

مقایسه روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل در مدل‌سازی جریان رودخانه با استفاده از مدل SWAT در حوزه آبخیز طالقان

عظاله کاویان^{۱*}، مرضیه بهرامی^۲، حامد روحانی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۴/۳

چکیده

فرایند تبخیر و تعرق یک عنصر کلیدی در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی تأمین آب، مدل‌های بارش-رواناب، محاسبات نفوذ و مدل‌های پیش‌بینی خشکسالی است. اخیراً معادلات بسیاری برای برآورد تبخیر و تعرق سالانه، ماهانه و روزانه در جهان به‌کار برده می‌شود. در این مطالعه، تبخیر و تعرق پتانسیل حوزه آبخیز طالقان توسط سه روش پریستلی-تیلور، پنمن-مانتیت و هارگریوز موجود در مدل SWAT تخمین زده شد. سپس تأثیر به‌کارگیری هر یک از این روش‌ها بر شبیه‌سازی هیدرولوژیکی جریان خروجی حوزه آبخیز طالقان در دو دوره واسنجی (۲۰۰۳-۱۹۹۸) و اعتبارسنجی (۲۰۰۳-۲۰۰۵) با استفاده از آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب کارایی نش-ساتکلایف (NS) و شاخص اریبی (PBIAS) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که حداکثر و حداقل مقادیر شبیه‌سازی شده تبخیر و تعرق و در نتیجه، حداکثر و حداقل مقادیر دبی شبیه‌سازی شده به ترتیب مربوط به روش هارگریوز و روش پریستلی-تیلور بوده است. همچنین بررسی ضرایب ارزیابی نشان داد تفاوت چندانی بین سه روش وجود ندارد. نتیجه آنالیز واریانس یک‌طرفه نیز مؤید عدم اختلاف معنی‌دار در سطح اعتماد ۹۹ درصد در میانگین دبی ماهانه بین سه روش مذکور است. سایر نتایج نشان داد در دوره اعتبارسنجی روش پنمن-مانتیت نتایج بهتری را نسبت به دو روش دیگر ارائه کرده است.

واژه‌های کلیدی: تبخیر و تعرق، جریان رودخانه، شبیه‌سازی، مدل SWAT، حوزه آبخیز طالقان.

۱. دانشیار دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، نویسنده مسئول / Email: a.kavian@sanru.ac.ir

۲. دانشجوی دکتری دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گروه آبخیزداری

۳. استادیار دانشگاه گنبد کاووس، دانشکده منابع طبیعی

مقدمه

مدیریت منابع آب نیازمند به آگاهی از فرایندهای تأثیرگذار روی بیلان آبی در مقیاس حوزه آبخیز است (ارراکی و همکاران^۱، ۲۰۰۷). تبخیر و تعرق یکی از اجزای اصلی چرخه هیدرولوژیکی بوده و پیش‌بینی دقیق آن در تمامی کاربردهای منابع آب ضروری است (فالمرزنیا^۲ و همکاران، ۲۰۱۱).

تبخیر و تعرق شامل تمامی فرایندهایی است که آب را در سطح زمین به بخار آب تبدیل می‌کند (آلن^۳ و همکاران، ۱۹۹۸؛ ورستراتین^۴ و همکاران، ۲۰۰۵). این فرایند یکی از اجزای اساسی در چرخه هیدرولوژیکی بوده که تولید آب حوزه آبخیز، ظرفیت مخازن (هارمسن^۵ و همکاران، ۲۰۰۹)، استفاده آب به وسیله گیاه و تأمین آب زیرزمینی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (کسکین^۶ و همکاران، ۲۰۰۴). فرایند تبخیر و تعرق یک عنصر کلیدی در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی تأمین آب، مدل‌های بارش-رواناب، محاسبات نفوذ و مدل‌های پیش‌بینی خشکسالی است (ایرلز و دیکسون^۷، ۲۰۰۸).

تبخیر و تعرق نه تنها به تابش خورشیدی، بلکه به دیگر عوامل اقلیمی مانند دمای هوا، رطوبت و باد بستگی دارد. از آنجاکه مقادیر تابش و دیگر پارامترهای اقلیمی از محلی به محلی دیگر و با زمان تغییر می‌کنند، تبخیر و تعرق نیز دارای تغییرات مکانی و زمانی است (میرزایی و معاضد، ۱۳۸۵).

تقریباً پنجاه روش برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل وجود دارد، اما این روش‌ها مقادیر متناقضی را به دلیل فرضیات و نیاز به داده‌های ورودی متفاوتشان، یا به دلیل اینکه برای مناطق اقلیمی ویژه توسعه داده شده‌اند، به دست می‌دهند (لو^۸ و همکاران، ۲۰۰۵). به منظور بهبود کیفیت تبخیر و تعرق از مدل‌های هیدرولوژیکی مختلف می‌توان استفاده کرد؛ زیرا اندازه‌گیری مستقیم توسط تکنیک‌های پرهزینه هواسنجی و براساس روش‌های بیلان انرژی و انتقال جریان توده بخار آب

انجام می‌گیرد (لندراس^۹ و همکاران، ۲۰۰۸) که همچنین زمان‌بر و سخت است.

SWAT^{۱۰} یک مدل هیدرولوژیکی پارامتری توزیعی، پیوسته زمانی فیزیکی است که از داده‌های خاک، کاربری اراضی، توپوگرافی و آب‌وهوا برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی استفاده می‌کند و در گام زمانی روزانه اجرا می‌شود. SWAT برای پیش‌بینی اثر عملیات مدیریت زمینی بر تولیدات آب، رسوب و مواد شیمیایی کشاورزی در آبخیزهای پیچیده بزرگ با خاک، کاربری اراضی و عملیات مدیریت متغیر توسعه داده شده است (آرنولد^{۱۱} و همکاران، ۱۹۹۸).

در این میان، سه روشی که به طور معمول مورد استفاده در مدل SWAT هستند، روش دمایی هارگریوز (هارگریوز و سامانی^{۱۲}، ۱۹۸۵)، روش تابشی پرستلی-تیلور (پرستلی و تیلور^{۱۳}، ۱۹۷۲) و روش ترکیبی پنمن-مانتیث (پنمن^{۱۴}، ۱۹۵۶؛ مانتیث^{۱۵}، ۱۹۶۵) می‌باشند. روش پنمن-مانتیث به‌عنوان یک روش استاندارد جهانی برای برآورد تبخیر و تعرق است که نیازمند به پنج پارامتر روزانه هواشناسی شامل تابش خورشید، حداقل و حداکثر دما، رطوبت نسبی و سرعت باد بوده که تبخیر و تعرق را تحت تأثیر قرار می‌دهند (اویسی^{۱۶}، ۲۰۱۶).

در زمینه مقایسه روش‌های مختلف تبخیر و تعرق، تاکنون تحقیقاتی زیادی در دنیا انجام شده است؛ برای مثال مارتینز کوب و تجرو-چاستی^{۱۷} (۲۰۰۴) نشان داد که روش هارگریوز که در ابتدا برای اقلیم خشک کالیفرنیا توسعه داده شده بود، برای مکان‌های بادی تحت شرایط نیمه‌خشک در شمال شرقی اسپانیا خوب کار می‌کند. همچنین لو و همکاران (۲۰۰۵) روش‌های پرستلی-تیلور و هارگریوز را به همراه چهار روش دیگر در سراسر یک شیب فیزیوگرافی ۳۶ آبخیز جنگلی در جنوب شرقی ایالت متحده مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که روش هارگریوز مقدار PET

9. Landeras

10. Soil and Water Assessment Tools

11. Arnold et al., 1998

12. Hargreaves and Samani

13. Priestley and Taylor

14. Penman

15. Monteith

16. Aouissi

17. Martinez-Cob and Tejero-Juste

1. Er-Raki

2. Falamarznia

3. Allen

4. Verstraeten

5. Harmsen

6. Keskin

7. Earls and Dixon

8. Lu

شبیه‌سازی همزمان رواناب، تبخیر و تعرق واقعی و عملکرد محصولات کشاورزی در حوضه زربینه رود پرداختند. همچنین میریعقوب‌زاده و همکاران (۱۳۹۳) در حوضه تمر استان گلستان، یاوری و همکاران (۱۳۹۳) در دشت و همچنین میان‌آبادی و همکاران (۱۳۹۵) در حوضه نیشابور، به ارزیابی تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم SEBAL و مدل SWAT پرداختند؛ نتایج آن‌ها حاکی از بهبود نتایج شبیه‌سازی جریان رودخانه توسط مدل SWAT با به‌کارگیری این الگوریتم بوده است.

نظر به اهمیت فرایند تبخیر و تعرق در چرخه هیدرولوژیکی و تأثیر این فرایند روی جریان خروجی حوضه، لازم است که در مناطق مختلف کشور تأثیر روش‌های مختلف در جریان رودخانه بررسی و روش مناسب برای هر منطقه انتخاب شود. با توجه به اینکه تاکنون در مناطق مختلف کشور این نوع بررسی‌ها انجام نشده است، در این مطالعه با هدف تعیین روش مناسب برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل حوضه طالقان انتخاب و تأثیر روش‌های مذکور بر میزان جریان خروجی حوضه با استفاده از مدل SWAT مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز طالقان در دامنه جنوبی رشته‌کوه‌های البرز و در بخش شمال غربی در فاصله ۱۲۰ کیلومتری از تهران واقع شده است. این حوضه بین دو عرض $36^{\circ} 5' 31''$ و $36^{\circ} 37' 23''$ شمالی و بین دو طول جغرافیایی $51^{\circ} 00' 21''$ و $51^{\circ} 16'$ شرقی واقع شده است. وسعت آن ۱۳۵۲۰ هکتار و مساحت حوضه سد مخزنی ۹۵۸۱۳ هکتار است. ارتفاع از سطح دریا در این حوضه نیز از ۱۱۰۰ تا ۴۴۰۰ متر متغیر است. میانگین بارش سالانه حوضه آبخیز طالقان ۵۱۵/۱۶ میلی‌متر و دمای سالانه آن نیز ۱۰/۵ درجه سانتی‌گراد است. شکل (۱) موقعیت حوضه آبخیز طالقان را نشان می‌دهد.

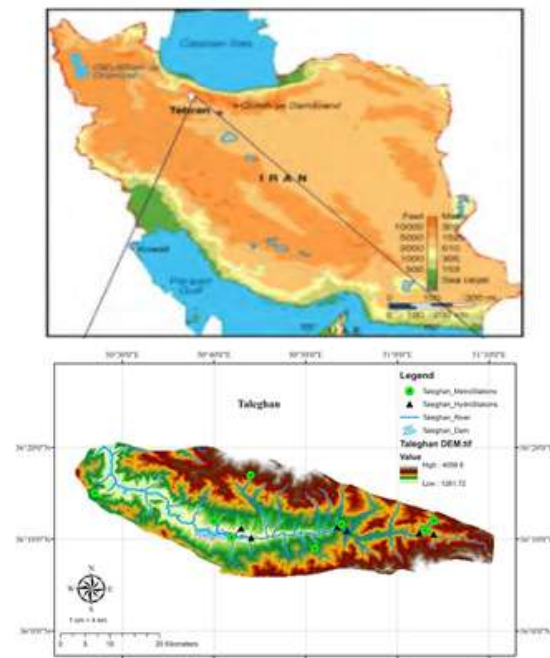
بالاتری نسبت به روش پرستلی-تیلور می‌دهد و اینکه روش پرستلی-تیلور بهتر از روش هارگریوز انجام می‌گیرد.

از سوی دیگر، مطالعاتی نیز در زمینه بررسی روش‌های مختلف تبخیر و تعرق با استفاده از مدل SWAT کشور صورت گرفته است؛ از جمله وانگ^۱ و همکاران (۲۰۰۶) به بررسی چگونگی تأثیر روش‌های PET بر پیش‌بینی رواناب برای یک گندم‌زار در حوضه‌ای در شمال غرب مینه‌سوتا توسط مدل هیدرولوژیکی SWAT پرداختند. آن‌ها دریافتند که سه روش مدل‌سازی PET تحت تأثیر پارامترهای کالیبراسیون مدل قرار گرفتند و روش هارگریوز مدل کمی برتر نسبت به پرستلی-تیلور و روش پنمن-مانتیت بود؛ اگرچه وانگ و همکاران (۲۰۰۶) نشان دادند که پس از آنکه مدل SWAT کالیبره شد، انتخاب روش‌های PET اثر قابل توجهی بر جریان آبراه ندارد. ایرلز و دیکسون (۲۰۰۸) استدلال می‌کنند که خصوصیات روش‌های PET در بودجه هیدرولوژیکی، بارش-رواناب، مدل‌ها، محاسبات نفوذ و مدل‌های پیش‌بینی خشکسالی مهم است. ایشان به این نتیجه رسیدند که روش‌های محاسبه PET (پنمن-مانتیت، هارگریوز و پرستلی-تیلور) ارائه شده توسط مدل SWAT نتایج PET مختلفی را در فلوریدا نشان داده است.

همچنین اویسی و همکاران (۲۰۱۶) طی مطالعه‌ای در تونس به ارزیابی تأثیر روش‌های پنمن-مانتیت، هارگریوز و پرستلی-تیلور در پیش‌بینی جریان شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل SWAT پرداختند. نتایج این محققان حاکی از آن بود که مدل پنمن-مانتیت میزان تبخیر و تعرق را به خوبی پیش‌بینی کرده، درحالی که تمامی روش‌های استفاده شده تأثیر قابل توجهی در پیش‌بینی‌های جریان رودخانه نداشته بودند. اما بین این سه روش تفاوت معنی‌داری وجود داشت. سایر نتایج نشان داد که مدل SWAT جریان رودخانه را بسیار نزدیک به داده‌های مشاهداتی پیش‌بینی کرده است.

همچنین در داخل کشور نیز محققانی تاکنون روی ارزیابی مدل‌های تبخیر و تعرق با استفاده از مدل SWAT انجام داده‌اند؛ از جمله احمدزاده و همکاران (۱۳۹۳) به

به بارش‌های قطع شده توسط پوشش گیاهی محاسبه می‌شود. بعد از آن SWAT مقدار حداکثر تعرق و حداکثر تصعید یا تبخیر آب خاک را محاسبه می‌کند. سپس مقدار واقعی تصعید و تبخیر از خاک محاسبه می‌شود. اگر برف در HRU موجود باشد، تصعید اتفاق خواهد افتاد و تنها زمانی که برفی نباشد، تبخیر از خاک صورت می‌گیرد. در SWAT، تبخیر و تعرق واقعی معمولاً براساس تبخیر و تعرق پتانسیل برآوردی با استفاده از یکی از سه روش پریستلی-تیلور، پنمن-مانتیث و هارگریوز محاسبه می‌شود. تبخیر آب خاک به‌عنوان یک تابع نمایی از عمق خاک و مقدار آب براساس PET و شاخص پوشش خاک براساس توده زنده بالای سطح زمین برآورد می‌شود. تعرق به‌عنوان یک تابع خطی از شاخص سطح برگ، عمق ریشه، مقدار آب خاک و تبخیر و تعرق پتانسیل برآورد می‌شود (نیتش و همکاران، ۲۰۱۱).



شکل (۱): موقعیت حوضه آبخیز طالقان در ایران

روش تحقیق

مدل SWAT

مدل SWAT ترکیبی از سه جزء اصلی به نام‌های زیرحوضه، مسیریابی مخزن آب و مسیریابی آبراهه است. هریک از این اجزا خود شامل چندین زیرجزء است. برای اهداف مدل‌سازی، SWAT یک آبخیز را به چندین زیرحوضه تقسیم می‌کند. بخش‌هایی که شامل مشخصات خاک، مدیریت و کاربری اراضی منحصر به فرد هستند، با هم طبقه‌بندی شده و به‌عنوان یک واحد پاسخ هیدرولوژیکی (HRU)^۱ تعریف می‌شود (نیتش^۲ و همکاران، ۲۰۰۲). با استفاده از یک معادله بیلان آبی، رواناب به‌طور جداگانه برای هر HRU پیش‌بینی می‌شود و برای به‌دست آوردن کل رواناب برای آبخیز جمع می‌شود. معادله شش متغیر دارد که مقدار رطوبت خاک، مقدار بارش، رواناب سطحی، تبخیر و تعرق واقعی، مقدار آب وارد شده به ناحیه غیراشباع^۳ پروفیل خاک و جریان برگشتی است. متغیر AET، آب واقعی برگشتی از HRU از طریق تبخیر از تاج پوشش گیاهی، تعرق، تصعید و تبخیر از خاک را بیان می‌کند. در SWAT در ابتدا تبخیرهای مربوط

روش‌های ارزیابی تبخیر و تعرق پتانسیل

مدل SWAT با استفاده از سه روش تبخیر و تعرق زیر به‌طور مستقل با استفاده از دبی‌های مشاهداتی ماهانه کالیبره و اعتبارسنجی شد. روابط مربوط به هر روش عبارت‌اند از:

الف. روش پریستلی-تیلور: این روش با استفاده از

رابطه (۱) به‌دست می‌آید:

$$ET_0 = \alpha_{pet} \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \times \frac{(H_{net} - G)}{\lambda} \quad (1)$$

در این رابطه، ET_0 تبخیر و تعرق پتانسیل (میلی‌متر در روز)، α_{pet} یک ضریب است و برابر با $1/28$ در نظر گرفته می‌شود، G چگالی شار گرما به زمین ($MJ m^{-2} d^{-1}$)، Δ شیب منحنی فشاردمای بخار اشباع، H_{net} تابش خالص ($MJ m^{-2} d^{-1}$)، γ ثابت فیزومتریکی ($kPa^0 C^{-1}$) و λ گرمای نهان تبخیر ($MJ kg^{-1}$) است (پریستلی و تیلور، ۱۹۷۲).

ب. روش پنمن-مانتیث: که از رابطه (۲) به‌دست می‌آید:

$$ET_0 = \frac{\Delta(H_{net} - G) + (e_a - e_d) \times \frac{\rho_{air} \times c_p}{r_a}}{\lambda(\Delta + \gamma(1 + \frac{r_s}{r_a}))} \quad (2)$$

در این رابطه، e_a فشار بخار اشباع هوا در ارتفاع z (kPa)، e_d فشار بخار آب هوا در ارتفاع z (kPa)، ρ_{air} چگالی هوا ($kg m^{-3}$)، c_p گرمای ویژه در فشار ثابت ($MJ kg^{-1} C^{-1}$)، r_a مقاومت آیرودینامیکی ($s m^{-1}$) و r_s مقاومت

1. Hydrological Response Unit
2. Neitsch
3. Vadose Zone

۲۰۰۳ (دی‌ماه ۱۳۸۱) تا سپتامبر ۲۰۰۵ (شهریور ۱۳۸۴) در نظر گرفته شد.

واسنجی و اعتبارسنجی مدل

دبی‌های شبیه‌سازی‌شده مربوط به هر روش در هریک از این دوره‌ها با مقادیر شبیه‌سازی‌شده مقایسه شدند. مقایسات برای گام‌های زمانی ماهانه صورت گرفت. در این مطالعه، واسنجی با استفاده از نرم‌افزار بهینه‌ساز و جانبی SWAT-CUP صورت پذیرفت. به منظور پیدا کردن اینکه آیا سه روش عملکرد شبیه‌سازی مشابه دارد یا خیر، چهار آماره به شرح زیر مورد استفاده قرار گرفت:

- ضریب تبیین (R^2)

در معادله (۴) (ضریب تبیین) هرچه مقادیر R^2 به عدد یک نزدیک‌تر باشد، برآورد و برازش بهتر را نشان می‌دهد (مک کوئن^۲، ۱۹۸۹).

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})(\hat{Q}_i - \bar{\hat{Q}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{Q}_i - \bar{\hat{Q}})^2}} \right]^2 \quad (4)$$

- ضریب نش-ساتکلایف^۳ (NS)

در معادله ضریب کارایی نش (رابطه ۵) E_{NS} می‌تواند از $-\infty$ تا ۱ تقسیم‌بندی شود، هرچه مقادیر به ۱ نزدیک‌تر باشد برازش بهتری دارد و ۱ برازش عالی را مشخص می‌کند (نش و ساتکلایف، ۱۹۷۰).

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (5)$$

- شاخص اریبی (PBIAS)

این شاخص به صورت رابطه (۶) تعریف می‌شود (راجیب و رحمان^۴، ۲۰۱۲):

$$PBIAS = \sum (Q_i - \hat{Q}_i) / \sum (Q_i) \quad (6)$$

در معادله PBIAS هرچه مقادیر برآوردی از ۱۰ درصد ($PBIAS < 0.1$) کمتر باشد، نتایج بسیار خوب بیشتر از ۱۰ درصد و کمتر از ۱۵ درصد ($0.1 < PBIAS < 0.15$) نتایج

تاج‌پوشش ($s \text{ m}^{-1}$) و مابقی متغیرها همانند رابطه (۱) است (جنسن^۱، ۱۹۹۰).

ج. روش هارگریوز: در این روش با استفاده از رابطه

(۳) تبخیر و تعرق محاسبه می‌شود:

$$ET_0 = 0.0023(T_m + 17.8)(\sqrt{T_{max} - T_{min}})R_a \quad (3)$$

در این رابطه، T_m دمای میانگین روزانه ($^{\circ}\text{C}$)، T_{max} حداکثر دمای روزانه هوا ($^{\circ}\text{C}$)، حداقل دمای روزانه هوا ($^{\circ}\text{C}$) و R_a تابش فرازمینی ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) است (هارگریوز و سامانی، ۱۹۸۵).

داده‌های مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل نقشه‌های اطلاعات مکانی از جمله نقشه‌های DEM، کاربری اراضی و خاک است. همچنین داده‌های هیدرواقلمی مانند داده‌های بارش، حداقل و حداکثر درجه حرارت و رطوبت نسبی، تابش خورشیدی در محل ایستگاه‌های هواشناسی موجود در سطح حوضه و همچنین داده‌های دبی در محل ایستگاه گلینک (بالادست سد طالقان) است (شکل ۱) که از سازمان‌ها و ادارات مربوطه (اداره کل منابع طبیعی، سازمان آب منطقه‌ای و اداره هواشناسی) اخذ گردید.

اجرای مدل SWAT

به منظور اجرای مدل ابتدا با استفاده از DEM موجود و محل خروجی حوضه، شبکه هیدروگرافی و زیرحوضه‌ها ترسیم شدند. در ادامه با توجه به نقشه‌های کاربری اراضی، خاک و شیب موجود، نقشه واحدهای پاسخ هیدرولوژیک (HRU) تهیه شد. سپس اطلاعات جغرافیایی و همچنین آمار مربوط به ایستگاه‌های هواشناسی وارد مدل شده و سپس مدل اجرا گردید.

برای اجرای مدل لازم بود که داده‌ها به دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی تقسیم شوند. بدین منظور به صورت تصادفی دوره واسنجی از ژانویه ۱۹۹۸ (دی‌ماه ۱۳۷۶) تا دسامبر ۲۰۰۲ (آذر ۱۳۸۱) و دوره اعتبارسنجی از ژانویه

2. McCuen
3. Nash-Sutcliffe
4. Rajib and Rahman

1. Jensen

نتایج

واسنجی مدل

همان‌طور که در بخش روش‌ها بیان شد، روش‌های پرستلی-تیلور، پنمن-مانتیث و هارگریوز به‌طور مستقل با استفاده از تغییر پارامترها طی دوره‌های واسنجی (۱۹۹۸-۲۰۰۲) اجرا شدند تا دبی‌های شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهداتی تطابق یابند. هیدروگراف حاصل از شبیه‌سازی جریان ماهانه رودخانه طالقان با استفاده از مدل SWAT با توجه به سه گزینه مختلف تبخیر و تعرق در شکل (۲) نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص شد که در ماه‌های با جریان متوسط و کم مدل در هر سه حالت تبخیر و تعرق، توانسته شبیه‌سازی قابل قبولی داشته باشد؛ هرچند که در ماه‌هایی که دبی جریان بالا بوده مقداری بیش‌برآورد در شبیه‌سازی مدل وجود داشته است. همان‌طور که در بخش مواد و روش‌ها اشاره شد، به‌منظور بررسی دقیق کارایی مدل در مرحله واسنجی از معیارهای مختلف آماری استفاده شد. جدول (۲) نتایج ارزیابی کارایی مدل SWAT با به‌کارگیری سه روش مختلف تبخیر و تعرق را در دوره‌های واسنجی را نشان می‌دهد. با توجه به جدول (۱) هر سه روش تبخیر و تعرق پرستلی-تیلور، پنمن-مانتیث و هارگریوز دارای کارایی قابل قبولی بعد از واسنجی بوده‌اند، به‌طوری‌که اختلاف ناچیزی در مقادیر هر چهار معیارهای ارزیابی وجود دارد. اما مدل هارگریوز با توجه به هر چهار معیار دارای عملکرد نسبتاً مناسب‌تری بوده است.

جدول (۱): معیارهای آماری حاصل از شبیه‌سازی میانگین دبی‌های ماهانه توسط مدل SWAT با به‌کارگیری سه روش مختلف تبخیر و تعرق در دوره واسنجی

روش تبخیر و تعرق	R ²	RMSE	PBIAS	NS
پرستلی-تیلور	۰/۸۳	۷/۸۹	-۰/۴۸	۰/۸۹
پنمن-مانتیث	۰/۸۳	۷/۸۹	-۰/۴۸	۰/۸۹
هارگریوز	۰/۸۶	۷/۱	-۰/۲۷	۰/۹۱

خوب و اگر بیشتر از ۱۵ درصد و کمتر از ۲۵ درصد باشد (۰/۲۵ < PBIAS < ۰/۱۵) نتایج بد است.

- مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}{N} \right]} \quad (7)$$

در معادله RMSE (رابطه ۷) هرچه مقدار به‌دست‌آمده این آماره کمتر باشد، مطابقت بیشتر را مشخص می‌کند (اویسی، ۲۰۱۶).

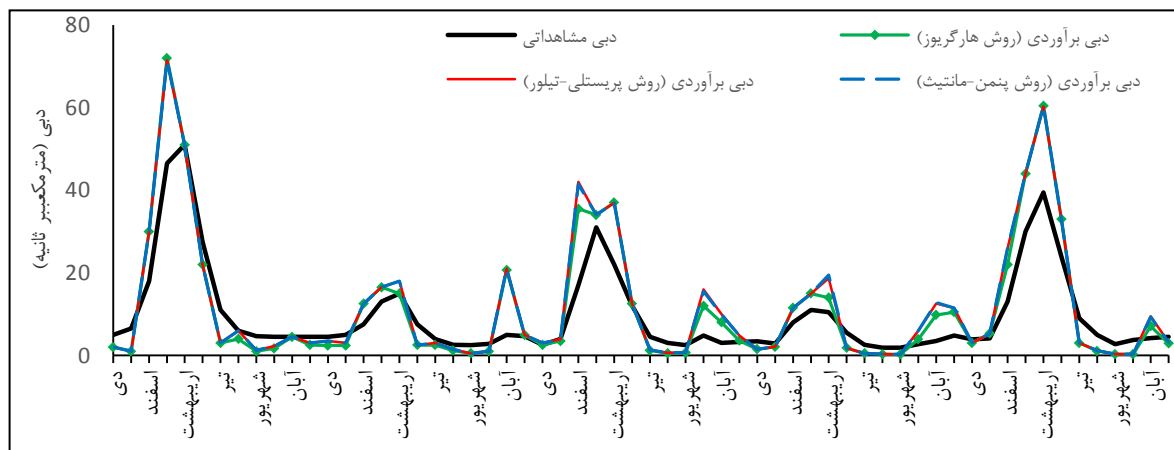
در معادلات فوق، Q_i مقادیر مشاهداتی، Q_i مقادیر برآوردی، \bar{Q} مقادیر میانگین مشاهداتی، \bar{Q} مقادیر میانگین برآوردی، N تعداد جفت داده‌های برآوردی و مشاهداتی است. روش‌های برتر براساس ضریب تبیین و میانگین حداقل مربعات خطای کمتر، ضریب نش-ساتکلیف بیشتر و شاخص ارزیابی در محدوده موردنظر مناسب در دوره‌های واسنجی و اعتبار سنجی انتخاب شد.

مقایسه روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق

در این مطالعه، مقایسه روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق به دو طریق انجام شد. در روش اول، عملکرد مدل SWAT با استفاده از معیارهای آماری که در بخش قبلی توضیح داده شد، در هرکدام از حالت‌های مختلف استفاده از روش‌های پرستلی-تیلور، پنمن-مانتیث و هارگریوز طی دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی، موردارزیابی قرار گرفت. بدین ترتیب روشی که در آن مدل SWAT بهترین عملکرد را داشته باشد، به‌عنوان مناسب‌ترین روش شناخته خواهد شد.

در روشی دیگر به‌منظور مقایسه روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق، از آزمون آنالیز واریانس یک‌طرفه^۱ (ANOVA) و روش‌های مقایسه میانگین استفاده شد. بدین منظور داده‌های دبی برآوردشده در خروجی حوضه توسط سه روش مذکور، ابتدا با استفاده از آزمون کلوموگروف-اسمیرنوف^۲ مورد آزمون نرمال‌سازی قرار گرفته و پس از اطمینان از وضعیت نرمال بودن داده‌ها، با استفاده از آزمون آنالیز واریانس یک‌طرفه مقایسه شد.

1. One way ANOVA
2. Kolmogorov-Smirnov



شکل (۲): هیدروگراف مشاهداتی و شبیه سازی شده با در نظر گرفتن سه روش پریستلی-تیلور، پنمن-مانتیت و هارگریوز طی دوره واسنجی (۱۹۹۸-۲۰۰۲)

اعتبارسنجی مدل

دو روش پنمن-مانتیت و پریستلی-تیلور نتایج بسیار نزدیکی را ارائه داده اند.

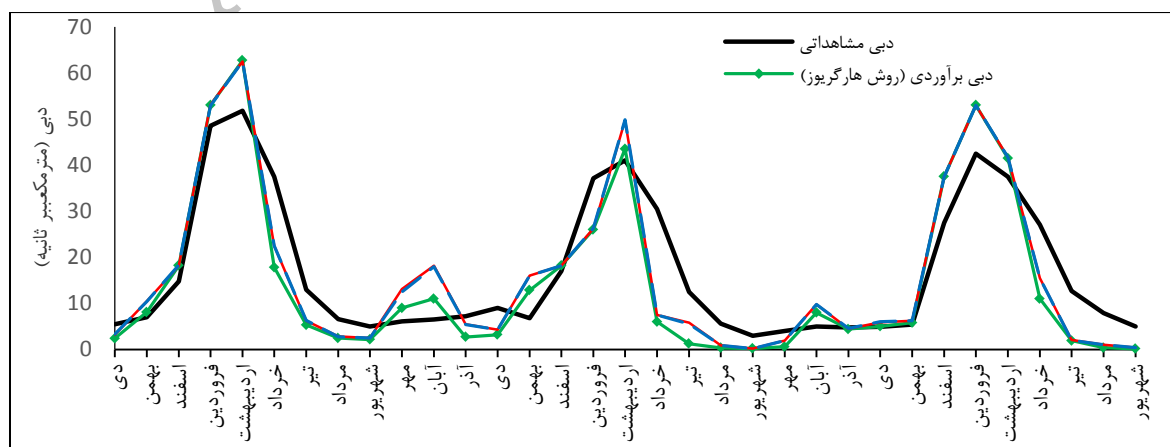
نتایج حاصل از معیارهای ارزیابی در جدول (۲) نیز تأییدکننده این امر بود که در مرحله اعتبارسنجی نیز مدل SWAT دارای عملکرد قابل قبولی در هر سه روش بوده است اما به کارگیری روش هارگریوز عملکرد مدل را به میزان ناچیزی نسبت به دو روش دیگر بهبود داده بود.

جدول (۲): معیارهای ارزیابی حاصل از شبیه سازی میانگین دبی های ماهانه توسط مدل SWAT با به کارگیری سه روش مختلف تبخیر و

تعرق در دوره اعتبارسنجی

روش تبخیر و تعرق	R ²	RMSE	PBIAS	NS
پریستلی-تیلور	۰/۷۸	۸/۵۲	۰/۰۶	۰/۶۸
پنمن-مانتیت	۰/۷۸	۸/۴۸	۰/۰۷	۰/۶۹
هارگریوز	۰/۷۸	۸/۶۷	۰/۰۵	۰/۷۱

پس از واسنجی و با استفاده از مقادیر بهینه شده پارامترها اقدام به اعتبارسنجی مدل SWAT با استفاده داده های مربوط به دوره مذکور (۲۰۰۳-۲۰۰۵) شد. نتایج حاصل از شبیه سازی دبی ماهانه حوضه آبخیز طالقان با استفاده از مدل SWAT و با به کارگیری سه روش مختلف تبخیر و تعرق در قالب هیدروگراف جریان ماهانه نشان داده شد (شکل ۳). هیدروگراف شکل (۳) نشان می دهد که به کارگیری هر سه روش منجر به شبیه سازی دبی های ماهانه نسبتاً یکسانی شده است. البته در ماه هایی که دبی جریان پایین بوده، روش هارگریوز (منحنی سبز رنگ) دبی های ماهانه را کمتر از دو روش دیگر (پنمن-مانتیت و پریستلی-تیلور) شبیه سازی کرده اند. همانند هیدروگراف مرحله واسنجی در این مرحله نیز



شکل (۲): هیدروگراف مشاهداتی و شبیه سازی شده با در نظر گرفتن سه روش پریستلی-تیلور، پنمن-مانتیت و هارگریوز طی دوره واسنجی (۱۹۹۸-۲۰۰۲)

مقایسه روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق

برآوردی توسط سه روش در مقیاس ماهانه وجود نداشته است؛ هرچند که میانگین کل دبی‌های برآوردی طی دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی (۲۷۹ ماه) برای روش هارگریوز ۱۲/۴۴، روش پنمن-مانتیت ۱۲/۴۲۷ و روش پرستلی-تیلور نیز ۱۲/۴۱۶ بود که هیچ‌گونه اختلاف معنی‌داری بین این سه روش دیده نشد.

مقادیر دبی برآوردی در مقیاس زمانی ماهانه با استفاده از سه روش مختلف مورد آزمون آنالیز واریانس قرار گرفت. نتایج این بررسی در جدول (۳) ارائه شده است. این نتایج نشان داد در سطح اعتماد ۹۹ درصد اختلاف معنی‌داری بین دبی‌های

جدول (۳): تجزیه واریانس آزمون دانکن برای مقایسه سه روش پرستلی-تیلور، پنمن-مانتیت و هارگریوز

معنی‌داری	f	درجه آزادی	میانگین مربعات	مجموع مربعات	
۰/۸۹۸	۰/۱۰۸	۲۹/۸۴	۲	۵۹/۶۸	بین گروهی
		۲۷۶/۶۸	۲۷۶	۷۶۳۶۴/۶۷	درون گروهی
			۲۷۸	۷۶۴۲۴/۳۵	کل

اختلاف سه روش با هم زیاد نبوده، اما مقادیر برآوردی توسط روش‌های پرستلی-تیلور و پنمن-مانتیت بسیار نزدیک به هم است. نتایج به‌دست‌آمده از روش پرستلی-تیلور با نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات دیگر همچون لو و همکاران (۲۰۰۵) مطابقت دارد.

به‌طور کلی، هر سه روش دارای کارایی قابل قبول در شبیه‌سازی جریان رودخانه بودند. اما طی سال‌های واسنجی، دبی‌های میانگین ماهانه به‌طور کلی با دقت بیشتری توسط روش هارگریوز پیش‌بینی شدند. سپس روش‌های کالیبره‌شده برای شبیه‌سازی دبی ماهانه برای دوره اعتبارسنجی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ استفاده شدند. آماره‌ها و نمودارهای به‌دست‌آمده از مقایسه دبی‌های مشاهداتی و برآوردی متناظر برای دوره‌های اعتبارسنجی نیز مشخص کردند که علی‌رغم کارایی نسبتاً مشابه هر سه روش، باز هم روش هارگریوز نسبت به بقیه روش‌ها کارایی به‌نسبت مناسب‌تری ارائه داد. در این زمینه جنسن و همکاران (۱۹۹۰) روش پنمن-مانتیت را به‌عنوان بهترین روش برای تولید برآوردهای تبخیر و تعرق نام بردند. همچنین وانگ و همکاران (۲۰۰۶) بیان کردند روش پنمن-مانتیت دو مزیت در مقایسه با دیگر روش‌ها دارد: ۱. روش قابل استناد خوب برای استفاده از لایسمتر تحت محدوده وسیعی از شرایط اقلیمی؛ ۲. نتایج بسیار خوبی در سناریوهای اقلیمی گوناگون تولید می‌کند. البته مناسب بودن کارایی روش پنمن-مانتیت در حوضه آبریز طالقان می‌تواند مشابه با نتایج این محققان باشد.

کارایی بهتر روش هارگریوز در منطقه مورد مطالعه با نتایج اشنایدر^۱ و همکاران (۲۰۰۷) که بیان کردند معادلات ساده

بحث و نتیجه‌گیری

این مطالعه اثرات عملکرد سه روش برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل مورد استفاده در مدل SWAT روی شبیه‌سازی هیدرولوژیکی مدل در حوضه آبخیز طالقان ارزیابی کرده است. سه روش مذکور، روش‌های پرستلی-تیلور، پنمن-مانتیت و هارگریوز بوده که با استفاده از دبی‌های مشاهده‌ای، واسنجی و اعتبارسنجی شدند. دبی‌ها و تبخیر و تعرق‌هایی که توسط سه روش واسنجی و اعتبارسنجی شدند، به‌منظور بررسی اثر هر یک از عملکردهای کلی مدل SWAT استفاده شدند. سه روش واسنجی شده مقادیر تقریباً مشابهی برای متغیر دبی خروجی حوضه شبیه‌سازی کردند. روش هارگریوز بیشترین مقدار را برای پارامتر تبخیر و تعرق شبیه‌سازی کرد؛ در نتیجه، کمترین مقدار برای پارامتر دبی توسط این روش برآورد شد که این نتیجه با نتایج محققان دیگر نظیر لو و همکاران (۲۰۰۵) همخوانی دارد و می‌تواند به این دلیل باشد که حوضه آبخیز طالقان دارای آب‌وهوای نسبتاً مشابهی با منطقه مورد مطالعه توسط ایشان است. این در حالی است که روش هارگریوز به‌طور اصلی برای آب‌وهوای خشک کالیفرنیا توسعه یافته است. مارتینز و تاجرو (۲۰۰۴) نشان دادند که این روش برای مناطق بادی تحت شرایط نیمه‌خشک در شمال شرقی اسپانیا خوب عمل کرده است.

روش‌های پرستلی-تیلور و پنمن-مانتیت مقادیر بسیار مشابهی را برای دبی برآورد کردند، به‌طوری‌که تقریباً هیدروگراف‌های مربوط به هر دو روش، روی هم منطبق بوده است. بیشترین مقدار متغیر دبی توسط روش پرستلی-تیلور با تفاوت بسیار جزئی از روش پنمن-مانتیت تخمین زده شد. البته

دیگر کارایی خوب یا ضعیفی برای آن ماه را به همان اندازه دارد. نتایج آنالیز واریانس یک‌طرفه برای مقایسه میانگین به‌دست‌آمده از سه روش مذکور نشان داد که اختلاف معنی‌داری در سطح اعتماد ۹۹ درصد بین این سه روش وجود ندارد. در مورد این یافته، ایرلز و همکاران (۲۰۰۸) به این نتیجه رسیدند که سه روش مورد استفاده در مدل SWAT در فلوریدای امریکا نتایجی همراه با تفاوت معنی‌دار ارائه داده‌اند که این امر با نتایج حاصل از این تحقیق مغایرت دارد.

در نهایت، می‌توان گفت هر سه روش در این دوره تقریباً هم‌زمان با کاهش دبی مشاهداتی، دبی برآوردی را کمتر از آن شبیه‌سازی کرده و به‌همین صورت با افزایش دبی در ماه‌های مذکور، دبی برآوردی به‌طور چشمگیری افزایش یافته، به‌طوری‌که از دبی مشاهداتی نیز بیشتر است.

هارگریوز بهتر از معادلات پیچیده پریستلی-تیلور و پنمن-ماتیت است مطابقت دارد؛ اگرچه ایشان عنوان کردند کارایی این روش‌ها به در دسترس بودن آب بستگی دارد.

این یافته با نتیجه به‌دست‌آمده توسط اویسی و همکاران (۲۰۱۶) که فقط مدل پنمن-ماتیت را مناسب تشخیص داده بود، مطابقت ندارد که دلیل آن می‌تواند تفاوت در منطقه مورد مطالعه، سایر روش‌های به‌کاررفته در شبیه‌سازی و تفاوت اقلیم دو منطقه باشد.

علاوه‌براین، مقادیر برآوردی توسط روش پنمن-ماتیت از مقادیر برآوردی توسط روش هارگریوز بیشتر و از مقادیر برآوردی توسط روش پریستلی کمتر است.

به‌طور کلی، برای حوضه آبخیز مورد نظر، کارایی سه مدل در پیش‌بینی دبی ماهانه همسان بود؛ بدین معنی هنگامی که یک روش کارایی خوب یا ضعیفی برای یک ماه معین دارد، دو روش

منابع

- Ahmadzadeh H., Morid S., Delavar M., 2014. Assessment of SWAT Model for Simultaneous Simulation of Streamflow, Actual Evapotranspiration and Crops' Yield: A Case Study in Zarineh Rud Basin. *Journal of Water and Soil*: 28(5): 876-889.
- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M., 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper no. 56, Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.
- Aouissi J., Benabdallah S., Chabaâne Z.L., Cudenne C., 2016. Evaluation of potential evapotranspiration assessment methods for hydrological modelling with SWAT-Application in data-scarce rural Tunisia. *Agricultural Water Management*, 174: Pages 39-51.
- Arnold J.G., Srinivasan R., Muttiah R.S., Williams. J.R., 1998. Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development. *Journal of American Water Res. Assoc.* 34(1): 73-89.
- Er-Raki S., Chehbouni A., Guemouria N., Duchemin B., Ezzahar J., Hadria R., 2007. Combining FAO-56 model and ground-based remote sensing to estimate water consumptions of wheat crops in a semi-arid region. *Agric. Water Manage.* 87, 41-54.
- Earls J., and Dixon B. 2008. A comparison of SWAT model-predicted potential evapotranspiration using real and modeled meteorological data. *Vadose Zone J.* 7(2): 570-580.
- Falamarznia Y., Palizdana N., Feng Huang Y., ShuiLee T., 2014. Estimating evapotranspiration from temperature and wind speed data using artificial and wavelet neural networks (WNNs). *Agric. Water Manage.* 140, 26-36.
- Hargreaves G. H. and Samani Z. A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Eng. In Agric.* 1(2): 96-99.
- Harmsen E.W., Miller N.L., Schlegel N.J., Gonzalez J.E., 2009. Seasonal climate change impacts on evapotranspiration, precipitation deficit and crop yield in Puerto Rico. *Agricultural Water Management* 96 (7), 1085-1095.
- Jensen M.E., Burman R.D., Allen R.G., 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. In: ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70. ASCE, N.Y, pp. 332.
- Keskin E.M., Terzi O., Taylan D., 2004. Fuzzy logic model approaches to daily pan evaporation estimation in western Turkey. *Hydrological Sciences Journal*, 49, 1001-1010.
- Landeras G., Ortiz-Barredo A. and Lopez J.J.,

2008. Comparison of artificial neural network models and empirical and semi-empirical equations for daily reference evapotranspiration estimation in the basque country (Northern Spain). *Agricultural water management*, 95: 553-565.
13. Lu J., Sun G., McNulty S.G., Amatya D.M., 2005. A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern United States. *Journal of American Water Res. Assoc.* 41(3): 621-633.
 14. Martinez-Cob A., and Tejero-Juste M., 2004. A wind-based qualitative calibration of the Hargreaves ET₀ estimation equation in semiarid regions. *Agric. Water Management*, 64(3): 251-264.
 15. McCuen, R. H., 1989. *Hydrologic analysis and design*. Prentice hall, Inc., Englewood cliffs, New Jersey.
 16. Mianabadi A., Alizadeh A., Sanaeinejad H., Ghahreman B., Davari K., 2016. Assessment of the SEBAL Algorithm to Estimate Actual Evapotranspiration in Neishaboor-Rokh Watershed Using SWAT Model.
 17. Miryaghoobzadeh M., 2014. Investigation of SWAT model development in evapotranspiration using by Surface Energy Balance Algorithm for Land. Ph.D thesis in Watershed management engineering and Sciences. University of Mazandaran.
 18. Mirzaei, T.H., and Moazedi A.D., 2006. Comparison of different methods for estimating evapotranspiration. *Irrigation and Drainage National Conference*, Shahid Chamran University, College of Water Sciences and Engineering.
 19. Monteith, J.L., (1965). Evaporation and environment. In *State and Movement of Water in Living Organisms: Proc. 19th Symp. Society of Experimental Biology*, 205-234. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press.
 20. Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River Flow forecasting through conceptual models part 1—a discussion of principles. *J. Hydrol.* 10, 282–292.
 21. Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., and Williams, J.R., (2000). *Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation. Version 2000*, Texas water Resources Institute, College Station, TX, 2002.
 22. Neitsch, S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., and Williams J.R., 2011. *Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation Version 2009*, Texas water Resources Institute., Technical report No. 406. pp: 618.
 23. Penman H.L., 1956. Evaporation: An introductory survey. *Netherlands J. Agric. Sci.* 4: 7-29.
 24. Priestley C. H. B., Taylor R.J., 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon. Weather Rev.* 100(2): 81-92.
 25. Rajib M. A. and Rahman M. M., 2012. A Comprehensive Modeling Study on Regional Climate Model (RCM) Application — Regional Warming Projections in Monthly Resolutions under IPCC A1B Scenario. *Atmosphere*, 3: 557-572.
 26. Schneider K., Ketzer B., Breuer L., Vach'e. K.B., Bernhofer C., and Frede H.G., 2007. Evaluation of evapotranspiration methods for model validation in a semi-arid watershed in northern China. *Adv. Geosci.* 11: 37-42.
 27. Verstraeten W.V., Veroustraeten, F., eyen, J., 2005. Estimating evapotranspiration of European forests from NOAA-imagery at satellite overpass time: towards an operational processing chain for integrated optical and thermal sensor data products. *Remote Sens. Environ.* 96, 256–276.
 28. Wang X., Melesse A.M., Yang W., 2006. Influences of Potential Evapotranspiration Estimation Methods on SWAT's Hydrologic Simulation in a Northwestern Minnesota Watershed. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 49(6): 1755-1771.
 29. Yavari M., Omidvar J., davary K., Farid hossini A., Inanloo M., 2014. Evaluation of "Experimental methods in estimation of large-scale actual annual evapotranspiration" using "estimated evapotranspiration from SEBAL" for Neyshabor plain. *Irrigation and Water Engineering Journal*, 17: 44-5.

Comparison of Potential Evapotranspiration Estimation Methods in Stream flow Modeling Using SWAT in Taleghan Watershed

ataollah kavian^{*1}, Marzieh Bahrami², Hamed Rouhani³

Received: 16/3/2017

Accepted: 24/6/2017

Abstract

Evapotranspiration process is a key element in hydrological simulation of water supply, rainfall-runoff models, infiltration calculations and drought prediction models. Recently, several equations were used for estimating annual, monthly and daily evapotranspiration in the world. In this study, the potential evapotranspiration of Taleghan watershed was estimated by three methods in the SWAT model including Priestley Taylor, Penman-Montieth and Hargreaves methods. The influence of applying these methods were evaluated on simulated streamflow of the Taleghan watershed in the calibration (1998 - 2003) and validation (2003 - 2005) periods, using determination coefficient (R^2), root mean square error (RMSE), Nash-Sutcliffe performance coefficient (NS) and skew index (PBIAS). Results revealed that the maximum and minimum values of simulated evapotranspiration and consequently, simulated runoff were related to the Hargreaves and Priestley Taylor methods, respectively. Moreover, investigation of statistic coefficients showed that there is no much difference among the three methods. Results of ANOVA also confirmed that there was no statistically significant difference at the 99% level among the simulated mean monthly flow using the three methods. In conclusion, the Hargreaves method provided better results than the two other methods during calibration and validation periods.

Keywords: Evapotranspiration, Streamflow, Simulation, SWAT, Taleghan watershed.

1. Associate Professor, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources; Email: a.kavian@sanru.ac.ir

2. Phd student, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

3. Associate Professor, University of Gonbad