

افزایش دقت شبیه‌سازی رواناب با کاربرد مدل WAPABA

بهنام رشیدی^۱، شهاب عراقی نژاد^۲، کیومرث ابراهیمی^{۳*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی منابع آب، دانشگاه تهران

۲. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

۳. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۱۸ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۵/۱)

چکیده

مقاله حاضر با هدف افزایش دقت شبیه‌سازی رواناب با استفاده از مدل WAPABA و مقایسه کارایی آن با مدل SALAS در ایستگاه‌های هیدرومتری شمال استان مرکزی برای سال آبی ۹۰-۸۹ انتخاب شده است. کاربرد مدل‌ها با استفاده از داده‌های تاریخی مربوطه واسنجی شدند. سپس ارزیابی عملکرد هر یک از مدل‌ها با استفاده از معیارهای مختلف دقت سنجی (R^2 , RMSE, CE و MAE) انجام شد. برای محاسبه معیارهای کارایی از مقادیر شبیه‌سازی شده مدل‌ها و اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هیدرومتری استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل SALAS رواناب را در ایستگاه‌ها بیشتر از میزان واقعی برآورد کرده که علت برآورد بیشتر این مدل وزن‌دهی بیشتر به بارش و وزن‌دهی کمتر به سایر پارامترها است. درحالی‌که مدل WAPABA مقدار رواناب را با در نظر گرفتن وزن‌های یکسان برای هر یک از پارامترها با دقت بهتری شبیه‌سازی کرده ولی در ایستگاه قطعه چهار شبیه‌سازی مدل مناسب نبوده است.

واژه‌های کلیدی: دقت سنجی، کارایی، رواناب، SALAS

مقدمه

بیلان، ترازنامه بین داشته‌ها و برداشت‌هاست و در مورد منابع آب عوامل ورودی و عوامل خروجی آب در یک سطح حوضه آبریز می‌باشد. هدف از برقراری بیلان آب هم‌تراز کردن بین عرضه و تقاضای آب است.

تقاضا برای آب و افزایش جمعیت، تخمین رواناب سطحی را ملزم نموده است که نیازمند ثبت آمارهای طولانی‌مدت است که می‌تواند باعث برنامه‌ریزی پایدار برای منابع آبی، تخصیص منابع آب و بنابراین کاهش کشمکش میان بهره‌برداران آب گردد (Rajurkar et al., 2004). ابزارهای ثبت بارش، دما و رواناب سطحی در بسیاری از مناطق دنیا محدود هست، درحالی‌که برآورد بلندمدت تغییرات جریانات سطحی برای کاهش اثرات سیل و خشک‌سالی از ضروریات است. در همین راستا مدل‌های متعددی جهت پیش‌بینی تخمین رواناب توسعه یافته‌اند که از بین آن‌ها می‌توان به مدل‌های بیلان آبی اشاره داشت. از این مدل‌ها بیلان آب برای بررسی تبادلات آب در یک محدوده معین زمانی و مکانی استفاده می‌شود. پژوهش‌ها نشان داده

است چنانچه مرفومتری حوضه‌ها بسیار پیچیده باشد دیگر نمی‌توان از مدل‌های پایه فیزیکی به‌تنهایی پاسخ لازم را دریافت نمود (Rajurkar et al., 2004)؛ بنابراین پژوهش‌ها جهت ترکیب این مدل‌ها با مدل‌های منطقی بیلان آب صورت گرفت و در این راستا مدل‌هایی دارای پارامترهای مربوط به آن‌ها با استفاده از روش‌های مختلف برآورد شد. فرایند ساخت مدل‌ها نشان می‌دهد که مقیاس مورد نظر زمان (از سالانه تا ساعتی) و سطح (از نقطه تا ۱۰۰۰ کیلومترمربع) عواملی هستند که پیچیدگی مدل را تعیین می‌سازند. در پژوهش‌های مختلف، بیلان آب مورد ارزیابی قرار گرفته که از انواع مختلف مدل‌های بیلان آب استفاده شده است. از جمله تحقیقات، مطالعه Vandewiele et al. (1992) است که مدل بیلان آبی ماهانه را در ۷۹ حوضه آبخیز بلژیک، چین و برمه به کار بردند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که یک مدل جهانی مناسب برای تمامی حوضه‌ها وجود ندارد. Arnel (1992) از یک مدل بیلان آب ماهانه برای بررسی عوامل کنترل‌کننده آثار تغییر اقلیم بر روی حوضه آبخیز انگلستان استفاده کرد به این منظور که ایشان با تغییرات فرضی عوامل هواشناسی در مدل بیلان آبی ماهانه نشان داد که در مقیاس ماهانه بیلان در تابستان، شرایط زمین‌شناسی حوضه اثر مهمی برعکس‌العمل حوضه نسبت به یک حالت مشخص تغییر اقلیم

* نویسنده مسئول: EbrahimiK@ut.ac.ir

<http://can.ut.ac.ir/member/ebrahimi.aspx>

همچنین از دیگر مزایای مدل در این است که اگر یک پارامتر بنا به دلایلی در حوضه اندازه‌گیری نشود، برای مثال رطوبت خاک از طریق مدل برآورد می‌گردد. مدل‌های بیلان آب قبلی به یکی از پارامترهای مهم در بیلان اهمیت کمتری نشان داده که آن تبخیر تعرق هست که این مدل بخاطر وزن یکسان به همه پارامترها دقت بالاتری نسبت به آنها دارد. از جمله محدودیت مدل کالیبره کردن ضرایب آن می‌باشد که برای این کار نیز می‌توان با قبول اندکی خطا از حوضه‌های مشابه استفاده کرد.

مواد و روش‌ها

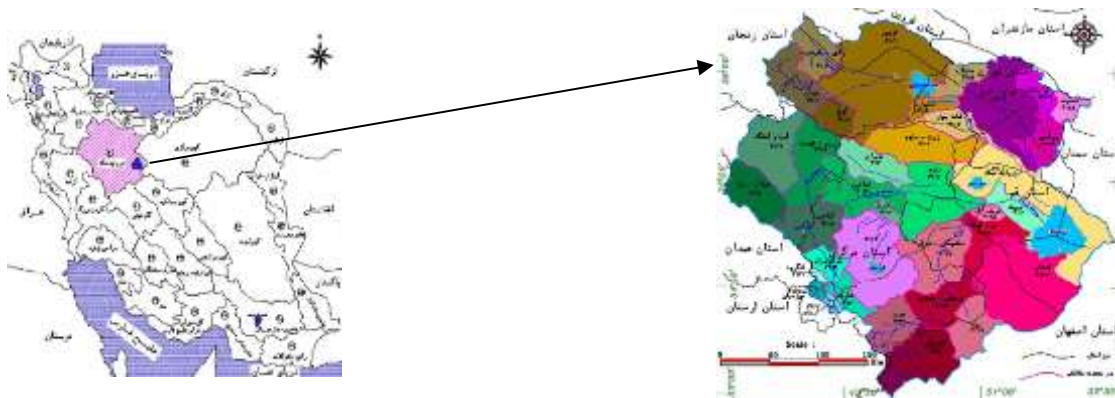
موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دریاچه نمک با وسعت ۹۲۵۶۳ کیلومتر مربع در شمال غرب قسمت مرکزی ایران قرار گرفته و استان‌های مانند استان تهران و قسمتی از استان‌های زنجان، همدان، مرکزی و اصفهان را در برمی‌گیرد. تغییرات درجه حرارت حوضه آبریز دریاچه نمک بین ۳۶/۷- تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد هست و میزان بارندگی در این حوضه نیز از نقطه‌ای به نقطه دیگر بین ۱۰۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر در سال تغییر می‌نماید. از رودخانه‌های مهم این منطقه رودخانه شور، جاجرود، کرج، قره‌چای، قمرود را می‌توان نام برد. حداکثر رتبه رودخانه‌های موجود در حوضه ۶ هست که متعلق به پایاب رودخانه‌های شور و قره‌چای است. سدهای مهم این حوضه عبارت از سد کرج، سد لتیان، سد گلپایگان، سد اکباتان، سد ساوه و سد پانزده خرداد هست. در مقاله حاضر، از بین ایستگاه‌های هواشناسی در محل خروجی و نزدیک ایستگاه‌های هیدرومتری موجود در منطقه، چهار ایستگاه زرد ساوه، قطعه چهار ساوه، نوبران ساوه جهت تهیه مقادیر بارندگی در یک دوره دوازده‌ماهه (مهر ۸۹ تا شهریور ۹۰) به دلیل داشتن داده‌های لازم و کافی و همچنین قرار داشتن در مرکز حوضه آبریز انتخاب شدند. مشخصات محدوده‌های مطالعاتی در جدول (۱) آمده است.

مدل بیلان آب SALAS

نفوذ، تبخیر تعرق، نفوذ عمقی، جریان پایه و جریان سطحی، مؤلفه‌های اصلی این مدل می‌باشند. پارامترهای مدل شامل ضریب رواناب (a)، بخشی از آب نفوذ شده که تبخیر می‌شود (b) و بخشی از آب زیرزمینی که تبدیل به جریان پایه (c) گردیده است.

دارد. Mahdavi and Azarakhshi (2003) به تعیین مدل بیلان آبی مناسب ماهانه در حوضه‌های آبخیز کوچک کشور پرداختند و نتیجه گرفتند که اختلاف معنی‌داری بین دبی متوسط ماهانه اندازه‌گیری شده و محاسبه‌شده توسط مدل وجود ندارد و مدل بیلان آبی ماهانه قادر به پیش‌بینی میزان رواناب ماهانه در حوضه‌های فاقد آمار هست. Lilua and Gu (1999) از یک مدل دو پارامتری بیلان آبی ماهانه برای شبیه‌سازی رواناب در ۷۰ زیر حوضه در جنوب چین استفاده کردند. آن‌ها در این مطالعه به این نتیجه رسیدند که مدل دو پارامتری بیلان آبی قادر به برآورد رواناب ماهانه می‌باشد. Saito *et al.* (2008) با بررسی رویکردی برای مدل‌سازی حوضه‌ی آبریز برای پیش‌بینی دبی در بازه‌های سراب رودخانه وال کر در ایالت نوادا در آمریکا به این نتیجه رسیدند که اگرچه اساس مدل SALAS روابط بسیار ساده و تنها ورودی آن نیز بارش هست اما توانسته میزان دبی خروجی را با درجه تبیین بالای ۰/۸۷ تخمین بزند. Delavar *et al.* (2008) که از مدل‌های مختلف بیلان آبی (شامل مدل‌های مختلف عمومی بیلان آبی، شبکه عصبی مصنوعی و همبستگی چندگانه) برای شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی دریاچه ارومیه، تحلیل حساسیت و عدم قطعیت تغییرات آن نسبت به مؤلفه‌های بیلان آبی استفاده کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد مدل شبکه‌ی عصبی با کاربرد همزمان دبی ورودی، بارندگی و تبخیر ماهیانه بهترین دقت و کمترین حساسیت را در شبیه‌سازی نوسانات تراز آب زیرزمینی دریاچه دارد. Mirzaei and Khazaei (2014) مدل بیلان آبی SALAS را برای جریانات سطحی مورد ارزیابی قراردادند و به این نتیجه رسیدند که مدل بیلان سالانه SALAS میزان رواناب را بهتر از مدل فصلی برآورد می‌کند. افزایش جمعیت، تغییر و ارتقای استانداردهای زندگی، گسترش منطقه‌های شهرنشینی، صنعتی و کشاورزی سبب رشد روزافزون تقاضا برای آب شده است. این در حالی است که محدودیت منابع آب، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک دنیا از جمله ایران افزایش‌یافته است. هدف اصلی مقاله حاضر ارزیابی مدل WAPABA در تعیین بیلان آب با در نظر گرفتن نیاز، عرضه و تقاضاست و از آنجایی که مدل‌های موجود محاسبه بیلان آب، مقادیر مصرف، عرضه و تقاضا را در نظر نمی‌گیرند، توانایی مدل WAPABA در این مورد است. در مقاله حاضر کل آب موجود حوضه به عنوان "عرضه" و تبخیر و تعرق گیاه بعنوان "تقاضا" و تبخیر و تعرق واقعی بعنوان "مصرف" در نظر گرفته‌شد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه شده حوضه آبریز دریاچه نمک

جدول ۱- مشخصات محدوده‌های مطالعاتی استفاده شده در حوضه آبریز دریاچه نمک

ردیف	نام محدوده مطالعاتی	وسعت ارتفاعات (کیلومترمربع)	حجم بارندگی	حجم تبخیر تعرق حقیقی	حجم بارندگی مفید
۱	زرنده ساوه	۲۰۴۹	۵۳۸/۱۰	۴۲۴	۱۱۴/۱۰
۲	قطعه چهار ساوه	۱۰۳۰	۲۰۵/۳۸	۱۹۶/۲۸	۱۱۴/۱۰
۳	نوبران	۱۶۳۰	۵۶۲/۶۰	۴۳۹/۱۰	۱۲۳/۵۰
۴	ساوه	۲۳۰۷	۵۴۸/۵۰	۳۵۲/۲۰	۱۹۶/۳۰

شبیه‌سازی جریان در مدل SALAS بر اساس فرض داشتن یک ذخیره و آن هم ذخیره آب زیرزمینی انجام می‌شود، زیرا ذخیره آب زیرزمینی، مؤلفه‌ی مهم مدل در انباشت یا آزادسازی آب در رابطه با میزان جریان ورودی خروجی حوضه است. مدل منطقی حوضه هم از تعدادی مدل ساده که فرایندهای مختلف جریان را در حوضه مشخص می‌سازد به دست می‌آید؛ مانند رواناب سطحی، نفوذ، تبخیر تعرق، نفوذ عمقی جریان پایه. مدل‌های مذکور اساس روند بارش را در سرتاسر حوضه تا خروجی تعیین می‌سازند. SALAS مؤلفه‌های جریان متغیرهای در نظر گرفته‌شده در مدل را با توجه به معادلات ذکر شده در منبع به صورت زیر ارائه کرده است (SALAS, 2002:2-3):

شبیه‌سازی جریان در مدل SALAS بر اساس فرض داشتن یک ذخیره و آن هم ذخیره آب زیرزمینی انجام می‌شود، زیرا ذخیره آب زیرزمینی، مؤلفه‌ی مهم مدل در انباشت یا آزادسازی آب در رابطه با میزان جریان ورودی خروجی حوضه است. مدل منطقی حوضه هم از تعدادی مدل ساده که فرایندهای مختلف جریان را در حوضه مشخص می‌سازد به دست می‌آید؛ مانند رواناب سطحی، نفوذ، تبخیر تعرق، نفوذ عمقی جریان پایه. مدل‌های مذکور اساس روند بارش را در سرتاسر حوضه تا خروجی تعیین می‌سازند. SALAS مؤلفه‌های جریان متغیرهای در نظر گرفته‌شده در مدل را با توجه به معادلات ذکر شده در منبع به صورت زیر ارائه کرده است (SALAS, 2002:2-3):

$$W(t) = P(t) + S(t-1) \quad (\text{رابطه ۱})$$

w(t) متغیر آب قابل دسترس، P(t) بارش در حوضه، S(t-1) رطوبت ذخیره‌شده در خاک در دوره قبل می‌باشد.

$$Y(t) = \frac{W(t)+b}{2a} - \left[\left(\frac{W(t)+b}{2a} - \frac{W(t)b}{a} \right) \right]^{0.5} \quad (\text{رابطه ۲})$$

Y(t) متغیر آب باقی مانده در حوضه، a بیان‌کننده میزان رواناب به وقوع پیوسته قبل از اشباع کامل خاک است و b بخشی از آب نفوذ شده که تبخیر می‌شود.

$$S(t) = Y(t) \times \text{EXP}\left(\frac{ETP}{b}\right) \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$GR(t) = c \times (W(t) - Y(t)) \quad (\text{رابطه ۴})$$

GR(t) نفوذ عمقی و c بخشی از آب زیرزمینی که تبدیل به جریان زیرزمینی می‌شود.

$$DR(t) = (1 - c) \times (W(t) - Y(t)) \quad (\text{رابطه ۵})$$

DR(t) رواناب جاری در منطقه

$$G(t) = \frac{GR(t) + G(t-1)}{d+1} \quad (\text{رابطه ۶})$$

G(t) ذخیره آب زیرزمینی، G(t-1) ذخیره آب زیرزمینی در دوره قبل در حوضه، d نیز بخشی از ذخیره آب زیرزمینی هست که به جریان آب زیرزمینی می‌پیوندد. متغیرهای a, b, c و d بر اساس داده‌های تاریخی و مشاهده‌ای بارش و جریان خروجی به دست می‌آیند. که در مقاله حاضر از روش آزمون و خطا استفاده گردید. به عبارت دیگر با استفاده از داده‌های تاریخی رواناب موجود و بکارگیری معادله مربوطه و سپس تغییر ضرایب و تکرار این موضوع تا آنجا که اختلاف دو طرف معادله ناچیز شود، ضرایب بدست می‌آید.

مدل بیلان آبی WAPABA

مدل WAPABA در سال ۲۰۰۸ در راستای چهارچوب budyko در سید منطقه استرالیا با توجه به منحنی مصرف، عرضه و

در دوره قبل است.

$$ET(t) = ET_0(t) f\left(\frac{W(t)}{ET_0(t)}, \alpha\right) \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

ET(t) تبخیر تعرق واقعی در حوضه، ET₀(t) تبخیر تعرق گیاه، α پارامتر مدل و نسبت آب قابل دسترس در حوضه به تبخیر تعرق پتانسیل است.

$$S(t) = W(t) - ET(t) \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

S(t) رطوبت خاک تعیین شده توسط مدل می باشد.

$$R(t) = \beta Y(t) \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

R(t) نفوذ عمقی، β ضریبی از آب قابل دسترس در حوضه است که به دست می آید.

$$Q_s(t) = Y(t) - R(t) \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

Q_s(t) رواناب سطحی ناشی از بارش در حوضه است. (رابطه ۱۶)

$$Q_b(t) = G(t-1)(1 - \exp(-\frac{T}{K})) + R(t)(1 - \exp(-\frac{T}{K}))(1 - \exp(-\frac{T}{K}))$$

Q_b(t) رواناب پایه در حوضه، T دوره مدل سازی، K ضریب ثابت برای بی بعد کردن T می باشد.

$$G(t) = G(t-1) + R(t) - Q_b(t) \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

G(t) رواناب تغذیه، G(t-1) رواناب تغذیه در دوره قبل محاسبه شده است.

$$Q(t) = Q_b(t) + Q_s(t) \quad (\text{رابطه ۱۸})$$

Q(t) کل رواناب جریان در حوضه که از رواناب پایه و رواناب بارش تعیین می گردد.

با توجه به اینکه تعداد گام های مدل WAPABA بیشتر از مدل SALAS و همچنین همبستگی بین گام ها بیشتر است، در تمامی گام ها برای برآورد پارامترهای مدل از روش آزمون و خطا استفاده شده است. که روش تعیین ضرایب همانند مدل SALAS برآورد گردید.

ارزیابی عملکرد مدل های مختلف

برای انتخاب مدل بهینه از پارامترهای دقت سنجی از جمله (R²، RMSE، MAE و CE) روابط (۱۸ تا ۲۱) استفاده گردید (Zhang et al. 2008).

$$CE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{y_0} - Q_{y_e})}{\sum_{t=1}^{12} (Q_{y_0} - \bar{Q}_{y_0})} \quad (\text{رابطه ۱۹})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^T (Q_{y_0} - Q_{y_e})^2} \quad (\text{رابطه ۲۰})$$

$$R^2 = \frac{\sum (Q_{y_0} - \bar{Q}_{y_0})^2 (Q_{y_e} - \bar{Q}_{y_e})^2}{\sum (Q_{y_0} - \bar{Q}_{y_0})^2 (Q_{y_e} - \bar{Q}_{y_e})^2} \quad (\text{رابطه ۲۱})$$

تقاضا مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به این که بیشترین مقدار هدر رفت آب در مناطق مختلف استرالیا تبخیر و تعرق هست لذا برای کمی کردن آن و نشان دادن تاثیر آن بر روی منابع آب، کل آب موجود در حوضه بعنوان "عرضه" و تبخیر و تعرق گیاه به عنوان "تقاضا" و تبخیر و تعرق واقعی بعنوان "مصرف" در نظر گرفته شد (Peel et al., 2008). از توانایی این مدل کاربرد آن در سطح گسترده و با قابلیت بکارگیری آن برای حوضه های فاقد ایستگاه هیدرومتری است. همچنین از دیگر مزایای مدل، کاربرد آن در شرایط کمبود یک پارامتر که بنا به دلایلی ممکن است در حوضه اندازه گیری نشود، است. مدل های بیلان آب قبلی برای پارامتر تبخیر تعرق اهمیت کمتری قائل شده است، ولی این مدل بخاطر وزن یکسان به همه پارامترها دقت بالاتری از آنها دارد. کارایی مهم این مدل در این است که با توجه به در نظر گرفتن همه جوانب مؤثر در بیلان آب دقت بالاتری دارد ولی به شرطی که تمام پارامترهای آن به طور صحیح برآورد شده باشد. محدودیت های مدل، پارامترهایی هستند که برای پیدا کردن آنها نیاز به واسنجی مدل دارد.

گام های محاسبه بیلان آب WAPABA به صورت زیر می باشد (Zhang et al. 2008). (رابطه ۷)

$$\frac{\text{مصرف}}{\text{تقاضا}} = f\left(\frac{\text{عرضه}}{\text{تقاضا}}, \alpha\right) = 1 + \frac{\text{عرضه}}{\text{تقاضا}} - [1 + \left(\frac{\text{عرضه}}{\text{تقاضا}}\right)^\alpha]^{1/\alpha}$$

α پارامتر مدل که از داده های تاریخی محاسبه می گردد. از آنجا که بیشترین مقدار آب ناشی از بارش به صورت تبخیر و تعرق تلف می شود، لذا در این مقاله عرضه کل آب برای تبخیر و تعرق، تقاضا برابر تبخیر و تعرق گیاه و مصرف برابر تبخیر و تعرق واقعی در نظر گرفته شد.

$$X_0(t) = ET_0(t) + S_{\max} - S(t-1) \quad (\text{رابطه ۸})$$

X₀(t) پتانسیل آب مصرف شده در حوضه، ET₀ تبخیر تعرق پتانسیل، S_{max} حداکثر ظرفیت نگهداری رطوبت خاک، S(t-1) رطوبت خاک که از دوره قبل به دست می آید.

$$X(t) = X_0(t) f\left(\frac{P(t)}{X_0(t)}, \alpha\right) \quad (\text{رابطه ۹})$$

X(t) آب مصرف شده در حوضه، P(t) بارش در سطح حوضه، α پارامتر مدل که نسبت بارش به پتانسیل آب مصرف شده است.

$$Y(t) = P(t) - X(t) \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

Y(t) آب باقی مانده در حوضه است.

$$W(t) = S(t-1) - X(t) \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

W(t) آب قابل دسترس در حوضه و S(t-1) رطوبت خاک

به‌طوری‌که از نتایج بالا (جدول ۲ و ۳) مشاهده گردید، پارامترهای مدل نقش تعیین‌کننده‌ای در تعیین میزان دقت نهایی مدل‌ها ایفا می‌کنند. در مدل SALAS، a معادل ضریب رواناب می‌باشد، b معادل میزان آبی است که تبخیر می‌شود، c نیز بخشی از آب زیرزمینی است که به جریان پایه افزوده می‌شود، d نیز بخشی از ذخیره آب زیرزمینی می‌باشد که به جریان آب زیرزمینی می‌پیوندد. همچنین مقادیر پارامترهای مدل WAPABA شامل پارامترهای: α_1 که از منحنی مصرف آب در حوضه، α_2 از منحنی تبخیر تعرق محاسبه می‌گردد، β معادل ضریبی از آب حوضه که صرف نفوذ در حوضه می‌گردد، K^{-1} ضریبی ثابت از ذخیره آب زیرزمینی می‌باشد.

مقادیر پارامترهای مدل‌ها با بهینه‌سازی و کنترل مقادیر خطا با لحاظ پارامترهای مهم و مؤثر تعیین شدند. در این مقاله برای شرایط مختلف زمین‌شناسی و اقلیمی مقادیر مختلفی به‌عنوان مقادیر بهینه استخراج شده‌اند. در جدول (۴ و ۵) خروجی حاصل از مدل‌های فوق ارائه شده است. در مطالعه حاضر برای پیش‌بینی میزان جریان سطحی یا رواناب کل عوامل بیلان (رواناب، نفوذ، پتانسیل تبخیر تعرق، تبخیر تعرق واقعی، رواناب پایه، ذخیره آب زیرزمینی، جریان آب زیرزمینی، رطوبت، مصرف، تقاضا و نیاز) به‌صورت متوالی با استفاده از داده‌های اولیه بارش، تبخیر تعرق پتانسیل در مدل SALAS و داده‌های اولیه بارش و دما در مدل WAPABA برآورد و در نهایت میزان رواناب به دست آمد. سپس میزان رواناب شبیه‌سازی شده با رواناب واقعی مقایسه گردید که مقادیر دقت‌سنجی برای هر محدوده مطالعاتی در جدول (۴ و ۵) ارائه شده است.

جدول ۴- مقادیر دقت سنجی کلی مدل WAPABA

نام ایستگاه	CE	MAE (mm)	RMSE (mm)	R ²
زرنند ساوه	۰/۰۶	۱/۸۴	۵/۳۴	۰/۴۷
قطعه چهار ساوه	-۰/۳۴	۰/۲۸	۱/۳۱	۰/۱۱
ساوه	۰/۱۶	۳/۰۲	۷/۵۸	۰/۷۴
نوبران	۰/۰۱	۳/۲۵	۹/۶۸	۰/۲۴

جدول ۵- مقادیر دقت سنجی کلی مدل SALAS

نام ایستگاه	CE	MAE (mm)	RMSE (mm)	R ²
زرنند ساوه	-۴/۱۱	۸/۸۸	۱۲/۴۴	۰/۶۶
قطعه چهار ساوه	-۱۹/۳۴	۳/۴۶	۵/۱۸	۰/۲۷
ساوه	-۰/۹۸	۸/۰۱	۱۱/۶۷	۰/۷۶
نوبران	-۰/۹۲	۷/۱۶	۱۱/۰۸	۰/۵۲

$$MAE = \left| \frac{1}{N} \sum (Q_{y_0} - Q_{y_e}) \right| \quad (\text{رابطه } ۲۲)$$

در روابط بالا CE ضریب کارایی، RMSE ریشه مجذور مربعات، R2 ضریب تبیین، MAE ریشه خطای مطلق، Q_{y_0} رواناب مشاهداتی، \bar{Q}_{y_0} میانگین رواناب مشاهداتی، Q_{y_e} رواناب محاسباتی، \bar{Q}_{y_e} میانگین رواناب محاسباتی که به غیر از ضریب کارایی و ضریب تبیین بقیه پارامترها دارای بعد میلی متر می‌باشند.

علت استفاده از مدل SALAS در این پژوهش این است که چون مدل WAPABA و مدل SALAS مدل‌های بیلان آب بوده و نحوه عملکرد آنها شبیه به هم بوده از مدل SALAS برای مقایسه استفاده شده است. مدل WAPABA صرفاً یک مدل بارش رواناب نمی‌باشد بلکه یک مدل بیلان آب بوده که یکی از پارامترهای آن رواناب می‌باشد که در این مقاله برای ارزیابی کارایی آن با مدل SALAS مقایسه گردیده است. از طرفی پارامتر تبخیر و تعرق تأثیر بسزایی در بیلان آب دارد و چون مدل SALAS به پارامتر بارش وزن بیشتری داده و نسبت به تبخیر و تعرق اهمیت کمتری دارد از مدل WAPABA برای نشان دادن تأثیر زیاد تبخیر و تعرق استفاده گردید.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از پارامترهای دو مدل به کار رفته در پژوهش حاضر شامل SALAS (d,c,b,a) و WAPABA ($k^{-1}, \beta, \alpha_2, \alpha_1$)؛ که با استفاده از روش آزمون و خطا بدست آمده اند در جدول (۲ و ۳) آورده شده‌اند.

جدول ۲- پارامترهای مدل WAPABA

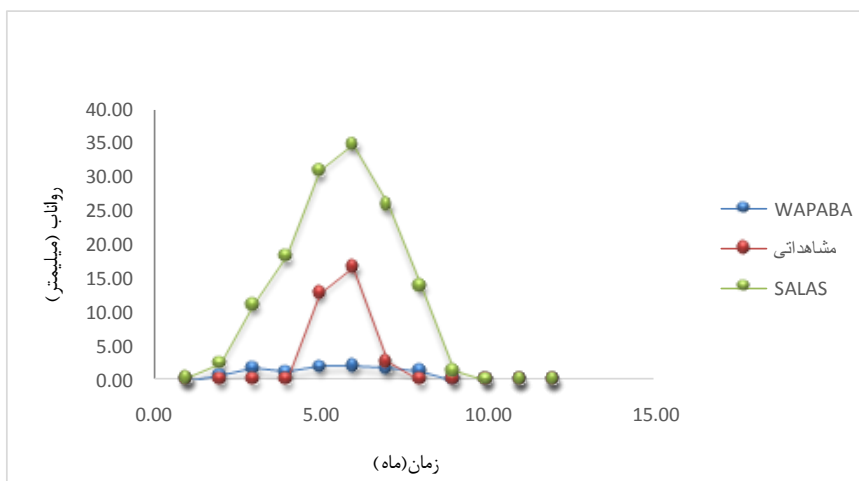
نام ایستگاه	α_1	α_2	β	k^{-1}
زرنند ساوه	۲/۲	۳/۵	۰/۰۵	۰/۴
قطعه چهار ساوه	۲/۹۹	۵/۷۵	۰/۰۳	۰/۴
ساوه	۱/۶۷	۳	۰/۱۳	۰/۴
نوبران	۲	۳/۳۱	۰/۰۵	۰/۴

جدول ۳- پارامترهای مدل SALAS

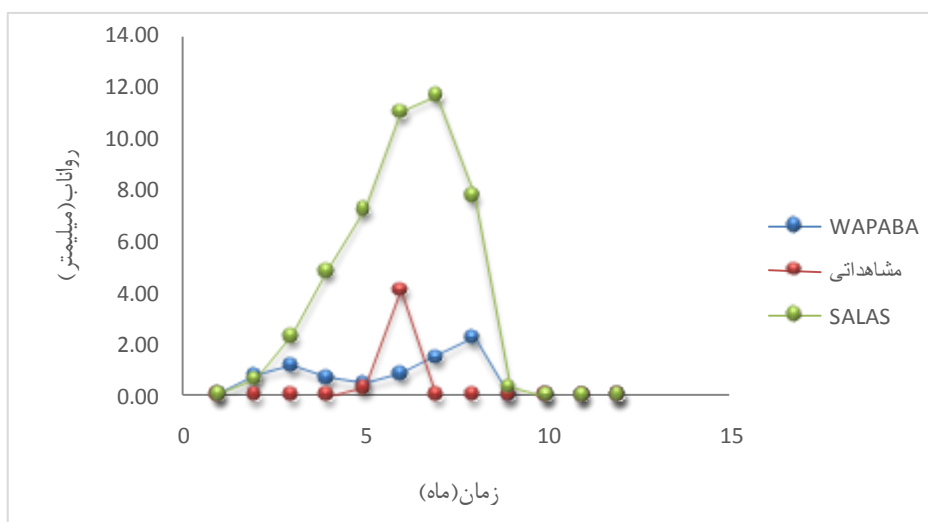
نام ایستگاه	A	b	c	D
زرنند ساوه	۰/۸۹	۵۹	۰/۱	۰/۵
قطعه چهار ساوه	۰/۹۴۱	۶۵	۰/۳۸	۰/۵
ساوه	۰/۶۷۳	۴۴	۰/۰۶۶	۰/۵
نوبران	۰/۹۱۸	۶۰/۷	۰/۲۷۳	۰/۵

۰/۶۶ بوده ولی مقدار ضریب کارایی ۴/۱۱- است که این نشان‌دهنده کارایی پایین مدل SALAS در این محدوده می‌باشد. در مجموع می‌توان بیان داشت که دقت و کارایی مدل WAPABA بیشتر از مدل SALAS بوده است. نتایج مدل‌سازی WAPABA در ایستگاه زرنند ساوه نشان‌دهنده عدم کارایی این مدل در این محدوده می‌باشد ولی در بقیه ایستگاه‌ها این چنین نیست. مدل SALAS اگر چه در برخی از ایستگاه‌ها دارای ضریب همبستگی بالایی داشته ولی میزان رواناب را بیشتر از میزان واقعی برآورد نموده است که نشان‌دهنده این واقعیت است که شرایط استفاده از مدل نیز نقش موثری در شبیه‌سازی دارد.

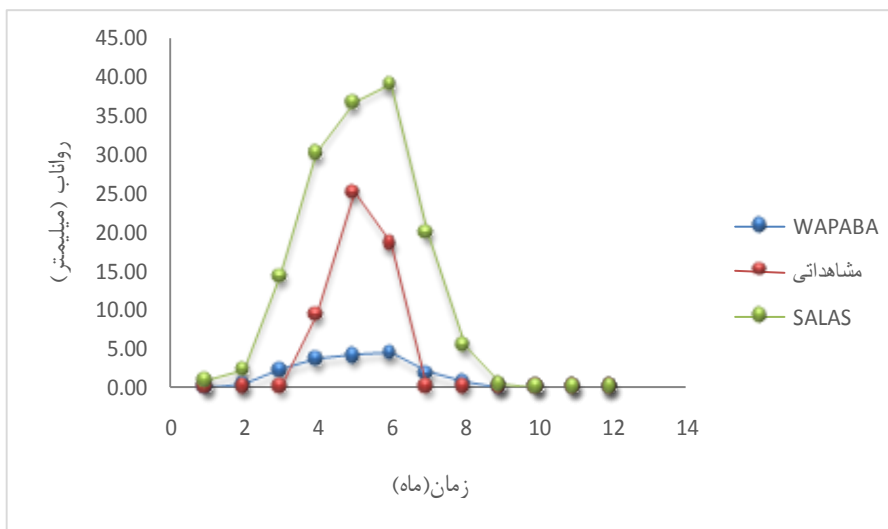
به‌طوری‌که از نتایج جدول (۴ و ۵) قابل‌مشاهده است پارامترهای دقت‌سنجی برای کل داده‌ها یعنی ریشه خطای مطلق (MAE)، میزان ریشه میانگین مجموع مربعات خطا (RMSE)، ضریب کارایی (CE) و ضریب تبیین (R^2) برای انتخاب مدل برتر انتخاب گردید. در مورد MAE و RMSE هرچه مقادیر نزدیک به صفر باشد و عدد کوچک‌تر باشد نشان‌دهنده کارایی بالاتر است، در حالی‌که در مورد R^2 و CE هرچه مقدار نزدیک به یک باشد کارایی مدل بالاتر خواهد بود. همان‌طور که از نتایج این جداول برمی‌آید تنها با اکتفا به ضریب تبیین R^2 نمی‌توان مدل برتر را انتخاب نمود به‌طوری‌که در برخی مدل‌ها، ضریب تبیین بالا اما میزان کارایی پایین بوده است. برای مثال در محدوده مطالعاتی زرنند ساوه ضریب تبیین



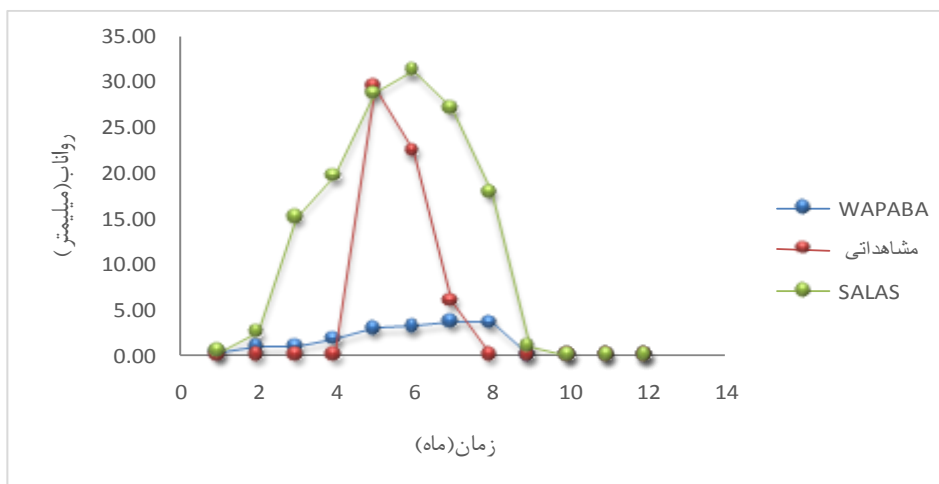
شکل ۲- مقایسه پیش‌بینی مدل WAPABA و SALAS با مقدار مشاهداتی ایستگاه زرنند ساوه



شکل ۳- مقایسه پیش‌بینی مدل WAPABA و SALAS با مقدار مشاهداتی ایستگاه قطعه چهار ساوه



شکل ۴- مقایسه پیش‌بینی مدل WAPABA و SALAS با مقدار مشاهداتی ایستگاه ساوه



شکل ۵- مقایسه پیش‌بینی مدل WAPABA و SALAS با مقدار مشاهداتی ایستگاه نوبران

نتیجه‌گیری

مدل WAPABA که برای اولین مرتبه در ایران مورد ارزیابی قرار گرفت نشان داد که با در نظر گرفتن عرضه، مصرف و تقاضا نتایج بهتری نسبت به مدل SALAS داشته، همچنین نسبت به پارامترها حساسیت بالایی نشان داد. لذا برای برآورد مقادیر پارامترها باید همه عوامل را در نظر گرفت. این مدل در ایستگاه‌های ساوه، نوبران، زرنند ساوه نتایج قابل قبولی نسبت به مدل SALAS ارائه داد ولی در محدوده مطالعاتی قطعه چهار ساوه نتایج ضعیف‌تری را نشان داد که علت آن را می‌توان به وسعت زیاد محدوده و یا عدم دقت مدل WAPABA و یا عدم وجود باران‌سنج در محل ایستگاه مرتبط دانست. همچنین این مدل بخاطر کوهستانی و برف‌گیر بودن حوضه‌ها و ذوب برف در برخی از ماه‌ها، میزان رواناب را کمتر از میزان واقعی برآورد

با توجه به شکل‌های (۲-۵) و مقایسه مقادیر مدل‌های SALAS و WAPABA با مقادیر مشاهده‌ای، مدل SALAS میزان رواناب را در ماه‌های مختلف بیشتر از مقدار واقعی نشان داده است. مدل WAPABA مقادیر رواناب را در ایستگاه زرنند ساوه همانند رواناب مشاهداتی در سال‌های اول صفر شبیه‌سازی کرده ولی مدل SALAS در ماه‌های اول بالاتر از صفر شبیه‌سازی نموده است که مدل WAPABA میزان رواناب را با توجه به رواناب ماه قبل خود محاسبه کرده است. این مدل در برخی موارد میزان رواناب را کمتر از مقدار واقعی نشان داده است که علت اصلی آن ذوب برف در برخی از ماه‌ها بخاطر کوهستانی و برف‌گیری بعضی از حوضه‌ها می‌باشد. در این گونه حوضه‌ها میزان رواناب تنها ناشی از باران نمی‌باشد و رواناب ناشی از ذوب برف نیز نقش مهمی در میزان جریان خروجی از حوضه دارد.

برنامه‌ریزی منابع آب تأثیر بسزایی دارد، می‌تواند کاربرد فراوانی داشته باشد.

سیاسگزاری

بدین‌وسیله از دانشگاه تهران و شرکت مهندسی مشاور آب و توسعه پایدار به دلیل تأمین امکانات و داده‌های لازم جهت اجرای این مقاله و تهیه مقالات مربوطه تشکر و قدردانی می‌شود.

REFERENCES

- Vandewiele, G.I. Xu, C. Ni-Lar-Win, Y, (1992). Methodology and comparative study of monthly water balance models in Belgium, china and burma, *journal of hydrology*, 43.
- Arnel, W. Nigel (1992). Factors controlling the effects of climate change on river flow regimes in humid temperate environmenta, *Journal of hydrology*, 132.
- Rajurkar. M.P. Kothyarib. U.C. Chaube. U.C (2004). Modeling of the daily rainfallrunoff relationship with artificial neural network, *Journal of Hydrology*, 285.
- Saito, Laurel. Biondi, Franco. SALAS, Jose D. Panorska, Anna. Kozubowski, Tomasz (2008). Watershed modeling approach to streamflow reconstruction from tree-ring records, *Environmental Research Letters*, 3:024006 (6pp) doi:10.1088/1748-9326/3/2/024006.
- Lilua, Xiong. GuoShenglianego (1999). A two – parameter monthly water balance model and its application, *Journal of hydrology*, 216, 1-2
- Peel, M.C.Chiew, F.H. Western, A.W. McMahon, T.A. 2008.Extension of Unimpaired Monthly Streamflow Data and Regionalisation of Paramete Values to Estimate Streamflow in Ungauged Catchments.National Land and Water Resources Audit Report. Centre for Environmental Applied Hydrology, University of Melbourne, Melbourne, VIC, Australia, p. 37.
- Zhang, L. Potter, N.Hickel, K. Zhang, Y. Shao, Q. 2008. Water balance modelling over variable time scales based on the Budyko framework – model development and testing. *J. Hydrol.* 360 (1–4), 117–131.
- Salas, Jose D (2003). Conceptual Model of a Watershed at Seasonal Time Scales (SEAMOD-03), Hydrology and Water Resources Program, Dep. of Civil Engineering, Colorado State University. USA.
- Mahdavi, M. and azarakhshi, M.(2003). Determining the appropriate monthly water balance model of small watershed in the country.*Iranian Journal of Natural Resources*, (3). (In Farsi)
- Delavar, M. morid, S. Shafiei far, M. (2008). Simulation, sensitivity and uncertainty analysis in groundwater level changes to the components of the water balance of Lake Urmia. *HydraulicJournal*, (3).(In Farsi)
- Mirzaei, M. and Khazaei, M. (2014). Evaluation of the efficiency of simulation of surface flow water balance model SALAS Watersheds in the province Kohgiluyeh and Boyerahmad. *Geographyand Development*, (35), 95-108. (In Farsi)

کرده است. چرا که میزان رواناب تنها ناشی از بارش نمی‌باشد و ذوب برف و رواناب حاصل از آن نیز نقش مهمی در میزان جریان خروجی از حوضه دارد. در مدل SALAS مهم‌ترین پارامتر بارش است و چون به خروجی‌ها وزن کمتری داده است لذا در ایستگاه‌ها میزان رواناب را بیشتر از واقعی برآورد کرده است. در مجموع می‌توان بیان کرد که مدل WAPABA با در نظر گرفتن میزان مصرف (مقدار آبی که صرف تبخیر و تعرق می‌شود) که بیشترین مقدار آب خارج از کنترل است که در