**اکوهیدرولوژی**

**دورهٔ ۱، شمارهٔ ۲، پاییز ۱۳۹۳، ص ۱۵۲-۱۴۳**

# تحلیل تأثیر مقادیر مختلف بارش روزانه بر مقدار رواناب در حوضهٔ آبخیز قره‌سو در استان کرمانشاه

**حسین زینی‌وند**

استادیار دانشکدهٔ کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان*

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۲/۱۳- تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۰۶/۲۰)

## چکیده

مطالعه و پژوهش دربارهٔ فرایندهای طبیعی مرتبط با آب از نیازهای ضروری کشور ایران است و ازآنجا که در حوضه‌های آبخیز، اندازه‌گیری تمام مؤلفه‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی مؤثر بر فرایند بارش و واکنش حوضه به آنها یعنی تولید رواناب میسر نیست، انتخاب مجموعه‌ای از روابط فیزیکی و تجربی حاکم بر فرایند بارش–رواناب در قالب یک مدل که بتواند با استفاده از حداقل داده‌های ورودی، شبیه‌سازی و پیش‌بینی با دقت مورد نظر را انجام دهد، لازم است. از طرفی، آگاهی از واکنش حوضهٔ آبخیز به شدت و مقدار بارش می‌تواند به پژوهشگران و مدیران در اعمال اقدامات پیشگیرانه در راستای کاهش خسارات ناشی از خشکسالی یا سیل کمک کند. هدف اصلی این پژوهش، شبیه‌سازی فرایند بارش- رواناب و تحلیل تأثیر کاهش شدت و مقدار بارش (خشکسالی) و افزایش شدت و مقدار آن (ترسالی) بر میزان جریان روزانهٔ رودخانه در حوضهٔ آبخیز قره‌سو در استان کرمانشاه با مساحت ۵۲۸۷ کیلومترمربع با استفاده از مدل هیدرولوژیک توزیعی- مکانی WetSpa است. میزان شاخص‌کارایی ناش – ساتکلیف؛ معیار ارزیابی شبیه‌سازی و کارایی مدل در شبیه‌سازی جریان رودخانه، برای حدود ۹ سال دادهٔ روزانه؛ ٦ سال واسنجی و ۳ اعتبارسنجی مدل، به‌ترتیب ۰/۸۳ و ۰/۸٤ (در برابر ۱ که برابری کامل است) به‌دست آمد که بیانگر توانایی بسیار خوب مدل در شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیک است. سپس برای اولین بار تأثیر مقدار و شدت بارش و واکنش حوضهٔ آبخیز بر رواناب خروجی حوضه، با تعیین دو سناریوی کاهش و افزایش مقدار بارش، و اجرای مدل با آنها، تجزیه‌وتحلیل شد.

**واژه‌های کلیدی:** بارش، رواناب، شبیه‌سازی هیدرولوژیک، قره‌سو، واکنش آبخیز، WetSpa.

* نویسندهٔ مسئول

Email: zeinivand.h@lu.ac.ir

**مقدمه**

رواناب حاصل از بارندگی و ذوب برف از منابع اصلی آب در ایران است و با توجه به خصوصیات آب‌وهوایی خشک تا نیمه‌خشک آن، برای تأمین آب مورد نیاز کشاورزی، صنعتی و شرب از اهمیت خاصی برخوردار است. از طرفی، یک حوضهٔ آبخیز به‌عنوان واحد هیدرولوژیکی تنظیم‌کنندهٔ کمیت و کیفیت چرخهٔ آب عمل می‌کند و انسان به‌دلیل ناآگاهی از این چرخهٔ پیچیده و نیز نداشتن برنامه‌ریزی در طرح‌ها به‌لحاظ ارتباط بین مدیریت آب و تحولات جوامع، متحمل هزینه‌های فراوانی شده است. بنابراین با توجه به اهمیت و حساسیت مهار آب‌های سطحی به‌ویژه در ایران که مسئلهٔ کمبود آب در پهنهٔ وسیعی از کشور وجود دارد یا گاه به‌وجود می‌آید (خشکسالی) یا افزایش موقت مقدار رواناب (سیل)، نیاز به شناسایی و به مدل درآوردن واکنش حوضه به بارش، رفتار رودخانه‌ها و شریان‌های آبی به‌منظور برنامه‌ریزی‌های بلندمدت و استفادهٔ بیشتر و بهتر از پتانسیل‌های آنها به‌شدت احساس می‌شود [۲].

پژوهش دربارهٔ فرایندهای طبیعی مرتبط با آب اعم از کمبود (خشکسالی) و مازاد (ترسالی) آن، از اقدامات ضروری کشور است و ازآنجا که در حوضه‌های آبخیز، اندازه‌گیری تمام مؤلفه‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی مؤثر بر فرایند بارش و واکنش حوضه به آنها یعنی تولید رواناب میسر نیست، انتخاب مجموعه‌ای از روابط فیزیکی و تجربی حاکم بر فرایند بارش- رواناب در قالب یک مدل که در عین سادگی ساختار و ارتباط مناسب مؤلفه‌ها با همدیگر، بتواند با استفاده از حداقل داده‌های ورودی، شبیه‌سازی و پیش‌بینی با دقت مورد نظر را انجام دهد، لازم است. از طرفی، آگاهی از واکنش حوضهٔ آبخیز به شدت و مقدار بارش می‌تواند به پژوهشگران و مدیران در اعمال اقدامات پیشگیرانه در راستای کاهش خسارات ناشی از خشکسالی یا سیل کمک کند. یکی از روش‌هایی که بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته، استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی است که در سال‌های اخیر توسعهٔ زیادی یافته‌اند. استفاده از مدل‌های هیدرولوژیک توزیعی به‌عنوان بستر توسعهٔ سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری، راه‌حلی برای چیرگی بر محدودیت‌ها و معضلات شناخت و بررسی فرایندهای هیدرولوژیک، برنامه‌ریزی‌ها و سیاستگذاری‌های مدیریت حوضه‌های آبخیز و منابع آب محسوب می‌شود.

استفاده از این نوع مدل‌ها و تأیید کارایی آنها با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری‌شده در ایستگاه‌ها، امکان پیش‌یابی و پیش‌بینی فرایندهای هیدرولوژیک از جمله تولید رواناب را فراهم می‌کند. طبیعی است که مدلسازی هیدرولوژیک در حوضه‌های آبخیز به‌خصوص حوضه‌های بزرگ و متوسط به‌دلیل عدم درک و فهم کامل سیستم هیدرولوژیک و رفتار تصادفی متغیرها و فرایندهای هیدرولوژیک بسیار پیچیده است [۶ ، ۵]. از طرفی در بیشتر طرح‌های توسعهٔ منابع آب، کنترل سیلاب، ساماندهی رودخانه، آبخیزداری و حفاظت خاک با برآورد مقدار بارش طراحی، می‌توان به هیدروگراف سیلاب طراحی دست یافت. بارش طراحی می‌تواند به‌عنوان ورودی به مدل بارش - رواناب معرفی شود و رواناب حاصل را برآورد کند.

از جمله مدل‌های توزیعی مکانی بر پایهٔ روابط اغلب فیزیکی و مناسب برای شبیه‌سازی پیوسته فرایندهای هیدرولوژیکی در حوضه‌های آبخیز و شبکهٔ رودخانه‌ها، مدل وتسپا است. مدل WetSpa [1] به‌دلیل بهره‌گیری از بیشترین تعداد پارامترهای مؤثر بر جریان و استفاده از سامانهٔ اطلاعات جغرافیایی و همچنین به‌دلیل نیاز به داده‌های اندک و دسترسی به‌نسبت آسان و کم‌هزینه به این داده‌ها، بسیار کاربردی است [۱]. نتایج کاربرد این مدل در بسیاری از حوضه‌های آبخیز در دنیا برای شبیه‌سازی مؤلفه‌های هیدرولوژیکی و فرسایش و رسوب، قابل قبول گزارش شده است که به عناوین برخی از آنها اشاره می‌شود: لیو و همکاران [۱۰] با کاربرد مدل هیدرولوژیک- توزیعی WetSpa در حوضهٔ آلزیت لوکزامبورگ با داده‌های دبی و رواناب ساعتی برای بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی یا پوشش خاک بر رفتار هیدرولوژی رودخانه؛ بهره‌مند [۴] برای شبیه‌سازی جریان روزانه و تطابق هیدروگراف حاصل از مدل با هیدروگراف مشاهداتی رودخانهٔ حوضهٔ هورناد در کشور اسلواکی؛ نورمحمد و همکاران [۱۲] با مدلسازی هیدرولوژیک رودخانه حوضهٔ بالایی سورینام به‌منظور تست مدل در یک حوضهٔ گرمسیری و شبیه‌سازی بیلان آبی و هیدروگراف خروجی حوضه؛ رتبولا [۱۳] به‌منظور شبیه‌سازی رواناب و فسفر در رودخانهٔ سیمیو در محدودهٔ دریاچهٔ ویکتوریا در تانزانیا؛ زینی‌وند و دسمت [۱۸] در

1. Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere

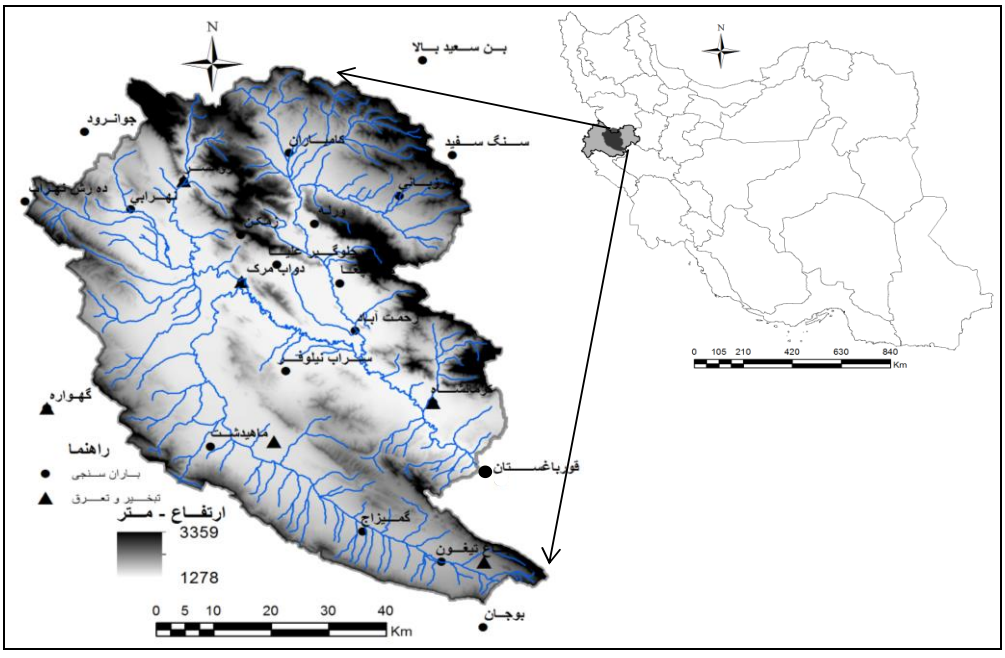
حوضهٔ رودخانهٔ مارگسانی در اسلواکی به‌منظور شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف؛ صفری و همکاران [۱۴] در حوضه‌های آبخیز میسوری ایالات متحدهٔ آمریکا برای تعیین کارایی مدل WetSpa در یک حوضهٔ بزرگ برای کاربرد در زیرحوضه‌های کوچک‌تر فاقد آمار؛ زینی‌وند و دسمت [۱۷] به‌منظور شبیه‌سازی توزیع مکانی فرسایش خاک و رسوب در حوضهٔ آبخیز لتیان؛ متکان و همکاران [۲] به‌منظور شبیه‌سازی جریان رودخانه و تحلیل تأثیرات تغییر کاربری بر آن با استفاده از مدل WetSpa در حوضهٔ آبخیز مرک؛ و مرادی‌پور و همکاران [۳] به‌منظور شبیه‌سازی توزیعی- مکانی و زمانی رواناب آبخیز طالقان.

در همهٔ تحقیقات مذکور نتایج کاربرد مدل رضایت‌بخش گزارش شده است. هدف اصلی این پژوهش، بررسی و تحلیل تأثیر کاهش شدت و مقدار بارش (خشکسالی) و افزایش شدت و مقدار آن (ترسالی) بر میزان جریان روزانهٔ رودخانه در حوضهٔ آبخیز قره‌سو در استان کرمانشاه است که برای اولین بار با استفاده از یک مدل هیدرولوژیک توزیعی- مکانی مانند WetSpa صورت می‌گیرد. با توجه به نوسانات و تغییرات اقلیمی، اجرای این گونه تحقیقات، برای آگاهی‌بخشی به مدیران در اعمال اقدامات پیشگیرانه برای کاهش خسارات ناشی از خشکسالی یا سیل ضروری به‌نظر می‌رسد.

## مواد و روش‌ها

### منطقهٔ تحقیق

حوضهٔ آبخیز قره‌سو با مختصات جغرافیایی "۳۰ '۰ °۳۴ تا '۵۴ °۳۴ عرض شمالی و '۲۲ °۴۶ تا '۲۲ °۴۷ طول شرقی در استان کرمانشاه و در غرب ایران، واقع شده است. این حوضه با ایستگاه هیدرومتری قورباغستان در خروجی آن، از زیرحوضه‌های مهم حوضهٔ آبخیز کرخه است و در شمال غربی آن قرار دارد. مساحت آن ۵۲۷۸ کیلومتر مربع و حداکثر و حداقل ارتفاع آن به ترتیب ۳۳۶۰ و ۱۲۷۰ متر است. متوسط بارندگی سالیانهٔ این حوضه بسیار متغیر و بین ۳۰۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر است. سه رودخانهٔ اصلی مرک، قره‌سو و رازآور در این حوضه جریان دارند. شکل ۱ موقعیت حوضهٔ آبخیز قره‌سو در ایران و استان کرمانشاه به‌همراه نقشهٔ ارتفاعی رقومی (DEM) و شبکهٔ آبراهه‌ای، موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی و تبخیرسنجی استفاده‌شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.




**شکل ۱. موقعیت حوضهٔ آبخیز قره‌سو در ایران و استان کرمانشاه به‌همراه نقشهٔ ارتفاعی رقومی (DEM) و شبکهٔ آبراهه‌ای، موقعیت ایستگاه هیدرومتری خروجی (قورباغستان) و ایستگاه‌های باران‌سنجی و تبخیرسنجی استفاده‌شده در این پژوهش**

**نقشه‌ها و داده‌های استفاده‌شده**

در این پژوهش از سه نقشهٔ توزیع مکانی حوضهٔ آبخیز شامل نقشه‌های رقومی ارتفاع راداری یا SRTM [1] حوضه مستخرج از نقشهٔ ارتفاعی رقومی موجود کشور با قدرت تفکیک ۸۵ متر، نقشهٔ کاربری اراضی (قدرت تفکیک ۸۵ متر) حوضه تهیه‌شده از تصویر ماهواره‌ای لندست و مربوط به سال ۲۰۰۵ (موجود در پژوهشکدهٔ حفاظت خاک و آبخیزداری کشور) و نقشهٔ بافت خاک حوضه مستخرج از گزارش‌ها و نقشه‌های خاک‌شناسی منطقه (بخش تحقیقات خاک و آب مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه)، استفاده شد. همچنین از داده‌های بارندگی، دما و تبخیر روزانه ایستگاه‌های داخل و خارج نزدیک به حوضه، تهیه‌شده از سازمان هواشناسی و سازمان تحقیقات منابع آب و آمار دبی روزانه در خروجی حوضه (ایستگاه هیدرومتری قورباغستان)، تهیه‌شده از سازمان تحقیقات منابع آب استفاده شد. همهٔ داده‌های مورد نیاز در ایستگاه‌های مختلف (شکل ۱) به‌مدت حدود ۹ سال مشترک (از تاریخ ۱۹۹۷/۳/۲۱ تا ۲۰۰۵/۱۲/۳۱) در شبیه‌سازی (واسنجی و اعتبارسنجی نتایج مدل) استفاده شد. در این پژوهش از داده‌های ۲۲ ایستگاه باران‌سنجی و ۶ ایستگاه تبخیر و تعرق و دماسنجی استفاده شد.

**مدل WetSpa**

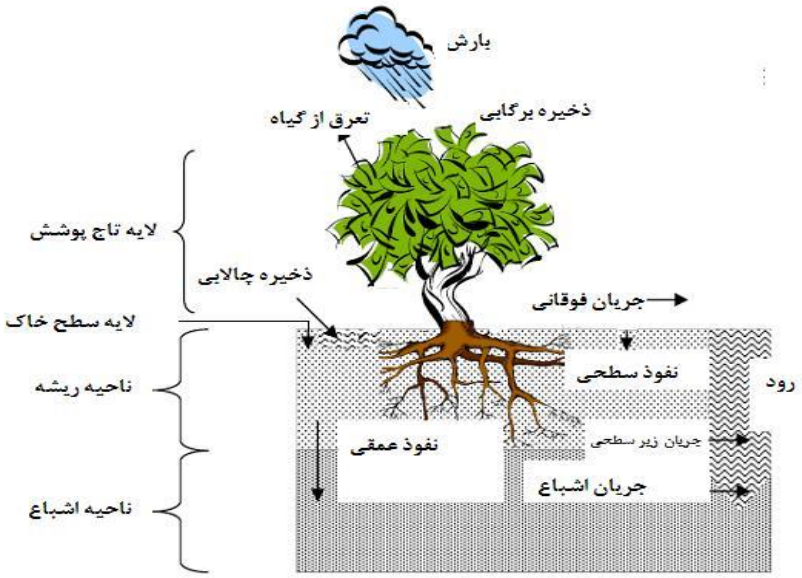
مدل توزیعی انتقال آب و انرژی بین خاک گیاه و اتمسفر، WetSpa، یکی از مدل‌های توزیعی مناسب است که در بسیاری از حوضه‌های آبریز در کشورهای مختلف برای شبیه‌سازی کلیهٔ مؤلفه‌های هیدرولوژیکی از جمله شبیه سازی جریان رودخانه در سطح پیکسل و در مقیاس حوضهٔ آبخیز به‌کار برده شده است. این مدل را اولین بار ونگ و همکاران [2] [۱۵] ابداع کردند و سپس دسمت و همکاران [۷]؛ لیو و همکاران [۱۰]؛ و زینی‌وند و دسمت [۱۷] آن را توسعه دادند. WetSpa نوعی مدل هیدرولوژیکی و فرسایش خاک و نمونه‌ای از مدل‌های با مبنای اغلب فیزیکی است، زیرا براساس راه‌حل معادلات اساسی فیزیکی به شبیه‌سازی در مقیاس بزرگ و مطالعهٔ فرایندهای سیستم اصلی می‌پردازد؛ و جزو مدل‌های توزیعی است، زیرا در آن اطلاعات مکانی به‌صورت واحدهایی در سطح پیکسل در کنار داده‌های هیدرولوژیک قرار می‌گیرند و حوضه و شبکهٔ آبراهه را به‌صورت شبکه‌ای به‌هم‌پیوسته درنظر می‌گیرد همچنین این مدل از نظر زمانی، به‌صورت پیوسته است (در این پژوهش، خلاصه‌ای از مشخصات مدل آورده شده است. برای آگاهی از جزئیات آن، می‌توان به وب‌سایت مدل به نشانی http://www.vub.ac.be/WetSpa/، همچنین لیو و دسمت [۹]، بهره‌مند [۴] و زینی‌وند [۱] مراجعه کرد).

باران اصلی‌ترین ورودی قسمت هیدرولوژیکی مدل است. ازآنجا که مدل براساس شبکهٔ سلولی طراحی شده، مطابق شکل ۲ سیستم هیدرولوژیک حوضه برای هر شبکهٔ سلولی، از چهار لایه در جهت عمودی تشکیل شده است که عبارتند از: لایهٔ تاج‌پوشش، لایهٔ سطح خاک، ناحیهٔ ریشه و ناحیهٔ اشباع.

مدل در هر شبکهٔ سلولی با توجه به مقدار بارش، دما و تبخیر و تعرق، فرایندهای هیدرولوژیک ذخیرهٔ برگابی، ذخیره چالابی، رواناب سطحی، نفوذپذیری، تبخیر و تعرق، ذوب برف، نفوذ عمقی، جریان زیرسطحی و جریان آب زیرزمینی را شبیه‌سازی می‌کند.

بارش، نیروی محرکهٔ حیاتی و ورودی اصلی بسیاری از فرایندهای هیدرولوژیک است. مدل‌های بارش- رواناب به ورودی بارش حساس‌اند و داده‌های بارش به‌طور معمول به‌صورت نقطه‌ای در ایستگاه‌های باران‌سنجی ثبت می‌شوند. در این مدل برای رسیدن به تخمین مکانی بارش از روش درون‌یابی چندضلعی‌های تیسن [3] استفاده می‌شود. همچنین تخمین توزیع مکانی برخی پارامترهای هواشناسی مانند دما در حالتی که تغییرات زیاد این پارامترها با ارتفاع وجود دارد، با استفاده از پدیدهٔ گرادیان دما یا لپس ریت [4] صورت می‌گیرد. این مدل قادر است هم با داده‌های ورودی در گام زمانی کوتاه (دقیقه و ساعت) و هم با داده‌های زمانی با گام بلند (روزانه) شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی را انجام دهد. در این پژوهش گام زمانی روزانه برای استفاده در مدل انتخاب شده است.

1. Shuttle Radar Topography Mission
2. Wang
3. Thiessen polygon
4. Laps rates




**شکل ۲. اجزای سیستم هیدرولوژیک حوضه در مدل WetSpa [۹]**

بیلان آبی برای کل حوضه به‌منظور تعیین تغییرات سیستم هیدرولوژیکی حوضه محاسبه می‌شود. بارندگی، ورودی سیستم است، درحالی که رواناب، جریان سطحی، جریان آب زیرزمینی و تبخیر و تعرق جزء خروجی سیستم هیدرولوژیک یک حوضه‌اند. وقتی که شبیه‌سازی برای یک دورهٔ به‌نسبت طولانی انجام می‌گیرد از تغییرات ذخیرهٔ چالابی، ذخیرهٔ برگابی و کانال می‌توان چشم‌پوشی کرد و بیلان آبی کل حوضه به طریق زیر محاسبه می‌شود:

$$P = RT + ET + \Delta SS + \Delta SG \qquad (۱)$$

که در آن: P: مقدار کل بارندگی در دورهٔ شبیه‌سازی در حوضه (mm)؛ RT و ET: کل رواناب و کل تبخیر و تعرق حوضه (mm)؛ ΔSS: تغییرات رطوبت خاک در حوضه بین آغاز و پایان دورهٔ شبیه‌سازی (mm)؛ و ΔSG: تغییرات آب زیرزمینی حوضه (mm) است.

در مدل WetSpa برای تخمین رواناب سطحی به‌عنوان بخشی از رواناب کل و فرایند نفوذپذیری، از یک روش ضریب اصلاحی استفاده شده است که در آن نفوذپذیری و رواناب در رابطه با عواملی چون توپوگرافی، بافت خاک، کاربری زمین، رطوبت خاک و شدت بارش بیان شده‌اند و معادلهٔ آنها را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

$$PE_i(t) = C_i\left[P_i(t) - I_i((t))\right]\left[\frac{\theta_i(t)}{\theta_{i,s}}\right]^a \qquad (۲)$$

$$F_i(t) = P_i(t) - I_i(t) - PE_i(t) \qquad (۳)$$

که در آن: $PE_i(t)$: بارش مازاد در سلول i در گام زمانی (mm)؛ $F_i(t)$: نفوذپذیری سلول (mm)؛ $I_i(t)$: تلفات برگابی (mm)؛ $\theta_i(t)$: محتوای رطوبتی خاک در زمان t ($m^3/m^3$)؛ $\theta_{i,s}$: پروزیته یا تخلخل خاک ($m^3/m^3$)؛ α: نمایی در رابطه با شدت بارندگی (-) ؛ و $C_i$: ضریب رواناب پتانسیل در سلول i (-) است. همچنین در این مدل روندیابی جریان آب در مدل به‌روش معادلات موج‌پخشی خطی انجام می‌گیرد [۱۰].

### واسنجی مدل

فرایند واسنجی شامل کنترل و مقایسهٔ دبی شبیه‌سازی‌شده پس از اجرای مدل با دبی مشاهداتی است. مدل با تنظیم ورودی‌های آن (پارامترهای عمومی مدل) و ارزیابی خروجی‌ها واسنجی می‌شود. در این مدل ۱۱ پارامتر عمومی برای واسنجی وجود دارد (جدول ۱) که به‌صورت دستی واسنجی شدند.

جدول ۱. پارامترهای عمومی مدل WetSpa و مقادیر واسنجی‌شدهٔ آنها در حوضهٔ آبخیز قره‌سو

| ردیف | پارامترهای عمومی مدل | علامت اختصاری | واحد | مقدار واسنجی‌شده |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | فاکتور مقیاس جریان زیرسطحی | Ki | - | ۱/۰۳ |
| ۲ | ضریب افت آب‌های زیرزمینی | Kg | $d^{-1}$ | $۸*۱۰^{-۵}$ |
| ۳ | مقدار رطوبت نسبی اولیه | K_ss | mm | ۰/۸ |
| ۴ | فاکتور تصحیح تبخیر و تعرق پتانسیل | K_ep | - | ۱/۲۷ |
| ۵ | ذخیرهٔ فعال آب‌های زیرزمینی | G0 | mm | ۱/۰۲ |
| ۶ | حداکثر ذخیرهٔ آب‌های زیرزمینی | G_max | mm | ۱۳۲۳ |
| ۷ | دمای آستانهٔ ذوب | T0 | $^oC$ | ۱/۵۸ |
| ۸ | ضریب دما درجه- روز | K_snow | $mm\,^oC^{-1}d^{-1}$ | ۱/۶۷ |
| ۹ | ضریب باران درجه- روز | K_rain | $^oC^{-1}d^{-1}$ | ۰/۰۴ |
| ۱۰ | مؤلفهٔ رواناب سطحی برای شدت بارندگی نزدیک صفر | K_run | - | ۵/۵۸ |
| ۱۱ | شدت بارندگی متناظر با توان رواناب سطحی | P_max | $mmd^{-1}$ | ۲۰۰ |

**ارزیابی مدل**

در مرحلهٔ واسنجی و اعتبارسنجی، عملکرد مدل توسط معیارهای آماری ارزیابی می‌شود. در این پژوهش از معیار آماری ناش و ساتکلیف برای ارزیابی عملکرد مدل استفاده شد. ناش و ساتکلیف [۱۱] یک ضریب بی‌بُعد به نام کارایی مدل NS ارائه دادند. این معیار به نام ناش- ساتکلیف معروف است. این معیار نشان‌دهندهٔ دقت شبیه‌سازی مدل است و شامل استاندارد واریانس باقی‌مانده‌ها می‌شود. این معیار از مقادیر منفی تا ۱ تغییر می‌کند و هر چه به ۱ نزدیک‌تر شود، نشان‌دهندهٔ تناسب بین مقادیر مشاهداتی و مقادیر شبیه‌سازی‌شده است.

$$NS = ۱ - \frac{\sum_{i=۱}^{N}\left(Qs_i - Qo_i\right)^۲}{\sum_{i=۱}^{N}\left(Qo_i - \overline{Qo}\right)^۲} \qquad (۴)$$

که در این رابطه، $Qs_i$: دبی شبیه‌سازی‌شده؛ $Qo_i$: دبی مشاهداتی در گام زمانی i ($m^3/s$)؛ $\overline{Qo}$: میانگین دبی‌های مشاهداتی در طول دورهٔ آماری؛ و N: تعداد گام‌های زمانی است.

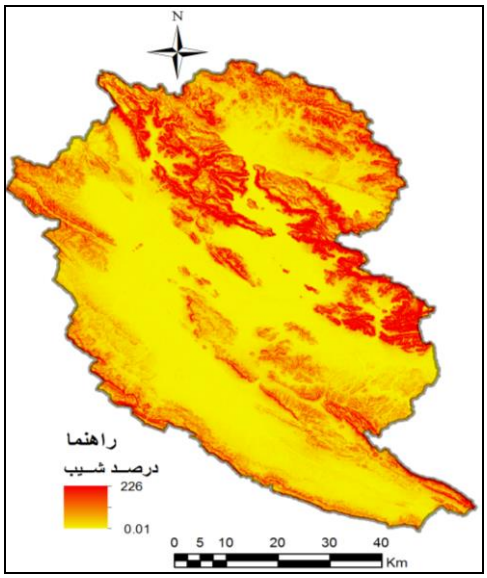
**سناریوهای مختلف بارش**

در این پژوهش بعد از واسنجی و اعتبارسنجی مدل با مجموع داده‌های روزانه تقریباً ۹ سال، برای مشخص کردن تأثیر مقدار و شدت بارش بر رواناب خروجی حوضه، به تعیین سناریوی کاهش مقدار بارش (۵۰ درصد کمتر از میزان ثبت‌شدهٔ بارش که مقداری محتمل است و ممکن است در حالت‌های خشکسالی اتفاق بیفتد) و سناریوی افزایش مقدار بارش (دوبرابر میزان ثبت‌شدهٔ بارش که ممکن است در حالت‌های ترسالی اتفاق بیفتد) یعنی در مجموع دو سناریوی بارش اقدام شد بدین صورت که تمام داده‌های روزانه بارندگی ثبت‌شده در طول دورهٔ آماری نصف یا دوبرابر مقادیر بارش‌های به‌وقوع‌پیوسته، شده و به‌عنوان ورودی بارش به مدل معرفی شد. پس از اجرای مدل با مقادیر بارش حاصل از سناریوها، مقادیر جریان رودخانه شبیه‌سازی‌شده به‌صورت گرافیکی و آماری، مقایسه و تحلیل شد.

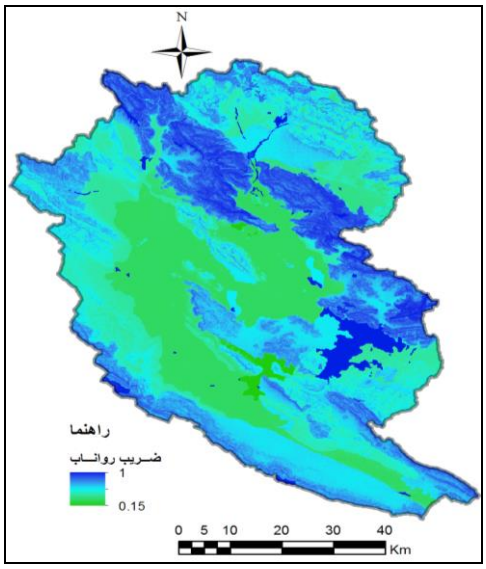
## نتایج

پس از جمع‌آوری اطلاعات پایهٔ حوضه و تهیهٔ آمار و اطلاعات بارندگی، تبخیر و تعرق، دما و دبی روزانه، مدل WetSpa به‌منظور شبیه‌سازی رواناب در حوضهٔ آبخیز قره‌سو اجرا شد. همان‌طور که ذکر شد از تقریباً ۹ سال دورهٔ آماری، در حدود ۶ سال اول (از تاریخ ۱۹۹۷/۳/۲۱ تا ۲۰۰۲/۱۲/۳۱) برای واسنجی مدل و ۳ سال بعدی (از تاریخ ۲۰۰۳/۱/۱ تا ۲۰۰۵/۱۲/۳۱) برای اعتبارسنجی نتایج مدل در نظر گرفته شد. در شکل‌های ۳ و ۴ نقشه‌های شیب و ضریب رواناب که از نقشه‌های مهم در برآورد رواناب هستند نشان داده شده است. در جدول ۱، پارامترهای عمومی مدل و مقادیر واسنجی‌شدهٔ آنها در حوضهٔ آبخیز قره‌سو آورده شده است. همچنین شکل‌های ۵ و ۶ مقایسهٔ گرافیکی هیدروگراف روزانهٔ مشاهده‌شده و

شبیه‌سازی‌شده برای دورهٔ واسنجی و اعتبارسنجی را نشان می‌دهند. جدول ۲ مقادیر شاخص‌کارایی ناش - ساتکلیف مدل برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی را نشان می‌دهد. در شکل ۷، دبی شبیه‌سازی‌شده با توجه به دبی مشاهداتی به همراه دبی شبیه‌سازی‌شده در دو حالتی که بارش ۵۰ درصد بارش اندازه‌گیری‌شده یا دوبرابر بارش اندازه‌گیری شده است، همچنین اختلاف نسبی دبی شبیه‌سازی‌شده در این دو حالت برای یک دوره به‌عنوان نمونه آورده شده است. در جدول ۳، واکنش حوضه به بارش از نظر حجم رواناب خروجی در طول دورهٔ آماری آورده شده است. همچنین نسبت رواناب در حالت کاهش دبی حاصل از کاهش بارش (نصف بارش ثبت‌شده) به رواناب شبیه‌سازی‌شده حاصل از بارش ثبت‌شده و نسبت رواناب شبیه‌سازی‌شده حاصل از بارش ثبت‌شده به رواناب حاصل از افزایش بارش (دوبرابر بارش ثبت‌شده) محاسبه شده است.



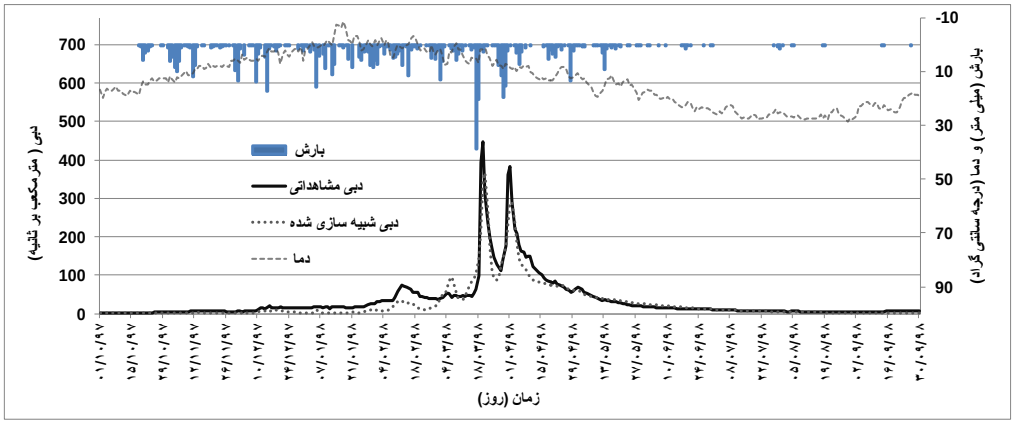

شکل ۳. نقشهٔ شیب در حوضهٔ آبخیز قره‌سو



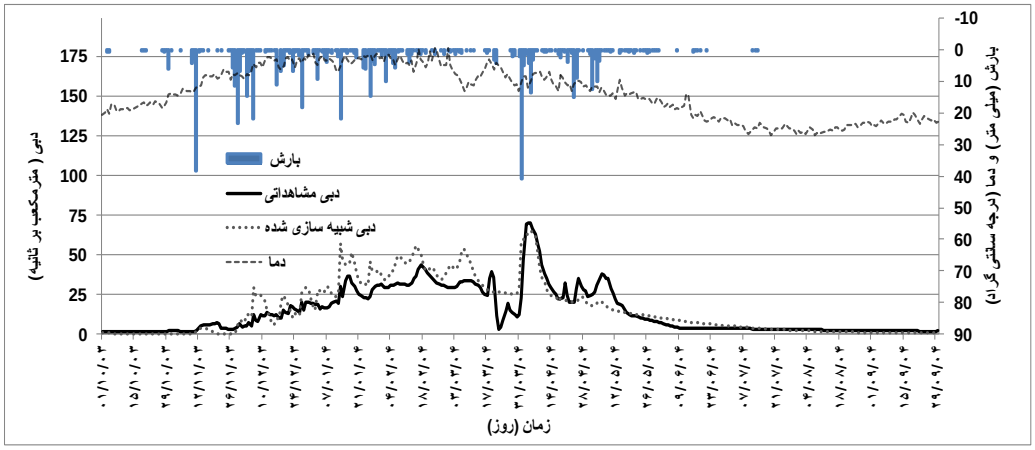

شکل ۴. ضریب رواناب پتانسیل در حوضهٔ آبخیز قره‌سو

جدول ۲. نتایج حاصل از تعیین مقادیر شاخص کارایی مدل برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی

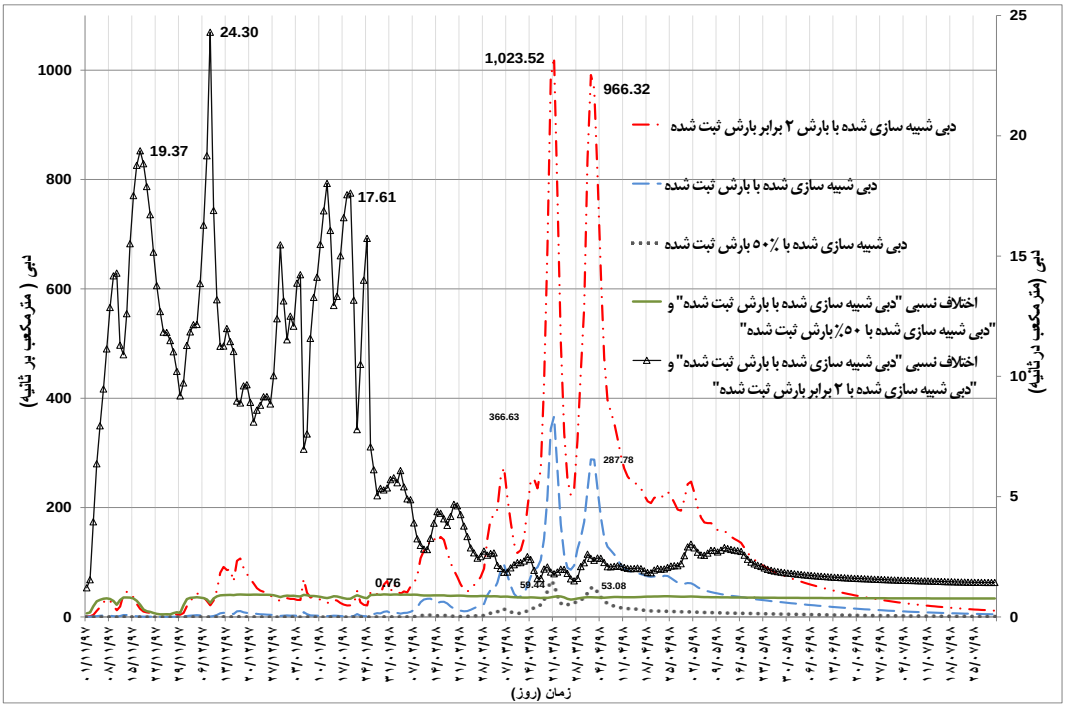
| معیار کارایی مدل | دورهٔ واسنجی | دورهٔ اعتبارسنجی |
|---|---|---|
| ناش – ساتکلیف | ۰/۸۳ | ۰/۸۴ |




شکل ۵. مقایسهٔ گرافیکی هیدروگراف روزانهٔ مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده برای یک سال از دورهٔ واسنجی در حوضهٔ آبخیز قره‌سو




**شکل ۶. مقایسهٔ گرافیکی هیدروگراف روزانهٔ مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده برای یک سال از دورهٔ اعتبارسنجی در حوضهٔ آبخیز قره‌سو**




**شکل ۷. دبی شبیه‌سازی‌شده با توجه به دبی مشاهداتی، دبی شبیه‌سازی‌شده در دو حالتی که بارش برابر ۵۰ درصد بارش یا دوبرابر بارش ثبت‌شده است (قرائت از محور عمودی سمت چپ)، و اختلاف نسبی دبی شبیه‌سازی‌شده در این دو حالت (قرائت از محور عمودی سمت راست) برای دورهٔ نمونه از مرحلهٔ واسنجی (۹۷/۱۱/۱ تا ۹۸/۰۷/۲۵)**

**جدول ۳. واکنش حوضه به بارش از نظر میزان رواناب در طول دورهٔ آماری**

| وضعیت بارش | حجم آب خروجی (مترمکعب) | نسبت رواناب |
|---|---|---|
| ۵۰ درصد بارش ثبت‌شده | ۶۵۷۷۸۲۸۹۹ | ۰/۱۷ |
| بارش ثبت‌شده | ۳۸۵۴۶۸۶۶۶۵ | ۰/۲۵ |
| ۲ برابر بارش ثبت‌شده | ۱۵۰۸۲۵۸۳۰۹۷ | |

**بحث و نتیجه‌گیری**

با نگاهی به نتایج حاصل از دو مرحلهٔ واسنجی و اعتبارسنجی مدل WetSpa می‌توان دریافت که نتایج اعتبارسنجی این مدل، همانند نتایج مرحلهٔ واسنجی بوده است که این را می‌توان به‌معنای ثبات مقادیر پارامترها (جدول ۱) و همچنین اطمینان‌بخش بودن نتایج مدل برای این حوضهٔ آبخیز دانست.

مقایسهٔ گرافیکی دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شدهٔ مدل در دورهٔ واسنجی (شکل ۵) و تطابق به‌نسبت خوب آنها به‌خصوص دبی‌های اوج (هم مقادیر و هم زمان تا اوج) نیز می‌تواند بیانگر توانایی مدل برای شبیه‌سازی دبی در این حوضه باشد. با نگاه به شکل ۵، می‌توان مشاهده کرد که از حدود ۱۹۹۷/۱۲/۱ تا اواخر ۱۹۹۸/۳/۱۷، یعنی دی تا بهمن با وجود بارش در حوضه، دبی تغییر آنچنانی ندارد. این وضعیت به این معناست که بارش به‌صورت برف بوده و مدل آن را بسیار خوب شبیه‌سازی کرده است و بعد از آن، با افزایش دما، ضمن ریزش باران، ذوب برف نیز اتفاق افتاده که سبب افزایش دبی و ایجاد سیل در خروجی حوضه شده است. شایان ذکر است که تجمع و ذوب برف در این مدل از دو روش درجه – روز و بیلان انرژی امکان‌پذیر است [۱۸]، که در این تحقیق به‌علت در دسترس نبودن داده‌های روش بیلان انرژی از روش درجه روز استفاده شده است. در این شکل دبی پایه در اواخر بهار و تابستان نیز به‌خوبی شبیه‌سازی شده است. در شکل ۶ که از دورهٔ اعتبارسنجی آورده شده است هرچند به‌خوبی شکل ۵، شبیه‌سازی نشده، به‌لحاظ وجود نوسانات بارش (باران و برف) در این سال، دارای اهمیت است و مدل دبی اوج رخداده در فروردین ماه را هم از نظر میزان و هم از نظر زمان وقوع به‌خوبی شبیه‌سازی کرده است. در شکل ۷ که در آن، دبی شبیه‌سازی‌شده با توجه به دبی مشاهداتی قسمتی از سال آبی ۷۷-۱۳۷۶ برای مقایسه با دبی شبیه‌سازی‌شده در دو حالتی که بارش ۵۰ درصد یا دوبرابر بارش اندازه‌گیری است، همچنین اختلاف نسبی دبی شبیه‌سازی‌شده برای این دو حالت برای یک دورهٔ نمونه از مرحلهٔ واسنجی (۱۹۹۷/۱۱/۱ تا ۱۹۹۸/۰۷/۲۵) آورده شده است، واکنش حوضه به تغییرات بارش، بخوبی دیده می‌شود. مطابق این شکل، با اینکه میزان بارش به یک نسبت ثابت (نصف و دوبرابر) بارش اندازه‌گیری‌شده، تغییر کرده است، پاسخ هیدرولوژیکی حوضه به این تغییرات و در این مدت، یکسان نیست. در این شکل مشاهده می‌شود زمانی که بارش به‌نسبت کم است، یا زمین هنوز به‌طور کامل از آب اشباع نشده است (قسمت ابتدایی گراف تا اواسط آن یعنی تا اواخر بهمن)، اختلاف نسبی و نوسانات دبی زیاد است و نظم مشخصی ندارد. ازآنجا که تجمع برف به مقدار بارش بستگی دارد، در زمان ذوب برف نیز این اختلاف زیاد است. از اواخر بهمن که شرایط رطوبتی زمین و شرایط دمایی متفاوت می‌شود، اختلاف دبی و نوسانات آن، به‌ازای افزایش یا کاهش بارش، حالت به‌نسبت منظمی می‌گیرد و تغییرات دبی بسیار کمتر است. از نسبت رواناب محاسبه‌شده در جدول ۳ می‌توان دریافت که هرچند با افزایش بارش، رواناب افزایش داشته، همان‌طور که انتظار می‌رفت، لزوماً با افزایش دوبرابری بارش، رواناب حاصل، دوبرابر نمی‌شود. به‌عبارتی نسبت رواناب حاصل به‌ازای نسبت مساوی افزایش مقادیر بارش به‌طور یکسان تغییر نمی‌کند. برای مثال دبی شبیه‌سازی‌شده به‌ازای بارش ۵۰ درصد، بارش ثبت‌شده و دوبرابر بارش ثبت‌شده، به‌ترتیب ۶۵۷۷۸۲۸۹۹، ۳۸۵۴۶۸۶۶۶۵ و ۱۵۰۸۲۵۸۳۰۹۷ متر مکعب است که نسبت آنها به‌ترتیب ۰/۱۷ و ۰/۲۵ است. شاید بتوان علت را به تلفات اولیهٔ بارش که در مقادیر کمتر بارش محسوس‌تر است و با افزایش بارش، نسبت به کل بارش کمتر می‌شود، نسبت داد. نتیجهٔ این تحقیق، تأییدکنندهٔ کمی غیرخطی بودن واکنش حوضه به مقادیر مختلف بارش نیز است.

با توجه به نتایج و موارد بحث‌شده در این پژوهش، می‌توان به این جمع‌بندی رسید که مدل WetSpa، توانایی خوبی [۱۴] در شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی در حوضهٔ آبخیز قره‌سو دارد که با نتایج بسیاری از تحقیقات گذشته (لیو و همکاران [۱۰]، بهره‌مند [۴]، نورمحمد و همکاران [۱۲]، زینی‌وند و دسمت [۱۷]، و صفری و همکاران [۱۴]) همخوانی دارد. همچنین، حوضهٔ آبخیز واکنش‌های متفاوتی به مقادیر مختلف بارش دارد و می‌توان با مدلسازی و شبیه‌سازی کمی تأثیرات غیرخطی بارش بر حوضه‌های آبخیز مختلف، مدیران منابع طبیعی و منابع آب را در ارائهٔ راهکارهای مدیریتی لازم در مواجهه با حالت‌های مختلف از جمله نوسانات و تغییرات اقلیمی (خشکسالی یا ترسالی)، یاری رساند.

## منابع


۱. زینی‌وند حسین. ۱۳۸۹، شبیه‌سازی توزیع مکانی فرسایش خاک و رسوب در مقیاس حوضه. ششمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری و چهارمین همایش ملی فرسایش و رسوب، دانشگاه تربیت مدرس، اردیبهشت ماه.

۲. متکان علی‌اکبر، زینی‌وند حسین، بیات باقر. میرباقری بابک، و غفوری عبدالمحمد، ۱۳۹۰، شبیه‌سازی جریان روزانه رودخانه و تحلیل اثرات تغییر کاربری بهینه روی آن با استفاده از مدل WetSpa در محیط GIS (مطالعهٔ موردی: حوزهٔ آبریز مرک، استان کرمانشاه). مجلهٔ سنجش از دور و GIS ایران، سال سوم، شماره دوم: ۱۸-۱.

۳. مرادی‌پور شهین. بهره‌مند عبدالرضا، زینی‌وند حسین، و نجفی‌نژاد علی، ۱۳۹۰، شبیه‌سازی توزیعی مکانی سیل با مدل هیدرولوژیکی WetSpa در حوضهٔ آبخیز طالقان، البرز، هفتمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۷ و ۸ اردیبهشت ماه.

4. Bahremand A. 2006, Simulating the effects of reforestation on floods using spatially distributed hydrologic modeling and GIS. PhD thesis of Department of Hydrology and Hydraulic Engineering, Vrije universiteity Brussel, Brussels, Belgium. 150

5. Beven K. J. 2000, Rainfall-runoff Modeling. John Willey and Sons Ltd, England. 200 pp.

6. Booij M.J. 2002, Appropriate modeling of climate change impacts of river flooding, Ph.D. thesis, Universiteit Twente, Nederland, 179 pp.

7. De Smedt F., Liu Y.B., and Gebremeskel S. 2000, Hydrological modeling on a catchment scale using GIS and remote sensed land use information, In: Brebbia, C.A. (ed), Risk Analyses II, WIT press, Southampton, Boston, pp. 295-304.

8. Kuczera G. 1983, Improved parameter inference in catchment models.1.Evaluating parameter uncertainty. Water Resour. Res. 19(5):1151–1162.

9. Liu Y.B., and De Smedt F. 2004, WetSpa Extension, A GIS-based Hydrologic Model for Flood Prediction and Watershed Management and Erosion and Sediment Transport Simulation, Documentation and User Manual. 155 PP.

10. Liu Y.B., Gebremeskel S., De Smedt F., and Pfister L. 2003, A diffusive transport approach for flow routing in GIS-based flood modeling, Journal of Hydrology, 283,91-106.

11. Nash J.E., and Sutcliffe J.V. 1970, River flow forecasting though conceptual models. Part 1-A discussion of principles. Journal of hydrology, 10: 282-290.

12. Nurmohamed R. Naipal S. and De Smedt F. 2006, Hydrologic Modeling of the Upper Suriname River basin Using WetSpa and Arcview GIS, Journal of Spatial Hydrology, Vol.6, No.1 Spring 2006.

13. Rwetabula J. 2007, Modelling the Fate and Transport of Organic Micro-Pollutants and Phosphates in the Simiyu River and Speke Gulf (Lake Victoria), Tanzania, Department of Hydrology and Hydraulic Engineering VUB – HYDROLOGIE (52).

14. Safari A., De Smedt F., and Moreda F. 2012, WetSpa model application in the Distributed Model Intercomparison Project (DMIP2). Journal of Hydrology.

15. Wang Z., Batelaan O., and De Smedt F. 1997, Adistributed model for water and energy transfer between soil, plants and atmosphere (WetSpa), physics and chemistry of the earth, (21): 189-193.

16. Zeinivand H. 2009, Development of Spatially Distributed Hydrological WetSpa Modules for Snowmelt, Soil Erosion, and Sediment Transport. Thesis submitted in fulfilment of the requirements for the award of the degree of Doctor in de ingenieurswetenschappen (Doctor in Engineering).

17. Zeinivand H., and De Smedt F. 2009, Spatially distributed modeling of soil erosion and sediment transport at watershed scale, World Environmental & Water Resources Congress (EWRI), 17-21 May, Kansas City, USA.

18. Zeinivand H., and De Smedt F. 2010, Prediction of snowmelt floods with a distributed hydrological model using a physical snow mass and energy balance approach, Natural Hazards Journal, 54(2), pp 451-468.