سال اول، شماره ۱، اسفند ۱۳۹۲، صفحات ۵۷ تا ۶۴
نشریه آب و توسعه پایدار

2014, Vol.1, No.1, Pages 57 to 64
Journal of Water and Sustainable Development

ارزیابی عملکرد مدل SWAT در برآورد رطوبت خاک

مطالعه موردی: حوضه آبریز نومل

فاطمه ولی نژاد[۱*]، خلیل قربانی[۲]، مهدی ذاکری نیا[۲]، امیراحمد دهقانی[۳]، بهنام آبابایی[۴]

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، استادیار و دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی ومنابع طبیعی گرگان. ۴- دانش‌آموخته دکتری گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران.
*(نویسنده مسئول، E-Mail: f_valinezhad@yahoo.com)
تاریخ دریافت: ۹۲/۸/۱۶
تاریخ پذیرش: ۹۲/۹/۲۵

Performance assessment of SWAT model for estimating soil moisture

Case study: Nomal watershed

F. Valinejad[1*], K. Ghorbani[2], M. Zakerinia[2], A. A. Dehghani[3], B. Ababaee[4]

1 - MSc student of Irrigation and Drainage - Agriculture and Natural Resources Faculty of Gorgan University
2 - Assistant Professor, Water Engineering Department, Gorgan University
3 - Associate Professor, Water Engineering Department, Gorgan University
4 - PhD student of Irrigation and Drainage
* (Corresponding author Email: f_valinezhad@yahoo.com)
Received: 7-11-2013
Accepted: 16-12-2013

چکیده

رطوبت خاک متغیر کلیدی برای درک فرآیندهای هیدرولوژیکی و شار انرژی در سطح زمین می‌باشد. بنابراین پیش‌بینی دقیق آن در طرح‌های آبیاری، مدیریت زراعی، پیش‌بینی خشکسالی و سیل، مدیریت کیفیت آب و پیش‌بینی هوا و تغییر اقلیم اهمیت بالایی دارد. اما علیرغم اهمیت زیاد آن، اندازه‌گیری صحرایی با توجه به تغییرات زیاد زمانی- مکانی خصوصیات خاک و همچنین هزینه‌های بالای آن منطقی نیست. بر این اساس استفاده از مدل‌های فیزیکی به عنوان راهکاری برای رفع این مشکل مدنظر پژوهشگران قرار گرفت. در مطالعه حاضر، مدل مفهومی و نیمه توزیعی SWAT برای برآورد رطوبت خاک حوضه آبریز نومل مورد بررسی قرار گرفت. الگوریتم SUFI2، در بسته نرم‌افزاری SWAT-CUP برای واسنجی براساس رطوبت اندازه‌گیری شده و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT در سطح حوضه استفاده شد. نتایج نشان داد که مقدار r-factor در اکثر زیرحوضه‌ها کمتر از ۱ و در کل حوضه ۱/۰۱ و مقدار p-factor در زیرحوضه‌ها بین ۵۰-۹۹ درصد و در کل حوضه ۹۰ درصد بودند. این مقادیر بیانگر واسنجی خوب رطوبت در حوضه و عدم قطعیت کم پیش‌بینی‌ها است. ضریب bR^2 بعد از واسنجی ۵۸ درصد بوده است که نشان‌دهنده دقت قابل قبول واسنجی مدل در حوضه است. براساس این نتایج می‌توان از مدل SWAT به عنوان ابزاری برای تخمین رطوبت خاک هم از نظر توزیع مکانی (در مقیاس زیرحوضه) و هم از نظر توزیع زمانی (در مقیاس روزانه) به همراه باند تخمین عدم قطعیت ۹۵ درصد در مطالعات مربوط به آب و کشاورزی استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: برآورد رطوبت، مدل SWAT، حوضه آبریز نومل، تحلیل عدم قطعیت.

Abstract

Soil moisture is a key variable in understanding hydrological processes and energy fluxes in the ground. Therefore, accurate simulation of soil moisture is useful in irrigation planning and crop management, flood and drought prediction, water quality management, climate change and weather forecast. But despite the importance of this hydrological variable, field measurement method is not appropriate considering huge spatial-temporal changes in soil properties as well as its high cost. Accordingly, the use of physical models as an approach to solve the problem has been addressed by researchers. In this study SWAT conceptual model is used to stimulate soil moisture in a Nomal watershed. SUFI2 algorithm was used in SWAT-CUP software pack for calibrating SWAT model, the amount of soil moisture measurements, and analysis of model uncertainty in the watershed. Uncertainty analysis was done by calculating P-factor and R-factor. According to results, R-factor in most sub-watersheds was less than 1, while in the whole watershed it was 1/01. P-factor in sub-watersheds was between 50-99 percent and the whole watershed 90 percent. These values indicated good calibration for moisture parameter in the watershed as well as large uncertainty predictions. bR^2 index was 58 percent showing acceptable accuracy in watershed model calibration. Moreover, important information on soil moisture both in terms of spatial as well as temporal (daily scale) distribution (sub-watershed) was obtained with an estimated uncertainty band of predictions.

Keywords: Moisture estimation, SWAT model, Nomal watershed, Uncertainty analysis.

مقدمه

رطوبت خاک، متغیری کلیدی برای درک فرآیندهای هیدرولوژیکی و شار انرژی در سطح زمین می‌باشد و یکي از مهمترین متغیرهاي خاك است که با زمان و مکان تغییر می‌کند. این عامل یکي از اجزاء مهم مدل‌هاي آب و هوایی، اکولوژیکي و هیدرولوژیکي محسوب مي‌شود که تخمین دقیق آن براي مدل کردن این فرآیندها ضروریست. به دلیل فراگیری مکانی و زمانی، کاربردهای عملی فراوانی برای اندازه‌گیری‌های متوالی و جامع رطوبت خاک وجود دارد. نتایج بدست آمده از این اندازه‌گیری‌ها می‌تواند در بسیاری از موارد بکار گرفته شود. اندازه‌گیري میداني رطوبت خاك علاوه بر زمان‌بر بودن و زحمت فراوان، نمي‌تواند تغییرات مکاني آن را در سطح حوضه‌ها به نحو مطلوب نشان دهد. بر این اساس استفاده از روش‌هایی که بتواند رطوبت را در سطح حوضه شبیه‌سازی کند، ضروری بنظر می‌رسد. مدل‌سازي یکي از چندین مجموعه ابزار قابل استفاده براي مدیریت منابع آب مي‌باشد. مدل‌سازي کامپیوتري در چهار دهه گذشته بطور فزاینده‌اي توسعه داده شده و مورد استفاده قرار گرفته است. دلایل اصلي این امر را مي‌توان دو عامل دانست: الف) ظاهر شدن مدل‌ها و روش‌هاي جدید توسط موسسات تحقیقاتي، و ب) افزایش تقاضا براي ابزار توسعه یافته و افزایش فشار بر منابع آب (Refsgaard، ۲۰۰۷).

مدل SWAT[1] یک مدل جامع در زمینه مطالعات آب و خاک است که مي‌تواند در برنامه‌ریزي‌هاي کلان براي اراضي وسیع مورد استفاده قرار گیرد. مطالعه انجام شده براي کل ایران (Faramarzi و همکاران، ۲۰۰۹) و مطالعه صورت گرفته براي کل قاره آفریقا (Schul و همکاران، ۲۰۰۸) این مطلب را تأیید مي‌کند.

Faramarzi و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از مدل SWAT مؤلفه‌های منابع آب قابل دسترس شامل آب آبی و آب سبز در مقیاس کشوری و استانی را برای کل ایران بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که عملیات آبیاری تأثیر چشم‌گیری در دقت محاسبه بیلان آب دارد، به طوري که بدون در نظر گرفتن آبیاري، مقدار تبخیر و تعرق خیلي کمتر از واقعیت تخمین زده مي¬شود. این مطالعه اطلاعات خوب و جامعی را در مورد منابع آب آبی و سبز در سطح هر استان فراهم می‌نماید. هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی عملکرد مدل SWAT در برآورد رطوبت خاک در حوضه آبریز نومل بود. به این منظور، از مدل SWAT که یک مدل بزرگ مقیاس است و به ورودی¬های زیادی نیاز دارد، استفاده شد. از آنجا که اندازه‌گیری بسیاری از پارامترها در مقیاس حوضه‌ای مشکل و یا حتی امکان‌پذیر نیست، مدل برای حوضه مورد نظر واسنجی شد.

مواد و روش‌ها

اطلاعات جغرافیایی حوضه آبریز نومل: این طرح در سال زراعی ۱۳۹۱ در حوضه نومل در ۵ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان گرگان از زیر حوضه‌های قره سو انجام شد. این حوضه با مساحتی در حدود ۴۳۵۰ هکتار بین طول جغرافیایی °۵۴ و ′۲۹ تا °۵۴ و ′۳۴ و عرض جغرافیایی °۳۶ و ′۴۳ تا °۳۶ و ′۵۰ و ارتفاع متوسط ۵۸۸ متر از سطح دریا واقع شده است.

معرفی مدل SWAT:

SWAT مدلی در مقیاس حوضه آبریز می‌باشد که توسط Arnold و همکاران (۱۹۹۸) ارائه شده است. این مدل برای پیش‌بینی تأثیر روش‌های مختلف مدیریت اراضی بر مقادیر آب، رسوب و مواد شیمیایی-کشاورزی در سطح حوضه‌های آبریز پیچیده و بزرگ با خاک، کاربری اراضی و شرایط مختلف مدیریتی در دراز مدت طراحی شده است. مدل SWAT مدلی مفهومی و نیمه توزیعی است؛ بنابراین به جای استفاده از روابط رگرسیونی، فرآیندها (حرکت آب، رسوب، رشد گیاه، سیکل مواد غذایی در خاک و غیره) را شبیه‌سازی می‌کند. مدل در این خصوص به اطلاعات مشخصی از اقلیم، خواص خاک، توپوگرافی و نوع پوشش اراضی احتیاج خواهد داشت. از مزایای این روش این است که حوضه‌هایی فاقد داده‌های برداشت نیز قابل شبیه‌سازی هستند. همچنین تأثیر پارامترهای ورودی (تغییر در روش‌های مدیریتی، آب و هوا، پوشش گیاهی و...) بر روی کیفیت آب و دیگر متغیرهای مورد نظر قابل کمی کردن است. مدل SWAT از پارامترهای ورودی قابل دسترس استفاده می‌کند و از نظر محاسباتی بسیار کارآمد است. شبیه‌سازی حوضه‌های بزرگ و پیچیده و با راهکارهای مختلف مدیریتی بدون صرف زمان زیادی قابل اجرا است. این مدل کاربر را قادر به مطالعه بلند مدت می‌سازد. بسیاری از فرآیندهایی که اکنون مورد نظر کاربر هستند، شامل تجمع تدریجی آلاینده‌ها و تأثیر آب‌های پایین‌دست نیز شبیه‌سازی می‌شوند. برای شبیه‌سازی، یک حوضه باید به تعدادی زیر حوضه تقسیم شود. استفاده از زیرحوضه‌ها در شبیه‌سازی به خصوص زمانی که مناطق مختلف حوضه دارای خاک و کاربری‌های گوناگونی بوده و ناهمگنی و تفاوت آن‌ها در هیدرولوژی حوضه تأثیر داشته باشد، بسیار مفید است. چرخه هیدرولوژیک که در مدل SWAT شبیه‌سازی می‌شود براساس معادله بیلان آبی استوار است (آبابایی و سهرابی، ۱۳۸۸)

$$SW_t = SW_0 + \Sigma_{i=1}^{t}(R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (۱)$$

که در آن SW_t مقدار نهایی رطوبت خاک (mm)، SW_0 مقدار اولیه آب در خاک در روز نخست (mm)، R_{day} میزان بارندگی در روز i (mm)، Q_{surf} مقدار روان آب سطحی در روز i (mm)، E_a مقدار تبخیر تعرق در روز i (mm)، W_{seep} مقدار آبی که در روز i وارد منطقه ی ریشه می شود (mm)، Q_{gw} مقدار جریان برگشتی زیرزمینی در روز i است (mm).

اطلاعات مورد نیاز مدل: داده های مورد نیاز برای شبیه سازی توسط مدل SWAT عبارت اند از: توپوگرافی، آب و هوا، پوشش گیاهی، خاک و داده های مدیریتی. اطلاعات توپوگرافی به صورت مدل ارتفاع رقومی (DEM)[۲] با دقت سلولی ۸۵×۸۵ می‌باشد. اطلاعات هواشناسی روزانه شامل بارش، دمای حداقل و حداکثر روزانه (از سال ۲۰۰۱ الی ۲۰۱۳ میلادی) به صورت فایل اطلاعاتی (dbf.) به مدل داده شده است. سایر اطلاعات هواشناسی مورد نیاز عبارت اند از: تابش، سرعت باد و رطوبت نسبی که در این تحقیق توسط مدل شبیه‌سازی شده‌اند. داده‌های بارندگی از آمار ایستگاه باران‌سنجی جلین و دمای روزانه از آمار ایستگاه سینوپتیک گرگان بدست آمده است. جدول (۱) مشخصات ایستگاه‌های باران‌سنجی و سینوپتیک استفاده شده در مدل‌سازی را نشان می‌دهد.

جدول ۱ – مختصات جغرافیایی ایستگاه های سینوپتیک و باران سنجی به همراه طول دوره ی آماری اطلاعات آن ها

نوع ایستگاه	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح آزاد دریا (m)	طول دوره ی آماری
سینوپتیک	گرگان	۵۴° ۲۴′	۳۶° ۵۴′	۱۳/۳	۱۳۹۱-۱۳۸۰
باران سنجی	جلین	۵۴° ۳۳′	۳۶° ۵۱′	۱۳۵	۱۳۹۱-۱۳۸۰

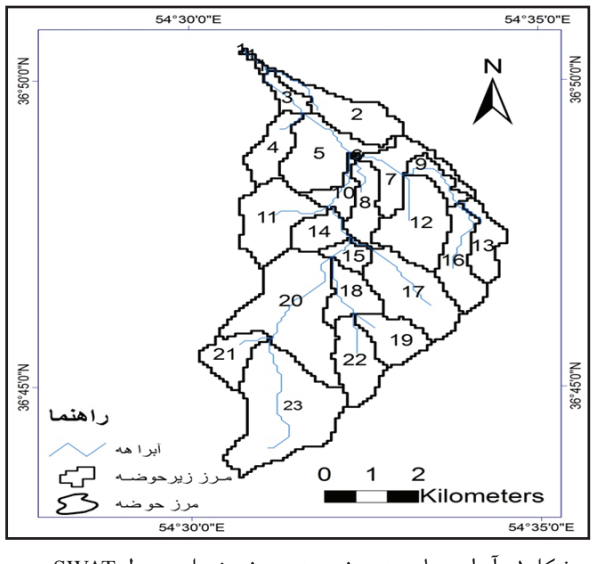
اطلاعات تدوین شده و جامعی در مورد پوشش اراضی، کاربری و نوع خاک در سطح حوضه مورد مطالعه در اختیار نبوده است. به منظور تهیه نقشه کاربری و پوشش اراضی منطقه ی مورد مطالعه، ابتدا نقشه مربوط به منطقه ی مورد مطالعه از محیط نرم افزار Google Earth جدا شده و در محیط نرم‌افزار Arc Gis زمین مرجع گردید. به نقشه ی فوق مختصات واقعی در مقیاس UTM داده شد. پس از رقومی کردن آن بوسیله ی لایه ی مرز، حوضه منطقه مشخص گردید. سپس از نقشه رقومی ارتفاعی و بازدیدهای میدانی انجام شده، جهت شناسایی منطقه و شناسایی انواع کلاس ها استفاده گردید. در نهایت ۵کلاس شامل اراضی زراعی دیم، جنگل انبوه، جنگل پراکنده، مناطق مسکونی و سد انتخاب شد. بر این اساس ملاحظه شد کاربری غالب منطقه متعلق به جنگل های انبوه و پراکنده با وسعت۶۶ درصد است. اراضی زراعی دیم، مناطق مسکونی و سد به ترتیب با ۳۱ و ۲/۵ و ۰/۵ درصد، در مراتب بعدی قرار دارند. جهت تهیه نقشه خاک و پارامترهای مورد نیاز (مثل بافت خاک) ابتدا در ۵۲ نقطه از منطقه ی مورد مطالعه و از ۴ عمق ۵-۰، ۲۰-۵، ۴۰-۲۰ و۶۰-۴۰ سانتی متر نمونه‌برداری انجام شد. درصد رس، سیلت وشن همه ی نمونه ها در عمق های مذکور در آزمایشگاه به روش هیدرمتری تعیینشده وسپس از مثلث بافت خاک، بافت خاک در نقاط اندازه گیری شده مشخص گردید. براساس نتایج حاصل تغییرات زیادی در بافت خاک منطقه‌ی نومل مشاهده نشد. بافت خاک در مناطق جنگلی سیلتی رس لوم و در مناطق زراعی سیلتی لوم می باشد. سایر پارامترهای مورد نیاز مدل برای هر لایه از پروفیل خاک از نرم افزار RETC[۳] تخمین زده شد. در جدول (۲) مشخصات خاک منطقه ارایه شده است.

جدول ۲ – ویژگی های خاک حوضه نومل تا عمق ۲۰ سانتی متری

نوع بافت	هدایت هیدرولیکی اشباع (mm/hr)	سیلت (درصد وزن)	شن (درصد وزن)	رس (درصدوزن)
سیلتی رس لوم	۵/۱	۵۴	۱۵/۵	۳۰/۵
لوم رسی	۶/۶	۵۰	۲۱/۸	۳۱/۸
لوم رسی	۴/۹	۳۴	۳۸/۲	۲۷/۸
سیلتی رس لوم	۳/۲	۴۸	۱۲/۵	۳۹/۵
سیلتی رس لوم	۳/۸	۵۰	۱۴/۶	۳۵/۴

اجرای مدل SWAT:

پس از جمع آوری اطلاعات وتهیه فایل های ورودی، مراحل اجرای مدل به ترتیب ایجاد زیرحوضه ها، HRUs، اصلاح پارامترهای اولیه (در صورت امکان) و در انتها اجرای مدل در دوره ی شبیه سازی می باشد. در این مطالعه به منظور ترسیم زیر حوضه ها و آبراهه ها با استفاده از نقشه DEM با دقت اندازه سلولی ۸۵ متری، حد آستانه تعریف زیر حوضه برابر ۸۹ کیلومتر مربع در نظر گرفته شد. بر این اساس تعداد ۲۳ زیر حوضه برای حوضه آبریز نومل حاصل شد (شکل ۱). گام بعدی در مدل سازی، معرفی لایه های اطلاعاتی مورد نیاز برای تشکیل واحدهای واکنش هیدرولوژیکی به مدل می باشد. این لایه ها عبارتند از: نقشه کاربری اراضی به همراه کدهای مخصوص هر کاربری در مدل SWAT، نقشه خاک به همراه جدول مشخصات خاک ها و نقشه‌ی شیب. در این مطالعه سه طبقه شیب برای حوضه آبریز نومل تعریف شد که شامل ۰ تا ۱۵ درصد، ۱۵ تا ۳۰ درصد وبیشتر از ۳۰ درصد می باشند. این طبقات شیب نه تنها به تفکیک مکانی بهتر حوضه کمک می‌کنند، بلکه برای تشخیص موقعیت مکانی واحدهای واکنش هیدرولوژیک نیز مناسب هستند. در نهایت با تلفیق سه لایه نقشه خاک، کاربری اراضی و شیب، حوضه به ۲۳ HRU تقسیم شد. بعد از واردکردن پارامترها مدل آماده اجرا است.



شکل۱– آبراهه ها، مرز حوضه و زیرحوضه نومل در مدل SWAT

تحلیل حساسیت و واسنجی مدل:

مدل SWAT دارای پارامترهای متعددی است که شبیه سازی آن به تغییرات برخی از پارامترها حساسیت بیشتری دارد. این مرحله از محاسبات با استفاده از نرم‌افزار SWAT-CUP و الگوریتم SUFI2 با تکرار ۵۰۰ تایی و۵۰۰ نمونه برداری لاتین هایپرکیوب اجرا شد.

الگوریتم SUFI-2:

به منظور شبیه سازی دقیق‌تر نتایج مدل SWAT، یک بسته نرم افزاری تحت عنوان SWAT-CUP توسعه داده شده است که تحلیل های عدم قطعیت و حساسیت را انجام می دهد. این نرم افزار از روش های مختلفی بدین منظور استفاده می کند که در این تحقیق از روش SUFI-2 استفاده شده است. در این روش، سنجش میزان عدم قطعیت در مدل‌سازی شامل عدم قطعیت در ورودی ها، مدل مفهومی، پارامترها و داده های اندازه گیری شده می باشد. برای این منظور نیز از معیار p-factor استفاده می شود. این معیار بیانگر درصد داده های اندازه گیری شده ای است که درون باند عدم قطعیت ۹۵ درصد (95PPU) قرار گرفته اند. معیار 95PPU با استفاده از نمونه برداری به روش نمونه گیری لاتین هایپرکیوب[۴] به دست می‌آید (Abbaspur، ۲۰۰۹). اگر چنانچه مقادیر مشاهده شده با دقت بالایی اندازه گیری شده باشند، قرار گرفتن ۸۰ درصد از مقادیر مشاهده شده بین باندهای عدم قطعیت و چنانچه مقادیر اندازه گیری شده از دقت پایینی برخوردارباشند، قرار گرفتن ۵۰ درصد از مقادیر مشاهده شده درون باندهای عدم قطعیت کفایت می کند (Abbaspur، ۲۰۰۹). در مرحله‌ی بعد معیارهای سنجش عدم قطعیت (p-factor و r-factor) محاسبه می شوند. چنانچه $\bar{d}x$ برابر با میانگین فاصله بین دو باند بالا و پایین باشد، رابطه ی زیر نتیجه می گردد:

$$\bar{d}\ \mathrm{x} = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}(X_u - X_l)_i \qquad (۲)$$

که k تعداد داده های مشاهداتی است. در شرایط ایده آل $\bar{d}x$ کوچک و در حد صفر می باشد. اما به دلیل وجود خطا در اندازه گیری و وجود عدم قطعیت های زیاد در مدل، چنین مقادیری برای آن به دست نخواهد آمد. مقدار $\bar{d}_X$ توسط r-factor کنترل می شود که برابر است با:

$$r - factor = \frac{\bar{d}\mathrm{x}}{\sigma_{\mathrm{x}}} \qquad (۳)$$

در این رابطه σ_x انحراف معیار مربوط به متغیر اندازه گیری شده (X) است. مقادیر کوچکتر از ۱ برای r-factor مطلوب هستند (Talebizadeh، ۲۰۰۹). از آنجا که حدود مشخص شده پارامترها در یک حوضه، ممکن است برای حوضه دیگر صادق نباشد، به این دلیل انجام آنالیز حساسیت برای واسنجی مدل در حوضه باید جداگانه انجام شده و نتایج حاصل از آن مورد استفاده قرار گیرد.

در این مطالعه به منظور ارزیابی و براساس آنالیز حساسیت، از بین پارامترها در مدل SWAT، ۱۱ پارامتر مربوط به آب و خاک (Faramarzi و همکاران، ۲۰۰۹؛ Abbaspour و همکاران، ۲۰۰۶) انتخاب شدند. پس از انجام هر مرحله شبیه سازی با توجه به تابع هدف تعریف شده پارامترهای حساس مشخص گردید. پارامترهای حساس با توجه به میزان اثر تغییرات آن ها در دامنه‌ی مجاز بر نتایج خروجی مدل رتبه بندی شدند. پس از انجام آنالیز حساسیت، پارامترهای دارای حساسیت بیشتر در برآورد رطوبت شناسایی شده که پارامترهای حساس‌تر به ترتیب حساسیت در جدول (۳) آورده شده‌اند. حساسیت هیدرولوژیکی حوضه‌های آبریز بر حسب شرایط و ویژگی‌هایشان، در برابر یک پارامتر خاص کاملاً متفاوت است. همانطور که از جدول (۳) بر می‌آید سه پارامتر شماره منحنی نفوذ (CN)، ظرفیت آب قابل دسترس (SOL_AWC) وضریب تبخیر خاک (ESCO) تأثیر ویژه‌ای در نتایج بدست آمده دارند. نتایج آنالیز حساسیت نشان می دهد با افزایش شماره منحنی، نگه‌داشت آب در خاک کاهش یافته و باعث کاهش رطوبت می شود و بالعکس. همچنین با کاهش مقدار پارامتر SOL_AWC فضای خالی برای نگهداری آب کاهش یافته در نتیجه میزان رطوبت افزایش می یابد و کاهش ضریب تبخیر خاک باعث افزایش آب خاک می شود.

جدول۳- نتایج تحلیل حساسیت مدل و واسنجی و بهینه سازی پارامترهای مدل

پارامتر	شرح پارامتر	درجه حساسیت	حدود نهایی مقدار پارامتر یا تغییر آن		مقدار بهینه پارامتر
			حداقل	حداکثر	
CN2	ضریب شماره منحنی SCS	۱	-۰/۲	۰/۲	-۰/۲۳
SOL_AWC	ظرفیت آب قابل دسترس خاک	۲	۰/۰۱	۰/۰۸	۰/۰۳
ESCO	فاکتور تصحیح تبخیر از سطح خاک	۳	۰/۸۱	۰/۹	۰/۸۷
SOL_K	هدایت هیدرولیکی خاک در حالت اشباع	۴	۲	۴	۲/۲
SURLAGE	ضریب تأخیر جریان سطحی	۵	۰/۰۵	۶	۵/۰۲۵
ALPHA_BF	ضریب جریان پایه آب زیرزمینی	۶	۰/۰۱	۰/۰۸	۰/۰۲
USLE_k	فاکتور فرسایش پذیری خاک	۷	۰/۰۱	۰/۳۳	۰/۰۲
CANMX	حداکثر ذخیره پوشش تاج گیاهی	۸	۲۵	۴۵	۴۲
SOL_BD	چگالی ظاهری خاک	۹	۱/۱	۱/۲	۱/۱۷
SOL_ALB	ضریب آلبید و خاک	۱۰	۰/۱۲	۰/۲۱	۰/۱۵
Epco	فاکتور جبران جذب گیاه	۱۱	۰/۲۹	۰/۴	۰/۳۸

به منظور شبیه سازی رطوبت، از طول کل دوره ی آماری ۱۳ ساله (۲۰۰۱ تا ۲۰۱۳) سال ۲۰۱۲ برای واسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت (سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۳ به عنوان دوره Warm-Up در نظر گرفته شد). برای ارزیابی نتایج برازش مدل از شاخصه های آماری ضریب تبیین (R^2) که نشان دهنده‌ی همخوانی بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه سازی با استفاده از تجزیه رگرسیونی است، bR^2، استاندارد ریشه مجذور مربعات خطا (SRMSE)[5] و میانگین خطای مطلق (MAE)[6] و همچنین معیارهای ارزیابی عدم قطعیت P-factor و R-factor استفادهشد. بهترین و بدترین معیار ضریب تبیین به ترتیب برابر ۱ و ۰ می‌باشد. برای ضریب bR^2 مقادیر نزدیک به ۱ نشان دهنده اعتبار بیشتر و خطای کمتر است و مقادیر بین ۰ تا ۱ قابل قبول در نظر گرفته می شود. برای بررسی عدم قطعیت مدل توصیه می شود معیارهای p-factor و r-factor با هم در نظر گرفته شوند. برنامه SUFI2 به دنبال طیف وسیعی از پارامترهاست که اکثر داده هایمشاهده‌ای در باند تخمین عدم قطعیت ۹۵ درصد واقع شوند. حالت ایده آل زمانی است که p-factor برابر ۱۰۰و r-factor برابر با صفر باشد. ولی از آنجا که با کاهش r-factor مقدار p-factor افزایش می یابد، بنابراین باید محاسبات تا زمانی ادامه یابد که اکثر داده های مشاهده‌ای در باند عدم قطعیت ۹۵ درصد واقع شوند و ضخامت باند تخمین عدم قطعیت ۹۵ درصد کوچک شود. مقدار p-factor بین ۰ تا ۱ تغییر می نماید که مقادیر بزرگتر مطلوب تر هستند. برای r-factor اگر مقادیر کمتر از ۱/۵ باشد نتایج مطلوب بوده است (Abbaspur، ۲۰۰۹). روابط مربوط به محاسبه این پارامترها:

$$bR^2 = \begin{cases} |b|R^2 & |b| \le 1 \\ |b|^{-1}R^2 & |b| > 1 \end{cases} \quad (۴)$$

که R^2 ضریب تبیین بین داده های مشاهده ای و شبیه سازی شده و b شیب خط رگرسیونی است (Krause و همکاران، ۲۰۰۵).

$$RMSE = \left(\left(\Sigma_{i=1}^{n}\left(z_{(x)}^{*} - z_{(x)}\right)\right)^2/\mathrm{n}\right)^{1/n} \quad (۵)$$

نتایج و بحث

همانطور که قبلاً اشاره شد، از طول کل دوره آماری ۱۳ ساله (۲۰۰۱– ۲۰۱۳) سال ۲۰۱۲– ۲۰۱۳ برای واسنجی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج واسنجی مدل SWAT در دوره ی آماری ۲۰۱۲–۲۰۱۳ برای ۷ زیرحوضه در جدول(۴) ارایه شده است. مقادیر p-factor بین ۵۰–۹۹ درصد و مقادیر R-factor در اکثر زیرحوضه ها کمتر از ۱ بود که بیانگر واسنجی خوب در این زیر حوضه ها می باشد. ضریب R^2 بدست آمده در هر زیرحوضه نشان دهنده همبستگی خوب مقادیر مشاهداتی و واسنجی شده است. نتایج حاصل حاکی از میانگین خطای مطلق کم و ریشه مجذور مربعات خطای کم برای بازه ی زمانی روزانه در هر زیر حوضه

$$SRMSE = \frac{RMSE}{\overline{z_x}}$$

$z(x)$: مقدار مشاهده شده رطوبت، $Z^*(x)$ مقدار برآورد شده رطوبت $\overline{z_x}$ میانگین مقادیر مشاهده شده رطوبت، n تعداد داده ها.

$$MAE = \Sigma_{i=1}^{n}\left|z_{(x_i)}^{*} - z_{(x_i)}\right|/n \quad (۶)$$

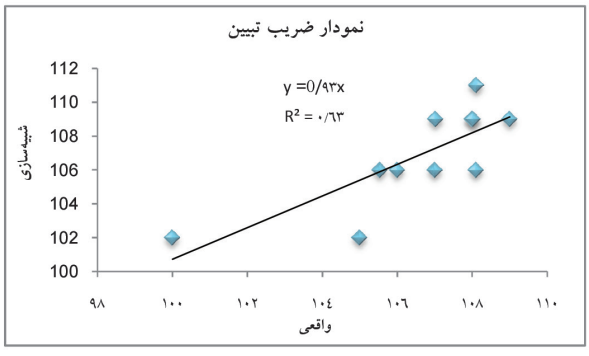
می باشد. همان طور که در این جدول ملاحظه می شود مقادیر R^2 ، p-factor و r-factor برای کل حوضه آبریز در مجموع قابل قبول بدست آمده است. ضریب R^2 در کل حوضه ۶۳ درصد بدست آمده است. نتایج مشابه نیز در مرجع Abbaspour و همکاران (۲۰۰۶) قابل مشاهده است. به طور کلی نتایج واسنجی بدست آمده برای کل حوضه آبریز قابل قبول و رضایت بخش است. مدل، مؤلفه‌هایی مانند جریان آب سطحی، زیرسطحی و زیرزمینی را جداگانه شبیه سازی و در نهایت تجمیع می کند. امکان کنترل مستقیم مؤلفه های جریان وجود ندارد، این مشکل ضرورت حداقل تجهیز حوضه های معرف را برای تنوع در داده‌برداری تأکید می کند.

جدول ۴– نتایج ارزیابی مدل در برآورد رطوبت در دوره واسنجی در زیرحوضه ها و کل حوضه

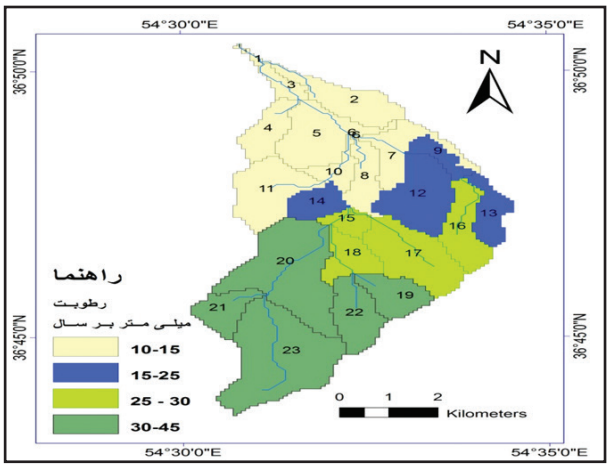
زیر حوضه ها	شاخصه های آماری					
	R^2	bR^2	MAE	SRMSE	p-factor	r-factor
SW_۵	۰/۹۷	۰/۷۵	۰/۴۴	۰/۰۰۴۷	۰/۹۸	۰/۶۳
SW_۷	۰/۹۵	۰/۶۲	۰/۷۲	۰/۰۰۷۱	۰/۹۹	۰/۳۸
SW_۸	۰/۹۲	۰/۶۱	۱/۴۹	۰/۰۱۴	۰/۵	۰/۱۵
SW_۹	۰/۹	۰/۵	۲/۴۵	۰/۰۲۶	۰/۹۸	۰/۴۷
SW_۱۰	۰/۹	۰/۵	۳/۵۵	۰/۰۳۴	۰/۵	۰/۱۶
SW_۱۱	۰/۹۲	۰/۵	۲/۹۵	۰/۰۲۷	۰/۸۹	۱/۱۸
SW_۱۴	۰/۸۵	۰/۳	۴/۵	۰/۰۵	۰/۵	۱/۳
کل حوضه	۰/۶۳	۰/۵۸	۲/۲۳	۰/۰۲۷	۰/۹	۱/۰۱

Sw مخفف soil water و پسوند بعد از آن بیانگر شماره زیر حوضه است.

متوسط رطوبت زیرحوضه ها در فایل خروجی مدل قابل دسترسی است. شکل (۴) توزیع مکانی متوسط سالانه رطوبت در سطح حوضه را نشان می دهد. این شکل که نشان دهنده ی آب خاک (میانگین بلند مدت مقدار رطوبت خاک در زیر حوضه‌های مختلف) است، اطلاعات خوبی برای مدیریت محصولات دیم فراهم می‌کند؛ زیرا مقدار رطوبت خاک که منبع مناسبی برای محصولات دیم است در بیشتر محاسبات منابع آب حوضه در نظر گرفته نمی شود و تغییرات آن صفر فرض می‌شود. این مطالعه



شکل۳- منحنی برازش داده های شبیه سازی و واقعی رطوبت



شکل۴ -میانگین سالانه رطوبت(دوره۲۰۱۲-۲۰۱۳) در ۲۳ زیر حوضه مدل شده حوضه آبریز نومل

اطلاعات مفیدی را در مورد وضعیت واقعی منابع آب موجود فراهم می کند وبه تشخیص مناطق مهم به منظور تحلیل های دقیق تر برای پروژه های مدیریت منابع آب کمک می کند. همچنین از این نتایج می توان به منظور تحلیل سناریوهای مدیریتی جهت افزایش رطوبت خاک برای کشاورزی دیم مانند بررسی اثر شخم در افزایش میزان رطوبت خاک در قسمت های مختلف حوضه استفاده کرد. رابطه منطقی بین رطوبت خاک، فرسایش و سیلاب وجود دارد؛ بنابراین داشتن اطلاعات کافی از تغییرات زمانی و مکانی رطوبت خاک در حوضه آبریز تأثیر زیادی در کارایی مدیریت حوضه دارد. با توجه به آزمایشات صحرایی می توان نتیجه گرفت با تغییر شیب و کاهش پوشش گیاهی و بافت خاک میزان توزیع رطوبت در حوضه ها متفاوت است.

به این ترتیب با افزایش ارتفاع میزان رطوبت خاک کاهش می یابد که می تواند به دلیل افزایش شیب باشد. افزایش شیب سرعت رواناب را افزایش داده، در نتیجه فرصت نفوذ کم می شود. در مناطق با بافت سنگین تر توانایی نگهداشت رطوبت بالاتر است. مناطق با پوشش گیاهی انبوه نیز نسبت به مناطق بدون پوشش گیاهی، به علت کاهش سرعت رواناب و فرصت نفوذ بیشتر، رطوبت بیشتری دارند. از طرفی در لایه های بالایی خاک این مناطق به دلیل وجود مواد آلی در پروفیل ابتدایی خاک رطوبت افزایش می یابد. نتایج حاصل از مدل بر نتایج حاصل از آزمایشات صحرایی منطبق بوده است.

نتیجه گیری

مدل SWAT با توجه به رطوبت اندازه گیری شده واسنجی گردید که نتایج آن با توجه به موارد یاد شده، به نسبت رضایت بخش بود. هدف اولیه از این مطالعه، بررسی عملکرد مدل SWAT در حوضه آبریز نومل بود. نتایج واسنجی نشان می دهد که مدل SWAT می تواند ابزار مناسبی در رابطه با شبیه سازی رطوبت حوضه باشد. استفاده از این مدل یا مدل های کامپیوتری دیگر به دلیل کاهش هزینه عملیات صحرایی و به ویژه کاهش زمان مورد نیاز برای تحلیل مسائل، می تواند جزو راهکارهای ممکن به منظور ارتقای سطح مدیریت منابع آب و حفظ محیط زیست قلمداد گردد. علاوه بر این، استفاده از این ابزار برای پژوهشگران و مدیران اجرایی امکان ارزیابی سناریوهای مختلف مدیریتی را (که امکان اجرای آن در کوتاه مدت و بدون صرف هزینه سنگین وجود ندارد) بوجود آورده، می توان با تحلیل نتایج بهترین تصمیم را اتخاذ نمود.

پی نوشت

1- Soil and Water Assesment Tool
2- Digital Elevation Method
3- RETantion Curve
4- Latin Hypercube Sampling
5- Standard Root Mean Squre Error
6- Mean Absolut Error

منابع

آبابایی، ب. وسهرابی، ت.۱۳۸۸. ارزیابی عملکرد مدل SWAT در حوضه آبریز زاینده رود. مجله پژوهش های حفاظت آب و خاک، ۱۶.

Arnold, J.G.,Srinivasan, R., Muttiah, R.S. and Williams, J.R. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. Journal of the American Water Resource Association,34(1): 73–89.

Abbaspur, Kc.2009. SWAT-CUP2; SWAT calibration and uncertainty programs user manual. Federal institu of aquatic science and technology (Eawag), Swiss.

Refsgaard, J.C. 2007. Hydrological Modelling and River Basin Management, Phd Thesis.Geological Survey of Denmark and Greenland Danish Ministry of the Environment. P: 90.

Abbaspour, K.C., J. Yang, I.,Maximov, R.,Siber, K.,Bogner, J.,Mieleitner, J.,Zobrist, and Srinivasan,R.2006. Modelling hydrology water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. J. Hydrol, 333(2-4): 413-430.

Faramarzi, M., Abbaspour, K.C.,Schulin, R. and Yang, H. 2009.Modelling blue and green water resources availability in Iran.Hydrological processes, 23, P:486–501.

Krause, p., Boyle, D.P., andBase, F. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hyrological Model aeeessment. Transactions of the ASBE, 5:89-97

Schul, J., Abbaspour,K.C., Yang, H., Srinivasan, R. 2008. Modeling blu and green water availability in africa. Water Resources Research, VOL. 44, W07406 d0i: 10.1029/2007WR006609.

Talebizadeh, M., Morid, S., Ayoubzadeh, S.A., and Gasemzadeh, M.2009. Uncertainty Analysis in sediment load modeling using ANN and SWAT model. Water Resour. Manage., DOI 10.10007/s11269-009-9522-2