تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی/جلد ۲۱/ شماره ۸۰/ پاییز ۱۳۹۹/ ص ۸۰-۶۱

مقاله پژوهشی

توسعهٔ مدل پیوند آب، انرژی و غذا در سطح شبکه‌های آبیاری بر اساس شاخص‌های کفایت و پایداری آب (مطالعهٔ موردی شبکهٔ آبیاری قزوین)

الهام قربانی[۱]، محمد جواد منعم[۲*] و مهسا واعظ تهرانی[۳]

۱ و ۲- به‌ترتیب: دانش آموخته کارشناسی ارشد، و استاد گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۳- رئیس گروه بهره‌برداری آب، معاونت راهبری و نظارت بر بهره‌برداری، شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور، تهران، ایران
تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۳/۱۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۶/۱۷

چکیده

آب، غذا و انرژی اصلی‌ترین منابع مورد نیاز برای توسعهٔ جوامع هستند. دیدگاه نکسوس برمدیریت به‌هم پیوستهٔ این منابع تأکید دارد. دیدگاه نکسوس با تمرکز بر سه منبع در سطح کلان حوضه به کار گرفته شده است، اما در شبکه‌های آبیاری به‌عنوان محدوده ای که ضمن مصرف انرژی، بیشترین مصرف آب و تولید غذا را دارد کمتر به‌آن توجه شده است. روابط آب، انرژی و غذا در سطح شبکه‌های آبیاری پیچیده است. در این تحقیق از رویکرد دینامیک سیستم‌ها برای بررسی ساختارهای موجود بین این منابع استفاده و روابط علت و معلولی بین آنها به‌صورت مدل مفهومی ارائه شده است. با توسعهٔ مدل کمی، مدل نکسوس برای شبکهٔ آبیاری قزوین با هدف ارتقاء بهره‌وری و مطلوبیت که عبارت است از ترکیبی از شاخص‌های کفایت و پایداری تحویل آب، تدوین شد. سناریوهایی در بخش آب، غذا و انرژی شامل، کاهش منابع آب سطحی، افزایش سطح زیر کشت، و افزایش مصرف انرژی ارزیابی شد. افزایش مصرف انرژی به افزایش تولید محصول انجامید اما اثر مکانیزم‌های کنترلی، با تأخیر ۴ ساله مشاهده شد. مطلوبیت آب نیز به میزان ۷ درصد بیشتر شد. افزایش سطح زیر کشت، تأثیر زیادی بر افزایش تولید محصول و مطلوبیت نداشته‌است. کاهش منابع آب سطحی بیشترین تأثیر را در کاهش تولید محصول و مطلوبیت، نسبت به ادامهٔ وضع موجود، داشته‌است. حداکثرکاهش تولید محصول۲۳ درصد و مطلوبیت ۳۲ درصد بوده است. با توجه به تأثیر قابل توجه محدودیت منابع آب، توصیه می‌شود در رویکرد نکسوس سناریوهای مرتبط با مدیریت آب از اولویت بالاتری برخوردار باشند.

واژه‌های کلیدی

سیستم دینامیک، شبکهٔ آبیاری قزوین، نکسوس

مقدمه

گسترش روزافزون جمعیت، محدودیت منابع آب، تقاضای رو به افزایش تأمین غذا و انرژی و افزایش رقابت‌های بین بخشی در مصرف آب شهری، صنایع، محیط زیست، و کشاورزی، توجه بیش از پیش به بهبود مدیریت آب، غذا، و انرژی را ایجاب می‌کند. میزان مصرف آب در بخش کشاورزی حدود ۹۱ درصد کل منابع آب موجود در کشور است؛ از این رو اهمیت ارتقاء سطح کارایی و بهره‌وری شبکه‌های آبیاری بیشتر نمایان می‌شود. به‌دلیل اهمیت پیوند آب، انرژی و غذا (نکسوس)[۱] اتخاذ سیاست‌های جامع در خصوص مدیریت و تأمین امنیت این منابع و توسعهٔ پایدار احساس می‌شود (Chang *et al.*, 2016). بهبود عملکرد شبکه‌های آبیاری برای تولید حداکثر مواد غذایی از واحد حجم آب با در نظر گرفتن انرژی مصرفی می‌تواند در تأمین این اهداف اقدام مؤثری باشد.

* نگارندهٔ مسئول: Email:monem_mj@modare.ac.ir

1- NEXUS

با توجه به آنکه در بحث پیوند آب، غذا و انرژی در شبکه‌های آبیاری تعامل بین اجزای مختلف و رفتار درازمدت آنها اهمیت شایانی دارد، باید با تعمق در عملکرد شبکه‌ها در طول زمان، روابط بین اجزای آب، غذا و انرژی را بهتر شناسایی کرد. با استفاده از رویکرد دینامیک سیستم‌ها می‌توان تصمیمات جامع‌تری در خصوص مدیریت شبکه‌ها اتخاذ کرد تا از امنیت منابع موجود برای توسعه‌ای پایدار اطمینان حاصل شود. رویکرد دینامیک سیستم‌ها حول دغدغهٔ اصلی شبکه شکل می گیرد که افزایش بهره‌وری و مطلوبیت[1] است. مطلوبیت شبکهٔ آبیاری عبارت است از ترکیبی ازشاخص های عملکردی (کفایت[2] و پایداری[3])، که هدف مدیریت، ارتقا و بهبود آنهاست. محققان زیادی در سال‌های گذشته در استفاده از روش دینامیک سیستم‌ها در خصوص مدیریت بهتر هر یک از این منابع به‌صورت تک‌بخشی به‌پژوهش‌هایی دست زده‌اند (Hatam *et al*., 1391; EL- Gafy *et al*., 2016; Smajgl *et al*., 2016; Artioli *et al*., 2017; Hosseinzade *et al*., 2017; Xu *et al*., 2017; Monem *et al*., 1399). واعظ تهرانی و همکاران (Vaez Tehrani *et al*., 2013) تحقیقی کردند مبتنی بر بهسازی شبکهٔ آبیاری باهدف ارتقای مطلوبیت با رویکرد پویایی سیستم‌ها و با تعیین متغیرهای مرتبط و شناسایی ساختار حاکم، رویکرد سیستم دینامیک را در بهسازی شبکه‌های آبیاری توسعه دادند. این محققان این رویکرد را برای تحلیل رفتار واقعی سیستم و پیش‌بینی بلندمدت آن مفید دانستند و اظهار داشتند نتیجهٔ تصمیم‌گیری بر اساس آن، اصولی‌تر و مدیریت سیستم مؤثرتر خواهد بود. شعبانی و همکاران (Shabani *et al*., 2014) در بهسازی شبکهٔ آبیاری فومنات با تمرکز بر ارتقای شاخص‌های کفایت و عدالت، برای افزایش مطلوبیت از رویکرد سیستمی بهره بردند و با تشریح ساختارهای حاکم در شبکه، مکانیزم‌های اقتصادی و تقاضای آب، مدل پویای به‌سازی شبکه را شبیه‌سازی کردند.

به‌دلیل جدید بودن موضوع نکسوس، بیشتر تحقیقات در زمینه پیوند آب، انرژی، و غذا در محدودهٔ تحقیقات منطقه‌ای، و حوضه‌ای است و در سطح شبکه‌های آبیاری به‌عنوان بخشی از حوضه که بزرگ‌ترین مصرف‌کنندهٔ آب و تولیدکنندهٔ غذاست تحقیقات محدودی در دسترس است. فائو مفهوم همبست آب، غذا وانرژی (نکسوس) و روش ارزیابی آن را در سطح کلان ارائه کرد، اما بر تمرکز انحصاری بر مهمترین متغیرهای مرتبط با موضوع تاکید کرده است. فائو توصیه می‌کند عمق و جزییات ورود به جنبه های مختلف نکسوس، و نوع و تعداد شاخص های مورد استفاده، متناسب با نیاز کاربر انتخاب شود. فائو فهرستی از شاخص های مرتبط با نکسوس در سازمان های بین المللی را ارائه کرده و رویکرد پیشنهادی را به عنوان شروعی معرفی کرده است که باید به‌تدریج تکمیل شود (FAO publication No. 58, 2014). راور و همکاران (Ravar *et al*., 2020) با استفاده از رویکرد پویایی سیستم‌ها به بررسی روابط بین آب- غذا، و آب-انرژی پرداختند و این منابع را به‌صورت توام و تحت سناریوهای کلی در سطح حوضه‌های آبریز بررسی و ارزیابی کردند.

کمیسیون بین المللی آبیاری و زهکشی[4] (ICID) در کنگره سال ۲۰۱۷ در مکزیک، موضوع پیوندآب، انرژی و غذا (نکسوس) را به عنوان یکی از محور های مورد بحث مطرح کرد. در این کنگره، چند مقاله در مورد نکسوس ارائه شد. حسن و همکاران (Hasan *et al*., 2017) موضوع انرژی مصرفی برای استخراج آب زیر زمینی در ارتباط با امنیت غذایی و تغییر اقلیم در چارچوب نکسوس را در پنجاب پاکستان بررسی کردند. در این تحقیق اعلام شد که با توجه به تغییر اقلیم و افزایش نیاز به آب زیرزمینی، سطح آب چاه ها افت کرده و هزینهٔ انرژی افزایش یافته است. محققان پیشنهاد کرده اند که تبعات تغییرات ایجاد شده، در چارچوب نکسوس بررسی شوند. در جمع بندی دیدگاه‌های این کنگره اعلام شد اگرچه رویکرد نکسوس با

1- Utility
2- Adequacy
3- Stability
4- International Commission on Irrigation and Drainage

سرعت زیادی در حال توسعه است، اما کاربرد های آن بسیار محدود است، و باید به فوریت نسبت به افزایش آگاهی ها و توسعه ظرفیت ها میان ذی نفعان آب اقدام شود(Pandya *et. al.*, 2018). در کنگره سال ۲۰۱۸ کمیسیون بین المللی آبیاری و زهکشی در ساسکاتون کانادا نیز به‌موضوع نکسوس توجه شد و اهمیت و جایگاه رویکرد نکسوس و ضرورت کاربرد آن در برنامه ریزی های توسعه آبیاری مطرح شد (Mabhaudhi *et al.*, 2018). کاربرد رویکرد نکسوس از نظر رابطهٔ آب و انرژی در تحقیقات فرناندز و همکاران (Fernandez G. *et. al.*, 2018) در اسپانیا به‌کار گرفته شد. در اسپانیا با توسعهٔ سیستم های تحت فشار، آبیاری کارآمدتری برای مزارع به‌کار گرفته شده است. اما مشاهده شد اگرچه مصرف آب آبیاری حدود ۲۳ درصد کاهش یافته، ولی هزینه های مربوط به آب ۵۲ درصد افزایش یافته است. در حال حاضر، علاوه بر تقاضای انرژی بیشتر، هزینه های بهره برداری و نگهداری سیستم‌ها و افزایش تعرفه های برق موجب افزایش هزینه ها شده است. این محققان با توجه به نگرانی‌های موجود در مورد بهینه سازی مصرف آب و انرژی، نمونه ای از سیستم های آبیاری هوشمند با مصرف انرژی خورشیدی را برای آبیاری باغ‌های زیتون پیشنهاد کردند که نشان می‌دهد این منبع می‌تواند منبعی جایگزین و قابل اعتماد باشد. منعم و همکاران (Monem *et al.*, 2020) رویکرد نکسوس را با استفاده از مدل برنامه ریزی منابع آب (WEAP) در سطح شبکه های آبیاری زاینده رود به‌کار بردند و سناریوهای مختلف برای مدیریت آب، انرژی و غذا را آزمودند. این مجققان نشان دادند که در مقایسه با کاربرد شاخص های منفرد، ترکیب شاخص های نکسوس، اولویت های سناریو ها و شبکه ها را در بهبود عملکرد تغییر می‌دهد.

با بررسی این سوابق می‌توان گفت که به‌رغم کارهای محدود در مورد نکسوس در شبکه های آبیاری، همچنان ضرورت کاربرد نکسوس در شبکه ها، و ظرفیت سازی و افزایش آگاهی در این خصوص وارائهٔ تعاریف همسان مورد تاکید محققان و سازمان های بین المللی قرار گرفته است. به‌طور مشخص اثر ترکیبی سناریو های مختلف مدیریتی در هر سه بخش آب، غذا، و انرژی به‌صورت یکپارچه با نظر به تعامل هر سه منبع بررسی نشده است. در این تحقیق با توجه به اهمیت پیوند آب، غذا و انرژی در سطح شبکه‌های آبیاری، مدل نکسوس برای شبکه های آبیاری تهیه شد. برای مدیریت همه‌جانبهٔ منابع آب، غذا ، و انرژی، عوامل مؤثر بر بهبود بهره‌وری و مطلوبیت آب، تعامل، اثرها و وابستگی بین این عوامل در بلندمدت بررسی شده است. الگوهای حاکم بر رفتار شبکه‌های آبیاری از دیدگاه آب، غذا و انرژی شناسایی و مکانیزم‌های موجود در آن با استفاده از رویکرد سیستم دینامیک به صورت مدل مفهومی تلفیق شده است. با مدل‌سازی کمی پیوند آب، انرژی و غذا در سطح شبکه آبیاری قزوین، مطلوبیت آب در شبکه تحت تأثیر سناریوهای مختلف ارزیابی شده است.

مواد و روش‌ها

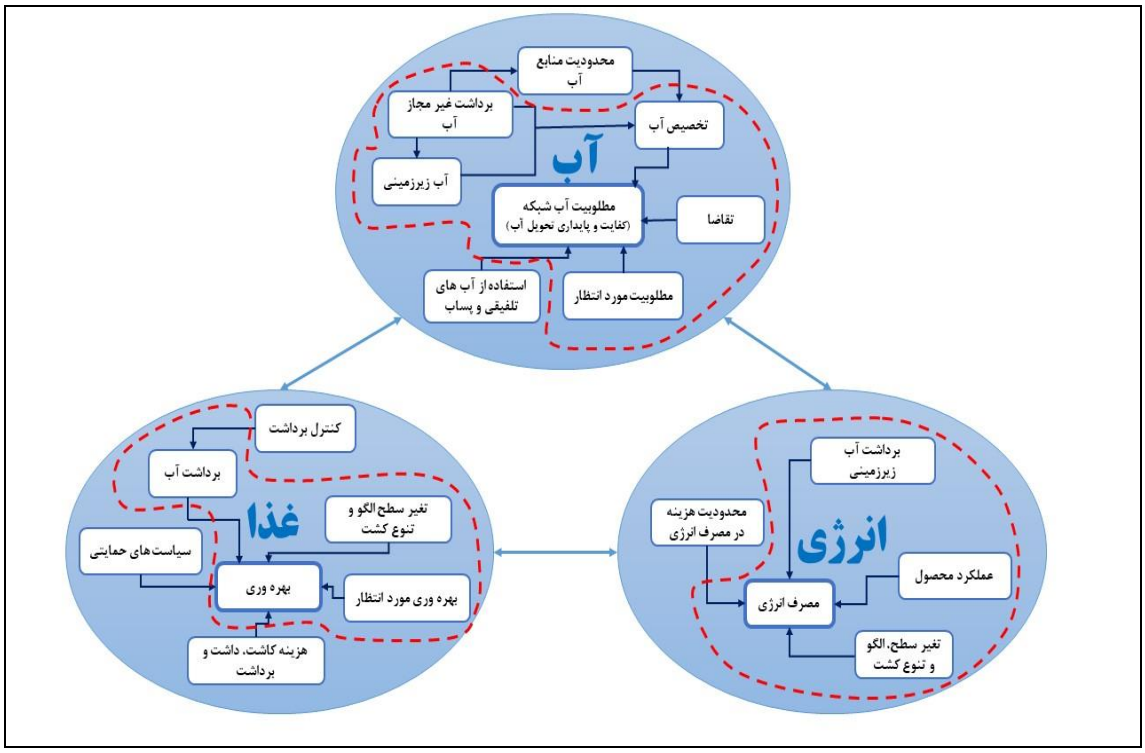
رویکرد دینامیک سیستم‌ها در سطح شبکه‌های آبیاری

رویکرد دینامیک سیستم‌ها با در نظر گرفتن تعاملات و بازخوردهای درون سیستم آب، انرژی و غذا درک بهتری از وضعیت موجود این اجزا را در شبکه‌های آبیاری ارائه می‌دهد. با رویکرد دینامیک سیستم ها، اثرهای این اجزا در بلندمدت ارزیابی می‌شود و توسعهٔ سیاست‌های پایدارتر در مدیریت شبکه‌های آبیاری صورت می‌پذیرد. با استفاده از این روش، در ابتدا با تعریف مسئله و تعیین مرز سیستم و فرضیه‌های دینامیکی، فرآیندهای بازخوردی به‌صورت حلقه‌های علت و معلولی بیان می‌شود. نمودار علت و معلولی[1] (CLD) با تاکید بر ساختار بازخوردی سیستم، ارتباط بین متغیرها را توصیف می‌کند. این نمودار برای توضیح فرضیه‌های علل پویایی سیستم، نمایش مدل های

1- Casual Loop Diagram

ذهنی ذی مدخلان، و تبادل اطلاعات در مورد بازخوردهای مهمی که عامل مشکل هستند ارائه می شود و ترکیب آنها مدل مفهومی سیستم را شکل می‌دهد. نمودار حالت و جریان با اقتباس از نمودارهای علت و معلولی، روابط کیفی را با کمک معادلات ریاضی به مقادیر کمی تبدیل می‌کنند، که مدل کمی سیستم را برای شبیه سازی و آزمون سناریو ها شکل می‌دهند.

مرز سیستم شامل عواملی خواهد بود که در معرفی مدل دخیل‌اند و روابطی تأثیرگذار و تأثیرپذیر از متغیرهای مرجع در سه بخش آب، غذا و انرژی دارند. در این تحقیق، متغیرهای بهره‌وری، مطلوبیت آب در شبکه و مصرف انرژی متغیرهای مرجع سیستم در نظر گرفته شده‌اند. متغیرهای فرعی سیستم از جمله آب زیرزمینی، عملکرد محصول، تغیر الگو و تنوع کشت و ... بر رفتار متغیرهای مرجع مؤثرند. نحوهٔ تعامل متغیرهای فرعی با متغیرهای مرجع در فرضیه‌های دینامیکی و معرفی الگوهای شناسایی شده منعکس می‌شود و نمودار مرز مدل را شکل می‌دهد. در این تحقیق، مرز فیزیکی سیستم از محل تأمین آب شبکه تا تحویل آب به کشاورزان و سامانهٔ مزرعه در داخل شبکه‌های آبیاری در نظر گرفته شده است. با ورود اطلاعات متغیرها به‌صورت سری زمانی، توسعهٔ مدل کمی، و صحت سنجی آن، سیاست‌های موردنظر در پیوند آب، انرژی و غذا در سطح شبکهٔ آبیاری ارزیابی خواهدشد. مطابق شکل ۱، در این تحقیق پس از تعیین مهمترین متغیرهای مؤثر در شبکهٔ آبیاری و مرز سیستم، مدل مفهومی کلی از رفتار پیوند آب، انرژی و غذا در شبکه‌های آبیاری تهیه شد.



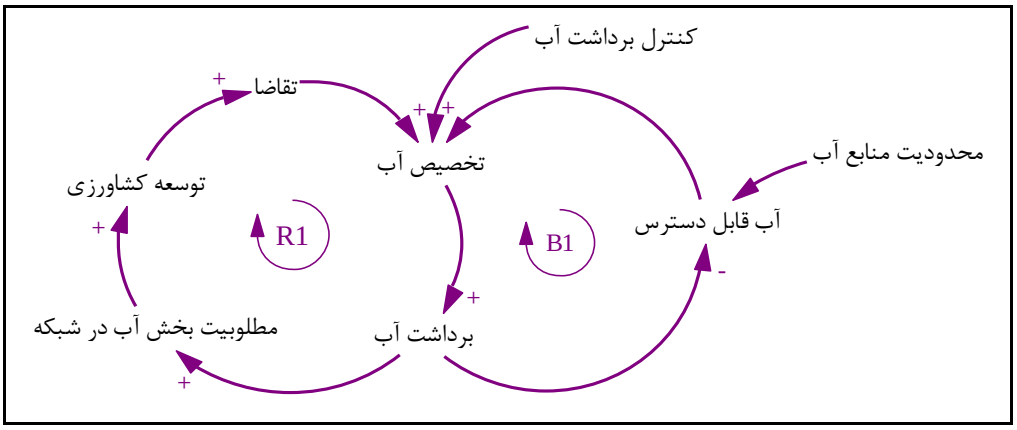
شکل ۱- مدل مفهومی حاکم بر شبکه‌های آبیاری از دیدگاه پیوند آب، انرژی و غذا

Fig. 1-Conceptual Model of Water, Energy, and Food Nexus for Irrigation Networks

در این تحقیق پس از بررسی‌ها، چهار ساختار فعال در سطح شبکه‌های آبیاری شناسایی شد. این ساختارها عبارت‌اند از: ساختار محدودیت رشد[1]، ساختار جابه‌جایی مشکل[2]، ساختار راه‌حل‌های منجر به شکست[3] و ساختار

1- Limits to Growth
2- Shifting the Burden
3- Fixes that Fail

فرسایش اهداف[1] (Braun, 2002). برای مثال، در شکل ۲ نمونه‌ای از ساختار محدودیت رشد به‌صورت محدودیت منابع آب در شبکه‌های آبیاری نشان داده‌شده است. در این ساختار در حلقهٔ تقویتی با بهبود مدیریت تخصیص و تحویل آب، بهره‌وری مصرف آب در شبکه افزایش می‌یابد و موجب افزایش تقاضای آب می شود. اما در مقابل محدودیت منابع آب، درحلقه متعادل کننده، رفتار سیستم را کنترل و از رشد حلقه‌های تقویتی جلوگیری می‌کند.



شکل ۲- ساختار محدودیت رشد در شبکه‌های آبیاری از دیدگاه پیوند آب، انرژی و غذا

Fig. 2- Limit to Growth Architype of Irrigation Networks from Water, Energy, and food Nexus Point of View

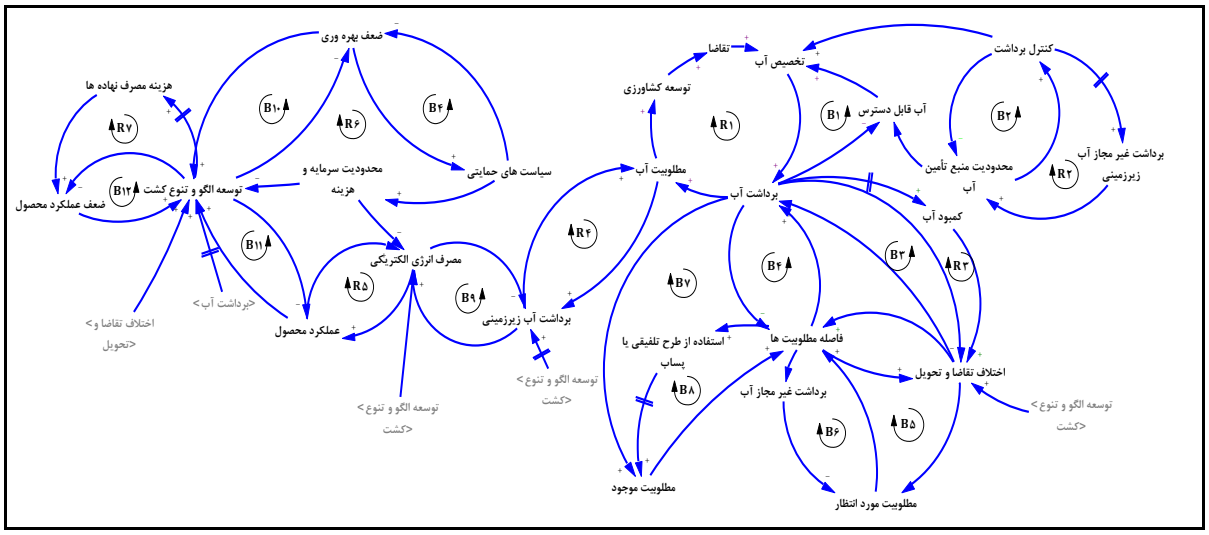
مکانیزم‌های فعال در شبکه‌های آبیاری

با توجه به شناسایی ساختارهای موجود در شبکه-های آبیاری، مکانیزم‌های فعال در پیوند آب، انرژی و غذا مطابق شکل ۳ به‌صورت حلقه‌های علت و معلولی ارائه می‌شوند.

از آنجاکه نقش آب در رویکرد نکسوس از لحاظ کشاورزی و تولید مواد غذایی بسیار بااهمیت است و مدیریت صحیح این منبع حیاتی برای توسعه و تغذیهٔ جمعیت در حال رشد الزامی است، افزایش تخصیص و تحویل آب از منابع آب سطحی و زیرزمینی موجب کاهش اختلاف بین تقاضا و تحویل آب و بهبود مطلوبیت آب در شبکه می‌شود (حلقهٔ R1، B5، B4 و B3). اگرچه با کنترل برداشت آب توسط مدیران می‌توان در کوتاه مدت کمبود آب را کاهش داد، با این حال برداشت غیر مجاز آب توسط کشاورزان در بلند مدت موجب افزایش کمبود آب و محدودیت بیشتر آن می‌شود، به‌طوری که کنترل برداشت آب، ساختاری منجر به شکست خواهد داشت (حلقهٔ R2 و B2). از طرفی به علت توسعهٔ کشاورزی و برداشت‌های غیرمجاز آب، کمبود آب در سطح شبکه بیشتر می‌شود و بر مطلوبیت آب شبکه اثر منفی می‌گذارد (حلقهٔ R1و B7،B6،B1،R3). همچنین مشاهده می‌شود در بلندمدت همراه با توسعه کشاورزی، برداشت آب زیرزمینی و مصرف انرژی افزایش می‌یابد (حلقهٔ B9). افزایش مصرف انرژی الکتریکی موجب افزایش مصرف آب در سطح شبکه می‌شود که بهبود مطلوبیت آب شامل کفایت و پایداری تحویل را به دنبال دارد (حلقهٔ R4). چنان‌چه محدودیت سرمایه و قیمت انرژی و محدودیت منبع آب وجود نداشته باشد، افزایش مصرف انرژی باعث بهبود مطلوبیت آب و توسعه کشاورزی و در نتیجه افزایش تولید محصول می‌شود، اما همواره شبکه‌ها با این محدودیت‌ها مواجه هستند و حلقه های متعادل کننده فعال می شوند (حلقهٔ R5 و B11). در این تحقیق امکان تغیر الگو و تنوع کشت به سمت گیاهان با مصرف آب بیشتر برای رفع مشکل بهره‌وری و افزایش تولید محصول و درآمد نیز در نظر

1- Eroding Goals

گرفته شده‌است. چنانچه محدودیت منبع آب، خاک، و سرمایه وجود نداشته باشد، و هزینه مصرف نهاده‌ها، عامل کنترل‌کننده توسعه کشاورزی نباشد، تغییر الگو و تنوع کشت، راه‌حلی برای رفع مشکل ضعف بهره‌وری و افزایش تولید محصول و درآمد محسوب می‌شود، البته وجود عوامل محدود کننده در عمل، حلقه های متعادل کننده را ایجاد خواهد کرد (حلقه R6،R7، B11،B12 و B10). گفتنی است که استفاده از بازچرخانی آب یا پساب نیز چنان‌چه با مدیریت مناسب بهره‌برداران اعمال شود می‌تواند در جهت بهبود مطلوبیت آب در سطح شبکه‌های آبیاری مؤثر باشد وگرنه با افزایش برداشت‌های غیر مجاز وکمبود منابع آب در بلند مدت همراه خواهد شد (حلقه B8 و B7).



شکل ۳- ساختار علت و معلولی پیوند آب، انرژی و غذا در سطح شبکه‌های آبیاری

Fig. 3-Casual Structure of Water, Energy, and Food Nexues in Irrigation Networks

شبکهٔ آبیاری زهکشی قزوین

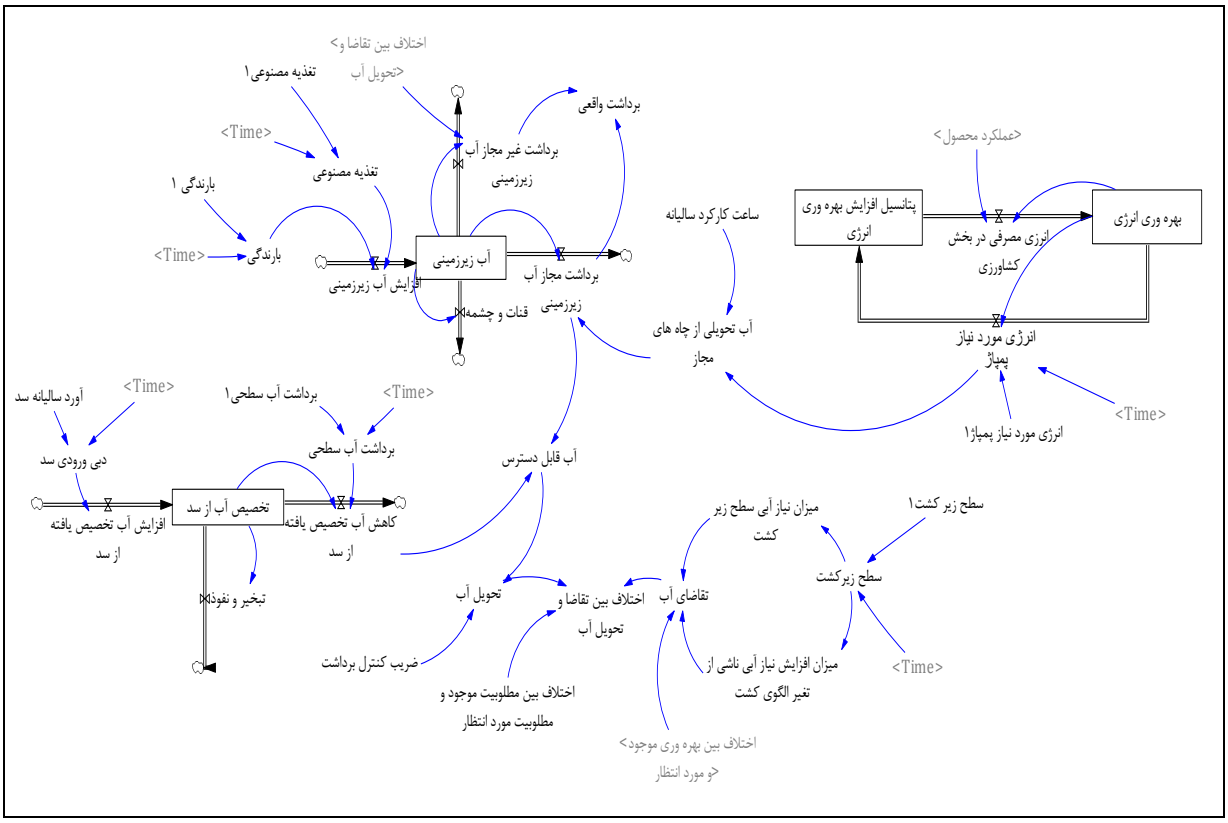
به دلیل دسترسی به اطلاعات شبکهٔ آبیاری قزوین این شبکه برای مطالعهٔ موردی انتخاب شد. شبکهٔ آبیاری دشت قزوین با وسعتی معادل ۸۰۰۰۰ هکتار به‌صورت نواری است که از محدودهٔ زیاران شروع و به اراضی کهک تاکستان منتهی می‌شود. در الگوی کشت منطقه حدود ۴۶درصد به گندم و جو اختصاص دارد. آب این شبکه در حال حاضر از سد مخزنی طالقان و چاه‌ها تأمین می‌شود. آب در این شبکه با روش توافقی[1] توزیع می‌شود، که در مورد مدت، مقدار و زمان تحویل آب به مصرف‌کننده، توافق بین مسئولان و مصرف‌کنندگان صورت می‌گیرد. شبکهٔ آبیاری قزوین با مشکلات عدیده‌ای مانند محدودیت منابع آب، رعایت نشدن الگوی کشت و محدودیت آگاهی مدیران در برخورد با کشاورزان و درنتیجه ایجاد بی‌اعتمادی مواجه است. اطلاعات مربوط به میزان آب سطحی ورودی به شبکه، آب تخصیصی به تغذیه آب زیر زمینی، آب تحویلی به کشاورزان، حجم بارش و سهم آن در تغذیه آب زیر زمینی، مصرف برق چاه ها، از سازمان آب منطقه ای استان قزوین دریافت شد. اطلاعات مربوط به تعداد، مشخصات، عمق آب و پروانه چاه ها، برداشت مجاز و غیر مجاز از چاه ها، مشخصات پمپ‌ها و ساعات کارکرد چاه ها از شرکت مدیریت منابع آب ایران دریافت شد. اطلاعات مربوط به میزان سطح زیر کشت، الگوی کشت، عملکرد محصول، مصرف کود و بذر و سم، هزینهٔ تولید محصول، میزان یارانهٔ پرداختی نهاده های کشاورزی، و بازده کاربرد آب از سازمان جهاد کشاورزی استان قزوین

1- Arranged method

دریافت شد. همچنین، از آمار منتشر شده در آمارنامه کشاورزی و سالنامه های آماری آب کشور در سال های مختلف نیز استفاده شده است. اطلاعات دریافتی به تفکیک ۱۱ سال از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ در مدل مورد استفاده و تحلیل قرار گرفت.

توسعهٔ مدل شبیه‌سازی

پس از توسعهٔ ساختار مفهومی مدل، با تعریف روابط ریاضی بین متغیرها و با استفاده از نرم‌افزار vensim به کمی‌سازی مدل پیوند آب، انرژی و غذا در شبکهٔ آبیاری قزوین پرداخته شد. این نرم‌افزار با شبیه‌سازی مبتنی بر پویایی سیستم‌ها امکان آزمون گزینه‌های مختلف را فراهم می‌کند. در ادامه، روابط ریاضی بین متغیرها به‌صورت چهار زیرسیستم تقاضا و تحویل آب، مطلوبیت آب، تولید محصول، و بهره‌وری تولید محصول ارائه شده است. در این روابط متغیرهایی چون آب تحویلی از چاه‌ها، آب سطحی برداشتی از سد، هزینهٔ مصرف نهاده‌ها و . بر اساس آمار موجود و به‌صورت سری زمانی ده ساله در نظر گرفته شده‌اند. برای بررسی امکان مقایسهٔ نتایج، متغیرهای مرجع و فرعی با توجه به مقادیر حداقل و حداکثر آنها، نرمال و به صورت بی بعد بیان شده اند.



شکل ۴- مدل زیرسیستم تقاضا و تحویل آب در شبکهٔ آبیاری قزوین

Fig. 4- Model of Water Demand and Supply Subsystem in Ghazvin Irrigation Network

مطابق شکل ۴ افزایش آب زیرزمینی (GW_I) تابعی از تغذیهٔ مصنوعی آب زیرزمینی (V_{rech})، و بخشی از بارندگی است که موجب تغذیهٔ سفره خواهدشد (PRa) و مطابق رابطهٔ ۱ محاسبه می‌شود. عوامل این رابطه برحسب میلیون مترمکعب است.

$$GW_I = PRa + V_{rech} \quad (۱)$$

کاهش آب زیرزمینی (GW_D) نیز از رابطهٔ ۲ بر اساس مجموع دو پارامتر برداشت واقعی چاه (مجاز و غیرمجاز) از آب زیرزمینی (W_R) و آب چشمه و قنات (W_F) محاسبه می‌شود این عوامل برحسب میلیون مترمکعب است.

$$GW_D = W_R + W_F \qquad (۲)$$

مقدار آب زیرزمینی در سال‌های مختلفGW از مجموع آب زیرزمینی در سال مبنا (سال ۱۳۸۵) GW_1 و مجموع اختلاف افزایش و کاهش آن در سال‌های متوالی، مطابق رابطهٔ ۳ به دست می‌آید.

$$GW = GW_1 + \sum_{t=85}^{95} (GW_I - GW_D)_t \qquad (۳)$$

میزان آب تحویلی به کشاورزان از مجموع آب تحویلی از چاه‌ها و آب سطحی برداشتی از سد و با اعمال ضریب کنترل برداشت طبق رابطهٔ ۴ محاسبه می‌گردد. ضریب کنترل برداشت ناشی از تفاوت آب تحویلی به کشاورزان و آب قابل دسترس شبکه است که به‌دلیل تلفات آب و اختصاص آب به سایر مصارف، وجود دارد. مقدار آن از سازمان آب منطقه ای دریافت شد.

$$W_S = (GW_a + W_{sd}) * C_{WC} \qquad (۴)$$

که در آن،

GW_a= آب تحویلی از چاه‌ها (میلیون مترمکعب)؛ W_{sd}= آب سطحی برداشتی از سد (میلیون مترمکعب)؛ و C_{WC}= ضریب کنترل برداشت است.

همان‌طور که در مدل مشاهده می‌شود، آب مورد نیاز شبکه در هرسال(V_{req})، عبارت است از مجموع نیاز آب سال قبل (PV_{req}) به اضافه افزایش نیاز ناشی از افزایش سطح زیر کشت (V_{req1}) و تغییر تقاضای آب ناشی از تغییر الگوی کشت (V_{req2}). البته اختلاف میان بهره‌وری موجود تا بهره‌وری مورد انتظار (D_p)، نیز برافزایش تقاضا موثراست. رابطهٔ ۵ بر اساس دو پارامتر افزایش سطح زیر کشت (DA) برحسب هکتار و میزان نیاز آبی (میلیون مترمکعب) در هر هکتار (W_{areq}) به دست می‌آید. رابطهٔ ۶ نیز حاصل‌ضرب دو پارامتر کل سطح زیر کشت (A) و تفاوت آب موردنیاز الگوی کشت مصوب و الگوی کشت واقعی (C_{pdef}) است.

$$V_{req_1} = DA * Wa_{req} \qquad (۵)$$

$$V_{req_2} = A * Cp_{def} \qquad (۶)$$

میزان تقاضای آب مطابق رابطهٔ ۷ محاسبه می‌شود. در این رابطه، D_p نشان‌دهندهٔ فاصله تا بهره‌وری مورد انتظار است که بر اساس رابطهٔ ۲۲ محاسبه و در ادامه توضیح داده می‌شود.

$$V_{req} = PV_{req} + (V_{req_1} + V_{req_2}) * D_p \qquad (۷)$$

با استفاده از رابطهٔ ۷ می‌توان اختلاف بین تقاضا و تحویل آب در شبکه را بر اساس رابطهٔ ۸ محاسبه کرد. D_u، فاصله تا مطلوبیت مورد انتظار است که در ادامه و در بخش زیرسیستم مطلوبیت (رابطهٔ ۱۳) تشریح می‌شود.

$$D_W = (W_s - V_{req}) * D_u \qquad (۸)$$

بهره‌وری انرژی(EP، کیلوگرم به ازای هر کیلووات ساعت)، با توجه به انرژی مصرفی(E) و تولید محصول (Y، کیلوگرم) طبق رابطهٔ ۹ محاسبه می‌گردد (Kitani et al., 1999).

$$EP = \frac{Y}{E} \qquad (۹)$$

مصرف انرژی با استفاده از رابطهٔ ۱۰ محاسبه می‌شود.

$$P = \frac{E}{T} \qquad (۱۰)$$

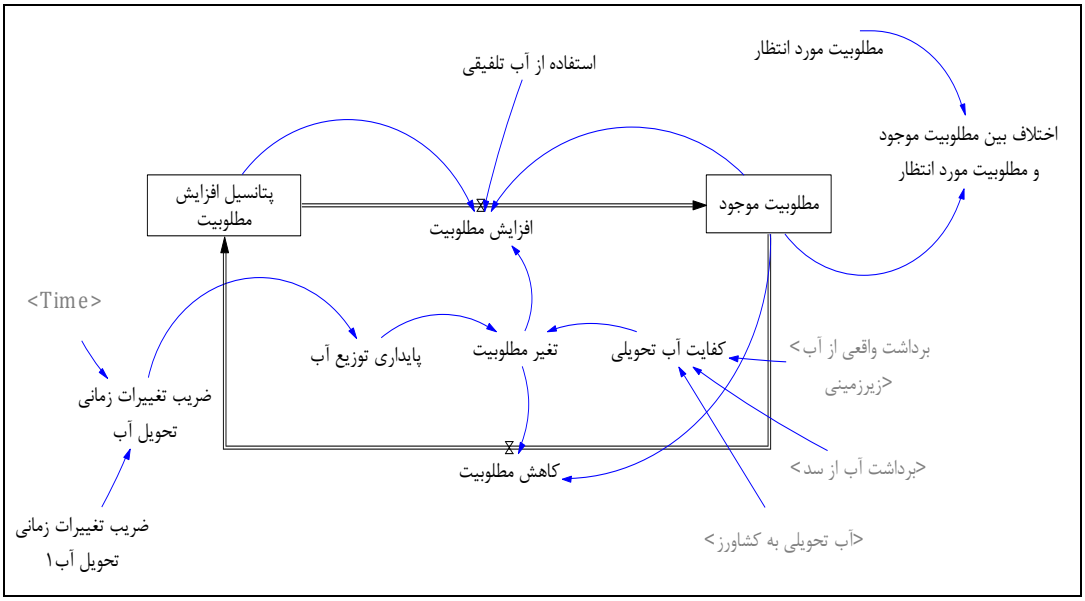
که در آن،

P= قدرت پمپ (کیلووات)؛ E= انرژی مصرفی پمپ (کیلووات ساعت)، و T= ساعت کارکرد سالانه است. رابطهٔ آب تحویلی از چاه‌ها (GW_a) برحسب میلیون مترمکعب، بسته به عوامل قدرت پمپ (P،کیلووات)، وزن مخصوص آب (γ، ۹۸۱۰ نیوتن بر مترمکعب)، ارتفاع پمپاژ (H، متر) و بازده الکتروپمپ (μ ، درصد) مطابق رابطهٔ ۱۱ است.

$$GW_a = \frac{0.001\mu P}{QH\gamma} \qquad (11)$$

راندمان آبیاری با توجه به سامانه‌های آبیاری متفاوت است و با ارتقای آن حجم آب پمپاژ کاهش می‌یابد. برای محاسبهٔ P، E و EP، به ترتیب از روابط ۱۱، ۱۰، و ۹ استفاده شده است.

با توجه بهاطلاعات کسب شده در سطح شبکهٔ قزوین، مقدار راندمان متوسط ۷۰ درصد، ارتفاع پمپاژ متوسط ۴۲/۵۳ متر، و متوسط ساعت کارکرد سالانه ۵۰۰۰ ساعت در نظر گرفته شده است.



شکل ۵- مدل زیرسیستم مطلوبیت آب در شبکهٔ آبیاری قزوین

Fig. 5Model of Water Utility Subsystem in Ghazvin Irrigation Network

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، میزان افزایش یا کاهش مطلوبیت در شبکه (I_{ut} , R_{ut})، تابعی از مطلوبیت موجود، میزان شاخص کفایت و پایداری، و استفاده از آب تلفیقی در شبکه است و مطابق رابطهٔ ۱۴ بیان می‌شود. دو پارامتر کفایت و پایداری در مدل مطابق رابطهٔ ۱۲ تحت عنوان تغییر مطلوبیت به‌صورت جمله‌های شرطی در نظر گرفته‌شده‌اند. بدین ترتیب که اگر میزان تغییر مطلوبیت از مقدار عددی آن در سال مبنا کمتر بود به‌اندازه تفاوت این دو مقدار سبب کاهش و میزان افزایش برابر صفر گردد و بالعکس.

$$U = U_0 + \sum_{t=85}^{95} (I_{ut} - R_{ut}) \qquad (12)$$

که در آن،

U= مطلوبیت موجود؛ و U_0= مطلوبیت در سال مبنا (در سال ۱۳۸۵) است.

فاصله تا مطلوبیت موردنظر از رابطهٔ ۱۳ به دست می‌آید که در آن مقدار مطلوبیت موردنظر ۱/۵ در نظر گرفته‌شده است که بیانگر حداکثر مطلوبیت خواهد بود. این مقدار با توجه به رشد ۵۰ درصدی طی ۱۰ سال، نسبت به مقدار مطلوبیت سال ۱۳۸۵ که برابر ۱ است، تعیین شده است.

$$D_u = OU - U \qquad (۱۳)$$

که در آن،

D_U= فاصله تا مطلوبیت مورد انتظار؛ O_U= مطلوبیت مورد انتظار؛ و U= مطلوبیت موجود است. در ادامه میزان افزایش یا کاهش مطلوبیت در شبکه (I_{ut} و R_{ut}) طبق رابطهٔ ۱۴ محاسبه می‌شود.

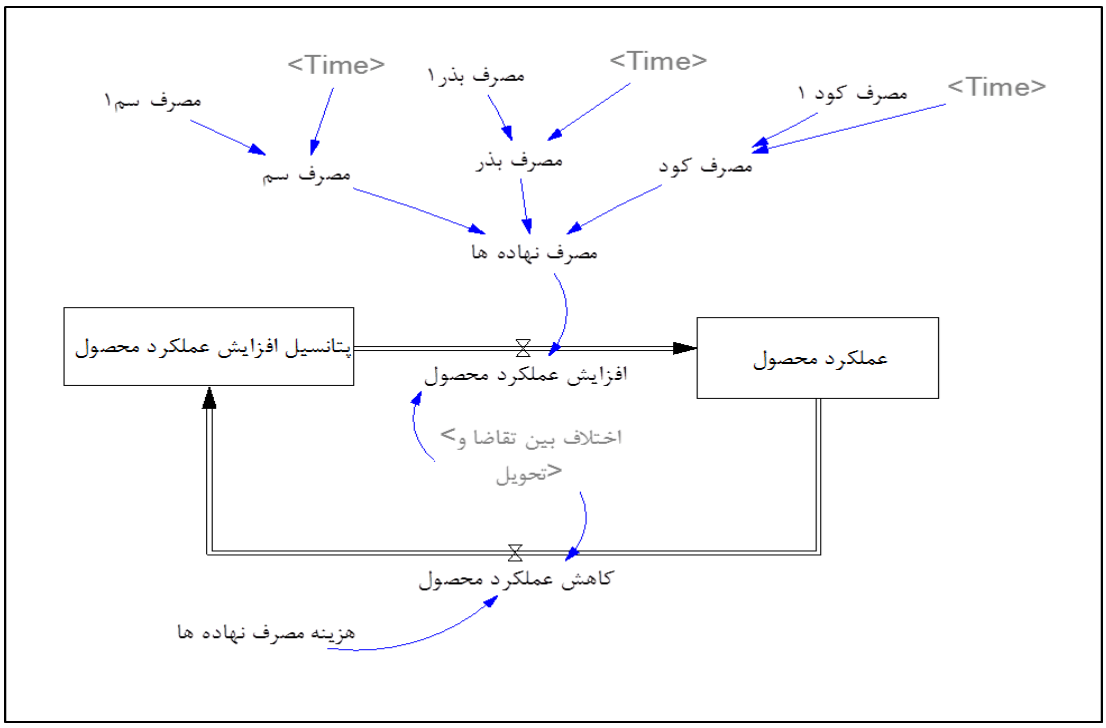
$$I_{ut} \text{ و } R_{ut} = 0.6Ad + 0.4St \qquad (۱۴)$$

شاخص کفایت تحویل آب (Ad)، از رابطهٔ ۱۵محاسبه می‌شود، شاخص پایداری (St) مطابق رابطهٔ ۱۶ به‌دست می‌آید. در این رابطه، با توجه به اهمیت بیشتر شاخص کفایت نسبت به شاخص پایداری، ضریب اهمیت وزنی کفایت ۰/۶ و برای پایداری ۰/۴ در نظر گرفته شد. کفایت به میزان آب تحویلی(W_S) و آب مورد نیاز یا مورد تقاضا (V_{req}) بستگی دارد. چنانچه میزان آب تحویلی از آب مورد نیاز بیشتر باشد حداکثر مقدار ۱ برای این شاخص در نظر گرفته می‌شود.

$$Ad = \frac{W_s}{V_{req}} \qquad (۱۵)$$

پایداری تحویل آب ضریب تغییرات زمانی تحویل آب (CV_R) است که به دبی واقعی تحویلی (Q_D) و دبی موردنیاز الگوی کشت (Q_R) بستگی دارد و از رابطهٔ ۱۷محاسبه می‌شود.

$$St = CV_R\left(\frac{Q_D}{Q_R}\right) \qquad (۱۶)$$

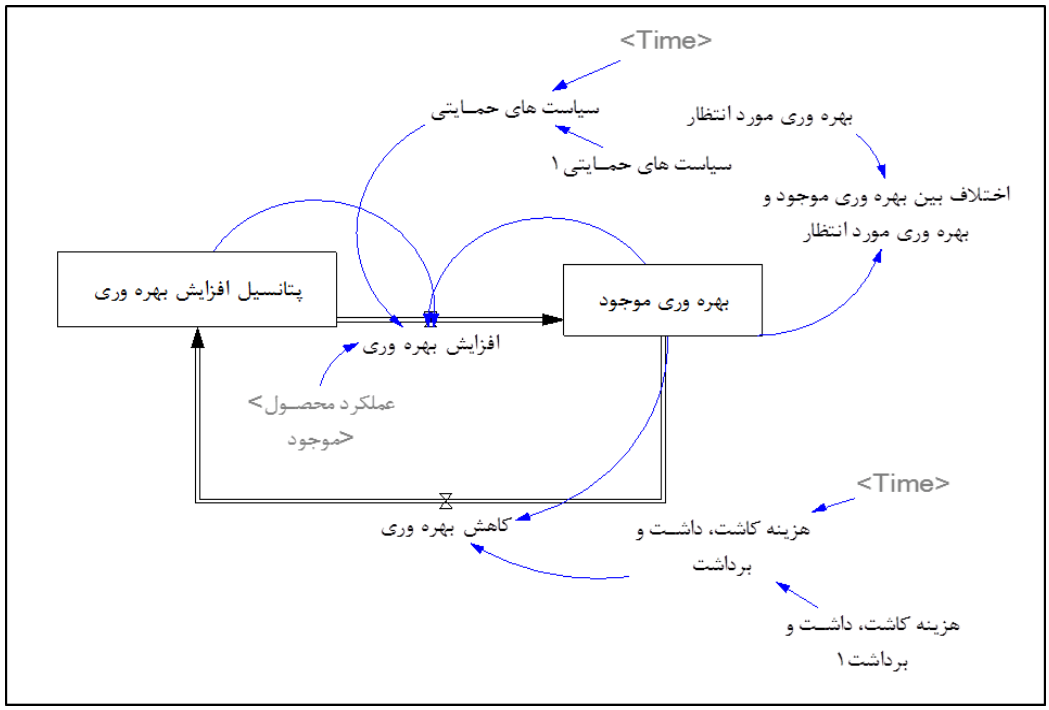


شکل ۶- مدل زیرسیستم عملکرد محصول شبکهٔ آبیاری قزوین

Fig. 6- Model of Crop production Subsystem in Ghazvin Irrigation Network

شاخص عملکرد محصول مطابق با رابطهٔ ۱۸، رابطهٔ بین تولید محصول و میزان مساحت تحت کشت را بیان می‌کند. از این شاخص به‌عنوان شاخص تولید محصول در تحلیل دینامیکی استفاده می‌شود و با دانستن سطح زیر کشت، عملکرد تولیدات کشاورزی را ارزیابی می‌کند. در ارزیابی کمی زیرسیستم عملکرد محصول مطابق شکل ۶، افزایش مقدار مصرف نهاده‌ها شامل کود، بذر و سم، در حدود توصیه شده، عامل افزایش عملکرد محصول، و افزایش هزینه مصرف نهاده‌ها عامل کاهش مصرف آنها و بالطبع کاهش عملکرد محصول در نظر گرفته می‌شود.

$$\text{عملکرد محصول} = \frac{\text{تولید محصول}}{\text{سطح زیر کشت}} \qquad (۱۸)$$



شکل ۷- مدل زیرسیستم بهره‌وری تولید محصول شبکهٔ آبیاری قزوین

Fig. 7- Model of Crop Production Utility Subsystem in Ghazvin Irrigation Network

شاخص بهره‌وری (CPD) شاخص تولید محصول با توجه به آب مصرفی است که به‌صورت رابطهٔ ۱۹ نشان داده‌شده است.

$$CPD = \frac{\textit{مقدار محصول تولید شده}}{\textit{مقدار آب مصرف شده}} \qquad (۱۹)$$

مطابق با رابطهٔ ۲۰ عواملی که در مدل به‌عنوان پارامترهای مؤثر بر افزایش بهره‌وری (I_P) شناخته‌شده‌اند عبارت‌اند از: بهره‌وری تولید محصول موجود (E_P) و افزایش بهره‌وری ناشی از سیاست‌های حمایتی (S_P) شامل سوبسیدهای کود، بذر و سم در بخش کشاورزی که از رابطهٔ ۲۰ محاسبه می‌شود.

$$I_P = E_P + S_P \qquad (۲۰)$$

از طرفی، افزایش هزینه‌های مربوط به کاشت، داشت و برداشت (هزینه تولید محصولات کشاورزی) مطابق شکل ۷، موجب کاهش بهره‌وری می‌شود. از اختلاف بین افزایش و کاهش بهره‌وری متغیر حالت بهره‌وری موجود مطابق رابطهٔ ۲۱ محاسبه می‌شود.

$$P = P_0 + \sum_{t=85}^{95} (I_{Pt} - R_{Pt}) \qquad (۲۱)$$

که در آن،

P= بهره‌وری موجود؛ P_0= بهره‌وری در سال مبنا (در سال ۱۳۸۵)؛ I_{Pt}= افزایش بهره‌وری موجود؛ و R_{Pt}= کاهش بهره‌وری موجود است.

فاصله تا بهره‌وری مورد انتظار از رابطهٔ ۲۲ به دست می‌آید. در این رابطه، مقدار بهره‌وری مورد انتظار ۱/۲ در نظر گرفته‌شده است که بیانگر حداکثر بهره‌وری موردنظر است. با توجه به آنکه حداکثر مقدار بهره‌وری در سال ۱۳۹۴ برابر ۰/۸ بوده‌است، رشد ۵۰ درصد در آن در سال‌های آینده در نظر گرفته‌شده و به‌عنوان بهره‌وری مورد انتظار به سیستم وارد شده است.

$$Dp=Op+P \qquad (۲۲)$$

که در آن،

D_P= فاصله تا بهره‌وری مورد انتظار؛ O_P= بهره‌وری مورد انتظار؛ و P= بهره‌وری موجود مطابق با رابطهٔ ۲۱ است.

صحت سنجی

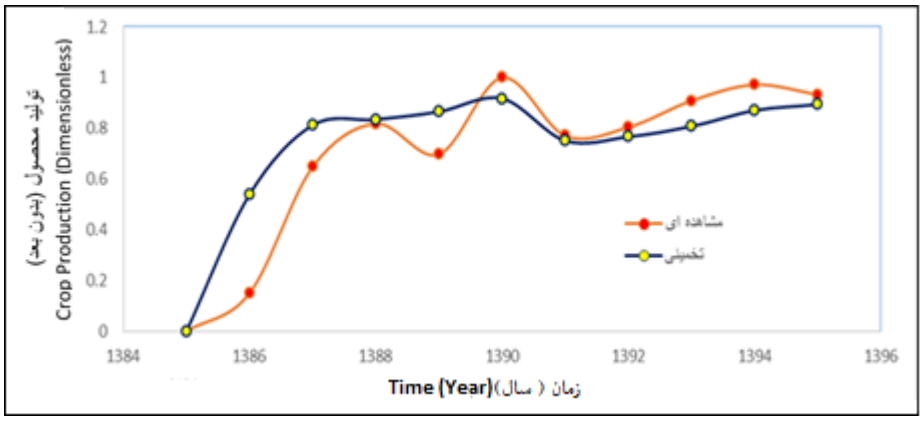
برای حصول اطمینان از عملکرد صحیح مدل، صحت آن با آزمون تکرار رفتار و آزمون شرایط حدی ارزیابی شد. در آزمون تکرار رفتار روند داده‌های تولیدشده در مدل با داده‌های واقعی (مشاهده‌ای) مقایسه و میزان مطابقت آنها با هم بررسی می‌شود. در آزمون شرایط حدی مقادیر خروجی از مدل تحت شرایط حدی که عکس العمل و رفتار شناخته شده ای به دنبال دارد بررسی می‌شود. نتایج آزمون های صحت سنجی در بخش بعد ارائه شده است.

نتایج و بحث

نتایج صحت سنجی

آزمون تکرار رفتار با بررسی رگرسیون خطی میان داده های مشاهده ای تولید محصول و خروجی مدل در سال های مختلف دنبال شد. مقادیر ضریب تبیین (R^2) با مقدار ۰/۸ و میانگین مطلق خطا (MAE)[1] با مقدار ۰/۱ به‌دست‌آمده که قابل قبول است. همان‌طور که در شکل ۸ نیز دیده می‌شود روند تغیر دو نمودار تطابق قابل قبولی را میان مقادیر تخمینی و مشاهده‌ای نشان می‌دهد.

$$D_p = O_p - p$$

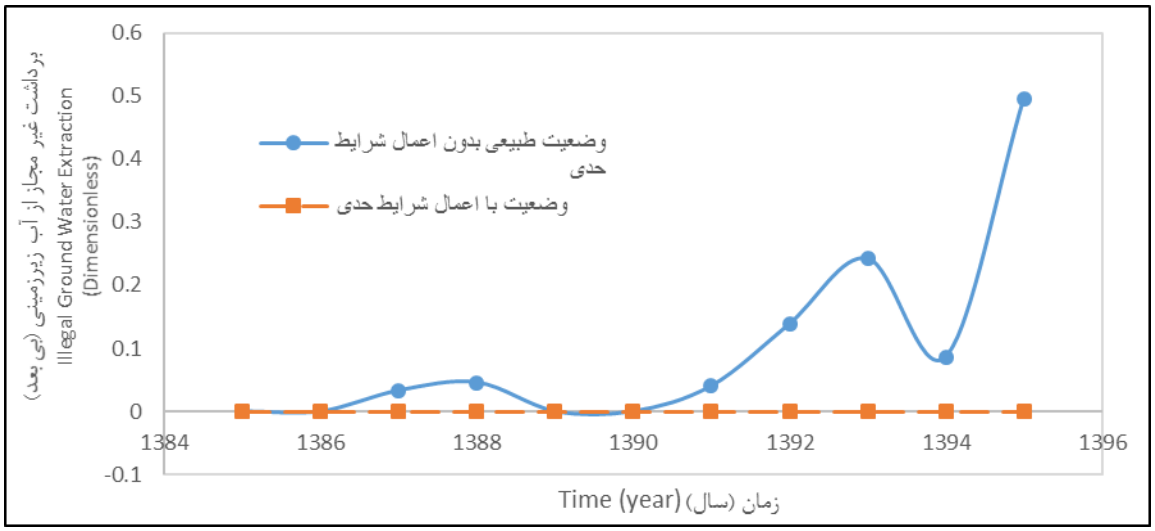


شکل ۸- داده‌های مشاهده‌ای و تخمینی تولید محصول در شبکهٔ آبیاری قزوین

Fig. 8- Observed and Estimated Crop Production Data in Ghazvin Irrigation Network

1- Mean Absolute Error

آزمون شرایط حدی برای متغیرهای مختلف مطلوبیت آب و عملکرد محصول بررسی و نتایج آن برای کاهش سطح زیرکشت در شکل ۹، نشان داده شده است. در اثر کاهش سطح زیر کشت انتظار می‌رود برداشت آب زیرزمینی غیرمجاز کاهش یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مطابق شکل ۹ روند تغییرات برداشت غیرمجاز آب زیرزمینی با سطح بدون کشت در طول زمان به مقدار صفر رسیده است. آزمون شرایط حدی برای سایرعوامل نیز نتایج مشابه و قابل قبولی داشته است.



شکل ۹- روند تغییرات برداشت غیرمجاز آب زیرزمینی تحت اثر کاهش سطح زیر کشت

Fig. 9- Illegal Ground Water Extraction Variation due to reduction of Cultivated Land

اجرای مدل و ارزیابی سیاست‌های اتخاذ شده

پس از کسب اطمینان از عملکرد مدل در آزمون‌های صحت سنجی، تولید محصول و مطلوبیت شبکه با اعمال سیاست‌های مختلف محتمل در زمینه های آب، غذا، و انرژی مورد ارزیابی قرار گرفت.

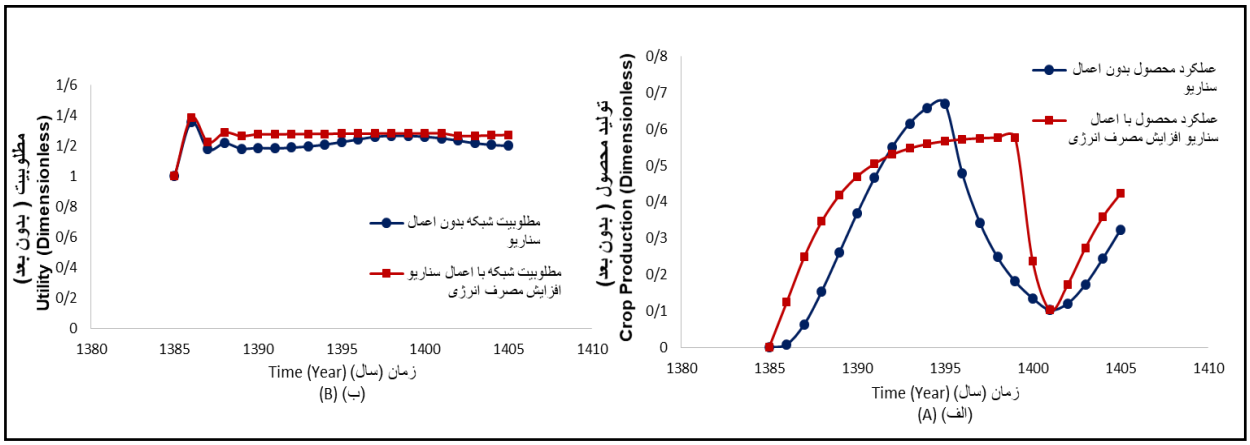
برای بحث و بررسی نتایج، نمودارهای تغییرات تولید محصول و مطلوبیت، در شکل های ۱۰ تا ۱۲ در دو حالت نشان داده شده است: ادامهٔ وضع موجود بدون اعمال سیاست ها، و ادامهٔ وضع موجود با اعمال سیاست ها.

در صورت ادامه وضع موجود به دلیل نیاز به افزایش غذا، با افزایش برداشت آب و توسعهٔ کشاورزی، در سال‌های اولیه شاهد افزایش تولید محصول تا حدود ۶۰ درصد هستیم. با توسعهٔ کشاورزی، میزان تقاضا و انتظارات نیز افزایش می‌یابد. ازسال ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۱ به مدت ۶ سال، به دلیل محدودیت امکانات توسعهٔ کشاورزی و کمبود آب، با فعال شدن حلقه های محدود کننده، تولید محصول به میزان حدود ۵۰ درصد کاهش چشمگیری یافته. پس از آن با کاهش انتظارات و متعادل شدن روند تقاضا با آب تحویلی، میزان تولید محصول تا سال ۱۴۰۵حدود۲۰ درصد افزایش می یابد. مطلوبیت آب نیز فرایندی مشابه دارد، به‌طوری که در ابتدا به‌رغم نوسان‌های محدود، با افزایش تدریجی به میزان حدود ۲۰ درصد تا سال ۱۳۹۹مواجه هستیم و پس از آن با محدودیت های منابع، به میزان ۱۰درصد در سال ۱۴۰۵ کاهش می یابد.

نتایج اجرای مدل، با سیاست افزایش مصرف انرژی، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. می‌بینیم که با افزایش مصرف انرژی و برداشت آب زیر زمینی، تولید محصول در سال‌های اولیه تا سال ۱۳۹۰ با شیب تند به میزان حدود

۴۷ درصد افزایش یافته و بعد از آن با شیب ملایم تا سال ۱۳۹۹ حدود ۱۰ درصد افزایش می‌یابد. دلیل کند شدن این روند، اثر تدریجی محدودیت هاست. ازسال ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۱ کاهش شدید (۵۰ درصد) در تولید محصول مشاهده می‌شود، که ناشی از تأثیرکامل محدودیت هاست. پس از آن با تعدیل انتظارات و تقاضا، متناسب با محدودیت های موجود، مجددا شاهد افزایش تولید محصول به میزان ۳۲ درصد تا سال ۱۴۰۵ هستیم. در مقایسه با ادامه وضع موجود، اعمال این سیاست موجب تشدید روند افزایش تولید محصول درسال‌های اولیه تا سال ۱۳۹۲ شده است. بعد از آن تا سال ۱۳۹۵ افزایش تولید، در ادامه وضع موجود، در مقایسه با اعمال این سیاست پیشی گرفته است، که می‌تواند عکس العمل سال‌های قبل باشد. در سال ۱۳۹۹ کاهش تولید محصول با ۴ سال تاخیر نسبت به ادامه وضع موجود و با دامنهٔ کمتر رخ داده است.

نهایتاً در سال ۱۴۰۵ میزان تولید محصول ۱۰ درصد بیشتر از میزان تولید ناشی از ادامهٔ وضع موجود شده است. مطلوبیت شبکه در ابتدا پس از نوسانات محدود اولیه تا سال ۱۳۹۱، روند ملایم افزایشی به میزان ۲۸ درصد تا سال ۱۴۰۱دارد. پس ازآن به دلیل محدودیت ها، تا سال ۱۴۰۵ حدود ۱۰ درصد کاهش می یابد. با اعمال سناریوی افزایش مصرف انرژی، مطلوبیت همواره نسبت به ادامهٔ وضع موجود به میزان محدودی بهتر بوده است و در سال ۱۴۰۵ حدود ۷ درصد بیشتر است.



شکل ۱۰- تغییرات تولید محصول (الف) و مطلوبیت (ب) تحت اثر گزینه افزایش مصرف انرژی

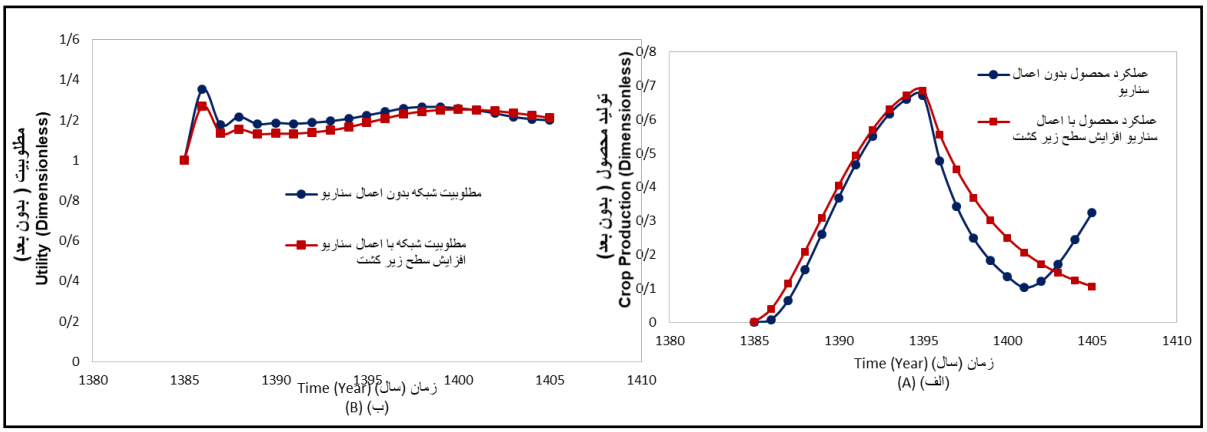
Fig 10- Crop production (A) and Utility (B) Variation for Energy Consumption Increase Scenario

نتایج اجرای مدل با سیاست افزایش سطح زیر کشت در شکل ۱۱ نشان داده شده است. افزایش سطح زیر کشت، هم در تولید محصول هم در مطلوبیت، رفتاری مشابه با ادامهٔ وضع موجود دارد. در سال های اولیه تا سال ۱۳۹۵ تولید محصول ۶۸درصد افزایش داشته است. در این گزینه، تولید محصول تا سال ۱۴۰۳، نسبت به ادامه وضع موجود، به مقدار کمی بیشتر است و دلیل آن محدودیت پتانسیل افزایش سطح زیر کشت می‌تواند باشد. بعد از سال ۱۴۰۳ ، آب کمبود خواهد داشت و منابع آب دیگر جوابگوی افزایش سطح زیر کشت نخواهند بود، از این رو تولید محصول کمتر می‌شود و در سال ۱۴۰۵ حدود ۲۰ درصد کمتر از ادامهٔ وضع موجود خواهد بود.

با اعمال سیاست افزایش سطح زیر کشت، مطلوبیت به علت افزایش تقاضای آب و کاهش آب تحویلی نسبت به

آب موردنیاز، در سال های اولیه تا ۱۴۰۰ کمتر از ادامه وضع موجود است. بعد از آن به علت انطباق نسبی با شرایط جدید، مطلوبیت به مقدار محدودی بهبود می‌یابد.

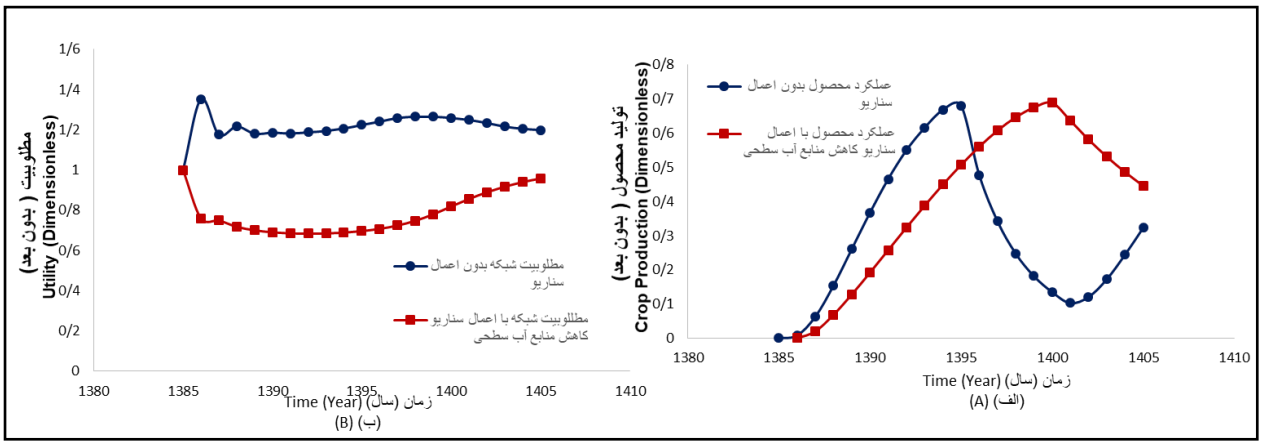
نتایج سیاست کاهش منابع آب سطحی به میزان ۳۰ درصد ، در شکل ۱۲ نشان داده شده است. رفتار کلی تولید محصول، مشابه با ادامه وضع موجود است، اما به دلیل کاهش منابع آب سطحی مقدار تولید محصول تا سال ۱۳۹۶ کمتر از ادامه وضع موجود است. در سال های اولیه به‌رغم کاهش آب سطحی، به دلیل فعال بودن مکانیزم های افزایش برداشت آب زیر زمینی و توسعه کشاورزی، تولید محصول مشابه با وضع موجود به میزان ۶۸ درصد رشد داشته، اما وصول به حداکثر رشد با ۵ سال تاخیر در سال ۱۴۰۰ اتفاق افتاده است. این امر به دلیل رویکرد تدریجی جایگزینی آب زیر زمینی و سایر اقدامات جبرانی در برابر کمبود آب سطحی است. بعد از این به دلیل فعال شدن مکانیزم های محدود کننده، کاهش تولید محصول ایجاد شده به‌طوری که در سال ۱۳۹۵ حدود ۲۴ درصد افت داشته است. با توجه به تاخیر فاز اثرهای این گزینه، می‌توان پیش بینی کرد که در صورت ادامه شبیه سازی تا سال‌های بعد، شاهد به تعادل رسیدن شرایط و افزایش مجدد تولید محصول البته به میزانی کمتر از ادامه وضع موجود باشیم.



شکل ۱۱- تغییرات تولید محصول (الف) و مطلوبیت (ب) تحت اثر گزینه افزایش سطح زیر کشت

Fig. 11- Crop production (A) and Utility (B) Variation for Cropped Land Increase Scenario

با اعمال این سیاست، مطلوبیت آب همواره نسبت به ادامهٔ وضع موجود کمتر است. در سال های اولیه به علت کمبود آب، مطلوبیت به‌شدت کاهش می‌یابد، به‌طوری که در سال ۱۳۹۲ حدود ۳۲ درصد کاهش یافته. سپس با فعال شدن سایر مکانیزم ها، اعم از توسعه کشاورزی و افزایش برداشت آب زیر زمینی به تدریج روند افزایشی داشته است و در سال ۱۴۰۵ به میزان ۲۷ درصد رشد دارد. البته به دلیل محدودیت منابع آب سطحی، همچنان به میزان ۱۹درصد نسبت به ادامه وضع موجود کمتر است.



شکل ۱۲- تغییرات تولید محصول (الف) و مطلوبیت (ب) تحت اثر گزینه کاهش منابع آب سطحی

Fig. 12- Crop production (A) and Utility (B) Variation for Surface Water Reduction Scenario

نتیجه‌گیری

هدف اصلی این تحقیق، توسعهٔ دیدگاه پیوند آب، انرژی و غذا در شبکه‌های آبیاری از دیدگاه تولید محصول و شاخص‌های تحویل آب (کفایت و پایداری) با استفاده از رویکرد دینامیک سیستم ها بود. نتایج نشان داد که با استفاده از رویکرد پویایی سیستم‌ها می‌توان مکانیزم‌های مؤثر در پیوند آب، انرژی و غذا را از دیدگاه تولید محصول و مطلوبیت آب در سطح شبکه‌های آبیاری شناسایی و آنها را ارزیابی کرد. با استفاده از این رویکرد، اثر هر یک از سیاست ها به‌صورت ترکیبی در هر سه بخش آب، غذا، و انرژی نه فقط درکوتاه مدت، بلکه با درنظرگرفتن اثر مکانیزم‌های محدود کننده و تعادلی در بلند مدت قابل بررسی و تحلیل است. بدین ترتیب می‌توان متناسب با اثرهای همه جانبه و بلند مدت نسبت به سیاست ها، تصمیم های مناسب‌تر اتخاذ کرد. نتایج این تحقیق نشان داد که اثر کاهش منابع آب سطحی بر تولید محصول و مطلوبیت آب به‌مراتب بیشتر از اثر سیاست افزایش مصرف انرژی و سطح زیر کشت است. دلیل این امر علاوه بر اهمیت آب سطحی به عنوان مهمترین نهادهٔ تولید، محدودیت پتانسیل افزایش مصرف انرژی و برداشت آب زیر زمینی و توسعه سطح کشت است. با توجه به محدودیت منابع آب و تاثیر قابل توجه آن بر تولید محصول و مطلوبیت، توصیه می شود در رویکرد نکسوس، سناریوهای مرتبط با مدیریت آب از اولویت بالاتری برخوردار باشند.

تأسف و تشکر

نویسندهٔ اول این مقاله در فاصلهٔ اعلام نظر داوران تا بازنگری مقاله، متاسفانه در حادثه رانندگی فوت کردند که موجب تأثر و تألم گردید.

بدین‌وسیله از همکاری کامل شرکت مدیریت منابع آب ایران، سازمان آب منطقه‌ای قزوین، و سازمان جهادکشاورزی قزوین که اطلاعات مورد نیاز را در اختیار قرار دادند، صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

مراجع

Artioli. F. Acuto. M. & McArthur. J. (2017). The water-energy-food nexus: An integration agenda and implications for urban governance. *Political Geography 61*, 215-223

Braun. W. (2002). The system archetypes. *The Systems Modeling Workbook*.26P

Chang. Y. Li. G. Yao. Y. & Zhang, L. (2016). Quantifying the water-energy-food nexus: current status and trends. *Energies*, *9*(2), 1-17

El-Gafy. I. Grigg. N. & Reagan. w. (2016). Dynamic Behaviour of The Water–Food–Energy Nexus: Focus On Crop Production And Consumption. *Jour. of Irrig. & Drain*, *66*, 19–33

FAO Publication No. 58. (2014). *Walking the Nexus Talk: Assessing the Water-Energy-Food Nexus in the Context of the Sustainable Energy for All Initiative*. July 2014. PP. 147

Fernandez Garcia. I. & Merida Garcia. A. (2018). Water Energy Nexus in Irrigated Areas. Lessons from Real Case Studies. Research Report University of Cordoba. Cordoba. Spain

Hassan. G. Hassan. F. & Ghulam. S. (2017). Food Security Challenges under Climatic Changes and Groundwater-Energy, Nexus- Case Study of Punjab Pakistan. *Modernizing Irrigation and Drainage for a new Green Revolution. Transactions of the 23rd ICID Congress on Irrigation and Drainage* – Abstract Volume: Question 60 and 61. 418 pp. ISBN: 978-81-89610-24-1

Hatam. A. Monem. M. J. & Bagheri. A. (2012). Development of Dynamic Model of Irrigation Network Improvement System with Consideration of Farmers' Participation and Improving Network Management. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *4*(13), 1-24 (In Persian)

Hosseinzade. z. Pagsuyoin. S. H. Ponnambalam. k. & Monem. M. J. (2017). Decision-making in irrigation networks: Selecting appropriate canal structures using multi-attribute decision analysis, *Jour. Of Science of the Total Environmen*, 177-185

Kitani, O. Jungbluth. T. Peart. R. M. & Ramdani. A. (1999). *CIGR Handbook of Agricultural Engineering. 5: Energy and Biomass Engineering*. ASAE. Pub.351P

Mabhaudhi. T. Sylvester. M. Dhesigen. N. Luxon. N. & Aiden. S. (2018). Integrating the Water – Energy – Food nexus into National Irrigation Planning: South African Perspectives, *24th International Congress on Irrigation and Drainage ICID*. Saskatoon, Canada

Monem. M. J. Delavar. M. & Hosseini. M. (2020). Application and Evaluation of Water, Food and Energy (NEXUS) in Irrigation Networks Management: Case Study of Zayandehrud Irrigation Network, *Iranian Jour. of Irrigation & Drainage*,14, 276-285. (In Persian)

Pandya. A. B. Varma. H. K. Singh. S. Mohanan. M. (2018). *Report of the 23rd International Congress on Irrigation and Drainage.* Mexico City, Mexico, 8-14 October 2017, International Commission on Irrigation and Drainage (ICID), ISBN: 978-81-89610-26-5, PP. 72.

Ravar. Z. Zahraie. B. Sharifinejad. A. Gozini. H. & Jafari. S. (2020). System Dynamics Modeling for Assessment of Water- Food- Energy Resources Security and Nexus in Gavkhuni Basin in Iran, *Jour. of Ecological Indicators*,*108*,1-18.

Shabani. S. Monem. M. J. & Bagheri. A. (2014). System Dynamics Model for Foomanat Irrigation Network, from Adequacy and Equity Point of view, *Iranian Jour. of Irrigation and Drainage*, *8*(4),836-826 (In Persian)

Smajgl. A. Ward. J. & Pluschke. L. (2016). The water-food-energy Nexus e realizing a new paradigm. *Journal of Hydrology*,*533*, 533-540

Vaez Tehrani. M. Monem. M. J. & Bagheri. A. (2013). A system dynamics approach to model rehabilitation of irrigation networks case study: Qazvin irrigation network, *Iranian Jour. of Irrigation and Drainage*, 62, 193–207 (In Persian)

Xu. Y. & Szmerekovsky. J. (2017). System dynamic modeling of energy savings in the US food industry. *Journal of Cleaner Production*, *165*, 13-26.

Irrigation and Drainage Structures Engineering Research/Vol.21/No.80/ Autumn 2020/P: 61-80

Research Paper

Development of Water, Energy and Food Nexus Model in Irrigation Networks Based on Water Adequacy and Stability Indicators (Qazvin Irrigation Network Case Study)

E. Ghorbani, M. J. Monem* and M. Vaez Tehrani

*Corresponding Author: Professor, Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: monem_mj@modares.ac.ir
Received: 4 June 2020, Accepted: 7 September 2020

Extended Abstract

Water, food and energy are the main resources needed for the development of societies. Recently, comprehensive management from Nexus' point of view has been examined and evaluated by focusing on these three sources at the macro, regional and basin levels. However Nexus approach has received less attention in irrigation networks, which consumes energy, and the most water, and produce the most food. (Mabhaudhi et al., 2018). International Commission of Irrigation and Drainage (ICID) announced the Nexus as one of the main topics for 2017 and 2018 congress. Some papers were presented with the focus on food security, energy consumption for ground water extraction, and climate change. As conclusion of both congress it is stated that even though the nexus approach is fast growing, however its application is very limited. Therefore Nexus knowledge and capacity building among stakeholders should be developed, and its application in development planning of irrigation networks should be considered (Hassan, et al. 2017 & Pandya, et al. 2018). Relationships of water, food, and energy at irrigation networks, due to the problems of each component, and their interactions are quite complex. In this study systems dynamics approach used to investigate existing structures between these sources, and causal relationship between different components is determined as a conceptual model. Subsequently, by development of quantified model, the Nexus model of Qazvin Irrigation Network from productivity, adequacy and sustainability of water delivery has been produced. Three scenarios regarding water, food and energy, including, reducing surface water resources, increasing cultivated area, and increasing energy consumption, were evaluated.

System Dynamic approach enables us to consider the complex interactions between water, food and energy components in long term in irrigation networks, and examined the impact of different scenarios, to decide on more sustainable policies. In this approach by problem definition, and determination of the boundaries of the system, the dynamics of the system in form of casual loops are defined. Four archetypes are identified which are Limits to Growth, Shifting the Burden, Fixes that Fail, and Eroding Goals. Considering casual loops in water, food, and energy systems, the conceptual model of the Nexus in irrigation networks is developed. By collecting the required data from Ghazvin irrigation network the quantitative model is

developed and verified using VENSIM model. The quantitative model is developed by defining mathematical relations between different components. The equations are defined in four subsystems including water demand and supply, food production, productivity, and water utility. In these relations, different information such as ground water extraction, surface water supply, required agricultural inputs, etc. are defined based on collected data in form of 10 year time series. Model verification is done by behavior investigation and boundary value test. The model estimated crop production, show good consistency with actual data with average error of 0.1%, and boundary value test show expected results. Therefore the verification results show appropriate performance of the model. Three scenarios for each resources (water, Food, and Energy) were examined which include, increasing energy consumption for ground water extraction, increasing cultivated area, and decreasing surface water.

Testing three scenarios provide the following results:

Continuation of the present condition, will led to increase of crop production up to 60% in early 10 years. However due to activation of controlling mechanisms it sharply decreases by 50% in 5 years. Water utility shows similar manner, initially 20% increase, and 10% decrease afterward. Increasing energy consumption and ground water extraction causes crop production increase in almost all the simulation period with lower variations. Four years delay in impact of controlling mechanism is visible. Water utility has been increased as well, and it is 7% more at the end of simulation period. Due to limited potentials of increasing cropped area, this scenario performs similar to continuation of present condition, with marginal improvement in crop production and water utility. Decreasing surface water has the greatest impact in decreasing crop production and water utility, with respect to continuation of present condition. The maximum decrease in crop production and water utility are 23%, and 32% respectively. Even though due to activation of balancing mechanisms crop production shows 60% increase, however it happens with 5 year delay and decreases sharply afterward. Considering limited water resources, and its greatest impact on crop production and water utility, it could be suggested that water management policies, take higher priority in Nexus approach.

As a general conclusion it could be stated that, system dynamic is a suitable method to implement Nexus approach in irrigation networks, and to investigate the long term impact of different scenarios, to select more sustainable policies for irrigation development.

Keywords: Dynamic System, Ghazvin Irrigation Network, Nexus.