



## Application of Simulation-Optimization Approaches to Assess the Effect of Climate and Management Scenarios on a Water Resource System

S. Zeinoddini<sup>1</sup>, S. Anvari<sup>2\*</sup> and Z. Zahmatkesh<sup>3</sup>

### Abstract

Optimal allocation of water resources for supply and demand management with respect to effects of the climate change on water systems is essential. The purpose of this study is to simulate and optimize various components of Aharchay water system under the climate change conditions and to evaluate different climate and management scenarios. The effect of climate change on weather variables is investigated using the outputs of GCMs under A1B, A2 and B1 scenarios. For the period of 2011-2030 in the study area results showed a decrease in rainfall and an increase in minimum and maximum temperatures. For estimation of the inflow to Sattarkhan dam reservoir during the period of 2015-2025, the IHACRES model is used. Results for R2 and RMSE criteria were obtained respectively as 0.65 and 1.21 for the calibration stage and 0.56 and 1.4 for the validation stage. Moreover, to estimate the water requirement under the climate change condition, evapotranspiration (ET) are calculated by CropWat model. For demand management in agricultural sector, optimization of soil and water allocation is carried out through linear and non-linear programming models (LP, NLP) considering plants' growth stage and its sensitivity to water stress. Water balance in the reservoir was simulated by WEAP under climate change scenarios aiming at allocating water to demand nodes. Considering the climate and management scenarios, the best option is then identified by AHP and the associated weights are calculated. Results demonstrated the use of optimal cultivating levels, new irrigation method and reducing per capita of the drinking water was selected as the best management scenario with the highest values of temporal and spatial reliability.

**Keywords:** Rainfall-Runoff, Climate Change, IHACRES, CropWat, WEAP.

Received: January 7, 2018

Accepted: September 9, 2018

## کاربرد رویکردهای شبیه‌سازی- بهینه‌سازی جهت ارزیابی گزینه‌های مختلف اقلیمی و مدیریتی در یک سامانه منابع آب

سمیرا زین‌الدینی<sup>۱</sup>، صدیقه انوری<sup>۲\*</sup> و زهرا زحمتکش<sup>۳</sup>

### چکیده

تخصیص بهینه منابع آب جهت مدیریت عرضه و تقاضا و بررسی تأثیر پدیده تغییر اقلیم بر سامانه‌های آبی امری ضروریست. هدف تحقیق، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی مؤلفه‌های سامانه آبی اهرچای تحت شرایط تغییر اقلیم و ارزیابی سناریوهای مختلف اقلیمی و مدیریتی جهت تصمیم‌گیری است. ابتدا اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای هواشناسی با مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) تحت سناریوهای A1B، A2 و B1 بررسی می‌گردد. نتایج این مدل تحت سناریوهای نامبرده برای سال‌های ۲۰۱۱-۲۰۳۰ حاکی از کاهش بارندگی و افزایش دما می‌باشد. برای برآورد جریان ورودی به مخزن سد ستارخان طی سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۲۵ از مدل شبیه‌ساز بارش-رواناب HACRES استفاده گردید که با داشتن R<sup>2</sup> و RMSE برابر با ۰/۶۵ و ۱/۲ در مرحله واسنجی و ۰/۵۶ و ۱/۴ برای صحت‌سنجی، عملکرد قابل قبولی داشته‌اند. برای تخمین نیاز آبی محصولات در دوره تغییر اقلیم از مدل CropWat استفاده شد. برای اعمال مدیریت تقاضای کشاورزی، تخصیص بهینه منابع آب و خاک با زیر مدل‌هایی از نوع برنامه‌ریزی خطی و غیر خطی (LP, NLP) به نحوی انجام شد که مراحل رشد گیاهان و حساسیت آن‌ها به تنش‌های آبی لحاظ شود. تغییرات بیان آبی مخزن جهت تخصیص در گره‌های مصرف با مدل WEAP بررسی شد. برای شناسایی آثار تغییر اقلیم و پاسخ سیستم به تغییرات عرضه و تقاضا، سناریوهای گوناگون اقلیمی و مدیریتی تعریف شد. با اعمال وزن‌های حاصل از مدل AHP و مقادیر شاخص پایداری برای سناریوها، استفاده از سطوح کشت بهینه، روش آبیاری نوین و کاهش مصرف سرانه شرب به عنوان بهترین گزینه مدیریتی معرفی شد که بیشترین مقدار اعتمادپذیری کمی و زمانی را به همراه داشت.

**کلمات کلیدی:** بارش-رواناب، تغییر اقلیم، مدل WEAP، مدل IHACRES.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۶/۱۸

1- M.Sc. Graduate in Water Resources Management and Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.

2- Assistant Prof., Department of Ecology, Faculty of Environmental Science, Institute of Science and High Technology and Environmental Science, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran. Email: Anvari.t@gmail.com; s.anvari@kgut.ac.ir

3- Visiting Professor at Department of Water Resources Management, Faculty of Civil Engineer, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.

\*- Corresponding Author

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، گروه مهندسی عمران، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران.

۲- هیات علمی گروه اکولوژی، پژوهشکده علوم محیطی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران.

۳- استادیار مدعو گروه مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران.

\*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

LARS-WG (2016) با استفاده از دو مدل ریزمقیاس‌نمایی IHACRES و SDSM سری زمانی رواناب را با استفاده از مدل‌های IHACRES و HEC-HMS را بدست آوردند و محدوده تغییرات آنرا در منطقه مشخص کردند که نشان داد مدل HEC-HMS نمی‌تواند معرف واقعی رواناب باشد در حالی که در مدل IHACRES نوسانات بارندگی و در نهایت رواناب در دوره آبی بخوبی شبیه‌سازی خواهد شد. همچنین Ramak et al. (2017) در بررسی احتمال وقوع بارش حداکثر در حوضه رودخانه کارون در محل پل شالو از مدل LARS-WG برای شبیه‌سازی بارش آینده استفاده کردند و اثر تغییر اقلیم بر PMP را تحت سه سناریو A1B، A2 و B1 مورد ارزیابی قرار دادند. (2018) Farmanbar با استفاده از روش ارزیابی ریسک منطقه‌ای (RRA<sup>5</sup>)، اثرات تغییر اقلیم را بر سامانه منابع آب حوضه دریاچه زریبار بررسی کردند. در این راستا از مدل واسنجی شده SWAT برای شبیه‌سازی حوضه در شرایط تغییر اقلیم استفاده گردید که نتایج حاکی از افزایش دما و بارندگی بود. همچنین بررسی اثرات تغییر اقلیم بر گیرنده‌های خطر در حوضه زریبار در چارچوب ریسک منطقه‌ای نشان داد که عملکرد محصولات کشاورزی و تغذیه آبخوان در معرض بیشترین آسیب ناشی از این پدیده‌اند.

هدف تحقیق حاضر بررسی آثار تغییر اقلیم بر متغیرهای هواشناسی و هیدرولوژیکی حوضه آبریز اهرچای، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی مولفه‌های عرضه و تقاضای منابع آب در این سامانه و نهایتاً ارزیابی سناریوهای مختلف اقلیمی و مدیریتی جهت تصمیم‌گیری می‌باشد. در زمینه بررسی آثار تغییر اقلیم بر مولفه‌های مختلف یک سامانه منابع آبی و در نهایت ارزیابی سناریوهای مختلف تصمیم‌گیری، تحقیقات متعددی تاکنون انجام شده است. با این وجود عمده نوآوری مقاله حاضر اعمال سه زیر مدل بهینه‌سازی از نوع برنامه‌ریزی خطی و غیرخطی (LP<sup>6</sup> و NLP<sup>7</sup>) برای تخصیص بهینه منابع آب و خاک در شبکه‌های کشاورزی پایین‌دست سد ستارخان می‌باشد. در این راستا با بکارگیری خروجی مدل‌های شبیه‌سازی بارش - رواناب و برآورد نیاز آبی گیاهان، به‌عنوان ورودی مدل‌های بهینه‌ساز نامبرده، مقادیر رهاسازی سالانه از مخزن، توزیع آب و سطح کشت بین محصولات مختلف و مراحل رشد بطور بهینه محاسبه شود. این نوآوری می‌تواند فاکتورهای مهمی چون مراحل رشد گیاهان و حساسیت آن‌ها به تنش‌های آبی را در محاسبات دخالت داده و عملکرد سیستم را تا حدی بهبود بخشد. همچنین در بخش اطمینان از نتایج مدل WEAP به مقایسه نتایج مدل‌سازی شده و مشاهداتی در دو بخش ذخیره مخزن و ایستگاه هیدرومتری خروجی حوضه، پرداخته شده است.

با توجه به کمبود شدید آب در جهان و افزایش روز افزون تقاضا، فاصله میان عرضه و تقاضای آب در آینده افزایش خواهد یافت. بنابراین نقش مدیریت این ماده حیاتی بیش از پیش ضروریست بنحوی که لزوم بکارگیری مدل‌های ریاضی مناسب جهت مدیریت، برنامه‌ریزی منابع آب و نیز بررسی سناریوهای مختلف اقلیم و مدیریتی را بارزتر می‌سازد. در این راستا پژوهش‌های مختلفی انجام شده که در مواردی به بررسی و توصیف قابلیت‌های کلی مدل‌ها و در مواردی نیز به بررسی عملکرد و روش‌های محاسباتی آن‌ها می‌پردازند. (2010) Sechi and Sulis جهت ارزیابی مدل‌های مختلف شبیه‌سازی و بهینه‌سازی برای یک سیستم چند مخزنی در جنوب ایتالیا از مدل‌های WARGI-SIM، AquaTool<sup>1</sup>، MODSIM<sup>2</sup>، RIBASIM<sup>2</sup> و WEAP<sup>3</sup> استفاده و نتایج‌شان را مقایسه کردند. (2013) Bagheri and Morid با ارزیابی و مقایسه مدل‌های WEAP و MIKE BASIN رفتار و عملکرد آن‌ها را در بهینه‌سازی و شبیه‌سازی بخشی از رودخانه قزل‌اوزن بررسی نمودند. نتایج حاکی از عملکرد بهتر مدل WEAP در بهینه‌سازی و توزیع کمبودها بین گره‌های مصرف بود. (2017) Tarek et al پیامدهای احتمالی تغییرات آب و هوا در تأمین آب و تقاضا و پیامدهای اقتصادی و اجتماعی آن با استفاده از مدل WEAP بررسی کردند. هیأت بین‌المللی تغییر اقلیم (IPCC<sup>4</sup>) اذعان داشته که با افزایش آثار پدیده تغییر اقلیم، بسامد و شدت وقایع حدی همانند خشکسالی و سیلاب رو به افزایش است، درحالی که حتی تغییر کوچکی در متغیرهای هیدرولوژیکی ممکن است به تغییرات محسوسی در عملکرد سیستم‌های منابع آب منجر شود (IPCC, 2001). از این‌رو بررسی آثار تغییر اقلیم از ضروریات مدیریت سیستم‌های منابع آب کشورها بویژه کشورمان ایران می‌باشد. در این راستا (2012) Karamouz et al رویکرد مدیریت یکپارچه را در شرایط تغییر اقلیم برای حوضه اهرچای توسعه دادند. نتایج، کاهش بارش و رواناب را در منطقه نشان داده است. (2015) Li et al. مدیریت منابع آب منطقه اقتصادی BHNA چین را که با چالش کمبود شدید آب مواجه است بررسی نمودند. ایشان با استفاده از مدل WEAP وضعیت آبی سامانه آبی نامبرده را با طرح سناریوهای مختلف توسعه اجتماعی و شهرنشینی تا سال ۲۰۲۰ بررسی نموده و گزینه‌های مدیریتی پیشنهاد نمودند. نتایج نشان داد که فشار بر منابع آب در آینده افزایش خواهد یافت. در بررسی خشکسالی هیدرولوژیکی حوضه رودخانه زاینده‌رود پس از شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی با مدل LARS-WG و ریزمقیاس نمودن خروجی‌ها با HADCM3، INCM3 و NCCCSM، از مدل IHACRES در تخمین رواناب حوضه استفاده شد که نتایج حاکی از کاهش شدید رواناب بود (Khajeh et al., 2017). (Yaghoobi and Massah)

۲- مواد و روش

۲-۱- ریزمقیاس‌نمایی

به تبدیل داده‌های بزرگ مقیاس مدل‌های گردش‌عمومی به منطقه‌ای ریزمقیاس‌نمایی گفته می‌شود، بدین منظور در تحقیق حاضر از مدل LARS-WG استفاده شده است. این مدل دربرگیرنده سه بخش اصلی کالیبراسیون، ارزیابی و تولید یا شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی دهه‌های آینده می‌باشد. نیاز اساسی مدل در مرحله کالیبراسیون، فایلی است که مشخص‌کننده رفتار اقلیم در دوره گذشته می‌باشد.

۲-۲- شبیه‌سازی بارش - رواناب

تحت اثر پدیده تغییر اقلیم، مقادیر بارش منطقه دستخوش تغییرات می‌گردد. در این میان، بررسی میزان رواناب برای تخمین حجم آب در دسترس در حوضه لازم است. از اینرو برای شبیه‌سازی بارش- رواناب، مدل IHACRES توسط Jakeman and Hornberger (1993) معرفی گردید. اطلاعات مورد نیاز این مدل، مساحت حوضه، سری زمانی بارش، جریان و همچنین یک متغیر هواشناسی نظیر اطلاعات دما یا تبخیر می‌باشند. این مدل شامل دو بخش به هم پیوسته غیرخطی و خطی است که به ترتیب برای محاسبه تلفات و تبدیل بارش مؤثر به رواناب تعریف شده است (Croke et al., 2005).

مراحل کار تحقیق حاضر در قالب سه بخش اصلی مطابق شکل ۱ می‌باشد. در ابتدا با استفاده از داده‌های مشاهداتی، مدل‌های شبیه‌سازی متغیرهای هواشناسی، رواناب و نیاز آبی برای دوره‌های تاریخی اجرا و سپس با استفاده از نتایج بدست آمده، سطوح بهینه برای کاشت محصولات زراعی بدست خواهد آمد. نهایتاً نتایج این مدل‌ها برای بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب در مدل WEAP استفاده شد. اولین مدلی که در این تحقیق برای بررسی اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارش بکار گرفته شده مدل‌های گردش‌عمومی جو (GCM) هستند. این مدل‌ها بر پایه قوانین فیزیکی استوار بوده و توسط روابط ریاضی ارائه شده در یک شبکه سه بعدی در سطح کره زمین حل می‌گردند. مدل‌های GCM مختلفی بر پایه تفاوت‌هایی در شبکه‌بندی در اقیانوس و خشکی، تعداد لایه‌ها، غلظت دی‌اکسیدکربن و کاربردهای متفاوت در مراکز مختلف اجرا شده‌اند. به دلیل اهمیت انتشار گازهای گلخانه‌ای در دوره آینده لازم است تا جهت اجرای GCM در دوره زمانی هدف، وضعیت گازهای گلخانه‌ای مورد نظر قرار گیرد. محاسبه و تعیین انتشار این گازها در دوره بعد بطور قطعی امکان‌پذیر نیست از این جهت سناریوهای مختلفی موسوم به سناریوهای انتشار که شامل چگونگی تغییرات این گازها در آینده می‌باشد ارائه شده است از سناریوهای A1B، A2 و B1 برای بررسی شرایط اقلیم در آینده استفاده شده است.

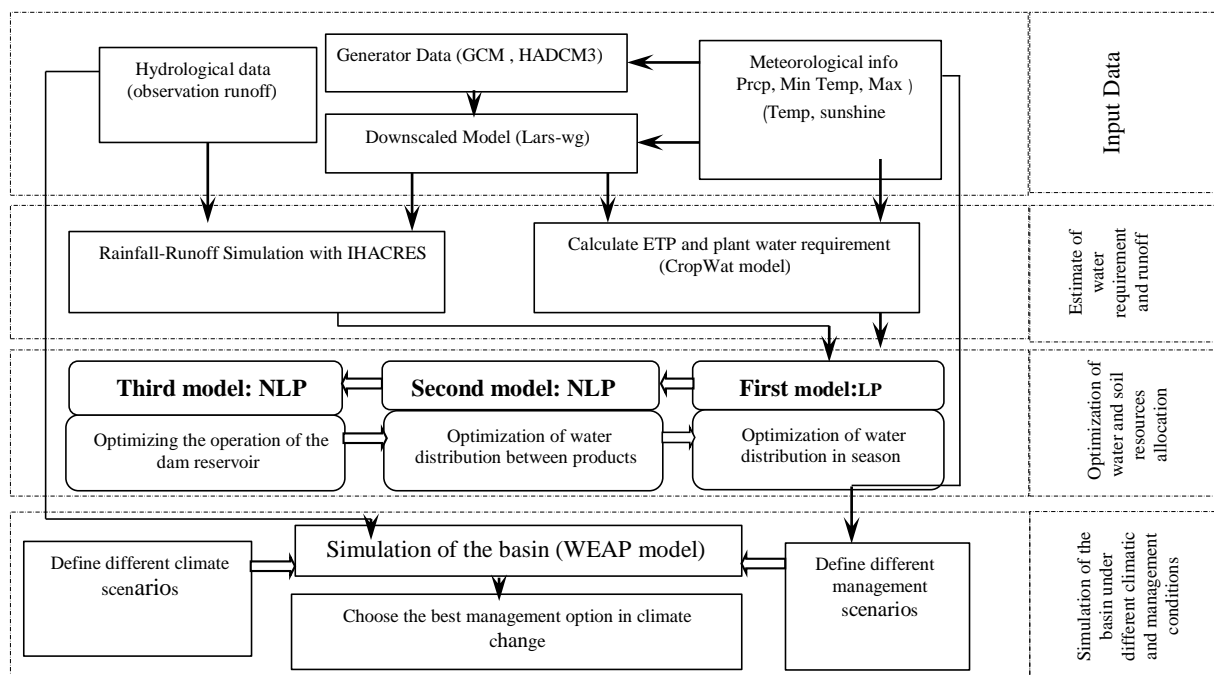


Fig. 1- Research Flowchart

شکل ۱- الگوریتم تحقیق

$K_c =$  ضریب گیاهی در هر دوره زمانی از رشد گیاه،  $ET_0 =$  تبخیر و تعرق پتانسیل یا  $ET$  مرجع در هر دوره زمانی مورد نظر می‌باشد. روش موسوم به فائو پنمن-مانتیت روشی استاندارد برای تعیین  $ET_0$  است به صورت رابطه (۸) توصیف شده است (Allen et al., 1998):

$$ET_0 = \frac{0.408 * R_n - G + g \frac{900}{T+273} U_2 (e_s - e_a)}{D + g(1+0.34U_2)} \quad (8)$$

که  $ET = ET_0$  گیاه مرجع ( $\text{mm d}^{-1}$ )،  $R =$  تابش خالص در سطح پوشش گیاهی ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )،  $G =$  شار گرما به داخل زمین  $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ،  $T =$  متوسط دمای ( $^{\circ}\text{C}$ ) که می‌توان آن را برابر صفر فرض کرد.  $U_2 =$  سرعت باد در ارتفاع ۲ متری ( $\text{m s}^{-1}$ )،  $e_s =$  فشار بخار اشباع (kPa)،  $e_a =$  فشار بخار واقع (kPa)،  $\Delta =$  شیب منحنی فشار بخار،  $g =$  ثابت سایکرومتری ( $\text{KPa}^{-1}$ ) در روش‌های برآورد نیاز آبی لازم است داده‌های ایستگاه‌ها با اعمال ضریبی که مقدار آن کمتر از یک خواهد بود اصلاح شوند. دمای حداقل ( $T_{\min}$ )، دمای حداکثر ( $T_{\max}$ )، دمای نقطه شبنم ( $T_{\text{dew}}$ ) هوا با نسبت بارندگی و  $ET$  مرجع ( $Rain/ET_0$ ) به خصوص در دامنه ( $0 < Rain/ET_0 < 1$ ) رابطه تقریباً خطی دارند ولی سایر پارامترها مثل باد رابطه معنی‌داری با پارامترهایی مثل دمای حداکثر، دمای حداقل و یا نسبت بارندگی به  $ET$  ندارد. با استفاده از این رابطه ضرایب اصلاحی برای دمای حداقل، حداکثر و نقطه شبنم به شرح زیر استخراج شده است (Allen et al., 1998):

$$\Delta T = T_{\min} - T_{\text{dew}} \quad (9)$$

$$T_{\min}(\text{adj}) = T_{\min} - \frac{\Delta T - 2}{2} \quad (10)$$

$$T_{\max}(\text{adj}) = T_{\max} - \frac{\Delta T - 2}{2} \quad (11)$$

$$T_{\text{dew}}(\text{adj}) = T_{\text{dew}} + \frac{\Delta T - 2}{2} \quad (12)$$

$T_{\min}(\text{adj})$ ،  $T_{\max}(\text{adj})$ ،  $T_{\text{dew}}(\text{adj})$  به ترتیب برابر با دماهای اصلاح شده حداقل، حداکثر و نقطه شبنم برای هر ماه می‌باشند.

برای بررسی تغییرات متغیرهای هواشناسی در شرایط سناریو اقلیمی، از خروجی‌های مدل LARS-WG استفاده شد. از آنجایی که خروجی این مدل صرفاً دمای حداقل و حداکثر، بارش و ساعت‌های آفتابی است، به دلیل ناتوانی در شبیه‌سازی سرعت باد و رطوبت نسبی، با توجه به همبستگی بین رطوبت نسبی و متغیرهای بارش، ساعت آفتابی، دمای حداقل و دمای حداکثر در فقدان اطلاعات مربوط به سناریوهای خروجی، می‌توان با تشکیل رابطه رگرسیونی خطی چند متغیره نسبت به داده‌های موجود مقدار رطوبت را با دقت قابل قبولی بدست آورد. (Ahmadi (2010) معادله رگرسیون خطی رطوبت نسبی

### ۳-۲- تبدیل بارش به بارش مؤثر (بخش غیرخطی)

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

$$u_k = s_k * r_k \quad (1)$$

شاخص  $s_k$  تابعی از میزان تبخیر و دما در حوضه می‌باشد و از طریق روابط (۲) و (۳) محاسبه می‌گردد:

$$s_k = C * r_k + \left[1 + \frac{1}{\tau_w(t_k)}\right] s_{k-1} \quad s_0 = 0 \quad (2)$$

$$\tau_w(t_k) = \tau_w e^{0.062 f(R-t_k)} \quad \tau_w(t_k) > 1 \quad (3)$$

که در آن  $R =$  دمای مرجع و  $C =$  ضریب تعیین بر اساس جرم تعادل بین بارش مؤثر و رواناب در دوره کالیبراسیون است. دو پارامتر مهم در این و  $f$  هستند که  $\tau_w$  ثابت زمانی خشک شدن حوضه می‌باشد و  $f$  فاکتور تعدیل دما است پارامتر  $\tau_w$ . مقداری از  $\tau_w(t_k)$  در دمای مرجع است که مقدار  $s_k$  را در زمانی که بارش رخ نمی‌دهد کنترل می‌نماید. سپس یک ماژول خطی از هیدروگراف واحد بارش مؤثر را به رواناب تبدیل می‌کند. این بخش الگوریتم، از تئوری هیدروگراف واحد استفاده می‌کند که حوضه را به شکل یک پیکربندی واحد درعمل ذخیره‌سازی خطی به صورت سری و موازی در نظر می‌گیرد.

### ۴-۲- تبدیل بارش مؤثر به رواناب

بخش خطی دارای سه پارامتر  $\tau_s$ ،  $\tau_q$  و  $V_s$  می‌باشد. ترکیب دو مولفه جریان سریع  $X_k^q$  و جریان آهسته  $X_k^s$  منجر به تولید رواناب  $X_k$  می‌شود که با استفاده از روابط (۴) تا (۶) بدست می‌آید:

$$X_k^q = aX_{k-1}^q + bU_k^q \quad (4)$$

$$X_k^s = aX_{k-1}^s + bU_k^s \quad (5)$$

$$X_k = X_k^q + X_k^s \quad (6)$$

که در آن  $a$  و  $b$  به ترتیب، ثابت زمانی جریان می‌باشند. روابط مربوط به این پارامترها در مقاله Kheirfam et al. (2014) آمده است.

### ۵-۲- تبخیر و تعرق

با توجه به اینکه برای تخمین نیاز آبی گیاهان روش‌های بسیار گوناگون و متنوعی ارائه شده است. روش‌های مستقیم و غیرمستقیم برای تخمین تبخیر - تعرق به کار برده می‌شود. در روش‌های غیرمستقیم از عوامل مختلف اقلیمی و گیاهی که بر نیاز آبی مؤثرند استفاده شده و از روی ارتباط آن‌ها با  $ET^8$  و معادله‌هایی که قبلاً با روش‌های مستقیم واسنجی شده‌اند،  $ET$  پوشش گیاهی مورد نظر تخمین زده می‌شود. این روش‌ها اصولاً بر فرمول زیر استوارند:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (7)$$

که  $ET_c =$  تبخیر و تعرق گیاه مورد نظر در یک دوره زمانی مشخص،

مدل در زیر نشان داده شده است:

$$\text{MAX: Benefit} = \sum_{c=1}^N F(\text{Hc}) A_c Y_{\text{max } c} P_c \quad (15)$$

که در آن  $N$  = تعداد محصولات کشت شده در منطقه،  $F(\text{Hc})$  = تابع عملکرد هر محصول،  $A_c$  = سطح زیر کشت محصول مورد نظر (هکتار)،  $Y_{\text{max } c}$  = عملکرد حداکثر محصول مورد نظر (کیلوگرم بر هکتار) و  $P_c$  = قیمت سود فروش محصول مورد نظر (ریال بر کیلوگرم) می‌باشد.

## ۹-۲- بهره‌برداری بهینه از مخزن سد

رها سازی بهینه از مخزن بین ۴ سال مورد مطالعه در این تحقیق به نحوی تعیین می‌شود که سود تخصیص مطابق رابطه زیر، حداکثر گردد.

$$\text{MAX: } \sum_{y=1}^Y F(V) \quad (16)$$

که  $Y$  = تعداد سال،  $F(V)$  = تابع عملکرد هر سال به ازای آب تخصیص یافته است که از مدل دوم و به ازای حجم‌های مختلف تخصیص داده شده به بخش کشاورزی به دست می‌آید. شرح مفصل محدودیت‌های این مدل‌ها در مرجع (Moghaddasi et al., 2010) قابل مشاهده است.

## ۱۰-۲- شبیه‌سازی منابع و مصارف حوضه و اعمال سناریوهای مختلف

برای مدل‌سازی بخش تقاضا و ارتباط آن با منابع تأمین آب در تحقیق حاضر از مدل WEAP که با استفاده از معادله‌های بیلان آب، قابلیت شبیه‌سازی و بهینه‌سازی حقایق را با در نظر گرفتن اولویت‌های تخصیص دارد، استفاده شده است (Yates et al., 2005; SEI, 2005). جهت تأمین نیاز آبی بخش‌های کشاورزی، صنعت و شرب در منطقه مطالعاتی این تحقیق که حوضه اهرچای و شبکه‌های کشاورزی پایین دست سد ستارخان است منابع آب سطحی و زیر زمینی بکار می‌روند (شکل ۲).

## ۱۱-۲- روش AHP

این مدل بر اساس چهار گام اجرا می‌شود که به ترتیب عبارتند از مدل‌سازی، قضاوت ترجیحی، محاسبات وزن‌های نسبی و در نهایت ادغام وزن‌های نسبی. فرایند تحلیل سلسله مراتبی نیازمند شکستن یک مسأله تصمیم با چندین شاخص به سلسله مراتبی از سطوح است. سطح اول بیانگر اهداف اصلی فرایند تصمیم‌گیری است. سطح دوم نشان‌دهنده شاخص‌های اساسی است و سطح سوم گزینه‌های تصمیم را ارائه می‌کند.

ماهانه بر حسب دمای حداقل، دمای حداکثر، ساعات آفتابی و بارش همان ماه را به شکل زیر بدست آورده است. مقدار ضریب تبیین (R-Squared) مربوط به این رابطه ۸۵/۳ درصد می‌باشد.

$$\text{RH} = 84.1 - 1.42\text{Sun} + 1.83\text{T}_{\text{min}} - 1.62\text{T}_{\text{max}} + 0.14\text{Rain} \quad (13)$$

که RH رطوبت نسبی (%)،  $T_{\text{min}}$  دمای حداقل ( $^{\circ}\text{C}$ )،  $T_{\text{max}}$  دمای حداکثر ( $^{\circ}\text{C}$ )، SUN = ساعت آفتابی، Rain بارش (mm). نهایتاً با داشتن دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش و ساعت آفتابی تولید شده توسط LARS-WG (به تفکیک سناریوهای اقلیمی و دوره‌های مختلف) و با به‌کارگیری رابطه (۱۳) برای هر دسته از اطلاعات، مقادیر متوسط ماهانه رطوبت نسبی نیز بدست آمد.

## ۶-۲- مدل‌سازی تخصیص بهینه آب

مدل‌سازی تخصیص بهینه آب بین مراحل مختلف رشد محصولات، بهینه‌سازی تخصیص آب و سطح زیر کشت بین محصولات زراعی منطقه (شامل گندم، یونجه، سیب‌زمینی و گوجه) و در نهایت بهره‌برداری بهینه از مخزن و تعیین مقادیر رها سازی بهینه از مخزن بین سال‌های مختلف، طی سه زیر مدل بهینه‌سازی بدست می‌آید که در ادامه به تشریح آن‌ها پرداخته می‌شود.

## ۷-۲- بهینه‌سازی توزیع آب در طول فصل رشد هر محصول

در این مدل مقدار آبی که در فصل رشد در دوره‌های ۱۰ روزه به گیاه داده می‌شود به صورت بهینه توزیع می‌شود. تابع هدف این مدل حداکثر کردن عملکرد واقعی محصول در هکتار است که به صورت رابطه (۱۴) می‌باشد (Allen et al., 1998):

$$\text{MAX: } \frac{Y_{ac}}{Y_{\text{max } c}} = 1 - \sum_{g=1}^n K_y g \left( 1 - \frac{ETa_{c,g}}{ET \text{ max}_{c,g}} \right) \quad (14)$$

در این رابطه  $ETa_{c,g}$  تبخیر و تعرق واقعی محصول C در مرحله رشد g ( $\text{mm}/10\text{day}$ )،  $ET \text{ max}_{c,g}$  = حداکثر تبخیر و تعرق محصول C در هر مرحله رشد g ( $\text{mm}/10\text{day}$ )،  $K_y$  = ضریب حساسیت عملکرد نسبت به تنش آبی برای هر گیاه در هر مرحله رشد، n تعداد مراحل رشد،  $Y_{ac}$  = عملکرد واقعی محصول c،  $Y_{\text{max } c}$  = حداکثر عملکرد محصول c (کیلوگرم بر هکتار) می‌باشد.

## ۸-۲- بهینه‌سازی تخصیص آب و سطح زیر کشت بین محصولات مختلف

این زیر مدل مجموع سود محصولات را با توجه به عملکرد و سطح زیر کشت آن محصول در شبکه حداکثر می‌کند. شکل تابع هدف این

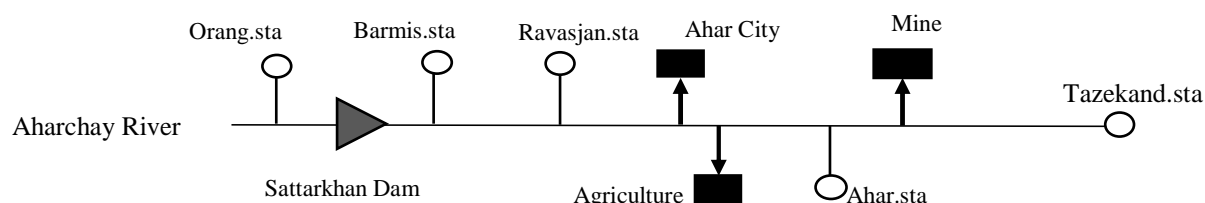


Fig. 2- Resources and demand Schematic  
 شکل ۲- شماتیک منابع و مصارف

۸۹۰ کیلومترمربع در محل ایستگاه اورنگ که قبل از سد قرار گرفته است و عدم قرارگیری ایستگاه تازه کند در سرشاخه‌ها، آبدهی ایستگاه اورنگ معرف جریان ورودی به سد می‌باشد. بخش کشاورزی در حوضه اهرچای قسمت اصلی فعالیت‌ها را در این منطقه تشکیل داده و در این میان پدیده تبخیر-تعرق (ET) از شاخص‌های مهم در مباحث منابع آب این حوضه تلقی می‌شود. این منطقه به عنوان یکی از مناطق مهم تولیدات زراعی و باغی در سطح استان به شمار می‌آید و دارای چهار محصول عمده زراعی گندم، یونجه، سیب‌زمینی، گوجه، می‌باشد.

با توجه به اینکه در حوضه اهرچای شکل‌های مختلفی از نیاز اعم از شرب، صنعت، زیست‌محیطی پایین‌دست رودخانه و کشاورزی وجود دارد، از طرف دیگر این نیازها با گذشت زمان و توسعه شبکه آبیاری و کشاورزی افزایش می‌یابد، بدین جهت سد ستارخان، اهمیت ویژه‌ای در کنترل و ذخیره آورد رودخانه در مواقع پر آبی برای مصرف در مواقع کم آبی دارد. در شکل ۳ موقعیت اراضی کشاورزی، بخش صنعت (معدن مس سونگون) و شهرستان اهر نسبت به سد ستارخان نشان داده شده است.

در مطالعه بخش رواناب منطقه از اطلاعات ایستگاه اورنگ مربوط به شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی استفاده شده است. آبدهی این ایستگاه معرف جریان ورودی به سد می‌باشد.

بعد از مدل‌سازی سلسله مراتبی مساله تصمیم، تصمیم‌گیرنده باید عنصر (شاخص یا گزینه‌های) هر سطح را نسبت به عنصر مربوط به خود در سطح بالاتر و به صورت دو به دو مقایسه و وزن آن‌ها را محاسبه کند. تقریباً تمامی محاسبات مربوط به AHP براساس قضاوت‌های اولیه تصمیم‌گیرنده که در قالب ماتریس مقایسات زوجی ظاهر می‌شود، صورت می‌پذیرد. نرخ سازگاری نشان می‌دهد که تا چه حد می‌توان به اولویت‌های حاصل از مقایسه‌ها اعتماد کرد. قدم‌هایی که برای محاسبه نرخ سازگاری به کار گرفته می‌شوند عبارتند از: ۱. محاسبه بردار مجموع وزنی، ۲. محاسبه بردار سازگاری، ۳. بدست آوردن  $\lambda_{max}$ ، ۴. محاسبه شاخص سازگاری (CI)، ۵. محاسبه نرخ سازگاری.

### ۱۲-۲- منطقه مطالعاتی

حوضه آبریز اهرچای با مساحتی حدود ۲۲۳۲ کیلومتر مربع در استان آذربایجان شرقی واقع شده و به دلیل پوشش دادن بخش قابل توجهی از حوضه آبریز ارس (در شمال غربی ایران)، از اهمیت بالایی در این ناحیه از کشور برخوردار است (Ahmadi, 2010). وسعت این حوضه در محل سد ستارخان ۹۱۰ کیلومترمربع بوده و ایستگاه تازه کند مهمترین ایستگاه اندازه‌گیری دبی حوضه می‌باشد (Karamouz et al., 2012). اما با توجه به سطح حوضه با مساحت



Fig. 3- The study area and Sattarkhan dam location  
 شکل ۳- منطقه مطالعاتی و موقعیت سد ستارخان

مدل و داده‌های واقعی دوره پایه (۲۰۰۷-۱۹۸۶) همچنین شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل شامل ضریب تعیین ( $R^2$ )، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و میانگین انحراف خطا (MBE) در جدول ۲ نشان داده شده است. با مقایسه مقادیر شاخص‌های ارزیابی، می‌توان نتیجه گرفت توزیع آماری داده‌های شبیه‌سازی شده نسبت به داده‌های مشاهداتی در محدوده قابل قبول قرار دارد. بنابراین، می‌توان از پارامترهای به دست آمده در مرحله کالیبراسیون مدل، برای شبیه‌سازی اطلاعات بارش، درجه حرارت و ساعت آفتابی استفاده کرد. با بررسی و مقایسه میانگین مقادیر متغیرهای مشاهداتی و شبیه‌سازی شده از مدل GCM برای دوره‌های ۲۰۱۱-۲۰۳۰، ۲۰۴۶-۲۰۶۵ و ۲۰۹۹-۲۰۸۰ این نتیجه حاصل شد که تحت اثر تغییر اقلیم و سناریو A1B طی دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰، بارش ۵/۳ درصد کاهش می‌یابد و ساعات آفتابی، دمای حداقل و دمای حداکثر هر کدام به ترتیب ۸، ۳/۶ و ۰/۶ درصد نسبت به دوره مشاهداتی افزایش خواهند داشت. همچنین دمای حداقل در دوره‌های ۲۰۴۶-۲۰۶۵ و ۲۰۹۹-۲۰۸۰ به ترتیب به مقدار ۴۰ و ۶۰ درصد نسبت به دوره مشاهداتی و دمای حداکثر در این دوره‌ها ۱۳ و ۲۲ درصد افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج دو سناریو اقلیمی A2 و B1 نیز کاهش مقدار بارش و افزایش دمای حداقل و حداکثر را برای دوره‌های آینده پیش‌بینی می‌کند. نتایج این بخش، با تحقیقات مشابه نیز سازگاری دارد به‌عنوان مثال Babaeian و همکاران برای دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۳۹ کاهش ۹ درصدی بارش و افزایش میانگین سالانه دما به میزان ۰/۵ درجه سانتی‌گراد در کل کشور را پیش‌بینی کرده است بدین صورت که استان‌های خراسان شمالی، آذربایجان غربی و آذربایجان شرقی با بیش‌ترین افزایش دما در دهه ۲۰۲۰ مواجه خواهند بود (Babaeian et al., 2010).

**Table 2- Evaluation of LARS-WG model for the calibration period (1986-2007)**

جدول ۲- ارزیابی مدل LARS-WG در دوره واسنجی (۱۹۸۶-۲۰۰۷)

Variable	R2	RMSE	MAE	MBE
Min. Temperature	0.99	0.34	0.29	-0.16
Max. Temperature	0.99	0.45	0.35	-0.12
Rain	0.85	5.37	4.17	-1.75
Sunshine	0.98	0.24	0.2	0.005

### ۲-۳- نتایج مدل IHACRES

برای ارزیابی عملکرد مدل IHACRES طی دوره کالیبراسیون، مقادیر روزانه جریان مشاهداتی برای سال‌های ۲۰۰۹-۲۰۱۱ در مقابل جریان شبیه‌سازی در شکل ۵ رسم شده است. شایان ذکر است در این بخش

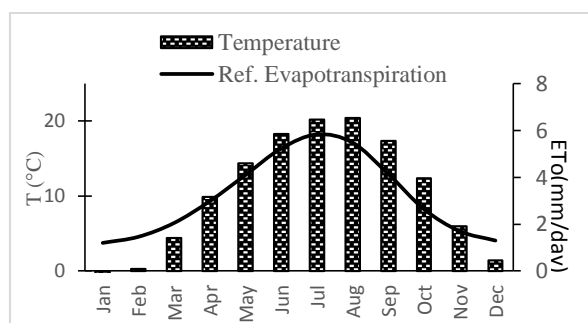
ایستگاه‌های باران‌سنجی کسانق، ورزقان، کاسین و ایستگاه سینوپتیک اهر نیز در این حوضه قرار دارند. سری زمانی بارش، دمای حداقل، دمای حداکثر، رطوبت نسبی و سرعت باد متعلق به ایستگاه سینوپتیک اهر بوده که در این تحقیق استفاده شده است (Karamuoz et al., 2013) مشخصات دو ایستگاه اورنگ و سینوپتیک اهر در جدول ۱ آورده شده است.

**Table 1- Characteristic of hydrometry and synoptic station**

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری و سینوپتیک استفاده شده

Station	Ahar	Orang
Longitud	47 o '04 '	46 o '52 '
Latitud	38 o '26 '	38 o '28 '
Class of St	Synoptic	Hydrometry
Period	1986-2014	1983-2014

با توجه به وسعت اراضی کشاورزی در حوضه آبریز اهرچای، پدیده تبخیر-تعرق (ET) در مصرف منابع آبی این منطقه تأثیرگذار است. در شکل ۴ نمودار تغییرات بلندمدت دمای متوسط حوضه و نیز تغییرات تبخیر-تعرق ارائه شده است. بالاترین میزان ET به پیروی از درجه حرارت در ماه جولای و بیشترین نیاز آبی گیاهان در ماه جولای و آگوست مشاهده می‌شود.



**Fig. 4- Comparison of average temperature and reference evapotranspiration (1986-2010)**

شکل ۴ - مقایسه متوسط دما با تبخیر و تعرق مرجع (۱۹۸۶-۲۰۱۰)

### ۳- بحث و نتایج

#### ۳-۱- ریزمقیاس کردن داده‌های مدل گردش عمومی

در این بخش مقادیر متغیرهای هواشناسی در شرایط تغییر اقلیم با استفاده از مدل GCM تولید و از مدل LARS-WG برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های هواشناسی بارش و دما استفاده شده است. در ابتدا مقدار ضریب تعیین در مورد داده‌های شبیه‌سازی شده توسط

تغییر اقلیم، پیک جریان یک ماه زودتر و در ماه مارس با مقدار ۲/۷ مترمکعب برثانیه اتفاق می‌افتد که نسبت به دوره پیش‌بینی با کاهش ۱/۹ برابر مواجه خواهد شد. این کاهش به دلیل تغییر الگوی بارش در منطقه است. همچنین با بررسی جریان در دو دوره این نتیجه به دست می‌آید که تنها در ماه فوریه مقدار جریان نسبت به دوره مشاهداتی به مقدار ۶ درصد افزایش خواهد داشت اما در سایر ماه‌ها این مقدار کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد که در پی وقوع دو سناریو A1B و A2 جریان با مقدار ۲۳ و ۲۲ میلیون مترمکعب در سال ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ به حداقل مقدار نسبت به سایر سال‌ها می‌رسد که این کاهش برای سال ۲۰۲۴ و سناریو A2 بیشتر خواهد بوده است.

### ۳-۴- نتایج مدل Cropwat

در این بخش با استفاده از متغیرهای هواشناسی ثبت شده در ایستگاه سینوپتیک اهر، تبخیر تعرق پتانسیل برای دوره مشاهداتی (۲۰۰۷-۱۹۸۶) محاسبه شده است. برای تحلیل تغییرات این متغیر در شرایط سناریو اقلیمی، از خروجی‌های مدل LARS-WG استفاده می‌شود. اطلاعات گیاهی همچون ضرایب  $K_c$  در مراحل مختلف رشد و نیز طول دوره رشد از مراجعی نظیر مجلات شماره ۳۳ و ۲۴ فائو و همچنین نرم‌افزار PTIWAT با استفاده از اطلاعات محصولات دشت اهر-ورزقان استخراج شده است (Doorenbos and Kassam, 1977; Doorenbos and Pruitt, 1986). تاریخ کاشت محصولات مختلف زراعی و باغی نیز با استفاده از تقویم زراعی استان آذربایجان شرقی تعیین شده است. نتایج به دست آمده از مدل Cropwat برای محاسبه نیاز آبی در دوره‌های مشاهداتی و دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ نشان می‌دهد با افزایش دمای حداقل و حداکثر و کاهش بارش در دوره‌های آبی نسبت به دوره مشاهداتی مقدار نیاز محصولات کشاورزی نیز افزایش خواهد یافت و این تغییر نیاز محصولات در سناریو A2 با مقدار ۱۸۰۶۷ مترمکعب بر هکتار نسبت به سناریوهای دیگر افزایش نیاز بیشتری را نشان می‌دهد. در شکل ۶ مقدار نیاز آبی محصولات به تفکیک در هر سال نشان داده شده است.

### ۳-۵- نتایج بهینه‌سازی تخصیص منابع آب و خاک

مدل‌سازی تخصیص بهینه منابع آب و خاک در دو مرحله تاریخی (۲۰۱۱-۲۰۱۴) و شرایط تغییر اقلیم (۲۰۱۵-۲۰۲۵) انجام شده است. بدین منظور بهینه‌سازی توزیع منابع آب بین مراحل مختلف رشد محصولات، تخصیص بهینه منابع آب و سطح زیر کشت بین محصولات مختلف و در نهایت بهره‌برداری بهینه از مخزن و تعیین مقادیر رهاسازی بهینه از مخزن بین سال‌های مختلف طی سه زیر مدل بدست می‌آید.

با سعی و خطا در تعیین پارامترهای مدل مقدار  $R^2$  دوره کالیبراسیون برابر با ۰/۶۵ بدست آمد. همچنین مقادیر RMSE, MAE برای این دوره به ترتیب ۱/۸۳ و ۰/۸ متر مکعب بر ثانیه است که حاکی از پیش‌بینی قابل قبول مدل در مرحله کالیبراسیون می‌باشد. در مطالعه عملکرد مدل IHACRES با استفاده از هفت سال داده، موتویلو و همکاران (۱۹۹۹) بیان نمودند که اگر مقادیر ضریب  $R^2$  در ارزیابی مدل در محدوده ۰/۳۶ تا ۰/۷۵ باشد نتایج شبیه‌سازی IHACRES قابل قبول خواهد بود (Motovilov et al., 1999). این امر نشان‌دهنده سازگاری نتایج تحقیق با مطالعات گذشته است.

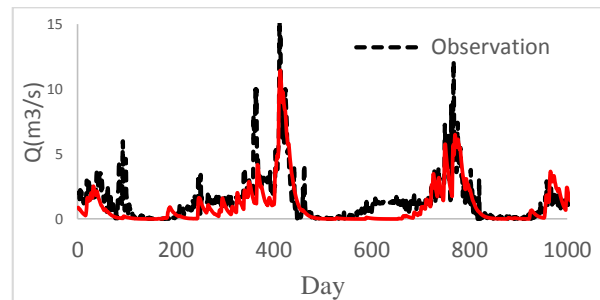


Fig. 5- Comparison of observed and simulated flow for the calibration period

شکل ۵- مقایسه جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی (نتایج مدل IHACRES در ایستگاه اورنگ)

در مرحله اعتبارسنجی ارزیابی مقادیر جریان روزانه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در سال‌های (۲۰۰۵-۲۰۰۸) مورد بررسی قرار گرفته است. مقادیر ضریب  $R^2$ , RMSE و MAE به ترتیب ۰/۵۶، ۱/۴ و ۰/۳ است که هر چند مقادیر این شاخص‌های ارزیابی از نظر کمی، چندان بالا نیست اما با توجه به عدم قطعیت‌های غیر قابل انکار در فرایند شبیه‌سازی بارش-رواناب و بخصوص برفی بودن حوضه مورد مطالعه، خروجی‌های مدل قابل قبول تلقی می‌باشد. بخصوص اینکه مطابق نتایج این بخش و نیز تحقیقات قبلی، مدل IHACRES برای منطقه مطالعاتی در شبیه‌سازی جریان‌های پیک عملکرد ضعیفی از خود نشان داده است (Karamouz et al., 2012).

### ۳-۳- اثر تغییر اقلیم بر جریان ورودی

مقدار جریان ورودی به مخزن در دوره‌های آبی توسط مدل IHACRES بدست آمد. برای شبیه‌سازی این متغیر با استفاده از مدل بارش-رواناب از داده‌های تولید شده توسط مدل LARS-WG و تحت سناریو تغییر اقلیم A1B استفاده شد. نتایج میانگین بلند مدت ماهانه جریان شبیه‌سازی شده و مشاهداتی برای سال‌های ۲۰۲۵-۲۰۱۵ حاکی از آن بود که پیک جریان در دوره مشاهداتی در ماه آوریل با مقدار ۵/۰۵ مترمکعب بر ثانیه رخ می‌دهد اما در دوره آبی و شرایط



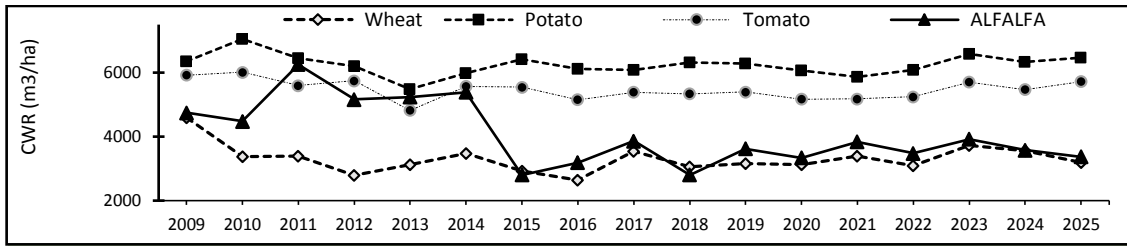


Fig. 6- Crop Net Water Demand  
شکل ۶- نیاز خالص آبی محصولات

مقدار سود موجود در منطقه که به طور متوسط ۱۵ میلیارد ریال است با نتایج مدل بهینه‌سازی مقایسه شد و بررسی نشان داد که استفاده از این مدل با کاهش ۲۳ درصدی مقدار تخصیص میزان سود منطقه را ۲۸ درصد افزایش می‌دهد. با توجه به کارایی مدل در بهبود سود، از این مدل برای تخمین سطوح زیر کشت منطقه در دوره آبی استفاده شد.

در بخش بعد و برای احتساب شرایط تغییر اقلیم در دوره ۲۰۱۵-۲۰۲۵، ابتدا توابع عملکرد محصولات با در نظر گرفتن اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای اقلیمی محاسبه شد. تابع عملکرد هر یک از محصولات گندم، یونجه، سیب زمینی و گوجه پس از حصول اطلاعات اقلیمی‌ای که با استفاده از مدل GCM (HADCM3) تحت سناریو AIB بدست آمدند و برای دوره شبیه‌سازی (۲۰۱۵-۲۰۲۵) ریزمقیاس شدند با اطلاعات خروجی مدل CROPWAT برای هر محصول در این دوره به دست آمد. مدل اول به ازای ارتفاع مختلف آب تخصیصی برای هر محصول اجرا و پس از آن با استفاده از عملکرد متناظر آن‌ها تابع عملکرد هر محصول محاسبه شد. در ادامه این توابع به منظور بهینه‌سازی حجم آب تخصیصی بین محصولات در هر سال استفاده شد که در نتیجه مقدار تابع سود در ازای مقادیر دبی‌های مختلف بدست آمد.

برای محاسبه مقادیر بهینه تخصیص آب بین مراحل مختلف رشد محصولات و در نهایت محاسبه تابع عملکرد هر محصول، زیر مدل اول (LP) به ازای دبی‌های مختلف اجرا و سپس با استفاده از عملکرد متناظر آن‌ها، تابع عملکرد هر محصول محاسبه گردید. نتایج توابع عملکرد برای محصولات زراعی در شکل ۷ ارائه شده است. لازم بذکر است شرایط آب و هوایی و اقلیمی جهت سالهای ۲۰۱۱-۲۰۱۴ اتخاذ شده است.

در مرحله بعد زیر مدل دوم (NLP) با استفاده از توابع عملکرد بدست آمده از زیر مدل اول، ساخته می‌شود. این مدل به ازای حجم‌های مختلف رهاسازی از مخزن سد اجرا و در نهایت، تابع سود شبکه کشاورزی پایین‌دست سد ستارخان برای هر سال محاسبه گردید. توابع سود سالانه حاصل از خروجی مدل دوم به‌عنوان ورودی زیر مدل سوم (مدل مخزن) استفاده گردید. در این مدل، مقدار رهاسازی سالانه به نحوی تعیین شد که سود کل سیستم طی چهار سال مورد مطالعه حداکثر گردد. با توجه به اولویت نیاز آب صنعت و شرب مقادیر این نیازها و همچنین نیاز محصولات باغی که ۶۰ درصد کل کشاورزی است در زیر مدل سوم، مقادیر این نیازها از رهاسازی کل کم شد و حاصل به عنوان قیدی در این بخش لحاظ گردید. برای بررسی کارایی مدل بهینه‌سازی نتایج حاصل از متوسط سود در سال ۲۰۱۱-۲۰۱۴

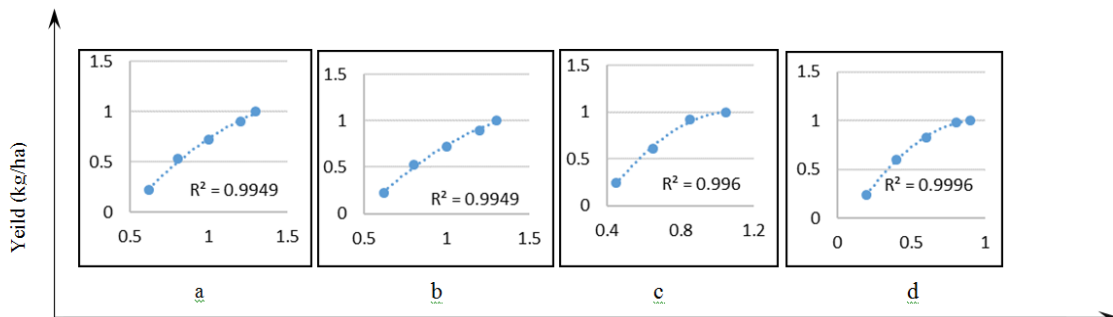


Fig. 7- Yield Functions based on the FAO-1979 method of 2011; a) potato, b) tomato, c) alfalfa, d) wheat  
شکل ۷- توابع عملکرد حاصل از مدل بهینه‌سازی بر اساس روش FAO-1979 سال ۲۰۱۱، الف) سیب زمینی، ب) گوجه، ج) یونجه، د) گندم.

۳-۶- نتایج مدل WEAP

با استفاده از مدل جامع مدیریت و برنامه‌ریزی WEAP به بررسی وضعیت منابع آب موجود در منطقه اهرچای و تغییرات در بخش مصارف با توجه به شرایط تغییر اقلیم پرداخته شد. داده‌های محاسبه شده مربوط به نیازها و منابع برای دوره‌های آبی شامل حجم آب ورودی و نیازهای آبی گیاهان، در این بخش وارد مدلسازی WEAP گردیدند. در ادامه بمنظور ایجاد اطمینان در خروجی‌های مدل WEAP مقادیر شبیه‌سازی طی دو مرحله یعنی مقادیر اندازه‌گیری شده در مخزن سد و ایستگاه هیدرومتری تازکند به با داده‌های مشاهداتی مقایسه شدند. شکل ۱۱ مقایسه احجام مشاهده‌ای و شبیه‌سازی ذخیره مخزن سد ستارخان را نشان می‌دهد. لازم بذکر است که بررسی تغییرات آبی عرضه و تقاضا در سطح حوضه آبریز با کمک سناریو مرجع و انتخاب یک سناریو پایه انجام می‌شود.

که در آن جهت انجام بهترین تخمین از دوره مطالعاتی، از داده‌های واقعی استفاده شده است. در این مطالعه سال پایه سال ۲۰۰۸ و سال انتهایی برای مدل‌سازی ۲۰۲۵ انتخاب شده است. برای شناسایی آثار تغییر اقلیم و نحوه پاسخ‌دهی سیستم به تنش‌های ناشی از افزایش تقاضا سناریوهای اقلیمی بر اساس نوع تغییرات اقلیم بصورت A1B، A2 و B1 تعریف می‌شوند.

در نهایت با حداکثر کردن مجموع توابع سود در طی این دوره با توجه به محدودیت‌های برداشت از مخزن و حجم آب اختصاصی به بخش کشاورزی، مقدار آب تخصیصی هر سال برای رسیدن به سود حداکثر مطابق شکل ۶ محاسبه شد.

با بکارگیری زیرمدل سوم و حداکثر کردن مقدار مجموع سود طی دوره زمانی ۲۰۱۵-۲۰۲۵ میزان بهینه آب تخصیصی در هر سال از مدل مطابق شکل ۷ بدست آمد. حجم بهینه آب تخصیصی به بخش کشاورزی در سال‌های انتهایی بیشتریترین نوسان را به دلیل تغییرات آب و هوایی و بویژه تأثیر بر نیاز آبی داشته است. در این دوره سال ۲۰۱۶ با ۵/۵ میلیون مترمکعب و سال ۲۰۲۲ با ۱۷/۹ میلیون مترمکعب کمترین و بیشترین مقدار در دوره شبیه‌سازی به خود اختصاص داده‌اند. میانگین مقدار رهاسازی شده در دوره (۲۰۱۵-۲۰۲۵) به مقدار ۱۸ درصد نسبت به دوره مشاهداتی افزایش می‌یابد این افزایش به علت روند رو به بالای دمای منطقه در دوره آبی و همچنین نرخ تورمی است که در منطقه برای محصولات اعمال شده است. با توجه به عملکرد کم محصول گندم در این منطقه نسبت به سایر محصولات زراعی سطح این محصول در دوره‌های آبی بصورت ثابت می‌باشد و محصول یونجه و سیب‌زمینی با مقدار ۸۰ و ۹۰ درصد نسبت به سطوح بهینه دوره مشاهداتی بیشترین تغییرات را نشان می‌دهند (شکل ۱۰).

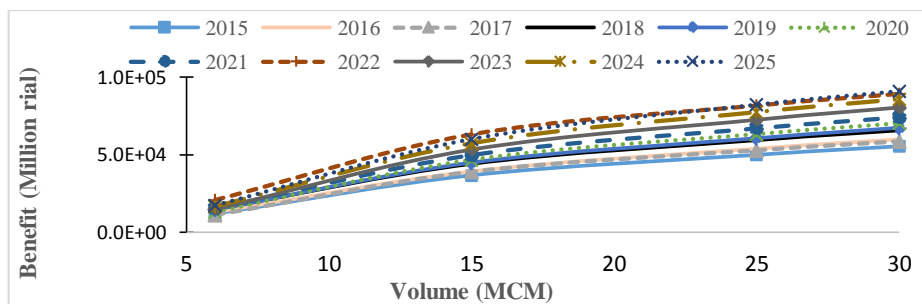


Fig. 8- Net Benefit for the simulation period (2015-2025)

شکل ۸- توابع سود دوره شبیه‌سازی (۲۰۱۵-۲۰۲۵)

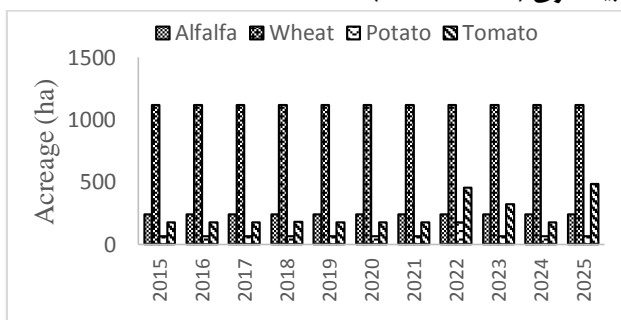


Fig. 10- Optimum cultivating crops

شکل ۱۰- سطح زیر کشت بهینه محصولات زراعی

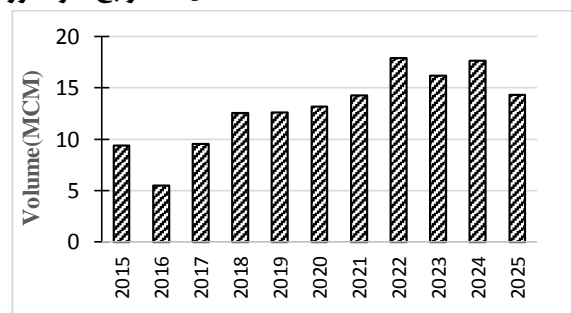
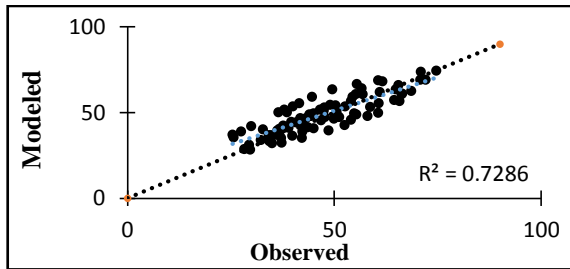
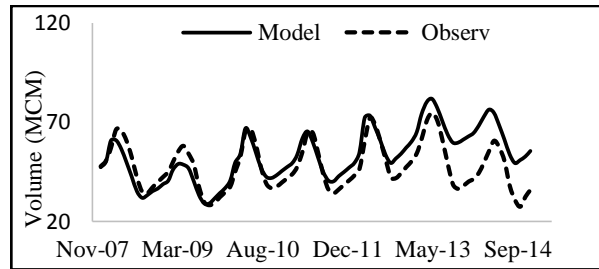


Fig. 9- Water allocation to the agricultural sector

شکل ۹- حجم تخصیصی به بخش کشاورزی



**Fig. 12- Linear correlation coefficient between observed and simulated reservoir storage**  
 شکل ۱۲- نمودار پراکنش مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده حجم مخزن



**Fig. 11- The monthly observed and simulated storage in Sattarkhan Dam (MCM)**  
 شکل ۱۱- میانگین ماهانه مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده حجم مخزن سد ستارخان بر حسب (MCM)

انتهایی برای مدل‌سازی است. هدف از طرح این سناریو مقایسه سناریوهای مدیریتی با وضع موجود است. همان‌طور که شکل ۱۳ نشان می‌دهد اگر تا انتهای دوره شبیه‌سازی شده شرایط آب و هوایی، نیاز بخش شرب و سطح زیرکشت محصولات کشاورزی و نحوه آبیاری زمین‌های زراعی ثابت بماند مقدار متوسط کمبود در بخش کشاورزی تا انتهای دوره برابر ۶/۷ میلیون متر مکعب خواهد بود که تا حدی متأثر از افزایش نیاز آبی محصولات، طی دوره تغییر اقلیم است. با توجه به وقوع پدیده تغییر اقلیم و اثرات آن در پدیده‌های هواشناسی تأمین نیازها با نظر به این امر بررسی شد. بعد از ارزیابی داده‌های حاصل شده برای هر یک از سناریوهای تغییر اقلیم، نتایج رواناب و مقدار نیاز آبی محصولات و سطوح زیر کشت بهینه به مدل WEAP وارد شدند. سناریوهایی که جهت مدیریت بهتر آب در منطقه تعریف و به مدل وارد شدند در ادامه شرح خواهند داد.

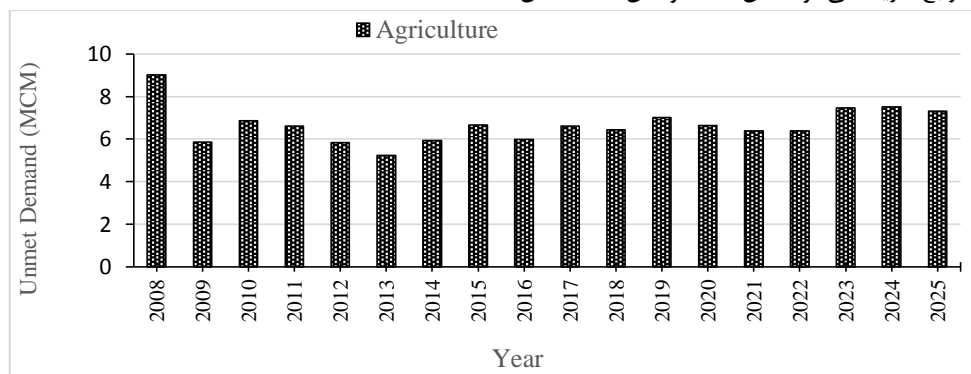
برای محاسبه شکل فوق از آمار جریان ورودی به مخزن که مربوط به ایستگاه اورنگ طی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴ می‌شود و نیز اطلاعات تبخیر از سطح دریاچه پشت سد استفاده گردید. میانگین سالانه شبیه‌سازی و مشاهداتی به ترتیب ۴۳/۳ و ۳۸/۲ میلیون متر مکعب می‌باشد. که خطایی برابر با ۱۳/۵ درصد را نشان می‌دهد. ضریب  $R^2$  با مقدار ۷۲/۸ درصد بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به دست آمد. با توجه به مقادیر برداشت‌های مختلف در بخش نیازهای حوضه و درصد آب برگشتی به رودخانه و با واردکردن اطلاعات سرشاخه‌هایی که بعد از سد به رودخانه اهر چای می‌ریزند مقدار دبی شبیه‌سازی شده در انتهای حوضه با اطلاعات ایستگاه تازه‌کند مقایسه شد. این مقایسه‌ها نشان داد که میانگین سالانه جریان شبیه‌سازی و مشاهده‌ای به ترتیب ۳۰/۶ و ۲۵/۳ میلیون مترمکعب است که خطایی برابر با ۱۷/۵ درصد داشته و از دقت قابل قبولی برخوردار است.

### ۷-۳- بررسی سناریوهای مختلف در مدل

در ادامه بررسی تغییرات آبی عرضه و تقاضا در سطح حوضه آبریز، با کمک سناریوی مرجع صورت گرفت. در این مطالعه، سال پایه که بر اساس آن سناریو مرجع تعریف می‌شود، سال ۲۰۰۸ و سال ۲۰۲۵ سال

### ۸-۳- تعریف سناریوهای مدیریتی و اقلیمی

ساختار مدیریتی در WEAP با استفاده از سناریوهایی که در آن نوشته



**Fig. 13- Unmet demand in reference scenario**

شکل ۱۳- کمبود هر نیازها در سناریو مرجع

• ترکیب سه سناریو (A1B - Opt.A- Mod.IR-St.Dom)

۳-۹- تأثیر تغییر اقلیم بر بخش مصرف کشاورزی

میانگین ماهانه درصد تأمین نیاز آب در بخش کشاورزی حوضه برای دوره شبیه‌سازی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ تحت تمامی سناریوها در شکل ۱۴ نشان داده شده است. کمترین مقدار سطح پوشش در ماه سپتامبر با مقدار کمبود ۱/۸ میلیون متر مکعب در سناریو A1B- Opt.A می‌باشد.

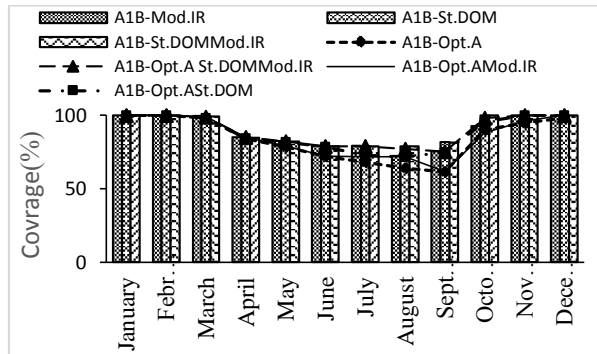


Fig. 14- Coverage of agricultural water needs  
شکل ۱۴- درصد تأمین نیاز آب کشاورزی

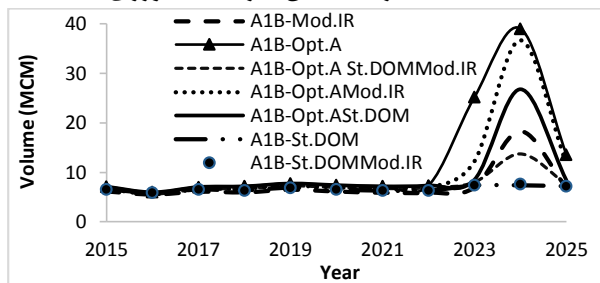


Fig. 15- Unmet Demand under conditions of climate change in each scenario

شکل ۱۵- کمبود بخش کشاورزی در اثر تغییر اقلیم در تمامی سناریوها

با توجه به کاهش جریان در دو سال پیاپی ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ به مقدار ۲۳ میلیون متر مکعب و ذخیره پایین مخزن، سال ۲۰۲۴ با تأثیر زیاد از مقدار مصرف نیازها در سال قبل خود قرار خواهد گرفت که به ازای حداقل سطح زیر کشت در این سال باز هم با کمبود شدید تأمین آب بخصوص در سناریو A1B-Opt.A مواجه خواهد شد. با توجه به نیاز زیاد بخش کشاورزی به مقدار ۴۵ میلیون متر مکعب و صرف تنها ۳۵ میلیون متر مکعب آن در بخش محصول سیب منطقه، این مقدار کمبود با صرف کلی تنها ۹ میلیون متر مکعب برای این بخش با کاهش شدید آب مواجه خواهد شد که در شکل ۱۵ نشان داده شده است. میانگین سالانه نیاز تأمین نشده در سناریو A1B-Opt.A مقدار ۱۱/۷ میلیون متر مکعب است. در سناریو (A1B-Opt.A, Mod.IR) میانگین ماهانه

می‌شود و نشان‌دهنده وضعیت آینده آب در آن منطقه است تعریف می‌شود. با تغییر این سناریوها می‌توان تأثیر آب و هوا، مدیریت کاربری اراضی، تقاضا، تنظیمات و برنامه‌ریزی‌ها را مشخص کرد. سناریوهایی که در این تحقیق برای مدیریت بهتر منابع استفاده شده است در دو بخش سناریوهای اقلیمی یعنی A1B، A2 و B1 و سناریوهای مدیریتی شامل استفاده از استاندارد سرانه مصرف در بخش شرب (St.Dom)، اعمال سطوح کشت بهینه (Opt.A) و استفاده از روش‌های نوین آبیاری در بخش کشاورزی (Mod.IR) که تا ۷۰ درصد راندمان افزایش می‌یابد معرفی می‌گردند. با اعمال سناریوهای اقلیمی به تنهایی و در ترکیب با سایر سناریوهای مدیریتی وضعیت تغییرات منابع و تأمین مصارف بررسی می‌شود. در ادامه با توجه به عملکرد سناریوها برای بررسی بهتر، پنج شاخص اعتمادپذیری زمانی، اعتمادپذیری حجمی، حداقل و حداکثر نیاز تأمین نشده و همچنین مقدار کل نیاز تأمین نشده برای هر سناریو محاسبه شد. اعتمادپذیری یک چارچوب سیستماتیک را فراهم می‌کند تا عدم قطعیت مربوط به خروجی سیستم را به صورت کمی درآورد (Mirakbari and Ganji, 2010). با توجه به درجه اهمیتی که این شاخص‌ها نسبت به یکدیگر دارند نیاز است تا با استفاده از روش سلسله مراتبی (مدل AHP) وزن دهی شوند. در ادامه در بخش ترکیب سناریوها تنها نتایج مربوط به سناریو A1B بصورت نمودار نشان داده شده است. اما تمامی فرایندهای مدل‌سازی برای دو سناریو A2 و B1 نیز عیناً تکرار شده است که نهایتاً با توجه به نتایج آن‌ها، عملکرد سناریوهای مختلف با هم مقایسه خواهد شد. برای شناسایی آثار تغییر اقلیم و نحوه پاسخ‌دهی سیستم به تنش‌های ناشی از افزایش تقاضا و کاهش رواناب، سناریوهای مختلفی طرح‌ریزی شد تا در نهایت یک تحلیل کلی نسبت به این دو تنش وارد بر سیستم، در دسترس باشد. سناریوهای بررسی شده در اینجا عبارتند از:

- اعمال سناریوی اقلیمی A1B، سطوح کشت بهینه و احتساب تغییرات سالانه عملکرد محصولات (A1B- Opt.A)،
- اعمال سناریو اقلیمی A1B به‌همراه استفاده از استاندارد سرانه مصرف در بخش شرب (A1B- St.Dom)،
- اعمال سناریو اقلیمی A1B به‌همراه استفاده از روش‌های نوین آبیاری در بخش کشاورزی (A1B- Mod.IR)،
- اعمال سناریو اقلیمی A1B به‌همراه سطوح کشت بهینه محصولات و روش‌های نوین آبیاری در کشاورزی (A1B -Opt.A Mod.IR)،
- اعمال سناریو اقلیمی A1B به‌همراه سطوح کشت بهینه محصولات و کاهش سرانه مصرف شرب (A1B -Opt.A, St.Dom)،
- اعمال سناریو اقلیمی A1B به‌همراه کاربرد روش‌های نوین آبیاری در کشاورزی و استاندارد سرانه در بخش شرب (A1B- Mod.IR, St.Dom)

کشاورزی ۹۰ درصد خواهد بود. نتایج این بخش‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.

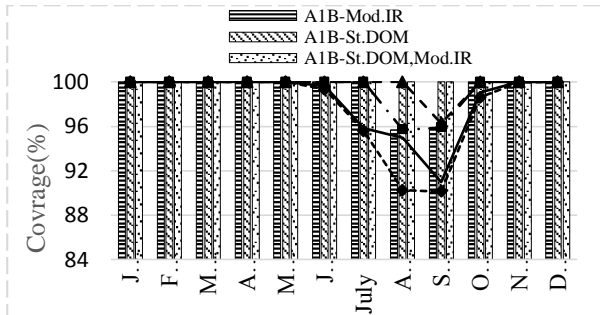


Fig. 16- Coverage of Domestic Water Demand  
شکل ۱۶- درصد تأمین نیاز آب شرب

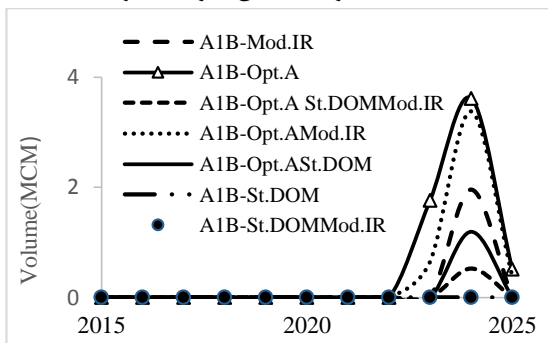


Fig. 17- Unmet Demand under conditions of climate change in each scenario

شکل ۱۷- کمبود بخش شرب تحت شرایط تغییر اقلیم در سناریوها

در زمان احتساب سناریوهای ترکیبی، استفاده از دو سناریو St.DOM و Mod.IR در تأمین نیازها و مواجهه با کمبود، با درصد نسبی عدم تأمین برابر با ۱۵/۰۹ درصد گزینه‌های بهتری هستند اما در این دو سناریو سطوح کشاورزی ثابت خواهند بود که این امر با توجه به افزایش جمعیت و تقاضا در سال‌های آتی قابل اجرا نخواهد بود. بهینه‌کردن سطوح زیر کشت که به تنهایی از جمله راهکارهای بخش مدیریت منطقه می‌باشد نیز در صورت اجرا به علت افزایش سطوح کشاورزی در بخش باغی نمی‌تواند پاسخگوی مدیریت کل دوره باشد.

Table 3- Comparison of scenarios with A1B scenario

جدول ۳- مقایسه سناریوهای ترکیبی با سناریو A1B

Scenario	Total Demand (MCM)	Unmet Demand (MCM)	Relative Unmet Demand (%)	Coverage		
				Domestic	Industrialize	Agriculture
Opt.A	571	135	23.53	96.4	100	84.1
St.DOM	482	73	15.21	100	100	90.4
Mod.IR	509	80	15.73	98.8	100	88.8
Opt.A, Mod.IR	548	114	20.76	97.3	100	85.0
Opt.A, St.DOM	525	101	19.13	98.4	100	87.8
Mod.IR, St.DOM	484	74	15.09	100	100	90.0
Opt.A,St.DOM,Mod.IR	502	82	16.4	99.5	100	89.5

نیاز کشاورزی در ماه‌های ژانویه و فوریه به طور کامل تأمین می‌شود اما در سایر ماه‌ها کمبودی در درصد تأمین وجود دارد که این مقدار در اگوست و سپتامبر با ۶۹/۶ و ۶۱/۶ درصد به حداکثر خود می‌رسد.

### ۳-۱۰- تأثیر تغییر اقلیم بر بخش مصرف شرب

برای بخش شرب کمترین درصد پوشش متعلق به سناریو A1B-Opt.A با مقدار ۹۰/۱۱ درصد سطح پوشش در ماه سپتامبر است. بیشترین مقدار کمبودی که در این دوره مشاهده خواهد شد ۵/۹ میلیون متر مکعب و مربوط به سناریو A1B-Opt.A خواهد بود که ۳/۶ این مقدار مربوط به سال ۲۰۲۴ از مقدار کل ۱۲/۵ میلیون مترمکعب بخش شرب می‌باشد. نمودار سطح پوشش این نیاز در شکل ۱۶ نشان داده شده است. در سناریوهای A1B-St.DOM, Mod.IR و A1B-St.DOM مقدار نیاز شرب در تمامی ماه‌ها بطور کامل تأمین خواهد شد. بنابراین استفاده از مقدار استاندارد مصرف شرب در بهبود وضعیت منابع تأمین آب می‌تواند نقش مؤثری در مدیریت کمی آن داشته باشد. با توجه به بیشترین میزان کمبود در سال ۲۰۲۴ بیشترین این مقدار در ماه اگوست سال با ۱/۲ میلیون متر مکعب در سناریوهای A1B-Opt.A, Mod.IR, A1B-Opt.A است.

### ۳-۱۱- تأثیر تغییر اقلیم بر بخش صنعت

با توجه به اینکه نیاز صنعت در مدل ثابت فرض شده است و هیچ تغییری در استفاده از آب در اینجا اعمال نشد مقدار آب مورد نیاز مطابق با همه سناریوها به طور کامل تأمین خواهد شد و تا انتهای دوره هیچ کمبودی را نخواهد داشت. با اعمال سه سناریو A1B-Opt.A, A1B-Mod.IR, A1B-St.Dom در منطقه و مقایسه آن‌ها در پایان دوره مشخص شد که از بین آن‌ها اعمال سناریو کاهش مصرف سرانه در دوره‌های بعد با مقدار نسبی نیاز تأمین نشده ۱۵/۲۱ درصد بهترین روش در مدیریت منطقه را بدست می‌دهد. این حالت، تأمین صد درصدی نیاز شرب و صنعت را در برداشته ولی میزان تأمین نیاز بخش

در این منطقه تغییرات زیادی نسبت به سال‌های مشاهداتی نخواهند داشت.

در ادامه، برای انجام قضاوت نهایی در مورد عملکرد هر سناریو، از روش AHP و محاسبه شاخص پایداری استفاده گردید. با توجه به اینکه درجه اهمیت شاخص‌های استفاده شده در مقاله حاضر (شامل اعتمادپذیری زمانی، اعتمادپذیری حجمی، حداقل و حداکثر نیاز تأمین نشده و همچنین مقدار کل نیاز تأمین نشده)، با یکدیگر متفاوتند، نیاز است تا با استفاده از روش AHP وزن‌دهی شوند. وزن مربوط به هر شاخص در جدول ۴ آمده است. مقدار اعتمادپذیری حجمی عبارتست از مقدار حجم آب رها شده در کل دوره، نسبت به مقدار کل نیاز مخازن. اعتمادپذیری زمانی، درصد دوره‌هایی است که سیستم به طور کامل نیازهای موجود را تأمین کند و با شکست مواجه نمی‌شود. در جدول ۵ نتایج مربوط به محاسبه شاخص پایداری در سناریوهای مختلف مدیریتی و اقلیمی آمده است. همانطور که از نتایج این جدول مشخص است با توجه به شاخص پایداری که در برگیرنده مجموع وزنی کلیه معیارهای قید شده برای سناریوها (شامل اعتمادپذیری زمانی، اعتمادپذیری حجمی، حداقل و حداکثر نیاز تأمین نشده و همچنین مقدار کل نیاز تأمین نشده) می‌باشد، با وقوع سناریو اقلیمی A1B در شرایطی که سطوح کشت در طی دوره ثابت باشند استفاده از سیستم‌های آبیاری نوین بهترین روش در کاهش و بهبود وضعیت منطقه خواهد بود. اما بکارگیری همزمان سه سناریو مدیریتی می‌تواند در حالتی که سطوح کشت متغیر و به صورت بهینه باشند بهترین گزینه در مدیریت سیستم باشند. این حالت در مورد شرایط اقلیمی B2 نیز تکرار خواهد شد. اما در حالت سوم از شرایط اقلیمی (A2) در حالتی که سطوح کشت بهینه در منطقه اعمال شوند استفاده از سناریوی ترکیب سه حالت مدیریتی با مجموع رهاسازی ۴۰۳ میلیون متر مکعب در انتهای دوره در سناریو A1B بهترین حالت مدیریتی را می‌دهد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله با بررسی آثار تغییر اقلیم در حوضه اهرچای بر روی منابع آب و بخش‌های تقاضا در دوره‌های آینده که با استفاده از سناریوهای انتشار A1B، A2 و B1 تجزیه و تحلیل شد نتایج بطور کلی کاهش میزان بارش و افزایش دما را نشان می‌دهد. طبق سناریو A1B مقدار بارندگی، ۵/۳ درصد نسبت به دوره مشاهداتی کاهش خواهد داشت و این روند کاهش در دو سناریو A2 و B1 نیز حاصل شد. با استفاده از مدل IHACRES مقدار میانگین ماهانه جریان در ایستگاه اورنگ محاسبه شد که مطابق آن جریان، تنها با یک افزایش ۶ درصدی در ماه فوریه مواجه می‌شود ولی بطور کلی مقدار آن کاهش خواهد داشت.

بهینه‌سازی سطوح کشاورزی در سناریوی Opt.A، بطور کلی کاهش سطح زیر کشت محصولات زراعی را در پی داشته است، اما عملاً بدلیل فرض افزایش ۱ درصدی برای اراضی باغی در هر سال، انجام بهینه‌سازی باعث افزایش سطح زیر کشت شده است. مقدار کل سطح زیر کشت در دوره مشاهداتی ۱۷۱۷ هکتار می‌باشد که در شرایطی که بهینه‌سازی انجام گرفت میانگین مجموع این سطوح به ۱۶۷۷ برای دوره وقوع تغییر اقلیم کاهش خواهد یافت. مجموع سطوح زیر کشت محصولات باغی از شروع سال شبیه‌سازی ۳۵۰۰ هکتار می‌باشد. بنابراین ترکیب سناریوی بهینه‌سازی سطح زیر کشت در کنار دو سناریوی کاهش سرانه و سیستم‌های نوین آبیاری می‌تواند عملکرد بهتری نشان دهد. کمبود در این سناریو در بخش نیازهای مختلف در شکل ۱۸ نشان داده شده است.

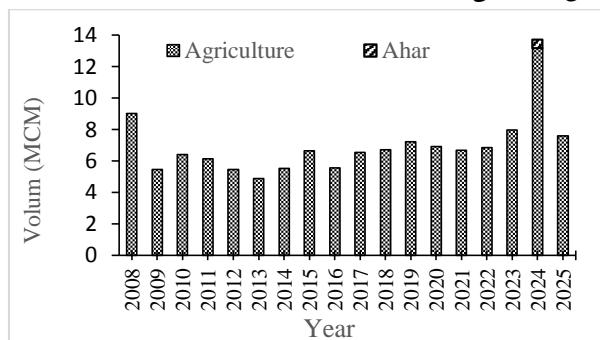


Fig. 18- Unmet demand in A1B - Opt.A- Mod.IR-St.Dom scenario

شکل ۱۸- کمبود نیازها مطابق با سناریو A1B - Opt.A- Mod.IR-St.Dom

Table 4- Weight of each criterion using the AHP method

جدول ۴- وزن محاسبه شده مربوط به هر معیار با استفاده از روش AHP

Index	Weight
Temporal reliability (Re t (%))	0.23
Volumetric reliability (Re v (%))	0.47
Maximum. unmet	0.145
Minimum. unmet	0.053

مقایسه حالت‌های استفاده از سطوح کشت بهینه به صورت مجزا و در کنار سایر سناریوهای مدیریتی این نتیجه را به عمل آورد که تقاضای محصول یونجه در سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷ در حالت اول (A1B- Opt.A) در مقایسه با شرایطی که سطوح کشاورزی در دوره‌های آینده ثابت باشند به مقدار ۰/۱ میلیون متر مکعب میانگین نیاز کاهش خواهد یافت. بطور کلی بیشترین سطح زیر کشت بترتیب مربوط به گندم، گوجه، یونجه و سیب‌زمینی است که با توجه به کمبود منابع آبی

**Table 5- The values of the criteria and the amount of the stability index of the scenarios**

جدول ۵- مقادیر معیارها و مقدار شاخص پایداری سناریوها

Scenarios	Re t	Re v	Unmet Demand	Max. Unmet Demand	Min. Unmet Demand	stability index
	(%)	(%)	(MCM)	(MCM)	(MCM)	
A1B-Opt.A	0.39	0.76	134.7	10.7	0	0.025
A1B-Mod.IR	0.45	0.96	73.4	8.8	0	0.314
A1B-St.DOM	0.46	0.85	80	1.9	0	0.245
A1B-Opt.AMod.IR	0.42	0.79	113.8	10.2	0	0.048
A1B-Opt.ASt.DOM	0.42	0.8	100.6	10.1	0	0.063
A1B-St.DOMMod.IR	0.46	0.84	73.6	3.1	0	0.187
A1B-Opt.A, St.DOM, Mod.IR	0.44	0.82	82.4	6.3	0	0.119

شرایط اقلیمی و مدیریت و بهره‌برداری در منطقه علاوه بر حالت پایدار ترکیب سه سناریو، کاهش سرانه مصرف در کنار سطوح بهینه نیز می‌تواند شرایط مطلوبی را در بر داشته باشد.

#### پی‌نوشت‌ها

- 1- Modeling and Simulation Method
- 2- River Basin Simulation Model
- 3- Water Evaluation and Planning
- 4- Intergovernmental Panel on Climate Change
- 5- Regional Risk Assessment
- 6- Linear Programming
- 7- Non-Linear Programming
- 8- Evapotranspiration (ET)

#### ۵- مراجع

- Ahmadi B (2010) A climate driven model for increased water productivity in agricultural sector. TEZ (In Persian)
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, 300:105-109
- Babaian I, Najafnikie Z, Zabol AF, Adab H, Malbousi S (2010) Climate change assessment over Iran during 2010-2039 by using statistical downscaling of ECHO-G Model. Geography and Development 7(16):135-152
- Bagheri MH, Morid S (2013) Comparison of the performance of WEAP and [MIKE BASIN] models in the allocation of water resource systems, Case study: Talvar River. Journal of Water and Soil Conservation Research 20:168-151 (In Persian)
- Croke BFW, Andrews F, Spate J, Cuddy SM (2005) IHACRES user guide. Technical Report 2005/19.

در بهینه‌سازی سطوح زیر کشت از سه زیر مدل استفاده شد که برای بررسی کارایی این روش مقادیر سود موجود منطقه با مقادیر حاصل از مدل بهینه برای دوره ۲۰۱۱-۲۰۱۴ مقایسه شد. نتایج نشان داد که از این روش ضمن کاهش ۲۳ درصدی در مقدار رهاسازی مقادیر سود را تا ۲۸ درصد افزایش می‌دهد. بنابراین استفاده از این روش راه حل مناسبی برای مدیریت آب و خاک در منطقه بوده و برای دوره‌های شبیه‌سازی نیز استفاده شد. نتایج مدل بهینه‌سازی به عنوان ورودی مدل شبیه‌ساز- بهینه‌ساز WEAP وارد گردید. این مدل با توجه به نیازهای آبی بخش‌های مختلف مصرفی به تخصیص منابع آب می‌پردازد. با کمک تعریف سناریوها می‌توان نحوه مدیریت در WEAP را بررسی کرد. اطلاعات مربوط به تغییر نیاز آبی محصولات و جریان ورودی به مخزن که با در نظر گرفتن اثر تغییر اقلیم به دست آمدند برای سناریوهای مدیریتی نیز اعمال شدند. در این حالت برای هر سناریو اقلیمی هفت سناریوی مدیریتی تعریف شد که نتایج اجرای هر یک از آن‌ها با توجه به معیارهای مختلف برای تعیین بهترین گزینه بخش مدیریتی با هم مقایسه شد. با توجه به شاخص‌های، درصد اعتمادپذیری زمانی، اعتمادپذیری کمی، کمبود و حداکثر کمبود این نتیجه حاصل شد که با توجه به افزایش تقاضا در دوره‌های آبی استفاده از روش‌های بهینه‌سازی برای بهینه کردن سطوح زیر کشت مؤثر است اما این گزینه به تنهایی و نسبت به حالتی که شرایط منطقه ثابت بماند نمی‌تواند پاسخ خوبی برای مدیریت باشد پس با اعمال دو سناریو کاهش مصرف سرانه و استفاده از سیستم‌های آبیاری نوین می‌تواند در بهبود عملکرد سناریوها مؤثر واقع شود. با مقایسه حالاتی از سناریوها که کشت بهینه در ترکیب با دو سناریوی دیگر بود و استفاده از روش سلسله مراتبی AHP این نتیجه را به دست داد که در صورت حضور شرایط اقلیمی متناسب با سناریوهای A1B و B1 استفاده از ترکیب سه سناریو مدیریتی بهترین گزینه است. اما در حالت سناریو A2 از

- Mirakbari M, Ganji A (2010) Reliability analysis of a rangeland system: The application of Profust theory, Stochastic. Environmental Research Risk Assessment 24(3):399-409
- Moghaddasi M, Morid S, Araghinejad S, Alikhani MA (2010) Assessment of irrigation water allocation based on optimization and equitable water reduction approaches to reduce agricultural drought losses: The 1999 drought in the Zayandeh Rud irrigation system (Iran). Irrigation and Drainage 59:377-387
- Nabibidhendi Gh, Mohammadnejad Sh (2008) Concepts of climate change changes with considerations of the Kyoto Protocol. Publishing and Printing University of Tehran, Second Edition (In Persian)
- Ramak Z, Porhemmat J, Sedghi H, Fattahi E, Lashni-Zand M (2017) The climate change effect on probable maximum precipitation in a catchment: A case study of the Karun river catchment in the Shalu bridge site (Iran). Russian Meteorology and Hydrology 42(3):204-211
- Sechi GM, Sulis A (2010) Inter comparison of generic simulation models for water resource systems. International Congress on Environmental Modelling and Software Modeling for Environment's Sake. Fifth Biennial Meeting, Ottawa, Canada
- Tarek D, Azzedine H, Mouldi S, Salam B, Samia H (2017) Water resources and their management under impact of climate change and users pressures in Kebir-West River basin (North-Eastern Algeria), using the WEAP model. Journal of Biodiversity and Environmental Sciences (JBES) 10(4):19-26
- Yaghoobi M, Massah Bavani M (2016) Comparison and evaluation of different sources of uncertainty in the study of climate change impact on runoff in semi-arid basins (Case study: Azam Harat River Basin). Iran-Water Resources Research 3:113-130 (In Persian)
- Yates D, Sieber J, Purkey D, Huber-Lee A (2005) WEAP21 a demand, priority and preference driven water planning model. Part 1. Model characteristics. Water International 30(4):487-500
- Second Edition. iCAM, School of Resources, Environment and Society, The Australian National University, Canberra, <http://www.toolkit.net.au/ihacres>
- Doorenbos J, Kassam AH (1979) Yield response to water. Irrigation and Drainage, 257
- Doorenbos J, Pruitt WO (1984) Guidelines for predicting crop water requirements. Irrig. Drain. Paper 24, Food and Agricultural Organization of the United Nations, Italy
- Farmanbar Z, Delavar M, Imani Amirabadi S (2018) The effects of climate change on water resources and agricultural systems in the context of regional risk assessment (Case study: Lake Zarebar Basin). Iran-Water Resources Research 13(4):75-88 (In Persian)
- IPCC (2001) Third assesment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, 630
- Jakeman AJ, Hornberger GM (1993) How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model. Journal of Water Resources Research 29:2637-2649
- Khajeh S, Paimozd S, Moghaddasi M (2017) Assessing the impact of climate changes on hydrological drought based on reservoir performance indices (case study: ZayandehRud River basin, Iran). Water Resources Management 31(9):2595-2610
- Karamouz M (2012) Studies on water resources and water management and drought management in the Aharchay basin. Detailed Report on the Third Progress, East Azarbaijan Regional Water Company, 5
- Karamouz M, Ahmadi Haghi B, Zahmatkesh Z (2013) Developing an agricultural planning model in a watershed considering climate change impacts. Water Resources Planning and Management 139:349-363
- Li X, Zhao Y, Shi C, Sha J, Wang ZL, Wang Y (2015) Application of water evaluation and planning (WEAP) model for water resources management strategy estimation in coastal Binhai New Area, China. Ocean & Coastal Management 97-109