Archive of SID

مجله پژوهش آب ایران
جلد ۱۳/ شماره ۴/ پیاپی ۳۵/ زمستان ۱۳۹۸ (۱۲۵-۱۳۶)

مروری بر مدل‌های بیلان آب: بررسی مدل‌های ریاضی مفهومی برای حوضه

سید سجاد رضوی کهنموئی[۱]، کامران داوری[۲*]، بیژن قهرمان[۳] و عطاءاله جودوی[۴]

چکیده

مطالعات بیلان آب، یکی از ارکان مدیریت و سیاست‌گذاری در مدیریت منابع آب و ابزاری برای ارزیابی کمی ذخایر منابع آب در حوضه و تغییرات این منابع در اثر فعالیت‌های انسانی است. در حال حاضر برای محاسبه‌ی بیلان در ایران مشکلاتی وجود دارد. پرهزینه و زمان‌بر بودن تأمین داده‌های موثق برای برآورد بسیاری از مؤلفه‌های بیلان (در سطح حوضه) و اتکا به روش‌های تجربی (تخمینی) برای برآورد این مؤلفه‌ها، و از طرفی نبود روش‌های تجربی واسنجی شده و بومی برای برآورد دقیق‌تر عوامل بیلان برخی از این مشکلات است. در بسیاری از کشورها از مدل‌هایی در برنامه‌ریزی منابع آب استفاده می‌شود که در کشورهای دیگر با شرایط اقلیمی متفاوت تولید شده‌اند. بنابراین، قبل از استفاده از این مدل‌ها باید به ساختار مدل توجه شود. هدف از این مطالعه، بررسی مدل‌ها و روش‌هایی است که در دنیا برای محاسبات بیلان آب، به کار گرفته می‌شود. با توجه به مزیت مدل‌های مفهومی در مقایسه با مدل‌های فرایند- محور و مدل‌های داده-محور در مدل‌سازی بیلان آب و همچنین با توجه به ضعف مدل‌های یکپارچه در شبیه‌سازی تغییرات پارامترها در سطح حوضه‌ی آبریز، تمرکز اصلی مقاله بر روی مدل‌های مفهومی در حالت‌های توزیعی و نیمه‌توزیعی است. این مدل‌ها، متفاوت از مدل‌های کاملاً توزیعی فرایند محور بوده و قابلیت کاربرد بیشتری را در حوضه‌های متوسط و بزرگ مقیاس (که داده‌های هیدروژئولوژیکی کافی وجود ندارد) دارند. سعی شده است با بررسی مدل‌های مختلف بیلان بتوان یک مدل اجرایی برای مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران انتخاب کرد. با توجه به شرایط موجود، در مناطقی که هنوز اطلاعات دقیق و موثق هیدرولوژیکی برای واسنجی مدل‌ها وجود ندارد (مانند اکثر حوضه‌ها در ایران) برای تولید، توسعه، واسنجی و بومی‌سازی یک مدل بیلان که هدف آن تخمین موجودیت آب در یک حوضه است، باید ابتدا مدل‌های ساده‌تر مدنظر قرار گیرد و نه مدل‌هایی که تحت عنوان مدل شبیه‌سازی هیدرولوژیکی شناخته می‌شوند. در این مطالعه، تعدادی از مدل‌ها، براساس برخی از معیارها از جمله عدم پیچیدگی، دسترسی به داده‌ها و کد، دسته‌بندی و از نظر خروجی‌ها، مقیاس زمانی و مکانی و ساختار مدل بیلان مقایسه شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: بیلان آب، خشک و نیمه‌خشک، شبه‌توزیعی و نیمه‌توزیعی، مدل‌های توزیعی، مدل‌های ریاضی- مفهومی.

ارجاع: رضوی کهنموئی س. س. کامران داوری ک. قهرمان ب. و جودوی ع. ۱۳۹۸. مروری بر مدل‌های بیلان آب: بررسی مدل‌های ریاضی مفهومی برای حوضه. مجله پژوهش آب ایران. ۳۵: ۱۲۵-۱۳۶.

۱- کارشناس ارشد مهندسی منابع آب، شرکت مهندسین مشاور (دانش بنیان) هیدروتک توس، مشهد.
۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.
۳- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.
۴- مؤسسه (دانشگاه) مرکز پژوهشی آب و محیط‌زیست شرق (EWERI).
*** نویسنده مسئول: K.Davary@ferdowsi.um.ac.ir**
تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۱۷

www.SID.ir

Archive of SID

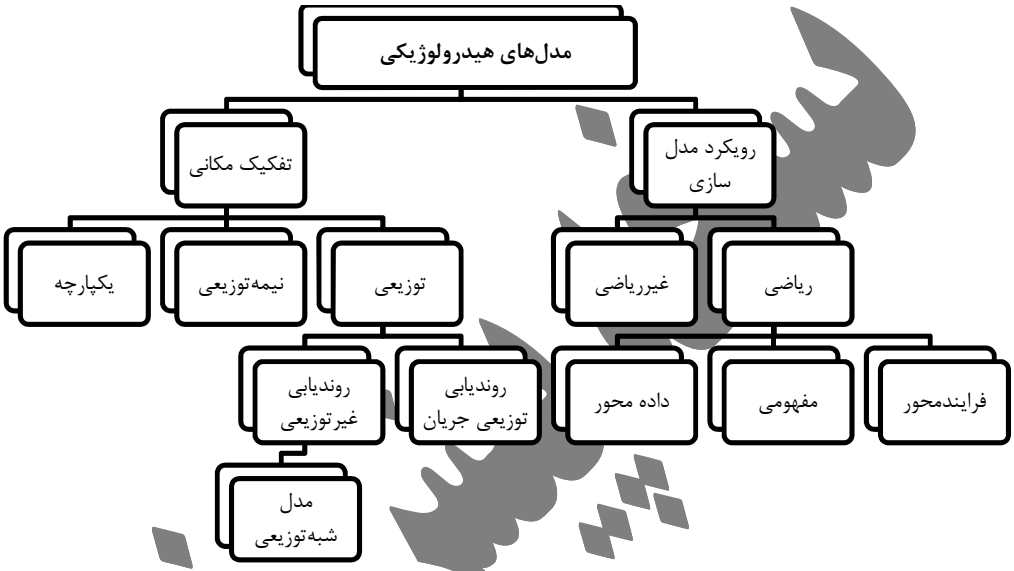
مقدمه

ارزیابی منابع آب، یکی از ارکان مدیریت و سیاست‌گذاری در مدیریت منابع آب بوده و بررسی روش‌های محاسبه بیلان آب یکی از موضوعات دیرین در هیدرولوژی است (سوکولوف وچاپمن، ۱۹۷۴). علاوه بر غیرممکن بودن اندازه‌گیری مستقیم برخی از مؤلفه‌های بیلان آب در حوضه، در حال حاضر برای محاسبه بیلان در ایران مشکلاتی وجود دارد. زمان‌بر بودن به‌دلیل انجام محاسبات به‌صورت دستی و ضرورت اتصال بیلان حوضه‌های مجاور به یکدیگر، کمبود داده‌های موثق برای برآورد بسیاری از متغیرهای هیدرولوژیکی بیلان (در سطح حوضه) و اتکا به روش‌های تجربی (تخمینی) برای برآورد این متغیرها در اکثر حوضه‌های کشور و نبود روش‌های تجربی واسنجی شده بومی، برخی از این مشکلات است (رضوی و همکاران، ۱۳۹۵). همین کمبودها، محققان را بر آن داشته تا با مطالعه‌ی روش‌های تخمین متغیرهای هیدرولوژیکی، گام‌هایی را برای تسهیل مدل‌سازی بیلان بردارند. تلاش‌های قهرمان (۱۳۹۳) منجر به تهیه‌ی پیش‌نویس دستورالعمل روش‌های محاسبه بیلان برای وزارت نیرو شد که یک دستورالعمل عمومی است و برای محاسبه‌ی بیلان در محدوده‌های مختلف، اطلاعات مفیدی را به‌دست می‌دهد. از آنجائی که مدل‌های هیدرولوژیکی معمولاً برای حل یک مسئله خاص در یک منطقه با شرایط اقلیمی خاص تولید می‌شوند، قبل از استفاده از این مدل‌ها در مناطق دیگر، باید به ساختار مدل توجه شود. همچنین، توجه به وجود داده‌های موردنیاز، امری ضروری است. مسئله‌ی مهم دیگر، دسترسی به کد مدل است که در اکثر موارد، این امکان وجود ندارد. برای مدل‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی رویکردهای مختلفی وجود دارد و یک مدل هیدرولوژیکی را می‌توان در یک یا چند دسته قرار داد. داوری و همکاران (۲۰۰۷) به مرور و تقسیم‌بندی رویکردهای مختلف در شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی خاک پرداختند؛ البته به سختی می‌توان یک مدل رایانه‌ای را تعریف کرد که بتواند تمام فرایندهای بیلان منابع آب را به طور کامل تحلیل کند با وجود این، مدل‌های متعددی تهیه شده‌اند تا بتوانند بخشی از فرایندها را شبیه‌سازی کنند. مدل کراوفورد و لینسلی معروف به مدل استنفورد و مدل ساکرامنتو از اولین مدل‌های رایانه‌ای هستند. این مدل‌ها اغلب دارای پارامترهای زیادی هستند که ممکن است در بهبود نتایج تأثیر چندانی نداشته باشند (بورناش، ۱۹۹۵؛ اندرو و دیاوند، ۲۰۰۷). مدل‌های ریاضی به دو دسته داده محور (data-driven models) یا جعبه- سیاه و فرایند محور (process-based models) تقسیم می‌شوند. به مدل‌های فرایند محور، جعبه- سفید و فیزیک پایه (physically based models) نیز گفته می‌شود و در آنها معادلات ریاضی (معمولاً به شکل معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی) استخراج شده از تئوری‌های علم فیزیک، توصیف‌کننده‌ی فرایندهای هیدرولوژیکی هستند و برای حل این معادلات به دانستن شرایط اولیه و شرایط مرزی نیاز است (اندرسون و همکاران، ۲۰۱۵). از طرفی، مدل‌های مفهومی (یا جعبه خاکستری) نیز وجود دارند که براساس روابط فیزیکی میان ورودی‌ها و خروجی‌ها در یک فرم ساده شده عمل می‌کنند که در آن روابط بین ورودی‌ها و خروجی‌ها مشخص است؛ ولی برای سیستم‌های مختلف باید کالیبره شوند. مدل‌های مفهومی مزیت‌هایی نسبت سایر مدل‌ها برای مدل‌سازی بیلان دارند. مدل‌های فرایند محور نیازمند تفکیک مکانی/ زمانی بالایی از داده‌های ورودی (مانند داده‌های هواشناسی و خاک) هستند و مدل‌های جعبه سیاه نیز برای وضعیت‌هایی که ممکن است در وضعیت اقلیم منطقه، ساختار خاک و کاربری اراضی تغییری رخ بدهد، مناسب نیستند (خو و سینگ، ۱۹۹۸). در یک نوع دسته‌بندی دیگر که برای مدل‌های هیدرولوژیکی حوضه متداول است، این مدل‌ها به سه دسته‌ی اصلی توزیعی، نیمه‌توزیعی و یکپارچه تفکیک می‌شوند. به‌دلیل مشکلات و پیچدگی‌های استفاده از مدل‌های فرایند محور یا کاملاً توزیعی (ریزمقیاس) و همچنین با توجه به ضعف مدل‌های یکپارچه در شبیه‌سازی تغییرات مکانی پارامترها در سطح حوضه، در این مقاله مروری بر مدل‌های بیلان با محوریت مدل‌های مفهومی با تفکیک مکانی توزیعی و نیمه‌توزیعی انجام شده است. با توجه به شرایط موجود در مناطقی که هنوز داده و اطلاعات دقیق و موثق هیدرولوژیکی برای واسنجی مدل‌ها وجود ندارد (مانند اکثر حوضه‌های ایران) برای توسعه، واسنجی و بومی‌سازی یک مدل بیلان مفهومی نیز، باید ابتدا مدل‌های ساده‌تر مدنظر قرار گیرد. بنابراین در این مقاله، مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولوژیکی و یا مدل‌های بیلان آب و انرژی (دارای پیچدگی‌های مضاعف برای

www.SID.ir

Archive of SID

کاربردهای خاص) مدنظر نیستند. از جمله می‌توان به مدل‌های SWBM, SWAT, LISFLOOD, WATFLOD, IBIS, FEST-EWB) (فولی و همکاران، ۱۹۹۶؛ آرنولد و همکاران ۱۹۹۸؛ لوئیجتن، ۱۹۹۹؛ واندرنیف و درو، ۲۰۰۸؛ کوئن، ۱۹۹۸؛ کرباری و همکاران، ۲۰۱۵) اشاره کرد. در شکل ۱، دسته‌بندی رویکردهای مدل‌سازی که چارچوب مقاله را تشکیل می‌دهد، نشان داده شده است. ویوکس (۲۰۱۶) بعد از تفکیک قائل‌شدن بین دو مفهوم تولید و روندیابی جریان، اشاره می‌کند که تولید و روندیابی جریان در مدل، می‌توانند براساس پارامترهای توزیعی و یا یکپارچه در نظر گرفته شوند. با در نظر گرفتن این تقسیم‌بندی، می‌توان مدل‌های توزیعی را می‌توان به دو دسته دارای روندیابی توزیعی (سلول به سلول) و روندیابی غیرتوزیعی تقسیم کرد که در این مقاله برای اولین بار این مدل‌ها شبه‌توزیعی نامیده شد.



شکل ۱- دسته‌بندی رویکردهای مدل‌سازی هیدرولوژیکی

یکی از موضوعات کلیدی دیگر در مدل‌سازی بیلان آب، مقیاس است که در انتخاب مدل و رویکرد مدل‌سازی نقش اساسی دارد. درک صحیح از تغییرات زمانی و مکانی متغیرهای بیلان، یکی از شرایط اصلی در نزدیک‌کردن مدل‌سازی به واقعیت است (شارما و همکاران، ۱۹۸۰). محدوده‌ی مکانی مطالعات بیلان آب از کل چرخه‌ی آب در کره زمین تا رطوبت موجود در اطراف برگ گیاهان را شامل می‌شود (قهرمان، ۱۳۹۳). روش، دقت و ساده‌سازی‌های لازم براساس اهداف مطالعه صورت می‌پذیرد و با توجه به مقیاس، دقت موردنظر و معادلات مورد استفاده تغییر خواهد کرد. مدل‌ها و ابزارهای هیدرولوژیکی مخصوص حوضه‌های ریز و متوسط مقیاس وجود دارد. این در حالی است که مدل‌سازی برای حوضه‌های بزرگ با مشکلاتی از جمله روندیابی جریان (در صورت نبود اطلاعات کافی) مواجه است (شولتز، ۱۹۹۴). مقیاس زمانی مدل براساس هدف مطالعه قابل تغییر است. مقیاس سالانه برای اهداف مدیریتی (تخمین آب تجدیدپذیر)، مدل‌های ماهانه برای بررسی تغییرات متغیرها در طول سال و مدل روزانه برای ردیابی رطوبت خاک و بیلان هیدروکلیماتولوژی (به‌دلیل اثر بسیار بالای رطوبت خاک در تبخیر واقعی و تغییرات رطوبت در بازه روز)، توصیه می‌شود. گام زمانی کمتر از روزانه برای شبیه‌سازی تک رخدادها کاربرد دارد.

مواد و روش‌ها

در این بخش، روش‌های تفکیک مکانی مدل‌ها بررسی و مدل‌های مفهومی با تفکیک توزیعی و نیمه‌توزیعی، معرفی شده‌اند.

مدل‌های بیلان از نظر تفکیک مکانی

بسیاری از مدل‌های هیدرولوژیک تولید شده تا دهه‌ی ۶۰ به‌صورت یکپارچه بوده‌اند (شولتز، ۱۹۹۴؛ خو و سینگ،

www.SID.ir

Archive of SID

۲۰۰۴؛ اندرو و دیاموند، ۲۰۰۷). یکی از قدیمی‌ترین مدل‌های بیلان، تورنث وایت و ماتر (۱۹۵۵) است. این مدل به‌عنوان ایده‌ی اصلی بسیاری از مدل‌های بیلان مورد استفاده قرار گرفته است.

مطالعات بسیاری برای نحوه‌ی تقسیم‌بندی حوضه به بخش‌های کوچک‌تر انجام شده است. این تفکیک براساس واحدهای کاربری مشابه و تشابه پوشش گیاهی، واحدهای همگن از نظر شیب و نوع خاک و یا با استفاده از توابع توزیع احتمال (مانند TOPMODEL) و یا روش‌های ترکیبی (یعنی تفکیک به واحدهای بزرگ‌تر سپس تقسیم این واحدها براساس روش‌های معمول) انجام می‌شود (بیون و کیمبرلی، ۱۹۷۹؛ کایت و کوئن، ۱۹۹۲؛ فلوگل، ۱۹۹۵؛ کرایسنوا و همکاران، ۱۹۹۸؛ وولدریج و کالما، ۲۰۰۱). جودوی و همکاران (۲۰۱۶) از رویکرد نیمه‌توزیعی براساس خصوصیات ژئولوژیکی، برای تفکیک آبخوان آبرفتی در یک مدل هیدرولوژیکی برای کاستن از عدم قطعیت‌های برآورد تغذیه آب زیرزمینی در سامانه آبرفت-کارست استفاده کردند. ایزدی و همکاران (۲۰۱۷) در منطقه‌ای در شمال کشور عمان، یک مدل نیمه‌توزیعی توسعه دادند که در آن فرایندهای هیدرولوژیکی سطحی و زیرسطحی در نظر گرفته شده است . SWAT آرنولد و همکاران (۱۹۹۸) و ARNO تودینی (۱۹۹۶) از مدل‌های نیمه‌توزیعی معروف هستند که داشتن پارامترهای فراوان، استفاده آن‌ها را در حوضه‌های فاقد اندازه‌گیری با مشکل مواجه می‌کند. در حالت توزیعی، دو رویکرد واحدهای شبیه‌سازی هیدرولوژیک (آرنولد و همکاران، ۲۰۰۰؛ افستراتیادیس و همکاران، ۲۰۰۸) و تقسیم‌بندی براساس سلول‌های هم اندازه (آرنل، ۱۹۹۹؛ مائئوسن و همکاران، ۲۰۰۰) وجود دارد. بیون (۱۹۹۶) پیشنهاد کرد که برای پی بردن به نحوه‌ی تغییرات، از توابع توزیع مکانی این ویژگی‌ها استفاده شود. ممکن است استفاده از داده‌های با تفکیک مکانی و زمانی بالا همیشه نتایج بهتری را ارائه ندهد (تران و همکاران، ۲۰۱۸). استفاده از DEM با دقت تفکیک بالاتر از داده‌های اصلی باعث ایجاد خطا در شیب و جهت جریان و خطاهای DEM ممکن است با وجود کوچک‌بودن، نقاط بحرانی برای مدل‌های هیدرولوژیکی محسوب شوند (ژانگ و مونت گومری، ۱۹۹۴؛ قهرمان ، ۱۳۹۳). برای جمع‌بندی می‌توان به مطالعه داس و همکاران (۲۰۰۸) بر روی مدل مفهومیHBV که دارای سابقه طولانی بوده و در کشورهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته است، اشاره کرد. در مطالعه‌ی مذکور، این مدل در حالت‌های توزیعی، نیمه‌توزیعی، نیمه‌یکپارچه و یکپارچه اجرا شده است. روش‌های نیمه‌توزیعی به‌کار رفته برای منطقه‌ی مورد مطالعه در این تحقیق نتایج بهتری را نسبت به روش‌های کاملاً توزیعی و کاملاً یکپارچه ارائه داده است. دلیل این نتایج، احتمالاً می‌تواند به سبب تعداد زیاد پارامترها در مرحله‌ی واسنجی برای روش توزیعی و وجود خطا در اثر میان‌یابی بارش با تفکیک مکانی بالا بوده باشد. بنابراین، ریزترشدن تفکیک مکانی یک مدل بدون اینکه دقت داده‌ها و اطلاعات به همان میزان افزایش یابد، خود می‌تواند منشأ ایجاد خطا باشد. در شکل ۲، مدل‌های بیلان از نظر تفکیک مکانی جمع‌بندی شده است.

مدل‌های مفهومی توزیعی و نیمه‌توزیعی

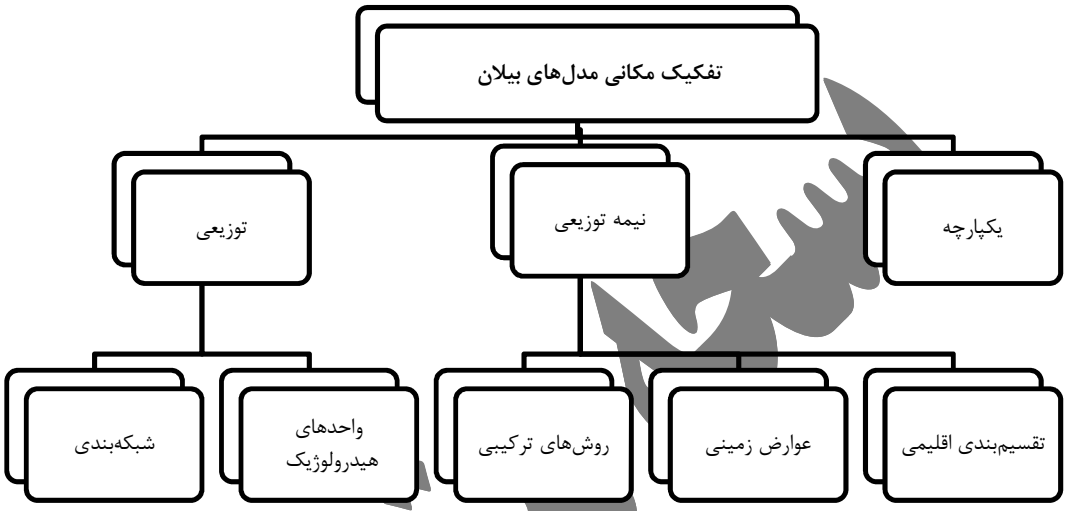
در حوضه‌ها مدل‌های مفهومی بارش- رواناب ارائه‌دهنده‌ی چگونگی تبدیل بارندگی به رواناب، تبخیر- تعرق، حرکت آب به سمت سیستم آب‌زیرزمینی با استفاده از چندین مخزن رطوبتی مرتبط به هم هستند. تغییرات حجم آب در مخازن و ورودی و خروجی‌های مدل توسط روابط ریاضی کنترل می‌شوند. این مدل‌ها را می‌توان به مدل‌های ساده‌ی تک لایه (مارلات و همکاران، ۱۹۶۱؛ فیتزپاتریک و نیکس، ۱۹۶۹) و مدل‌های چند لایه تقسیم کرد (هولمز و رابرتسون، ۱۹۵۹؛ بایر و همکاران، ۱۹۷۹؛ فینچ، ۲۰۰۱).

ضعف مدل‌های تک‌لایه، مدنظر قراردادن توزیع رطوبت خاک و همچنین صعود موئینه از آب زیرزمینی است (جانگ و بوتسما، ۱۹۹۶). مدل‌های رطوبتی خاک در نهایت با دخالت دادن هرچه بیشتر پارامترهایی همچون هدایت هیدرولیکی به روش‌های فیزیکی نزدیک‌تر می‌شوند. معمولاً در مدل‌سازی‌های کاربردی، مدل‌های مفهومی به مدل‌های فرایند-محور ترجیح داده می‌شوند؛ زیرا ضمن ارائه‌ی پاسخ‌های قابل‌قبول، به تلاش محاسباتی و داده‌های ورودی کمتری نیاز دارند. از مدل‌های معروف مفهومی می‌توان مدل HyMod، HBV و FLEX را نام برد (برگستورم، ۱۹۷۶؛ آرنولد و همکاران، ۱۹۹۸؛ فنیکیا، ۲۰۱۱). در ادامه، چند مدل مفهومی ساده معرفی می‌شوند که این مدل‌ها با رویکرد توزیعی و نیمه‌توزیعی، مدل‌سازی بیلان حوضه را انجام می‌دهند؛ این مدل‌ها علاوه بر تفاوتی که با مدل‌های مفهومی یکپارچه دارند، از

www.SID.ir

Archive of SID

مدل‌های توزیعی و ریزمقیاس فرایند محور مانند SHE (اباوت و همکاران،۱۹۸۶) و MODFLOW (مک دانلد و هارباو، ۱۹۸۸) نیز متفاوت‌اند. امروزه با وجود پیشرفت‌هایی که در علوم و فنون و فن‌آوری سنجش از دور رخ داده است؛ ولی هنوز هم استفاده از مدل‌های مفهومی، برای مدل‌سازی و موازنه بیلان نسبت به مدل‌های پیچیده‌تر ترجیح دارند. دلیل این رویکرد را می‌توان در محدودیت اطلاعات برای واسنجی، زمان‌بری و هزینه‌بری، جستجو کرد. نمونه‌ی بارز این رویکرد، مدل SWB است که نسخه‌ی دوم آن در سال ۲۰۱۸ توسط USGS به‌روز شده است (وستنبروک و همکاران، ۲۰۱۸).



شکل۲- جمع‌بندی مدل‌های بیلان از نظر نوع تفکیک مکانی

برای جمع‌بندی این بخش، چند مدل مفهومی ساده معرفی می‌شود. مدل ایدر و همکاران (۲۰۰۵)، یک مدل بیلان نیمه-توزیعی است که رواناب تولید شده از هر زیرحوضه به زیرحوضه دیگر منتقل می‌شود. هر زیرحوضه به چند منطقه‌ی ارتفاعی تقسیم شده که در هر ناحیه‌ی بارندگی و دما و سایر پارامترها با الگوهای توزیعی مختلف محاسبه می‌شود. در مدل Xinanjiang، که برای مناطق مرطوب چین توسعه داده شده است، نیز محاسبات مربوط به پهنه‌بندی داده‌های هواشناسی و زمین‌شناسی و سایر متغیرهای هیدرولوژیکی، در واحد زیرحوضه با استفاده از روش‌های توزیعی انجام می‌گیرد. در مناطق مرطوب رواناب زمانی رخ می‌دهد که رطوبت خاک در حد ظرفیت زراعی باشد. در مناطق خشک و شرایط رگباری شدت بارش بیشتر از نرخ نفوذ بوده و امکان دارد رواناب سطحی قبل از پرکردن ظرفیت ذخیره خاک تولید شود (رن-جان، ۱۹۹۲؛ گو و همکاران، ۲۰۱۶). نسخه اصلاح‌شده‌ی این مدل، هر دو فرایند تولید رواناب را در نظر می‌گیرد (هو و همکاران، ۲۰۰۵). برای مطالعات منطقه‌ای از مدل‌های مفهومی توزیعی با شبکه‌بندی بزرگ مقیاس استفاده شده است. آلئماو و چائوکا (۲۰۰۳) از مدل DGHM با تفکیک مکانی ۳۰ در ۳۰ دقیقه برای جنوب آفریقا استفاده کردند. کانوای (۱۹۹۷) نیز از یک مدل مفهومی با رویکرد شبکه‌بندی استفاده شد؛ ولی واسنجی آن را با رویکرد نیمه‌توزیعی و براساس زیرحوضه‌ها انجام داد؛ چرا که تعداد ایستگاه‌های بارندگی و دوره‌ی ثبت داده‌های دما در حوضه‌ی موردنظر دارای محدودیت بودند. مدل پورتوگیس و همکاران (۲۰۰۵)، از جمله مدل‌های مفهومی توزیعی با ابعاد بزرگ (۱ کیلومترمربع) مناسب برای مناطق نیمه‌خشک است. در مناطق نیمه‌خشک به‌دلیل کمبود ثبت داده‌های هیدرومتریک دقت تخمین تغذیه آب زیرزمینی وابسته به دقت ویژگی‌های مکانی سطح زمین دخیل در معادله بیلان است. پارامترهای موردنیاز در این مدل براساس داده‌ها و اطلاعات پیشین بدون نیاز به واسنجی تعیین می‌شود. مدل میزان رواناب زیرسطحی و نفوذ عمقی را با استفاده از ضریبی مرتبط با بافت و ژئومورفولوژی زیرسطحی، از یکدیگر جدا می‌شود. تبخیر-تعرق با استفاده از ضرایب گیاهی برای پوشش‌های گیاهی با در نظر گرفتن تراکم و اعمال تنش رطوبتی خاک

www.SID.ir

Archive of SID

محاسبه شده است. RHINEFLOW، یک مدل بیلان برای حوضه‌ی رودخانه Rhine است. تمام داده‌های موردنیاز به‌صورت لایه‌های رستری با تفکیک مکانی ۳ در ۳ کیلومتر تهیه شده و با استفاده از ابزار WATERSHED با مدل مرتبط می‌شوند. همچنین، این ابزار امکان روندیابی جریان را فراهم می‌آورد (کوادجیک و رتمانس، ۱۹۹۵). STREAM، یک مدل توزیعی با مقیاس‌های مکانی و زمانی مختلف مبتنی بر GIS برای حوضه‌های آبریز رودخانه‌ای بزرگ و مناطق ساحلی و مدلی براساس مدل RHINEFLOW است (آئرتس و همکاران، ۱۹۹۹). WATBAl از هر دو رویکرد منظم و نامنظم برای تفکیک مکانی حوضه بهره می‌برد؛ به این ترتیب که از روش توزیعی برای داده‌های هواشناسی، و از واحدهای واکنش هیدرولوژیکی برای تقسیم‌بندی ویژگی‌های توپوگرافی، خاک و پوشش گیاهی استفاده می‌کند (کازمارک، ۱۹۹۳). مدل J2000g، نیز از هردو رویکرد بهره می‌برد (دئوس و همکاران، ۲۰۱۳).

پشتیبانی مدل‌سازی با GIS

مدل‌هایی که دارای پارامترهای متغیر مکانی هستند و در واقع تمام مدل‌های هیدرولوژیک برای شبیه‌سازی فعل و انفعالات حوضه می‌توانند از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده کنند (میدمنت، ۱۹۹۶). قهرمان (۱۳۹۳) به‌طور مفصل به این موضوع پرداخته‌اند. نحوه‌ی ارتباط سیستم اطلاعات جغرافیایی با یک مدل بسته به اهداف موردنظر دارای مراتب مختلفی است: ۱- ممکن است مدل هیدرولوژیک و GIS با یکدیگر ارتباط نداشته و تنها تبادل اطلاعات از دو سیستم انجام گیرد (استورک و همکاران، ۱۹۹۸؛ سینگ و همکاران، ۲۰۰۴؛ فیکوس و همکاران، ۲۰۰۵)؛ ۲- تبادل اطلاعات میان دو سامانه به‌صورت خودکار انجام شود (لیو، ۲۰۰۵)؛ و ۳- توانایی تغییر در پارامترها و فرایندها در یک سیستم واحد امکان‌پذیر باشد (اسمیت و میدمنت، ۱۹۹۵؛ هوانگ و جیانگ، ۲۰۰۲). افزونه‌هایی همچون ArcGIS-SWAT، PRO-GRADE، THESEUS، HDDS، ArcCN-Runoff برای شبیه‌سازی مؤلفه‌های هیدرولوژیکی و محاسبات شیب، زمان تمرکز و شبکه‌ی زهکش حوضه و محاسبه‌ی شماره‌ی منحنی تا به امروز تولید شده است (میدمنت، ۱۹۹۶؛ وگهنکل، ۲۰۰۲؛ داینیش، ۲۰۰۸: لین و همکاران، ۲۰۰۹).

نتایج و بحث

در این بخش، برخی از مدل‌های مطالعه شده در قالب جدول ۱ دسته‌بندی شده‌اند. مدل‌های دسته‌بندی شده یک یا چند ویژگی دارند: ۱- مدل‌های مفهومی هستند؛ ۲- دارای حداقل پارامتر یا تعداد پارامتر کم برای واسنجی هستند؛ ۳- مناسب برای بیلان هستند (از این نظر که برای هدف خاصی مانند شبیه‌سازی سیلاب نباشند)؛ ۴- مناسب برای شرایط خشک و نیمه‌خشک هستند؛ و ۵- نرم‌افزار یا کد قابل دسترس دارند. اضافه‌شدن برخی از مدل‌ها به این جدول، مانند مدل‌های HBV، BILAN و SWB به این دلیل است که یک مدل رایانه‌ای هستند و می‌توانند به‌عنوان مدل‌های آزمایشی مورد ارزیابی قرار گیرند. مدل ژانگ و همکاران (۲۰۰۸) نیز به‌دلیل استفاده از روش بادیکو (روش متفاوت از بیلان رطوبتی)، می‌تواند مورد توجه و آزمایش قرار گیرد. در جدول ۲، به شرح سایر ویژگی‌های مدل‌های جدول ۱ پرداخته شده است. تعداد پارامترهای موردنیاز برای واسنجی، مسئله‌ای است که در تحقیقات مختلف به آن توجه شده است. مدل Boughton، توسط عبدالله و بدرانی (۲۰۰۰) برای سه حوضه‌ی مختلف در عراق و با ایجاد اصلاحاتی مبتنی بر تغییر تعداد پارامترهای واسنجی، اجرا شده است. مدل اصلی تنها سه پارامتر واسنجی دارد و بقیه‌ی پارامترها ثابت فرض شده‌اند. در حالت‌های بعدی، دو و سه پارامتر دیگر به پارامترهای آزاد اضافه می‌شود. نتایج کلی نشان‌دهنده‌ی وضعیت قابل قبول در حالت پنج پارامتری نسبت به سه پارامتری بوده و این در حالی است که با افزایش تعداد پارامترهای واسنجی به شش پارامتر، تغییر چندانی در نتایج حاصل نگردید. بررسی‌های خو و سینگ (۱۹۹۸) نشان داد که مدل‌های مفهومی نسبتاً پیچیده با ۱۰ تا ۱۵ پارامتر برای مناطق خشک کاربرد شده اند؛ در حالیکه از مدل‌های ۲ تا ۵ پارامتری نیز می‌توان برای مناطق مرطوب استفاده کرد.

نتیجه‌گیری

هدف این تحقیق، بررسی مدل‌ها و روش‌های محاسبه بیلان در مناطق مختلف بوده است؛ در عین حال، با توجه به مزیت/معایب مختلف این روش‌ها، مدلی که قابلیت اجرا در حوضه‌های ایران را داشته باشد نیز مدنظر قرار گرفت. در این مقاله، تقریباً به تمام انواع مدل‌های مرتبط با بیلان

www.SID.ir

Archive of SID

اشاره شده است که مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولوژیکی و مدل‌های فیزیکی کاملاً توزیعی تا مدل‌های مفهومی توزیعی و نیمه‌توزیعی را شامل می‌شود. عیب مدل‌های فرایند-محور، نبود داده‌های کافی با تفکیک مکانی مناسب در سطح حوضه، برای واسنجی و اعتبارسنجی و تعمیم این مدل‌ها به مناطق مختلف است.

جدول ۱- جمع‌بندی مدل‌های بیلان

مدل	داده‌های ورودی	خروجی‌های مدل	شیوه برآورد متغیرها	مقیاس مکانی	مقیاس زمانی	نوع بیلان	اجزای زیرزمینی	روندیابی
HBV ۱۹۷۳	بارش، تبخیر-تعرق پتانسیل، دما (ذوب برف) کاربری، خاک و توپوگرافی (نیمه‌توزیعی‌سازی)	رواناب (سطحی و زیرسطحی)، باران‌گیرش، ذوب برف، رطوبت خاک، تبخیر-تعرق (بیلان رطوبت)	یکپارچه، توزیعی و نیمه‌توزیعی	حوضه، زیرحوضه شبکه‌بندی و HRU	ساعتی، روزانه ماهانه	سطحی: دو لایه	زیرسطحی: یک لایه نفوذ عمقی، جریان پایه	یکپارچه
کانوای ۱۹۷۹	بارش، دما تبخیر پتانسیل مشاهده‌ای، توپوگرافی	رواناب، تبخیر-تعرق واقعی (روش: بیلان رطوبتی)	توزیعی: واسنجی در زیرحوضه	شبکه بزرگ (۱۰ دقیقه)	ماهانه	سطحی: یک لایه	ندارد	ندارد
پورتوگیس ۲۰۰۵	بارش، تبخیر پتانسیل، کاربری و ضرایب گیاهی، خاک و توپوگرافی، ورودی/خروجی زیرزمینی، برداشت‌ها	رواناب (سطحی و زیرسطحی)، نفوذ، رطوبت خاک، آبیاری، تبخیر واقعی (بیلان رطوبتی و ضرایب گیاهی)	توزیعی (بیلان سطحی) و یکپارچه (بیلان زیرزمینی)	شبکه‌بندی: یک کیلومتر	ماهانه	سطحی:یک لایه، زیرزمینی: یک لایه	نفوذ عمقی، برداشت‌ها، ورود/ خروج جریان	ندارد
J2000g ۲۰۰۶	بارش، دما، ساعت آفتابی، رطوبت، باد، کاربری، توپوگرافی، خاک و زمین‌شناسی	رواناب (سطحی و پایه)، نفوذ، تبخیر-تعرق واقعی (روش: بیلان رطوبتی) انباشت و ذوب برف	توزیعی و نیمه توزیعی	شبکه‌بندی و HRU	روزانه ماهانه	سطحی: یک لایه	جریان پایه، نفوذ عمقی	ندارد
ژانگ ۲۰۰۸	رواناب مشاهده‌ای بارش و تبخیر پتانسیل ماهانه	رواناب، نفوذ، تبخیر-تعرق واقعی (روش: بادیکو)	یکپارچه	حوضه	روزانه ماهانه، سالانه	سطحی: یک لایه	جریان پایه	ندارد
BILAN ۲۰۱۵ موسسه تحقیقاتی T. G. Masaryk	بارش، دما رواناب مشاهده‌ای، رطوبت نسبی، جریان پایه تبخیرپتانسیل، داده‌های برداشت	نفوذ و تغذیه، انباشت برف، رواناب (مستقیم، زیرسطحی و پایه)، تبخیر-تعرق پتانسیل و واقعی (روش: بیلان رطوبتی)	یکپارچه	حوضه	روزانه ماهانه	سطحی: یک لایه، زیرزمینی: یک لایه	جریان پایه	ندارد
SWB-USGS ۲۰۱۸	بارش، دما، رطوبت نسبی و داده‌های تبخیر پتانسیل (هارگیوز، جنسن) کاربری، توپوگرافی و خاک	تغذیه، رواناب، ذوب برف برگاب، رطوبت خاک، آبیاری، تبخیر واقعی (بیلان رطوبتی و Kc)	توزیعی	شبکه: ۱۰۰ تا ۱۵۰۰ متر	روزانه (نتایج ماهانه هم دارد)	سطح: یک لایه	نفوذ عمقی	توزیعی

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۲- برخی از مشخصات مدل‌های انتخاب شده

HBV	برای حوضه‌های مختلف کاربرد شده است. دارای ۱۴ پارامتر است که کاربرد آن را در حالت توزیعی با مشکل مواجه می‌کند. در اصل یک مدل نیمه‌توزیعی بوده. در لینک زیر، یک نسخه‌ی یکپارچه از مدل با چارچوب MOEA وجود دارد: http://jdherman.github.io/awr-hbv-benchmark
کانوای	برای حوضه‌ی بزرگ مقیاس (دارای تنوع اقلیم در آفریقا) کاربرد شده است. دارای ۳ مؤلفه است. با وجود توزیعی‌بودن مدل، ولی در مرحله واسنجی از رویکرد نیمه‌توزیعی استفاده شده است. با توجه به ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه (پوشش گیاهی پراکنده، شیب تند و خاک کم‌عمق و لخت) و نبود داده‌های لازم، روندیابی جریان انجام نشده است.
پورتوگیس	همه‌ی متغیرها به‌صورت توزیعی محاسبه می‌شود. روندیابی جریان انجام نمی‌شود؛ ولی رواناب تجمیعی سلول‌هایی که در مناطق مؤثر تولید رواناب هستند، به عنوان رواناب آبراهه‌ای در نظرگرفته می‌شود. مخصوص مناطق خشک و نیمه‌خشک. حداقل فرضیات لازم و در عین حال کافی برای یک مدل بیلان که بتواند بدون پیچیدگی‌های اضافی بیلان را محاسبه کند.
J2000g	دارای ۶ پارامتر است. روندیابی جریان انجام نمی‌شود. با توجه به تعداد پارامترها و توزیعی‌بودن مدل در صورت نبود داده‌های مناسب واسنجی مدل به آسانی انجام نخواهد گرفت و باید واسنجی برای دوره‌های کوتاه انجام گیرد. مدل در چارچوب مدل‌سازیJAMS قابل اجرا است: http://jams.uni-jena.de/jamsblog
ژانگ	برای حوضه‌های کوچک و متوسط (۵۰ تا ۲۰۰۰ کیلومترمربع) کاربرد شده است. براساس فرضیات بادیکو بوده و در مقیاس‌های سالانه، ماهانه و روزانه استفاده شده است، بنابراین تغییرات ذخیره‌ی رطوبت خاک نیز به‌صورت تابعی از بارش در نظر گرفته شده است. اساساً بادیکو، یک رویکرد بالا به پایین است (برای یافتن یک درک مفهومی در مرحله بالاتر و حرکت به سمت مرحله پایین‌تر)
BILAN	در حالت روزانه ۶ و ماهانه ۸ پارامتر دارد و دارای نرم‌افزار و ابزار کالیبراسیون است. در سه شرایط تابستان، زمستان و ذوب برف محاسبات را جداگانه انجام می‌دهد. دسترسی به کد آزاد است (نسخه ۲۰۱۵) https://github.com/cran/bilan
SWB	براساس تورنت وایت اصلاح‌شده در مقیاس روزانه است. پیچیدگی‌های احتمالی: روندیابی جریان (در صورت کمبود داده مناسب). مدل دارای گزینه‌های جایگزین در انتخاب روش محاسبه تبخیر پتانسیل است. دستیابی به کد (فرترن) در لینک زیر (نسخه ۱): https://www.usgs.gov/software/swb-modified-thornthwaite-mather-soil-water-balance-code-estimating-groundwater-recharge

مدل‌های داده-محور نیز مناسب برای وضعیت‌های متغیر اقلیمی/ زمین‌شناسی نیستند. امروزه، علاوه بر مدل‌های توزیعی سنتی ریزمقیاس، مدل‌های بیلان با رویکرد توزیعی بزرگ‌مقیاس نیز وجود دارند. اگرچه رویکرد توزیعی انطباق بهتری با ماهیت فرایندهای هیدرولوژیک در سطح حوضه را داراست؛ ولی با توجه به پارامترهای زیادی که مدل‌های مفهومی در حالت توزیعی دارند، واسنجی این مدل‌ها را با مشکل روبه‌رو می‌کند. بنابراین، در یک مدل مفهومی نیز با دخالت دادن قیود فیزیکی حاکم بر حوضه و استفاده از روش ابتکاری با فرضیات ساده‌سازی و ضرایب نسبی، می‌توان محدوده‌ی منطقی تغییرات پارامتر را شناسایی و از عدم قطعیت آن کم کرد. مدل‌هایی که در جدول ۱ ارائه شده است، با توجه به دارا بودن یک یا چند ویژگی در این جدول قرار گرفتند که در بخش قبل به شرح آن‌ها پرداخته شده است: ۱- مدل‌های ریاضی مفهومی هستند؛ ۲- برخی از آن‌ها در حالت‌های مختلف برای مناطق مختلف به کار رفته‌اند؛ ۳-برخی از آن‌ها برای مناطق خشک و نیمه‌خشک استفاده شده است؛ ۳- برخی از آن‌ها از چارچوب بادیکو برای تبخیر استفاده می‌کنند؛ و ۴- برخی نیز به‌خاطر قابل دسترس‌بودن کد مدل و داشتن نرم‌افزار و حد واسط گرافیکی مد نظر قرار گرفته‌اند. به نظر می‌رسد این ویژگی‌ها به‌عنوان معیارهای اولیه برای انتخاب یک مدل، می‌توانند مورد توجه قرار گیرند. بدیهی است قضاوت نهایی باید بعد از ارزیابی مدل برای مناطق مختلف انجام گیرد؛ از آنجایی که یک مدل عمومی واحدی را نمی‌توان برای همه مناطق معرفی کرد، بهتر است با اقتباس از مدل‌ها، یک چارچوب و الگوریتم مناسب با در نظرگرفتن شرایط محلی تهیه شود. با توجه به معیارهای ذکرشده، مدل پورتوگیس و همکاران (۲۰۰۵) مورد ارزیابی دقیق‌تری قرار گرفت. به‌دلیل پارامترهای زیادی که در معادله‌ی بیلان وجود دارد و عدم قطعیت‌های غیرقابل انکار، با انتخاب هرگونه ساختاری برای مدل بیلان، در نهایت برای موازنه معادله بیلان نیاز به روش‌های بهینه‌سازی وجود دارد. مدل پورتوگیس با وجود پرهیز از پیچیدگی‌های احتمالاً غیرضرور برای یک مدل بیلان کاربردی (حوضه)، تقریباً تمام فرایندهای هیدرولوژیکی را مدنظر قرار می‌دهد. ویژگی بارز این مدل که آن را از سایر مدل‌ها جدا می‌کند، پارامترهای با فهم فیزیکی (مانند مناطق مؤثر تولید رواناب و مشخصات ژئومورفولوژیکی زیرسطحی) آن است. این مدل توسط

www.SID.ir

Archive of SID

رضوی (۱۳۹۲) و رضوی و همکاران (۱۳۹۵) برای محدوده‌ی نیشابور-رخ (خراسان رضوی) در محیط متلب پیاده‌سازی و کدنویسی شد و با به کارگیری تغییرات لازم برای منطقه‌ی مورد مطالعه اجرا و QDWB (Quasi Balance model Distributed Water) نامیده شد. شبه‌توزیعی نامیدن مدل تنها به‌دلیل عدم روندیابی جریان از یک سلول به سلول دیگر است. مدل براساس مفهوم مناطق مؤثر در رواناب از مجموعه‌ای از سلول‌های یک محدوده‌ی مشخص برای رواناب استفاده می‌کند. نتایج نشان‌دهنده‌ی تطبیق کلی مدل با فرآیندهای هیدرولوژیکی حاکم بر حوضه بوده و نتایج تبخیر-تعرق مدل با نتایج SWAT که توسط ایزدی و همکاران (۲۰۱۵) برای همان منطقه کالیبره شده است، مقایسه گردید که نتایج نشان‌دهنده‌ی انطباق کامل روند نتایج است. مدل اصلاح‌شده در قالب طرح پژوهشی برای آب منطقه‌ای خراسان رضوی و در محدوده‌های مطالعاتی رخ، نیشابور، سنگرد (قلعه‌بان)، عطائیه، سبزوار و داورزن مورد ارزیابی قرار گرفته است.

منابع

۱. رضوی س. س. ۱۳۹۲. توسعه مدل شبه توزیعی برای برآورد بیلان، (QDWB) و ارزیابی آن در محدوده مطالعاتی رخ- نیشابور. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. ۱۱۹ ص.

۲. رضوی کهنمویی س. س. داوری ک. قهرمان ب. ضیائی ع. ن. و ایزدی ع. ۱۳۹۵. توسعه مدل شبه توزیعی برای برآورد بیلان QDWB و ارزیابی آن در محدوده مطالعاتی رخ- نیشابور. فصلنامه آب و خاک. ۳۰(۶): ۱۸۸۸-۱۹۰۴.

۳. قهرمان ب. ۱۳۹۳. دستورالعمل روش‌های محاسبه بیلان منابع آب. وزارت نیرو، معاونت امور آب و آبفا، دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا -دانشگاه فردوسی مشهد، کمیته تخصصی مدیریت منابع آب طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور. ۴۱۸- الف.

http://shaghool.ir/downloadarea.php?id=۳۳۵۶۴

4. Abbott M. B. Bathurst J. C. Cunge J. A. O'Connell P. E. and Rasmussen J. 1986. An introduction to the European Hydrological System — Systeme Hydrologique Europeen, “SHE”, 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system. Journal of Hydrology. 87(1):61-77.
5. Abdulla F. and Al-Badranih L. 2000. Application of a rainfall-runoff model to three catchments in Iraq. Hydrological Sciences Journal. 45(1): 13-25.
6. Aerts J. Kriek M. and Schepel M. 1999. STREAM (spatial tools for river basins and environment and analysis of management options): ‘set up and requirements. Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere. 24(6): 591-595.
7. Alemaw B. Chaoka T. 2003. A continental scale water balance model: a GIS-approach for Southern Africa. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. 28(20): 957-966.
8. Anderson M. P. Woessner W. W. and Hunt R. J. 2015. Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport. Academic press. 630 p.
9. Andrew R. M. and Dymond J. R. 2007. A distributed model of water balance in the Motueka catchment, New Zealand. Environmental Modelling & Software. 22(10): 1519-1528.
10. Arnell N. W. 1999. A simple water balance model for the simulation of streamflow over a large geographic domain. Journal of Hydrology. 217(3-4): 314-335.
11. Arnold J. G. Muttiah R. S. Srinivasan R. and Allen P. M .2000. Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin. Journal of Hydrology. 227(1): 21-40.
12. Arnold J. G. Srinivasan R. Muttiah R. S. and Williams J. R. 1998. Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development. JAWRA Journal of the American Water Resources Association. 34(1): 73-89.
13. Baier W. Dyer J. A. and Sharp W. R .1979. The versatile soil moisture budget. Tech. Bull. 87, Land Resource Research Institute, Agriculture Canada, Ottawa, ON. 52 p.
14. Bergström S. 1976. Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments, SMHI, Report No. RHO 7, Norrköping. 134 p.
15. Beve K. J. and Kirkby M. J. 1979. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. Hydrologic Sciences Bulletin. 240(1): 43-69.
16. Beven K. J. 1996. A Discussion of Distributed Hydrological Modelling. In M. B. Abbott & J. C. Refsgaard (Eds.), Distributed Hydrological Modelling. Dordrecht Springer Netherlands. 255-278.

www.SID.ir

Archive of SID

17. Burnash R. J. C .1995. The NWS River Forecast System - catchment modeling. In: Singh, V. P. (Ed.). Computer Models of Watershed Hydrology. pp. 311-366.
18. Conway D. 1997. A water balance model of the Upper Blue Nile in Ethiopia. Hydrological Sciences Journal. 42(2): 265-286.
19. Corbari C. Timmermans W. and Andreu A. 2015. Intercomparison of surface energy fluxes estimates from the FEST-EWB and TSEB models over the heterogeneous REFLEX 2012 site (Barrax, Spain). Acta Geophysical. 63(6): 1609-1638.
20. Das T. Bárdossy A. Zehe E. and He Y. 2008. Comparison of conceptual model performance using different representations of spatial variability. Journal of Hydrology. 356(1-2): 106-118.
21. Davary K. Ghahraman B. and Sadeghi M. 2007. Review and Classification of Modeling Approaches of Soil Hydrology Processes. Iran Agricultural Research. 27: 1-2.
22. Deus D. Gloaguen R. and Krause P. 2013. Water Balance Modeling in a Semi-Arid Environment with Limited in situ Data Using Remote Sensing in Lake Manyara, East African Rift, Tanzania. Remote Sensing. 5(4): 1651.
23. Dinesh S. 2008. Extraction of hydrological features from digital elevation models using morphological thinning. Asian Journal Scientific Research. 1:310-323.
24. Eder G. Fuchs M. Nachtnebel H. P. and Loibl W. 2005. Semi-distributed modelling of the monthly water balance in an alpine catchment. Hydrological Processes. 19(12): 2339-2360.
25. Efstratiadis A. Nalbantis I. Koukouvinos A. Rozos E. and Koutsoyiannis D. 2008. HYDROGEIOS: a semi-distributed GIS-based hydrological model for modified river basins. Hydrology and Earth System Sciences. 12(4): 989-1006.
26. Fenicia F. Kavetski D. and Savenije H. H. G. 2011. Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling: 1. Motivation and theoretical development. Water Resources Research. 47: W11510.
27. Fikos I. Ziankas G. Rizopoulou A. and Famellos S. 2005. Water balance estimation in Anthemountas river basin and correlation with underground water level. Global nest. The international journal. 7(3): 354-359.
28. Finch J. 2001. Estimating change in direct groundwater recharge using a spatially distributed soil water balance model. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. 34(1): 71-83.
29. Fitzpatrick E. and Nix H. 1969. A model for simulating soil water regime in alternating fallow-crop systems. Agricultural Meteorology. 6(5): 303-319.
30. Flügel W. A. 1995. Delineating hydrological response units by geographical information system analyses for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the River Bröl, Germany. Hydrological Processes. 9(3-4): 423-436.
31. Foley J. A. Colin P. I. Ramankutty N. Levis S. Pollard D. Sitch S. and Haxeltine A. 1996. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. Global Biogeochemical Cycles. 10(4): 603-628.
32. Guo Wj. Wang Ch. Ma Tf. Zeng Xm. and Yang H. 2016. A distributed Grid-Xinanjiang model with integration of subgrid variability of soil storage capacity. Water Science and Engineering. 9(2): 97-10.
33. Holmes R. M. and Robertson G. W. 1959 A Modulated Soil-Moisture Budget. Monthly Weather Review. 87: 101-106.
34. Hu C. Guo S. Xiong L. and Peng D. 2005. A modified Xinanjiang model and its application in northern China. Hydrology Research. 36(2): 175-192.
35. Huang B. and Jiang B. 2002. AVTOP: a full integration of TOPMODEL into GIS. Environmental Modelling & Software. 17(3): 261-268.
36. Institute for Environment and Sustainability: Ispra, Italy. 109 p.
37. Izady A. Abdalla O. Joodavi A. Karimi A. Chen M. and Tompson A. F. B .2017. Groundwater recharge estimation in arid hardrock-alluvium aquifers using combined water-table fluctuation and groundwater balance approaches. Hydrological Processes. 31(19): 3437-3451.
38. Izady A. Davary K. Alizadeh A. Ziaei A. N. Akhavan S. Alipoor A. Joodavi A. and Brusseau M. L. 2015. Groundwater conceptualization and modeling using distributed SWAT-based recharge for the semi-arid agricultural Neishaboor plain, Iran. Hydrogeology Journal. 23(1): 47-68.
39. Jong R. D. and Bootsma A. 1996. Review of recent developments in soil water simulation models. Canadian Journal of Soil Science. 76(3): 263-273.
40. Joodavi A. Zare M. Raeisi E. and Ahmadi M. B. 2016. A Multi-Compartment Hydrologic Model to Estimate Groundwater Recharge in an Alluvial-Karst System. Arabian Journal of Geosciences. 9(3): 1-13.
41. Kaczmarek Z. 1993. Water balance model for climate impact analysis. ACTA Geophysica Polonica. 41(4): 1-16.

www.SID.ir

Archive of SID

42. Kite G. and Kouwen N. 1992. Watershed modeling using land classifications. Water Resources Research. 28(12): 3193-3200.
43. Kouwen N. 1988. WATFLOOD Users manual. Water Resources Group, University of Waterloo. 125 p.
44. Krysanova V. Müller-Wohlfeil D. I. and Becker A. 1998. Development and test of a spatially distributed hydrological/water quality model for mesoscale watersheds. Ecological Modelling. 106(2): 261-289.
45. Kwadijk J. and Rotman J. 1995 The impact of climate change on the river Rhine: a scenario study. Climatic Change. 30(4): 397-425.
46. Lin Y. F. Wang J. and Valocchi A. J. 2009. PRO-GRADE: GIS Toolkits for Ground Water Recharge and Discharge Estimation. Ground water. 47(1): 122-128.
47. Liu Z. 2005. ArcTOP: a distributed hydrologic modeling system of tight coupling TOPKAPI with GIS. Hydrology. 25(4): 1.
48. Luijten J. C. 1999. A tool for community-based water resources management in hillside watersheds. Doctoral dissertation, University of Florida. 303 p.
49. Maidment D. 1996. GIS and hydrologic modeling-an assessment of progress. Paper presented at the Third International Conference on GIS and Environmental Modeling, Santa Fe, New Mexico. http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/gishydro/meetings/santafe/santafe.htm#Part5
50. Marlatt W. Havens A. Willits N. and Brill G. 1961. A comparison of computed and measured soil moisture under snap beans. Journal of Geophysical Research. 66(2):535-541.
51. Matheussen B. Kirschbaum R. L. Goodman I. A. O'Donnell G. M. and Lettenmaier D. P. 2000. Effects of land cover change on streamflow in the interior Columbia River Basin (USA and Canada). Hydrological Processes. 14(5): 867-885.
52. McDonald M. G. and Harbaugh A. W. 1988. A Modular Three-dimensional Finite-Difference Ground-water Flow Model. U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations. 06-A1, 576.
53. Portoghese I. Uricchio V. and Vurro. M. 2005. A GIS tool for hydrogeological water balance evaluation on a regional scale in semi-arid environments. Computers & geosciences. 31(1): 15-27.
54. Ren-Jun Z. 1992. The Xinanjiang model applied in China. Journal of Hydrology. 135(1): 371-381.
55. Schultz G. A. 1994. Meso-scale modelling of runoff and water balances using remote sensing and other GIS data. Hydrological Sciences Journal. 39(2): 121-142.
56. Sharma M. Gander G. and Hunt C. 1980. Spatial variability of infiltration in a watershed. Journal of Hydrology. 45(1): 101-122.
57. Singh R. K. Prasad V. H. and Bhatt C. M. 2004. Remote sensing and GIS approach for assessment of the water balance of a watershed. Hydrological sciences journal. 49(1): 131-141.
58. Smith P. N. and Maidment D. R. 1995. Hydrologic Data Development System. CRWROnline Report 95-1. Center for Research in Water Resource.
59. Sokolov A. A. and Chapman T. G. 1974. Methods for water balance computations; an international guide for research and practice-A contribution to the International Hydrological Decade. 122 p.
60. Storck P. Bowling L. Wetherbee P. and Lettenmaier D. 1998. Application of a GIS-based distributed hydrology model for prediction of forest harvest effects on peak stream flow in the Pacific Northwest. Hydrological Processes. 12(6): 889-904.
61. T. G. Masaryk Water Research Institute in Prague. 2015. Bilan water balance model Manual. 51 p. http://bilan.vuv.cz/bilan/user-manual-model-bilan/
62. Thornthwaite C. W. and Mather J. R. 1955. The water balance, Publ. Climatol. Lab. Climatol.Dresel Inst. Technol. 8(8): 1-104.
63. Todini E. 1996. The ARNO rainfall—runoff model. Journal of Hydrology. 175(1): 339-382.
64. Tran Q. Q. De Niel J. and Willems P. 2018. Spatially distributed conceptual hydrological model building: A generic top-down approach starting from lumped models. Water Resources Research. 54: 8064-8085.
65. Vieux B. E. 2016. Distributed Hydrologic Modeling Using GIS. Springer Netherlands. 289 p.
66. Wegehenkel M. 2002. Estimating of the impact of land use changes using the conceptual hydrological model THESEUS—a case study. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. 27(9-10): 631-640.
67. Westenbroek S. M. Engott J. A. Kelson V. A. and Hunt R. J. 2018. SWB Version 2.0—A Soil-Water-Balance code for estimating net infiltration and other water-budget components. U.S. Geological Survey Techniques and Methods. book 6, chap. A59. 118 p.
68. Wooldridge S. A. and Kalma J. D. 2001. Regional-scale hydrological modelling using multiple-parameter landscape zones and a quasi-distributed water balance model.

www.SID.ir

Archive of SID

Hydrology and Earth System Sciences. 5(1): 59-74.

69. Xu C. Y. and Singh V. P. 1998. A review on monthly water balance models for water resources investigations. Water Resources Management. 12(1): 20-50.
70. Xu C. Y. and Singh V. P. 2004. Review on regional water resources assessment models under stationary and changing climate. Water Resources Management. 18(6): 591-612.
71. Zhang L. Potter N. Hickel K. Zhang Y. and Shao Q. 2008. Water balance modeling over variable time scales based on the Budyko framework.
72. Zhang W. and Montgomery D. R. 1994. Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. Water Resources Research. 30(4): 1019-1028.

نسخه پیش نویس

www.SID.ir