

Article Type: Applied

نوع مقاله: کاربردی

Comparison of the Performance of MISDc and HBV Hydrological Models in Runoff Simulation of Kakareza Basin in Lorestan Province

A. Amiri^{1*}, H. Salimi¹

1- MSc of Watershed Management Engineering, Lorestan University, Iran.

*(Corresponding Author Email: aamiri1670@gmail.com)

Received: 23-05-2020

Accepted: 22-08-2020

مقایسه عملکرد دو مدل هیدرولوژی MISDc و HBV در شبیه‌سازی رواناب حوضه آبخیز کاکارضا

عاطفه امیری^{۱*}، حیات سلیمی^۱

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه لرستان، ایران.

*(نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: aamiri1670@gmail.com)

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۳/۰۳

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۶/۰۱

Abstract

Hydrological models are useful tools in hydrological researches, testing research hypotheses and understanding hydrological processes, designing, evaluating and allocating water resources (flood plain assessment and ecosystem conservation). Hydrology models are simplified representations of the actual hydrology system and help to study the function of the basin in response to various inputs and to better understand hydrological processes. Due to the variety of hydrological models, it is difficult to choose a model. Therefore, comparative evaluation of models is needed to determine the capability of models in the study area. In this study, MISDc and HBV semi distributed models are used to simulate the flow of Kakareza watershed. For this instance a 9 year simulation period (2002-2010) was selected. The accuracy of model performance was evaluated using Nash-Sutcliffe (NS) and the coefficient of determination (R2) criterion. The Nash-Sutcliffe values and coefficient of determination for MISDc model were 0.83 and 0.84, for HBV model, 0.79 and 0.80 for 2002-2008 calibration period respectively and for MISDc model, it was 0.88 and 0.89, and for the HBV model, it is 0.72 and 0.73, for the 2009-2010 validation period, which indicates the better performance of the MISDc model in daily flow simulation in the study area. The results show that the MISDc model has performed better than the HBV model and it is suggested to use this model in hydrological studies of the region.

Keywords: Lorestan, Rainfall-Runoff Model, Calibration and Validation, MISDc, HBV.

چکیده

مدل‌های هیدرولوژی ابزار مفیدی در تحقیقات هیدرولوژی، آزمایش فرضیه‌های تحقیق و درک فرآیندهای هیدرولوژی، طراحی و ارزیابی و تخصیص منابع آب (ارزیابی سیلاب دشت‌ها و حفاظت اکوسیستم‌ها) به‌شمار می‌روند. مدل‌های هیدرولوژی نمایش ساده شده سیستم واقعی هیدرولوژی هستند و به مطالعه کارکرد حوضه در واکنش به ورودی‌های گوناگون و فهم بهتر از فرآیندهای هیدرولوژی کمک می‌کنند. باتوجه‌به تنوع مدل‌های هیدرولوژی انتخاب هر مدل برای هر کار دشوار است. بنابراین نیاز است، ارزیابی مقایسه‌ای بین مدل‌ها برای مشخص کردن توانایی و قابلیت هر مدل در منطقه مطالعاتی انجام گیرد. در این مقاله از دو مدل نیمه توزیعی MISDc و HBV برای شبیه‌سازی جریان حوضه آبخیز کاکارضا استفاده شده است. دوره مشترک شبیه‌سازی این دو مدل در بازه زمانی ۹ ساله (۲۰۰۲-۲۰۱۰) انتخاب شد. دقت نتایج حاصل از مدل‌ها با استفاده از معیارهای نش-ساتکلیف و ضریب تعیین ارزیابی شد. مقادیر به‌دست آمده نش-ساتکلیف و ضریب تعیین برای مدل MISDc به ترتیب ۰/۸۳ و ۰/۸۴ و برای مدل HBV به ترتیب ۰/۷۹ و ۰/۸۰ برای دوره واسنجی ۲۰۰۲-۲۰۰۸ و برای مدل MISDc به ترتیب ۰/۸۸ و ۰/۸۹، و برای مدل HBV به ترتیب ۰/۷۲ و ۰/۷۳ برای دوره اعتبارسنجی ۲۰۰۹-۲۰۱۰ می‌باشد، که بیانگر عملکرد بهتر مدل MISDc در شبیه‌سازی جریان روزانه در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. نتایج حاصل نشان می‌دهد مدل MISDc بهتر از مدل HBV عمل کرده است و پیشنهاد می‌شود در مطالعات هیدرولوژی منطقه از این مدل استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: لرستان، مدل بارش-رواناب، واسنجی و اعتبارسنجی، MISDc، HBV.

قرار گرفتند. نتایج ارزیابی با چهار شاخص ارزیابی مختلف نشان داد، مدل SMAR کارایی و عملکرد بهتری نسبت به مدل HMS دارد، اما مدل HMS برای شبیه سازی مقادیر پیک کارایی بهتری دارد. Brocca و همکاران (۲۰۱۳) نسخه دوم مدل MISDc را برای شبیه سازی رواناب در مقیاس روزانه در حوضه آبخیز رودخانه Tibere بررسی کردند. در این پژوهش از ضریب نش-ساتکلیف برای ارزیابی کارایی مدل استفاده شد، نتایج حاصل از این ضریب توانایی بالای مدل در شبیه سازی جریان را بیان می کند. Smith و همکاران (۲۰۱۵) شاخص رطوبت خاک (SWI) حاصل از سنسور پیشرفته (ASCAT) روی ماهواره Metop در حوضه رودخانه تیر ایتالیا را بررسی کردند. SWI در ابتدا با الگوی زمانی رطوبت خاک حاصل از مدل بارش-رواناب پیوسته (MISDc) برای ارزیابی ارتباط آن با داده های مدل شده مقایسه شد و عملکرد مدل در برآورد سیل تجزیه و تحلیل شد. نتایج نشان داد SWI مشتق شده از حسگر ASCAT به منظور بهبود پیش بینی رواناب در منطقه مورد مطالعه، در صورتی که شرایط رطوبت خاک اولیه ناشناخته باشد، SWI مشتق شده از حسگر ASCAT، می تواند استفاده شود. Barbetta و همکاران (۲۰۱۷) به منظور بررسی رویکرد چند منظوره/چند مدله پیش بینی عدم قطعیت سیل در زمان واقعی، در رودخانه تیر ایتالیا از روش پردازنده شرطی مدل در مدل های STAFOM-RCM و MISDc استفاده کردند. به این منظور از داده های ساعتی ۳۴ سیل که در ۶ سال اتفاق افتاده بود استفاده کردند، نتایج نشان داد عملکرد مدل ها در پیش بینی مناسب است و میانگین خطا در مرحله اوج به ترتیب در مدل MISDc و STAFOM-RCM کاهش می یابد. Camici و همکاران (۲۰۱۸) به منظور بررسی عملکرد داده های SRPs در شبیه سازی سیل به جای داده های اندازه گیری در ۱۵ حوضه در مدیترانه از مدل MISDc استفاده کردند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد عملکرد نسبتاً ضعیف داده های SRPs در شبیه سازی سیل در مقایسه با داده های اندازه گیری است. Alessio و همکاران (۲۰۱۹) به منظور بررسی سیلاب و منابع آب منطقه پو در غرب ایتالیا از مدل MISDc استفاده کردند و پارامترهای بهینه مدل با استفاده از استراتژی های مختلف منطقه بندی شدند. عملکرد مدل از طریق چندین شاخص تجزیه و تحلیل رژیم هیدرولوژیکی، شرایط جریان بالا و منحنی طول مدت جریان (FDC) بررسی شد. نتایج این تحقیق بیانگر عملکرد مناسب مدل برای پیش بینی سیلاب منطقه است. امیری و همکاران (۱۳۹۷) به منظور شبیه سازی رواناب حوضه کشکان افرینه از مدل MISDc استفاده کردند. نتایج حاصل از معیارهای ارزیابی بیانگر توانایی بالای مدل در شبیه سازی جریان و به ویژه در مقادیر دبی پیک حوضه می باشد. طبق نتایج ارائه شده از دو مدل در نقاط مختلف دنیا می توان بیان کرد

بارش مهمترین و موثرترین منبع آب یک حوضه آبخیز است. در دسترس بودن اطلاعات پیوسته بارش که می تواند برای پیش بینی مقدار رواناب استفاده شود شروع خوبی برای شبیه سازی پدیده بارش-رواناب به شمار می رود (Sechi و Lorrai، ۱۹۹۵). مدل های بارش-رواناب برای توضیح فرآیندهای غیرخطی، پیش بینی حوادث و ارزیابی تأثیرات پتانسیل در اقلیم آینده و کاربری اراضی استفاده شدند (HBIB و Aghakoucha، ۲۰۱۲). ارزیابی و تخمین اثرات هیدرولوژی در تغییر پوشش و مدیریت زمین از کاربردهای مدل های هیدرولوژیکی است (Schneider و همکاران، ۲۰۰۰). مدل های بارش-رواناب قابلیت درون یابی و برون یابی جریان را متناسب با داده های ورودی به مدل دارند (Mengistu، ۲۰۰۹). انتخاب یک مدل مناسب وابسته به فاکتورهایی از قبیل شبیه سازی متغیرهای طراحی (رواناب سطحی، آب های زیرزمینی، بار رسوب و غیره)، دقت داده های در دسترس و مقیاس مکانی و زمانی است (Linde، ۲۰۰۸).

در زمینه مدل سازی هیدرولوژیکی پژوهشگران داخل و خارج کشور تحقیقاتی انجام دادند. Normand و همکاران (۲۰۱۰) برای شبیه سازی هیدرولوژیکی در حوضه نیال شرقی مدل HBV را به کار بردند. نتایج نشان داد به استثنای دبی های حداقل و حداکثر که مشکلاتی در رابطه با شبیه سازی آن ها بود در بقیه موارد به خوبی فرآیندهای شبیه سازی را انجام داد. Klaus و همکاران (۲۰۱۸) عملکرد مدل HBV در پنج حوضه نروژ که تحت سیل های فصلی پاییزه و بهار قرار دارند را بررسی کردند. نتایج حاصل نشان داد این مدل برای بررسی سیل های بارزیم بارش و رژیم برف منطقی عمل می کند. Hashlm Isam و همکاران (۲۰۲۰) به منظور بررسی مقایسه مدل های مفهومی و توزیعی برای ارزیابی تأثیر تغییرات آب و هوا بر رواناب آینده در حوضه رودخانه هاروی در استرالیا غربی از مدل HBV برای شبیه سازی رفتار هیدرولوژیکی حوضه استفاده کردند. سیگنال های آب و هوای آینده از یک مجموعه چند مدل از هشت مدل جهانی آب و هوای جهانی (GCM) استخراج شد. نتایج حاصل نشان داد، کاهش میانگین جریان سالانه در همه سناریوها وجود داشت. Brocca و همکاران (۲۰۱۱) از مدل بارش رواناب نیمه توزیعی پیوسته به نام MISDc برای شبیه سازی سیلاب در رودخانه Tibere استفاده نمودند، نتایج به دست آمده بیانگر قابلیت اطمینان مدل برای شبیه سازی سیلاب و بهره وری محاسباتی آن و بیان کننده دقت مدل در تولید هیدروگراف خروجی بود. Bashar (۲۰۱۲) برای شبیه سازی هیدرولوژیکی Blue Nile، مدل های HMS و SMAR را به کار برد، هر دو مدل به منظور شبیه سازی روابط بارش، رواناب، ذخیره، تبخیر و تعرق و هدر رفت خاک مورد استفاده

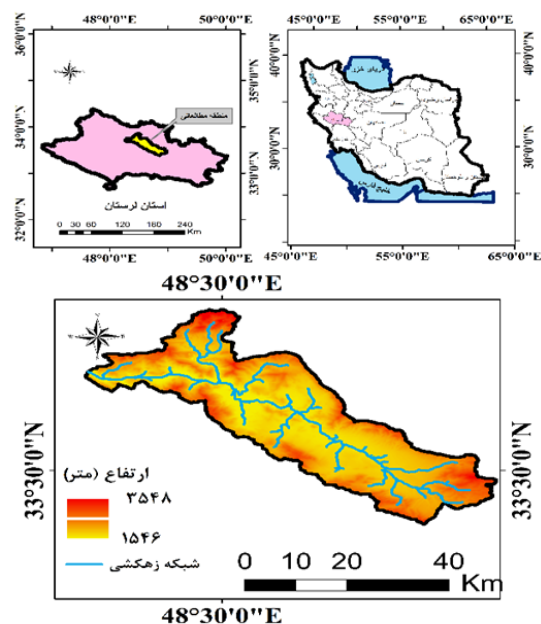
هر دو مدل باتوجه به داده‌های مورد استفاده توانایی خوبی در برآورد رواناب دارند. انتخاب یک مدل از بین مدل‌های پیچیده که نیاز به ورودی‌های زیادی دارند و کارکردن با آن‌ها سخت است و یا مدل‌های ساده که کارکردن با آن‌ها آسان است، برای برنامه‌ریزان منابع آب مهم تلقی می‌شود. همچنین آگاهی از میزان دقت مدل‌ها در فرآیند شبیه‌سازی امر مهمی است که باید بررسی شود. در راستای این هدف در این تحقیق دو مدل

MISDC و HBV برای شبیه‌سازی رواناب حوضه کاکارضا برای اولین بار واسنجی و اعتبارسنجی شدند و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شد. باتوجه به نوع مدل‌ها و نتایج به دست آمده از اجرای آن‌ها در نقاط مختلف انتظار می‌رود هر دو مدل شبیه‌سازی را در حد قابل قبولی انجام دهند، ولی با توجه به دقت مدل MISDC انتظار می‌رود، این مدل با دقت بیشتری شبیه‌سازی را انجام دهد.

مواد و روش‌ها

• منطقه مطالعاتی

حوضه آبخیز کاکارضا با مساحتی بالغ بر ۱۱۳۳/۳ کیلومتر مربع در استان لرستان، با موقعیت جغرافیایی عرض ۴۸ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۵۸ دقیقه شرقی و در طول ۳۳ درجه و ۲۲ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۵۱ دقیقه شمالی واقع شده است. این حوضه با ارتفاع حداکثر ۳۵۴۸ و حداقل ۱۵۴۶ متر و متوسط بارش ۵۳۰/۶ میلی‌متر یکی از زیرحوضه‌های کرخه می‌باشد. این حوضه دارای رودخانه کاکارضا که از رودخانه‌های دائمی استان لرستان و از کوه‌های جنوب شرقی شهرستان الشتر و بخش چغلوندی (هرو) سرچشمه گرفته و در محدوده شهرستان الشتر به نام کاکارضا معروف است. در منطقه مطالعاتی ۹ نوع وضعیت سنگ‌شناسی وجود دارد که بیشترین سطح منطقه با آهک خاکستری ضخیم پوشیده شده است. موقعیت حوضه آبخیز کاکارضا در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- نقشه موقعیت حوضه کاکارضا در استان لرستان و کشور

• معرفی مدل‌ها

-مدل MISDC^۱

MISDC یک مدل بارش و رواناب نیمه توزیعی است که اولین بار به منظور پیش‌بینی وقایع سیلاب در حوضه رودخانه Tever در مرکز ایتالیا توسعه پیدا کرد (Brocca و همکاران، ۲۰۱۱). ورودی‌های این مدل را داده‌های روزانه بارندگی و دمای هوا در سطح حوضه تشکیل می‌دهند و تغییرات تدریجی آب موجود در خاک را به دو حالت مستقل W₁ و W₂ شبیه‌سازی می‌کند. آب از لایه اول توسط تبخیر و تعرق خارج می‌شود که از طریق تابع خطی بین تبخیر پتانسیل (برآورد شده از رابطه بلانی و کریدلی اصلاح شده به وسیله Doorenbos و Pruitt (۱۹۹۷) و اشباع خاک محاسبه می‌شود. نفوذ از سطح خاک به ناحیه ریشه از رابطه غیرخطی پیشنهاد شده توسط Famiglietti و Wood (۱۹۹۴) محاسبه می‌شود (امیری و همکاران، ۱۳۹۷).

سه مولفه مختلف رواناب سطحی، مازاد اشباع از لایه سطحی و لایه دوم و مولفه رواناب زیرسطحی باعث تولید رواناب می‌شوند. دو مورد اول به وسیله ی هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومرفولوژی (GIUH) جمع شده و تا خروجی روندیابی می‌شوند، درحالی‌که رواناب زیرزمینی به وسیله یک روش مخزن خطی به بخش خروجی منتقل می‌شود. برای هر دو حالت، زمان تأخیر توسط رابطه پیشنهاد شده توسط Melone و همکاران (۲۰۰۱) ارزیابی می‌شود (امیری و همکاران، ۱۳۹۷).

MISDC شامل دو جزء اصلی است: ۱- یک ماژول برای شبیه‌سازی الگوی زمانی رطوبت خاک (مدل SWB) و ۲- یک مدل بارش رواناب (RR) رویدادی نیمه توزیعی (MISD) برای شبیه‌سازی سیل. با ترکیب این دو مدل از طریق یک رابطه تجربی، ساختار مدل بارش رواناب پیوسته شکل می‌گیرد. تحلیل تأثیر وضعیت رطوبت پیشین (AWC) بر پاسخ هیدرولوژیک حوضه در منطقه مورد مطالعه، علت اصلی انتخاب، این نوع ساختار مدل بود (Brocca و همکاران، ۲۰۰۸؛ ۲۰۰۹؛ Melon و همکاران، ۲۰۰۱؛ امیری و همکاران، ۱۳۹۷).

- مدل بیلان آب خاک

لایه سطح خاک به عنوان یک سیستم مکانی یکپارچه فرض می‌شود که موازنه آب آن از طریق رابطه زیر برقرار می‌شود:

$$\begin{cases} \frac{dW(t)}{dt} = f(t) - e(t) - g(t) & \text{if } W(t) \leq W_{max} \\ W(t) = W_{max} \end{cases} \quad (1)$$

که در آن t زمان، $W(t)$ مقدار آب در لایه خاک مورد بررسی، $f(t)$ کسری از باران در حال نفوذ به خاک، $e(t)$ نرخ تبخیر و تعرق، $g(t)$ نرخ زهکشی به دلیل جریان بینابینی و یا نفوذ عمیق و W_{max} حداکثر ظرفیت آب لایه خاک است. نسبت $W(t)/W_{max}$ نشان‌دهنده درجه اشباع است. نرخ نفوذ $f(t)$ با استفاده از معادله گرین آمپت برآورد شده است.

$$\begin{cases} f(t) = K_s [1 - \psi(W_{max} - W_i)/F(t)L] & \text{if } f(t) \leq r(t) \\ f(t) = r(t) \end{cases} \quad (2)$$

که در آن، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع، ψ جبهه مرطوب مکش خاک، W_i مقدار آب در آغاز رویداد بارندگی، L ضخامت لایه خاک، $F(t)$ عمق نفوذ تجمعی از زمان بارندگی، و $r(t)$ نرخ بارندگی است. برای مولفه زهکشی، رابطه زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد (Wood و Famiglietti، ۱۹۹۴):

$$g(t) = K_s [W(t)/W_{max}]^{3+2/\lambda} \quad (3)$$

که در آن، λ شاخص توزیع اندازه منافذ ذرات مربوط به ساختار لایه خاک است. تبخیر و تعرق واقعی، که عمدتاً آنگوهای زمان رطوبت خاک را در دوره‌های بدون بارندگی کنترل می‌کند، با یک رابطه خطی وابسته به تبخیر و تعرق پتانسیل $ET_p(t)$ و اشباع خاک نشان داده می‌شود (رابطه ۴):

$$e(t) = ET_p(t) W(t)/W_{max} \quad (4)$$

تبخیر و تعرق پتانسیل از طریق رابطه تجربی بلانی و کریدلی که توسط Doorenbos و Pruitt (۱۹۹۷) اصلاح شده است محاسبه می‌شود (رابطه ۵):

$$ET_p(t) = -2 + b[\xi(0.46T_a(t) + 8.13)] \quad (5)$$

که در آن، $T_a(t)$ دمای هوا بر حسب درجه سانتی‌گراد، ξ درصد کل ساعت‌های روزانه برای دوره مورد استفاده (روزانه یا ماهانه) از کل ساعت‌های روزانه سال (365×24) و b پارامتری است که واسنجی می‌شود (امیری و همکاران، ۱۳۹۷).

-مدل بارش رواناب نیمه توزیع شده

مدل MISD، مدل نیمه توزیعی مبتنی بر رویداد بارش-رواناب است که ابتدا توسط Corradini و همکاران (۱۹۹۵) طراحی شده است. این مدل بر اساس شبکه زهکشی و ویژگی‌های زمین‌شناسی، خاک، کاربری اراضی، یک حوزه آبریز مشخص به Nb جزء تقسیم می‌شود. هر کدام از آنها یک زیرحوضه با خروجی در امتداد کانال اصلی یا یک منطقه زهکشی که مستقیماً به کانال اصلی تخلیه می‌شود، می‌باشد (امیری و همکاران، ۱۳۹۷).

نسخه MISD مورد استفاده، از روش شماره منحنی (Curve Number) برای بررسی تلفات استفاده می‌کند. هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژی (IUH) و مخزن خطی IUH به ترتیب برای روندیابی بارش موجود در زیرحوضه‌ها و مناطقی که به طور مستقیم به آبراهه اصلی تخلیه می‌شود به کار می‌روند. در نهایت، روندیابی در امتداد آبراهه اصلی از طریق یک رویکرد خطی پخشی تخمین زده می‌شود. بنابراین، مقدار بارندگی، $\varepsilon_j(t)$ ، برای جزء j ($j=1, \dots, N_b$) است که توسط فرمول شناخته شده SCS-CN برآورد می‌شود (Chow و همکاران، ۱۹۹۸؛ امیری و همکاران، ۱۳۹۷):

$$\begin{cases} \varepsilon_j(t) = \frac{[r_j(t)(R_j(t) - \lambda_1 S_j)(R_j(t) + (2 - \lambda_1)S_j)]}{(R_j(t) + (1 - \lambda_1)S_j)^2} \\ \varepsilon_j(t) = 0 & R_j(t) \geq \lambda_1 S_j \end{cases} \quad (6)$$

$R_j(t)$ عمق بارندگی از آغاز سیلاب است، S_j حداکثر پتانسیل نگهداشت خاک در ابتدای سیلاب و λ_1 پارامتر مربوط به تلفات اولیه است و برای همه اجزاء ثابت فرض می‌شود. هیدروگراف رواناب مستقیم، $Y(t)$ ، $\varepsilon(t)$ و هیدروگراف واحد لحظه‌ای، $h(t)$ ، به صورت زیر است:

$$Y(t) = A \int_0^t \varepsilon(\tau) h(t - \tau) d\tau \quad (7)$$

که در آن، τ متغیر کمکی برای زمان و A مساحت است. IUH نشأت گرفته از رویکردهای ژئومورفولوژی که برای زیرحوضه‌ها و از طریق روش ذخیره‌سازی خطی برای اجزاء دیگر است و توسط Gupta و همکارانش (۱۹۸۰) بیان شده است. پارامتر دینامیک زمان تاخیر، L یک رابطه تجربی-مساحت و توسط Corradini و همکاران (۲۰۰۲) ارائه شده است، محاسبه می‌شود:

$$L = \eta 1.19A^{0.33} \quad (8)$$

که در آن، L برحسب ساعت، A برحسب کیلومتر مربع بیان می‌شود و η پارامتری است که واسنجی می‌شود.

پارامترهای واسنجی مدل MISDc در جدول (۱) ارائه شده است (امیری و همکاران، ۱۳۹۷).

جدول ۱- پارامترهای مدل MISDc

پارامتر	توضیح	واحد	محدوده
W_{max}	حداکثر ظرفیت آب در لایه خاک	mm	۵۰-۷۰۰
K_s	هدایت هیدرولیکی اشباع	mm/h	۰/۳-۲۰
ψ/L	رطوبت بخش بالایی خاک تقسیم بر ضخامت لایه خاک	-	(ثابت) ۰/۲۲-
λ	شاخص توزیع اندازه ذرات خاک	-	۰/۰۵-۰/۵
b	فاکتور تصحیح برای تبخیرتعرق	-	۰/۷-۲
η	پارامتر مناطق تأخیر	-	۰/۵-۲
c	سرعت	Km/h	۱-۵
D	توزیع پذیری	h/Km ²	۴(ثابت)
α	پارامتر خطی از روابط مدل SWB و MISD	-	۱-۵

محاسبه رطوبت خاک و تولید رواناب است، در نهایت به کمک تابع وزنی ساده مثلثی، رواناب ایجاد شده را روندیابی می‌کند (Siebert و Vis، ۲۰۱۲)

۱) **روال برف:** انباشت بارش هنگامی که دما کمتر از TT (آستانه دما) باشد، به صورت برف خواهد بود. ذوب برف وقتی شروع می‌شود که دما بیشتر از TT باشد و از روش ساده درجه-روز (روابط (۱۰) و (۱۱)) برای محاسبه آن استفاده می‌شود.

$$Melt = CFMAX (T(t) - TT) \quad (10)$$

$$Melt\ water = CFMAX (T - TT) \text{ (mm day}^{-1}\text{)} \quad (11)$$

$CFMAX$ فاکتور درجه-روز، TT آستانه دما، $T(t)$ میانگین دمای روزانه، CFR ضریب تصحیح انجماد آب ذوب شده برف است.

۲) **روال خاک:** در این قسمت تغذیه آب زیرزمینی و تبخیر واقعی به صورت تابعی از ذخیره واقعی آب شبیه‌سازی می‌شود. این قسمت مهمترین بخش کنترل شکل‌گیری رواناب است و ۳ پارامتر در رابطه (۱۲) دارد:

$$Recharge/(P(t))=(SM/FC) \quad (12)$$

$BETA$ پارامتری که سهم نسبی در رواناب (تابع عکس العمل یا افزایش رطوبت خاک) از هر میلی‌متر بارش یا ذوب برف را کنترل می‌کند، FC حداکثر ظرفیت ذخیره رطوبت در خاک، LP پارامتر نشانگر محدوده پتانسیل تبخیر است. LP مقدار رطوبت خاک

هیدروگراف رواناب مستقیم، $Q(t)$ ، در خروجی آبخیز با یک روش خطی پخشی تخمین زده می‌شود (Karlinger و Troutman، ۱۹۸۵):

$$Q(t)=\sum \int_0^t Y(\tau)p(t-\tau)d\tau \quad (9)$$

$p(t)$ تابع روندیابی است که به صورت ذیل محاسبه می‌شود:

$$p(t) = \frac{L_c}{2(\pi D_j t^3)^{1/2}} \exp\left(-\frac{(ct-L_c)^2}{4Dt}\right) \quad (10)$$

که در آن، L_c فاصله بین هر جزء تا خروجی حوضه، C سرعت و D پارامتر پخشیدگی است (امیری و همکاران، ۱۳۹۷).

تخمین مقادیر پارامترها:

برای این مدل بارش-رواناب، باید نه پارامتر برآورد شوند که شامل حداکثر ظرفیت آب لایه خاک W_{max} ، هدایت هیدرولیکی اشباع K_s ، نسبت بین رطوبت بخش بالایی خاک و ضخامت لایه خاک ψ/L ، شاخص توزیع اندازه ذرات λ ، ضریب اصلاح برای تبخیر تعرق پتانسیل b ، سرعت c ، پخشیدگی D ، و پارامتر a که رابطه S و Wt می‌باشد. شایان ذکر است، پارامتر مولفه نفوذ ψ/L و D برای مسیریابی آبراهه، دارای تأثیر بسیار کم بر نتایج مدل هستند و از این رو ثابت در نظر گرفته می‌شوند. دامنه

مدل HBV^۲

مدل HBV در موسسه هواشناسی و هیدرولوژیکی سوئد در اوایل دهه هفتاد توسعه داده شد (Bergstrom، ۱۹۷۶). امکان استفاده از این مدل برای طیف وسیعی از حوضه‌ها با شرایط اقلیمی گوناگون وجود دارد. این مدل برای پیش‌بینی سیلاب در کشورهای اسکاندیناوی و بسیاری اهداف دیگر مانند طراحی سرریز، شبیه سازی سیلاب و ارزیابی منابع آب به کار می‌رود. این مدل يك مدل مفهومی و شامل محاسبات مفهومی برای فرایندهای هیدرولوژیکی در مقیاس حوضه است. این مدل می‌تواند در حکم مدلی نیمه‌توزیعی با تقسیم حوضه به چندین زیرحوضه اجرا شود. هر زیرحوضه باتوجه به ارتفاع، دریاچه، یخچال‌های طبیعی و پوشش گیاهی به چندین ناحیه تقسیم می‌شود. نسخه استفاده شده در این تحقیق HBV-Light توسعه یافته مدل سیلبرت در سال ۲۰۰۲ است. این مدل به دلایل زیر استفاده می‌شود: ساختار ساده ولی انعطاف‌پذیر آن که قابلیت تقسیم‌بندی به ناحیه‌های گوناگون ارتفاعی و گیاهی را دارد، به اطلاعات زیادی نیاز ندارد و داده های ورودی آن در دسترس است، در شرایط آب وهوایی متفاوت، قابلیت استفاده دارد (یعقوبی و بوانی، ۱۳۹۳).

مدل شامل روال‌هایی (Routine) برای انباشت و ذوب برف،

است که بالاتر از آن تبخیر و تعرق به مقدار پتانسیل می‌رسد. این پارامتر به صورت درصدی از FC است. همچنین $SM(t)$ ذخیره واقعی خاک و $P(t)$ مجموع بارش و برف روزانه است.

۳) تابع عکس العمل: در این بخش رواناب محاسبه شده تبدیل به دبی در خروجی زیرحوضه می‌شود. با در نظر گرفتن دو لایه خاک، بارش ورودی باتوجه به رابطه (۱۳) درحالت‌های زیر از آن خارج می‌شود: خروج از لایه اول با ضریب ذخیره سریع K_1 ، نفوذ به لایه زیرین خاک با نرخ ثابت نفوذ PERC، اگر آستانه UZL (پارامتر آستانه) از حالت ذخیره تجاوز کند مازاد آن با ضریب ذخیره K_0 خارج می‌شود و در نهایت آب از لایه زیرزمینی با ضریب ذخیره آهسته K_2 خارج می‌شود.

$$Q(t) = K_1 K_1 SUZ + K_2 SLZ + K_0_{max} (SUZ - UZL, 0) \quad (13)$$

که در این رابطه $Q(t)$ خروجی دو مخزن است.

۴) روال روندیابی این رواناب در نهایت از تابع وزنی مثلثی با پارامتر MAXBAS برای روندیابی جریان محاسبه شده در خروجی حوضه استفاده می‌نماید (یعقوبی و بوانی، ۱۳۹۳).

• داده‌ها

در این تحقیق داده‌های پایه مورد استفاده شامل داده‌های مشاهداتی دما، بارش، دبی و تبخیر و تعرق در دوره ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۰ میلادی از ۶ ایستگاه منتخب منطقه و اطراف آن می‌باشد (جدول شماره ۲). اطلاعات مورد نیاز مدل MISDc عبارتند از: داده‌های روزانه بارش، دما و دبی و داده‌های مورد نیاز HBV شامل داده‌های روزانه بارش، دما، دبی و تبخیر و تعرق ماهانه می‌باشد. فلوجارت روش تحقیق به کار گرفته شده در این مطالعه در شکل (۲) نشان داده شده است.

• ارزیابی کارایی مدل

فرایند ارزیابی کارایی مدل نه تنها در جریان توسعه مدل و فرایند واسنجی، بلکه در زمان ارائه نتایج به سایر محققین

نتایج و بحث

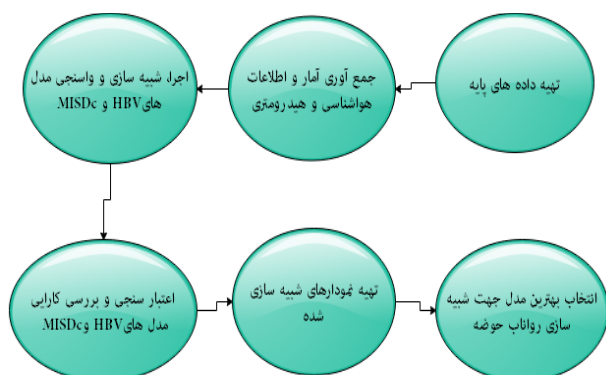
• شبیه‌سازی رواناب توسط مدل MISDc

بعد از تهیه داده‌های مورد نیاز برای اجرای مدل، با وارد کردن داده‌ها در نرم‌افزار متلب، شبیه‌سازی در بازه زمانی مورد نظر انجام گرفت. پس از ورود داده‌ها به نرم‌افزار به منظور شبیه‌سازی، پارامترهای مدل به صورت دستی تغییر می‌یابند و مرحله واسنجی انجام می‌شود. در این پژوهش از آمار ۹ سال (۲۰۱۰-۲۰۰۲) برای اجرای مدل استفاده شده است. لذا از این ۹ سال آمار در نظر گرفته شده، دوره واسنجی به مدت

اهمیت اساسی دارد (Schaefli و Gupta, ۲۰۰۷). شاخص‌های مختلفی برای ارزیابی مدل‌ها ارائه شده و استفاده می‌شود. در این خصوص استانداردهای روشی برای ارزیابی پیش‌بینی مدل‌ها با استفاده از روش‌های آماری مشخص نشده است، بنابراین در این پژوهش نتایج شبیه‌سازی دبی‌های حوضه و زیرحوضه‌های آن در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌ها با ضریب تعیین (R^2)، شاخص‌های ناش-ساتکلیف (NS)، ارزیابی شد.

جدول ۲- مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه

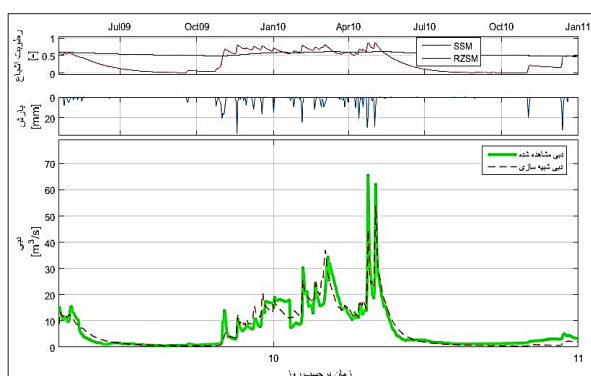
ردیف	نام ایستگاه	مختصات		ارتفاع (متر)
		X	Y	
۱	خرم آباد	۴۸/۲۸۳	۳۳/۴۳۳	۱۱۴۷
۲	بروجرد	۴۸/۷۵	۳۳/۹۱۶	۱۶۲۹
۳	کاکارضا	۴۸/۲۶	۳۳/۷۱	۱۵۵۰
۴	رحیم آباد	۴۸/۸۶	۳۳/۷۳	۱۴۹۶
۵	دهنو	۴۸/۷۶	۳۳/۵۱	۱۸۰۰
۶	دورود	۴۹/۰۶	۳۳/۴۸	۱۴۰۲



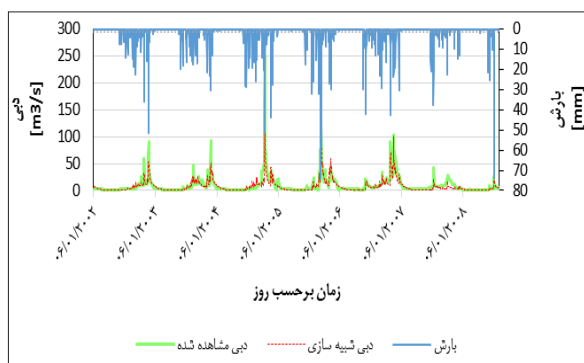
شکل ۲- فلوجارت روش تحقیق به کار گرفته شده در شبیه‌سازی رواناب حوضه آبخیز کاکارضا

۷ سال (۲۰۰۲-۲۰۰۸) و دوره اعتبارسنجی به مدت ۲ سال (۲۰۱۰-۲۰۰۹) استفاده شد. باتوجه به نتایج به دست آمده، مقادیر معیارهای ارزیابی نش-ساتکلیف و ضریب تعیین برای مرحله واسنجی به ترتیب ۰/۸۳ و ۰/۸۴ محاسبه شد. همچنین نتایج حاصل از مقایسه هیدروگراف دبی‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی در شکل (۲) نمایش داده شده است. بنابراین نتایج معیارهای ارزیابی در دوره واسنجی و همچنین مقایسه هیدروگراف‌ها، بیان می‌کند، مدل توانسته روند تغییرات دبی مشاهداتی حوضه را به خوبی به خصوص در نقاط اوج شبیه‌سازی کند. همچنین از مطالعه نمودارهای

بیانگر افزایش دقت مدل در این مرحله و قابلیت بالای مدل برای شبیه‌سازی رواناب حوضه می‌باشد (شکل ۴). مطابق شکل (۴) در مرحله اعتبارسنجی مدل در شبیه‌سازی دبی‌های اوج به خوبی مرحله واسنجی عمل نکرده است. می‌توان بیان کرد، علت آن مربوط به بارش‌های رگباری فصل بهار و ذوب شدن برف‌ها می‌باشد و مدل در شبیه‌سازی ذوب برف خیلی خوب عمل نمی‌کند. مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج سایر تحقیقات مشابه صورت گرفته در سطح جهان (Brocca و همکاران ۲۰۱۱؛ Brocca و همکاران ۲۰۱۳؛ Smith و همکاران ۲۰۱۵؛ امیری و همکاران ۱۳۹۷) نشان می‌دهد، دقت شبیه‌سازی مدل قابل قبول و نزدیک به نتایج سایر محققین می‌باشد.



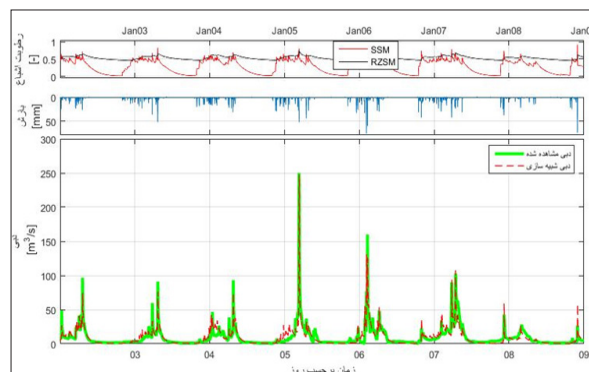
شکل ۴- نمودار دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مرحله اعتبارسنجی با مدل MISDc



شکل ۵- نمودار دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی با مدل HBV

برای اینکه نشان داده شود آیا مدل برای این منطقه قابلیت پیش‌بینی رواناب را برای دوره خارج از دوره واسنجی دارد یا خیر، دوره (۲۰۰۹/۰۴/۱۹-۲۰۱۰/۱۲/۳۱) برای اعتبارسنجی

مربوط به شکل (۳) که شامل رطوبت اشباع، بارش و دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی است می‌توان نتیجه گرفت، یک رابطه منطقی بین نمودارها وجود دارد به طوری که با افزایش بارش و دبی، رطوبت اشباع خاک افزایش پیدا کرده است.



شکل ۳- نمودار دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی با مدل MISDc

در مرحله اعتبارسنجی، به منظور بررسی عملکرد مدل، اعتبارسنجی در دوره آماری ۲ سال (۲۰۰۹-۲۰۱۰) اجرا شد. در این مرحله با استفاده از مقادیر پارامترهای مدل در مرحله واسنجی، اعتبارسنجی انجام خواهد شد. نتایج به دست آمده از معیارهای ارزیابی نش-ساتکلیف و ضریب تعیین برای مرحله اعتبارسنجی ۰/۸۸ و ۰/۸۹ می‌باشد که مقایسه نتایج حاصل از اعتبارسنجی

• شبیه‌سازی رواناب توسط مدل HBV

به منظور شبیه‌سازی رواناب با استفاده از مدل HBV داده‌های مورد نیاز مدل آماده و مدل اجرا شد. ابتدا یک دوره ۷ سال (۲۰۰۲/۰۶/۰۱-۲۰۰۸/۱۲/۳۱) برای واسنجی مدل انتخاب شد. قبل از واسنجی یک دوره ۱۵۰ روزه (۲۰۰۲/۰۱/۰۱-۲۰۰۲/۰۵/۳۱) برای دوره آماده‌سازی (Warm up) لحاظ شد. در ادامه پارامترهای مدل به صورت دستی تغییر پیدا می‌کند تا مقادیر مناسب انتخاب شوند. با توجه به نتایج به دست آمده، مقادیر معیارهای ارزیابی نش-ساتکلیف و ضریب تعیین برای مرحله واسنجی به ترتیب ۰/۷۹ و ۰/۸۰ محاسبه شد. همچنین نتایج حاصل از مقایسه هیدروگراف دبی‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی در شکل (۵) نمایش داده شده است. نتایج معیارهای ارزیابی در دوره واسنجی و همچنین مقایسه هیدروگراف‌ها، بیان می‌کند، مدل روند تغییرات دبی مشاهداتی حوضه را توانسته به خوبی شبیه‌سازی کند.

مدل استفاده شد. در ادامه باتوجه به مقادیر به دست آمده از پارامترهای مدل در مرحله واسنجی، اعتبارسنجی مدل انجام شد. نتایج به دست آمده از معیارهای ارزیابی نش-ساتکلیف و ضریب تعیین برای مرحله اعتبارسنجی ۰/۷۲ و ۰/۷۳ می باشد. مقایسه گرافیکی نتایج حاصل از اعتبارسنجی نشان داد، این مرحله امکان شبیه سازی دقیق دبی های اوج با مجموعه پارامترهای مرحله واسنجی را نمی دهد یعنی در برخی موارد دبی را کمتر از مقدار مشاهداتی شبیه سازی کرده است، این به علت ساختار نسبتاً ساده و مفهومی مدل است که با یک لایه زیرزمینی رواناب تولید می کند (شکل ۶). مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج سایر تحقیقات مشابه صورت گرفته در سطح جهان (Normand و همکاران ۲۰۱۰؛ Abebe و همکاران ۲۰۱۰؛ هاونگی و مساح بوانی ۱۳۹۳؛ یعقوبی و مساح بوانی ۱۳۹۳) نشان می دهد، دقت شبیه سازی مدل قابل قبول و نزدیک به نتایج سایر محققین به دست آمده است.

همچنین در دوره واسنجی مدل MISDC در شبیه سازی دبی های پیک بسیار مناسب تر از مدل HBV عمل کرد. در مدل MISDC هر دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی مقادیر پیش بینی شده و مشاهداتی به هم نزدیک می باشند. در مجموع می توان بیان کرد، مدل MISDC (ضریب نش ۰/۸۳ در واسنجی و ضریب نش ۰/۸۸ برای اعتبارسنجی) برای شبیه سازی جریان روزانه حوضه کاکارضا مناسب تر است و پیشنهاد می شود در مطالعات هیدرولوژی این منطقه استفاده شود. استفاده از مدل HBV هم، بستگی به نوع مطالعه و دقت مورد نظر دارد. در این حوضه مشاهده شد، حالت یکپارچه مدل دقت قابل قبولی در شبیه سازی جریان دارد. نتایج ارزیابی دو مدل MISDC و HBV نشان می دهد مدل MISDC دبی ها را به خصوص در مقادیر پیک به خوبی شبیه سازی می کند و مدل HBV دبی ها را کمتر از مقادیر مشاهداتی شبیه سازی کرده است.

سپاسگزاری

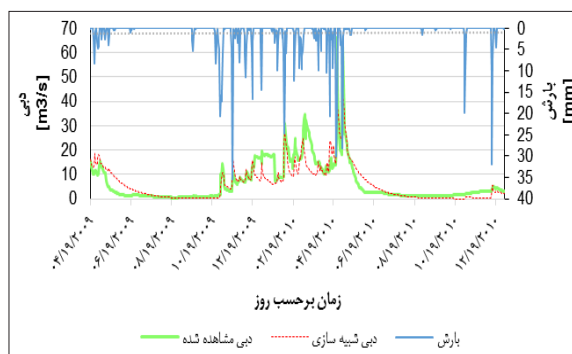
به این وسیله از جناب آقای دکتر Luca Brocca توسعه دهنده مدل MISDC، برای راهنمایی های ارزنده شان قدردانی می شود.

پی نوشت

- 1- Modello Idrologico Semi-Distribuito in continuo
- 2- Hydrologiska Byrans Vattenavdelning

منابع

- امیری، ع.، زینی وند، ح.، طهماسبی پور ن. و حقی زاده. ع. ۱۳۹۷. بررسی کارایی مدل MISDC در شبیه سازی رواناب حوضه آبخیز کشکان آفرینه. نشریه سامانه های سطوح آبیگیر باران، ۶(۱۹): ۵۳-۶۲
- هاونگی، م. و مساح بوانی. ع. ر. ۱۳۹۳. مقایسه عملکرد دو مدل هیدرولوژی IHACRES و HBV light در شبیه سازی حوضه دز. دهمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری (آبخیزداری پایدار). دانشگاه بیرجند، بیرجند
- یعقوبی، م. و مساح بوانی. ع. ر. ۱۳۹۳. تحلیل حساسیت و مقایسه عملکرد سه مدل مفهومی HBV، IHACRCE و HEC-HNS در شبیه سازی بارش-رواناب پیوسته در حوضه های نیمه خشک (بررسی موردی: حوضه اعظم هرات-یزد). مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۰(۲): ۱۵۳-۱۷۲.
- Abebe N., Ogden F.L. and Pradhan N.R. 2010. Sensitivity and uncertainty analysis of the conceptual HBV rain-



شکل ۶- نمودار دبی مشاهداتی و شبیه سازی شده در مرحله اعتبارسنجی با مدل HBV

نتیجه گیری

باتوجه به تنوع مدل های هیدرولوژی انتخاب هر مدل برای شبیه سازی هیدرولوژیکی دشوار است، بنابراین نیاز به ارزیابی مقایسه ای بین مدل ها برای مشخص کردن توانایی و قابلیت هر مدل در منطقه مطالعاتی است. در این مقاله از مدل MISDC و HBV در دو حالت نیمه توزیعی و یکپارچه استفاده شده است. براساس شاخص های آماری و نموداری به کار رفته در این مطالعه هم مدل MISDC و هم مدل HBV در دوره واسنجی نتایج شبیه سازی قابل قبولی داشتند (ضریب نش بالای ۰/۶ و ضریب تعیین بالای ۰/۷). همچنین در دوره واسنجی و اعتبارسنجی مدل MISDC بهتر از مدل HBV عمل کرده است. در دوره واسنجی هر دو مدل جریان کمتری را نسبت به دوره مشاهداتی پیش بینی کردند که باز هم عملکرد مدل MISDC مناسب تر بود.

- How reliable are satellite precipitation estimates for driving hydrological models: a verification study over the mediterranean area, *Journal of Hydrology*, 563: 950-961.
- Chow V.T, Maidment D.R. and Mays L.W. 1988. *Applied hydrology*, McGrawHill. New York.
- Corradini C. Melone F. and Ubertini L. 1995. A semi-distributed model for direct runoff estimate. In *Applied Simulation and Modelling*, Hamza MH (ed). IASTED ACTA Press: Anaheim (CA): 541- 545
- Corradini C., Morbidelli R., Saltalippi C. and Melone F. 2002. An adaptive model for flood forecasting on medium size basins. In *Applied Simulation and Modelling*, Ubertini L (ed). IASTE Acta Press: Anaheim (CA): 555-559.
- Doorenbos J. and Pruitt W.O. 1997. Background and development of methods to predict reference crop evapotranspiration (ET_o). In *FAO-ID-24, Appendix II*.
- Famiglietti J.S. and Wood E.F. 1994. Multiscale modeling of spatially variable water and energy balance processes. *Water Resour. Res*, 11: 3061-3078.
- Gupta V.K., Waymire E. and Wang C.T. 1980. A representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology. *J. Water Resources Manage*, 16(5): 855-862.
- Hashim Isam J., Hamideh K. and Ranjan S. 2020. Comparative study of conceptual versus distributed hydrologic modelling to evaluate the impact of climate change on future runoff in unregulated catchments, *Journal of Water and Climate Change*, 11(2): 341-366.
- Karlinger M.R. and Troutman B.M. 1985. An assessment of the instantaneous unit hydrograph derived from the theory of topologically random networks. *Water Resour. Res*, 21: 1693-1702.
- Lorrai, M. and H.M. Sechi. 1995. Neural Nets for Modeling Rainfall- Runoff Transformation. *Water Resources Management*, 9: 299-313.
- Melone F, Neri N., Morbidelli R. and Saltalippi C. 2001. A conceptual model for flood prediction in basins of moderate size. In *Applied Simulation and Modelling*, Hamza MH (ed). IASTED Acta Press: Anaheim, fall-runoff model: Implications for parameter estimation, *Journal of Hydrology*, 389: 301-310.
- Agha kouchak N. and HBIB E. 2012. An educational model for ensemble streamflow simulation and uncertainty analysis. *hydrology and Earth system sciences*, 17: 445-452
- Alessio C., Daniele M., Christian M., Stefania C. and Brocca L. 2019. Combining a rainfall-runoff model and a regionalization approach for flood and water resource assessment in the western Po Valley, Italy, *Hydrological Sciences Journal*, 65(3): 348-370.
- Barbetta S., Coccia G. Moramarco T. Brocca L. and Todini E. 2017. The multi temporal/multi-model approach to predictive uncertainty assessment in real-time flood forecasting, *Journal of Hydrology*, 551: 555-576.
- Bashar K. 2012. Comparative Performance of Soil Moisture Accounting Approach in Continuous Hydrologic Simulation of the Blue Nile. *Nile Basin Water Science & Engineering Journal*, 5: 2-10.
- Bergstrom S. 1976. Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments, Publisher Department of Water Resources Engineering, Lund Institute of Technology, University of Lund.
- Brocca L, Melone F, Moramarco T. 2008. On the estimation of antecedent wetness conditions in rainfall-runoff modelling. *Hydrological Processes*, 22(5): 629-642.
- Brocca L. Melone F. Moramarco T. Singh VP. 2009. Assimilation of observed soil moisture data in storm rainfall-runoff data. *Journal of Hydrologic Engineering ASCE*, 14(2): 153-165.
- Brocca L., Camici S. Tarpanelli A. Melone F. and Moramarco. T. 2011. Analysis of climate change effects on floods frequency through a continuous hydrological modelling. In: *Climate Change and its Effects on Water Resources*. Springer, Dordrecht, the Netherlands.
- Brocca., L. Melone F. Moramarco T. Penna D. Borga M. Matgen P. Gumuzzio A. Martinez-Fernández J. and Wagner W. 2013 Detecting threshold hydrological response through satellite soil moisture data. *Die Bodenkultur*, 64 (3-4): 7-12.
- Camici S., Ciabatta L., Massari C. and Brocca L. 2018.

- modeling with a userfriendly catchment runoff-model software package, *Earth Syst. Sci*, 16: 3315-3325.
- Smith D.R., King K.W., Johnson L., Francesconi W., Richards P., Baker D., Sharpley A.N. 2015. Surface runoff and tile drainage transport of phosphorus in the midwestern united st. *Schreider sy ,smith DI and Jokeman AJ*. 2000. climate change impacts on urban flooding. *Climate change. Jornal of Environmental Quality*, 47: 91-115.
- Klaus V. Maik H. Axel B. and Deborah L. 2018. Hydrological model parameter (in) stability-“crash testing” the HBV model under contrasting flood seasonality conditions. *Journal Hydrological Sciences Journal*, 63(7): 1-17.
- (CA): 461-466.
- Mengistu K.T. 2009. Watershed hydrological response to change in land use and land cover and management practices at hare watershed ,Ethiopia.
- Normand S., Konz M. and Merz J. 2010 . Anapplication of the HBV model to the Tamor Basin in Eastern Nepal. *Journal of Hydrology and meteorology*, 7(1): 49-58.
- Schaefli B. and Gupta H.V. 2007. Do Nash values have value? *Hydrological Processes*, 21(15): 2075-2080
- Schreider sy ,smith DI and Jokeman AJ. 2000. climate change impacts on urban flooding. *Climate change*, 47: 91-115.
- Siebert J. and Vis M. J. P. 2012. Teachinghydrological