Research Paper

Efficiency Assessment and Calibration of BILAN Model for Estimation of Monthly Flow Runoff in Gauged Stations of Ardabil Province Rivers

Hamideh Darjazi[1], Abazar Esmali-Ouri[2]* Raoof Mostafazadeh[3] Zeinab Hazbavi[4] Mohammad Golshan[5]

[1] M.Sc, in Watershed Management Engineering, Department of Natural Resources, Faculty of Agricultural and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
[2] Professor, Department of Natural Resources and Member of Water Management Research Center, Faculty of Agricultural and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
[3] Associate Professor, Department of Natural Resources and Member of Water Management Research Center, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
[4] Assistant Professor, Department of Natural Resources and Member of Water Management Research Center, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
[5] Ph.D in Watershed Management Sciences and Engineering, Natural Resources and Watershed Management Office, Astara, Guilan, Iran

10.22125/IWE.2022.323132.1588

Received:
May 12, 2022
Accepted:
August 24, 2022
Available online:
August 23, 2023

Keywords:
Hydrological modelling, Monthly River flow, Water balance, Water resources management

Abstract

Streamflow simulation in watersheds is necessary to runoff management and understanding watershed response. Different hydrological models were developed for rainfall-runoff modelling. The BILAN model was used to simulate daily runoff in 23 river gauge stations in a 20-year period using observed rainfall, temperature, humidity and discharge time series. The values of model parameters including Spa, Dgm, Dgw. Alf, Mec, Wic, Soc, and Gid have been calibrated using the genetic algorithm. The monthly values of streamflow data were simulated in the selected watersheds. The efficiency of the calibrated model was evaluated using statistical measures. The statistical measures were coefficient of efficiency (CE), root mean square error (RMSE) and coefficient of determination (R2). The results showed that in the calibration period, the ranges of values of R2 evaluation indicators were acceptable in Shams Abad (92%), Neneh Karan (42%), Mashiran (38%) and Barouq (51%) watersheds. Also, the results of the BILAN model validation showed that the efficiency of the model in Amoghin, Atashgah, Nir, Namin, Samian, Viladaragh and Shams Abad watersheds had a good agreement with the R2 values more than 60%. Meanwhile, the performance of the BILAN model in Gilandeh, Iril, Ahmadkandi, Barouq and Poleh Almas stations was not acceptable according to the R2 values less than 5%. In general, according to the results of model performance evaluation, it can be said that the BILAN model has a relatively acceptable performance in some of studied stations. Therefor the BILAN model can be implemented based on the available input data of the model.

1. Introduction

Streamflow simulation in watersheds is necessary to runoff management and understanding watershed response. Different hydrological models were developed for rainfall-runoff modelling. More accurate knowledge of existing watershed conditions is needed to predict long periods of drought and more severe floods. To achieve such knowledge, calculating the water balance is necessary which and can provide reliable information in defining strategies to deal with climate change in the watershed. In fact,

* **Corresponding Author:** Abazar Esmali Ouri
Address: Department of Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Iran
Email: esmaliouri@uma.ac.ir
Tel: 09144538623

water balance, water losses, water storage along with other components of precipitation, runoff, evaporation and transpiration and storage of water is necessary to sound management of water resources in a watershed.

2. Materials and Methods

The BILAN model was used to simulate daily runoff in 23 river gauge stations in a 20-year period using observed rainfall, temperature, humidity and discharge time series. The values of model parameters including Spa, Dgm, Dgw. Alf, Mec, Wic, Soc, and Gid have been calibrated using the genetic algorithm. The monthly values of streamflow data were simulated in the selected watersheds. The efficiency of the calibrated model was evaluated using statistical measures. The statistical measures were coefficient of efficiency (CE), root mean square error (RMSE) and coefficient of determination (R2).

3. Results

The results showed that in the calibration period, the ranges of values of R2 evaluation indicators were acceptable in Shams Abad (92%), Neneh Karan (42%), Mashiran (38%) and Barouq (51%) watersheds. Also, the results of the BILAN model validation showed that the efficiency of the model in Amoghin, Atashgah, Nir, Namin, Samian, Viladaragh and Shams Abad watersheds had a good agreement with the R2 values more than 60%. Meanwhile, the performance of the BILAN model in Gilandeh, Iril, Ahmadkandi, Barouq and Poleh-Almas stations was not acceptable according to the R2 values less than 5%.

4. Discussion and Conclusion

In general, according to the results of model performance evaluation, it can be said that the BILAN model has a relatively acceptable performance in some of studied stations, therefor this model can be used in some of the studded watersheds, based on the available input data of the model. According to the simulation results, there is a good performance of BILAN model in some of the studied watersheds. Therefore, it can be said that the BILAN model can well predict the amount of monthly runoff in each upstream basin under humid weather conditions. According to the results of efficiency assessment, it was found that the model has the ability to simulate monthly river flow data. The calibration of BILAN model is a time-consuming procedure and need a comprehensive knowledge on the watershed characteristics. In addition, the BILAN model also provides variables such as base flow, surface water storage, and groundwater storage, which can be used to better manage the hydrological cycle and watershed budget.

5. Six important references

1) Alley, W.M. 1984. On the treatment of evapotranspiration, soil moisture accounting and aquifer recharge in monthly water balance models. Water Resources 20, 1137-1149.
2) Cha, S. M. and Lee, S. W. 2021. Advanced hydrological streamflow simulation in a watershed using adjusted radar-rainfall estimates as meteorological input data. Journal of Environmental Management, 277, 111393.
3) Kašpárek, L. and Novický, O. 1997. User's guide BILAN, 12 p. Available at: http://www.geo.uio.no/edc/content/software.htm
4) Kim, S., Hong, S.J. Kang, N., Noh, H.S. and Kim, H.S. 2016. A comparative study on the simple two-parameter monthly water balance model and Kajiyama formula for monthly runoff estimation. Hydrological Sciences Journal 6667, 1244-1252.
5) Melišová, E., Vizina, A., Staponites, L. R. and Hanel, M. 2020. The role of hydrological signatures in calibration of conceptual hydrological model. Water, 12(12), 3401.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to the University of Mohaghegh Ardabili that financially supports conducting the research.

ارزیابی کارایی و واسنجی مدل BILAN در برآورد رواناب ماهانه جریان در تعدادی از رودخانه‌های دارای آمار استان اردبیل

حمیده درجزی[۱]، ابادر اسمعلی عوری*[۲]، رئوف مصطفی‌زاده[۳]، زینب حزباوی[۴] محمد گلشن[۵]

تاریخ ارسال:۱۴۰۱/۰۲/۲۲
تاریخ پذیرش:۱۴۰۱/۰۶/۲

مقاله پژوهشی

چکیده

شبیه‌سازی رواناب در حوزه‌های آبخیز برای مدیریت رواناب حاصل از بارش ضروری است. مدل‌های هیدرولوژیکی متفاوتی برای این منظور ارائه شده که در این تحقیق مدل BILAN برای اولین بار به‌منظور شبیه‌سازی رواناب استان اردبیل در ۲۳ ایستگاه هیدرومتری با حداقل ۲۰ سال دوره آماری برای داده‌های بارش، دما، رطوبت و دبی انجام شد. برای واسنجی هشت پارامتر مدل شامل Spa، Dgm، Dgw، Alf، Mec،Wic، Soc، Gid با الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی و سری‌های ماهانه شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در خروجی حوزه آبخیز محاسبه شدند. کارایی مدل با نمایه‌های آماری ضریب کارایی (CE)، ریشه مربعات خطا (RMSE) و ضریب تبیین (R^2) ارزیابی شد. نتایج نشان داد که در دوره واسنجی، دامنه‌های مقادیر شاخص‌های ارزیابی R^2 در ایستگاه‌های شمس‌آباد (۹۲ درصد)، ننه‌کران (۴۲ درصد)، مشیران (۳۸ درصد)، باروق (۵۱ درصد) بهتر است. هم‌چنین دوره اعتبارسنجی ایستگاهای عموقین، آتشگاه، نیر، نمین، سامیان، ویلادرق و شمس آباد با R^2 بیش از ۶۰ درصد بهترین کارایی مدل BILAN را نشان دادند و ایستگاه‌های گیلانده، ایریل، احمدکندی، باروق و پل الماس با R^2 کم‌تر از ۵ درصد کارایی چندانی در شبیه‌سازی جریان رودخانه نداشتند. در مجموع با توجه به نتایج ارزیابی عملکرد مدل می‌توان گفت که مدل BILAN در تعدادی از ایستگاه‌های مورد بررسی دارای کارایی نسبتاً قابل قبولی است و می‌تواند به‌منظور اهداف مدیریت رواناب حوضه‌های آبخیز در این منطقه به‌کار رود.

واژه‌های کلیدی: جریان ماهانه، بیلان آب، مدل‌سازی هیدرولوژیک، مدیریت منابع آب

[۱]- کارشناسی ارشد، گروه منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، hamidehdarzi@gmail.com

[۲]- استاد گروه منابع طبیعی و عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، ۰۹۱۴۴۵۳۸۶۲۳، esmaliouri@uma.ac.ir (نویسنده مسئول)

[۳]- دانشیار گروه منابع طبیعی و عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، raoofmostafazadeh@uma.ac.ir

[۴] استادیار گروه منابع طبیعی و عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، z.hazbavi@uma.ac.ir

[۵] دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، اداره منابع طبیعی و آبخیزداری آستارا، آستارا، گیلان، ایران، m.golshan@sanru.ac.ir

مقدمه

مدل‌های هیدرولوژیکی با دو هدف اساسی درک بهتر رفتارهای هیدرولوژیکی، نحوه تغییر و اثرات آن‌ها و نیز توانایی ترکیب داده‌های هیدرولوژیکی به‌منظور طراحی منابع آب، مهار سیل، تعدیل جریان آب، برنامه‌ریزی و پیش‌بینی جریان ارائه می‌شوند (Kumari et al., 2021). برای پیش‌بینی دوره‌های طولانی‌مدت خشکسالی و شدت بیش‌تر سیلاب‌ها، به دانش دقیق‌تر از شرایط آبخیز موجود نیاز است. برای دستیابی به‌چنین دانشی، محاسبه بیلان آب[6] در وهله اول ضروری است و می‌تواند اطلاعات قابل اعتماد در تعریف راهبردهای مقابله با تغییرات اقلیمی در حوزه آبخیز ارائه دهد (خاوریان و همکاران، ۱۳۹۹). در واقع بیلان آب، مطالعه میزان ورود و خروج، هدررفت آب به‌صورت‌های مختلف و ذخیره آب از هنگام ورود به سامانه آبخیز در خاک به‌صورت بارش، رولناب، تبخیر و تعرق و ذخیره آب در خاک و فرآیندهای موثر بر آن را شامل می‌شود که اطلاع از آن ابزار لازم و اساسی در مدیریت اصولی حوزه آبخیز است (عسگری و همکاران، ۱۳۹۶). مشارکت حوضه در تولید رواناب سطحی به مقدار بارش، تبخیر و تعرق و ویژگی‌های منطقه شامل توپوگرافی، ریخت‌شناسی، زمین‌شناسی، ظرفیت ذخیره، رطوبت خاک، پوشش گیاهی و کاربری اراضی بستگی دارد (Esmaliouri et al., 2020). برای استفاده مهندسی مدل‌ها باید شرایط مربوط به سهل‌الوصول بودن داده‌های لازم برای واسنجی و انجام آسان آن را نیز مد نظر قرار داد (Alley et al., 1984؛ Kim et al., 2016؛ گلشن و همکاران، ۱۳۹۷).

مسئله برآورد رواناب در حوزه آبخیز موضوع پیچیده‌ای است که اطلاعات و فهم دانش بشری از قوانین فیزیکی حاکم بر آن در برخی موارد از دیدگاه فرمول‌های ریاضی محدود است و دست‌یابی به‌میزان کمّی و کیفی آن، پایه مطالعات طرح‌های مختلف توسعه بهره‌برداری از منابع آب و سازه‌های آبی را تشکیل می‌دهد (Cha and Lee., 2021). برای بهینه‌سازی مصرف آب، اطلاع از بیلان آب حوزه‌های آبخیز ضروری است. از طرفی، اندازه‌گیری اجزای بیلان آب در فاصله‌های زمانی مورد نیاز به‌دلیل وقت‌گیر و پرهزینه بودن مشکل است. استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی راه حل مناسبی برای مقابله با این موضوع و ارائه چشم‌انداز مدیریتی است. مدل BILAN توسط موسسه تحقیقات آب Masaryk واقع در پاراگوئه در زمینه بررسی وضعیت بیلان حوزه‌های آبخیز معرفی شده است (Kašpárek and Novický., 1997؛ Horacek et al., 2008). در واقع مدل BILAN برای شبیه‌سازی اجزای بیلان آب در حوضه طراحی شده است.

در کشور ایران اکثر حوزه‌های آبخیز، به‌ویژه از نوع کوهستانی و صعب‌العبور، فاقد ایستگاه‌های اندازه‌گیری به تعداد کافی هستند که هر گونه برنامه‌ریزی مدیریتی را با معضل و یا حتی با شکست مواجه می‌کند (صیاد و همکاران، ۱۴۰۰؛ اسدی و همکاران، ۱۳۹۹). برای مقابله با این معضل، محققان راه‌حل‌های مختلفی عرضه نموده‌اند، عقیده بر این است که مدل‌سازی پدیده‌های هیدرولوژی در حوزه‌های آبخیز پیش‌نیاز و راه‌حل بهینه‌ای برای انجام برنامه‌ریزی لازم در رابطه با مدیریت و پایش منابع آب باشد (Cha and Lee., 2021). در داخل کشور با استفاده از مدل‌های هیدرولولژیکی متفاوتی دبی حوزه‌های آبخیز شبیه‌سازی شده است که می‌توان مطالعات گلشن و همکاران (۱۳۹۷) در حوزه آبخیز سامیان اردبیل با مدل SWAT، آقابیگی و همکاران (۱۳۹۸) در حوزه آبخیز دوست‌بیگلو اردبیل با مدل IHACRES، پور حق‌وردی و همکاران (۱۴۰۰) در حوزه آبخیز بار نیشابور با مدل KINEROS2 و در خارج کشور Simões و همکاران (۲۰۲۱) در حوزه آبخیز ایندای برزیل با مدل SWAT، Melišová et al., (2020) در حوزه آبخیز ایولوت جمهوری چک با مدل BILAN، Strnad et al., (2020) در ۱۳۳ حوزه آبخیز متفاوت با مدل BILAN و بسیاری از مطالعات دیگر در این زمینه را نام برد. مصطفی‌زاده و عسگری (۱۴۰۰) کارایی مدل GR4J را در شبیه‌سازی دبی روزانه جریان در حوزه آبخیز نیرچای اردبیل ارزیابی نمودند. ایشان نتیجه گرفتند که بر اساس مقدار ضریب معیار نش-ساتکلیف (در دامنه ۰/۷۷-۰/۳۱) کارایی مدل

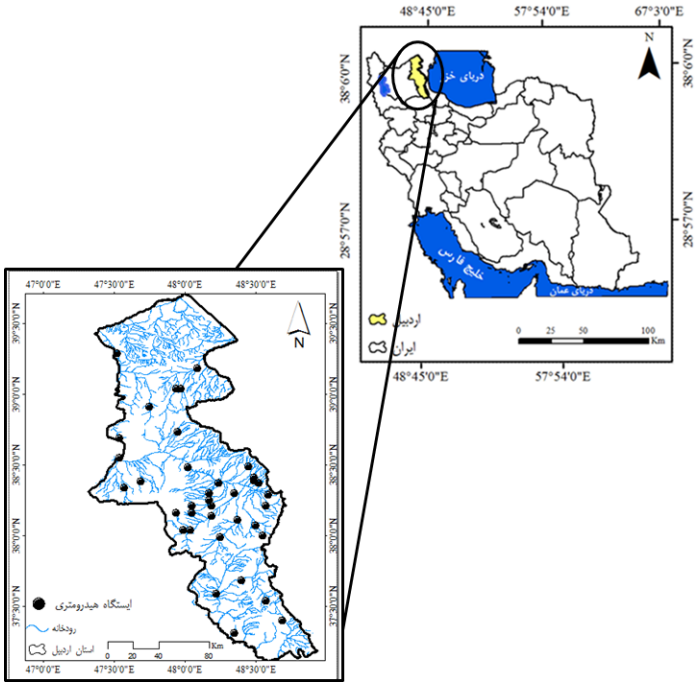
[6]- Water Balance

در حد متوسط و قابل قبولی است. ایشان منبع بروز خطا در شبیه‌سازی را به وجود اختلاف ارتفاعی ایستگاه ثبت داده‌های اقلیمی با مرکز ثقل حوزه و تفاوت مقادیر ورودی به مدل با مقادیر واقعی موثر بر دبی شبیه‌سازی شده نسبت دادند. به‌همین منظور پژوهش حاضر برای اولین بار در راستای درک بهتر فرآیندهای مؤثر بر بیلان آب حوزه‌های آبخیز استان اردبیل با استفاده از مدل BILAN و نیز ارزیابی و واسنجی مدل مذکور در حوزه‌های آبخیز دارای آمار استان اردبیل پیش‌بینی شده است، در این راستا می‌توان از قابلیت‌های مدل مذکور در برآورد جریان در حوزه‌های فاقد آمار و مشابه استان از نظر اقلیمی و فیزیوگرافی استفاده نمود.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش استان اردبیل در شمال غربی فلات ایران به مختصات جغرافیایی ″۲۶ ′۴۶ °۴۷ تا ″۳۴ ′۵ °۴۸ طول شرقی و ″۵۳ ′۵۱ °۳۷ تا″۳۳ ′۱۴ °۳۸ عرض شمالی است. استان اردبیل با اقلیم سردسیر کوهستانی دارای مقدار نزولات جوی به‌طور متوسط بین ۲۵۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر در سال در بخش‌های مختلف است (مطالعات طرح آمایش استان اردبیل، ۱۳۹۱). مقدار متوسط تبخیر و تعرق سالانه در استان از ۶۰۰ تا ۱۷۰۰ میلی‌متر و مقدار دمای متوسط سالانه آن از پنج تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد در مناطق مختلف متغیر است. ارتفاع حداکثر در قله سبلان، ارتفاع حداقل در شهرستان مغان پارس‌آباد و ارتفاع متوسط در دشت اردبیل به‌ترتیب ۴۸۱۱، ۲۰ و ۱۸۵۰ متر بالاتر از سطح دریا است (مهری و همکاران، ۱۳۹۶). در تحقیق حاضر از ۲۳ ایستگاه هیدرومتری که شامل پل الماس، سامیان، نیر، آلادیزگه، ویلادرق، عموقین، شمس‌آباد، لای، آتشگاه، ننه‌کران، سولا، ایریل، نمین، هیر، کوزه‌تپراقی، گیلانده، دوستبیگلو، ارباب‌کندی، پل‌سلطانی، بران، مشیران، حاج‌احمدکندی و اکبرداوود برای برآورد دبی ماهانه استفاده شد (عسگری و همکاران، ۱۳۹۹). در شکل ۱، موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری مورد بررسی نشان داده شده است



شکل (۱): موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری در ایران و استان اردبیل

داده‌ها و روش انجام پژوهش

بر اســـاس اهـداف پژوهش، ابتـدا حوزه‌هـای آبخیز دارای ایســتگاه‌های هیدرومتری با حداقل ۳۰ ســال دوره آماری برای داده‌های بارش و دبی انتخاب شد. در ادامه به‌منظور جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌های پایه از داده‌های هواشناسی و هیدرولوژی و موقعیت جغرافیایی ایســتگاه‌های هیدرومتری منتخب از شــرکت آب منطقه‌ای استان اردبیل استفاده شد. قابل ذکر است که دوره آماری از ســال (۱۳۷۵-۱۳۸۵) برای دوره واســنجی و از ســال (۱۳۸۶-۱۳۹۲) برای دوره اعتبارســنجی اســتفاده شــد. ســپس داده‌ها برای مدل‌ســازی (تکمیل، تطویل، صــحت و بررســی همگنی) مورد پردازش قرار گرفت و در نهایت با استفاده از مدل BILAN اقدام به تعیین بیلان آب در ایســتگاه‌های هیدرومتری منتخب شد.

تئوری و کاربرد مدل BILAN

مدل BILAN نسخه ۱/۷ برای شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب حوزه آبخیز توسعه داده شده است. این مدل مبتنی بر یک سری روابط بیان‌گر اصول بنیادی بیلان آب برای دو محدوده غیراشباع و اشباع است. گام زمانی مورد استفاده این مدل ماهانه است (Kašpárek and Novický., 1997).

پارامترهای مدل

هشت پارامتر قابل دسترس برای شبیه‌سازی تولید جریان رودخانه توسط مدل BILAN به‌شرح جدول ۱ است که برای این پارامترها در مرحله واسنجی مدل مقادیر بهینه انتخاب شدند.

جدول(۱)" توصیف پارامترهای مدل BILAN

پارامتر	توصیف
Spa	ظرفیت ذخیره رطوبتی خاک (میلی‌متر)
Dgm	عامل ذوب برف
Dgw	عامل محاسبه کمیت آب مایع قابل دسترس بر سطح خاک تحت شرایط زمستان
Alf	پارامتر مربوط به معادله بارندگی- رواناب سطحی (رواناب مستقیم)
Soc	پارامتر کنترل‌کننده توزیع تراوش به دوره جریان زیرقشری و زیرزمینی قابل تغذیه تحت شرایط ذوب برف
Mec	پارامتر کنترل‌کننده توزیع تراوش به دوره جریان زیرقشری و زیرزمینی قابل تغذیه تحت شرایط ذوب برف
Wic	پارامتر کنترل‌کننده توزیع تراوش به دوره جریان زیرقشری و زیرزمینی قابل تغذیه تحت شرایط زمستان
Gid	پارامتر کنترل‌کننده جریان خروجی از ذخیره آب زیرزمینی (آب پایه)

واسنجی و اعتبارسنجی پارامترهای مدل

واسنجی پارامترها در دو مرحله اجرا می‌شود، در اولین گام، خطای استاندارد تخمینی (انحراف از معیار بین سری‌های رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده) یا میانگین خطای مطلق (میانگین محاسباتی از انحراف مطلق بین سری‌های رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده؛ منظور از واژه "مطلق" تبدیل انحرافات منفی به مقادیر مثبت است)، به‌عنوان معیار بهینه‌سازی برای واسنجی پارامترهای Spa، Dgm، Dgw و Alf استفاده می‌شود که اثر معنی‌داری بر میانگین رواناب خواهد داشــت (Kašpárek, L. and Novický, 1997).

چهار پارامتر باقی‌مانده (Gid ،Soc ،Wic، Mec) بر توزیع رواناب به مؤلفه‌های جداگانه موثر هستند که با استفاده از میانگین مقادیر مطلق انحرافات نسبی (مفهوم نسبی به معنی انحراف هر کدام تقسیم بر مقادیر مشاهداتی است) واسنجی می‌شوند. این امر توسط محاسبات آزمایشگاهی قابل تعیین است که روش واسنجی غالباً برازش قابل قبولی را از لحاظ مقدار میانگین رواناب و جریان حداقل آن نشان می‌دهد. میانگین به‌دست آمده از مقادیر مطلق انحرافات

نسبی در خروجی مدل تحت عنوان "معیار بهینه‌سازی" نشان داده خواهد شد (Melišová et al., 2020). به‌دلیل احتمال وجود داده‌های گم‌شده در ایستگاه‌های ثبت بارش و تبخیر و عدم قطعیت حاصل از آن، به ناچار برای واسنجی مدل‌ها دوره آماری (۱۳۹۲-۱۳۸۶) انتخاب شد که تعداد داده‌های گم‌شده کم‌تری داشته باشد.

برای صحت‌سنجی مدل، بعد از اجرای مدل در مرحله واسنجی و اخذ نتایج مورد نیاز، اقدام به اجرای مدل برای یک دوره جدید آماری می‌شود، به‌طوری که مدل قبلاً با این اطلاعات ورودی اجرا نشده است. بعد از اجرای مدل برای دوره آماری جدید در صورتی‌که نتایج مدل از کارایی مناسبی برخوردار باشد کاربر می‌تواند از این مدل برای اهداف مطالعاتی خود استفاده کند (گلشن و همکاران، ۱۳۹۷). هشت پارامتر مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی واسنجی شده‌اند. هدف بهینه‌سازی در دست‌یابی به بهترین برازش بین سری‌های رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده است (Mosavi et al., 2021).

ارزیابی دقت و واسنجی مدل BILAN

برای تعیین دقت و خطای مدل BILAN در شبیه‌سازی دبی در کل منطقه از نمایه‌های آماری میانگین قدرمطلق خطا (MAE)، ریشه مربعات خطا (RMSE)، ضریب کارایی (CE)، ضریب تبیین (R^2) و میانگین خطا (ME) طبق رابطه‌های ۱ تا ۵ استفاده شد. معیارهای خطای جذر میانگین (RMSE) تفاوت میان مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل یا برآوردگر آماری و مقدار واقعی است. RMSE یک ابزار خوبی برای مقایسه خطاهای پیش‌بینی توسط یک مجموعه داده است و برای مقایسه چند مجموعه داده کاربرد ندارد (بهره‌مند و مصطفی‌زاده، ۱۳۸۹؛ گلشن و همکاران، ۱۳۹۷).

$$MAE = \frac{\sum|O_i - P_i|}{N} \quad (۱)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(O_i - P_i)^2}{N}} \quad (۲)$$

$$CE = 1 - \frac{\sum_i^n 1(O_i - P_i)}{\sum_i^n 1(O_i - \bar{O}_m)} \quad (۳)$$

$$R^2 = \frac{\sum_i^n 1(O_i - \bar{O}_m)(P_i - \bar{P}_m)}{\left(\sum_i^N (O_i - \bar{O}_m)2\right)^{0.5} \sum_i^N 1(P_i - \bar{P}_m)^2)^{0.5}} \quad (۴)$$

$$\boldsymbol{ME = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Q_{obs} - Q_{sim})} \quad (۵)$$

که در آن‌ها، Oi، مقدار مشاهده شده، Pi، مقدار پیش‌بینی شده، N، تعداد داده‌های مشاهداتی، $\bar{O}_m$، مقدار میانگین مشاهدات و $\bar{P}_m$، مقدار میانگین پیش‌بینی شده است.

نتایج

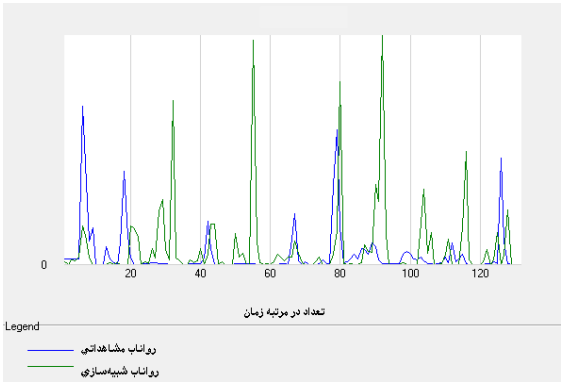
واسنجی مدل BILAN

در پژوهش حاضر، مدل BILAN در داخل کشور برای اولین بار در سطح حوضه مورد استفاده قرار گرفت. به‌همین دلیل لازم است مقدار بهینه پارامترهای مختلف ورودی مدل برای شرایط هیدرولوژیکی استان اردبیل تعیین شوند. برای واسنجی مدل لازم است که داده‌های شبیه‌سازی شده دبی جریان با داده‌های واقعی مقایسه و مناسب‌شوند (Esmaliouri et al., 2020; Mostafazadeh, et al 2017).

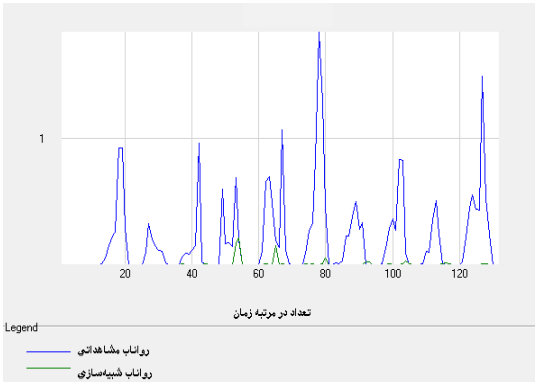
دامنه ضرایب مدل برای بیلان ظرفیت ذخیره رطوبتی خاک (Spa) بین ۲۰۰-۰، عامل ذوب برف (Dgm) بین ۲۰۰-۰، عامل محاسبه کمیت آب مایع قابل دسترس بر سطح خاک تحت شرایط زمستان (Dgw) بین ۲۰-۰، پارامتر مربوط به معادله بارندگی- رواناب سطحی (رواناب مستقیم) (Alf) بین ۰/۰۰۳-۰، پارامتر کنترل‌کننده توزیع تراوش به دوره جریان زیرقشری و زیرزمینی قابل تغذیه تحت شرایط ذوب برف (Soc)، پارامتر کنترل‌کننده توزیع تراوش به دوره جریان زیرقشری و زیرزمینی قابل تغذیه تحت شرایط ذوب برف (Mec)، پارامتر کنترل‌کننده توزیع تراوش به دوره جریان زیرقشری و زیرزمینی قابل تغذیه تحت شرایط زمستان (Wic) و پارامتر کنترل‌کننده جریان خروجی از ذخیره آب زیرزمینی (Gid) بین ۱-۰ است (Rekomendatsi et al., 1976). در دوره واسنجی با ثابت

نگه‌داشتن ضرایب پیش فرض نرم‌افزار دوره واسنجی اجرا شد، که ضرایب پارامترهای Spa، Dgm، Dgw، Alf، Soc، Mec، Wic، Gid به‌ترتیب ۱۴۷/۷، ۱۵/۲۲، ۱۳/۸، ۰/۰۰۰۷۷، ۰/۶۹۹، ۰/۷۹۹، ۰/۳۴۲، ۰/۴۹۹ به‌دست آمدند.

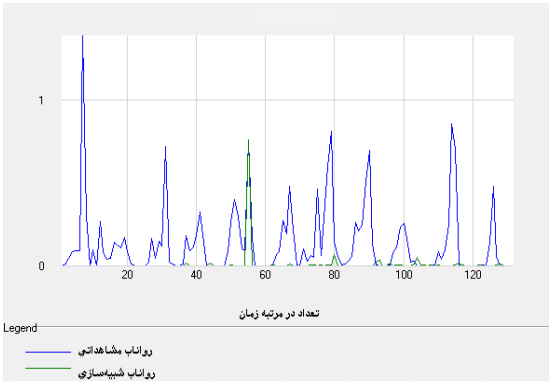
نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل BILAN در واسنجی برای برخی از ایستگاه‌های هیدرومتری استان اردبیل در شکل ۲ نشان داده شده است



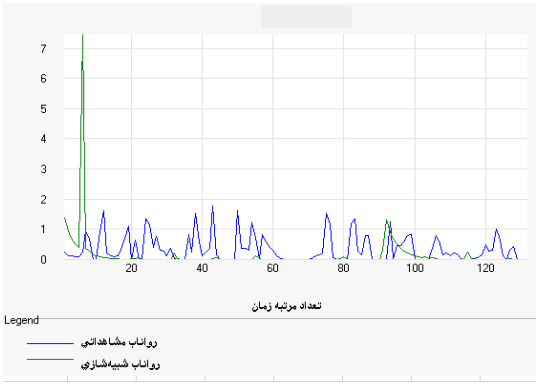
کوزه‌تپراقی



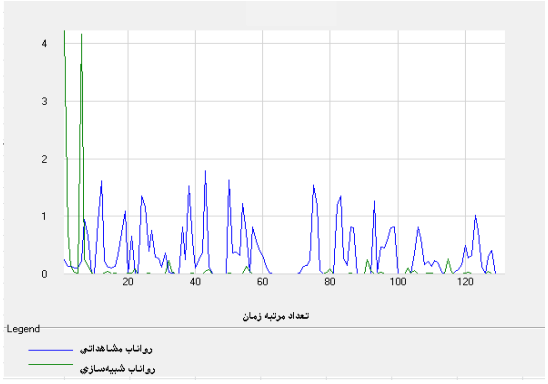
عموقین



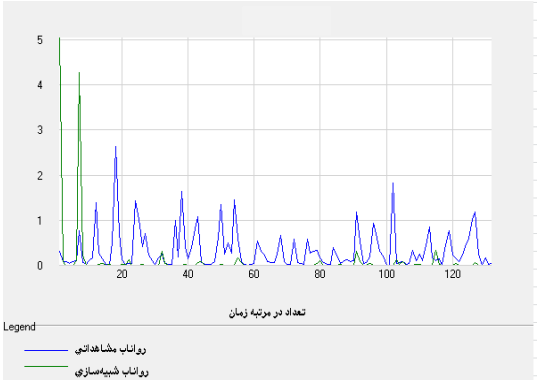
باروق



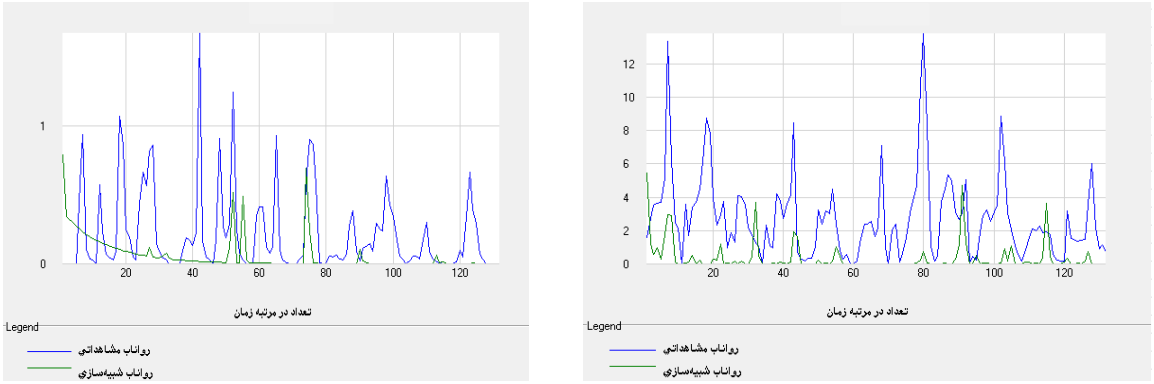
نیر



هیر



آلادیزگه



نمین مشیران

شکل (۲): نتایج حاصل از واسنجی مدل BILAN برای برخی از ایستگاه‌های هیدرومتری استان اردبیل (۱۳۸۵-۱۳۷۵)

همان‌طورکه در شکل ۲ ملاحظه می‌شود در اکثر موارد، زمان تا اوج به‌طور قابل ملاحظه‌ای صحیح شبیه‌سازی شده است. اما در شبیه‌سازی دبی پایه مدل دچار خطا شده است. هم‌چنین، باید توجه نمود که آب رودخانه‌ها در حوضه‌ها در دوره تابستان برای آبیاری استفاده می‌شود و دبی خروجی حوضه در این دوره‌ها باید بیش‌تر از مقادیر ثبت شده به‌وسیله وزارت نیرو باشد

جدول (۲): مقادیر ضرایب واسنجی شده مدل BILAN ایستگاه‌های هیدرومتری

ضرایب ایستگاه	Spa	Dgm	Dgw	Alf	Soc	Mec	Wic	Grd
احمدکندی	۱۹۳/۵۰	۱۵/۲۲	۱۳/۸۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۰۱
اکبرداود	۰/۱۸	۱۶/۷۴	۱۳/۸۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
آلادیزگه	۱۹۳/۵۰	۱۵/۲۲	۱۳/۸۰	۰/۰۰	۰/۷۰	۰/۰۲	۰/۳۴	۰/۹۸
عموقین	۲۵/۵۰	۱/۲۳	۰/۰۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۸۸	۰/۰۰
ارباب‌کندی	۱۱۶/۸۰	۰/۰۰	۰/۳۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۸۰	۰/۳۴	۰/۰۰
باروق	۱۹۳/۵۰	۰/۴۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۹	۰/۳۴	۰/۰۰
ایریل	۱۹۸/۱۰	۱۵/۲۲	۱۳/۸۰	۰/۰۰	۰/۷۰	۰/۸۰	۰/۳۴	۰/۸۳
پل الماس	۱۹۹/۸۰	۱۴/۸۲	۱۹/۲۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۸۰	۰/۶۷	۰/۹۹
پل سلطانی	۴/۵۷	۰/۰۳	۰/۱۴	۰/۰۰	۰/۹۲	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۱
سولا	۱۹۳/۵۰	۱۵/۲۲	۱۳/۸۰	۰/۰۰	۰/۷۰	۰/۸۰	۰/۳۴	۰/۰۷
آتشگاه	۱۹۳/۵۰	۲/۸۶	۰/۱۳	۰/۰۰	۰/۹۲	۰/۹۷	۰/۳۴	۰/۸۲
نیر	۱۱۸/۸۰	۱۵/۲۲	۱۳/۸۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۹۷	۰/۴۶	۰/۲۶
گیلانده	۱۹۳/۵۰	۱۵/۲۲	۱۸/۲۸	۰/۰۰	۰/۹۲	۰/۸۰	۰/۳۴	۰/۱۲
هیر	۱۹۳/۵۰	۱۵/۲۲	۱۳/۸۰	۰/۰۰	۰/۷۰	۰/۹۷	۰/۳۴	۰/۸۲
لای	۹۱/۹۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۳۴	۰/۰۰
نمین	۳۶/۸۱	۱۵/۲۲	۱۳/۸۰	۰/۰۰	۰/۶۸	۰/۸۰	۰/۳۴	۰/۰۷
سامیان	۱۹۳/۵۰	۱۵/۲۲	۱۳/۸۰	۰/۰۰	۰/۷۰	۰/۸۸	۰/۳۴	۰/۶۵
ویلادرق	۱۹۳/۵۰	۰/۳۲	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۳۴	۰/۰۰
دوست‌بیگلو	۱۴۵/۹۰	۱۵/۴۲	۱۷/۵۸	۰/۰۰	۰/۷۰	۰/۸۰	۰/۳۴	۰/۳۸

ادامه جدول (۲): مقادیر ضرایب واسنجی شده مدل BILAN ایستگاه‌های هیدرومتری

شمس آباد	۱۹۳/۵۰	۱۵/۲۲	۱۳/۸۰	۰/۰۰	۰/۹۲	۰/۸۰	۰/۳۴	۰/۸۲
ننه‌کران	۱۷۷/۵۰	۱۵/۲۲	۱۹/۴۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۸	۰/۳۴	۰/۹۴
مشیران	۱۹۹/۸۰	۱۵/۲۲	۱۳/۸۰	۰/۰۰	۰/۷۰	۰/۸۰	۰/۳۴	۰/۵۵
کوزه‌تپراقی	۱۹۳/۵۰	۱۵/۲۲	۱۳/۸۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۸۰	۰/۳۴	۰/۰۰

ارزیابی کارایی مدل BILAN

نتایج آماری برای ایستگاه‌های مورد بررسی نشان می‌دهد که در بیش‌تر ایستگاه‌های مورد بررسی خطای آماری قابل توجهی وجود دارد. با توجه به نتایج، بیش‌ترین همبستگی در ایستگاه شمس‌آباد با ۹۲ درصد و در ایستگاه ایریل، پل الماس و گیلانده بدون همبستگی در رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی به‌ست آمد.

.

اعتبارسنجی مدل BILAN

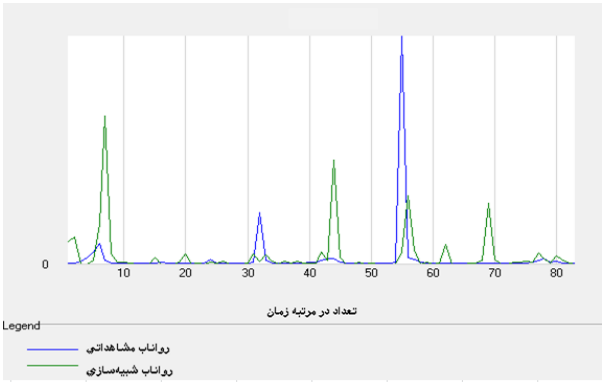
مدل بیلان در مرحله واسنجی در تعدادی از ایستگاه‌های مطالعاتی نتایج قابل قبولی را ارائه داد که جهت اعتبارسنجی کارایی مدل از دوره آماری جدید استفاده شد که نتایج مقادیر متوسط سالانه برخی از پارامترهای هیدولوژی در دوره اعتبارسنجی (۱۳۸۶-۱۳۹۲) در جدول ۳ ارائه شده است

جدول (۳): مقادیر متوسط سالانه در دوره اعتبارسنجی (۱۳۹۲-۱۳۸۶)

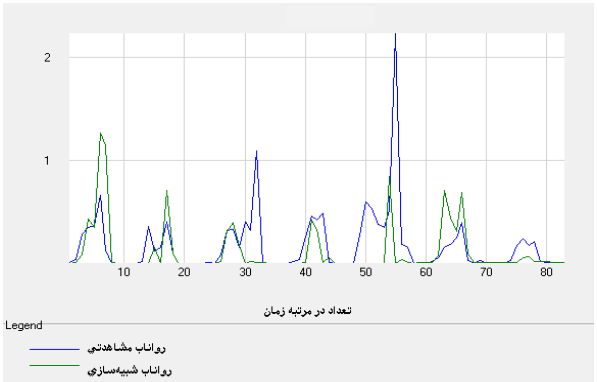
پارامتر ایستگاه	بارش (mm)	رواناب مشاهداتی (mm)	رواناب شبیه‌سازی (m)	جریان زیرقشری (mm)	جریان پایه (mm)	جریان سطحی (mm)	پتانسیل تبخیر و تعرق (mm)	تبخیر پایه (mm)	ذخیره آب سطحی (mm)	ذخیره آب زیرزمینی (mm)	دمای هوا (°C)	جریان زیرزمینی (mm)
احمدکندی	۲۴۵/۷۰	۰/۵۹	۰/۱۷	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۱۶	۵۴۰/۲۰	۲۵۹/۱۰	۵۹/۲۷	۸۷/۱۲	۱۰/۱۱	۸۰۳/۹۰
اکبرداود	۲۴۶/۷۰	۰/۳۸	۰/۱۴	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۱۳	۵۳۶/۰۰	۲۵۹/۵۰	۶۰/۰۴	۸۷/۱۳	۱۰/۰۰	۸۰۴/۶۰
آلادیزگه	۲۱۵/۱۰	۲/۸۵	۰/۶۵	۰/۰۱	۰/۱۸	۰/۴۶	۵۱۷/۹۰	۲۳۳/۷۰	۴۶/۹۸	۲۰۲/۲۰	۹/۱۷	۸۷۲/۵۰
عموقین	۴۷۸/۹۰	۲/۱۲	۱/۲۵	۰/۰۴	۱/۱۷	۰/۰۴	۴۶۷/۵۰	۳۵۳/۲۰	۶۴/۶۱	۸۰۹/۱۰	۷/۶۲	۸۹۷/۴۰
ارباب‌کندی	۳۲۶/۳۰	۰/۱۰	۰/۰۹	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۸	۵۱۷/۹۰	۳۲۱/۰۰	۹۱/۸۷	۲۵۸/۵۰	۹/۱۷	۸۷۲/۵۰
باروق	۴۷۸/۹۰	۱/۴۰	۰/۸۳	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۸۲	۴۶۷/۵۰	۳۹۱/۷۰	۱۴۵/۱۰	۴۰۳/۴۰	۷/۶۲	۸۹۷/۴۰
ایریل	۲۱۵/۱۰	۲/۳۴	۰/۵۳	۰/۰۰	۰/۰۷	۰/۴۶	۵۱۷/۹۰	۲۳۳/۷۰	۴۶/۹۸	۷۲/۹۷	۹/۱۷	۸۷۲/۵۰
پل الماس	۳۴۷/۶۰	۰/۹۳	۰/۶۳	۰/۱۱	۰/۰۷	۰/۴۴	۵۲۱/۴۰	۳۳۵/۱۰	۹۶/۹۹	۴۱۲/۶۰	۹/۴۹	۸۸۴/۰۰
پل‌سلطانی	۳۷۵/۶۰	۴/۹۱	۲/۰۷	۰/۰۱	۱/۶۹	۰/۳۷	۴۶۵/۸۰	۲۳۲/۳۰	۱۴/۲۵	۹۱۹/۵۰	۷/۶۸	۸۱۷/۶۰
سولا	۲۴۱/۲۰	۲/۵۸	۰/۸۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۸۱	۵۶۱/۸۰	۲۵۲/۹۰	۴۸/۰۶	۱۰۲/۹۰	۱۰/۶۲	۸۴۶/۲۰
آتشگاه	۴۷۸/۹۰	۱/۱۰	۱/۱۴	۰/۳۱	۰/۳۷	۰/۴۵	۴۶۷/۵۰	۳۹۱/۸۰	۱۴۵/۲۰	۸۹۶/۵۰	۷/۶۲	۸۹۷/۴۰
نیر	۳۴۳/۹۰	۶/۵۸	۵/۱۳	۴/۰۰	۰/۹۱	۰/۲۲	۵۲۵/۳۰	۲۵۲/۹۰	۲۱/۶۰	۶۹۰/۱۰	۹/۶۰	۸۸۳/۳۰
گیلانده	۳۴۷/۶۰	۰/۱۰	۰/۰۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۷	۵۲۱/۴۰	۳۳۴/۶۰	۹۴/۲۸	۲۳۸/۶۰	۹/۴۹	۸۸۴/۰۰
هیر	۴۱۳/۴۰	۲۴/۵۷	۱۱/۲۰	۷/۸۵	۳/۰۷	۰/۲۸	۳۷۹/۴۰	۲۴۰/۷۰	۴۰/۴۷	۲۰۴/۵۰	۲/۰۵	۹۳۹/۵۰
لای	۳۷۵/۶۰	۸/۲۱	۶/۸۲	۳/۶۰	۰/۳۶	۲/۸۷	۴۶۵/۸۰	۳۳۰/۸۰	۱۰۸/۱۰	۴۲۶/۵۰	۷/۶۸	۸۱۷/۶۰
نمین	۲۴۱/۲۰	۱/۹۲	۰/۸۱	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۸۱	۵۶۱/۸۰	۲۵۲/۹۰	۴۸/۰۶	۱۰۲/۹۰	۱۰/۶۲	۸۴۶/۲۰
سامیان	۳۴۷/۶۰	۰/۴۰	۰/۱۷	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۱۵	۵۲۱/۴۰	۲۷۵/۱۰	۳۲/۵۸	۳۵۴/۲۰	۹/۴۹	۸۸۴/۰۰
ویلادرق	۴۷۸/۹۰	۱/۱۵	۰/۷۶	۰/۴۶	۰/۲۷	۰/۰۳	۴۶۷/۵۰	۳۴۸/۹۰	۵۹/۳۴	۵۲۹/۹۰	۷/۶۲	۸۹۷/۴۰
میانگین	۳۴۴/۳۴	۳/۴۶	۱/۸۵	۰/۹۱	۰/۴۶	۰/۴۸	۵۰۱/۳۳	۲۹۴/۴۴	۶۷/۹۹	۳۷۷/۷۰	۸/۶۰	۸۶۷/۶۷
انحراف معیار	۹۵/۰۱	۵/۷۳	۲/۹۵	۲/۱۱	۰/۸۱	۰/۶۵	۴۵/۱۲	۵۵/۷۳	۳۸/۰۲	۲۸۵/۰۷	۱/۹۶	۳۷/۴۱

نتایج شبیه‌سازی مدل BILAN در دوره اعتبارسنجی با داده‌های مشاهداتی برای برخی از ایستگاه‌های هیدرومتری استان اردبیل در شکل ۳ نشان داده شده است

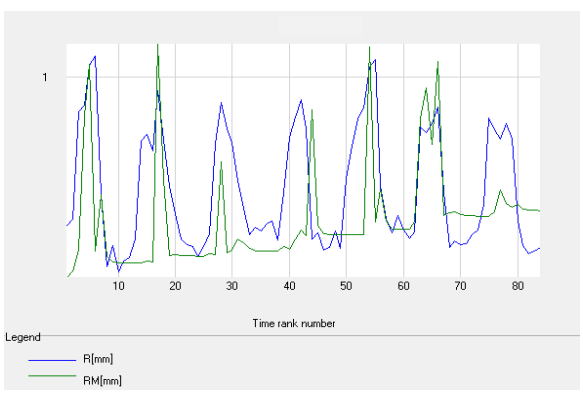
.



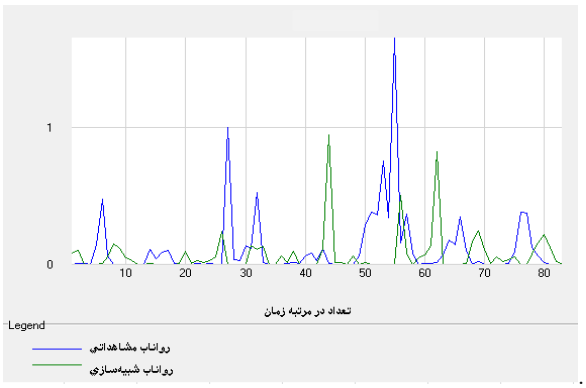
کوزه‌تپراقی



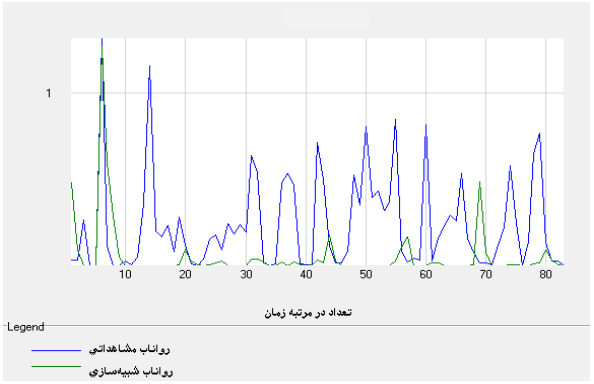
عموقین



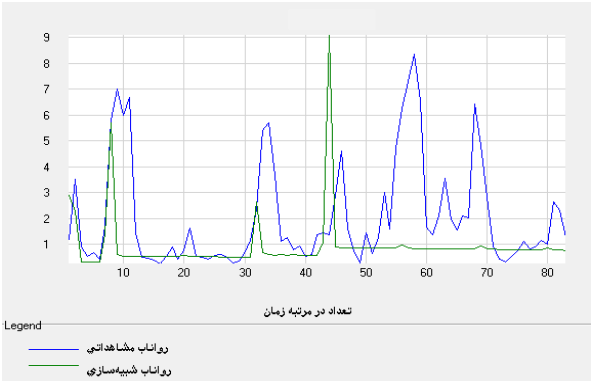
نیر



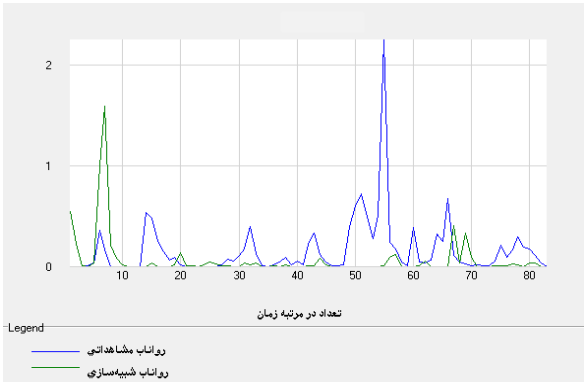
باروق



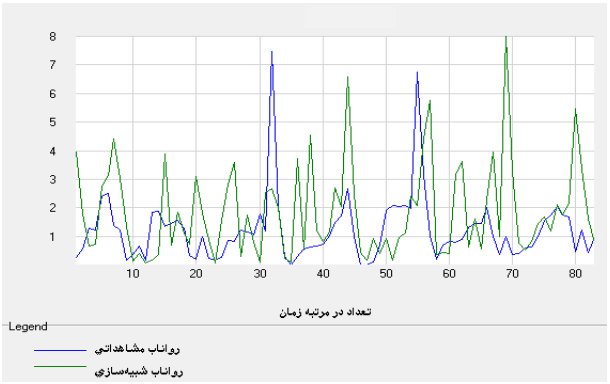
آلادیزگه



هیر



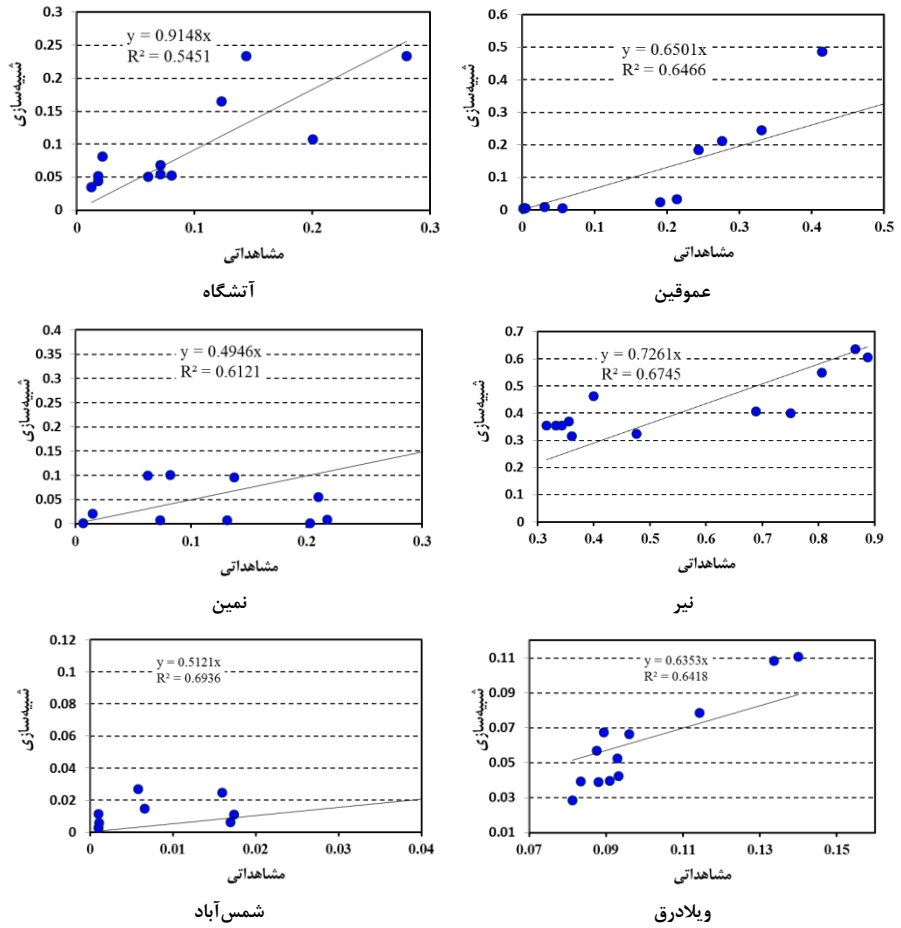
نمین



مشیران

شکل (۳): نتایج حاصل از اعتبارسنجی مدل BILAN برای برخی از ایستگاه‌های هیدرومتری استان اردبیل (۱۳۹۲-۱۳۸۶)

برای ارزیابی بصری و بهتر مدل از نمودارهای ابر نقاط (شکل ۳) استفاده شد که نمایان‌گر توانایی مدل در تطابق بازه‌های زمانی مورد استفاده در مدل‌سازی است. با توجه به نمودارها دامنه‌ای که مدل در آن دارای صحت بالاتری است مشخص می‌شود. مقدار ضریب تعیین بالاتر نشان می‌دهد که در مدل BILAN مقدار مشاهده شده به خط برازش شده نزدیک‌تر است.



شکل (۴): نمایش گرافیکی ضریب تعیین مدل BILAN

شکل ۴ نشان‌دهنده ایستگاه‌هایی است که دارای ضریب تعیین بیش از ۶۰ درصد است. از لحاظ تئوری اگر R^2 برابر ۱۰۰ درصد شود تمامی مقادیر مشاهده شده با مقادیر برازش شده یکسان هستند و همه نقاط داده‌ها بر خط برازش شده قرار خواهند گرفت. برای مقادیر دیگر ایستگاه‌ها هم تقریباً مقادیر برازش شده نسبت به خط برازش فاصله زیادی دارند.

بحث و نتیجه‌گیری

دامنه‌های مقادیر شاخص‌های ارزیابی R^2 برای نتایج شبیه‌سازی مدل در دوره واسنجی برای ایستگاه‌های شمس‌آباد (۹۲ درصد)، ننه‌کران (۴۲ درصد)، مشیران (۳۸ درصد)، باروق (۵۱ درصد) دارای نتایج قابل قبولی می‌باشند. که می‌تواند به‌دلیل سطح آب زیرزمینی، انتخاب مقادیر پارامترهای واسنجی شده براساس دامنه ارائه شده در راهنماهای مدل باشد (Horacek et al., 2008؛ Mosavi et al., 2021). هم‌چنین نتایج شبیه‌سازی مدل در دوره واسنجی نشان داد که ایستگاه‌های هیدرومتری ایریل، پل الماس، گیلانده و هیر دارای شبیه‌سازی نامناسب می‌باشند که می‌توان گفت دلیل دیگر به تغییر در شرایط طبیعی جریان در اثر برداشت آب، انحراف جریان و یا بهره‌برداری از آب سطحی باشد که در نتایج گلشن و همکاران (۱۳۹۷) و Choubin et al. (۲۰۱۹) به این موضوع اشاره شده است. هم‌چنین در ایستگاه‌های هیدرومتری میزان دبی اوج و زمان رسیدن به اوج دبی‌جریان توسط مدل به‌صورت قابل قبولی شبیه‌سازی شده است در حالی که دبی پایه شبیه‌سازی شده از دقت پایینتری برخوردار است، این موضوع در نتایج شبیه‌سازی مدل SWAT در حوزه آبخیز هراز (Pirnia et al., 2019) و نتایج شبیه‌سازی مدل BILAN در حوزه آبخیز ایولوت (Melišová et al., 2020) نیز ارائه شده است. یکی دیگر از عوامل خطا می‌تواند تعمیم داده‌هایی مانند تبخیر و

رطوبت از ایستگاه‌های مجاور باشد که در مواردی باعث ایجاد خطا در نتایج می‌شود (Musie et al., 2019؛ Dembélé et al., 2020). در مرحله اعتبارسنجی مدل ایستگاهای عموقین، آتشگاه، نیر، نمین، سامیان، ویلادق و شمس‌آباد با همبستگی بیش از ۶۰ درصد بهترین کارایی مدل BILAN را نشان دادند و ایستگاه‌های گیلانده، ایریل، احمدکندی، باروق و پل الماس با همبستگی کم‌تر از ۵ درصد بدترین وضعیت را داشتند. در حالت کلی براساس نتایج، مدل مذکور در آبخیزداری با رودخانه های دائمی جواب مناسب‌تری ارائه می‌دهد که می‌توان دلیل آن را با تداوم جریان ماهانه و نیز واکنش سریع حوضه در تولید رواناب ماهانه مرتبط دانست، که با نتایج شبیه‌سازی دبی جریان با استفاده از مدل‌سازی منطقه‌ای در استان اردبیل مطابقت دارد (گلشن و همکاران، ۱۳۹۷). هم‌چنین نتایج نشان‌دهنده این است که مدل BILAN برای بررسی درازمدت اثر تغییرات اقلیمی بر منابع آب سطحی می‌تواند ابزار مفیدی باشد. با توجه به نتایج ارزیابی دقت مدل BILAN برای شبیه‌سازی دبی جریان، این مدل توانایی شبیه‌سازی دبی جریان را دارد، که با نتایج Horacek et al. (۲۰۰۸) و Strnad et al. (۲۰۲۰) در جمهوری چک مطابقت دارد.

با توجه به تغییرات دبی جریان در حوزه‌های آبخیز و توسعه روزافزون مدل‌های هیدرولوژیکی لازم است مدل‌های هیدرولوژیکی بررسی و مدل‌های مناسب با توجه به اهداف مطالعاتی انتخاب شوند. نتایج مدل BILAN در ایستگاه‌های هیدرومتری عموقین، آلادیزگه، پل سلطانی، آتشگاه، نیر، نمین، سامیان، ویلادرق، دوست‌بیگلو، شمس آباد، ننه‌کران و مشیران از ایستگاه‌های مورد بررسی در حد نسبتاً قابل قبولی ارزیابی شد. با توجه به تغییرات رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی، نتایج نشان از کارایی خوب مدل BILAN برای برخی از ایستگاه‌های مورد بررسی است. بنابراین می‌توان گفت که مدل BILAN می‌تولند به‌خوبی مقدار رولناب ماهلنه را در هر زیرحوضه بالادست تحت شرایط آب و هوایی مرطوب پیش‌بینی کند. با توجه به نتایج ضرایب آماری مشخص شد که مدل توانایی شبیه‌سازی داده‌های ماهلنه را با توجه به معیارهای ارزیابی کارایی دارد. از آنجایی که در مدل BILAN معایب واسنجی نیازمند زمان است و شناخت از منطقه برای اجرای مدل ضروری است، جزو معایب این مدل است. مدل BILAN علاوه بر نمایش مقادیر رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده، متغیرهایی مانند جریان پایه، جریان سطحی، ذخیره آب سطحی، ذخیره آب زیرزمینی را نیز ارائه می‌دهد که از این داده‌ها می‌توان برای مدیریت بهتر چرخه هیدرولوژیکی و بیلان آب حوزه‌های آبخیز استفاده کرد.

منابع

اسدی، م؛ جباری، ا.، حصادی، ه. ۱۳۹۹. مدل‌سازی سیلاب در مناطق خشک و نیمه خشک با بهره‌گیری از مدل HEC-HMS مطالعه موردی: حوضه آبریز سد استقلال میناب، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، ۸(۳): ۳۳-۱۷.

آقابیگی، ن؛ اسمعلی عوری، ا.، مصطفی زاده، ر.، گلشن، م. ۱۳۹۸. اثرات تغییر اقلیم بر رواناب با مدل هیدرولوژیکی IHACRES در برخی از حوزه‌های آبخیز استان اردبیل. مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۰ (۲): ۱۸۹-۱۷۸.

بهره‌مند، ع.، مصطفی‌زاده، ر. ۱۳۸۹. مقایسه کارایی روش‌های تخمین پارامترهای مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای نش در شبیه‌سازی هیدروگراف جریان. پژوهش‌های آبخیزداری، ۸۶: ۴۲ تا ۵۱.

پورحق وردی، ف؛ معماریان، ه.، پوررضا بیلندی، م.، تاجبخش، م.، مجیدی، م. ۱۴۰۰. استفاده از HydroPSO در واسنجی مدل هیدرولوژی KINEROS2 جهت شبیه‌سازی رواناب در حوزه‌های آبخیز مناطق نیمه‌خشک (مطالعه موردی: حوزه آبخیز بار نیشابور). پژوهش‌های فرسایش محیطی، ۱۰(۴): ۱۱۰-۹۰.

خاوریان، ح.، آقایی، م.، مصطفی‌زاده، رئوف. (۱۳۹۹). پیش‌بینی تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر جریان ماهانه با استفاده از مدل هیدرولوژیکی و داده‌های سنجش از دور در حوضه آبریز کوزه‌تپراقی اردبیل، هیدروژئومورفولوژی. سال ۷، شماره ۲۴، ص ۱۹-۳۹.

صیاد، د.، قضاوی، ر.، امیدوار، ا. ۱۴۰۰. بررسی کارایی مدل SWAT در برآورد دبی‌های روزانه حوضه‌های فاقد آمار با رویکرد منطقه‌بندی در مناطق خشک. هیدروژئومورفولوژی، ۷ (۲۵): ۱۸۲-۱۶۱.

عسگری، ا.، حسینی، س.ز.، مصطفی‌زاده، ر. ۱۳۹۹. تعیین ارتباط و تغییرات مکانی مقادیر دبی و رسوب معلق در حوضه‌های استان اردبیل. جغرافیا و توسعه، ۱۸(۶۱): ۱۴۹ تا ۱۷۶.

عسگری، ا.، مصطفی‌زاده، ر.، اسمعلی، ا. ۱۳۹۶. تعیین سهم مشارکت مؤلفه‌های هیدروگراف در جریان رودخانه‌ای برخی از ایستگاه‌های استان اردبیل. مهندسی آبیاری و آب، ۸(۳۰): ۵۶-۷۱.

گلشن، م.، کاویان، ع.، اسمعلی، ا.، زیگلر، ا. ۱۳۹۷. مدل‌سازی تولید رواناب و رسوب با استفاده از خصوصیات هیدروژئومورفولوژیک در حوزه آبخیز سامیان، استان اردبیل. علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۱۲ (۴۳): ۱۲۶-۱۱۷.

مصطفی‌زاده، ر.، عسگری، ا. ۱۴۰۰. ارزیابی کارایی مدل بارش-رواناب GR4J در شبیه‌سازی دبی روزانه جریان در یک آبخیز کوهستانی استان اردبیل. مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۱(۳): ۷۹ تا ۹۵.

مطالعات طرح آمایش استان اردبیل، ۱۳۹۱. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان اردبیل، ۱۵۷ ص.

مهری، س.، مصطفی‌زاده، ر.، اسمعلی عوری، ا.، قربانی، ا. ۱۳۹۶. تغییرات زمانی و مکانی شاخص جریان پایه در رودخانه‌های استان اردبیل. فیزیک زمین و فضا، ۴۳(۳): ۶۲۳ تا ۶۳۴.

Alley, W.M. 1984. On the treatment of evapotranspiration, soil moisture accounting and aquifer recharge in monthly water balance models. Water Resources 20, 1137-1149.

Cha, S. M. and Lee, S. W. 2021. Advanced hydrological streamflow simulation in a watershed using adjusted radar-rainfall estimates as meteorological input data. Journal of Environmental Management, 277, 111393.

Choubin, B., Solaimani, K., Rezanezhad, F., Roshan, M. H., Malekian, A. and Shamshirband, Sh. 2019. Streamflow regionalization using a similarity approach in ungauged basins: Application of the geo-environmental signatures in the Karkheh River Basin, Iran. Catena, 182, 104128.

Dembélé, M., Ceperley, N., Zwart, S. J., Salvadore, E., Mariethoz, G. and Schaefli, B. 2020. Potential of satellite and reanalysis evaporation datasets for hydrological modelling under various model calibration strategies. Advances in Water Resources, 143, 103667.

EsmaliOuri, A., Golshan, M., Janizadeh, S., Cerdà, A. and Melesse, A. M. 2020. Soil erosion susceptibility mapping in Kozetopraghi catchment, Iran: a mixed approach using rainfall simulator and data mining techniques. Land, 9(10), 368.

Horacek, S., Kasparek. L. and Novicky. O. 2008. Estimation of climate change impact on water resources by using Bilan water balance model. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, December 2008 4(1):012023. DOI: 10.1088/1755-1307/4/1/012023

Kašpárek, L. and Novický, O. 1997. User's guide BILAN, 12 p. Available at: http://www.geo.uio.no/edc/content/software.htm

Kim, S., Hong, S.J. Kang, N., Noh, H.S. and Kim, H.S. 2016. A comparative study on the simple two-parameter monthly water balance model and Kajiyama formula for monthly runoff estimation. Hydrological Sciences Journal 6667, 1244-1252.

Kumari, N., Srivastava, A., Sahoo, B., Raghuwanshi, N. S. and Bretreger, D. 2021. Identification of suitable hydrological models for streamflow assessment in the Kangsabati River Basin, India, by using different model selection scores. Natural Resources Research, 30(6), 4187-4205.

Melišová, E., Vizina, A., Staponites, L. R. and Hanel, M. 2020. The role of hydrological signatures in calibration of conceptual hydrological model. Water, 12(12), 3401.

Mosavi, A., Golshan, M., Choubin, B., Ziegler, A. D., Sigaroodi, S. K., Zhang, F. and Dineva, A. A. 2021. Fuzzy clustering and distributed model for streamflow estimation in ungauged watersheds. Scientific Reports, 11(1), 1-14.

Mostafazadeh, R., Sadoddin, A., Bahremand, A., and Sheikh, V.B, ZareGarizi, A. 2017. Scenario analysis of flood control structures using a multi-criteria decision-making technique in Northeast Iran. Natural Hazards, 87(3), 1827-1846.

Musie, M., Sen, S. and Srivastava, P. 2019. Comparison and evaluation of gridded precipitation datasets for streamflow simulation in data scarce watersheds of Ethiopia. Journal of Hydrology, 579, 124168.

Pirnia, A., Darabi, H., Choubin, B., Omidvar, E., Onyutha, C. and Haghighi, A. T. 2019. Contribution of climatic variability and human activities to stream flow changes in the Haraz River basin, northern Iran. Journal of Hydro-Environment Research, 25, 12-24.

Rekomendatsi, A. 1976. Rekomendatsii poroschotu ispareniias poverhnosti suchi (Guideline's fir Caculation of evaporation from land surface). Gidrometeoizdat, peterbury Russia.

Simões, K., Condé, R. D. C. C., Roig, H. L. and Cicerelli, R. E. 2021. Application of the SWAT hydrological model in flow and solid discharge simulation as a management tool of the Indaia River Basin, Alto São Francisco, Minas Gerais. Revista Ambiente & Água, 16.

Strnad, F., Moravec, V., Markonis, Y., Máca, P., Masner, J., Stočes, M. and Hanel, M. 2020. An index-flood statistical model for hydrological drought assessment. Water, 12(4), 1213.