تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال چهاردهم، شماره ۵، زمستان ۱۳۹۷
Volume 14, No.5, Winter 2019 (IR-WRR)
۲۷-۳۸

ارزیابی ظرفیت مدیریت فعلی آب کشاورزی در حوضه زرینه‌رود برای سازگاری با تغییر اقلیم براساس رویکرد تصمیم‌گیری استوار

فرشید بابانیا[۱]، سعید مرید[۲*] و اشکان شکری[۳]

چکیده

در مدیریت سامانه‌های منابع آب، عدم قطعیت‌های ذاتی گوناگونی وجود دارد که با طولانی‌تر شدن افق طرح، تشدید می‌شوند. در این میان، عدم قطعیت‌های تغییر اقلیم و تبعات مربوط، از مهمترین آنها می‌باشد که بدلیل نبود تعریف دقیق از توابع احتمالاتی رخداد آنها، تحت عنوان عدم قطعیت‌های عمیق یاد می‌شوند. در این شرایط تصمیماتی باید اتخاذ شوند که از استواری بیشتری برخوردار باشند و در سناریوهای مختلف اقلیمی همچنان کارکرد خود را حفظ نمایند. مقاله حاضر این مهم را هدف قرار داده است و تلاش دارد تا با استفاده از مفهوم استواری به ارزیابی راهبردهای سازگاری با تغییر اقلیم بپردازد. بدین منظور، از روش تصمیم‌گیری استوار که به مدل SWAT برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی و کشاورزی اتصال یافته استفاده می‌کند. منطقه مطالعاتی تحقیق، حوضه زرینه‌رود می‌باشد که اراضی کشاورزی زیادی را در خود جای داده است و تأمین کننده اصلی آب دریاچه ارومیه نیز می‌باشد. در ادامه، مقاله به بررسی ظرفیت مدیریت فعلی حوضه به عنوان راهکار سازگاری با تغییر اقلیم و ارزیابی استواری آن می‌پردازد. بدین منظور تعدادی معیار شامل: جریان‌های ورودی به دریاچه، تغییر در ذخائر آب زیرزمینی، تبخیر و تعرق و عملکرد محصول تعریف شده است. نتایج تحقیق نشان داد که مدیریت فعلی برای شرایط تغییر اقلیم استوار نمی‌باشد و در بسیاری از موارد بدلیل عدم تعادل عرضه و تقاضای آبی شکست خواهد خورد. این شکست‌ها همزمان با کاهش بارندگی و افزایش دمای بیش از ۰/۷۵ درجه سانتیگراد بیشتر خودنمایی می‌کنند. این مهم تأکیدی است بر تغییر نگرش مدیریتی و تدوین راهبردهای جدید که بخوبی با چارچوب مدل توسعه یافته قابل بررسی و ارزیابی هستند.

کلمات کلیدی: تغییر اقلیم، تصمیم‌گیری استوار، عدم قطعیت عمیق، مدل SWAT، حوضه زرینه‌رود.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۴/۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۴/۳

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس.
۲- استاد گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس.
۳- دانشجوی دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه موناش استرالیا.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

Assessment of the Capacity of Current Agricultural Water Management in Zarrineh Rud Basin for Adaptation to Climate Change Using Robust Decision Making Technique

F. Babania[1], S. Morid [2]and A. Shokri[3]*

Abstract

In the management of water resources systems, there are various inherent uncertainties which are exacerbated in longer planning horizons. Among these uncertainties, those related to climate change and its consequences are among the most challenging and attributed as deep uncertainty since there is no clear probabilistic distribution for the outcomes. For such cases, it is crucial to take more robust decisions and maintain their performances during different climatic scenarios. This issue is addressed as the objective of current research in which the concept of "robustness" is applied for evaluation of climate change adaptation strategies. For this purpose, this study used Robust Decision Making (RDM) technique, which was linked to Soil and Water assessment Tool (SWAT) model for the required water and agricultural simulations. The case study of this research was Zarrineh Rud River basin which includes plenty of cultivated lands. The basin is also the main feeding river of Lake Urmia in northwestern Iran. At this stage, the paper evaluated the capacity of the current management of the basin as a climate change adaptation strategy. For this, different indicators including; inflows to the lake, change in groundwater storage, actual evapo-transpiration, and crop yield were assessed. The results showed that the current management is not robust and fails in most of the projected climate scenarios. The situation also worsened as the rainfall decreases and temperature increases more than 0.75 Celsius. This suggests necessity of a new vision for the basin management and evolving strategies, which can be properly evaluated through the developed modeling framework.

Keywords: Climate Change, Robust Decision Making, Deep Uncertainty, SWAT Model.

Received: June 23, 2017
Accepted: June 24, 2018

1- M.Sc. Graduate, Department of Water Resources Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2- Professor, Department of Water Resources Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: morid_sa@modares.ac.ir
3- Ph.D. Student in Department of Civil Engineering, Monash University, Australia.
*- Corresponding Author

۱- مقدمه

در مدیریت سامانه‌های منابع آب، همواره عدم قطعیت‌های مختلفی وجود دارد که با افزایش افق زمانی، شدت آنها بیشتر شده و تصمیم‌گیری‌ها را با چالش‌های بیشتری مواجه می‌سازد. این عدم قطعیت‌ها می‌تواند منابع مختلفی داشته باشد که تغییر اقلیم یکی از مهمترین‌های آنها است. در حوزه مدیریت منابع آب، این تصمیم‌گیری‌ها برای بخش آب و کشاورزی (که بیشترین آسیب‌پذیری را به این پدیده دارد)، به مراتب نقش بیشتری را ایفاء خواهد نمود. از این رو برخورد با عدم قطعیت‌ها و همچنین شبیه‌سازی جامع سامانه آب و کشاورزی نیاز به توجه خواهد داشت و لازم است که روش و ابزارهای نرم‌افزاری مناسبی را برای آن توسعه داد.

به طور کلی می‌توان دو نوع رویکرد احتمالاتی و غیر احتمالاتی را برای مواجهه با شرایط فوق و عدم قطعیت‌های پیش‌رو در تصمیم‌گیری‌ها بکار برد. در رویکرد اول، فرض اصلی این است که می‌توان یک تابع مطلوبیت بر روی پیامدها برازش داد و تصمیم منطقی را اتخاذ نمود. در این خصوص غالباً از نظریه مطلوبیت مورد انتظار[۱] (EU) (Von Neumann and Morgenstern, 1947) یا شکل توسعه‌یافته آن، مطلوبیت ذهنی مورد انتظار[۲] (SEU) (Savage, 1954) استفاده می‌شود. برای این منظور، تصمیم‌گیرنده قبل از هر چیز نیاز به برآورد احتمال وقوع هر یک از حالات ممکن را دارد. این تابع مطلوبیت بسته به نوع نگرش فرد تصمیم‌گیر نسبت به مسأله پیش رو تعریف می‌شود. اما برای رویکرد دوم که از مهمترین روش‌های آن، تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت عمیق[۳] است، شرایط به‌گونه‌ای است که نمی‌توان روی مواردی مانند: ۱) مدل‌های مناسب برای توصیف تعاملات میان متغیرهای سامانه مورد مطالعه، ۲) توزیع احتمال عدم قطعیت در مورد پارامترهای کلیدی و ۳) چگونگی ارزش‌گذاری مطلوبیت نتایج توافق کرد و یا اطلاعات داشت (Walker et al., 2013). ساختار مطالعات تغییر اقلیم و عدم قطعیت‌های مربوط (مانند وجود مدل‌های متنوع GCM[۴]، سناریوهای اقلیمی، روش‌های ریزمقیاس کردن و غیره) و بخصوص نبود اطلاع از مواردی مانند توزیع احتمالاتی دما و بارش در آینده نیز بگونه‌ای است که برای آنها رویکرد دوم مناسب‌تر می‌باشد (Wilby and Dessai, 2010). در این مقاله نیز از این رویکرد استفاده می‌شود. دراین راستا و برای تحلیل‌های عدم قطعیت عمیق، اخیراً استفاده از مفهوم استواری[۵] مورد توجه قرار گرفته است. بدین معنی که گزینه استوار می‌تواند عملکرد مناسب خود را در طیف وسیعی از حالات ممکن (ناشی از عدم قطعیت‌های مورد اشاره) برای سامانه مورد مطالعه حفظ کند (Hall et al., 2012). به عنوان مثال طراحی سیستم جمع‌آوری آب شهری که می‌تواند در طیف وسیعی از بارش‌ها همچنان کارآمد باشد (Prutsch et al., 2010). با استفاده از این مفاهیم نیز روش تصمیم‌گیری استوار[۶] (RDM) توسعه یافته است که بر کشف و مقایسه مناطقی از فضای عدم قطعیت که در آن یک راهبرد مطلوب یا غیر مطلوب عمل می‌کند، تمرکز دارد.

محققین مختلف از روش RDM برای حل برخی مسائل مرتبط با منابع آب استفاده نمودند که تحقیق Groves and Lempert (2007) نمونه‌ای از آن است. آنها این روش را برای یافتن استوارترین راهبردهای بلندمدت در مدیریت منابع آب کالیفرنیا بکار بردند. در این تحقیق، عدم قطعیت ۱۶ عامل مورد ارزیابی قرار گرفت که در بین آنها پارامترهای اجتماعی (مانند رشد جمعیت) و اقتصادی (نظیر ضریب ارتجاعی قیمت آب) در بخش‌های مختلف وجود دارد. در تحقیقی دیگر Lempert and Groves (2010) از رویکرد RDM برای ارزیابی مدیریت آب شهری در غرب آمریکا تحت شرایط عدم قطعیت آینده استفاده نمودند. عدم قطعیت‌هایی که در مدل در نظر گرفته شده شامل: تغییر اقلیم، تقاضای آب آینده، تغییرات منابع ورودی، تغییرات آب زیرزمینی، اثرات مدیریتی و هزینه‌های آینده بودند. در ادامه راهبردهای سازگار شامل بهره‌وری مصرف آب، بازیافت آب و سیاست‌های بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی مورد استفاده و ارزیابی قرار گرفتند. با ترکیب‌های مختلف از عدم قطعیت‌ها، ۴۵۰ آینده محتمل (سناریو) حاصل شد و برای آنها نسبت هزینه‌ی کمبود به هزینه‌ی تأمین آب ارزیابی شد. محاسبات لازم نیز با مدل WEAP انجام و نتایج بکارگیری راهبردها مختلف در مدیریت کمبود آب مورد بررسی قرار گرفت. Matrosov et al. (2013) برای برنامه‌ریزی سامانه‌های منابع آب در حوضه رودخانه تایمز، دو رویکرد ۱) بهینه‌سازی اقتصادی و ۲) شبیه‌سازی در چارچوب RDM مورد استفاده قرار دادند که براساس رویکرد اول احداث یک مخزن جدید و براساس دوم طرح انتقال آب را برای منطقه پیشنهاد گردید. لذا مشاهده می‌شود که رویکردهای مختلف می‌توانند گزینه‌های مختلفی را سبب شوند.

با توجه به اهداف طرح حاضر که مدیریت آب کشاورزی می‌باشد، مدل SWAT[۷] برای محاسبات انتخاب شده که یک مدل نیمه توزیعی برای شبیه‌سازی تأثیر اقدامات مدیریتی (بیشتر کشاورزی) روی منابع آب و خاک می‌باشد. از جمله کاربردهای مشابه این مدل را می‌توان در مطالعه Gosain et al. (2006) مشاهده نمود که تأثیر سناریوهای تغییر اقلیم در سال‌های ۲۰۶۰-۲۰۴۱ را بر روی جریان رودخانه‌ای ۱۲ حوضه آبریز اصلی هند شبیه‌سازی کردند. آنها در این مطالعه داده‌های روزانه مدل HadRM2 برای بررسی وضعیت آینده آب قابل دسترس رودخانه‌ها استفاده کردند. Zaman et al. (2016) نیز یک چارچوب

مدل‌سازی یکپارچه براساس SWAT و چارچوب سازمان همکاری اقتصادی و توسعه[8] (OECD) را برای ارزیابی استراتژی‌های سازگاری بخش کشاورزی با تغییراقلیم در حوضه آبریز سیمینه‌رود بکار بردند. در این تحقیق، راهکارهایی نظیر تغییر در الگوی کشت، کم آبیاری، تغییر در زمان کشت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تغییر الگوهای کشت، مؤثرترین آنها برای کاهش اثرات منفی این پدیده بود، هرچند هیچ یک از آنها نتوانستند امکان ورود متوسط جریان تاریخی به دریاچه را فراهم آورند.

با توجه به موارد فوق، هدف این تحقیق ارائه روش‌شناسی و بستر مدل‌سازی برای ارزیابی اقدامات سازگاری با تغییر اقلیم در چارچوب مفهوم استواری و روش تصمیم‌گیری استوار (RDM) می‌باشد. بدین منظور، برای بخش شبیه‌سازی فرآیندهای آبی و کشاورزی آن از SWAT و برای بخش RDM نرم‌افزار خاصی در اتصال با مدل اول توسعه یافته است. برای ارائه نتایج روش‌شناسی، مقاله حاضر تنها به بررسی ظرفیت وضعیت فعلی مدیریت آب و کشاورزی حوضه زرینه‌رود تحت شرایط تغییر اقلیم می‌پردازد. به عبارتی استواری این مدیریت (یعنی سطح اراضی، الگوی کشت و مدیریت آبیاری کنونی و غیره) براساس چشم‌اندازهای اقلیمی آتی چگونه می‌باشد؟

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی منطقه مطالعاتی

زرینه‌رود، بزرگترین زیر حوضه از حوضه دریاچه ارومیه است و رودخانه آن در حدود ۲۷ درصد از حجم آب ورودی به دریاچه ارومیه را تأمین می‌کند. طول رودخانه نزدیک به ۳۰۰ کیلومتر و مساحت آن نیز بالغ بر ۱۲۰۲۵ کیلومتر مربع می‌باشد. شهرستان‌های میاندوآب، شاهین‌دژ، تکاب در استان آذربایجان غربی و شهرستان سقز در استان کردستان و بخش کوچکی از آذربایجان شرقی نیز در آن قرار دارد (شکل ۱). محصولات متنوعی در حوضه کشت می‌شود که گندم، جو، سیب زمینی، گوجه، چغندرقند، یونجه و سیب درختی محصولات اصلی و راهبردی آن هستند (Ahmadzadeh, 2012).

۲-۲- ساختار مدل‌سازی تحقیق

ساختار مدل‌سازی این تحقیق از دو بخش اصلی تشکیل شده که عبارتند از: بخش شبیه‌سازی آب و کشاورزی که با مدل SWAT انجام می‌شود و بخش تصمیم‌گیری که مدل خاصی برای آن توسعه یافته است. شرح مربوط آنها در ادامه ارائه می‌گردد.

۲-۲-۱- مدل SWAT

مدل جامع SWAT برای ارزیابی اثر بلندمدت اقدامات مدیریتی روی کمیت و کیفیت آب در حوضه‌های پیچیده و با شرایط متنوع خاک و پوشش گیاهی توسعه یافته است (Arnold, 1996). مدل از نوع نیمه مفهومی بوده و تلاش دارد تا فرآیندهای حاکم در حوضه آبریز را مانند: حرکت آب، رشد گیاه، سیکل مواد غذایی در خاک را بطور یکپارچه شبیه‌سازی نماید. بدین منظور نیز از ورودی‌هایی مانند: داده‌های اقلیمی، خصوصیات خاک، توپوگرافی و نوع پوشش اراضی استفاده می‌کند. مدل برای شبیه‌سازی‌های لازم، ابتدا آن را به زیر حوضه‌هایی تقسیم می‌کند. در مواردی که حوضه از چندین نوع کاربری اراضی و خاک تشکیل شده باشد، هر زیر حوضه نیز به چند قسمت دیگر به نام واحد هیدرولوژیکی یکسان (HRU[9]) تقسیم می‌شود. برای این قسمت نیز مدل SWAT که توسط Ahmadzadeh et al. (2016) برای حوضه زرینه‌رود واسنجی شده، مورد استفاده قرار گرفته است. متذکر می‌گردد که واسنجی آن برای بازه زمانی ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۷ بوده و در آن متغیرهایی مانند: رواناب رودخانه‌ها، عملکرد محصول و تبخیر و تعرق واقعی مد نظر قرار داشتند که کاملا نیاز این تحقیق را تأمین می‌نماید.

۲-۲-۲- رویکرد تصمیم‌گیری استوار RDM

با شرحی که در مقدمه آمد، هدف اصلی در روش RDM دستیابی به سیاست‌های (دسته‌ای از متغیرهای تصمیم) استوار می‌باشد. به این مفهوم که سیاست‌هایی که در طیف وسیع‌تری از شرایط آتی، دارای عملکرد بهتری (با توجه به حد آستانه‌ها) هستند، شناسایی و انتخاب گردند (Hall et al., 2012). به طور کلی می‌توان مراحل آن را در ۵ مرحله مطابق شکل ۲ نمایش داد.

الف) *هدف‌گذاری:* در این مرحله عدم‌قطعیت‌ها ($\mathbf{U}_j=(u_1,...,u_m)$)، سیاست‌ها ($q_i$)، روابط کلیدی و شاخص‌های عملکردی ($f(q_i,\mathbf{U}_j)$) تعریف می‌گردند.

ب) *شبیه‌سازی:* برای این قسمت یک یا چند گزینه سیاستی انتخاب می‌شود و سپس برای تمامی سناریوهای محتمل، شبیه‌سازی انجام و عملکرد آنها تحت سناریوهای مورد نظر ارزیابی می‌گردند. طی این ارزیابی، می‌توان جدول عملکرد هر سیاست در شرایط سناریوهای محتمل را تشکیل داد. به طور مثال، اگر در مسأله‌ای برای هر سناریو دو پارامتر دارای عدم قطعیت وجود داشته باشد ($\mathbf{U}_j=(u_1,u_2)$) جدولی مشابه جدول ۱ برای هر سیاست تشکیل می‌شود. متناسب با اهداف این تحقیق، α و β می‌توانند تغییرات دما و بارندگی باشند.

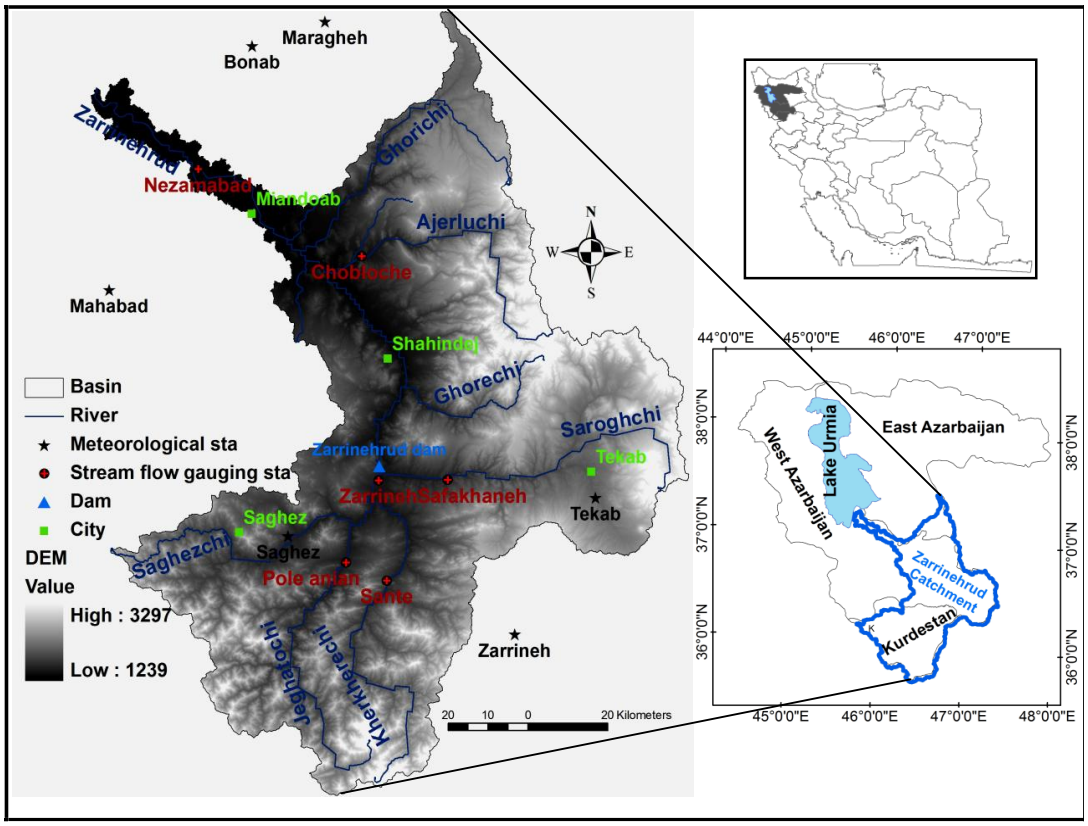

Fig. 1- Location of Zarrinehrud Basin

شکل ۱- حوضه زرینه‌رود

$$\forall(u_1,u_2)=\begin{Bmatrix} u_1,u_2 \mid u_1\in[\alpha_1,\alpha_k], \\ u_2\in[\beta_1,\beta_l] \end{Bmatrix} \qquad (۱)$$

تعداد این شبیه‌سازی‌ها برای هر سیاست، بسته به تعداد عدم قطعیت‌ها (ابعاد) و تعداد گسسته‌سازی‌ها می‌تواند (برخلاف روش تحلیل سناریو) صدها یا هزاران شبیه‌سازی باشد.

Table 1- Simulatin result for a specific policy in presence of two uncertainties

جدول ۱- نتایج شبیه‌سازی‌ها برای یک سیاست خاص در صورت وجود دو عدم قطعیت

u_2 \ u_1	α_1	α_2	...	α_k
β_1	$f(q_i,(\alpha_1,\beta_1))$	$f(q_i,(\alpha_2,\beta_1))$	...	$f(q_i,(\alpha_k,\beta_1))$
β_2	$f(q_i,(\alpha_1,\beta_2))$	$f(q_i,(\alpha_2,\beta_2))$	...	$f(q_i,(\alpha_k,\beta_2))$
⋮	⋮	⋮	⋱	⋮
β_l	$f(q_i,(\alpha_1,\beta_l))$	$f(q_i,(\alpha_2,\beta_l))$	...	$f(q_i,(\alpha_k,\beta_l))$

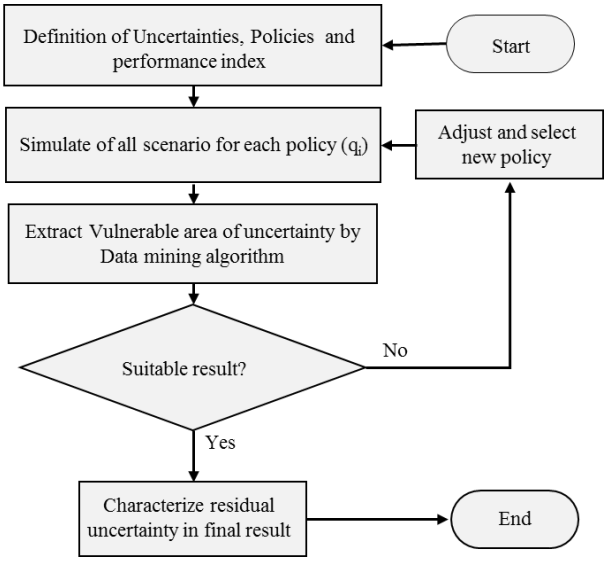

Fig. 2- RDM Flowchart

شکل ۲- روندنما روش RDM

همانطور که از جدول ۱ مشاهده می‌شود، سناریو q_i برای تمامی حالات نمایش داده شده در رابطه ۱ به صورت گسسته مورد شبیه‌سازی و ارزیابی قرار خواهد گرفت:

ج) *شناسایی بخش‌های آسیب‌پذیر*: هدف اصلی این مرحله، شناسایی بخش‌هایی از فضای عدم قطعیت می‌باشد که سیاست مورد نظر (q_i) عملکرد مناسبی را در آن به همراه ندارد. برای شناسایی بخش‌های آسیب‌پذیر، ابتدا لازم است عملکرد سیاست مورد نظر در تمامی سناریوهای محتمل ارزیابی و مشخص گردد که آیا این عملکرد در محدوده مناسب قرار دارد یا خیر؟ پس از انجام طبقه‌بندی سناریوها، لازم است از یک روش خوشه‌بندی برای استخراج محدوده‌های آسیب‌پذیر استفاده شود. برای این منظور Lempert et al. (2006) روش خوشه‌بندی PRIM[11] که توسط Friedman and Fisher (1999) توسعه داده شده بود را پیشنهاد نمودند که در بخش بعدی به تفضیل به آن پرداخته می‌شود.

د) *اصلاح سیاست*: در این مرحله با شناسایی محدوده‌های آسیب‌پذیر، سیاست‌های جدیدی تعریف می‌گردد. به نحوی که این سیاست‌ها در طیف وسیع‌تری از سناریوهای محتمل، دارای عملکرد مناسب باشند. پس از تعریف این سیاست‌ها روند تحلیل‌ها به گام دوم بازمی‌گردد. این حلقه تا زمانی تکرار می‌شود که استوارترین سیاست‌ها شناسایی شوند.

ه) *توصیف مشخصات عدم قطعیت‌های باقیمانده*: از آنجایی که ممکن است در نهایت نتوان سیاستی را پیدا کرد که در حالات محتمل آتی بدون شکست باشد، لذا لازم است که نقاط ضعف سیاست‌های منتخب و برای تصمیم‌گیران به نحو مطلوبی توصیف شوند.

- الگوریتم PRIM

همانطور که بیان گردید، از جمله روش‌های رایجی که به منظور شناسایی فضای آسیب‌پذیر (طبقه بندی فضای عدم قطعیت به دو دسته شکست و موفقیت) مورد استفاده قرار می‌گیرد، الگوریتم PRIM می‌باشد (Friedman et al., 2001). در این الگوریتم فضای آسیب‌پذیر توسط جعبه‌هایی[12] که با توجه به معیارهای شایستگی[13] مورد ارزیابی قرار می‌گیرند، توصیف می‌شوند. به عبارتی این الگوریتم نقاط شکست شناسایی شده را در داخل جعبه‌هایی قرار می‌دهد که محدوده تغییرات وجه‌های آن، نشان‌دهنده بازه‌هایی است که راهبرد مورد نظر در آن با شکست مواجه خواهد شد.

جهت توصیف بهتر فضای آسیب‌پذیر به منظور کمک به فرآیند تصمیم‌گیری، جعبه‌ها به شکلی انتخاب می‌شوند که تعداد بالایی از نقاط مورد نظر (تعداد سناریوهای شکست) را در خود داشته باشند (پوشش[14] بالا). البته می‌بایست نسبت شکست در آنها از کل نقاط داخل جعبه بیشتر باشد (تراکم[15] بالا) تا جعبه کارکرد خود را داشته و در عین حال هم قابل تفسیر[16] نیز باشد. این سه ویژگی را می‌توان بصورت زیر تعریف نمود:

- معیار پوشش که عبارتست از درصد نقاط شکست (I_s) که توسط جعبه B پوشش داده شده‌اند. به عبارتی این معیار برابر است با نسبت تعداد کل نقاط مورد نظر (شکست یا موفقیت) در جعبه B به تعداد نقاط مورد نظر در کل فضای عدم قطعیت که می‌توان آن را با رابطه ۲ بصورت ریاضی نمایش داد:

$$\text{Coverage}=\frac{\sum_{x_i\in B} y_i'}{\sum_{x_i\in x^I} y_i'} \text{ where } y_i'=1|\text{if } x_i \in I_s \quad \text{and } y_i'=0 \text{ otherwise.} \qquad (۲)$$

- معیار تراکم بصورت نسبت کل نقاط شکست جعبه به تعداد کل نقاط جعبه B بیان می‌شود و با استفاده از رابطه زیر تعریف می‌گردد:

$$\text{Density}=\frac{\sum_{x_i\in B} y_i'}{\sum_{x_i\in B} 1} \qquad (۳)$$

- معیار قابلیت تفسیر پذیر بودن سهولت را نشان می‌دهد. بدین‌معنا که تصمیم‌گیرندگان تا چه میزان می‌توانند یک مجموعه جعبه را درک کرده و از آن به منظور تسهیل فرآیند تصمیم‌گیری استفاده کنند. این معیار ذهنی است، اما با این وجود می‌توان آن را با گزارش تعداد جعبه‌ها و یا حداکثر تعداد پارامترهایی از ورودی مدل (پارامترهای غیر قطعی) که جعبه توسط آنها توصیف می‌گردد، کمی نمود.

۲-۲-۳- سناریوهای اقلیمی

در این پژوهش به منظور تعیین محدوده تغییرات اقلیمی آینده از اطلاعات پیش‌نویس گزارش سوم تغییرات آب و هوایی ایران[17] (۲۰۱۷) و Mansouri et al. (2014) که برای حوضه زرینه‌رود بوده، استفاده گردید. در مرجع اول (گزارش سوم تغییرات آب و هوایی ایران) به منظور مدیریت عدم قطعیت‌های موجود در مدل‌های گردش عمومی جو، بیش از ۱۵ مدل و سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای استفاده و تغییرات دما و بارش برای سال های ۲۰۲۰، ۲۰۳۵ و ۲۰۵۰ بررسی شده است. طبق نتایج حاصل، متوسط دراز مدت دمای حداقل سالانه در کل کشور در تمام نقاط افزایش خواهد یافت. بگونه‌ای که دما در شمال غربی کشور (محدوده حوضه زرینه‌رود) افزایشی تا حدود ۰/۸ درجه سانتی‌گراد را تا ۲۰۵۰ تجربه خواهد کرد. به همین ترتیب، میانگین درازمدت بارش سالانه بخش‌هایی از شمال غرب کاهش ۱۰ درصدی را نسبت به دوره پایه خواهد داشت. در مرجع دوم (Mansouri et al., 2014) که فقط روی این حوضه بود، افزایش دما تا ۱/۷۳ و کاهش بارش تا ۷/۲۴- درصد گزارش شده است. البته

گذشته از طی ۳ سال اخیر، حوضه دریاچه ارومیه بعد از دهه ۲۰۰۰ میلادی کاهش‌های بیشتری از بارندگی را شاهد بوده، هرچند این تغییرات الزاماً تغییر اقلیم نیستند و می‌توان آن را به تغییرپذیری اقلیم نسبت داد. به عنوان نمونه Farokhnia and Morid (2013) نشان دادند که بین دوره ۱۹۹۸-۱۹۸۸ و ۲۰۰۹-۱۹۹۹، میانگین بارندگی‌های حوضه حدود ۲۰ درصد کاهش یافته است. نهایتاً، در این پژوهش جهت ارزیابی بهتر آینده‌های محتمل اقلیمی، بازه عدم قطعیت تغییرات میانگین دمای آینده بین ۰ تا ۴ درجه سانتیگراد و تغییرات میانگین بارش از ۳۰٪- تا ۱۵٪+ در نظر گرفته شده که در این مطالعات مرسوم می‌باشد، مانند آنچه در تحقیق Jones (2000) قابل مشاهده است.

۲-۲-۴- معیارها و آستانه‌های کارکردهای مدیریتی

در روش‌شناسی این تحقیق، آستانه‌های شکست یا موفقیت یک تصمیم است، بسیار اهمیت دارند. بدین منظور، متغیرهایی در دوره پایه مبنا قرار داده شدندکه شامل میانگین و ضریب تغییرات آنها هستند. بدین معنا که به عنوان مثال، اگر میانگین ورودی رودخانه زرینه‌رود به دریاچه ارومیه در دوره آتی از میانگین دوره پایه بیشتر شود، موفقیت و در غیر این‌صورت شکست خواهد بود. متغیرها و شاخص‌های ارزیابی که در این مرحله انتخاب شدند به همراه آستانه موفقیت عملکرد آنها در جدول ۲ آورده شده است.

۲-۲-۵- چارچوب بسته نرم‌افزاری توسعه یافته (SRDM)

برای محاسبات چارچوب روش‌شناسی فوق که محاسبات زیادی را همراه داشت، بسته نرم‌افزاری SRDM در محیط MATLAB توسعه داده شد که فلوچارت آن در شکل ۳ قابل مشاهده است. این بسته از سه زیر مدل جداگانه تشکیل شده که عبارتند از:

۱) Pre Processing (پیش پردازش): تشکیل و تقسیم‌بندی فضای عدم قطعیت و تولید سناریوهای اقلیمی،

۲) Processing (پردازش): اعمال سناریوهای اقلیمی تولید شده در زیر مدل Pre Processing در فایل‌های ورودی مدل SWAT (input*.sub)، اجرای برخط مدل SWAT به ازای هر سناریو در کل دوره شبیه‌سازی و ذخیره فایل‌های متنی خروجی هر سناریو در دایرکتوری‌های مستقل،

۳) Post Processing (پس پردازش)،

- Data Classification (طبقه‌بندی اطلاعات): طبقه‌بندی اطلاعات فایل‌های خروجی مدل SWAT متناسب با محتوای اطلاعات هر یک از فایل‌ها به تفکیک سال، کاربری و زیرحوضه در سناریوهای اقلیمی مختلف،
- Plot Data (ترسیم نمودار): محاسبه شاخص‌های عملکردی و ترسیم اشکال و منحنی‌های لازم در کل فضای عدم قطعیت (مانند شکل ۴)

Table 2- Strategies evaluation index

جدول ۲- متغیرها و شاخص‌های ارزیابی راهبردها

Index	Successfully
Inflow to lake in BAU respected to climate conditions	>1
Changing in groundwater volume in BAU respected to climate conditions	<1
Evapotranspiration in natural lands in BAU respected to climate conditions	>1
Evapotranspiration in Agricultural lands in BAU respected to climate conditions	<1
Crop yield in BAU respected to climate conditions	>1

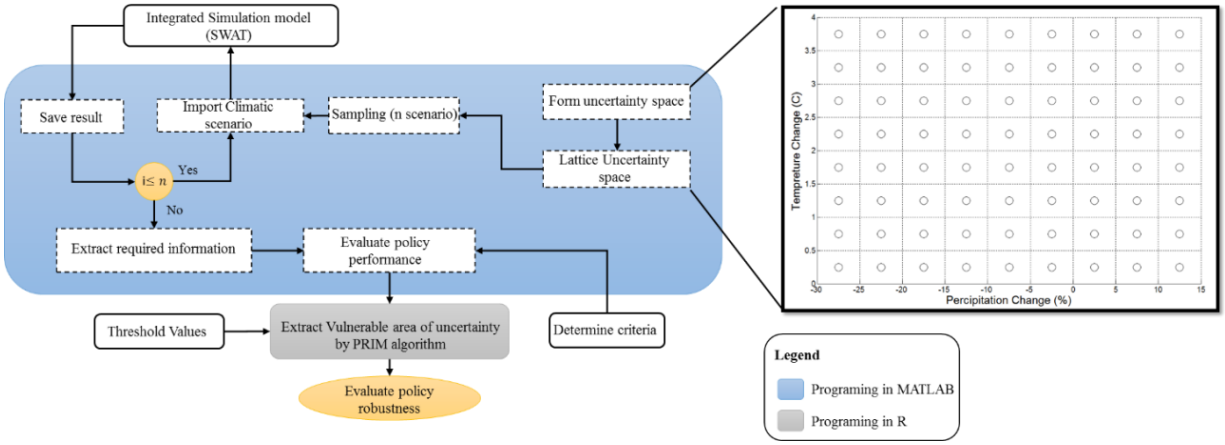

Fig. 3- Devoloped model framework

شکل ۳- چارچوب مدل توسعه یافته

۳- نتایج و تحلیل نتایج

این قسمت به ارائه نتایج تحقیق براساس روش‌شناسی و مدل توسعه یافته (SRDM) که در بالا تشریح شد، می‌پردازد. یادآوری می‌گردد که با استفاده از این ابزار، مدل SWAT برای فضای تولید شده از سناریوهای اقلیمی اجرا می‌شود و سپس متغیرهای مورد نظر برای محاسبه معیارهای ارزیابی استخراج می‌گردند تا کارکرد آنها، در سناریوهای مختلف ارزیابی شود. در این خصوص "موفقیت" یعنی حفظ عملکرد سامانه (مساوی و بیشتر) در دوره پایه (از سال ۱۹۸۷ تا سال ۲۰۰۷) و "شکست" یعنی عدم توانایی آن در حفظ کارکرد قبل (مانند شکل ۴). متعاقباً محدوده مناطق آسیب‌پذیر اقلیمی با استفاده از الگوریتم PRIM، بصورت جعبه (مستطیل)هایی شناسایی می‌کند که برای ترسیم آنها محدوده‌هایی از هر متغیر غیرقطعی (مختصات چهار گوشه مستطیل) را به عنوان خروجی معرفی می‌کند.

۳-۱- ارزیابی شاخص‌ها

۳-۱-۱- حجم آب ورودی به دریاچه ارومیه

همانگونه که آمد، این معیار شاخصی برای امکان تأمین حقابه محیط‌زیستی حوضه تحت شرایط اقلیمی جدید می‌باشد. در شکل ۴ نتایج ارزیابی راهبرد مدیریت جاری حوضه (BAU)[۱۸] براساس متوسط سالانه حجم آبی که تحت سناریوهای مختلف اقلیمی به دریاچه وارد می‌شود را نشان می‌دهد. متذکر می‌گردد که دایره‌های سفید و مشکی به ترتیب مبین کارکرد موفق و شکست راهبرد می‌باشند (جدول ۲). بدین معنا که تمامی مقادیری که به ازای سناریوهای مختلف اقلیمی برای حجم سالانه ورودی به دریاچه بدست آمده، با تقسیم بر میانگین بلند مدت سالانه دوره پایه (برابر ۱۲۹۳/۲۷ میلیون متر مکعب مستند به آمار ایستگاه نظام آبسنجی نظام‌آباد) بی‌بعد شده‌اند. در ادامه سناریوهایی که نسبت آنها مساوی و یا بزرگتر از یک بود، به عنوان سناریوهای موفق (دایره‌های سفید رنگ) و ناموفق (کمتر از یک) با دایره‌های مشکی رنگ شناسایی شدند (شکل ۴). همانطور که ملاحظه می‌گردد، در اکثریت سناریوهای اقلیمی، سامانه از منظر این شاخص شکست می‌خورد. همچنین روند تغییرات نشان می‌دهد که تأثیر تغییرات بارش بر این معیار به مراتب بیشتر از تأثیر تغییرات دمایی می‌باشد.

۳-۲-۲- تغییرات حجم آب زیرزمینی

شکل ۵، نتایج ارزیابی راهبرد BAU تحت سناریوهای مختلف اقلیمی بر میزان تغییرات حجم آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌گردد، میزان تغییرات حجم آب زیرزمینی تحت تأثیر افزایش میانگین بارش، کاهش می‌یابد. مانند قبل، روند تغییرات نشان می‌دهد که بارندگی عامل مؤثر بوده است. همچنین به منظور ارزیابی سناریوهای تغییر اقلیم، تمامی مقادیری که به ازای سناریوهای مختلف اقلیمی برای میانگین تغییرات سالانه حجم آب زیرزمینی به دست آورده شد، با تقسیم بر میانگین بلند مدت سالانه سناریو پایه (۸۶/۶۸- میلیون متر مکعب براساس نتایج مدل واسنجی شده)، بی‌بعد گردید و مانند قبل ارزیابی شد (شکل ۵). همانطور که ملاحظه می‌گردد در اکثریت سناریوهای اقلیمی، سامانه تحت وضعیت نامناسبی قرار می‌گیرد و تنها تحت شرایط افزایش بارش می‌تواند از آن انتظار موفقیت داشت.

۳-۲-۳- ارزیابی تبخیر و تعرق واقعی در اراضی طبیعی

این بخش تبخیر و تعرق واقعی در سطح اراضی طبیعی را پوشش می‌دهد. این مقدار، متغیری تأثیرگذار در بیلان آبی حوضه آبریز می‌باشد. از طرفی نیز تغییرات آن می‌تواند گویای حفظ اکولوژی حوضه بخصوص در آبخیز و مراتع باشد.

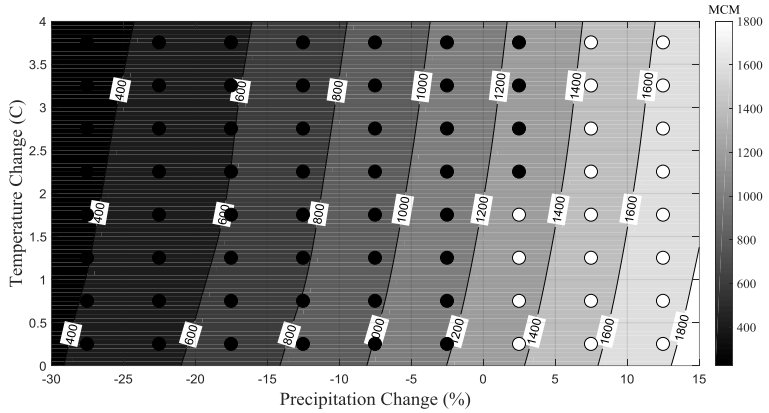

Fig. 4- Lake inflow under climate scenarios

شکل ۴- حجم آب ورودی به دریاچه تحت سناریوهای اقلیمی

شکل ۶ میانگین تبخیر و تعرق اراضی طبیعی طی دوره شبیه‌سازی را تحت سناریوهای مختلف اقلیمی نشان می‌دهد (میانگین سالانه دوره پایه برابر ۲۶۰۸/۷۵ میلیون متر مکعب براساس نتایج مدل). با توجه به شکل و همانطور که انتظار می‌رفت، از تبخیر و تعرق واقعی همزمان با کاهش بارش کاسته شده و با افزایش بارش این میزان بیشتر می‌شود. همچنین ملاحظه می‌گردد که تأثیر تغییرات دما نسبت به تأثیر تغییرات بارش بر روی تبخیر و تعرق واقعی کمتر بوده است.

۳-۲-۴- تبخیر و تعرق واقعی در اراضی کشاورزی

این قسمت صرفاً بر تبخیر و تعرق از اراضی کشاورزی تمرکز دارد که مطابق آنچه آمد، شامل محصولات کشاورزی غالب یعنی: گندم، جو، سیب زمینی، گوجه، چغندرقند، یونجه و سیب درختی می‌شود که اطلاعات دقیق سطح زیر کشت و عملکرد این محصولات در مرجع Ahmadzadeh et al. (2016) قابل دسترس است. بالتبع این بخش شامل اراضی است که آبیاری می‌شوند و نوسانات آن بر عملکرد و متعاقباً بر اقتصاد حوضه اثرگذار می‌باشد. تبخیر و تعرق واقعی در اراضی کشاورزی منطقه روندی همانند روند تغییرات تبخیر و تعرق واقعی کل حوضه داشته که بطور مستقیم متأثر از تغییرات بارش می‌باشد (شکل ۷). با شناسایی نقاط موفقیت و شکست، ملاحظه می‌گردد که در اکثریت سناریوهای اقلیمی، میزان تبخیر و تعرق نسبت به سناریو پایه بیشتر بوده است (میانگین سالانه دوره پایه برابر ۵۰۷/۲۲ میلیون متر مکعب می‌باشد). البته در کلان مسأله نمی‌توان کاهش این متغیر را بطور مطلق به منزله شکست سامانه تلقی نمود، زیرا انتظار است که با افزایش بهره‌وری آب، عملکردهای مشابهی با کاهش مصرف آب را شاهد بود.

۳-۲-۵- عملکرد محصولات براساس تولید کالری گیاهی

میزان عملکرد محصولات کشاورزی حوضه در شکل ۸ قابل مشاهده می‌باشد. بدین ترتیب که تناژ محصولات در هر سناریو اقلیمی در میزان کیلوکالری آنها ضرب شده است تا امکان تجمیع عملکرد محصولات مختلف فراهم گردد. ملاحظه می‌شود، تنها در بخش‌هایی از سناریوهای اقلیمی می‌توان انتظار افزایش عملکرد را داشت (عمدتاً بدلیل افزایش واحد حرارتی[۱۹]) که آن هم به قیمت کاسته شدن از ورودی‌های دریاچه می‌باشد.

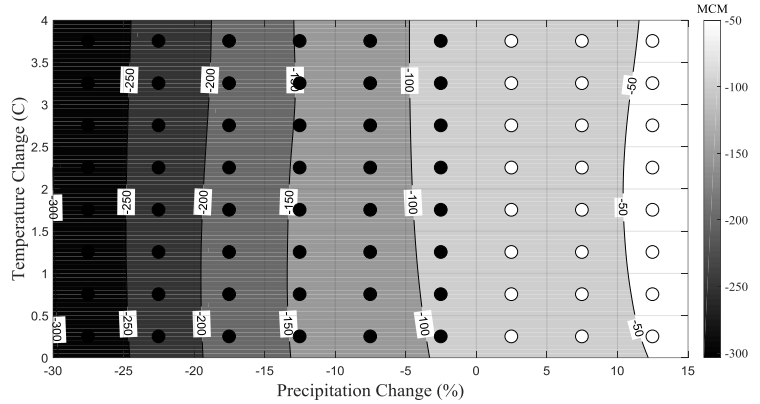

Fig. 5- Changing in groundwater volume under climate scenarios

شکل ۵- تغییرات حجم آب زیرزمینی تحت سناریوهای اقلیمی مختلف

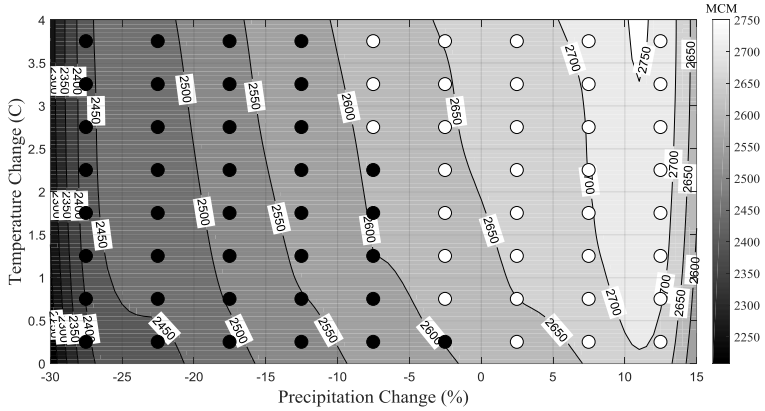

Fig. 6- Evapotranspiration in natural lands under climate scenarios

شکل ۶- تبخیر و تعرق واقعی اراضی طبیعی تحت سناریوهای اقلیمی مختلف

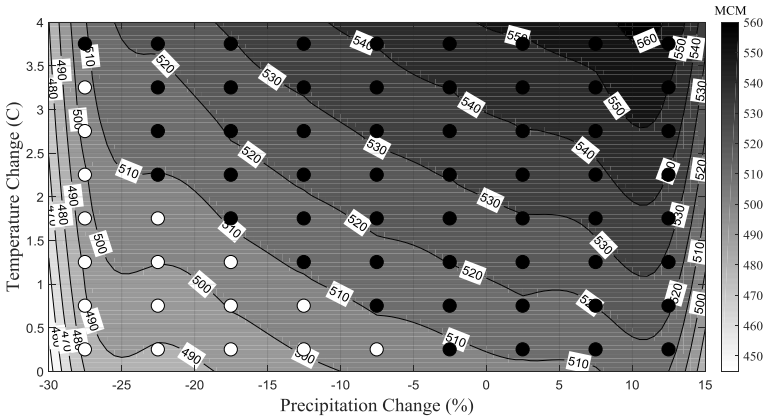

Fig. 7- Evapotranspiration in agricultural lands under climate scenarios

شکل ۷- تبخیر و تعرق اراضی کشاورزی تحت سناریوهای اقلیمی مختلف

شکل ۸ نشان می‌دهد که در اکثریت سناریوهای اقلیمی، میزان عملکرد نسبت به سناریو پایه کمتر می‌گردد. البته ملاحظه می‌گردد که در بخشی از این شکل با کاهش بارش و افزایش محدود دما (تا ۱ درجه سانتی گراد) سیستم برخلاف انتظار موفق عمل کرده‌است. اما، لازم به توضیح است که این میزان افزایش تنها حدود ۱٪ است که می‌تواند ناشی از شرایط مطلوب‌تر دمایی برای گندم و جو باشد که سطح قالب حدود ۵۰٪ سطح اراضی فاریاب را دارد و نهایتاً موجب افزایش نسبی تولید کل کالری در حوضه می‌شود.

۳-۲-۶- ارزیابی محدوده‌های آسیب‌پذیر براساس الگوریتم PRIM

موقعیت (Box) مناطق آسیب‌پذیر اقلیمی برای مدیریت فعلی حوضه در جدول ۳ قابل ملاحظه می‌باشد. جدول ۳ برای سه شاخص مورد استفاده، نشان می‌دهد که در کدام محدوده اقلیمی سامانه شکست خورده است. ملاحظه می‌شود که معیار تبخیر و تعرق از اراضی کشاورزی کمترین و عملکرد محصولات کشاورزی (کالری تولیدی) بیشترین آسیب‌پذیری را از تغییر اقلیم خواهد داشت.

۳-۲-۷- ارزیابی همزمان پارامترها

در قسمت‌های قبل به بررسی "موفقیت" و "شکست" سناریوهای مختلف اقلیمی توسط شاخص‌های مربوط برای ارزیابی عملکرد سامانه پرداخته شد، در اینجا تلاش بر این است تا بتوان همه شاخص‌ها را همزمان ارزیابی و به عبارتی آنها را تجمیع نمود. بدین منظور مجموع تعداد شکست همه پارامترها، برای هر سناریو محاسبه گردید، رویکردی که در طرح ESPON برای ارزیابی خطر و ریسک مخاطرات طبیعی و انسانی در کشورهای اتحادیه اروپا نیز استفاده شد (Bengs and Schmidt-Thomé, 2006). در شکل ۹ مجموع این شکست‌ها برای هر سناریوی اقلیمی بصورت نمودار میله‌ای نمایش داده شده که در آن ارتفاع و رنگ میله‌ها نماینده تعداد شکست‌ها می‌باشد. متذکر می‌گردد که در این شکل، وزن شاخص‌ها ثابت فرض شده (ارزش یکسان)، ولی این امکان نیز وجود دارد تا این تغییرات را براساس وزن‌های متفاوت نیز نشان داد.

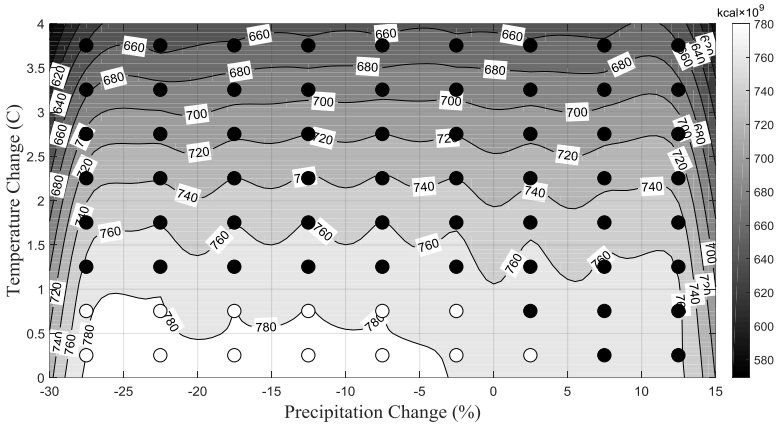

Fig. 8- Crop yield under climate scenarios

شکل ۸- عملکرد محصولات تحت سناریوهای اقلیمی مختلف

Table 3- Extract vulnerable space using PRIM algorithm

جدول ۳- استخراج محدوده‌های آسیب‌پذیر با استفاده از الگوریتم PRIM

Box properties			Vulnerable space							
Coverage	Density	Number of Failed Scenarios in box	Temperature changes(C)		Rain changes (%)		Box NO.	Number of failed Scenario	Total number of Scenarios	Evaluation index
			Upper limit	Lower limit	Upper limit	Lower limit				
0.9231	1	48	4	0	0	-30	box 1	52	72	Inflow to lake
0.0769	1	4	4	2	5	0	box 2			
1	1	48	4	0	0	-30	box 1	52	72	Changing in groundwater volume
0.8421	1	32	4	0	-10	-30	box 1	38	72	Evapotranspiration in natural lands
0.1316	1	5	2.5	0	-5	-10	box 2			
0.0263	1	1	0.5	0	0	-5	box 3			
0.582	1	32	4	0	15	-5	box 1	55	72	Evapotranspiration in Agricultural lands
0.291	1	16	4	2	-5	-25	box 2			
0.073	1	4	2	1	-5	-15	box 3			
0.018	1	1	1	0.5	-5	-10	box 4			
0.018	1	1	2	1.5	-15	-20	box 5			
0.018	1	1	4	3.5	-25	-30	box 6			
0.915	1	54	4	1	15	-30	box 1	59	72	Crop yield
0.068	1	4	1	0	15	5	box 2			
0.017	1	1	1	0.5	5	0	box 3			

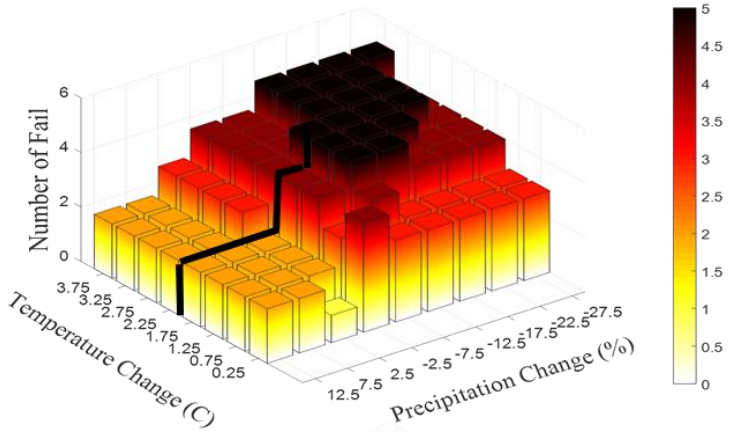

Fig. 9- Bar diagram of aggregate fails of index in each scenario

شکل ۹- نمودار میله‌ای مجموع شکست شاخص‌ها در هر سناریو

آنچه که در شکل ۹ آمده نشان می‌دهد که مدیریت فعلی نمی‌تواند، حوضه را برای این پدیده سازگاری نماید. البته محدوده تغییرات شاید بخصوص برای دمای بالا باشد. از طرفی نیز عزم جهانی برای کنترل افزایش دما تا ۲ درجه سانتیگراد است (COP21, 2016). حتی با نگاه به بخشی که کمتر از این مقدار است (با خط سیاه در شکل ۹ تفکیک شده است)، همچنان مدیریت فعلی (BAU) در تمامی شرایط، نمی‌تواند به عنوان راهبردی مؤثر برای سازگاری با تغییر اقلیم مورد توجه قرار گیرد.

۴- خلاصه و جمع‌بندی

مقاله حاضر بخشی از تلاشی بود برای ارائه روش‌شناسی در ارزیابی اقدامات سازگاری با تغییر اقلیم که در این بخش، ظرفیت مدیریت فعلی حوضه آبریز زرینه‌رود به عنوان سیاست پایه در سازگاری مورد بررسی قرار گرفت. روش‌شناسی تحقیق براساس رویکرد RDM و اتصال آن به یک مدل مفهومی (SWAT) تعریف شد که در شرایط عدم قطعیت عمیق، می‌تواند استواری راهبردهای مدیریت آب و کشاورزی را مورد ارزیابی قرار دهد. چارچوب و مدل توسعه یافته براساس آن از انعطاف‌پذیری بالایی برخودار است. بطوریکه امکان تعریف سناریوهای مختلف اقلیمی و مدیریتی (با استفاده از امکانات موجود در مدل SWAT) در آن مهیا بود. به علاوه امکان استخراج شاخص‌های خاص که در خروجی‌های معمول SWAT وجود ندارند نیز در آن میسر می‌باشد. امکانات گرافیکی و ترسیم محدوده‌های آسیب‌پذیری در آن نیز فضای شکست و موفقیت راهبردها را بطور مناسبی نمایش می‌دهد.

در ادامه ارزیابی مدیریت فعلی حوضه (BAU) براساس شاخص‌های مورد استفاده و محدوده بازه سناریوهای اقلیمی نشان داد که: ۱) ورودی به دریاچه ارومیه به عنوان معیاری برای کارکرد محیطزیستی حوضه در اکثریت سناریوهای اقلیمی با شکست مواجه خواهد بود، بخصوص حساسیت آن به کاهش بارش زیاد است، ۲) تبخیر و تعرق اراضی کشاورزی که مبین عملکرد و محصول می‌باشد، نشان داد که در اکثر سناریوها میزان تبخیر و تعرق نسبت به سناریو پایه بیشتر می‌شود. این افزایش برای تأمین آب کشاورزی خواهد بود، ولی تبعات آن متوجه ورودی‌ها به دریاچه و کاهش آب تخصیصی به آن را خواهد داشت، ۳) در بیشتر سناریوهای اقلیمی، میزان عملکرد محصولات کشاورزی نسبت به سناریو پایه کمتر می‌گردد و تنها در بخش‌هایی از سناریوهای اقلیمی می‌توان انتظار افزایش عملکرد (عمدتاً بدلیل افزایش واحد حرارتی) را داشت که آن همانند بند قبل، منجر به کاسته شدن از ورودی‌های به دریاچه می‌شود و ۴) شدت آسیب‌پذیری عرصه‌های طبیعی (مانند مراتع و دیم) افزایش یافته و وضعیت آن مانند گذشته نخواهد بود. نهایتاً با توجه به موارد فوق و تجمیع شاخص‌ها، نتایج نشان داد که سامانه حوضه زرینه‌رود با مدیریت فعلی نیاز به بازنگری جدی دارد و راه‌کارهایی برای سازگاری باید اتخاذ شود (مانند کاهش سطح زیر کشت، تغییر الگوی کشت، کم آبیاری، تغییر تاریخ کشت و غیره) که انجام آن در دستور کار ادامه این تحقیق می‌باشد.

پی‌نوشت‌ها

1- Expected Utility Theory
2-Subjective Expected Utility Theory
3-Deep Uncertainty
4- General Circulation Model
5- Robustness
6- Robust Decision Making
7- Soil and Water Assessment Tool
8- Organization for Economic Cooperation and Development
9- Hydrologic Response Units
10- Clustering
11- Patient Rule Induction Method
12- Box
13- Measures of Merit
14- Coverage
15- Density
16- Interpretability
17- Iran Third National Communication to UNFCCC
18- Business As Usual
19- Heat Unit

۵- مراجع

Ahmadzadeh H, Morid S, Delavar M and Srinivasan R (2016) Using the SWAT model to assess the impacts of changing irrigation from surface to pressurized systems on water productivity and water saving in the Zarrineh Rud catchment. Agricultural Water Management 175:15-28

Ahmadzadeh H (2012) Assessment of agricultural water productivity using SWAT model: A case study on Zarrinehrud basin. M.Sc Thesis, University of Tarbiat Modares (In Persian)

Arnold JG, Allen PM and Bernhardt G (1993) A comprehensive surface-groundwater flow model. Journal of hydrology 142(1-4):47-69

Bengs C and Schmidt-Thomé K (2006) Urban-rural relations in Europe. EPSON Final Report: 482

Farokhnia A and Morid S (2013) Assessment of the effects of temperature and precipitation variations on the trend of river flows in Urmia Lake Watershed. Journal oh Water and Wastewater 25(3):86-97

Friedman J, Hastie T and Tibshirani R (2001) The elements of statistical learning (Vol. 1): Springer series in statistics. Springer, Berlin

Friedman JH and Fisher NI (1999) Bump hunting in high-dimensional data. Statistics and Computing 9(2):123-143

Gosain A, Rao S, and Basuray D (2006) Climate change impact assessment on hydrology of Indian River basins. Current Science 90(3):346-353

Groves DG and Lempert RJ (2007) A new analytic method for finding policy-relevant scenarios. Global Environmental Change 17(1):73-85

Hall JW, Lempert RJ, Keller K, Hackbarth A, Mijere C and McInerney DJ (2012) Robust climate policies under uncertainty: a comparison of robust decision making and info-gap methods. Risk Analysis 32(10):1657-1672

International Climate Talks- COP 21 (2016) http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php

Jones RN (2000) Analysing the risk of climate change using an irrigation demand model. Climate Research 14(2):89-100

Lempert RJ and Groves DG (2010) Identifying and evaluating robust adaptive policy responses to climate change for water management agencies in the American west. Technological Forecasting and Social Change 77(6):960-974

Lempert RJ, Groves DG, Popper SW, and Bankes SC (2006) A general, analytic method for generating

Savage L (1954) The foundations of statistics. Dover Publications, 1972 Reprint

Von Neumann J and Morgenstern O (1947) Theory of games and economic behavior. 2nd Revision, Princeton University Press

Walker WE, Haasnoot M and Kwakkel JH (2013) Adapt or perish: a review of planning approaches for adaptation under deep uncertainty. Sustainability 5(3):955-979

Wilby RL and Dessai S (2010) Robust adaptation to climate change. Weather 65(7):180-185

Zaman MR, Morid S, and Delavar M (2016) Evaluating climate adaptation strategies on agricultural production in the Siminehrud catchment and inflow into Lake Urmia, Iran using SWAT within an OECD framework. Agricultural Systems 147:98-110

robust strategies and narrative scenarios. Management Science 52(4):514-528

Mansouri B, Ahmadzadeh H, Massah Bavani A, Morid S, Delavar M, and Lotfi S (2014) Assessment of climate change impacts on water resources in Zarrinehrud Basin using SWAT model, Journal of Water and Soil 28(6):1191-1203 (In Persian)

Matrosov E, Padula S and Harou JJ (2013) Selecting portfolios of water supply and demand management strategies under uncertainty-contrasting economic optimization and 'robust decision making' approaches. Water Resources Management 27(4):1123-1148

Prutsch A, Grothmann T, Schauser I, Otto S, and McCallum S (2010) Guiding principles for adaptation to climate change in Europe. European Environment Agency ETC/ACC Technical Paper, 6