

مقایسه مدل‌های تجربی برآورد تغذیه‌ی پتانسیل آب‌های زیرزمینی در منطقه‌ای نیمه‌خشک با به‌کارگیری داده‌های لایسیمتری

سید ادیب بنی‌مهد*، داور خلیلی، علی‌اکبر کامگار حقیقی و شاهرخ زندپارسا^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۷/۷)

چکیده

در پژوهش حاضر، کارایی شش مدل تجربی با نام‌های فراتر از آستانه ساده، فراتر از نسبت ثابت، ذخیره با تابع درجه دوم، ذخیره با تابع نمایی، ذخیره با تابع درجه سوم و ذخیره با تابع توانی به‌منظور برآورد تغذیه‌ی پتانسیل آب‌های زیرزمینی در منطقه‌ای نیمه‌خشک، مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. ابتدا، برآورد تبخیر از روش ضریب دوگانه گیاهی FAO در طی رخداد تغذیه پتانسیل ارزیابی شد. سپس مدل‌های تجربی با استفاده از داده‌های رطوبت خاک و تغذیه پتانسیل، واسنجی شدند. به‌منظور اعتبارسنجی مدل‌های تجربی، رطوبت خاک و تغذیه پتانسیل به‌طور هم‌زمان برای واقعه‌ای مستقل برآورد شدند. مطابق با نتایج، ۵ مدل از شش مدل مورد بررسی (به‌استثنا مدل فراتر از آستانه ساده) قادر به برآورد تغذیه‌ی پتانسیل با دقت مناسب و با بیشترین مقدار "جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده" (NRMSE) برابر با ۲۴/۴ درصد می‌باشند. براساس نتایج اعتبارسنجی، تغذیه پتانسیل توسط مدل‌های نمایی، درجه سه و توانی به‌طور مناسب‌تری نسبت به مدل‌های خطی برآورد گردید. همچنین، رطوبت خاک با به‌کارگیری تمامی مدل‌های تجربی با دقت مناسبی در دوره تغذیه برآورد شد. در نهایت، مدل نمایی که دارای کمترین مقدار NRMSE در برآورد رطوبت خاک و همچنین برآورد مناسبی از تغذیه بوده، به‌عنوان مناسب‌ترین مدل برآورد تغذیه‌ی پتانسیل در منطقه مورد مطالعه معرفی گردید.

واژه‌های کلیدی: تغذیه‌ی پتانسیل آب زیرزمینی، تبخیر از خاک بایر، مدل‌های تجربی.

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز
*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: adib2004b@gmail.com

مقدمه

مفید در به کارگیری مدل‌های پیچیده (از قبیل ریچاردز)، استفاده از مدل‌های ساده تجربی و یا یکپارچه برای برآورد آب‌های زیرزمینی، هنوز می‌تواند مفید واقع گردد. در این راستا، برآوردهای منطقی از تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی با به کارگیری داده‌های صحرایی که به سرعت به دست می‌آیند، می‌تواند ارائه شود برای این منظور، تعدادی از مدل‌ها با الگوریتم ساده و با به کارگیری بیلان رطوبتی روزانه خاک به برآورد تغذیه پتانسیل آب‌های زیرزمینی می‌انجامند. با وجود این که مدل‌های قطعی حل معادله ریچاردز و یا بیلان آبی می‌توانند نتایج با دقت بالایی را به دست دهند، ولی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به دلیل عدم قطعیت موجود در برآورد یا اندازه‌گیری تبخیر (تبخیر-تعرق)، خطای برآورد تغذیه آب‌های زیرزمینی با به کارگیری این مدل‌ها ممکن است زیاد شود (۱۰). بنابراین یکی از زمینه‌های تحقیقات، برآورد تغذیه پتانسیل با به کارگیری داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد.

هدف از پژوهش حاضر بررسی کارایی مدل‌های ساده و تجربی برآورد تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه‌ای نیمه‌خشک می‌باشد. برای این منظور در ابتدا مقدار تبخیر از سطح خاک در طول دوره رخداد تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی و با به کارگیری روش ضریب گیاهی دوگانه FAO، برآورد و ارزیابی می‌شود. سپس، مدل‌های متداول تجربی برآورد تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های رطوبت خاک و تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده، واسنجی می‌شوند. به منظور اعتبارسنجی مدل‌های تجربی، رطوبت خاک و تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی به طور هم‌زمان و در واقع‌ای مستقل، شبیه‌سازی می‌شوند. در نهایت بهترین مدل مناسب برآورد تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی برای کاربرد در منطقه مورد مطالعه معرفی می‌شود.

مواد و روش‌ها

تبخیر واقعی از خاک بایر

تبخیر روزانه واقعی از سطح خاک بایر (E_a) از روش ضریب گیاهی دوگانه مطابق با رابطه زیر برآورد می‌شود (۱):

$$E_a = (K_e + K_{cb}) ET_0 \quad [1]$$

که K_{cb} ضریب مربوط به تبخیر پخشیده شده در خاک بایر

ازدیاد جمعیت جهان سبب افزایش روزافزون برداشت از آب‌های زیرزمینی گردیده و این مسئله باعث شده است که در مدیریت منابع آب، ارائه روش‌های مناسب جهت دست‌یابی به برآورد تغذیه پتانسیل یا واقعی آب زیرزمینی در بازه‌های زمانی، به صورت چالش‌هایی در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی به موقع و در زمان واقعی (Real time) مطرح گردد. از طرفی، مدل‌های شبیه‌سازی که برای برآورد تغذیه پتانسیل یا واقعی آب زیرزمینی به کار می‌روند اغلب به طور مستقیم یا غیرمستقیم متکی بر برآورد تبخیر (عمق آبی که از سطح خاک یا تعرق گیاهان وارد اتمسفر می‌شود) می‌باشند. در راستای برآورد تغذیه آب زیرزمینی (پتانسیل یا واقعی) تا به امروز، روش‌های متنوعی برای اقلیم‌های مختلف (از قبیل خشک، نیمه‌خشک و مرطوب) و مناطق مختلف (از قبیل دشت و کوهپایه) ارائه شده است (۱۳، ۱۷، ۲۵ و ۲۶). به طور کلی روش‌های تعیین فرآیند تغذیه آب زیرزمینی، پاسخ‌های متفاوتی را ارائه می‌کنند (۱۷ و ۲۶). همگام با سایر کشورهای جهان، در ایران نیز تحقیقات بر روی شبیه‌سازی یا تخمین تغذیه آب زیرزمینی (واقعی یا پتانسیل) صورت گرفته است (۱۵، ۱۶، ۲۱، ۲۳، ۲۴ و ۲۹). مدل‌هایی که در دو دهه اخیر در جهان برای برآورد تغذیه آب زیرزمینی (پتانسیل یا واقعی) به کار گرفته شده‌اند اغلب براساس حل معادله ریچاردز در جهت جریان عمودی رو به پایین در منطقه غیراشباع و یا براساس روندیابی جریان از میان تعداد زیادی از لایه‌های گسسته (مستقل) می‌باشند (۳، ۶، ۱۴، ۱۹، ۲۰ و ۲۸). مدل‌های شبیه‌سازی زیادی بر این اساس ارائه شده‌اند که می‌توان به SHETRAN (۹)، SWIM (۲۲)، HYDRUS (۲۷)، WAVES (۳۱) و SOIL-SISPAT (۵) اشاره نمود. در این مدل‌ها تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی (زه‌کشی) به صورت جریان آب رو به پایین از زیرمنطقه ریشه محاسبه می‌گردد. این مدل‌ها اغلب نیاز به اندازه‌گیری و یا برآورد تعداد زیادی از پارامترها (از قبیل هیدرولیکی و گیاهی) داشته و برای اثبات برتری نتایج این مدل‌ها نسبت به مدل‌های یکپارچه (lump) با مخزن خاک یگانه (عموماً براساس حل معادله بیلان آبی)، شواهد کمی وجود دارد. با وجود پیشرفت ریزرایانه‌ها به منظور ابزار کاربردی

قرار می‌گیرد. این مدل‌ها بر این فرض استوار می‌باشند که اگر مقدار آب خاک (S) از مقدار ظرفیت زراعی (FC) کمتر گردد، تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی صورت نگرفته و یا قطع می‌گردد. همچنین، این مدل‌ها در حالت مخزن یگانه و در مقیاس روزانه ارائه شده و شامل پارامترهای برازشی بوده که به تفکیک به آنها اشاره می‌گردد.

مدل (۱): وقوع فراتر از آستانه ساده (Simple threshold exceedance)

براساس الگوریتم ساده زیر برای برآورد تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی (R) ارائه شده است (۸):

$$R = (S - FC) * Z \quad [6]$$

که در آن S و FC به ترتیب مقادیر حجمی رطوبت و ظرفیت زراعی خاک ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)، Z عمق لایه خاک (mm) و R مقدار پتانسیل تغذیه آب‌های زیرزمینی (mm) می‌باشند.

مدل (۲): وقوع فراتر با نسبت ثابت (Fixed proportion exceedance)

الگوریتم این مدل ساده به قرار زیر بوده (۷) که در آن DPF (پارامتر بدون بعد) و FC پارامترهای برازشی مدل می‌باشند:

$$R = DPF * (S - FC) * Z \dots \quad [7]$$

مدل (۳): ذخیره با تابع درجه دوم (Quadratic function of storage)

این الگوریتم در مدل SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure) مطرح شده است و به قرار زیر می‌باشد (۱۸):

$$R = CREC * (S - FC) * Z * (S/SC) \quad [8]$$

که در آن SC حداکثر مقدار آب خاک مشاهده شده و CREC (پارامتر بدون بعد) و FC پارامترهای برازشی مدل می‌باشند.

مدل (۴): ذخیره با تابع نمایی (Exponential function of storage)

این الگوریتم از داده‌های اندازه‌گیری شده لایسیمتر وزنی در

(برابر با ۱۵/۰ ارائه شده توسط مرجع ۱)، ET_0 تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع (محاسبه شده از روش فائو-پنمن-مونتیث) و K_e ضریب مربوط به جزء تبخیر می‌باشند. K_e از رابطه زیر به دست می‌آید (۱):

$$K_e = \min[K_r(K_{c-\max} - K_{cb}), f_{ew}K_{c-\max}] \quad [2]$$

که در آن $K_{c-\max}$ حداکثر مقدار ضریب گیاهی پس از بارندگی (برابر با ۱/۲)، f_{ew} کسر خاک خیس شده و در معرض تابش مستقیم (برای خاک بایر برابر با ۱) و K_r ضریب کاهش تبخیر وابسته به عمق تخلیه (تبخیر) جمع‌ی از لایه سطحی خاک می‌باشند.

فرآیند تبخیر از سه مرحله تشکیل شده است (۱۱) که در مرحله اول: تبخیر با حداکثر قدرت تبخیرکنندگی هوا انجام می‌گیرد و عامل محدودکننده، مقدار انرژی می‌باشد. در مرحله دوم: آب عامل محدودکننده بوده و روند تبخیر نزولی است. مرحله سوم: تبخیر بسیار ناچیز بوده و به صورت پخش و جریان هوای خاک صورت می‌گیرد. این مراحل با تعریف دو نقطه رطوبتی "کل آب قابل تبخیر" (TEW) و "رطوبت آسان تبخیرشونده" (REW)، توسط ضریب K_r تعیین می‌شوند (۱):

$$K_r = \begin{cases} 1.0 & \text{if } D_{e,i-1} \leq REW \\ \frac{TEW - D_{e,i-1}}{TEW - REW} & \text{if } REW < D_{e,i-1} < TEW \\ 0.0 & \text{if } D_{e,i-1} \geq TEW \end{cases} \quad [3]$$

$$TEW = (FC - 0.5PWP)Z_e \quad [4]$$

که در آن $D_{e,i-1}$ مقدار جمع‌ی تبخیر از سطح خاک در روز i-ام، FC و PWP به ترتیب برابر با رطوبت ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم و Z_e عمق لایه سطحی خاک می‌باشند. مقادیر REW برای خاک‌های مختلف توسط مرجع (۱) داده شده است. مقدار تبخیر جمع‌ی از سطح خاک بایر از رابطه زیر محاسبه می‌شود (۱):

$$D_{e,i} = D_{e,i-1} - (P_i - RO_i) + E_{a,i} \quad [5]$$

که در آن RO_i ، P_i به ترتیب مقدار بارش و رواناب در روز iام می‌باشند.

توصیف مدل‌های تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی

در این تحقیق کاربرد مدل‌های ساده تجربی برآورد تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی برای منطقه‌ی نیمه‌خشک مورد ارزیابی

Wisconsin ارائه گردید (۴):

$$R = C^b * (S - FC) * Z \quad [9]$$

که در آن C، b (پارامترهای بدون بعد) و FC پارامترهای برازشی مدل می‌باشند.

مدل (۵): ذخیره با تابع درجه سوم (Cubic function of storage)

این مدل توسط هوگینز و مونک (۱۲) به شرح زیر ارائه شده است:

$$R = I_c \left\{ 1 - \frac{(SC-S)}{(SC-FC)} \right\}^3 \quad [10]$$

که در آن I_c (پارامتر بدون بعد) و FC پارامترهای برازشی هستند.

مدل (۶): ذخیره با تابع توانی (Power function of storage)

الگوریتم این مدل از داده‌های لایسمتر وزنی ارائه شده است (۲):

$$R = C * [(S - FC) * Z]^b \quad [11]$$

که در آن C، b (پارامترهای بدون بعد) و FC پارامترهای برازشی مدل می‌باشند.

برآورد مقادیر آب خاک

همان‌طور که در توصیف مدل‌های (۱) تا (۶) نشان داده شد، تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی به‌عنوان تابعی از ذخیره آب خاک می‌باشد. در عمل می‌بایست، ذخیره آب خاک (S) در مقیاس زمانی مورد بررسی (روزانه در این تحقیق)، با به‌کارگیری تغذیه‌ی برآورد شده به‌عنوان متغیر (R) و معادله بیلان آب خاک، برای صحت‌سنجی معادلات برآورد تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی دوباره محاسبه گردد (۱). برای این منظور، مقدار رطوبت خاک و تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی به‌طور هم‌زمان برآورد شدند:

$$S'_i = (S_{i-1} * Z + P_i - RO_i - E_i) / Z \quad [12]$$

$$R_i = f(S'_i - FC) \quad [13]$$

$$S_i = S'_i - \frac{R_i}{Z} \quad [14]$$

که در آن P_i، RO_i و E_i به‌ترتیب عبارت از مقادیر روزانه

بارش، رواناب و تبخیر در روز iام (mm) و Z عمق لایه خاک (mm) می‌باشند. در ابتدا مقدار رطوبت خاک در روز i (S'_i) با فرض صفر بودن مقدار تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی (R_i) محاسبه می‌شود (معادله (۱۲)). سپس، مقدار تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی به‌عنوان تابعی از اختلاف میان رطوبت خاک در روز i (محاسبه شده، S'_i) و ظرفیت زراعی (FC) با به‌کارگیری مدل‌های (۱) تا (۶) برآورد می‌گردد (معادله (۱۳)). در نهایت مقدار برآورد شده‌ی تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی از مقدار رطوبت خاک محاسبه شده از قبل (S'_i) کسر می‌گردد و رطوبت خاک در روز i (S_i) برآورد می‌گردد (معادله (۱۴)). با به‌کارگیری معادلات (۱۲) تا (۱۴)، مدل‌های برآورد تغذیه پتانسیل (۱) تا (۶) و رطوبت خاک اندازه‌گیری شده در روز i-1 ام (S_{i-1})، رطوبت خاک و تغذیه پتانسیل در روزهای مختلف به‌طور هم‌زمان برآورد می‌شوند.

تابع هدف و معیارهای ارزیابی

جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE) به‌عنوان تابع هدف در واسنجی مدل‌ها به‌کار گرفته شد. معیارهای ارزیابی NRMSE، میانگین خطای جهت‌گیری (MBE) و راندمان مدل (E) برای ارزیابی مدل‌های واسنجی شده بکار گرفته شدند (۷ و ۳۰).

$$NRMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_i - \hat{R}_i)^2} / \bar{R} \quad [15]$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_i - \hat{R}_i) \quad [16]$$

$$E = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \hat{R}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2} \right) \quad [17]$$

که n، تعداد کل داده‌ها R_i و \hat{R}_i به‌ترتیب مقدار اندازه‌گیری و برآورد شده‌ی تغذیه و \bar{R} میانگین تغذیه است. مقادیر کمتر NRMSE و MBE و مقدار نزدیک‌تر به ۱۰۰ راندمان مدل (E)، بیان‌گر عملکرد مناسب‌تر مدل می‌باشند (۳۰).

براساس پیشنهاد ویلمت (۳۰) اگر شاخص آماری NRMSE کمتر از ۳۰ درصد باشد، شبیه‌سازی‌ها قابل قبول است. مقدار مثبت MBE نشان‌دهنده کم برآورد شدن مقادیر شبیه‌سازی شده تغذیه پتانسیل نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده آن می‌باشد.

منطقه مورد مطالعه و موجودیت داده‌ها

منطقه مورد مطالعه با نام حوضه‌ی کوی اساتید (خاک: سبک بافت لوم و لوم شنی، اقلیم: نیمه‌خشک) در دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز واقع شده است. برای بررسی اجزای معادله بیلان آب در خاک، لایسمتر فلزی غیروزنی و استوانه‌ای شکل به قطر و ارتفاع ۲ متر در محلی با شیب ۷ درصد، در خاک نصب شد. آمار روزانه بارندگی (مربوط به سال آبی ۹۱-۱۳۹۰) (مهر تا شهریور) با بارندگی سالانه ۳۴۳ میلی‌متر) از ایستگاه هواشناسی سینوپتیک دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز جمع‌آوری گردید. هم‌چنین داده‌های رواناب رخ داده شده در روی سطح لایسمتر مربوط به هر واقعه بارندگی به‌طور مستقیم اندازه‌گیری و برداشت شد. قرائت رطوبت خاک توسط دستگاه نوترون‌متر در فواصل عمقی ۳۰ سانتی‌متری از یکدیگر (تا عمق ۱۵۰ سانتی‌متری) در هنگام رخداد تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی، در اکثر موارد به‌صورت روزانه انجام شد. آب خروجی از کف لایسمتر در عمق ۲ متری (تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی) به‌صورت روزانه قرائت شد. دو واقعه مستقل تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی مشاهده شد که واقعه دوم (روزهای ۸۷ تا ۱۴۳ از ابتدای سال میلادی) برای واسنجی مدل‌های (۱) تا (۶) و واقعه اول (روزهای ۳۷ تا ۸۶ از ابتدای سال میلادی) جهت اعتبارسنجی آنها به‌کار برده شد. لازم به ذکر است که در تحقیق حاضر فرض هم‌ارزی میان هیدروگراف نفوذ عمقی از کف لایسمتر (در عمق ۲ متری) و هیدروگراف تغذیه به آب زیرزمینی در نظر گرفته شده تا بتوان آب خروجی از کف لایسمتر را با تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی مرتبط دانست. این فرض توسط مرجع (۷) نیز مورد پذیرش قرار گرفته است.

این پژوهش با هدف بررسی مدل‌های ساده و تجربی برآورد تغذیه‌ی پتانسیل آب زیرزمینی انجام می‌شود و برای این منظور در ابتدا مقدار تبخیر تجمعی واقعی از سطح خاک با مقادیر برآورد شده از روش ضریب گیاهی دوگانه FAO مقایسه گردیده تا کارآیی روش ضریب گیاهی در طی رخداد تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه ارزیابی شود. سپس، مدل‌های تجربی برآورد تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی برای واقعه دوم رخداد آن (روزهای ۸۷ تا ۱۴۳

از ابتدای سال میلادی) واسنجی شده و بهترین مدل‌ها براساس معیارهای ارزیابی ارائه می‌شوند. در نهایت، مقدار رطوبت خاک و تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی در واقعه اول رخداد آن (روزهای ۳۷ تا ۸۷ از ابتدای سال میلادی) با به‌کارگیری معادله‌ی واسنجی شده‌ی برآورد تبخیر از سطح خاک (روش ضریب گیاهی دوگانه)، بهترین مدل‌های برآورد تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی، معادله بیلان آب (معادلات (۱۲) تا (۱۴)) و مقدار رطوبت خاک اندازه‌گیری شده در روز اول (روز شماره ۳۷) به‌عنوان شرط مرزی اولیه، برآورد و ارزیابی می‌شوند.

نتایج و بحث

تبخیر از سطح خاک بایر

مقادیر تبخیر واقعی از خاک بایر با به‌کارگیری روش ضریب گیاهی دوگانه در دوره‌ی رخداد تغذیه پتانسیل (روزهای ۳۷ تا ۱۴۳ از ابتدای سال میلادی) برآورد شد. برای این منظور در ابتدا مقدار تبخیر روزانه از سطح خاک با به‌کارگیری معادله بیلان آب و با مشخص بودن مقادیر روزانه بارش، رواناب، رطوبت خاک و تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی، محاسبه شد. سپس، مقادیر Z_e و K_{ob} با حداقل کردن تابع هدف جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE) میان مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده‌ی تبخیر و هم‌چنین با استفاده از منوی SOLVER برنامه EXCEL، به‌ترتیب برابر با ۰/۱ و ۱۱۵ میلی‌متر بهینه شدند.

بنابر نتایج، مقادیر تبخیر تجمعی برآورد شده از سطح خاک بایر و اندازه‌گیری شده آن (از معادله بیلان) در دوره رخداد تغذیه پتانسیل (روز ۳۷ تا ۱۴۳) به‌ترتیب برابر با ۵۶/۷ و ۶۳/۱ میلی‌متر می‌باشند. شیب خط برازش داده‌های مقادیر تجمعی تبخیر برآورد شده از سطح خاک در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده، برابر با ۱/۰۱۲ (بسیار نزدیک به ۱) به‌دست آمده که دلیلی بر مناسب بودن روش ضریب گیاهی دوگانه جهت برآورد تبخیر تجمعی واقعی از سطح خاک با دقت مناسب می‌باشد (شکل خط برازش ارائه نشده است).

واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌های تغذیه

مدل‌های ارائه شده در پژوهش حاضر واسنجی شد، و پارامترهای واسنجی شده و معیارهای ارزیابی آنها به ترتیب در جدول‌های (۱) و (۲) آورده شده است. مطابق با جدول (۲)، به غیر از مدل (۱) با NRMSE برابر با ۱۴۵/۷ درصد خطا، تمامی مدل‌ها به خوبی واسنجی شده‌اند (بیشترین مقدار NRMSE برابر با ۲۴/۴ درصد). مقدار راندمان محاسبه شده مربوط به مدل‌های (۲) تا (۶) بسیار نزدیک به ۱۰۰ بوده که دلیلی بر مناسب بودن برآوردها می‌باشد. همچنین، مقادیر مثبت MBE، بیانگر کم‌برآورده شدن تغذیه پتانسیل می‌باشد. کارایی مدل (۱) بسیار متفاوت از سایر مدل‌ها می‌باشد (جدول (۳))، بدان دلیل است که پس از اتمام بارندگی تمامی آب اضافه‌تر از حد ظرفیت زراعی، بلافاصله از خاک تخلیه شده و تغییرات ناگهانی تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی را به دست می‌دهد که با واقعیت هماهنگی ندارد. عدم کارایی مدل (۱) در مرجع ۷ نیز تأیید شده است. سایر مدل‌ها، مقدار تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی را با دقت مناسب برآورد کرده که در مرحله اعتبارسنجی به کار گرفته شدند (جدول (۳)).

به منظور اعتبارسنجی و کارایی مدل‌های واسنجی شده در برآورد تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی (با به کارگیری پارامترهای واسنجی شده)، تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی و مقدار آب ستون خاک (تا عمق ۱۵۰ سانتی متری) به ترتیب برآورد و شبیه‌سازی شدند. برای این منظور از مدل‌های واسنجی شده (۲) تا (۶) برای برآورد تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی، روش ضریب گیاهی دوگانه جهت برآورد تبخیر از سطح خاک و معادله بیلان جهت برآورد رطوبت خاک، استفاده شد. نتایج تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی برآورد شده در دوره اعتبارسنجی با به کارگیری مدل‌های واسنجی شده (مدل‌های (۲) تا (۶))، در جدول (۳) آورده شده است. مطابق با جدول (۳) با به کارگیری تمامی مدل‌ها، مقادیر تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی در مرحله اعتبارسنجی نیز کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده، برآورد شد. همچنین، نتایج اعتبارسنجی نشان داد که مدل‌های (۲) و (۳) در اواخر رخداد آن به خوبی قادر به برآورد تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی نبودند به طوری که مقدار آن را برابر با صفر برآورد

نمودند (درحالی که هنوز رخداد واقعی آن ادامه داشت) که به دلیل خطی بودن فرم تابع این مدل‌ها می‌باشد (شکل‌ها نشان داده نشده است). به علاوه، مدل‌های (۴)، (۵) و (۶) مقدار تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی را در اواخر رخداد آن، کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده آن (بیشتر از صفر) برآورد نموده‌اند (شکل مربوط به مدل (۵) نشان داده نشده است). مطابق با نتایج مربوط به برآورد مقادیر سالانه تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی، مدل‌های (۴) و (۶) برآورد بهتری نسبت به مدل (۵) داشته‌اند (جدول (۳)). این نتایج مشابه با تحقیقات ارائه شده توسط مرجع ۷ بوده که برای ۱۱ لایسمتر کشت شده برای یک مرتع ارائه شده است.

تغییرات تغذیه پتانسیل روزانه آب زیرزمینی برآورد شده با به کارگیری مدل‌های (۴) و (۶) در روزهای ۳۷ تا ۸۷ از ابتدای سال میلادی (دوره اعتبارسنجی) در شکل (۱) نشان داده شده است. از شکل (۱) مشخص است که مدل‌های (۴) و (۶) دو نقطه اوج برای تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی پس از رخداد بارندگی برآورد نموده‌اند که از نظر مقدار، بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده و از نظر زمان رخداد، سریع‌تر از زمان رخداد واقعی آن برآورد شده‌اند (نتایج مشابه برای سایر مدل‌های مورد بررسی (به استثنای مدل (۱)) به دست آمده که نشان داده نشده است). علت افزایش ناگهانی مقدار تغذیه روزانه شبیه‌سازی شده و عدم تطابق آن با مقدار اندازه‌گیری شده (نقطه اوج اول در شکل (۱)) و هم‌چنین تأخیر زمانی میان آنها (نقطه اوج دوم در شکل (۱)) را می‌توان این‌گونه بیان نمود که در دوره برآورد تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی، مقدار رطوبت خاک زیاد بوده (بیشتر از حد FC) و با به کارگیری این مدل‌ها در هنگام وقوع بارش، آب اضافه خاک (بیشتر از حد بحرانی FC) با سرعت بیشتری نسبت به واقعیت، تخلیه شده و به صورت تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی برآورد می‌شود. با توجه به اهمیت بسیار زیاد برآوردهای سالانه تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی نسبت به برآوردهای روزانه آن، و از آنجاکه در این تحقیق مقادیر سالانه آن با به کارگیری مدل‌های واسنجی شده با دقت مناسبی برآورد شده، لذا نتایج تحقیق قابل قبول است.

جدول ۱. پارامترهای واسنجی شده مدل‌ها

پارامترهای مدل‌ها					شماره مدل
$\times 10^{-3} (-) Ic$	$\times 10^{-3} (-) b$	$\times 10^{-3} (-) C$	$\times 10^{-3} (-) DBF$	$\times 10^{-3} (-) FC$	
---	---	---	---	۲۲۳/۱	۱
---	---	---	۵۸/۷	۲۰۳/۸	۲
---	---	---	۶۱/۱	۲۰۳/۵	۳
---	۷۳۵/۰	۱۱۰۳/۱	---	۲۱۷/۴	۴
۳۶۱۸/۰	---	---	---	۱۸۷/۰	۵
---	۳۲۶۹/۵	۲۲۸۶×10^{-6}	---	۱۸۱/۰	۶

FC, DBF, C, b و Ic پارامترهای برازشی مدل‌ها می‌باشند. (-): نشان‌دهنده بدون بعد بودن پارامترها

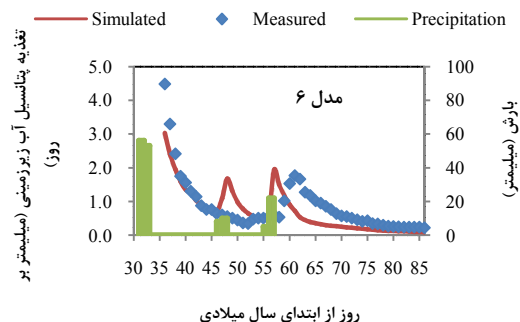
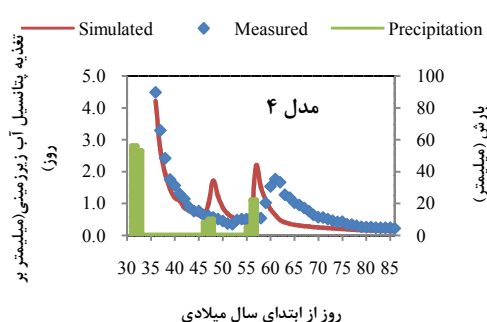
جدول ۲. معیارهای ارزیابی در مرحله واسنجی در واقعه دوم تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی (از روز ۸۷ تا ۱۴۳ از ابتدای سال میلادی)

شماره مدل	NRMSE (%)	MBE (10^{-3} mm/d)	E (%)	شماره مدل	NRMSE (%)	MBE (10^{-3} mm/d)	E (%)
۱	۱۴۵/۷	۳۲۵	۶۱/۳	۴	۹/۳	۷	۹۹/۵
۲	۲۴/۴	۲۹	۹۸/۹	۵	۱۶/۲	۱۲	۹۹/۸
۳	۲۲/۸	۲۹	۹۹/۱	۶	۱۳/۶	۱۲	۹۹/۷

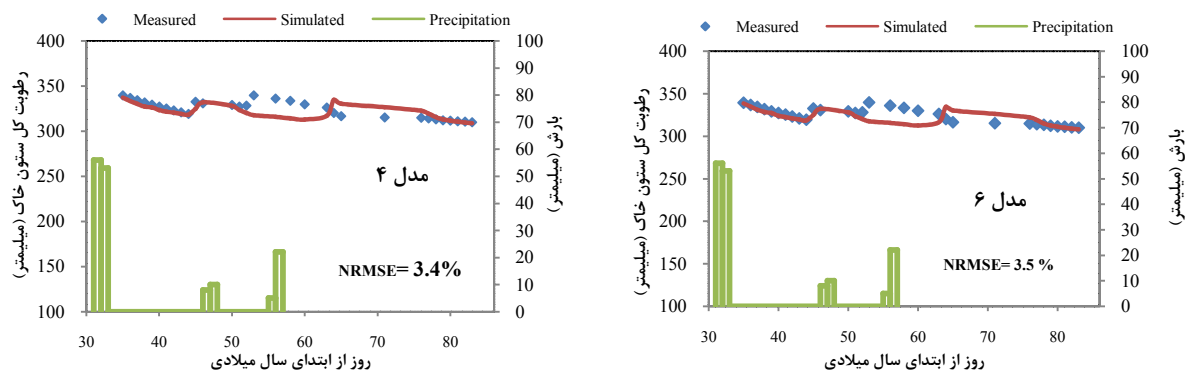
NRMSE: میانگین جذر مربعات خطا نرمال شده، MBE: میانگین خطای جهت‌گیری و E: راندمان مدل.

جدول ۳. تغذیه‌ی پتانسیل آب زیرزمینی اندازه‌گیری و برآورد شده با به‌کارگیری مدل‌های واسنجی شده (mm)، در سال‌های ۹۱-۱۳۹۰

شماره مدل	برآورد شده		اندازه‌گیری شده	
	اعتبارسنجی	واسنجی	اعتبارسنجی	واسنجی
۱	۲/۰	---	۱۳/۷	۳۹/۳
۲	۱۲/۷	۳۳/۳	---	---
۳	۱۲/۷	۳۳/۳	---	---
۴	۱۴/۲	۳۶/۱	---	---
۵	۱۳/۵	۳۵/۳	---	---
۶	۱۴/۲	۳۶/۳	---	---



شکل ۱. تغییرات مقادیر تغذیه‌ی پتانسیل آب زیرزمینی اندازه‌گیری و برآورد شده با به‌کارگیری مدل‌های (۴) و (۶) در روزهای ۳۷ تا ۸۷ از ابتدای سال میلادی در دوره اعتبارسنجی.



شکل ۲. تغییرات آب خاک اندازه‌گیری و برآورد شده با مدل‌های (۴) و (۶) در روزهای مختلف از ابتدای سال میلادی.

آب زیرزمینی با به‌کارگیری داده‌های اندازه‌گیری شده لایسومتر غیرروزی در منطقه‌ی نیمه‌خشک برای حالت مخزن یگانه، واسنجی و اعتبارسنجی شدند. همچنین در این پژوهش، روش ضریب گیاهی دوگانه‌ی برآورد تبخیر از سطح خاک در طی فرآیند رخداد تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج برآورد تبخیر از سطح خاک نشان داد که با به‌کارگیری داده‌های صحرایی اندازه‌گیری شده شامل رطوبت خاک (تا عمق ۱/۵ متری) و تغذیه‌ی پتانسیل آب زیرزمینی (از عمق ۲ متری) در سال آبی ۹۱-۱۳۹۰، نزدیکی مناسبی میان مقادیر تجمعی تبخیر واقعی از سطح خاک برآورد شده از روش ضریب گیاهی دوگانه با مقادیر تجمعی اندازه‌گیری شده (محاسبه شده از معادله بیلان) وجود داشت.

نتایج اعتبارسنجی مدل‌های برآورد تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی با به‌کارگیری روش ضریب گیاهی برآورد تبخیر در معادله بیلان رطوبتی خاک، نشان داد که مدل (۱) با فرض ساده‌ی برآورد تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی به‌صورت اختلاف مستقیم آب خاک از حد بحرانی FC (تابع خطی)، کارایی نداشت. به‌علاوه، مدل‌های (۲) و (۳) به‌ترتیب با توابع خطی و درجه دوم مقدار تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی را در اواخر دوره رخداد آن برابر با صفر برآورد می‌کنند.

نتایج نشان داد که تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی توسط مدل‌های با توابع درجه سوم، نمایی و توانی (مدل‌های (۴)، (۵) و (۶)) با دقت مناسب‌تری برآورد می‌گردد که از میان آنها، مدل‌های (۴) و (۶) کارایی مناسبی در برآورد تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی داشته، هرچند که مقدار آن را کمتر از

نتایج شبیه‌سازی رطوبت خاک با به‌کارگیری تمامی مدل‌های (۱) تا (۶) در مرحله اعتبارسنجی نشان داد که برای این مدل‌ها، شاخص آماری NRMSE به‌ترتیب برابر با ۴/۵، ۳/۹، ۳/۸، ۳/۴، ۳/۷ و ۳/۵ درصد به‌دست آمد. اگرچه شبیه‌سازی تغییرات روزانه رطوبتی خاک با به‌کارگیری تمامی مدل‌های برآورد تغذیه پتانسیل در معادله بیلان آب با دقت مناسبی انجام شده است ($NRMSE < 5\%$ ، شکل‌های مربوط به مدل‌های (۲)، (۳) و (۵) آورده نشده است) ولی مدل‌های (۴) و (۶) دارای کمترین مقدار خطا بودند. به‌منظور بررسی دقیق‌تر، تغییرات آب خاک برآورد شده (تا عمق ۱۵۰ سانتی‌متری) در مقایسه با مقادیر متناظر اندازه‌گیری شده آن در دوره اعتبارسنجی، با به‌کارگیری مدل‌های (۴) و (۶) در شکل (۲) آورده شده است. از شکل (۲) مشخص است که روند تغییرات رطوبت خاک اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده مشابه بود، به‌طوری‌که بیشترین اختلاف میان آنها مربوط به دوره‌ی برآورد نادرست تغذیه‌ی پتانسیل (دو نقطه اوج در شکل (۱)) می‌باشد. نتایج مشابهی برای سایر مدل‌ها (به استثنای مدل (۱)) به‌دست آمده است که نشان داده نشده است. در نهایت، مدل (۴) با بهترین برآورد از رطوبت خاک (کمترین مقدار NRMSE) و برآورد مناسب از تغذیه پتانسیل، به‌عنوان مناسب‌ترین مدل برای برآورد تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه پیشنهاد می‌گردد.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، شش مدل ساده جهت برآورد تغذیه پتانسیل

مقدار واقعی برآورد می‌کنند. نتایج برآورد آب خاک با شاخص آماری NRMSE، برای مدل (۴) محاسبه شده که به‌کارگیری مدل‌های (۴) و (۶) نشان داد که کمترین مقدار برای منطقه مورد مطالعه پیشنهاد می‌شود.

منابع مورد استفاده

۱. سمیعی، م. و ع. تلوری. ۱۳۹۰. برآورد تغذیه آب زیرزمینی از طریق تحلیل جریان پایه و استفاده از نرم‌افزارهای PART و RORA. *مجله علوم و مهندسی آب‌خیزداری ایران*. ۵(۱۴): ۷۶-۷۱.
۲. سلطانی گردفرامزی، س. و ج. عایدی کوپایی. ۱۳۸۹. تخمین تغذیه آب زیرزمینی در زیرحوضه کرون در منطقه اصفهان با استفاده از مدل CRD. *مجله آب و فاضلاب*. ۴: ۹۷-۹۲.
۳. سعادت، ح.، ف. شریفی، م. مهدوی، ح. احمدی، و م. محسنی ساروی. ۱۳۸۹. بررسی تغییرات حجم مخزن، رطوبت و املاح منطقه‌ی غیراشبع دشت هشتگرد بمنظور ارزیابی سفره آب زیرزمینی. *مجله علوم و مهندسی آب‌خیزداری ایران*. ۴(۱۰): ۵۰-۴۵.
4. Allen, R., L.S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements, Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, Italy 300 p.
5. Aston, A. and F. Dunin. 1977. An empirical model for drainage from soil under rain-fed conditions. *Australian Journal of Soil Research* 15: 205-210
6. Ball, J. and S.T. Trudgill. 1995. Review of solute modelling. Solute modelling in catchment systems. In: Trudgill ST, editor. Solute modeling in catchment systems. Overview of solute modeling. London: Wiley.
7. Black, T., G. Gardiner and G. Thurtell. 1969. The prediction of evaporation, drainage and soil water storage for a bare soil. *Soil Science Society America Proceeding* 33: 655-660.
8. Braud, I., A.C. Dantas-Antonino, M. Vauclin, J.L. Thony and P. Ruelle. 1995. A Simple Soil Plant Atmosphere Transfer model (SiSPAT). Development and field verification. *J. of Hydrol.* 166: 213-250.
9. Carrera-Hernández, J.J., B.D. Smerdonb and C.A. Mendozac. 2012. Estimating groundwater recharge through unsaturated flow modelling: Sensitivity to boundary conditions and vertical discretization. *J. of Hydrol.* 452-453: 90-101.
10. Chapman T.G. and R.W. Malone. 2002. Comparison of models for estimation of groundwater recharge, using data from a deep weighing lysimeter. *Mathematics and Computers in Simulation* 59: 3-17.
11. Dawdy, D. and T. O'Donnell. 1965. Mathematical models of catchment behaviour. *Proceeding of American Society of Civil Engineers* 91: 123-137.
12. Ewen, J., G. Parkin and P.E. O'Connell. 2000. SHETRAN: a coupled surface/subsurface modelling system for 3D water flow and sediment and solute transport in river basins. *ASCE, Journal of Hydrologic Engineering* 5(3): 250-8.
13. Gee G.W. and D. Hillel. 1988. Groundwater recharge in arid regions: Review and critique of estimation methods. *Hydrological Processes* 2: 255-266.
14. Hillel, D. 1998. *Environmental Soil Physics*. Academic Press, London. 771 p.
15. Huggins, L. and E. Monke. 1967. A mathematical model for simulating the hydrological response of a watershed, Paper H9, in: *Proceedings of the 48th Annual Meeting of American Geophysical Union, Washington, DC*.
16. Izuka, S.K., D.S. Oki and J.A. Engott. 2010. Simple method for estimating groundwater recharge on tropical islands. *Journal of Hydrology* 387: 81-89.
17. Keese, K.E., B.R. Scanlon and R.C. Reedy. 2005. Assessing controls on diffuse groundwater recharge using unsaturated flow modeling. *Water Resources Research* 2005. 41:W06010. doi:10.1029/2004WR003841.
18. Khazaei, E., A.E.F. Spink and J. W. Warner. 2003. A catchment water balance model for estimating groundwater recharge in arid and semiarid regions of south-east Iran. *Hydrogeology J.* 11: 333-342.
19. Lashkaripour, G.R. 2003. An investigation of groundwater condition by geoelectrical resistivity method: A case study in Korin aquifer, southeast Iran. *J. of Spatial Hydrol.* 3(1): 1-5.
20. Lerner, D.N., A.S. Issar and I. Simmers. 1990. *Groundwater Recharge. A Guide to Understanding and Estimating Natural Recharge*, International Contributions to Hydrogeology. Verlag Heinz Heise. 345 p.
21. Lopes, J., B. Braga and J. Conejo. 1982. SMAP—a simplified hydrologic model, in: V. Singh (Ed.), *Applied Modeling in Catchment Hydrology*, Water Resources Publications, Littleton, CO.
22. Mastrocicco, M., N. Colombania, E. Salemia and G. Castaldelic. 2010. Numerical assessment of effective evapotranspiration from maize plots to estimate groundwater recharge in lowlands. *Agricultural Water Management* 97: 1389-1398.
23. Pollacco, J.A.P., J.A.S. Ugald, R. Angulo-Jaramillo, I. Braud, and B. Saugier. 2008. A Linking Test to reduce the number of hydraulic parameters necessary to simulate groundwater recharge in unsaturated soils. *Advances in Water Resources* 31: 355-369.
24. Rasoulzadeh, A. and S.A.A. Moosavi. 2007. Study of groundwater recharge in the vicinity of Tashk lake area. *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering* 31: 509-521.
25. Ross, P.J. 1990. Efficient numerical methods for infiltration using Richards equation. *Water Resources Research* 26: 279-90.

26. Scanlon, B.R. and P.G. Cook. 2002. Theme Issue: Groundwater Recharge. *Hydrogeol. J.* 10: 3-4.
27. Simmers, I. 1997. Recharge of Phreatic Aquifers in (Semi-) Arid Areas. *International Contributions to Hydrogeology*, Vol. 19. AA Balkema, Rotterdam, 277 p.
28. Simunek, J., K. Huang and M.Th. van Genuchten. 1998. The HYDRUS code for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Version 6.0, Research Report No. 144, US Salinity Laboratory, University of California, Riverside, California.
29. Singh, V.P. 1995. Computer models of watershed hydrology. Littleton, Colorado: Water Resources Publications.
30. Willmott, C.J. 1981. On the validation of models. *Physical Geography* 2:184-194.
31. Zhang, L. and W. Dawes. 1998. WAVES – an integrated energy and water balance model. CSIRO Land and Water Technical Report No. 31/98.