

جغرافیا و توسعه شماره ۳۶ پاییز ۱۳۹۳

وصول مقاله : ۱۳۹۰/۸/۱۵

تأیید نهایی : ۱۳۹۱/۸/۲۲

صفحات : ۹۵ - ۱۰۸

ارزیابی کارایی شبیه‌سازی جریان سطحی با استفاده از مدل بیلان آبی سالاس در حوزه‌های آبخیز استان کهگیلویه و بویراحمد

دکتر محمدرضا میرزایی^۱، مجید خزایی^۲

چکیده

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی کارایی مدل بیلان آبی سالاس سالانه و فصلی در ایستگاه‌های هیدرومتری استان کهگیلویه و بویراحمد که دارای طول دوره‌ی آماری مناسب بود برنامه‌ریزی شده است. بعد از انجام پالایش روی داده‌های هیدرومتری از کل ۱۰ ایستگاه استان، ۷ ایستگاه هیدرومتری دارای داده‌های بارش و دبی، با طول دوره‌ی آماری حداقل ۲۰ سال انتخاب گردید. سپس پارامترهای هر مدل با انجام سعی و خطا و نظارت بر کمترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی بهینه گردیدند. ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از معیارهای مختلف دقت‌سنجی همچون ضریب کارایی (CE)، ریشه مجذور مربعات (RMSE)، ضریب تبیین (R^2) صورت گرفت. برای محاسبه‌ی معیارهای کارایی از مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل سالاس و مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هیدرومتری استفاده شد. در مجموع نتایج مدل‌سازی نشان داد که مدل بیلان سالانه سالاس میزان دبی را بهتر از مدل فصلی برآورد کرده است. مدل سالاس فصلی در اکثر موارد میزان دبی را کمتر از میزان واقعی برآورد کرده است. ایستگاه‌های نازمکان، سیدآباد، پاتاوه و بطاری نسبت به ایستگاه‌های دیگر کارایی بهتری را ارائه داده‌اند و ایستگاه نازمکان (مقیاس سالانه ۱۰۴ = RMSE و $CE=0/94$) و سیدآباد (مقیاس فصلی $RMSE=93$ و $CE=0/88$) بهترین کارایی را داشتند در حالیکه ایستگاه زهره، کتا و بطاری نسبت به دیگر ایستگاه‌ها دقت پایین‌تری داشته‌اند. در مجموع می‌توان از مدل سالاس با توجه به سادگی آن، در حوزه‌های آبخیز فاقد ایستگاه هیدرومتری با شرایط اقلیمی و زمین‌شناسی مشابه و حوضه‌های دشتی کوچک و همگن، برای شبیه‌سازی دبی رودخانه استفاده کرد. در صورت ارائه در حوضه‌های برف‌گیر باید میزان بارش برفی و رواناب حاصل از آن نیز در مدل‌سازی لحاظ گردد تا علاوه بر دقت، مدل صحت بالایی نیز داشته باشد.

کلیدواژه‌ها: مدل‌سازی، حوزه‌ی آبخیز، بیلان آبی، پیش‌بینی، SALAS، مدل سالاس ماهانه.

mmirzaei@mail.yu.ac.ir

khazaei.phd@hormozgan.ac.ir

۱- استادیار آبخیزداری، دانشگاه یاسوج

۲- دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشگاه هرمزگان (نویسنده مسؤول)

مقدمه

بیلان آبی به کلیه‌ی آب‌هایی که در یک زمان معین وارد یک محدوده‌ی خاص می‌گردد و در این ناحیه یا به مصرف می‌رسد یا ذخیره شده و یا به صورت‌های مختلف از محدوده خارج می‌گردد اطلاق می‌گردد. هدف از برقراری بیلان بررسی و هماهنگی عناصر ورودی و خروجی و تعیین مقادیر هر یک از آنها و میزان مصرف و ذخیره آب می‌باشد. تغییر اقلیم دارای اثرات پیش‌بینی شده روی همه‌ی منابع آب در تمام دنیا می‌باشد (Seager et al, 2007: 1185). ابزارهای ثبت بارش، دما و رواناب سطحی در بسیاری از مناطق دنیا محدود می‌باشد، در حالی‌که برآورد بلندمدت تغییرات جریان‌ات سطحی برای کاهش اثرات سیل و خشکسالی از ضروریات است (Salas & Shin, 2000: 148). 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: 100).

در این راستا، مدل‌های متعددی جهت پیش‌بینی و تخمین مقادیر رواناب توسعه یافته‌اند، از بین آنها می‌توان به مدل‌های بیلان آبی اشاره داشت. از این مدل‌های بیلان آب برای بررسی تبادلات آب در یک محدوده‌ی معین زمانی و مکانی استفاده می‌شود. پژوهش‌ها نشان داده است چنانچه مرفومتری حوضه بسیار پیچیده باشد (دریاچه‌ها و حوضه‌های بزرگ) دیگر نمی‌توان از مدل‌های پایه‌ی فیزیکی به تنهایی پاسخ‌لازم را دریافت کرد (Rajurkar, 2004: 109). بنابراین پژوهش‌ها جهت ترکیب این مدل‌ها با مدل منطقی بیلان آب صورت گرفت و در این راستا مدل‌هایی دارای پارامترهای مختلف ایجاد شدند؛ که بایستی پارامترهای مربوط به آنها با استفاده از روش‌های

مختلف برآورد شود. فرآیند ساخت مدل 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 (Salas & Shin, 1981: 4)

در پژوهش‌های مختلفی، بیلان آب بطور مستقل در حوضه‌ها مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته است. برای محاسبه‌ی بیلان نیز روش‌های گوناگون از جمله مدل‌های ساده و منطقی همچون سالاس، شناخت میزان و پراکنش بارندگی، محاسبه تبخیر و تعرق واقعی و... استفاده شده است. علی‌رغم مطالعات متعددی که از مدل‌های مختلف جهت تخمین متغیرهای هیدرولوژیک صورت گرفته است، اما تخمین متغیرهای هیدرولوژیک با استفاده از مدل‌های بیلان آبی بندرت انجام پذیرفته است.

از جمله مطالعه‌ی دلاور و همکاران 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 (دلاور و همکاران، ۱۳۸۷: ۵۵-۴۴).

واندیل و همکاران یک مدل بیلان آبی ماهانه را در ۷۹ حوزه‌ی آبخیز بلژیک، چین و برمه بکار بردند. نتایج به دست آمده نشان داد که یک مدل جهانی مناسب برای تمام حوزه‌های آبخیز وجود ندارد (Vandewiele et al, 1992: 317-347).

آرنل از یک مدل بیلان ماهانه برای بررسی عوامل کنترل‌کننده آثار تغییر اقلیم بر حوزه‌های آبخیز انگلستان استفاده کرد. بدین منظور ایشان با تغییرات

نوترون متر در چهار سطح آبیاری طی فصل رشد گیاه اندازه‌گیری شد. بر اساس نتایج به دست آمده مدل DSSAT-CSM مدل قابل اعتمادی برای بررسی مدول موازنه بیلان آب خاک تحت سطوح مختلف کم‌آبیاری و بیش‌آبیاری می‌باشد. حیدری‌زاده و احمدی‌راد از مدل چهار متغیره سالاس برای به دست آوردن رابطه بارش - رواناب به شکل سالانه و ماهانه در یک حوضه استفاده نمودند (حیدری‌زاده و احمدی‌راد ۱۳۸۷: ۵).

در این مدل از طریق چهار مؤلفه اصلی جریان آب در حوضه، رابطه بین بارش و رواناب به دست می‌آید. لذا تنها با داشتن میزان بارش و رواناب و واسنجی مدل می‌توان جریان خروجی را به جریان پایه، زیرسطحی و مستقیم تجزیه کرد که مباحث فیزیکی و ریاضی آن را سالاس و اسمیت در مقاله خود تشریح کرده است (Salas & Smith, 2008:6). در این مدل فرض بر این است که حوضه آبخیز همگن بوده و از سه ذخیره‌ی سطحی، زیرسطحی و زیرزمینی ترکیب شده است. هر ذخیره دارای متغیرهای ورودی و خروجی مشخصی می‌باشد و ذخیره‌ها با همدیگر به‌وسیله‌ی ورودی‌ها و خروجی‌ها (نفوذ، تبخیر و تعرق...) ارتباط داده شده‌اند (Salas, 2005: 6).

با توجه به این‌که در بسیاری از مکان‌ها ایستگاه‌های هیدرومتری با داده‌های دبی مناسب جهت برآورد دبی یا همان جریان سطحی وجود ندارد، در این راستا مدل‌های تجربی و آماری می‌توانند جهت برآورد جریان سطحی رودخانه‌ها استفاده شوند. این پژوهش با هدف بررسی جریان سطحی (دبی) برآورد شده توسط مدل آبی سالاس در ایستگاه‌های مختلف استان کهگیلویه و بویراحمد می‌باشد که تنها ورودی مورد نیاز آن داده‌های بارش برای مدل سالانه سالاس، و داده‌های بارش و تبخیر برای مدل فصلی سالاس است. پژوهش حاضر در پی رسیدن به اهداف زیر است:

فرضی عوامل هواشناسی در مدل بیلان آبی ماهانه نشان داد که در مقیاس ماهانه بیلان آب در تابستان و شرایط زمین‌شناسی حوضه اثر مهمی برعکس‌العمل حوضه نسبت به حالت مشخص تغییر اقلیم دارد (Arnel, 1992: 321-342).

لیلوآ و گیو از یک مدل دو پارامتره بیلان آبی ماهانه برای شبیه‌سازی رواناب در ۷۰ زیرحوضه در جنوب چین استفاده کردند. آنها در این مطالعه به این نتیجه رسیدند که مدل دو پارامتره بیلان آبی قادر به برآورد رواناب ماهانه می‌باشد (Lilua & Guo, 1999: 111-123). سیتو و همکاران با بررسی رویکردی برای مدل‌سازی حوضه‌ی آبریز برای پیش‌بینی دبی در بازه‌های سراب رودخانه والکر در ایالت نوادا در آمریکا به این نتیجه رسیدند که اگرچه اساس مدل سالاس از روابط بسیار ساده و تنها ورودی آن نیز بارش می‌باشد اما توانسته میزان دبی خروجی را با درجه تبیین بالای ۰/۸۷ تخمین بزند (Saito et al, 2008:6).

کانونی و همکاران مدل بیلان آبی سالانه را در حوضه‌های فاقد آمار استان فارس مورد بررسی قرار دادند. نتایج این بررسی نشان داد که مدل به دست آمده می‌تواند رواناب سالانه را بخوبی بازسازی کند (کانونی و همکاران، ۱۳۷۸: ۶).

مهدوی و آذرخشی 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 محاسبه شده توسط مدل وجود ندارد و مدل بیلان آبی ماهانه قادر به پیش‌بینی میزان رواناب ماهانه در حوضه‌های فاقد آمار می‌باشد (مهدوی و آذرخشی، ۱۳۸۲: ۴۲۷ - ۴۱۵). قیصری و بیابانکی کارایی مدول موازنه بیلان آب خاک مدل CERES-Maize تحت سطوح مختلف کم‌آبیاری و بیش‌آبیاری بررسی کرده‌اند (قیصری و بیابانکی، ۱۳۸۸: ۶). به این منظور رطوبت خاک در اعماق مختلف با

۴- مقایسه مدل سالاس سالانه با مدل سالاس فصلی و پاسخ به این سؤال که در کدام مقیاس مدل سالاس شبیه‌سازی دقیق‌تری از جریان سطحی را دارا می‌باشد.

روش تحقیق

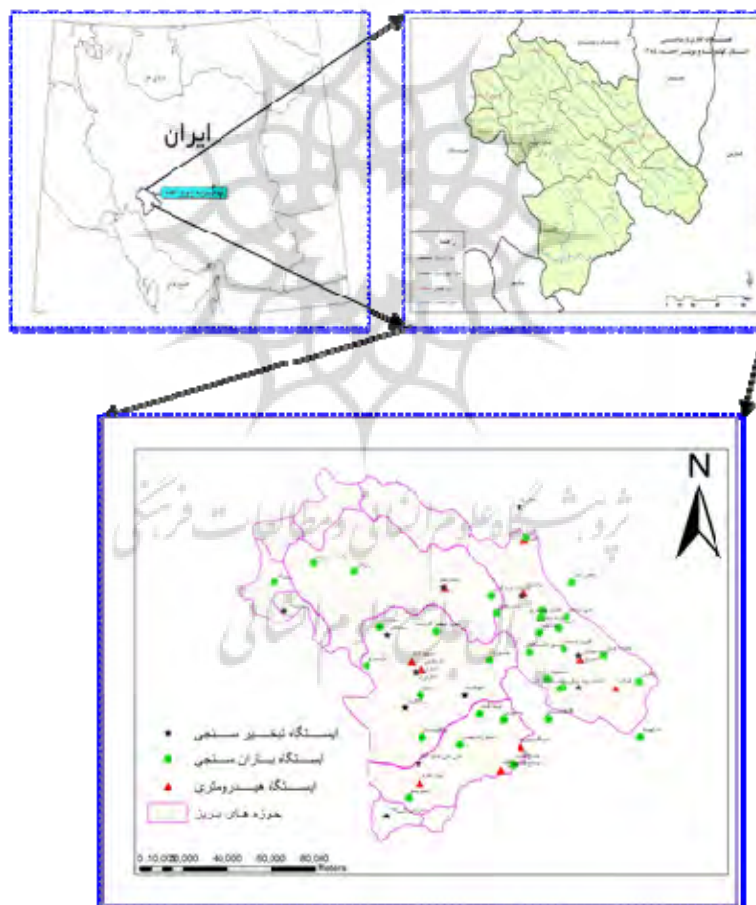
منطقه‌ی مورد مطالعه

منطقه‌ی مطالعاتی محدوده‌ی استان کهگیلویه و بویراحمد بوده که در گستره‌ی جغرافیایی "۴۵' ۴۸' ۲۹۰ تا "۳۸' ۲۶' ۳۱۰ عرض شمالی و "۲۶' ۵۳' ۴۹۰ تا "۱۶' ۵۳' ۵۱۰ طول شرقی واقع شده است (شکل ۱).

۱- شبیه‌سازی جریان سطحی با استفاده از مدل سالاس در دو مقیاس زمانی سالانه و فصلی در محل ۷ ایستگاه هیدرومتری در استان کهگیلویه و بویراحمد؛

۲- بررسی کارایی این مدل با استفاده از معیارهای مختلف کارایی با استفاده از مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل سالاس و داده‌های هیدرومتری اندازه‌گیری شده در محل هر ایستگاه هیدرومتری؛

۳- با توجه به معیارهای کارایی و مقادیر واقعی جریان سطحی تعیین دقیق‌ترین مدل برای هر ایستگاه هیدرومتری؛



شکل ۱: موقعیت استان، نقشه حوزه‌های آبریز و موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی، هیدرومتری و تبخیرسنجی استان
مأخذ: مطالعات میدانی نگارندگان، ۱۳۹۰

آبریز رودخانه‌های مهمی چون کارون، مارون و زهره واقع شده است. با توجه به اینکه بخش عمده‌ای از

استان کهگیلویه و بویراحمد از نظر تقسیم‌بندی کلی هیدرولوژیکی ایران در زیرمجموعه‌ای از حوزه‌های

نهایت رودخانه‌های شیو، خیرآباد و شمس عرب در حوضه‌ی زهره نام برد. در جدول مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در حوضه‌های آبریز کارون و زهره و خیرآباد که در این پژوهش برای مدل‌سازی به کار رفته‌اند ارائه شده است.

مساحت استان کوهستانی می‌باشد و میزان ریزش‌های جوی در این مناطق قابل توجه است، لذا این استان منشأ سرشاخه‌های پرآبی از رودخانه‌های کارون، مارون و زهره می‌باشد که می‌توان به رودخانه‌های بشار، سپیدار، و خرسان در حوضه‌ی کارون، رودخانه‌های سقاوه، لوداب، چاروسا و قلات در حوضه‌ی مارون و در

جدول ۱: مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری مطالعه شده در پژوهش حاضر

نام ایستگاه	حوزه‌ی آبریز	رودخانه	مساحت (کیلومتر مربع)	طول جغرافیائی	عرض جغرافیائی	ارتفاع (متر)	محاسبه‌ی بارندگی	دوره‌ی آماری (تعداد سال)
بطاری	کارون	کبگیان	۸۸۵	۰۷-۲۰-۵۱	۴۰-۵۱-۳۰	۱۶۵۰	*	۱۳۵۰-۸۸ (۳۸)
کتا	کارون	بشار	۳۰۵۹	۳۲-۱۵-۵۱	۰۴-۱۱-۳۱	۱۵۵۰	*	۱۳۵۰-۸۸ (۳۸)
سیدآباد	خیرآباد	چم‌سیاه	۷۹۴	۵۰-۴۲-۵۰	۳۵-۴۰-۳۰	۶۴۰	*	۱۳۶۱-۸۸ (۲۷)
نازمنان	خیرآباد	شاه بهرام	۱۰۶۰	۰۰-۴۶-۵۰	۴۰-۳۸-۳۰	۶۵۰	*	۱۳۶۷-۸۸ (۲۱)
پل زهره	زهره	زهره	۶۷۶۰	۲۵-۴۵-۵۰	۱۰-۱۰-۳۰	۳۹۰	**	۱۳۳۶-۸۸ (۵۲)
بریم	زهره	شیو	۷۸۸	۲۱-۱۴-۵۱	۱۹-۱۹-۳۰	۸۰۰	*	۱۳۴۸-۸۸ (۴۰)
پاتاوه	کارون	بشار	۲۸۰۰	۱۷-۱۵-۵۱	۴۴-۵۷-۳۰	۱۵۴۵	*	۱۳۵۰-۸۸ (۳۸)

مأخذ: مطالعات میدانی نگارندگان، ۱۳۹۰

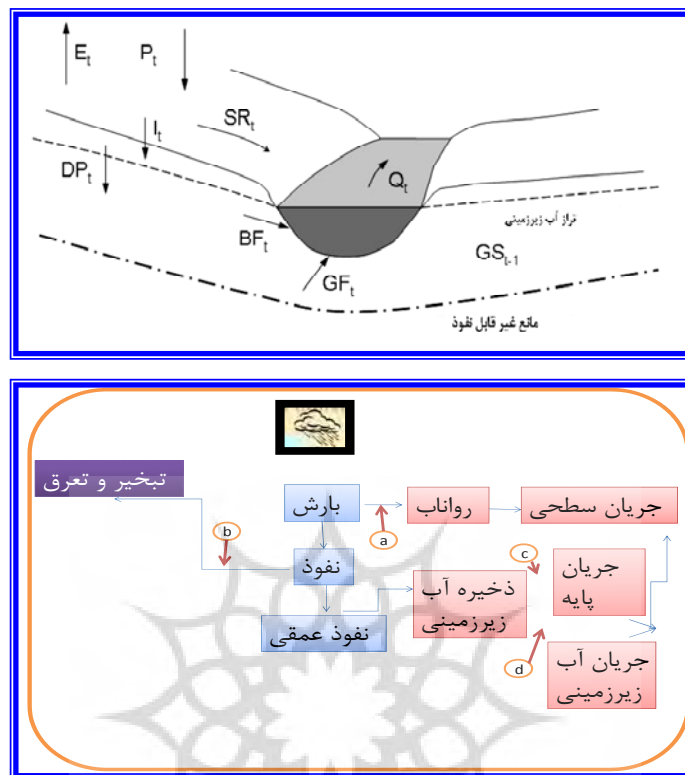
داده‌ها و روش‌ها

بر اساس اهداف پژوهش، ابتدا حوضه‌های دارای ایستگاه‌های هیدرومتری دارای حداقل ۲۰ سال طول دوره‌ی آماری برای داده‌های بارش و دبی انتخاب گردیدند. که سال‌های سپس داده‌ها را برای مدل‌سازی (تکمیل، تطویل، صحت، همگنی و کنترل داده‌ها) آماده نموده و در نهایت با استفاده از مدل‌های زیر اقدام به مدل‌سازی گردید.

مدل بیلان آبی SALAS

رواناب سطحی، نفوذ، تبخیر و 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 ذخیره آب زیرزمینی که تبدیل به جریان زیرزمینی گردیده (c) است.

سالاس (۱۹۹۲) و سالاس (۲۰۰۲) در شبیه‌سازی ساده و منطقی فرض را بر یک حوضه با جریان طبیعی و بدون انحراف آب در حوضه و یا بدون سد ذخیره‌ای بنا گذاشت (Salas, 1992: 1186-1194; Salas, 2002: 3) (شکل ۲) که به متغیرهای زیر نیاز دارد: $P(t)$: بارش متوسط روی حوضه در فواصل زمانی t ، $SR(t)$: جریان سطحی روی حوضه در فواصل زمانی t ، $I(t)$: نفوذ روی حوضه در فواصل زمانی t ، $E(t)$: تبخیر و تعرق روی حوضه در فواصل زمانی t ، $DP(t)$: نفوذ عمیق روی حوضه در فواصل زمانی t ، $BF(t)$: جریان پایه روی حوضه در فواصل زمانی t ، $GF(t)$: جریان زیرزمینی روی حوضه در فواصل زمانی t ، $GS(t-1)$: ذخیره آب زیرزمینی در ابتدای زمانی t و $Q(t)$: جریان خروجی روی حوضه در فواصل زمانی t .



شکل ۲: شمای ساده‌ای از حوزه آبخیز مدل‌سازی شده و به دست آوردن میزان جریان سطحی در روش SALAS
 مأخذ: Saito et al, 2008: 6

- رابطه (۱): رواناب سطحی
 Surface Runoff: $SR(t) = a P(t)$, $0 < a < 1$
- رابطه (۲): نفوذ
 Infiltration: $I(t) = P(t) - SR(t) = (1-a) P(t)$
- رابطه (۳): تبخیر و تعرق
 Evaporation: $E(t) = b I(t) = b (1-a) P(t)$, $0 < b < 1$
- رابطه (۴): نفوذ عمقی
 Deep Percolation: $DP(t) = I(t) - E(t) = (1-a) P(t) - b (1-a) P(t) = (1-a) (1-b) P(t)$
- رابطه (۵): ذخیره سفره
 Groundwater storage: $GS(t) = GS(t-1) + DP(t) - BF(t) - GF(t)$
- رابطه (۶): جریان پایه
 Baseflow: $BF(t) = c GS(t-1)$, $0 < c < 1$

شبیه‌سازی جریان در مدل سالاس بر اساس فرض داشتن یک ذخیره و آن هم ذخیره‌ی آب زیرزمینی انجام می‌شود (شکل ۲)، زیرا ذخیره‌ی آب زیرزمینی یک مؤلفه‌ی مهم مدل در انباشت یا آزادسازی آب در رابطه با میزان جریان ورودی و خروجی حوضه است. مدل منطقی حوضه هم از تعدادی مدل ساده که فرآیندهای مختلف جریان را در حوضه مشخص می‌سازد به دست می‌آید مانند رواناب سطحی، نفوذ، تبخیر و تعرق، نفوذ عمقی، جریان پایه. مدل‌های مذکور اساساً روند بارش را در سرتاسر حوضه تا خروجی تعیین می‌سازند. سالاس مؤلفه‌های جریان و متغیرهای در نظر گرفته شده در مدل را با توجه به معادلات موجود در منبع ذکر شده به صورت زیر ارائه کرده است (Salas, 2002:2-3):

مدل بیلان آبی SALAS در مقیاس فصلی

در روش سالاس در مقیاس فصلی از نرم‌افزار Excel و ماکروی Solver طبق ارائه سالاس (۲۰۰۳) استفاده گردید که در آن پارامترهای مدل همان پارامترهای مدل در نمونه سالانه می‌باشد با این تفاوت که علاوه بر آن‌ها پارامتر e که از نسبت (تبخیر و تعرق پتانسیل به تبخیر و تعرق تشتک) PET/PEV به دست می‌آید و ظرفیت زراعی CF و رطوبت اولیه SM نیز در خروجی مدل تأثیرگذار می‌باشند. همچنین در این مدل علاوه بر متغیرهای بارش، رواناب، دبی، نفوذ و نفوذ عمقی، جریان آب زیرزمینی، جریان پایه و ذخیره آب زیرزمینی که در مدل سالانه به کار رفته‌اند در نوع فصلی متغیرهای رطوبت، تبخیر و تعرق تشتک، تبخیر و تعرق پتانسیل و تبخیر و تعرق واقعی نیز در نتایج نهایی مدل تأثیرگذار هستند. روابط حاکم بر مدل سالاس ماهانه (روابط ۱۱ الی ۱۶) به صورت زیر می‌باشد (Cabrerá, 2012:1-3):

رابطه (۱۱):

$$SM = SM(t-1) + I(t)$$

که در آن SM میزان رطوبت خاک می‌باشد که از مجموع رطوبت اولیه خاک میزان نفوذ به دست می‌آید.

رابطه (۱۲):

$$PET = e \cdot PEV$$

که در آن PET پتانسیل تبخیر و تعرق و تبخیر و تعرق به دست آمده از تشتک می‌باشد.

رابطه (۱۳):

$$AET(t) = \min[PET, (PET/FC) \cdot SM, SM]$$

که در آن AET میزان تبخیر و تعرق واقعی می‌باشد. باید توجه داشت که در این مورد فرضیات برقرار است:

رابطه (۱۴):

$$PET \leq FC, PET > FC$$

رابطه (۷): جریان زیرزمینی

$$\text{Groundwater flow: } GF(t) = d \text{ GS}(t-1), 0 < d < 1, 0 < c+d < 1$$

رابطه (۸): جریان زیر سطحی

$$\text{Streamflow: } Q_t = SR(t) + BF(t)$$

بنابراین مدل جریان حوزه‌ی آبخیز شامل روابط (۱) تا (۸) می‌شود. بعلاوه می‌توان با ترکیب معادلات (۱) تا (۴) بر اساس مدل سالاس نشان داد (Salas, 2002: 3):

رابطه (۹):

$$GS(t) = (1-c-d) GS(t-1) + (1-a) (1-b) P(t)$$

رابطه (۹a):

$$GS(t) = \phi GS(t-1) + \psi P(t)$$

بطوری که در رابطه (۹b) داریم:

$$\psi = (1-a) (1-b) \text{ و } \phi = 1-c-d$$

و به همین صورت با ترکیب معادلات ۱، ۶ و ۹ خواهیم داشت:

رابطه (۱۰ a):

$$Q(t) = (1-c-d) Q(t-1) + a P(t) + [c (1-b) + a (bc + d - 1)] P(t-1)$$

رابطه (۱۰ b):

$$Q(t) = \phi Q(t-1) + a P(t) - \theta P(t-1)$$

بطوری که: در رابطه (۱۱) داریم:

$$\theta = -[c (1-b) + a (bc + d - 1)]$$

بنابراین مدل حوضه بسیار ساده می‌شود و قادر خواهیم بود بطور روشن ذخیره‌ی سفره و جریان رودخانه را با نسبتی از بارش و با متغیرهای a, b, c و d توصیف نماییم. متغیرهای a, b, c و d مدل بر اساس داده‌های تاریخی و مشاهده‌ای بارش و جریان خروجی به دست می‌آیند. برای این کار می‌توان از روش آزمون و خطا و روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی استفاده نمود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Qy_o - Qy_e)^2}{n}}$$

رابطه (۱۹): ضریب تبیین

$$R^2 = \left(\frac{\sum (Qy_o - \bar{Qy}_o)(Qy_e - \bar{Qy}_e)}{\sqrt{\sum (Qy_o - \bar{Qy}_o)^2 \sum (Qy_e - \bar{Qy}_e)^2}} \right)^2$$

رابطه (۲۰): ریشه خطای مطلق

$$MAE = \left| \frac{\sum Qy_o - Qy_e}{N} \right|$$

در روابط بالا Qy_o دبی مشاهداتی، \bar{Qy}_o میانگین دبی مشاهداتی، Qy_e دبی محاسباتی و \bar{Qy}_e میانگین دبی محاسباتی می‌باشد.

نتایج

نتایج حاصل از پارامترهای بهینه‌سازی مدل‌های مختلف به کار رفته در پژوهش حاضر شامل سالاس سالانه (a, b, c, d و GS)، سالاس ماهانه (a, b, c, d و GS، FC، SM و e) که با استفاده از آزمون و خطا به دست آمده‌اند در جداول ۲ ارائه شده است.

که در آن PET پتانسیل تبخیر و تعرق تابعی از تبخیر و تعرق به دست آمده از تشتک تبخیر PEV می‌باشد که آن هم تابعی از میزان بارش می‌باشد. نحوه‌ی محاسبه نفوذ عمقی DP و ذخیره آب زیرزمینی GS به شکل زیر است:

رابطه (۱۵):

$$DP(t) = \max[0, SM(t) - FC]$$

رابطه (۱۶):

$$GS(t-1) = (c-d) \cdot GS(t-1) + DP(t-1)$$

ارزیابی عملکرد مدل‌های مختلف

برای انتخاب مدل بهینه از پارامترهای دقت‌سنجی از جمله R^2 ، RMSE، MAE و CE) روابط ۱۷ تا ۲۰ استفاده گردید.

رابطه (۱۷): ضریب کارایی

$$CE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Qy_o - Qy_e)^2}{\sum_{t=1}^T (Qy_o - \bar{Qy}_o)^2}$$

رابطه (۱۸): ریشه مجذور مربعات خطا

جدول ۲: مقادیر پارامترهای واسنجی شده مدل‌های مختلف

SEAM-03								SALAS					نام ایستگاه
SM	FC	e	GS	d	c	b	a	GS	d	c	b	a	
۱۰	۱۰	۰/۰۱	۵۰	۰/۳	۰/۴۵	۰/۴	۰/۴	۱۰۰	۱/۴	۰/۱	۰/۱	۰/۴	پل بریم
۱۰	۲۰	۰/۰۲	۵۰	۰/۱۳	۰/۵	۰/۴	۰/۳۴	۱۰۰	۰/۳	۰/۴	۰/۲	۰/۷	نازمکان
۱۰	۱۰	۰/۰۱	۵۰	۰/۸	۰/۶	۰/۳۵	۰/۴۵	۱۰۰	۰/۲	۰/۱	۰/۲	۰/۴	زهره
۵۰	۵۰	۰/۰۲	۵۰	۰/۳۵	۰/۴۵	۰/۳	۰/۴	۱۰۰	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۰/۴	سیدآباد
۱۰۰	۵۰	۰/۰۲	۵۰	۰/۳۵	۰/۴۴	۰/۳۸	۰/۲۲	۵۰۰	۰/۴	۰/۱	۰/۵۰	۰/۵۷	کتا
۱۰	۱۰	۰/۰۱	۵۰	۰/۴۵	۰/۳۵	۰/۳۲	۰/۳	۵۰۰	۰/۵	۰/۱۵	۰/۳	۰/۴	بطاری
۲۰	۵۰	۰/۰۲	۵۰	۰/۵	۰/۱	۰/۶	۰/۴	۵۰۰	۰/۴	۰/۲	۰/۳۵	۰/۴	پاتاوه

مأخذ: مطالعات میدانی نگارندگان، ۱۳۹۰

مطالعه این میزان بین مقادیر ۳۰ تا ۶۰ درصد تغییر داشته است. b معادل میزانی از آب نفوذی است که تبخیر می‌شود، c نیز بخشی از ذخیره آب زیرزمینی می‌باشد که به جریان پایه افزوده می‌شود که این مقدار

بطوری که از نتایج بالا (جدول ۲) مشاهده گردید، پارامترهای مدل نقش تعیین‌کننده‌ای در تعیین میزان دقت نهایی مدل‌ها ایفا می‌کنند. در مدل سالاس a معادل ضریب رواناب می‌باشد که در ایستگاه‌های مورد

مختلفی به‌عنوان مقادیر بهینه استخراج شده‌اند. جداول ۳ خروجی حاصل از مدل‌های مختلف ارائه شده است. در مطالعه حاضر برای پیش‌بینی میزان جریان سطحی یا دبی کلیه عوامل بیلان (رواناب، نفوذ، پتانسیل تبخیر و تعرق، تبخیر و تعرق واقعی، دبی پایه، ذخیره آب زیرزمینی، جریان آب زیرزمینی و رطوبت) به صورت متوالی با استفاده از داده‌های اولیه بارش در مدل سالانه و بارش و تبخیر در مدل فصلی استخراج و در نهایت میزان دبی به دست آمد. سپس میزان دبی شبیه‌سازی شده با دبی واقعی مقایسه گردید بطوری که مقادیر دقت‌سنجی برای هر ایستگاه به صورت ارائه شده در جدول ۳ می‌باشد.

برای اکثر ایستگاه‌ها معادل ۰/۱ می‌باشد و d نیز بخشی از ذخیره‌ی آب زیرزمینی می‌باشد که به جریان آب زیرزمینی می‌پیوندد همچنین GS ذخیره اولیه آب زیرزمینی می‌باشد. مقادیر پارامترهای مدل‌ها در مدل بیلان آبی فصلی شامل پارامترهای موجود در نوع سالانه به همراه میزان رطوبت اولیه، میزان ذخیره آب زیرزمینی و نسبت تبخیر و تعرق به پتانسیل تبخیر و تعرق است که با بهینه‌سازی و کنترل مقادیر خطا با تغییر مقدار پارامترها به دست آمده‌اند. بطوری‌که پارامترهای مهم و مؤثر بر کارایی و دقت در این پژوهش نیز مقادیر ثابت و مشخصی نمی‌توان ارائه داد و برای شرایط مختلف زمین‌شناسی و اقلیمی مقادیر

جدول ۳: مقادیر دقت‌سنجی کلی در میان مدل‌ها و ایستگاه‌های مختلف

SEAM-03				SALAS				
R^2	CE	RMSE	MAE	R^2	CE	RMSE	MAE	
۰/۸۱	۰/۰۸	۲۹/۰۷	۲۴/۲	۰/۹۰	۰/۱۶	۵۸۸/۵۶	۵۰۹/۳۱	پل بریم
۰/۷۴	۰/۰۲	۶۹/۰۶	۶۱/۱	۰/۸۵	۰/۹۴	۱۰۴/۴۲	۸۰/۷۱	نازمکان
۰/۲۰	۰/۱۶	۷۵/۴	۴۸/۶	۰/۵۰	۰/۴۵	۱۲۶/۱۳	۹۷/۱۷	زهره
۰/۶۸	۰/۵۴	۲۲/۶۰	۱۷/۳۵	۰/۷۳	۰/۸۸	۹۳/۶۶	۶۵/۹۹	سیدآباد
۰/۴۵	۰/۳۸	۲۲/۸۸	۱۵/۶۰	۰/۶۵	۰/۴۲	۱۷۵/۹۹	۱۳۰/۵۲	کنا
۰/۸۰	۰/۵۲	۴۰/۱۶	۱۹/۵۴	۰/۷۸	۰/۱۲	۴۸۳	۴۰/۱۶	بطاری
۰/۷۵	۰/۴۸	۳۳/۹۴	۲۳/۵	۰/۷۸	۰/۵۰	۵۲۱	۳۸۰	پاتاوه

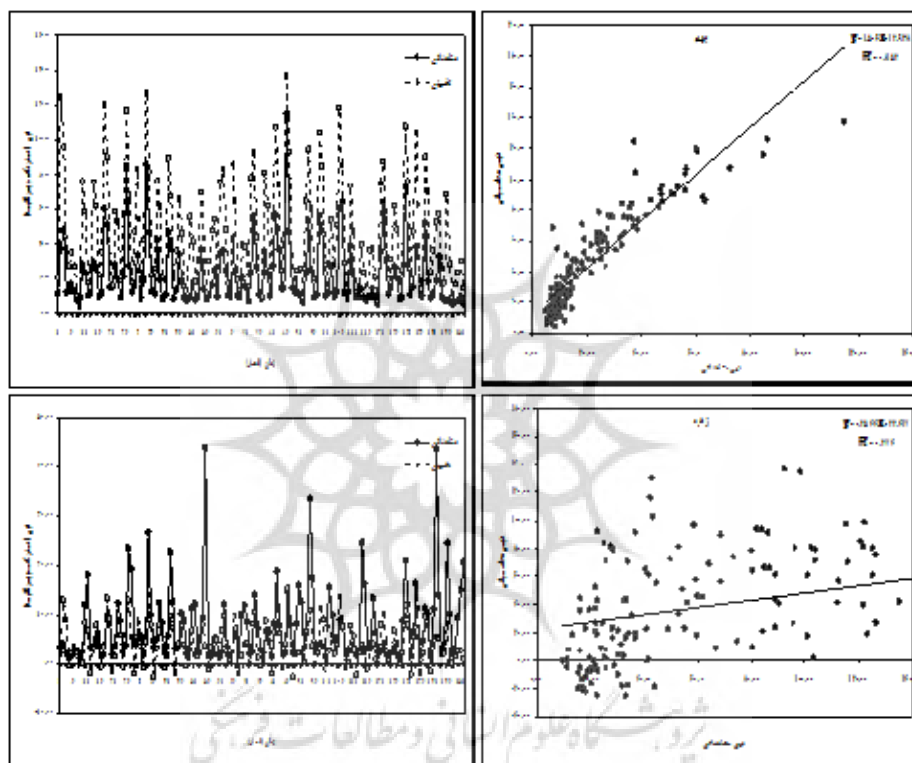
مأخذ: مطالعات میدانی نگارندگان، ۱۳۹۰

کرد بطوری در بعضی موارد مدل‌های دارای ضریب تبیین بالا اما میزان کارایی پایین بوده است و برعکس. بطور مثال ضریب تبیین در ایستگاه بریم (همچنین ایستگاه بطاری) برای مدل سالاس ۰/۹ می‌باشد (جدول ۳) که نشان‌دهنده رابطه معنی‌دار بین دبی مشاهده‌ای و دبی مدل‌سازی شده توسط مدل سالاس است. اما میزان ضریب کارایی در اینجا بسیار پایین و حدود ۰/۱۶ است که نشان‌دهنده‌ی عدم کارایی مدل سالاس برای مدل‌سازی دبی در این منطقه می‌باشد. بطور نمونه بخشی از نتایج در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده‌اند که به ترتیب نمودار مقایسه‌ای بین مقادیر مشاهداتی و

بطوری‌که از نتایج جدول ۳ قابل مشاهده 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 استفاده گردید. در مورد MAE و RMSE هر چه مقدار نزدیک به صفر باشد و عدد کوچکتر باشد نشان‌دهنده‌ی کارایی بالاتر است، در حالی‌که در مورد CE و R^2 هر چه مقدار نزدیک به یک باشد کارایی مدل بالاتر خواهد بود. همانطور که از نتایج این جداول بر می‌آید تنها با اکتفا به ضریب تبیین (R^2) نمی‌توان مدل برتر را انتخاب

وضوح دیده می‌شود که مقادیر شبیه‌سازی شده توسط سالاس کمتر از میزان واقعی برای کلیه دامنه دبی‌ها می‌باشند بطور مثال برای ارتفاع روانابی در حدود ۸۰۰ میلیمتر در سطح حوضه، میزان ۳۰۰ میلیمتر را تخمین زده است.

محاسباتی در ایستگاه‌های بریم و زهره در مقیاس فصلی در شکل ۳، و نازمکان و کتا در مقیاس سالانه در شکل ۴ آورده شده‌اند. در شکل ۳ که ایستگاه پل‌بریم و بطاری با رنگ مثلث خاکستری قابل مشاهده است یک رابطه‌ی خطی معنی‌دار دیده می‌شود اما به

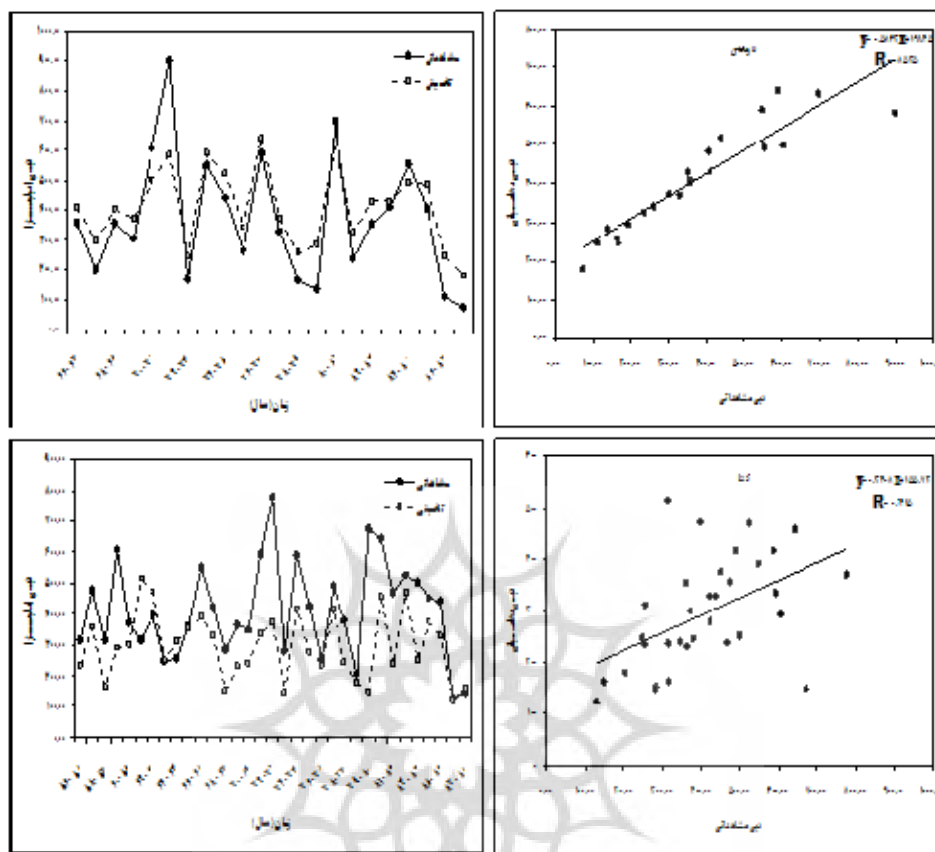


شکل ۳: نمودار مقایسه‌ای مقادیر مشاهداتی و محاسباتی در مدل بیلان آبی سالاس فصلی

مأخذ: مطالعات میدانی نگارندگان، ۱۳۹۰

نشان‌دهنده‌ی این واقعیت است که شرایط استفاده از مدل نیز نقش مؤثری در نتایج پیش‌بینی دارد. در مجموع نتایج جداول بالا می‌توان بیان داشت دقت هر دو نوع مدل، در ایستگاه نازمکان، سیدآباد، پاتاوه و بطاری حداکثر و در ایستگاه زهره و کتا حداقل می‌باشد.

در مجموع می‌توان بیان داشت که دقت و کارایی مدل‌های سالاس سالانه بیشتر از مدل سالاس فصلی بوده است. نتایج مدل‌سازی بیلان آبی سالاس هر چند در بعضی ایستگاه‌ها (بریم) دقت بالایی را ارائه داده است اما در بعضی موارد میزان رواناب را کمتر از میزان واقعی برآورد نموده است و به همین علت میزان کارایی مدل در این ایستگاه‌ها پایین بوده است که



شکل ۴ نمودار مقایسه‌ای مقادیر مشاهداتی و محاسباتی در مدل بیلان آبی سالانه

مأخذ: مطالعات میدانی نگارندگان، ۱۳۹۰

بالایی تخمین بزنند. کم‌ترین میزان پیش بینی و عدم مطابقت در بین کلیه مدل‌ها در ایستگاه زهره مشاهده گردید که احتمالاً بخاطر وسعت زیاد حوضه و عدم دقت مدل سالاس برای حوضه‌های بزرگ و عدم وجود باران سنج در محل این ایستگاه می‌باشد بصورتی‌که برای کلیه ایستگاه‌های مدل‌سازی شده در این مطالعه دارای ایستگاه باران سنجی در محل هیدرومتر بوده است.

نتایج ماتریس همبستگی بین پارامترهای بیلان آبی در مدل سالاس نوع سالانه بطور مثال برای ایستگاه بریم در جدول ۴ ارائه شده است بطوری‌که برای کلیه ایستگاه‌ها نتایج مشابه حاصل گردید. دقت در نتایج ماتریس همبستگی بین متغیرهای مدل سالاس در

جدول ۴ نتایج ماتریس همبستگی در بین پارامترهای بیلان آبی در مدل سالاس نوع سالانه بطور نمونه برای ایستگاه بریم ارائه شده است که برای کلیه ایستگاه‌ها نتایج مشابه به دست آمده است.

با توجه به نمودار مقایسه‌ای و ابرپراکندگی نقاط بین مدل‌های سالاس با مقادیر مشاهده‌ای نشان داده شده در شکل ۳ و ۴، مدل سالاس برای ایستگاه‌های بطاری، بریم و کتا میزان رواناب را کم برآورد نموده است. این امر ممکن است به دلیل برف‌گیر بودن حوضه‌های بالادست این ایستگاه‌ها باشد. بیشترین تشابه و همبستگی بین ابرپراکندگی نقاط در ایستگاه سیدآباد قابل مشاهده است بطوری‌که در این ایستگاه هر سه مدل توانسته‌اند رواناب را با دقت و صحت

جریانی است که معمولاً در مواقع کم‌آبی نیز در رودخانه جریان دارد و معمولاً مقدار ثابتی است و مقدار بارش فقط باعث تغییر در جریان خروجی می‌گردد و مقدار نفوذ و تبخیر نیز نمی‌تواند مقدار زیادی بر میزان جریان پایه تأثیر گذارد. از طرفی جریان آب زیرزمینی به جریان پایه و ذخیره‌ی آب زیرزمینی بستگی دارد و هر چه مقدار ذخیره‌ی آب زیرزمینی بالا باشد بر روی میزان جریان نیز اثر می‌گذارد. همین‌طور جریان پایه فقط به ذخیره‌ی آب زیرزمینی بستگی دارد بطوری که هر چه ذخیره بیشتر باشد جریان پایه نیز بیشتر می‌باشد.

تمامی ایستگاه‌ها نشان داد که بین اکثر متغیرها همبستگی بالایی مشاهده گردید اما نکته‌ای که در همه‌ی ایستگاه‌ها نیز به‌وضوح قابل مشاهده بود عدم همبستگی معنی‌دار بین متغیر دبی شبیه‌سازی شده توسط مدل سالاس و جریان پایه و آب زیرزمینی بوده است. البته همبستگی بین جریان پایه و آب زیرزمینی با دیگر متغیرها از جمله نفوذ، تبخیر و تعرق، بارش و رواناب نیز ضعیف بود که نشان‌گر تأثیر غیرمستقیم این دو پارامتر از دیگر متغیرها بوده است. در صورتی که پارامترهای نفوذ، تبخیر و تعرق، بارش و رواناب بطور مستقیم روی همدیگر تأثیر گذاشته است. جریان پایه

جدول ۴: نتایج ماتریس همبستگی بین متغیرهای مدل سالاس در ایستگاه پل بریم

بارش	دبی مشاهده‌ای	رواناب سطحی	نفوذ	تبخیر و تعرق	نفوذ عمقی	ذخیره آب زیرزمینی	جریان پایه	جریان آب زیرزمینی	دبی شبیه‌سازی شده
بارش									
دبی مشاهده‌ای	**۰/۹۰۳								
رواناب سطحی	**۰/۹۹	**۰/۹۰۳							
نفوذ	**۰/۹۹	**۰/۹۰۳	**۰/۹۹						
تبخیر و تعرق	**۰/۹۹	**۰/۹۰۳	**۰/۹۹	**۰/۹۹					
نفوذ عمقی	**۰/۹۹	**۰/۹۰۳	**۰/۹۹	**۰/۹۹	**۰/۹۹				
ذخیره آب زیرزمینی	*۰/۴۷۴	**۰/۵۷۲	*۰/۴۷۴	*۰/۷۴	*۰/۷۴	۱			
جریان پایه	-۰/۰۹۵	۰/۰۷۶	-۰/۰۹۵	-۰/۰۹۵	-۰/۰۹۵	**۰/۸۳۱	۱		
جریان آب زیرزمینی	-۰/۰۹۵	۰/۰۷۶	-۰/۰۹۵	-۰/۰۹۵	-۰/۰۹۵	**۰/۸۳۱	**۰/۹۹	۱	
دبی شبیه‌سازی شده	**۰/۹۸۳	**۰/۹۱۸	**۰/۹۸۳	**۰/۹۸۳	**۰/۹۸۳	**۰/۹۸۳	**۰/۶۲۷	۰/۰۸۸	۱

مأخذ: مطالعات میدانی نگارندگان، ۱۳۹۰

نتیجه

مهم‌ترین پارامتر در مدل سالاس بارش می‌باشد و اندازه‌گیری دقیق بارش در کارایی مدل نقش بسزایی دارد؛ ۲- در حوضه‌های بزرگ جریان زیرسطحی مقدار بسیار ناچیزی خواهد شد در نتیجه مدل سالاس نسبت

مدل سالاس در بین ایستگاه‌های مورد بررسی، ایستگاه نازمکان و سیدآباد دارای بهترین کارایی بوده است. این امر ممکن است ۱- به این علت باشد که

گردید. به‌همین خاطر دقت داده‌های بارش بالا و در نتیجه مدل توانست به‌خوبی متغیرهای دیگر را برآورد کند. در مجموع می‌توان بیان کرد که مدل سالاس با توجه به‌سادگی کاربرد و کارایی بالا در مدل‌سازی دبی، می‌تواند جریان رودخانه را در رودخانه‌هایی با شرایط اقلیمی و زمین‌شناسی با شرایط دشتی و حوضه‌های کوچک و همگن فاقد ایستگاه هیدرومتری شبیه‌سازی کند. در صورتی که برای حوزه‌های آبخیز با شرایط دیگر، مدل سالاس نمی‌تواند برآورد مناسبی داشته باشد. در مجموع برای کلیه شرایط و حوضه‌های پیچیده شبکه‌ی عصبی برآوردهای منطقی و دقیق‌تری می‌تواند ارائه دهد.

منابع

- حیدری‌زاده، مجید؛ محمدعلیم احمدی‌راد (۱۳۸۷). مدل چهار متغیره Salas در تجزیه مؤلفه‌های بیلان در داخل حوزه، سومین کنفرانس مدیریت منابع آب. دانشگاه تبریز.
- دلاور، مجید؛ سعید مرید؛ مهدی شفیع‌فر (۱۳۸۷). شبیه‌سازی، تحلیل حساسیت و عدم قطعیت تغییرات تراز آب زیرزمینی دریاچه ارومیه نسبت به مؤلفه‌های بیلان آبی، مجله هیدرولیک. شماره ۱.
- قیصری، مهدی؛ منیره بیابانکی (۱۳۸۸). بررسی کارایی مدول موازنه بیلان آب خاک مدل CERES-Maize تحت سطوح کم‌آبی، دومین همایش ملی اثرات خشکسالی و راهکارهای مدیریت آن، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان.
- کانونی، ا.، خلیلی د.، پارسا، ش (۱۳۸۷). معادله‌های پیش بینی رواناب سالانه در حوزه‌های فاقد آمار استان فارس با توجه به بیلان آبی حوزه‌ها، اولین همایش منطقه‌ای بیلان آب. اهواز.
- مهدوی، محمد؛ مریم آدرخشی (۱۳۸۲). تعیین مدل بیلان آبی ماهانه مناسب در حوزه‌های آبخیز کوچک کشور (مطالعه موردی: استان آذربایجان شرقی و شمال خراسان)، مجله منابع طبیعی ایران. شماره ۳.

به این عامل حساسیت نشان داده و میزان خطای پیش‌بینی را در چنین حوضه‌هایی بالا می‌برد. مدل سالاس در حوزه‌ی آبخیز زهره برآورد خوبی را ارائه نموده است که علت این امر نیز عامل مساحت زیاد حوضه و ناچیز بودن آب زیرسطحی رسیده به خروجی حوضه می‌باشد. همچنین صحت مدل سالاس در حوضه‌های کتا، بریم و بطاری نیز پایین بوده است بطوری که مدل میزان رواناب را کم‌تر از میزان واقعی تخمین زده است. به علت اینکه حوزه‌های آبریز مذکور از حوضه‌های کوهستانی می‌باشد و میزان رواناب تنها ناشی از میزان بارش نمی‌باشد و رواناب ناشی از برف نیز نقش مهمی در میزان جریان خروجی از حوضه دارد مدل سالاس در این حوضه‌ها نیز میزان رواناب را کمتر از میزان واقعی برآورده نموده است، سایتو و همکاران (۲۰۰۸) در نوشته‌های خود به نتایج مشابه رسیده‌اند. همانطور که از شکل‌های شماره ۳ و ۴ مشخص است در بیشتر موارد رفتار خطی با درجه تبیین بالا (جدول ۳) بین داده‌های اندازه‌گیری شده و داده‌های که توسط مدل سالاس محاسبه شده دیده می‌شود اما با توجه به ضرایب کارایی دیگر و تخمین پایین‌تر از دبی‌های مشاهده‌ای گویای این واقعیت است که بایستی دقت لازم در به‌کارگیری این مدل مخصوصاً در حوزه‌ی آبخیز بریم صورت گیرد.

مقادیر و پارامترهای مدل سالاس نیز نشان داد که بجز ایستگاه‌های کتا و بطاری که در اقلیم کاملاً متفاوت با ایستگاه‌های دیگر می‌باشند، دامنه‌ی مقادیر در همه ایستگاه‌ها مشابه بوده است که به علت یکنواختی اقلیم و شرایط زمین‌شناسی و خاک‌شناسی محدوده ایستگاه‌ها می‌باشد. همچنین با توجه به این که در پژوهش حاضر از روش‌های زمین آماری برای به‌دست آوردن میزان بارش در ایستگاه‌های هیدرومتری استفاده گردید، اما در ایستگاه نازمکان و سیدآباد به علت موجود بودن باران‌سنج از مقادیر بارش همین ایستگاه استفاده

- Dep. of Civil Engineering, Colorado State University. USA, Available
Online:<http://www.engr.colostate.edu/~jsalas/classes/CE322/Handouts/Watershed%20modeling.pdf>.
- 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.
 - Salas, Jose D., Smith, Ricardo A. (1981). Physical basis of stochastic models of annual flows, *Water Resource Research*, 17:2.
 - Salas, Jose D (2005). scientist, Department of Atmospheric Science at Colorado State University, businessandmedia.org/specialreports/2007/./SkepticalScientists.asp.
 - Seager R., Ting M., Held I., Kushnir Y., Lu J., Vecchi G., Huang H., Harnik N., Leetmaa A., Lau N., Li C., Velez J., Naik N (2007). Model projections of an imminent transition to a more arid climate in southwestern North America, *Science magazine*, 4.
 - Shin, Hyun-Suk., Salas, Jose D (2000). Regional drought analysis based on neural networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 5.
 - 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 environmental, *Journal of hydrology*, 132.
 - Cabrera, Juana (2012). Modelo abcd-Simulación de caudales mensuales, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, available online :
http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_5.pdf
 - Lilua, Xiong., Guo Shenglianego (1999). A two-parameter monthly water balance model and its application, *Journal of hydrology*, 216:1-2.
 - Rajurkar. M.P., Kothyarib. U.C., Chaube. U.C (2004). Modeling of the daily rainfall-runoff 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.
 - Salas, Jose D., Obeysekera, Jayantha (1992). Conceptual basis of seasonal streamflow time series models, *Journal of Hydraulic Engineering*, 118.
 - Salas, Jose D (2002). Precipitation-streamflow relationship: watershed modeling, *Hydrology and Water Resources Program*,