



**Comparing deterministic optimization and uncertainty-based approaches in auto-calibration of rainfall-runoff module of WEAP software
(Case Study: Shapur River Basin)**

**مقایسه رویکردهای بهینه‌سازی قطعی و مبتنی بر عدم قطعیت در واسنجی خودکار ماجول بارش - رواناب نرم‌افزار WEAP
مطالعه موردی: حوضه آبریز رودخانه شاپور**

S. Mirzaei^۱, H. Alizadeh^{۲*}

سمانه میرزائی^۱، حسین علیزاده^{۲*}

Abstract

In recent decades, estimation of watershed model parameters is facing problems due to the large number of parameters and lack of complete physical understanding of them. One of the most important parts of modeling in hydrology is the uncertainty analysis of parameters in hydrological models. Identifying the characteristics of the output of the model. In this study, for the hydrological modeling of the Shapur River catchment basin system, the calibration and uncertainty analysis of the hydrological parameters of the WEAP software have been investigated. The calibration was done first by PEST method and then by GLUE coding method and finally it was connected with WEAP software API to analyze the uncertainty of the parameters. The results of the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient error standard value in the PEST method for the sub-basins of the Shapur catchment basin are on average ۰.۳۰, which indicates the appropriate estimation of these parameters. The calibration and uncertainty analysis of the parameters from the GLUE method compared to the likelihood function of the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient With a threshold of ۰.۸, it showed that, on average, the posterior distribution of the parameters of flow resistance, water capacity of the root zone, and plant cultivation coefficient were smaller compared to their previous distribution. On the other hand, on average, ۶۰% of the measured runoff data in the hydrometric stations of the Shapur catchment area are within the ۹۵% confidence range. The average thickness of this interval is ۰.۰۳ for the mentioned basin, which is relatively small and favorable.

Keywords: hydrological modeling, Shapur river basin, WEAP software, soil moisture method, PEST, GLUE

Received: May ۲۸, ۲۰۲۴

Accepted: July ۱۰, ۲۰۲۴

چکیده

در دهه‌های اخیر تخمین پارامترهای مدل حوضه آبریز به علت تعداد زیاد پارامترها و نداشتن درک فیزیکی کامل از آن‌ها، در مرحله تخمین پارامترها با مشکل مواجه شده است. از مهم‌ترین بخش‌های مدل‌سازی در هیدرولوژی، تجزیه و تحلیل عدم قطعیت پارامترها در مدل‌های هیدرولوژیکی و تشخیص ویژگی‌های خروجی مدل است. در این پژوهش جهت مدل‌سازی هیدرولوژیکی سیستم حوضه آبریز رودخانه شاپور، به بررسی واسنجی و تحلیل عدم قطعیت پارامترهای هیدرولوژیکی نرم‌افزار WEAP پرداخته شده است. واسنجی ابتدا توسط روش PEST و سپس توسط روش GLUE برای تحلیل عدم قطعیت پارامترها استفاده شد. نتایج مقدار معیار خطای ضریب راندمان نش - ساتکلیف در روش PEST برای زیرحوضه‌های حوضه آبریز شاپور را به‌طور میانگین ۰/۵۳ نشان داده است. این مقدار نشان‌دهنده تخمین مناسب پارامترها می‌باشد. در واسنجی و تحلیل عدم قطعیت پارامترها از روش GLUE نسبت به تابع درست‌نمایی ضریب راندمان نش - ساتکلیف با آستانه ۰/۸ نشان داده که به‌طور میانگین توزیع پسین پارامترهای عامل مقاومت در برابر جریان، ظرفیت آب ناحیه ریشه و ضریب کشت گیاه نسبت به توزیع پیشین آن‌ها کوچک‌تر شده است. از طرفی به‌طور میانگین ۶۰ درصد داده‌های اندازه‌گیری شده رواناب در ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه آبریز شاپور در محدوده اطمینان ۹۵ درصد قرار گرفته است. ضخامت این بازه به صورت میانگین برای حوضه مذکور ۰/۰۳ است که نسبتاً کم و مطلوب است.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی هیدرولوژیکی، حوضه آبریز شاپور،

نرم‌افزار WEAP، مدل رطوبت خاک، PEST، GLUE

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۳/۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۴/۲۰

۱. M.Sc., Civil Engineering Department, Ale-Taha Institute of Higher Education, Tehran, Iran.

۲. Assistant Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
Email: alizadeh@iust.ac.ir

* Corresponding Author

۱. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، دانشکده مهندسی عمران، مؤسسه آموزش عالی ال‌طه، تهران، ایران.

۲. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران. ایمیل: alizadeh@iust.ac.ir

* نویسنده مسئول



مقدمه

و Todini, (۲۰۰۶). محققان در سال ۲۰۰۹ از روش GLUE برای ارزیابی باندهای پیش‌بینی مدل‌های بارش - رواناب استفاده کردند. با توجه به نتایج به دست آمده توصیه کردند که مجموعه گسترده‌ای از مشاهدات برای ارزیابی نتایج عدم قطعیت اجرا شده در نظر گرفته شود (Xiong et al., ۲۰۰۹). در تحقیقی دیگر پژوهشگران از روش بیزی که هدف آن کمی کردن منابع عدم قطعیت روند مدل‌سازی بارش - رواناب است استفاده کردند. آن‌ها این روش را با روش GLUE مقایسه کردند. نتایج نشان داد که برآورد عدم قطعیت کلی در هر دو روش یکسان بوده اما روش GLUE عدم قطعیت بزرگ‌تری را ارائه داده است (Vrugt et al., ۲۰۰۹). در مطالعه‌ای که در سال ۲۰۰۱ رخ داد محققان متوجه شدند که عدم قطعیت در مدل شبیه‌سازی کیفیت آب به دلیل مشکل تعیین کردن یک مدل واحد که بتواند کیفیت آب را تحت تمام شرایط مورد نیاز مدل نشان دهد، اجتناب‌ناپذیر است (Adams و Reckhow, ۲۰۰۱). دو محقق، متس لارسبو و جارویس (Mats Larsbo و Jarvis) به بررسی عدم قطعیت در مدل شبیه‌سازی انتقال املاح در ساختار خاک مزرعه پرداختند. نتایج تحلیل GLUE حاکی از آن است که مشاهدات حجم آب خاک و زهکشی جریان در هر دو حالت اشباع ساکن و گذرا برای آفت‌کش‌ها از عدم قطعیت بالایی برخوردار است (Mats Larsbo و Jarvis, ۲۰۰۴). فرنی (Freni) و همکاران به بررسی عدم قطعیت نتایج حاصل از مدل زهکشی شهری یکپارچه شامل شبکه فاضلاب و تصفیه‌خانه فاضلاب گیاهان و نباتات با استفاده از روش

عدم قطعیت و واسنجی دقیق مدل‌های حوضه آبریز به دلیل استفاده از آن‌ها برای پشتیبانی تصمیمات در زمینه‌های استراتژی‌های مدیریتی مختلف بسیار مهم است. با این وجود، واسنجی مدل‌های حوضه آبریز به دلیل عدم قطعیت در عامل‌های ورودی، ساختار، مدل و پارامتر چالش‌برانگیز است. فرایندهایی که در مدل به حساب نمی‌آیند مانند فعالیت‌های ناشناخته در آب و نیز عدم دقت مدل به دلیل ساده‌سازی بیش از حد فرایندهای در نظر گرفته شده مانند اثرات تالاب‌ها، تعامل میان آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی جزء منابع عدم قطعیت ساختار مدل می‌باشد. جهت توصیف این عدم قطعیت‌ها، در دو دهه اخیر روش‌های تحلیل عدم قطعیت بسیاری ایجاد و برای حوضه‌های آبریز مختلف به کار رفته است. به این جهت در این مطالعه به بررسی مبانی واسنجی و روش‌های آن و نیز الگوریتم روش‌های واسنجی به کار رفته در این پژوهش پرداخته شده است. در نهایت واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی با استفاده از روش‌های PEST و GLUE ارائه می‌گردد. به دلیل اینکه روش GLUE عدم قطعیت ورودی، ساختار مدل و پارامتر خروجی را توضیح می‌دهد به یکی از گسترده‌ترین روش‌های تحلیل عدم قطعیت در مطالعه مدل‌های بارش - رواناب شناخته شده است (Stedinger et al., ۲۰۰۸). روش GLUE برخلاف محبوبیت زیاد آن با مشکلاتی نیز مواجه است. تعریف تابع درست‌نمایی، کارایی باندهای پیش‌بینی عدم قطعیت در تحت پوشش قرار دادن مشاهدات و فردی بودن انتخاب آستانه برای تعریف مجموعه پارامتر رفتاری از جمله مشکلات این روش است (Mantovan

مقایسه رویکردهای بهینه‌سازی قطعی و مبتنی بر عدم قطعیت در واسنجی خودکار ماجول بارش - رواناب

WEAP نرم‌افزار

سمانه میرزائی، حسین علیزاده

کمی‌سازی عدم قطعیت‌های کلی در منطقه مورد مطالعه نداشته است (Jung et al., ۲۰۱۲). دو محقق در سال ۲۰۰۷ با استفاده از روش PEST و EKF به واسنجی یک مدل بارش - رواناب مفهومی پرداختند. نتایج بیانگر این است که خطای زیاد در مقادیر اولیه پارامترها و مشاهدات در روش PEST، می‌تواند باعث شکست در به حداقل رساندن تابع هدف توسط الگوریتم واسنجی شود (Goegebeur و Pauwels, ۲۰۰۷). طی مطالعه‌ای که در حوضه آبریز تورپسا در اسلواکی با استفاده از روش PEST صورت گرفت، محققان به آنالیز حساسیت و عدم قطعیت پارامترهای مدل پرداختند. نتایج بیانگر این است که تلفیق مدل‌های هیدرولوژیکی بر پایه GIS با مدل PEST باعث تخمین دقیق‌تر و نزدیک به واقعیت پارامترهای شبیه‌سازی شده می‌شود (Bahreman, ۲۰۱۰). با وجود تعداد زیاد روش‌های واسنجی و تحلیل عدم قطعیت، به ندرت بیش از یک روش در یک مطالعه موردی برای مقایسه استفاده شده است. هدف این مطالعه، حل این مسئله است. در این مطالعه از روش‌های PEST و GLUE برای واسنجی و تحلیل عدم قطعیت پارامترهای یک حوضه آبریز استفاده شده است و نتایج حاصل از آن‌ها با یکدیگر مقایسه خواهند شد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق برای مدل‌سازی حوضه آبریز رودخانه شاپور که در شکل ۱ نشان داده شده است، از ماژول مدل‌سازی هیدرولوژیکی بارش - رواناب مدل WEAP

GLUE پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که عدم قطعیت بالایی در نتایج مدل کیفی آب نسبت به نتایج مدل کمی و یا مدل رواناب وجود دارد

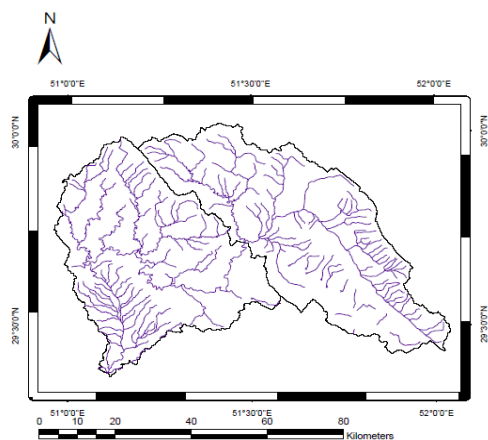
(Freni et al., ۲۰۰۸). طی مطالعه دیگری پژوهشگران برای یک مدل کیفی با هدف بررسی وضعیت زیست‌محیطی رودخانه‌های کوچک با استفاده از روش GLUE به مطالعه پرداختند. نتایج نشان داد که مدل به‌طور پیوسته قادر به تولید مجدد آلاینده‌ها نبوده و بارهای آلاینده پیش‌بینی با عدم قطعیت قابل‌توجهی همراه است (Mannina و Viviani, ۲۰۰۹). در پژوهشی که بر روی رودخانه Ephemeral صورت گرفت، محقق با استفاده از روش GLUE به تخصیص عدم قطعیت در مدل کیفیت آب برای رودخانه مذکور پرداخت. نتایج بیانگر این است که این شیوه در این مدل کارایی مناسبی داشته است (Mannina, ۲۰۱۱).

ناصری و همکاران در مقیاس حوضه آبریز به بهینه‌سازی ساختار مدل بیلان آبی ماهانه بودیکو پرداختند. نتایج این مطالعه با رویکرد متداول مقایسه و عدم قطعیت نتایج آن با روش GLUE در هر دو روش معمول و بهینه ارزیابی شد. نتایج نشان داد ارزیابی عدم قطعیت سبب بهبود نسبی در پایداری نتایج شده است (ناصری و همکاران, ۱۳۹۰). طی تحقیقی دیگر جونگ (Jung) و همکاران به ایجاد نقشه پهنه سیلاب دشت تحت تأثیر عدم قطعیت در اطلاعات، شیوه مدل‌سازی، پارامترها و ابزار پردازش جغرافیایی که با استفاده از روش GLUE و تحلیل حساسیت صورت گرفت پرداختند. نتایج نشان داد ابزار GLUE اثر مهمی در

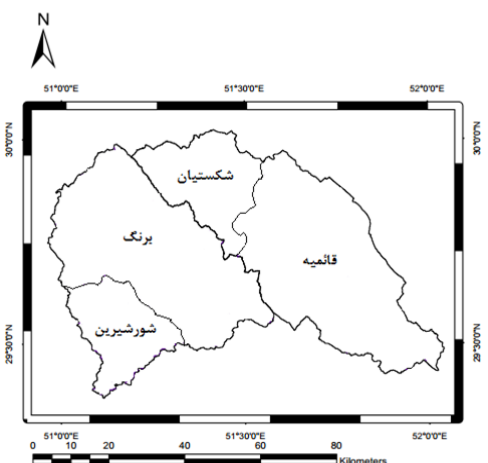
مقایسه رویکردهای بهینه‌سازی قطعی و مبتنی بر عدم‌قطعیت در واسنجی خودکار ماژول بارش - رواناب

WEAP نرم‌افزار

سمانه میرزائی، حسین علیزاده



شکل ۱: حوضه آبریز شاپور و شبکه آبراهه‌های آن



شکل ۲: تقسیم‌بندی زیرحوضه‌های حوضه آبریز

شاپور

تحلیل حساسیت مطلق پارامترهای مدل هیدرولوژیکی بارش - رواناب

در ابتدا برای هر پارامتر بازه‌ای منطقی با توجه به نوع خاک، پوشش گیاهی و غیره در نظر گرفته شد. سپس تحلیل حساسیت انجام گرفت. در این بخش مدل WEAP برای پنج مقدار درون این بازه‌ها اجرا شد.

استفاده شده است. در مدل WEAP شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه از سه روش بارش - رواناب، روش نیاز آبی و روش بارش - رواناب (مدل رطوبت خاک) پشتیبانی می‌شود. در این مطالعه از روش رطوبت خاک طی بازه ۱۹۷۹ تا ۲۰۰۷ میلادی استفاده شده است. در ادامه با استفاده از روش PEST واسنجی صورت گرفته است. از طرف دیگر روش GLUE برای واسنجی پارامترهای مدل هیدرولوژیکی بارش - رواناب شبیه‌سازی شده توسط روش رطوبت خاک استفاده شده است. حوضه آبریز شاپور با توجه به جریان‌های میان حوضه‌ای، خود به چهار زیرحوضه قائمیه، شکستیان، برنگ و شورشیرین تقسیم‌بندی شده است. شکل ۲ تقسیم‌بندی زیرحوضه‌های حوضه آبریز شاپور را نشان داده است.

پارامترهای مورد استفاده در مدل رطوبت خاک

پارامترهای در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی بارش - رواناب شامل ضریب کشت گیاه (K_c)، ظرفیت آب ناحیه ریشه، ضریب هدایت هیدرولیکی ناحیه ریشه (K_1)، حجم اولیه آب ناحیه ریشه (Z_1)، ظرفیت آب لایه زیرین، ضریب هدایت هیدرولیکی لایه زیرین (K_2)، حجم اولیه آب لایه زیرین (Z_2)، جهت ترجیحی جریان، عامل مقاومت در برابر رواناب (RRF)، سطح زیر کشت اراضی و مصرف آب آبیاری اراضی است.

مقایسه رویکردهای بهینه‌سازی قطعی و مبتنی بر عدم قطعیت در واسنجی خودکار ماجول بارش - رواناب

WEAP نرم‌افزار

سمانه میرزائی، حسین علیزاده



ترجیحی جریان و ضریب هدایت هیدرولیکی ناحیه ریشه به‌عنوان حساس‌ترین پارامترهای مدل بعد از تحلیل حساسیت شناخته شدند. با توجه به رواناب مشاهداتی ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه آبریز شاپور، طی دوره ۱۵ ساله واسنجی مدل صورت گرفت. ایستگاه‌های هیدرومتری شامل ۴ ایستگاه بوشیگان، شکستیان، جره بالا و سعدآباد است.

جدول‌های ۳ الی ۶ بهترین مقادیر برای پارامترهای مدل را در هر ۴ زیرحوضه نشان داده است.

جداول ۳ الی ۶ نشان‌دهنده کاهش حدود ۵۰ درصدی دامنه اولیه تعیین شده برای پارامترهای عامل مقاومت در برابر جریان و ظرفیت آب ناحیه ریشه است. این موضوع بیانگر تخمین مناسب این پارامترها است.

در ادامه با ثابت نگه‌داشتن مقادیر پارامترها در مقدار میانی بازه انتخابی و تغییر در مقدار یک پارامتر، حساسیت هر پارامتر با توجه به تغییر در مقادیر تابع هدف نش - ساتکلیف، سنجیده شد. جدول ۱ دامنه انتخابی پارامترهای ورودی روش رطوبت خاک برای تابع هدف نش - ساتکلیف در پنج‌بار اجرای مدل WEAP در ایستگاه هیدرومتری سعدآباد که ایستگاه انتهایی حوضه است، نشان داده شده است.

از جدول ۱ می‌توان نتیجه گرفت که در پنج پارامتر ابتدایی جدول تغییرات مقادیر تابع هدف بیشتر است.

جدول ۲ میزان حساسیت مدل به هر پارامتر سنجیده شده، به ترتیب میزان حساسیت و نیز مقادیر بازه انتخابی ارائه شده است که در اینجا از ۵ پارامتر نخست جهت واسنجی استفاده شده است.

واسنجی مدل هیدرولوژیکی بارش - رواناب

پس از شبیه‌سازی رواناب توسط روش رطوبت خاک با استفاده از روش PEST واسنجی صورت گرفت. پارامترها به ترتیب عامل مقاومت در برابر جریان، ظرفیت آب ناحیه ریشه، ضریب کشت گیاه، جهت

جدول ۱: دامنه انتخابی پارامترهای ورودی روش رطوبت خاک به همراه مقادیر به دست آمده برای تابع هدف نش -

ساتکلیف در پنج‌بار اجرای مدل WEAP در ایستگاه هیدرومتری سعدآباد

NS						
پارامتر	واحد	بازه انتخابی	ابتدای بازه	مقدار میانی	مقدار میانی	مقدار انتهایی بازه
عامل مقاومت در برابر جریان	بدون واحد	۰-۱۰	-۷/۰۲	۰/۳۲	۰/۱۷	۰/۱۲
ظرفیت آب ناحیه ریشه	میلیمتر در روز	۱۰۰-۱۲۰۰	-۰/۳	۰/۳	۰/۱۷	۰/۰۴

مقایسه رویکردهای بهینه‌سازی قطعی و مبتنی بر عدم‌قطعیت در واسنجی خودکار ماجول بارش - رواناب

WEAP نرم‌افزار

سمانه میرزائی، حسین علیزاده

۰/۱۳	۰/۱۵	۰/۱۷	۰/۱۸	۰/۰۴	۱/۰-۳	بدون واحد	ضرب کشت گیاه
۰/۲	۰/۲	۰/۱۷	۰/۱	۰/۰۱	۰-۱	بدون واحد	جهت ترجیحی جریان
۰/۲۳	۰/۲	۰/۱۷	۰/۱۲	۰/۰۶	۱۰-۲۰۰	میلیمتر در روز	ضرب هدایت هیدرولیکی ناحیه ریشه
۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۱۰۰۰۰-۳۵۰۰۰	میلیمتر	ظرفیت آب لایه زیرین
۰/۱۷	۰/۱۸	۰/۱۷	۰/۱۵	۰/۱۳	۱۰-۳۰۰	میلیمتر در روز	ضرب هدایت هیدرولیکی لایه زیرین
۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۵-۴۰	درصد	حجم اولیه آب ناحیه ریشه
۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۵-۳۰	درصد	حجم اولیه آب لایه زیرین
۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۲۷۲۰-۳۶۸۰	هکتار	سطح زیر کشت اراضی خشت
۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۵۰-۱۰۰	مترمکعب در هکتار	مصرف آب آبیاری اراضی خشت

جدول ۲: پارامترهای ورودی روش رطوبت خاک به ترتیب میزان حساسیت مدل WEAP و دامنه انتخابی برای هر پارامتر

پارامتر	واحد	تفکیک	بازه انتخابی
عامل مقاومت در برابر جریان	بدون واحد	کاربری اراضی	۰-۱۰
ظرفیت آب ناحیه ریشه	میلیمتر در روز	خاک	۱۰۰-۱۲۰۰
ضرب کشت گیاه	بدون واحد	کاربری اراضی	۱/۰-۳
جهت ترجیحی جریان	بدون واحد	خاک	۰-۱
ضرب هدایت هیدرولیکی ناحیه ریشه	میلیمتر در روز	خاک	۱۰-۲۰۰
ضرب هدایت هیدرولیکی لایه زیرین	میلیمتر در روز	حوضه	۱۰-۳۰۰
ظرفیت آب لایه زیرین	میلیمتر	حوضه	۱۰۰۰۰-۳۵۰۰۰
حجم اولیه آب ناحیه ریشه	درصد	خاک	۵-۴۰
حجم اولیه آب لایه زیرین	درصد	حوضه	۵-۳۰
سطح زیر کشت اراضی خشت	هکتار	کاربری اراضی	۲۷۲۰-۳۶۸۰
مصرف آب آبیاری اراضی خشت	مترمکعب در هکتار	کاربری اراضی	۵۰-۱۰۰

جدول ۳: نتایج حاصل از واسنجی مدل هیدرولوژیکی بارش - رواناب توسط روش PEST برای پارامترهای زیرحوضه

قائمیه برای سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۷

کاربری اراضی زیرحوضه				واحد	پارامتر
کشاورزی آبی	کشاورزی دیم	جنگل	کوهستانی		

مقایسه رویکردهای بهینه‌سازی قطعی و مبتنی بر عدم قطعیت در واسنجی خودکار ماجول بارش - رواناب WEAP نرم‌افزار

سمانه میرزائی، حسین علیزاده

۵/۷۶	۳/۹۴	۴/۰۴	۰/۵	بدون واحد	عامل مقاومت در برابر جریان
۷۲۷/۲	۶۰۹/۹	۵۰۱/۲	۱۶۲/۶	میلیمتر در روز	ظرفیت آب ناحیه ریشه
۰/۹۸	۱/۱۳	۰/۵	۰/۳	بدون واحد	ضریب کشت گیاه
۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۶	۰/۹۸	بدون واحد	جهت ترجیحی جریان
۱۰۸/۱	۱۴۰/۸	۶۴/۴	۳۶/۴	میلیمتر در روز	ضریب هدایت هیدرولیکی ناحیه ریشه

جدول ۴: نتایج حاصل از واسنجی مدل هیدرولوژیکی بارش - رواناب توسط روش PEST برای پارامترهای زیرحوضه شکستیان برای سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۷

کاربری اراضی زیرحوضه				پارامتر	واحد
کشاورزی دیم	جنگل	کشاورزی دیم	کشاورزی دیم	عامل مقاومت در برابر جریان	بدون واحد
۶/۷	۴	۴۴۱/۸	۴۹۵/۸	ظرفیت آب ناحیه ریشه	میلیمتر در روز
۱/۳	۰/۵	۰/۹۸	۰/۵	ضریب کشت گیاه	بدون واحد
۰/۰۰۲	۰/۶۲	۰/۰۱	۰/۶	جهت ترجیحی جریان	بدون واحد
۱۰۹/۳	۶۲/۴	۱۰۸/۱	۶۴/۴	ضریب هدایت هیدرولیکی ناحیه ریشه	میلیمتر در روز

جدول ۵: نتایج حاصل از واسنجی مدل هیدرولوژیکی بارش - رواناب توسط روش PEST برای پارامترهای زیرحوضه برنگ برای سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۷

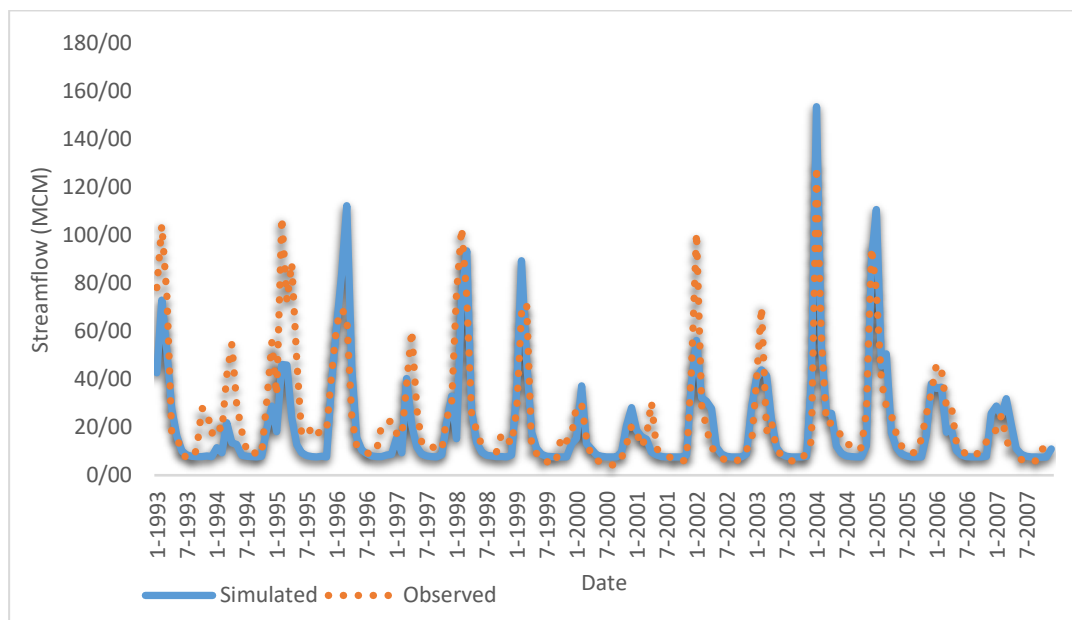
کاربری اراضی زیرحوضه				پارامتر	واحد
کشاورزی آبی	کشاورزی دیم	جنگل	کوهستانی	عامل مقاومت در برابر جریان	بدون واحد
۱/۴۳	۴/۱	۴	۰/۵	ظرفیت آب ناحیه ریشه	میلیمتر در روز
۷۲۳/۱	۶۵۶/۸	۴۹۳/۳	۱۶۰/۴	ضریب کشت گیاه	بدون واحد
۰/۹	۱/۳	۰/۵	۰/۳	جهت ترجیحی جریان	بدون واحد
۰/۱	۰/۱	۰/۶۴	۰/۹۳	ضریب هدایت هیدرولیکی ناحیه ریشه	میلیمتر در روز
۱۷۳/۸	۸۵/۱	۵۶/۶	۳۶/۲		

جدول ۶: نتایج حاصل از واسنجی مدل هیدرولوژیکی بارش - رواناب توسط روش PEST برای پارامترهای زیرحوضه شورشیرین برای سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۷

کاربری اراضی حوضه				پارامتر	واحد
کشاورزی دیم	جنگل	کوهستانی	کشاورزی دیم	عامل مقاومت در برابر جریان	بدون واحد
۹/۴	۳/۸	۰/۵	۹/۴		

مقایسه رویکردهای بهینه‌سازی قطعی و مبتنی بر عدم قطعیت در واسنجی خودکار ماجول بارش - رواناب
WEAP نرم‌افزار
سمانه میرزائی، حسین علیزاده

۷۰۷/۹	۶۹۹/۹	۱۵۶/۹	میلیمتر در روز	ظرفیت آب ناحیه ریشه
۱/۱	۱/۱	۰/۳	بدون واحد	ضریب کشت گیاه
۰/۰۱	۰/۱	۰/۹۹	بدون واحد	جهت ترجیحی جریان
۱۴۶/۶	۱۱۰/۴	۲۸/۹	میلیمتر در روز	ضریب هدایت هیدرولیکی ناحیه ریشه



شکل ۳: سری زمانی رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ایستگاه هیدرومتری بوشیگان بر روی رودخانه شاپور برای

سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۷

جدول ۷ مقادیر به دست آمده تابع هدف نش - ساتکلیف نشان داده است

جدول ۷: مقادیر به دست آمده برای توابع هدف حاصل از واسنجی مدل هیدرولوژیکی بارش - رواناب در هر زیرحوضه برای سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۷

با استفاده از روش PEST مدل هیدرولوژیکی بارش - رواناب و با در نظر گرفتن تابع هدف ضریب راندمان نش - ساتکلیف واسنجی صورت گرفت. نمودار مربوط به رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در شکل ۳ نشان داده شده است (برای نمونه تنها ایستگاه هیدرومتری بوشیگان نمایش شده است).



پارامترها بستگی به نزدیکی میزان پارامترهای واقعی به تخمین اولیه پارامترها دارد.

تحلیل عدم قطعیت پارامترهای ماجول بارش - رواناب

در این مطالعه الگوریتم GLUE دوبار به ازای تعداد نمونه‌های ۲۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ تایی و با هدف تحلیل حساسیت نتایج نسبت به تعداد نمونه‌ها، اجرا گردید. سپس توزیع‌های مقادیر احتمالاتی پسین بر مبنای مجموعه پارامترهای قابل قبول استخراج شد. آستانه قابل قبول برای معیار ضریب راندمان نش - ساتکلیف، ۰/۸ در نظر گرفته شده است. با توجه به معیار ضریب نش - ساتکلیف از تعداد نمونه‌های تولید شده حدود ۱۸ درصد به عنوان مجموعه پارامترهای رفتاری استخراج شد. توزیع‌های مقادیر احتمالاتی در شکل ۴ نشان داده شده است (برای نمونه تنها زیرحوضه قائمیه نشان داده شده است).

NS	ایستگاه هیدرومتری	زیرحوضه
۰/۶۲	بوشیگان	قائمیه
۰/۳۱	شکستیان	شکستیان
۰/۷	جره بالا	پرنگ
۰/۵	سعدآباد	شورشیرین
۰/۵۳		میانگین

به علت اینکه حد قابل قبول ضریب نش - ساتکلیف ۰/۵ و مقدار مطلوب آن ۱ است، از جدول ۷ می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر ایستگاه‌های بوشیگان، جره بالا و سعدآباد مطلوب است. اما مقدار به دست آمده ایستگاه هیدرومتری شکستیان مطلوب نیست. همچنین با توجه به شکل ۳ می‌توان گفت که رواناب مشاهداتی در ایستگاه‌های هیدرومتری هر زیرحوضه تطابق خوبی با رواناب شبیه‌سازی شده توسط WEAP با مقادیر محاسبه شده توسط روش PEST، دارد. پس می‌توان نتیجه گرفت که میل کردن تابع هدف به سمت مقدار بهینه و همچنین تخمین مناسب



شکل ۴: توزیع پسین به دست آمده از دو بار اجرای روش GLUE برای پارامترهای حساس مدل WEAP در زیر حوضه قائمیه با توجه به معیار درست‌نمایی ضریب راندمان نش - ساتکلیف (NS=۰/۸). rrf: عامل مقاومت در برابر جریان، swc: ظرفیت آب ناحیه ریشه، Kc: ضریب کشت گیاه، pfd: جهت ترجیحی جریان، rzc: ضریب هدایت هیدرولیکی ناحیه ریشه

جدول ۸: توزیع پسین به دست آمده از دو بار اجرای الگوریتم GLUE برای پارامترهای حساس ورودی مدل WEAP در هر یک از زیرحوضه‌های حوضه آبریز شاپور به ازای تعداد نمونه‌های ۲۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ تایی

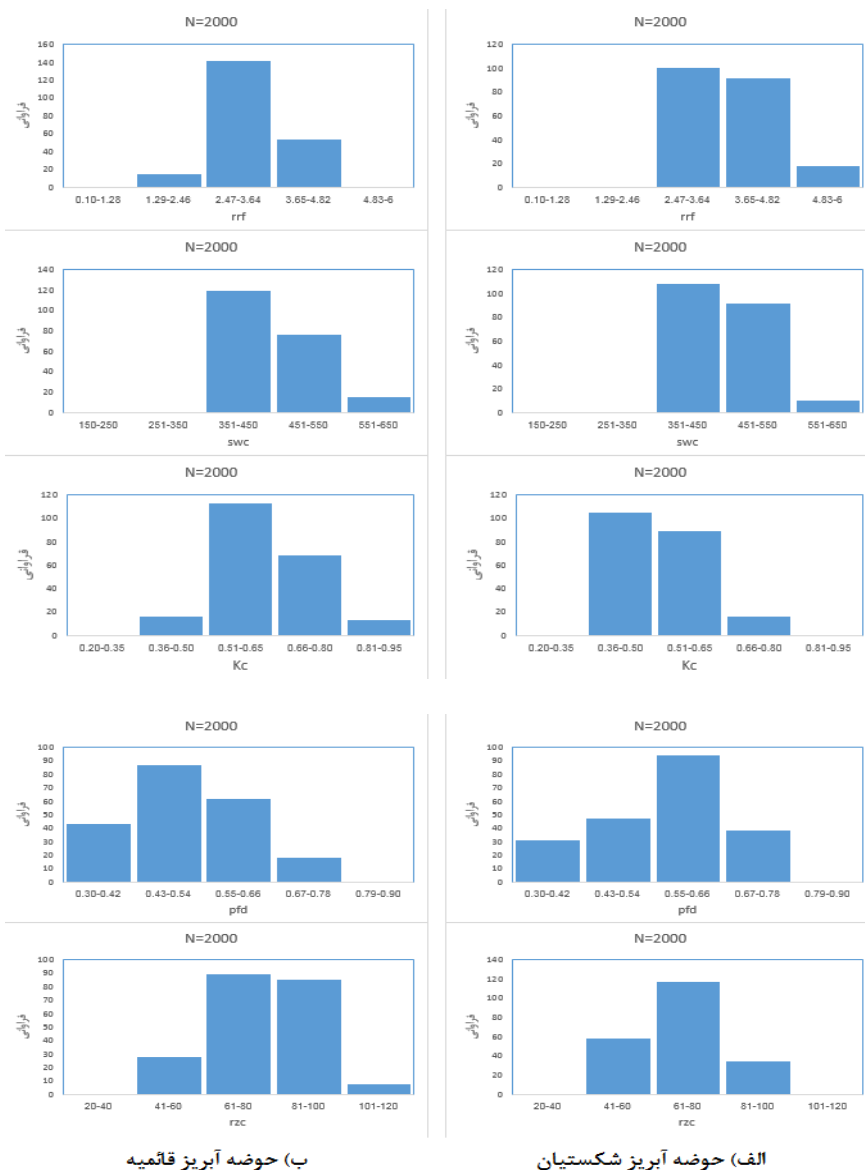
زیرحوضه‌های حوضه آبریز شاپور				پارامتر	
شورشیرین	برنگ	شکستیان	قائمیه	واحد	پارامتر
۰/۹-۴۸/۶۹	۰/۹-۵۱/۷۲	۰/۹-۶۵/۶۱	۰/۹-۶۸/۵۱	بدون واحد	عامل مقاومت در برابر جریان (rtf)
۹۶۵-۱۱۴	۹۶۴-۱۱۰	۹۷۱-۱۱۵	۹۶۹-۱۱۲	میلیمتر در روز	ظرفیت آب ناحیه ریشه (SWC)
۰/۱-۰۳/۲۴	۰/۱-۰۳/۲۵	۰/۱-۰۴/۲۳	۰/۱-۰۴/۲۲	بدون واحد	ضریب کشت گیاه (Kc)
۰/۰-۰۴/۹۶	۰/۰-۰۴/۹۷	۰/۰-۰۴/۹۶	۰/۰-۰۴/۹۵	بدون واحد	جهت ترجیحی جریان (pfd)
۱۹۵-۱۸	۱۹۲-۱۹	۱۹۶-۱۷	۱۹۴-۱۵	میلیمتر در روز	ضریب هدایت هیدرولیکی ناحیه ریشه (tzc)

جدول ۹: دامنه محدود شده برای پارامترهای حساس ورودی مدل WEAP در اجرای مجدد الگوریتم GLUE

حد بالا	حد پایین	تفکیک	واحد	پارامتر
۶	۰/۱	کاربری اراضی	بدون واحد	عامل مقاومت در برابر جریان (rtf)
۶۵۰	۱۵۰	خاک	میلیمتر در روز	ظرفیت آب ناحیه ریشه (SWC)
۰/۹۵	۰/۲	کاربری اراضی	بدون واحد	ضریب کشت گیاه (Kc)
۰/۹	۰/۳	خاک	بدون واحد	جهت ترجیحی جریان (pfd)
۱۲۰	۳۰	خاک	میلیمتر در روز	ضریب هدایت هیدرولیکی ناحیه ریشه (tzc)

الگوریتم GLUE که طی ۴ بار و به ازای تعداد نمونه‌های ۲۰۰۰ تایی مقادیر پارامترها اجرا شد، از توزیع پسین پارامترهای به دست آمده تکرار قبل به‌عنوان دامنه اولیه پارامترها جهت نمونه‌گیری استفاده شد. سرانجام از ۲۰۰۰ نمونه تنها ۲۱۰ مجموعه پارامتر استخراج شد. شکل ۵ توزیع‌های مقادیر احتمالاتی پسین بر مبنای مجموعه پارامترهای رفتاری را نشان داده است (برای نمونه از ۴ زیرحوضه تنها زیرحوضه‌های شکستیان و قائمیه نشان داده شده است).

از شکل ۴ می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر با چگالی بالا در تمام دامنه توزیع واقع شده‌اند. توزیع پسین به‌دست آمده برای پارامترهای مدل به ازای دو بار اجرای الگوریتم GLUE در جدول ۸ نشان داده شده است. جدول ۸ بیانگر این مسئله است که کران بالا و پایین پارامترها در هر دو مرحله اجرا نسبت به توزیع پیشین آن‌ها تغییر قابل توجهی نداشته است. از این رو تا جای ممکن مقادیر پارامترها براساس مساحت کاربری‌های اراضی و اطلاعات موجود در هر یک از زیرحوضه‌های حوضه آبریز شاپور محدود شد. این مقادیر در جدول ۹ ارائه شده است. در هر اجرا



شکل ۵: توزیع پسین به دست آمده از اجرای مجدد روش GLUE برای پارامترهای حساس مدل WEAP در زیرحوضه قائمیه و شکستیان با توجه به معیار درست‌نمایی ضریب راندمان نش - سانکلیف (NS=۰/۸). rrf: عامل مقاومت در برابر جریان، swc: ظرفیت آب ناحیه ریشه، Kc: ضریب کشت گیاه، pfd: جهت ترجیحی جریان، rzc: ضریب هدایت هیدرولیکی ناحیه ریشه

جدول ۱۰: توزیع پسین به دست آمده از اجرای مجدد الگوریتم GLUE برای پارامترهای محدود شده ورودی مدل WEAP در هر یک از زیرحوضه‌های حوضه آبریز شاپور به ازای تعداد نمونه‌های ۲۰۰۰ تایی

زیرحوضه‌های حوضه آبریز شاپور					
پارامتر	واحد	قائمه	شکستیان	برنگ	شورشیرین
عامل مقاومت در برابر جریان (rtf)	بدون واحد	۲/۴-۴/۶	۵-۳/۲	۰/۲-۹۷/۵	۱/۳-۶/۷
ظرفیت آب ناحیه ریشه (swc)	میلیمتر در روز	۵۸۰-۳۸۸	۵۹۶-۴۰۵	۳۹۹-۲۰۱	۵۱۸-۳۲۰
ضریب کشت گیاه (Kc)	بدون واحد	۰/۱-۵/۸۴	۰/۱-۴/۷	۰/۱-۳/۵۵	۰/۱-۵/۸۸
جهت ترجیحی جریان (pfd)	بدون واحد	۰/۱-۳/۷	۰/۱-۳/۸	۰/۱-۵/۹	۰/۱-۳/۷
ضریب هدایت هیدرولیکی ناحیه ریشه (rtzc)	میلیمتر در روز	۱۰۵-۵۰	۹۲-۴۲	۸۵-۳۰	۱۱۰-۴۰

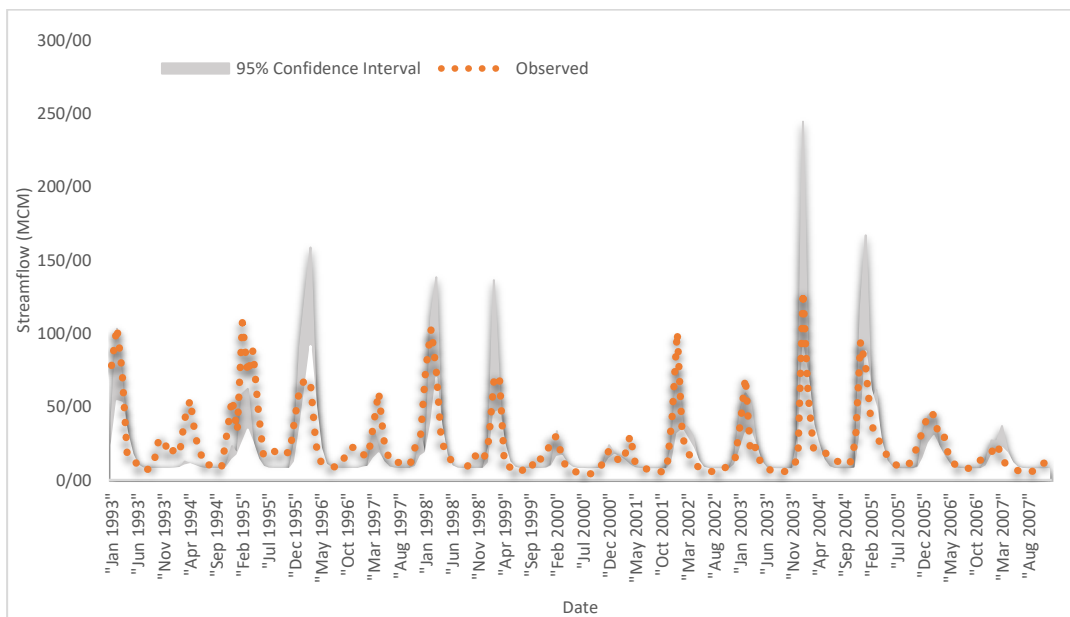
عدم قطعیت در شبیه‌سازی حجم رواناب

نتایج حجم رواناب شبیه‌سازی شده توسط روش GLUE به همراه مقادیر مشاهداتی حجم رواناب در ایستگاه‌های هیدرومتری زیرحوضه‌های حوضه آبریز شاپور و به صورت محدوده عدم قطعیت ۹۵ درصد در شکل ۶ نشان داده شده است (برای نمونه تنها ایستگاه هیدرومتری بوشیگان نشان داده شده است). میزان عدم قطعیت پیش‌بینی شده در رواناب شبیه‌سازی شده در این نمودارها بیانگر میزان عدم قطعیت کل می‌باشد که در این مطالعه با استفاده از پارامترهای قابل قبول در روش GLUE و نیز با نظر گرفتن وزن‌های درست‌نمایی آن‌ها محاسبه شده است.

از شکل ۶ می‌توان نتیجه گرفت که داده‌های مشاهداتی اکثراً در محدوده اطمینان قرار گرفته است.

با توجه به شکل ۵ می‌توان گفت که شکل توابع پسین به دست آمده برای پارامترهای ماجول بارش - رواناب به صورت لوگ نرمال بوده به طوری که اکثراً به سمت یک دامنه با فراوانی بیشتر همگرا شده است. این امر نشان‌دهنده تخمین مناسب آن‌ها است. جدول ۱۰ توزیع پسین به دست آمده برای پارامترهای مدل به ازای چهار بار اجرای مجدد الگوریتم GLUE را نشان داده است.

مقایسه توابع پیشین و پسین پارامترها بیانگر این است که دامنه پارامترهای (rtf)، (swc) و (Kc) در تمامی زیرحوضه‌ها نسبت به توزیع پیشین آن‌ها در جدول ۱۰ کوچک‌تر شده است. میزان این تغییرات در پارامترهای جهت ترجیحی جریان و ضریب هدایت هیدرولیکی ناحیه ریشه، کمتر است. این موضوع نشان‌دهنده عدم قطعیت بالای این پارامترها در ماجول بارش - رواناب مدل WEAP است.



شکل ۶: بازه اطمینان ۹۵٪ حجم رواناب شبیه‌سازی شده (بخش سایه‌خورده) و مقادیر مشاهداتی آن در ایستگاه

هیدرومتری بوشیگان بر روی رودخانه شاپور برای سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۷

۹۰ درصد مناسب خواهد بود. جدول ۱۱ مقادیر محاسبه شده این فاکتورها را نشان داده است.

جدول ۱۱: نتایج به دست آمده برای شاخص‌های P-

factor و r-factor در ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه آبریز

شاپور برای دوره واسنجی ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۷

r-factor	P-factor (%)	زیرحوضه	ایستگاه هیدرومتری
۰/۰۳	۷۳	قائمیه	بوشیگان
۰/۰۲	۵۸	شکستیان	شکستیان
۰/۰۴	۶۶	برنگ	جره بالا
۰/۰۴	۴۲	شورشیرین	سعدآباد
۰/۰۳	۵۹/۷۵		میانگین

در این مطالعه شاخص P-factor بیانگر درصدی از داده‌های مشاهداتی است که در بازه احتمالاتی ۹۵ درصد قرار گرفته است. همچنین شاخص r-factor برابر با میانگین اختلاف فاصله میان ۲ باند بالا پایین بازه‌های عدم قطعیت تقسیم بر انحراف معیار داده‌های مشاهداتی است.

بهترین نتیجه برای شاخص P-factor این است که حداکثر برابر با ۱۰۰ درصد باشد و شاخص r-factor نیز برابر صفر باشد؛ این در صورتی است که عدد تابع هدف قابل قبول باشد. در عمل نمی‌توان به این نتایج دست یافت، در نتیجه برای شاخص r-factor نزدیک شدن به عدد یک و شاخص P-factor رسیدن به عدد

مقایسه رویکردهای بهینه‌سازی قطعی و مبتنی بر عدم قطعیت در واسنجی خودکار ماجول بارش - رواناب

WEAP نرم‌افزار

سمانه میرزائی، حسین علیزاده

جدول ۱۲: دامنه اولیه پارامترها و نتایج توزیع پسین پارامترهای به دست آمده از اجرای روش GLUE در

زیرحوضه‌های حوضه آبریز شاپور برای سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۷

زیرحوضه‌های حوضه آبریز شاپور						
پارامتر	واحد	دامنه اولیه	قائمیة	شکستیان	برنگ	شورشیرین
عامل مقاومت در برابر جریان	بدون واحد	۰/۶-۱	۲/۴-۴/۶	۵-۳/۲	۰/۲-۹۷/۵	۱/۳-۶/۷
ظرفیت آب ناحیه ریشه	میلیمتر در روز	۶۵۰-۱۵۰	۵۸۰-۳۸۸	۵۹۶-۴۰۵	۳۹۹-۲۰۱	۵۱۸-۳۲۰
ضریب کشت گیاه	بدون واحد	۰/۰-۲/۹۵	۰/۰-۵/۸۴	۰/۰-۴/۷	۰/۰-۳/۵۵	۰/۰-۵/۸۸
جهت ترجیحی جریان	بدون واحد	۰/۰-۳/۹	۰/۰-۳/۷	۰/۰-۳/۸	۰/۰-۵/۹	۰/۰-۳/۷
ضریب هدایت هیدرولیکی ناحیه ریشه	میلیمتر در روز	۱۲۰-۳۰	۱۰۵-۵۰	۹۲-۴۲	۸۵-۳۰	۱۱۰-۴۰

تکرار در مدل‌های غیرخطی به جواب بهینه دست پیدا کند. بزرگ‌ترین نقطه ضعف این روش حساس بودن نسبت به دامنه اولیه مقادیر پارامترها و نیز محدودیت آن در تعداد پارامترهای واسنجی است.

با اینکه مقایسه الگوریتم‌های ۲ روش مذکور کار راحتی نیست اما می‌توان نتایج حاصل از واسنجی آن‌ها را با هم مقایسه کرد.

دامنه مقادیر پارامترهای به دست آمده از توابع توزیع پسین به روش GLUE در جدول ۱۲ نمایش داده شده است. همچنین در جدول‌های ۱۳ تا ۱۶ دامنه پارامترهای به دست آمده از روش PEST برای تمام کاربری‌ها نشان داده شده است.

با توجه به جدول ۱۱ می‌توان گفت مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهداتی حجم رواناب نشان‌دهنده این است که روش GLUE توانسته به درستی پارامترهای ماجول بارش - رواناب را واسنجی کند.

مقایسه روش‌های GLUE و PEST در واسنجی پارامترهای ماجول بارش - رواناب

GLUE یک روش برپایه نمونه‌گیری است و برای دامنه گسترده‌ای از مدل‌ها قابل اجرا است. از طرفی بزرگ‌ترین نقطه ضعف این روش تعداد اجراهای زیاد و بار محاسباتی سنگین آن است.

روش PEST برپایه بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم Gauss-Marquardt-Levenberg است. طراحی این روش به این صورت است که برای متصل شدن به مدل‌های مختلف بدون نیاز به کدنویسی باشد و اغلب در یک‌بار تکرار در مدل‌های خطی و پنج یا شش بار

جدول ۱۳: نتایج حاصل از واسنجی مدل هیدرولوژیکی بارش - رواناب توسط روش PEST برای پارامترهای زیرحوضه قائمیه برای سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۷

کاربری اراضی زیرحوضه					
کشاورزی آبی	کشاورزی دیم	جنگل	کوهستانی	واحد	پارامتر
۵/۷۶	۳/۹۴	۴/۰۴	۰/۵	بدون واحد	عامل مقاومت در برابر جریان
۷۲۷/۲	۶۰۹/۹	۵۰۱/۲	۱۶۲/۶	میلیمتر در روز	ظرفیت آب ناحیه ریشه
۰/۹۸	۱/۱۳	۰/۵	۰/۳	بدون واحد	ضریب کشت گیاه
۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۶	۰/۹۸	بدون واحد	جهت ترجیحی جریان
۱۰۸/۱	۱۴۰/۸	۶۴/۴	۳۶/۴	میلیمتر در روز	ضریب هدایت هیدرولیکی ناحیه ریشه

جدول ۱۴: نتایج حاصل از واسنجی مدل هیدرولوژیکی بارش - رواناب توسط روش PEST برای پارامترهای زیرحوضه شکستیان برای سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۷

کاربری اراضی زیرحوضه				واحد	پارامتر
کشاورزی دیم	جنگل	کوهستانی	واحد	پارامتر	
۶/۷	۴	بدون واحد	بدون واحد	عامل مقاومت در برابر جریان	
۴۴۱/۸	۴۹۵/۸	میلیمتر در روز	میلیمتر در روز	ظرفیت آب ناحیه ریشه	
۱/۳	۰/۵	بدون واحد	بدون واحد	ضریب کشت گیاه	
۰/۰۰۲	۰/۶۲	بدون واحد	بدون واحد	جهت ترجیحی جریان	
۱۰۹/۳	۶۲/۴	میلیمتر در روز	میلیمتر در روز	ضریب هدایت هیدرولیکی ناحیه ریشه	

جدول ۱۵: نتایج حاصل از واسنجی مدل هیدرولوژیکی بارش - رواناب توسط روش PEST برای پارامترهای زیرحوضه برنگ برای سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۷

کاربری اراضی زیرحوضه					
کشاورزی آبی	کشاورزی دیم	جنگل	کوهستانی	واحد	پارامتر
۱/۴۳	۴/۱	۴	۰/۵	بدون واحد	عامل مقاومت در برابر جریان
۷۲۳/۱	۶۵۶/۸	۴۹۳/۳	۱۶۰/۴	میلیمتر در روز	ظرفیت آب ناحیه ریشه
۰/۹	۱/۳	۰/۵	۰/۳	بدون واحد	ضریب کشت گیاه
۰/۱	۰/۱	۰/۶۴	۰/۹۳	بدون واحد	جهت ترجیحی جریان
۱۷۳/۸	۸۵/۱	۵۶/۶	۳۶/۲	میلیمتر در روز	ضریب هدایت هیدرولیکی ناحیه ریشه

مقایسه رویکردهای بهینه‌سازی قطعی و مبتنی بر عدم قطعیت در واسنجی خودکار ماجول بارش - رواناب
WEAP نرم‌افزار
سمانه میرزائی، حسین علیزاده

جدول ۱۶: نتایج حاصل از واسنجی مدل هیدرولوژیکی بارش - رواناب توسط روش PEST برای پارامترهای زیرحوضه شورشیرین برای سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۷

کاربری اراضی حوضه				
کشاورزی دیم	جنگل	کوهستانی	واحد	پارامتر
۹/۴	۳/۸	۰/۵	بدون واحد	عامل مقاومت در برابر جریان
۷۰۷/۹	۶۹۹/۹	۱۵۶/۹	میلیمتر در روز	ظرفیت آب ناحیه ریشه
۱/۱	۱/۱	۰/۳	بدون واحد	ضریب کشت گیاه
۰/۰۱	۰/۱	۰/۹۹	بدون واحد	جهت ترجیحی جریان
۱۴۶/۶	۱۱۰/۴	۲۸/۹	میلیمتر در روز	ضریب هدایت هیدرولیکی ناحیه ریشه

مقایسه رویکردهای بهینه‌سازی قطعی و مبتنی بر عدم قطعیت در واسنجی خودکار ماجول بارش - رواناب
WEAP نرم‌افزار
سمانه میرزائی، حسین علیزاده



۱۵	۲۹	بدون واحد	جهت ترجیحی جریان
۳۷	۳۶	میلیمتر در روز	ضریب هدایت هیدرولیکی ناحیه ریشه

نتایج

این تحقیق در راستای رودخانه شاپور رخ داده است. واسنجی و تحلیل عدم قطعیت این مدل‌ها به دلیل استفاده آن‌ها در تصمیم‌های مدیریتی بسیار اهمیت دارد. هدف از واسنجی، حداقل کردن اختلاف بین خروجی پیش‌بینی شده و مشاهده شده است که این کار می‌تواند به وسیله اندازه‌گیری دقیق پارامترها و یا به صورت روش‌های بهینه‌سازی انجام شود. در این مطالعه ابتدا یک مدل هیدرولوژیکی با استفاده از نرم‌افزار WEAP تشکیل و جهت شبیه‌سازی فرایند بارش - رواناب از روش رطوبت خاک استفاده گردید. سپس تحلیل حساسیت بر روی پارامترها صورت گرفت و ۵ پارامتر از ۱۱ پارامتر در نظر گرفته شده استخراج شد. در نهایت با نرم‌افزار PEST نسبت به واسنجی مدل اقدام شد. نتایج حاکی از تخمین مناسب پارامترها است. در مرحله بعد از نرم‌افزار GLUE جهت تحلیل عدم قطعیت پارامترها استفاده شد. در روش GLUE با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو چندین سری پارامترهای مختلف ایجاد شد. نتایج نشان داد که توزیع پسین پارامترها در کران بالا و پایین پارامترهای (trf)، (swc) و (Kc) نسبت به توزیع پیشین آن‌ها کوچک‌تر شده است. از طرفی ۶۰ درصد داده‌های اندازه‌گیری شده رواناب

کران بالا و پایین پارامترها در روش GLUE نسبت به توزیع پیشین آن‌ها به‌طور میانگین در پارامترهای (trf)، (swc) و (Kc) به ترتیب به میزان ۶۵، ۶۱ و ۵۷ درصد کوچک‌تر شده است. در روش PEST دامنه اولیه پارامترها به‌ویژه در پارامترهای (trf) و (swc) به‌طور میانگین ۵۰ درصد کاهش یافته است. این حاکی از تخمین خوب این پارامترها است. جدول ۱۷ میانگین مقدار کاهش بازه اولیه تعیین شده برای پارامترها در واسنجی توسط روش‌های PEST و GLUE را نمایش داده است.

از جدول ۱۷ می‌توان نتیجه گرفت که کاهش پارامترهای (trf) و (swc) در روش GLUE بیشتر بوده و تخمین دقیق‌تری ارائه داده است. از سوی دیگر در روش PEST برای هر پارامتری که در مرحله واسنجی تعریف شده است، نهایتاً یک مقدار بهینه مشخص شده است، اما در روش GLUE نتایج به شکل بازه عدم قطعیت بیان شده است.

جدول ۱۷: میانگین درصد کاهش بازه اولیه تعیین

شده برای پارامترها در واسنجی توسط روش‌های بهینه‌سازی قطعی PEST و مبتنی بر عدم قطعیت

GLUE در زیرحوضه‌های حوضه آبریز شاپور

پارامتر	واحد	GLUE	PEST
عامل مقاومت در برابر جریان	بدون واحد	۶۵	۴۹
ظرفیت آب ناحیه ریشه	میلیمتر در روز	۶۱	۵۰
ضریب کشت گیاه	بدون واحد	۵۷	۳۴

مقایسه رویکردهای بهینه‌سازی قطعی و مبتنی بر عدم قطعیت در واسنجی خودکار ماجول بارش - رواناب

WEAP نرم‌افزار

سمانه میرزائی، حسین علیزاده

با نرم‌افزار PEST پرداخته شد. در گام بعد برای واسنجی و تحلیل عدم قطعیت پارامترها از روش GLUE استفاده شد. با مقایسه نتایج حاصل از این روش می‌توان گفت که پارامترهای عامل مقاومت در برابر جریان و ظرفیت آب ناحیه ریشه در هر دو روش نسبت به دامنه اولیه آن‌ها کاسته شده، اما این کاهش روش GLUE بیشتر بوده و تخمین دقیق‌تری از پارامترها داشته است.

مراجع

ناصری، محسن؛ رهنما، بهزاد و زهرایی بنفشه. «بهینه‌سازی ساختار مدل بیان آبی ماهانه حوضه آبریز و ارزیابی عدم قطعیت آن». پنجمین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک کشور، کرمان، انجمن مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۳۹۰.

Adams, B. and Reckhow, K.H., (۲۰۰۱). An examination of the scientific basis for mechanisms and parameters in water quality models.

Bahremand, A., and De Smedt, F., (۲۰۱۰). Predictive Analysis and Simulation Uncertainty of a Distributed Hydrological Model, *Water Resource Management*, ۲۴: ۲۸۶۹-۲۸۸۰.

Blasone, RS., Vrugt, JA., Madsen, H., et. al., (۲۰۰۸a). Generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) using adaptive Markov Chain Monte Carlo sampling. *Adv Water Resour* ۲۰۰۸(۳۱): ۶۳۰-۶۴۸.

در ایستگاه‌های هیدرومتری در محدوده اطمینان ۹۵٪ و ضخامت این بازه ۰/۰۳ محاسبه شده است که بسیار مطلوب است. در نهایت مقایسه نتایج روش PEST و GLUE نشان داد کران بالا و پایین پارامترها در روش GLUE نسبت به توزیع پیشین آن‌ها کوچک‌تر شده است. از طرف دیگر در روش PEST دامنه اولیه پارامترها کاسته شده است که حاکی از تخمین مناسب پارامترهاست؛ اما با این تفاوت که در روش PEST نهایتاً یک مقدار بهینه در مرحله واسنجی برای هر پارامتر تعریف شده اما در روش GLUE نتایج به صورت بازه عدم قطعیت بیان شده است. با وجود اینکه از مقادیر پارامترهای (rtf) و (swc) در هر دو روش نسبت به دامنه اولیه آن‌ها کاسته شده، اما این کاهش در روش GLUE بیشتر بوده و تخمین دقیق‌تری از پارامترها ارائه داده است. از سوی دیگر پیشنهاد شده است با در نظر گرفتن سدهای موجود و بررسی اثرات آن بر رواناب رودخانه به بررسی شرایط توسعه مدل پرداخته شود و جهت پیش‌بینی دقیق‌تر می‌توان از الگوریتم خودکار مبتنی بر عدم قطعیت دیگری جهت واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل مذکور استفاده کرد.

جمع‌بندی

در این مطالعه که به بررسی رودخانه شاپور پرداخته شد، به واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل‌های حوضه آبریز پرداخته شده است. در گام اول یک مدل هیدرولوژیکی با استفاده از نرم‌افزار WEAP شبیه شد. بعد از تحلیل حساسیت مدل به واسنجی

مقایسه رویکردهای بهینه‌سازی قطعی و مبتنی بر عدم قطعیت در واسنجی خودکار ماجول بارش - رواناب

WEAP نرم‌افزار

سمانه میرزائی، حسین علیزاده

assessment: incoherence of the GLUE methodology. *J Hydrol* ۲۳۰:۲۶۸-۲۸۱.

Stedinger, JR., Vogel, RM., Lee, SU., Batchelor, R., (۲۰۰۸). Appraisal of the generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) method. *Water Resour Res* ۴۴:W۰۰B۰۶.

Vrugt, JA., ter Braak, CJF., Gupta, HV., Robinson, BA., (۲۰۰۸). Equifinality of formal (DREAM) and informal (GLUE) Bayesian approaches in hydrologic modeling. *Stochastic Environ Res Risk Assess.*

Xiong, L., Wan, M., Wei, X., O'Connor, KM., (۲۰۰۹). Indices for assessing the prediction bounds of hydrological models and application by generalised likelihood uncertainty estimation. *Hydrol Sci J* ۵۴(۵):۸۵۲-۸۷۱.

Walker, J.P., Houser, P.R., (۲۰۰۴). Requirements of a global near-surface soil moisture satellite mission: accuracy, repeat time, and spatial resolution. *Adv. Water Resour.* ۲۷ (۸), ۷۸۵-۸۰۱.

Blasone, R-S., Vrugt, J.A., Madsen, H., (۲۰۰۸). Generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) using adaptive Markov Chain Monte Carlo sampling, *Advances in Water Resources* ۳۱, ۶۳-۶۴۸.

Freni, G., Mannina, G., Viviani, G., (۲۰۰۸a). Uncertainty in urban stormwater quality modelling: the effect of acceptability threshold in the GLUE methodology. *Water Res* ۴۲(۸-۹):۲۰۶۱-۲۰۷۲.

Freni, G., Mannina, G., Viviani, G., (۲۰۰۸b). Uncertainty in urban stormwater quality modelling: the effect of acceptability threshold in the GLUE methodology. *Water Res* ۴۲(۸-۹):۲۰۶۱-۲۰۷۲.

Goegebeur, M., Pauwels, V., (۲۰۰۷). Improvement of the PEST parameter estimation algorithm through Extended Kalman Filtering. *Jornal of Hydrology (Impact Factor: ۳/۰۵). ۰۴/۲۰۰۷; ۳۳۷(۳):۴۳۶-۴۵۱.*

Jung, Y. and Merwade, V., (۲۰۱۲). Uncertainty Quantification in Flood Inundation Mapping Using Generalized Likelihood Uncertainty Estimate and Sensitivity Analysis. *J. Hydrol. Eng.,* ۱۰.۱۰۶۱/(10.1061/(ASCE)1084-0699(2012)17:5(507-520)).

Mannina, G., Viviani, G., (۲۰۰۹). Parameter uncertainty analysis of water quality model for small river, ۱۸th World IMACS/MODSIM Congress, Cairns, Australia ۱۳-۱۷ July ۲۰۰۹.

Mannina, G., (۲۰۱۱). Uncertainty Assessment of a Water-Quality Model for Ephemeral Rivers Using GLUE Analysis. *J. Environ. Eng.,* ۱۰.۱۰۶۱/(ASCE)EE.۱۹۴۳-۷۸۷۰.۰۰۰۰۳۱۲, ۱۷۷-۱۸۶.

Mantovan, P., Todini, E., (۲۰۰۶). Hydrological forecasting uncertainty

مقایسه رویکردهای بهینه‌سازی قطعی و مبتنی بر عدم قطعیت در واسنجی خودکار ماجول بارش - رواناب

WEAP نرم افزار

سمانه میرزائی، حسین علیزاده