

مدل سازی بارش-رواناب مبتنی بر رویکرد پویایی سیستم، مطالعه موردی: حوضه کارده مشهد

علی سلاجقه^۱، علیرضا مقدم‌نیا^۲، شهرام خلیقی سیگارودی^۳، مریم آذرخشی^۳ و محمد رستمی خلیج^{۴*}
^۱استاد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ^۲دانشیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ^۳استادیار، دانشکده منابع طبیعی،
دانشگاه تربت حیدریه و ^۴دانشجوی دکتری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۵/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۲۹

چکیده

مدل سازی بارش-رواناب یکی از روش‌های تخمین رواناب و ابزاری مناسب برای مطالعه فرایندهای هیدرولوژیکی، ارزیابی منابع آبی و مدیریت حوزه آبخیز می‌باشد. اما پیچیدگی و ماهیت غیر خطی فرایند بارش-رواناب و ناشناخته بودن تاثیر عوامل روی یکدیگر و نهایتاً روی دبی خروجی حوضه مدل سازی را مشکل تر می‌کند. لذا، استفاده از روش‌هایی که علاوه بر پویایی، قابلیت توسعه، ساختار مفهومی و کاربرپسند داشته باشد، ضروری می‌باشد. از این رو در این مطالعه برای مدل سازی بارش-رواناب از روش‌های پویایی سیستم در حوضه سد کارده مشهد استفاده شد. مدل ارائه شده شامل شش مخزن است که عبارت از مخزن برف، مخزن تاج پوشش، مخزن سطوح نفوذناپذیر، مخزن خاک سطحی، مخزن خاک زیرسطحی و مخزن آب زیرزمینی می‌باشند. داده‌های ورودی مورد نیاز شامل بارندگی و دمای متوسط روزانه است. برای واسنجی مدل از داده‌های روزانه دبی خروجی حوضه در بازه زمانی سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۸ و برای دوره اعتبارسنجی آمار سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۲ استفاده شد. نتایج تحلیل حساسیت مدل نشان داد که پارامترهای مربوط به دما از حساسیت بیشتر برخوردار بوده و تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی دبی و دبی پیک حوضه دارند. همچنین، مقادیر شبیه سازی شده و مشاهده‌ای تطابق خوبی دارند و دامنه ضریب ناش-ساتکلیف به دست آمده در دوره اعتبارسنجی بین $0/۶۷ - 0/۵۷$ است که نشان دهنده توانایی بالای روش‌های پویایی سیستم در مدل سازی بارش-رواناب حوضه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: استان خراسان رضوی، ضریب ناش-ساتکلیف، فرایند هیدرولوژیکی، مخزن برف، مخزن سطوح نفوذناپذیر

مقدمه

به امکانات ایستگاه‌ها این اندازه‌گیری‌ها فقط در تعداد محدودی از حوضه‌ها می‌باشد و دوره آماربرداری معمولاً کوتاه مدت است. علاوه بر این، سری زمانی برداشت شده گره‌گشای کارهای مدیریتی و پیش‌بینی شرایط آبی نیست. روش‌های متنوعی برای تعیین رواناب خروجی از حوضه ارائه شده است که با استفاده

برآورد دقیق و قابل قبول رواناب تولید شده از حوضه، یک بخش مهم و غیر قابل انکار از اطلاعات لازم برای سیاست‌گذاری و مدیریت حوزه آبخیز می‌باشد. بهترین راه برآورد رواناب، اندازه‌گیری دبی در خروجی حوضه است اما باید توجه داشت که با توجه

* مسئول مکاتبات: rostami88@ut.ac.ir

نتایج نشان داد که روش پویایی سیستم در شبیه‌سازی سیلاب با هیدروگراف ساده‌تر خیلی موفق‌تر عمل می‌کند و سیلاب‌هایی با هیدروگراف پیچیده را به‌خوبی شبیه‌سازی نمی‌کند. این موضوع نشان می‌دهد که مدل‌سازی مدل تانک مبتنی بر پویایی سیستم قادر به شبیه‌سازی تغییرات ناگهانی در دبی که ناشی از خصوصیات فیزیکی و هیدرولوژیکی حوضه است، نمی‌باشد و تنها دبی اوج و زمان تا اوج را به‌خوبی شبیه‌سازی می‌کند.

Darbandi و همکاران (۲۰۱۴) به‌منظور شبیه‌سازی بارش-رواناب در حوضه ليقوان از روش پویایی سیستم و برنامه‌ریزی ژنتیک استفاده کردند که در آن از داده‌های شش رویداد رگبار به همراه اطلاعات رواناب ناشی از آن استفاده شد. در این مطالعه ساختار مدل تانک که از چهار مخزن سری تشکیل شده است با استفاده از نرم‌افزار Vensim مبتنی بر رویکرد پویایی سیستم مدل‌سازی شد و با استفاده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک برای به‌دست آوردن بهترین ترکیب، ورودی‌های مختلف برای مدل‌سازی استفاده شد. نتایج نشان داد که روش پویایی سیستم توانایی خوبی در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی دارد و به‌خوبی قادر است پویایی سیستم‌ها را درک و آن‌ها را شبیه‌سازی کند.

Elshorbagy و همکاران (۲۰۰۷) برای شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی حوضه از مدل‌سازی مبتنی بر رویکرد پویایی سیستم از سه کورت آزمایشی در حوضه آلبرتای کانادا استفاده کردند. در این مطالعه، از مدل‌های ریاضی و مفهومی استفاده شد و خاک را به چهار مخزن تقسیم می‌کند. همچنین، از روش‌های پویایی سیستم تنها برای شبیه‌سازی استفاده نشد، بلکه علاوه بر شبیه‌سازی، از آن برای درک بهتر فرایندهای هیدرولوژیکی نیز بهره بردند. نتایج نشان داد که روش‌های پویایی سیستم توانایی بالایی در شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی حوضه دارند. در مطالعه دیگری در ادامه مطالعات Elshorbagy و همکاران (۲۰۰۷) برای مدل‌سازی نفوذ و دبی خروجی از روش پویایی سیستم استفاده شد (Huang و همکاران، ۲۰۱۱). برای مدل‌سازی از محیط نرم‌افزاری

از داده‌های مشاهداتی یا تکنیک‌های آماری و تجربی مقدار رواناب را تخمین می‌زنند. اما مدل‌های بارش رواناب در این بین از همه روش‌ها کارآمدتر، مفیدتر و دارای عمومیت بیشتری هستند.

مدل وسیله‌ای است که بخشی از واقعیت را شبیه‌سازی می‌کند. هدف از مدل کردن، نشان دادن عملکرد و رفتار یک پدیده طبیعی تحت شرایط معین می‌باشد (Phomcha و همکاران، ۲۰۱۱). مدل استدلالی بارش رواناب، در قرن نوزدهم با یک فرمول ساده ارائه شد و تا اوایل دهه ۱۹۷۰ با توسعه کامپیوترها و استفاده از آن در ساخت مدل‌های بارش-رواناب مدل‌های مختلفی ارائه شد (Beven, ۲۰۰۵).

مدل‌های مختلفی که تاکنون ارائه شده است، اکثراً دارای مشکلاتی هستند که معمولاً استفاده از این مدل‌ها را محدود می‌کند. یکی از این مشکلات این است که کاربر نمی‌تواند در ساختار مدل با توجه به شرایط منطقه تغییرات ایجاد کند یا این‌که برای انجام این تغییرات باید زبان برنامه‌نویسی مخصوص همان مدل را بیاموزد که وقت‌گیر و هزینه‌بر است. علاوه بر این، ساختار داخلی مدل برای درک بهتر مدل مشخص نیست و تأثیر عوامل مختلف روی هم و در کل روی خروجی حوضه قابل شناسایی نیست. همچنین، اکثر مدل‌ها نیاز به داده‌های ورودی زیادی دارند که اندازه‌گیری آن‌ها هزینه‌بر است و یا داده‌های تاریخی آن موجود نیست. با توجه به مطالب ذکر شده، ارائه مدلی که نیاز به داده‌ها و اطلاعات زیاد و هزینه‌بر نداشته و در مقایسه با مدل‌های ارائه شده در گذشته نتایج دقیق‌تر و قابل قبول‌تر ارائه دهد و از همه مهم‌تر قابل فهم بودن، کارشناس پسند بودن، پویایی و قابلیت توسعه مدل برای دستیابی به اهداف مختلف در مدیریت حوزه آبخیز را داشته باشد، از ضروریات می‌باشد. مدل‌سازی مبتنی بر رویکرد سیستمی، مدعی ارائه روشی برای برخورد اصولی‌تر با پیچیدگی‌های دنیای کنونی است (Sternan, ۲۰۰۰؛ Khan و همکاران، ۲۰۰۹).

Jawadiyanzadeh و Borhani Darian (۲۰۱۱) از نوعی مدل تانک دو مخزنی برای شبیه‌سازی بارش-رواناب حوضه امامه در مقیاس ساعتی استفاده کردند.

استلا استفاده کرده و نتایج نشان داد که مدل توانایی قابل ملاحظه‌ای در شبیه‌سازی مقادیر نفوذ و دبی خروجی دارد.

Khan و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از رویکرد سیستمی و مدل‌سازی مبتنی بر پویایی سیستم، رفتارهای سیستم‌های پیچیده هیدرولوژیکی را تجزیه و تحلیل کردند. این مطالعه در حوضه بیجین چین انجام شد و مطالعه را به دو بخش تقسیم کرد. بخش اول برای شبیه‌سازی بیلان آب در مزارع برنج انجام شد و بخش دوم برای شبیه‌سازی جریان سطحی و زیرزمینی که برای آبیاری این مزارع استفاده می‌شدند، صورت گرفت. برای این منظور، یک مدل مفهومی فیزیکی ارائه شد که خاک را به چند لایه مختلف تقسیم‌بندی کرد و بیلان آب را با در نظر گرفتن مقدار بارندگی، تبخیر و تعرق آبیاری و غیره محاسبه نمود. نتایج نشان داد که استفاده از روش پویایی سیستم به درک بهتر سیستم‌های پیچیده هیدرولوژیکی کمک زیادی می‌کند.

Ghashghaei و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از روش شی‌گرا با رویکرد پویایی سیستم، مقادیر بارش-رواناب را در حوضه پل‌چهر و زیرحوضه دوآب مدل‌سازی کردند که از مدل Vensim PLE برای این منظور استفاده شد. در این مطالعه از عوامل فیزیکی حوضه (شیب، ارتفاع و مساحت)، پارامترهای هواشناسی (دما، بارندگی و تبخیر) و عوامل هیدرولوژیکی مثل رواناب استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل توانایی قابل قبولی برای شبیه‌سازی مقادیر بارش-رواناب ماهانه را دارد و مقادیر ضریب ناش-ساتکلیف برای دبی خروجی به ترتیب برای حوضه‌های پل‌چهر و دوآب ۰/۶۶ و ۰/۶۴ برآورد شد.

Li و Simonovic (۲۰۰۲) از روش‌های پویایی سیستم برای مدل‌سازی برای تخمین سیل ناشی از ذوب برف در شمال آمریکا استفاده کردند و برای مدل‌سازی از تئوری مخزن‌های عمودی در محیط نرم‌افزاری STELLA استفاده کردند. نتایج نشان داد که شباهت قابل ملاحظه‌ای بین دبی شبیه‌سازی شده و مشاهداتی وجود دارد و مدل به خوبی دبی‌های اوج را

شبیه‌سازی کرده است.

مدل هیدرولوژیکی^۱ HYSIM از تئوری مخازن عمودی برای شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی استفاده کرده است. در این مدل، آب ناشی از ذوب برف و بارش وارد مخازن مختلف خاک می‌شود و در نهایت از خروجی حوضه خارج می‌شود (Manley, ۲۰۰۶).

بر اساس مطالعات Manley (۲۰۰۶) و Li و Simonovic (۲۰۰۲) مدل رواناب در مجموع از شش مخزن تشکیل شده است که این مخازن به‌طور عمودی به‌صورت سری قرار گرفته‌اند. در مطالعات Li و Simonovic (۲۰۰۲) توجهی به تأثیر مناطق نفوذناپذیر نشده است. اما اگر حوضه مورد مطالعه دارای مناطق شهری و صخره‌ای باشد، تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی رواناب خروجی دارد. از طرف دیگر، در مطالعه Manley (۲۰۰۶) لایه‌های بینابینی بین مخزن خاک سطحی و مخزن آب زیرزمینی ارائه شده است که باعث افزایش پارامترهای مورد نیاز می‌شود و خطای مدل افزایش پیدا می‌کند. همچنین، جریان ابتدا وارد مخزن کانال‌های کوچک می‌شود، سپس با روابط روندیابی وارد کانال اصلی می‌شود که اندازه‌گیری پارامترهای آن مشکل است. اما در مطالعات Li و Simonovic (۲۰۰۲) از این موارد چشم‌پوشی شده است.

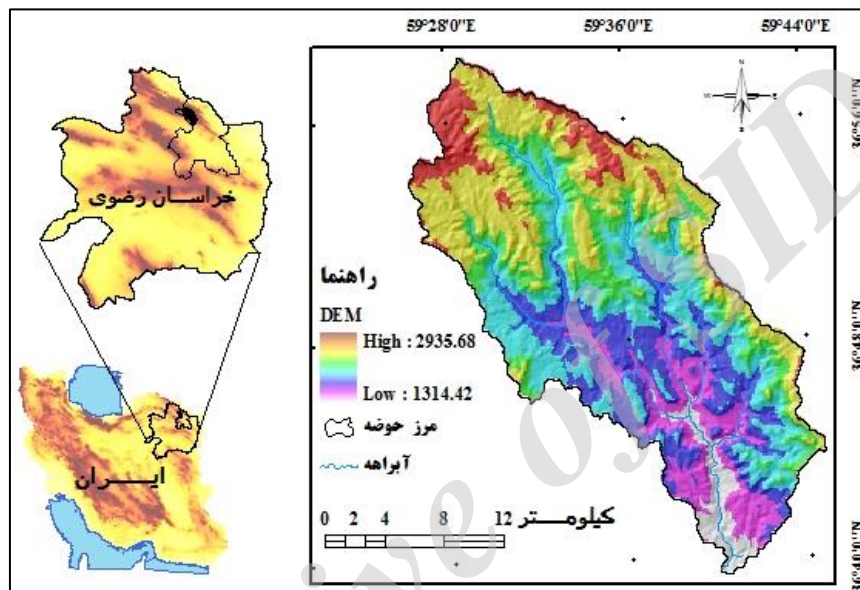
با توجه به مطالعات انجام شده روش‌های پویایی سیستم توانایی خوبی برای شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی دارند که می‌توان از آن در مدل‌سازی بارش-رواناب و مدیریت بهینه حوضه استفاده نمود. جهت بررسی این‌که مدل به‌دست آمده مبتنی بر رویکرد پویایی سیستم قادر است توزیع مؤلفه‌های هیدرولوژیکی در مقیاس زمانی و مکانی ارائه دهد و مدل‌سازی بارش-رواناب مبتنی بر رویکرد پویایی سیستم منجر به ارائه مدلی کاربرپسندتر می‌شود، هدف از این مطالعه مدل‌سازی رواناب خروجی از حوضه سد کارده با استفاده از رویکرد پویایی سیستم می‌باشد.

¹ HYdrologic SIMulation Model

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش: حوزه آبخیز کارده با ۴۴۶/۷ کیلومتر مربع مساحت، شیب متوسط وزنی ۴۲/۷ درصد در شمال شرقی استان خراسان رضوی بین عرض جغرافیایی ۴۰' ۳۶° تا ۵۸' ۳۶° شمالی و طول جغرافیایی ۵۹' ۴۵° تا ۲۷' ۴۵° شرقی قرار دارد (شکل ۱). بالاترین نقطه ارتفاعی در شمال غرب حوزه ۲۹۳۵ متر از سطح دریا و پایین‌ترین نقطه

ارتفاعی در خروجی حوضه و در بالادست روستای کارده با ارتفاع ۱۳۱۴ متر می‌باشد. متوسط بارندگی سالانه ۳۶۷ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه ۶/۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. طول آبراهه اصلی ۴۶/۷ کیلومتر می‌باشد که از خط‌الرأس ارتفاعات کپه داغ- هزار مسجد سرچشمه گرفته و پس از عبور از سد کارده به کشف رود می‌ریزد.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران

داده‌های مورد نیاز مدل بارش-رواناب مبتنی

بر رویکرد پویایی سیستم: مهمترین داده‌های مورد نیاز دمای متوسط روزانه و بارندگی روزانه هستند که این داده‌ها از آمار ایستگاه تبخیرسنجی مارشک تهیه شد. طول دوره آماری از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۲ است که جمعاً ۱۵ سال داده روزانه می‌باشد. علاوه بر داده‌های اقلیمی از اطلاعات میانگین سطح آب زیرزمینی منطقه برای مشخص کردن سطح آب زیرزمینی حوضه استفاده شد. نقشه‌های زمین‌شناسی و کاربری اراضی با استفاده از مطالعات جامع آبخیزداری حوضه سد کارده ۱۳۷۹ تهیه شد. نقشه شیب با استفاده از DEM ۳۰ متر سازمان نقشه‌برداری به‌دست آمد. همچنین، نقشه رخنساره‌های فرسایشی با استفاده از تفسیر عکس‌های هوایی منطقه و مطالعات صحرائی تهیه شد. با تلفیق نقشه‌های ذکر شده، واحدهای همگن به‌دست

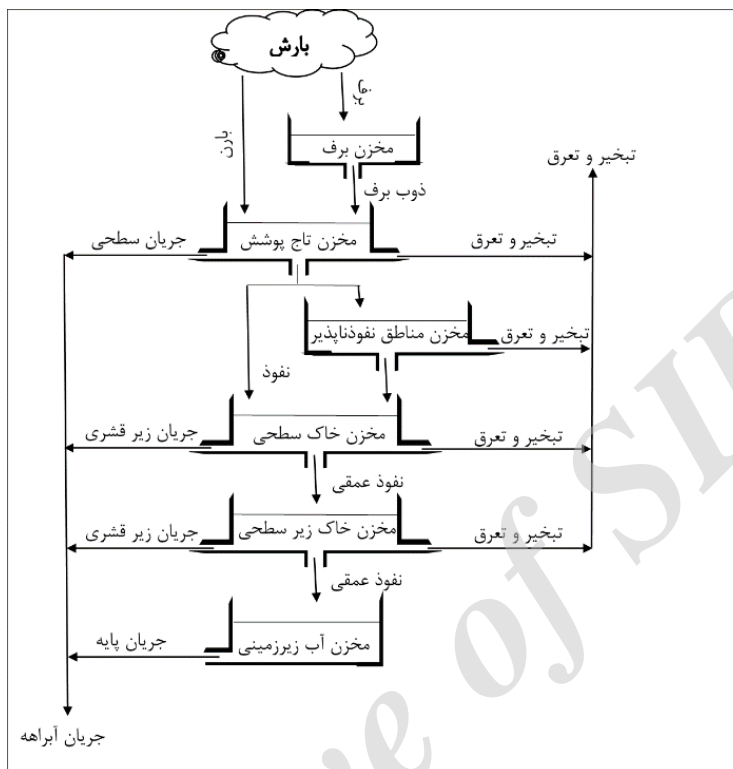
آمد و با حفر پروفیل و نمونه‌برداری در هر یک از واحدها نقشه خاک‌شناسی منطقه تهیه شد. همچنین، از مطالعات جامع آبخیزداری حوضه سد کارده ۱۳۷۹ برای تکمیل نقشه خاک‌شناسی استفاده شد.

ساختار مدل بارش-رواناب: ساختار مدل ارائه شده در این مطالعه برگرفته از مطالعات Manley (۲۰۰۶) و Li و Simonovic (۲۰۰۲) می‌باشد. مخازن این مدل عبارت از مخزن برف، مخزن تاج پوشش، مخزن سطوح نفوذناپذیر، مخزن خاک سطحی، مخزن خاک زیرسطحی و مخزن آب زیرزمینی می‌باشند. شکل ۲، ساختار مدل رواناب را نشان می‌دهد.

با توسعه روش‌های رایانه‌ای مدل‌سازی، اجرای مدل‌ها و تحلیل نتایج آن‌ها راحت‌تر، دقیق‌تر و با سرعت بیشتر انجام شد. محیط‌های مدل‌سازی مختلفی برای این امر ارائه شده است که برای مدل‌سازی مبتنی بر

نسبت به سایر نرم‌افزارهای پویایی سیستم راحت‌تر است. در نتیجه، برای مدل‌سازی مدل بارش-رواناب مبتنی بر رویکرد پویایی سیستم از محیط نرم‌افزاری Vensim استفاده شد.

پویایی سیستم نرم‌افزارهای مختلفی مانند iThink، STELLA، Vensim، VisSim و PowerSim موجود است. اما در این بین، نرم‌افزار Vensim نرم‌افزاری سهل‌الوصول و کاربرپسند است و کار با این نرم‌افزار



شکل ۲- ساختار مدل رواناب استفاده شده در این پژوهش

تأمین می‌شود که نفوذ باعث افزایش رطوبت مخزن خاک سطحی می‌شود و این رطوبت باعث افزایش رطوبت اشباع خاک سطحی شده و با افزایش رطوبت اشباع خاک، میزان تبخیر و تعرق افزایش می‌یابد و افزایش تبخیر و تعرق موجب کاهش رطوبت مخزن خاک سطحی می‌شود. با توجه به مطالب ذکر شده و با توجه به ساختار مفهومی ارائه شده، روابط ریاضی مدل در زیر ارائه می‌شود.

زیرمدل مخزن برف: آب حاصل از برف باریده شده در سطح حوضه نشان‌دهنده مخزن ذوب برف می‌باشد. برای محاسبه ذوب برف از شاخص درجه-روز استفاده شد (Anderson، ۱۹۷۶؛ Li و Simonovic، ۲۰۰۲؛ Elshorbagy و همکاران، ۲۰۰۷). روابط مخزن برف به صورت زیر است.

$$\frac{dSS}{dt} = SWE - SM \quad (1)$$

ساختار پویایی مدل: روش پویایی سیستم کمک می‌کند تا ساختار آماری مدل‌های مختلف را بهتر درک کنیم. تأثیر عوامل مختلف بر یکدیگر به وسیله لوپ‌هایی نشان داده می‌شود که بازخورد هر یک از این عوامل روی هم مشخص می‌شود. به عنوان مثال، حلقه بازخوردی مخزن خاک سطحی در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳- حلقه بازخوردی مخزن خاک سطحی

آب مورد نیاز خاک سطحی با استفاده از نفوذ

$$CI = \text{MIN}(WAI, (C_{IC} - CS)) \quad (6)$$

که در آن، WAI مقدار آب موجود برای برگاب حاصل از ذوب برف و باران، C_{IC} نشان دهنده ظرفیت برگاب تاج پوشش است که از طریق رابطه زیر به دست می آید.

$$WAI = (SM / SWE_C) + \text{rain} \quad (7)$$

$$C_{IC} = C_{\max}(C_{\min} + C_{tc}) \quad (8)$$

که در آن، C_{\max} حداکثر ظرفیت برگاب تاج پوشش (سانتی متر بر روز) و C_{\min} حداقل مقدار C_{\max} در طول زمستان (بدون بعد) است که طی فرایند واسنجی، مقدار آن محاسبه شد. C_{tc} نشان دهنده تأثیر دمای مؤثر تجمعی بر روی تاج پوشش (بدون بعد) است که از رابطه زیر به دست می آید.

$$C_{tc} = \begin{cases} \left[\frac{(\sum T) / T_{C_{\max}}}{1} \right]^{C_c} & \text{if } \sum T < T_{C_{\max}} \\ 1 & \text{if } \sum T \geq T_{C_{\max}} \end{cases} \quad (9)$$

که در آن، $T_{C_{\max}}$ حداکثر دمای مؤثر تجمعی در زمانی که مخزن تاج پوشش حداکثر می شود (بدون بعد) و C_c ضریب نمایی دمای تجمعی مؤثر روی رشد تاج پوشش (بدون بعد) هستند که طی فرایند واسنجی، مقدار آن ها به دست می آید. نرخ زهکشی از تاج پوشش زمانی اتفاق می افتد که مقدار آب موجود در مخزن تاج پوشش بیشتر از ظرفیت تاج پوشش باشد و با استفاده از رابطه زیر به دست می آید.

$$D = \begin{cases} b(CS - C_{IC}) & \text{if } CS > C_{IC} \\ 0 & \text{if } CS \leq C_{IC} \end{cases} \quad (10)$$

که در آن، b پارامتر تجربی زهکشی از تاج پوشش (بر روز) است که مقدار حداقل و حداکثر آن به ترتیب یک و ۱۰۰۰ است که مقدار متوسط ۵۰۰ در نظر گرفته شد (Vrugt و همکاران، ۲۰۰۳). مقدار تبخیر از تاج پوشش به دمای هوا و مقدار آب موجود در تاج پوشش بستگی دارد و با استفاده از رابطه زیر به دست می آید (Simonovic، ۲۰۰۱).

$$E = \text{MIN}(e \times T, CS) \quad (11)$$

که در آن، e ضریب تبخیر (بدون بعد) می باشد و طی فرایند واسنجی، مقدار آن به دست می آید.

زیرمدل مخزن مناطق نفوذناپذیر: رواناب حاصل از مخازن تاج پوشش وارد مخزن مناطق نفوذناپذیر می شود و مقداری از آن در اثر تبخیر از دست رس

که در آن، SS نشان دهنده آب مخزن برف (سانتی متر)، SWE مقدار آب معادل برف (سانتی متر بر روز) که می توان آن ها را از حاصل ضرب چگالی ویژه برف در ضخامت برف بر اساس رابطه زیر به دست آورد (Beyrodiyan، ۲۰۰۴) و SM نشان دهنده مقدار آب حاصل از ذوب برف (سانتی متر بر روز) است.

$$SWE = \text{snow} \times SWE_C \quad (2)$$

که در این آن، snow مقدار بارش برف (سانتی متر) و SWE_C چگالی ویژه برف یا ضریب آب معادل برف می باشد که از رابطه زیر به دست می آید (Beyrodiyan، ۲۰۰۴).

$$SWE_C = 100 \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (3)$$

که در آن، ρ_w چگالی آب (کیلوگرم بر متر مکعب) و ρ_s چگالی برف (کیلوگرم بر متر مکعب) می باشد که در سطح حوضه به طور متوسط ۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب (Beyrodiyan، ۲۰۰۴) در نظر گرفته شد. همچنین، مقدار ضریب آب معادل برف ۴/۵ به دست آمد. مقدار ذوب برف به وسیله رابطه زیر محاسبه می شود (Elshorbagy و همکاران، ۲۰۰۵).

$$SM = 0.011 \times \rho_s T \quad (4)$$

که در آن، T دمای میانگین روزانه (درجه سانتی گراد) می باشد.

زیرمدل مخزن تاج پوشش: Vrugt و همکاران (۲۰۰۳) بر اساس مدل چندلایه برگاب Rutter و همکاران (۱۹۷۱) و Bouten و همکاران (۱۹۹۶) مدل تک لایه برگاب^۱ را ارائه کرده است. معادله بیلان آب در مخزن تاج پوشش بر اساس مدل تک لایه برگاب به صورت زیر است.

$$\frac{dCS}{dt} = CI - D - E \quad (5)$$

که در آن، CS مقدار آب مخزن تاج پوشش (سانتی متر)، CI نرخ برگاب تاج پوشش (سانتی متر بر روز)، D نرخ زهکشی (سانتی متر بر روز) و E نرخ تبخیر از تاج پوشش (سانتی متر بر روز) می باشد.

نرخ واقعی برگاب معمولاً کمتر از مقدار آب در دسترس آن است و می توان آن را با استفاده از رابطه زیر به دست آورد (Simonovic، ۲۰۰۱).

¹ Single-Layer Interception Model

سطحی یا رطوبت باقی مانده که با استفاده از منحنی خصوصیات آب خاک، در خاک سطحی (Boese, ۲۰۰۳؛ Elshorbagy و همکاران، ۲۰۰۵؛ Jutla, ۲۰۰۶؛ Elshorbagy و همکاران، ۲۰۰۷) به دست آمد. پارامتر تأثیر دما روی حالات فیزیکی آب و خاک است. Li و Simonovic (۲۰۰۲) با استفاده از یک رابطه تجربی تأثیر دما را روی نفوذپذیری خاک‌های یخ زده بررسی کردند. بر این اساس C_{ii} با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$C_{ii} = \begin{cases} (T_I/T_{Imax})^{c_i} & \text{if } T < T_{Imax} \\ 1 & \text{if } T \geq T_{Imax} \end{cases} \quad (18)$$

$$T_I = \begin{cases} \sum T & \text{if } T > 0 \text{ and } N < N_n \\ 0 & \text{if } N \geq N_n \end{cases} \quad (19)$$

$$N = \begin{cases} \sum N_0 & \text{if } T < 0 \\ 0 & \text{if } T \geq 0 \end{cases} \quad (20)$$

$$N_0 = \begin{cases} 1 & \text{if } T < 0 \\ 0 & \text{if } T \geq 0 \end{cases} \quad (21)$$

که در آن، T_{Imax} حداکثر T_I در نقطه‌ای که یخ خاک سطحی کامل ذوب می‌شود (درجه سانتی‌گراد) و c_i توانی که تأثیر T_I را روی ذوب شدن خاک سطحی نشان می‌دهد (بدون بعد) که این دو پارامتر طی دوره واسنجی محاسبه می‌شوند. N تعداد تجمعی روزها که دما زیر نقطه دمای مؤثر است. N_n حداکثر N بعد از آن که T_I کاهش یابد و خاک دوباره منجمد شود، N_0 متغیر تعریف روزهایی که دما بالاتر یا پایین‌تر از دمای مؤثر است. نرخ تبخیر و تعرق با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$R_{EI} = et \times T \times S_{ms}^{\lambda} \times C_{ii} \quad (22)$$

که در آن، et ضریب تبخیر و تعرق (سانتی‌متر بر درجه سانتی‌گراد در روز)، λ ضریب نمایی که نشان‌دهنده تأثیر رطوبت اشباع روی تبخیر و تعرق و جریان زیر قشری است. این متغیر بزرگ‌تر از یک است و در دوره واسنجی محاسبه می‌شود. از رابطه زیر برای محاسبه نرخ جریان زیرسطحی استفاده شد.

$$R_{F1} = c_1 \times S_{ms}^{\lambda} \times C_{ii} \quad (23)$$

که در آن، c_1 ضریب جریان زیر قشری خاک است. برای محاسبه نرخ نفوذ عمقی از رابطه زیر استفاده شد.

خارج می‌شود و مقدار باقی مانده وارد مخزن خاک سطحی می‌شود (Manley, ۲۰۰۶). روابط مخزن مناطق نفوذناپذیر به صورت زیر می‌باشد.

$$\frac{d \text{Im} S}{dt} = CI - \text{Im} - E \quad (12)$$

که در آن، $\text{Im} S$ مخزن مناطق نفوذناپذیر و Im نرخ مناطق نفوذناپذیر است که با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\text{Im} = \begin{cases} \text{Im} S \times \text{Im} p & \text{if } \text{Im} S > 0 \\ 0 & \text{if } \text{Im} S \leq 0 \end{cases} \quad (13)$$

که در آن، $\text{Im} p$ ضریب سهم مناطق نفوذناپذیر است که در مناطق شهری عدد ۰/۲ و برای مناطق غیرشهری مانند منطقه مورد مطالعه عدد ۰/۰۲ در نظر گرفته می‌شود (Manley, ۲۰۰۶).

زیرمدل مخزن خاک سطحی: تغییرات در مقدار آب موجود در مخزن خاک سطحی با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید (Li و Simonovic, ۲۰۰۲).

$$\frac{dSSS}{dt} = R_I - R_{E1} - R_{F1} - R_{P1} \quad (14)$$

که در آن، SSS مخزن خاک سطحی (سانتی‌متر)، R_I نرخ نفوذ (سانتی‌متر بر روز)، R_{E1} نرخ تبخیر و تعرق (سانتی‌متر بر روز)، R_{F1} نرخ جریان زیرسطحی (سانتی‌متر بر روز) و R_{P1} مقدار آگذری یا نفوذ عمقی (سانتی‌متر بر روز) می‌باشد. نرخ نفوذ از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$R_I = \text{MIN}(WIA - CI, I_1) \quad (15)$$

که در آن، I_1 محدودیت نفوذ خاک است و با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$I_1 = (I_c / S_{ms}^{\gamma}) C_{ii} \quad (16)$$

$$S_{ms} = \frac{SSS - S_{rs}}{S3_n - S_{rs}} \quad (17)$$

که در آن، I_c ضریب نفوذ (سانتی‌متر بر روز) و γ ضریب نمایی که نشان‌دهنده تأثیر رطوبت اشباع روی نفوذ می‌باشد که مقدار این دو پارامتر در خاک سطحی با توجه به مطالعات Manley (۲۰۰۶) به ترتیب ۱۰ و دو در نظر گرفته شد. S_{ms} رطوبت اشباع مؤثر در خاک سطحی (بدون بعد)، $S3_n$ حداکثر مخزن آب سطحی (سانتی‌متر) و S_{rs} حداقل مخزن آب

است و C_6 ضریب آب پایه (روز) که در واسنجی مقدار آن قابل محاسبه است.

کل رواناب به دست آمده برای روندیابی از رواناب حاصل از جریان سطحی، جریان زیرقشری خاک سطحی و زیرسطحی و همچنین، جریان آب پایه مخزن آب زیرزمینی به دست می آید که می توان آن را به این صورت نوشت.

$$R = R_{of} + R_{F1} + R_{F2} + R_{BF} \quad (۳۲)$$

$$R_{of} = WIA - R_l - CI \quad (۳۳)$$

که در آن، R_{of} مقدار رواناب سطحی (سانتی متر) می باشد.

جریان آبراهه ها ناشی از آب به دست آمده از مخازن مختلف تحت تأثیر زمان تأخیر قرار می گیرد و برای شبیه سازی آن از تابع هموارسازی به صورت زیر استفاده می شود.

$$Q = SMOOTH(R \times Area, td) \quad (۳۴)$$

که در آن، A مساحت حوضه (کیلومتر مربع)، td نشان دهنده متوسط زمان تأخیر است که طی دوره واسنجی محاسبه می شود و r ضریب تبدیل واحد است که سانتی متر کیلومتر مربع بر روز را به متر مکعب بر ثانیه تبدیل می کند و برابر $۱۰۰۰۰/۸۶۴۰۰$ می باشد.

مقدار اولیه متغیر حالت مخزن برف با توجه به برف گیر بودن منطقه به طور متوسط چهار سانتی متر در نظر گرفته شد. این مقدار برای مخزن تاج پوشش و مناطق نفوذناپذیر با توجه به این که این مخازن در ابتدا فاقد مقدار هستند، صفر در نظر گرفته شد. برای مخزن خاک سطحی و مخزن خاک زیرسطحی با توجه به مقدار بارندگی در سال گذشته و رطوبت پیشین مقدار اولیه متغیر حالت محاسبه شد. برای مخزن آب زیرزمینی در اجرای اولیه مقدار ۷۰۰ سانتی متر به دست آمد.

تحلیل حساسیت مدل: در فرایند تحلیل حساسیت، پارامترهای حساس مشخص و تمرکز بر روی این پارامترها صورت می گیرد و به این ترتیب با کاهش عدم قطعیت، دقت نتایج افزایش یافته و باعث صرفه جویی در وقت و هزینه می شود (Avarand و همکاران، ۲۰۰۷). برای بررسی حساسیت متغیرهای مدل، از روش تحلیل حساسیت جزئی (مطلق) استفاده

$$R_{P1} = \begin{cases} c_2(S_{ms} - S_{mss})^3 C_{ti} & \text{if } S_{ms} - S_{mss} > 0.01 \\ 0 & \text{if } S_{ms} - S_{mss} \leq 0.01 \end{cases} \quad (۲۴)$$

که در آن، c_2 ضریب نفوذ عمقی است و با c_1 با واسنجی مدل به دست می آید. S_{mss} رطوبت اشباع مؤثر در خاک زیرسطحی (بدون بعد) که در ادامه رابطه آن ارائه می شود.

زیرمدل مخزن خاک زیرسطحی: بیلان آب در خاک زیرسطحی از طریق رابطه زیر محاسبه می شود (Simonovic و Li، ۲۰۰۲).

$$\frac{dSubS}{dt} = R_{P1} - R_{E2} - R_{F2} - R_{P2} \quad (۲۵)$$

$$R_{E2} = c_3 \times T \times S_{mss}^\lambda \times C_{tc} \quad (۲۶)$$

$$R_{F2} = c_4 \times S_{mss}^\lambda \quad (۲۷)$$

$$R_{P2} = c_5 \times S_{mss}^\lambda \quad (۲۸)$$

$$S_{mss} = \frac{\frac{SubS}{S4_n} - S_{rl}}{1.0 - S_{rl}} \quad (۲۹)$$

که در آن، $SubS$ مقدار آب مخزن زیرقشری (سانتی متر)، c_3 ضریب تبخیر و تعرق از خاک زیر قشری (سانتی متر بر درجه سانتی گراد در روز)، c_4 و c_5 به ترتیب ضریب جریان زیرقشری و ضریب نفوذ عمقی خاک (سانتی متر بر روز)، $S4_n$ حداکثر رطوبت اشباع خاک زیرسطحی (سانتی متر) و S_{rl} حداقل رطوبت اشباع خاک زیرسطحی که با استفاده از منحنی خصوصیات آب خاک، در خاک زیرسطحی (Boese، ۲۰۰۳؛ Elshorbagy و همکاران، ۲۰۰۵؛ Jutla، ۲۰۰۶؛ Elshorbagy و همکاران، ۲۰۰۷) قابل محاسبه است.

زیرمدل مخزن آب زیرزمینی: تغییرات در رطوبت مخزن آب زیرزمینی با استفاده از رابطه (۳۰) محاسبه می شود.

$$\frac{dGS}{dt} = R_{P2} - R_{BF} \quad (۳۰)$$

$$R_{BF} = (GS - S5_n) / c_6 \quad (۳۱)$$

که در آن، GS مقدار آب در مخزن آب زیرزمینی (سانتی متر)، R_{BF} نرخ جریان آب پایه (سانتی متر بر روز)، $S5_n$ سطح آب زیرزمینی (سانتی متر) که با استفاده از داده های سطح آب زیرزمینی قابل محاسبه

کارده در خروجی حوضه استفاده شد. طول دوره آماری ۱۵ سال است که از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۸ جمعاً ۱۱ سال برای دوره واسنجی و از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۲ برای ارزیابی مدل استفاده شد. میزان صحت فرایند واسنجی و ارزیابی با استفاده از ضریب ناش-ساتکلیف محاسبه شد. ضریب ناش-ساتکلیف از طریق رابطه زیر به دست می‌آید.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{av})^2} \quad (37)$$

که در آن، Q_{sim} و Q_{obs} دبی شبیه‌سازی شده و دبی مشاهداتی در زمان t ام، Q_{av} برابر میانگین دبی مشاهداتی و n تعداد داده‌ها می‌باشد.

نتایج و بحث

در فرایند مدل‌سازی مبتنی بر رویکرد پویایی سیستم کشف و نمایش فرایندهای بازخوردی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ساختار مفهومی مدل پویا به صورت شکل ۴ می‌باشد.

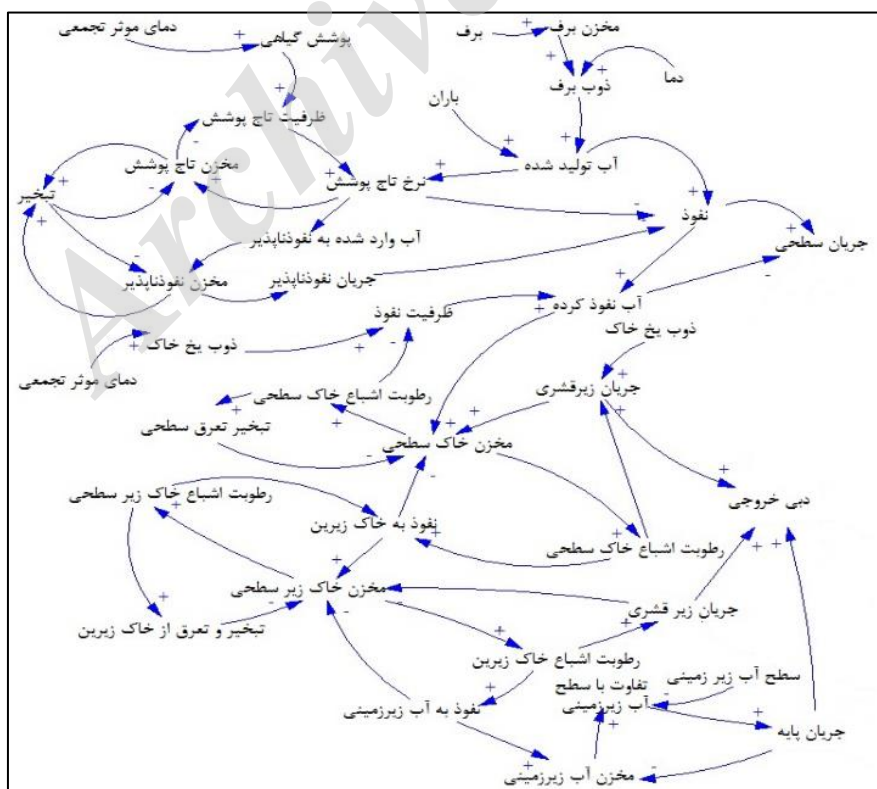
شد و بعد از اجرای اولیه مدل مقادیر اولیه پارامترها به دست آمد. برای تعیین حساسیت پارامترهای مدل مقدار اولیه پارامترها ± 5 ، ± 10 و ± 15 تغییر داده شد و تأثیر آن روی دبی خروجی مشخص شد، سپس با استفاده از روابط زیر مقدار حساسیت پارامترهای مدل محاسبه شد.

$$\bar{s} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{Q'_{st} - Q_{st}}{Q_{st}}}{n} \times 100 \quad (35)$$

$$\bar{sp} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{Q'_{sp} - Q_{sp}}{Q_{sp}}}{n} \times 100 \quad (36)$$

که در آن، \bar{s} نشان‌دهنده حساسیت متوسط دبی خروجی تحت تأثیر تغییرات پارامترهای مدل، \bar{sp} حساسیت دبی پیک، n تعداد داده‌ها یا کل تعداد روزها، t گام زمانی، Q_{st} مقادیر شبیه‌سازی شده در واسنجی اولیه، Q'_{st} دبی شبیه‌سازی شده پس از تغییر پارامتر، Q_{sp} مقدار دبی پیک شبیه‌سازی شده، Q'_{sp} مقدار دبی پیک بعد از تغییر پارامتر می‌باشد.

واسنجی و ارزیابی مدل: برای واسنجی و ارزیابی مدل از اطلاعات دبی روزانه ثبت شده در ایستگاه



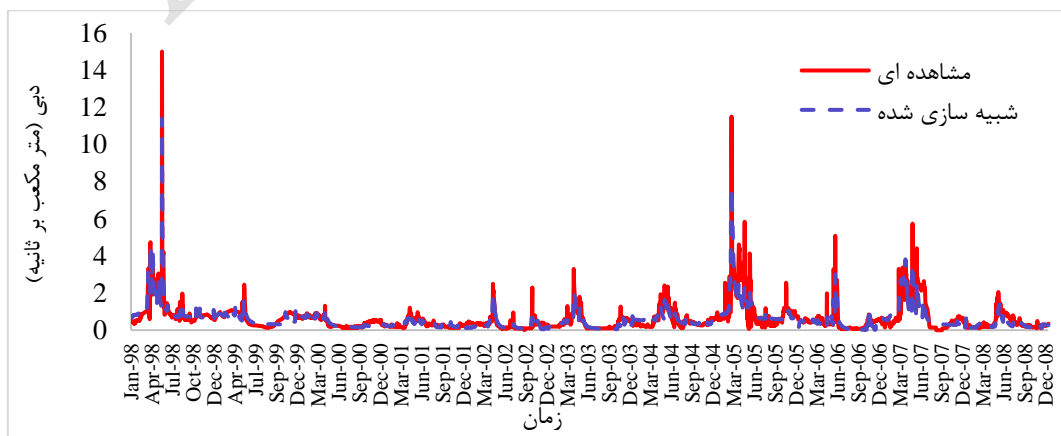
شکل ۴- ساختار مفهومی مدل رواناب-رسوب مبتنی بر رویکرد پویایی سیستم

طی فرایند واسنجی ابتدایی مدل مقادیر اولیه متغیرها به دست آمد و در فرایند تحلیل حساسیت به این مقادیر پنج، ۱۰ و ۱۵ درصد افزوده و کاسته شد تا متغیرهای حساس مدل شناسایی شوند. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت در جدول ۱ ارائه شده است.

با مشخص شدن پارامترهای حساس مدل پارامترهایی که حساسیت کمتری داشتند، مقادیر اولیه آن‌ها در نظر گرفته شد. سایر پارامترها در محدوده مجازشان تغییر داده شدند و مقادیر بهینه به دست آمد. نتایج حاصل از واسنجی مدل در شکل ۵

جدول ۱- نتایج تحلیل حساسیت مدل

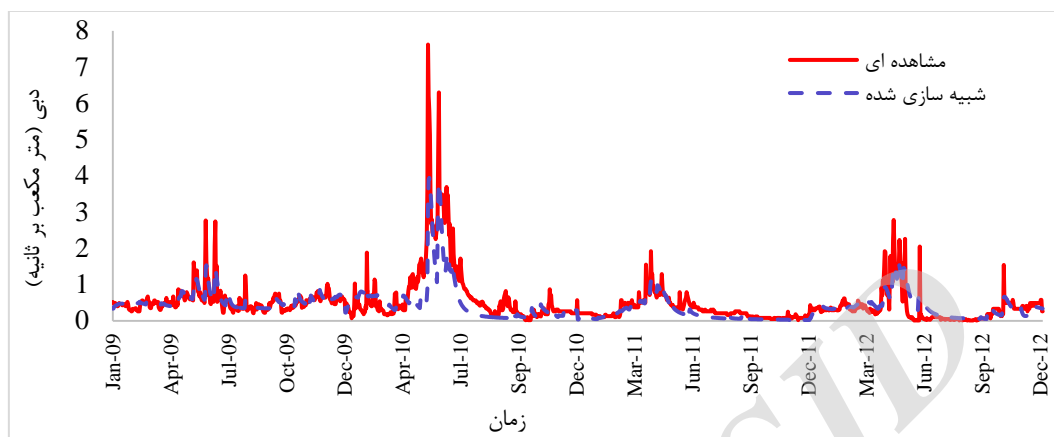
پارامتر	\bar{s}					\bar{sp}				
	۱۵	۱۰	۵	-۵	-۱۰	۱۵	۱۰	۵	-۵	-۱۰
T_{cmax}	۱/۱۷	۰/۸	۰/۴۱	-۰/۴۵	-۰/۹	۶/۴۶	۴/۴	۲/۱۵	-۲/۳۶	-۴/۷
C_c	۱/۴۹	۰/۴	۰/۳	-۰/۲۵	-۰/۵	۳/۰۴	۲	۱/۰۴	-۱/۱۱	-۲/۳
e	-۰/۳۷	-۰/۳	-۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۲	-۰/۱۱	-۰/۶	-۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۱۳
T_{Imax}	-۰/۴۵	-۰/۳۱	-۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۳۷	۰/۵۸	۰/۲۹	۰/۰۹	-۰/۰۸	-۰/۲۲
c_i	-۰/۶۱	-۰/۴۹	-۰/۲۵	۰/۲۶	۰/۵۵	۰/۸۵	۰/۰۶	۰/۰۴	-۰/۰۲	-۰/۰۹
λ	-۱/۵۳	-۰/۸	-۰/۴۵	۰/۳۹	۱	۱/۰۴	-۲/۲۴	-۰/۰۸	۰/۹۶	۳/۴۳
et	-۴/۴۲	-۲/۸	-۱/۵۸	۱/۷	۳/۲	۵/۶	-۳/۶	-۱/۸۸	۱/۹۹	۶/۳۸
c_1	۵/۴۹	۳/۴	۲/۳۲	-۱/۰۱	-۳/۴	-۴/۵۶	۱۰/۸۲	۷/۲	-۲/۹	-۱۰/۱۲
c_2	-۱/۰۱	-۰/۶	-۰/۳	۰/۲	۰/۵	۱/۳	-۳/۵۶	-۱/۳	۱/۰۷	۳/۸
c_3	-۰/۱	-۰/۰	-۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰	۰/۱۲	-۰/۱	-۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۱۱
c_4	۰/۷۲	۰/۳	۰/۲۴	-۰/۲۴	-۰/۳	-۰/۷۳	۰/۱۵	۰/۰	-۰/۰۵	-۰/۱۵
c_5	-۰/۰۶	-۰/۰	-۰/۰	۰/۰	۰/۰	-۰/۰۹	-۰/۰	-۰/۰	۰/۰	۰/۰۹
c_6	-۵/۶	-۳/۹	-۲/۰۳	۲/۳	۴/۸	۷/۶	-۱/۰۸	-۰/۷	۰/۴۸	۱/۵۴
C_{max}	-۵/۳۳	-۳/۶	-۱/۹	۲/۰۵	۴/۳	-۶/۶۵	-۸/۵	-۵/۷	-۲/۹	۶/۳
C_{min}	-۲/۷۸	-۱/۹	-۱/۰۱	۱/۱۱	۲/۳	۳/۶۷	-۴/۴۴	-۲/۹	۱/۵	۴/۶۴



شکل ۵- نتایج حاصل از واسنجی مدل

جدول ۲- مقادیر ناش-ساتکلیف در دوره واسنجی مدل

سال											
۲۰۰۸	۲۰۰۷	۲۰۰۶	۲۰۰۵	۲۰۰۴	۲۰۰۳	۲۰۰۲	۲۰۰۱	۲۰۰۰	۱۹۹۹	۱۹۹۸	NS رواناب
۰/۶۳	۰/۶۱	۰/۶۳	۰/۶۲	۰/۶۵	۰/۸۱	۰/۶۵	۰/۶۶	۰/۶۷	۰/۶۳	۰/۶۶	



شکل ۶- نتایج ارزیابی مدل

پوشش (C_{max}) علاوه بر تأثیر زیادی که روی دبی خروجی دارد، تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی اوج دارد که تأثیر دما روی تاج پوشش را تأیید می‌کند که این نتایج با نتایج به دست آمده از مطالعات Li و Simonovic (۲۰۰۲) مطابقت ندارد. به این دلیل که حوضه مورد مطالعه آن‌ها کاملاً برف‌گیر بوده و عامل حساس را فاکتور درجه-روز معرفی نموده‌اند و دبی ناشی از ذوب برف باعث افزایش دبی پیک شده است. از پارامترهای حساس دیگر، ضریب جریان زیر قشری خاک (C_1) می‌باشد که هم روی مقدار دبی و هم دبی اوج تأثیر دارد. افزایش و کاهش این ضریب، باعث افزایش و کاهش مقدار دبی و میزان دبی اوج می‌شود. ضریب تبخیر و تعرق از خاک سطحی نیز یکی دیگر از پارامترهای مهم و مؤثر روی دبی می‌باشد که حساسیت این پارامتر در فرآیند تحلیل حساسیت، این موضوع را تأیید می‌کند.

با توجه به شکل ۷، مشاهده می‌شود که مدل توانایی شبیه‌سازی دقیق دبی اوج را ندارد و مقادیر شبیه‌سازی شده کمتر از مقادیر دبی اوج مشاهداتی می‌باشد. دلیل این موضوع را با توجه به نتایج تحلیل حساسیت می‌توان به مخزن تاج پوشش نسبت داد. زیرا مدل، پوشش گیاهی را در سرتاسر حوضه یکسان

مقادیر ناش-ساتکلیف دوره ارزیابی مدل در جدول

۳ زیر ارائه شده است.

جدول ۳- مقادیر ناش ساتکلیف در دوره ارزیابی مدل

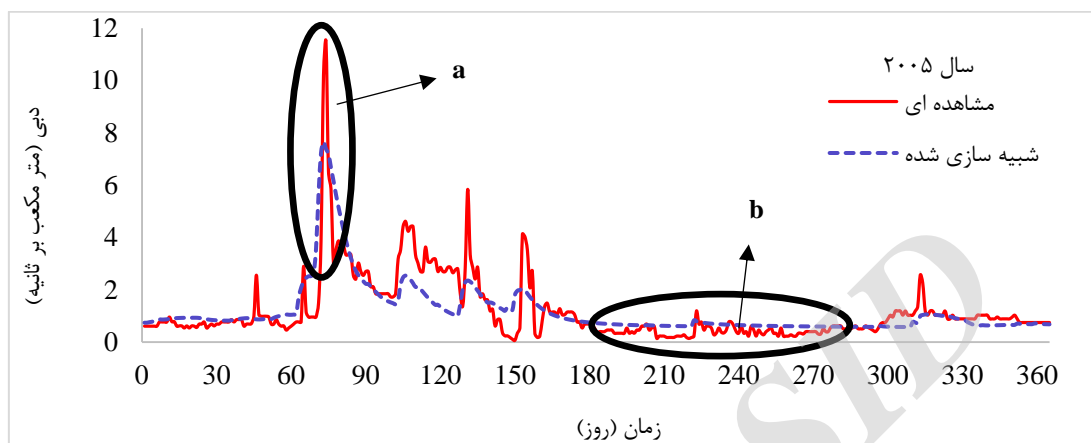
سال				
۲۰۱۲	۲۰۱۱	۲۰۱۰	۲۰۰۹	رواناب NS
۰/۱۶	۰/۶۷	۰/۶۶	۰/۵۷	

نتیجه‌گیری

پارامترهایی که مقدار آن‌ها در دوره واسنجی به دست آمدند، پارامترهای مربوط به دما و خاک می‌باشند که تحلیل حساسیت نشان داد که پارامترهای مربوط به دما نسبت به پارامترهای مربوط به خاک حساس‌تر هستند. برخی از این پارامترها مانند T_{max} و C_c که مربوط به تأثیر دمای مؤثر تجمعی بر روی تاج پوشش (بدون بعد) می‌باشند، تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی دبی اوج دارند که نشان‌دهنده تأثیر دما روی رشد تاج پوشش و از طرفی وجود تاج پوشش روی دبی اوج می‌باشد. لذا، رشد تاج پوشش باعث افزایش نفوذ و کاهش دبی اوج می‌شود. اما تغییرات دما و کاهش پوشش گیاهی باعث افزایش رواناب سطحی، در نتیجه افزایش دبی اوج می‌شود. همچنین، حداکثر مخزن تاج

حوضه می‌باشد. در اکثر مدل‌ها، تأثیر دما، ثابت در نظر گرفته شده است. اما، ساختار مفهومی مدل پویا می‌تواند اثر تغییرات دما بر روی ذوب و انجماد آب در خاک، تبخیر و تعرق و تغییرات برگاب را در نظر بگیرد.

در نظر می‌گیرد و از طرفی نوع پوشش گیاهی و تأثیر آن روی رواناب مشخص نشده است. در اکثر موارد، زمان تا اوج به‌طور قابل ملاحظه‌ای صحیح شبیه‌سازی شده است. دلیل این موضوع، در نظر گرفتن نوسانات دما و تأثیر آن روی عوامل مختلف



شکل ۷- دبی شبه‌سازی شده و مشاهده‌ای سال ۲۰۰۵، a= کم تخمینی دبی اوج، b= عدم توانایی شبیه‌سازی دبی پایه

تغییرات کوچک را ندارند که این نتایج با نتایج Borhani Darian و Jawadiyanzadeh (۲۰۱۱) مطابقت دارد. لذا، در این مطالعه تغییرات در دبی پایه به‌درستی شبیه‌سازی نشده است که اگر در مطالعات آبی در زمینه شبیه‌سازی در حوضه‌های بزرگ انجام شود، این مشکل برطرف خواهد شد. همچنین، نتایج نشان داد که روش پویایی سیستم توانایی خوبی در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی دارد و به‌خوبی قادر است پویایی سیستم‌ها را درک و آن‌ها را شبیه‌سازی کند که این نتایج با نتایج Darbandi و همکاران (۲۰۱۴) مطابقت دارد. در کل، نتایج به‌دست آمده از فرایند واسنجی و ارزیابی مدل نشان می‌دهد که نمودارهای مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده با هم مطابقت قابل قبولی دارند. همچنین، ضریب ناش-ساتکلیف به‌دست آمده بیشتر از ۰/۵ بوده است که این موضوع نشان‌دهنده شبیه‌سازی قابل قبول مدل می‌باشد و توانایی روش‌های پویایی سیستم را در شبیه‌سازی بارش رواناب تأیید می‌کند.

همان‌طور که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود، مقادیر دبی در دوره‌های کم آبی (تابستان) با دقت بیشتری نسبت به دبی پیک برآورد شده است که نشان می‌دهد، پدیده‌های تبخیر و تعرق و اثر آب پایه شناخته شده‌تر از سایر پدیده‌ها بوده‌اند. همچنین، باید توجه نمود که آب رودخانه کارده به‌وسیله اهالی در دوره تابستان جهت آبیاری باغات استفاده می‌شود و دبی خروجی حوضه در این دوره‌ها باید بیشتر از مقادیر ثبت شده به‌وسیله وزارت نیرو باشد.

در مطالعات Li و Simonovic (۲۰۰۲)، حوضه مورد مطالعه بزرگ بوده است و دارای رودخانه بزرگ دائمی می‌باشد که برای نشان دادن تأثیر زمان تأخیر از تابع هموارسازی مرتبه سوم استفاده شده است. اما در مطالعه حاضر، حوضه مورد مطالعه نسبت به حوضه مذکور کوچک‌تر و دارای رودخانه کم آب بوده است. بنابراین، از تابع هموارساز استفاده شد. اما این تابع و توابع تأخیر برای نشان دادن تأخیر زمانی مقادیر را هموار می‌کنند و توانایی مناسبی برای نشان دادن

منابع مورد استفاده

1. Anderson, E.A. 1976. A point energy and mass balance of a snow cover. NOAA Technical Report NWS-19, US Department of Commerce, Washington, D.C.

2. Avarand, R., H. Torabi and A. Farzeyayi. 2007. Sensitivity analysis HEC-1 model to the input parameter. 7th International Conference on River Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran (in Persian).
3. Beyrodiyan, N. 2004. Snow and Avalanche (snowy area management). Emam Reza University Publishers, 230 pages (in Persian).
4. Beven, S. 2005. Rainfall-runoff modeling: introduction. Encyclopedia of Hydrological Sciences, John Wiley and Sons, 1-12.
5. Boese, K. 2003. The design and installation of a field instrumentation program for the evaluation of soil-atmosphere water fluxes in a vegetated cover over saline/sodic shale overburden. MSc Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, 245 pages.
6. Borhani Darian, A. and M.M. Jawadiyanzadeh. 2011. Prepare the model of rainfall-runoff system dynamics analysis and comparison with bees mating algorithm. New Findings in Civil Engineering Conference, Islamic Azad University of Najafabad, 23-24 February.
7. Bouten, W., M.G. Schaap and J. Aerts. 1996. Vermetten, monitoring and modelling canopy water storage amounts in support of atmospheric depositions studies. Journal of Hydrology, 181: 305-321.
8. Darbandi, S., Y. Dinpajouh and S. Zeinalli. 2014. Efficiency study of the system dynamics model to simulate the rainfall-runoff, case study: Lighvan Watershed. Journal of Water and Soil, 28(1): 127-138.
9. Elshorbagy, A., A. Jutla, L. Barbour and J. Kells. 2005. System dynamics approach to assess the sustainability of reclamation of disturbed watersheds. Canadian Journal of Civil Engineering, 32: 144-158.
10. Elshorbagy, A., A. Jutla and J. Kells. 2007. Simulation of the hydrological processes on reconstructed watersheds using system dynamics. Hydrological Sciences Journal, 52(3): 538-562.
11. Ghashghaei, M., A. Bagheri and S. Morid. 2013. Rainfall-runoff modeling in a watershed scale using an object oriented approach based on the concepts of system dynamics. Water Resources Management, 11: 22-34.
12. Huang, M., A. Elshorbagy, S.L. Barbour, J.D. Zettl and B.C. Si. 2011. System dynamics modeling of infiltration and drainage in layered coarse soil. Canadian Journal of Soil Science, 91: 185-197.
13. Jutla, A. 2006. Hydrologic modeling of reconstructed watersheds using a system dynamics approach. MSc Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, 287 pages.
14. Khan, S., L. Yufeng and A. Ahmad. 2009. Analyzing complex behavior of hydrological systems through a system dynamics approach. Environmental Modelling and Software, 24: 1363-1372.
15. Lhomme, J., C. Bouvier and J.L. Perrin. 2004. Applying a GIS-based geomorphological routing model in urban catchments. Journal of Hydrology, 299(3-4): 203-216.
16. Li, L. and S.P. Simonovic. 2002. System dynamics model for predicting floods from snowmelt in North American prairie watersheds. Hydrological Process, 16: 2645-2666.
17. Phomcha, P., P. Wirojanagud, T. Vangpaisal and T. Thaveevouthti. 2011. Predicting sediment discharge in an agricultural watershed: A case study of the Lam Sonthi Watershed, Thailand. ScienceAsia, 37: 43-50.
18. Rutter, A.J., K.A. Kershaw, P.C. Robins and A.J. Morton. 1971. A predictive model of rainfall interception in forests: I. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. Agricultural Meteorology, 9: 367-384.
19. Simonovic, S.P. 2001. Assessment of the impact of climate variability and change on the reliability, resiliency and vulnerability of complex flood protection systems. Water Resources Research Report, 92 pages.
20. Sterman, J.D. 2000. Business dynamics systems thinking and modeling for a complex world. McGraw-Hill.
21. Vrugt, J.A., S.C. Dekker and W. Bouten. 2003. Identification of rainfall interception model parameters from measurements of throughfall and forest canopy storage. Water Resources Research, 39: 9-23.

Rainfall-runoff modeling based on system dynamics approach, case study: Mashhad Kardeh dam basin

Ali Salajeghe¹, Shahram Khalighi Sikaroudi², Maryam Azarakhshi³ and Mohammad Rostami Khalaj^{*4}

¹ Professor, Faculty of Natural Resources, Tehran University, Iran, ² Associate Professor, Faculty of Natural Resources, Tehran University, Iran, ³ Assistant Professor, Faculty of Natural Resources, University Of Torbat Heydariyeh, Iran and ⁴ PhD Student, Faculty of Natural Resources, Tehran University, Iran

Received: 19 March 2016

Accepted: 07 August 2016

Abstract

Rainfall-runoff modeling is one of runoff estimation techniques and an appropriate tool for studying hydrological processes, water resources evaluation and watershed management. But, the complexity and the non-linear nature of rainfall-runoff process and not being known factors affecting it and generally on discharge at watershed outlet, modeling has become more difficult. Therefore, using the methods that have additionally dynamic, development capability, conceptual structure and user friendly is essential. Therefore, in this study, for rainfall-runoff modeling, system dynamics methods were used in the Kardeh dam basin of Mashhad. The proposed model includes six reservoir including snow storage, canopy storage, impervious storage, surface soil storage, subsurface storage and groundwater storage. The required input data includes average daily precipitation and temperature. To calibrate the model, daily discharge data from basin outlet in the period from 1998 to 2008 and for evaluation the discharge from 2009 to 2012 were used. The results of sensitivity analysis showed that temperature parameters are more sensitive and have considerable impact on discharge and peak flow. Also, the results indicated that simulated stream flow pattern is quite similar to that observed and Nash-Sutcliffe coefficient obtained in evaluation period is between 0.57-0.67 which represents the high ability of system dynamics methods in watershed rainfall-runoff modeling.

Keywords: Hydrological processes, Impervious storage, Khorasan Razavi province, Nash-Sutcliffe coefficient, Snow storage

* Corresponding author: rostami88@ut.ac.ir