

توسعه مدل شبیه‌سازی توزیعی مکانی-زمانی وقایع بارش-رواناب با کمک سامانه اطلاعات جغرافیایی و زبان برنامه‌نویسی PCRaster

واحدبردی شیخ^{۱*}، رویا جعفری^۲، محسن حسینعلی‌زاده^۲ و حسن رضایی مقدم^۴

^۱ دانشیار، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ^۲ کارشناس ارشد، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ^۳ استادیار، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان و ^۴ دانشجوی دکتری گروه آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۲۱

چکیده

برآورد دقیق واکنش یک حوزه آبخیز به رخدادهای بارش در مدیریت منابع آب و خاک آن و همچنین، طراحی سازه‌های عمرانی در داخل حوضه و پائین‌دست آن روی آبراهه‌ها و رودخانه‌ها یا در مجاور آن‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. با توجه به افزایش شناخت و درک نسبی از سامانه‌های حوزه آبخیز و گسترش فناوری‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری و تسهیل یادگیری و کاربرد این فناوری‌ها، امروزه پژوهشگران ترجیح می‌دهند، مدل مورد نیاز خویش را با توجه به هدف خود و شرایط داده‌ای موجود طراحی و استفاده کنند. هدف از این پژوهش، توسعه مدل توزیعی مکانی-زمانی در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی و برنامه‌نویسی PCRaster برای دستیابی به روش بهینه نمایش فرایندهای حوزه آبخیز در مقیاس یک آبخیز زراعی کوچک است. در این پژوهش، یک مدل هیدرولوژیکی توزیعی مکانی-زمانی رخدادمحور در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی و مدل‌سازی PCRaster طراحی و توسعه یافت و کارایی آن با استفاده از داده‌های مشاهداتی زیرحوضه زراعی منتهی به شهرک بهزیستی گرگان به مساحت ۲۷/۶ هکتار که در طول پژوهش مورد پایش و داده‌برداری قرار گرفت، ارزیابی شد. مدل مورد نظر، از نوع یک مدل با اتصال سخت به GIS است. در طی انجام این پژوهش، فقط دو رویداد بارش در تاریخ‌های ۱۳۹۳/۰۸/۱۱ و ۱۳۹۴/۰۶/۲۵ منجر به ایجاد رواناب شد که به ترتیب از این رویدادها برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل استفاده شد. مقایسه آماری هیدروگراف‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی رگبارهای مورخه ۱۳۹۳/۰۸/۱۱ و ۱۳۹۴/۰۶/۲۵ نشان داد که ضریب همبستگی آن‌ها به ترتیب ۰/۶۹ و ۰/۶۵ و معیار نش-ساتکلیف آن‌ها به ترتیب ۰/۵۰ و ۰/۵۱ است. نتایج حاکی از آن است که مدل توسعه داده شده از توانایی خوبی در شبیه‌سازی فرایند بارش-رواناب در طول وقایع رگباری برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: آبخیز زراعی کوچک، رخدادهای بارش، گرگان، مدل، هیدروگراف

مقدمه

استفاده قرار می‌گیرد، مدل‌سازی فرایند بارش-رواناب از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. مدل‌های زیست‌محیطی به‌عنوان ابزاری برای نمایش بخشی از چشم‌انداز که شامل اشیاء و فرایندهایی که در روی و

از آنجا که نتایج خروجی مدل‌های بارش-رواناب به‌طور مستقیم در مسائلی از قبیل مدیریت منابع آب، کنترل سیلاب و طراحی سازه‌های هیدرولیکی مورد

اغلب سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی با داده‌های مکانی ایستا سر و کار دارند، کاربرد آن‌ها فقط برای توسعه مدل‌هایی که دارای دو یا سه بعد فضایی هستند، مناسب است و برای توسعه مدل‌هایی که دینامیک هستند، نیاز به نرم‌افزار یا محیط‌های برنامه‌نویسی جداگانه دارند. اما نرم‌افزار PCRaster تلفیقی از سامانه اطلاعات جغرافیایی و زبان برنامه‌نویسی را به صورت یک‌جا فراهم می‌کند که طراحی و ساخت مدل‌های دینامیک توزیعی-مکانی را برای متخصصان محیط زیست که تبحر ناکافی در استفاده از زبان‌های برنامه‌نویسی سطح پائین دارند، امکان‌پذیر می‌سازد.

مرور ادبیات علمی مدل‌سازی هیدرولوژی نشان می‌دهد که تا کنون مدل‌های فراوانی برای شبیه‌سازی فرایند بارش-رواناب توسعه داده شده است. برای مثال، مدل استانفورد به‌عنوان اولین مدل شبیه‌سازی رفتار هیدرولوژیکی حوزه آبخیز به‌وسیله Crawford و Linsley در سال ۱۹۶۶ برای شبیه‌سازی پدیده‌های فیزیکی بارش-رواناب توسعه پیدا کرد. مدل مفهومی HBV^۲ که در شبیه‌سازی بارش-رواناب کاربرد دارد، در موسسه هواشناسی و هیدرولوژیکی سوئد به‌وسیله Bergstrom در اوایل دهه هفتاد توسعه داده شد (Bergstrom, ۱۹۷۶). Yue و Hashino (۲۰۰۰) با توسعه مدل تانک استاندارد ساگووارا در قالب سه تانک سری و یک تانک موازی، به شبیه‌سازی اجزای رواناب کل در حوضه رودخانه کیوفو پرداختند. Coon و Jeng (۲۰۰۳) به دلیل این‌که بعضی از مقادیر اولیه هیدروگراف واحد لحظه‌ای مدل ناش منفی به دست می‌آمد، با استفاده از روش موج سینماتیک آن را توسعه دادند. Chen و Adams (۲۰۰۶) با ترکیب شبکه عصبی با مدل مفهومی برای مدل‌سازی بارش-رواناب مدل تانک را ارتقا دادند. با توجه به این‌که برنامه‌نویسی این مدل‌ها به‌وسیله متخصصان برنامه‌نویسی کامپیوتر و با زبان‌های برنامه‌نویسی سطح پائین انجام شده و اغلب هم به صورت منبع باز^۳ نیستند، تغییر و تعدیل در آن‌ها به‌وسیله متخصصان محیط زیست امکان‌پذیر نیست. به همین دلیل، امروزه اقبال گسترده‌ای به سمت استفاده از زبان‌های

یا زیرسطح زمین یا آب‌ها هستند، نگریسته می‌شوند (Karssenber, ۲۰۰۲). مدل‌های هیدرولوژیکی حوزه آبخیز که دسته‌ای از مدل‌های زیست‌محیطی محسوب می‌شوند، می‌توانند فیزیکی یا ریاضی باشند. مدل‌های فیزیکی یا قیاسی یک سامانه محیطی را به صورت مینیاتوری از آن سامانه در محیط آزمایشگاه نمایش می‌دهند (Telvari, ۱۹۹۶). در مدل‌های ریاضی، از روابط ریاضی برای مدل‌سازی محیط زیست استفاده می‌شود (Singh و Frevert, ۲۰۰۶). علاوه بر انواع مدل‌های ریاضی همچون مدل‌های آماری، مدل‌های پویا به‌طور گسترده در علوم زیست‌محیطی استفاده می‌شوند (Karssenber, ۲۰۰۲). خصوصیتی که یک مدل را پویا می‌سازد، این است که این مدل‌ها در طول زمان با استفاده از روابط علت و معلولی برای شبیه‌سازی تغییرات زمانی سامانه (چشم‌انداز) از الگوریتم پیش‌رو^۱ عمل می‌کنند، به همین دلیل، به این مدل‌ها، مدل‌های پیش‌رو می‌گویند. هدف از مدل‌سازی ایجاد مدل‌های پیچیده نیست، بلکه یافتن روش‌های ساده برای نمایش فرایندهای پیچیده در قالب یک مدل ساده است که به صورت حل روابط عددی به‌وسیله یک برنامه کامپیوتری انجام می‌شود (Holzbecher, ۲۰۱۲). نرم‌افزارهای برنامه‌نویسی مدل یکی از مؤلفه‌های اصلی فناوری در مدل‌سازی است. از نقطه نظر تکنولوژیکی، مراحل مختلف مدل بایستی به صورت یک سلسله مراتب قابل فهم و ردیابی باشد. این‌که مراحل مختلف یک مدل قابل فهم و ردیابی باشد، به نحوه نمایش مدل، ورودی‌ها و خروجی‌های مدل و ابزار مورد استفاده برای برنامه‌نویسی بستگی دارد و یک مدل توزیعی-مکانی پیچیده، با توجه به تعداد زیاد متغیرهای آن در چندین بعد نمی‌تواند به راحتی قابل فهم و پیگیری باشد. امروزه ابزارهای استاندارد گرافیکی موجود در سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی کمک زیادی به تجزیه و تحلیل، درک و نمایش داده‌های مکانی می‌کنند. مسائل مربوط به برنامه‌نویسی مدل شامل تغییر و تبدیل نمایش ریاضی فرایندهای یک مدل دینامیکی به کمک یک برنامه کامپیوتری است (Karssenber, ۲۰۰۲). از آنجائی که

^۲ Hydrologiska Byrans Vattenavdelning

^۳ Open-source

^۱ Forward

BEACH را در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی و برنامه‌نویسی PCRaster با هدف تولید نقشه‌های روزآمد رطوبت خاک توسعه دادند. Fall و Fall (۲۰۰۱) برای مدل‌سازی دینامیک مناظر طبیعی، Cantòn و همکاران (۲۰۰۴) در آلمریای اسپانیا در تحقیق خاکشناسی-ژئومورفولوژیک خود برای تهیه بخشی از نقشه‌های مورد نیاز خود، Chaplot و همکاران (۲۰۰۵) برای روندیابی الگوریتم رواناب سطحی و مدل‌سازی تشکیل خندق‌ها و Zhao و همکاران (۲۰۱۱) در زیرحوضه ژئوتیالو که از مهمترین زیرحوضه‌های حوزه آبخیز تای‌هو در جنوب شرق چین است، برای مدل‌سازی منشایی منبع آلودگی رسوب از زبان برنامه‌نویسی PCRaster استفاده کردند و همگی بر سهولت کار، قابلیت بالای مدل‌سازی دینامیک و کارآمدی سامانه اطلاعات جغرافیایی و برنامه‌نویسی PCRaster تأکید کرده‌اند. بنابراین، در این پژوهش با الگوگیری از معادلات و روابط معادلات اساسی مدل‌های رایج شبیه‌سازی وقایع بارش-رواناب که به‌وسیله زبان‌های برنامه‌نویسی سطح پائین و به‌صورت اتصال باز^۱ یا اتصال سست^۲ با سامانه اطلاعات جغرافیایی توسعه یافته‌اند (Tao و همکاران، ۱۹۹۶)، همچنین، با اعمال تغییرات جزئی به‌منظور تطبیق با شرایط داده‌ای موجود، یک مدل توزیعی مکانی-زمانی در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی و برنامه‌نویسی PCRaster به‌صورت اتصال محکم^۳ توسعه داده شد (Bhat و همکاران، ۲۰۱۴) و کارایی آن با استفاده از داده‌های مشاهداتی زیرحوضه زراعی منتهی به شهرک بهزیستی گرگان ارزیابی شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش: زیرحوضه غربی شهرک بهزیستی در ورودی غربی شهرستان گرگان با مساحتی معادل ۲۷/۶ هکتار، در حد فاصل طول جغرافیایی ۵۴° ۲۳' ۵۵" تا ۵۴° ۲۴' ۲۳" شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶° ۵۲' ۴۹" تا ۳۶° ۵۰' ۱۴" شمالی واقع شده است. زراعت گندم دیم کاربری غالب

برنامه‌نویسی سطح بالا برای طراحی و توسعه مدل‌ها به‌ویژه مدل‌های منبع-باز وجود دارد. زبان برنامه‌نویسی PCRaster یکی از این زبان‌های سطح بالاست که برای کارشناسان و محققین علوم محیط زیست تهیه شده است (Karssenberg, ۲۰۰۲).

بعد از معرفی PCRaster در اوایل دهه ۱۹۹۰ (van Duersn و Wesseling, ۱۹۹۲) مدل‌های زیست‌محیطی متعددی با استفاده از آن طراحی و توسعه یافتند. Van Duersn و Kwadijk (۱۹۹۳) برای شبیه‌سازی تغییرات مؤلفه‌های بیلان آب رودخانه راین مدل PHINEFLOW را در محیط GIS و برنامه‌نویسی PCRaster توسعه دادند. De Roo (۱۹۹۶) مدل هیدرولوژیکی و فرسایش خاک LISEM را با کمک بسته نرم‌افزاری PCRaster برای شبیه‌سازی فرسایش خاک در اراضی تپه‌ماهوری لسی جنوب هلند به‌کار بردند. مدل LISFLOOD یک مدل هیدرولوژیکی توزیعی مکانی می‌باشد که برای پیش‌بینی سیلاب‌ها، ارزیابی اثرات اقدامات مدیریتی، تغییرات کاربری اراضی و تغییرات اقلیمی روی رژیم هیدرولوژیکی آبخیزها به‌وسیله مرکز تحقیقات مشترک کمیسیون اروپایی در محیط زبان برنامه‌نویسی PCRaster و پایتون توسعه داده شد (De Roo و Knijff, ۲۰۰۸). مدل بیلان آب جهانی PCR-GLOBWB یک مدل هیدرولوژیکی بزرگ مقیاس می‌باشد که با هدف شبیه‌سازی روزانه بیلان آب خشکی‌های سیار زمین در محیط PCRaster به‌وسیله گروه جغرافیایی فیزیکی دانشگاه اوترخت هلند طراحی و تدوین شده است (Mohammadi و Sperna Weiland و همکاران، ۲۰۱۰). همکاران (۲۰۱۲)، در پژوهش خود مدل توزیعی GFHM را برای شبیه‌سازی آب‌نمای سیل حوضه جعفرآباد با استفاده از زبان شبیه‌سازی محیط زیستی PCRaster توسعه دادند. Sheikh و همکاران (۲۰۰۸)، در پژوهش خود بیلان آب و جریان خروجی حوزه آبخیز چهل‌چای را در محیط GIS و برنامه‌نویسی PCRaster مدل‌سازی کردند، با توسعه و تدوین این مدل می‌توان تغییرات کاربری مدیریتی را در هر نقطه حوضه و تأثیر آن را بر بیلان آب مورد محاسبه قرار داده، عکس‌العمل هیدرولوژی را بررسی و مطالعه کرد.

Sheikh و همکاران (۲۰۰۸)، مدل شبیه‌سازی

¹ Decoupled

² Loosely coupled

³ Tightly coupled

از ابزارهای کامپیوتری برای ذخیره، مدیریت، تجزیه و تحلیل و بازیابی اطلاعات جغرافیایی است (Karssenber, ۱۹۹۶). PCRaster، یک سامانه بر مبنای شبکه‌بندی رستری است که از یک مکانیزم قوی کنترل نوع داده استفاده می‌کند (Karssenber, ۱۹۹۶). این بدان معنی است که نوع اطلاعاتی (صفتی) که داده‌های مکانی مختلف فراهم می‌کنند به پسوند و صفت فایل ذخیره شده بستگی دارد و هر عملیاتی را بر روی هر نوع داده‌ای نمی‌توان اعمال کرد.

این محدوده می‌باشد، به طوری که از کل مساحت حوضه، ۲۵/۴ هکتار را گندم‌زار و ۲/۲۴۵ را کاربری مرتع تشکیل می‌دهد. پست‌ترین نقطه حوضه در ارتفاع ۱۲۹/۷ متر و بلندترین نقطه در ارتفاع ۳۰۷/۷ متر ارتفاع از سطح دریا واقع شده است.

محیط مدل‌سازی: در این تحقیق، برای توسعه مدل توزیعی مکانی-زمانی وقایع بارش-رواناب از محیط مدل‌سازی PCRaster استفاده شد. PCRaster یک سامانه اطلاعات جغرافیایی است که شامل مجموعه‌ای



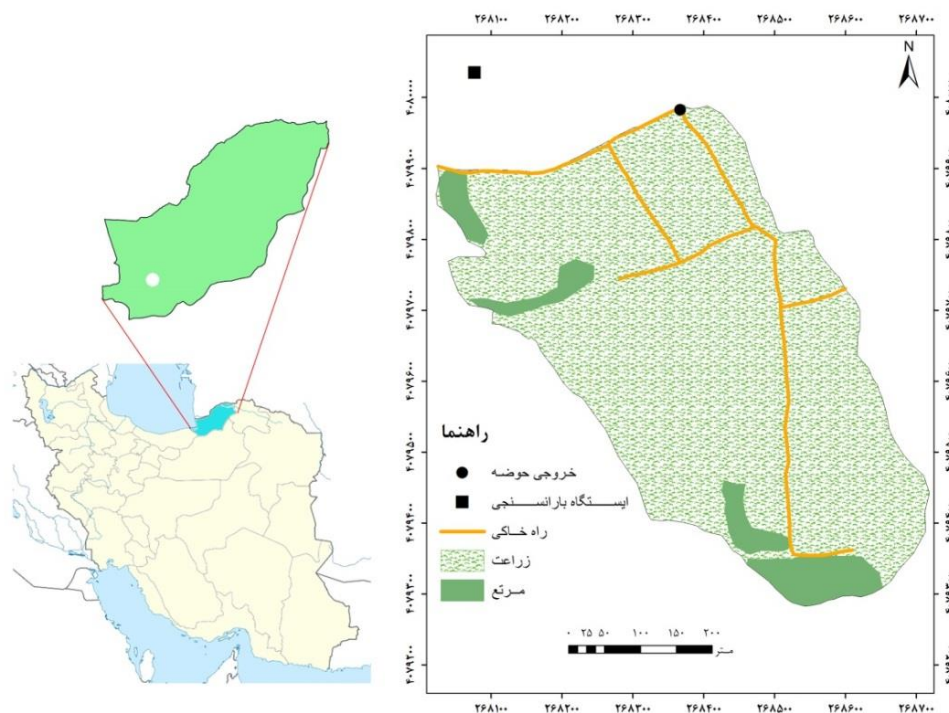
شکل ۱- تصویری از منطقه مورد مطالعه

متنی (ASCII) و تبدیل این فایل‌های متنی به فرمت نقشه (Filename.map) در محیط PCRaster و برعکس امکان‌پذیر است. با توجه به این که PCRaster، نه تنها یک محیط برنامه‌نویسی سطح بالا بر پایه سامانه اطلاعات جغرافیایی است، بلکه یک زبان برنامه‌ریزی ساده در مدل‌سازی مناظر طبیعی و محیط‌زیست می‌باشد، در نتیجه پردازش مکانی اطلاعات ساده و دقیق خواهد بود (Karssenber, ۱۹۹۶). در تحقیق حاضر تمام مراحل تهیه مدل وقایع بارش-رواناب در محیط PCRaster انجام شده است که گرچه انعطاف‌پذیری زبان‌های برنامه‌نویسی سطح پایین C++ را ندارد، ولی با توجه به این که PCRaster جزو زبان‌های برنامه‌نویسی زیست‌محیطی (EML) سطح بالا می‌باشد، یادگیری و کاربرد آن برای افرادی

فایل‌های قابل تشخیص و استفاده در محیط PCRaster یکی از انواع نقشه (Filename.map)، سری زمانی (Filename.tss)، جدول (Filename.tbl)، یا فایل متنی (Filename.txt or Filename.asc)، یا فایل اجرایی یا Script مدل (Filename.mod) است (Karssenber, ۱۹۹۶). ساختار سامانه PCRaster اجازه اعمال توابع مدل‌سازی زیست‌محیطی را با توابع کلاسیک GIS فراهم می‌کند. مدل‌سازی کارتوگرافیک و دینامیک با زبان برنامه‌نویسی سطح بالا این امکان را فراهم می‌کند که هم برای عملیات GIS و هم توابع ریاضی مدل‌سازی از یک زبان برنامه‌نویسی واحد استفاده کرد (Karssenber, ۱۹۹۶). تبادل اطلاعات با هر برنامه مدل‌سازی و GIS دیگر از طریق عملیات ذخیره کردن فایل‌ها در آن محیط به صورت فایل‌های

می‌باشد که توسعه مدل‌های مکانی دوبردی را ساده‌تر می‌کند (Karssenberg, ۱۹۹۶).

که تخصص و تبحر کافی در برنامه‌نویسی کامپیوتری ندارند، راحت است و در عین حال یک محیط GIS با بسته‌های هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی غنی



شکل ۲- موقعیت زیرحوضه غربی شهرک بهزیستی در ایران و استان گلستان

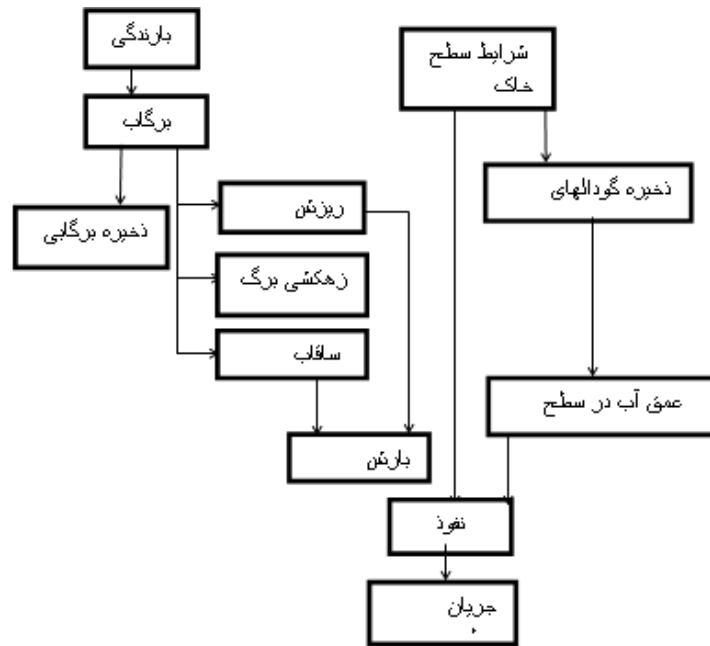
انجام بازدیدهای میدانی در اردیبهشت ماه سال ۱۳۹۳ نقشه کاربری اراضی حوضه و نقشه موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی منطقه مورد مطالعه تهیه شدند. به منظور تعیین موقعیت نقاط نمونه‌برداری از دستگاه GPS استفاده شد. این نقشه‌ها در محیط نرم‌افزار ArcGIS با دستور Raster to ASCII به صورت فایل متنی ASCII تبدیل شد و سپس، این فایل‌های متنی در محیط PCRaster فراخوانی و به نقشه‌های با فرمت map تبدیل شد. تمام نقشه‌های رستری در محیط PCRaster دارای فرمت map هستند. پس از تهیه سه نقشه پایه و تعیین مقادیر پارامترهای مورد نیاز مطابق جدول ۱، کد کامپیوتری مدل در محیط PCRaster به صورت یک فایل اجرایی نوشته شد. در این فایل اجرایی، محل نقشه‌ها، فایل بارش، خروجی مدل، مدت زمان رگبار و گام‌های زمانی شبیه‌سازی و غیره مشخص می‌شوند. در نهایت، با اجرای این فایل در محیط PCRaster، اطلاعات حاصل از شبیه‌سازی از

تشریح ساختار مدل: در این تحقیق، یک مدل با پایه فیزیکی برای شبیه‌سازی وقایع بارش-رواناب در یک زیرحوضه کوچک طراحی و تهیه شده است که رویداد باران، اصلی‌ترین ورودی آن است که نمودار جریانی آن در شکل ۱ نشان داده شده است. به‌طور کلی، ورودی‌های این مدل مجموعه‌ای از یک سری نقشه‌های رستری، اطلاعات فیزیک خاک و هایتوگراف بارندگی می‌باشد. کمینه تعداد نقشه‌های لازم برای شبیه‌سازی، ۱۱ نقشه می‌باشد، که نام آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است. بیشتر این نقشه‌ها، از سه نقشه پایه مدل رقومی ارتفاعی (DEM)، کاربری اراضی و نقشه موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی تهیه می‌شوند.

داده‌های ورودی و خروجی مدل: بنابراین، برای اجرای مدل ابتدا باید این سه نقشه پایه با فرمت رستری تهیه شود. نقشه DEM حوضه مورد مطالعه با اندازه سلولی ۱×۱ متر از تصاویر اولتراکم در محیط ArcGIS 9.3 تهیه شد. با استفاده از عکس اولتراکم و

مطالعاتی از تاریخ ۱۳۹۳/۰۲/۰۱ تا ۱۳۹۴/۰۲/۰۱، یک دستگاه باران‌نگار Rainwise در مجاورت حوزه آبخیز در محوطه پردیس دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان نصب شد که قادر به ثبت داده‌های بارندگی در گام‌های زمانی کوتاه‌مدت بود. در این تحقیق گام زمانی ثبت داده‌ها پنج دقیقه تنظیم شد.

جمله نقشه عمق رواناب و سری زمانی هیدروگراف سیل تولید می‌شود. تمامی نقشه‌های ورودی و خروجی در مدل به صورت رستری هستند. بارش: مدل توسعه داده شده به داده‌های بارندگی در گام‌های زمانی کوتاه نیاز دارد و از شدت رگبار در محاسبات میزان رواناب استفاده می‌کند. در طی دوره



شکل ۱- ساختار مدل

جدول ۱- نقشه‌های مورد نیاز مدل

نام نقشه	نوع نقشه	کاربرد
Area.map	نقشه مرز حوضه	بررسی نقشه‌های دیگر از لحاظ تعداد و مکان سلول‌ها
Grad.map	شیب حوضه	نشان‌دهنده شیب در مسیر رواناب
ID.map	نقشه پراکنش باران‌سنج‌ها	نشان‌دهنده گستره تحت پوشش باران‌سنج‌ها
LAI	شاخص سطح برگ	تعیین ظرفیت ذخیره تاج پوشش گیاهی
Per	درصد پوشش گیاهی	منطقه تحت پوشش گیاهی
Ch	ارتفاع پوشش گیاهی	محاسبه انرژی جنبشی قطرات باران
Max interception	بیشینه ذخیره برگابی	مقدار رواناب
n	ضریب مانینگ	رواناب سطحی
RR	ضریب پستی بلندی سطح	ذخیره چالابی
Ksat	ظرفیت هدایت هیدرولیکی اشباع خاک	تعیین میزان نفوذ
Thetas	ظرفیت حجمی رطوبت خاک اشباع شده	تعیین ظرفیت ذخیره رطوبت خاک
Thetai	ظرفیت حجمی رطوبت اولیه خاک	ظرفیت موجود رطوبت خاک
Effective capillary drive	نیروی موینگی مؤثر	ظرفیت موینگی مؤثر خاک

RAS (زبری عمود بر شیب) بیان می‌شود، عبارت است از نسبت فاصله مستقیم بین دو نقطه بر روی زمین به فاصله واقعی بین آن دو نقطه. این مقادیر را می‌توان با قرار دادن یک زنجیر یک متری با حلقه‌های ریز بر روی زمین تعیین کرد و با استفاده از رابطه (۴) به عمق ذخائر سطحی (D) بر حسب متر تبدیل کرد (Morgan و همکاران، ۱۹۹۳؛ Quinton و همکاران، ۱۹۹۹).

$$D = e^{(-6.6 + 0.27RFR)} \quad (4)$$

زبری هیدرولیکی مربوط به بافت خاک است که به‌صورت ضریب زبری مانینگ بیان می‌شود. جایی که سطح خاک دارای ۱۰ درصد یا بیشتر پوشش سنگی یا قلوه‌سنگ باشد، ضریب مانینگ با استفاده از رابطه زیر تصحیح می‌شود (Morgan و همکاران، ۱۹۹۳؛ Woolhiser و همکاران، ۱۹۹۰).

$$n_{stone} = ne^{-.18Rc} \quad (5)$$

که در آن، n_{stone} ضریب زبری مانینگ برای سطحی که دارای سنگ است، n ضریب زبری مانینگ برای سطح بدون پوشش سنگی و Rc درصد پوشش سنگی می‌باشد.

رواناب سطحی: هنگامی که شدت باران خالص که به زمین می‌رسد از شدت نفوذ آب به داخل خاک و حجم ذخائر سطحی تجاوز کرد، رواناب سطحی ایجاد می‌شود. در این مدل رواناب در امتداد یک سطح یا المان، شیار یا کانال، طبق رابطه (۶) یک جریان یک بعدی است که در آن شدت جریان (Q) به شعاع هیدرولیکی (r) بستگی دارد (Woolhiser و همکاران، ۱۹۹۰؛ Sheikh و همکاران، ۲۰۰۸).

$$Q = Q \propto pr^m \quad (6)$$

که بر مبنای معادله مانینگ رابطه (۷)، ضریب α برابر است با:

$$\alpha = 1/n(S^{1/2}) \quad (7)$$

که در آن، n ضریب زبری مانینگ، s شیب طولی، p محیط خیس شده (m) و r شعاع هیدرولیکی (m) می‌باشد.

در یک جریان سطحی چون عمق جریان کم و عرض آن زیاد است، شعاع هیدرولیکی با عمق جریان تقریباً یکسان فرض می‌شود. لذا پارامتر h یک متغیر مستقل و معرف متوسط عمق جریان در طول شیب است که

برگاب: بخشی از بارندگی که به تاج‌پوشش گیاه برخورد می‌کند، تشکیل ذخیره برگابی را می‌دهد که مقدار آن به‌صورت زیر محاسبه می‌شود. ابتدا بخشی از بارش که روی تاج‌پوشش می‌بارد، از رابطه (۱) محاسبه می‌شود (Morgan و همکاران، ۱۹۹۳؛ Quinton و همکاران، ۱۹۹۹).

$$IC = R.COV \quad (1)$$

که در آن، R عمق کل بارندگی (mm)، IC عمق بارانی که روی پوشش گیاهی می‌بارد (mm)، COV بخشی از سطح خاک که به‌وسیله پوشش گیاهی اشغال شده است. مریام^۱، عمق ذخیره برگاب (IC_{stor}) را تا یک زمان معین به‌صورت رابطه تجربی (۲) بیان کرده است (Merriam، ۱۹۷۳).

$$IC_{stor} = IC_{max} [1 - \exp(-R_{cum} / IC_{max})] \quad (2)$$

که در آن، IC_{max} بیشینه عمق ذخیره برگاب (mm)، R_{cum} بارندگی تجمعی (mm) از ابتدای شروع بارش است.

نفوذ: برای محاسبه نفوذ از روش اسمیت-پارلانژ استفاده شده است (Smith و Parlange، ۱۹۷۸) که به‌صورت رابطه (۳) است.

$$f_c = K_s \frac{\exp(F/B)}{\exp(F/B) - 1} \quad (3)$$

که در آن، f_c نرخ نفوذ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)، F میزان نفوذ تجمعی از ابتدای بارش که قبلاً جذب خاک شده است (mm) و B عامل موئینگی خاک است که به درصد ذرات کوچک‌تر از دو میلی‌متر خاک وابسته است. مقدار B با توجه به بافت منطقه ۳۵ میلی‌متر تعیین شد و نحوه اندازه‌گیری و تعیین مقدار K_s نیز در بخش‌های بعدی تشریح شده است.

ذخیره چالابی: سطح زمین از دو نوع زبری به نام‌های زبری شکل^۲ و زبری هیدرولیکی^۳ تشکیل شده است که هر دو در فرسایش خاک و جریان‌های سطحی نقش دارند. زبری شکل تعیین‌کننده حجم آبی است که در ذخایر سطحی زمین نگهداری می‌شود. زبری شکل که با دو عامل RFR (زبری در امتداد شیب) و

¹ Merriam

² Shape roughness

³ Hydraulic roughness

در رابطه (۸) آورده شده است.

$$Q = ah^m \quad (8)$$

برای واحد عرض جریان $w=1$ و $r=h$ به صورت رابطه (۹) در می‌آید.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \alpha m h^{m-1} \frac{\partial h}{\partial x} = q_s(x, t) \quad (9)$$

اندازه‌گیری پارامترهای ورودی مدل: برای

شبیه‌سازی هر رگبار، تمام پارامترهای مدل برای واحدهای کاری مختلف بایستی به صورت یک جدول پایه تنظیم شود. پارامترهای مورد نیاز مدل شامل درصد پوشش گیاهی، بیشینه ظرفیت ذخیره برگابی، درصد سنگ‌ریزه، ضریب مانینگ، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، ظرفیت حجمی رطوبت اولیه خاک، ظرفیت حجمی رطوبت خاک اشباع شده، نیروی موینگی مؤثر، ضریب پستی بلندی و شاخص سطح برگ است. در این تحقیق، بعضی پارامترهای مدل مستقیماً اندازه‌گیری شدند که به اختصار در بخش‌های زیر توضیح داده شده است. مقادیر بقیه پارامترها از منابع علمی موجود (Morgan و همکاران، ۱۹۹۸) استخراج و استفاده شدند.

رطوبت اولیه خاک: در این زیرحوضه رطوبت خاک در طی یک سال (۱۳۹۳/۰۲/۰۱ تا ۱۳۹۴/۰۲/۰۱) و با فواصل زمانی یک هفته به وسیله دستگاه TDR^۱ در ۱۸ نقطه مورد پایش قرار گرفت، بنابراین، مقادیر رطوبت پیشین خاک از مقادیر اندازه‌گیری شده به وسیله دستگاه TDR به دست آمد.

هدایت هیدرولیکی: برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در حوضه مورد مطالعه، در مجموع از نه رینگ فلزی استفاده شد. در کاربری زراعت به علت مساحت زیاد شش عدد رینگ (سه تکرار در بالادست و سه عدد در پایین‌دست) و در کاربری مرتع سه عدد رینگ استوانه‌ای شکل (قطر ۱۵/۲۴ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر) استفاده شدند. همچنین، دستگاه اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع به دلیل اهمیت و حساسیت مدل به داده‌های هدایت هیدرولیکی اشباع و عدم دسترسی به دستگاه‌های اندازه‌گیری، در طول این تحقیق طراحی و

ساخته شد که در شکل ۲ نشان داده شده است. هدایت هیدرولیک اشباع خاک با استفاده از قانون داری و روش بار ثابت از رابطه (۱۰) محاسبه شد.

$$K = \frac{(V \times L)}{(A \times t) \times (L + D)} \quad (10)$$

که در آن، K هدایت هیدرولیکی ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)، V حجم آب خروجی از ته رینگ (cm^3)، L ارتفاع خاک درون رینگ (cm)، A سطح مقطع نمونه (cm^2)، t مدت زمان اندازه‌گیری (دقیقه) و D عمق آب روی نمونه خاک (cm) است. شکل ۴ مراحل کار را نشان می‌دهد.

اندازه‌گیری رواناب: در طی دوره مطالعاتی برای برآورد میزان رواناب مشاهداتی، یک دستگاه حسگر اولتراسونیک با دقت یک میلی‌متر در خروجی حوضه که منتهی به یک کانال بتنی به ارتفاع ۱۵۰ و عرض ۱۲۰ سانتی‌متر می‌شود، نصب شد. در طی دوره مطالعه فقط سه رگبار منجر به ایجاد رواناب شدند. به دلیل نفوذ رطوبت به داخل حسگر دستگاه و در نتیجه خرابی حسگر در طی یکی از رخدادها، فقط سری زمانی دو واقعه رواناب در خروجی حوضه در تاریخ‌های ۱۳۹۳/۰۸/۱۱ و ۱۳۹۴/۰۶/۲۵ ثبت شد.

ارزیابی مدل: برای ارزیابی کارایی مدل از دو روش، مقایسه چشمی (کیفی) و مقایسه آماری (کمی) هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی، استفاده شده است. در روش مقایسه چشمی، مقایسه شکل ظاهری هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی بررسی می‌شود و همچنین، اطلاعات مفیدی در خصوص رفتار کلی مدل در شبیه‌سازی رخداد و نقاط قوت و ضعف مدل در شبیه‌سازی مؤلفه‌های مختلف هیدروگراف به دست می‌آید. برای ارزیابی آماری می‌باشد از ضریب همبستگی (R^2)، معیار کارایی ناش-ساتکلیف (N-S) و میانگین کمینه مربعات خطا (RMSE) استفاده شده است.

نتایج و بحث

انتخاب رخدادها مناسب: پس از بررسی آمار و اطلاعات دبی و بارش زیرحوضه مورد مطالعه که به مدت یک سال مورد پایش قرار گرفت، برای ارزیابی کارایی مدل از دو رویداد بارش تاریخ‌های

¹ Time Domain Reflectometry

تهیه شدند. شکل‌های ۳ و ۴ نقشه‌های پایه زیرحوضه مورد مطالعه را نشان می‌دهند. نوع بافت حوضه از مطالعات و آزمایش‌های خاک انجام شده در این حوضه کسب شد. نتایج نشان داد که بافت خاک در کل زیرحوضه به صورت سیلتی-رسی می‌باشد.

رواناب در خروجی زیرحوضه مورد مطالعه شده و آمار هم‌زمان دبی آن‌ها نیز ثبت شده بود، استفاده شد. نقشه‌های پایه تهیه شده: تمامی ۱۱ نقشه مورد نیاز مدل با استفاده از سه نقشه پایه DEM، کاربری اراضی و نقشه ایستگاه‌های باران‌سنجی در محیط PCRaster

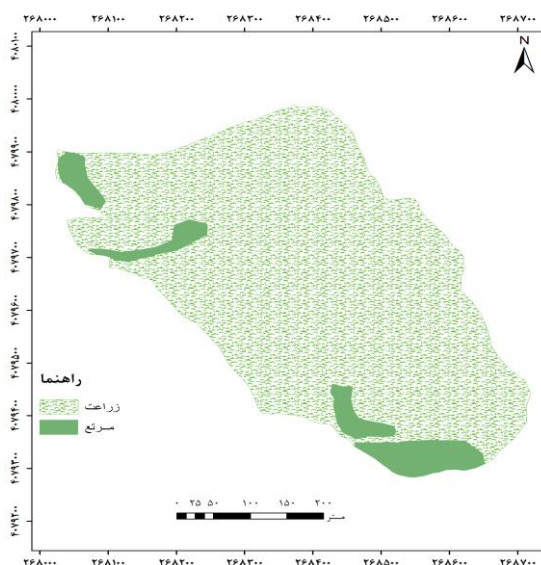


(ب)

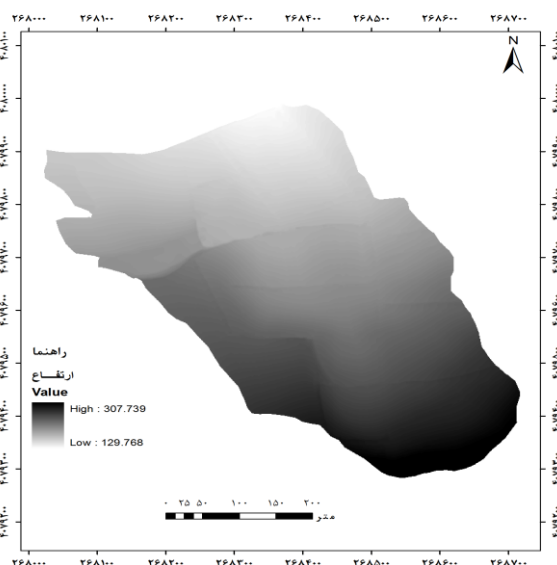


(الف)

شکل ۲- (الف) مرحله برداشت نمونه و (ب) آزمایش هدایت هیدرولیکی اشباع خاک



شکل ۴- نقشه کاربری اراضی زیرحوضه مورد مطالعه



شکل ۳- نقشه مدل رقومی ارتفاع زیرحوضه مورد مطالعه

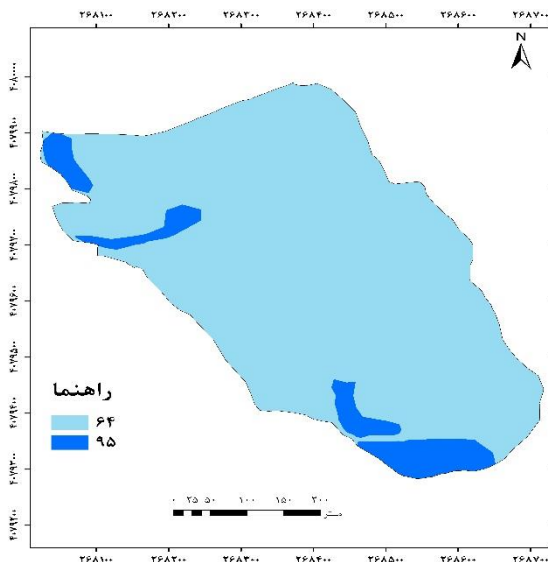
زهکشی از نقشه‌های آبخیز و نقشه هدایت هیدرولیکی اشباع از نقشه‌های نفوذ در شکل ۵ و ۶ نشان داده شده است.

سناریوهای مدیریت پوشش گیاهی: برای انتخاب سناریوی مدیریت پوشش گیاهی مناسب، ابتدا نقشه‌های مورد نیاز از روی نقشه سه بعدی DEM

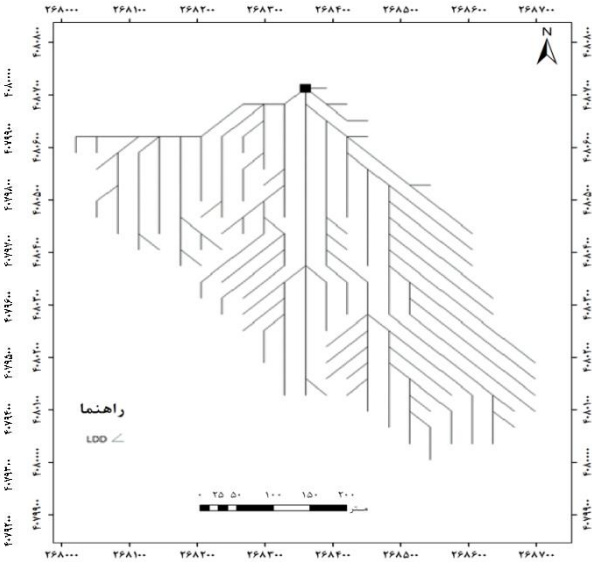
از دیگر نقشه‌هایی که با استفاده از توابع سامانه اطلاعات جغرافیایی PCRaster با کدنویسی در این محیط ساخته می‌شود، می‌توان به نقشه‌های آبخیز، پوشش گیاهی، نفوذ و خاک اشاره کرد که از روی سه نقشه پایه ورودی مدل و جداول جستجو (Lookup tables) ساخته می‌شوند. به عنوان مثال، نقشه شبکه

منطقه محیط ArcGIS ایجاد شد و در نهایت با ادغام نقشه‌ها، نقشه واحدهای زیست‌محیطی تعیین شد و در نهایت با استفاده از مدل مخدوم، سناریوی جنگل‌کاری

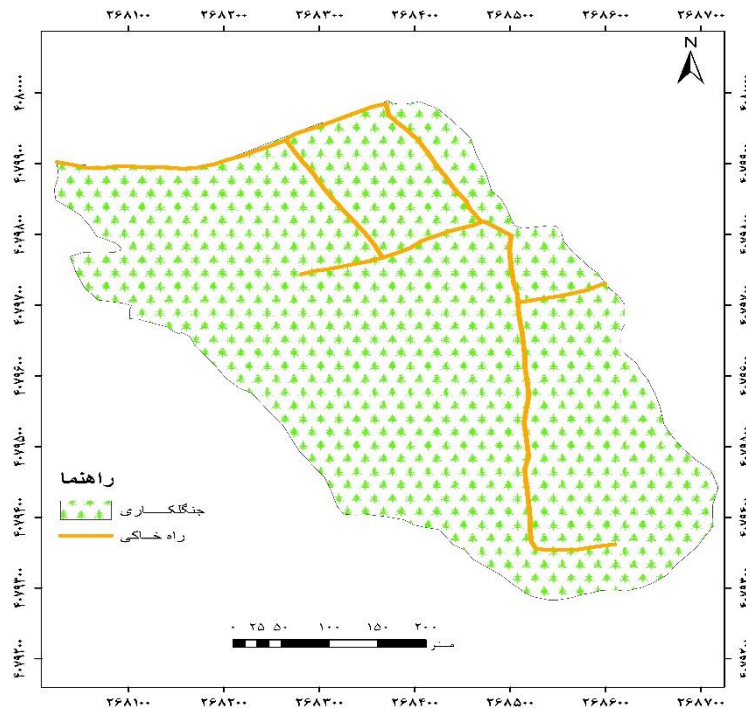
برای کل حوضه با توجه به توپوگرافی منطقه به عنوان سناریوی مناسب انتخاب شد.



شکل ۶- نقشه هدایت هیدرولیکی زیرحوضه مورد مطالعه



شکل ۵- نقشه شبکه زهکشی زیرحوضه مورد مطالعه



شکل ۷- نقشه سناریوی مدیریت پوشش گیاهی انتخاب شده برای منطقه موردنظر

نتایج حاصل از پارامترهای اندازه‌گیری شده: پس از اندازه‌گیری پارامترهای مورد نیاز، جدول‌های پایه مدل که شامل مقادیر پارامترهای مدل است تهیه شدند. جدول‌های ۲ و ۳ مقادیر پارامترهای ورودی

مدل را برای دو رگبار مورد بررسی نشان می‌دهد. شایان ذکر است، چون هدف از بررسی سناریو مدیریتی، مقایسه اثر آن با وضعیت موجود می‌باشد، فقط برای یکی از رگبارها اثرات آن شبیه‌سازی و ارائه

شده است.

می‌باشد. ضریب زبری مانینگ و ضریب پستی و بلندی سطح از جدول راهنمای ارائه شده به‌وسیله De Roo و همکاران (۱۹۹۵) برای مدل LISEM استخراج شدند. مقادیر بقیه پارامترها نیز بر اساس جدول راهنمای ارائه شده به‌وسیله Morgan و همکاران (۱۹۹۸) برای مدل EUROSEM تعیین شدند.

در جدول ۳ پارامترهای هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و درصد سنگ‌ریزه مقادیر اندازه‌گیری شده هستند که برای هر دو رگبار ثابت در نظر گرفته شد. رطوبت اولیه خاک نیز از روی داده‌های پایش رطوبت خاک به‌دست آمده است که برای هر رگبار متغیر

جدول ۲- مقادیر پارامترهای ورودی مدل برای رگبار ۱۳۹۳/۰۸/۱۱

متغیر/پارامتر	واحد	زراعت	مرتع	راه خاکی	سناریوی مدیریتی جنگل‌کاری
درصد پوشش گیاهی	-	۰	۰/۷	.	۰/۷
حداکثر ظرفیت ذخیره برگابی	mm	۰	۱	0	۲/۲
درصد سنگ‌ریزه	-	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲
ضریب مانینگ	-	۰/۱۳	۰/۲۵۹	۰/۱۲	۰/۱۵
ظرفیت هدایت هیدرولیکی اشباع خاک	mm.hr ⁻¹	۶۴	۹۵	۱۲	۹۵
ظرفیت حجمی رطوبت اولیه خاک	m ³ m ⁻³	۰/۲۲	۰/۲۵	۰/۲	۰/۲۵
ظرفیت حجمی رطوبت خاک اشباع شده	m ³ m ⁻³	۰/۴۲	۰/۴۳۵	۰/۴	۰/۴۳۵
نیروی مویبندی مؤثر	mm	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵
ضریب پستی بلندی سطح	mm	۱۱	۹/۹	۹/۷	۱۳/۶
شاخص سطح برگ	m ² m ⁻²	۰	۱/۸۶	۰/۳۹	۷

جدول ۳- مقادیر پارامترهای ورودی مدل برای رگبار ۱۳۹۴/۰۶/۲۵

کاربری اراضی	واحد	زراعت	مرتع	راه خاکی
درصد پوشش گیاهی	-	۰/۲۵	۰/۷	.
حداکثر ظرفیت ذخیره برگابی	mm	۱/۱	۱	۰
درصد سنگ‌ریزه	-	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲
ضریب مانینگ	-	۰	۰/۲۵۹	۰/۱۲
ظرفیت هدایت هیدرولیکی اشباع خاک	mm.hr ⁻¹	۶۴	۹۵	۱۲
ظرفیت حجمی رطوبت اولیه خاک	m ³ m ⁻³	۰/۱۳	۰/۱۵	۰/۱۲
ظرفیت حجمی رطوبت خاک اشباع شد	m ³ m ⁻³	۰/۴۲	۰/۴۳۵	۰/۴
نیروی مویبندی مؤثر	mm	۳۵	۳۵	۳۵
ضریب پستی بلندی سطح	mm	۱۱	۹/۹	۹/۷
شاخص سطح برگ	m ² m ⁻²	۰	۱/۸۶	۰/۳۹

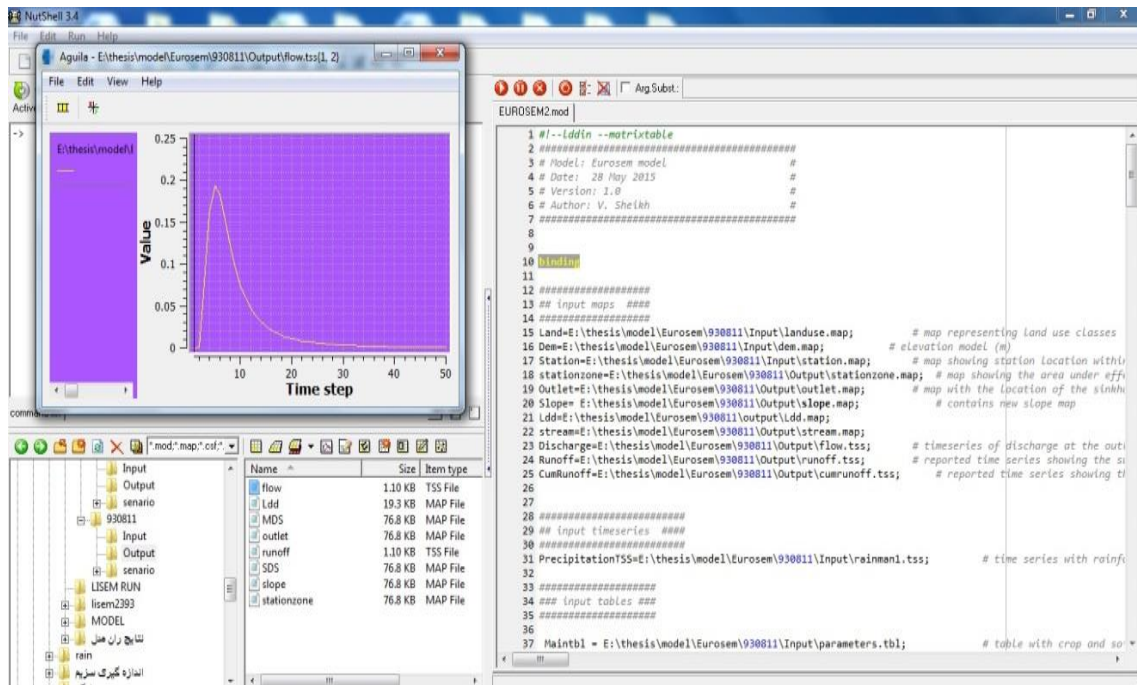
نتایج حاصل از اجرای مدل در محیط PCRaster:

با اجرای اسکریپت مدل نوشته شده در محیط PCRaster، پس از هر اجرای مدل که برای زیرحوضه مورد نظر پنج دقیقه طول می‌کشد، خروجی‌های مدل، شامل سری زمانی هیدروگراف در نقطه خروجی، نقشه‌های رواناب زیرحوضه به‌صورت سری نقشه (Mapseries) تولید می‌شود. نقشه رواناب و

هیدروگراف در محیط PCRaster، بعد از اتمام شبیه‌سازی به‌صورت یک فایل تصویری ذخیره می‌شود که در شکل ۸ فایل تصویری مربوط به پایان شبیه‌سازی رگبار مشاهداتی مورخه ۱۳۹۳/۰۸/۱۱ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در این مطالعه، مدل نسبت به تغییرات رطوبت پیشین بیشترین حساسیت را نشان داد که برای واسنجی و

پارامترها، از رویکرد تخصیص پارامتر (Parameter allocation) و سعی و خطای محدود استفاده شد (Bahremand, ۲۰۱۶).

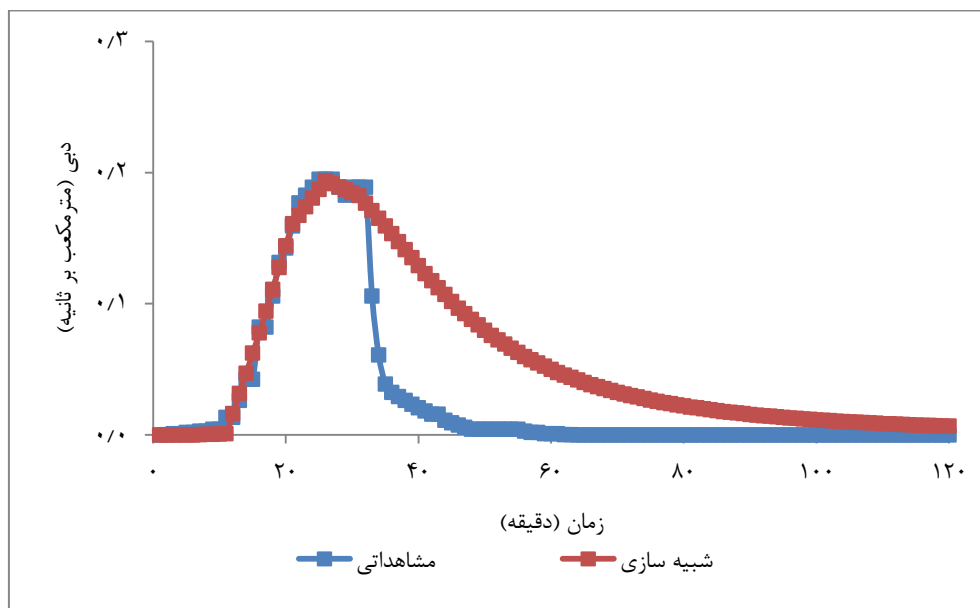
اعتبارسنجی مدل تنها پارامتر رطوبت پیشین، در حد مجاز خطای دستگاه TDR که در حدود به علاوه، منهای پنج می باشد، تغییر داده شد. در حقیقت، در این مطالعه به جای انجام فرایند بهینه سازی کامل



شکل ۸- شمایی از محیط کدنویسی و ارائه نتایج شبیه سازی مدل در محیط PCRaster

نتایج حاصل از اجرای مدل برای هریک از رگبارها در جدول های ۴ و ۵ نشان داده شده است.

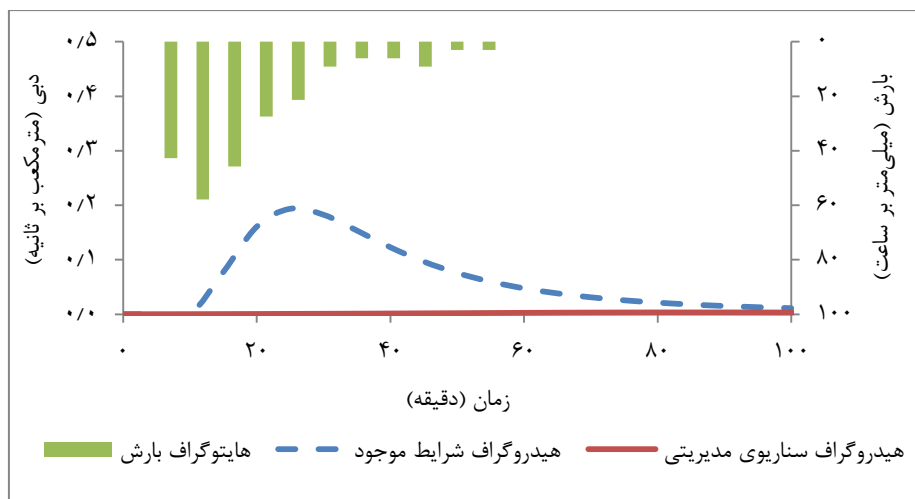
ارزیابی مدل: مقایسه ظاهری هیدروگراف های شبیه سازی شده و مشاهداتی دو رویداد ۱۳۹۳/۰۸/۱۱ و ۱۳۹۴/۰۶/۲۵ در شکل های ۹ تا ۱۲ و همچنین،



شکل ۹- مقایسه چشمی هیدروگراف مشاهداتی و شبیه سازی بارش مورخه ۱۳۹۳/۰۸/۱۱

یکی از مزایای روش ارزیابی چشمی هیدروگراف‌ها این است که میزان انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده از مقادیر مشاهداتی برای قسمت‌های مختلف هیدروگراف را امکان‌پذیر می‌سازد. همان‌طور که در شکل‌های ۹ و ۱۱ مشاهده می‌شود، هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل در رگبارهای مورد مطالعه در زیرحوضه غربی شهرک بهزیستی تأخیر چندانی در شبیه‌سازی شاخه صعودی نشان نمی‌دهد، ولی تأخیر ۳۵ دقیقه‌ای در اتمام شاخه نزولی هیدروگراف ۱۳۹۳/۰۸/۱۱ را نشان می‌دهد. به‌طوری‌که در این شبیه‌سازی، شاخه صعودی هیدروگراف شبیه‌سازی شده با تفاوت اندک دیرتر از شاخه صعودی هیدروگراف مشاهداتی آغاز شده است و شاخه نزولی هیدروگراف شبیه‌سازی شده با تفاوت نسبتاً زیاد دیرتر می‌دهد.

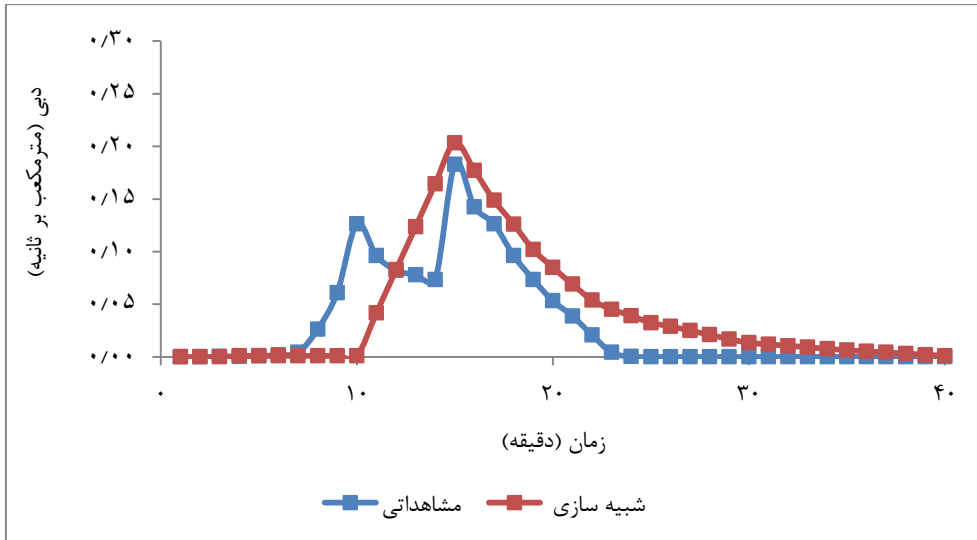
از شاخه نزولی هیدروگراف مشاهداتی به اتمام رسیده است، این روند در شبیه‌سازی رواناب را می‌توان به شیب نسبتاً زیاد و مساحت کم حوضه مورد مطالعه تعمیم داد که باعث عکس‌العمل سریع حوضه در برابر ایجاد جریان و تأخیر بسیار اندک در شاخه صعودی می‌شود. علاوه بر بررسی ظاهری، می‌توان اطلاعات مهم هیدروگراف‌ها مانند میزان دبی اوج، زمان اوج هیدروگراف‌ها و حجم سیلاب را نیز به‌صورت کمی مقایسه کرد. در مقایسه میزان دبی و حجم سیلاب دیده می‌شود که مدل با اختلاف کم دبی جریان را شبیه‌سازی کرده، همچنین، در مقایسه زمان تا اوج دیده می‌شود که هیدروگراف‌ها دقیقاً در یک زمان به اوج رسیده‌اند. جدول ۶ نتایج این مقایسه را نشان می‌دهد.



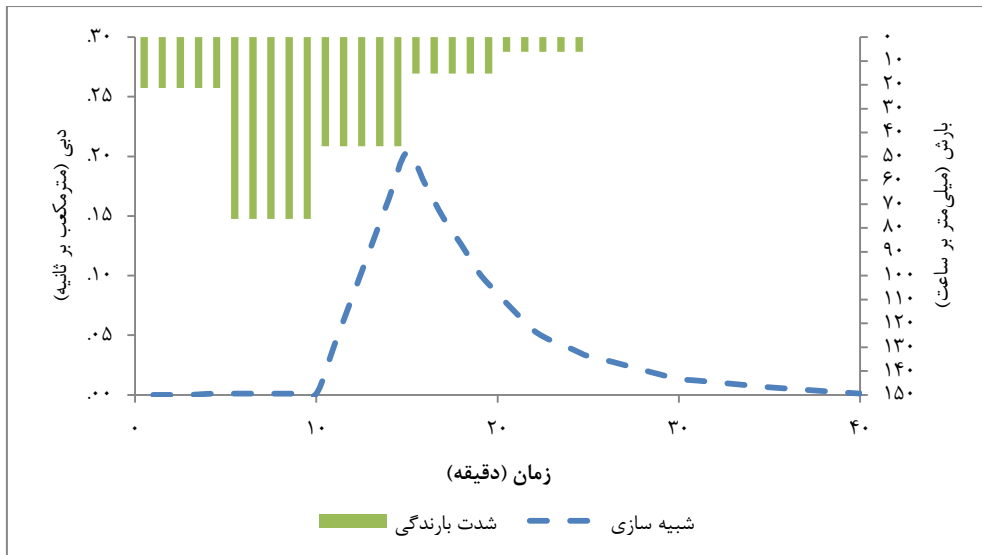
شکل ۱۰- هایتوگراف بارش مورخه ۱۳۹۳/۰۸/۱۱ و هیدروگراف شبیه‌سازی شده برای شرایط موجود و سناریوی مدیریتی

جدول ۶- خلاصه اطلاعات شبیه‌سازی مدل یوروسم برای رگبار مورخه ۱۳۹۳/۰۸/۱۱

متغیرهای خروجی مدل	نتایج شبیه‌سازی رخداد ۱۳۹۳/۰۸/۱۱	نتایج سناریوی مدیریتی
مساحت حوضه (هکتار)	۲۷/۶۴۵	۲۷/۶۴۵
مجموع بارندگی (میلی‌متر)	۱۹/۳	۱۹/۳
ارتفاع رواناب (میلی‌متر)	۱/۶۲	۰/۰۹۸
مجموع ذخیره برگابی (میلی‌متر)	۰/۱۲	۰/۷
مجموع نفوذ (میلی‌متر)	۱۷/۵۶	۱۸/۵۰۲
حجم رواناب (متر مکعب)	۴۳۱/۱۴	۲۶/۱۶
دبی پیک (لیتر بر ثانیه)	۱۹۳/۵۸	۳/۳۳
زمان شروع رواناب بعد از شروع بارش (دقیقه)	۱۰	۳۵
زمان اوج (دقیقه)	۲۵	۸۵
ضریب رواناب (درصد)	۸/۰۸	۰/۴۹



شکل ۱۱- مقایسه چشمی هیدروگراف مشاهداتی و شبه‌سازی بارش مورخه ۱۳۹۴/۰۶/۲۵



شکل ۱۲- هایتوگراف بارش مورخه ۱۳۹۴/۰۶/۲۵ و هیدروگراف شبه‌سازی شده برای شرایط موجود

جدول ۵- خلاصه اطلاعات شبه‌سازی مدل یوروسم برای رگبار مورخه ۱۳۹۴/۰۶/۲۵

نتایج شبه‌سازی رخداد ۱۳۹۴/۰۶/۲۵	متغیرهای خروجی مدل
۲۷/۶۴۵	مساحت حوضه (هکتار)
۱۳/۷	مجموع بارندگی (میلی‌متر)
۰/۳۶	ارتفاع رواناب (میلی‌متر)
۰/۳۷	مجموع ذخیره برگابی (میلی‌متر)
۱۲/۹۸	مجموع نفوذ (میلی‌متر)
۱۰۰/۱	حجم رواناب (متر مکعب)
۲۰۳/۳	دبی پیک (لیتر بر ثانیه)
۵	زمان شروع رواناب بعد از شروع بارش (دقیقه)
۱۵	زمان اوج (دقیقه)
۲/۶۴	ضریب رواناب (درصد)

جدول ۶- مقایسه نتایج هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل

۱۳۹۴/۰۶/۲۵		۱۳۹۳/۰۸/۱۱		رویداد سیل
مشاهداتی	شبیه‌سازی شده	مشاهداتی	شبیه‌سازی شده	متغیرها
۲۰۳/۳	۱۸۲/۷	۱۹۳/۵۸	۱۹۴/۲۵	دبی حداکثر لحظه‌ای ($l s^{-1}$)
۱۵	۱۵	۲۵	۲۵	زمان اوج (min)
۱۰۰/۱	۷۷/۳	۴۳۱/۱۴	۲۰۳/۹۱	حجم سیل (m^3)

(N-S) و میانگین کمینه مربعات خطا (RMSE) استفاده شده است که نتایج به‌ترتیب در جدول ۷ آورده شده است.

ارزیابی آماری هیدروگراف: در ارزیابی آماری هیدروگراف شبیه‌سازی شده از سه آزمون آماری ضریب همبستگی (R^2)، معیار کارایی ناش-ساتکلیف

جدول ۷- مقایسه آماری هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی مدل

روش‌های آماری	R^2	N-S	RMSE
رگبار ۱۳۹۳/۰۸/۱۱	۰/۶۹۶	۰/۵۰	۳۰/۲۶
رگبار ۱۳۹۴/۰۶/۲۵	۰/۶۵	۰/۵۱	۳۲/۸

یک متر) به حساب آورد. با این وجود، نتایج کارایی مدل در پیش‌بینی رواناب نشان می‌دهد، مقادیر رواناب محاسباتی در مقایسه با مقادیر مشاهداتی از تطابق مناسبی برخوردار هستند. شیب شاخه صعودی، مقدار دبی پیک و شکل خاص هر یک از هیدروگراف‌ها متفاوت بوده، این تفاوت‌ها به‌طور اساسی به‌وسیله الگوی رگبار، خصوصیات و ظرفیت رطوبت اولیه خاک هر یک از رگبارها ایجاد شده‌اند که مدل به‌خوبی توانسته است، این تفاوت‌ها و خصوصیات را نشان دهد. از نتایج پیش‌بینی رواناب استنباط می‌شود که همبستگی خوبی بین مقادیر هیدرو گراف‌های مشاهداتی و محاسباتی وجود دارد و مدل توسعه داده شده به‌خوبی توانسته است، رواناب را شبیه‌سازی کند. همچنین، در این تحقیق مدل توسعه داده شده مورد ارزیابی قرار گرفت که با توجه به ضریب همبستگی و ضریب ناش-ساتکلیف قابل قبول، بیانگر کارایی این مدل در شبیه‌سازی بارش-رواناب است.

هرچه ضریب همبستگی و ضریب ناش-ساتکلیف به یک نزدیک‌تر و مقدار RMSE کوچک‌تر باشند، نشان‌دهنده کارایی بهتر مدل در شبیه‌سازی هیدروگراف جریان می‌باشد. همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، مقدار ضریب همبستگی برای هر دو هیدروگراف نزدیک به یک و مقادیر ضریب ناش-ساتکلیف بالای ۰/۵ می‌باشد که قابل قبول است و همین‌طور مقادیر کم RMSE بیانگر میزان خطای کم مدل در شبیه‌سازی رواناب‌های سطحی است.

نتیجه‌گیری

تعیین و برآورد رواناب و سیلاب در بیشتر پروژه‌های منابع آب و خاک، از پارامترهای اصلی و کلیدی به شمار می‌رود. یکی از مهمترین ویژگی‌های این تحقیق را می‌توان استفاده از داده‌های کلیدی و با دقت (نصب باران‌نگار در مجاورت محدوده مورد مطالعه، نصب حسگر در خروجی محدوده برای تعیین دبی و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای دقیق با رزولوشن

منابع مورد استفاده

- Bahremand, A. 2016. HESS opinions: advocating process modelling and de-emphasizing parameter estimation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20: 1433-1445.
- Bhat, G., M. Kumar and C.J. Duffy. 2014. A tightly coupled GIS and distributed hydrologic modeling framework. *Environmental Modelling and Framework*, 62: 1-15.
- Cantón, Y., A. Sole-Benet and F. Domingo. 2004. Temporal and spatial patterns of soil moisture in semiarid badlands of SE Spain. *Journal of Hydrology*, 285: 199-214.
- Chaplot, V., G. Giboire, P. Marchand and C. Valentin. 2005. Dynamic modelling for gully initiation

- and development under climate and land-use changes in northern Laos. *Catena*, 63: 318-328.
5. Chen, J. and B.J. Adams. 2006. Integrati on of artificial neural networks with conceptual models in rainfall -runoff modeling. *Journal of Hydrology*, 318: 232-249.
 6. De Roo, A., C. Wesseling, V. Jetten, R. Offermans and C. Ritsema. 1995. LISEM, limburg soil erosion model, user manual. Department of Physical Geography, Utrecht University, The Netherlands, 72 pages.
 7. De Roo, A.P.J. 1996. The LISEM project: an introduction. *Hydrological Processes*, 10: 1021-1025.
 8. Fall, A. and J. Fall. 2001. A domain-specific language for models of landscape dynamics. *Ecological Modelling*, 141: 1-18.
 9. Holzbecher, E. 2012. *Environmental modellig: using Matlab*. Springer, 410 pages.
 10. Jeng, R.I. and G.C. Coon. 2003. True form of instantaneous unit hydrograph of linear reservoirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(1): 11-17.
 11. Karssenber, D.J. 2002. Building dynamic spatial environmental model. *Netherlands Geographical Studies*, 224 pages.
 12. Merriam, R.A. 1973. Fog drip from artificial leaves in a fog wind tunnel. *Water Resources Research*, 9: 1591-1598.
 13. Mohammadi, M., V.B. Sheikh and A. Sadoddin. 2012. Development and application of GFHM in flood drain simulation, a case study of Jafarabad Basin, Golestan Province. *Journal of Water Resources Engineering*, 5: 13-30.
 14. Morgan, R., J. Quinton and R. Rickson. 1993. EUROSEM version 3.1 a user guide. Silsoe College, Cranfield University, Silsoe, Bedford, UK, 83 pages.
 15. Morgan, R., J. Quinton, R. Smith, G. Govers, J. Poesen, K. Auerswald, G. Chisci, D. Torri, M. Styczen and A. Folly. 1998. The european soil erosion model (EUROSEM): documentation and user guide. Silsoe College, Cranfield University, 30 pages.
 16. Quinton, J.N., R.E. Smith and A. Folly. 1999. EUROSEM: a dynamic approach to erosion simulation. *Experiences with Soil Erosion Models*, 2: 41-51.
 17. Bergstrom, S. 1976. Development and application of a conceptual runoff model for scandinavian catchments. SMHI Norrköping, 803 pages.
 18. Sheikh, V.B., A.J. Hezbi and A. Bahreman. 2015. Distributed dynamic modeling of water balance in the Chehelchai Watershed within a GIS environment. *Journal of Watershed Management*, 12: 42-29.
 19. Sheikh, V., S. Visser and L. Stroosnijder. 2008. A simple model to predict soil moisture: Bridging Event Continuous Hydrological (BEACH) modeling. *Environmental Modelling and Software*, 2: 542-556.
 20. Singh, V.P. and D.A. Woolhiser. 2002. Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, 7(4): 270-292.
 21. Singh, V.P. and D.K. Frevert. 2006. *Watershed models*. Taylor and Francis, 678 pages.
 22. Smith, R. and J.Y. Parlange. 1978. A parameter efficient hydrologic infiltration model. *Water Resources Research*, 14: 533-538.
 23. Sperna Weiland, F.C., L.P.H. Van Beek, J.C.J. Kwadijk and M.F.P. Bierkens. 2010. The ability of a GCM-forced hydrological model to reproduce global discharge variability. *Hydrology and Earth System Science*, 14: 1595-1621.
 24. Tao, C., W. Kainz and R.A. Zuidam. 1996. Coupling GIS and environmental modeling: the implication for spatio-temporal data modeling. *Internation Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 31: 849-856.
 25. Telvari, A. 1996. *Hydrological models in simple language*. Institute of Forestry and Rangeland Research, 118 pages.
 26. van Duersn, W.P.A. and C.G. Wesseling. 1992. The PCRaster package. Technical Report of the Department of Physical Geography, University of Utrecht, The Netherlands, 125 pages.
 27. van Duersn, W.P.A. and J.C.J. Kwadijk. 1993. RHINEFLOW: an integrated GIS water balance model for the Rhine River. In: *Proceeding of HydroGIS93 Conference* (eds. K. Kovar and H.P. Nachtnebel), IAHS Publication, 211: 507-518.
 28. Woolhiser, D.A., R. Smith and D.C. Goodrich. 1990. KINEROS: a kinematic runoff and erosion model: documentation and user manual. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 230 pages.
 29. Yue, S. and M. Hashino. 2000. Unit hydrographs to model quick and slow runoff components of streamflow. *Journal of Hydrology*, 227: 195-206.
 30. Zhao, G.J., G. Hormann, N. Fohrer, H.P. Li, J.F. Gao and K. Tian. 2011. Development and application of a nitrogen simulation model in a data scarce catchment in South China. *Agricultural Water Management*, 98: 619-631.