تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال چهاردهم، شماره ۵، زمستان ۱۳۹۷
Volume 14, No. 5, Winter 2019 (IR-WRR)
۲۶۹-۲۸۲

تخصیص بهینه آب بین شبکه‌های آبیاری حوضه زاینده‌رود با رویکرد اقتصادی و بررسی عملکرد توزیع آب داخل شبکه (مطالعه موردی: شبکه آبیاری رودشت شمالی)

داود رجبی[۱]، سیدفرهاد موسوی[۲*] و عباس روزبهانی[۳]

چکیده

هدف اصلی از انجام این مطالعه، توسعه ساختار هیدرواکونومیک در حوضه زاینده‌رود به‌منظور تخصیص بهینه آب سد زاینده‌رود به شبکه‌های آبیاری پایاب این سد، در راستای حداکثرسازی منافع اقتصادی حاصل از فعالیت‌های کشاورزی است. برای تحقق این هدف، با تدوین مدل اقتصادی برنامه‌ریزی ریاضی مثبت[۱] (PMP)، شبیه‌سازی فعالیت‌های کشاورزی به تفکیک هر شبکه آبیاری انجام شد. با تلفیق مدل برنامه‌ریزی تخصیص آب توسعه داده شده‌ی MODSIM حوضه با مدل اقتصادی، ساختار هیدرواکونومیک ساخته شده و بر اساس شرایط پایه سال آبی ۹۴-۱۳۹۳ واسنجی و همگرایی مدل‌ها انجام گرفت. نتایج به‌کارگیری ساختار هیدرواکونومیک در مدیریت توزیع آب حاکی از تغییر محسوس در اولویت‌بندی تخصیص آب بوده به نحوی‌که شبکه‌های آبیاری نکوآباد و رودشت که به‌ترتیب اولویت‌های اول و پنجم تخصیص آب در شرایط معمول را دارند، پس از به‌کارگیری ساختار هیدرواکونومیک، اولویت‌های چهارم و دوم را به‌دست آوردند. در ادامه، پتانسیل سامانه بهره‌برداری موجود در شبکه آبیاری رودشت، به نمایندگی از سایر شبکه‌های آبیاری حوضه، به‌عنوان زیرساخت لازم جهت پیاده‌سازی تخصیص بهینه آب با رویکرد هیدرواکونومیک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مدل‌سازی سامانه بهره‌برداری موجود در شبکه آبیاری رودشت، عملکرد متوسط و ضعیفی را به‌خصوص در بخش میانی و پایین‌دست جهت تخصیص بهینه آب با رویکرد اقتصادی نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: تخصیص آب، سامانه بهره‌برداری، مدل اقتصادی، مدل هیدرواکونومیک.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۱۱/۱۸
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۵/۱۴

Optimal Water Allocation Among the Irrigation Districts in Zayandehrud Basin with Economic Approach and Performance Assessment of Water Distribution Within the District (Case Study: North-Rudasht Irrigation District)

D. Rajabi[1], S.F. Mousavi[2] and A. Roozbahani[3]*

Abstract

The primary objective of this study is to develop a hydro-economic framework in Zayandehrud River Basin to optimize allocation of water released from Zayandehrud dam to downstream irrigation districts in order to maximize the economic benefits from agricultural activities. To achieve this goal, the existing agricultural activities in each irrigation district were simulated by applying the Positive Mathematical Programming (PMP) economic model. Coupling the developed water allocation planning model of the basin (MODSIM) with this economic model, the hydro-economic framework was then generated. Calibration and convergence of the models were performed by using the data from the base-year (2014-2015). Results of employing the hydro-economic framework in the management of water distribution revealed significant changes in water-allocation priorities among irrigation districts. For instance, allocation priorities of Neko-Abad and Rudasht Irrigation districts which were respectively first and fifth under the current conditions, have significantly changed to fourth and second after employing the developed hydro-economic framework. As a case study, the potential of existing operating system in North Rudasht Irrigation District to make an infrastructure for optimum water allocation by using the hydro-economic framework, was investigated as a representative of other irrigation districts in the basin. Results of modeling the existing operating system of North Rudasht Irrigation District showed an average and inadequate performance in applying optimum water allocation with an economic approach, especially in the middle and lower sections.

Keywords: Water Allocation, Operating System, Economic Model, Hydro-Economic Model.

Received: February 7, 2018
Accepted: August 5, 2018

۱- دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.
۲- استاد گروه مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.
۳- استادیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

1- Ph.D. Candidate, Department of Water Resources Engineering and Management, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.
2- Professor, Department of Water Resources Engineering and Management, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran. Email: fmousavi@semnan.ac.ir
3- Assistant Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, Aburaihan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran.
*- Corresponding Author

۱- مقدمه

پاسخگویی صحیح و دوراندیشانه به معضلات، چالش‌ها و مشکلات پیش روی صنعت آب، ضرورت اعتلای رویکردهای نظام مدیریتی آب در کلیه جنبه‌ها و مؤلفه‌های خود، از طریق فراهم نمودن ابزارها و نظام‌های مؤثر و کارا را اجتناب‌ناپذیر ساخته است. بنابراین، بسط و گسترش نظام‌های بازتخصیص و بهبود الگوهای مصرف در بخش‌های مختلف (به ویژه در مصارف کشاورزی) از طریق به کارگیری ابزارهای انعطاف‌پذیر اقتصادی لازم و ضروری است. در این شرایط، برنامه‌ریزان منابع آب در بسیاری از نقاط جهان به این درک مشترک رسیده‌اند که تکیه صرف بر روش‌های سنتی مدیریت عرضه به تنهایی قادر به پرکردن شکاف بین عرضه و تقاضای آب نیست و باید بر برنامه‌ریزی یکپارچه منابع آب که در آن تعامل میان هر سه مؤلفه توسعه پایدار (اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی) دیده شده باشد، تکیه کرد.

تمرکز بر کارایی اقتصادی به عنوان هدف اصلی در توسعه و تخصیص منابع آب سبب می‌شود که معیارهای کارایی ابزاری برای حل و فصل تعارضات و ارزیابی هزینه فرصت استفاده از منابع آب در مصارف مختلف مد نظر قرار گیرد (Howitt et al., 2012). همچنین،کارایی اقتصادی در پی حداکثرسازی بهره‌وری منابع آب یا همان حداکثرسازی ستانده به ازای هر متر مکعب آب مصرفی است. از دیدگاه اقتصادی، تخصیص منابع آب زمانی کاراست که با توجه به هزینه تمام شده و بر اساس ارزش اقتصادی آن اتفاق بیافتد. با در نظر گرفتن موارد مطرح شده در بالا و با علم به نقش بی‌بدیل رویکرد به‌هم پیوسته منابع آب (در قالب مدل هیدرواکونومیک استفاده شده در این مقاله) در حل مسائل و مشکلات منابع آب در نقاط مختلف جهان (از جمله کشورهای خشک و نیمه‌خشک)، ضرورت و اهمیت رویکرد مذکور در کشور واضح به نظر می‌رسد. استفاده از مفهوم مدیریت یکپارچه منابع آب در کشوری با شرایط آب و هوایی ایران که همواره از برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت و دیدگاه سازه‌ای و فنی مهندسی متولیان خود در مدیریت و برنامه‌ریزی تخصیص منابع آب رنج می‌برد، لازم و ضروری است. همچنین، به منظور ایجاد زیرساخت لازم برای مدیریت بهینه آب کشاورزی به‌صورت یکپارچه از محل ذخیره و تأمین تا محل مزرعه، لازم است حجم آب تخصیص داده شده به شبکه‌های آبیاری واقع در یک حوضه آبریز به صورت مطلوبی بین همه آب‌بران توزیع گردد تا عواید حاصل از به‌کارگیری مدل‌های هیدرواکونومیک به نحو شایسته‌ای اثرهای مستقیم و غیرمستقیم خود را در حوضه نشان دهد.

استفاده از مدل‌های هیدرواکونومیک در برنامه‌ریزی منابع آب مناطق خشک و نیمه خشک جهان قدمتی تقریباً چهل ساله دارد که به عنوان یکی از شاخص‌ترین آن‌ها به مطالعه Noel and Howitt (1982) در زمینه تخصیص بهینه منابع آب می‌توان اشاره کرد. در استرالیا نیز Rogers et al. (1993) به منظور بررسی ارتباط بین تغییرات موجودی آب قابل دسترس و رشد بخش کشاورزی، از مدل هیدرواکونومیک بهره بردند. تعیین استراتژی‌های بهینه آبیاری به منظور بیشینه کردن تولید در بخش کشاورزی با استفاده از ساختار هیدرواکونومیک، توسط Peralta et al. (1994) در محدوده‌های مطالعاتی با شرایط آب و هوایی خشک و نیمه‌خشک مورد پژوهش قرار گرفتند. در ادامه، Beare et al. (1998) مطالعه مذکور را با محاسبه ارزش آب آبیاری و بررسی اثرپذیری آن از تغییرات هیدرولوژیک تکمیل نموده و ارتباط بین تغییرات موجودی آب قابل‌دسترس و رشد بخش کشاورزی و اثر آن بر ارزش آب آبیاری کشور مذکور را مورد بررسی قرار دادند. Oñate et al. (2007) با کاربرد روش برنامه‌ریزی ریاضی مثبت به مقایسه اثرهای مکانیزم‌های حمایتی مربوط به سیاست مشترک کشاورزی اتحادیه اروپا بر تولید مزارع نمونه در منطقه‌ای از اسپانیا پرداختند. نتایج نشان داد که در مقایسه با سیاست‌های قبلی، سود ناخالص به‌صورت چشمگیری کاهش می‌یابد. Gallego-Ayala and Gómez-Limón (2011) با استفاده از روش برنامه‌ریزی ریاضی مثبت به بررسی و تجزیه و تحلیل ابزارهای سیاسی برای کنترل کردن آلودگی نیترات در آبیاری کشاورزی در کاستیای اسپانیا پرداختند و نشان دادند که اصلاحات اخیر در سیاست‌های معمول کشاورزی منجر به کاهش اساسی در آلودگی نیترات خواهد شد و اگر این کاهش به اندازه کافی در نظر گرفته نشود سایر ابزارهای سیاسی می‌تواند این منابع آلودگی را بیشتر کاهش دهد. Medellín-Azuara et al. (2010) با استفاده از روش برنامه‌ریزی ریاضی مثبت به بررسی ارزش اقتصادی آب تحت شرایط مختلف روی رودخانه Rio در شمال مکزیک پرداختند و نشان دادند که ارزش اقتصادی آب در سطوح مزرعه و سطح منطقه نسبتاً مشابه است. تغییرپذیری و تأثیرات هر سناریو در سطح منطقه، بیشتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد. همچنین، نشان دادند که ارزش آب در شرایط کمبود در سطح مزرعه افزایش قیمت بیشتری دارد. از دیگر مطالعات انجام شده در این زمینه می‌توان به مطالعه Varela-Ortega et al. (2011) اشاره کرد که با استفاده از مدل هیدرواکونومیک اثرهای خشکسالی در تخصیص بهینه منابع آب در بخش‌های اقتصادی، از جمله بخش کشاورزی، را بررسی نموده و سیاست‌های مختلف تخصیص آب و گزینه‌های مدیریتی تحت سناریوهای مختلف اقلیمی در بخش‌های مذکور را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند.

مطالعات و بررسی‌ها حاکی از آن است که مدیریت بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری کشور عملکرد ضعیفی در استفاده بهینه از آب داشته

است. به‌طوری که تحقیق جامعی که از کل شبکه‌های آبیاری کشور انجام گرفته حاکی از آن است که راندمان کل آبیاری در این شبکه‌ها بین ۱۵ تا ۳۶ درصد در نوسان است (Abbasi et al., 2016). روش‌های بهره‌برداری سنتی، به دلیل عدم وجود زیرساخت مناسب برای پیاده‌سازی استراتژی‌های نوین برنامه‌ریزی منابع آب (مانند رویکرد هیدرواکونومیک) عملکرد دور از انتظاری را در تحویل آب کافی و عادلانه در سطح شبکه دارا می‌باشند. لذا، اجرای طرح‌های نوسازی و خودکارسازی بهره‌برداری کانال‌های آبیاری با بهره‌گیری از روش‌های هوشمند مدیریتی و با هدف پیاده‌سازی کامل راهبردها و رویکردهای نوین برنامه‌ریزی منابع آب در حوضه‌های آبریز لازم و ضروری است. بنابراین، در اولین گام لازم است تا میزان توانایی و پتانسیل سامانه‌های موجود بهره‌برداری از شبکه‌های آبیاری در توزیع کافی، مؤثر و عادلانه آب مورد بررسی قرار گیرد تا لزوم نوسازی و بهسازی شبکه‌های مذکور مشخص گردد. در تحقیق Hashemy Shahdany et al. (2017a)، رویکرد جدید بهره‌برداری اقتصادی شبکه‌های آبیاری در شرایط کم آبی و بر پایه حداکثرسازی سود حاصل از فعالیت‌های کشاورزی و ارزش اقتصادی هر متر مکعب آب تحویلی ارائه شده است. برای این منظور، از تلفیق مدل اقتصادی برنامه‌ریزی اثباتی، به‌منظور تعیین ارزش اقتصادی آب، و مدل بهره‌برداری پیش‌بین، جهت تحویل آب به واحدهای زراعی درجه دو استفاده شده است.

هدف از مطالعه حاضر، در گام اول محاسبه اولویت تخصیص آب بین شبکه‌های آبیاری پایاب سد زاینده‌رود بر پایه اهداف اقتصادی می‌باشد. این مهم، با تلفیق مدل‌های بهینه سازی اقتصاد کشاورزی (مدل برنامه‌ریزی ریاضی مثبت PMP) و مدل برنامه‌ریزی منابع آب (مدل MODSIM) انجام گردید. در گام دوم تحقیق، میزان توانایی سامانه آبیاری فعلی بهره‌برداری در شبکه‌های آبیاری در توزیع آب تخصیص یافته بهینه در داخل سامانه اصلی انتقال و توزیع آب داخل شبکه آبیاری مورد بررسی قرار گرفت. هدف از گام دوم این تحقیق، ارزیابی عملکرد سامانه موجود بهره‌برداری از شبکه آبیاری در تحویل و توزیع مناسب آب تخصیص داده شده بهینه به شبکه آبیاری است. برای تحقق این هدف، شبکه آبیاری رودشت (آخرین شبکه آبیاری واقع در پایاب رودخانه زاینده‌رود) انتخاب شد و عملکرد بهره‌برداری کانال قبل و بعد از تخصیص بهینه آب به شبکه مورد بررسی قرار گرفت.

۲- روش پژوهش

۲-۱- حوضه آبریز زاینده‌رود

انتخاب حوضهٔ آبریز زاینده‌رود به عنوان منطقهٔ مطالعاتی این پژوهش به این دلیل صورت گرفته که این حوضه یکی از حوضه‌های آبریز تحت تنش آبی در کشور است که با وجود تداوم طرح‌های توسعهٔ منابع آب در حوضه، به دلیل رشد سریع تقاضا، همواره با کمبود آب مواجه بوده است. شرایط حال حاضر حوضه زاینده‌رود حاکی از آن است که بحران آب در سطح حوضه در آینده ناشی از هر دو مؤلفه کاهش عرضه و افزایش تقاضا خواهد بود. بنابراین، برنامه‌ریزی‌های جامع و درازمدت مدیریت منابع آب حوضه باید با تأکید بر هر دو مؤلفه صورت پذیرد. در سطح محدوده مطالعاتی مورد نظر تحقیق حاضر، مطابق شکل ۱، شش زیرمحدوده وجود دارد. زیرمحدوده‌های این حوضه عبارتند از شبکه سنتی زاینده‌رود (از سد زاینده‌رود تا سد نکوآباد)، شبکه مدرن مهیار و جرقویه (محل آبگیری از بند ذوب آهن)، شبکه مدرن نکوآباد چپ و راست (محل آبگیری از سد انحرافی نکوآباد)، شبکه مدرن بُرخوار (محل آبگیری از دریچه انتهایی شبکه سمت چپ نکوآباد)، شبکه مدرن آبشار چپ و راست (محل آبگیری از سد انحرافی آبشار در شهر اصفهان) و شبکه مدرن رودشت شمالی و جنوبی (محل آبگیری از سد انحرافی رودشت).

محصولات زراعی استفاده شده در الگوی کشت هر کدام از شش شبکه آبیاری، که در مدل اقتصادی مورد استفاده قرار گرفت در ادامه ارائه شده است. محصولات گندم، جو، برنج، سیب‌زمینی، پیاز، یونجه و ذرت علوفه‌ای محصولات زراعی شبکه آبیاری نکوآباد را تشکیل می‌دهند. در شبکه آبیاری آبشار، محصولات گندم، پیاز، خربزه، انواع کدو، باقلا و شبدر کاشت می‌شوند. محصولات زراعی گندم، جو، یونجه، ذرت علوفه‌ای، خربزه، هندوانه، طالبی، گرمک و چغندرقند در شبکه آبیاری برخوار کشت می‌شوند. در شبکه آبیاری رودشت، عمدتاً گندم و جو و در کنار آن محصولات ذرت علوفه‌ای، یونجه و گلرنگ کاشت می‌شوند. در دو شبکه مهیار و سنتی، محصولات گندم، جو، پیاز، یونجه و ذرت علوفه‌ای کاشت می‌شود.

همان‌طور که پیش‌تر نیز توضیح داده شد، کانال اصلی شاخه شمالی شبکه آبیاری رودشت به‌عنوان مورد مطالعاتی بخش دوم این تحقیق جهت ارزیابی وضعیت بهره‌برداری شبکه پس از تخصیص بهینه آب، مورد استفاده قرار گرفت که اطلاعات مورد نیاز مدل‌سازی آن در جدول ۱ ارائه شده است. کانال مذکور دارای شیب ملایم و شامل ۱۴ سازه آب‌بند (سازه تنظیم کننده سطح آب) می‌باشد که بر این اساس کانال مورد مطالعه به ۱۳ بازه تقسیم می‌شود. در این کانال، تنظیم تراز سطح آب به‌طور معمول برای هر زوج آبگیر (دریچه‌های نیرپیک) توسط یک سازه تنظیم (سرریز نوک اردکی) انجام می‌شود. شرایط فیزیکی و هیدرولیکی آبگیرهای واقع شده در طول کانال اصلی سمت چپ شاخه شمالی در Hashemy Shahdany et al. (2017b) آورده شده است.

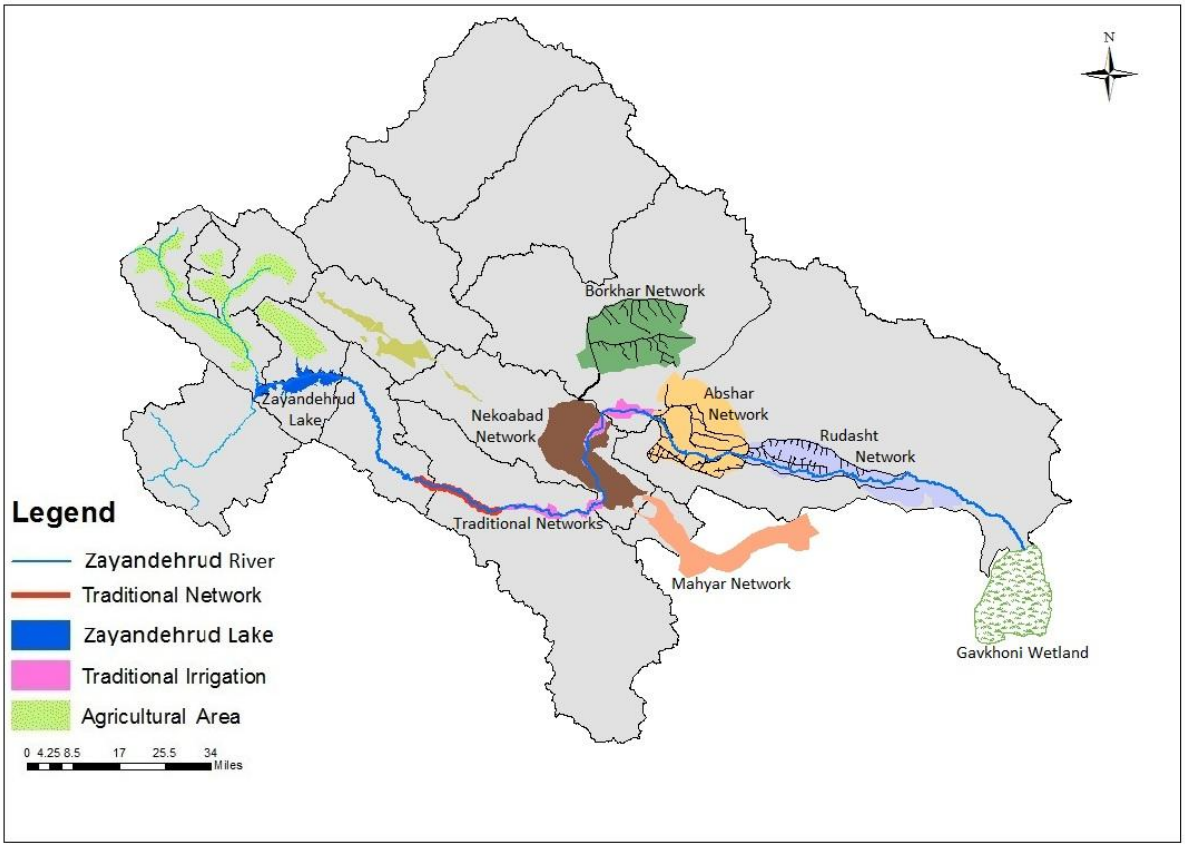

Fig. 1- Location of the six irrigation districts along Zayandehrud River
شکل ۱- شمایی از شش شبکه آبیاری واقع در طول رودخانه زاینده‌رود

Table 1- Structural and operational features of the six irrigation districts
جدول ۱- مشخصات سازه‌ای و بهره‌برداری شش شبکه آبیاری این تحقیق

ID	Farmland (ha)	Conveyance System		Design Capacity of the Main Canal (cms)		Conveyance system infrastructure and operational management			Scheme Irrigation Efficiency (%) (Abbasi et al., 2017)
		length (km)	type of lining	Left Branch	Right Branch	Main Regulating Structures	Main Off-takes	Canal Operation	
ID1	33000	95	Earthen	7	10	Check	Check	Manual	32.2
ID2	36000	231	Concrete	12	-	Hydro-Mechanical & Duck-Bill	Nyrpic Module	Manual	40.9
ID3	13000	267	Concrete	-	12	Hydro-Mechanical & Duck-Bill	Nyrpic Module	Manual	40.9
ID4	65000	205	Concrete	50	15	Hydro-Mechanical	Nyrpic Module	Manual	42.1
ID5	30000	129	Concrete	15	15	Hydro-Mechanical	Nyrpic Module	Manual	42.1
ID6	42000	317	Concrete	24	24	Duck-Bill	Nyrpic Module	Manual	42.1

ID1- Traditional, ID2= Borkhar, ID3= Mahyar, ID4- Neko-Abad, ID5= Abshar, ID6= Rudasht

۲-۲- مدل اقتصادی (مدل برنامه‌ریزی ریاضی مثبت)

روش برنامه‌ریزی ریاضی مثبت، یک روش تحلیل تجربی است و از تمام اطلاعات موجود (فارغ از اینکه به چه میزان کمیاب هستند) استفاده می‌کند و در تحلیل‌های سیاستی منطقه‌ای و بخشی اهمیت ویژه‌ای دارد. نیاز روزافزون به الگو و شبیه‌سازی توابع رفتاری تحت شرایط فنی، اقتصادی، سیاسی و اخیراً زیست‌محیطی، استفاده از مدل اقتصادی را تقویت کرده است. آمار و اطلاعاتی که به منظور

شبیه‌سازی و واسنجی مدل اقتصادی مورد نیاز می‌باشد به سه دسته به شرح زیر تقسیم‌بندی می‌شوند (Howitt et al., 2012).

دسته اول: مجموعه آمار و اطلاعاتی که از طریق پرسشنامه و از کشاورزان شاغل در محدوده مطالعاتی مذکور در سال زراعی مشخص به‌دست می‌آید. این آمار و اطلاعات عبارتند از:
الف) آمار و اطلاعات مربوط به عملکرد، سطوح و ترکیب کشت اراضی زراعی کشاورزی در سطح شبکه‌های آبیاری
ب) مقدار مصرف و هزینه تولید مربوط به نهاده‌های محصولات کشاورزی (در واحد هکتار) شامل: زمین، کود، سموم، نیروی کار و ماشین‌آلات، قیمت سر خرمن محصولات (محصولاتی که دارای قیمت تضمینی نمی‌باشند)

دسته دوم: داده‌ها و اطلاعاتی که از طریق مراجعه به سازمان‌ها و نهادهای مربوط به محل شبکه آبیاری مورد نظر جمع‌آوری می‌گردند، که عبارتند از: تعرفه آب، قیمت محصولات کشاورزی، حجم آب قابل دسترس از منابع آب سطحی، زیرزمینی و سایر منابع احتمالی (مانند پساب تصفیه شده)، اطلاعات مربوط به حقابه‌های موجود، قیمت (محصولات دارای قیمت تضمینی) و عملکرد محصولات،

دسته سوم: نیاز آبی برآورد شده به تفکیک هر واحد زراعی درجه چهار (مزرعه) و واحدهای زراعی با درجه بالاتر، پس از اعمال راندمان انتقال، توزیع و تحویل آب

روند مدل‌سازی اقتصادی در این تحقیق در قالب شکل ۲ به تصویر کشیده شده و مراحل آن به شرح زیر توضیح داده شده است. پس از جمع‌آوری کلیه اطلاعات، فرض بر این است که همه کشاورزانی که در محدوده مطالعاتی مورد نظر (شش شبکه آبیاری) مشغول به فعالیت کشاورزی می‌باشند، به دنبال حداکثر کردن درآمد خالص خود در هر سال زراعی معین می‌باشند.

۲-۲-۱- تابع هدف مدل اقتصادی

(۱)

$$\max net = \sum_i \left[p_i q_i(X_{ih}, P_i) - \sum_h p_h X_{ih} - (\alpha_i X_{iland} + 0.5\psi_i X_{iland}^2) \right]$$

قسمت اول (سمت راست) معادله (۱) نشان‌دهنده درآمد ناخالص، p_i المان‌های بردار قیمت محصولات شامل قیمت محصول i واقع شده در الگوی کشت (ریال) که توسط تابع تولید $q_i(X_{ih},P_i)$ تولید می‌شوند، X_{ih}، ماتریس (i×h) متشکل از محصولات زراعی i و نهاده‌های کشاورزی h، شامل زمین (هکتار)، حجم آب سطحی مورد استفاده در آبیاری (متر مکعب)، نیروی کار اجاره‌ای (نفر)، نیروی کار خانوادگی (نفر) و نهاده‌های قابل خرید مانند کود (کیلوگرم)، سم (کیلوگرم یا لیتر) و p_h قیمت نهاده‌های مذکور (ریال)، می‌باشند.

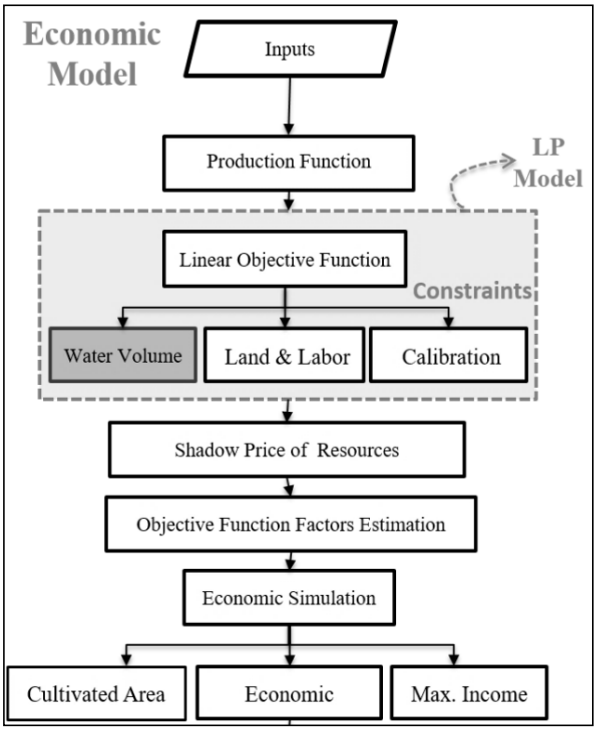

Fig. 2- Modeling steps of the economic PMP model (Hashemy Shahdany et al., 2017b)

شکل ۲- مراحل مدل‌سازی مدل اقتصادی PMP (Hashemy Shahdany et al., 2017b)

Pi حجم بارشی است که در طول فصل رشد محصول i، بر زمین زراعی می‌بارد (میلی‌متر). هزینه هر واحد از تولید محصول i در دو بخش جداگانه در معادله (۱) تعریف شده است (Medellín-Azuara et al., 2010). بخش اول نشان‌دهنده حاصل‌ضرب قیمت بازاری (p_h) نهاده‌ها در مقدار مصرف آن‌ها (X_{ih}) می‌باشد و بخش دوم که در داخل پرانتز قرار دارد، به‌منظور در نظر گرفتن هزینه ضمنی زمین بر اساس تخصیص آن می‌باشد که دارای تصریح درجه دو با پارامترهای α_i و ψ_i (بی‌بعد) بوده و افزایشی بودن هزینه نهایی نهاده کشاورزی زمین را برای محصولات (X_{iland}) مختلف در نظر می‌گیرد. تابع تولید $q_i(X_{ih},P_i)$، تخمینی از محصولات تولید شده را به‌وسیله مجموعه‌ای از نهاده‌های موجود و سطح بارش برای هر محصول زراعی i فراهم می‌نماید.

۲-۲-۲- محدودیت‌های مدل اقتصادی

$$\text{Land}: \sum_i X_{iland} \le B_{land} \quad (۲)$$

$$\text{Family labor}: \sum_i a_{ifl} X_{iland} \le B_{fl} \quad (۳)$$

$$\text{Surface Water}: \sum_i X_{iswm} \le B_{swm} \quad (۴)$$

$$X_{iland} \le \hat{X}_{iland} \quad (۵)$$

که a_{ih} نهاده‌های مورد استفاده در واحد هکتار، B_{land} و B_{fl} به ترتیب بازتاب کل زمین در دسترس (هکتار) و نیروی کار خانوادگی (نفر) می‌باشند. رابطه (۴) تضمین می‌کند که مقدار کل آب‌های سطحی مورد استفاده (X_{iswm}) (متر مکعب) در ماه یا سال m، کمتر یا مساوی میزان کل آب سطحی در دسترس (B_{swm}) برای آبیاری محصولات زراعی در همان ماه و یا سال می‌باشد. در رابطه (۵)، $\widehat{X}_{iland}$ عبارت است از مساحت کل زمین تخصیص داده شده به محصول زراعی i که توسط محقق مشاهده گردیده است (هکتار).

قیمت‌های سایه‌ای برای هر نهاده غیربازاری و یا با عرضه محدود، از حل مدل برنامه‌ریزی خطی معمولی فوق با تابع حداکثرسازی درآمد کشاورزان منطقه (رابطه ۱) و محدودیت‌های واسنجی (رابطه ۵) به همراه محدودیت‌های منابع (روابط ۲، ۳ و ۴) با هدف برآورد قیمت‌های سایه‌ای سطح زیر کشت محصولات حاصل می‌شوند. قیمت‌های سایه‌ای به‌دست آمده مذکور به منظور برآورد پارامترهای تابع تولید در مرحله بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲-۲-۳- تابع تولید مورد استفاده در مدل اقتصادی

فرم تابعی مورد استفاده در مدل اقتصادی از نوع کشش جانشینی ثابت می‌باشد و شکل تابع مذکور برای محصولات کشاورزی فاریاب به شرح زیر است:

$$q_i^{ir} = A_i \left(\sum_h b_{ih-1} X_{ih-1}^{\gamma} + b_w \left(X_{isw} + P_i^a \right)^{\gamma} \right)^{\frac{\varepsilon_i}{\gamma}} \quad (۶)$$

توان ir در q_i^{ir} مخفف تابع تولید آبی، Ai پارامتر کارایی می‌باشد که مقدار آن بزرگتر از صفر در نظر گرفته می‌شود و b_{ih} پارامترهای تابع تولید برای همه نهاده‌های تولید به‌جز آب سطحی، b_w سهم آب سطحی (X_{isw}) یا بارش P_i^a از آب آبیاری کل و γ و ε_i نیز پارامتر بازده به مقیاس ($\gamma = \frac{\sigma-1}{\sigma}$ که σ کشش جانشینی میان نهاده‌ها است) می‌باشد. به منظور شبیه‌سازی شرایط موجود کشاورزی محدوده مطالعاتی تحقیق حاضر و دستیابی به مجموعه‌ای بهینه از نهاده‌های حداکثر کننده درآمد ناخالص شرایط موجود کشاورزان، تابع تولید غیرخطی q_i^{ir} (رابطه ۶) در تابع هدف خطی اولیه (رابطه ۱) به جای $q_i(X_{ih},P_i)$ قرار گرفت و تابع مذکور در یک مسأله برنامه‌ریزی غیرخطی به استثنای محدودیت واسنجی (ولی همراه با سایر محدودیت‌های مدل) به‌منظور برآورد ارزش اقتصادی آب به تفکیک محصولات زراعی واقع در الگوی کشت شبکه‌های آبیاری و بررسی روند تغییرات الگوی کشت مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۳- مدل برنامه‌ریزی منابع آب

مدل هیدرولوژی مورد استفاده در مدل منابع آب ساختار یکپارچه هیدرواکونومیک این تحقیق، مدل تخصیص منابع آب MODSIM می‌باشد. در این مدل منابع آب، به طور سیستماتیک جریان‌های طبیعی آب و مصارف آن و همچنین مدیریت زیربنایی برای تعادل عرضه و تقاضای آب در داخل مدل شبیه‌سازی می‌شود. ساختار مدل مذکور به‌منظور تخصیص آب بر پایه رسیدن به یک تعادل مناسب، متشکل از الگوریتم برنامه‌نویسی خطی است که نیازهای کمبود آب مصارف مختلف را با در نظر گرفتن یک‌سری محدودیت‌ها، حداقل‌سازی می‌کند. محدودیت‌های مذکور عبارتند از محدودیت‌های وابسته به اولویت نیاز مصارف مختلف و همچنین عرضه از منابع گوناگون.

از مدل MODSIM به منظور شبیه‌سازی سیستماتیک جریان طبیعی آب ورودی به سد زاینده‌رود، حجم آب قابل دسترس سد مذکور و تحویل و توزیع آب به هر یک از شبکه‌های آبیاری بر پایه ارزش اقتصادی آب در سال ۹۴-۱۳۹۳ استفاده گردید. به همین منظور، کاربست مدل MODSIM با توجه به منابع (سد زاینده‌رود به عنوان تنها منبع عرضه) و مصارف (نیازهای شرب، زیست‌محیطی، صنعت و کشاورزی) موجود و به منظور فراخوانی داده‌ها و اطلاعات لازم به این مدل در محیط نرم‌افزار MODSIM طراحی گردید. از آنجا که در این مدل، اولویت نیازها تعیین‌کننده چگونگی تخصیص آب به مصارف مختلف و اولویت عرضه نیز دیکته کننده چگونگی عرضه آب از یک منبع به منبع دیگر در موقع کمبود آب می‌باشد، هدف کلی این پژوهش در محدوده مطالعاتی مورد نظر، تخصیص آب به بخش کشاورزی (شبکه‌های آبیاری پایاب سد زاینده‌رود و محصولات واقع در الگوی کشت آن‌ها) بر اساس ارزش اقتصادی می‌باشد. از آنجا که مصارف دیگر از جمله شرب، زیست‌محیطی و صنعت نیز در این محدوده وجود دارند، بنابراین، به‌منظور در نظر گرفتن حجم آب تخصیص یافته به هر یک از مصارف مذکور، اولویت تخصیص آب به صورت برون‌زا و بر اساس اسناد بالادستی به‌ترتیب اولویت یک، دو و سه در مدل برنامه‌ریزی منابع آب در نظر گرفته شد. بعد از آن، آب قابل دسترس

باقی‌مانده برای بخش کشاورزی با در نظر گرفتن اولویت ارزش اقتصادی آب به این شبکه‌های آبیاری شش‌گانه سد زاینده‌رود تخصیص داده شد.

از آنجا که هر یک از محصولات واقع در الگوی کشت شبکه‌های آبیاری شش‌گانه پایاب سد زاینده‌رود به عنوان یک نیاز مستقل در کاربست مدل مذکور در نظر گرفته شده است، لذا به منظور تحویل و توزیع بهینه آب به هر یک از محصولات مورد نظر، اولویت تحویل و توزیع شبکه‌های آبیاری مورد نظر بر اساس میانگین وزنی ارزش اقتصادی آب محصولات زراعی واقع در الگوی کشت آنها در نظر گرفته شد و حجم آب موجود و قابل برنامه‌ریزی در سال شاخص بر اساس اولویت نیازهای قید شده فوق به مصارف مختلف تخصیص داده شد.

۲-۴- تلفیق مدل‌های هیدرولوژیک و اقتصادی در ساختار یکپارچه هیدرواکونومیک

ارتباط بین دو مدل اقتصادی و برنامه‌ریزی منابع آب در ساختار توسعه یافته هیدرواکونومیک تحقیق حاضر به صورت مجزا در نظر گرفته شده است. بدین علت که هر چند انتقال اطلاعات بین اجزای مدل یک چالش فنی است، اما فقط در مدل‌های مذکور استفاده از تکنیک‌های ترکیبی شبیه‌سازی و بهینه‌سازی امکان‌پذیر است. عامل ارتباط بین دو مدل برنامه‌ریزی منابع آب و اقتصادی، حجم آب در دسترس بخش کشاورزی و سطح زیر کشت بهینه موجود در الگوی زراعی شبکه‌های آبیاری پایاب سد زاینده‌رود می‌باشد. با این توضیح که میزان آب قابل دسترس سد زاینده‌رود و به دنبال آن حجم آب قابل تحویل به شبکه‌های آبیاری پایاب سد توسط مدل منابع آب تخمین زده می‌شود. سپس، اطلاعات مذکور به عنوان یک محدودیت در تولید محصولات زراعی از طریق معادلات مربوطه وارد مدل اقتصادی می‌گردد. مدل اقتصادی نیز واکنش احتمالی کشاورزان را نسبت به تغییرات مذکور، در قالب تغییرات الگوی کشت و اثر آن بر ارزش اقتصادی محصولات زراعی، مورد ارزیابی قرار می‌دهد. با ورود تغییرات مذکور در مدل برنامه‌ریزی منابع آب، حجم آب قابل دسترس بر اساس این تغییرات توسط مدل مذکور شبیه‌سازی و دوباره وارد مدل اقتصادی می‌گردد. همگرایی بین دو مدل زمانی اتفاق می‌افتد که حجم آب قابل دسترس به‌دست آمده از مدل منابع آب و تخصیص آن به شبکه‌های آبیاری (بر اساس اولویت ارزش اقتصادی آب) بر اثر تغییرات زراعی بین دو تکرار متوالی ثابت شده و یا تفاوت چندانی نداشته باشد و یا الگوی کشت بهینه موجود منتج از مدل اقتصادی در دو تکرار متوالی دستخوش تغییرات نگردد.

۲-۵- تهیه مدل ریاضی بهره‌برداری از کانال اصلی رودشت

در این تحقیق، به منظور شبیه‌سازی جریان غیرماندگار، از مدل هیدرودینامیک توسعه داده شده توسط Masah Bouani (2002) استفاده شد. این مدل قادر به شبیه‌سازی جریان‌های ماندگار و غیرماندگار در شبکه‌های آبیاری با انواع شکل مقطع کانال همراه با طیف قابل توجهی از سازه‌ها و امکان بهره‌برداری آنها توأم با جریان‌های گسترده ورودی و خروجی می‌باشد. برای اطلاع از جزییات بیشتر در مورد چگونگی عملکرد، مبانی مدل، روش شبیه‌سازی و نحوه استفاده و کاربردهای گوناگون این مدل ریاضی در شبیه‌سازی بهره‌برداری از کانال‌های آبیاری به مطالعه Shahverdi and Monem (2017) مراجعه شود. برای شبیه‌سازی جریان در یک کانال توسط این مدل و به منظور انجام محاسبات هیدرولیکی، کانال به تعدادی بازه تقسیم می‌شود. ابتدا و انتهای این بازه‌ها در اغلب موارد سازه‌های آب‌بند و آبگیر در طول کانال می‌باشند که به عنوان شرایط مرزی آن قطعه محسوب می‌شوند. بنابراین، وضعیت هیدرولیکی این سازه‌ها باید در داده‌های ورودی مدل مشخص و تعریف گردد. به ازای هر سازه‌ای که در انجام محاسبات در طول کانال نقش شرط مرزی را دارد، دو ماتریس اطلاعات مربوط به آن شرط مرزی باید در یک فایل ورودی قید گردد. مدل ریاضی کانال اصلی آبیاری مورد مطالعه حاضر بر اساس اطلاعات جمع‌آوری شده از دفتر بهره‌برداری شبکه آبیاری رودشت، شامل نقشه مسیر کانال، مشخصات فیزیکی بازه‌های کانال، محل و ابعاد سازه‌های آب‌بند نوک اردکی، نوع و مکان سازه‌های آبگیر نیرپیک و شرایط هیدرولیکی مرزی بالادست و پایین‌دست در شبیه‌ساز هیدرودینامیک طراحی شد. واسنجی مدل براساس داده‌های دبی تحویلی به کلیه آبگیرهای کانال رودشت، برای کشت بهاره سال ۱۳۹۴ انجام گرفت. برای مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهده شده، از شاخص‌های ارزیابی واسنجی RMSE و CRM استفاده گردید (Hashemy Shahdany et al., 2017):

$$RMSE = \left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(M_i - S_i\right)^2\right]^{0.5} \times \left(\frac{100}{M}\right) \quad (۷)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^{n} M_i - \sum_{i=1}^{n} S_i}{\sum_{i=1}^{n} M_i} \quad (۸)$$

که در این روابط S_i، M_i و M به‌ترتیب مقادیر شبیه‌سازی شده، مشاهده شده و میانگین مقادیر مشاهداتی است.

شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) پارامتری آماری است که جذر مجموع اختلافات مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده نسبت به میانگین مقادیر مشاهداتی را نشان می‌دهد. مقدار مطلوب این

شاخص برابر صفر بوده و نشان دهنده انطباق مقادیر شبیه‌سازی مدل با مقادیر مشاهداتی است. ضریب خطای باقیمانده (CRM) شاخصی است که خطاهای ثابت توزیع شده در تمام مقادیر شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. اگر مقدار CRM برابر صفر باشد نشان می‌دهد که خطای توزیع شده روی مقادیر شبیه‌سازی در ارتباط با مقادیر مشاهداتی وجود ندارد.

ارزیابی و مقایسه عملکرد سامانه تحویل و توزیع آب شبکه آبیاری رودشت قبل و بعد از تخصیص بهینه آب محاسبه شده توسط ساختار هیدرواکونومیک، تحت سناریوی بهره‌برداری ماه فروردین کشت بهاره سال ۱۳۹۴ انجام گرفت. بنابراین، کل دوره زمانی مورد استفاده در شبیه‌سازی بهره‌برداری کانال مذکور، فصل آبی سال ۹۴-۱۳۹۳ بوده و گام زمانی مورد استفاده در محاسبات مدل‌سازی بهره‌برداری شبکه آبیاری رودشت ۱۵ دقیقه در نظر گرفته شد. میزان تقاضای آب در هر آبگیر نیز بر اساس آمار و اطلاعات ثبت شده دفتر بهره‌برداری شبکه در نظر گرفته شد. برای سامانه آبگیری نیرپیک، تنظیم آبگیرها تنها یک بار در ابتدای روز انجام شده و در زمان نوسانات، بازشدگی شاتل‌های دریچه نیرپیک ثابت بوده و تغییری در بازشدگی یا بسته بودن آن‌ها صورت نگرفته است.

۲-۶- معیارهای کارایی مربوط به تحویل آب

به‌منظور ارزیابی جامع فرایند بهره‌برداری کانال آبیاری، میزان کفایت و راندمان تحویل آب در محل هر آبگیر و نیز مقدار عدالت توزیع آب بین آبگیرهای واقع شده در طول کانال اصلی بررسی شدند. شاخص کفایت تحویل آب شاخصی است که میزان توانایی سامانه بهره‌برداری در تحویل آب به اندازه تقاضا (یا حقابه مشخص) را مورد بررسی قرار می‌دهد. همچنین، میزان مازاد آب تحویلی نسبت به میزان تقاضا در اثر عملکرد نامناسب روش بهره‌برداری، توسط شاخص راندمان تحویل آب بررسی می‌شود. برای این منظور، در این تحقیق، از معیارهای کارایی مربوط به تحویل آب ارائه شده توسط Molden and Gates (1990) استفاده شد:

$$P_A = \frac{1}{T}\sum_T[\frac{1}{R}\sum_R(P_a)] \quad (۹)$$

$$\mathrm{P_a} = \frac{\mathrm{Q_d}}{\mathrm{Q_r}} \quad \text{if } \mathrm{Q_d} < \mathrm{Q_r} \quad \text{Otherwise } \mathrm{P_a} = 1$$

$$P_F = \frac{1}{T}\sum_T[\frac{1}{R}\sum_R(P_f)] \quad (۱۰)$$

$$\mathrm{P_f} = \frac{\mathrm{Q_r}}{\mathrm{Q_d}} \quad if \;\; Q_r < Q_d \;\; Otherwise \;\; P_f = 1$$

$$P_E = \frac{1}{T}\sum_T C\,V_R(\frac{Q_d}{Q_r}) \quad (۱۱)$$

روابط مذکور به‌ترتیب بیانگر شاخص کفایت تحویل (P_A)، راندمان تحویل (P_F) و عدالت تحویل (P_E) می‌باشند. در این روابط، Q_r و Q_d به ترتیب مقدار آب مورد نیاز و مقدار آب تحویل شده در هر آبگیر در دوره زمانی T، R پارامتر مکانی (تعداد آبگیرها) و CV_R نشان‌دهنده ضریب تغییرات مکانی است. شاخص عدالت توزیع، شاخصی است که به بررسی یکنواختی مکانی کفایت تحویل آب در طول کانال اصلی پرداخته و میزان تناسب موجود بین مقادیر آب تحویلی و مقادیر مورد تقاضا در محل آبگیرهای واقع در شبکه آبیاری را در کل زمان بهره‌برداری ارزیابی می‌کند. CV_R از تقسیم میانگین به انحراف معیار نسبت تحویل آب (مقدار آب تحویل شده به مقدار آب مورد نیاز) برای هر آبگیر در هر گام زمانی شبیه‌سازی به‌دست می‌آید. بر اساس استاندارد ارائه شده توسط Molden and Gates (1990)، ارزیابی مطلوبیت بهره‌برداری بر اساس هر کدام از سه معیار مذکور با استفاده از سه مفهوم خوب، متوسط و ضعیف، مطابق جدول ۲ انجام می‌گیرد.

Table 2- Evaluation of canal operation based on water delivery indicators

جدول ۲- ارزیابی بهره‌برداری از کانال بر اساس معیارهای کارایی مربوط به تحویل آب

Indicator	Performance range		
	Poor	Moderate	Good
Adequacy	Less than 0.8	0.8 to 0.9	0.9 to 1
Efficiency	Less than 0.7	0.7 to 0.84	0.85 to 1
Equity	More than 0.25	0.11 to 0.25	0 – 0.1

۳- نتایج و بحث

به منظور تخصیص بهینه آب بین شبکه‌های آبیاری شش‌گانه پایاب سد زاینده‌رود (تحت شرایط معمول بهره‌برداری) توسط ساختار توسعه یافته هیدرواکونومیک ارائه شده در این تحقیق، در ابتدا باید شرایط موجود کشاورزی هر یک از شبکه‌های آبیاری توسط مدل اقتصادی و همچنین شرایط هیدرولوژیک حوضه توسط مدل منابع آب شبیه‌سازی گردد. واسنجی مدل اقتصادی با توجه به آمار و اطلاعات پایه جمع‌آوری شده (از طریق پرسشنامه و سایر اطلاعات کتابخانه‌ای موجود) صورت گرفت. در ادامه، مدل‌سازی وضعیت تخصیص آب از سد زاینده‌رود صورت گرفت و فراخوانی آمار و اطلاعات سال پایه و تعیین اولویت منابع و مصارف انجام شد.

۳-۱- شبیه‌سازی وضعیت اقتصادی هر یک از شبکه‌های آبیاری

بهره‌برداری از ساختار توسعه یافته هیدرواکونومیک تحقیق حاضر از ماژول اقتصادی آن در هر یک از شبکه‌های آبیاری آغاز می‌شود و با اجرای مدل اقتصادی ساختار مذکور، شرایط مرزی لازم جهت شبیه‌سازی مدل هیدرولوژی فراهم می‌گردد. به همین منظور در ابتدا،

الگوی کشت هر یک از شبکه‌های آبیاری با استفاده از داده‌ها و اطلاعات شرایط موجود اقتصاد کشاورزی هر یک از آنها، از جمله داده‌ها و اطلاعاتی که از طریق پرسشنامه از کشاورزان و ذینفعان هر محدوده زراعی به طور جداگانه (هزینه زمین، کود، سم، آب، ماشین‌آلات و نیروی کار در واحد هکتار هر یک از محصولات زراعی واقع در الگوی کشت) و از سازمان‌ها و نهادهای مربوطه (قیمت نهاده‌ها، قیمت محصولات زراعی و عمکرد آنها، حجم آب مصرفی محصولات و حجم آب ورودی به هر یک از شبکه‌های آبیاری) جمع‌آوری گردید توسط مدل PMP شبیه‌سازی گردید.

وضعیت فعلی سیستم منابع آب حوضه زاینده‌رود (شامل حجم آب قابل رهاسازی از سد، اولویت‌های تخصیص بین مصارف زیست‌محیطی، شرب و صنعت و حجم مورد تقاضای هر شبکه) به عنوان ورودی‌های مدل منابع آب در نظر گرفته شد. پس از آن، ارتباط بین این مدل و مدل اقتصادی در قالب ساختار توسعه یافته در سایه تخصیص آب بخش کشاورزی، بر اساس اولویت‌های منتج از مدل اقتصادی، به شبکه‌های آبیاری مورد نظر شکل گرفت. از ارتباط مدل منابع آب با مدل اقتصادی، ترتیب اولویت تحویل آب به شش شبکه آبیاری با هدف بهینه‌سازی منافع اقتصادی وضع موجود کشاورزی تمام شبکه‌های آبیاری مشخص شد. نتایج به صورت شماتیک در شکل ۳ ارائه شده است. بر اساس اولویت مذکور، شبکه آبیاری نکوآباد دارای اولویت اول و شبکه آبیاری سنتی دارای اولویت آخر در تحویل آب به شبکه‌های مذکور می‌باشند. شبکه‌های آبیاری مهیار و جرقویه، برخوار، آبشار و رودشت به ترتیب دارای اولویت‌های دوم تا پنجم می‌باشند.

گام بعدی، همگرا نمودن مدل اقتصادی و منابع آب در ساختار مدل هیدرواکونومیک می‌باشد. همگرایی مدل‌های اقتصادی و منابع آب زمانی انجام می‌شود که مقادیر نهایی ارزش آب محصولات محاسبه گردد. به‌عبارت دیگر، بر اساس مقادیر محاسبه شده ارزش اقتصادی آب، اولویت تخصیص به هر شبکه تغییر خواهد کرد و مدل منابع آب بر اساس اولویت جدید اقدام به تخصیص دوباره آب نموده و حجم آب تحویلی جدید به هر شبکه مشخص می‌گردد. حجم آب تحویلی به عنوان خروجی مدل منابع آب به عنوان یک محدودیت در تأمین منابع آب هر شبکه و هر محصول وارد مدل اقتصادی شده و مقادیر ارزش آب جدید محاسبه می‌شود. این روند تا زمانی ادامه پیدا خواهد کرد که ارزش آب محاسبه شده از مدل اقتصادی (به‌عنوان مبنای اولویت تخصیص هر شبکه) و حجم آب تحویلی به هر شبکه (خروجی مدل منابع آب) ثابت شود. بر این اساس، ترتیب اولویت تخصیص آب به شبکه‌های آبیاری بر اساس همگرایی بین دو مدل اقتصادی و منابع آب در ساختار هیدرواکونومیک به‌دست خواهد آمد. نتایج همگرایی در قالب شکل ۴ ارائه شده است. در شکل مذکور، اولویت جدید تخصیص آب نمایش داده شده است.

همانگونه که در شکل ۴ دیده می‌شود، ترتیب اولویت تحویل آب به شبکه‌های آبیاری شش‌گانه تغییر قابل ملاحظه‌ای نموده، به‌طوری‌که اولویت اول تا ششم به ترتیب به شبکه‌های آبیاری آبشار، رودشت، مهیار و جرقویه، نکوآباد، برخوار و سنتی رسیده است. این اولویت تخصیص در مقایسه با اولویت آبگیری شبکه‌های مذکور در شرایط پایه (شکل ۳) که به ترتیب به شبکه‌های نکوآباد، مهیار و جرقویه، برخوار، آبشار، رودشت و سنتی بود، متفاوت می‌باشد و نشان می‌دهد که تخصیص آب به شبکه‌های مذکور در حالت عادی بر اساس ارزش اقتصادی آب محصولات کشاورزی واقع در الگوی کشت آنها صورت نمی‌گیرد.

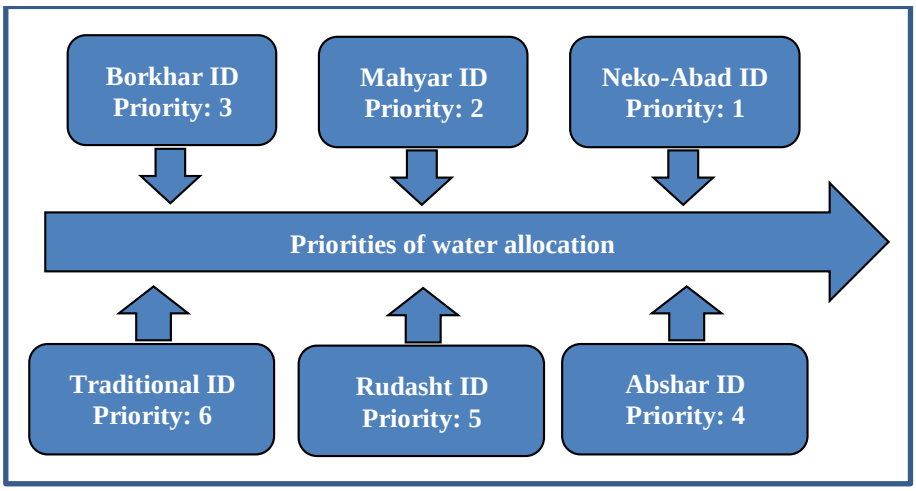

Fig. 3- Priorities of water allocation to the Irrigation Districts (ID) for the base year

شکل ۳- ترتیب اولویت تخصیص آب بین شبکه‌های آبیاری در شرایط سال پایه

زمانی که تجربه و مهارت کشاورز، با اطلاعاتی همچون سطح زیر کشت، میزان مصرف آب به تفکیک محصولات، هزینه نهاده‌ها (از جمله آب) و قیمت محصولات عجین شده و ارزش اقتصادی آب (ساختار توسعه یافته تحقیق حاضر) معیار تخصیص این نهاده در بخش کشاورزی قرار می‌گیرد، سبب افزایش (و یا کاهش) سطح زیر کشت محصولاتی در الگوی کشت موجود می‌گردد که با وجود بازده برنامه‌ای زیاد موجب افزایش بهره‌وری اقتصادی و مصرف بهینه آب در محدوده مطالعاتی مورد نظر می‌گردد. نتایج حاصل از به‌کارگیری مدل اقتصادی شامل درآمد خالص به‌دست آمده در شرایط سطوح زیر کشت در حالت بهینه در مقایسه با حالت موجود در جدول ۳ ارائه شده است. چنانچه ملاحظه می‌گردد، مطابق این جدول، اجرای الگوی کشت بهینه در شرایط موجود شبکه‌های آبیاری منطقه مورد مطالعه باعث افزایش درآمد خالص کشاورزی نسبت به شرایط فعلی سطح زیر کشت شبکه‌ها می‌شود.

با توجه به این مهم، در ادامه، میزان حجم آب ورودی به شبکه‌ها در شرایط پایه و پس از همگرایی مدل‌ها مطابق جدول ۴ آورده شده است. شایان ذکر است که بر اساس اطلاعات جمع‌آوری شده از شرکت آب منطقه‌ای اصفهان، مجموع آب تخصیص یافته به شش شبکه آبیاری پایاب سد زاینده‌رود برابر ۷۶۷ میلیون متر مکعب در سال نرمال است. بر این اساس، در مدل اقتصادی، حداکثر مقدار آب تحویلی به هر شبکه بر اساس حقابه‌های معین (که مجموع آن‌ها برابر ۷۶۷ میلیون متر مکعب است) تعیین گردید. بـه عبارت دیگر، اطلاعات سال پـایه (۹۴-۱۳۹۳) که برای واسنجی مدل اقتصادی به کار برده شد، تنها بر اساس وجود یک مجموعه اطلاعات کامل جهت انجام این تحقیق در نظر گرفته شد. بنابراین، علاوه بر تخصیص بهینه آب به شش شبکه آبیاری در شرایط نرمال در حوضه (سهم بخش کشاورزی از کل حجم آب رها شده از سد زاینده‌رود برابر ۷۶۷ میلیون متر مکعب می‌باشد)، تخصیص بهینه در شرایط خشکسالی و بر اساس آمـار سال پـایه ۹۴-۱۳۹۳ (که سهم بخش کشاورزی برابر ۵۰۹/۴ میلیون متر مکعب است) نیز در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌طور که از نتایج جدول ۴ مشخص است، اولویت تخصیص آب در هر دو حالت سناریوی نرمال و سناریوی کم‌آبی یکسان به‌دست آمده است و تفاوت فقط در حجم آب بهینه تخصیص یافته به هر شبکه می‌باشد.

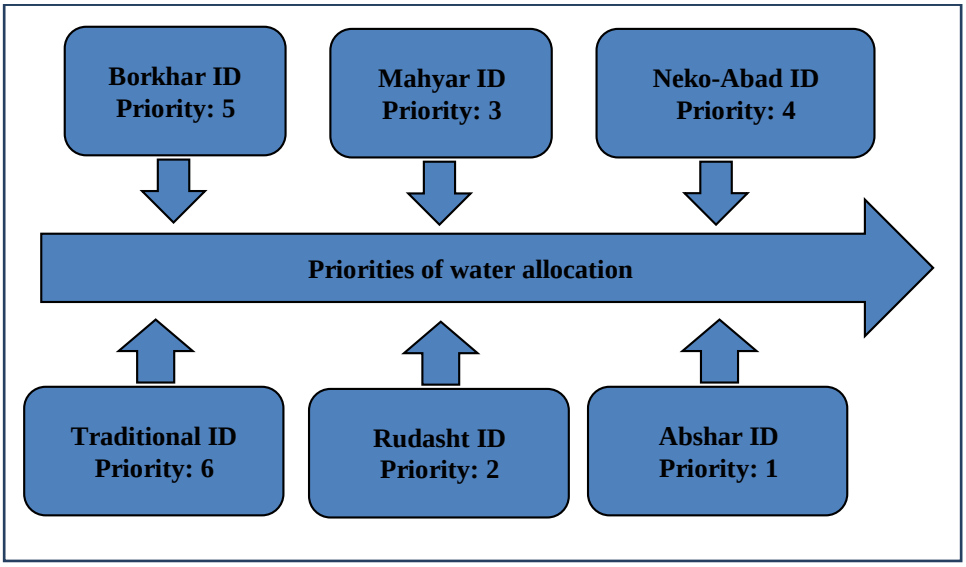

Fig. 4- Priorities of water allocation within the Irrigation Districts (ID) after convergence of the economic and hydrologic models

شکل ۴- ترتیب اولویت تخصیص آب بین شبکه‌های آبیاری پس از همگرایی مدل‌های اقتصادی و هیدرولوژی

Table 3- Net revenues obtained for the six Irrigation Districts before and after optimizing the current cultivated area

جدول ۳- نتایج درآمد خالص حاصل شده به تفکیک شبکه‌های آبیاری شش‌گانه قبل و بعد از بهینه‌سازی سطح زیر کشت موجود

Revenue	Irrigation District					
	Rudasht	Mahyar	Traditional	Borkhar	Abshar	Neko-Abad

Revenue in the current conditions (Million Rials)	19822100	4875950	7675620	33877350	14967900	20526840
optimization of the current Net revenue after cultivated area (Million Rials)	21624080	5143090	7923010	35723670	16980090	21429180

Table 4- Allocated water to the Irrigation Districts (MCM)
جدول ۴- حجم آب تخصیص داده شده به شبکه‌های آبیاری (میلیون متر مکعب)

Irrigation District (ID)		Traditional	Mahyar	Rudasht	Borkhar	Abshar	Neko-Abad	Released Water from the Dam
Base Year		60	13	140.3	10.6	117.5	168	509.4
After Converging the Models	Based on the Base Year's Information	56.28	26	148.2	8.4	130.4	140.12	509.4
	Based on the Normal Year's Information	78	67	153	90	156	223	767

۳-۲- بررسی وضعیت بهره‌برداری از شبکه آبیاری رودشت شمالی

گام اول در این قسمت واسنجی و صحت‌سنجی مدل توسعه داده شده بهره‌برداری کانال اصلی شبکه آبیاری رودشت شمالی می‌باشد. برای واسنجی مدل ریاضی تهیه شده، ضریب دبی هر سازه تنظیم به عنوان متغیر قابل تغییر جهت انطباق مقادیر شبیه‌سازی دبی عبوری از سرریزهای نوک اردکی و نیز رقوم سطح آب بالادست سازه‌های مذکور با مقادیر متناظر اندازه‌گیری شده، استفاده شدند. اطلاعات اندازه‌گیری شده شامل دبی عبوری از هر سازه تنظیم، رقوم سطح آب بالادست آن و دبی آبگیری شده توسط آبگیرها، توسط شرکت بهره‌برداری شبکه آبیاری رودشت به عنوان اطلاعات مشاهداتی در نظر گرفته شد. پس از واسنجی مدل ریاضی جریان در کانال، فرایند صحت‌سنجی بر اساس مقایسه مقدار دبی محاسبه شده تحویلی هر کدام از آبگیرهای واقع در کانال اصلی و مقدار دبی اندازه‌گیری شده توسط شرکت بهره‌برداری انجام گرفت. لازم به توضیح است که صحت‌سنجی مدل ریاضی تهیه شده توسط مدل هیدرودینامیک بر اساس شرایط فعلی بهره‌برداری کانال آبیاری، شامل سازه‌های تنظیم از نوع نوک اردکی و آبگیرهای مدول نیرپیک، و دقیقاً مطابق شرایط فیزیکی کانال آبیاری در زمان اندازه‌گیری انجام شده است. بررسی مطلوبیت فرایند واسنجی و صحت‌سنجی مدل ریاضی تهیه شده، به‌ترتیب برای شاخص RMSE برابر مقادیر ۰/۰۰۳ و ۰/۰۱۵، و برای شاخص CRM برابر ۰/۰۹۹ و ۰/۰۱۱حاکی از آن است که مدل به‌خوبی واسنجی شده و برای شبیه‌سازی سناریوی بهره‌برداری، که هدف اصلی این پژوهش است، دقت خوبی دارد.

نتایج ارزیابی مطلوبیت عملکرد بهره‌برداری کانال اصلی شامل تحویل آب به آبگیرهای واقع در کانال مذکور، از نقطه‌نظر کفایت و راندمان توزیع آب در محل هر آبگیر و عدالت توزیع آب بین آبگیرهای بالادستی، بخش میانی و پایین‌دست کانال بررسی شد و نتایج در قالب شکل ۵ ارائه شد. هر سه معیار کارایی عملکرد، میزان مطلوبیت بهره‌برداری را بر اساس استاندارد ارائه شده جدول ۲، با تکیه بر سه مفهوم «خوب» و «متوسط» و «ضعیف»، ارزیابی می‌نمایند.

بر اساس شاخص کفایت (گراف سبز رنگ در نمودار کفایت شکل ۵)، روش بهره‌برداری موجود در شرایط بهره‌برداری معمول (CI در شکل ۵) تنها قادر بوده است که برای ۷ آبگیر ابتدایی کانال، آب کافی تحویل دهد. مقدار میانگین شاخص کفایت برای هفت آبگیر مذکور بین ۹۰ تا ۹۷ درصد به‌دست آمده و شاخص در طیف خوب ارزیابی می‌شود. هرچه از بالادست به سمت میانی کانال اصلی نزدیک شویم، از مطلوبیت شاخص کفایت کاسته شده به نحوی که آبگیرهای ۸ تا ۱۲ با مقدار میانگین شاخص کفایت ۸۰ تا ۹۰ درصد در طیف متوسط قرار می‌گیرند. به عبارت دیگر، آبگیرهای مذکور به‌طور متوسط بین ۱۰ تا ۲۰ درصد در طول دوره شبیه‌سازی (فروردین ماه ۱۳۹۴) آب کمتری دریافت نموده‌اند. از آبگیر ۱۷ تا انتهای کانال، وضعیت میانگین شاخص کفایت ضعیف ارزیابی شده به نحوی که برای آبگیرهای پایین‌دستی تا ۳۸ درصد کمبود آب تحویلی به‌دست آمده است. بنابراین، روش معمول بهره‌برداری، به سبب ماهیت کنترل بالادست بودن، قادر نیست در شرایط معمول توزیع مناسب آب از نظر شاخص کفایت تأمین نماید. با اعمال آب ورودی بهینه شده (OPT Inflow در شکل ۵، با به‌کارگیری ساختار هیدرواکونومیک) در سراب شبکه آبیاری رودشت، مقدار میانگین شاخص‌های کفایت (گراف آبی رنگ در نمودار کفایت شکل ۵) به‌طور نامحسوسی بهبود یافته است. شایان ذکر است که این بهبود وضعیت بهره‌برداری به‌هیچ وجه مربوط به سامانه بهره‌برداری نبوده و همان‌طور که در جدول ۳ نیز مشخص شده است، به‌دلیل افزایش حجم آب تخصیص یافته به شبکه است. مقادیر به‌دست آمده شاخص راندمان تحویل آب نیز مؤید همین مطلب است. این شاخص

بیانگر آن است که آیا آبگیرها آب مازادی تحویل گرفته‌اند یا خیر. مطابق شاخص‌های راندمان محاسبه شده در شرایط بهره‌برداری معمول (گراف سبز رنگ در نمودار راندمان شکل ۵) از آبگیر شماره ۶ تا انتهای کانال و در شرایط بهره‌برداری، با به‌کارگیری ساختار هیدرواکونومیک (گراف آبی رنگ در نمودار راندمان شکل ۵) از آبگیر شماره ۱۲ تا آبگیر شماره ۳۰، متوسط شاخص راندمان بیشتر از ۸۵٪ به‌دست آمده که مطابق دسته‌بندی ارائه شده در جدول ۲، راندمان توزیع و تحویل آب در کانال اصلی شبکه آبیاری رودشت «خوب» ارزیابی می‌شود. با توجه به اینکه این شاخص بیانگر تحویل آب مازاد به آبگیرهاست و نیز با توجه به آنکه مطابق نتایج شاخص کفایت، هیچکدام از آبگیرهای میانی و پایین‌دستی مقدار شاخص کفایت بیشتر از ۸۰٪ نداشته‌اند، لذا می‌توان نتیجه گرفت که سامانه بهره‌برداری فعلی (در کل زمان شبیه‌سازی بهره‌برداری کانال رودشت) نتوانسته آب مورد نیاز آبگیرها را به نحو قابل قبولی تأمین نماید.

با در نظر گرفتن مقادیر به‌دست آمده شاخص عدالت توزیع آب در بخش بالادست، میانی و پایین‌دست کانال آبیاری رودشت، عدم توانایی سامانه بهره‌برداری موجود شبکه آبیاری بیش از پیش مشخص خواهد شد. لذا جهت استفاده بهینه از آب تخصیص یافته به شبکه آبیاری در راستای تحقق هدف افزایش منافع اقتصادی در کل شبکه آبیاری، لازم و ضروری است که سامانه بهره‌برداری موجود ارتقا یابد. نتایج حاکی از آن است که عدم بهبود وضعیت سامانه بهره‌برداری کانال آبیاری نمی‌تواند فواید به‌کارگیری ساختار توسعه یافته هیدرواکونومیک را در هر کدام از شبکه‌ها و نهایتاً در کل حوضه زاینده‌رود به‌همراه داشته باشد. در این ارتباط، اقدامات مختلفی اعم از بهره‌گیری از روش‌های غیرسازه‌ای، سازه‌ای و نیز استفاده از سامانه‌های کنترل خودکار در بهبود بهره‌برداری از شبکه‌های آبیاری می‌تواند انجام گیرد. در روش اول، مدیریت بهره‌برداری کانال‌های آبیاری صرفاً با افزایش تعداد اپراتورها در سطح شبکه و ارتقای مدیریت تحویل و توزیع آب با استفاده از سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری (با استفاده از مدل‌های هیدرودینامیک و یا مدل ریاضی سامانه‌های کنترل خودکار به صورت آفلاین) انجام می‌گیرد. در روش‌های سازه‌ای، پس از انجام ارزیابی عملکرد سازه‌های تنظیم سطح آب و سازه‌های آبگیر موجود در شبکه آبیاری و اطمینان از عملکرد نامطلوب آن‌ها، اقدام به نوسازی سازه‌های مذکور می‌نمایند.

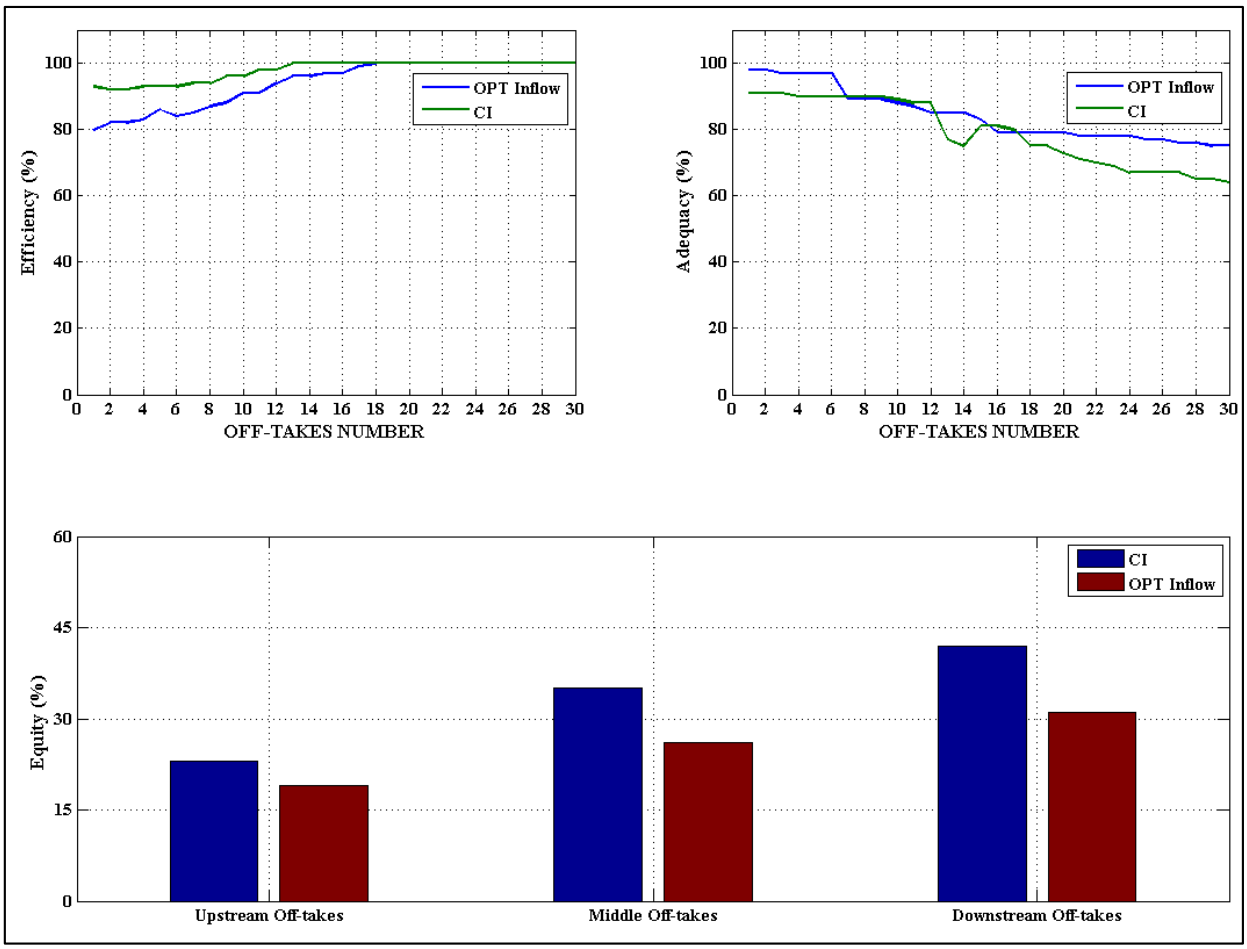

Fig. 5- Average calculated values of the adequacy, efficiency, and equity of water distribution within the Rudasht main irrigation canal

شکل ۵- مقادیر متوسط شاخص‌های کفایت، راندمان و عدالت توزیع آب در کانال اصلی شبکه آبیاری رودشت

احداث مخازن بین مسیری نیز نمونه دیگری از اقدامات سازه‌ای است که می‌تواند در جهت بهبود عملکرد شبکه‌ها مورد استفاده قرار گیرد. روش سوم به‌این‌گونه عمل می‌کند که بدون هیچ‌گونه تغییر در وضعیت فیزیکی کانال و سازه‌های آبگیر، صرفاً اقدام به موتوریزه نمودن سازه‌های تنظیم آب می‌نمایند. بر این اساس، هر گونه تنظیم سطح آب در کانال آبیاری بدون دخالت اپراتورها و با استفاده از سامانه‌های کنترل خودکار در کانال آبیاری صورت می‌پذیرد.

۴- خلاصه و جمع‌بندی

این مطالعه بر اساس دو هدف عمده پایه‌ریزی شد. هدف اول عبارت بود از توسعه ساختار هیدرواکونومیک در حوضه زاینده‌رود با هدف تخصیص بهینه آب سد زاینده‌رود به شش شبکه آبیاری پایاب سد در راستای حداکثرسازی منافع اقتصادی حاصل از فعالیت‌های کشاورزی در شبکه‌های آبیاری. در این راستا، مدل اقتصادی (با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی مثبت) اقدام به شبیه‌سازی فعالیت کشاورزی به تفکیک هر شبکه آبیاری نمود. با تلفیق مدل تخصیص آب (MODSIM) در حوضه زاینده‌رود با مدل اقتصادی، ساختار هیدرواکونومیک برای حوضه زاینده‌رود ساخته شده و بر اساس شرایط پایه (شامل اطلاعات کشاورزی در سال پایه ۹۴-۱۳۹۳) واسنجی شد. با همگرایی مدل‌های اقتصادی و تخصیص آب، میانگین ارزش اقتصادی آب برای هر شبکه بر اساس محصولات کشاورزی واقع در الگوی کشت آن شبکه محاسبه شد و به‌عنوان مبنای اولویت‌بندی تخصیص آب به شبکه لحاظ شد. هدف دوم، بررسی عملکرد بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری مذکور به‌عنوان زیرساخت پیاده‌سازی تخصیص بهینه آب توسط رویکرد هیدرواکونومیک، در داخل شبکه آبیاری می‌باشد. در واقع، این قسمت به بررسی این موضوع پرداخت که اگر تخصیص بهینه آب با به‌کارگیری ساختار هیدرواکونومیک محقق گردد، آب تخصیص یافته تا چه حد به‌طور مؤثر در شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین مدل بهره‌برداری کانال آبیاری با استفاده از مدل شبیه‌ساز هیدرودینامیک تهیه، واسنجی و مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج به‌کارگیری ساختار هیدرواکونومیک در برنامه‌ریزی منابع آب حوضه نشانگر این موضوع بود که روش کنونی تخصیص آب به شبکه‌های آبیاری واقع در حوضه زاینده‌رود صرفاً یک روش تجربی فاقد هدف‌گذاری اقتصادی بوده است. گواه این مطلب تغییر محسوس اولویت‌بندی تخصیص آب بین شش شبکه آبیاری بوده به نحوی‌که شبکه‌های آبیاری آبشار و رودشت که اولویت چهارم و پنجم تخصیص آب در شرایط معمول دارند، پس از به‌کارگیری ساختار هیدرواکونومیک در برنامه‌ریزی تخصیص آب، به‌ترتیب اولویت‌های اول و دوم را به‌دست آوردند. بنابراین، استفاده از راهبرد هیدرواکونومیک، افزایش منافع اقتصادی حاصل از فعالیت‌های کشاورزی در منطقه را به دنبال دارد. حال آنکه این هدف بسیار کاربردی و قابل قبول نیاز به زیرساخت مناسب داخل شبکه‌های آبیاری دارد تا به‌درستی محقق شود. زیرساخت لازم، به‌کارگیری یک روش مدرن بهره‌برداری داخل شبکه می‌باشد تا آب بهینه تخصیص یافته را با کمترین تلفات انتقال داده و به اندازه کافی و به صورت عادلانه در سطح شبکه پیاده نماید. نتایج مدل‌سازی بهره‌برداری کانال اصلی شبکه آبیاری رودشت شمالی حاکی از آن بود که حجم آب مازاد تخصیص یافته به این شبکه (که با هدف افزایش درآمد کشاورزان صورت گرفته) به نحو مناسبی در شبکه توزیع نشده، به‌طوری که بخش‌های میانی و پایین‌دست شبکه از دریافت آب ناکافی و توزیع ناعادلانه آب رنج می‌برند. بنابراین، لازم و ضروری است که ارتقا مدیریت و برنامه‌ریزی تخصیص منابع آب در سطح حوضه، با اقدامات نوسازی و بهسازی داخل شبکه‌های آبیاری هماهنگ گردد تا اهداف اقتصادی در نظر گرفته شده به‌خوبی محقق گردد.

پی‌نوشت‌ها

1- Positive Mathematical Programming (PMP)

۵- مراجع

Abbasi F, Sohrab F, Abbasi N (2016) Evaluation of irrigation efficiencies in Iran. Irrigation and Drainage Structures Engineering Research 17(67):113-120 (In Persian)

Beare SC, Bell R, Fisher BS (1998) Determining the value of water: The role of risk, infrastructure constraints, and ownership. American Journal of Agricultural Economics 80(5):916-940

Gallego-Ayala J, Gómez-Limón JA (2011) Future scenarios and their implications for irrigated agriculture in the Spanish region of Castilla y León. New Medit 10(1):4-16

Hashemy Shahdany SM, Hassani Y, Hormozi M (2017a) Optimal water distribution and delivery within the main irrigation canal regarding to economic perspective in water shortages conditions. Iran Water Resources Research 13(3):33-42 (In Persian)

Spanish high-nature value cereal-steppe farming systems. Agricultural Systems 94(2):247-260

Peralta RC, Hegazy MA, Musharrafieh GR (1994) Preventing pesticide contamination of groundwater while maximizing irrigated crop yield. Water Resources Research 30(11):3183-3193

Rogers P, Hurst C, Harshadeep N (1993) Water resources planning in a strategic context: Linking the water sector to the national economy. Water Resources Research 29(7):1895-1906

Shahverdi K, Monem M (2017) Design construction and test of PID control system upstream of sliding gate. In Proc. of 9th Iranian National Hydraulics Conference, 20-23 April, Tarbiat Modares University, pp. 345-352 (In Persian)

Varela-Ortega C, Blanco-Gutiérrez I, Swartz CH, Downing TE (2011) Balancing groundwater conservation and rural livelihoods under water and climate uncertainties: An integrated hydro-economic modeling framework. Global Environmental Change 21(2):604-619

Howitt RE, Medellín-Azuara J, MacEwan D, Lund JR (2012) Calibrating disaggregate economic models of agricultural production and water management. Environmental Modelling and Software 38(4):244-258

Masah Bouani A (2002) Introduce mathematical model of Nyrpic gates. MSc. Thesis, School of Agricultural Engineering, Tarbiat Modares University (In Persian)

Medellín-Azuara, J, Harou JJ, Howitt RE (2010) Estimating economic value of agricultural water under changing conditions and the effects of spatial aggregation. Science of the Total Environment 408(23):5639-5648

Molden DJ, Gates TK (1990) Performance measures for evaluation of irrigation water delivery systems. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 116(6):804-822

Noel JE, Howitt RE (1982) Conjunctive multibasin management: An optimal control approach. Water Resources Research 18(4):753-763

Oñate JJ, Atance I, Bardají I, Llusia D (2007) Modelling the effects of alternative CAP policies for the