمین میزان تغذیه آب زیرزمینی زیرحوزه کرون اصفهان از طریق بارندگی را حدود ۴۸/۰۷ میلیون مترمکعب نشان داد. در این پژوهش نیز که به‌مانند تحقیق Baalousha (۲۰۰۵) به منظور بهینه کردن روش CRD از کوچک کردن جذر میانگین مربع خطا بین داده‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه شده سطح ایستابی انجام شد بهترین مقدار بهینه در کم-ترین مقدار خطای مربع میانگین ریشه به دست آمد.

4. Emberger

2. Dolomite
3. Visual Basic

که در آن، RT تغذیه در زمان T است. r تابع CRD که در محاسبه تغذیه به کار می‌رود، S_y آب‌دهی ویژه، Δh_i تغییرات سطح آب در طول ماه i ، Q_P برداشت از آب زیرزمینی (L^3/T)، Q_{out} جریان‌های طبیعی خارج شده از آبخوان، A وسعت آبخوان (L^2)، P_i بارش ماه i (L/T) و مقدار آستانه‌ای می‌باشد که نشان‌دهنده شرایط مرزی آبخوان است. P_t ممکن است بین صفر تا P_{av} (بارش متوسط) متغیر باشد که مقدار صفر نشان‌دهنده یک آبخوان بسته (عدم جریان) و P_{av} نشانگر یک سیستم آبخوان باز می‌باشد. نسبت r/S_y را می‌توان براساس معادله (۲) و با یک عمل بهینه‌سازی که اختلاف بین نوسانات سطح آب محاسبه شده و مشاهده‌ای را در فواصل زمانی خاصی به حداقل برساند، برآورد نمود.

آب رسیده به سفره می‌تواند شامل کسری از بارش‌های صورت گرفته و نیز شامل کسری از آب آبیاری باشد که برای زمین‌های زراعی منطقه همه‌ساله مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما اگر جریان‌های جانبی درون خاک نادیده در نظر گرفته نشود، باید علاوه بر کسر آب باران و آبیاری که باعث بالا رفتن سطح آب، آب زیرزمینی می‌گردد، جریان‌های زیرسطحی را نیز که به صورت افقی درون خاک وجود دارد، در نوسانات سطح آب در نظر گرفت. ضمن آنکه خروج آب از آبخوان به وسیله منافذ طبیعی مانند چشمه‌ها و یا تراوش به جریان‌های رودخانه‌ای در زمانی که سطح آب زیرزمینی بالا است و همچنین تأسیسات ساخت بشر مانند قنوات و چاه‌ها در پایین رفتن سطح آب تأثیر به‌سزایی دارد. از این‌رو، معادله (۱) با وارد کردن کسری از مقدار آبیاری (λ) که به سطح آب زیرزمینی می‌رسد، به منظور محاسبه نوسانات سطح آب زیرزمینی به صورت زیر به دست می‌آید (Ahmadi و همکاران، ۲۰۱۵):

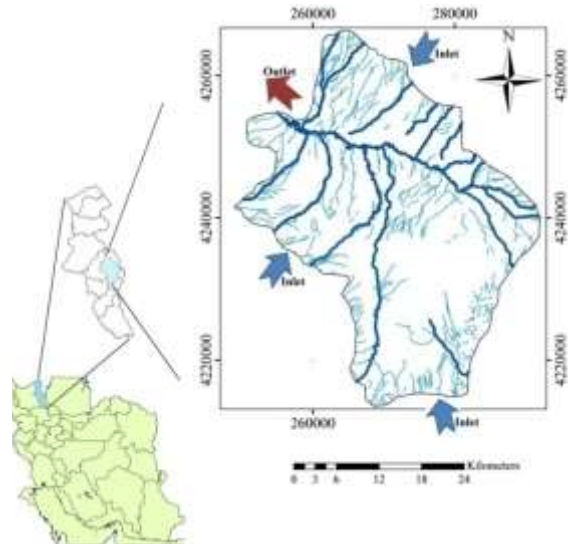
$$\Delta h_i = \frac{r}{S_y} CRD_i - \left[(1-\lambda)Q_{Pi} - Q_{ini} + Q_{out} \right] / (AS_y) \quad (3)$$

که در آن، Q_{out} و Q_{ini} به ترتیب جریان جانبی ورودی به آبخوان و جریان جانبی خروجی از آبخوان هستند.

۲-۳- مدل مفهومی

به منظور بررسی جامع تغییرات سطح آب زیرزمینی آبخوان اردبیل با روش CRD، ابتدا ۲۶ حلقه چاه مشاهده‌ای با اطلاعات کافی در داخل مرز آبخوان انتخاب شد. هیدروگراف بیلان آب زیرزمینی در ۲۶ حلقه چاه مشاهده‌ای انتخاب شده در آبخوان طی دوره ۱۰ ساله از مهرماه ۱۳۸۰ تا شهریورماه سال ۱۳۹۰ (۱۲۰ ماه) بعد از استخراج ترازهای آب و انتقال داده‌ها به محیط نرم‌افزار MS Excel به دست آمد. در نرم‌افزار ArcGIS اقدام به تهیه شبکه

بارش سالانه با ۵۰۱ میلی‌متر نیز در همین ایستگاه در سال ۱۳۸۵ و حداقل بارش سالانه با ۱۵۵/۹ میلی‌متر مربوط به سال ۱۳۸۹-۹۰ ایستگاه فرودگاه اردبیل می‌باشد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی آبخوان دشت اردبیل

جدول ۱- خلاصه آمار سالانه طی دوره ۱۰ ساله ایستگاه‌های هواشناسی

ایستگاه	آبی بیگلو	اردبیل	سامیان	فرودگاه اردبیل	نمین	هیر
حداکثر	۴۹۹/۸	۳۰۹/۷	۲۸۴	۳۶۹/۸	۳۱۹/۷	۵۰۱
متوسط	۳۴۸/۴	۲۶۶/۴	۲۲۱/۶	۲۴۱/۸	۲۶۴/۹	۳۳۵/۷
حداقل	۲۰۱/۹	۱۸۷/۲	۱۶۲/۵	۱۵۵/۹	۱۹۳/۶	۲۱۶/۵

۲-۲- تئوری روش حرکت تجمعی بارش

روش حرکت تجمعی بارش^۵ (CRD) براین اساس استوار است که نوسانات سطح آب زیرزمینی به وسیله رخدادهای بارندگی به وجود می‌آید. Bredenkamp و همکاران (۱۹۹۵) این روش را به طور وسیعی در آفریقای جنوبی با موفقیت به کار بردند. Van و Xu (۲۰۰۱) طی مطالعه‌ای این روش را برای مطابقت با سری‌های زمانی بارش، اصلاح و الگوریتم توسعه یافته جدیدی را پیشنهاد کردند. در این روش تغذیه آب زیرزمینی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R_T = rCRD_i = S_y [\Delta h_i + (Q_{Pi} + Q_{out}) / (AS_y)] \quad (1)$$

$$CRD_i = \sum_{i=1}^N P_i - \left(2 - \frac{1}{P_{av}^i} \sum_{i=1}^N P_i \right) i P_i \quad (2)$$

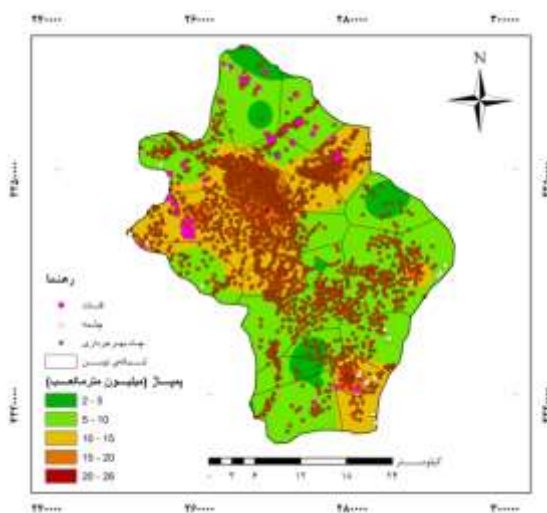
آبیاری که سبب تغذیه آب زیرزمینی می‌شود و همچنین آب‌دهی ویژه برآورد گردید. مدل‌سازی معکوس با در نظر گرفتن روش CRD به‌عنوان مدل پیشرو (Forward) (معادله (۳)) و با کمک الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای حداقل ساختن تابع هدف (اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده نوسانات سطح آب زیرزمینی با روش CRD و مقادیر مشاهده‌ای) انجام شد. مقادیر ورودی و خروجی استفاده‌شده در این پژوهش حاصل نتیجه پژوهش توسط Ghafari و همکاران (۲۰۱۸) با روش WTF می‌باشد. در مدل‌سازی معکوس از کد نوشته‌شده توسط Xu و Van Tonder (۲۰۰۱) در محیط نرم‌افزار MSEExcel استفاده شد. در این کد، فرآیند بهینه‌سازی از طریق ماژول^۸ تعبیه‌شده در کد با استفاده از روش بهینه‌سازی کلاسیک نیوتن انجام شد.

۲-۵- اعتبارسنجی مدل

در مرحله اعتبارسنجی، به‌منظور سنجش صحت پارامترهای برآورد شده در مرحله واسنجی، بدون استفاده از روش معکوس، با استفاده از پارامترهای برآورد شده در مرحله واسنجی مدل و معادله (۳) نوسانات سطح آب زیرزمینی از مهرماه سال ۱۳۸۵ تا شهریورماه سال ۱۳۹۰ (۶۰ ماه) شبیه‌سازی و با مقادیر مشاهده‌ای مقایسه شد. برای مقایسه نوسانات آب زیرزمینی مشاهده‌شده و برآورد شده از محک آماری RMSE استفاده گردید:

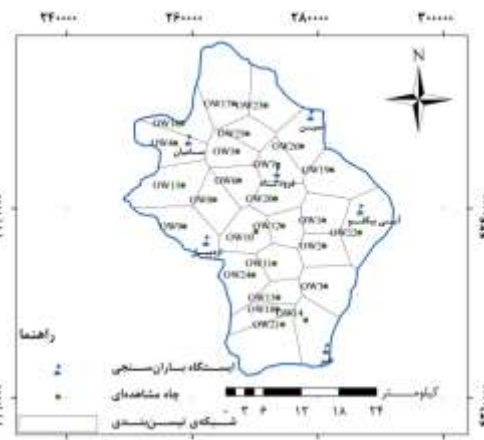
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (W_o - W_e)^2}{n}} \quad (4)$$

که در آن، W_o ، سطح آب زیرزمینی مشاهده‌ای، W_e ، سطح آب زیرزمینی برآورد شده و n ، تعداد مشاهدات است.



شکل ۳- متوسط سالانه برداشت آب از آبخوان اردبیل

تیسسن^۷ آن‌ها گردید. شکل (۲) موقعیت ۲۶ چاه مشاهده‌ای و ایستگاه‌های باران‌سنجی به‌کار رفته در این پژوهش به‌همراه شبکه تیسسن چاه‌های مشاهده‌ای را نشان می‌دهد. برداشت آب در آبخوان از طریق چاه‌ها، چشمه‌ها و قنوات صورت می‌گیرد و طبق بررسی‌ها، در مناطقی از قسمت‌های دشت که چاه‌های بهره‌برداری بیشتری وجود دارد و همچنین، مناطقی که زمین‌های زراعی آبی حاصل‌خیزتری دارند (بیشتر در اطراف شهرستان‌های اردبیل و نمین) میزان پمپاژ، بسیار بیشتر از مناطقی است که چاه‌های کم‌تر و زمین‌های زراعی با حاصلخیزی کم و یا دیم دارند. شکل (۳) موقعیت چاه‌های بهره‌برداری و میزان پمپاژ سالانه آبخوان را نشان می‌دهد.



شکل ۲- موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای و ایستگاه‌های

تمامی عوامل ذکرشده برای هر یک از پلی‌گون‌های شبکه تیسسن، به‌صورت جداگانه، مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌عبارت‌دیگر، هرکدام از تیسسن‌ها همانند یک آبخوان در نظر گرفت شد. برای این کار بعد از استخراج تغییرات مشاهده‌شده سطح آب از اطلاعات چاه‌های مشاهده‌ای انتخاب شده، مقادیر بارش، مقادیر خارج‌شده از آبخوان از طریق چاه‌ها (۱۹۱۷ حلقه چاه فعال)، چشمه‌ها (۲۳ چشمه دائمی و سه چشمه فصلی) و قنوات (۶۲ حلقه) (شکل (۳)) و مقادیر آبیاری در هر یک از محدوده‌های مربوط به چاه مشاهده‌ای در ۱۲۰ ماه (مهرماه سال ۱۳۸۰ تا شهریورماه سال ۱۳۹۰) استخراج گردید.

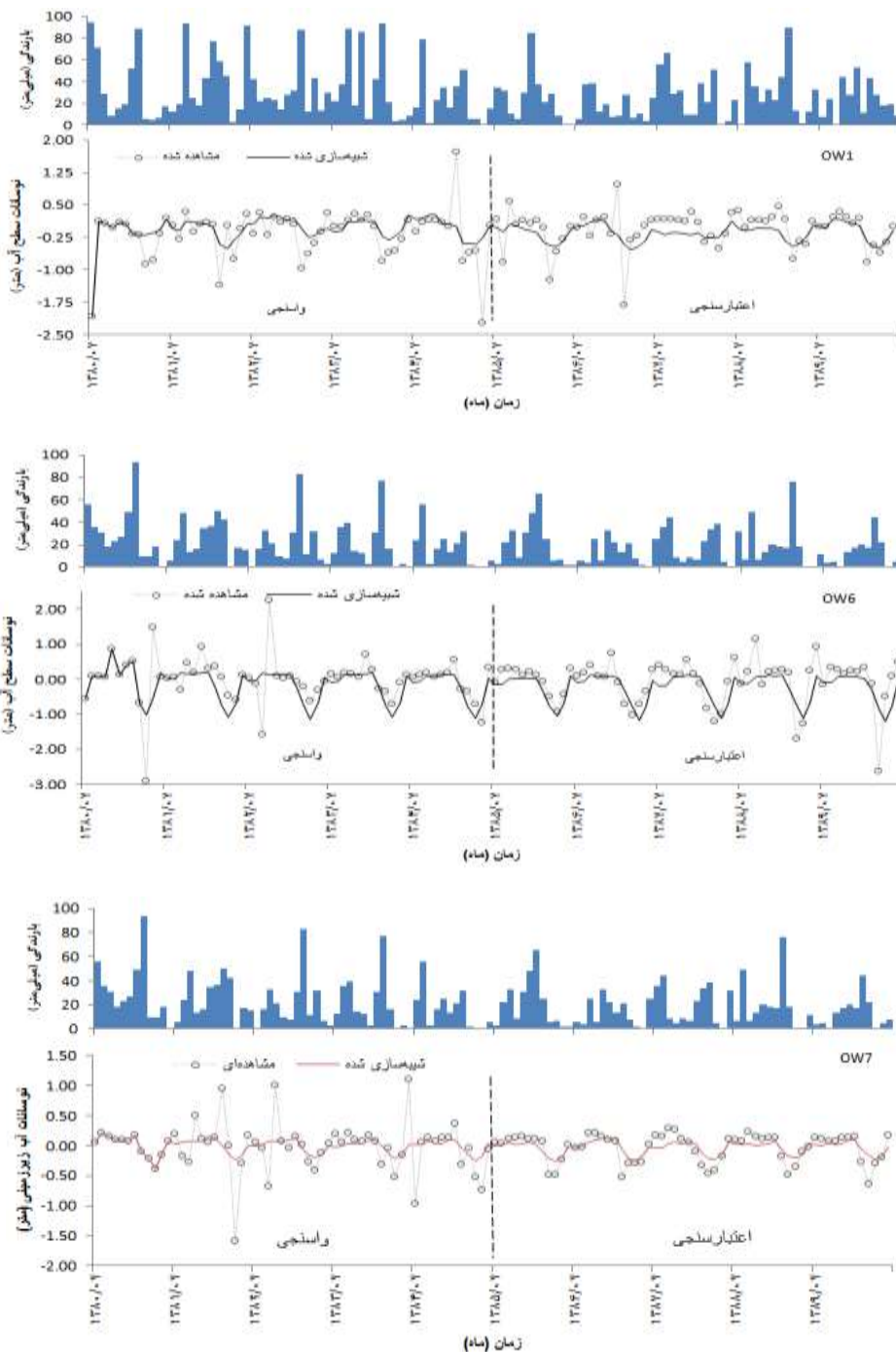
۲-۴- واسنجی مدل

اطلاعات استخراج‌شده به دو قسمت تقسیم گردید. اطلاعات از مهرماه سال ۱۳۸۰ تا شهریورماه سال ۱۳۸۵ (۶۰ ماه)، برای واسنجی استفاده گردید. در قسمت واسنجی با استفاده از مدل-سازی معکوس (Inverse Method)، پارامترهای کسر بارش، کسر

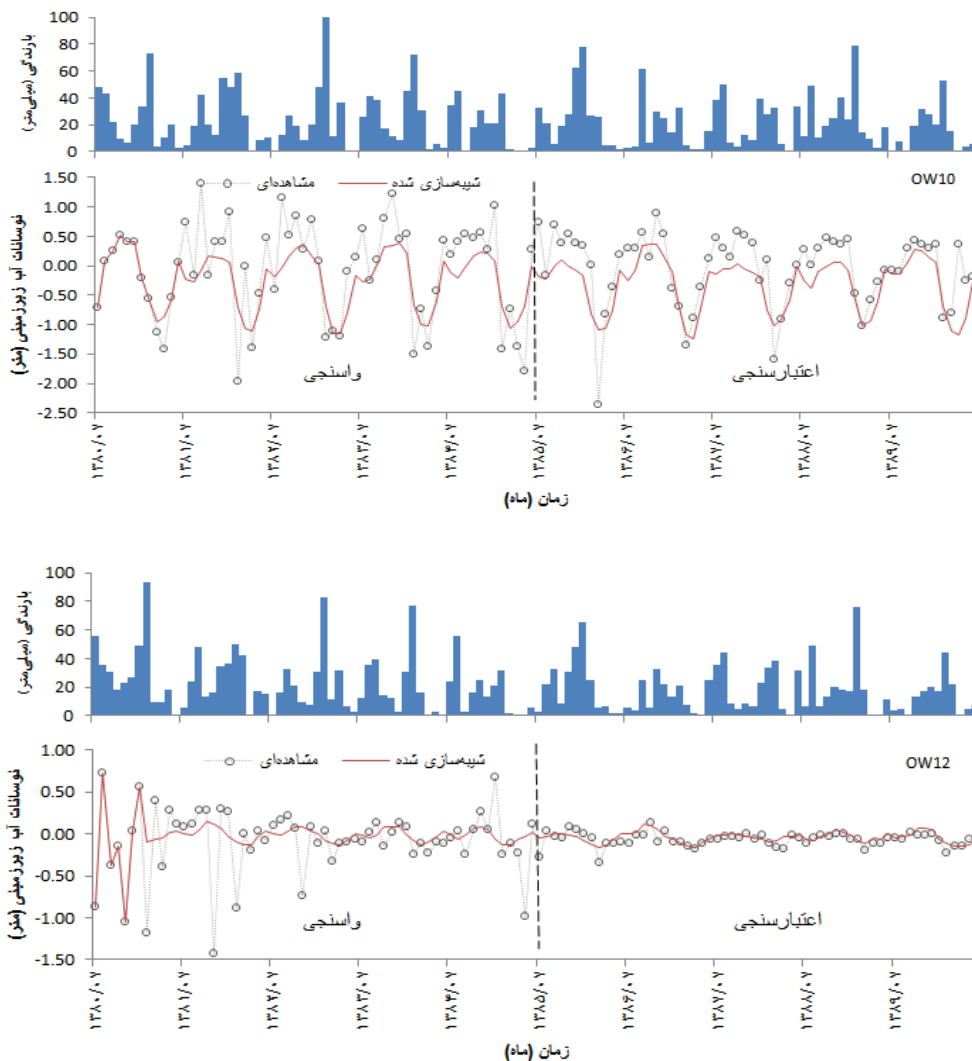
۳- نتایج

گرفت در موقع تخمین پارامترهای مدل، تابع هدف "حداقل" شده است. سازگاری مناسب نوسانات سطح آب شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در قسمت اعتبارسنجی بیانگر دقت زیاد پارامترهای برآورد شده می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که روش معکوس و الگوریتم طراحی شده عملکرد مناسبی داشته است. با توجه به شکل‌های مذکور ملاحظه می‌شود که در برخی نقاط به-خصوص نقاط حداقل و حداکثر نوسانات سطح آب زیرزمینی، شبیه‌سازی مناسب نمی‌باشد.

شبیه‌سازی: نوسانات مشاهده شده و شبیه‌سازی شده به همراه مقادیر بارش ماهانه در دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی برای شش چاه مشاهده‌ای به‌عنوان نمونه در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است. نتیجه شبیه‌سازی چاه‌های دیگر نیز به همین روال است. با توجه به انطباق مناسب سطح آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده با مشاهده شده در قسمت واسنجی، می‌توان نتیجه

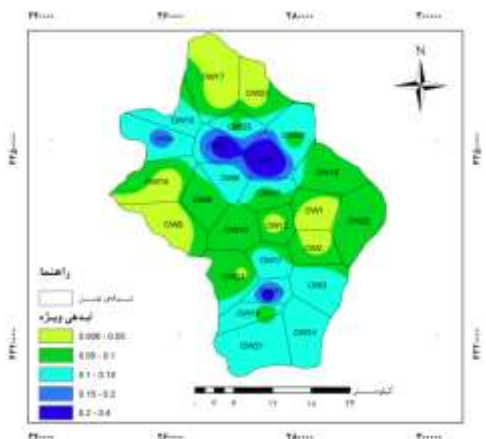


شکل ۴- شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی چاه‌های مشاهده‌ای ۱، ۶ و ۷



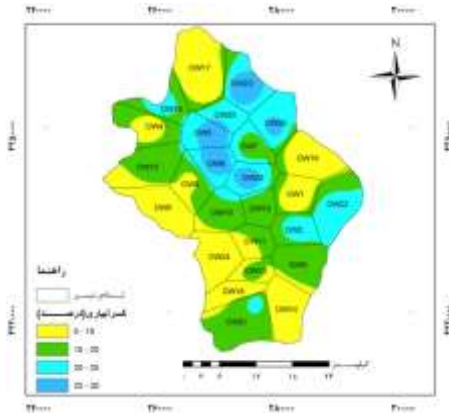
شکل ۵- شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی چاه‌های مشاهده‌ای ۱۰ و ۱۲

افزایش توانایی خاک در نفوذ دادن آب به سطوح زیرین و افزایش آب‌دهی ویژه شده است.



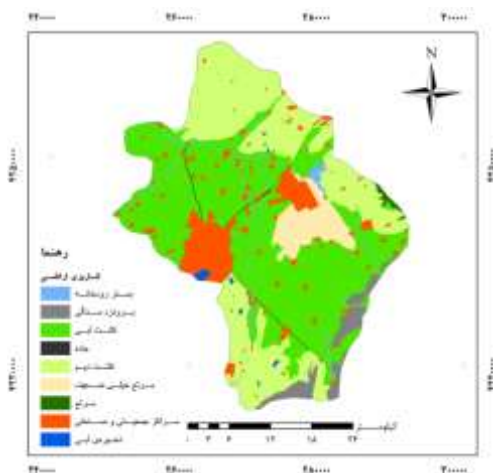
شکل ۶- پهنه‌بندی آب‌دهی ویژه

آب‌دهی ویژه (S_r): در این پژوهش، آب‌دهی ویژه (S_r) در قسمت‌های مختلف آبخوان مقداری نسبتاً متفاوت به دست آمد ولی در اکثر مناطق مقدار آن کم‌تر از ۰/۱ می‌باشد (شکل (۶)). حداقل و حداکثر این پارامتر در آبخوان به ترتیب ۰/۰۶ و ۰/۴ به دست آمد. پارامتر آب‌دهی ویژه که به ساختار زمین‌شناسی، بستگی دارد با توجه به وضعیت خاک منطقه (شکل (۷)) مشاهده می‌شود که در نواحی شمالی (پلی‌گون‌های ۴، ۵، ۶، ۷، ۲۵ و ۲۶) با بافت خاک متوسط، دارای آب‌دهی ویژه بیشتری نسبت به سایر مناطق می‌باشد. آب‌دهی ویژه در بخش‌های میانه (پلی‌گون‌های ۱، ۲ و ۱۲)، قسمت غربی آبخوان (پلی‌گون‌های ۹ و ۱۵) و منطقه شمالی (پلی‌گون‌های ۱۷ و ۲۳) کم است. بخش‌های میانه دارای بافت خاک سنگین و شور، بخش غربی دارای خاک سنگین تا خیلی سنگین و منطقه شمالی نیز دارای خاک تقریباً سنگین می‌باشد. در قسمت‌های جنوبی نیز وجود خاک‌های سنگریزه‌دار، باعث

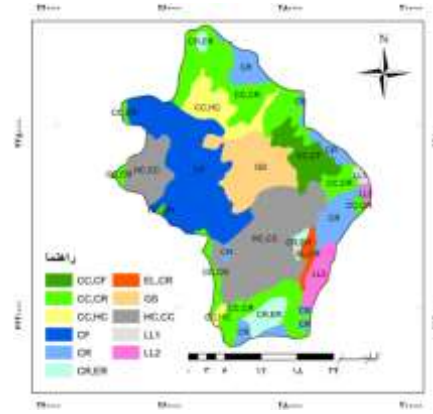


شکل ۹- پهنه‌بندی کسری از آبیاری که موجب تغذیه گردید

شکل (۱۰) وضعیت کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همان‌طور که گفته شد، روش CRD بر این اساس استوار است که رخدادهای بارندگی موجب تغذیه سفره آب زیرزمینی می‌گردند. بنابراین در این روش‌ها، در زمان رسیدن آب باران به سطح سفره، طول دوره‌ای که رخدادهای بارشی در آن‌ها در تغذیه سفره شرکت می‌کنند و این‌که چه زمانی طول می‌کشد تا آن‌ها به سطح سفره برسند، مهم است. بنابراین در این روش علاوه بر محاسبه پارامترهایی که در روش قبل گفته شد، پارامترهای طول دوره و زمان تأخیر نیز به‌دست آمد. از این‌رو در این پژوهش علاوه بر مقدار تغذیه طبیعی طول دوره بارندگی که موجب تغذیه آبخوان می‌گردد و نیز زمانی که لازم است آب رسیده به سطح خاک به سطح آب زیرزمینی برسد نیز با روش CRD محاسبه گردید. به منظور ارزیابی نتایج حاصل از واسنجی از آماره RMSE استفاده شد (جدول (۲)).

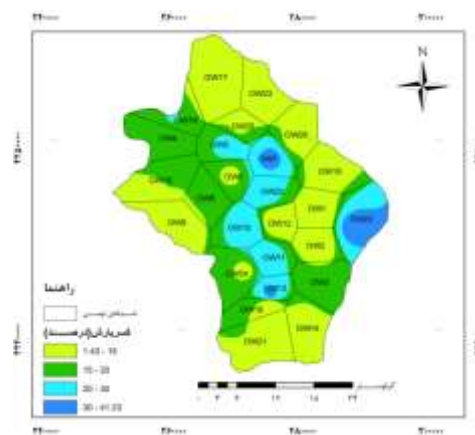


شکل ۱۰- کاربری اراضی آبخوان دشت اردبیل

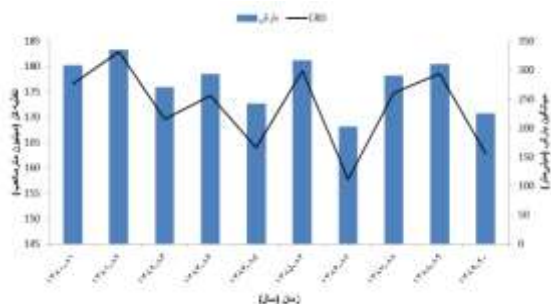


شکل ۷- انواع خاک در آبخوان اردبیل (سمت چپ، علائم: Calcaric :CF, Haplic Calcisols :HC, Calcaric :CC Cambisols :CR, Eutric Leptosols :EL, Gleyic Solonchaks :GS, Fluvisols :LL, Eutric Regosols :ER, Calcaric Regosols :LR)
(Leptosols)

کسر بارندگی و آبیاری‌ها: نتایج به‌دست‌آمده برای مقادیر کسر بارندگی و آبیاری که به سفره آب زیرزمینی می‌رسد نشان می‌دهد که این دو پارامتر با آب‌دهی ویژه همبستگی زیادی دارند. در بیشتر مناطق آبخوان، کمتر از ۲۰ درصد از بارش‌ها (شکل (۸)) و آبیاری‌ها (شکل (۹)) موجب تغذیه سفره آب زیرزمینی شده است. بیش‌ترین مقدار تأثیر بارندگی‌ها و آبیاری‌ها در تغذیه آب زیرزمینی در اطراف شهرهای اردبیل و نمین و نیز در قسمت غربی آبخوان در اطراف روستای آبی‌بیگلو به‌دلیل وجود زمین‌های زراعی حاصلخیز مشاهده می‌شود. مسئله حاصلخیز بودن زراعت آبی در میزان نفوذ آب باران و آبیاری‌ها چنان تأثیرگذار است که با دقت در مناطق جنوبی شهر اردبیل یا دیگر مناطقی که به‌صورت دیم کشت می‌شوند مشاهده می‌گردد که میزان نفوذ آب باران و آبیاری به خاک بسیار کم است.



شکل ۸- پهنه‌بندی کسری از بارندگی که موجب تغذیه گردید



شکل ۱۱- مقدار تغذیه سالانه آب زیرزمینی آبخوان دشت اردبیل

۴- بحث و نتیجه‌گیری

نتایج آب‌دهی ویژه نشان داد که در مناطق دارای خاک‌های سنگین و شور میزان آب‌دهی ویژه کم است به طوری که Bredenkamp و همکاران (۱۹۹۵) و Moosavi و Rasoulzadeh (۲۰۰۷) نیز در مطالعه خود در آفریقای جنوبی و دشت ارسنجان که خاک‌های سنگین و شور دارند میزان آب‌دهی ویژه را به ترتیب ۲/۳۹ و ۳/۴۲ درصد به دست آوردند.

با مقایسه نقشه کاربری اراضی با نقشه مقدار تغذیه در اثر بارندگی، مشاهده می‌گردد مقدار تغذیه و کاربری اراضی با یکدیگر هم‌خوانی دارند، به طوری که اطراف شهر هیر که باغات زیادی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد و آب بارندگی‌ها بیشتر می‌تواند نفوذ کند. در مراتع ضعیف مقدار تغذیه به علت از بین رفتن پوشش گیاهی و نیز در مناطق شهری (شهرستان اردبیل) به دلیل غیرقابل نفوذ بودن سطح شهر کاهش یافته است. تأثیر کم بارندگی‌ها در تغذیه در حاشیه‌های شمالی و شمال شرق آبخوان در حالی که در برخی از این مناطق آب‌دهی ویژه زیاد است به دلیل تراکم بیشتر آبراهه‌ها در این قسمت‌ها است. نکته حائز اهمیت در نتایج تغذیه آب زیرزمینی از طریق بارندگی‌ها و آبیاری‌ها این است که بخش جنوبی آبخوان آب‌دهی ویژه زیادی دارد و طبیعتاً انتظار می‌رفت مقدار تغذیه در اثر بارندگی و آبیاری بیشتر شود در حالی که مقدار تغذیه در این قسمت‌ها کم به دست آمد. با دقت در شیب توپوگرافیکی بالا در این مناطق صحت آن به وضوح روشن است. شیب توپوگرافیکی زیاد باعث می‌گردد آب در سطح خاک یا سطوح زیرقشری حرکت کرده و از منطقه خارج شود و به سفره آب زیرزمینی نرسد.

بیشتر پژوهش‌ها که با استفاده از مدل‌های تجربی به برآورد تغذیه آب‌های زیرزمینی ناشی از بارندگی و آبیاری پرداخته‌اند در مناطق گرم و خشک جهان انجام شده است و بنابراین میزان تأثیر بارندگی در تغذیه سفره آب زیرزمینی در آن‌ها بیشتر از تأثیر آبیاری‌ها بوده است که به دلیل وسعت کم یا نبود مزارع آبی است (Moosavi و Rasoulzadeh، ۲۰۰۷). اما در این پژوهش که در

جدول ۲- زمان تأخیر، طول دوره بارندگی منجر به تغذیه، تغذیه

شماره چاه	طول دوره بارندگی (ماه)	زمان تأخیر (ماه)	کل و RMSE	
			تغذیه (M^3)	RMSE
OW1	۵	۷	۲۵۲۸۳۸۶۶	۰/۴۴۵
OW2	۵	۱۰	۴۴۱۷۸۴۸۴	۰/۵۹۸
OW3	۲	۱۱	-۵۲۴۷۷۸۳۳	۰/۲۸۰
OW4	۷	۶	۷۸۰۸۹۲۴۲	۰/۳۴۵
OW5	۴	۲	۱۴۴۸۷۰۳۱۳	۰/۳۳۱
OW6	۱۰	۳	۱۳۳۹۲۳۵۷۰	۰/۵۸۵
OW7	۴	۱۰	۱۲۰۴۸۱۷۸۲	۰/۳۵۹
OW8	۵	۵	۷۱۶۵۶۹۶۸	۰/۵۸۸
OW9	۶	۵	۵۹۱۷۶۹۹۳	۰/۲۲۰
OW10	۴	۸	۷۱۲۵۶۲۳۱	۰/۵۴۲
OW11	۵	۸	۳۹۴۴۱۳۳۸	۰/۵۱۸
OW12	۳	۸	۲۳۳۷۶۹۳۵	۰/۳۵۴
OW13	۳	۴	۵۸۱۶۲۰۸	۰/۴۸۱
OW14	۵	۷	۱۹۵۴۶۰۶۱۰	۰/۴۶۷
OW15	۱	۵	۱۵۵۳۹۸۵۱۹	۰/۷۸۶
OW16	۳	۷	۴۰۵۲۸۸۸۲	۰/۲۰۱
OW17	۵	۱۰	۲۴۴۰۲۶۷۳	۰/۲۶۳
OW18	۹	۴	-۲۲۱۱۶۹۷	۰/۲۸۴
OW19	۲	۵	-۷۷۸۳۸۰۵	۰/۳۱۰
OW20	۴	۸	۸۰۷۸۵۰۲۴	۰/۵۹۳
OW21	۳	۹	۷۸۷۸۱۷۰۲	۰/۱۷۲
OW22	۳	۹	۱۷۱۲۴۲۷۶۴	۱/۰۰
OW23	۸	۱۱	۳۳۴۴۱۴۳۱	۰/۴۵۵
OW24	۶	۱۱	۷۹۶۵۴۳۳	۱/۶۱۸
OW25	۲	۵	۲۷۲۲۷۶۹۵	۰/۱۷۴
OW26	۸	۱	۱۵۰۱۸۱۳۸۰	۰/۱۷۲

شکل (۱۱) مقادیر برآوردی تغذیه آب زیرزمینی در ۱۰ سال آماری مورد مطالعه با مدل CRD را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌گردد، مقادیر تغذیه آب زیرزمینی در هر سال با بارندگی در همان سال هم‌خوانی دارد که با افزایش بارندگی، تغذیه نیز افزایش و با کاهش آن، تغذیه نیز کاهش می‌یابد. به‌طور کلی میزان تغذیه آب زیرزمینی با این روش ۱۷۲ میلیون مترمکعب در سال به دست آمد.

منطقه‌ای با مزارع آبی و باغ‌های زیاد صورت گرفته است میزان تأثیر آبیاری در تغذیه سفره به‌همان میزان تأثیر بارندگی و حتی به مقدار جزئی بیشتر از آن است. چنانچه Singh (۲۰۱۱) در مطالعه‌ای با هدف ارزیابی راه‌حل‌های مناسب برای جلوگیری از غرقاب و شور شدن آبخوانی واقع در ایالت هاریانای هند در اثر آبیاری مزارع کشت برنج، انجام داده است نشان داد که آبیاری زیاد باعث شده است که آب نفوذ کرده از آبیاری‌ها ۴۹ درصد از کل تغذیه آبخوان را شامل گردد. این امر با نتایج Ahmadi و همکاران (۲۰۱۵ و ۲۰۱۲) و همچنین Pahlevani Majdabady و همکاران (۲۰۲۰) نیز مطابقت می‌کند.

در پژوهش حاضر، متوسط کسر بارندگی که باعث تغذیه آبخوان می‌گردد ۱۶/۱۹ درصد و متوسط کسر آبیاری منجر به تغذیه را معادل ۱۷/۴۶ درصد برای کل آبخوان برآورد گردید. Ghafari و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از روش WTF متوسط کسر بارندگی و آبیاری که منجر به تغذیه آبخوان دشت اردبیل می‌شود به ترتیب ۱۶/۸۴ و ۲۲/۵۳ درصد برآورد کردند. علت اختلاف، ناشی از ماهیت روش‌های CRD و WTF می‌باشد. Ahmadi و همکاران (۲۰۱۴)، مقادیر تغذیه در اثر بارش و آبیاری را برای دشت نیشابور با دو روش CRD و RIB محاسبه کردند. نتایج حاکی از اختلاف دو روش، در برآورد مقادیر یاد شده داشت.

۵- مراجع

- Ahmadi T, Ziaei AN, Rasoulzadeh A, Davary K, Esmaili K, Izady A, "Mapping groundwater recharge areas using CRD and RIB methods in the semi-arid Neishaboor Plain", Iran, Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8, 2921-2935.
- Ahmadi T, Ziaei AN, Davari K, Rasoulzadeh A, Faridhoseini AR, Izadi A, "Estimation of groundwater recharge using various methods in Neishaboor Plain, Iran. In Hadi & Copty (Eds.)", Groundwater Modelling and Management under Uncertainty (pp. 9-15). London: Taylor & Francis Group, 2012.
- Baalousha H, "Using CRD method for quantification of groundwater recharge in the Gaza Strip", Palestine, Environmental Geology, 2005, 48 (7), 889-900.
- Bredenkamp DB, Botha LJ, Van Tonder GJ, Van Rensburg HJ, "Manual on quantitative estimation of groundwater recharge and aquifer storativity", WRC Report TT 73/95, Pretoria, South Africa, 1995, 407.
- Crosbie RS, Binning P, Kama JD, "A time series approach to inferring groundwater recharge using the water table fluctuation method", Water Resources Research, 2005, 41 (1). DOI: 10.1029/2004WR003077.
- Farthing MW, Kees CE, Todd SC, Kelley CT, Miller CT, "Efficient steady-state solution techniques for variably saturated groundwater flow", Advances in Water Resources, 2003, 26, 833-849.
- Ghafari H, Rasoulzadeh A, Raouf M, Eameali A, "Estimation of natural groundwater recharge using WTF method (case study: Ardabil plain aquifer)",

شبیه‌سازی سیستم در حالت واقعی نیازمند شرایط اولیه می‌باشد و در صورت ورود شرایط اولیه ناصحیح، نتایج حاصل از مدل‌سازی نیز تحت تأثیر قرار گرفته و منطبق با واقعیت نخواهد شد و نیز تخمین پارامترهای کسری از بارندگی و آبیاری و همچنین آب‌دهی ویژه در شرایط استفاده از مدل به‌صورت مستقیم بسیار مشکل است (Farthing, ۲۰۰۳)؛ Jones و همکاران، ۲۰۰۸؛ Rasoulzadeh, ۲۰۰۶). بنابراین نتایج این پژوهش نیز نشان داد که رویکرد مدل‌سازی معکوس روش مناسبی برای مدل‌سازی در شرایطی است که اطلاعات ورودی به‌طور کامل از قطعیت برخوردار نیست.

Scanlon و همکاران (۲۰۰۲) معتقدند که نواحی مختلف در مقیاس‌های زمانی و مکانی متغیر، برآوردهایی از تغذیه ارائه می‌دهد که نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش نیز نشان داد که میزان تغذیه در طول زمان و در مکان‌های مختلف متفاوت است. این امر با نتایج Crosbie و همکاران (۲۰۰۵) و Varni و همکاران (۲۰۱۳) نیز مطابقت می‌کند.

میزان تغذیه سالانه آب زیرزمینی در این پژوهش ۱۷۲ میلیون مترمکعب به‌دست آمد که این مقدار در مقایسه با مقادیر تخمین زده‌شده توسط Baalousha (۲۰۰۵)، در نوار غزه فلسطین،

۹. Haryana

- Journal of Civil and Environmental Engineering, 2018, 48 (1), 43-52.
- Jones JP, Sudicky EA, McLaren RG, "Application of a fully-integrated surface-subsurface flow model at the watershed-scale: A case study", Water Resources Research, 44, 1-13.
- Rasoulzadeh A, "Three-Dimensional variable-saturated numerical modeling of groundwater management in a coastal aquifer", PhD Thesis, Shiraz University, 2006.
- Rasoulzadeh A, Moosavi SAA, "Study of groundwater recharge in the vicinity of Tashk lake area", Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B, Engineering, 2007, 31, 509-521.
- Pahlevani Majdabady M, Rasoulzadeh A, Kanooni A, Ahmadzadeh GR, "estimation of groundwater recharge originating from agricultural irrigation and rainfall in shyramyn plain", Iran. Irrigation and Drainage, 2020, 69 (1), 107-120.
- Scanlon BR, Healy RW, Cook PG, "Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge", Hydrogeology Journal, 2002, 10, 18-39.
- Singh A, "Estimating long-term regional groundwater recharge for the evaluation of potential solution alternatives to waterlogging and salinisation", Journal of Hydrogy, 2011, 406, 245-255.
- Soltani S, Abedi J, "Estimation of natural groundwater recharge in Krone sub-basin in Isfahan region using CRD method", Journal of Water and Watershed, 2010, 4, 92-97.
- Sun X, Xu Y, Jovanovic NZ, Kapangaziwiri E, Brendonck L, Bugan RDH, "Application of the rainfall infiltration breakthrough (RIB) model for groundwater recharge estimation in west coastal South Africa", Water SA, 2013, 39 (2), 221-230.
- Varni M, Comas R, Weinzettel P, Dietrich S, "Application of water table fluctuation method to Charaterize groundwater recharge in the Pampa plain", Argentina, Hydrological Sciences Journal, 2013, 58 (7), 1445-1455.
- Website weather in Ardebil, www.ardebil.ir
- Whitaker DA, Tosen R, Storry RB, "CRD Method For Groundwater Pumping Assessment in Dolomites", South Africa, Eurock -Isrm International Symposium, 2009, 157-164.
- Xu Y, Van Tonder GJ, "Estimation of recharge using a revised CRD method", ISSN 0378-4738, Water SA, 2001, 27 (3), 341-343.

EXTENDED ABSTRACT

Estimation of Natural Recharge of Ardabil Aquifer Using CRD Method

Hossein Ghafari^a, Ali Rasoulzadeh^{b,*}, Majid Raof^b, Abazar Esmeali Ouri^c

^a University of Mohaghegh Ardabili and Member of Natural Resources and Watershed Management, Parsabad, 56918-65531, Iran

Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, 56199-11367, Iran

^b Water Engineering Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, 56199-11367, Iran

^c Rangeland and Watershed Management Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Member of Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, 56199-11367, Iran

Received: 03 January 2020; **Review:** 10 September 2021; **Accepted:** 18 September 2021

Keywords:

CRD method, Specific yield, Fraction of irrigation, Fraction of rainfall, Ardabil plain aquifer.

1. Introduction

Groundwater recharge from rainfall and the return flow of irrigation is essential for sustainable water resources management, groundwater modeling. Quantification of the rate of ground water recharge is a basic prerequisite for efficient ground water resource management. The rate of aquifer recharge is one of the most difficult components to measure when evaluating ground water resources. Numerous techniques are used to quantify recharge rate. One of these techniques is the cumulative rainfall departure (CRD) method. This method is considered to be one of the most promising and attractive due to its ease of use and low cost of application in semiarid areas. Numerous studies have been carried out to estimate groundwater recharge from rainfall. The CRD is a water balance method which depends on groundwater level fluctuations in shallow aquifers as a function of rainfall. Xu and van Tonder (2001) and Rasoulzadeh and Moosavi (2007) used the revised CRD method and Ahmadi et al. (2014) applied the CRD method to assess groundwater recharge in arid and semi-arid region.

2. Methodology

Ardabil plain is located in northwest of Iran with a cold semi-arid environment and 279.8 mm annual average precipitation. The total area of the groundwater basin is approximately 1217.17 km² and is located between 48° 8' 45" to 48° 37' 30" east longitude and 38° 2' 15" to 38° 31' 00" north latitude. The major source of water for irrigation purposes in the study area is groundwater. The annual average rainfall is 279.8 mm. In this study, monthly rainfall from 2001 to 2011 (10 years) was used in development of the conceptual model. The objective of the conceptual model is to capture the salient physical processes controlling the transient response of the groundwater table elevation to seasonal rainfall events and irrigation practices, and yield reliable estimates of groundwater recharge as well as specific yield. These aquifer properties can be used as input to simulate the management of the basin-wide groundwater resource. The CRD model is applied to estimate groundwater recharge. Regarding the CRD model, a few nondeterministic data such as groundwater level measurements, rainfall records, inflow and outflow, specific yield, as well as a groundwater extraction data set are essential to execute the CRD model. The study area has been divided in 26 polygons based on the observation wells using the Thiessen method with the help of ARCGIS. A conceptual model was constructed for each of the 26 polygons

* Corresponding Author

E-mail addresses: ghafari_h67@yahoo.com (Hossein Ghafari), rasoulzadeh@uma.ac.ir (Ali Rasoulzadeh), majidraof2000@yahoo.co.uk (Majid Raof), abazar.esmali@gmail.com (Abazar Esmeali Ouri).

(one for each observation well). Then, monthly records of rainfall, the pumping rate, inflow and outflow were listed against the corresponding groundwater level record for each polygon (observation well). Calibration of the CRD model was implemented in a userfriendly Excel spreadsheet and programmed using a visual basic application (VBA), which was produced by Xu and Van Tonder (2001). The software enables one to manipulate, analyze and display data, and estimate recharge of groundwater based on measured groundwater levels and rainfall. The software minimizes the objective function using the least squares method. The calibration was performed to estimate the fraction of cumulative recharge by rainfall (r), specific yield (S_y), the fraction of withdrawal through pumping wells acts to recharge (λ), lag time and length of related rainfall events for each individual observation well model. The calibration target (objective function) was based on minimizing the difference between the estimated and observed groundwater table elevation in each individual observation well (individual polygon).

3. Results and discussion

The results showed that the water table elevation estimated by using the optimized parameters exhibits approximately a good match with the water table elevation observed for all observation wells. It can be concluded that the used model can successfully describe the groundwater fluctuation in the study area. The results depicted that the S_y ranges from 0.006 to 0.4. The estimated fraction of precipitation (r) and irrigation (λ) which infiltrate to groundwater showed that the less than of 20% of precipitation and irrigation acts to recharge groundwater in the most of area. The results showed that the average of the specific yield is estimated 0.1 and the estimated fraction of irrigation and rainfall that acts to recharge the water table are 17.46 and 16.19 percent respectively. Finally, with obtaining effective parameters in recharge, average of annual groundwater recharge is estimate 172 million cubic meters.

4. Conclusions

The advantage of the CRD model is that specific yield and recharge are estimated at the scale of interest to basin hydrologic studies and that the method requires no extensive in situ instrumentation network. Proper matching between observed and simulated water table assure that the present conceptual model has a potential for estimating groundwater recharge. The result showed that the temporal and spatial variability of recharge from rainfall and return flow of irrigation are sizeable in the study area and need to be considered for groundwater modeling and management. Groundwater recharge would have to be estimated as a temporally and spatially distributed variable.

5. References

- Ahmadi T, Ziaei AN, Rasoulzadeh A, Davary K, Esmaili K, Izady A, "Mapping groundwater recharge areas using CRD and RIB methods in the semi-arid Neishaboer Plain", *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, 8, 2921–2935.
- Rasoulzadeh A, Moosavi SAA, "Study of groundwater recharge in the vicinity of Tashk lake area", *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering*, 2007, 31, 509-521.
- Xu Y, Van Tonder GJ, "Estimation of recharge using a revised CRD method", *Water SA*, 2001, 27 (3), 341-343.