

## آنالیز اثرات پارامترهای مختلف بر تغذیه آب‌های زیرزمینی با استفاده از یک روش هیبریدی

مصطفی گودرزی<sup>۱</sup>، جهانگیر عابدی کوپایی<sup>۱\*</sup>، منوچهر حیدرپور<sup>۱</sup> و حمیدرضا صفوی<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۵/۰۳)

### چکیده

با توجه به تغییرات زیاد وقایع هیدرولوژیکی نسبت به زمان و مکان در مناطق خشک و نیمه‌خشک اندازه‌گیری تغذیه در این مناطق بسیار دشوار می‌باشد. طی سال‌ها هنوز هم روش ثابت و مشخصی برای اندازه‌گیری تغذیه آب‌های زیرزمینی وجود ندارد و تا کنون روش‌های مختلفی برای محاسبه نرخ تغذیه توسعه یافته است. هدف از این تحقیق ارزیابی و ایجاد یک روش هیبریدی برای محاسبه تغذیه آب‌های زیرزمینی می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از یک روش هیبریدی اثرات پارامترهای مختلف بر تغذیه آب‌های زیرزمینی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر تغذیه بافت خاک، بارش، کاربری اراضی، ضخامت ناحیه غیراشباع، شیب زمین، میزان نیاز آبیاری و آبدهی ویژه، می‌باشد که در این بین بارش و بافت خاک بیشترین تأثیر را دارا می‌باشند. نتایج ارزیابی‌ها نشان داد که به‌طور کلی تغییرات اندک بارش و دما اثرات قابل توجهی بر تغذیه می‌گذارند به طوری که با تغییر ۱۰ درصدی بارش میزان تغذیه بین ۱۶ تا ۷۷ درصد تغییر می‌کند، همچنین با تغییر ۱ درجه‌ای دما، میزان تغذیه بین ۶ تا ۴۲ درصد تغییر می‌یابد. براساس نتایج به‌دست آمده حساسیت خاک‌های ریزبافت به این تغییرات خیلی بیشتر از خاک‌های درشت‌بافت می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که تغییرات بارش و تبخیر و تعرق در چهار ماه شامل آذر، دی، بهمن و اسفند اثر قابل ملاحظه‌ای در مقدار نرخ تغذیه سالانه دارا می‌باشند. با استفاده از نتایج این تحقیق می‌توان مناطق آسیب‌پذیر دشت، مکان‌های مناسب و نیز زمان مناسب برای تغذیه مصنوعی در سطح دشت را مشخص نمود. به‌طور کلی نتایج به‌دست آمده از این تحقیق می‌تواند در جنبه‌های مختلف مدیریت آب‌های زیرزمینی بسیار مفید باشد.

واژه‌های کلیدی: تغذیه، روش هیبریدی، آب‌های زیرزمینی، تحلیل سلسله‌مراتبی، روش تورنت وایت، آنالیز حساسیت

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: koupai@yahoo.com

## مقدمه

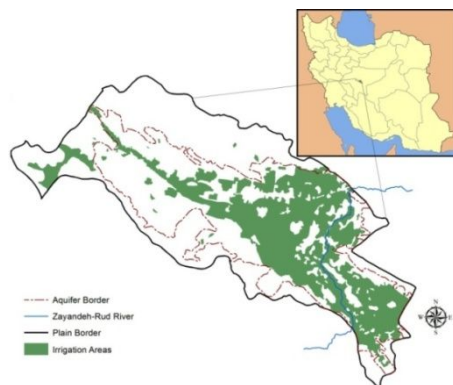
در مناطقی که منابع آب سطحی محدود بوده و یا به راحتی در دسترس انسان قرار ندارند، می‌توان نیاز انسان‌ها را به آب از طریق آب‌های زیرزمینی که در همه جا به‌طور وسیع و گسترده پخش شده‌اند برطرف نمود. در بسیاری از مناطق آب‌های زیرزمینی منبع آب اصلی هم برای مصارف شرب و هم آبیاری می‌باشند (۲۳). حدود ۴۰ درصد از منابع غذایی جهان به‌وسیله کشاورزی فاریاب آبیاری شده با آب‌های زیرزمینی تأمین می‌شود. در مناطق خشک و نیمه‌خشک وابستگی به آب‌های زیرزمینی از ۶۰ تا ۱۰۰ درصد می‌باشد. بنابراین آب‌های زیرزمینی یک منبع آب حیاتی بر روی زمین به‌خصوص برای مناطق خشک و نیمه‌خشک، می‌باشند (۲۱).

گزارش‌های به‌دست آمده از بسیاری از کشورها حاکی از کاهش بین ۱ تا ۳ متری سطح آب درآبخوان‌ها، می‌باشد. در بسیاری از آبخوان‌ها، آب‌های فسیلی در حال استخراج می‌باشد، این درحالی‌است که این آب‌ها دیگر جایگزین نمی‌شوند. تخلیه اکثر آبخوان‌ها برای تأمین آب آبیاری می‌باشد، که سهم بسیار بالاتری نسبت به سایر بخش‌ها دارد. بنابراین مشکل تغذیه آب‌های زیرزمینی کاملاً با امنیت غذایی گره خورده است. واضح است که افزایش هزینه‌ها آخرین عامل بازدارنده برای استخراج آب از آبخوان‌ها می‌باشد. اما یک راه‌حل معقول محاسبه متوسط نرخ تغذیه در یک منطقه و تطبیق نرخ پمپاژ در منطقه مطابق با آن می‌باشد، به‌گونه‌ای که مخزن آب را در سطح مطلوب نگه داشته و بتوان ذخیره مناسبی برای خشکسالی‌های طولانی مدت داشت (۱۴).

با توجه به تغییرات زیاد وقایع هیدرولوژیکی نسبت به زمان و مکان در مناطق خشک و نیمه‌خشک اندازه‌گیری تغذیه در این مناطق بسیار دشوار می‌باشد. در این مناطق تبخیر و تعرق پتانسیل بیشتر از بارش می‌باشد و این بدان معنی است که فقط در بعضی از شرایط تغذیه صورت می‌گیرد. با توجه به این‌که تغذیه در مناطق خشک یک فرآیند پیوسته نمی‌باشد بنابراین مشاهده و اندازه‌گیری آن بسیار مشکل است (۱۶). اندازه‌گیری

نقطه‌ای جوابگوی تغییرات مکانی ناشی از نوع خاک، پوشش گیاهی و توپوگرافی، نمی‌باشد. همچنین فرآیندهای طبیعی مختلفی ممکن است در مقیاس‌های مختلف بر تغذیه تأثیر بگذارند. مواردی مانند جبهه نفوذ، جریان‌های ترجیحی در ساختمان خاک، نشت موضعی، رودخانه‌ها و نهرا مزارع تحت آبیاری، از جمله عوامل تأثیرگذار بر تغذیه می‌باشند. روش‌های اساسی برای محاسبه تغذیه آب‌های زیرزمینی شامل روش اندازه‌گیری مستقیم، روش‌های مبتنی بر روابط تجربی، روش‌های بیلان آبی، روش‌های مبتنی بر قانون دادرسی، ردیاب‌ها، شار صفر جریان (ZFP) و جداسازی جریان پایه می‌باشد (۱۹). براساس این روش‌ها تا کنون مدل‌های مختلفی برای محاسبه تغذیه به‌منظور ارزیابی منابع آب‌های زیرزمینی ایجاد و مورد استفاده قرار گرفته که در این بین می‌توان به روش‌های تجربی و آماری که میزان بارش و تغذیه را به‌هم مرتبط می‌کند (۱۹، ۱۸، ۲۱)، مدل‌های توزیعی فیزیکی مانند ZOODRM، SWAT، Wetspa، Wetspass (۲، ۸، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۱۳)، مدل‌های عددی مانند HELP (۳، ۱۴، ۱۷، ۲۳ و ۲۴) مدل WAVES (۵، ۶ و ۷) مدل VFM (۴، ۹ و ۱۹) مدل HydroGeoSphere (۱۱)، اشاره نمود، که هر یک برای یک شرایط خاص مورد استفاده قرار گرفته و دارای مزایا و معایبی می‌باشند. شرح مفصلی از تحقیقات انجام شده در زمینه روش‌های محاسبه تغذیه توسط هیلی (۱۲)، ارائه شده است.

دلیل این‌که طی سال‌ها هنوز هم روش ثابت و مشخصی برای اندازه‌گیری تغذیه آب‌های زیرزمینی وجود ندارد این است تغذیه یک پدیده پیچیده می‌باشد که در آن با شرایط متفاوتی روبه‌رو هستیم. در بین روش‌های موجود برای محاسبه تغذیه یکی از روش‌های مناسب جهت برآورد تغذیه روش تجربی است. مهم‌ترین مزیت این روش‌ها این است که می‌توان آنها را نسبت به زمان و مکان تغییر داد لذا برای مطالعات مختلف جهت ارزیابی منابع آب زیرزمینی بسیار مناسب می‌باشند. با این وجود، روش‌های تجربی دارای معایب مختلفی از جمله اینکه این مدل‌ها فیزیکی نمی‌باشند و پارامترهای مختلف فیزیکی



شکل ۱. محدوده دشت نجف‌آباد، آبخوان مربوطه و مناطق تحت آبیاری

موجود نیز از گستردگی چندانی برخوردار نمی‌باشد. حداقل و حداکثر ارتفاع حوضه براساس تحلیل‌های انجام شده بر روی حوضه مطابق نقشه‌های DEM اخذ شده از سازمان نقشه‌برداری کشور به ترتیب ۱۵۷۹ و ۲۹۴۲ متر و شیب عمومی حوضه از غرب به شرق و شمال شرق است.

از لحاظ اقلیمی منطقه با وجود منابع نسبتاً غنی آب‌های سطحی و زیرزمینی، جزء اقلیم‌های خشک و بیابانی محسوب می‌گردد. میانگین سالانه بارش در سطح حوضه ۱۵۸ میلی‌متر و تبخیر و تعرق پتانسیل بالغ بر ۱۵۰۰ میلی‌متر محاسبه گردیده است. در شکل ۱ موقعیت و محدوده حوضه آبریز و آبخوان مورد مطالعه و سطوح تحت آبیاری موجود در منطقه که براساس آنالیز و تفسیر تصاویر ماهواره‌ای در سیستم اطلاعات جغرافیایی تعیین گردیده است، نشان داده شده است.

در این تحقیق ابتدا براساس پارامترهای اساسی مؤثر بر تغذیه، ناحیه‌های همگن تغذیه مشخص و منطقه‌بندی شد. پس از تعیین نواحی همگن تغذیه‌ای با استفاده از روش تورنت وایت و متر (Thornthwaite and Mather) مقدار تغذیه آب‌های زیرزمینی برای هر یک از این نواحی تعیین و معادله غیرخطی تغذیه برای هر یک از نواحی با توجه به پارامترهای مؤثر از جمله بارش، آبیاری، تبخیر و تعرق و ضخامت لایه غیراشباع، استخراج گردید. سپس این نواحی تغذیه‌ای به مدل MODFLOW وارد شده و فرآیند مدل‌سازی، اصلاح تغذیه و کالیبراسیون مدل‌های تجربی در مدل MODFLOW ادامه یافت.

مؤثر در تغذیه را در نظر نمی‌گیرند و در صورت وقوع تغییرات در وضعیت فیزیولوژی آبخوان اگر اصلاح نشوند، کاربرد خود را از دست می‌دهند. یکی از راه‌های اصلاح معادلات تجربی استفاده از روش‌های هیبریدی می‌باشد. لذا در این تحقیق با توجه به شرایط کلی منطقه ضمن ارائه یک روش هیبریدی برای محاسبه تغذیه آب‌های زیرزمینی اثر پارامترهای مختلف بر تغذیه آب‌های زیرزمینی مورد ارزیابی قرار گرفت.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه دشت نجف‌آباد است که بخشی از حوضه بزرگ زاینده‌رود بوده و مهم‌ترین دشت از لحاظ کشاورزی در حوضه زاینده‌رود می‌باشد. در واقع عبور رودخانه زاینده‌رود و وجود شبکه آبیاری و زهکشی در بخش جنوب شرقی آبخوان دشت نجف‌آباد موجب شده تا این دشت به بزرگ‌ترین قطب کشاورزی در استان اصفهان تبدیل شود. همچنین این مسئله باعث شده است که این منطقه از نظر هیدرولوژیکی شرایط متفاوتی نسبت به سایر آبخوان‌ها داشته باشد. وسعت کل محدوده مطالعاتی ۱۷۱۲ کیلومترمربع که آبخوان آبرفتی ۹۴۰/۹ کیلومترمربع از دشت را شامل می‌شود. این دشت به لحاظ جغرافیایی بین مدار ۵۷° ۵۰ تا ۲۶° ۴۴' ۵۱" طول شرقی و مدارهای ۱۳" ۲۰° ۳۲ تا ۲۱° ۴۹' ۳۲" عرض شمالی واقع شده است. در محدوده این زیرحوضه تنها یک لایه آزاد قرار گرفته و منابع آب کارستیک

توافق در زمان ساخت هر یک از ماتریس‌ها، ارائه شده است. این روش مبتنی بر محاسبه یک شاخص نسبت توافق (CR) مناسب انجام می‌شود، شرح مفصل این روش توسط الساعتی (۲۲) بیان شده است. پس از وزن‌دهی لایه‌ها با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS و براساس رابطه ۳ لایه‌ها با هم ترکیب شدند. نقشه نهایی حاصل شده به‌عنوان مناطق تغذیه‌ای به‌مدل MODFLOW وارد شدند.

$$R_z = W_s.S + W_{Lu}.Lu + W_p.P + W_D.D + W_{Gs}.Gs + W_{Irr}.Irr \quad [3]$$

که در این رابطه  $R_z$  منطقه همگن تغذیه‌ای،  $W_s$  وزن مربوط به‌نوع خاک،  $S$  نوع خاک،  $W_{Lu}$  وزن کاربری اراضی،  $Lu$  کاربری اراضی،  $W_p$  وزن بارش،  $P$  بارش،  $W_D$  وزن ضخامت لایه غیراشباع،  $D$  ضخامت لایه غیراشباع،  $W_{Gs}$  وزن شیب زمین،  $G_s$  شیب زمین،  $W_{Irr}$  وزن آبیاری و  $Irr$  آبیاری، می‌باشد.

### روش تورنت وایث

در بین روش‌های موجود برای تخمین بیلان رطوبتی خاک با استفاده از داده‌های ساده خاک و اقلیمی، روش ارائه شده توسط تورنت وایت یکی از بهترین و پرکاربردترین روش‌ها می‌باشد. در این روش می‌توان تبخیر و تعرق واقعی، کمبود رطوبتی خاک و آب اضافی را محاسبه نمود. بیلان رطوبتی خاک محاسبه شده به‌روش تورنت وایت را می‌توان برای طبقه‌بندی اقلیمی، تعیین ویژگی‌های هیدرولوژیکی به‌منظور مدیریت آب، مطالعات زیست محیطی و برنامه‌ریزی کشاورزی به‌منظور تعیین کاربری اراضی و فعالیت‌های کشاورزی، استفاده نمود. معادله اساسی مورد استفاده برای تخمین ذخیره رطوبتی خاک ( $A$ )،  $mm$  به‌صورت زیر می‌باشد (۱۰):

$$A = A_c \cdot e^{-\frac{L}{A_c}} ; A_c = (\theta_f - \theta_w) Z_e \quad [4]$$

که در آن  $L$  تلفات پتانسیل تجمعی آب ( $mm$ )، که به‌صورت جمع اختلاف بین بارش ( $P$ ) برحسب میلی‌متر و تبخیر و تعرق پتانسیل ( $ET_0$ ) برحسب میلی‌متر محاسبه می‌شود،  $A_c$  ظرفیت نگهداری خاک ( $mm$ )،  $Z_e$  عمق مؤثر ریشه ( $mm$ )،  $\theta_f$  و  $\theta_w$  به‌ترتیب درصد رطوبت در ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی

با این کار اثر پارامترهای مهم مؤثر بر تغذیه از جمله ویژگی‌های خاک، ضخامت لایه غیراشباع، بارش و آبیاری در مدل‌های غیرخطی تجربی به‌دست آمده لحاظ گردید. در ادامه مراحل مختلف ایجاد مدل‌های غیر خطی تغذیه شرح داده می‌شود.

### مشخص نمودن نواحی همگن تغذیه

در این تحقیق ابتدا عوامل احتمالی مؤثر بر تغذیه و درجه اهمیت آنها در آبخوان مورد مطالعه مشخص گردید. سپس نقشه هرکدام از این عوامل به‌صورت طبقه‌بندی شده در سیستم GIS ترسیم گردید. پس از تهیه نقشه‌های مورد نیاز برای هر لایه تولید شده با توجه به میزان اهمیت آن یک وزن در نظر گرفته شد. به‌منظور وزن‌دهی به هر یک از معیارها از روش آنالیز سلسله مرتبی (AHP) استفاده گردید. این روش توسط ساعتی (۲۲)، ارائه گردید و یکی از جامع‌ترین سیستم‌ها برای تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه است، که بر مبنای مقایسه زوجی بنا شده است (۲۲). بدین‌منظور ابتدا با بررسی منابع مختلف، مدل‌های متفاوت محاسبه‌کننده تغذیه (SWAT، WetSpa، HELP، VFM، WAVES) مورد ارزیابی قرار گرفته و پارامترهای احتمالی مؤثر بر تغذیه مشخص گردید. سپس برای تعیین مقدار اهمیت هر یک از پارامترها از تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده شد. در این روش با مشخص شدن درجه اهمیت هر یک از معیارها نسبت به یکدیگر و نیز طبقات مختلف یک معیار نسبت به هم، به‌صورت دو به دو در هر مرحله، معیارها با توجه به اهمیت‌شان در تصمیمی که در دست بررسی است به‌صورت جفتی مقایسه می‌شوند. وزن‌های نسبی عناصر در هر مرحله با توجه به‌عنصر مجاور در سطح بالا، به‌عنوان اجزای بردار ویژه نرمال شده، مرتبط با بزرگ‌ترین بردار ویژه ماتریس مقایسه‌ای آنها محاسبه می‌شوند و سپس وزن‌های ترکیب شده به‌وسیله مجموع وزن‌ها در تمامی سلسله‌مراتب تعیین می‌گردند. وقتی که تعداد زیادی مقایسه دودویی انجام می‌شود، ممکن است یکسری عدم توافق ایجاد گردد. برای این‌منظور در روش AHP یک روش مناسب برای به‌وجود آمدن

بعدی جریان آب زیرزمینی ساخته شد. با توجه به کمیت و کیفیت داده‌های پایه یک شبکه‌بندی ۳ بعدی به ابعاد ۵۰۰ متر در ۵۰۰ متر بر روی آبخوان دشت نجف‌آباد ایجاد گردید. به‌منظور اجرای مدل از یک شبکه تفاضلات محدود با ۱۶۷ ستون و ۶۸ ردیف استفاده شده است.

### کالیبراسیون مدل

بعد از شبکه‌بندی محدود مورد مطالعه، برای کالیبراسیون مدل از دو حالت ماندگار و غیرماندگار استفاده شد. هدف از اجرای مدل در شرایط ماندگار بررسی صحت ضرایب هیدرودینامیک داده شده به‌مدل و همچنین به‌دست آوردن بار آبی اولیه برای اجرای مدل در شرایط غیرماندگار می‌باشد. ابتدا با ناحیه‌بندی منطقه به واحدهای کوچک‌تر، مدل در شرایط ماندگار با استفاده از داده‌های سطح ایستابی بهمن ۱۳۷۹ اجرا و با مدل‌سازی معکوس مقادیر اولیه هدایت هیدرولیکی و تغذیه در ناحیه‌های مشخص شده در مرحله قبل، محاسبه گردید. سپس مدل در شرایط غیرماندگار برای بازه ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۹ اجرا شد و در این مرحله مقادیر تغذیه، هدایت هیدرولیکی و آبدی ویژه برای نواحی مختلف آبخوان از طریق کالیبراسیون دستی و اتوماتیک محاسبه گردید. همچنین از داده‌های سطح ایستابی سال ۱۳۸۹ و ۱۳۹۰ برای صحت‌سنجی مدل استفاده گردید. برای کالیبراسیون از معیارهای آماری ضریب تعیین ( $R^2$ )، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین انحراف خطا (MBE) و متوسط خطای مطلق (MAE) استفاده گردید.

### روابط تجربی تخمین تغذیه

با توجه به مشکلات ذکر شده در ارتباط با تخمین تغذیه و نیز با توجه به نیاز به یک روش مناسب برای محاسبه تغذیه در منطقه، در این تحقیق از یک روش هیبریدی که از ترکیب مدل MODFLOW، AHP و روابط تجربی به‌دست می‌آید، استفاده گردید. با توجه به این‌که مهم‌ترین عیب روش‌های تجربی این است که در آنها شرایط فیزیکی منطقه در نظر گرفته نمی‌شود و

خاک ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) می‌باشد. با استفاده از  $i$  به‌عنوان اندیس شمارنده دوره‌ها در طول سال (به‌عنوان مثال برای مقیاس ماهانه ۱، ۲، ...، ۱۲) داریم:

اگر  $(P_i - ETO_i) < 0$  (حالت I - فصل خشک):

$$A = A_C \cdot e^{-\frac{L}{A_C}}; L_i = L_{i-1} \cdot (P_i - ETO_i) \quad [5]$$

اگر  $(P_i - ETO_i) > 0$  (حالت II - فصل مرطوب):

$$A_i = A_{i-1} + (P_i - ETO_i); \text{if } A_i \geq A_C \text{ then } A_i = A_C \text{ and } L_i = -A_C \ln\left(\frac{A_i}{A_C}\right) \quad [6]$$

تبخیر و تعرق واقعی ( $ETa_i$ )، برحسب میلی‌متر، برای دوره  $i$  را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$\Delta A_i = A_i - A_{i-1}; ETa_i = P_i + \Delta A_i \quad [7]$$

که در آن  $\Delta A_i$  تغییرات ذخیره رطوبتی خاک در بین دوره  $i$  و  $i-1$  می‌باشد. کمبود رطوبت خاک ( $D, \text{mm}$ ) و آب اضافی ( $E, \text{mm}$ ) در حالت I (فصل خشک) با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$D_i = ETO_i - ETa_i; E_i = 0 \quad [8]$$

حالت II (فصل مرطوب):

$$D_i = 0; E_i = P_i - ETO_i - \Delta A_i \quad [9]$$

### تهیه مدل آب زیرزمینی

معادلات حاکم بر جریان آب زیرزمینی، چه در لایه آبدار آزاد و چه در لایه آبدار تحت فشار به‌روش‌های ساده ریاضی قابل حل نبوده و بایستی از روش‌های عددی استفاده نمود. در این تحقیق از مدل MODFLOW که یکی از قوی‌ترین مدل‌ها در زمینه شبیه‌سازی جریان آب‌های زیرزمینی می‌باشد، برای شبیه‌سازی جریان آب در آبخوان مورد بررسی، استفاده شده است.

قبل از تهیه مدل شبیه‌سازی ابتدا مدل مفهومی منطقه تهیه گردید. برای این منظور ابتدا محدوده آبخوان مشخص گردید سپس براساس اطلاعات موجود در منطقه ورودی‌های و خروجی‌های آبخوان به آبخوان‌های مجاور مشخص شد. پس از جمع‌آوری و صحت‌سنجی داده‌های مورد نیاز مدل، مدل سه

جدول ۱. ماتریس مقایسه زوجی معیارهای مؤثر در تغذیه آب‌های زیرزمینی

معیارها	شیب	آبیاری	آبدهی ویژه	ضخامت لایه غیراشباع	بارش	کاربری اراضی	بافت خاک	وزن نهایی
بافت خاک	۲	۱	۱۷	۳	۰/۷۷	۵	۱	۰/۲۳
کاربری اراضی	۰/۳۳	۰/۲۱	۴	۰/۵	۰/۱۷	۱	۰/۲	۰/۰۴۶
بارش	۲/۵	۱/۳	۲۱	۳/۴	۱	۶	۱/۳	۰/۲۸۷
ضخامت لایه غیراشباع	۰/۶۶	۰/۳۷	۶/۲	۱	۰/۲۹۴	۲	۰/۳۳	۰/۰۸۳
آبدهی ویژه	۰/۱۲۵	۰/۰۶	۱	۰/۱۶۱	۰/۰۴۷	۰/۲۵	۰/۰۵۹	۰/۰۱۳
آبیاری	۱/۸	۱	۱۶/۵	۲/۷	۰/۷۷	۴/۸	۱	۰/۲۲۱
شیب	۱	۰/۵۵	۸	۱/۵	۰/۴	۳	۰/۵	۰/۱۲

در این روابط فقط براساس مقدار بارش، تغذیه محاسبه می‌شود، همچنین به‌خوبی نمی‌توان از آنها برای پیش‌بینی تغذیه در آینده استفاده نمود. لذا در این تحقیق با ترکیب استفاده از مدل قدرتمند MODFLOW و تولید ناحیه‌های تغذیه‌ای، معادله تغذیه برای هر ناحیه براساس پارامترهای مختلف مانند بارش، دما، نیاز آبیاری و ضخامت لایه غیراشباع، به‌دست آمد. با این کار هم شرایط فیزیکی حاکم بر تغذیه آب زیرزمینی در نظر گرفته می‌شود و هم با استفاده از پارامترهای موجود می‌توان با سناریوهای مختلف میزان تغییرات تغذیه را در آینده پیش‌بینی نمود.

## نتایج و بحث

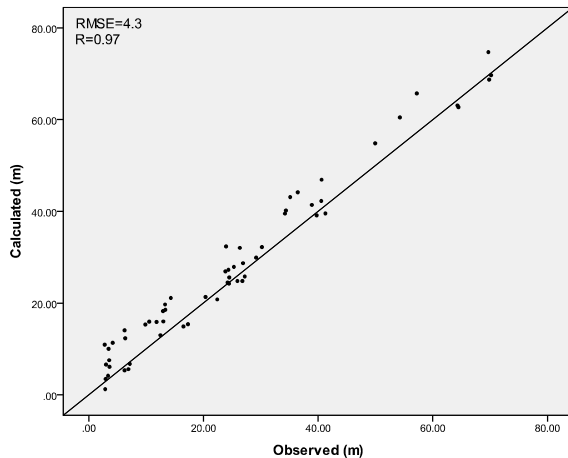
### نواحی تغذیه

همان‌طور که بیان شد به‌منظور تعیین مناطق همگن تغذیه‌ای از ترکیب نقشه‌های مختلف در GIS و تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده گردید. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد که مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر تغذیه شامل بافت خاک، بارش، کاربری اراضی، ضخامت ناحیه غیراشباع، شیب زمین، میزان نیاز آبیاری و آبدهی ویژه، می‌باشد. در مرحله بعد با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی میزان تأثیر هر یک از پارامترها در تغذیه آب زیرزمینی مشخص گردید. در جدول ۱ ماتریس مقایسه

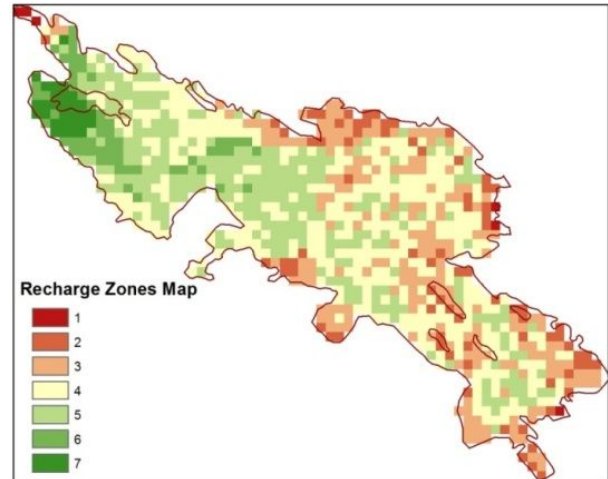
زوجی معیارهای مؤثر در تغذیه آب‌های زیرزمینی ارائه شده است. با توجه به‌نتایج به‌دست آمده از تحلیل AHP بارش با ۰/۲۸۷ و پس از آن بافت خاک با ۰/۲۳ بیشترین وزن را دارا می‌باشند. همچنین آبدهی ویژه با ۰/۰۱۳ و کاربری اراضی با ۰/۰۴۶ کمترین وزن را در لایه‌بندی تغذیه آب زیرزمینی دارا بودند. مقدار نسبت توافق در تمامی معیارها و زیر معیارها کمتر از ۰/۱ بود که نشان دهنده سطح توافق قابل قبول در تحلیل‌ها می‌باشد.

### نقشه پارامترهای مختلف مؤثر بر تغذیه

پس از تعیین عوامل مؤثر بر تغذیه نقشه هر یک از این پارامترها در نرم‌افزار ArcGIS ترسیم گردید. پس از تهیه نقشه‌های مورد نیاز برای هر لایه تولید شده با توجه به‌میزان اهمیت آن و براساس نتایج تحلیل سلسله‌مراتبی یک وزن در نظر گرفته شد. بعد از وزن‌دهی هرکدام از عوامل و نیز رتبه‌بندی هر کدام از لایه‌ها این لایه‌ها در محیط نرم‌افزار ArcGIS با هم ترکیب شده و نقشه نهایی نواحی همگن تغذیه‌ای ایجاد گردید. در شکل ۲ نقشه نواحی همگن تغذیه‌ای در آبخوان دشت نجف‌آباد نشان داده شده است. سپس این نواحی تغذیه‌ای به‌مدل MODFLOW وارد شده و فرآیند مدل‌سازی و اصلاحات اضافی در مدل MODFLOW ادامه یافت.



شکل ۳. تراز سطح ایستابی مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در حالت ماندگار



شکل ۲. نواحی همگن تغذیه‌ای به‌دست آمده از تحلیل AHP

### مدل‌سازی تغذیه

کالیبراسیون مدل آب زیرزمینی یکی از بخش‌های مهم در مدل‌سازی هیدرولوژیک این تحقیق بود که طی دو مرحله اصلی کالیبراسیون در شرایط ماندگار و شرایط غیرماندگار انجام گرفت. برای این منظور ابتدا مدل در شرایط ماندگار کالیبره شد و در این مرحله مقدار هدایت هیدرولیکی مشخص گردید. براساس نتایج به‌دست آمده مقادیر هدایت هیدرولیکی در آبخوان از ۰/۴ تا ۸ متر بر روز در ناحیه‌های مختلف آبخوان متغیر می‌باشد، که این نتایج با نتایج آزمایش پمپاژ انجام شده در سطح آبخوان همخوانی دارد. در شکل ۳ میزان تطابق تراز سطح ایستابی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در پیزومترهای موجود در سطح منطقه نشان داده شده است.

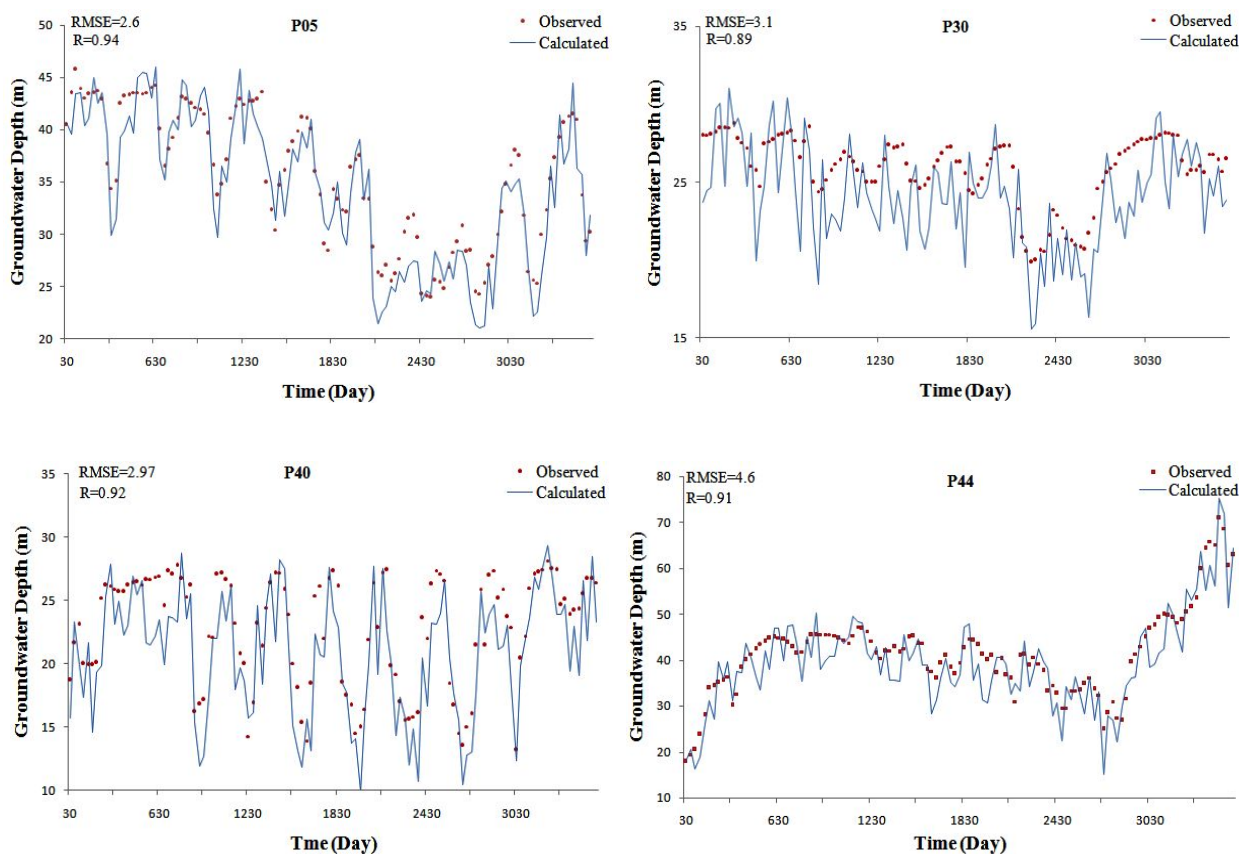
پس از کالیبراسیون مدل در شرایط ماندگار و مشخص شدن مقادیر هدایت هیدرولیکی مدل در شرایط غیرماندگار که مشخص کننده شرایط واقعی در آبخوان است، کالیبره گردید. در این مرحله کالیبراسیون براساس میزان تطابق سطح ایستابی شبیه‌سازی شده با سطح ایستابی مشاهده شده در طول بازه شبیه‌سازی (۱۳۷۹-۱۳۸۹)، صورت گرفت. در شکل ۴ نمودار مقادیر محاسبه شده و مشاهداتی عمق سطح ایستابی برای چهار پیزومتر انتخابی (P۰۵، P۳۰، P۴۰ و P۴۴) همراه با مقادیر خطا و ضریب تعیین هر یک در طول بازه شبیه‌سازی

نشان داده شده است. با توجه به نتایج ملاحظه می‌شود که مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهده‌ای همخوانی مناسبی دارند. براساس نتایج به‌دست آمده مقدار RMSE برای کل دوره شبیه‌سازی و تمامی پیزومترها برابر با ۵/۲ و مقدار MAE نیز برابر با ۴/۳ می‌باشد.

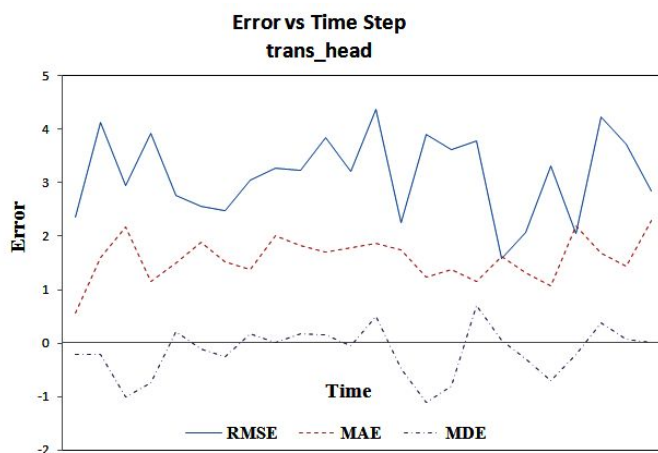
به‌منظور تأیید مدل تهیه شده از پیش‌بینی بار هیدرولیکی پیزومترها در بازه زمانی ۱۳۹۰-۱۳۸۹ و مقایسه آن با بار هیدرولیکی مشاهداتی استفاده گردید. در صورتی که پیش‌بینی‌های مدل در مرحله صحت‌سنجی نتایج کالیبراسیون را تکرار و تأیید کند مدل برای پیش‌بینی شرایط آینده قابل استفاده خواهد بود. در شکل ۵ نمودار تغییرات خطا شامل RMSE، MAE و میانگین انحراف معیارها MDE نسبت به زمان برای کل دوره صحت‌سنجی نشان داده شده است. براساس نتایج به‌دست آمده در این مرحله همانند نتایج مربوط به مرحله کالیبراسیون قابل قبول بوده و مدل نهایی تأیید می‌گردد و به‌خوبی از آن می‌توان برای پیش‌بینی شرایط آینده استفاده نمود.

### مدل تجربی تغذیه

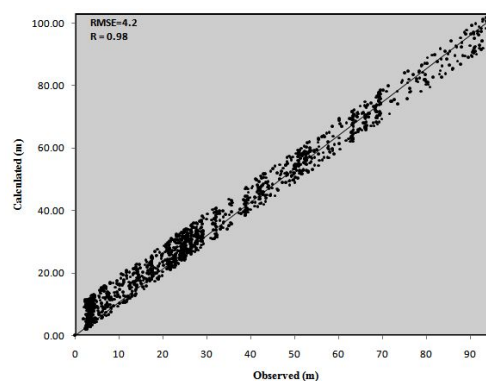
به‌منظور ایجاد مدل تجربی تغذیه برای هر ناحیه از روش تورنت وایت با توجه به خصوصیات ناحیه‌های همگن تغذیه‌ای



شکل ۴. تراز سطح ایستابی مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در حالت غیرماندگار برای پیزومترهای انتخابی



(ب)



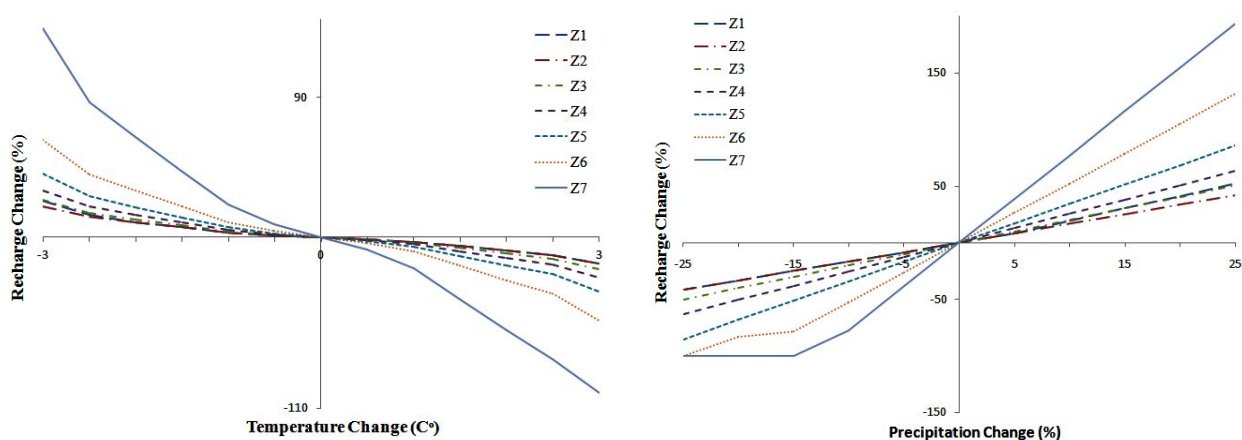
(الف)

شکل ۵. الف) مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده سطح ایستابی در کل دوره صحت‌سنجی،  
ب) نمودار تغییرات خطا نسبت به زمان برای کل داده‌های صحت‌سنجی



جدول ۲. نتایج معادلات غیرخطی تغذیه در نواحی مختلف

Zone	Non Linear Model	$\hat{R}$	RMSE
R۳	$R = \left( \frac{0.0932(P - ET_C)}{-7.93D^{0.1447} + 3Irr^{-0.955}} \right) - 7.65$	0.961	۴/۳
R۵	$R = \left( \frac{20.745(P_C - ET_C)}{1.192D^{0.584} + 0.00356Irr^{-4}} \right) + 6.2$	0.958	۴/۴
R۱۱	$R = EXP(0.00256(P - ET_C)) - 0.0076D + 0.01Irr + 3.63$	0.972	۳/۹
RIV	$R = 0.568(P - ET_C) + \frac{834.9}{D} + 0.455Irr - 68.67$	0.94	۵/۱
RN۴	$R = EXP(0.00676P - 0.000751ET - 0.00422D + 3.08)$	0.946	۵/۲



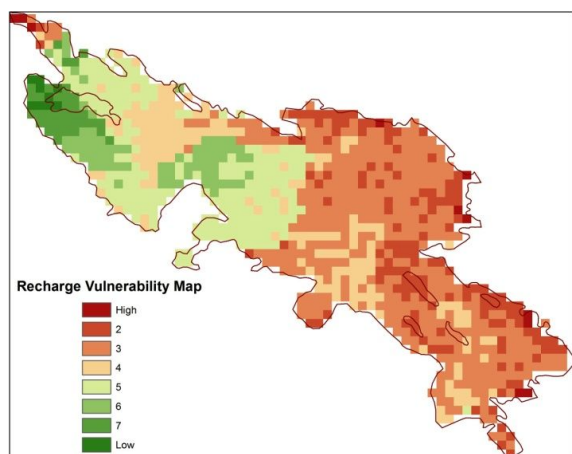
شکل ۶. نمودار آنالیز حساسیت نرخ تغذیه سالانه نسبت به تغییرات دما و بارش در نواحی مختلف

و ضخامت لایه غیراشباع (D) می‌باشند، که برای هر منطقه ترکیب متفاوتی از این پارامترها مؤثر بوده و در معادله در نظر گرفته شد. با توجه به نتایج به دست آمده از معادلات به دست آمده به خوبی می‌توان برای محاسبه تغذیه در منطقه با توجه به پارامترهای مؤثر، استفاده نمود.

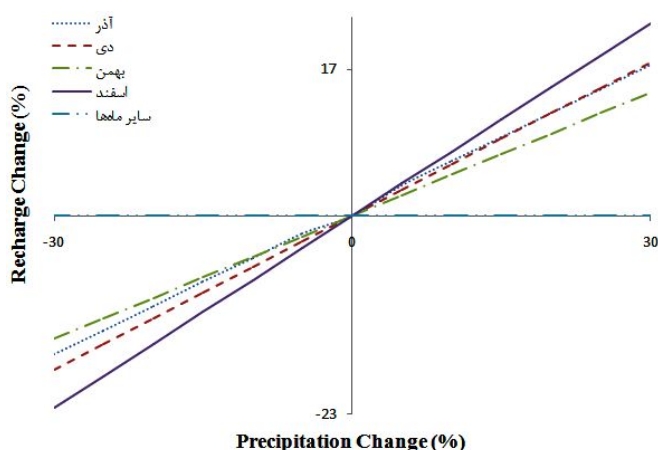
#### آنالیز حساسیت

در این تحقیق به منظور بررسی اثر پارامترهای مختلف بر تغذیه از آنالیز حساسیت استفاده گردید. بدین منظور ابتدا اثر تغییرات بارش و دما بر تغذیه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آنالیز حساسیت برای این دو پارامتر در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده با تغییر ۱۰ درصدی بارش میزان تغذیه بین ۱۶ تا ۷۷ درصد تغییر می‌کند. همچنین با تغییر ۱ درجه‌ای دما، میزان تغذیه بین ۶ تا ۴۲ درصد تغییر می‌کند. با

استفاده شد و مقادیر تغذیه ماهانه برای هر ناحیه مشخص گردید. سپس با توجه به پارامترهای مؤثر بر تغذیه شامل بارش، تبخیر و تعرق، آبیاری و ضخامت لایه غیراشباع معادله غیرخطی هر ناحیه استخراج گردید. فرآیند کالیبراسیون مدل غیرخطی تجربی تغذیه همزمان با کالیبراسیون مدل MODFLOW انجام گرفته و مدل تجربی به دست آمده از روش تورنت وایت همزمان با مدل MODFLOW اصلاح گردید. در جدول ۲ مدل غیرخطی تغذیه برای ناحیه‌های R۳، RIV، RN۴ و R۵ همراه با میزان خطای RMSE و ضریب تعیین مربوط به مدل غیرخطی استخراج شده، به عنوان نمونه ارائه شده است. پارامترهای در نظر گرفته شده در این معادلات شامل بارش سالانه (P)، بارش در ماه‌های بحرانی یعنی آذر، دی، بهمن و اسفند (Pc)، آبیاری (Irr)، تبخیر و تعرق سالانه (ET)، تبخیر و تعرق در ماه‌های بحران (ETc)،



شکل ۸. نقشه پتانسیل آسیب پذیری تغذیه در دشت نجف آباد



شکل ۷. آنالیز حساسیت نرخ تغذیه سالانه نسبت به تغییرات بارش در ماه‌های مختلف سال

به تغییرات نشان می‌دهند و تغییرات سایر ماه‌ها تقریباً اثری بر نرخ تغذیه سالانه ندارند.

در نهایت با توجه به نتایج به دست آمده از آنالیز حساسیت و مدل هیبریدی به دست آمده، نقشه آسیب پذیری تغذیه در دشت نسبت به تغییر پارامترهای مؤثر بر تغذیه در محیط نرم افزار ArcGIS ترسیم گردید که نقشه مربوطه در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد اکثر نواحی دشت در محدوده با خطر آسیب پذیری بالا واقع شده‌اند، با این حال نیمه غربی دشت پتانسیل آسیب پذیری کمتری نسبت به نیمه شرقی دارا می‌باشد.

### نتیجه گیری

در این تحقیق به منظور محاسبه تغذیه در سطح آبخوان یک روش هیبریدی جهت اصلاح روابط تجربی محاسبه تغذیه ارائه گردید. بدین منظور ابتدا عوامل مؤثر بر تغذیه و میزان اهمیت هر یک با تعیین مناطق همگن تغذیه‌ای به روش AHP مشخص گردید. سپس با روش تورنت وایت مقادیر تغذیه در هر ناحیه محاسبه و معادله تجربی غیرخطی آن استخراج گردید و با یک روش سعی و خطای دوسویه با استفاده از مدل ریاضی آبخوان، مدل‌های تجربی ایجاد شده اصلاح و کالیبره شدند. با این کار اثرات پارامترهای مختلف در مدل تجربی در نظر گرفته شده و

توجه به نتایج مشخص گردید که نواحی با خاک سنگین‌تر و دشواری نفوذ بیشتر نسبت به تغییرات دما و بارش حساسیت بیشتری نشان می‌دهند. لذا این مناطق دارای پتانسیل آسیب پذیری بیشتری نسبت به کاهش احتمالی بارش و یا افزایش دما، می‌باشند. براساس نتایج به دست آمده تغییرات اندک در میزان بارش باعث می‌شود که میزان تغذیه چندین برابر تغییر کند.

همچنین در این تحقیق با استفاده از آنالیز حساسیت، اهمیت مقدار بارش و تبخیر و تعرق و تغییرات آنها در هر ماه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که تغییرات بارش و تبخیر و تعرق در چهار ماه شامل آذر، دی، بهمن و اسفند اثر قابل ملاحظه‌ای در مقدار نرخ تغذیه سالانه دارا می‌باشند (شکل ۷). لذا مقدار بارش در این ماه‌ها بسیار قابل توجه و مهم بوده و هرگونه تغییر در روند بارش و تبخیر و تعرق در این ماه‌ها اثرات قابل توجهی بر نرخ تغذیه سالانه در آبخوان خواهد داشت. در این تحقیق بارش و تبخیر و تعرق در این ماه‌ها به عنوان ماه‌های بحرانی در نظر گرفته شده و نرخ تغذیه سالانه در برخی از نواحی براساس این پارامترها تعیین گردید. در شکل ۶ نمودار تحلیل آنالیز حساسیت بارش در ماه‌ها مختلف نشان داده شده است، همان‌طور که ملاحظه می‌گردد چهار ماه آذر، دی، بهمن و اسفند بیشترین حساسیت را نسبت

گونه تغییر در روند بارش و تبخیر و تعرق در این ماه‌ها اثرات قابل توجهی بر نرخ تغذیه سالانه در آبخوان خواهد داشت. با توجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق نقشه آسیب‌پذیری تغذیه در دشت تهیه گردید. همچنین نتایج نشان داد که مقدار تغذیه خالص در این آبخوان عمدتاً توسط مقدار بارش و تبخیر و تعرق کنترل می‌شود درحالی که سایر پارامترهای فیزیکی بیشتر بر روی مکانیزم و مقدار واقعی تغذیه، اثر می‌گذارند. با استفاده از مدل هیبریدی ایجاد شده به‌خوبی می‌توان در تحقیقات مرتبط با ارزیابی آب‌های زیرزمینی به‌خصوص برای محاسبه نرخ برداشت مجاز و مطمئن از آبخوان و نیز استفاده در ارزیابی اثرات سناریوهای مختلف مدیریتی در آینده و تغییر اقلیم استفاده نمود. همچنین با استفاده از نتایج این تحقیق می‌توان مکان‌های مناسب و نیز زمان مناسب برای تغذیه مصنوعی در سطح دشت را مشخص نمود.

این عیب که مهم‌ترین عیب‌های تجربی برای محاسبه تغذیه می‌باشد برطرف گردیده و نیز معادلاتی به دست آمد که به راحتی می‌توان از آنها در ارزیابی‌های مختلف منابع آب زیرزمینی در آینده استفاده نمود. میزان دقت مدل‌های تجربی غیرخطی ایجاد شده به وسیله مدل آب زیرزمینی کالیبره شده آبخوان مربوطه مورد ارزیابی قرار گرفت و مقادیر کم RMSE که برای همه ناحیه‌های همگن در حدود ۴ تا ۸ متغیر بود و نیز مقادیر بالای ضریب تعیین، نشان دهنده دقت بالا و قابل اطمینان بودن این مدل‌ها در محاسبه نرخ تغذیه در این آبخوان می‌باشد. نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که نواحی با خاک سنگین‌تر و دشواری نفوذ بیشتر نسبت به تغییرات حساسیت بیشتری نشان داده و دارای آسیب‌پذیری بیشتری می‌باشند. همچنین نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که تغییرات بارش و تبخیر و تعرق در چهار ماه شامل آذر، دی، بهمن و اسفند اثر قابل ملاحظه‌ای در مقدار نرخ تغذیه سالانه دارا می‌باشند. لذا مقدار بارش در این ماه‌ها بسیار قابل توجه و مهم بوده و هر

## منابع مورد استفاده

- Adamowski, J., H. Fung Chan. 2011. A wavelet neural network conjunction model for groundwater level forecasting. *J. Hydrol.* 407: 28-40.
- Ajjur, S. and Y. Mogheir. 2012. Effects of Climate Change on Groundwater Resources. The 4<sup>th</sup> International Engineering Conference -Towards engineering of 21<sup>st</sup> century.
- Allen, D. M., A. J. Cannon, M. W. Toews and J. Scibek. 2010. Variability in simulated recharge using different GCMs. *Water Resour. Res.* 46, W00F03.
- Ali, R., D. McFarlane, S. Varma, W. Dawes, I. Emelyanova, G. Hodgson and S. Charles. 2012. Potential climate change impacts on groundwater resources of south-western Australia. *J. Hydrol.* 475: 456-472.
- Crosbie, R. S., B. R. Scanlon, F. S. Mpelasoka, R. C. Reedy, J. B. Gates and L. Zhang. 2013. Potential climate change effects on groundwater recharge in the High Plains Aquifer, USA. *Water Resour. Res.* 49.
- Crosbie, R. S., J. L. McCallum, G. R. Walker and F. H. S. Chiew. 2010. Modelling climate change impacts on groundwater recharge in the Murray-Darling basin, Australia. *Hydrogeol. J.* 18: 1639-1656.
- Crosbie, R. S., J. L. McCallum, G. R. Walker and F. H. S. Chiew. 2012. Episodic recharge and climate change in the Murray-Darling basin, Australia. *Hydrogeol. J.* 20: 245- 261.
- Dams, J., E. Salvatore, T. Van Dael, V. Ntegeka, P. Willems and O. Batelaan. 2011. Spatio-temporal impact of climate change on the groundwater system. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 8: 10195-10223.
- Dawes, W., R. Ali, S. Varma, I. Emelyanova, G. Hodgson and D. McFarlane. 2012. Modelling the effects of climate and land cover change on groundwater recharge in south-west Western Australia. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 9: 6063-6099.
- Dourado, N. D., Q. J. van Lier, K. Metselaar, K. Reichardt and D. R. Nielsen. 2010. General procedure to initialize the cyclic soil water balance by the Thornthwaite and Mather method. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*, v.67, n.1: 87-95.
- Goderniaux, P., S. Brouye`re, S. Blenkinsop, A. Burton, H. J. Fowler, P. Orban and A. Dassargues. 2011. Modeling climate change impacts on groundwater resources using transient stochastic climatic scenarios. *Water Resour. Res.*, 47, W12516.

12. Healy, R. W. 2010. Estimating groundwater recharge. Cambridge University Press, Cambridge.
13. Jackson, C. R., R. Meister and C. Prudhomme. 2011. Modelling the effects of climate change and its uncertainty on UK Chalk groundwater resources from an ensemble of global climate model projections. *J. Hydrol.* 399: 12-28.
14. Jyrkama, M. I. and J. F. Sykes. 2007. The impact of climate change on spatially varying groundwater recharge in the Grand River watershed (Ontario). *J. Hydrol.* 338(3-4): 237-250. 8
15. Kingston, D. G. and R. G. Taylor. 2010. Sources of uncertainty in climate change impacts on river discharge and groundwater in a headwater catchment of the Upper Nile Basin, Uganda. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14: 1297-1308.
16. Kinzelbach W., W. Aeschbach, C. Alberich, I. B. Goni, U. Beyerle, P. Brunner, W.-H. Chiang, J. Rueedi and K. Zoellmann. 2002. A Survey of Methods for Groundwater Recharge in Arid and Semi-arid regions. Early Warning and Assessment Report Series, UNEP/DEWA/RS.02-2. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya. ISBN 92-80702131-3.
17. L. Kurylyk, B. and K. T. B. MacQuarrie. 2013. The uncertainty associated with estimating future groundwater recharge: A summary of recent research and an example from a small unconfined aquifer in a northern humid-continental climate. *J. Hydrol.* 492: 244-253.
18. Mogaji, K., H. S. Lim and K. Abdullah. 2015. Modeling of groundwater recharge using a multiple linear regression (MLR) recharge model developed from geophysical parameters: a case of groundwater resources management. *Environ. Earth Sci J.* 73:1217-1230.
19. Nyagwambo, N. L. 2006. Groundwater Recharge Estimation and Water Resources Assessment in a Tropical Crystalline Basement Aquifer. Phd dissertation, in Delft University of Technology, Netherlands.
20. Nyenje, P. M. and O. Okke Batelaan. 2009. Estimating the effects of climate change on groundwater recharge and baseflow in the upper Ssezibwa catchment, Uganda. *Hydrolog. Sci. J.* 54: 713-726.
21. Oke, O., M. O. Martins, O. Idowu and O. Aiyelokun. 2013. Comparative Analysis of Empirical Formulae Used in Groundwater Recharge in Ogun Oshun River Basins. *J. Sci. Res. & Rep.* 692-710.
22. Satty, T. 1980. The Analytical Hierarchy Process, Planning Priority, Resource Allocation. TWS Publications. USA. 287.
23. Scibek, J., D. M., Allen. 2006. Modeled impacts of predicted climate change on recharge and groundwater levels. *Water Resour. Res.* 42, W11405, 18p.
24. Toews, M. W. and D. M. Allen. 2009. Evaluating different GCMs for predicting spatial recharge in an irrigated arid region. *J. Hydrol.* 374: 265-281.
25. Woldeamlak, S. T., O. Batelaan and F. De Smedt. 2007. Effects of climate change on the groundwater system in the Grote-Nete catchment, Belgium. *Hydrogeol. J.*, 15: 891-901.