[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-10]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.23.5]

[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.287]

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

مصطفی گودرزی[۱]، جهانگیر عابدی کوپایی[۱*]، منوچهر حیدرپور[۱] و حمیدرضا صفوی[۲]

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

چکیده

با توجه به‌تغییرات 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 تغییرات‌اند که بارش و دما اثرات قابل توجهی بر تغذیه می‌گذارند به‌طوری که با تغییر ۱۰ درصدی بارش میزان تغذیه بین ۱۶ تا ۷۷ درصد تغییر می‌کند، همچنین با تغییر ۱ در جه‌ای دما، میزان تغذیه بین ۶ تا ۴۲ درصد تغییر می‌یابد. براساس نتایج به‌دست آمده حساسیت خاک‌های ریز بافت به‌این تغییرات خیلی بیشتر از خاک‌های درشت بافت 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 ازاین تحقیق می‌تواند در جنبه‌های مختلف مدیریت آب‌های زیرزمینی بسیار مفید باشد.

واژه‌های کلیدی: تغذیه، روش هیبریدی، آب‌های زیرزمینی، تحلیل سلسله مراتبی، روش تورنث 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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-10]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.23.5]

[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.287]

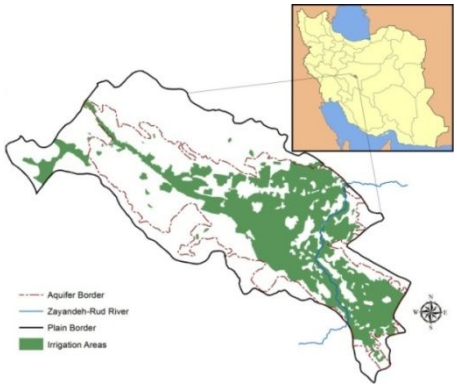
مقدمه

در مناطقی که منابع آب سطحی محدود بوده و یا بـه راحتـی در دسترس انسان قرار ندارند، می‌توان نیـاز انسـان‌هـا را بـه آب از طریق آب‌های زیرزمینی که در همه جا به‌طور وسـیع و گسـترده پخش شده‌انـد برطـرف نمـود. در بسـیاری از منـاطق آب‌هـای زیرزمینی منبع آب اصلی هم برای مصارف شرب و هم آبیـاری می‌باشند (۲۳). حدود ۴۰ درصد از منابع غذایی جهان به‌وسـیله کشاورزی فاریـاب آبیـاری شـده بـا آب‌هـای زیرزمینـی تـأمین می‌شود. در مناطق خشک و نیمه‌خشـک وابسـتگی بـه آب‌هـای زیرزمینـی از ۶۰ تـا ۱۰۰ درصـد مـی‌باشـد. بنـابراین آب‌هـای زیرزمینی یک منبع آب حیاتی بر روی زمین به‌خصـوص بـرای مناطق خشک و نیمه‌خشک، می‌باشند (۲۱).

گزارش‌های به‌دست آمده از بسـیاری از کشـورها حـاکی از کاهش بین ۱ تا ۳ متری سطح آب درآبخـوان‌هـا، مـی‌باشـد. 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، کـه سـهم بسـیار بالاتری نسبت به سایر بخـش‌هـا دارد. بنـابراین مشـکل تغذیـه آب‌های زیرزمینی کاملاً بـا امنیـت غـذایی گـره خـورده اسـت. واضح است که افزایش هزینه‌ها آخـرین عامـل بازدارنـده بـرای استخراج آب از آبخوان‌هـا مـی‌باشـد. امـا یـک راه‌حـل معقـول 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 خشکسـالی‌هـای طولانی مدت داشت (۱۴).

با توجه به‌تغییرات زیاد وقایع هیدرولوژیکی نسبت به زمـان و مکان در مناطق خشک و نیمه‌خشک اندازه‌گیری تغذیه در این مناطق بسیار دشـوار مـی‌باشـد. در ایـن منـاطق تبخیـر و تعـرق پتانسیل بیشتر از بارش می‌باشد و این بدان‌معنی است کـه فقـط در بعضی از شرایط تغذیه صورت می‌گیرد. با توجـه بـه‌ایـن‌کـه تغذیه در مناطق خشک یک فرآیند پیوسـته نمـی‌باشـد بنـابراین مشاهده و اندازه‌گیری آن بسیار مشکل است (۱۶). انـدازه‌گیـری نقطه‌ای جوابگوی تغییرات مکانی ناشی از نـوع خـاک، پوشـش گیاهی و توپـوگرافی، نمـی‌باشـد. همچنـین فرآینـدهای طبیعـی مختلفی ممکن است در مقیـاس‌هـای مختلـف بـر تغذیـه تـأثیر بگذارند. مواردی مانند جبهـه نفـوذ، جریـان‌هـای ترجیحـی در ساختمان خاک، نشت موضعی، رودخانه‌ها و نهرها مزارع تحت آبیاری، از جمله عوامل تأثیرگذار بر تغذیه می‌باشند. روش‌هـای اساسی بـرای محاسـبه تغذیـه آب‌هـای زیرزمینـی شـامل روش انـدازه‌گیـری مسـتقیم، روش‌هـای مبتنـی بـر روابـط تجربـی، روش‌هـای بـیلان آبـی، روش‌هـای مبتنـی بـر قـانون دادرسـی، ردیاب‌ها، شار صـفر جریـان (ZFP) و جداسـازی جریـان پایـه می‌باشد (۱۹). براساس این روش‌ها تا کنون مدل‌هـای مختلفـی برای محاسبه تغذیه به‌منظور ارزیـابی منـابع آب‌هـای زیرزمینـی ایجاد و مورد اسـتفاده قـرار گرفتـه کـه در ایـن بـین مـی‌تـوان به‌روش‌های تجربی و آماری که میزان بارش و تغذیـه را بـه‌هـم مرتبط می‌کند (۱۹، ۱۸ ۲۱)، مدل‌هـای تـوزیعی فیزیکـی ماننـد Wetspass، Wetspa، SWAT، ZOODRM (۲، ۸، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۱۳)، مدل‌هـای عـددی ماننـد HELP (۳، ۱۴، ۱۷، ۲۳ و ۲۴) مـدل WAVES (۵، ۶ و ۷) مـدل VFM (۴، ۹ و ۱۹) مـدل HydroGeoSphere (۱۱)، اشاره نمود، که هـر یـک بـرای یـک شرایط خاص مورد استفاده قرار گرفته و دارای مزایـا و معـایبی مـی‌باشـند. شـرح مفصـلی از تحقیقـات انجـام شـده در زمینـه روش‌های محاسبه تغذیه توسط هیلی (۱۲)، ارائه شده است.

دلیل این‌که طی سال‌ها هنـوز هـم روش ثابـت و مشخصـی برای اندازه‌گیری تغذیه آب‌های زیرزمینی وجود ندارد این است تغذیه یک پدیده پیچیده می‌باشد که در آن بـا شـرایط متفـاوتی روبه‌رو هستیم. در بین روش‌های موجود بـرای محاسـبه تغذیـه یکی از روش‌های مناسب جهـت بـرآورد تغذیـه روش تجربـی است. مهم‌ترین مزیت این روش‌ها این است که می‌توان آنهـا را نسبت به زمان و مکان تغییـر داد لـذا بـرای مطالعـات مختلـف جهت ارزیابی منابع آب زیرزمینی بسیار مناسب می‌باشند. با این وجود، روش‌های تجربی دارای معایب مختلفی از جملـه اینکـه این مدل‌ها فیزیکی نمی‌باشـند و پارامترهـای مختلـف فیزیکـی



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

مؤثر در تغذیه را در نظر نمی‌گیرند و درصورت 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 به‌شرایط کلی منطقه ضمن ارائه یک روش هیبریدی برای محاسبه تغذیه آب‌های زیرزمینی اثر پارامترهای مختلف برتغذیه 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 نسبت‌به سایر آبخوان‌ها داشته باشد. وسعت کل محدوده مطالعاتی ۱۷۱۲ کیلومترمربع که آبخوان آبرفتی ۹۴۰/۹ کیلومترمربع از دشت را شامل می شود. این دشت به‌لحاظ 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 موجود نیز از گستردگی چندانی برخوردار نمی‌باشد. حداقل و حداکثر ارتفاع حوضه براساس تحلیل‌های انجام شده برروی حوضه مطابق نقشه‌های DEM اخذ شده از سازمان نقشه‌برداری کشور به‌ترتیب 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 برتغذیه، ناحیه‌های همگن تغذیه مشخص و منطقه‌بندی شد. پس از تعیین نواحی همگن تغذیه‌ای با استفاده از روش تورنث وایت و متر (Thornthwaite and Mather) مقدار تغذیه آب‌های زیرزمینی برای هر یک از این نواحی تعیین و معادله غیرخطی تغذیه برای هریک از نواحی با توجه به‌پارامترهای مؤثر از جمله بارش، آبیاری، تبخیر و تعرق و ضخامت لایه غیراشباع، استخراج گردید. سپس این نواحی تغذیه‌ای به‌مدل MODFLOW وارد شده و فرآیند مدل‌سازی، اصلاح تغذیه و کالیبراسیون مدل‌های تجربی در مدل MODFLOW ادامه یافت.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-10]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.23.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.287]

با این کار اثر پارامترهای مهم مؤثر برتغذیه 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 به‌میزان 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 محاسبه کننده 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 هریک از معیارها نسبت‌به یکدیگر و نیز طبقات مختلف یک معیار نسبت به‌هم، به‌صورت دو به دو در هر مرحله، معیارها با توجه به‌اهمیت‌شان 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 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.

$$R_z = W_S.S + W_{Lu}.Lu + W_P.P + W_D.D + W_{Gs}.Gs + W_{Irr}.Irr \qquad [۳]$$

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، GS شیب زمین، W_{Irr} وزن آبیاری و Irr آبیاری، می‌باشد.

روش تورنث وایث

در بین روش‌های موجود برای تخمین بیلان رطوبتی خاک با استفاده از داده‌های ساده خاک و اقلیمی، روش ارائه شده توسط تورنث 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 تورنث 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):

$$A = A_C.e^{-\frac{L}{A_C}} \; ; \; A_C = \left(\theta_f - \theta_w\right) Z_e \qquad [۴]$$

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)، θ_f و θ_w به‌ترتیب درصد رطوبت در ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-10]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.23.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.287]

خاک (cm^3/cm^3) می‌باشد. با استفاده از i به‌عنوان اندیس شمارنده دوره‌ها در طول سال (به‌عنوان مثال برای مقیاس ماهانه ۱۲و...۲و۱=i) داریم:

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

$$A = A_C.e^{-\frac{L}{A_C}} ; L_i = L_{i-1}.(P_i - ETO_i) \quad [۵]$$

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

$$A_i = A_{i-1} + (P_i - ETo_i); \text{if } A_i \geq A_C \text{ then } A_i = A_C \text{ and } L_i = -A_C Ln\left(\frac{A_i}{A_C}\right) \quad [۶]$$

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

$$\Delta A_i = A_i - A_{i-1} ; ETa_i = P_i + \Delta A_i \quad [۷]$$

که در آن ΔA_i تغییرات ذخیره رطوبتی خاک در بین دوره i و i-۱ می‌باشد. کمبود رطوبت خاک (D، mm) و آب اضافی (E،mm) در حالت I (فصل خشک) با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$D_i = ETo_i - ETa_i ; E_i = 0 \quad [۸]$$

حالت II (فصل مرطوب):

$$D_i = 0 ; E_i = P_i - ETo_i - \Delta A_i \quad [۹]$$

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 تهیهٔ 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 بعدی جریان آب زیرزمینی ساخته شد. با توجه به‌کمیت وکیفیت 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 محدوده 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 درشرایط غیرماندگار می‌باشد. ابتدا با ناحیه‌بندی منطقه به واحدهای کوچک‌تر، مدل درشرایط ماندگار با استفاده از داده‌های سطح ایستابی بهمن ۱۳۷۹ اجرا و با مدل‌سازی معکوس مقادیر اولیه هدایت هیدرولیکی و تغذیه درناحیه‌های مشخص شده درمرحله قبل، محاسبه گردید. سپس مدل درشرایط غیرماندگار برای بازه ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۹ اجرا شد و در این مرحله مقادیر تغذیه، هدایت هیدرولیکی و آبدهی 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 به‌مشکلات ذکر شده در ارتباط با تخمین تغذیه و نیز با توجه به‌نیاز 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 به‌این‌که مهم‌ترین عیب روش‌های تجربی این است که در آنها شرایط فیزیکی منطقه در نظر گرفته نمی‌شود و

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-10]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.23.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.287]

جدول۱. 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

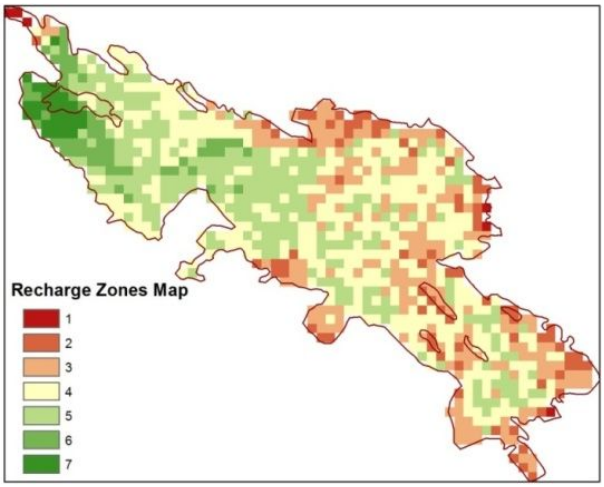
نواحی تغذیه

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 سلسله مراتبی 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.

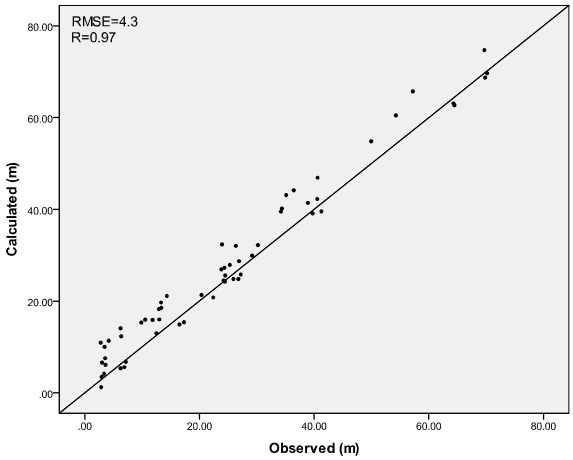
نقشه پارامترهای مختلف مؤثر بر تغذیه

پس از تعیین عوامل مؤثر بر تغذیه نقشه هر یک از این پارامترها در نرم‌افزار ArcGIS ترسیم گردید. پس از تهیهٔ نقشه‌های مورد نیاز برای هر لایه تولید شده با توجه به‌میزان اهمیت آن و براساس نتایج تحلیل سلسله مراتبی 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 شکل۲ 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.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-10]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.23.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.287]



شکل۲ . نواحی همگن تغذیه‌ای به‌دست آمده از تحلیل AHP



شکل۳. تراز سطح ایستابی مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در حالت ماندگار

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 این‌منظور 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 شکل۳ میزان تطابق تراز سطح ایستابی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در پیزومترهای موجود در سطح منطقه نشان داده شده است.

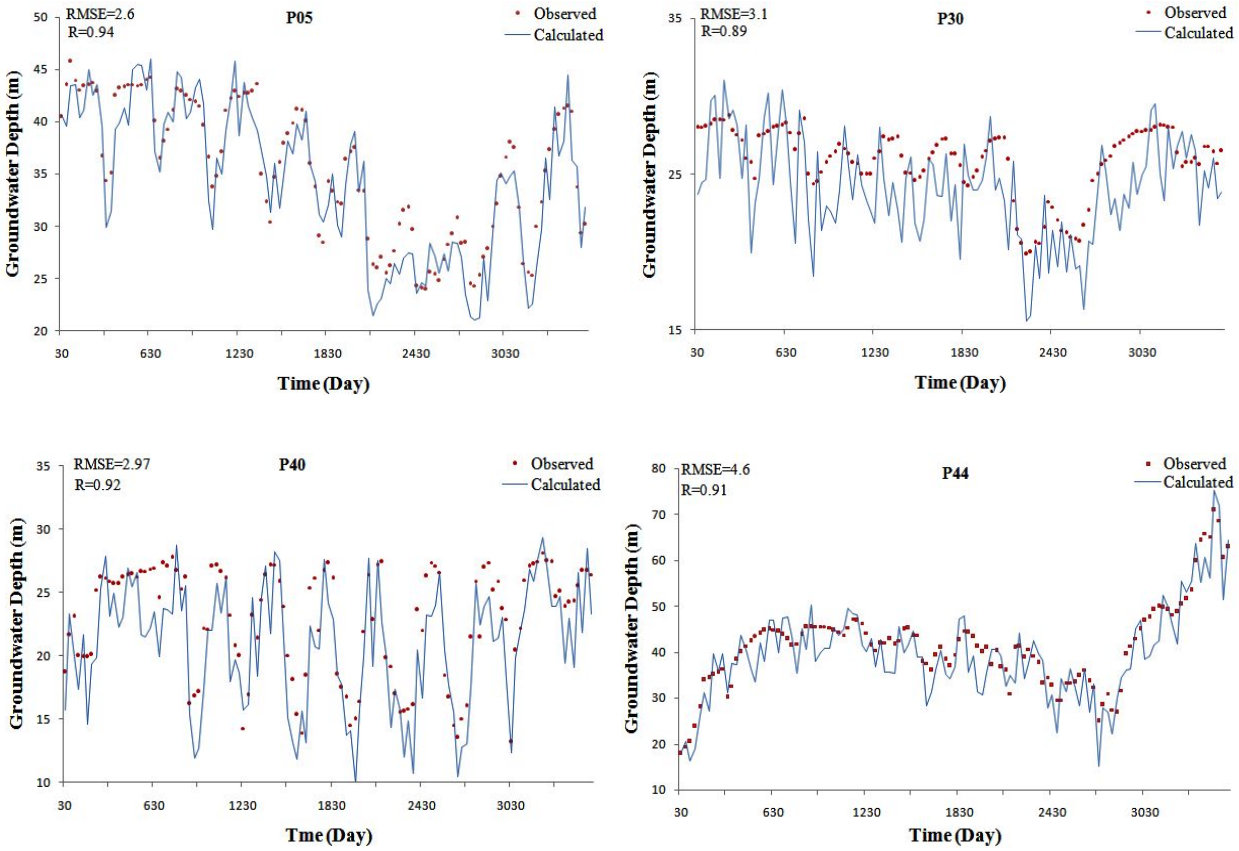
پس از کالیبراسیون مدل در شرایط ماندگار و مشخص شدن مقادیر هدایت هیدرولیکی مدل در شرایط غیرماندگار که مشخص کننده شرایط واقعی در آبخوان است، کالیبره گردید. در این مرحله کالیبراسیون براساس میزان تطابق سطح ایستابی شبیه‌سازی شده با سطح ایستابی مشاهده شده در طول بازه شبیه‌سازی (۱۳۸۹-۱۳۷۹)، صورت گرفت. در شکل 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 به‌نتایج 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 تهیهٔ شده از پیش‌بینی بار هیدرولیکی پیزومترها در بازهٔ زمانی ۱۳۹۰-۱۳۸۹ و مقایسه آن با بار هیدرولیکی مشاهداتی استفاده گردید. درصورتی 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 به‌مرحله کالیبراسیون قابل قبول بوده و مدل نهایی تأیید می‌گردد و به‌خوبی از آن می‌توان برای پیش‌بینی شرایط آینده استفاده نمود.

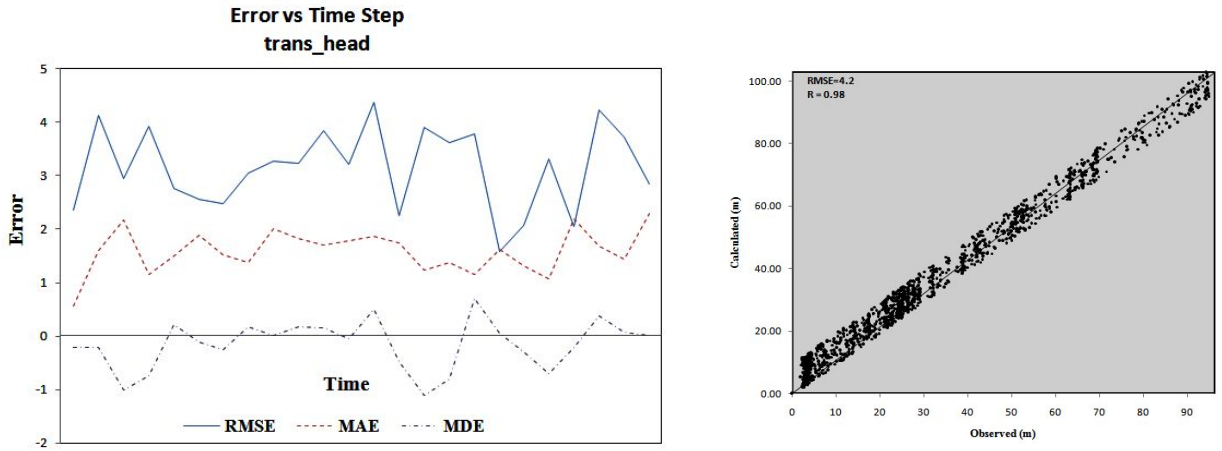
مدل تجربی تغذیه

به‌منظور ایجاد مدل تجربی تغذیه برای هر ناحیه از روش تورنث وایت با توجه به‌خصوصیات ناحیه‌های همگن تغذیه‌ای

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-10]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.23.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.287]



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 نسبت‌به زمان برای کل داده‌های صحت‌سنجی

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-10]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.23.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.287]

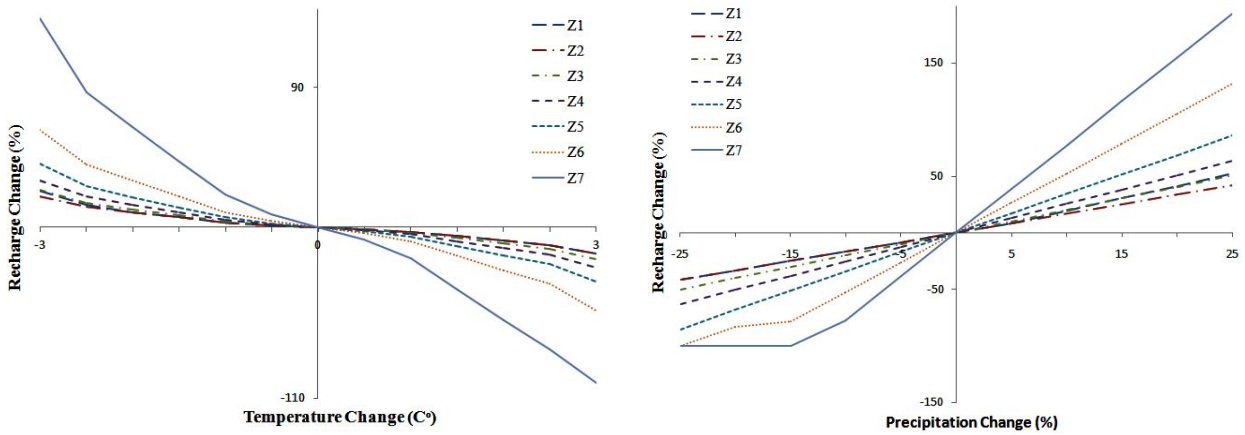
[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-10]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.23.5]

[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.287]

جدول ۲ . نتایج معادلات غیرخطی تغذیه در نواحی مختلف

Zone	Non Linear Model	R^2	RMSE
R۳	$R=\left(\frac{۰/۰۹۳۲(P-ET_C)}{-۷/۹۳D^{۰/۲۴۴۷}+۳Irr^{-۰/۰۹۵۵}}\right)-۷/۶۵$	۰/۹۶۱	۴/۳
R۵	$R=\left(\frac{۲۰/۷۴۵(P_C-ET_C)}{۱/۱۹۲D^{۰/۰۵۸۴}+۰/۰۰۳۵۶Irr^{-۴}}\right)+۶/۲$	۰/۹۵۸	۴/۴
R۱۱	$R=EXP\left(۰/۰۰۲۵۶(P-ET_C)\right)-۰/۰۰۷۶D+۰/۰۱Irr+۳/۶۳$	۰/۹۷۲	۳/۹
RIV	$R=۰/۵۶۸(P-ET_C)+\frac{۸۳۴/۹}{D}+۰/۴۵۵Irr-۶۸/۶۷$	۰/۹۴	۵/۱
RN۴	$R=EXP\left(۰/۰۰۶۷۶P-۰/۰۰۰۷۵۱ET-۰/۰۰۴۲۲D+۳/۰۸\right)$	۰/۹۴۶	۵/۲

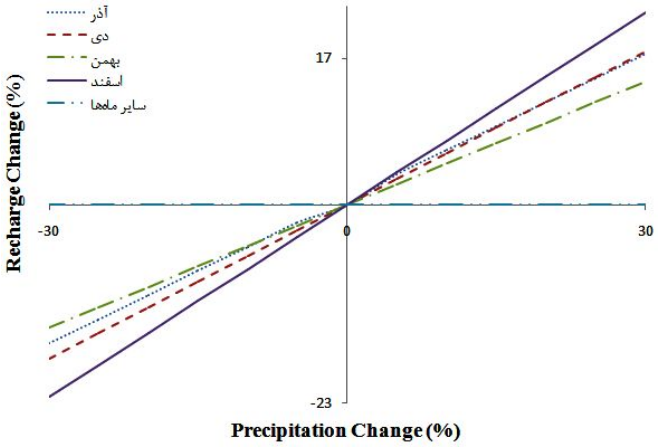


شکل ۶. نمودار آنالیز حساسیت نرخ تغذیه سالانه نسبت به تغییرات دما و بارش در نواحی مختلف

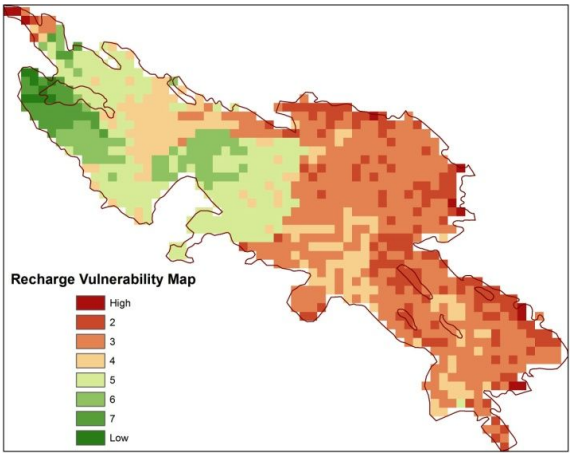
استفاده شد و مقادیر تغذیه ماهانه برای هر ناحیه مشخص گردید. سپس با توجه به پارامترهای مؤثر بر تغذیه شامل بارش، تبخیر و تعرق، آبیاری و ضخامت لایه غیراشباع معادله غیرخطی هر ناحیه استخراج گردید. فرآیند کالیبراسیون مدل غیرخطی تجربی تغذیه همزمان با کالیبراسیون مدل MODFLOW انجام گرفته و مدل تجربی به‌دست آمده از روش تورنث 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 به‌مدل غیرخطی استخراج شده، به‌عنوان 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)، 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 به‌نتایج به‌دست آمده از معادلات به‌دست آمده به‌خوبی می‌توان برای محاسبه تغذیه در منطقه با توجه به‌پارامترهای مؤثر، استفاده نمود.

آنالیز حساسیت

در این تحقیق به‌منظور بررسی اثر پارامترهای مختلف بر تغذیه از آنالیز حساسیت استفاده گردید. بدین‌منظور 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 به‌نتایج به‌دست 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



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



شکل ۸. نقشه پتانسیل آسیب‌پذیری تغذیه در دشت نجف‌آباد

توجه به‌نتایج مشخص گردید که نواحی با خاک سنگین‌تر و دشواری نفوذ بیشتر نسبت به‌تغییرات دما و بارش حساسیت بیشتری نشان می‌دهند. لذا این مناطق دارای پتانسیل آسیب‌پذیری بیشتری نسبت به کاهش احتمالی بارش و یا افزایش دما، می‌باشند. براساس نتایج به‌دست 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 به‌عنوان ماه‌های بحرانی در نظر گرفته شده و نرخ تغذیه سالانه در برخی از نواحی براساس این پارامترها تعیین گردید. در شکل۶ 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 به‌تغییرات نشان می‌دهند و تغییرات سایر ماه‌ها تقریبا اثری بر نرخ تغذیه سالانه ندارند.

در نهایت با توجه به‌نتایج به‌دست آمده از آنالیز حساسیت و مدل هیبریدی به‌دست آمده، نقشه آسیب‌پذیری تغذیه در دشت نسبت به تغییر پارامترهای مؤثر بر تغذیه در محیط نرم افزار ArcGIS ترسم گردید که نقشه مربوطه در شکل۸ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد اکثر نواحی دشت در محدوده با خطر آسیب‌پذیری بالا واقع شده‌اند، با این حال نیمه غربی دشت پتانسیل آسیب‌پذیری کمتری نسبت به نیمه شرقی دارا می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به‌منظور محاسبه تغذیه در سطح آبخوان یک روش هیبریدی جهت اصلاح روابط تجربی محاسبه تغذیه ارائه گردید. بدین‌منظور ابتدا عوامل مؤثر بر تغذیه و میزان اهمیت هر یک با تعیین مناطق همگن تغذیه‌ای به‌روش AHP مشخص گردید. سپس با روش تورنث وایت مقادیر تغذیه در هر ناحیه محاسبه و معادله تجربی غیرخطی آن استخراج گردیده 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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-10]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.23.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.287]

این عیب که مهم‌ترین عیب روش‌های تجربی برای محاسبه تغذیه می‌باشد برطرف گردیده و نیز معادلاتی به‌دست آمد که به‌راحتی می‌توان از آنها در ارزیابی‌های مختلف منابع آب زیرزمینی در آینده استفاده نمود. میزان دقت مدل‌های تجربی غیرخطی ایجاد شده به‌وسیله 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 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 به‌نتایج به‌دست 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.

منابع مورد استفاده

1. Adamowski, J., H. Fung Chan. 2011. A wavelet neural network conjunction model for groundwater level forecasting. J. Hydrol. 407: 28-40.
2. Ajjur, S. and Y. Mogheir. 2012. Effects of Climate Change on Groundwater Resources. The 4th International Engineering Conference -Towards engineering of 21st century.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Crosbie, R. S., J. L. McCallum, G. R. Walker and F. H. S. Chiew. 2010. Modelling climatechange impacts on groundwater recharge in the Murray-Darling basin, Australia. Hydrogeol. J. 18: 1639-1656.
7. 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.
8. Dams, J., E. Salvadore, 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-10]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.23.5]

[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.287]

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.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-10]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.23.5]

[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.287]