



## The Simulation of Discharge in Upper Helmand Basin in Afghanistan Using Multi-Objective Optimization and FLEX Conceptual Model

A. Roodari<sup>1</sup>, F. Hassanpour<sup>2\*</sup>, M. Yaghobzadeh<sup>3</sup>,  
M. Delavar<sup>4</sup> and M. Hrachowitz<sup>5</sup>

### Abstract

Hirmand River is the main drainage system in the southern part of Afghanistan and has a significant impact on the socio-economic life of Sistan region. Long term assessment of water potential of Hirmand River requires the use of rainfall-runoff model. The present study focused on simulating the daily discharge of the upper Helmand basin in Afghanistan using the conceptual model FLEX in combination with multi-objective optimization, which has not been considered in previous studies. At first, the discharge was evaluated integrally by lumped model considering one objective function. Then it was simulated using semi-distributed model by adding the logarithm of the flow to the objective function. The results indicated that the model is efficient in the semi-distributed mode by using two objective functions for calibration of parameters. The coefficients of NS, NS-log in the calibration period were respectively estimated to be 0.86, 0.92. They were estimated in validation period as 0.76 and 0.81, respectively. Pareto front analysis gave the best optimum set for each parameter used in model simulation. The model gave satisfactory results based on monthly calibration and can be used to investigate the drought and climate change research in study basin.

**Keywords:** Rainfall-Runoff Simulation, Multi-Objective Optimization, FLEX Model, Pareto Front, Upper Helmand Basin of Afghanistan.

Received: August 15, 2018

Accepted: November 4, 2018

## شبیه‌سازی رواناب در حوضه بالادست هلمند افغانستان با استفاده از واسنجی چندهدفه و مدل مفهومی FLEX

آرتمیس رودری<sup>۱</sup>، فرزاد حسن‌پور<sup>۲\*</sup>، مصطفی یعقوب‌زاده<sup>۳</sup>،  
مجید دلاور<sup>۴</sup> و مارکوس هراکوویتز<sup>۵</sup>

### چکیده

رودخانه هیرمند اصلی‌ترین زهکش نیمه جنوبی افغانستان بوده و تأثیر به‌سزایی در حیات اقتصادی- اجتماعی منطقه سیستان دارد. در راستای ارزیابی پتانسیل آبی رودخانه هیرمند در طولانی مدت نیاز به استفاده از مدل بارش رواناب می‌باشد. هدف از این تحقیق شبیه‌سازی رواناب روزانه حوضه بالادست هلمند با استفاده از مدل مفهومی FLEX در ترکیب با بهینه‌سازی چندهدفه بوده که در سایر تحقیقات پیشین مورد توجه نبوده است. بنابراین در ابتدا مدل به صورت یکپارچه با در نظر گرفتن یک تابع هدف و سپس به صورت نیمه‌توزیعی و افزودن لگاریتم جریان به تابع هدف ارزیابی گردید. نتایج پژوهش نشان‌دهنده کارایی بالای مدل در حالت نیمه‌توزیعی و استفاده از دو تابع هدف برای واسنجی پارامترها بوده و ضرایب NS، NS-log در دو حالت واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب برابر ۰/۸۶، ۰/۹۲، ۰/۷۶ و ۰/۸۱ می‌باشد. با توجه به اینکه همه نقاط روی جبهه پرتو جزو بهترین راه‌حل‌ها هستند، بنابراین برای هر پارامتر بازه بهینه آن در نظر گرفته شد. همچنین با توجه به نتایج رضایت‌بخش مدل به صورت ماهانه، می‌تواند جهت بررسی خشکسالی و تغییر اقلیم در حوضه مورد مطالعه استفاده گردد.

**کلمات کلیدی:** شبیه‌سازی بارش-رواناب، بهینه‌سازی چندهدفه، مدل FLEX، جبهه پرتو، حوضه بالادست هلمند افغانستان.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۵/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۸/۱۳

1- Ph.D. Candidate of Water Engineering Group, Department of Soil and Water, Zabol University, Zabol, Iran.

2- Associate Professor, Department of Soil and Water, Zabol University, Zabol, Iran. Email: hassanpourir@uoz.ac.ir

3- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Birjand University, Birjand, Iran.

4- Assistant Professor, Department of Water Resources Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

5- Associate professor, Department of Water Resources, Delft University of Technology, Netherlands.

\*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری آبیاری زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشگاه زابل.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل.

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند.

۴- استادیار گروه مدیریت منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس.

۵- دانشیار گروه منابع آب، دانشگاه صنعت دلفت، هلند.

\*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

رابطه بارندگی-رواناب را با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه و الگوریتم مونت کارلو و با در نظر گرفتن سه ساختار مختلف برای مدل توزیعی FLEX در دو زیرحوضه بررسی نموده و بیان کردند یک مدل منفرد برای نشان دادن فرایندهای هیدرولوژیکی حوضه کافی نیست. (2016) Rezaie et al. به کمک مدل Tank و نه روش بهینه‌سازی، رواناب روزانه حوضه نازلوچای دریاچه ارومیه را مدل‌سازی کرده و در حالت کلی برتری مدل‌هایی را که بر مبنای ضریب نش انتخاب شده بودند تأیید نمودند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده عملکرد خوب روش انتخابی در شبیه‌سازی رواناب پایه و ضعف در مقادیر رواناب بالا بود. به طور کلی مطالعات بسیاری در خصوص فواید واسنجی‌های چندهدفه صورت گرفته که کاربردی و قابل اطمینان بودن نتایج را در فرایندهای هیدرولوژیکی تأیید می‌کنند (Madsen, 2003; Reddy and Nagesh, 2007; Foglia et al., 2009; Li et al., 2010; Lu et al., 2013; Tiedeman and Green, 2013).

در میان انواع مدل‌های بارش-رواناب، مدل‌های مفهومی بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدل FLEX یک مدل مفهومی یکپارچه بوده که روابط بین فرایندهای هیدرولوژیکی را به خوبی در حوضه نشان می‌دهد (Fenicia et al., 2006). در همین راستا مطالعات بسیاری در خصوص واسنجی مدل FLEX با ساختارهای ساده تا پیچیده در ترکیب با روش‌های بهینه‌سازی یک یا چند هدفه صورت گرفته و نتایج رضایت‌بخشی ارائه شده است (Fenicia et al., 2007; Savenije, 2010; Hrachowitz et al., 2013; Gharari et al., 2014; Gao et al., 2014). با توجه به اینکه مدل FLEX در محیط متلب نوشته شده و می‌توان ساختار آن را با کدنویسی تغییر داد، نسبت به مدل‌های پیچیده هیدرولوژیکی مانند SWAT، کاربر دوست بوده و در این مطالعه جهت شبیه‌سازی رابطه بارش-رواناب حوضه بالادست هلمند استفاده شده است.

منطقه سیستان به علت کاهش مقدار بارندگی و وابستگی کامل حیات منطقه به آب رودخانه هیرمند که در طول سال‌های ۹۲-۱۳۷۸ به طور متناوب در اکثر مواقع سال قطع بوده، مواجه با شدیدترین خشکسالی در سطح کشور می‌باشد (Roodari et al., 2016). یکی از بزرگ‌ترین مشکلاتی که در این حوضه وجود دارد محدودیت دسترسی به داده‌های ورودی به مدل از جمله داده‌های هواشناسی است. به همین منظور مطالعاتی در خصوص استفاده از داده‌های پایگاه‌های جهانی در برآورد رواناب این حوضه صورت گرفته است. از جمله Hajjhosseini et al. (2016) با استفاده از داده‌های پایگاه CRU<sup>1</sup> و مدل SWAT به شبیه‌سازی ماهانه رواناب در حوضه بالادست هلمند پرداخته و کاهش سالیانه رواناب را تا سال ۲۰۱۲ گزارش نمودند. در مطالعه دیگری

بهره‌برداری و استفاده مطلوب از منابع آب و مدیریت بهینه آن مستلزم شناخت بهتر مدل هیدرولوژیکی است. بارش و به دنبال آن تشکیل رواناب سطحی از فازهای مهم چرخه هیدرولوژیکی محسوب می‌شود و اساس کار مدل هیدرولوژیکی، بررسی رابطه بین بارش و رواناب است. واسنجی دستی مدل‌های هیدرولوژیکی از اوایل دهه ۱۹۶۰ مورد توجه قرار گرفته است، ولی به دلیل وقت گیر بودن و پیچیدگی آن، از اواخر دهه مذکور بحث واسنجی خودکار مورد توجه قرار گرفت. واسنجی خودکار نیازمند انتخاب یک تابع هدف مناسب، یک الگوریتم جست و جو و یک معیار برای به اتمام رساندن الگوریتم است (Sorooshian and Gupta, 1983).

در مدل‌های مفهومی، همه فرایندهای بارش-رواناب به صورت مفاهیم ساده شده توصیف می‌شوند. در مواردی که تنها لازم است جریان در خروجی حوضه آبریز شبیه‌سازی شود، مدل‌های مفهومی اغلب بر انواع دیگر مدل‌های بارش-رواناب، از جمله مدل‌های فیزیکی، ترجیح داده می‌شوند؛ زیرا ضمن ارایه‌ی پاسخ‌های قابل قبول، به تلاش محاسباتی و داده‌های ورودی کم‌تری نیاز دارند (Cooper et al., 2007). مدل‌های مفهومی از تعدادی پارامتر برخوردارند که چکیده‌ای از ویژگی‌های حوضه هستند. بیشتر این پارامترها از کمیت‌های قابل اندازه‌گیری حوضه به دست نمی‌آیند و لازم است از راه واسنجی مدل برآورد شوند. بیشتر مدل‌های مفهومی بارش-رواناب به ویژه نوع پیوسته آن‌ها، از شمار زیادی پارامتر برخوردارند و سری پارامترهای مناسب باید در یک فضای بزرگ چند بعدی یافت شوند. سطح پاسخ تابع هدف این مدل‌ها اغلب از بهینه‌های موضعی زیادی برخوردار هستند. بنابراین می‌توان گفت که واسنجی خودکار در مورد این مدل‌ها امری راه‌گشا و ضروری است (Khazaei, 2009). لذا با توجه به اهمیت واسنجی مدل‌های بارش-رواناب در حوضه و در بیشتر مواقع عدم دسترسی به داده‌های ورودی کافی، استفاده از مدل‌هایی با ساختار ساده‌تر و ترکیب آن با روش‌های بهینه‌سازی یک یا چند هدفه می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. در همین راستا، (2018) Mostafaie et al. با استفاده از چهار روش بهینه‌سازی و یک مدل هیدرولوژیکی مفهومی، رواناب را شبیه‌سازی نموده و نشان دادند نتایج توابع چندهدفه رضایت‌بخش‌تر از توابع یک هدفه می‌باشد. (2015) Zhang et al. با استفاده از روش بهینه‌سازی Shuffled Complex Evolution به شبیه‌سازی مدل هیدرولوژیکی پرداخته و نشان دادند طول سری زمانی نسبت به نوع الگوریتم بهینه‌سازی اثر کمتری بر واسنجی مدل دارد و خطاهای ناشی از داده‌ها و ساختار مدل منجر به عدم قطعیت‌های معنی‌داری در بهینه‌سازی پارامترها می‌گردد. (2015) Tekleab et al.

۲- روش تحقیق

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، بالادست حوضه آبریز رودخانه هیرمند تا محل سد کجکی واقع در کشور افغانستان به مساحت ۴۷۰۰۰ کیلومترمربع و طول حدود ۵۰۰ کیلومتر می‌باشد (شکل ۱). این رودخانه از کوه‌های بابا یغما با ارتفاع ۵۱۴۳ متر از سطح دریا در غرب کابل سرچشمه گرفته و به سد کجکی به ارتفاع ۱۰۰۰ متری می‌رسد. رودخانه پس از طی مسافت ۱۰۵۰ کیلومتر به دریاچه هامون در سیستان ایران می‌رسد. قسمت‌های شمالی حوضه کوهستانی و تپه‌ای با پوشش سنگی در شیب‌های کوهستانی و خاک‌های سیلتی تا شنی در دامنه تپه‌ها می‌باشد. اقلیم آن خشک و نیمه خشک بوده و بیشترین بارش در ارتفاعات بالا در طول ماه‌های اکتبر تا می رخ می‌دهد. بارش سالیانه در بازه‌ای بین ۱۵۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر و تبخیر تعرق پتانسیل سالیانه بین ۸۰۰ تا ۲۴۰۰ میلی‌متر می‌باشد (U.S. Agency for International Development, 1976; Favre and Kamal, 2004).

(Carrie and Jacobs 2011) از داده‌های سنجش از دور به منظور ارزیابی آب معادل برف حوضه بالادست هیرمند استفاده کرده است و نتایج آن را با خروجی مدل HEC-HMS مقایسه نمودند. Burger (2005) با استفاده از مدل HBV و داده‌های هواشناسی از پایگاه ECMWF Re-analysis dataset رابطه بارش رواناب را در مقیاس ماهانه و سالانه در حوضه بالادست هیرمند شبیه‌سازی نموده است و نتایج قابل قبولی با در نظر گرفتن واسنجی مدل در سال‌های خشک و تر گزارش نمود. ورودی‌های رودخانه هیرمند به کشور، همواره دستخوش تغییرات و عاملی برای مناقشات هیدروپلیتیکی ایران و افغانستان بوده است. به همین دلیل ارزیابی پتانسیل منابع آب این رودخانه در بلندمدت ضروری بوده است که بررسی چنین موردی نیاز به استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی بارش-رواناب دارد (Hajihoseini et al., 2015). لذا هدف از انجام این مطالعه واسنجی رابطه بارش-رواناب حوضه بالادست هیرمند با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه و مدل FLEX در مقیاس زمانی روزانه می‌باشد که در مطالعات گذشته مورد توجه قرار نگرفته است.

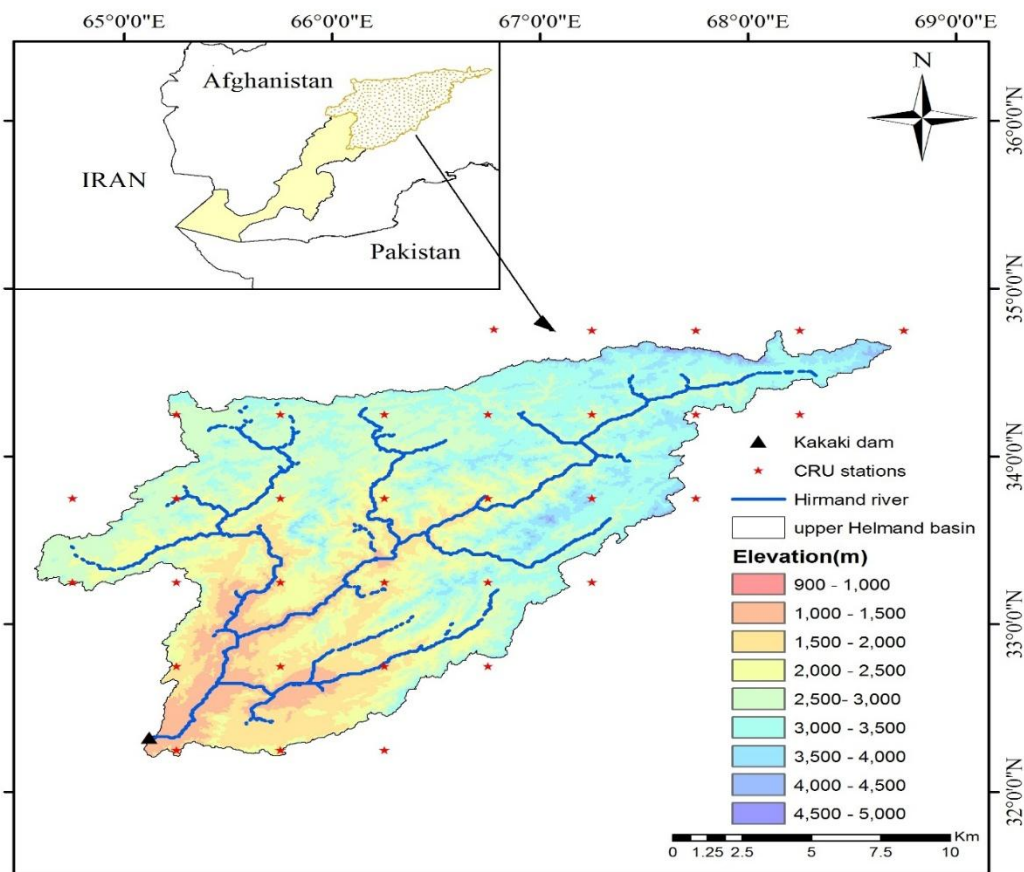


Fig. 1- The location of Upper Helmand Basin in Afghanistan

شکل ۱- موقعیت حوضه بالادست هیرمند افغانستان

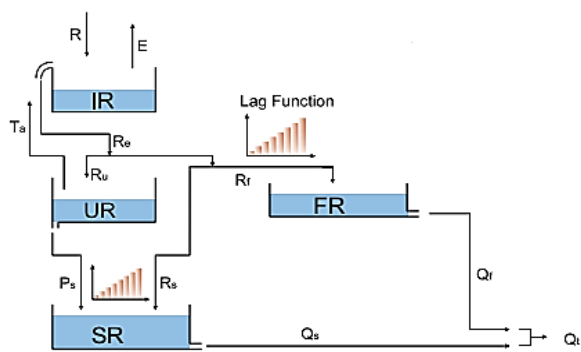


Fig. 2 – Structure schematization of the FLEX model

شکل ۲- ساختار کلی مدل FLEX

که در آن  $R$  بارندگی،  $E$  تبخیر،  $T_a$  تعرق واقعی،  $Q_t$  رواناب کل،  $R_e$  باران مؤثر،  $R_u$  جریان ورودی به مخزن خاک غیراشباع،  $R_f$  جریان ورودی به مخزن رواناب سریع،  $R_s$  جریان ترجیحی،  $P_s$  نفوذ عمقی،  $Q_f$  رواناب سریع و  $Q_s$  رواناب کند می‌باشد.

### ۲-۳-۱- مخزن Interception

در ابتدا بارندگی به مخزن Interception رسیده که می‌تواند تا حد آستانه  $I_{max}$  پر شود. تا زمانی که آب در مخزن موجود است تبخیر  $E_i$  ادامه داشته و می‌توان فرض کرد با تبخیر پتانسیل  $E_p$  از طریق ضریب  $I_c$  رابطه خطی دارد:

$$E_i = I_c \cdot E_p \quad (1)$$

### ۲-۳-۲- مخزن خاک غیراشباع

هنگامی که جریان ورودی به مخزن Interception از مقدار  $I_{max}$  بیشتر می‌شود بارندگی مؤثر  $R_e$  مخزن را ترک می‌کند. این جریان با توجه به مقدارش به چند بخش تقسیم می‌شود. ضریب رواناب  $C_r$  (معادله ۲) که به صورت یک تابع  $s$  شکل بیان شده به نسبت بین ذخیره مخزن خاک غیر اشباع  $S_u$  و بیشترین مقدار ظرفیت مخزن  $S_{fc}$  بستگی دارد. قسمتی از  $R_e$  در مخزن خاک غیراشباع نفوذ کرده ( $R_u$ )، و آب اضافی از این مخزن به کمک ضریب  $D$  به جریان ترجیحی  $R_s$  که وارد مخزن رواناب کند شده و رواناب سطحی  $R_f$  که وارد مخزن رواناب سریع می‌شود، تقسیم می‌گردد (معادلات ۳، ۴ و ۵).

$$C_r = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{-S_u/S_{fc} + 1/2}{\beta}\right)} \quad (2)$$

$$R_u = (1 - C_r) \cdot R_e \quad (3)$$

### ۲-۲- داده‌های هواشناسی و آبسنجی

همان‌گونه که گفته شد مهم‌ترین مشکل حوضه هلمند، محدودیت دسترسی به داده‌های زمینی اندازه‌گیری شده در سال‌های اخیر است. به همین منظور در این پژوهش از داده‌های پایگاه CRU که در مطالعات Hajihoseini et al. (2016) صحت عملکرد آن در حوضه پیش‌رو مورد تأیید قرار گرفته، استفاده شده است. داده‌های این پایگاه در مقیاس ماهانه بوده که بایستی با استفاده از برخی الگوریتم‌ها به روزانه تبدیل شوند. به همین منظور در این تحقیق از داده‌های CRU موجود در پایگاه اینترنتی WETechData که به معرفی یک ابزار جدید CCT<sup>۲</sup> برای مطالعات تغییرات تقویم می‌پردازد، استفاده شده است (Ashraf Vaghefi et al., 2017). نسخه CRU به کار گرفته شده در این ابزار CRU TS 3.1 با تفکیک مکانی ۰/۵ در ۰/۵ درجه جغرافیایی و در مقیاس روزانه برای بازه زمانی ۱۹۷۰ تا ۲۰۰۵ بوده که شامل داده‌های بارش و درجه حرارت به صورت ریزمقیاس شده می‌باشد.

اندازه‌گیری داده‌های آبسنجی رودخانه هیرمند در ایستگاه‌های مختلف از دهه ۱۹۴۰ میلادی آغاز و از سال ۱۹۷۹ میلادی هم‌زمان با تهاجم اتحاد جماهیر شوروی به این کشور متوقف شده است. با توجه به هم‌پوشانی داده‌های هواشناسی و هیدرومتری در سال‌های ۱۹۷۱ تا ۱۹۷۹ از داده‌های رواناب ایستگاه آبسنجی دهرارود که به صورت ماهانه در گزارش تهیه شده توسط USGS موجود می‌باشد، استفاده گردید. با توجه به اینکه هدف از انجام این مطالعه شبیه‌سازی روزانه رابطه بارش-رواناب در حوضه بالادست هلمند بود بنابراین داده‌های روزانه رواناب ایستگاه دهرارود نیز از پایگاه اینترنتی USGS تهیه گردید. سال‌های ۱۹۷۱-۷۲ به عنوان دوره گرم کردن مدل، ۱۹۷۲-۷۵ دوره واسنجی و ۱۹۷۶-۷۹ دوره صحت‌سنجی مدل در نظر گرفته شد.

### ۲-۳-۳- مدل FLEX

FLEX یک مدل مفهومی یکپارچه بوده که فرایندهای هیدرولوژیکی حوضه را به خوبی شبیه‌سازی می‌کند. به طور کلی مدل از چهار مخزن (Interception Reservoir (IR) مخزن خاک غیراشباع (UR)<sup>۳</sup>، مخزن رواناب سریع (FR)<sup>۴</sup> و مخزن رواناب کند (SR)<sup>۵</sup> تشکیل گردیده که در ادامه هر یک از این مخازن با روابط موجود در آن‌ها شرح داده می‌شود (Fenicia et al., 2006). ساختار کلی مدل در شکل ۲ نشان داده شده است.

( $P_e$ ) برابر با مجموع بارندگی  $P$  و ذوب برف  $M$  می‌باشد که معمولاً در اوایل بهار و پاییز قابل مشاهده است. نکته مهم این که ذوب برف و Interception به طور هم‌زمان رخ نداده و توسط دمای هوا، بارش و وجود یا عدم وجود پوشش برف کنترل می‌شود. سیستم برف براساس یک مدل ساده درجه-روز طراحی شده که در مدل‌های مفهومی زیادی به کار برده شده است (Seibert, 1997; Uhlenbrook et al., 2004; Hrachowitz et al., 2013). معادله ۸ بیانگر ذوب در این مخزن می‌باشد:

$$M = F_{dd} \cdot (T - T_{th}) \quad (8)$$

در این معادله  $F_{dd}$  فاکتور درجه روز بوده که به صورت مقدار آب ذوب شده در هر روز و در هر درجه سلسیوس تعریف می‌شود. مقادیر  $F_{dd}$  و  $T_{th}$  از واسنجی مدل به دست می‌آیند. بنابراین مدل دوازده پارامتر نامعلوم دارد که مقادیر آن‌ها از طریق واسنجی بهینه می‌گردد.

#### ۲-۴- روش واسنجی

در ابتدا روش مورد استفاده در این تحقیق برای واسنجی پارامترها، روش نمونه‌گیری تصادفی مونت کارلو بود که باتوجه به تعداد ۱۲ پارامتر، تعداد تکرار ۱۰۰۰۰۰۰ بار در نظر گرفته شد. باتوجه به این که مدل FLEX در محیط MATLAB نوشته شده و پردازش آن با تعداد تکرار بالا بسیار زمان‌بر بود از الگوریتم بهینه‌سازی در ساختار مدل استفاده گردید که سرعت پردازش و دقت بهینه‌سازی را افزایش داد. الگوریتم مورد استفاده در این مطالعه MOPSO بوده که در ادامه به شرح آن پرداخته می‌شود.

#### ۲-۴-۱- الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه (MOPSO)

الگوریتم MOPSO توانایی حل مسایل با ابعاد بزرگ و تعداد متغیرهای زیاد را داراست. از سوی دیگر، مسایل مورد توجه در مدیریت منابع آب از مسایلی هستند که اغلب دارای تعداد متغیرهای زیاد هستند و بهینه‌سازی توابع هدف غیرخطی در آن‌ها مطرح است. این الگوریتم اولین بار توسط Coello (2004) معرفی گردید که در آن مفهومی به نام آرشیو یا مخزن نسبت به الگوریتم PSO اضافه شده است. انتخاب بهترین جواب کلی برای هر ذره گام مهم و اساسی در این الگوریتم است. هنگامی که ذرات می‌خواهند حرکتی انجام دهند یک عضو از مخزن را به عنوان رهبر انتخاب می‌کنند. این رهبر حتماً باید عضو مخزن و همچنین نامغلوب باشد. ترتیب اجرای این الگوریتم به شرح زیر است:

۱- تعیین مؤلفه‌های مورد نیاز برای اجرای الگوریتم، ۲- جمعیت اولیه ایجاد می‌شود، ۳- بهترین تجربه شخصی هر ذره تعیین می‌شود،

نفوذ عمقی  $P_s$  از مخزن خاک غیراشباع وارد مخزن رواناب کند شده و به عنوان تابع خطی از  $S_u$  با ضریب  $P_{max}$  محاسبه می‌شود:

$$P_s = P_{max} (S_u / S_{fc}) \quad (4)$$

تعرق پتانسیل با توجه به معادله ۵ به تعرق واقعی تبدیل می‌شود:

$$T_a = T_p \cdot \min \left( 1, \frac{S_u}{S_{fc}} \cdot \frac{1}{L_p} \right) \quad (5)$$

که در آن  $L_p$  آستانه تعرق می‌باشد.

#### ۲-۳-۳- سیستم انتقال

همانطور که در شکل ۲ دیده می‌شود دو تابع زمان تأخیر برای دو مخزن مدل وجود دارد که از توزیع مثلثی برخوردار بوده و وزن آن‌ها به صورت خطی افزایش می‌یابد. این توابع برای انحراف جریان‌های  $P_s$  و  $R_s$  که وارد مخزن رواناب کند و  $R_f$  که وارد مخزن رواناب سریع می‌شود، استفاده شده و عمدتاً زمان تأخیر سیستم و شبیه‌سازی بازوی بالارونده هیدروگراف را کنترل می‌کنند. مخازن رواناب سریع و کند، مخازن خطی بوده که با ضرایب مقیاس زمانی به ترتیب  $K_f$  و  $K_s$  تعریف می‌شوند. معادلات زهکشی ۶ و ۷ برای این دو مخزن بیان شده است:

$$Q_f = S_f / K_f \quad (6)$$

$$Q_s = S_s / K_s \quad (7)$$

به طوری که  $Q_f$  و  $Q_s$  به ترتیب رواناب مخازن سریع و کند و  $S_f$  و  $S_s$  به ترتیب ذخیره مخازن سریع و کند می‌باشند. این مخازن بیشتر شبیه‌سازی بازوهای برگشتی هیدروگراف را به عهده دارند. مدل شامل ده پارامتر بوده که مقادیر نهایی آن‌ها از طریق واسنجی تعیین می‌شود. باتوجه به کوهستانی بودن حوضه مورد مطالعه ساختار مدل بایستی تغییر کرده و مخزن برف نیز به آن اضافه گردد که در ادامه به شرح این مخزن پرداخته می‌شود.

#### ۲-۳-۴- مخزن برف

بارش می‌تواند در مخزن برف یا Interception ذخیره شود قبل از اینکه به مخزن خاک غیراشباع برسد. برف نقش مهمی در زمستان و بهار بازی کرده در حالی که Interception در تابستان و پاییز اهمیت بیشتری دارد. زمانی که دمای هوا  $T$  از درجه حرارت آستانه  $T_{th}$  بیشتر است بارش به مخزن Interception رسیده و پوشش برفی وجود ندارد. وقتی که میانگین دمای روزانه کمتر از  $T_{th}$  باشد، بارش به صورت ذخیره برف بوده که معمولاً در زمستان رخ می‌دهد. زمانی که پوشش برف وجود داشته و دمای هوا بالای دمای بحرانی است، بارش مؤثر

هنگامی که در حداقل یک تابع هدف 91 بهتر از 92 باشد. ۲- مجموعه راه‌حل‌های بهینه پرتو آن راه‌حل‌هایی هستند که توسط هیچ راه‌حل دیگری در فضای ممکن مغلوب نگردند. به مجموعه راه‌حل‌های بهینه پرتو در فضای تابع هدف جبهه بهینه پرتو گفته می‌شود. تمامی راه‌حل‌ها در جبهه پرتو ارزش یکسانی دارند و نمی‌توان گفت کدام راه‌حل از دیگری بهتر است. در این حالت با در نظر گرفتن محدودیت‌های موجود در توابع هدف به چندین روش می‌توان بهترین راه‌حل بهینه را تخمین زد. در این مطالعه روش مورد استفاده برای انتخاب بهترین راه‌حل بهینه، فاصله از آرمان بوده که با در نظر گرفتن نقطه آرمان صفر، همان فاصله اقلیدسی  $D_E$  حاصل می‌گردد. هر کدام از پاسخ‌های بهینه که کمترین فاصله اقلیدسی را از مبدأ یعنی نقطه صفر و صفر داشته باشد، بهترین راه‌حل بهینه برای پارامترها می‌باشد.

$$D_E = \sqrt{(1 - NS)^2 + (1 - NS_{log})^2} \quad (11)$$

#### ۲-۵- آماده‌سازی داده‌های ورودی به مدل FLEX

داده‌های ورودی به مدل شامل بارش، درجه حرارت هوا، تبخیر-تعرق پتانسیل و دبی مشاهده‌ای می‌باشد. همانطور که قبلاً گفته شد از داده‌های پایگاه CRU به عنوان ورودی‌های هواشناسی مدل استفاده گردید که با توجه به هم‌پوشانی با داده‌های رواناب مشاهده‌ای روزانه، سال‌های ۱۹۷۱ تا ۱۹۷۹ مدنظر قرار گرفت براساس طول و عرض جغرافیایی منطقه مورد مطالعه، تعداد ۳۲ واحد ایستگاه CRU در حوضه قرار دارد که هر کدام دارای بارش و درجه حرارت متفاوت است. به همین منظور بایستی میانگین وزنی آن‌ها که نسبت مساحت حوضه در هر واحد به مساحت کل حوضه است، محاسبه گردد. به این ترتیب میانگین بارش سالانه و میانگین دمای هوا به ترتیب برابر ۳۰۹ میلی‌متر و ۸/۳ درجه سلسیوس حاصل می‌گردد. با توجه به این که یکی دیگر از ورودی‌های مدل تبخیر-تعرق پتانسیل می‌باشد، از روش هارگریوز-سامانی استفاده گردید. (Allen et al. (1998 پیشنهاد کردند در شرایطی که تمام داده‌های معتبر مورد نیاز حل معادله پنمن-مانتیت موجود نباشد، از معادله هارگریوز استفاده شود. این معادله به دلیل کم بودن داده‌های ورودی مورد نیاز و سادگی آن، قابل توجه می‌باشد (Majidi and Alizadeh, 2012). معادله استفاده شده در این مطالعه به صورت رابطه ۱۲ بیان شده است:

$$Et_0 = 0.0023 \times 0.408 \times R_a \times (T_{max} - T_{min})^{0.5} \times \left( \frac{T_{max} + T_{min}}{2} + 17.8 \right) \quad (12)$$

که در آن،  $T_{max}$  و  $T_{min}$  به ترتیب دمای روزانه حداکثر و حداقل (°C)،  $R_a$  تابش برون زمینی ( $Mj/m^2/day$ ) و  $Et_0$  تبخیر-تعرق مرجع

۴- اعضای نامغلوب جمعیت جداسازی و در مخزن ذخیر می‌شود، ۵- هر ذره از میان اعضای مخزن یک رهبر انتخاب کرده و حرکت خود را انجام می‌دهد، ۶- بهترین تجربه شخصی هر کدام از ذرات به‌روز می‌شوند، ۷- اعضای نامغلوب جدید به مخزن افزوده می‌شوند، ۸- اعضای مغلوب مخزن حذف می‌شوند و ۹- در صورتی که شرایط خاتمه محقق نشده است از شماره ۵ به بعد الگوریتم تکرار می‌شود. در مطالعه حاضر تعداد ذرات، اندازه مخزن و تعداد تکرار ۱۰۰۰ مورد در نظر گرفته شد.

#### ۲-۴-۲ تابع هدف

واستجی مدل مستلزم بهینه کردن یک تابع هدف است، تابع هدف به کار گرفته شده در مطالعه حاضر، ضریب نش-ساتکلیف  $(NS)^y$  بوده (معادله ۹) که در مباحث منابع آب بارها مورد توجه قرار گرفته است. دامنه تغییرات این ضریب بین  $-\infty$  و ۱ بوده که در حالت ایده‌آل به مقدار ۱ می‌رسد:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_0^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - Q_0)^2} \quad (9)$$

که در آن  $Q_m$ ،  $Q_0$  و  $\bar{Q}_0$  به ترتیب رواناب شبیه‌سازی شده توسط مدل، رواناب مشاهده‌ای و میانگین رواناب مشاهده‌ای و  $T$  طول سری زمانی است. در مطالعه پیش‌رو به دلایلی که در قسمت بحث و نتایج به آن پرداخته می‌شود تابع هدف دیگری به نام  $NS-log$  نیز استفاده گردید که در واقع لگاریتم مقادیر رواناب‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در ضریب نش می‌باشد. بنابراین فرآیند بهینه‌سازی با دو تابع هدف  $NS-log$  و  $NS$  و الگوریتم MOPSO صورت گرفت.

#### ۲-۴-۳ جبهه پرتو

در مسائل چند هدفه به جای یک تابع هدف، چندین تابع هدف باید به صورت هم‌زمان بهینه شوند. در چنین شرایطی معمولاً مسأله دارای بیش از یک جواب بهینه خواهد بود که به آن‌ها جواب‌های بهینه پرتو گفته می‌شود. مفهوم پرتو به صورت زیر شرح داده می‌شود (Madsen, 2000):

$$\text{Min} \{F_1(\theta), F_2(\theta), \dots, F_m(\theta)\} \quad \theta \in \Theta \quad (10)$$

به طوری که راه‌حل  $\theta$  برداری از پارامترهای مدل بوده که در فضای ممکن پارامتر، محدود شده است. توابع هدف  $F_i(\theta)$ ،  $i = 1 \dots m$  اسکالرهایی هستند که عملکرد مدل را با توجه به واستجی اهداف انتخابی بازتاب می‌کنند. مقادیر کمتر آن‌ها نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل می‌باشد. مفهوم پرتو به صورت بهینه براساس تعریف غالب بودن بوده و عبارت است از ۱- راه حل  $\theta_1$  بر راه‌حل  $\theta_2$  غلبه کرده

در جریان‌های پایین در همه سال‌ها طی فصل پاییز، روند رواناب‌های مشاهده‌ای و مدل‌سازی شده برعکس می‌باشد. باتوجه به اینکه تابع هدف به کار رفته در این مطالعه ضریب نش بوده و اختلاف جریان‌ها در صورت کسر به توان دو می‌رسد، در جریان‌های پایین که اختلاف رواناب مشاهده‌ای و مدل‌سازی شده زیاد است، خطای موجود به توان دو رسیده و دقت مدل را کاهش می‌دهد بنابراین لگاریتم جریان در نظر گرفته شد و تابع هدف NS-log علاوه بر ضریب نش به مدل اضافه گردید. مجدداً واسنجی مدل یکپارچه، با دو تابع هدف و روش مونت کارلو صورت گرفت که نتایج آن در شکل ۴ مشاهده می‌شود. باتوجه به شکل به نظر می‌رسد استفاده از لگاریتم جریان به عنوان تابع هدف تأثیر مثبتی در فرایند واسنجی داشته به طوری که مقادیر  $NS = 0/78$  و  $NS-log = 0/84$  می‌گردد. همچنین رواناب‌های مدل‌سازی شده در جریان‌های پایین که در فصل پاییز وجود دارند به مقادیر مشاهده‌ای نزدیک‌تر گردیده و رواناب جریان‌های بالا نیز نسبت به حالت قبل افزایش یافته است.

در ادامه با توجه به تغییرات توزیع برف در ارتفاعات حوضه، مدل به صورت نیمه‌توزیعی نیز واسنجی گردید. با توجه به اینکه در حالت نیمه‌توزیعی ساختار مدل پیچیده‌تر شده و تعداد تکرار روش مونت کارلو یک میلیون بار است، زمان اجرای مدل طولانی‌تر شده و برای جلوگیری از اتلاف زمان، از الگوریتم بهینه‌سازی MOPSO جهت واسنجی پارامترهای مدل استفاده گردید. نتایج مدل نیمه‌توزیعی FLEX<sup>D</sup> با دو تابع هدف در شکل ۵ دیده می‌شود.

همانطور که در شکل ۵ دیده می‌شود مقادیر رواناب مشاهده‌ای و مدل‌سازی شده به هم نزدیک شده و مقدار دو تابع هدف NS- و NS-log به ترتیب برابر ۰/۸۶ و ۰/۹۲ می‌باشد که نسبت به نتایج FLEX<sup>L</sup> افزایش یافته‌اند. مقادیر رواناب با خط یک به یک نیز مقایسه شد که نتایج آن در شکل ۶ ارائه شده است. باتوجه به شکل، به نظر می‌رسد داده‌ها پراکندگی مناسبی اطراف خط یک به یک داشته و ضریب رگرسیون ۰/۸۶ نیز تطابق آن‌ها را تأیید می‌کند. همچنین براساس نتایج جدول Anova مقادیر P-value شیب خط و عرض از مبدأ کمتر از ۰/۰۱ بوده که نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار آن‌ها با خط یک به یک در سطح ۹۹ درصد می‌باشد. مقادیر رواناب مدل‌سازی شده در شکل ۵ از پارامترهای بهینه‌ای به دست آمده‌اند که کمترین فاصله اقلیدسی را نسبت به سایر نقاط روی جبهه‌ی پرتو داشته‌اند. با توجه به این که نقاط روی جبهه پرتو همگی جزو بهترین جواب‌ها هستند، بنابراین بازه نهایی هر پارامتر باتوجه به تغییرات نقاط روی جبهه حاصل می‌گردد که در جدول ۱ مقادیر آن قابل مشاهده است.

می‌باشد. میانگین تبخیر-تعرق محاسبه شده در این مطالعه براساس روش هارگریوز سامانی برابر ۳/۱ میلی‌متر بر روز می‌باشد.

باتوجه به اینکه در مدل یکپارچه، توزیع برف و بارندگی سرتاسر حوضه یکسان در نظر گرفته می‌شود و تغییرات ارتفاعی حوضه بین ۱۰۰۰ تا ۴۵۰۰ متر متغیر است بنابراین به نظر می‌رسد بایستی حوضه به چند ناحیه ارتفاعی تقسیم شده و در هر ناحیه شبیه‌سازی مخزن برف صورت گیرد. به همین منظور نقشه DEM منطقه با وضوح مکانی ۹۰×۹۰ متر از سایت <http://www.diva-gis.org/datadown> دانلود و براساس آن حوضه به هفت ناحیه ارتفاعی با گام‌های ۵۰۰ متری تقسیم گردید. باتوجه به این که مقدار ذوب برف در هر ناحیه ارتفاعی باید مشخص شود بنابراین مخزن برف مدل در هر ناحیه به صورت جداگانه شبیه‌سازی می‌گردد. به این ترتیب مدل حالت نیمه‌توزیعی (FLEX<sup>D</sup>) پیدا کرده و شامل هفت مخزن برف می‌باشد. همان‌طور که قبلاً گفته شد ۳۲ پایگاه CRU در منطقه مطالعاتی قرار داشته که درصدی از مساحت هر یک از آن‌ها در هر ناحیه ارتفاعی واقع می‌شوند. به طور مثال در ناحیه ارتفاعی یک که ارتفاع آن بین ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ متر می‌باشد ۱۰ واحد CRU قرار دارد که درصد مساحت هر واحد نسبت به مساحت کل ناحیه ارتفاعی در محیط نرم‌افزار ArcGIS تعیین می‌شود. بنابراین در هر ناحیه میانگین وزنی داده‌های بارش، دما و تبخیر-تعرق با در نظر گرفتن وزن هر واحد در آن ناحیه محاسبه می‌گردد. پس از اجرای مخزن برف در هر ناحیه ارتفاعی، مقادیر ذوب و بارندگی کل حوضه با استفاده از روابط ۱۳ و ۱۴ به دست می‌آید:

$$M_t = w_1 \cdot M_1 + w_2 \cdot M_2 + \dots + w_7 \cdot M_7 \quad (13)$$

$$R_t = w_1 \cdot R_1 + w_2 \cdot R_2 + \dots + w_7 \cdot R_7 \quad (14)$$

که  $M_1$ ،  $M_2$  و  $M_7$  ذوب برف در هر ناحیه ارتفاعی،  $M_t$  ذوب برف در کل حوضه و  $w$  وزن هر ناحیه بوده که از تقسیم مساحت آن ناحیه به مساحت کل حوضه حاصل می‌گردد.  $R$  نشان‌دهنده بارندگی هر ناحیه بوده که میانگین وزنی آن در کل حوضه محاسبه می‌شود.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- نتایج واسنجی مدل روزانه

نتایج واسنجی مدل به صورت یکپارچه (FLEX<sup>L</sup>)، با در نظر گرفتن تنها یک تابع هدف و روش نمونه‌گیری مونت کارلو به صورت روزانه طی سال‌های ۱۹۷۱ تا ۱۹۷۹ در شکل ۳ قابل مشاهده است. همان‌طور که دیده می‌شود دقت مدل در برآورد جریان‌های بالا و پایین چندان مورد قبول نبوده است و ضریب نش برابر ۰/۷۴ می‌باشد. به خصوص

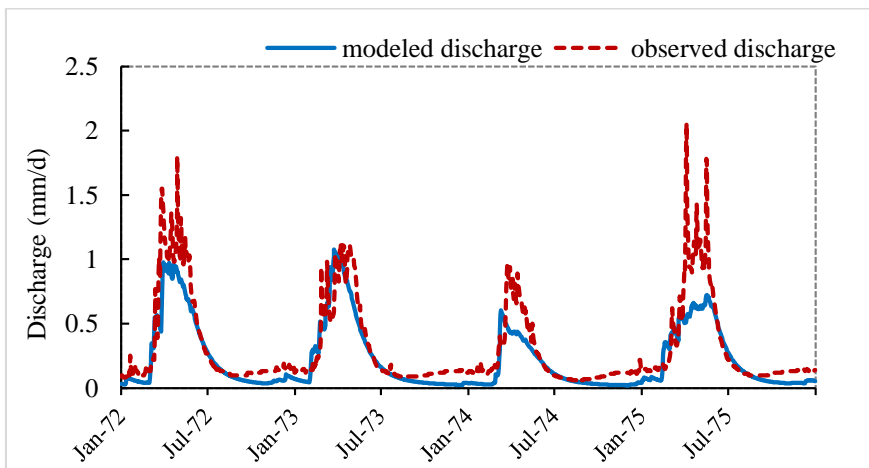


Fig. 3- Observed and simulated discharge of FLEX<sup>L</sup> with single objective function  
 شکل ۳- رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده مدل یکپارچه FLEX<sup>L</sup> با یک تابع هدف

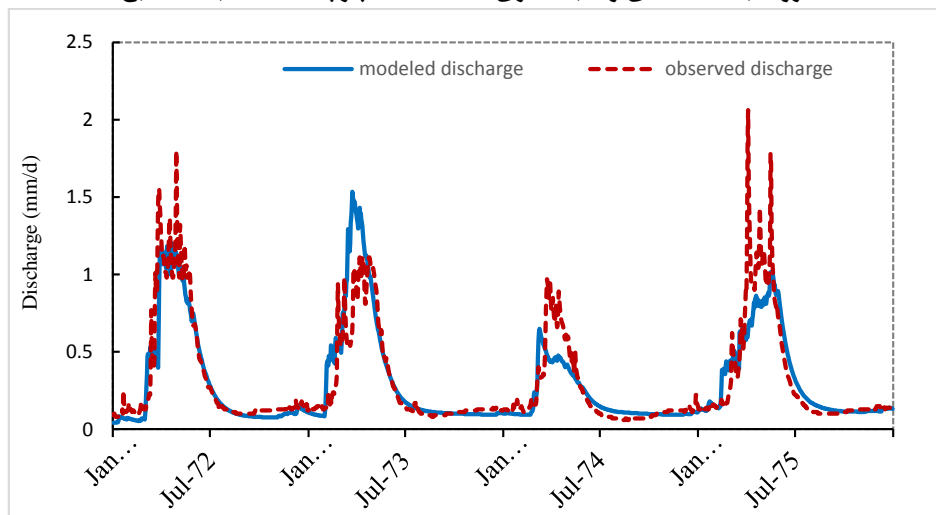


Fig. 4- Observed and simulated discharge of FLEX<sup>L</sup> with two objective functions  
 شکل ۴- رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده مدل یکپارچه FLEX<sup>L</sup> با دو تابع هدف

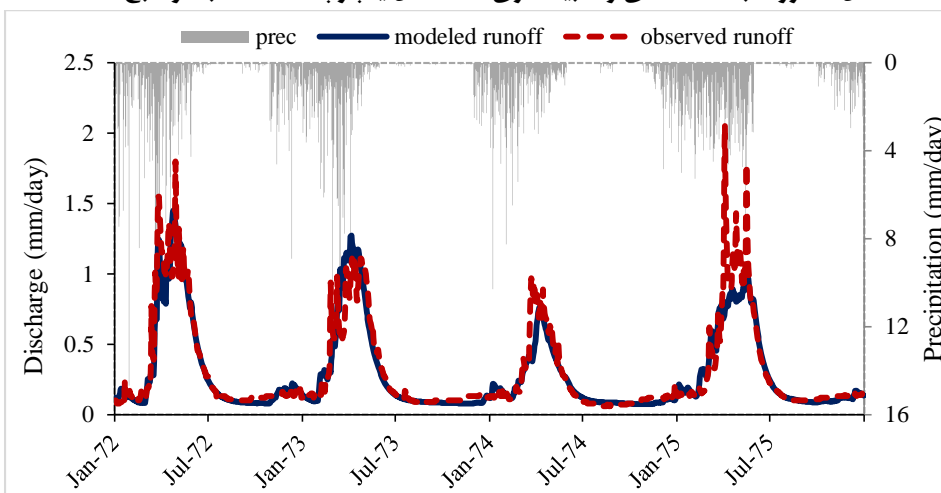


Fig. 5- Observed and simulated discharge of FLEX<sup>D</sup> with two objective functions  
 شکل ۵- رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده مدل نیمه‌توزیعی FLEX<sup>D</sup> با دو تابع هدف



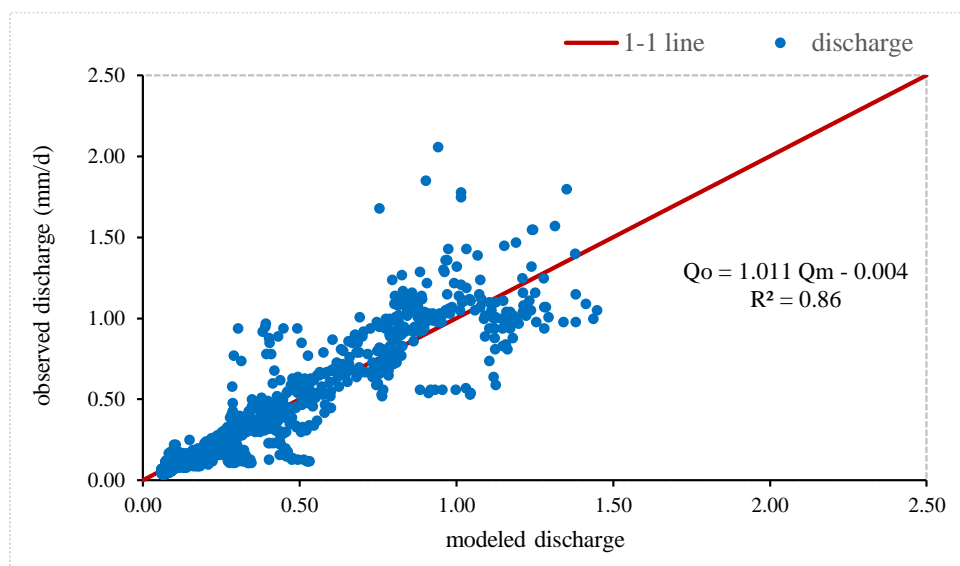


Fig. 6- Comparison of observed and simulated discharge of FLEX<sup>D</sup> with unit line  
 شکل ۶- مقایسه رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده FLEX<sup>D</sup> با خط یک به یک

Table 1- Initial, final and optimum parameter ranges after calibration of FLEX<sup>D</sup>  
 جدول ۱- مقادیر اولیه، نهایی و بهینه پارامترها پس از واسنجی مدل FLEX<sup>D</sup>

Parameter	Initial values	Final values	Optimum parameter
I <sub>max</sub> (mm)	0-2	(0.11-1.34)	0.31
C <sub>e</sub>	0.2-1	(0.59-0.88)	0.77
S <sub>umax</sub> (mm)	40-850	(435-800)	609.20
β	0.2-3	(0.71-1.15)	0.95
P <sub>max</sub> (mm/day)	0.009-0.6	(0.522-0.591)	0.58
T <sub>lag</sub> (day)	0-5	(0.6-4.6)	1.12
K <sub>f</sub>	0.01-0.1	(0.039-0.064)	0.05
K <sub>s</sub>	0.0009-0.01	0.002-0.004	0.0025
T <sub>th</sub> (°C)	-2.5 - 2.5	(-2.42 -0.69)	-1.12
F <sub>dd</sub>	0-5	(0.43-0.84)	0.67

که دلیل عمده آن می‌تواند ناشی از ساختار نیمه‌توزیعی مدل و کیفیت داده‌های ورودی باشد. همانطور که قبلاً گفته شد ۳۲ واحد CRU در منطقه مورد مطالعه قرار گرفته که بایستی میانگین وزنی بارش و دمای آن‌ها در هر ناحیه ارتفاعی محاسبه گردد. بنابراین وزن هر واحد بر روی مقادیر تأثیر گذاشته و اثر سلول‌هایی با بارش بیشتر و وزن کمتر در محاسبات تقلیل می‌یابد. برای رفع این مشکل می‌توان ساختار مدل را توزیعی کرده و در هر واحد آن را واسنجی نمود که باتوجه به تعداد زیاد واحدها و سرعت پایین MATLAB در این پژوهش به آن پرداخته نشده است.

### ۳-۳- نتایج عدم قطعیت رواناب‌های مدل‌سازی شده

در ادامه عدم قطعیت رواناب‌های شبیه‌سازی شده ناشی از انتخاب بازه مناسب برای پارامترها در کل دوره مطالعاتی به سه روش صورت گرفت که عبارتند از: ۱- استفاده از نقاط جبهه پرتو، ۲- استفاده از نقاطی که

### ۳-۲- نتایج صحت‌سنجی مدل روزانه

پس از واسنجی مدل و انتخاب پارامترهای بهینه با استفاده از روش کمترین فاصله اقلیدسی، صحت سنجی آن در سال‌های ۱۹۷۶ تا ۱۹۷۹ به صورت روزانه مورد بررسی قرار گرفت که نتیجه آن در شکل ۷ مشاهده می‌شود. همان‌طور که دیده می‌شود رواناب‌های مشاهداتی و مدل‌سازی شده تطابق نسبتاً خوبی داشته و مقادیر NS-log و NS به ترتیب برابر ۰/۷۶ و ۰/۸۱ می‌گردد. نتایج جدول Anova نیز نشان دهنده عدم اختلاف معنی‌دار شیب خط و عرض از مبدأ با خط یک به یک در سطح ۹۵ درصد می‌باشد. دقت مدل در شبیه‌سازی جریان‌های پایه در حالت صحت‌سنجی بالاتر از حالت واسنجی بوده و روند رواناب مدل‌سازی و مشاهداتی در این جریان‌ها تقریباً مشابه یکدیگر می‌باشد.

با دقت در نتایج واسنجی و صحت‌سنجی دیده می‌شود مدل رواناب‌های اوج را نسبت به دبی‌های پایه با دقت کمتری برآورد کرده

از آن‌ها قابل استناد بوده و فضای بیشتری برای تصمیم‌گیری بر اساس سناریوهای مختلف را فراهم می‌کند که این نتیجه در پژوهش‌های (Gharari et al. (2014) و Liu et al. (2016) نیز دیده می‌شود.

### ۳-۴- نتایج واسنجی مدل ماهانه

ارزیابی رودخانه هیرمند در منطقه مورد مطالعه به علت عدم دسترسی به داده‌های روزانه، چندان مورد توجه نبوده و تنها تعداد کمی از محققین به تخمین ماهانه جریان و استفاده از تکنیک‌هایی همچون تصاویر ماهواره‌ای پرداخته‌اند.

در فاصله ۱/۰۵ برابر کمترین فاصله اقلیدسی (De) قرار دارند، ۳- نقاطی که تنها تحت پوشش یک تابع هدف هستند ( $1-NS \leq 0.2$ ). شکل ۸ نشان‌دهنده نقاط حاصله از این سه روش می‌باشند. نتایج حاصل از عدم قطعیت رواناب‌های شبیه‌سازی شده با توجه به سه روش ذکر شده در شکل‌های ۹ تا ۱۱ ارائه شده است. با توجه به اینکه در این مطالعه دو تابع هدف وجود داشته و نقاط جبهه پرتو سایر نقاط را مغلوب می‌کنند، بنابراین بهتر است به جای یک راه‌حل، مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها را برای هر پارامتر در نظر گرفت و به کمک باند عدم قطعیت، تغییرات رواناب را به ازای آن پارامترها نشان داد. از آنجاکه در هر سه روش مذکور مقادیر توابع هدف بالای ۰/۸ بوده و در مباحث منابع آب مقدار قابل قبولی برای ضریب نش- ساتکلیف می‌باشد، رواناب حاصله

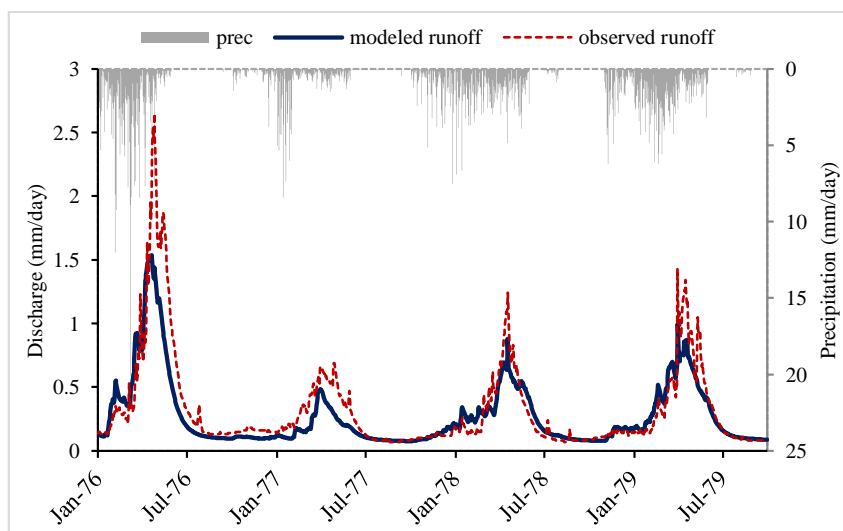


Fig. 7- Observed and modeled discharge after validation of FLEX<sup>D</sup>  
 شکل ۷- رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده پس از صحت‌سنجی FLEX<sup>D</sup>

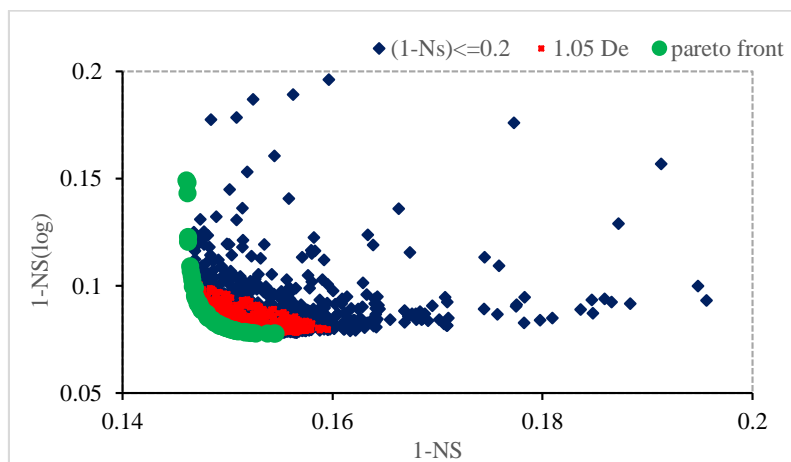


Fig. 8- Comparative analysis of methods for selection of optimum range of parameters  
 شکل ۸- مقایسه روش‌های مورد استفاده برای انتخاب بازه بهینه پارامترها

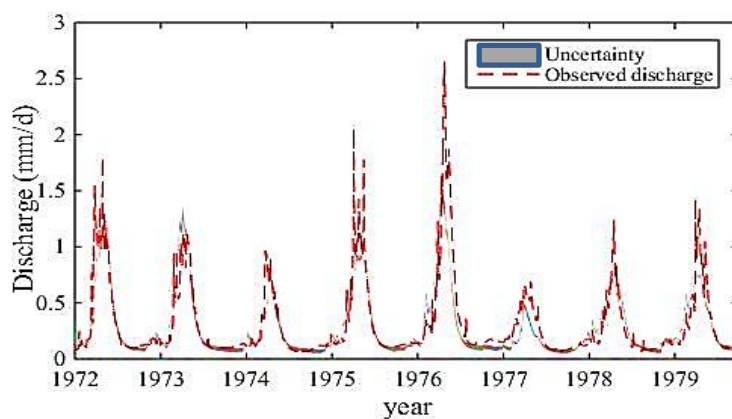


Fig. 9- The uncertainty of simulated discharge based on Pareto front

شکل ۹- عدم قطعیت رواناب‌های شبیه‌سازی شده با توجه به جبهه پرتو

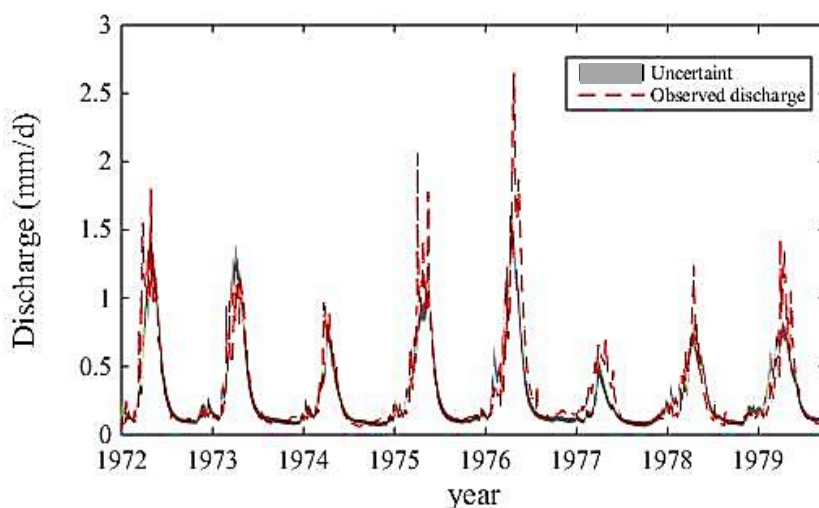


Fig. 10- The uncertainty of simulated discharge based on 1.05 De

شکل ۱۰- عدم قطعیت رواناب‌های شبیه‌سازی شده براساس نقاط با فاصله  $1/0.5$  De

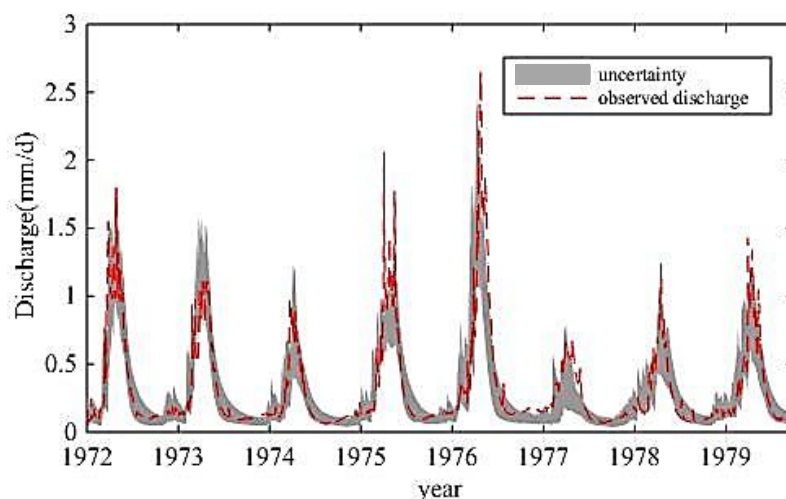


Fig. 11- The uncertainty of simulated discharge based on single objective function

شکل ۱۱- عدم قطعیت رواناب‌های شبیه‌سازی شده براساس یک تابع هدف

بالا بردن دقت مدل در تخمین رواناب‌های پیک، ساختار آن را از حالت نیمه‌توزیعی به توزیعی تغییر داد و نتایج حاصل از آن را بررسی نمود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

رودخانه هیرمند اصلی‌ترین منبع تأمین آب دشت سیستان در ایران بوده و نقش به‌سزایی در تأمین نیازهای شرب، کشاورزی و محیط زیست مردم در این ناحیه دارد. از طرفی ارزیابی پتانسیل منابع آب رودخانه هیرمند نیاز به استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی بارش-رواناب دارد. به همین منظور در این مطالعه رابطه بارش-رواناب حوضه بالادست هلمند با استفاده از مدل مفهومی FLEX در ترکیب با بهینه‌سازی چند هدفه در مقیاس روزانه شبیه‌سازی گردید. نتایج زیر از این تحقیق حاصل گردید:

- نتایج واسنجی مدل به صورت یکپارچه (FLEX<sup>L</sup>) و با در نظر گرفتن یک تابع هدف از دقت بالایی برخوردار نبوده و دبی جریان‌های پایین و بالا با اختلاف نسبتاً زیادی نسبت به داده‌های مشاهداتی برآورد می‌گردد.
- با افزودن تابع هدف دوم به صورت لگاریتم جریان در ضریب نش-ساتکلیف، از خطای بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در جریان‌های پایین نیز لگاریتم گرفته شده و عملکرد مدل افزایش می‌یابد.
- با توجه به یکسان نبودن توزیع برف و بارش در سرتاسر حوضه، تغییرات ارتفاعی در آن منظور گردید و ضرایب آماری NS، NS-log و R<sup>2</sup> به ترتیب برابر ۰/۸۶، ۰/۹۲ و ۰/۸۶ به دست آمد که نشان‌دهنده عملکرد بالایی مدل نیمه‌توزیعی مدل FLEX<sup>D</sup> می‌باشد.

باتوجه به نتایج رضایت‌بخش مدل در مقیاس زمانی روزانه، واسنجی و صحت‌سنجی آن به صورت ماهانه نیز صورت گرفت که نتایج آن در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود. بالا بودن معیارهای آماری NS و R<sup>2</sup> به ترتیب برابر ۰/۹۱ و ۰/۹۰ در حالت واسنجی و ۰/۸۱ و ۰/۸۵ در حالت صحت‌سنجی نشان‌دهنده عملکرد بالایی مدل می‌باشد. نتایج حاصل با مطالعه (Hajihoseini et al. (2015 نیز مقایسه گردید که با استفاده از مدل SWAT به ارزیابی ماهانه حوضه پرداخته و ضرایب NS و رگرسیون را در دو حالت واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب برابر ۰/۷۶، ۰/۷۵، ۰/۸۴ و ۰/۸۲ گزارش نمودند. بنابراین به نظر می‌رسد مدل FLEX<sup>D</sup> با ساختاری ساده‌تر نسبت به SWAT نتایج بهتری را نشان داده است. همچنین با مقایسه ضرایب آماری روزانه و ماهانه مدل، می‌توان نتیجه گرفت مدل مقادیر ماهانه را بهتر از رواناب‌های روزانه شبیه‌سازی نموده است.

با توجه به افزایش تعداد و طول دوره‌های خشکسالی در دهه‌های اخیر در دشت سیستان ایران که در پایین دست حوضه هلمند می‌باشد، شبیه‌سازی رابطه بارش رواناب که از ارکان اصلی خشکسالی هیدرولوژیکی است، ضروری می‌باشد. به همین منظور مدل نیمه‌توزیعی FLEX<sup>D</sup> باتوجه به نتایج رضایت‌بخش آن، جهت تخمین رواناب در حوضه مورد مطالعه پیشنهاد می‌گردد. نظر به اینکه در حوضه پایین دست هلمند، مشکل دسترسی به داده‌های روزانه رواناب وجود داشته و عملکرد مدل در مقیاس ماهانه بهتر از روزانه می‌باشد، بنابراین ساختار ماهانه مدل جهت مطالعات خشکسالی و تغییر اقلیم در دوره‌های طولانی مدت می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در ادامه می‌توان جهت

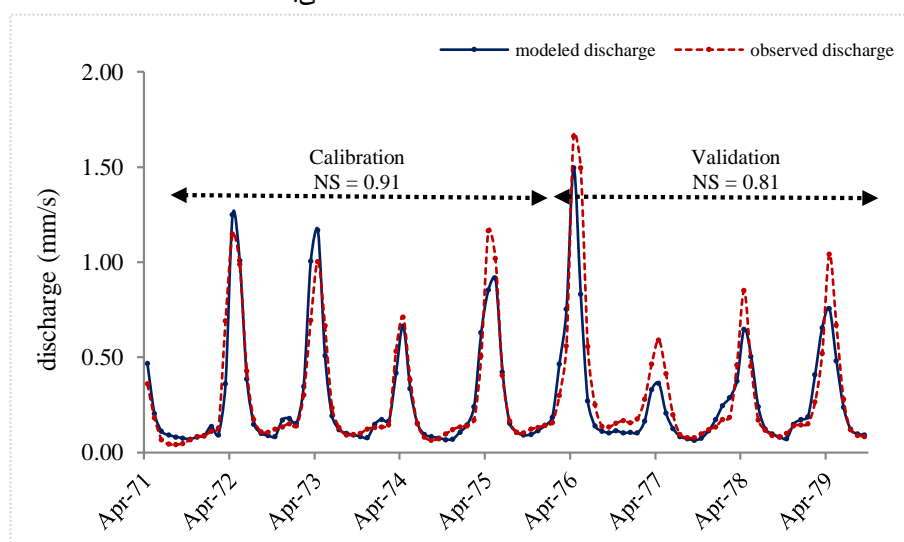


Fig. 12- Comparison of monthly calibration and validation results of FLEX<sup>D</sup> model  
شکل ۱۲- مقایسه نتایج واسنجی و صحت‌سنجی ماهانه مدل FLEX<sup>D</sup>

- Ashraf Vaghefi S, Abbaspour N, Kamali B and Abbaspour K C (2017) A toolkit for climate change analysis and pattern recognition for extreme weather conditions—Case study: California-Baja California Peninsula. *Environmental Modeling & Software* 96:181-198
- Burger A S (2005) Calibration of a precipitation runoff model for the Hirmand River in Afghanistan and Iran using remote sensing data. M.Sc. Thesis, Department of Water Management, Delft University of Technology
- Carrie M V, Jacobs J M (2011) Snowpack and runoff generation using AMSR-E passive microwave observations in the Upper Helmand Watershed, Afghanistan. *Remote Sensing of Environment* 115:3313-3321
- Coello C A (2004) Handling multiple objectives with particle swarm optimization. *IEEE Transaction on Evolutionary Computation* 8:256-279
- Cooper V A, Nguyen V T V and Nicell J A (2007) Calibration of conceptual rainfall-runoff models using global optimization methods with hydrologic process-based parameter constraints. *Journal of Hydrology* 334(3-4):455-466
- Favre R, Kamal G M (2004) Watershed atlas of Afghanistan: Kabul, Afghanistan. Information Management Service, 183p
- Fenicia F, Savenije H H G, Matgen P and Pfister L (2006) Is the groundwater reservoir linear? Learning from data in hydrological modeling. *Hydrology and Earth System Sciences* 10:139-150
- Fenicia F, Savenije H H G, Matgen P and Pfister L (2007) A comparison of alternative multiobjective calibration strategies for hydrological modeling. *Water Resources Research* 43:1-16
- Foglia L, Hill M C, Mehl S W and Burlando P (2009) Sensitivity analysis, calibration, and testing of a distributed hydrological model using error-based weighting and one objective function. *Water Resources Research* 45:1-18
- Gao H, Ding Y, Zhao Q, Hrachowitz M and Savenije H H G (2017) The importance of aspect for modeling the hydrological response in a glacier catchment in Central Asia. *Hydrological Processes* 31(16):2842-2859
- Gharari S, Hrachowitz M, Fenicia F, Gao H and Savenije H H G (2014) Using expert knowledge to increase realism in environmental system models can dramatically reduce the need for calibration. *Hydrology and Earth System Sciences* 18:4839-4859
- Hajihoseini H, Hajihoseini M, Morid S, Delavar M and Booi M J (2016) Hydrological assessment of the
- با توجه به پیچیده شدن ساختار مدل و اینکه در روش مونت کارلو تعداد تکرار حداقل یک میلیون بار است، زمان اجرای مدل طولانی شده و الگوریتم MOPSO جایگزین روش مونت کارلو گردید.
- بر اساس این که نقاط روی جبهه پرتو همگی جزو بهترین راه حل ها هستند بنابراین برای هر پارامتر مدل، بازه بهینه ای تعریف شد و بر اساس کمترین فاصله اقلیدسی با نقطه آرمان (۰،۰)، مقادیر پارامترهای بهینه به دست آمدند.
- عدم قطعیت رواناب های شبیه سازی شده بر اساس روش های مختلف برای پیدا کردن بازه بهینه هر پارامتر، ارزیابی گردید و باتوجه به بالا بودن ضریب نش- ساتکلیف در همه روش ها، رواناب حاصله از آن ها قابل استناد بوده و فضای بیشتری برای تصمیم گیری بر اساس سناریوهای مختلف را فراهم می کند.
- باتوجه به عدم دسترسی به داده های روزانه در پایین دست حوضه هلمند و همچنین عملکرد بالای مدل در مقیاس ماهانه نسبت به روزانه، ساختار ماهانه مدل جهت مطالعات خشکسالی و تغییر اقلیم می تواند مورد استفاده قرار گیرد.
- مدل FLEX<sup>D</sup> باتوجه به نتایج رضایت بخش آن در دو مقیاس روزانه و ماهانه و همچنین ساختار کاربر دوست تر در مقایسه با سایر مدل های استفاده شده در حوضه مورد مطالعه، جهت برآورد رواناب توصیه می گردد. همچنین در تحلیل های خشکسالی و تغییر اقلیم باتوجه به طولانی بودن سری زمانی و عدم دسترسی کافی به داده های روزانه، می توان از نتایج ماهانه مدل استفاده نمود. در ادامه پیشنهاد می گردد جهت بالا بردن دقت مدل FLEX در برآورد رواناب های بالا، نتایج آن به صورت توزیعی نیز برآورد گردد.

#### پی نوشت ها

- 1-Climatic Research Unit
- 2-Climate Change Toolkit
- 3-Unsaturated Soil Reservoir
- 4-Fast Reservoir
- 5-Slow Reservoir
- 6-Multi-Objective Particle Swarm Optimization
- 7-Nash-Sutcliffe Efficiency

#### ۵- مراجع

- Allen R G, Pereira L S, Raes D and Smith M (1998) Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements, FAO irrigation and drainage paper No 56. Food and Agriculture Organisation, Land and Water. Rome, Italy, 326p

- techniques to calibrate a conceptual hydrological model using in situ runoff and daily GRACE data. *Computational Geosciences* 22:789-814
- Reddy M J, Kumar D N (2007) Multi-objective particle swarm optimization for generating optimal trade-offs in reservoir operation. *Hydrological Processes* 21:2897-2909
- Rezaei H, Jabbari A, Behmanesh J and Hessari B (2017) Modeling the runoff of Nazloo Chai watershed at the west side of Uremia Lake by the use of Tank model. *Journal of water and Soil Conservation* 23(6):123-141 (In Persian)
- Roodari A, Hassanpour F, Yaghobzadeh M and Delavar M (In Press) The investigation of relation between hydrological and meteorological droughts in Sistan Plain. *Journal of Environmental of Science and Technology* (In Persian)
- Savenije H H G (2010) Topography driven conceptual modeling (FLEX-Topo). *Hydrology and Earth System Sciences* 14:2681-2692
- Sibert J (1997) Estimation of parameter uncertainty in the HBV model. *Nordic Hydrology* 28:247-262
- Sorooshian S and Gupta V K (1983) Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: The question of parameters observability and uniqueness. *Water Resources Research* 19(1):260-268
- Tekleab S, Uhlenbrook S, Savenije H H G, Mohamed Y and Menninger J (2015) Modeling rainfall-runoff processes of the Chemoga and Jedeb meso-scale catchments in the Abay/Upper Blue Nile basin, Ethiopia. *Hydrological Sciences Journal* 60(11):2029-2046
- Tiedeman C R, Green C T (2013) Effect of correlated observation error on parameters, predictions and uncertainty. *Water Resources Research* 49:6339-6355
- U. S. Agency for International Development (1976) Helmand River Basin-Soil and water survey study report. Open-File Report in Kabul, Afghanistan, 180p
- Uhlenbrook S, Roser S and Tilch N (2004) Hydrological process representation at the meso-scale: The potential of a distributed conceptual catchment model. *Journal of Hydrology* 291:278-296
- Zhang C, Wang R and Meng Q (2015) Calibration of conceptual rainfall-runoff models using global optimization. *Advances in Meteorology* 2015:1-12
- 1973 treaty on the Transboundary Helmand River, using the SWAT model and global climate database. *Journal of Water Resources Management* 30(13):4681-4694
- Hajihoseini H, Hajihoseini M, Najafi A, Morid, S and Delavar, M (2015) Assessment of changes in hydro-meteorological variables upstream of Helmand Basin during the last century using CRU data and SWAT model. *Iran-Water Resources Research* 10(3):38-52 (In Persian)
- Hrachowitz M, Savenije H H G, Bogaard T A, Tetzlaff D and Soulsby C (2013) What can flux tracking teach us about water age distribution patterns and their temporal dynamics?. *Hydrology and Earth System Sciences* 17:533-564
- Khazaei M R, Zahabiyoun B and Saghafian B (2009) Automatic calibration of the ARNO conceptual Rainfall-Runoff model. *Iran-Watershed Management Science & Engineering* 3(8):21-28 (In Persian)
- Li Xuyong, Weller D E and Jordan T E (2010) Watershed model calibration using multi-objective optimization and multi-site averaging. *Journal of Hydrology* 380:277-288
- Liu Y, Lu M, Huo X, Hao Y, Gao H, Liu Y, Fan Y and Metivier F (2016) A Bayesian analysis of generalized Pareto distribution of runoff minima. *Hydrological Processes* 30:424-432
- Lu D, Ye M, Meyer P D, Curtis G P, Shi X, Niu X and Yabusaki S B (2013) Effects of error covariance on estimation of model averaging weights and predictive performance. *Water Resources Research* 49:6029-6047
- Madsen H (2000) Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives. *Journal of Hydrology* 235:276-288
- Madsen H (2003) Parameter estimation in distributed hydrological catchment modeling using automatic calibration with multiple objectives. *Advances in Water Resources* 26:205-216
- Majidi M and Alizadeh A (2012) Analysis of the effect of missing weather data and alternative methods to estimate the reference evapotranspiration and ranking ET0 equation for different climatic conditions (case study: Khorasan Razavi Provinces). *Journal of Water and Soil* 25(6):1503-1519 (In Persian)
- Mostafaie A, Forootan E, Safari A and Schumacher M (2018) Comparing multi-objective optimization