

Performance Evaluation of WetSpa Hydrological Model for Runoff Simulation in Semi-arid Climatic Conditions (Case Study: Menderjan Basin)

PARISA ALMASTI¹, ALIREZA MOGHADDAM NIA^{*1}, SHAHRAM KHALIGHI SIGAROODI¹, ALI SALAJEGHEH¹,
SAEED SOLTANI KOPAEI²

1. Department of Arid and Mountainous Regions Reclamation, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

2. Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

(Received: Dec. 13, 2020- Revised: Jan. 6, 2020- Accepted: Jan. 16, 2021)

ABSTRACT

The application of hydrological models in watersheds has always been considered by water resources researchers. This subject is of special importance in arid and semi-arid regions due to the greater complexity of hydrological processes in these region. In this research, the efficiency of WetSpa distributed hydrological model in Menderjan semi-arid basin has been evaluated and the sensitivity analysis and uncertainty analysis of the model parameters have been performed using PEST software. Moreover, the efficiency of the Extended Kalman filter in improving the results has been investigated. The Nash-Sutcliffe coefficient for the calibration and validation periods was 0.63 and 0.58, respectively, confirming that the WetSpa model has a good performance in runoff simulation in Menderjan basin. The results of sensitivity analysis also show the high sensitivity of Kg and K_ss parameters and the low sensitivity of G_max and P_max parameters in the study area. Moreover, the results of uncertainty analysis are generally consistent with the results of sensitivity analysis and indicate the high certainty of sensitive parameters and the low certainty of non-sensitive parameters. The results of applying Kalman filter also show the improvement of the results. So that the Nash-Sutcliffe coefficient increased from 0.63 to 0.71 in the calibration period and from 0.58 to 0.69 in the validation period.

Keywords: Sensitivity Analysis, WetSpa Model, Uncertainty, Calibration, Extended Kalman Filter.

ارزیابی کارایی مدل هیدرولوژیکی WetSpa برای شبیه‌سازی رواناب در شرایط اقلیمی نیمه‌خشک (مطالعه موردی: حوزه آبخیز مندرجان)

پریسا الماسی^۱، علیرضا مقدم‌نیا^{۱*}، شهرام خلیقی سیگارودی^۱، علی سلاجقه^۱، سعید سلطانی کوپائی^۲

۱. گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲. گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۹/۲۳ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۱۷ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۱۰/۲۷)

چکیده

کاربرد مدل‌های هیدرولوژیکی در حوزه‌های آبخیز همواره مورد توجه محققین منابع آب بوده است. این موضوع در مناطق خشک و نیمه خشک به دلیل پیچیدگی بیشتر فرآیندهای هیدرولوژیکی در این مناطق، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این تحقیق کارایی مدل هیدرولوژیکی توزیعی WetSpa در حوزه آبخیز نیمه خشک مندرجان ارزیابی شده و آنالیز حساسیت و تحلیل عدم قطعیت پارامترهای مدل نیز با استفاده از نرم‌افزار PEST انجام شده است. هم‌چنین کارایی فیلتر کالمن توسعه یافته در بهبود نتایج بررسی شده است. ضریب Nash-Sutcliffe برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب برابر ۰/۶۳ و ۰/۵۸ حاصل شد و موید این است که مدل WetSpa عملکرد مناسبی در شبیه‌سازی رواناب در حوزه آبخیز مندرجان داشته است. نتایج تحلیل حساسیت نیز نشان‌دهنده حساسیت بالای پارامترهای ضریب افت آب زیر زمینی (Kg) و رطوبت اولیه خاک (K_{ss}) و حساسیت پایین پارامترهای حداکثر ذخیره آب زیرزمینی (G_{max}) و حداکثر شدت بارش (P_{max}) در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. نتایج تحلیل عدم قطعیت هم به طور کلی با نتایج تحلیل حساسیت مطابقت داشته و بیانگر قطعیت بالای پارامترهای حساس و قطعیت کم پارامترهای غیر حساس است. نتایج حاصل از اعمال فیلتر کالمن نیز نشان‌دهنده بهبود نتایج می‌باشد. به طوری که ضریب Nash-Sutcliffe از ۰/۶۳ به ۰/۷۱ در دوره واسنجی و از ۰/۵۸ به ۰/۶۹ در دوره اعتبارسنجی افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی: آنالیز حساسیت، مدل WetSpa، عدم قطعیت، واسنجی، فیلتر کالمن توسعه یافته

(Bahremand and De Smedt., 2006).

مقدمه

واسنجی پارامترها و پیش‌بینی عدم قطعیت مدل به یکدیگر وابسته‌اند و مدل‌سازی باید با تحلیل عدم قطعیت همراه باشد. عدم قطعیت‌های ورودی از فقدان دانش کافی پیرامون ورودی‌های مدل، پارامترها و ساختار مدل ناشی می‌شود (Abbaspour *et al.*, 2018). به طور مثال، هر واقعه بارش شرایطی کاملاً منحصر به فرد دارد و عدم وجود اطلاعات با تفکیک زمانی و مکانی مناسب از بارش، به در نظر نگرفتن دینامیک بارش و جهت عبور آن بر فراز حوزه آبخیز منجر می‌گردد. این موضوع به نوبه خود باعث کاهش دقت شبیه‌سازی و افزایش عدم قطعیت می‌شود (Sigaroodi and Chen, 2016)

مدل (Water and Energy Transfer between WetSpa Soil, Plants and Atmosphere) از مدل‌های هیدرولوژیکی توزیعی است که در مطالعات بسیاری جهت شبیه‌سازی رواناب و ارزیابی اثرات تغییر اقلیم و کاربری‌راضی استفاده شده است. به

استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی برای شبیه‌سازی بارش-رواناب مورد توجه محققین بسیاری قرار گرفته است. دقت پیش‌بینی‌های این مدل‌ها به ساختار و چگونگی تعیین پارامترهای آن‌ها بستگی دارد. بنابراین تخصیص مقادیر مناسب به پارامترها طی واسنجی مدل به منظور افزایش دقت نتایج، امری ضروری است (Liu *et al.*, 2005) و نیازمند داشتن آگاهی کامل نسبت به پارامترها و فرآیندهای در نظر گرفته شده در مدل است. عدم آگاهی نسبت به پارامترها به تخصیص مقادیر غیر قابل قبول به پارامترهای حساس و یا صرف بیهوده زمان بر پارامترهای غیر حساس منجر می‌شود. تمرکز بر پارامترهای حساس می‌تواند برآورد دقیق‌تر مقادیر و بنابراین کاهش عدم قطعیت‌ها را همراه داشته باشد (Lenhart *et al.*, 2002). لذا آنالیز حساسیت به عنوان ابزاری برای ارزیابی میزان تاثیر پارامترها بر خروجی مدل، نه تنها برای واسنجی بلکه برای صحت‌سنجی مدل و کاهش عدم قطعیت سودمند است

هیدرولوژیکی استفاده شده است که از این بین می‌توان به داده-گواری اشاره کرد. Data Assimilation یا داده‌گواری روشی ریاضی است که تئوری موجود در یک مدل را با مشاهدات به صورت بهینه ترکیب می‌کند. این امر با اهداف مختلفی نظیر تعیین برآورد بهینه حالت یک سیستم، تعیین شرایط اولیه برای مدل‌های عددی پیش‌بینی، آموزش پارامترهای مدل عددی بر اساس داده‌های مشاهداتی انجام می‌شود. روش‌های داده‌گواری که ابتدا در زمینه‌هایی مانند هواشناسی، علوم دریا و اقیانوس‌شناسی به کار رفتند، در سال‌های اخیر در زمینه هیدرولوژی نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند. داده‌گواری در هیدرولوژی شامل ترکیب کردن مقادیر مشاهداتی اندازه‌گیری شده با خروجی مدل هیدرولوژیکی در چهارچوبی قاعده‌مند و هدفمند، به منظور کاهش عدم قطعیت و افزایش اعتمادپذیری است (Xie and Zhang, 2010). بسته به هدف مطالعه، می‌توان از روش‌های متفاوتی استفاده کرد. یکی از روش‌هایی که برای بهبود دقت نتایج شبیه‌سازی در مدل‌سازی هیدرولوژیکی استفاده می‌شود، فیلتر کالمن است. Sarikhani et al., 2017، از فیلتر کالمن توسعه یافته به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت مدل در مدل‌سازی یک آبخوان آزاد استفاده کردند و جهت اطمینان از صحت روش عددی، نتایج مدل‌سازی با داده‌های مشاهداتی مقایسه شد. نتایج نشان داد استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته باعث کاهش خطای مدل‌سازی آب زیرزمینی شده، به طوری که خطای جذر میانگین مربعات نتایج از ۰/۰۸ به ۰/۰۰۷ کاهش یافت. Sun et al. (2017) کاربرد فیلتر کالمن توسعه یافته را برای بهبود عملکرد مدل SWAT در دو حالت شامل داده‌گواری پارامتر-حالت و داده‌گواری خروجی مدل برای یک سال خشک و یک سال مرطوب مقایسه کردند. نتایج نشان داد اگرچه هر دو روش به طور قابل توجهی دقت پیش‌بینی را بهبود می‌بخشند، عملکرد آنها تحت تأثیر رژیم هیدرولوژیکی سال مورد نظر قرار دارد. در طول سال مرطوب، RMSE برای پیش‌بینی هفت روزه از ۶۷۰،۴۶ به ۴۲۰،۴۲ m³ / s در هنگام استفاده از داده‌گواری خروجی و به ۳۶۷،۶۰ m³ / s در هنگام استفاده از داده‌گواری حالت-پارامتر کاهش پیدا کرد. در این حالت، ضریب Nash-Sutcliffe نیز به ترتیب از ۰،۶۳ به ۰،۸۵ و ۰،۸۸ بهبود یافت.

با توجه به آن‌چه در بالا اشاره شد، در بیشتر مطالعات، از مدل WetSpa در شرایط مرطوب و نیمه‌مرطوب استفاده و کارایی مناسب مدل در این شرایط تایید شده‌است. اما با توجه به این‌که بخش عظیمی از کشور ما دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک است، ضروری است کارایی این مدل در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور نیز ارزیابی گردد. از این‌رو، در این پژوهش به بررسی کارایی

عنوان مثال (Liu and De Smedt, 2004)، از مدل WetSpa برای ارزیابی اثر تغییر کاربری بر فرآیندهای سیل در زیر حوزه استینسل لوکزامبورگ استفاده کردند. نتایج نشان داد که رواناب مناطق شهری در مقایسه با رواناب سایر کاربری‌ها برای یک واقعه سیل غالب است.

Mohammady et al. (2018) به بررسی اثرات تغییر کاربری اراضی بر پارامترهای رواناب پرداختند. در این مطالعه، نقشه‌های کاربری اراضی سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۲ با استفاده از روش‌های مصنوعی تهیه و نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۳۲ نیز با استفاده از مدل GLUE-s شبیه‌سازی شد. در ادامه از این نقشه-های کاربری برای شبیه‌سازی رواناب با مدل WetSpa استفاده شد. مهم‌ترین تغییرات کاربری اراضی طی این سال‌ها، تبدیل جنگل و مرتع به کشاورزی و انواع کاربری مسکونی بوده که به افزایش رواناب کل شبیه‌سازی شده منجر شده‌است.

Danesh et al. (2020) از مدل WetSpa برای بررسی اثرات سناریوی توسعه مناطق مسکونی بر هدررفت خاک ناشی از رواناب سطحی و قطرات باران درحوزه آبخیز زیارت استان گلستان استفاده کردند. نتایج نشان داد میزان هدررفت خاک ناشی از رواناب سطحی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش و هدررفت ناشی از قطرات باران افزایش یافت. Kavian et al. (2020)، با استفاده از مدل WetSpa و زنجیره مارکوف به پیش‌بینی اثرات تغییرات کاربری اراضی و فرآیندهای هیدرولوژیکی در حوزه آبخیز شهری پرداختند. نتایج نشان دهنده برخی اثرات منفی تغییرات کاربری اراضی مانند افزایش رواناب سطحی، دبی اوج و سرعت جریان در بازه زمانی ۲۰۰۱-۲۰۳۲، کاهش زمان تمرکز از ۶ ساعت در سال ۲۰۰۱ به ۵ ساعت در سال ۲۰۱۶ و ۴ ساعت در سال ۲۰۳۲ بود. آنالیز حساسیت و عدم‌قطعیت پارامترهای مدل WetSpa نیز در تحقیقات بسیاری مورد توجه قرار گرفته و روش‌هایی نظیر استفاده از نرم‌افزار PEST و الگوریتم ژنتیکی برای واسنجی این مدل مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. Shafii and (2009) DeSmedt، از روش الگوریتم ژنتیکی برای واسنجی مدل WetSpa در رودخانه هورناد اسلوواکی استفاده نمودند. نتایج نشان داد استفاده از الگوریتم ژنتیکی، روشی کارا برای تعیین پارامترهای مدل می‌باشد. نرم‌افزار PEST برای انجام آنالیز حساسیت و عدم قطعیت این مدل نیز در مطالعات متعددی از جمله (2006) Bahreman and (2012) Azinmehr، و (2010) Bahreman and De Smedt مورد استفاده قرار گرفته‌است.

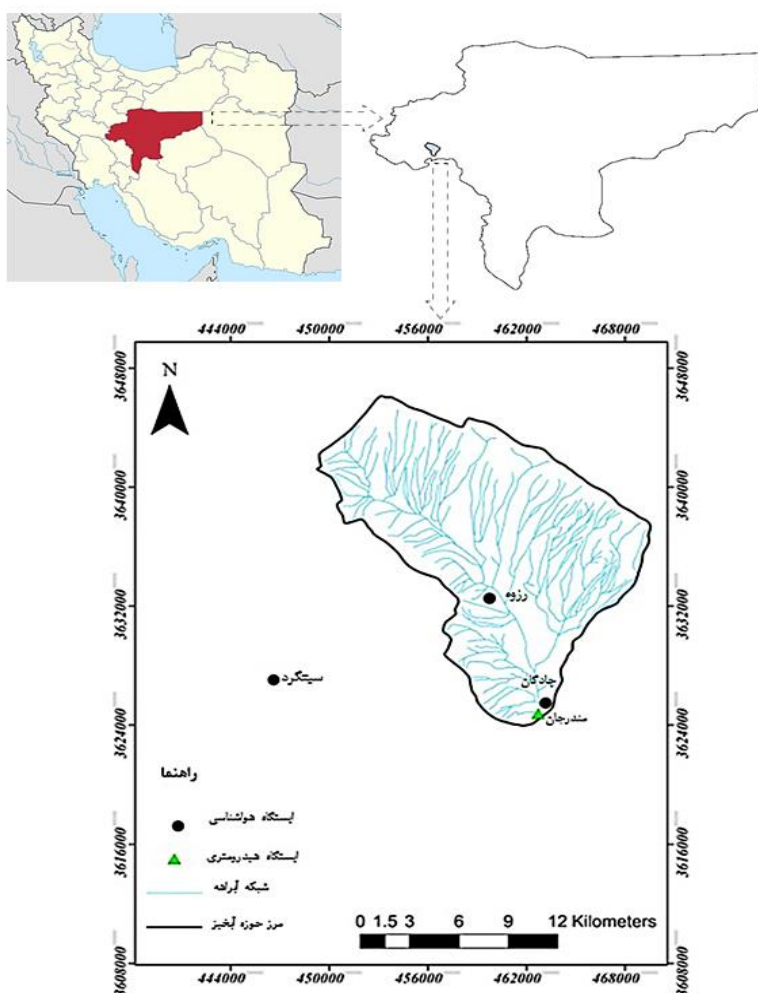
در سال‌های اخیر از تکنیک‌های متعددی برای کاهش عدم قطعیت و افزایش اعتمادپذیری در پیش‌بینی متغیرهای

مدل WetSpa در شرایط نیمه‌خشک پرداخته شده و واسنجی خودکار و تحلیل حساسیت و عدم قطعیت پارامترهای مدل نیز با استفاده از برآوردگر پارامتر مستقل از مدل PEST انجام شده است. همچنین کاربرد فیلتر کالمن به عنوان ابزاری برای بهبود تخمین خروجی مدل و افزایش دقت نتایج بررسی شده است.

ماده و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه حوزه آبخیز مندرجان می‌باشد که با مساحت حدود ۲۱۶ کیلومتر مربع، بین طول جغرافیایی "۱۶' ۵۰° تا " ۴۸' ۳۲° ۴۵' ۱۲" شرقی و عرض جغرافیایی "۳۲° ۴۵' ۱۲" تا "۴۸' ۳۲° ۴۵' ۱۲" شمالی در بالادست سد زاینده‌رود در شهرستان چادگان استان اصفهان واقع شده است (شکل ۱). ارتفاع حداکثر حوزه آبخیز ۳۵۸۰ متر و ارتفاع حداقل ۲۰۵۷ متر می‌باشد. در حدود ۶۰ درصد منطقه در ارتفاع ۲۲۰۰ تا ۲۴۰۰ متر از سطح دریا قرار دارد. شیب متوسط حوزه ۳ آبخیز/۱۳ درصد محاسبه شده و به صورت شمالی- جنوبی می‌باشد. این حوزه آبخیز دارای آب و هوای نیمه‌خشک با زمستان‌های سرد و بارش متوسط سالانه ۴۰۰ میلی‌متر می‌باشد. حوزه آبخیز مندرجان به لحاظ پوشش گیاهی دارای مرتع، باغات، کشاورزی آبی و کشاورزی دیم می‌باشد (Soil and water conservation studies, 1992).



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز مندرجان و ایستگاه‌های مورد مطالعه

بررسی آماری داده‌ها

قبل از استفاده از داده‌ها به عنوان ورودی مدل هیدرولوژیکی، داده‌های ایستگاه‌های موجود در منطقه به لحاظ طول دوره آماری و وجود داده مفقوده بررسی شد. در بررسی اولیه، ایستگاه‌های دارای طول دوره آماری کوتاه و یا تعداد داده مفقوده زیاد، حذف شده و نهایتاً از ایستگاه‌های دارای آمار بلند مدت و فاقد داده مفقوده شامل ایستگاه‌های هواشناسی چادگان، سینگرد و رزوه و آمار دبی ایستگاه هیدرومتری مندرجان سال ۱۹۹۳-۲۰۱۷

دارای طول دوره آماری کوتاه و یا تعداد داده مفقوده زیاد، حذف شده و نهایتاً از ایستگاه‌های دارای آمار بلند مدت و فاقد داده مفقوده شامل ایستگاه‌های هواشناسی چادگان، سینگرد و رزوه و آمار دبی ایستگاه هیدرومتری مندرجان سال ۱۹۹۳-۲۰۱۷

(متر مکعب بر متر مکعب)، a توان مرتبط با شدت بارش و G_i ضریب رواناب پتانسیل در سلول i می‌باشد.

جریان سطحی که از رابطه ۲ محاسبه می‌شود و جریان زیر قشری ابتدا در هر شبکه سلولی به سوی کانال اصلی با استفاده از معادلات تقریب موج پخشی سنت و نانت روندیابی می‌شوند و در خروجی هر زیر حوزه آب زیر زمینی هم به آن‌ها اضافه شده و سپس کل جریان به سمت خروجی حوزه آبخیز روندیابی می‌گردد.

میزان دبی در انتهای مسیر جریان از رابطه زیر - که یک تابع پاسخ خطی سنت و نانت است - محاسبه می‌شود (Liu *et al.*, 2003):

$$U(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi t^3/t_0^3}} \exp \left[-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma^2 t/t_0} \right] \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن $U(t)$ (ثانیه^{-۱}) تابع پاسخ مسیر جریان است که برای تعیین هیدروگراف واحد لحظه‌ای جریان به کار می‌رود و روندیابی مسیر جریان تا خروجی حوزه آبخیز را ممکن می‌سازد، t_0 زمان پیمایش (ساعت) و σ انحراف معیار زمان جریان است. در نهایت هیدروگراف رواناب مستقیم در خروجی حوزه آبخیز یا هر نقطه پایین دست که جریان به هم می‌پیوندد از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$Q(t) = \int A \int_0^t I(\tau) U(t-\tau) d\tau dA \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در این رابطه $Q(t)$ میزان دبی خروجی (متر مکعب بر ثانیه)، $U(t-\tau)$ تابع پاسخ مسیر جریان (ثانیه^{-۱})، τ زمان تاخیر (ثانیه)، $I(\tau)$ بارش موثر در هر سلول (متر بر ثانیه) در زمان τ و A سطح زهکش حوزه آبخیز (متر مربع) است (Liu *et al.*, 2003). در تحقیق حاضر، علاوه بر داده‌های هواشناسی و هیدرومتری از نقشه‌های کاربری اراضی و بافت خاک در مقیاس ۱/۵۰۰۰۰ که از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان تهیه شده و همچنین نقشه رقومی ارتفاع سنجنده ASTER به عنوان نقشه‌های ورودی مدل استفاده شده است. این نقشه‌ها به صورت رستر با اندازه سلول ۳۰ متر به مدل وارد شد. استفاده از مقیاس‌های کوچکتر به دلیل بالارفتن حجم محاسبات مستلزم صرف زمان زیادی است و در مقیاس‌های بزرگتر (به طور مثال اندازه سلول ۱۰۰ متر) هم ممکن است بسیاری از جزئیات حذف گردد و از دقت شبیه‌سازی کاسته شود. از این رو در این مطالعه از اندازه سلول ۳۰ متر برای تهیه نقشه‌های ورودی استفاده شد. همچنین از آمار و اطلاعات دما، بارش و تبخیر و تعرق روزانه مربوط به سال آبی ۱۳۷۱ تا ۱۳۸۶ برای واسنجی و آمار سال آبی ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۶ برای اعتبارسنجی استفاده گردید.

به منظور تسهیل فرآیند واسنجی پارامترها، ۱۱ پارامتر کلی

میلادی در مقیاس روزانه استفاده شد. پس از آن، برخی آزمون‌های آماری جهت بررسی کفایت و همگنی داده‌ها در ایستگاه‌های منتخب انجام شد. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار SPSS بررسی‌های آماری جهت بررسی کفایت داده‌ها و همگنی داده‌ها انجام شد.

تشریح مدل WetSpa

مدل WetSpa یک مدل هیدرولوژیکی توزیعی برای پیش‌بینی انتقال آب و انرژی بین خاک، گیاهان و اتمسفر است. این مدل اولین بار توسط Wang *et al.* (1996) ابداع و سپس توسط De Smedt *et al.* (2000) و Liu *et al.* (2002) برای پیش‌بینی سیل توسعه یافت. این مدل بر اساس شبکه سلولی طراحی شده که هر سلول شامل چهار لایه در جهت عمودی است این لایه‌ها عبارتند از: زون تاج پوشش، زون ریشه، زون انتقال و زون اشباع (Liu and De Smedt, 2004).

در این مدل تعادل آب در زون ریشه برای هر شبکه سلولی

از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Liu and De Smedt, 2004):

$$D \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = P - I - V - E - R - F \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در این رابطه D عمق ریشه (متر)، $\Delta \theta$ تغییرات رطوبتی خاک (متر مکعب/متر مکعب)، Δt گام زمانی (روز)، P بارش (میلی‌متر در روز)، I تلفات اولیه شامل ذخیره برگابی و ذخیره چالایی (متر در روز)، V رواناب سطحی یا بارش مازاد (متر در روز)، E تبخیر و تعرق (متر در روز)، R میزان نفوذ عمقی از زون ریشه (متر در روز) و F میزان جریان زیر قشری (متر در روز) می‌باشد.

در این مدل، تبخیر و تعرق واقعی از خاک و گیاه بر اساس روابط توسعه یافته تورنوایت و میسر محاسبه می‌شود که تابعی از تبخیر و تعرق پتانسیل، نوع پوشش گیاهی، مرحله رشد و میزان رطوبت خاک است. میزان نفوذ عمقی به خارج از زون ریشه به صورت تابعی از محتوای رطوبتی خاک، تخلخل خاک و میزان هدایت هیدرولیکی اشباع محاسبه می‌شود. جریان زیر قشری نیز بر اساس قانون دارسی و معادلات موج سینماتیکی محاسبه می‌گردد. در مدل WetSpa رواناب سطحی در هر شبکه سلولی با استفاده از روش ضریب رواناب اصلاح شده (با در نظر گرفتن رطوبت خاک) از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Liu and De Smedt, 2004):

$$S = C_i (P - I) \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^a \quad (\text{رابطه ۲})$$

در رابطه فوق S نشان‌دهنده رواناب سطحی (میلی‌متر)، P بارش (میلی‌متر)، I تلفات برگابی (میلی‌متر)، θ محتوای رطوبتی خاک (متر مکعب بر متر مکعب)، θ_s رطوبت اشباع خاک

صفر مشاهده‌ای یا شبیه‌سازی شده معرفی شده است.

تحلیل حساسیت و عدم قطعیت

در تحقیق حاضر، جهت انجام آنالیز حساسیت از نرم افزار PEST استفاده شده و محاسبه آن معمولاً از طریق محاسبات مشتق جزئی توابع خروجی نسبت به متغیرهای ورودی انجام می‌گردد. در این نرم‌افزار، محاسبه مشتق برای هر مشاهده در رابطه با هر پارامتر بر اساس الگوریتم گوس-مارکوارت-لونبرگ می‌باشد. این مشتقات برای تعیین آنالیز حساسیت به ماتریس ژاکوب وارد می‌شوند که شامل m ردیف (برای هر مشاهده) و n ستون (برای هر پارامتر) می‌باشد که در آن هر ردیف عبارت است از مشتقات هر مشاهده در رابطه با هر یک از n پارامتر. میزان حساسیت هر پارامتر به صورت حساسیت نسبی - با تقسیم حساسیت مطلق در میزان عددی آن پارامتر- بیان می‌گردد. استفاده از حساسیت نسبی امکان مقایسه پارامترهای مختلف مدل (که از انواع مختلف بوده و مقادیر عددی آنها اختلاف زیادی با هم دارند) را فراهم می‌سازد (Azinmehr et al., 2013).

در بررسی عدم قطعیت، یک ورودی با مقدار قطعی به ارائه یک خروجی قطعی ختم می‌شود. از طرف دیگر، یک ورودی با مقدار غیر قطعی به یک خروجی غیر قطعی با بازه ای از مقادیر احتمالی خواهد انجامید. در این تحقیق، عدم قطعیت از طریق تعیین حدود اطمینان پارامترهای واسنجی شده و با استفاده از نرم‌افزار PEST بررسی شده است. نرم‌افزار PEST با ارائه حدود اطمینان ۹۵ درصد، کارایی مناسبی در محاسبه میزان اعتماد مربوط به مقادیر متفاوت پارامترهای مورد ارزیابی دارد. این ارزیابی در PEST با محاسبه انحراف معیار و حدود معنی‌داری برای هر پارامتر که از رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود، انجام می‌گردد.

$$m \pm t_{\alpha,n} \cdot S \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

در رابطه فوق m میانگین پارامترها، S انحراف معیار پارامترها و α و n به ترتیب بیانگر حدود احتمال و درجه آزادی در آزمون t student می‌باشد. در اینجا، مقدار n برابر با تعداد داده‌ها منهای یک و مقدار α برابر ۰/۰۵ است. به عبارت دیگر، در این مطالعه حدود اطمینان در سطح ۹۵ درصد بررسی شده است. هرچه یک پارامتر دامنه عدم قطعیت بیشتری داشته باشد، خطای ناشی از مقداردهی آن بر نتایج تاثیر بیشتری می‌گذارد و باعث تطابق کم بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده می‌گردد. پارامترهایی که عدم قطعیت اندکی دارند، معمولاً پارامترهای حساس مدل بوده و بر نتایج شبیه‌سازی تاثیر بسزایی دارند. از طرف دیگر، پارامترهای دارای عدم قطعیت زیاد، عموماً پارامترهایی را شامل می‌شود که تعیین مقدار واقعی آنها در

در مدل WetSpa مورد استفاده قرار می‌گیرد (جدول ۱). این پارامترها که دارای تعاریف فیزیکی هستند، بر هیدروگراف خروجی حوزه آبخیز تاثیر بسزایی دارند؛ اما تعیین مقدار دقیق آنها در مقیاس شبکه سلولی بسیار دشوار است. بنابراین برای کسب نتایج بهتر در مدل، واسنجی این پارامترها در برابر داده‌های رواناب مشاهده‌ای ضرورت دارد. در این مطالعه از نرم افزار PEST برای واسنجی خودکار پارامترها استفاده شده است. از مزایای این نرم‌افزار این است که در تمام علوم کاربرد دارد و با دیگر نرم‌افزارها لینک می‌شود و دارای قابلیت‌هایی مانند واسنجی خودکار، بهینه‌سازی پارامترها، آنالیز حساسیت، آنالیز عدم قطعیت و آنالیز پیش‌بینی است. در نرم‌افزار PEST از الگوریتم گوس-مارکوارت-لونبرگ استفاده شده که مزایای دو روش Hessian و steepest decent را ترکیب کرده و همگرایی سریع‌تر و موثرتری به سمت حداقل تابع هدف دارد. اما خطر افتادن در مینیمم‌های محلی از معایب این نرم‌افزار به شمار می‌رود (Yaghoobi, 2010).

نرم افزار PEST طبق الگوریتم موجود در خود به صورت مرحله به مرحله پارامترها را مطابقت داده و اجرای برنامه به روش جستجوی محلی تکرار می‌شود تا زمانی که بهترین مقدار پارامترها به دست آید. در این نرم‌افزار که روشی برای تخمین غیر خطی پارامترها است، مقادیر بهینه پارامترها از طریق به حداقل رساندن اختلاف مجموع مربعات دبی‌های مشاهده‌ای و محاسباتی تعیین می‌گردد (Bahremand and De Smed, 2010).

برای ارزیابی دقت نتایج شبیه‌سازی شده از برخی معیارهای آماری استفاده می‌شود. معیارهای مورد استفاده در این مطالعه عبارتند از: Nash-Sutcliffe (NS)، ضریب تعیین (R-squared)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و اریبی (Bias). این معیارها به صورت زیر محاسبه می‌شود (Liu and De Smedt, 2004):

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Qs_i - Qo_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Qo_i - \bar{Qo})^2} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Qs_i - Qo_i)^2}{n}} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Qs_i - Qo_i| \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$Rsqr = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Qo_i - \bar{Qo})(Qs_i - \bar{Qs})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Qo_i - \bar{Qo})^2 \sum_{i=1}^n (Qs_i - \bar{Qs})^2}} \right]^2 \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (Qs_i - Qo_i)}{\sum_{i=1}^n Qo_i} \quad (\text{رابطه ۹})$$

در روابط بالا Qs_i و Qo_i به ترتیب دبی شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای (متر مکعب بر ثانیه) در گام زمانی i ، \bar{Qo} و \bar{Qs} میانگین دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی در طول دوره شبیه‌سازی و ϵ مقدار بسیار کوچکی که برای جلوگیری از مشکلات ناشی از وجود داده

ایستگاه‌های دارای دوره آماری بلندمدت و فاقد داده مفقوده، بررسی کفایت داده‌ها و همگنی داده‌ها انجام شد. برای بررسی کفایت داده‌ها از آزمون بارتلت و شاخص KMO (Kaiser-Mayer-Olkin) در نرم‌افزار SPSS استفاده شد و طبق آن مقدار شاخص 0.718 به دست آمد که بیانگر کفایت نمونه‌ها می‌باشد. برای بررسی همگنی داده‌ها در ایستگاه‌های منتخب نیز از آزمون توالی استفاده شد و نتایج آزمون بیانگر همگنی داده‌ها در ایستگاه‌های منتخب بود.

آنالیز حساسیت

هدف از تحلیل حساسیت شناسایی پارامترهای حساس و تمرکز بیشتر بر این پارامترها در طی واسنجی می‌باشد. از این‌رو، در این مطالعه تحلیل حساسیت پارامترهای مدل WetSpa برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر انجام شده است. نتایج حاصل از آنالیز حساسیت ۱۱ پارامتر مدل در جدول (۱) ارائه شده است، به طوری که رتبه ۱ نشان‌دهنده بیشترین و رتبه ۱۱ نشان‌دهنده کمترین میزان حساسیت می‌باشد. طبق این جدول پارامتر Kg که افت شاخه آب زیرزمینی را کنترل می‌کند دارای بیشترین حساسیت بوده و پارامتر K_{ss} هم در رتبه دوم قرار گرفت. پارامتر K_{ss} در دوره شبیه‌سازی در ابتدای هیدروگراف شبیه‌سازی همواره به وسیله شرایط رطوبتی اولیه خاک تحت تأثیر قرار می‌گیرد و به همین خاطر حساسیت بیشتری نسبت به دیگر پارامترها داشت. طبق نتایج آنالیز حساسیت، پارامترهای G_{max} و P_{max} نیز کمترین حساسیت را دارا بودند.

جدول ۱- نتایج آنالیز حساسیت نسبی پارامترهای مدل WetSpa با استفاده

از نرم‌افزار PEST در حوزه آبخیز مندرجان		
رتبه حساسیت	حساسیت	علامت
۷	$1/76 \times 10^{-4}$	Ki
۱	۰/۱۵۸	Kg
۲	$1/32 \times 10^{-2}$	K_{ss}
۴	$3/04 \times 10^{-3}$	Kep
۹	$1/35 \times 10^{-5}$	G0
۱۱	$4/26 \times 10^{-7}$	G_{max}
۶	1×10^{-3}	t0
۵	$2/28 \times 10^{-3}$	K_{snow}
۳	$8/29 \times 10^{-3}$	K_{rain}
۸	$3/05 \times 10^{-5}$	K_{run}
۱۰	$6/31 \times 10^{-7}$	P_{max}

نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل

یکی از راه‌های بررسی میزان کارایی مدل، مقایسه هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده می‌باشد. بعد از اجرای اولیه و مقایسه هیدروگراف‌ها، مقادیر پارامترهای عمومی

واسنجی دشوار بوده و بنابراین از منابع عمده خطا به شمار می‌روند. در این مطالعه، ابتدا مقادیر اولیه پارامترها تعیین و مدل به صورت دستی واسنجی شد تا نگرشی کلی راجع به پارامترها و میزان حساسیت آن‌ها حاصل گردد. سپس از نرم‌افزار PEST جهت حصول نتایج دقیق‌تر در واسنجی تحلیل حساسیت و عدم قطعیت استفاده شده است. نرم‌افزار PEST به روش ارزیابی نقطه-ای، بهترین ارزیابی از پارامترهای عمومی مدل را جستجو می‌کند. در این ارزیابی، قابلیت اعتماد و عدم قطعیت پارامترها با فواصل یا حدود اطمینان ارائه می‌گردد (Azinmehr, 2012).

فیلتر کالمن توسعه یافته

از آنجایی که روابط حاکم بر سیستم هیدرولوژیکی به صورت غیر خطی است، باید از فیلترهای غیر خطی در این زمینه استفاده کرد. اما یکی از محدودیت‌های اصلی در این رابطه، پیچیدگی زیاد محاسبات و نیافتن پاسخ صریح برای معادلات و به عبارتی عدم توانایی استفاده از روابط غیر خطی بهینه است. به همین خاطر از فیلترهای غیرخطی شبه‌بهینه نظیر فیلتر کالمن توسعه یافته یا EKF استفاده می‌شود. فیلتر کالمن توسعه یافته همان فیلتر کالمن اصلی است که در حوالی کوواریانس و میانگین تخمین موجود به صورت خطی در آمده است (Kay, 1993). کافی است در هر مرحله از تخمین حالت‌های سیستم، از روی داده‌هایی که تخمین زده شده‌اند، دینامیک سیستم غیرخطی با استفاده از سری تیلور خطی‌سازی شود. در این مطالعه از کد فیلتر کالمن در نرم‌افزار R استفاده شده است و معادلات کلی آن به صورت زیر است:

$$y_t = Z_t \alpha_t + \epsilon_t \dots \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

$$\alpha_{t+1} = T_t \alpha_t + R_t \eta_t \dots \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

که در آن $\epsilon_t \sim N(0, H_t)$ ، $\alpha_t \sim N(a_1, P_1)$ و $\eta_t \sim N(0, Q_t)$ مستقل از یکدیگر هستند. Y_t پاسخ مشاهده‌ای سری زمانی و حاوی داده‌هایی است که باید فیلتر شود (در این مطالعه معادل داده‌های رواناب سطحی است)، α_t دینامیک بردار حالت، ϵ_t نویز و η_t ورودی‌های تصادفی است. ماتریس‌های Z_t ، H_t ، T_t ، R_t و Q_t در طی زمان تغییر می‌کنند و در نرم‌افزار R با استفاده از روش‌های ویژه تعیین می‌شود. روابط تعیین و محاسبه آن‌ها در مطالعاتی مانند Koopman and Durbin, 2003؛ و راهنمای پکیج KFAS (Helske 2010) تشریح شده است.

نتایج

نتایج بررسی‌های آماری

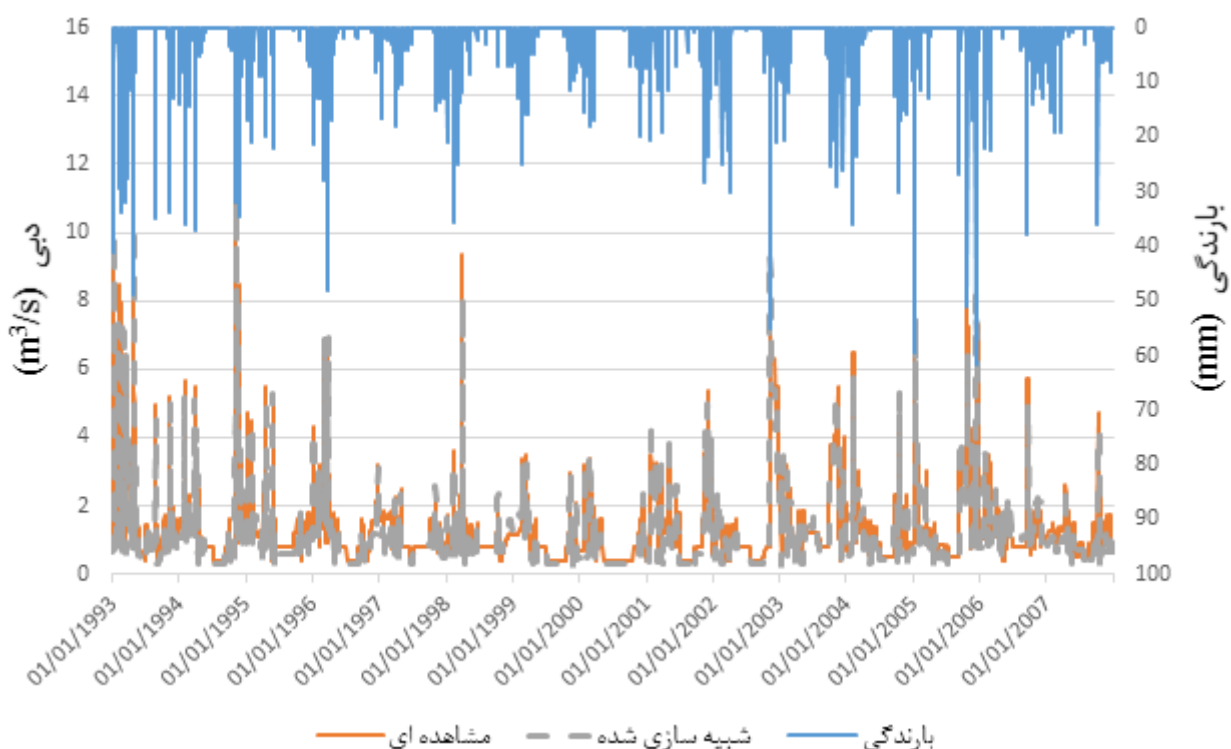
همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، در این پژوهش پس از انتخاب

مناسب، از نرم‌افزار PEST برای بهبود نتایج واسنجی استفاده شد. پس از تغییر مقادیر پارامترها برای دوره واسنجی، مدل مجدداً اجرا و نتایج شبیه‌سازی با مقادیر مشاهده‌ای به صورت گرافیکی و آماری مقایسه گردید. شکل (۲) مقایسه گرافیکی هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای را برای دوره واسنجی نشان می‌دهد.

تغییر داده می‌شود تا جایی که اختلاف بین هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده به حداقل برسد و تطابق مناسب بین آن‌ها ایجاد گردد. مقادیر مربوط به این پارامترها و محدوده تغییرات آنها در جدول (۲) ارائه شده است. در این مطالعه ابتدا با توجه به ویژگی‌های حوزه آبخیز و فرضیات مدل، مقادیر اولیه به صورت دستی تعیین شد و پس از دستیابی به واسنجی نسبتاً

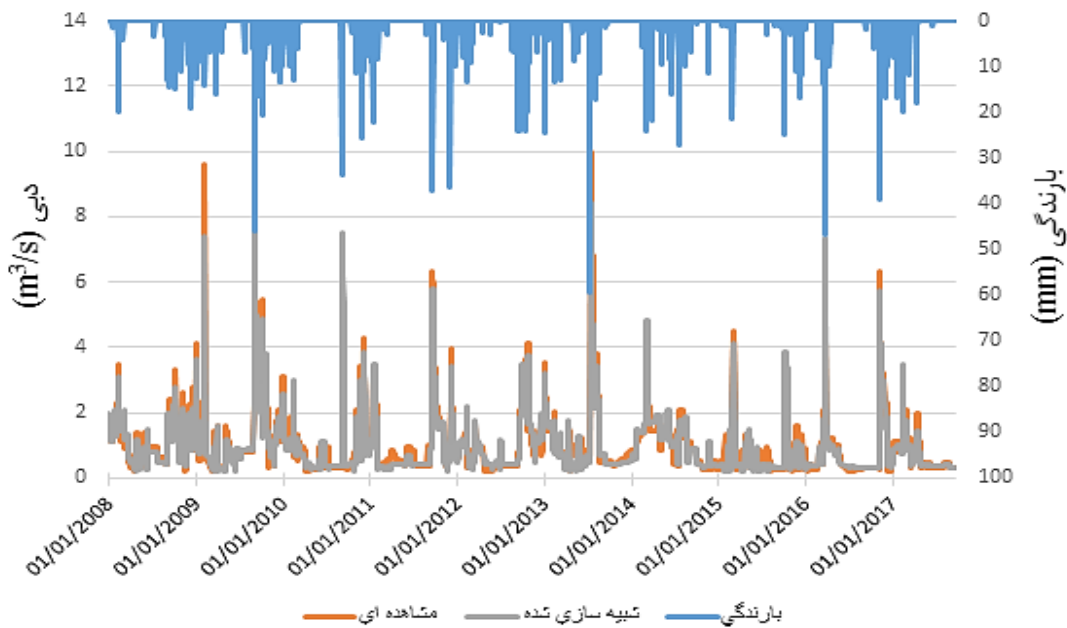
جدول ۲- مقادیر پارامترهای عمومی و محدوده تغییرات آنها در حوزه آبخیز مندرجان

پارامتر	علامت	حداقل	مقدار واسنجی شده	حداکثر
فاکتور جریان زیر سطحی (-)	Ki	۰/۱	۱/۰۹۸	۳
ضریب افت آب زیر زمینی (d^{-2})	Kg	۰/۰۰۰۰۰۱	۰/۰۰۹۹	۰/۱
رطوبت اولیه خاک (-)	K _{ss}	۰/۳	۰/۹۳	۲
فاکتور تصحیح تبخیر و تعرق پتانسیل (-)	Kep	۰/۱	۱/۰۸۹	۲
ذخیره آب زیر زمینی اولیه (mm)	G0	۰	۵۵/۵	۱۰۰
حداکثر ذخیره آب زیر زمینی (mm)	G _{max}	۰	۵۷۰	۲۰۰۰
ضریب درجه حرارت آستانه (°C)	T0	-۳	۰/۵۳	۲
ضریب درجه روز دما (mm/°C/day)	K _{snow}	-۳	۰/۲۷۵	۳/۲
ضریب درجه روز بارش (mm/mm/°C/day)	K _{rain}	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۵۴	۰/۳
توان رواناب سطحی (-)	K _{run}	۲	۲/۲۶	۵
حداکثر شدت بارش (mm)	P _{max}	۰	۱۵۵	۴۰۰



شکل ۲- مقایسه هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده دوره واسنجی

به منظور بررسی مناسب بودن پارامترهای واسنجی شده و بررسی کارایی مدل برای دوره‌های آماری دیگر، فرآیند اعتبارسنجی مدل با استفاده از دوره آماری ۲۰۰۸-۲۰۱۷ انجام گرفت. شکل (۳) هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای را در دوره اعتبارسنجی ارائه می‌دهد.



شکل ۳- مقایسه هیدروگراف‌های مشاهداتی و محاسباتی دوره اعتبارسنجی

تحلیل عدم قطعیت

مربوط به پارامتر Kg است. در واقع مقدار این پارامتر که حساس-ترین پارامتر در آنالیز حساسیت شناخته شد، با دقت زیاد و به درستی محاسبه شده و بنابراین از قطعیت بالایی برخوردار می-باشد. به طور کلی با مقایسه نتایج جدول (۱) و (۳) در می-یابیم پارامترهای دارای قطعیت بالا (شامل پارامترهای Kg، K_{ss} و K_{rain})، پارامترهای حساس و مهم مدل طی واسنجی هستند که تغییر ناچیزی در مقدار آن‌ها با تغییر قابل ملاحظه‌ای در نتایج شبیه‌سازی همراه است. از طرف دیگر، پارامترهای دارای قطعیت کم (عدم قطعیت زیاد) پارامترهای غیر حساس بوده (پارامترهای G_{max}، P_{max} و G₀) که تعیین مقدار آن‌ها طی واسنجی با خطای زیادی همراه می‌باشد و می‌توانند از منابع مهم خطا در فرآیند شبیه‌سازی لحاظ شوند.

نرم‌افزار PEST علاوه بر انحراف معیار، حد بالا و پایین عدم قطعیت هر پارامتر را نیز محاسبه می‌کند (جدول ۳). با توجه به نتایج نشان داده شده در این جدول، برای پارامتر G_{max} دامنه وسیعی از عدم قطعیت در نظر گرفته شده است. با توجه به مقادیر ارائه شده در جدول (۳)، مقدار اولیه اختصاص یافته به این پارامتر در فاصله اطمینان مشخص شده قرار دارد و بنابراین تفاوت معنی-داری بین مقدار اولیه و مقدار محاسبه شده آن وجود ندارد. بنابراین می‌توان گفت عدم قطعیت زیاد این پارامتر به این دلیل است که تعیین مقدار واقعی آن طی واسنجی بسیار دشوار می-باشد. با توجه به جدول (۳)، کمترین دامنه عدم قطعیت نیز

جدول ۳- محدوده اطمینان ۹۵٪ برای پارامترهای مدل در حوزه آبخیز مندرجان

پارامتر	مقدار اولیه (حاصل از واسنجی دستی)	مقدار محاسبه شده در واسنجی خودکار	انحراف معیار	حداقل	حداکثر
Ki	۱/۴۳	۱/۰۹۸	۰/۰۳۵	۱/۰۵	۱/۸
Kg	۰/۰۱۴	۹/۹×۱۰ ^{-۳}	۰/۰۰۰۵۵	۰/۰۰۸	۰/۰۱۱
K _{ss}	۱/۰۱	۰/۹۳	۰/۰۱۵	۰/۹۱	۰/۹۸
K _{ep}	۱/۰۶	۱/۰۸۹	۴/۵×۱۰ ^{-۳}	۱/۰۱۲	۱/۲۱۵
G ₀	۲۴/۷	۵۵/۵	۷/۸×۱۰ ^{-۲}	۲۱/۲	۶۵/۷
G _{max}	۳۷۴	۵۷۰	۳۲۰/۸۴	۲۸۴	۱۰۰۰
t ₀	۰/۷۱	۰/۵۳	۰/۰۱۶	-۰/۱۱	۰/۶۱۵
K _{snow}	۰/۶	۰/۲۷۵	۰/۰۱۴	۰/۰۹۸	۰/۳۰۸
K _{rain}	۰/۲	۵/۴×۱۰ ^{-۳}	۰/۰۷۹	-۰/۰۹۸۵	۰/۰۹۸۱
K _{run}	۳/۷۸	۲/۲۶	۰/۰۱۵	۲/۲۳	۲/۳۵
P _{max}	۲۰۰	۱۵۵	۵۱/۱۶	۱۰۰	۲۳۵

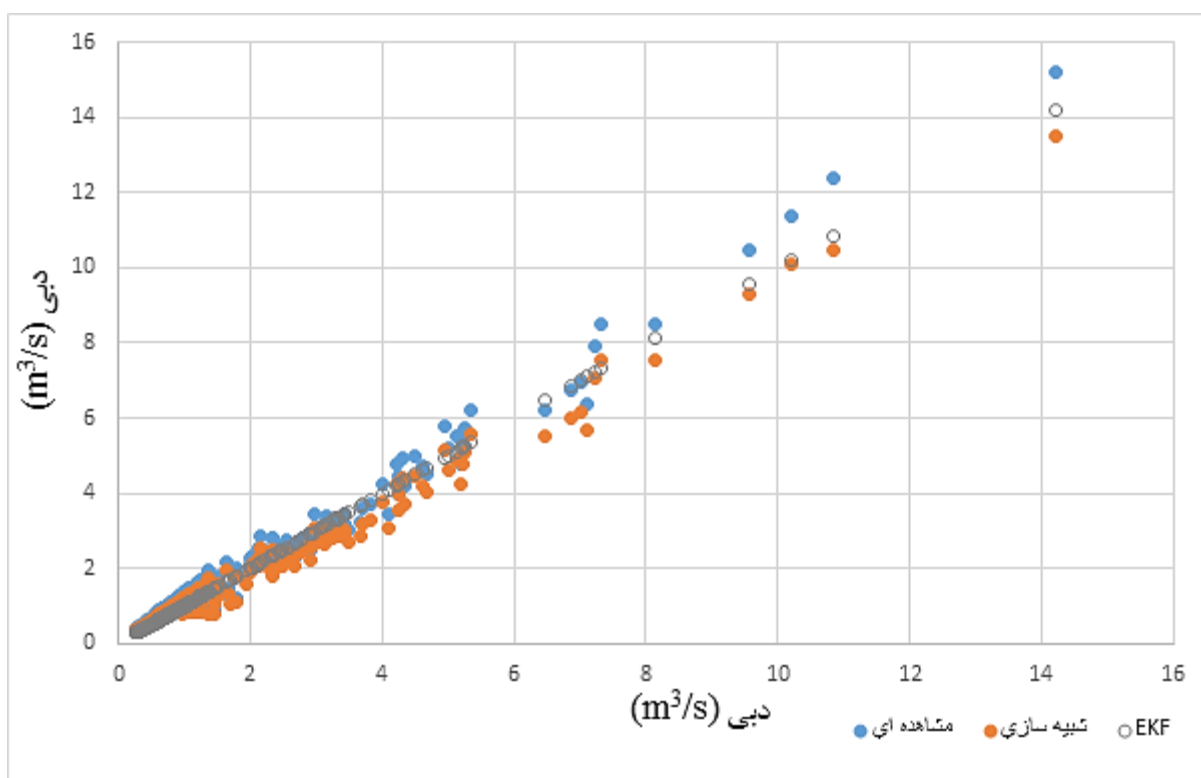
استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته

دقت نتایج شده است؛ به طوری که در بیشتر روزها داده حاصل از فیلتر در مقایسه با خروجی مدل WetSpa، به مقدار مشاهده‌ای نزدیک‌تر شده است. به عبارت دیگر، با استفاده از EKF میزان اختلاف بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای کاهش یافته و نتایج دقیق‌تری حاصل شده است. معیارهای آماری محاسبه شده برای داده‌های حاصل از EKF نیز موید این امر می‌باشد (جدول ۴). به طوری که معیار Nash-Sutcliffe حدود ۱۲ درصد در دوره واسنجی و حدود ۱۹ درصد در دوره اعتبارسنجی بهبود یافته است. طبق جدول (۴)، معیارهای ارزیابی خطا نیز در اثر استفاده از EKF کاهش یافته است.

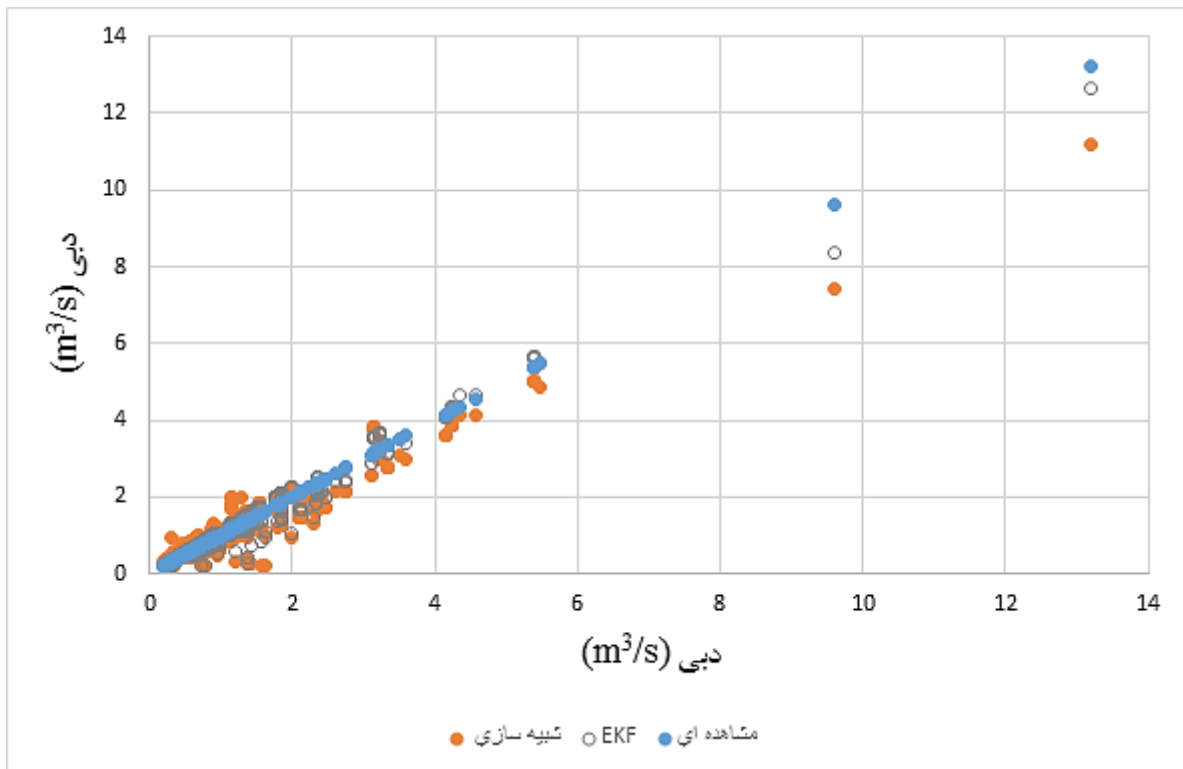
در این مطالعه پس از واسنجی مدل WetSpa توسط PEST و دستیابی به نتایج مناسب، از فیلتر کالمن توسعه یافته (EKF) برای بهبود دقت نتایج در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی استفاده شد. شکل‌های ۴ و ۵ مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده در حالت عادی و اعمال فیلتر را با داده‌های مشاهداتی در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی نشان می‌دهد. با توجه به تعداد زیاد داده‌ها، به منظور واضح بودن نمودارهای ترسیمی و امکان بررسی بصری، این شکل‌ها تنها برای بخشی از دوره واسنجی (۱۹۹۳-۱۹۹۴) و اعتبارسنجی (۲۰۰۸-۲۰۰۹) ترسیم شد. همان‌گونه که در شکل‌های ۴ و ۵ نیز مشهود است، استفاده از EKF باعث بهبود

جدول ۴- مقادیر معیارهای ارزیابی کارایی مدل طی واسنجی و اعتبارسنجی

معیار	واسنجی		اعتبارسنجی	
	EKF بدون	بعد از اعمال EKF	EKF بدون	بعد از اعمال EKF
Nash-Sutcliffe	۰/۶۳	۰/۷۱	۰/۵۸	۰/۶۹
RMSE	۱۲/۴۵	۱۰/۷۳	۱۴/۳۷	۱۰/۸۴
MAE	۸/۳۱	۷/۲۴	۹/۵۴	۸/۴۶
R- squared	۰/۸۴	۰/۹۱	۰/۸۱	۰/۹۲
Bias	۰/۰۷۵	۰/۰۲۱	۰/۰۹۱	۰/۰۳۷



شکل ۴- مقایسه رواناب شبیه‌سازی شده در حالت عادی و اعمال فیلتر با داده‌های مشاهداتی برای سال‌های ۱۹۹۳-۱۹۹۴



شکل ۵- مقایسه رواناب شبیه‌سازی شده در حالت عادی و اعمال فیلتر با داده‌های مشاهداتی برای سال‌های ۲۰۰۸-۲۰۰۹

شرایط مرزی)، فرضیات مدل و الگوریتم‌های به کار رفته در توصیف فرآیندها و اندازه‌گیری‌ها برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل مربوط می‌شود (Bahremand and De Smedt, 2008). بنابراین با توجه به محدودیت‌ها و مشکلات مربوط به استفاده از مدل‌های توزیعی، مقادیر اولیه پارامترها باید با دقت انتخاب گردد و سعی شود این مقادیر به مقادیر صحیح پارامترها نزدیک باشد. انتخاب مناسب مقادیر اولیه پارامترها همچنین باعث کاهش تعداد تکرار لازم برای دستیابی به حالت بهینه می‌شود. در هر حال، این امر شناخت کافی از مدل هیدرولوژیکی مورد استفاده و شرایط فیزیکی حوزه آبخیز مورد مطالعه را می‌طلبد. در این مطالعه مقادیر اولیه پارامترهای به کار رفته در مدل WetSpa به صورت دستی و به روش آزمون و خطا به دست آمد و طی مراحل واسنجی و آنالیز حساسیت مقادیر به منظور حصول بالاترین میزان ضریب Nash-Sutcliffe و کمترین میزان خطا تعدیل گردید.

در این تحقیق آنالیز حساسیت و تحلیل عدم قطعیت پارامترهای مدل نیز توسط نرم‌افزار PEST انجام شد. با توجه به نتایج آنالیز حساسیت پارامترها، پارامتر Kg که افت شاخه آب زیر زمینی را کنترل می‌کند بیشترین حساسیت نسبی را دارا می‌باشد. به عبارتی این ضریب نشان‌دهنده بخشی از آب نفوذیافته است که به آب زیر زمینی نمی‌پیوندد و پس از نفوذ سطحی، به صورت رواناب در می‌آید. با توجه به اینکه عامل شیب از عوامل مهم تأثیرگذار بر میزان نفوذ بوده، می‌توان گفت این پارامتر به شیب

بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه کارایی مدل هیدرولوژیکی WetSpa در شبیه‌سازی رواناب در شرایط اقلیمی نیمه‌خشک (حوزه آبخیز مندرجان) بررسی شد. همان‌گونه که نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل WetSpa نشان داد، تعیین مقادیر بهینه برای پارامترها در استفاده از مدل‌های بارش-رواناب ضروری است. در غیر این صورت کاربرد مدل بسیار مشکل شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های آن با خطای قابل توجهی همراه خواهد بود. بنابراین باید در استفاده از آن‌ها، پارامترها با توجه به خصوصیات توپوگرافی، ویژگی‌های فیزیکی خاک و کاربری اراضی حوزه آبخیز تعدیل گردند. همچنین انجام فرآیند اعتبارسنجی نیز برای بررسی صحت واسنجی این مدل‌ها ضروری است تا بتوان درک صحیحی از خطای احتمالی در پیش‌بینی‌های مدل به دست آورد.

نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که مجموعه پارامترهای واسنجی شده نسبت به مقادیر ابتدایی، ممکن است به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر کند و بنابراین بر نتایج ارزیابی عملکرد مدل هم تأثیر بسزایی داشته باشد. این موضوع به دلیل غیر خطی بودن ساختار مدل و عدم قطعیت مدل و پارامترهای آن است. مشکل غیر خطی بودن مدل، یکی از مشکلات اساسی مدل‌های توزیعی در هیدرولوژی به ویژه در حوزه‌های آبخیز بزرگ است. مشکل عدم قطعیت فرآیند مدل‌سازی به داده‌های ورودی (تغییرپذیری مکانی و زمانی پارامترها، شرایط اولیه و

حوزه آبخیز مورد مطالعه در اقلیم نیمه خشک واقع شده و آب زیر زمینی از سطح فاصله قابل توجهی دارد. بنابراین تبخیر از آب زیر زمینی رخ نمی‌دهد.

نتایج آنالیز حساسیت این تحقیق با نتایج بسیاری از مطالعات انجام شده همخوانی نسبی دارد. به عنوان مثال، در آنالیز حساسیت پارامترهای مدل WetSpa در حوزه آبخیز دینور استان کرمانشاه پارامتر Kg به عنوان حساس‌ترین پارامتر، و G_max به عنوان غیر حساس‌ترین پارامتر معرفی شده است (Azinmehr, 2012). همچنین نتایج مشابهی برای آنالیز حساسیت مدل WetSpa در حوزه آبخیز بالخلوچای در استان اردبیل ارائه شده است (Imani, 2014). در رتبه‌بندی حساسیت پارامترها در حوزه آبخیز توریسا در اسلوواکی بیشترین و کمترین حساسیت به ترتیب مربوط به پارامترهای Kep و G_max گزارش شده است. در این مطالعه پارامترهای K_run و K_ss نیز به ترتیب در رتبه دوم و سوم حساسیت قرار گرفتند (Bahremand and De Smedt, 2008). نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای مدل WetSpa در حوزه آبخیز باراریه نیشابور نیز بیانگر حساسیت بالای دو پارامتر Kg و Kep می‌باشد (Rahmati, 2013). بنابراین به طور کلی می‌توان پارامترهای Kg، Kep و K_ss را به عنوان پارامترهای حساس و پارامترهای G_max، GO و P_max را به عنوان پارامترهای غیر حساس معرفی کرد.

نتایج تحلیل عدم قطعیت پارامترهای مدل نشان داد طی محاسبه فواصل اطمینان و یا دامنه عدم قطعیت، به طور کلی به پارامترهای غیر حساس دامنه وسیعی از مقادیر اختصاص می‌یابد. از این روی، در مطالعه انجام شده برای پارامتر G_max بیشترین دامنه عدم قطعیت مشاهده می‌شود که با نتایج حاصل از آنالیز حساسیت انجام شده همخوانی دارد. زیرا با توجه به نتایج آنالیز حساسیت، G_max به عنوان پارامتر غیر حساس شناسایی شده است. به طور کلی می‌توان گفت پارامترهای حساس دارای عدم قطعیت کم و پارامترهای غیر حساس دارای عدم قطعیت زیادی هستند.

همانگونه که در قسمت‌های قبل اشاره شد، هدف از آنالیز حساسیت تعیین پارامترهای حساس و تمرکز بر این پارامترها به منظور صرفه‌جویی در زمان و دستیابی به دقت بیشتر در فرآیند مدل‌سازی می‌باشد. بنابراین با توجه به عدم حساسیت پارامترهایی نظیر G_max، GO و P_max در حوزه آبخیز مورد مطالعه، می‌توان در تحقیقات بعدی در این حوزه آبخیز، با حذف این پارامترها در زمان آنالیز حساسیت در زمان و هزینه مورد نیاز برای پروژه صرفه‌جویی گردد. از طرف دیگر، در انتخاب مقادیر مربوط به پارامترهای دارای حساسیت بالا نظیر Kg و Kep باید دقت کافی

حساس است. بنابراین در مناطق پرشیب و یا در حالتی که برآورد دقیقی از شیب متوسط حوزه آبخیز ارائه نشده باشد، این پارامتر حساسیت زیادی از خود نشان می‌دهد. زیرا مقدار عددی شیب متوسط حوزه آبخیز بر میزان کمی این پارامتر مؤثر است. پارامتر K_ss هم به عنوان دومین پارامتر حساس مدل شناسایی شد. زیرا پارامتر K_ss در ابتدای هیدروگراف طی دوره شبیه‌سازی همواره تحت تاثیر شرایط رطوبتی اولیه خاک قرار می‌گیرد و به همین خاطر حساسیت بیشتری نسبت به دیگر پارامترها خواهد داشت.

مقایسه هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده طی دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی نشان‌دهنده عملکرد خوب مدل در شبیه‌سازی رواناب حوزه آبخیز مندرجان می‌باشد. مقادیر مربوط به معیارهای آماری نیز مؤید این امر است. به طوری که ضریب Nash-Sutcliffe در دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۶۳ و ۰/۵۸ حاصل شد که بیانگر عملکرد خوب مدل در حوزه آبخیز مورد مطالعه می‌باشد. طبق نتایج، مقادیر حاصل برای اغلب پارامترهای مدل WetSpa طی واسنجی خودکار نسبت به مقادیر اولیه کاهش یافت (به جز پارامترهای Kep، G_max و GO). مقدار حاصل برای پارامتر K_i که پارامتر مربوط به جریان زیرقشری است، مؤید این است که جریان تاخیری در خاک نسبت به جریان عمودی در خاک، سهم بیشتری در تشکیل رواناب دارد. کاهش مقدار پارامتر Kg بیانگر این است که میزان نگهداری شده به صورت آب زیرزمینی کمتر از میزان در نظر گرفته شده می‌باشد. مقدار بالاتر پارامتر GO می‌تواند ناشی از شرایط هیدرولوژیکی و اقلیمی غالب در دوره زمانی مورد بررسی و همچنین تفاوت‌های موجود در ساختار خاک باشد (Porretta et al., 2011).

با بررسی نتایج مدل در شبیه‌سازی دبی روزانه مشاهده می‌شود که علیرغم اینکه پارامترهای مدل در دوره واسنجی و اعتبارسنجی به مقدار بهینه رسیده است و ضریب Nash-Sutcliffe نتایج بهینه‌سازی پارامترها را به‌ویژه برای جریان‌های حداکثر تایید می‌کند، ولی با این وجود مقادیر حداکثر روزانه در مقادیر حدی مقداری کم برآورد شده است. این مورد را می‌توان به کمبود ایستگاه‌های باران‌سنجی و کافی نبودن اطلاعات در زمینه پراکنش مکانی بارش و جهت حرکت توده باران‌زا نسبت داد که رفع آن نیازمند این است که تعداد بیشتری ایستگاه برای ثبت آمار بارش در منطقه موجود باشد تا بتوان شرایط منحصر به فرد هر واقعه بارش را به درستی شبیه‌سازی کرد.

نتایج همچنین نشان داد پارامتر G_max که مقدار تبخیر و تعرق از آب زیر زمینی را کنترل می‌کند، دارای کمترین حساسیت می‌باشد. این موضوع می‌تواند به این دلیل باشد که

قبلا اشاره شد فیلتر کالمن توسعه یافته در بازه‌های کوچک با استفاده از بسط تیلور خطی‌سازی می‌شود. اگرچه نتایج حاصل در این مطالعه نشان‌دهنده کارایی این فیلتر در بهبود دقت نتایج بوده است، اما باید توجه داشت که مسئله خطی‌سازی به شکلی که در این فیلتر انجام می‌شود، ممکن است به ارائه نتایج همراه با خطا منجر شود. لذا پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی از سایر تکنیک‌های داده‌گواری که برای سیستم‌های غیر خطی توسعه یافته مانند (EnKF) ensemble kalman filter و Unscented Kalman filter (UKF) نیز استفاده و کارایی این روش‌ها مقایسه شود. بدین ترتیب می‌توان تکنیک‌های داده‌گواری مناسب‌تر و دقیق‌تر را برای مطالعه سیستم‌های هیدرولوژیکی معرفی کرده و توسعه داد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Abbaspour, K. C., Vaghefi, S. A., & Srinivasan, R. (2018). *A guideline for successful calibration and uncertainty analysis for soil and water assessment: A review of papers from the 2016 International SWAT Conference*.
- Azinmehr, M. (2012). Simulation of the effect of land use change scenarios on the flow hydrograph of Dinur watershed using WetSpa distributed-spatial hydrological model. M.Sc. Thesis, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources (In Farsi).
- AzinMehr, M., Bahremand, A., & and Kabir, A. (2013). Sensitivity analysis of effective parameters in flow hydrograph simulation using WetSpa spatial distribution hydrological model in Dinur watershed upstream of Karkheh Dam, 6th National Conference on Watershed Management and Water and soil Resources Management Kerman . (In Farsi).
- Bahremand, A. (2006). Simulating the effects of reforestation on floods using spatially distributed hydrologic modeling and GIS. Brussels: Vrije Universiteit Brussel.
- Bahremand, A., & De Smedt, F. (2006). Parameter sensitivity and uncertainty analysis of the WetSpa model using PEST. In *Proceedings of the 2006 IASME/WSEAS Int. Conf. on Water Resources, Hydraulics & Hydrology* (pp. 26-35).
- Bahremand, A., & De Smedt, F. (2008). Distributed hydrological modeling and sensitivity analysis in Torysa Watershed, Slovakia. *Water Resources Management*, 22(3), 393-408.
- Bahremand, A., & De Smedt, F. (2010). Predictive analysis and simulation uncertainty of a distributed hydrological model. *Water resources management*, 24(12), 2869-2880.
- Danesh, M. F., Ghaleno, M. R. D., Alvandi, E., Meshram, S. G., & Kahya, E. (2020). Predicting the Impacts of Optimal Residential Development Scenario on Soil Loss Caused by Surface Runoff and Raindrops Using TOPSIS and WetSpa Models. *Water Resources Management*, 34(10), 3257-3277.
- De Smedt, F., Liu, Y.B., & Gebremeskel, S. (2000). Hydrologic modelling on a catchment scale using GIS and remote sensed land use information. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 45.
- Helske J (2010) KFAS: Kalman filter and smoothers for exponential family state space models. R package version 06.0
- Imani, R. (2014). Hydrological Simulation Using WetSpa and Neural Network Models (Case Study: Balkhulchay Watershed, Ardabil Province). M.Sc. Thesis, Gorgan University of Agricultural and Natural Resources Sciences. (In Farsi).
- Kavian, A., Javidan, N., Bahrehmand, A., Gyasi-Agyei, Y., Hazbavi, Z., & Rodrigo-Comino, J. (2020). Assessing the hydrological effects of land-use changes on a catchment using the Markov chain and WetSpa models. *Hydrological Sciences Journal*.
- Kay, S. M. (1993). *Fundamentals of statistical signal processing*. Prentice Hall PTR.
- Koopman, S. J., & Durbin, J. (2003). Filtering and smoothing of state vector for diffuse state-space models. *Journal of Time Series Analysis*, 24(1), 85-98.
- Lenhart, T., Eckhardt, K., Fohrer, N., & Frede, H. G. (2002). Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 27(9-10), 645-654.
- Liu, Y. B., Batelaan, O., De Smedt, F., Poórová, J. A. V. L., & Velická, L. (2005). Automated calibration applied to a GIS-based flood simulation model

مبذول داشت تا نتایجی با حداقل خطا حاصل گردد. همچنین با توجه به برآورد کمتر دبی برای جریان‌های حداکثر، پیشنهاد می‌شود کارایی مدل WetSpa در حوزه‌های دارای تعداد ایستگاه زیاد برای ثبت بارش بررسی شود و بدین ترتیب تاثیر در نظر گرفتن اطلاعات مربوط به پراکنش مکانی بارش و جهت حرکت توده باران‌زا نیز ارزیابی گردد.

در این مطالعه کارایی فیلتر کالمن توسعه یافته در بهبود نتایج نیز مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج حاصل، استفاده از این فیلتر به میزان قابل توجهی دقت نتایج را بهبود بخشید و انطباق بهتری از داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده را ارائه نمود. این امر بیان‌گر این است که می‌توان در شبیه‌سازی بارش- رواناب از فیلتر کالمن توسعه یافته به عنوان ابزاری برای بهبود دقت نتایج استفاده کرد. این موضوع به ویژه در مناطقی که دارای نقص آماری یا کمبود داده است، کاربرد زیادی دارد. همانگونه که

- using PEST. *Floods, from defence to management*. London: Taylor & Francis Group.
- Liu, Y. B., De Smedt, F., Hoffmann, L., & Pfister, L. (2005). Assessing land use impacts on flood processes in complex terrain by using GIS and modeling approach. *Environmental modeling & assessment*, 9(4), 227-235.
- Liu, Y.B., De Smedt, F., and Pfister, L., (2002). Flood prediction with the WetSpa model on catchment scale. In *Flood Defence*. Science Press: New York, pp 499-507.
- Liu, Y. B., & De Smedt, F. (2004). WetSpa extension, a GIS-based hydrologic model for flood prediction and watershed management. *Vrije Universiteit Brussel, Belgium*, 1, e108.
- Liu, Y. B., Gebremeskel, S., De Smedt, F., Hoffmann, L., & Pfister, L. (2003). A diffusive transport approach for flow routing in GIS-based flood modeling. *Journal of Hydrology*, 283(1-4), 91-106.
- Mohammady, M., Moradi, H. R., Zeinivand, H., Temme, A. J. A. M., Yazdani, M. R., & Pourghasemi, H. R. (2018). Modeling and assessing the effects of land use changes on runoff generation with the CLUE-s and WetSpa models. *Theoretical and Applied Climatology*, 133(1-2), 459-471.
- Porretta-Brandyk, L., Chormański, J., Brandyk, A., & Okruszko, T. (2011). Automatic calibration of the WetSpa distributed hydrological model for small lowland catchments. In *Modelling of Hydrological Processes in the Narew Catchment* (pp. 43-62). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Rahmati, H. (2013). *Surface Balance Modeling by WetSpa Model (Case Study: Barariyeh Basin)*. M.Sc. Thesis, Ferdowsi University of Mashhad. (In Farsi).
- Sarikhani, S., Naseri, M., Akbarpour, A. & Sharifi, M.B. (2017). Using a Kalman filter to improve prediction of groundwater levels, *Fourth International Conference on Environmental Planning and Management*, University of Tehran. ((In Farsi).
- Shafii, M., & Smedt, F. D. (2009). Multi-objective calibration of a distributed hydrological model (WetSpa) using a genetic algorithm. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(11), 2137-2149.
- Sigaroodi, S. K., & Chen, Q. (2016). Effects and consideration of storm movement in rainfall-runoff modelling at the basin scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(12), 5063-5071.
- Sun, L., Seidou, O., & Nistor, I. (2017). Data Assimilation for Streamflow Forecasting: State-Parameter Assimilation versus Output Assimilation. *Journal of Hydrologic Engineering*, 22(3), 04016060.
- Soil and water conservation studies, Zayandehrood dam watershed, Parcel B2. (1992). *Vegetation*, Volume II. (In Farsi).
- Wang, Z. M., Batelaan, O., & De Smedt, F. (1996). A distributed model for water and energy transfer between soil, plants and atmosphere (WetSpa). *Physics and Chemistry of the Earth*, 21(3), 189-193.
- Xie, X., & Zhang, D. (2010). Data assimilation for distributed hydrological catchment modeling via ensemble Kalman filter. *Advances in Water Resources*, 33(6), 678-690.
- Yaghoubi, F. (2010). Simulation of river flow using WetSpa distributed hydrological model in Chehelchay watershed, Golestan province. M.Sc. Thesis, *Gorgan University of Agricultural and Natural Resources Sciences*. (In Farsi).