



Detection and Attribution of Climate Change Effects on Inflow to Karaj Dam in the Past Periods

E. Naseri¹, A.R. Massah Bavani^{2*}, T. Saadi³, and S. Javadi⁴

Abstract

One of the most notable consequences of Climate Change is the change in climatic variables and its effects on hydrological variables and water resources. Karaj Dam is one of the profound sources of water and electrical energy for Tehran and Alborz province. Thus, the diagnosis of factors affecting the water resources upstream of the catchment and the runoff entering Karaj dam could be vital for plans and policies for the future periods. One of the best methods for diagnosing the effects of Climate Change on climatic and hydrological variables is Detection and Attribution with an Optimal Fingerprint approach. This research has tried to detect and attribute the ALL, GHG, and NAT signals using simulations from the CanESM-2.0 model. Every signal has been downscaled with the MRQNBC method and then simulated with the SWAT calibrated model for selected signals for the period 1985-2011. Finally, detection and attribution of each signal were performed using the optimal fingerprint method. Results showed that just the GHG signal, showing the globe under the effects of Greenhouse gases (without the other factors) has been detected and attributed and its scaling factor (β) was obtained as 0.76. Two other signals (ALL, NAT) could not be detected and attributed. In other words, the variation in the inflow to the Karaj dam was very likely consonant with the simulated runoff under the GHG signal only.

Keywords: Climate Change, Detection, Attribution, Optimal Fingerprint, SWAT, MRQNBC, Karaj Dam.

Received: August 13, 2020

Accepted: December 13, 2020

آشکارسازی و نسبت‌دهی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب ورودی به سد کرج در دوره‌های گذشته

عرفان ناصری^۱، علیرضا مساح بوانی^{۲*}، توفیق سعدی^۳ و سامان جوادی^۴

چکیده

یکی از مهم‌ترین پیامدهای تغییر اقلیم و گرمایش جهانی، تأثیر متغیرهای اقلیمی بر متغیرهای هیدرولوژیکی و منابع آب است. سد کرج به عنوان یکی از منابع مهم آب و برق استان‌های تهران و البرز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. لذا شناسایی عوامل مؤثر بر منابع آب حوضه بالادست این سد و رواناب ورودی به آن می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های آبی و مدیریت منابع آب این نقطه از کشور مؤثر باشد. یکی از روش‌های شناسایی اثرات تغییر اقلیم بر متغیرهای هواشناسی و هیدرولوژیکی، آشکارسازی و نسبت‌دهی با روش انگشت نگاشت بهینه است. در این تحقیق سعی شد تا با استفاده از سیگنال‌های ALL، GHG و NAT مستخرج از مدل CanESM-2.0 و ریزمقیاس‌نمایی آنها با رویکرد MRQNBC و رواناب ناشی از متغیرهای اقلیمی برای دوره آماری (۲۰۱۱-۱۹۸۵) به کمک مدل کالیبره شده SWAT مدل‌سازی شود تا به وسیله انگشت نگاشت بهینه، اثرات هر یک از سیگنال‌ها، آشکارسازی و نسبت‌دهی گردد. با توجه به نتایج به دست آمده تنها سیگنال GHG که معرف شرایط جوی کره زمین تحت تأثیر گازهای گلخانه‌ای (بدون لحاظ کردن سایر عوامل) می‌باشد، آشکارسازی و نسبت‌دهی شد و ضریب مقیاس‌ساز (β) آن ۰/۷۶ به دست آمد. در حالی که دو سیگنال دیگر ALL و NAT که به ترتیب جهان را تحت شرایط عادی امروزی و شرایط صرفاً طبیعی (بدون لحاظ نمودن سایر عوامل) شبیه‌سازی نمودند، قابل آشکارسازی و نسبت‌دهی نبودند. به عبارت دیگر تغییرات رواناب ورودی به سد کرج تنها با رواناب شبیه‌سازی شده تحت تأثیر گازهای گلخانه‌ای (به تنهایی) هماهنگی داشت.

کلمات کلیدی: تغییر اقلیم، آشکارسازی، نسبت‌دهی، انگشت نگاشت بهینه، SWAT، MRQNBC، سد کرج.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۵/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۹/۲۳

1- Ph.D. Candidate of Water Resources Engineering, Department of Irrigation and Drainage, Aburairhan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran.

2- Associate Professor, Department of Irrigation and Drainage, Aburairhan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: armassah@ut.ac.ir

3- Ph.D. Graduate, Regional Water Company of Alborz.

4- Associate Professor, Department of Irrigation and Drainage, Aburairhan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: javadis@ut.ac.ir

*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.

۳- دکتری اقلیم‌شناسی در برنامه‌ریزی محیطی، شرکت آب منطقه‌ای البرز.

۴- دانشیار گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

تجربیات جهانی نشان می‌دهد که تغییر اقلیم تأثیر معناداری بر تغییرات درازمدت متغیرهای اقلیمی، چرخه هیدرولوژی و منابع آب داشته است. با توجه به نقش مهم منابع آب در زیست‌بوم‌ها، شناسایی فاکتورهای تغییرات جریان در طول زمان و مکان جهت مدیریت منابع آب امری مهم و ضروری است (Li et al., 2010). برای شناخت و مدل‌سازی جو کره زمین و بررسی تغییرات صورت گرفته ابزار و روش‌های گوناگونی ارائه شده است. مدل‌های گردش عمومی جوی اقیانوسی^۱ و مدل‌های هیدرولوژیکی از این جمله می‌باشند. به کمک این مدل‌ها می‌توان درک بهتری از واکنش^۲ سامانه کره زمین نسبت به عوامل مؤثره^۳ یا واداشت‌های^۴ گوناگون طی دوره‌های مختلف داشت (Velasquez et al., 2019).

مهم‌ترین ابزار شناخت تغییرات اقلیمی صورت گرفته در گذشته، روش‌های آشکارسازی و نسبت‌دهی^۵ می‌باشد. روش‌های آشکارسازی و نسبت‌دهی ابزاری رسمی جهت درک و اثبات دلایل پیچیده این موضوع است. طبق تعریف هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم^۶، "آشکارسازی" عبارت است از فرآیندی که بدون ذکر دلیل، تغییرات اقلیم یا سامانه متأثر از تغییر اقلیم را توسط شاخص‌های آماری تبیین و اثبات می‌کند، در صورتی که به تعریف این سازمان "نسبت‌دهی" فرآیندی است که سهم عوامل مؤثر بر یک تغییر یا رویداد را با سطوح معنی‌داری مختلف آماری نمایش می‌دهد (Cramer et al., 2015). از آنجا که فرآیند نسبت‌دهی مبانی فیزیکی مسأله و ترکیب تحلیل‌های آماری مختلف را نیز در نظر می‌گیرد، این فرآیند از پیچیدگی بیشتری نسبت به آشکارسازی برخوردار است (Hegerl and Zwiers, 2011).

در خصوص آشکارسازی و نسبت‌دهی مطالعات متعددی در سطح جهان صورت گرفته است (Zohrabi et al., 2014)، ولی تنها تعداد محدودی از آنها به آشکارسازی و نسبت‌دهی تغییر اقلیم در سطح حوضه‌ای و منطقه‌ای پرداخته‌اند (Saadi et al., 2016) و از این بین، تنها تعداد انگشت‌شماری این روش را برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر سایر متغیرهای هیدرولوژیکی از جمله رواناب به کار بسته‌اند، از جمله این تحقیقات می‌توان به مطالعه (Mondal and Mujumdar, 2012) اشاره نمود. ایشان با استفاده از روش انگشت‌نگاشت بهینه اقدام به بررسی تغییرات حجم رواناب ناشی از بارش‌های مانسونی بر حوضه ماهاندی هند با مدل بارش روانابی بر اساس برنامه‌ریزی ژنتیک^۷ نمودند و میزان تأثیر بارش‌های مانسونی ناشی از تغییر اقلیم را آشکارسازی و نسبت‌دهی کردند. بر این اساس نتایج تمامی مدل‌های مورد مطالعه آنها در نیمه دوم قرن بیستم هم برای بارش‌ها و هم

سیلاب‌های مانسونی خارج از محدوده مورد انتظار هستند و کاهش حجم سیلاب‌های مانسونی این منطقه به احتمال قطع به یقین (۹۹٪-۹۵٪) ناشی از فعالیت‌های انسانی و تغییر اقلیم می‌باشد. (Forbes et al., 2018) نیز با مطالعه رواناب در ایالات متحده آمریکا طی دوره ۶۰ ساله (۲۰۱۰-۱۹۵۰) دریافتند، میزان تغییرات رواناب در غرب و جنوب این کشور در فصول تابستان و پاییز ناشی از تغییر اقلیم عمومی کره زمین بوده و ارتباطی به تغییرات منطقه‌ای ندارد. به عبارت دیگر دریافتند تغییرات صورت گرفته طی این دوره با تغییرات منطقه‌ای غلظت CO₂، ترکیبات نیتروژن و کاربری اراضی منطقه‌ای ارتباطی نداشته و این تغییرات به تغییر اقلیم جهانی قابل نسبت‌دهی است. همچنین، Shim et al. (2019) با بررسی اثرات عوامل انسانی^۸ و طبیعی بر تغییرات دمای تابستانه در شرق آسیا به وسیله ۶ مدل از سری مدل‌های CMIP5 طی قرن بیستم و تقسیم نمودن این سده به سه دوره مختلف (P1: ۱۹۱۱-۱۹۴۰)، (P2: ۱۹۷۰-۱۹۴۱) و (P3: ۲۰۰۰-۱۹۷۱) دریافتند که گرمایش دوره P1 عمدتاً ناشی از نوسانات طبیعی مربوط به افزایش گازهای گلخانه‌ای و بازگشت اثرات فعالیت‌های آتشفشانی اواخر قرن ۱۹ و ابتدای ۲۰ میلادی بود، در حالی که دوره سرمایشی P2 متأثر از اثرات ترکیبی هواویزه‌های^۹ انسانی و افزایش فوران‌های آتشفشانی در دهه ۱۹۶۰ بود که از گرمایش ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای پیش گرفت. همچنین دوره P3، ترکیب گرمایش ناشی از گازهای گلخانه‌ای است که از اثرات سرمایشی متأثر از هواویزه‌های فعالیت‌ها انسانی فزونی یافت و منجر به گرمایش زمین گردید. اندرکنش^{۱۰} مابین این عوامل مؤثر به وسیله تغییر در چرخه هیدرولوژی، به ویژه در دوره‌های P2 و P3، بر دمای هوای سطحی تأثیرگذار است. در مطالعه‌ای دیگر Wang et al. (2020) با ارائه یک رویکرد جدید مبتنی بر وزنی دهی مجموع نمره معادلات مرزی توزیع تعمیم یافته مقادیر حدی (GEV)، اقدام به تجزیه و تحلیل تأثیرات انسانی را بر مقادیر حدی دما در مقیاس زیرقاره‌ای^{۱۱} نمودند. این پژوهش در مقایسه با مطالعات قبلی، تأثیرات انسانی را در تعداد مناطق کمتری مشاهده نمود که این موضوع احتمالاً ناشی از عدم پوشش فواصل اطمینان در مطالعات موجود است.

در ایران نیز (Zohrabi et al., 2014) با استفاده از توزیع نرمال دو متغیره نوسانات درونی اقلیمی حوضه کارون را به روش آماری آشکارسازی کردند. نتایج حاکی از روند افزایش دما و کاهش بارندگی بود و دما تحت تأثیر تغییر اقلیم قرار گرفته بود. به طوری که تغییرات صورت گرفته طی دوره (۲۰۰۹-۱۹۷۱) خارج از محدوده نوسانات درونی اقلیم قرار گرفت و به این معنی است که تغییر اقلیم سال‌های اخیر بر متغیرهای مورد مطالعه تأثیر داشته است. به علاوه Saadi et al. (2016)، برای اولین بار روش انگشت‌نگاشت بهینه را

برای خروجی‌های مدل‌های فاز پنجم مدل‌های مقایسه‌ای^{۱۲} و داده‌های شبکه‌بندی افرویدیت^{۱۳} در کشور به کار بستند و بارش‌های حدی تجمعی پنج روزه (RX5day) و یک روزه (RX1day) را در حوضه‌های جنوب غربی کشور بررسی نمودند. نتایج نشان داد که سیگنال ترکیبی عوامل انسانی و طبیعی (ALL) قابل آشکارسازی و نسبت‌دهی است. یعنی تغییرات صورت گرفته با تنوع‌پذیری درونی^{۱۴} اقلیم دارای هماهنگی نبوده و خارج از نوسانات طبیعی اقلیم می‌باشد. به علاوه هیچ کدام از تغییرات ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG) و عوامل طبیعی (NAT) به تنهایی قابل آشکارسازی و نسبت‌دهی نبودند. همچنین، Shirazi et al. (2018) در مقاله‌ای مشابه، به منظور نسبت‌دهی بارش‌های حدی از روش انگشت‌نگاشت برای مناطقی از کشور استفاده نمودند. در این پژوهش با استفاده از داده‌های مشاهداتی ۲۸۶ ایستگاه بارانسنجی طی دوره (۲۰۰۵-۱۹۶۶) و داده‌های شبیه‌سازی تحت اثرات انسانی (ANT)، تحت شرایط طبیعی (NAT) و کنترلی مستخرج از مدل MIROC-ESM به این نتیجه رسیدند که در اکثر مناطق مورد مطالعه، مقدار بارش‌های حدی دارای تغییراتی است و بیشتر این تغییرات با روند افزایشی آشکارسازی گردید. به علاوه نسبت‌دهی برای بیشتر مناطق آشکار شده، گویای تغییراتی با روند افزایشی بود. گرچه تا امروز مطالعات مختلفی به آشکارسازی و نسبت‌دهی تغییرات متغیرهای اقلیمی پرداخته‌اند ولی تاکنون آشکارسازی و نسبت‌دهی رواناب به عنوان یک متغیر هیدرولوژیکی که متأثر از چند متغیر اقلیمی دیگر می‌باشد، صورت نگرفته است. همچنین اکثر مطالعات در سطوح بزرگ جغرافیایی و به کمک داده‌های واکاوی^{۱۵} انجام شده است و تأثیر مستقیم تغییرات اقلیمی با داده‌های مشاهداتی ایستگاهی بر رواناب ورودی یک سد مطالعه نشده است، لذا در این پژوهش سعی شده تا برای نخستین بار آشکارسازی و نسبت‌دهی رواناب شبیه‌سازی شده با مدل نیمه‌توزیعی SWAT^{۱۶}، با استفاده از داده‌های مشاهداتی و در مقیاس حوضه‌ای صورت بگیرد.

۲- منطقه مورد مطالعه و جمع‌آوری داده‌ها

محدوده مطالعاتی این پژوهش حوضه بالادست سد کرج (امیرکبیر) است که از لحاظ موقعیت سیاسی و اقتصادی اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. زیرا حجم قابل توجهی از آب شرب و برق مورد نیاز استان‌های تهران و البرز از این سد تأمین می‌گردد. حجم مخزن این سد چند منظوره ۲۰۵ میلیون مترمکعب می‌باشد و طول دریاچه پشت آن ۵/۵ کیلومتر است. حوضه آبخیز سد کرج در مسافت ۲۰ تا ۶۰ کیلومتری شمال غرب تهران و در محدوده جغرافیایی ۳۰'، ۵۰° تا ۳۵'، ۵۰° و عرض جغرافیایی شمالی و ۳۵°، ۵۳' تا ۳۶°، ۱۱' طول شرقی گسترده

است. وسعت حوضه مورد مطالعه در این تحقیق (بخش بالادست سد) ۸۳۲ کیلومتر مربع می‌باشد و رودخانه‌های کرج، شهرستانک، آزادبار، ولایت‌رود، وارنگ‌رود و سیرا مهم‌ترین جریان‌های سطحی حوضه را تشکیل می‌دهند (شکل ۱).

در این مطالعه از داده‌های مشاهداتی روزانه شامل داده‌های ایستگاه‌های همدیدی^{۱۷}، آبسنجی^{۱۸} و بارانسنجی^{۱۹} استفاده شد و با توجه به محدودیت طول دوره آماری مشاهداتی (از زمان شروع) و شبیه‌سازی مدل‌های اقلیمی (تا زمان پایان) دوره ۲۰۱۱-۱۹۸۵ جهت مطالعه و بررسی انتخاب گردید (جدول ۱).

به علاوه به منظور شبیه‌سازی عوامل و سیگنال‌های^{۲۰} تأثیرگذار بر اقلیم منطقه‌ای و جهانی از خروجی‌های^{۲۱} مدل CanESM-2.0 استفاده گردید. این مدل از نسل دوم مدل‌های مرتبط با سامانه‌های کره زمین است که ترکیبی از مدل‌های جوی-اقیانوسی (CanCM4) و مدل‌های کربن اقیانوسی (CMOC) و مدل‌های کربن زمینی (CTEM) را در بر می‌گیرد. این مدل کانادایی یکی از معتبرترین مدل‌ها جهت شبیه‌سازی‌های آب و هوایی کره زمین می‌باشد و شبکه‌بندی آن با دقت ۵۰۰ کیلومتر صورت گرفته است (Scinocca et al., 2016). انتخاب مدل بر مبنای بالاترین ضریب همبستگی میانگین سالانه داده‌ها، از بین تمامی مدل‌های موجود انجام شد (Naseri et al., 2019). شبیه‌سازی‌های تاریخی مورد استفاده در این مطالعه عبارتند از:

سیگنال ALL: در حقیقت اتمسفر جهانی را شبیه‌سازی می‌کند که اتمسفر آن مشابه جهان کنونی است. یعنی جو کره زمین را با در نظر گرفتن تمام عوامل مؤثر موجود شامل عوامل طبیعی (تشنعات خورشیدی و آتشفشان‌ها) و عوامل غیرطبیعی (گازهای گلخانه‌ای و سایر عوامل انسانی) شبیه‌سازی می‌نماید. لذا تغییرات غلظت گازهای گلخانه‌ای و تمام اثرات انسانی و طبیعی موجود از سال ۱۸۵۰ در آن لحاظ شده است، به همین دلیل از اصطلاح همگی یا ALL برای اشاره به این سیگنال استفاده می‌شود.

سیگنال GHG: جوی را شبیه‌سازی می‌کند که متغیرهای آن تنها متأثر از تغییر غلظت گازهای گلخانه‌ای^{۲۲} طی دوره گذشته می‌باشد و سایر عوامل مانند تشنعات خورشیدی، فعالیت‌های آتشفشانی و غیره را در آن لحاظ نمی‌کند و جو کره زمین را فقط متأثر از گازهای گلخانه‌ای در نظر می‌گیرد، به همین علت به این سیگنال اختصاراً GHG یا گازهای گلخانه‌ای گفته می‌شود.

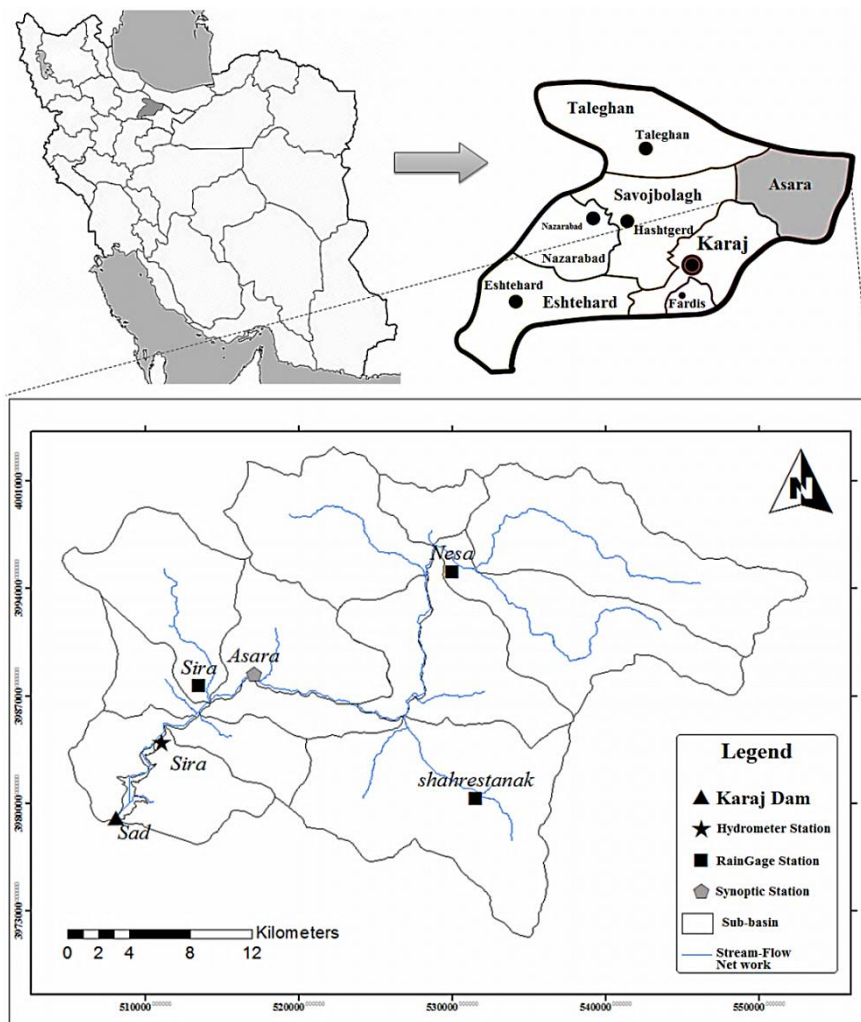


Fig. 1- The study area (Upstream catchment of Karaj dam)
 شکل ۱- محدوده مطالعاتی (حوضه بالادست سد کرج)

Table 1- Information of the observational stations used in the study
 جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های مشاهداتی مورد استفاده در تحقیق

Name of Station	Type of Station Organization	Latitude (°)	Longitude (°)	Elevation (m)	Selected Variable (Unit)		
Asara	Synoptic	51.19	36.04	1864	Precipitation (mm)	Minimum	Maximum
Abali	(Meteorological Organization of Iran)	51.88	35.75	2465		Surface Temperature (C°)	Surface Temperature (C°)
Sira	Rain gage	51.15	36.03	1790	Precipitation (mm)		
Shahrestanak	(Regional Water Company of Alborz)	51.35	35.97	2150			
Nesa	Hydrometer (Regional Water Company of Alborz)	51.33	36.01	2300	Discharge (m ³ /s)		
Sira		51.12	36.01	1790			

تشعشعات خورشیدی و فعالیت‌های خورشیدی می‌باشد. لذا از این سیگنال تحت عنوان NAT یاد می‌شود که معرف عوامل طبیعی یا Natural Forcing می‌باشد.

سیگنال NAT: این سیگنال حاصل شبیه‌سازی اتمسفر جهانی است که در آن هیچگونه گاز گلخانه‌ای وجود ندارد و تأثیر بر تغییر متغیرهای اقلیمی ندارد و جو این جهان صرفاً متأثر از عوامل طبیعی نظیر تغییر

آن علاوه بر کاهش حجم داده‌ها، یک سری زمانی مستقل تصادفی از رواناب‌های شبیه‌سازی شده تحت شرایط پیش از انقلاب صنعتی، برای آزمون باقیمانده‌ها انتخاب می‌شود. به کمک این آزمون می‌توان دریافت که چقدر نتایج به دست آمده از فرآیند آشکارسازی و نسبت‌دهی اعتبار دارد، زیرا شرط اول استفاده از رگرسیون خطی تصادفی بودن باقیمانده‌ها و پیروی از توزیع نرمال می‌باشد. در نهایت پس از اطمینان از اعتبار نتایج، مقادیر ضرایب مقیاس‌ساز حاصل از آشکارسازی و نسبت‌دهی رواناب تحت سیگنال‌های منتخب بررسی شده و با توجه به محدوده تغییرات این ضرایب می‌توان تغییرات صورت گرفته در رواناب حوضه را به سیگنال‌ها مورد مطالعه نسبت‌دهی نمود (شکل ۲).

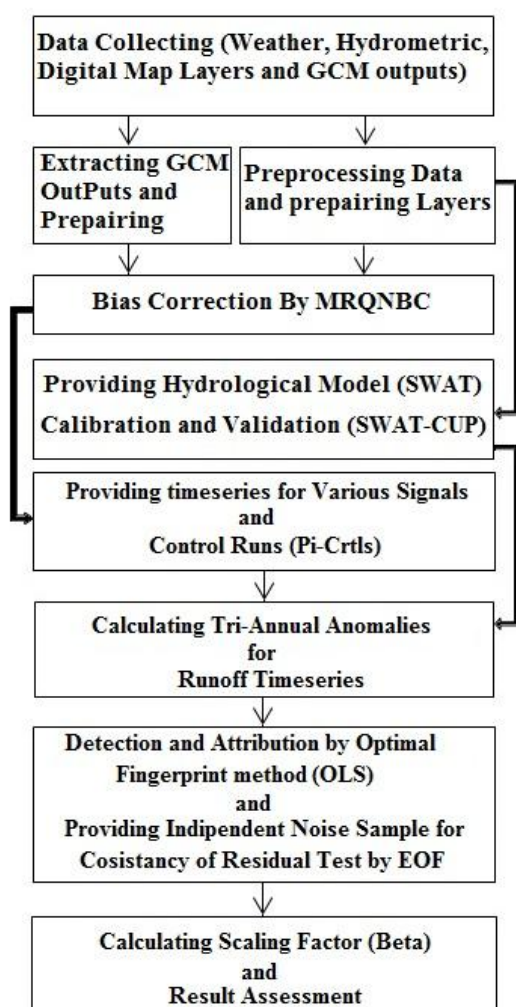


Fig. 2- Flowchart of the study
شکل ۲- ساختار روش‌شناسی تحقیق

در ادامه هر یک از گام‌های ارائه شده شکل ۲ به طور جداگانه تشریح می‌گردد.

به همین ترتیب دوره‌های پیش از انقلاب صنعتی جو جهانی مشابه قبل از انقلاب صنعتی (پیش از ۱۸۵۰ میلادی) را شبیه‌سازی می‌کند که گازهای گلخانه‌ای و عوامل انسانی نقش مؤثری بر متغیرهای اقلیمی نداشتند، بنابراین از این شبیه‌سازی‌ها به منظور کنترل محاسبات آشکارسازی و نسبت‌دهی (از نظر تصادفی بودن نتایج) استفاده می‌شود به همین دلیل به آنها شبیه‌سازی کنترلی پیش از انقلاب صنعتی^{۲۳} یا (Pi-Ctrl) گفته می‌شود.

۳- روش‌شناسی تحقیق

شکل ۲ گام‌های مختلف آشکارسازی و نسبت‌دهی رواناب را به ترتیب نمایش می‌دهد. در گام نخست این تحقیق اقدام به جمع‌آوری داده‌های مشاهده‌ای، خروجی‌های مدل‌های اقلیمی و نقشه‌ها و لایه‌های رقومی شد. سپس داده‌های مشاهده‌ای از نظر کفایت و خلأهای آماری بررسی شدند و همگنی آنها مورد آزمون قرار گرفت، به این مرحله پیش‌پردازش گفته می‌شود. به طور همزمان خروجی‌های مدل‌های اقلیمی برای محدوده مورد مطالعه استخراج^{۲۴} و تبدیل واحد گردیدند و لایه‌های مورد نظر برای شبیه‌سازی توزیعی بارش- رواناب برای حوضه مورد نظر برش داده شدند. در گام بعد با توجه به اینکه خروجی مدل‌های اقلیمی به صورت شبکه‌ای (پهنه‌ای) می‌باشند به روش MRQNBC ریزمقیاس گردیدند تا برای ورود به مدل بارش- رواناب قابل استفاده باشند. سپس مدل هیدرولوژیکی حوضه با لایه‌ها و داده‌های مشاهده‌ای ساخته شد و با استفاده از پارامترهای پژوهش (Naseri et al. 2015) مورد واسنجی و صحت‌سنجی قرار گرفت. در مرحله بعد سیگنال‌ها و شبیه‌سازی‌های اقلیمی آماده‌سازی شده (شامل دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش) به مدل بارش- رواناب کالیبره شده معرفی گردید تا واکنش حوضه به سیگنال‌های مختلف و شبیه‌سازی‌های پیش از انقلاب صنعتی، مشخص شود. از این‌رو، در گام بعدی رواناب‌های تحت تأثیر هر یک از سیگنال‌های ALL، NAT، GHG و شبیه‌سازی‌های پیش از انقلاب صنعتی به صورت میانگین تجمعی غیرمتداخل سه ساله محاسبه شدند و به صورت استاندارد محاسبه شدند. هدف از این کار تقویت نتایج و حذف نویزهای موجود است که برای اجرای یک پروژه آشکارسازی و نسبت‌دهی ضروری است. پس از آن، سری‌های زمانی مذکور به همراه سری زمانی مشاهده‌ای رواناب با روش انگشت‌نگاشت بهینه مورد آشکارسازی و نسبت‌دهی قرار گرفتند. این روش که بر اساس رگرسیون خطی عمل می‌کند، بر اساس حداقل مربعات معمولی^{۲۵} ضریب مقیاس‌ساز^{۲۶} را محاسبه می‌کند. با توجه به حجم بالای داده‌های شبیه‌سازی پیش از انقلاب صنعتی سازوکاری در این روش پیش‌بینی شده است موسوم به توابع متعامد تجربی^{۲۷} که به وسیله

۳-۱- گردآوری و پیش‌پردازش داده‌ها

می‌باشد. لذا کاهش این خطا که از آن به عنوان ریزمقیاس‌نمایی نیز یاد می‌شود، جهت تجسم^{۳۲} تغییرات اقلیمی و هیدرولوژیکی امری مهم و ضروری است (Mehrotra et al., 2018). یکی از مهم‌ترین روش‌های تشخیص و اصلاح تغییر و ناهمگنی داده‌های روزانه هواشناسی، روش تطابق چندکی^{۳۳} می‌باشد که بر اساس انطباق چندک‌های توزیع داده‌های شبیه‌سازی بر داده‌های مشاهداتی یا واکاوی کار می‌کند. هدف این روش، بهبود و اصلاح سری‌های زمانی است، به طوری که توزیع تجربی تمامی بخش‌های سری پایه روندزادایی شده، با یکدیگر انطباق داشته باشند. (Li et al. (2010) استفاده از این رویکرد روشی موسوم به تطابق چندکی متساوی‌الفاصله^{۳۴} (EQM) را ارائه دادند که اساس کار Mehrotra and Sharma (2016) قرار گرفت. فرآیند ارائه شده توسط Mehrotra and Sharma (2016)، می‌تواند بیش از یک جنبه آماری (به طور مثال، میانگین یا تنوع‌پذیری) را در مقیاس‌های زمانی مختلف (روزانه، ماهانه، سالانه) برای خروجی‌های خام مدل‌های اقلیمی جهانی^{۳۵} (GCM) اصلاح کند. تابع مورد استفاده در این روش بر اساس مدل خودهمبسته چندمتغیره مرتبه اول^{۳۶} کار می‌کند و سری زمانی اصلاح شده با پارامترهای Lag-0 و Lag-1 همبستگی و خودهمبستگی منطبق می‌شود. مدل خودهمبسته درجه اول با پارامترهای ثابت به منظور مدل‌سازی سری‌های زمانی مشاهدات و GCM چندمتغیره به شرح روابط ۱ و ۲ می‌باشد:

$$\tilde{Z}_t^h = C\tilde{Z}_{t-1}^h + D\varepsilon_t \quad (1)$$

$$\tilde{Z}_t^{qg} = E\tilde{Z}_{t-1}^{qg} + F\varepsilon_t \quad (2)$$

در این روش سری‌های زمانی مشاهداتی و استاندارد شده GCM (پس از به کار بردن روش EQM تک متغیره برای هر یک از سری‌های زمانی) با میانگین صفر و واریانس واحد به ترتیب با \tilde{Z}_t^h و \tilde{Z}_t^{qg} نمایش داده می‌شوند. همچنین C و D ماتریس ضرایب سری زمانی مشاهداتی (\tilde{Z}_t^h) و به طور مشابه E و F ماتریس ضرایب سری‌های زمانی GCM استاندارد شده و اصلاح شده اولیه (\tilde{Z}_t^{qg}) می‌باشند.

همانطور که اشاره شد، روش اصلاح بایاس چندمتغیره با حذف Lag-0 و Lag-1 همبستگی و خودهمبستگی (E و F) از سری‌های زمانی استاندارد شده GCM یا \tilde{Z}_t^{qg} و به کارگیری Lag-0 و Lag-1 همبستگی و خودهمبستگی (C و D) و ایجاد یک سری زمانی اصلاح شده (\tilde{Z}_t^{qg}) استفاده شد. با بازنویسی رابطه ۲ و ساده‌سازی آن برای ε_t رابطه ۳ به دست می‌آید:

$$\varepsilon_t = F^{-1}(\tilde{Z}_t^{qg} - E\tilde{Z}_{t-1}^{qg}) \quad (3)$$

که در آن ε_t بردار استاندارد شده متغیر M می‌باشد که پس از بیرون کشیدن Lag-0 و Lag-1 همبستگی و خودهمبستگی از سری زمانی \tilde{Z}_t^{qg} به دست آمده است. این بردار استاندارد شده با توجه به خصوصیات

همانطور که اشاره شد در گام نخست باید داده‌های مشاهداتی و لایه‌های رقومی جهت تهیه مدل بارش رواناب گردآوری گردد و شبیه‌سازی‌های مدل‌های اقلیم جهانی پس از بررسی دانلود شود. در این پژوهش به بررسی خلأها، کفایت آماری و همگنی داده‌های مشاهداتی با آزمون ران تست پیش‌پردازش داده‌ها گفته می‌شود. همچنین طبیعی نمودن جریان رواناب مشاهداتی که لازمه واسنجی صحیح مدل هیدروژیکی است جزیی از این بخش است. به علاوه جهت مدل‌سازی هیدرولوژیکی با مدل SWAT نیاز به نقشه‌های رقومی ارتفاعی^{۳۸}، خاک، کاربری (پوشش) اراضی تحت محیط Arc-GIS است که این نقشه‌ها از پایگاه داده بین‌المللی <https://earthexplorer.usgs.gov/> انتخاب گردید و پس از انطباق دستی با بانک داده‌ای موجود در خود مدل SWAT مورد استفاده قرار گرفت. به منظور شبیه‌سازی اقلیم کره زمین تحت شرایط مختلف از خروجی‌های مدل CanESM-2.0 استفاده شد. برای سهولت طبقه‌بندی و دریافت این شبیه‌سازی‌ها، معمولاً در قالب شبیه‌سازی‌های کل کره زمین برای چندین دهه مختلف و به صورت سلول‌های بزرگ‌مقیاس (۵۰۰ کیلومتری) ارائه شده‌اند. لذا این خروجی‌ها پس از دریافت از پایگاه <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip5> باید برای محدوده مطالعاتی (نزدیکترین سلول) استخراج شوند. این امر به کمک بسته نرم‌افزاری^{۳۹} ncdf4 تحت محیط R صورت گرفت و فرمت داده‌ها از NetCDF به مقادیر قابل استفاده تبدیل شد. همچنین به منظور استفاده از این شبیه‌سازی‌ها واحد اندازه‌گیری آنها از کلونین (برای دما) و شار^{۴۰} (برای بارش) به ترتیب به سلسیوس و میلی‌متر تغییر کرد و خروجی‌های خام به داده‌های قابل استفاده تبدیل شد. با توجه به هدف تحقیق و ضرورت استفاده از این داده‌ها در مدل بارش- رواناب، باید شبیه‌سازی ریزمقیاس می‌گردید تا خطای سیستماتیک ناشی از شبیه‌سازی‌های اقلیمی به صورت سلول‌های بزرگ مقیاس کاهش می‌یافت. از این رو استفاده از یک روش ریزمقیاس‌نمایی ضروری به نظر می‌رسد که در بخش بعد ارائه شده است.

۳-۲- ریزمقیاس‌نمایی به روش MRQNBC

با توجه به شبیه‌سازی رواناب به صورت روزانه در مقیاس حوضه‌ای، باید حتی‌الامکان خطای سیستماتیک موجود در خروجی‌های مدل‌های اقلیمی را جهت افزایش دقت شبیه‌سازی به روش‌های مختلف کاهش داد. خطای سیستماتیک موجود در شبیه‌سازی‌های بزرگ‌مقیاس اقلیمی منجر به بروز آریبی^{۳۱} (بایاس) در خروجی‌های مدل می‌گردد که ناشی از شبیه‌سازی به صورت شبکه‌ای و عدم تطابق بعد فضایی

Lag-1 و Lag-0 (C و D) به منظور دستیابی به سری زمانی اصلاح شده \bar{Z}_t^{qg} به صورت رابطه ۴ مورد استفاده قرار گرفته است:

$$\bar{Z}_t^{qg} = CZ_{t-1}^{qg} + DF^{-1}\bar{Z}_t^{qg} - DF^{-1}E\bar{Z}_{t-1}^{qg} \quad (4)$$

رابطه ۴، ساختار مدل چندمتغیره‌ای را که ویژگی‌های ساختاری Lag-1 و 0 همبستگی و خودهمبستگی را در قالب سری زمانی (\bar{Z}_t^{qg}) حفظ کرده است نشان می‌دهد. در حالی که روش‌های تصحیح خطای پارامتریک ارائه شده دارای مزایای بسیاری است ولی مزیت اصلی روش تطابق چندکی در توانایی آن در تصحیح خطای بایاس در سراسر توزیع احتمالاتی متغیر (شامل مقادیر حدی)، نهفته است. به بیان دیگر، منطق پیمانهای^{۳۷} علاوه بر اصلاح بایاس‌ها در صفات مرتبط قادر است بایاس‌های موجود در پیمان‌ها یا سبدهای زمانی مختلف (روزانه، ماهانه، فصلی و سالانه) به طور همزمان کاهش دهد. لذا Mehrotra and Sharma (2015) بر مبنای ایده تطابق چندکی متساوی‌الفاصله (EQM) و ترکیب آن با ایده تصحیح خطای پیمانهای^{۳۸} روش جدیدی برای کاهش خطای بایاس (ریزمقیاس‌نمایی) ارائه دادند. به این صورت که تصحیح خطای پیمانهای ایستا^{۳۹} را از Johnson and Sharma (2012)، منطق بازگشتی^{۴۰} را از Mehrotra and Sharma (2012) و روشی جدید را توسعه دادند. این روش یکی از جدیدترین روش‌های ریزمقیاس‌نمایی و کاهش بایاس است که با عنوان تصحیح بایاس چندمتغیره پیمانهای بازگشتی^{۴۱} (MRQNBC) در قالب یک بسته نرم‌افزاری تحت زبان فورترن برای محیط R ارائه شده است. رویکرد پیمانهای (سیدی) در این روش، بدین صورت عمل می‌کند که پس از تطابق چندک‌ها بین سری‌های زمانی روزانه بزرگ مقیاس و مشاهداتی به ترتیب با توجه به روابطی که اشاره شد، بایاس سری‌های ماهانه، فصلی، سالانه را کاهش می‌دهد. سپس کلیه سری‌های زمانی اصلاح شده را به کمک رابطه ۵، در تمام مقیاس‌های زمانی به حداقل می‌رساند:

$$Z_{t,j,s,i}^{qg} = \left(\frac{Y_{j,s,i}^{qg}}{Y_{j,s,i}^{qg}} \right) \times \left(\frac{X_{j,s,i}^{qg}}{X_{j,s,i}^{qg}} \right) \times \left(\frac{A_i^{qg}}{A_i^{qg}} \right) \times Z_{t,j,s,i}^{qg} \quad (5)$$

در این رابطه $Z_{t,j,s,i}^{qg}$ سری زمانی اصلاح شده برای تمامی پیمان‌های زمانی می‌باشد. به علاوه، مقدار اصلاح شده ماهانه، $Y_{j,s,i}^{qg}$ مقدار میانگین تجمعی ماهانه که از مقادیر روزانه تصحیح شده حاصل شده، است. همچنین $X_{j,s,i}^{qg}$ مقدار اصلاح شده فصلی، $X_{j,s,i}^{qg}$ مقدار میانگین تجمعی فصلی که از مقادیر اصلاح شده ماهانه به دست آمده، می‌باشد. A_i^{qg} مقدار اصلاح شده سالانه و A_i^{qg} میانگین یا مجموع سالانه که از مقادیر اصلاح شده فصلی محاسبه شده است، حاصل گردید. در این رابطه t بیانگر روز، j به معنی ماه، s معادل فصل و i برابر سال در نظر گرفته شده است و $Z_{t,j,s,i}^{qg}$ سری زمانی اصلاح شده مرحله قبل است. در نهایت جهت اطمینان از دستیابی به حداقل خطای بایاس (عدم تطابق بین توزیع خروجی‌های بزرگ مقیاس و مقادیر مشاهداتی)،

مراحل یاد شده چندین بار تکرار می‌شود تا مقدار بایاس به حداقل برسد، این عمل در واقع معرف منطق بازگشتی استفاده شده در مدل ریزمقیاس‌نمایی MRQNBC می‌باشد. به منظور دستیابی به بهترین نتیجه توصیه شده که این عمل حداقل ۳ تا ۵ بار تکرار شود (Johnson and Sharma, 2012). بر اساس مطالعه Mehrotra and Sharma (2019) روش (MRQNBC) بهترین روش برای کاهش خطای سیستماتیک (ریزمقیاس‌نمایی) در فرآیند مطالعات اقلیمی است. بنابراین با این روش سه متغیر دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش برای محدوده مورد مطالعه (سد کرج) ریزمقیاس گردید و جهت شبیه‌سازی رواناب تحت تأثیر سیگنال‌های منتخب به مدل بارش- رواناب معرفی شد.

۳-۳- شبیه‌سازی بارش- رواناب

تاکنون مطالعات متعددی به وسیله مدل SWAT در سطح جهان و کشور صورت گرفته که همگی کارایی این مدل در ارزیابی‌های هیدرولوژیکی و مسائل مدیریتی وابسته به آن از جمله مباحث اقلیمی، کیفی و رسوب تأیید می‌کنند (Zare Garizi and Talebi, 2017). مدل ارزیابی خاک و آب^{۴۲} که با نام اختصاری SWAT شناخته می‌شود، نخستین بار توسط سرویس تحقیقاتی کشاورزی آمریکا به دست آرنولد و همکاران در اوایل دهه ۱۹۹۰ میلادی ارائه شد و تا امروز در حال بروزرسانی و توسعه می‌باشد. این مدل یک مدل نیمه توزیعی است که در گام‌های پیوسته زمانی (روزانه، ساعتی) قادر است شرایط هیدرولوژیکی یک حوضه را به صورت مفهومی مدل‌سازی کند (Krysanova and Arnold, 2008). در این مدل هر حوضه به چند زیرحوضه کوچکتر و هر زیرحوضه بر اساس لایه‌های رقوم مختلف (شامل DEM، خاک، کاربری اراضی و شیب) به واحدهای هیدرولوژیکی^{۴۳} کوچکتر موسوم به HRU تقسیم می‌گردد. رواناب شبیه‌سازی شده در هر یک از واحدهای مستقل هیدرولوژیکی محاسبه شده است و پس از پیوستن به هم در پست‌ترین زیرحوضه، مقدار رواناب خروجی از کل حوضه به دست می‌آید. به طور کلی در مدل SWAT شبیه‌سازی سامانه آبخیز به دو بخش زمینی و آبی تقسیم‌بندی می‌گردد. محاسبات بخش زمینی بر فرآیندهای سطح زمین و ورود آب، مواد شیمیایی و رسوب به آبراهه اصلی تمرکز دارد، در حالی که بخش آبی به روندیابی و بررسی فرآیندهای آبراهه‌ای مانند حرکت آب و رسوب یا عناصر شیمیایی مربوط می‌شود. در این مدل شبیه‌سازی فاز زمینی چرخه هیدرولوژی بر اساس معادله بیلان آبی (رابطه ۶) صورت می‌گیرد:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seap} - Q_{gw}) \quad (6)$$

حوضه‌های بزرگ که زمان تمرکز آن بیش از یک روز است) نیز در نظر گرفته می‌شود (شکل ۳).

۳-۴- واسنجی و صحت‌سنجی با SWAT-CUP

با توجه به پیچیدگی واسنجی و صحت‌سنجی در محیط Arc-GIS، Abbaspour et al. (2007) جهت سهولت و تسریع امر واسنجی و صحت‌سنجی نرم‌افزاری موسوم به SWAT-CUP را توسعه دادند. این نرم‌افزار دارای چهار الگوریتم فراکاوشی تحت عناوین SUFI-2، Glue، Parasol و MCMC می‌باشد. الگوریتم بهینه‌سازی استفاده شده در این تحقیق SUFI-2 است که بر اساس تابع هدف و محدوده‌های مجاز (یا دامنه اولیه) برای پارامترهای تعیین شده، از نتایج تولیدشده نمونه‌گیری می‌کند. همچنین جهت به کمیت در آوردن عدم قطعیت در این روش، ضرایب P-factor و r-factor پیشنهاد شده است که به ترتیب برای به کمیت در آوردن قدرت واسنجی و تحلیل عدم قطعیت می‌باشند. به منظور واسنجی جریان در روش SUFI-2 از تابع هدف نش-ساتکلیف^{۴۴} یا br^2 استفاده شود. تابع هدف br^2 (یا φ) جهت مقایسه بین جریان مشاهداتی و برآورد شده ماهانه می‌باشد. این معیار توسط Krause et al. (2005) ارائه شده است:

$$\varphi = \begin{cases} |b|R^2 & \text{for } |b| \leq 1 \\ |b|^{-1} & \text{for } |b| > 1 \end{cases} \quad (7)$$

که در آن R^2 ضریب تبیین بین ۲ سیگنال مشاهداتی و شبیه‌سازی شده و b شیب خط رگرسیون می‌باشد. مقدار تابع φ بین صفر و ۱ تغییر می‌کند ولی تابع نش-ساتکلیف (NS) بین یک مقدار منفی بزرگ تا ۱ متغیر است.

در این رابطه: SW_t مقدار نهایی آب موجود در خاک، SW_0 مقدار اولیه آب موجود در خاک، R_{day} میزان بارندگی در روز، Q_{surf} میزان رواناب سطحی در روز، E_a مقدار تبخیر-تعرق در روز، W_{seep} میزان آبی است که در روز از پروفیل خاک به ناحیه غیراشباع وارد می‌شود و Q_{gw} مقدار جریان برگشتی می‌باشد (کلیه واحد میلی‌متر در روز اُم می‌باشد). در این مدل نیمرخ خاک به لایه‌های متعددی تقسیم می‌شود و فرآیندهای حرکت آب در خاک شامل نفوذ، رواناب سطحی، جریان جانبی، جذب توسط گیاهان، تبخیر، نفوذ عمقی به آکیفرهای عمیق و کم عمق است. در این مدل شبیه‌سازی رواناب سطحی با روش گرین آمپت (برای داده‌های ساعتی بارش) یا SCS اصلاح شده (برای داده‌های بارش روزانه) صورت می‌گیرد (Neitsch et al., 2005). حجم آب باقیمانده پس از جذب اولیه (ذخیره سطحی، برگابه و غیره) که در روش SCS معادل 0.2 پارامتر نگهداشت (S) لحاظ می‌شود. به منظور شبیه‌سازی حرکت آب بین لایه‌های خاک از روش روندیابی مخزن استفاده می‌شود. برای محاسبه جریان جانبی نیز از روش روندیابی جنبشی مخزن، بر اساس مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع، درجه شیب، طول شیب شبیه‌سازی می‌شود. مازاد آب نفوذیافته به آکیفرهای کم عمق وارد می‌گردد و جهت محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل، روش‌های هارگریوز، پریستلی-تیلور و پنمن-مانتیث قابل دسترسی است. پس از محاسبه میزان رواناب سطحی به روش منتخب (شماره منحنی)، مقدار رواناب وارد شده به کانال آبراهه محاسبه می‌گردد. معادله مانینگ جهت برآورد سرعت جریان و روش ضریب ذخیره متغیر یا ماسکینگ جهت روندیابی جریان در کانال به کار برده می‌شود. به منظور محاسبه تلفات انتقال آب در مسیر کانال و تأخیر زمانی رواناب سطحی (برای

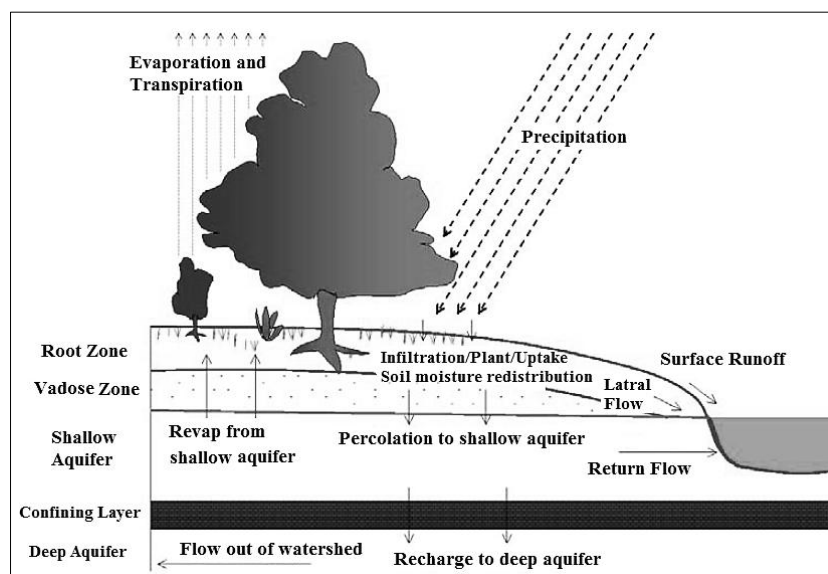


Fig. 3- Hydrological cycle in SWAT model

شکل ۳- چرخه هیدرولوژیک در مدل SWAT

به عبارت دیگر این مقدار منفی بزرگ مربوط به شبیه‌سازی نامناسب در ایستگاهی است که می‌تواند در فرآیند بهینه‌سازی بر سایر شبیه‌سازی‌ها مؤثر باشد (Abbaspour et al., 2009). همان‌طور که اشاره شد، یکی دیگر از معادلاتی که در این زمینه استفاده می‌شود، معادله ضریب نش- ساتکلیف است (رابطه ۸):

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (8)$$

که در آن n تعداد مشاهدات، O_i و P_i مقادیر متناظر مشاهداتی و برآورد شده می‌باشند، \bar{O} نیز میانگین ریاضی مقادیر دیدبانی بوده مقدار آن از منفی بی‌نهایت تا +۱ متغیر است. (Moriasi et al., 2007) پیشنهاد کردند که مقادیر NS باید از ۰/۵ بزرگتر باشد تا بتوان در مقیاس ماهانه، نتایج مدل را برای مطالعات هیدرولوژیکی و شبیه‌سازی فرآیندهای مرتبط با انتقال آلاینده‌ها قابل قبول دانست.

۳-۵- افزایش قدرت آشکارسازی و نسبت‌دهی

پس از تهیه سری‌های زمانی رواناب تحت سیگنال‌های منتخب ALL، GHG، NAT و پیش از انقلاب صنعتی، جهت تکمیل فرآیند آشکارسازی و نسبت‌دهی، شبیه‌سازی‌ها باید تا حد ممکن واضح باشند و نویز موجود به حداقل برسد. بنابراین روش‌های انگشت‌نگاشت بهینه نیازمند مقادیر استاندارد شده‌ای نظیر آنومالی و یا شاخص احتمالاتی می‌باشند. در تحقیقات گذشته نیز، برای افزایش دقت نتایج آشکارسازی و نسبت‌دهی متغیرهای اقلیمی، این رویکرد توصیه شده است (Zhang et al., 2013). بنابراین این در پژوهش به منظور افزایش قدرت آشکارسازی^{۴۵} هنگام استفاده از روش انگشت‌نگاشت بهینه، از مقادیر استاندارد شده (آنومالی) استفاده شد. همچنین، می‌توان جهت کاهش عدم قطعیت در مطالعات آشکارسازی و نسبت‌دهی به روش انگشت‌نگاشت بهینه، ابعاد داده‌ها از نظر فضایی و زمانی را کاهش داد. به همین دلیل، علاوه بر این دو مرحله (ریزمقیاس‌نمایی و استانداردسازی)، محاسبه سری‌های میانگین‌های چندساله غیرمتداخل راهکار مناسبی جهت ارتقای نتایج آشکارسازی به نظر می‌رسد. بنابراین با تهیه سری‌های زمانی حاصل از میانگین تجمعی چند ساله غیرمتداخل بر نویز ناشی نوسانات موجود در مقیاس‌های کوچکتر زمانی (روزانه، ماهانه، فصلی و سالانه) غلبه کرد و روند آشکارتری را برای تغییرات متغیرهای اقلیمی و هیدرولوژیکی به دست آورد. بدین ترتیب در ابتدا میانگین غیرمتداخل ۳ ساله برای رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی‌ها اقلیمی محاسبه گردید (کل دوره آماری به ۹ دوره سه ساله تقسیم شد) و سپس مقادیر حاصل شده، نسبت به میانگین کل (۲۷ سال) استاندارد شد. جهت محاسبه مقادیر استاندارد رواناب از رابطه (۹) استفاده شد:

$$Z = \frac{X_i - \mu_i}{\sigma_i} \quad (9)$$

در این رابطه، Z : معادل استاندارد شده متغیر (رواناب)، X_i : مقدار متغیر در سال i ام، μ_i : میانگین درازمدت متغیر طی کل دوره و σ : مقادیر انحراف معیار هستند.

۳-۶- آشکارسازی و نسبت‌دهی به روش انگشت‌نگاشت بهینه^{۴۶}

سری‌های زمانی تبدیل شده از مرحله قبل با روش انگشت‌نگاشت بهینه آشکارسازی و نسبت‌دهی می‌شوند و با این روش مشخص می‌شود رواناب شبیه‌سازی شده تحت تأثیر کدام سیگنال بیشترین هماهنگی را با رواناب مشاهداتی منطقه دارا می‌باشد. در حال حاضر بهترین و گسترده‌ترین روش آشکارسازی و نسبت‌دهی تغییر اقلیم روشی موسوم به انگشت‌نگاشت بهینه است (Ribes et al., 2013). این روش نخستین بار توسط (Hasselmann et al., 1979; Hasselmann, 1993; Hegerl and Zwiers, 2011; Hannart et al., 2014; Ribes et al., 2017). این روش بر اساس رگرسیون خطی استاندارد کار می‌کند و در آن، وجود روند و همچنین سهم عوامل مختلف مانند اثرات گازهای گلخانه‌ای، اثرات فعالیت‌های آتشفشانی یا تغییر تشعشعات خورشیدی با برازش بر داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌های مدل شامل سیگنال و تغییرپذیری درونی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این روش اگر بتا (β) یا ضرایب مقیاس‌ساز^{۴۷} و محدوده اطمینان ۹۵ درصد آن بیش از صفر باشد، یعنی آشکارسازی صورت گرفته است و چنانچه نتایج حاصل شده شامل مقدار ۱ باشد می‌توان اثرات را به سیگنال مورد بررسی نسبت‌دهی کرد. رابطه (۱۰) معادله رگرسیون خطی استاندارد استفاده شده در روش انگشت‌نگاشت بهینه می‌باشد:

$$y = \sum_{i=1}^m X_i \beta_i + v = X\beta + v \quad (10)$$

بر این اساس y بردار رتبه‌ای داده‌های مشاهده‌ای، m ستونی از نمونه‌های پاسخ‌های شبیه‌سازی یا X می‌باشد و مقادیر مجهول مورد بررسی β و β_i می‌باشند؛ همچنین تغییرپذیری درونی اقلیم (نویز) با v نشان داده می‌شود. کوواریانس تغییرپذیری درونی اقلیم نیز از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود:

$$C_N = \varepsilon(vv^T) \quad (11)$$

در این رابطه، ε تابع امید ریاضی و مجهول می‌باشد و به کمک یک اجرای کنترلی (پیش از انقلاب صنعتی) برآورد می‌شود. با توجه به این که رگرسیون مربعات وزن‌دهی نشده تخمین‌های خیلی قویتری از خطاهای β به دست می‌دهند، در حالی β را خیلی ضعیف برآورد می‌کند باید از یک عملگر اصلاحی موسوم به پیش‌پالایش^{۴۸} جهت تقویت

ضرایب مقیاس‌ساز (β) استفاده کرد، لذا جهت حل این مسأله از رابطه (۱۲) استفاده می‌شود:

$$\varepsilon(Pv v^T P^T) = I_k \quad (12)$$

در این رابطه I_k ، ماتریس واحد، k رتبه‌ای است. باید توجه داشت که رتبه P ، می‌تواند از n یا رتبه مشاهدات y بسیار کوچکتر باشد. از آنجا که Pv ، نویز سفید توزیع شده مستقلی است، بنابراین بهترین تابع با کمترین واریانس بدون خطای خطی مربوط به β ، $\tilde{\beta}$ می‌باشد که با حداقل نمودن تابع مناسب، محاسبه می‌شود:

$$r^2(\tilde{\beta}) \equiv (PX\tilde{\beta} - Py)^T (PX\tilde{\beta} - Py) \equiv \tilde{v}^T P^T P \tilde{v} \quad (13)$$

و با توجه به $\tilde{\beta}$ در حداقل خواهیم داشت:

$$\tilde{\beta} = (X^T P^T P X)^{-1} X^T P^T P y \equiv F^T y \quad (14)$$

در رابطه اخیر، F همان انگشت نگاشت متمایز است. با این روش بهترین الگوهای حاصل شده (مؤلفه‌های اصلی) به ازای هر برش زمانی به وسیله توابع متعامد تجربی به دست می‌آید و با رویکرد حداقل مربعات معمولی در رگرسیون خطی، یک بازه از تغییرات ضریب مقیاس‌ساز در محدوده معنی‌داری ۹۰ درصد به دست می‌آید. میانه این بازه در حقیقت ضریب مقیاس‌ساز (β) یا شیب خط رگرسیونی می‌باشد. با توجه به فرض اصلی استفاده از معادلات رگرسیونی خطی مبنی بر تصادفی بودن باقیمانده‌ها از آزمون ثبات باقیمانده‌ها^{۴۹} استفاده می‌شود. این آزمون به وسیله مقایسه توزیع مقادیر باقیمانده معادلات رگرسیونی با نمونه‌های تصادفی از شبیه‌سازی‌های کنترلی انجام می‌شود (باید از توزیع نرمال برخوردار باشند). این رویکرد جهت اثبات هماهنگی بین باقیمانده‌های برآورد شده با انگشت نگاشت بهینه و تغییرپذیری درونی اقلیم توسعه یافته است (Allen and Tett, 1999; Allen and Stott, 2003). در این آزمون، محدوده‌های قابل قبول باقیمانده‌ها بر اساس سطح اطمینان (معناداری) مورد مطالعه مشخص می‌شود و اگر باقیمانده‌های به دست آمده از رگرسیون درون این محدوده واقع شوند، می‌توان نتیجه گرفت که نتایج تصادفی بوده و از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشند. لذا باید به صورت تصادفی یک سری زمانی مستقل از رواناب‌های تحت شرایط پیش از انقلاب صنعتی با این باقیمانده‌ها مقایسه شود. این موضوع به وسیله توابع متعامد تجربی انجام می‌شود که به طور هم‌زمان با روش انگشت‌نگاشت بهینه کار می‌کند و در بخش بعد به آن پرداخته می‌شود.

۳-۷- توابع متعامد تجربی^{۵۰}

همانطور که اشاره شد، از این توابع به منظور تهیه نمونه نویز مستقل جهت انجام آزمون ثبات باقیمانده‌ها استفاده می‌شود. از طرفی با توجه به حجم بسیار زیاد داده‌های حاصل از شبیه‌سازی مدل‌ها جهت برآورد نوسانات درونی اقلیم در روش‌های بهینه آشکارسازی و نسبت‌دهی،

باید حجم داده‌های حاصل از اجراهای کنترلی (که معمولاً در دوره‌های ۵۰۰ تا ۱۰۰ ساله تهیه می‌شوند) را به نحو بهینه‌ای کاهش داد تا ضمن افزایش نسبت سیگنال به نویز^{۵۱}، بهترین نتایج به دست آید. لذا به منظور کاهش حجم سری‌های زمانی استاندارد شده میانگین غیرمتداخل رواناب‌های شبیه‌سازی شده، از این روش به منظور تقویت نتایج آشکارسازی و نسبت‌دهی استفاده می‌شود. سازوکار این روش بر این مبنا است که با توجه به همبستگی غیرصفر استدلال می‌شود که داده‌های مازاد وجود دارد و از این رو مهم‌ترین ماتریس‌ها استخراج می‌شوند. این توابع تنها مؤلفه‌های اصلی را در نظر می‌گیرند. یعنی اگر یک تابع متعامد تجربی را به صورت یک ساختار فضایی در نظر بگیریم، مؤلفه‌های اصلی قدرت نمایش آنها در زمان را تبیین می‌کنند. معمولاً فرض می‌شود که داده‌های مورد مطالعه در زمان مستقل هستند، یعنی مقادیر X شامل مقادیر مستقل از زمان می‌باشد. بنابراین آنالیز مؤلفه‌های اصلی بیانگر ساختارهای فضایی همبسته در برخی از توابع متعامد تجربی با رفتار مشابه هستند. می‌توان هر یک از فیله‌های داده‌های شبکه‌بندی شده در مطالعات اقلیمی را یک سری نقشه در نظر گرفت که هر یک از آنها یک مشاهده را ارائه می‌دهند. در نقشه‌های متوالی معمولاً یک ویژگی شاخص بیشتر به چشم می‌خورد که اگر این ویژگی شاخص را از داده‌ها حذف شود، مجموعه داده‌هایی با ویژگی‌های جدید به دست می‌آید. بنابراین به کمک این فرآیند می‌توان با وزن‌دهی به یک سری نقشه پایه (یک نمونه داده‌ها)، تمامی نقشه‌ها با سری بسیار کوچکتری از نقشه‌های پایه را بیان کرد. توابع متعامد تجربی (EOF) بیانگر یک ساختار فضایی هستند در حالی که مؤلفه اصلی قدرت نمایش آنها را در زمان توصیف می‌کنند (Allen and Tett, 1999; Allen and Stott, 2003). در حقیقت هدف اصلی توابع غیرمتعامد تجربی دستیابی به یک ساختار زمانی-مکانی پیوسته است که رابطه آن به شرح رابطه ۱۵ است:

$$X(t, s) = \sum_{k=1}^M ck(t)uk(s) \quad (15)$$

در این رابطه M تعداد مدل‌ها یا نمونه‌های استفاده شده در ساختار مورد نظر با به کار بردن یک سری بهینه از توابع فضایی پایه $uk(s)$ و $ck(t)$ توابع گستره زمان می‌باشند (Saadi et al., 2016). بنابراین هم‌زمان با کاهش حجم شبیه‌سازی‌های استاندارد شده توسط توابع متعامد تجربی، بهترین الگوها جهت آشکارسازی و نسبت‌دهی به روش انگشت‌نگاشت بهینه معرفی می‌شوند.

در نهایت پس از اجرای کامل مراحل یادشده، بر اساس محدوده قرارگیری ضرایب مقیاس‌ساز حدفاصل خط صفر و یک می‌توان دریافت کدام سیگنال آشکارسازی و نسبت‌دهی می‌گردد و رواناب مشاهداتی با کدام یک از رواناب‌های شبیه‌سازی شده بیشترین

همانگی را دارد، تا به این وسیله بتوان تغییرات صورت گرفته را به آن عامل نسبت داد.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- واسنجی و صحت‌سنجی مدل هیدرولوژیکی

همانطور که در بخش قبل اشاره شد، مدل هیدرولوژیکی SWAT بر اساس مطالعه Naseri et al. (2015) پارامترهای مؤثر و دامنه

تغییرات آنها انتخاب و به وسیله نرم‌افزار SWAT-CUP واسنجی و صحت‌سنجی گردید (شکل ۴ و ۵). نتایج ارزیابی واسنجی و صحت‌سنجی با معیارهای یاد شده عملکرد مطلوب مدل را نشان داد (جدول ۲). بر این اساس بزرگتر بودن ضرایب R^2 ، bR^2 و NS به معنی عملکرد بهتر مدل می‌باشد و منجر به بالا رفتن معیار p-factor می‌شود و هر چه میزان r-factor کوچکتر باشد دقت شبیه‌سازی بالاتر است. البته باید بین دو معیار یاد شده تناسب برقرار باشد، زیرا با کاهش r-factor از میزان p-factor نیز کاسته می‌شود.

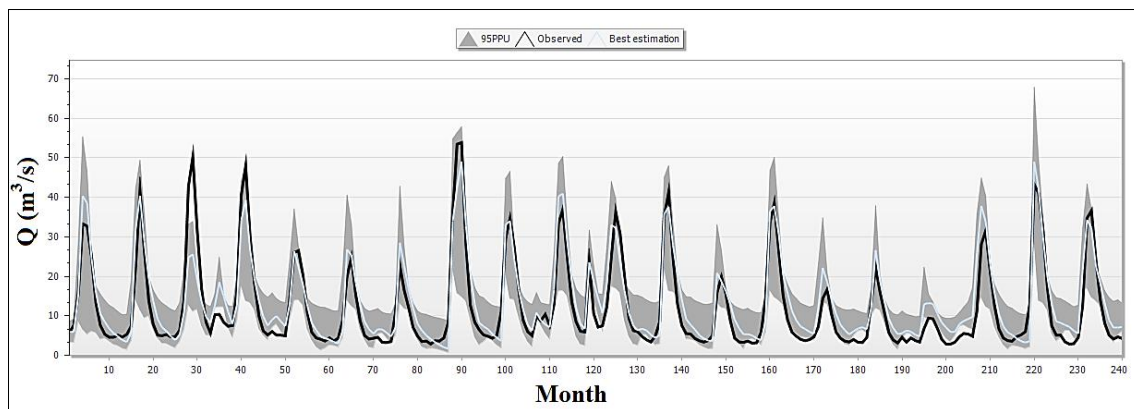


Fig. 4- Results of calibration periods

شکل ۴- نتایج شبیه‌سازی دوره واسنجی

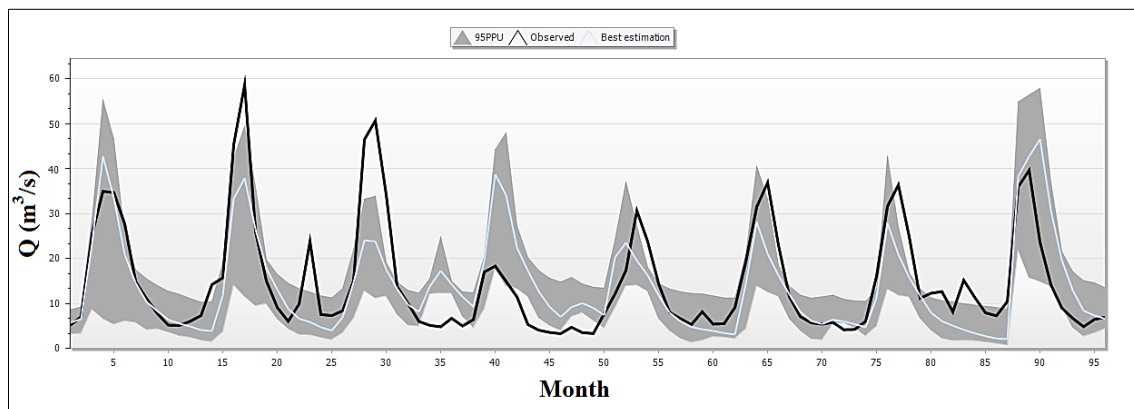


Fig. 5- Results of validation periods

شکل ۵- نتایج شبیه‌سازی دوره صحت‌سنجی

Table 2- Calibration and validation criteria for selected periods

جدول ۲- معیارهای واسنجی و صحت‌سنجی برای دوره‌های مورد مطالعه

Periods/Criteria	R^2	bR^2	NS	p-factor	r-factor
Calibration Period	0.87	0.75	0.85	0.79	1.09
Validation Period	0.54	0.34	0.51	0.7	1.10

۲-۴- آشکارسازی و نسبت‌دهی سیگنال ALL

پس از شبیه‌سازی رواناب‌های متأثر از سیگنال‌های مختلف به کمک مدل کالیبره شده SWAT، مقادیر به دست آمده به صورت میانگین تجمعی ۳ ساله غیرمتداخل محاسبه و پس از استانداردسازی آنها با روش انگشت‌نگاشت بهینه آشکارسازی و نسبت‌دهی شد. بر این اساس، شکل (۶-الف) نتایج آشکارسازی رواناب متأثر از سیگنال ALL را که در حقیقت واکنش به تغییرات عوامل انسانی و طبیعی در دوره مطالعاتی است، به تصویر کشیده است. هرچند در این شکل بخشی از نتایج بالای خط صفر قرار دارند، ولی به دلیل عدم پوشش کافی اکثر بتاها و عدم هماهنگی بین آنها قابلیت آشکارسازی برای این سیگنال کاهش یافته و نمی‌توان نقش سیگنال ALL را بر رواناب ورودی به سد (ایستگاه سیرا) نسبت‌دهی نمود. زیرا تنها جزء ناچیزی از دامنه تغییرات بتا مقدار خط یک را در بر می‌گیرند. به عبارت دیگر ترکیب عوامل انسانی و طبیعی در تغییر حجم رواناب ورودی به سد کرج نقش آشکاری ایفاء نکرده است. همچنین شکل (۶-ب)، صحت روش استفاده شده را با استفاده از آزمون ثبات باقیمانده‌ها نشان می‌دهد. چنانچه دایره‌های قرمز رنگ (آماره آزمون)، در محدوده اطمینان (خط چین‌های آبی) قرار بگیرند، یعنی باقیمانده‌های به دست آمده از معادله رگرسیونی برای هر برش زمانی تصادفی است و از توزیع نرمال برخوردار است و مدل رگرسیون به خوبی این نتایج را تخمین زده است.

۳-۴- آشکارسازی و نسبت‌دهی سیگنال GHG

همچنین شکل (۷-ج)، نتایج آشکارسازی و نسبت‌دهی ناشی از اعمال سیگنال گازهای گلخانه‌ای (GHG) را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، بخش عمده‌ای از ضرایب مقیاس‌ساز نزدیک به یک یا بزرگتر از یک می‌باشد. به علاوه محدوده تغییرات برای این سیگنال در حدود (۰/۵- تا ۲) می‌باشد، که این موضوع تأییدی بر هماهنگی بین نتایج در برش‌های زمانی مختلف می‌باشد. این موضوع به این معنی است که تغییرات صورت گرفته در آنومالی رواناب ورودی به سد با نتایج شبیه‌سازی تحت سیگنال GHG هماهنگی قابل قبولی دارد و با سطح اطمینان حدود ۹۰ درصد می‌توان تغییرات صورت گرفته در رواناب را ناشی از تغییرات گازهای گلخانه‌ای در جو کره زمین در نظر گرفت. البته با وجود هماهنگی بین بیشتر نتایج (شکل ۷-ج)، برخی نتایج از هماهنگی لازم برخوردار نیستند. این اختلاف ممکن است ناشی از وجود خطا در شبیه‌سازی باشد، زیرا علی‌رغم فرض کلیدی روش انگشت‌نگاشت بهینه مبنی بر عدم وجود نویز در شبیه‌سازی‌ها، همواره میزانی از خطای قابل قبول در شبیه‌سازی وجود دارد که منجر به عدم قطعیت می‌شود و در برخی موارد باعث بروز ناهماهنگی در نتایج می‌گردد. شکل (۷-د) نیز، نتایج آزمون ثبات باقیمانده‌ها را نشان می‌دهد. در این شکل نیز آزمون ثبات باقیمانده‌ها صحت نتایج آشکارسازی و نسبت‌دهی را در سطح معناداری ۹۰ درصد نمایش می‌دهد.

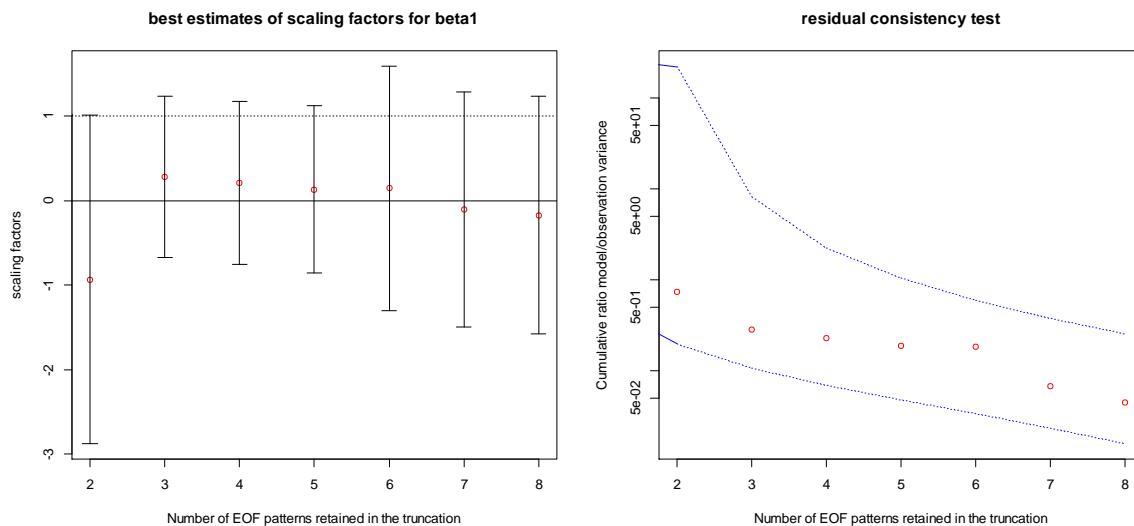


Fig. 6- Confidence limits (90%) and median of β (Left-a) and results of the residual consistency test (Right-b)
 شکل ۶- محدوده اطمینان (۹۰٪) و میانه بتا (الف- چپ)، نتایج آزمون ثبات باقیمانده‌ها (ب- راست)

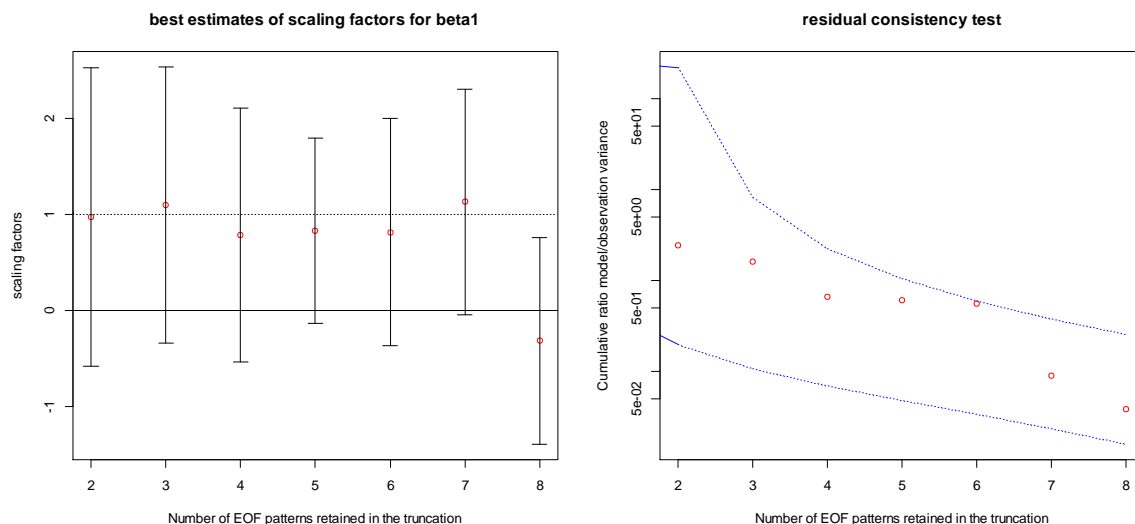


Fig. 7- Confidence limits (90%) and median of β (Left-c) and results of the residual consistency test (Right-d)
 شکل ۷- محدوده اطمینان (۹۰٪) و میانه بتا (ج- چپ)، نتایج آزمون ثبات باقیمانده‌ها (د- راست)

همچنین شکل (۸- و) عملکرد روش را به کمک آزمون ثبات باقیمانده‌ها نشان می‌دهد. این شکل نتایج آزمون باقیمانده‌های مربوط به ضرایب مقیاس‌ساز سیگنال NAT نشان می‌دهد و با توجه به قرار گرفتن اکثر نتایج در محدوده اطمینان مدل عملکرد خوبی را نشان می‌دهد.

بنابراین با توجه به شکل‌های فوق و محاسبات صورت گرفته، ضرایب مقیاس‌ساز (β) و حدود بالا و پایین ۹۰ درصد آنها که تحت عوامل مختلف به روش انگشت نگاشت بهینه برآورد گردیده است در جدول ۴ ارائه شده است.

۴-۴- آشکارسازی و نسبت‌دهی سیگنال NAT

در شکل (۸- ه)، نتایج مشابه با شکل (۶- الف) مشاهده می‌شود. این شکل بیانگر نتایج شبیه‌سازی‌های سیگنال NAT می‌باشد. یعنی عوامل طبیعی به تنهایی تأثیر معناداری بر تغییرات رواناب حوضه مورد مطالعه ندارند؛ زیرا همانطور که در این شکل دیده می‌شود، محدوده اکثر بتاها کمتر از صفر است و به سختی خط یک را در بر می‌گیرند و بخش عمده‌ای از آنها زیر صفر قرار دارند. به عبارت دیگر، تغییرات رواناب ورودی به سد کرج تحت تأثیر عوامل طبیعی نه تنها قابل آشکارسازی نیستند بلکه به هیچ وجه نمی‌توان این تغییرات را به اثر عوامل طبیعی مانند فعالیت‌های خورشیدی و آشفشانی نسبت داد.

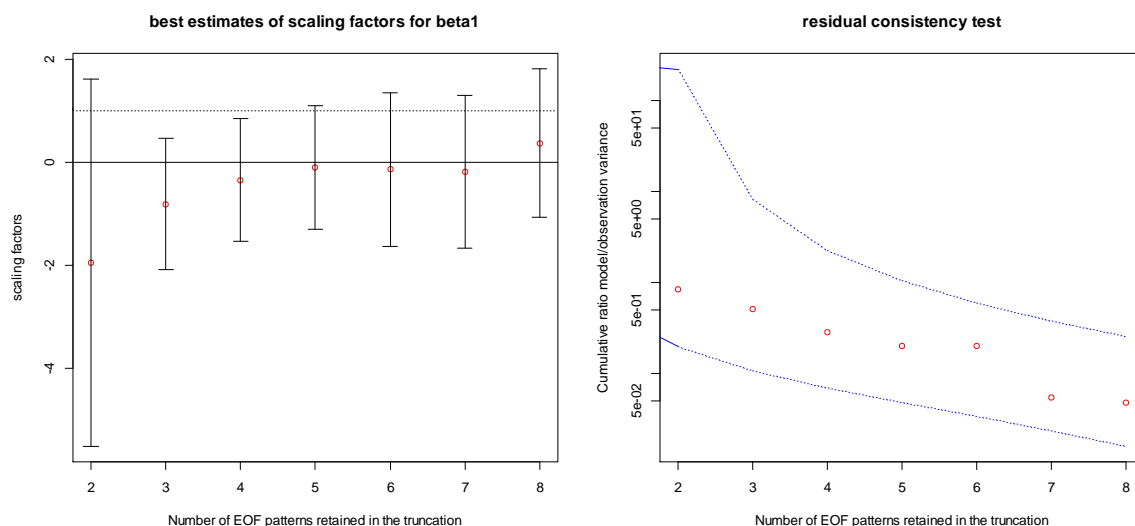


Fig. 8- Confidence limits (90%) and median of β (Left-e) and results of the residual consistency test (Right-g)
 شکل ۸- محدوده اطمینان (۹۰٪) و میانه بتا (ه- چپ)، نتایج آزمون ثبات باقیمانده‌ها (و- راست)

Table 4- Limits of β for Selected Signals
جدول ۴- حدود بتا برای سیگنال‌های مورد مطالعه

Variable	Signal	Lower limit of β	Scaling factor (β)	Upper limit of β
Simulated Run-Off (Entered to the Dam)	ALL	-1.24	-0.05	1.24
	GHG	-0.48	0.76	2.00
	NAT	-2.54	-0.62	1.21

۵- نتیجه‌گیری

با توجه نتایج به دست آمده، تغییرات رواناب ورودی به سد کرج در ایستگاه سیرا با شبیه‌سازی‌های تحت اثرات گازهای گلخانه‌ای (بدون در نظر گرفتن سایر اثرات) بیشترین هماهنگی را داشت و روش انگشت نگاشت بهینه تغییرات صورت گرفته طی دوره گذشته را به سیگنال GHG نسبت‌دهی نمود و ضریب مقیاس‌ساز (β) برای این سیگنال ۰/۷۶ برآورد گردید. این ضریب در واقع مقدار ضریب شیب خط رگرسیون تغییرات آشکار شده است. با این حال نتایج شبیه‌سازی شده تحت تأثیر عوامل ترکیبی انسانی و طبیعی (ALL) از هماهنگی لازم با رواناب مشاهداتی برخوردار نبود و روش انگشت‌نگاشت بهینه نتوانست این سیگنال را برای دوره مطالعاتی (۲۰۱۱-۱۹۸۵) آشکارسازی و نسبت‌دهی کند. به طور مشابه آنومالی تغییرات رواناب تحت تأثیر عوامل طبیعی (به تنهایی) قابل آشکارسازی و نسبت‌دهی نبود. با توجه به این موضوع می‌توان چنین استنباط کرد که ترکیب عوامل طبیعی با گازهای گلخانه‌ای سیگنال ALL را تشکیل می‌دهند، باعث ضعیف شدن قدرت آشکارسازی این سیگنال گردیده و باعث شده که این سیگنال آشکارسازی و نسبت‌دهی نشود.

هرچند با توجه به آزمون ثبات باقیمانده‌ها مدل انگشت نگاشت بهینه برای هر سه سیگنال (ALL، GHG و NAT) از اعتبار قابل قبولی برخوردار است و در محدوده اطمینان آزمون واقع شده است، اما با وجود نتایج قابل قبول آشکارسازی و نسبت‌دهی واداشت‌های گازهای گلخانه‌ای، هماهنگی کاملی بین تمامی ضرایب مقیاس‌ساز (β) در برش‌های زمانی مختلف وجود نداشت، که این موضوع ممکن است ناشی از تأثیر ریزمقیاس‌نمایی یا به دلیل عدم قطعیت مدل‌ها در شبیه‌سازی اجرای کنترلی و سیگنال‌ها باشد. در نهایت، به نظر می‌رسد بتوان با مطالعه روی سایر حوضه‌های کشور که دارای آمار طولانی‌تری هستند یا با استفاده از داده‌های واکاوی‌شده به نتایج بهتری دست یافت و با تحلیل عدم قطعیت در مطالعات مشابه به بهبود نتایج کمک کرد و سهم اثرات گازهای گلخانه‌ای یا واداشت‌های انسانی را دقیق‌تر ارزیابی نمود.

۶- قدردانی

نویسندگان در پایان از راهنمایی‌های استاد دانشگاه ویکتوریا پروفیسور زوئرس^{۵۲}، آقای دکتر اوجی (استادیار دانشگاه گیلان) و حمایت‌های سازمان هواشناسی کشور و شرکت آب منطقه‌ای البرز کمال تشکر را دارند.

پی‌نوشت‌ها

1. Atmosphere Ocean General Circulation Models (AOGCM)
2. Response
3. Influence Agents
4. Forcing
5. Detection and Attribution (D&A)
6. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)
7. Genetic Programming (GP)
8. Anthropogenic
9. Aerosols
10. Interaction
11. Sub-continental
12. Coupled Model Inter-Comparison Project Phase 5 (CMIP5)
13. APHRODITE: Asian Precipitation Highly Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation
14. Internal Variability
15. Reanalysis
16. SWAT: Soil and Water Assessment Tools
17. Synoptic
18. Hydrometer
19. Rain gauge
20. Signals
21. Products
22. Green House Gases
23. Preindustrial-Control
24. Extract
25. Ordinary Least Squares (OLS)
26. Scaling Factor
27. Experimental Orthogonal Function (EOF)
28. Digital Elevation Model (DEM)
29. Package
30. Flux
31. Bias
32. Projecting
33. Quantile Matching
34. Equidistance Quantile Matching
35. Global Climate Model (GCM)

- Hasselmann K, Bengtsson L, Cubasch U, Hegerl GC, Rodhe H, Roeckner E, Storch HV, Voss R, and Waszkewitz J (1995) Detection of anthropogenic climate change using a fingerprint method. Max-Planck-Institut für Meteorologie (168)
- Hegerl G and Zwiers F (2011) Use of models in detection and attribution of climate change. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change 2(4):570–591
- Johnson F and Sharma A (2012) A nesting model for bias correction of variability at multiple time scales in general circulation model precipitation simulations. Water Resources Research 48(1):1–16
- Krause P, Boyle DP, and Bäse F (2005) Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. Advances in Geosciences 5(5):89–97
- Krysanova V and Arnold JG (2008) Advances in ecohydrological modelling with SWAT-A review. Hydrological Sciences Journal 53(5):939–947
- Li H, Sheffield J, and Wood EF (2010) Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching. Journal of Geophysical Research Atmospheres 115(10)
- Mehrotra R, Johnson F, and Sharma A (2018) A software toolkit for correcting systematic biases in climate model simulations. Environmental Modelling and Software 104:130–152
- Mehrotra R and Sharma A (2012) An improved standardization procedure to remove systematic low frequency variability biases in GCM simulations. Water Resources Research 48(12):1–8
- Mehrotra R and Sharma A (2015) Correcting for systematic biases in multiple raw GCM variables across a range of timescales. Journal of Hydrology 520:214–223
- Mehrotra R and Sharma A (2016) A multivariate quantile-matching bias correction approach with auto- and cross-dependence across multiple time scales: Implications for downscaling. Journal of Climate 29(10):3519–3539
- Mehrotra R and Sharma A (2019) A resampling approach for correcting systematic spatiotemporal biases for multiple variables in a changing climate. Water Resources Research 55(1):754–770
- Mondal A and Mujumdar PP (2012) On the basin-scale detection and attribution of human-induced climate change in monsoon precipitation and streamflow. Water Resources Research 48(10):1–18
- Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD and Veith TL (2007) Model evaluation
36. MAR(1): First Order Multivariate Auto-Regressive
37. Nesting
38. Nesting Bias Correction (NBC)
39. Stationary Nesting Bias Correction
40. Recursive
41. Multivariate Recursive Quantile-matching Nesting Bias Correction
42. SWAT: Soil and Water Assessment Tools
43. HRU: Hydrologic Response Unit
44. Nash-Sutcliffe (NS)
45. Detectability
46. Optimal Fingerprint
47. Scaling Factors
48. Pre-Whitening
49. Residual Consistency Test
50. Experimental Orthogonal Functions
51. Signal to Noise Ratio (S/N)
52. Zwiers

۷- مراجع

- Abbaspour KC (2007) A user manual of SWAT-CUP, SWAT calibration and uncertainty programs. Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic and Science and Technology, 100p
- Abbaspour KC, Faramarzi M, Ghasemi SS, and Yang H (2009) Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. Water Resources Research 45(10):1–16
- Allen MR and Stott PA (2003) Estimating signal amplitudes in optimal fingerprinting, part I: Theory. Climate Dynamics 21(5–6):477–491
- Allen MR and Tett SFB (1999) Checking for model consistency in optimal fingerprinting. Climate Dynamics 15(6):419–434
- Cramer W, Yohe GW, Auffhammer M, Huggel C, Molau U, Da Silva Dias MAF, Solow A, Stone DA, Tibig L, Leemans R, ... Hansen G (2015) Detection and attribution of observed impacts. Climate Change 2014 Impacts, Adaptation and Vulnerability: Part A: Global and Sectoral Aspects 979–1038
- Forbes WL, Mao J, Jin M, Kao SC, Fu W, Shi X, Riccuito DM, Thornton PE, Ribes A, Wang Y, ... Hayes DJ (2018) Contribution of environmental forcings to US runoff changes for the period 1950–2010. Environmental Research Letters 13(5):054023
- Hannart A, Ribes A, and Naveau P (2014) Optimal fingerprinting under multiple sources of uncertainty. Geophysical Research Letters 41(4):1261–1268
- Hasselmann K (1997) Multi-pattern fingerprint method for detection and attribution of climate change. Climate Dynamics 13(9):601–611

- Dugas B (2016) Coordinated global and regional climate modeling. *Journal of Climate* 29(1):17–35
- Shim S, Kim J, Yum SS, Lee H, Boo KO, and Byun YH (2019) Effects of anthropogenic and natural forcings on the summer temperature variations in East Asia during the 20th century. *Atmosphere* 10(11):690
- Shirazi M, Naseri M, and Zahraie B (2018) Detection and attribution of extreme precipitation in Iran. The 6th Comprehensive Conference on Flood Engineering and Management, Tehran, Iran (In Persian)
- Velasquez P, Messmer M, and Raible C (2019) A new bias-correction method for precipitation over complex terrain suitable for different climate states. *Geoscientific Model Development Discussions* (July):1–27
- Wang Z, Jiang Y, Wan H, Yan J, and Zhang X (2020) Toward optimal fingerprinting in detection and attribution of changes in climate extremes. *Journal of the American Statistical Association* 1–23, DOI: 10.1080/01621459.2020.1730852
- Yuemei H, Xiaoqin Z, Jianguo S, and Jina N (2008) Conduction between left superior pulmonary vein and left atria and atria fibrillation under cervical vagal trunk stimulation. *Colombia Medica* 39(3):227–234
- Zare Garizi A and Talebi A (2017) Water balance simulation for the Ghare-Sou Watershed, Golestan, using the SWAT model. *Journal Management System* 9(30):37-50 (In Persian)
- Zhang X, Wan H, Zwiers FW, Hegerl GC, and Min SK (2013) Attributing intensification of precipitation extremes to human influence. *Geophysical Research Letters* 40(19):5252–5257
- Zohrabi N, Massah Bavani A, Goodarzi E, and Eslamian S (2014) Attribution of temperature and precipitation changes to greenhouse gases in northwest Iran. *Quaternary International*. Elsevier Ltd and INQUA 345:130–137
- guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50(3):885–900
- Naseri E, Massah Bavani A, and Saadi Tofigh (2019) Evaluating the efficiency of GCM models for estimating the average temperature of Alborz province in (1985-2015) historical Period. 6th International-Regional Conference on Climate Change, 18-19 November, National Library of Iran, Tehran, Iran (In Persian)
- Naseri E, Shahidi A, and Farzaneh MR (2015) The assesment of climate change on run-off by SWAT model. *Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems* 3(9):27-38 (In Persian)
- Neitsth SL, Arnold JG, Kiniry JR, and Williams JR (2005) Soil and water assessment tools theoretical documentation. Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural research service, 494p
- Ribes A, Azaïs JM, and Planton S (2009) Adaptation of the optimal fingerprint method for climate change detection using a well-conditioned covariance matrix estimate. *Climate Dynamics* 33(5):707–722
- Ribes A, Planton S, and Terray L (2013) Application of regularised optimal fingerprinting to attribution. Part I: Method, properties and idealised analysis. *Climate Dynamics* 41(11–12):2817–2836
- Ribes A, Zwiers FW, Azaïs JM, and Naveau P (2017) A new statistical approach to climate change detection and attribution. *Climate Dynamics*. Springer Berlin Heidelberg 48(1–2):367–386
- Saadi T, Alijani B, Akbari M, and Massah Bavani A (2016) Detection of extreme precipitation changes and attribution to climate change using standard optimal fingerprinting (Case study: The Southwest of Iran). *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards* 3(3):65-80(In Persian)
- Scinocca JF, Kharin V V, Jiao Y, Qian MW, Lazare M, Solheim L, Flato GM, Biner S, Desgagne M, and