تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال پانزدهم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۸
Volume 15, No. 3, Fall 2019 (IR-WRR)
۲۵۸-۲۷۱

ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر الگوی بهینه کشت محصولات زراعی: مطالعه موردی حوضه قره‌سو در استان گلستان

الهام کلبعلی[۱]، سامان ضیائی[۲*]، مصطفی مردانی نجف‌آبادی[۳] و مهدی ذاکری‌نیا[۴]

چکیده

این مطالعه با هدف ارزیابی فنی و اقتصادی اثرات تغییر اقلیم بر بخش کشاورزی حوضه قره سو در استان گلستان انجام شده است. در قسمت اول، با استفاده از مدل بارش- رواناب IHACRES و داده‌های بارش، دما و رواناب ماهانه در دوره پایه (۲۰۱۰-۱۹۹۴)، میزان رواناب رودخانه قره‌سو در دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱ شبیه‌سازی شد. سپس، وضعیت احتمالی تخصیص منابع آب و تأمین نیاز بخش کشاورزی توسط مدل WEAP مورد بررسی قرار گرفت. در قسمت دوم، برای کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم بر بخش کشاورزی، با استفاده از مدل اقتصادی برنامه‌ریزی آرمانی، الگوی بهینه کشت با آرمان‌های حداقل مصرف آب و حداکثر سود در آینده تعیین گردید. نتایج قسمت اول نشان داد که رواناب در دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه ۳۴/۳۱ درصد کاهش می‌یابد. همچنین، نتایج مدل WEAP نشان‌دهنده افزایش نیاز تأمین نشده بخش کشاورزی در منطقه مورد مطالعه در دوره آتی می‌باشد. این نتیجه بیانگر این است که در آینده، در صورت ادامه تغییر اقلیم، جهت کاهش اثرات منفی در بخش کشاورزی، باید الگوی کشت منطقه به حذف پنبه و افزایش سطح زیرکشت جو و برنج تغییر کند. این تغییرات در نتایج قسمت دوم مدل به واسطه یک مدل برنامه‌ریزی آرمانی مشخص شد. در الگوی بهینه کشت ارائه شده، میزان سود ناخالص کشاورزان منطقه مـورد مطالعه در دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱ از ۱۳۸۶ میلیارد ریال به ۱۹۹۱ میلیارد ریال نسبت به سال پایه افزایش می‌یابد. پیشنهاد می‌شود با توجه به این‌که نتایج مدل برنامه‌ریزی آرمانی اهداف متضادی (حداکثر سود ناخالص، افزایش سطح زیرکشت و حداقل مصرف آب) را در برگرفته است، از نتایج آن (تغییر الگوی کشت) به عنوان یک راهنما برای مدیران تصمیم‌گیر استفاده شود.

کلمات کلیدی: تغییر اقلیم، حوضه قره‌سو، استان گلستان، WEAP، برنامه‌ریزی آرمانی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۱۱/۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۵/۲

۱- دانشجوی دکتری اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل.
۲- دانشیار اقتصاد کشاورزی، دانشگاه زابل.
۳- استادیار اقتصاد کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان.
۴- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

Assessment of Climate Change Impacts on Optimum Cropping Pattern: A Case Study of Gharehso Basin in Golestan Province

E. Kalbali[1], S. Ziaee[2], M. Mardani Najafabadi[3], and M. Zakerinia[4]*

Abstract

This study was carried out to evaluate the economic and technical effects of climate change on the agricultural sector of Gharehso basin in Golestan province. In the first part, using the IHACRES rainfall-runoff model and rainfall, temperature, and monthly runoff data during the base period (1994-2010), the Ghareso river flow was simulated during the period of 2011-2040. Then, the probabilistic status of water resources allocation and provision of agricultural sector was evaluated by WEAP model. In the second part, in order to reduce the negative effects of climate change on the agricultural sector, using the goal programming economic model, optimal cultivation with the goals of minimum water consumption and maximum future profits was determined. The results of the first part showed that runoff decreases in the upcoming periods by 31.34% compared to the base period. In addition, the results of the WEAP model indicate an increase in the unmet need of the agricultural sector in the region under study. This result suggests that with the continuation of climate change in the future to reduce the negative effects in agriculture, the region's cultivation pattern should be changed to remove cotton and increase the area of barley and rice. These changes were identified in the results of the second part of the model through the Goal Programming Model. In the optimal cultivation pattern, the gross profit of farmers in the studied area in the period of 2011-2040 increased from 1386 billion Rials to 1991 billion Rials compared to the base year. It is suggested, since the results of the Goal Programming Model have included conflicting objectives (minimizing water consumption and maximizing profit and cultivation area), its results (changed cultivation pattern) should be used as a guide for decision makers.

Keywords: Climate Change, Gharehso Basin, Golestan Province, WEAP, Goal Programming Model.

Received: January 22, 2019
Accepted: July 24, 2019

1- Ph.D. Student, Agricultural Economic Department, Faculty of Agriculture, Zabol Univercity.
2- Associate Professor of Agricultural Economics, University of Zabol Email: samanziaee@uoz.ac.ir, samanziaee@gmail.com
3- Assistance professor of agricultural economics, Agriculture Sciences and Natural Resources University of Khuzestan.
4- Associate Professor of Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources.
*- Corresponding Author

۱- مقدمه

تغییر اقلیم، که یکی از مهم‌ترین موضوعات قرن جاری می‌باشد، عبارت است از تغییرات رفتار آب‌وهوایی یک منطقه نسبت به رفتاری که در طول یک افق زمانی بلندمدت از اطلاعات مشاهده یا ثبت شده در آن منطقه مورد انتظار است (Karamouz and Araghinejad, 2015). این پدیده متأثر از دو عامل دما و میزان بارش می‌باشد که با تغییر هر کدام از این عوامل تغییر اقلیم رخ می‌دهد (Vaesghi and Esmaili, 2008) و در پی آن با تأثیر بر چرخه هیدرولوژیک، نقش مهمی در تعیین میزان رواناب در دوره‌های آتی یک حوضه خواهد داشت (Almasi et al., 2017). زمانی که لازم است فقط جریان در خروجی حوضه آبریز شبیه‌سازی شود، مدل‌های مفهومی اغلب بر انواع دیگر مدل‌ها ترجیح داده می‌شوند؛ زیرا ضمن ارائه پاسخ خوب، به تلاش محاسباتی و داده‌های ورودی کمتری نیاز دارند (Cooper et al., 2007). یکی از این مدل‌ها، مدل IHACRES می‌باشد که به علت داده‌های کمتر مورد نیاز، بدون صرف زمان و هزینه زیاد برای تهیه داده‌ها، به آسانی می‌تواند در بسیاری از حوضه‌های آبریز به‌کار برده شود (Dye and Croke, 2003).

تغییر اقلیم مسأله مهمی برای تولیدات کشاورزی پایدار در دهه‌های اخیر در نواحی خشک و نیمه خشک سراسر جهان می‌باشد. در این نواحی، تغییرات اقلیم باعث افزایش دما و تبخیر و تعرق، کاهش بارش و تغییر الگوی بارش می‌شود و اثرات منفی روی منابع آب، کشت‌های دیم و آبی و اکوسیستم‌های وابسته به آب می‌گذارد (IPCC, 2014). در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، انتظار می‌رود که آسیب‌پذیری کشاورزی آبی به تغییرات اقلیم بسیار زیاد باشد (IPCC, 2014). پیش‌بینی‌های تغییرات آب‌وهوایی برای این مناطق، کاهش قابل ملاحظه‌ی منابع آب شیرین از منابع آب سطحی و زیرزمینی و افزایش وقوع خشکسالی‌های شدید و مداوم را نشان می‌دهند (Lehner et al., 2006). این بحران به عنوان مشکلی برای مدیریت در زمینه افزایش تقاضا برای مواد غذایی و رقابت رو به رشد بین استفاده از آب شرب و زیست‌محیطی خواهد بود (Elliott et al., 2014).

مدل‌های هیدرولوژی و اقتصادی که با هم به بررسی اثر تغییر اقلیم بر بخش کشاورزی می‌پردازند، شامل دو بخش می‌باشند. بخش هیدرولوژی، که اثر تغییر اقلیم بر منابع آب را مورد بررسی قرار می‌دهد و بخش اقتصادی، که با استفاده مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی و نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS[1] جهت تعدیل اثرات تغییر اقلیم راهکار مدیریتی ارائه می‌کند.

مطالعاتی که در زمینه تغییر اقلیم انجام شده است را می‌توان در دو گروه عمده دسته‌بندی کرد. در بخش هیدرولوژی مطالعات، با استفاده از مدل‌های بارش- رواناب، میزان دبی رودخانه را شبیه‌سازی کرده و سپس با استفاده از دبی شبیه‌سازی شده و مدل WEAP (Ghandehari et al., 2015; Malamir et al., 2016; Ajamzadeh and Mollaeinia, 2016; Yates et al., 2005; Ashofteh, 2013; Esteve et al., 2015)، اثرات تغییر اقلیم بر میزان آب تخصیصی بخش کشاورزی را مورد ارزیابی قرار می‌دهند. Niromandfard et al. (2018) در مطالعه خود، اثر تغییر اقلیم بر جریان رودخانه‌ای، برای حوضه محمدآباد استان گلستان، با استفاده از مدل IHACRES را بررسی کردند. نتایج مدل برای دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب با مقادیر همبستگی ۵۰ و ۴۶ درصد قابل قبول ارزیابی گردید و مجموع متوسط رواناب سالانه درازمدت در دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱ به میزان ۱/۷۲ متر مکعب بر ثانیه در سناریوی A1B، ۴/۷۶ متر مکعب بر ثانیه در سناریوی A2 و ۰/۲۵ متر مکعب بر ثانیه در سناریوی B1 نسبت به دوره‌ی ۲۰۱۰-۱۹۸۲ کاهش خواهد یافت. نتایج حاصل از مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مطالعه Hosseini et al. (2016) در بررسی جریان رودخانه صوفی‌چای واقع در حوضه دریاچه ارومیه به وسیله مدل بارش- رواناب IHACRES نشان داد که این مدل در شبیه‌سازی جریان صوفی‌چای دارای عملکرد رضایت‌بخش است. به‌طور کلی، روند تغییر جریان تولید شده برای دوره‌های آتی و تحت سناریوهای انتشار مطابق و همسو با نتایج به دست آمده برای بارش بود که به طور ضمنی بیانگر اهمیت پارامتر بارش در تولید جریان رودخانه به‌وسیله مدل هیدرولوژیک است. متوسط کاهش نسبی جریان سالانه در دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۱ به‌ترتیب برای دو سناریوی انتشار A2 و B1، ۱۸- و ۵/۸- درصد و برای دوره ۲۰۶۵- ۲۰۴۶، ۱۶/۶- و ۲۰/۲- درصد محاسبه شد. Abushandi and Broder (2011)، در تحقیقی در حوضه‌ای در شمال شرقی اردن با اقلیم خشک، مدل IHACRES را به‌کار گرفتند. آن‌ها نتایج قابل قبولی در خصوص بارش مؤثر و جریان به‌دست آوردند. به‌طوری که امکان استفاده از مدل مربوطه را برای پیش‌بینی جریان در مناطق فاقد داده، ترسیم نمودند. Ghandehari et al. (2015) در پژوهشی، وضعیت منابع آب حوضه رودخانه بار نیشابور در سه بخش صنعت، شرب و کشاورزی را با استفاده از مدل WEAP در شرایط تغییر اقلیم در دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱ میلادی مورد بررسی قرار دادند. نتایج، نشان‌دهنده افزایش دما و کاهش بارندگی می‌باشد. تحت این شرایط، نیاز آبی در بخش کشاورزی و صنعت افزایش می‌یابد. به‌طوری که بیشترین درصد کمبود در بخش کشاورزی (۱۲ درصد)، سپس در بخش صنعت (۲ درصد) و در نهایت در بخش نیاز شرب با کمبود مواجه نخواهد شد. همچنین، در خصوص تخصیص آب با استفاده از مدل

WEAP می‌توان به مطالعات Salehpoor Laghani et al. (2018)، Yates et al. (2005)، Ashofteh (2013)، Esteve et al. (2015) و Malamir et al. (2016) نیز اشاره کرد. در بخش اقتصادی، با توجه به این‌که اثرات تغییر اقلیم بر تولید محصولات کشاورزی و ارزیابی راهکارهای مدیریتی به این تغییرات به یکی از موضوعات مورد علاقه‌ی اقتصاددانان کشاورزی نیز تبدیل شده است و یا تأثیری که بر رفاه و مازاد اقتصادی جامعه دارد مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند. در زمینه‌ی آثار اقتصادی تغییرات اقلیم در بخش کشاورزی می‌توان به مطالعات زیر اشاره کرد: Kahil et al. (2015) در شمال اروپا، با ارائه سیاست‌های کارآمد مدیریتی آب، با استفاده از مدل برنامه‌ریزی ریاضی تصادفی دومرحله‌ای، سازگاری بخش کشاورزی با تغییرات اقلیم را مورد بررسی دادند و اثرات منفی تغییر اقلیم را در بخش کشاورزی با راهکارهای مدیریتی بازار آب، تغییر الگوی کشت و تغییر سیستم‌های آبیاری تعدیل کردند، که در بین این روش‌ها فقط تغییر الگوی کشت برای جامعه هزینه‌بر نمی‌باشد. Jalili et al. (2017) اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی دشت اسلام‌آباد در شرایط کنونی و تغییر اقلیم و بهینه‌سازی تخصیص سطح زیر کشت محصولات با توجه به محدودیت آب در دسترس و با استفاده از برنامه‌ریزی خطی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی آنها نشان داد که متغیرهای بارش، دمای بیشینه و کمینه و ساعات آفتابی در شرایط تغییر اقلیم به ترتیب ۳۱/۴، ۲/۲، ۱۳/۶۶ و ۰/۴ درصد تغییر می‌کنند. این شرایط بر نیاز آبی و حجم آب دردسترس تأثیر گذاشته و سود در شرایط تغییر اقلیم نسبت به وضعیت کنونی ۳/۹ درصد کاهش می‌یابد. یکی از موضوعات مهم دیگر در حوزه برنامه‌ریزی کشاورزی و شرایط تغییر اقلیم، دستیابی به الگو یا ترکیب مناسبی از محصولات مدنظر، جهت کشت می‌باشد. در این راستا، با توجه به محدودیت‌های موجود و مدنظر قرار دادن اهداف و آرمان‌های مختلف، تصمیم‌گیری به منظور استفاده بهینه از منابع با پیچیدگی‌های خاصی همراه می‌باشد. در نتیجه، به‌کارگیری مدل‌های ریاضی می‌تواند تا حد زیادی به برنامه‌ریزی در این زمینه کمک نماید. برنامه‌ریزی آرمانی یکی از مدل‌های ریاضی می‌باشد که با اهداف متفاوت، الگوی بهینه کشت را ارائه می‌کند. در تحقیقی که توسط Mirzaei and Ziaei (2016) در رودبار الموت غربی با استفاده از مدل برنامه‌ریزی آرمانی اولویتی انجام شد، الگوی بهینه کشت مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، چهار هدف اقتصادی و دو هدف آرمانی در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که الگوی کشت فعلی در این منطقه بهینه نیست. بنابراین، محصولات گندم و جو به علت بازده ناخالص کم و محصولات گوجه‌فرنگی و یونجه به دلیل مصرف بالای کود و سم از الگوی فعلی حذف شدند.

در حال حاضر، اکثر مطالعات داخلی در زمینه تغییر اقلیم، با تأکید بر یکی از مدل‌های هیدرولوژی یا اقتصادی، انجام شده‌اند و تعداد انگشت‌شماری از این مطالعات از جمله، Hosseini et al. (2013)، Parhizgari et al. (2017)، Varela-Ortega et al. (2016) و Kahil et al. (2015) ارائه راهکارهایی مدیریتی در سطح مزرعه جهت سازگاری بخش کشاورزی با تغییر اقلیم را مورد توجه قرار داده‌اند. اما در پژوهش حاضر، با به‌کارگیری همزمان مدل‌های هیدرولوژی و اقتصادی، ابتدا با استفاده از مدل بارش- رواناب IHACRES تحت سناریوی اقلیمی A2، میزان رواناب رودخانه قره‌سو شبیه‌سازی شده و سپس با استفاده از این رواناب و مدل WEAP، اثرات تغییر اقلیم بر میزان آب تخصیصی بخش کشاورزی مورد ارزیابی قرار گرفت و در آخر، نتایجی که از مدل‌های هیدرولوژیک حاصل می‌گردد به عنوان یک محدودیت، همراه با محدودیت‌های اقتصادی، جهت تأمین هدف (حداکثرکردن سود ناخالص کشاورزان و کاهش مصرف آب در شرایط تغییر اقلیم و سناریوی افزایش سطح زیر کشت محصولات) در مدل اقتصادی برنامه‌ریزی ریاضی آرمانی به‌کار می‌روند و الگوی بهینه کشت منطقه به عنوان یک راهکار مدیریتی ارائه می‌گردد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- منطقه مطالعاتی

حوضه آبخیز قره‌سو در استان گلستان، به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شده است (شکل ۱). حوضه آبخیز قره‌سو با مساحتی معادل ۱۶۷۰ کیلومتر مربع، معادل ۸ درصد مساحت استان گلستان می‌باشد. استان گلستان از نظر اقلیمی به سه بخش آب و هوای معتدل گرم و بارانی با زمستانی ملایم در حدّ فاصل بین قره‌سو و کوهستان، آب و هوای صحرایی گرم در ناحیه اترک و گرگان‌رود و آب‌وهوای بیابانی گرم و خشک با بارندگی کم در ناحیه کوچکی از شمال منطقه گرگان تقسیم می‌شود. مجموع طول رودخانه‌های قره‌سو حدود ۹۳۰ کیلومتر می‌باشد که ۸ درصد آب سطحی استان گلستان در این حوضه جریان دارد. محور فعالیت‌های اقتصادی در استان گلستان، کشاورزی می‌باشد و فعالیت‌های بخش کشاورزی (دیم و آبی) به شدت به شرایط اقلیمی وابسته است (Regional Water Authority of Golestan, 2016). بر این اساس، انتظار می‌رود وقوع پدیده‌ی تغییر اقلیم با مشخصه‌ی افزایش دما و کاهش بارش‌ها، پیامدهای زیانباری برای بخش کشاورزی و به‌ویژه برای زیربخش زراعت استان به همراه داشته باشد (Gorgan Organization of Jihad-e-Agriculture, 2017).

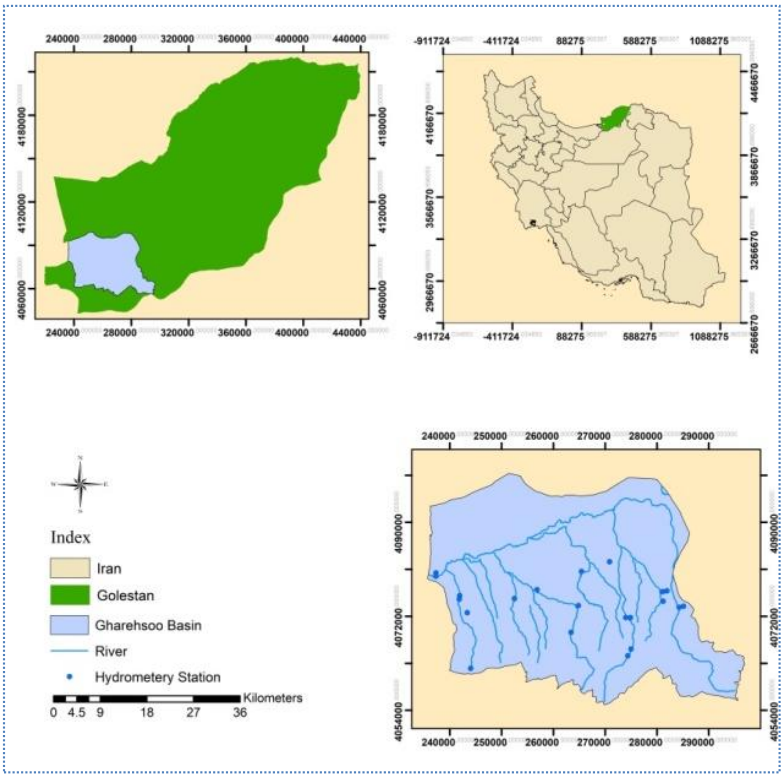

Fig. 1- Geographical location of the Gharehso watershed

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز قره سو

روش تحقیق حاضر شامل دو بخش می‌باشد. بخش اول، بخش هیدرولوژی است که اثر تغییر اقلیم بر رواناب و پیش‌بینی رواناب آینده با استفاده از مدل IHACRES و تأمین نیاز کشاورزی در آینده را با کمک نرم‌افزار WEAP مورد بررسی قرار می‌دهد. بخش دوم، بخش اقتصادی است که در چارچوب روش برنامه‌ریزی ریاضی آرمانی در مقیاس حوضه آبریز قره سو، به منظور بهره‌برداری پایدار از منابع آب و حداکثر کردن سود ناخالص کشاورزان و کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم، مشروط به محدویت‌های هیدرولوژیک و کشاورزی حوضه آبریز قره‌سو، الگوی بهینه کشت را ارائه می‌کند. با توجه به مطالب عنوان شده، فرآیند انجام مطالعه‌ی حاضر در چارچوب شکل ۲ قابل ملاحظه است.

۲-۲- مدل بارش- رواناب IHACRES

مدل بارش- رواناب IHACRES یک مدل پیوسته و نیمه مفهومی است که در ابتدا توسط جیکمن و هورمبرگ در سال ۱۹۹۳ (Crooks and Naden, 2007) برای استفاده در حوضه‌های معتدل توسعه یافته، و بعد برای رودخانه‌های موقت بهبود داده شد (Ye et al., 1995).

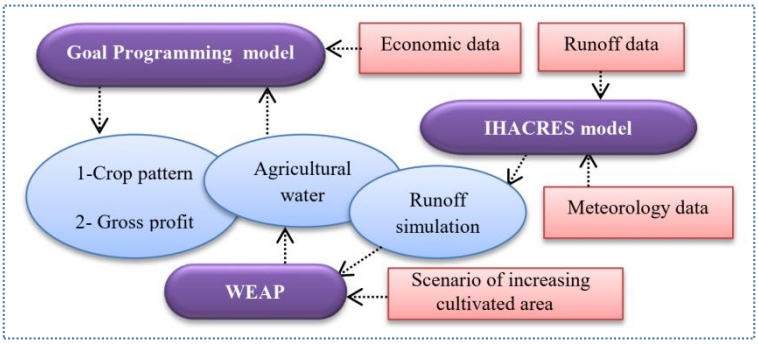

Fig. 2- Conceptual framework for analyzing the effects of climate change on the agricultural sector

شکل ۲- چارچوب مفهومی مدل‌سازی برای تجزیه و تحلیل اثرات تغییر اقلیم بر بخش کشاورزی

این مدل، برای حوضه‌های آبخیز با اندازه‌ها و شرایط آب و هوایی متنوع به‌کار برده شده است (Meshkati et al., 2010). این مدل، مطابق شکل ۳، شامل دو بخش به هم پیوسته غیرخطی و خطی است. در این مدل، در ابتدا بارندگی (r_k) و دما (t_k) در هر گام زمانی k توسط مدل غیر خطی، به بارندگی مؤثر u_k تبدیل شده و سپس مدل خطی هیدروگراف واحد به رواناب سطحی در همان گام زمانی (شکل ۳) تبدیل می‌شود (Ghorbani et al., 2016).

– تبدیل بارش به بارش مؤثر (بخش غیرخطی):

در این بخش، بارش مؤثر از حاصل‌ضرب بارش کل در شاخص رطوبت خاک حوضه در هر بازه زمانی محاسبه می‌شود (معادله ۱):

$$u_k[c(\varphi_k - l)]^p r_k \qquad (۱)$$

که در آن:

c: ضریب تعادل حجم بارش، l آستانه شاخص رطوبت خاک، p عامل واکنش غیر خطی، r_k بارش مشاهداتی و φ_k شاخص رطوبت خاک می‌باشد که با استفاده از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\varphi_k = r_k + \left(1 - \frac{1}{\tau_k}\right)\varphi_{k-1} \qquad (۲)$$

$$\tau_k = \tau_w \exp(f(T_{ref} - T_k) \times 0.062) \qquad (۳)$$

که τ_k شدت خشکی خاک، به‌عنوان تابعی از دما، τ_w شدت خشکی مبنا، f تابع تعدیل دما، T_{ref} دمای مرجع و T_k دما در بازه زمانی مورد نظر می‌باشد.

بعد از محاسبه بارش مؤثر، هیدروگراف واحد کل با استفاده از بخش خطی در مدل محاسبه می‌گردد.

– تبدیل بارش مؤثر به رواناب (بخش خطی):

بخش خطی دارای سه پارامتر τ_q، τ_s و ϑ_q می‌باشد. ترکیب دو مؤلفه جریان سریع $x_k^{(q)}$ و جریان آهسته $x_k^{(s)}$ منجربه تولید رواناب می‌شود که با استفاده از معادلات (۴) تا (۶) محاسبه می‌گردد (Taesombat and Sriwongsitanon, 2010):

$$x_k = s_k^{(q)} + x_k^{(s)} \qquad (۴)$$

$$x_k^{(q)} = -\alpha_q x_{k-1}^{(q)} + \beta_q u_k \qquad (۵)$$

$$x_k^{(s)} = -\alpha_s x_{k-1}^{(s)} + \beta_s u_k \qquad (۶)$$

که در آن، α_q و β_q به‌ترتیب ثابت زمانی جریان سریع و α_s و β_s به‌ترتیب ثابت زمانی جریان آهسته می‌باشند که با استفاده از معادلات (۷) و (۸) به‌دست می‌آیند:

$$\tau_q = \frac{-\Delta}{\ln(-\alpha_q)} \qquad (۷)$$

$$\tau_s = \frac{-\Delta}{\ln(-\alpha_s)} \qquad (۸)$$

که در آنها، Δ بازه زمانی و τ_q و τ_s ثابت زمانی فروکش برای جریان سریع و آهسته در مخازن متوالی (بر حسب روز) می‌باشند. نسبت حجمی جریان سریع و آهسته به‌صورت معادله (۹) در نظرگرفته می‌شود:

$$\vartheta_q = 1 - \vartheta_s = \frac{\beta_q}{1+\alpha_q} = 1 - \frac{\beta_s}{1+\alpha_s} \qquad (۹)$$

مدل IHACRES به سه سری زمانی داده‌های بارندگی، دما و دبی جریان مشاهده‌ای نیاز دارد. داده‌های روزانه دما، تبخیر و بارش مشاهداتی از ایستگاه بالابلوک کردکوی و دبی مشاهده‌ای از ایستگاه هیدرومتری سیاه آب واقع در خروجی حوضه (جدول ۱) در دوره آماری ۲۰۱۰-۱۹۹۴ به عنوان ورودی‌های مدل IHACRES به منظور انجام واسنجی و صحت‌سنجی استفاده شد. پس از این مرحله، مقادیر شبیه‌سازی شده دما و بارش ماهانه توسط مدل اقلیمی HadCM3 تحت سناریوی بدبینانه A2، که این سناریوی انتشار رشد اقتصادی بسیار سریع جهان آینده همسو با شرایط منطقه‌ای، توسعه چشمگیر تکنولوژی و همچنین استفاده افراطی از سوخت‌های فسیلی را برای آینده شامل می‌شود، به مدل بارش– رواناب IHACRES داده شد و میزان دبی برای دوره‌ی ۲۰۴۰-۲۰۱۱ شبیه‌سازی گردید.

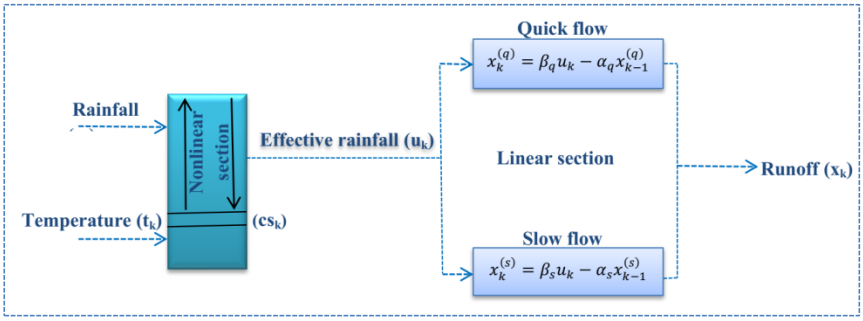

Fig. 3- IHACRES model structure (Evans and Jakeman, 1998)

شکل ۳- ساختار مدل IHACRES (Evans and Jakeman, 1998)

Table 1– Studied stations in the Ghareso watershed

جدول ۱- ایستگاه‌های مورد مطالعه در حوضه قره‌سو

Statistical period (Year)	Height (m)	latitude	Longitude	Station
23	140	36° 45′	54° 07′	Raingauge
45	-26	36° 45′	54° 30′	Hydrometeric
53	13.3	36° 54′	54° 25′	Synoptic

۲-۲-۱- ارزیابی مدل بارش- رواناب

پس از بررسی عملکرد مدل برای دوره‌های مختلف، دوره ۲۰۰۶- ۱۹۹۴ برای واسنجی و دوره ۲۰۱۰- ۲۰۰۶ برای صحت‌سنجی انتخاب شدند. جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها و ارزیابی مدل از معیارهایی مانند ضریب تعیین (R^2)[۲]، معیاری بدون بعد که بهترین مقدار آن برابر یک می‌باشد (رابطه ۱۰)؛ جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)[۳]، به عنوان مرسوم‌ترین شاخص خطا و قیاسی برای نشان دادن اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده از مقادیر اندازه‌گیری (رابطه ۱۱)؛ متوسط خطای مطلق (MAE)[۴]، برای مقایسه عبارت به عبارت خطای نسبی مقادیر شبیه‌سازی شده با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده (رابطه ۱۲)؛ مجموع خطا در حجم جریان (BIAS)، نشان‌دهنده بیشتر یا کمتر بودن جریان شبیه‌سازی شده توسط مدل نسبت به جریان مشاهداتی و نش- ساتکلیف (NSE)[۵]، که برای ارزیابی توانایی شبیه‌سازی جریان آبراهه به‌کار می‌رود، استفاده شد. اگر مقدار NSE برابر ۱ باشد، تناسب کاملی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده وجود دارد. مقدار NSE صفر نشان می‌دهد که مدل، نسبت به استفاده از مقادیر میانگین داده‌های مشاهداتی بهتر یا بدتر پیشگویی نمی‌کند. اگر NSE بزرگتر از ۰/۷۵ باشد نتایج شبیه‌سازی خوب توصیف می‌شود. اما زمانی که مقادیر NSE بین ۰/۳۶ و ۰/۷۵ است، نتایج مدل رضایت‌بخش به شمار می‌رود (McIntyre and Al-Qurashi, 2009; Ghorbani et al., 2016).

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^{n}(X_{obsi} - \overline{X}_{obs})(X_{simi} - \overline{X}_{sim})]^2}{\sum_{i=1}^{n}(X_{obsi} - \overline{X}_{obs})^2 \sum_{i=1}^{n}(X_{simi} - \overline{X}_{sim})^2} \quad (۱۰)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_{obsi} - X_{simi})^2}{n}} \quad (۱۱)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n}|X_{obsi} - X_{simi}|}{n} \quad (۱۲)$$

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_{obsi} - X_{simi})}{n} \quad (۱۳)$$

$$NSE = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_{obsi} - X_{simi})^2}{\sum_{i=1}^{n}(X_{obsi} - \overline{X}_{obs})^2}\right] \quad (۱۴)$$

در فرمول‌های بالا، X_{obsi} و X_{simi} به‌ترتیب i امین داده واقعی (مشاهده شده) و شبیه‌سازی شده توسط مدل، $\overline{X}_{obs}$ و $\overline{X}_{sim}$ میانگین کل داده‌های X_{obsi} و X_{simi} در جامعه آماری و n تعداد کل نمونه‌های مورد ارزیابی می‌باشند (Ghorbani et al., 2016; Niromandfard et al., 2018; Sadeghi et al., 2015; Blume et al., 2007).

۲-۳- مدل ارزیابی و برنامه‌ریزی منابع آب

مدل برنامه‌ریزی و ارزیابی منابع آب (WEAP)[۶] یکی از قدرتمندترین مدل‌های تصمیم‌یار[۷] است که تلاش می‌کند همزمان به هیدرولوژی حوضه آبریز و مدیریت تخصیص آب موجود میان تقاضاهای مختلف بپردازد (Sieber et al., 2005). مدل WEAP به دلیل توانایی در ملاحظه توأم فرآیندهای مهم تأثیرگذار در سیستم‌های طبیعی و انسانی، مدیریت منابع آب در سطح حوضه رودخانه، فراگیری استفاده از آن برای حل مسائل مشابه در نقاط مختلف جهان و دسترسی به آن (Dehghan et al., 2015)، در این پژوهش انتخاب شده است. این ابزار، چارچوبی جامع، قابل انعطاف وکاربردوست را برای تحلیل سیاست‌ها فراهم می‌کند. این نرم‌افزار، با هدف دخیل کردن طرح‌های تأمین آب در چارچوب مسائل مربوط به مدیریت مصرف، کیفیت آب و حفاظت از بوم سامانه‌ها در یک ابزار کاربردی برای برنامه‌ریزی منابع آب توسعه داده شده است (Kite et al., 2001). مدل WEAP دارای زیرمدل‌های کیفی رودخانه، اقتصادی و مدیریت تقاضای کشاورزی است. در این مطالعه، برای بررسی وضعیت تخصیص منابع آب حوضه رودخانه قره‌سو، تحت سناریوی اقلیمی A2، ابتدا سیستم منابع آب در مدل WEAP پیکربندی شد. ساختار مدیریتی در WEAP با استفاده از سناریوهایی که در آن نوشته می‌شود وضعیت آب در آینده را نشان می‌دهد، که در آن می‌توان تأثیر آب و هوا، مدیریت کاربری اراضی، تقاضا، تنظیمات و برنامه‌ریزی‌ها را مشخص کرد (Yazdan Panah et al., 2010). سناریوها از سال پایه اخذ می‌شوند. شرایط موجود، در واقع سال پایه (۲۰۱۱) برای مدل است و تمام اطلاعات سیستم مانند نیاز، داده‌های منابع و غیره در آن وارد می‌شود. سناریوها بر اساس مجموعه اطلاعات وارد شده در شرایط موجود ساخته می‌شوند. سناریوها تغییرات احتمالی سیستم در سال‌های آینده و بعد از شرایط موجود را مورد بررسی قرار می‌دهند. سناریوی مرجع را نیز می‌توان برای مدل تعریف کرد و مقادیر آن را برای نیازهای مختلف تغییر داد. در این تحقیق فرض بر این است که سناریوی مرجع (۲۰۴۰- ۲۰۱۲)

براساس داده‌های سال پایه تا آخر دوره اجرا می‌شود. سایر سناریوی‌ها از بدنه‌ی سناریوی مرجع تولید می‌شوند تا نتایج آن‌ها با سناریوی مرجع به عنوان مبنا مورد مقایسه قرار گیرند (جدول ۲).

Table 2- Defined scenarios in the WEAP model
جدول ۲- سناریوهای تعریف‌شده در WEAP

Scenario	Description
Scenario 1	Reference Scenario: The occurrence of climate change
Scenario 2	The increase in the cultivated area in the future

۲-۴- مدل برنامه‌ریزی آرمانی (GPM) و الگوی بهینه کشت

مدل GPM[۸] اولین بار به وسیله چارنز و کوپر در سال ۱۹۶۰ (Romero, 2004) معرفی شد و سپس به وسیله سایر محققین گسترش پیدا کرد. مدل برنامه‌ریزی آرمانی به طور کلی از چهار بخش متغیرهای تصمیم، محدودیت‌های سیستمی، محدودیت‌های آرمانی و تابع هدف تشکیل شده است. محدودیت‌های آرمانی دارای متغیرهای انحرافی مثبت p یا منفی n هستند که هدف، حداقل‌کردن این انحراف‌ها از سطح آرمان‌های مورد نظر است (Flavell, 1976). در مطالعه حاضر، از مدل برنامه‌ریزی آرمانی وزنی برای تعیین الگوی بهینه کشت با توجه به تغییر اقلیم و سناریوی افزایش سطح زیر کشت استفاده شده است. در این روش، همه آرمان‌ها همزمان در یک تابع هدف توافقی قرار می‌گیرند که مجموعه‌ی متغیرهای انحرافی بین آرمان‌ها و سطح قابل‌قبول آن‌ها را حداقل می‌کند. انحرافات براساس اهمیت نسبی هر هدف نزد تصمیم‌گیرنده وزن داده شده و مسئله حل می‌شود (Sabuhi, 2012). برای نرمالیزه کردن هدف‌ها در این‌جا از روش ارشمیدسی استفاده شد (Kalbali et al., 2014).

مجموعه علائم بکار رفته در برنامه‌ریزی آرمانی به شرح زیر می‌باشد.

ung: مجموعه آرمان‌هایی که متغیر ناخواسته منفی دارند
upg: مجموعه آرمان‌هایی که متغیر ناخواسته مثبت دارند
c: مجموعه مربوط به محصولات
$MaxLand_c$: حداکثر زمین قابل دسترس برای محصولات
$MinLand_c$: حداقل زمین قابل دسترس برای محصولات
$Land_V_c$: متغیر سطح زیر کشت
PN_{ung}: متغیر انحرافی مثبت برای آرمان‌هایی که متغیر نامطلوب آنها منفی است
$unGoalTarget_{ung}$: اهداف آرمان‌هایی که متغیر ناخواسته منفی دارند
$upGoalTarget_{upg}$: اهداف آرمان‌هایی که متغیر ناخواسته مثبت دارند
$unGoalCoef_{ung,c}$: ضرایب فنی آرمان‌هایی که متغیر ناخواسته منفی دارند
$upGoalCoef_{upg,c}$: ضرایب فنی آرمان‌هایی که متغیر ناخواسته مثبت دارند
NN_{ung}: متغیرانحرافی مثبت برای آرمان‌هایی که متغیر نامطلوب آن‌ها مثبت است
PP_{upg}: متغیرانحرافی منفی برای آرمان‌هایی که متغیر نامطلوب آن‌ها منفی است
NP_{upg}: متغیر انحرافی مثبت برای آرمان‌هایی که متغیر نامطلوب آنها مثبت است

در این تحقیق، از اطلاعات مربوط به مطالعه ۹ محصول زراعی عمده در حوضه قره‌سو استفاده شده است. جدول ۵ اطلاعات مربوط به سطح زیرکشت محصولات (هکتار) و میزان سود ناخالص (میلیون ریال) هر محصول را که از سالنامه کشاورزی سال ۱۳۹۱ و داده‌های منتشر شده جهاد کشاورزی استان گلستان جهت تعیین الگوی بهینه کشت جمع‌آوری شده نشان می‌دهد. الگوی مورد استفاده در این پژوهش شامل ۳ محدودیت آرمانی و ۴ محدودیت سیستمی می‌باشد. این اهداف با شرایط منطقه و با توجه به درجه اهمیتی که در منطقه دارند به صورت زیر می‌باشند.

۱) آرمان حداکثرسازی بازده ناخالص

$$\sum_{c} unGoalCoef_{ung,c} Land_V_c + NN_{ung} - PN_{ung} = unGoalTarget_{ung} \quad \forall ung \qquad (۱۵)$$

سطح آرمان حداکثرسازی سود ناخالص کشاورزان از طریق مدل برنامه‌ریزی خطی و بدون محدودیت‌های آرمانی به میزان ۱۳۴۱ میلیارد ریال برآورد گردید و در مدل آرمانی به عنوان یک هدف لحاظ گردید.

۲) آرمان حداقل‌سازی مصرف آب

$$\sum_{c} upGoalCoef_{upg,c} Land_V_c + NP_{upg} - PP_{upg} = upGoalTarget_{upg} \quad \forall upg \qquad (۱۶)$$

۲۵۲/۰۰۲ میلیون متر مکعب آب برآورد شده در حوضه قره‌سو از طریق نرم‌افزار WEAP تحت شرایط تغییر اقلیم به عنوان یک هدف جهت حداقل‌سازی مصرف آب وارد مدل شد.

۳) آرمان حداکثرسازی سطح زیر کشت

$$\sum_{c} unGoalCoef_{ung,c} Land_V_c + NN_{ung} - PN_{ung} = unGoalTarget_{ung} \quad \forall ung \qquad (۱۷)$$

آرمان حداکثر سطح زیر کشت از طریق افزایش ۱ درصدی سطح زیرکشت به میزان ۸۷۰۵۷/۹۶ هکتار در آینده به‌دست آمد. برای حداکثرسازی بازده ناخالص و سطح زیرکشت انحراف منفی از آرمان تعیین شده و برای حداقل‌سازی مصرف آب انحراف مثبت از آرمان تعیین شده لحاظ می‌گردد و با توجه به اینکه واحد اندازه‌گیری هر یک از آرمان‌های مورد بررسی متفاوت است، به جهت نرمال‌سازی از تقسیم متغیرهای انحرافی ناخواسته بر مقادیر هدف استفاده شد. لذا تابع هدف به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\text{Min} \quad Z = \sum_{ung} \frac{NN_{ung}}{unGoalTarget_{ung}} + \sum_{upg} \frac{PP_{upg}}{upGoalTarget_{upg}} \qquad (۱۸)$$

از آنجایی‌که نیاز است سود ناخالص حداقل برابر با هدف $unGoalTarget_{ung}$ و یا بیشتر از آن باشد، باید مقدار NN_{ung} (انحراف منفی از سود ناخالص) برابر با صفر شود. اما در عمل، تبدیل آن به صفر غیر ممکن می‌باشد. لذا باید مقدار آن را تا حد امکان کوچک نمود. PP_{upg} انحراف مثبت از آرمان تعیین شده $unGoalTarget_{upg}$ برای مصرف آب می‌باشد. از آنجایی که نباید مصرف آب از مقدار آرمانی تعیین شده آن بیشتر باشد، لذا باید مقدار PP_{upg} را به میزان حداقل خود رساند.

سه مجموعه محدودیت سخت نیز در این مطالعه شامل حداکثر و حداقل میزان زمین قابل دسترس برای هر محصول (روابط ۱۹ و ۲۰) و همچنین رعایت حداقل سود ناخالص جاری (رابطه ۲۱) می‌باشد.

$$Land_{V_c} \leq MaxLand_c \qquad (۱۹)$$

$$Land_{V_c} \geq MinLand_c \qquad (۲۰)$$

$$\sum_{c} CurentBenefit_c \, Land_{V_c} \geq \sum_{c} CurentBenefit_c \, CurentPattern_c \qquad (۲۱)$$

۳- نتایج و تحلیل نتایج

۳-۱- نتایج مدل بارش- رواناب

در این پژوهش، مدل IHACRES در سال‌های ۲۰۰۶-۱۹۹۴ واسنجی گردید. پارامترهای بهینه شده برای حوضه قره‌سو عبارت بودند از V(s)، T(s)، C، F و τ(w) که به‌ترتیب بیانگر نسبت حجمی جریان آهسته در ایجاد جریان رودخانه، ثابت زمانی کاهش جریان آهسته (روز)، ظرفیت نگهداری رطوبت حوضه آبخیز (میلی‌متر)، فاکتور تعدیل دما (درجه سلسیوس) و ثابت زمانی خشکیدگی حوضه آبخیز (روز) می‌باشند. نتایج عملکرد حوضه به ترتیب در جداول ۳ و ۴ آورده شده است. در مرحله بعد، مدل واسنجی شده مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. مقایسه گرافیکی مقادیر روزانه شبیه‌سازی شده و مشاهداتی دبی برای مرحله واسنجی در سال‌های ۱۹۹۴ تا ۲۰۰۶ و صحت‌سنجی در سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰ در شکل ۴ ارائه شده است.

براساس نتایج به‌دست آمده از آماره‌های خطا در جدول ۴، مدل IHACRES توانسته است جریان را تا حد قابل قبولی شبیه‌سازی کند. با توجه به عملکرد مدل در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی در شکل ۴ می‌توان دریافت که عملکرد مدل در شبیه‌سازی جریان در مرحله صحت‌سنجی بهتر از مرحله واسنجی بوده است. پارامتر V(s) نشان‌دهنده مشارکت جریان پایه در ایجاد جریان رودخانه‌ای می‌باشد و مقادیر زیاد این پارامتر نشان‌دهنده وجود جریان پایه بیشتر رودخانه است. C حجم رطوبت ذخیره شده در حوضه بر حسب میلی‌متر است و نشان‌دهنده سرعت واکنش حوضه آبخیز نسبت به بارش می‌باشد.

با توجه به مقادیر خطا در حجم جریان (BIAS= ۰/۲۸) در مرحله واسنجی و BIAS= ۰/۰۴ در مرحله صحت‌سنجی، جریان شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی توسط مدل IHACRES، بیشتر از جریان مشاهداتی نسبت به دوره صحت‌سنجی بوده است (Croke et al., 2005). براساس انحرافات کم مدل در پارامترهای خطا و مقادیر ضریب تعیین می‌توان به این نتیجه رسید که عملکرد مدل در حوضه مورد نظر قابل‌قبول بوده و مدل توانایی نسبتاً خوبی در شبیه‌سازی جریان‌های حداکثر داشته است.

براساس نتایج به‌دست آمده از آمارهای خطا در جدول ۴ و نمودار پراکنش در شکل ۵، رواناب مشاهداتی و تولید شده، مدل IHACRES توانسته است جریان را تاحد قابل قبولی شبیه‌سازی کند.

Table 3- Results from calibration phase of the IHACRES model in Gharehso watershed

جدول ۳- نتایج حاصل از مرحله واسنجی مدل IHACRES در حوضه قره‌سو

Parameter	f	C	T(s)	V(s)	τ(w)
Optimum value	0.500000	0.000017	1.386	1.000	27.000

Table 4- Error measurement criteria between observed and simulated flow values by IHACRES model in Gharehso watershed

جدول ۴- معیارهای سنجش خطا بین مقادیر جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل IHACRES در حوضه قره‌سو

Period	MAE	RMSE	BIAS	R^2	NSE
Calibration	0.309	0.376	0.28	0.52	0.38
Validation	0.055	0.19	0.041	0.6	0.47

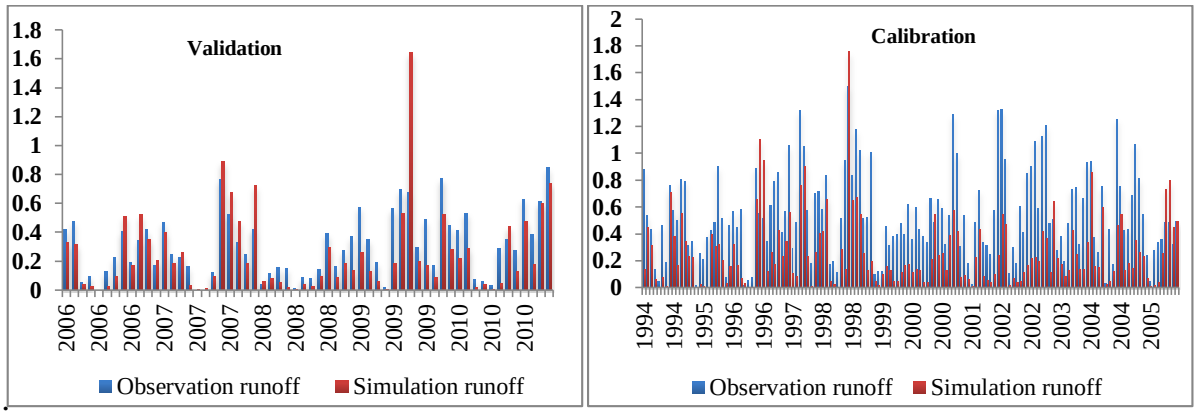

Fig. 4- Time series of observed and simulated river flows by the IHACRES model during calibration and validation periods

شکل ۴ – سری زمانی رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل IHACRES در دوره واسنجی و صحت‌سنجی

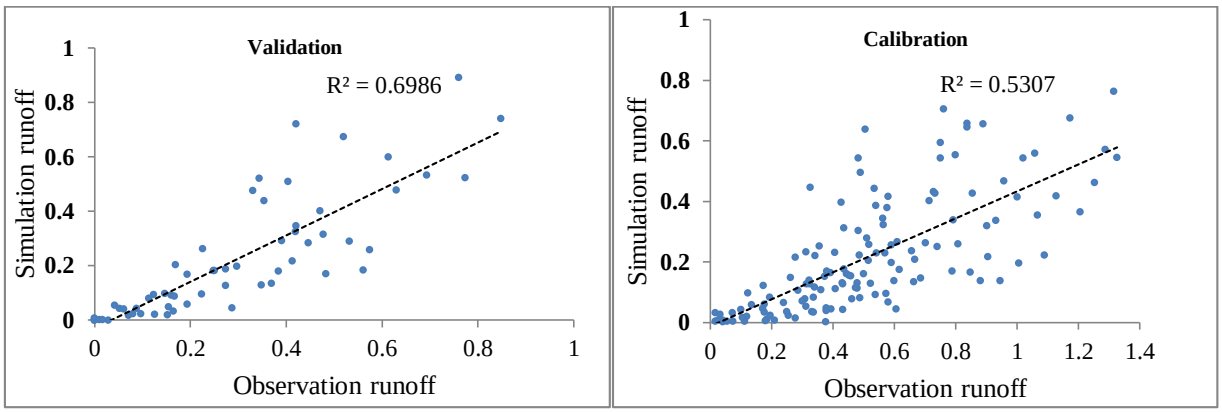

Fig. 5- Average monthly distribution chart of observed and simulated runoff during calibration and validation periods

شکل ۵- نمودار پراکنش متوسط ماهانه رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی و صحت‌سنجی

پس از واسنجی مدل، سری زمانی رواناب ماهانه حوضه در دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱ با استفاده از مدل IHACRES شبیه‌سازی شد. سپس متوسط رواناب ماهانه درازمدت (۱۷ ساله) در دوره آتی با متوسط رواناب ماهانه دوره مشاهداتی در سناریوی A2 مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که متوسط رواناب سالانه درازمدت در دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱ به میزان ۳۴/۳۱ درصد نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت. بر این اساس نتایج این پژوهش با نتایج حاصل از پژوهش (Shakib and Farzin, 2018) که نشان از کاهش چشمگیر رواناب در حوضه زیارت شهر گرگان و بیشترین کاهش بارندگی تحت سناریوی A2 در دوره‌های آتی می‌باشد و نیز پژوهش (Razzaghian et al., 2016) که اثرات تغییر اقلیم بر حوضه آبخیز بابلرود را با استفاده از مدل IHACRES را مورد بررسی قرار دادند و کاهش مقدار بارندگی سالانه و کاهش ۱۵-۱۸/۵ درصدی در میزان رواناب ماهانه را نتیجه گرفتند، مطابقت دارد. شکل ۶ تغییرات بلندمدت ماهانه رواناب شبیه‌سازی شده توسط مدل را در دوره‌ی آتی نسبت به دوره مشاهداتی نشان می‌دهد.

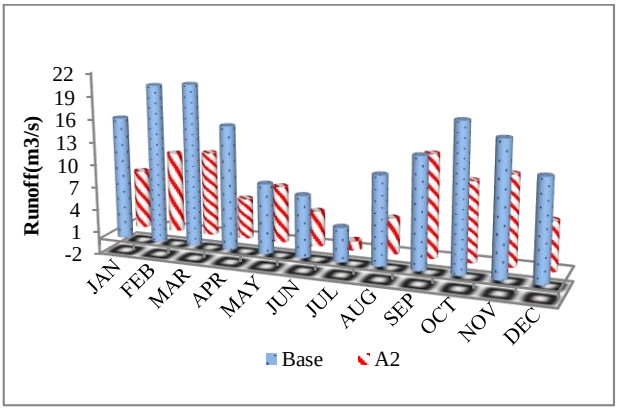

Fig. 6- Long-term variations of the runoff simulated by the model in the upcoming period relative to the base period

شکل ۶- تغییرات بلندمدت ماهانه رواناب شبیه‌سازی شده توسط مدل در دوره‌ی آتی نسبت به دوره پایه

۳-۲- نتایج مدل WEAP

نتایج WEAP در حوزه آبریز قره‌سو نشان‌دهنده افزایش نیاز آبی در دوره‌ی ۲۰۴۰-۲۰۱۲ تحت سناریوی A2 و براساس سناریوی افزایش سطح زیر کشت نسبت به سال پایه می‌باشد (شکل ۷). همانطور که از نمودار پیداست، در سناریوی مدیریتی افزایش سطح زیر کشت، نیاز آبی یک روند افزایشی شدید به خود گرفته که می‌تواند به دلیل خشکسالی، تأمین نیاز مصرف کشاورزی کل حوضه در آینده دچار مشکل جدی شود.

شکل ۷ نشان‌دهنده افزایش میانگین ماهانه نیاز آبی تحت سناریوهای مختلف می‌باشد که بیشترین نیاز آبی مربوط به سناریوی افزایش سطح زیر کشت در شرایط تغییر اقلیم می‌باشد یعنی اثر اعمال سناریوی افزایش سطح زیر کشت بر منطقه بیشتر از سایر سناریوهای مدیریتی تأثیر گذاشته است. پس باید برای جلوگیری از مشکلات پیش آمده در آینده به سمت تغییر الگوی کشت، ایجاد گلخانه و استفاده از سیستم‌های نوین آبیاری رفت که بتوان اثر آن را خنثی کرد. بیشترین نیاز آبی مربوط به ماه‌های خرداد تا مرداد است. در حالی که میزان رواناب تحت سناریوی A2 در این ماه‌ها کمترین مقدار می‌باشد. همچنین مقادیر درصد نیاز تأمین شده آب در سناریوی افزایش سطح زیر کشت در مدل WEAP تحت سناریوی A2 مورد بررسی قرار گرفت، نتایج نشان‌دهنده کاهش درصد تأمین شده آب در این سناریو می‌باشد (شکل ۸).

این نمودار نشان می‌دهد که بخش کشاورزی در آینده با کمبود آب مواجه خواهد شد. دلیل این امر کاهش آورد رودخانه در اثر تغییرات اقلیم می‌باشد. این نتیجه بیانگر این است که در آینده با ادامه تغییر اقلیم و بدون راهکارهای مدیریتی برای کنترل اتلاف آب در بخش کشاورزی به ناچار از مساحت زیر کشت کاسته می‌گردد. به همین دلیل، در این پژوهش، با استفاده از مدل برنامه‌ریزی آرمانی و میزان آب در دسترس بخش کشاورزی در اثر تغییر اقلیم، الگوی بهینه کشت ارائه شده است.

۳-۳- نتایج مدل برنامه‌ریزی ریاضی آرمانی

با توجه به این‌که بخش کشاورزی در اثر کاهش بارش و در نتیجه کاهش آورد رودخانه با کمبود آب مواجه می‌گردد. اصلی‌ترین راهکار مدیریتی تغییر الگوی کشت است. یعنی اینکه ما با تغییر الگوی کشت به سمت استفاده بهینه از منابع آب خواهیم رفت. در کنار این تغییر، افزایش سطح زیر کشت برای کمک به جبران کاهش سود احتمالی نیز در نظر گرفته خواهد شد.

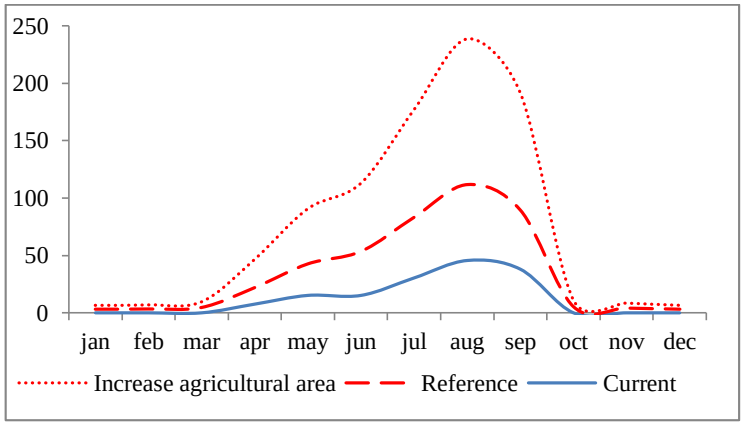

Fig. 7- Comparison of monthly water requirement in the base year, reference scenarios and increase of area under cultivation

شکل ۷- مقایسه نیاز آبی ماهانه در سال پایه و سناریوهای مرجع و افزایش سطح زیر کشت

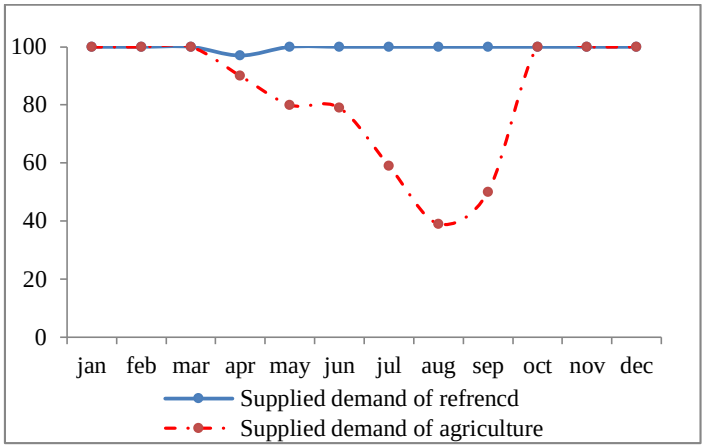

Fig. 8- Percentage of the needs provided in reference scenarios and scenario of increasing area under cultivation

شکل ۸- درصد نیاز تأمین‌شده در سناریوهای مرجع و سناریوی افزایش سطح زیر کشت

به همین دلیل در این بخش با در نظر گرفتن تغییر اقلیم و سناریوی افزایش یک درصدی سطح زیر کشت، الگوی بهینه کشت و میزان سود ناخالص با استفاده از مدل آرمانی بررسی و در جدول ۳ آورده شده است.

همان‌طوری که در جدول ۵ ملاحظه می‌شود، محصولات گندم، سویا، پنبه، گوجه و ذرت علوفه‌ای با توجه به اهداف مدل برنامه‌ریزی آرمانی که افزایش سود ناخالص در مقابل کاهش مصرف آب در شرایط تغییر اقلیم می‌باشد، با کاهش سطح زیر کشت همراه می‌باشند. بیشترین کاهش سطح زیر کشت مربوط به محصول پنبه با توجه به صرفه اقتصادی کمتر آن به ازای مصرف هر مترمکعب آب آبیاری می‌باشد. با کاهش سطح زیر کشت این محصولات میزان سود ناخالص این محصولات در هر هکتار کاهش می‌یابد. سطح زیر کشت محصولات جو، برنج، کلزا، و خیار با توجه به بازدهی بالای آن‌ها در هکتار نسبت به مصرف آب آن‌ها افزایش می‌یابد و به دنبال آن میزان سود ناخالص این محصولات در واحد سطح نسبت به سال پایه (۹۰-۹۱) افزایش می‌یابد. بیشترین میزان سود در این الگوی کشت مربوط به جو با سطح زیر کشت بهینه ۴۵۶۳/۲ هکتار و کمترین میزان سود ناخالص بر اساس مدل برنامه‌ریزی آرمانی مربوط به محصول پنبه و بعد ازآن برای ذرت علوفه‌ای به میزان ۷۲/۳۱ میلیون ریال به دلیل مصرف بالای آب و صرفه اقتصادی پایین آن در واحد هکتار می‌باشد که با اهداف مدل مغایرت دارد در نتیجه میزان سطح زیر کشت آن در مدل بهینه کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج به‌دست آمده، ملاحظه می‌شود که بیشترین میزان تغییرات سود ناخالص کشاورزان در واحد سطح مربوط به محصول پنبه و کمترین میزان تغییرات سود ناخالص مربوط به محصول گندم می‌باشد. افزون براین، نتایج نشان می‌دهد که با اعمال

Table 5- Changes in optimal cultivation pattern (ha) and gross profit (million Rials) in terms of climate change and scenario of increased area under cultivation

جدول ۵- تغییرات الگوی بهینه کشت (هکتار) و سود ناخالص (میلیون ریال) در شرایط تغییر اقلیم و سناریـوی افزایش سطح زیر کشت

Crop	Current crop pattern	Optimal crop pattern	in Change crop pattern	Gross profit of current crop pattern	Gross profit of optimal crop pattern	Changes in gross profit
Wheat	28950	24520.79	-18.06	254444.7	215551.9	-18.06
Barely	920	4563.2	79.84	5621.2	27881.15	79.84
Rice	9944	17447.74	43.01	944990.8	1658081	43.01
Rapeseed	1567	2122.66	26.18	7787.43	10548.85	26.18
Soybean	23853	15686.66	-52.06	32185.59	21166.53	-52.06
Cotton	2688	0	-100	8399.17	0	-100
Tomato	2128	1676.65	-26.92	31374.81	24720.21	-26.92
Cucumber	338	491.65	31.25	4621.05	6721.78	31.25
corn Forage	4494	1244	-72.31	96544.06	26724.7	72.31-

سناریوهای اقلیمی و مدیریتی، مجموع سود ناخالص حاصل از الگوی کشت در حوضه قره‌سو نسبت به سال پایه ۴۳/۶۷ درصد و از ۱۳۸۶ به ۱۹۹۱میلیارد ریال افزایش و میزان مصرف آب ۲۵/۳۶ درصد کاهش می‌یابد. در این پژوهش، تغییر الگوی کشت حوضه به عنوان یک راهکار تطبیقی بدون هزینه در کاهش آثار تغییر اقلیم در بخش کشاورزی ارزیابی شد.

۴- خلاصه و جمع‌بندی

به‌دلیل محدودیت امکان اندازه‌گیری جریان رودخانه‌ای در زمان‌ها و مکان‌های مختلف استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی می‌تواند ابزار مفیدی برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی جریان باشد که به تصمیم‌گیری جهت مدیریت منابع سطحی و مدیریت پایدار منابع آب کمک فراوانی خواهد کرد. بنابراین انتخاب یک مدل ساده با کاربری آسان و ورودی‌های قابل دسترس از بین مدل‌های پیچیده هیدرولوژی امری مهم برای مدیران تلقی می‌گردد. لذا در این پژوهش به شبیه‌سازی جریان رودخانه‌ای در حوزه آبریز قره‌سو با استفاده از مدل IHACRES در دوره پایه جهت بررسی تغییرات اقلیمی پرداخته شد. سپس وضعیت منابع آب در بخش‌کشاورزی با استفاده از مدل WEAP در دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۲ میلادی مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت برای جلوگیری از اثرات منفی تغییر اقلیم بر بخش کشاورزی با استفاده از مدل برنامه‌ریزی ریاضی آرمانی الگوی بهینه کشت پیشنهاد گردید. نتایج نشان داد که رواناب سطحی منطقه تحت سناریوی تغییر اقلیم برای دوره‌های ۲۰۴۰-۲۰۱۱ نسبت به دوره پایه کاهش پیدا کرد که نشان از تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه در دوره‌ی آتی می‌باشد. با توجه به کاهش دبی رودخانه، فرآیند شبیه‌سازی تخصیص در حوضه با درنظر گرفتن سناریوی افزایش سطح کشاورزی در مدل WEAP انجام شد. نتایج نشان داد حوضه مورد نظر در بخش کشاورزی با افزایش نیاز آبی مواجه خواهد شد. بنا بر پژوهش صورت گرفته، اثر تغییر اقلیم بر منابع آبی در آینده، غیر قابل چشم‌پوشی بوده و نیازمند مدیریت صحیح شرایط فعلی برای کنترل بحران در آینده خواهد بود. افزایش دما و کاهش بارش بر میزان کاهش رواناب حوضه، زمانی اتفاق می‌افتد که نیاز به آب در آینده رو به افزایش است که کاهش رواناب و افزایش نیاز آبی بخش کشاورزی در پژوهش Ghandehari et al. (2017)، Malamir et al. (2016) و سایر پژوهشگران مشترک می‌باشد. در نتیجه در مسائل تخصیص منابع آب بهتر است، تعیین الگوی مناسب تخصیص تحت شرایط تغییر اقلیم در منطقه جایگزین مقادیر ثابت تخصیص یافته برای هریک از نقاط نیاز گردد تا بتوان در هر زمان با توجه به وضعیت منطقه و منابع قابل دسترس، در مورد میزان تخصیص به هریک از نقاط نیاز بهتر تصمیم‌گیری نمود. که در پژوهش حاضر با استفاده از مدل برنامه‌ریزی ریاضی آرمانی و نرم‌افزار GAMS الگوی بهینه کشت ارائه گردید که میزان سطح زیر کشت محصولات جو، برنج، کلزا و خیار نسبت به سال پایه افزایش و میزان سطح زیر کشت محصولات گندم، سویا، گوجه و ذرت علوفه‌ای کاهش می‌یابد. همچنین محصول پنبه به دلیل مصرف بالای آب و صرفه اقتصادی پایین آن از مدل حذف گردیده است. در نتیجه با این الگوی کشت میزان سود ناخالص در دوره آتی نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. پیشنهاد می‌شود که با توجه به افزایش شدید نیاز آبی و افزایش درصد کمبود آب در بخش کشاورزی در این حوضه علاوه بر تغییر الگوی کشت منطقه، از گونه‌های مقاوم به کم آبی و دارای صرفه اقتصادی بالاتر، استفاده کرد. همچنین پیشنهاد می‌گردد که با تشکیل بازار آب حتماً سناریوهای تغییر قیمت آب بررسی شود و با بالا بردن راندمان آبیاری که با تغییر تکنولوژی آبیاری همراه می‌باشد، محصولاتی که دارای صرفه اقتصادی بالا و مصرف آب زیاد می‌باشند را به الگوی کشت اضافه کرد و سود کشاورزان را در حوضه افزایش داد. در نهایت، می‌توان گفت که این‌گونه مطالعات و بررسی تغییرات اقلیم در مناطق مختلف، امکان اتخاذ تصمیمات مدیریتی و بکارگیری روش‌های جدید تطبیق با شرایط اقلیم، متفاوت را فراهم می‌کند.

۵- سپاسگزاری

این پژوهش به‌عنوان قسمتی از رساله دکتری خانم الهام کلبعلی و با حمایت مالی دانشگاه زابل با کد پژوهانه ۹۱-۹۵۱۷ انجام شده است که بدینوسیله قدردانی به‌عمل می‌آید.

پی‌نوشت‌ها

1- General Algebraic Modelling System (GAMS)
2- Determination Coefficient
3- Root Mean Square Error
4- Mean Absolute Error
5- Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) Coefficient
6- Water Evaluation and Planning (WEAP) System
7- Decision Support System (DSS)
8- Goal Programming Model (GPM)

۶- مراجع

Abushandi EE, Broder M (2011) Application of IHACRES rainfall -runoff model to the Wadi Dhuliel arid catchment, Jordan. Journal of Water and Climate Change 2(1):56-71

Ajamzadeh A, Mollaeinia MR (2016) Assessment of impact of climate change on Firoozabad river runoff

Ghandehari Gh, Soltani J, Hamidianpour M (2015) Title evaluation of optimal water allocation scenarios for Bar river of Neishabour using WEAP model under A2 climatic changes scenario. Journal of Water and Soil 29(5):1158-1172 (In Persian)

Ghorbani Kh, Sohrabian E, Salarijazi M, Abdolhoseini M (2016) Prediction of climate change impact on monthly river discharge trend using IHACRES hydrological model (Case study: Galikesh watershed). Journal of Water and Soil Resources Conservation 5(4):19-34 (In Persian)

Gorgan Organization of Jihad-e-Agriculture (2017) Statistics and information of crops. (In Persian)

Hosseini S, Ghorbani MA, Masah Bavani A (2016) Rainfall-runoff modelling under the climate change condition in order to project future streamflows of Sufichay watershed. Journal of Watershed Management Research 6(11):1-14 (In Persian)

Hosseini S, Nazari M, Araghinejad Sh (2013) The effects of climate change on the agricultural sector emphasizing the role of applying adaptive strategies in this section. Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research 44(1):1-16 (In Persian)

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014) Summary for policymakers. In: Field C, Barros V, Dokken D, et al. (Eds.), Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects, Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge:1-22

Jalili KH, Moradi RM, Bozorg Haddad O (2016) Assessment of climate change impacts on water resources in Islamabad aquifer and land allocation optimization. Desert Ecosystem Engineering Journal 5(11):119-133 (In Persian)

Kahil MT, Connor JD, Albiac J (2015) Efficient water management policies for irrigation adaptation to climate change in Southern Europe. Ecological Economics 120:226-233

Kalbali E, Mardani M, Sabouhi Sabouni M (2014) Quality management of groundwater resources of Aghala. Journal of Environmental Studies 40(3):775-786 (In Persian)

Karamouz M, Araghinejad Sh (2015) Advanced hydrology. Amirkabir University Press, 468p (In Persian)

Kite G (2001) Modelling the Mekong: Hydrological simulation for environmental impact studies. Journal of Hydrology 253(1-4):1-13

with downscaling of atmospheric circulation models output by SDSM and LARS-WG softwares. Iran-Water Resources Research 12(1):95-109 (In Persian)

Almasi P, Soltani S, Goodarzi M, Modarres R (2017) Assessment the impacts of climate change on surface runoff in Bazoft watershed. JWSS-Isfahan University of Technology 20(78):39-52 (In Persian)

Ashofteh PS, Bozorg-Haddad O, Mariño MA (2013) Scenario assessment of streamflow simulation and its transition probability in future periods under climate change. Water Resources Management 27(1):255-274

Blume T, Zehe E, Bronstert A (2007) Rainfall-runoff response, event-based runoff coefficients and hydrograph separation. Hydrological Sciences Journal 52(5):843-862

Cooper VA, Neguyen VTV, Nichol JA (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

Croke BFW, Andrews F, Spate J, Cuddy SM (2005) IHACRES user guide. Technical Report 2005/19, 2nd Ed. ICAM, School of Resources, Environment and Society, The Australian National University, Canberra, 39p

Crooks SM, Naden PS (2007) CLASSIC: A semi-distributed rainfall-runoff modelling system. Hydrology and Earth System Sciences Discussions 11(1):516-531

Dehghan Z, Delbari M, Mohammadrezapour O (2015) Planning water resources allocation under various managerial scenarios in Gorganroud basin. Water and Soil Science 25(3):117-132 (In Persian)

Dye PJ, Croke BFW (2003) Evaluation of streamflow predictions by the IHACRES Rainfall-Runoff model in two South African catchments. Environmental Modeling and Software 18:705-712

Elliott J, Deryng D, Müller C, Frieler K, Konzmann M, Gerten D, Glotter M, Flörke M, Wada Y, Best N, Eisner S (2014) Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences 111(9):3239-3244

Esteve P, Varela-Ortega C, Blanco-Gutiérrez I, Downing TE (2015) A hydro-economic model for the assessment of climate change impacts and adaptation in irrigated agriculture. Ecological Economics 120:49-58

Flavell RB (1976) A new goal programming formulation. Omega 4(6):731-732

on using the excel software. Noor-e-Elm Press, 294p (In Persian)

Sadeghi SH, Ghasemieh H, Sadatinejad SJ (2015) Performance evaluation of the IHACRES hydrological model in wet areas (Case study: Navrud basin, Guilan). Journal of Water and Soil Sciences 19(73):73-83 (In Persian)

Salehpoor Laghani J, Ashrafzadeh A, Moussavi SA (2018) Water resources allocation management in Hablehroud basin using a combination of the SWAT and WEAP models. Iran-Water Resources Research 14(3):278-290 (In Persian)

Shakib SH, Farzin S (2018) Prediction of water resource status affected by climate change whit ANFIS model and general circulation model (Case study: Ziarat basin of Gorgan). Iranian Journal of Ecohydrology 5(1):173-187 (In Persian)

Sieber J, Swartz C, Huber-Lee A (2005) User guide for WEAP21. Stockholm Environment Institute Tellus Institute

Taesombat W, Sriwongsitanon N (2010) Flood investigation in the Upper Ping River Basin using mathematical models. Kasetsart Journal (Natural Science) 44:152-166

Varela-Ortega C, Blanco-Gutiérrez I, Esteve P, Bharwani S, Fronzek S, Downing TE (2016) How can irrigated agriculture adapt to climate change? Insights from the Guadiana Basin in Spain. Regional Environmental Change 16(1):59-70

Vaseghi E, Esmaili A (2008) The effects of climate change on agricultural land rents. Agricultural Economics 2(3):6-47 (In Persian)

Yates D, Sieber J, Purkey D, Huber-Lee A (2005) WEAP21-A demand-, priority-, and preference-driven water planning model: Part 1: Model characteristics. Water International 30(4):487-500

Yazdanpanah T, Davar K, Khodashenas SR, Ghahraman B (2009) Water resource management of basin by WEAP (Case study: Azgand basin). Journal of Water and Soil 21:213-223 (In Persian)

Ye W, Jakeman AJ, Barnes CJ (1995) A parametrically efficient model for prediction of streamflow in an Australian benchmark catchment with complex storage dynamics. Environment International 21(5):539-544

Lehner B, Döll P, Alcamo J, Henrichs T, Kaspar F (2006) Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: A continental, integrated analysis. Climatic Change 75:273-299

Malmir M, Mohammadrezapour O, Sharif Azari S (2016) Evaluation of climate change impacts on agricultural water allocation in Garasu watershed, using WEAP. The Iranian Society of Irrigation and Water 6(23):143-155 (In Persian)

McIntyre N, Al-Qurashi A (2009) Performance of ten rainfall–runoff models applied to an arid catchment in Oman. Environmental Modelling and Software 24(6):726-738

Meshkati A, Kordjazi M, Babaeian I (2010) Investigation and assessment of LARS-WG model in simulation of meteorological data of Golestan in 1993-2007. Journal of Applied Researches in Geographical Sciences 16:81-96 (In Persian)

Mirzaie K, Ziaei S (2016) Determination of agronomic-economic program of cropping pattern for sustainability of environment using lexicographic goal programming (Case study: west Roudbar Alamot). Journal of Agricultural Economics Research 8(29):161-175 (In Persian)

Niromandfard F, Zakerinia M, Yazarloo B (2018) Investigating the effect of climate change on river flow using IHACRES rainfall-runoff model. Irrigation Sciences and Engineering 41(3):103-117 (In Persian)

Parhizgari A, Mahmoodi A, Shokat Fadaie M (2017) Assessing the effects of climate change on available water resources and agricultural production in the watershed basin. Agricultural Economics 9(33):23-50 (In Persian)

Razzaghian H, Shahedi K, Habibnejad-Roshan M (2016) Evaluation of climate change effect on Babol-rood watershed runoff using IHACRES model. The Iranian Society of Irrigation and Water 7(26):159-172 (In Persian)

Regional Water Authority of Golestan (2016) Statistics and information of surface water. (In Persian)

Romero C (2004) A general structure of achievement function for a goal programming model. European Journal of Operational Research 153(3):675-686

Sabouhi Sabouni M (2012) Application of mathematical programming in agricultural economics with a focus