

## ارزیابی سناریوهای مدیریت آب و تأثیر تغییر اقلیم بر پایداری زیست‌محیطی و کشاورزی (مطالعه موردی: حوضه‌های آبریز زرینه‌رود و سیمینه‌رود)

جمال احمدآلی<sup>۱\*</sup>، غلامعباس بارانی<sup>۲</sup>، کورش قادری<sup>۳</sup> و بهزاد حصاری<sup>۴</sup>

۱. استادیار، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان

غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه

۲. استاد، بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۳. دانشیار، بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۴. استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۳/۱۲؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۰۶/۲۵)

### چکیده

دریاچه ارومیه واقع در شمال غربی ایران طی دو دهه گذشته هر سال حدود ۴۰ سانتی‌متر افت سطح آب داشته و در حال خشک شدن است که این مسئله به عواقب اجتماعی و زیست‌محیطی منجر شده است. در تحقیق حاضر شاخص‌های پایداری زیست‌محیطی و پایداری کشاورزی با استفاده از معیارهای عملکرد تحت تأثیر تغییر اقلیم و راهبردهای مدیریت آب برای حوضه‌های آبریز زرینه‌رود و سیمینه‌رود، به عنوان بزرگ‌ترین زیرحوضه دریاچه ارومیه ارزیابی شد. مدل‌سازی رفتار هیدرولوژیک این حوضه‌ها با استفاده از نرم‌افزار WEAP۲۱ انجام گرفت. برای شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی از مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG استفاده شد. مدل برای سه سناریوی انتشار آینده (A۲، A۱B و B۱)، طی دوره ۲۰۱۵-۲۰۴۰، و پنج سناریوی مدیریت آب: ۱. ادامه وضع موجود (S۰)، ۲. تغییر الگوی کشت (S۱)، ۳. بهبود راندمان انتقال و توزیع (S۲)، ۴. ترکیب بهبود راندمان انتقال و توزیع با بهبود راندمان کاربرد با استفاده از تکنولوژی‌های نوین (S۳)، و ۵. ترکیب تغییر الگوی کشت با بهبود راندمان کل آبیاری (S۴) تحلیل شد. نتایج نشان داد بیشترین مقادیر شاخص‌های پایداری زیست‌محیطی و پایداری کشاورزی مربوط به سناریوی ترکیب تغییر الگوی کشت با بهبود راندمان کل آبیاری تحت سناریوی انتشار B۱ (B۱S۴) است. تحت این سناریو، مقدار جریان متوسط سالیانه ورودی به دریاچه ارومیه از حوضه‌های آبریز زرینه‌رود و سیمینه‌رود به ترتیب برابر ۱۲۹۲ و ۳۵۱ میلیون مترمکعب در سال شده و در نتیجه نیاز زیست‌محیطی دریاچه از این حوضه‌ها تأمین خواهد شد.

**کلیدواژگان:** دریاچه ارومیه، شبکه آبیاری زرینه‌رود، مدل LARS-WG، مدل WEAP۲۱.

## مقدمه

در مناطق خشک و نیمه‌خشک، کشاورزی پرمصرف به کاهش سطح آب دریاچه‌های بزرگی مانند آرال، ارومیه، هامون و بختگان منجر شده است [۱]. دریاچه ارومیه، بزرگ‌ترین دریاچه ایران و دومین دریاچه فوق شور جهان طی دو دهه اخیر در حال خشک شدن بوده و به پیامدهای اجتماعی-زیست‌محیطی مشابه یا حتی بزرگ‌تر از فاجعه دریای آرال منجر شده است [۲].

به دلیل کمبود آب در جهان، علاقه به یافتن راه‌هایی برای کاهش مصرف آب، و تخصیص مجدد آب صرفه‌جویی شده برای استفاده‌های دیگر از جمله احیای محیط زیست وجود دارد [۳]. یکی از مشکلات جامعه ما که در آینده شدیدتر نیز خواهد شد، کمبود آب در بخش‌های مصرف‌کننده، به‌خصوص بخش کشاورزی، تأمین امنیت غذایی از منابع آب محدود و چالش کاهش ناگزیر سهم آب بخش کشاورزی برای تأمین نیاز زیست‌محیطی است [۴]. برای صرفه‌جویی در آب برای محیط زیست، اقدامات صرفه‌جویی در مصرف آب کشاورزی به‌عنوان دستور کار سیاست زیست‌محیطی در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک معرفی شده است [۵].

تغییرات اقلیم و فعالیت‌های انسانی دو عامل عمده مؤثر بر تغییر منابع آب و هیدرولوژی حوضه است. درک کارکرد عوامل اصلی مؤثر در تغییرات رواناب برای مدیریت حوضه‌ها اهمیت دارد [۶ و ۷].

جلیلی و همکارانش آثار تغییر اقلیم و عوامل انسانی را روی نوسانات سطح آب دریاچه ارومیه بررسی کردند [۸]. نتایج پژوهش آنها نشان داد کاهش سطح آب اخیر دریاچه ارومیه بیشتر ناشی از آثار انسانی است تا تغییر اقلیم. دلاور و همکارانش آثار تغییر اقلیم بر نوسانات تراز آب دریاچه ارومیه را بررسی کردند [۹]. در پژوهش یادشده تأثیر تغییر اقلیم بر تراز آینده دریاچه ارومیه تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌های اقلیمی به کمک الگوی ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG تحلیل شد. نتایج پژوهش آنها نشان داد تراز دریاچه طی سال‌های آینده روند کاهش‌ی را طی خواهد کرد. گودرزی و همکارانش عملکرد مدل‌های ریزمقیاس‌گردانی LARS-WG و SDSM در شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه را ارزیابی کردند [۱۰]. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد هیچ یک از مدل‌ها برتری

مطلق بر یکدیگر ندارند و به رغم تفاوت‌هایی در شبیه‌سازی، می‌توانند در بررسی‌های تغییرات اقلیمی مفید واقع شوند.

بلانکو-گوتیرز راهبردهای مدیریت آب را برای برقراری تعادل بین آب برای طبیعت (حفاظت از تالاب‌ها) و آب برای غذا روی حوضه آبریز گوادایانا واقع در کشور اسپانیا، آنالیز هیدرولوژیکی-اقتصادی کرد [۱۱]. نتایج مطالعه ایشان نشان داد در دوره‌های خشکسالی‌های طولانی مدت (پیش‌بینی افزایش دما بین ۱/۵ تا ۳/۶ درجه سانتی‌گراد و کاهش ۱۰ تا ۲۰ درصدی بارش‌ها تا سال ۲۰۵۰)، با کاهش آب در دسترس و افزایش تقاضای آب آبیاری قطعاً تنش‌ها روی کشاورزی، منابع اراضی و منابع آب تشدید خواهد شد. جویس و همکارانش استراتژی‌های مدیریت آب کشاورزی را در زمینه سازگاری با تغییر اقلیم با استفاده از مدل WEAP بررسی کردند [۱۲]. استراتژی‌های سازگاری شامل بهبود تکنولوژی‌های آبیاری و تغییر الگوی کشت به محصولات باارزش‌تر یا با مصرف آب کمتر می‌شد. مهتا و همکارانش با استفاده از مدل WEAP عرضه و تقاضای آب آبیاری را بر اثر سناریوهای تغییر اقلیم و کاربری اراضی در منطقه یولوی کالیفرنیا بررسی کردند [۱۳]. آنها سه سناریو تا سال ۲۰۹۹ را به شرح زیر تست کردند: ۱. تغییر در الگوی کشت بر اساس پیش‌بینی‌های اقتصادی، ۲. تغییر به سمت الگوهای کشت متنوع‌تر و با کارایی مصرف آب بیشتر، و ۳. ترکیب بهبود تکنولوژی آبیاری و تغییر در الگوی کشت. نتایج پژوهش آنها نشان داد تقاضای آب آبیاری تحت سناریوهای اقلیم پایه B1 و A2 در اواخر قرن به ترتیب ۲۶ و ۳۲ درصد افزایش می‌یابد. بیشترین صرفه‌جویی در مصرف آب در سناریوی ترکیب الگوهای کشت متنوع‌تر و با کارایی مصرف آب بیشتر با بهبود در تکنولوژی آبیاری اتفاق می‌افتد، که این میزان تقاضا را حدود ۱۲ درصد زیر میانگین زمانی کاهش می‌دهد.

با توجه به کمبود منابع آب و عدم قطعیت در اقلیم و تقاضای آینده، تصمیم‌گیران نیاز به تکنیک‌های تحلیل پایداری در مدیریت منابع آب دارند [۱۴]. لاکس<sup>۱</sup> برای نخستین‌بار شاخصی را برای کمی کردن پایداری سیستم‌های منابع آب با استفاده از سه معیار اطمینان‌پذیری<sup>۲</sup>، تاب‌آوری<sup>۳</sup> و آسیب‌پذیری<sup>۴</sup> توسعه داد. وی شاخص پایداری<sup>۵</sup> را برای ارزیابی

1. Loucks
2. Reliability
3. Resilience
4. Vulnerability
5. Sustainability Index

حوضه‌های آبریز زرينه‌رود و سيمينه‌رود بزرگ‌ترین زیرحوضه حوضه آبریز دریاچه ارومیه هستند، این مطالعه روی این دو حوضه صورت گرفت. در مطالعه حاضر ارزیابی راهبردها با استفاده از شاخص‌های پایداری زیست‌محیطی، پایداری کشاورزی و کمبود آب آبیاری انجام شد.

### مواد و روش‌ها

#### منطقه مطالعه شده

حوضه آبریز دریاچه ارومیه با وسعت ۵۱۸۷۶ کیلومتر مربع در ناحیه کوهستانی شمال غرب ایران و بین استان‌های آذربایجان غربی با ۴۲ درصد مساحت حوضه، آذربایجان شرقی با ۳۷ درصد مساحت حوضه و کردستان با ۱۱ درصد مساحت حوضه واقع شده است. دریاچه ارومیه نیز با وسعتی حدود ۵۱۰۰ کیلومتر مربع، ۱۰ درصد مساحت حوضه را به خود اختصاص داده و بین استان‌های آذربایجان غربی و آذربایجان شرقی مشترک است [۱۸]. با توجه به اینکه حوضه‌های آبریز زرينه‌رود و سيمينه‌رود حدود ۵۲ درصد حوضه آبریز ارومیه را تأمین کرده [۱۹] و از زیرحوضه‌های مهم حوضه آبریز دریاچه ارومیه هستند، تحقیق حاضر روی این دو زیرحوضه انجام شده است. زیرحوضه زرينه‌رود- سيمينه‌رود در جنوب و جنوب شرقی دریاچه ارومیه واقع شده و از نظر وسعت بزرگ‌ترین زیرحوضه از حوضه آبریز دریاچه ارومیه است (شکل ۱).

#### معرفی مدل WEAP

WEAP یک ابزار مدل‌سازی است که می‌تواند ارزیابی یکپارچه‌ای از اقلیم، هیدرولوژی، کاربری اراضی، تأسیسات آبیاری و اولویت‌های مدیریت آب حوضه آبریز ارائه دهد [۲۰ و ۲۱]. در تحقیق حاضر از روش رطوبت خاک مدل WEAP برای مدل‌سازی واکنش هیدرولوژیکی حوضه‌ها و میان حوضه‌ها استفاده شد.

#### روش رطوبت خاک<sup>۱</sup>

روش رطوبت خاک مدل WEAP بر اساس توابع تجربی است که رفتار تبخیر- تعرق، رواناب سطحی، جریان بین لایه‌ای، جریان پایه و نفوذ عمقی را برای یک حوضه توصیف می‌کند. جزئیات این روش در مقاله احمدآلی و همکارانش [۲۲] آمده است.

#### ساختار مدل WEAP

مدل برای حوضه‌های آبریز زرينه‌رود و سيمينه‌رود با استفاده از

کارایی گزینه‌های مختلف مدیریتی از دیدگاه ذی‌نفعان آب و محیط زیست تعریف کرد. شاخص پایداری، تخمینی بر ظرفیت سیستم در کاهش آسیب‌پذیری آن است. اگر یک سیاست پیشنهادی سبب شود که یک سیستم پایدارتر شود، این شاخص نشان می‌دهد سیستم ظرفیت زیادی در کاهش آسیب‌پذیری در آینده دارد. پس از آن، شاخص پیشنهادی در تحقیقات متعددی توسط محققان استفاده شد [۱۵].

ییلماز و هارمانسیگولو با استفاده از مدل WEAP مدیریت منابع آب را در حوضه آبریز رودخانه گدیز در ترکیه ارزیابی کردند [۱۶]. ورودی اولیه مدل ارائه شده مقدار آب سطحی است که تا حد زیادی به مصارف آبیاری اختصاص داده شده است. بنابراین، روابط متقابل عرضه و تقاضا در مصرف آب کشاورزی تمرکز اصلی مطالعه آنها را تشکیل داده است. نتایج مطالعه آنها بر اساس شاخص‌های مختلف از جمله شاخص پایداری نشان داد حوضه آبریز رودخانه گدیز کاملاً به شرایط خشکسالی حساس است و بخش کشاورزی به طور درخور توجهی تحت تأثیر کسری آبیاری قرار گرفته که به خصوص در دوره‌های خشکسالی شدت آن بیشتر است. سانتیکایاسا و همکارانش با استفاده از مدل WEAP پایداری مصرف آب را تحت سناریوهای مدیریت آبیاری و تغییر اقلیم در حوضه آبریز رودخانه سیتاروم در کشور اندونزی ارزیابی کردند [۱۷]. آنها مدل را برای دو طرح تغییر اقلیم در آینده (A۲ و B۲) برای دوره زمانی تا سال ۲۰۹۹ و برای چهار سناریو: ۱. افزایش سطح زیر کشت آبی، ۲. افزایش تراکم کشت گیاه، ۳. تغییر در الگوی کشت و ۴. ترکیب افزایش سطح زیر کشت آبی و افزایش تراکم کشت امتحان کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد تأمین آب به میزان حدود ۸۵ و ۶۰ درصد (نسبت به دوره تاریخی) در سناریوهای تغییر اقلیم A۲ و B۲ تا آخر قرن افزایش می‌یابد. نیاز آب آبیاری و شاخص پایداری (اطمینان‌پذیری، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری) نسبت به دوره تاریخی در آینده کاهش خواهد یافت. نسبت به سناریوی پایه، افزایش سطح زیر کشت پایدارتر از افزایش تراکم کشت یا ترکیب افزایش سطح زیر کشت آبی و افزایش تراکم کشت خواهد بود. افزایش سطح زیر کشت آبی قابلیت تطابق بیشتری نسبت به تغییرات احتمالی اقلیم در آینده دارد.

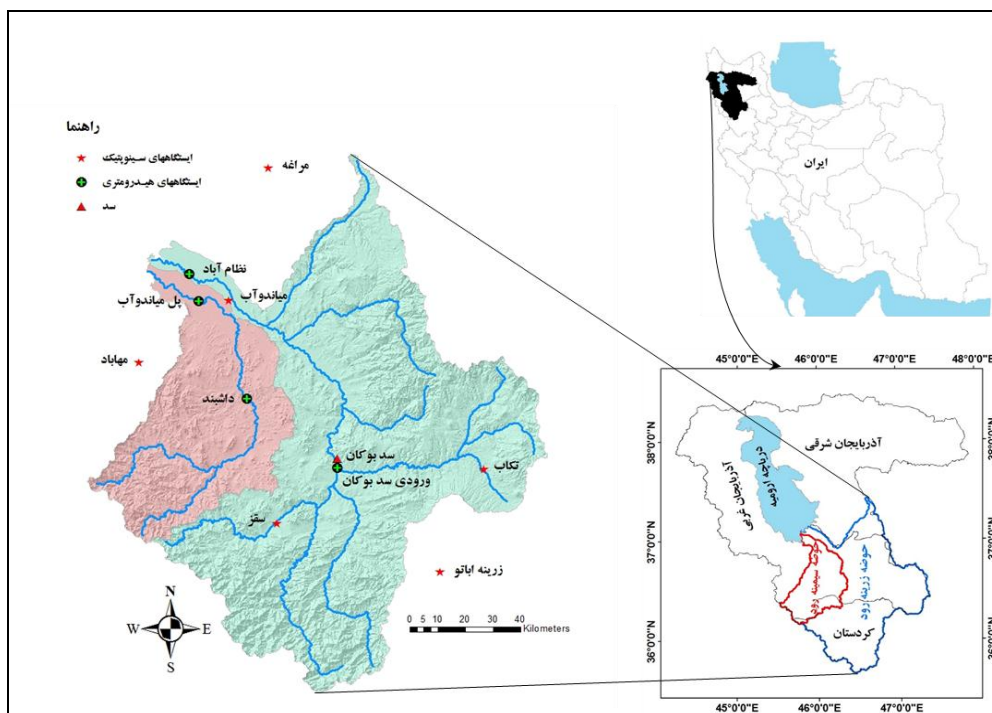
هدف اصلی از انجام تحقیق حاضر ارزیابی راهبردهای مدیریت آب کشاورزی تحت تأثیر تغییر اقلیم و اثر آن بر ورودی آب به دریاچه ارومیه طی سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۱۵ با استفاده از مدل WEAP21 است. با توجه به اینکه

مطالعه شده به تعداد ۲۸ ایستگاه (چهار ایستگاه سینوپتیک، ۱۱ ایستگاه تبخیرسنجی و ۱۳ ایستگاه باران‌سنجی) برای پارامترهای هواشناسی بارش، دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و کسر ابرناکی استفاده شد. در پژوهش حاضر از آمار ماهانه دبی چهار ایستگاه هیدرومتری استفاده شد که موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری در شکل ۲ آمده است.

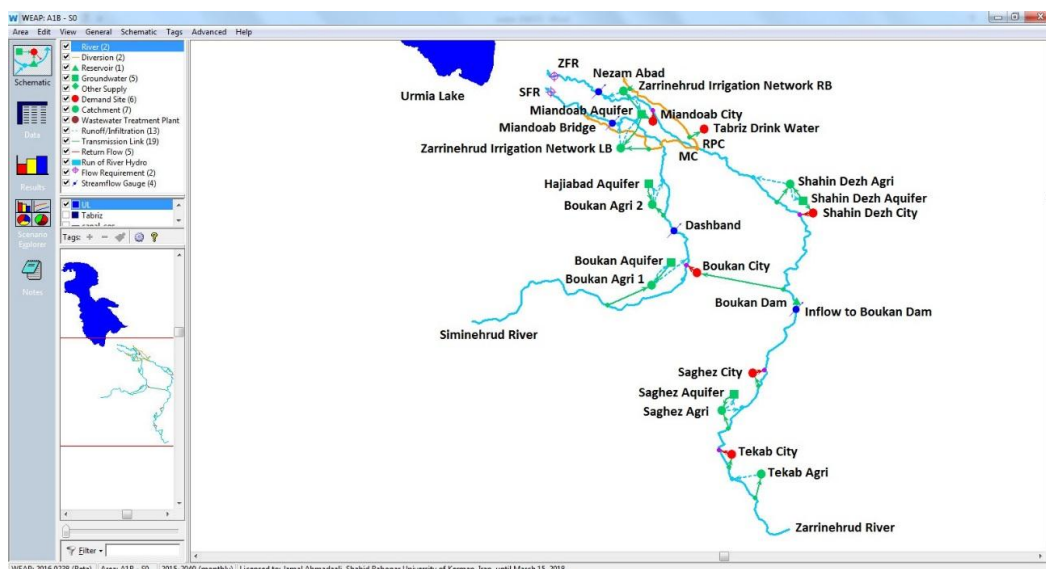
نرم‌افزار ارزیابی و برنامه‌ریزی منابع آب (WEAP21) ساخته شد. شماتیک مدل در شکل ۲ نشان داده شده است.

**منابع داده‌ها و اطلاعات**

در تحقیق حاضر یک دوره آماری ۲۰ ساله (۱۳۷۴-۱۳۹۳) برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شد. ایستگاه‌های هواشناسی داخل و نزدیک حوضه‌های آبریز



شکل ۱. نقشه منطقه مطالعه شده



شکل ۲. طرح مدل WEAP برای حوضه‌های آبریز زربنه‌رود و سیمینه‌رود

دما و بارندگی ریزمقیاس‌شده مربوط به پیش‌بینی اقلیمی سناریوهای انتشار A2، A1B و B1 برداشته شد.

#### تدوین سناریوها

در تحقیق حاضر سناریوها بر اساس راه‌کارهای مدیریتی و تغییر اقلیم آینده تدوین شده‌اند. به‌منظور مشخص کردن سناریوهای اقلیم آینده، خروجی بارش و دمای ریزمقیاس‌شده توسط مدل LARS-WG برای مدل گردش عمومی جو HadCM3 سه سناریوی انتشار A2، A1B و B1 طی دوره ۲۰۱۵-۲۰۴۰ استفاده شد.

مشخصات حوضه‌های کشاورزی برای وضع موجود<sup>۴</sup> (سال ۲۰۱۵) به شرح جدول ۱ است.

سناریوهای منتخب، ترکیبی از تغییر اقلیم و راه‌کارهای مدیریتی به شرح زیر است:

#### ۱. سناریوی پایه (S0)

سناریوی پایه بر اساس پیش‌بینی اقلیم آینده (A2، A1B و B1) است. سطح زیر کشت آبی و ترکیب کشت در آینده برای سناریوی پایه ثابت در نظر گرفته شده و برابر داده‌های سال ۲۰۱۴ است، ولی تقاضای آب خانگی بر اساس پیش‌بینی میزان رشد جمعیت در آینده در مدل متغیر است و برای تمامی سناریوهای دیگر نیز اعمال خواهد شد.

#### ۲. سناریوی S1

سناریوی S1 ترکیبی از تغییر اقلیم و تغییر ترکیب کشت موجود با محصولات با نیاز آبی کمتر است. در این سناریو محصولات پرمصرف یونجه و چغندر قند با محصولات کم‌مصرف تر گندم، جو و کلزا جایگزین خواهد شد. البته، در هر منطقه کشاورزی مقدار کمی از سطح زیر کشت یونجه برای مصارف محلی تغییر کشت داده نخواهد شد.

#### ۳. سناریوی S2

سناریوی S2 ترکیبی از تغییر اقلیم و بهبود راندمان انتقال و توزیع به میزان ۱۵ درصد وضع موجود به منظور کاهش تلفات آب است. در این سناریو بهبود راندمان انتقال و توزیع از طریق بهسازی شبکه آبیاری زرينه‌رود، لایروبی و پوشش انهار، انتقال آب با لوله و آموزش و حمایت فنی کشاورزان صورت خواهد گرفت.

#### واسنجی و اعتبارسنجی مدل WEAP

در تحقیق حاضر مدل با مقیاسه داده‌های دبی جریان شبیه‌سازی‌شده در مقیاس ماهانه با داده‌های مشاهداتی در ایستگاه‌های هیدرومتری منتخب، واسنجی شد. یک دوره آماری ۱۱ ساله (از سال آبی ۱۳۷۳-۱۳۷۴ تا ۱۳۸۳-۱۳۸۴) برای واسنجی مدل و یک دوره ۱۰ ساله (از سال آبی ۱۳۸۴-۱۳۸۵ تا ۱۳۹۲-۱۳۹۳) برای اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شد. جزئیات بیشتر در مقاله احمدآلی و همکارانش [۲۲] آمده است.

#### تغییر اقلیم

به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر منابع آب حوضه‌ها، از مدل اقلیمی HadCM3 تحت سناریوهای انتشار A2، A1B و B1 بر اساس IPCC<sup>۱</sup> [۲۳] برای دوره ۲۰۱۵-۲۰۴۰ استفاده شد. خروجی مدل‌های اقلیمی دقت تجزیه مکانی و زمانی لازم برای مدل‌های هیدرولوژیکی را ندارد، بنابراین لازم است که خروجی مدل‌های اقلیمی برای منطقه مد نظر ریزمقیاس شود. در تحقیق حاضر برای ریزمقیاس کردن داده‌ها از مدل LARS-WG استفاده شد. در پژوهش حاضر دوره پایه سال‌های ۱۹۸۶-۲۰۱۰ برای شش ایستگاه سینوپتیک زرينه اباتو، تکاب، سقز، مهاباد، میاندوآب و مراغه بود. موقعیت این ایستگاه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

#### ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر مؤلفه‌های هیدرولوژیکی با استفاده از مدل WEAP

به‌منظور تجزیه و تحلیل آثار آینده تغییر اقلیم بر دبی جریان<sup>۲</sup> و تبخیر-تعرق<sup>۳</sup>، مدل WEAP برای فرایندهای هیدرولوژیکی با استفاده از پیش‌بینی اقلیمی سناریوهای انتشار A2، A1B و B1 (استخراج‌شده از مدل گردش عمومی جو HadCM3 و مدل LARS-WG) استفاده شد. برای تعیین شرایط پایه، مدل واسنجی‌شده WEAP برای تولید دبی جریان و تبخیر-تعرق حوضه‌های آبریز زرينه‌رود و سیمینه‌رود طی دوره مطالعه‌شده (۱۹۸۶-۲۰۱۰) استفاده شد. گام‌های مشابه برای تولید دبی جریان و تبخیر-تعرق در دوره آینده (۲۰۱۵-۲۰۴۰) با استفاده از

4. Current Account

1. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)  
2. Stream flow  
3. Evapotranspiration (ET)

جدول ۱. مشخصات حوضه‌های کشاورزی (مناطق آبیاری) در وضع موجود (سال ۲۰۱۵) [۲۴-۲۷]

حوضه آبریز	منطقه آبیاری	مساحت (هکتار)	محصولات غالب	درصد مساحت سیستم‌های آبیاری	راندمان کل آبیاری
سیمینه‌رود	بوکان ۱	۱۵۰۰۰	گندم، چغندر قند، یونجه، سیب	سطحی (۵۸/۱)، بارانی (۴۰/۷)، قطره‌ای (۱/۲)	۰/۵
	بوکان ۲	۱۰۰۰۰	گندم، چغندر قند، یونجه، سیب	سطحی (۴۹)، بارانی (۵۰/۳)، قطره‌ای (۰/۷)	۰/۵۲
زربینه‌رود	سقز	۱۶۰۰۰	یونجه، گندم، جو، چغندر قند، سیب	سطحی (۶۵/۸)، بارانی (۳۲/۴)، قطره‌ای (۱/۸)	۰/۴۳
	تکاب	۱۳۰۰۰	یونجه، سیب، گندم	سطحی (۹۵/۲)، بارانی (۳)، قطره‌ای (۱/۸)	۰/۳۵
زربینه‌رود	شاهین دژ	۳۲۰۰۰	گندم، یونجه، جو، چغندر قند، سیب	سطحی (۸۶/۵)، بارانی (۱۲)، قطره‌ای (۱/۵)	۰/۳۶
	ساحل راست شبکه آبیاری زربینه‌رود	۲۵۵۰۰	گندم، یونجه، انگور، سیب، چغندر قند	سطحی (۹۴/۹)، بارانی (۴/۹)، قطره‌ای (۰/۲)	۰/۴۴
	ساحل چپ شبکه آبیاری زربینه‌رود	۲۴۵۰۰	گندم، یونجه، انگور، سیب، چغندر قند	سطحی (۹۰/۶)، بارانی (۹)، قطره‌ای (۰/۴)	۰/۴۳

جدول ۲. شاخص‌های ارزیابی [۱۶]

شاخص	شرح
پایداری زیست‌محیطی	جمع زمانی سری‌های زمانی نسبت عرضه به تقاضا (فقط برای نیاز زیست‌محیطی) بر اساس معیار عملکرد وقتی که مقدار رضایت‌بخش برابر یک است (پوشش کامل)
پایداری کشاورزی	جمع زمانی سری‌های زمانی نسبت عرضه به تقاضا (فقط برای آبیاری) بر اساس معیار عملکرد وقتی که مقدار رضایت‌بخش بین ۰/۸ و ۱ در نظر گرفته شود
کمبود آب آبیاری	نشان‌دهنده تقاضای برآورد نشده سالانه برای آبیاری است (متوسط سالانه در ارزیابی‌ها استفاده می‌شود)؛ $10^6 \text{ m}^3$

۴. سناریوی ۳ (S۳) شاخص پایداری زیست‌محیطی (ESI)<sup>۱</sup>، پایداری کشاورزی (ASI)<sup>۲</sup> و کمبود آب آبیاری (IWD)<sup>۳</sup> به شرح جدول ۲ در نظر گرفته شد. شاخص پایداری زیست‌محیطی برای ارزیابی وضعیت تأمین نیاز زیست‌محیطی (EFRs)<sup>۴</sup> دریاچه ارومیه از حوضه‌های آبریز زربینه‌رود و سیمینه‌رود و شاخص‌های پایداری کشاورزی و کمبود آب آبیاری برای ارزیابی وضعیت آبیاری حوزه‌های آبریز زربینه‌رود و سیمینه‌رود به کار رفته‌اند.

۵. سناریوی ۴ (S۴) شاخص پایداری (SI)<sup>۵</sup> شاخص پایداری یک مفهوم نسبتاً جدید برای اندازه‌گیری عملکرد سیستم‌های منابع آب در دوره‌های زمانی طولانی است [۲۸]. این شاخص برای تسهیل ارزیابی یک سیاست

سناریوی ۳ ترکیبی از سناریوی S۲ و بهبود راندمان کاربرد از طریق تغییر سیستم‌های آبیاری سطحی به بارانی و قطره‌ای است. در این سناریو راندمان کاربرد سیستم آبیاری بارانی ۷۵ درصد و راندمان کاربرد سیستم آبیاری قطره‌ای ۹۵ درصد در نظر گرفته شده است.

سناریوی ۴ ترکیبی از سناریوی S۱ و S۳ است. در این سناریو هم‌زمان با تغییر ترکیب کشت به محصولات کم‌مصرف‌تر، راندمان‌های انتقال، توزیع و کاربرد (راندمان کل آبیاری) نیز افزایش یافته است.

#### شاخص‌های ارزیابی

به‌منظور ارزیابی سناریوهای در نظر گرفته‌شده، سه

1. Environmental Sustainability Index (ESI)
2. Agricultural Sustainability Index (ASI)
3. Irrigation Water Deficit (IWD)
4. Environmental Flow Requirements (EFRs)
5. Sustainability Index (SI)

گروه k با مصرف‌کنندگان آب از i تا z متعلق به این گروه استفاده می‌شود [۲۹].

$$SG^k = \sum_{i=1}^{j \in k} W^i \times SI^i \quad (4)$$

در رابطه یادشده  $W^i$  وزن نسبی برای مصرف‌کننده آب  $W^i$ ، که بین ۰-۱ متغیر بوده و مجموع آن برابر با یک است. اگر  $SI$  هر مصرف‌کننده با تقاضای سالیانه آب آن وزن‌دهی شود،  $SG$  برای گروه  $k$  به صورت زیر بیان می‌شود.

$$SG^k = \sum_{i=1}^{j \in k} \frac{\text{Water demand}^i}{\text{Water demand}^k} \times SI^i \quad (5)$$

که در آن:

$$\text{Water demand}^k = \sum_{i=1}^{j \in k} \text{Water demand}^i \quad (6)$$

#### نیاز زیست‌محیطی دریاچه ارومیه

بر اساس تحقیقات عباسپور و نظری‌دوست [۳۰]، دریاچه ارومیه سالانه به حدود ۳۱۰۰ میلیون مترمکعب جریان ورودی آب برای داشتن یک اکوسیستم پایدار نیاز دارد که این مقدار معادل تراز اکولوژیک سطح آب دریاچه (۱۲۷۴/۱ متر بالاتر از سطح دریا) است. همچنین، بر اساس آمار درازمدت دوره تاریخی، حوضه آبریز زرينه‌رود حدود ۴۱ درصد و حوضه آبریز سيمينه‌رود حدود ۱۱ درصد نیاز زیست‌محیطی دریاچه ارومیه را تأمین کرده‌اند [۱۹]. بنابراین، سهم تأمین نیاز زیست‌محیطی دریاچه ارومیه از حوضه‌های آبریز زرينه‌رود و سيمينه‌رود به ترتیب برابر ۱۲۷۱ و ۳۴۱ میلیون مترمکعب در سال در محاسبات در نظر گرفته شد.

#### نتایج و بحث

##### عملکرد مدل‌های WEAP و LARS-WG در دوره تاریخی

##### مدل WEAP

مقادیر آماری و شاخص‌های مربوط به ارزیابی کمی نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل برای ایستگاه‌های هیدرومتری نشان داد مقدار ضریب نش-ساتکلیف برای جریان ماهانه از ۰/۷۴ تا ۰/۸۳ برای دوره واسنجی و از ۰/۷۰ تا ۰/۸۵ برای دوره اعتبارسنجی متغیر است، شاخص تطابق از ۰/۹۲ تا ۰/۹۵ برای دوره واسنجی و از ۰/۹۱ تا ۰/۹۶ برای دوره اعتبارسنجی متغیر است. نتایج عملکرد خوب مدل را در شبیه‌سازی نشان داد.

مدیریت آب و مقایسه آن با سایر سیاست‌های دیگر پیشنهاد شده است [۱۷]. شاخص پایداری از مقدار صفر، برای کمترین و بدترین مقدار ممکن، تا مقدار یک برای بیشترین و بهترین مقدار ممکن تغییر می‌کند [۱۶]. در تحقیق حاضر شاخص پایداری به صورت رابطه ۱ محاسبه شده است [۲۹]. شاخص پایداری زیست‌محیطی (ESI) و شاخص پایداری کشاورزی (ASI) نیز بر اساس رابطه ۱ با روابط ۲ و ۳ محاسبه شده‌اند.

$$SI^i = \left[ \text{Rel}^i \times \text{Res}^i \times (1 - \text{Vul}^i) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

$$ESI = \left[ \text{Rel}_{\left(\frac{Se}{De}\right)} \times \text{Res}_{\left(\frac{Se}{De}\right)} \times (1 - \text{Vul}_{\left(\frac{Se}{De}\right)}) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

$$ASI = \left[ \text{Rel}_{\left(\frac{Sa}{Da}\right)} \times \text{Res}_{\left(\frac{Sa}{Da}\right)} \times (1 - \text{Vul}_{\left(\frac{Sa}{Da}\right)}) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

در روابط یادشده، ESI شاخص پایداری زیست‌محیطی،  $\text{RE}_{(Se/De)}$  اطمینان‌پذیری نسبت عرضه به تقاضای<sup>۱</sup> نیاز زیست‌محیطی دریاچه ارومیه،  $\text{RS}_{(Se/De)}$  تاب‌آوری نسبت عرضه به تقاضای نیاز زیست‌محیطی دریاچه ارومیه،  $\text{VU}_{(Se/De)}$  آسیب‌پذیری نسبت عرضه به تقاضای نیاز زیست‌محیطی دریاچه ارومیه، ASI شاخص پایداری کشاورزی،  $\text{RE}_{(Sa/Da)}$  اطمینان‌پذیری نسبت عرضه به تقاضای مناطق آبیاری،  $\text{RS}_{(Sa/Da)}$  تاب‌آوری نسبت عرضه به تقاضای مناطق آبیاری و  $\text{VU}_{(Sa/Da)}$  آسیب‌پذیری نسبت عرضه به تقاضای مناطق آبیاری است.

در تحقیق حاضر مقادیر تقاضای آبیاری برای مناطق آبیاری با استفاده از مدل WEAP به صورت ماهانه محاسبه شد. برای مقادیر عرضه یا مصارف آبیاری نیز از داده‌های گرفته‌شده از شرکت سهامی آب منطقه‌ای و سازمان جهاد کشاورزی استان‌های آذربایجان غربی و کردستان استفاده شد. همچنین، شاخص کمبود آب آبیاری (تقاضای برآوردنشده) بر اساس مقادیر متوسط سری‌های زمانی که به صورت سالیانه از دوره شبیه‌سازی از مدل WEAP به دست می‌آید، محاسبه شد.

برای مقایسه گروهی مصرف‌کنندگان آب، پایداری بر اساس گروه (SG)<sup>۲</sup> به عنوان میانگین وزنی شاخص‌های پایداری تعریف شد. SG برای محاسبه پایداری برای یک

1. Supply/Demand (S/D) Ratio  
2. Sustainability by Group (SG)

## بارش و دما

نتایج مقایسه میانگین ماهانه بارش و دمای مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل LARS-WG بر اساس شاخص‌های مربوط به آن برای ایستگاه‌های مطالعه شده نشان داد مدل به خوبی قادر است تغییرات ممکن در آینده را مطابق سناریوهای اقلیم آینده پیش‌بینی کند.

## اقلیم آینده

نتایج متوسط سالیانه بارش، کمترین و بیشترین دما برای ایستگاه‌های مطالعه شده برای دوره پایه (۱۹۸۶-۲۰۱۰) و دوره آینده (۲۰۱۵-۲۰۴۰) نشان داد بارش ایستگاه‌های مطالعه شده در دوره آتی برای تمامی سناریوهای انتشار نسبت به دوره پایه افزایش نشان می‌دهد. بیشترین بارش برای سناریوهای انتشار نیز برای تمامی ایستگاه‌ها مربوط به سناریوی انتشار A2 بود. همچنین، کمترین و بیشترین دمای ایستگاه‌های مطالعه شده در دوره آتی برای تمامی سناریوهای انتشار نسبت به دوره پایه افزایش نشان داد.

## اثر تغییر اقلیم بر هیدرولوژی منطقه مطالعه شده

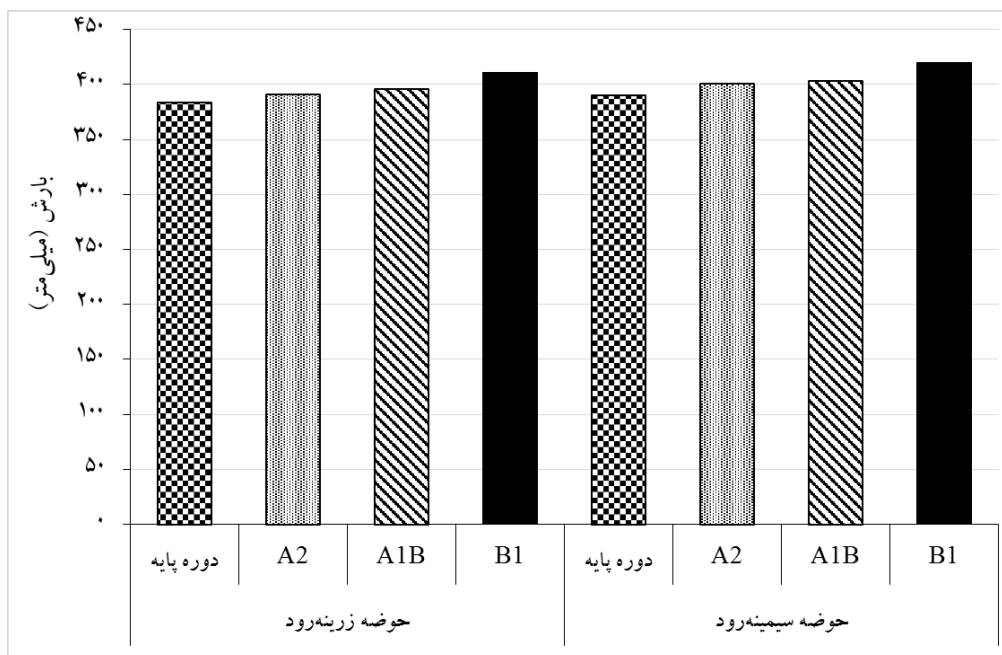
## تغییر در بارش

شکل ۳ تغییرات پیش‌بینی شده متوسط بارش در دوره

آینده (۲۰۱۵-۲۰۴۰) برای سناریوهای انتشار A2، A1B و B1 در مقایسه با دوره پایه (۱۹۸۶-۲۰۱۰) را برای حوضه‌های آبریز زرينه‌رود و سيمينه‌رود نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳ پیش‌بینی می‌شود که مقدار متوسط بارش برای حوضه زرينه‌رود در دوره آینده (۲۰۱۵-۲۰۴۰) برای سناریوهای انتشار A2، A1B و B1 در مقایسه با دوره پایه (۱۹۸۶-۲۰۱۰) به ترتیب حدود ۱/۸، ۳/۱ و ۷ درصد و برای حوضه سيمينه‌رود به ترتیب حدود ۲/۸، ۳/۳ و ۷/۷ درصد افزایش یابد.

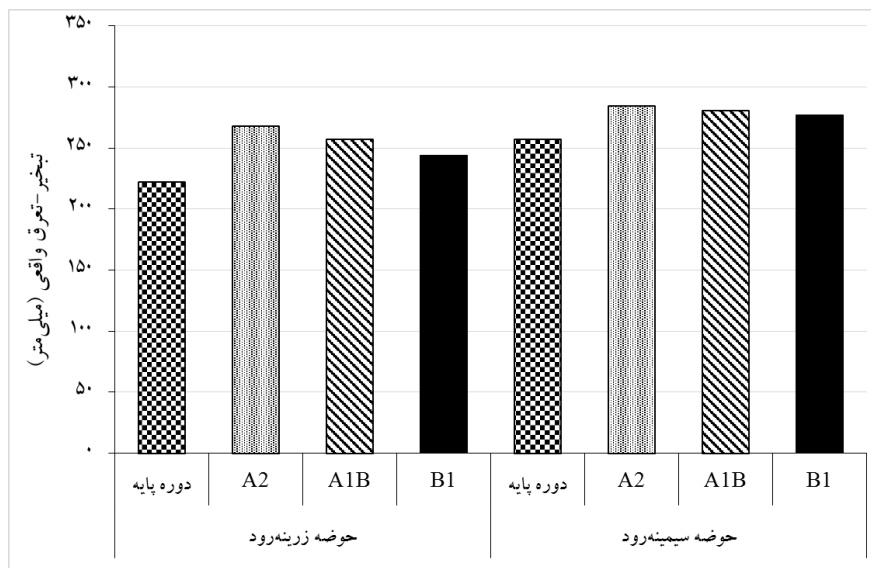
## تغییر در تبخیر-تعرق واقعی

نتیجه تجزیه و تحلیل تبخیر-تعرق واقعی بر اساس شکل ۴ نشان می‌دهد متوسط تبخیر-تعرق واقعی سالانه (بر اساس خروجی مدل WEAP) طی دوره آینده (۲۰۱۵-۲۰۴۰) برای سناریوهای انتشار A2، A1B و B1 در مقایسه با دوره پایه (۱۹۸۶-۲۰۱۰) افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۴ پیش‌بینی می‌شود که مقدار متوسط تبخیر-تعرق واقعی برای حوضه زرينه‌رود طی دوره آینده (۲۰۱۵-۲۰۴۰) برای سناریوهای انتشار A2، A1B و B1 در مقایسه با دوره پایه (۱۹۸۶-۲۰۱۰) به ترتیب حدود ۲۰/۵، ۱۵/۵ و ۹/۸ درصد و برای حوضه سيمينه‌رود به ترتیب حدود ۱۰/۴، ۹ و ۷/۶ درصد افزایش یابد.

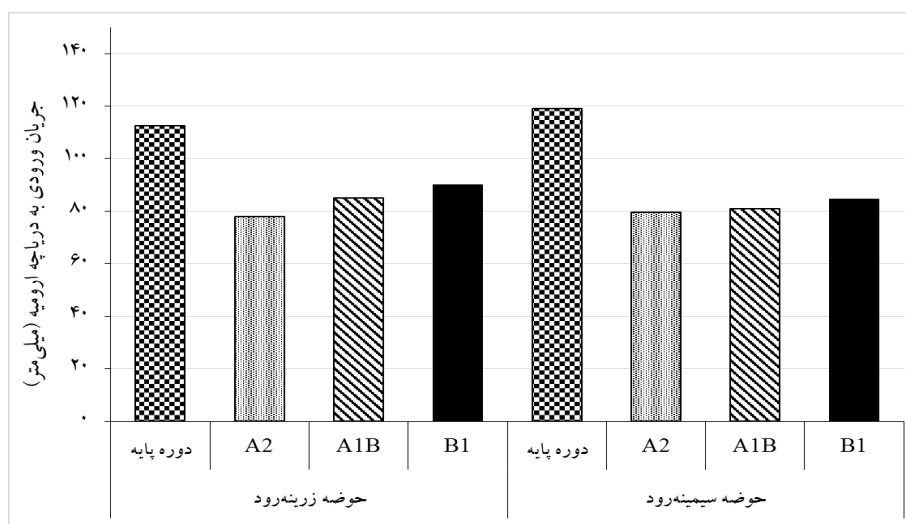


شکل ۳. مقایسه میانگین بارش طی دوره آتی (۲۰۱۵-۲۰۴۰) تحت سناریوهای انتشار مختلف نسبت به دوره پایه (۱۹۸۶-۲۰۱۰)





شکل ۴. مقایسه میانگین تبخیر-تعرق واقعی طی دوره آتی (۲۰۱۵-۲۰۴۰) تحت سناریوهای انتشار مختلف نسبت به دوره پایه (۱۹۸۶-۲۰۱۰)



شکل ۵. مقایسه میانگین جریان ورودی به دریاچه ارومیه طی دوره آتی (۲۰۱۵-۲۰۴۰) تحت سناریوهای انتشار مختلف نسبت به دوره پایه (۱۹۸۶-۲۰۱۰)

#### تغییر در دبی جریان

شکل ۵ تغییرات پیش‌بینی‌شده جریان متوسط سالانه ورودی به دریاچه ارومیه طی دوره آینده (۲۰۱۵-۲۰۴۰) برای سناریوهای انتشار A2، A1B و B1 در مقایسه با دوره پایه (۱۹۸۶-۲۰۱۰) را برای حوضه‌های آبریز زربنه‌رود و سیمینه‌رود نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵ پیش‌بینی می‌شود که مقدار جریان متوسط سالانه ورودی به دریاچه ارومیه از حوضه زربنه‌رود طی دوره آینده (۲۰۱۵-۲۰۴۰) برای سناریوهای انتشار A2، A1B و B1

در مقایسه با دوره پایه (۱۹۸۶-۲۰۱۰) به ترتیب حدود ۴۴/۲، ۳۲/۵ و ۲۴/۹ درصد و برای حوضه سیمینه‌رود به ترتیب حدود ۴۹/۷، ۴۷/۳ و ۴۰/۸ درصد کاهش یابد. نتایج مطالعه حاضر نشان داد بارش و دما در آینده افزایش می‌یابد. افزایش تبخیر-تعرق پتانسیل به علت افزایش دما به افزایش تبخیر-تعرق واقعی منجر می‌شود. چون تبخیر-تعرق واقعی در آینده افزایش می‌یابد، دبی جریان کاهش می‌یابد زیرا افزایش تبخیر-تعرق واقعی بیش از افزایش بارش خواهد بود.

## ارزیابی سناریوها

## معیارهای عملکرد

معیارهای عملکرد اطمینان‌پذیری، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری برای حوضه‌های کشاورزی طی دوره آتی (۲۰۱۵-۲۰۴۰) تحت سناریوهای انتشار و مدیریتی مختلف در زمینه تأمین نیاز آبیاری در جدول ۳ ارائه شده است. در زمینه تأمین نیاز آبیاری، بیشترین افزایش برای اطمینان‌پذیری و تاب‌آوری و بیشترین کاهش برای آسیب‌پذیری برای تمامی حوضه‌های کشاورزی، مربوط به سناریو S۴ یا تغییر الگوی کشت با افزایش راندمان کل آبیاری است. با توجه به جدول ۳، اجرای سناریوهای مدیریت آب، اطمینان‌پذیری و تاب‌آوری را افزایش و آسیب‌پذیری را کاهش داده است.

معیارهای عملکرد اطمینان‌پذیری، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری برای حوضه‌های کشاورزی برای دوره آتی (۲۰۱۵-۲۰۴۰) تحت سناریوهای انتشار و مدیریتی مختلف برای حوضه‌های زرينه‌رود و سيمينه‌رود در زمینه تأمین نیاز زیست‌محیطی دریاچه ارومیه در جدول ۴ ارائه شده است. درباره تأمین نیاز زیست‌محیطی نیز بیشترین افزایش مربوط به اطمینان‌پذیری و تاب‌آوری و بیشترین کاهش مختص آسیب‌پذیری برای هر دو حوضه زرينه‌رود و سيمينه‌رود، تحت سناریوی S۴ یا تغییر الگوی کشت با افزایش راندمان کل آبیاری است. با توجه به جدول ۴، اجرای سناریوهای مدیریت آب، اطمینان‌پذیری و تاب‌آوری را افزایش و آسیب‌پذیری را کاهش داده است.

جدول ۳. معیارهای اطمینان‌پذیری، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری برای حوضه‌های کشاورزی

S4			S3			S2			S1			S0			سناریوها
Vul	Res	Rel	Vul	Res	Rel	Vul	Res	Rel	Vul	Res	Rel	Vul <sup>۲</sup>	Res <sup>۱</sup>	Rel <sup>۱</sup>	
<b>A2</b>															
۰/۰۴	۰/۷۱	۰/۷۸	۰/۰۵	۰/۶۸	۰/۷۴	۰/۰۶	۰/۶۶	۰/۷۱	۰/۰۶	۰/۶۷	۰/۷۲	۰/۰۷	۰/۶۵	۰/۶۹	بوکان ۱
۰/۰۴	۰/۷۱	۰/۸۱	۰/۰۵	۰/۷	۰/۷۵	۰/۰۶	۰/۶۶	۰/۷۳	۰/۰۵	۰/۶۷	۰/۷۵	۰/۰۶	۰/۶۵	۰/۷۲	بوکان ۲
۰/۰۷	۰/۶۸	۰/۷۵	۰/۱۱	۰/۶۵	۰/۷	۰/۱۶	۰/۵۷	۰/۶۳	۰/۱۳	۰/۶۳	۰/۶۸	۰/۱۹	۰/۵۴	۰/۶	سقز
۰/۱۱	۰/۵۸	۰/۶۷	۰/۱۹	۰/۵	۰/۵۹	۰/۲۶	۰/۴۱	۰/۴۹	۰/۲۱	۰/۴۸	۰/۵۷	۰/۳۶	۰/۳۳	۰/۴۱	تکاب
۰/۰۵	۰/۶۶	۰/۷۳	۰/۱۳	۰/۵۷	۰/۶۴	۰/۱۹	۰/۵۱	۰/۵۸	۰/۱۵	۰/۵۵	۰/۶۲	۰/۲۳	۰/۴۷	۰/۵۴	شاهین دژ
۰/۰۴	۰/۷۶	۰/۸۱	۰/۰۵	۰/۷۴	۰/۷۹	۰/۰۶	۰/۶۸	۰/۷۴	۰/۰۵	۰/۷۱	۰/۷۶	۰/۰۶	۰/۶۷	۰/۷۳	ساحل راست زرينه
۰/۰۴	۰/۷۴	۰/۸	۰/۰۵	۰/۷۲	۰/۷۸	۰/۰۶	۰/۶۷	۰/۷۲	۰/۰۵	۰/۶۹	۰/۷۵	۰/۰۶	۰/۶۶	۰/۷۱	ساحل چپ زرينه
<b>A1B</b>															
۰/۰۴	۰/۷۲	۰/۸	۰/۰۴	۰/۷	۰/۷۷	۰/۰۶	۰/۶۶	۰/۷۳	۰/۰۵	۰/۶۸	۰/۷۴	۰/۰۶	۰/۶۵	۰/۷۲	بوکان ۱
۰/۰۴	۰/۷۳	۰/۸۲	۰/۰۴	۰/۷۱	۰/۷۸	۰/۰۵	۰/۶۸	۰/۷۴	۰/۰۴	۰/۶۹	۰/۷۵	۰/۰۶	۰/۶۷	۰/۷۲	بوکان ۲
۰/۰۶	۰/۶۹	۰/۷۶	۰/۱	۰/۶۶	۰/۷۲	۰/۱۵	۰/۵۸	۰/۶۴	۰/۱۱	۰/۶۴	۰/۶۹	۰/۱۷	۰/۵۵	۰/۶۱	سقز
۰/۱	۰/۵۸	۰/۶۹	۰/۱۸	۰/۵۱	۰/۶۱	۰/۲۵	۰/۴۲	۰/۵	۰/۱۹	۰/۴۸	۰/۵۹	۰/۳۵	۰/۳۴	۰/۴۲	تکاب
۰/۰۵	۰/۶۷	۰/۷۵	۰/۱۱	۰/۵۷	۰/۶۵	۰/۱۸	۰/۵۲	۰/۵۹	۰/۱۴	۰/۵۶	۰/۶۳	۰/۲۱	۰/۴۸	۰/۵۵	شاهین دژ
۰/۰۴	۰/۷۷	۰/۸۳	۰/۰۵	۰/۷۵	۰/۸	۰/۰۵	۰/۷۱	۰/۷۶	۰/۰۵	۰/۷۲	۰/۷۷	۰/۰۶	۰/۶۸	۰/۷۴	ساحل راست زرينه
۰/۰۴	۰/۷۶	۰/۸۱	۰/۰۵	۰/۷۳	۰/۷۹	۰/۰۵	۰/۶۸	۰/۷۶	۰/۰۵	۰/۷	۰/۷۶	۰/۰۶	۰/۶۶	۰/۷۳	ساحل چپ زرينه
<b>B1</b>															
۰/۰۳	۰/۷۴	۰/۸۳	۰/۰۴	۰/۷۲	۰/۸	۰/۰۴	۰/۶۹	۰/۷۵	۰/۰۴	۰/۷۱	۰/۷۶	۰/۰۶	۰/۶۷	۰/۷۲	بوکان ۱
۰/۰۳	۰/۷۵	۰/۸۵	۰/۰۴	۰/۷۲	۰/۸۳	۰/۰۴	۰/۷۱	۰/۷۶	۰/۰۴	۰/۷۲	۰/۷۷	۰/۰۵	۰/۶۷	۰/۷۵	بوکان ۲
۰/۰۵	۰/۷۲	۰/۷۸	۰/۰۸	۰/۶۷	۰/۷۴	۰/۱۳	۰/۶	۰/۶۷	۰/۱	۰/۶۷	۰/۷۱	۰/۱۶	۰/۵۶	۰/۶۴	سقز
۰/۰۸	۰/۱۶	۰/۷۱	۰/۱۶	۰/۵۲	۰/۶۳	۰/۲۲	۰/۴۳	۰/۵۲	۰/۱۸	۰/۵۱	۰/۶۱	۰/۳۳	۰/۳۶	۰/۴۴	تکاب
۰/۰۴	۰/۶۹	۰/۷۷	۰/۰۹	۰/۵۹	۰/۶۷	۰/۱۶	۰/۵۴	۰/۶۱	۰/۱۲	۰/۵۸	۰/۶۵	۰/۲	۰/۵	۰/۵۷	شاهین دژ
۰/۰۲	۰/۷۹	۰/۸۵	۰/۰۴	۰/۷۷	۰/۸	۰/۰۵	۰/۷۳	۰/۸	۰/۰۴	۰/۷۶	۰/۷۹	۰/۰۵	۰/۷	۰/۷۷	ساحل راست زرينه
۰/۰۳	۰/۷۹	۰/۸۳	۰/۰۴	۰/۷۳	۰/۸۱	۰/۰۵	۰/۷۳	۰/۷۷	۰/۰۵	۰/۷۴	۰/۷۸	۰/۰۵	۰/۶۷	۰/۷۷	ساحل چپ زرينه

1. Reliability
2. Resilience
3. Vulnerability

سناریوی مدیریتی وجود دارد. چون این ترکیب با شرایط اقلیمی تغییر می‌کند، سه ترکیب برای سه سناریوی انتشار A2، A1B و B1 به دست می‌آید. در جدول ۵ شاخص‌های پایداری کشاورزی و کمبود آب آبیاری برای مناطق کشاورزی آمده است.

شاخص‌های پایداری کشاورزی، کمبود آب آبیاری و پایداری زیست‌محیطی برای حوضه‌های آبریز زرینه‌رود و سیمینه‌رود ترکیبی از سه شاخص پایداری کشاورزی (ASI)، کمبود آب آبیاری (IWD) و پایداری زیست‌محیطی (ESI) در مقابل پنج

جدول ۴. معیارهای اطمینان‌پذیری، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری تحت سناریوهای S0، S1، S2، S3 و S4 برای حوضه‌های زرینه‌رود و سیمینه‌رود

S4			S3			S2			S1			S0			سناریوها
Vul	Res	Rel	Vul	Res	Rel	Vul	Res	Rel	Vul	Res	Rel	Vul	Res	Rel	
A2															
۰/۲۵	۰/۶۱	۰/۶۳	۰/۳۸	۰/۴۸	۰/۵	۰/۴۵	۰/۴۱	۰/۴۳	۰/۳۹	۰/۴۷	۰/۴۹	۰/۵۱	۰/۳۵	۰/۳۷	حوضه زرینه‌رود
۰/۲۸	۰/۵۵	۰/۵۸	۰/۴	۰/۴۴	۰/۴۷	۰/۴۴	۰/۴۲	۰/۴۴	۰/۴۱	۰/۴۳	۰/۴۶	۰/۴۹	۰/۳۷	۰/۳۹	حوضه سیمینه‌رود
A1B															
۰/۱۸	۰/۶۸	۰/۷۱	۰/۳۵	۰/۵	۰/۵۲	۰/۴۴	۰/۴۲	۰/۴۴	۰/۳۷	۰/۴۹	۰/۵۱	۰/۴۹	۰/۳۶	۰/۳۸	حوضه زرینه‌رود
۰/۲۲	۰/۶۳	۰/۶۵	۰/۳۸	۰/۴۵	۰/۴۸	۰/۴۲	۰/۴۳	۰/۴۵	۰/۳۹	۰/۴۴	۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۳۸	۰/۴	حوضه سیمینه‌رود
B1															
۰/۱۳	۰/۷۱	۰/۷۵	۰/۳۲	۰/۵۳	۰/۵۵	۰/۴۱	۰/۴۴	۰/۴۶	۰/۳۳	۰/۵۲	۰/۵۴	۰/۴۶	۰/۳۸	۰/۴	حوضه زرینه‌رود
۰/۱۷	۰/۶۷	۰/۷۱	۰/۳۴	۰/۴۸	۰/۵۱	۰/۳۸	۰/۴۵	۰/۴۸	۰/۳۷	۰/۴۶	۰/۴۹	۰/۴۵	۰/۳۹	۰/۴۳	حوضه سیمینه‌رود

جدول ۵. ارزیابی شاخص‌های پایداری کشاورزی و کمبود آب آبیاری برای مناطق کشاورزی

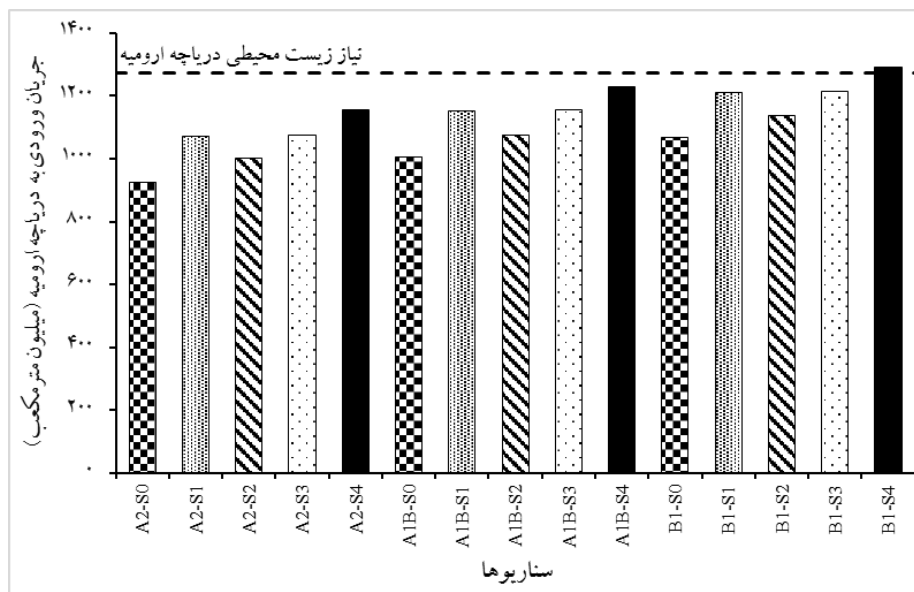
IWD					ASI					سناریوها
S4	S3	S2	S1	S0	S4	S3	S2	S1	S0	
A2										
۵/۷	۹/۴	۱۵/۹	۱۱/۳	۱۹/۶	۰/۸۱	۰/۷۸	۰/۷۶	۰/۷۷	۰/۷۵	بوکان ۱
۳/۲	۵/۳	۸/۲	۵/۶	۹/۷	۰/۸۲	۰/۷۹	۰/۷۷	۰/۷۸	۰/۷۶	بوکان ۲
۷/۶	۱۳/۹	۳۰/۰	۱۵/۸	۳۵/۲	۰/۷۸	۰/۷۴	۰/۶۷	۰/۷۲	۰/۶۴	سقز
۱۵/۴	۴۵/۰	۸۲/۷	۶۵/۹	۹۸/۲	۰/۷	۰/۶۲	۰/۵۳	۰/۶	۰/۴۴	تکاب
۱۸/۷	۵۴/۸	۱۰۰/۷	۸۰/۳	۱۱۹/۶	۰/۷۷	۰/۶۸	۰/۶۲	۰/۶۶	۰/۵۸	شاهین دژ
۶/۹	۱۲/۹	۲۵/۳	۱۹/۴	۳۳/۰	۰/۸۴	۰/۸۲	۰/۷۸	۰/۸	۰/۷۷	ساحل راست زرینه
۷/۲	۱۴/۰	۲۶/۴	۲۰/۶	۳۴/۲	۰/۸۳	۰/۸۱	۰/۷۷	۰/۷۹	۰/۷۶	ساحل چپ زرینه
A1B										
۵/۱	۸/۷	۱۳/۱	۱۰/۳	۱۸/۲	۰/۸۲	۰/۸	۰/۷۷	۰/۷۸	۰/۷۶	بوکان ۱
۲/۸	۴/۶	۷/۲	۵/۲	۹/۲	۰/۸۳	۰/۸۱	۰/۷۸	۰/۷۹	۰/۷۷	بوکان ۲
۶/۷	۱۳/۲	۲۸/۵	۱۴/۶	۳۳/۹	۰/۷۹	۰/۷۵	۰/۶۸	۰/۷۳	۰/۶۵	سقز
۱۳/۹	۴۲/۹	۷۹/۳	۶۳/۲	۹۵/۶	۰/۷۱	۰/۶۳	۰/۵۴	۰/۶۱	۰/۴۵	تکاب
۱۶/۹	۵۲/۲	۹۶/۴	۷۶/۸	۱۱۶/۲	۰/۷۸	۰/۶۹	۰/۶۳	۰/۶۷	۰/۵۹	شاهین دژ
۵/۲	۱۰/۷	۲۲/۵	۱۷/۵	۳۱/۹	۰/۸۵	۰/۸۳	۰/۸	۰/۸۱	۰/۷۸	ساحل راست زرینه
۵/۷	۱۱/۸	۲۳/۵	۱۸/۲	۳۲/۱	۰/۸۴	۰/۸۲	۰/۷۹	۰/۸	۰/۷۷	ساحل چپ زرینه
B1										
۳/۴	۷/۰	۱۰/۵	۸/۶	۱۵/۳	۰/۸۴	۰/۸۲	۰/۷۹	۰/۸	۰/۷۷	بوکان ۱
۱/۸	۳/۶	۵/۸	۳/۹	۸/۰	۰/۸۵	۰/۸۳	۰/۸	۰/۸۱	۰/۷۸	بوکان ۲
۴/۶	۱۱/۱	۲۴/۱	۱۲/۸	۳۱/۷	۰/۸۱	۰/۷۷	۰/۷	۰/۷۵	۰/۶۷	سقز
۱۰/۸	۳۸/۱	۷۱/۵	۵۶/۴	۸۹/۱	۰/۷۳	۰/۶۵	۰/۵۶	۰/۶۳	۰/۴۷	تکاب
۱۳/۲	۴۶/۶	۸۷/۴	۶۸/۹	۱۰۸/۹	۰/۸	۰/۷۱	۰/۶۵	۰/۶۹	۰/۶۱	شاهین دژ
۱/۷	۸/۴	۱۶/۶	۱۲/۱	۲۶/۱	۰/۸۷	۰/۸۴	۰/۸۲	۰/۸۳	۰/۸	ساحل راست زرینه
۲/۸	۹/۷	۱۸/۱	۱۳/۶	۲۷/۷	۰/۸۶	۰/۸۳	۰/۸۱	۰/۸۲	۰/۷۹	ساحل چپ زرینه

از مناطق می‌تواند سبب کاهش عملکرد و کاهش درآمد کشاورز شود، اما با راه‌کارهای پیشنهادشده (سناریوهای S1 تا S4) می‌توان مقدار IWD را تا حد زیادی بهبود بخشید. با توجه به جدول ۵ مقدار IWD در سناریوی B1S4 برای تمامی مناطق کشاورزی بیشترین بهبود را نشان می‌دهد. بیشترین بهبود برای IWD در تمامی سناریوهای انتشار مربوط به مناطق کشاورزی شاهین‌دژ، تکاب و سقز است، زیرا در این مناطق هم راندمان آبیاری پایین است و هم محصولات با نیاز آبی بالا بیشتر کشت می‌شود.

در شکل ۶ مقدار متوسط آب ورودی به دریاچه ارومیه از حوضه آبریز زرينه‌رود در شرایط آینده (۲۰۱۵-۲۰۴۰) تحت سناریوهای مختلف آمده است. سهم تأمین نیاز زیست‌محیطی دریاچه ارومیه از حوضه آبریز زرينه‌رود برابر ۱۲۷۱ میلیون مترمکعب در سال در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار متوسط آب ورودی به دریاچه از این حوضه مربوط به سناریوی ترکیب تغییر الگوی کشت با بهبود راندمان کل آبیاری تحت سناریوی انتشار B1 (B1S4) است. تحت این سناریو مقدار جریان متوسط سالیانه ورودی به دریاچه ارومیه از حوضه آبریز زرينه‌رود برابر ۱۲۹۲ میلیون مترمکعب در سال شده و در نتیجه نیاز زیست‌محیطی دریاچه از این حوضه تأمین خواهد شد.

شاخص پایداری کشاورزی (ASI)، بین صفر و یک متغیر است. مقادیر ASI نزدیک به یک دلالت بر عملکرد خوب دارد. با توجه به جدول ۵ در سناریوی مرجع یا S0، مقادیر ASI برای تمامی مناطق کشاورزی برای هر سه سناریوی انتشار A2، A1B و B1 کمتر از یک است، به این معنا که همه مناطق کشاورزی تحت تنش هستند و بهبود برای ASI تحت سیاست‌های مختلف می‌تواند به دست آید. مقدار ASI برای تمامی سناریوهای در نظر گرفته‌شده افزایش نشان می‌دهد، اما بیشترین مقدار ASI برای همه مناطق کشاورزی مربوط به سناریوی B1S4 یا همان ترکیب تغییر الگوی کشت با افزایش راندمان کل آبیاری تحت سناریوی انتشار B1 است. همچنین، با توجه به اینکه مناطق کشاورزی سقز، تکاب و شاهین‌دژ به علت راندمان آبیاری کمتر پتانسیل بیشتری برای بهبود پایداری دارند، در این مناطق افزایش مقدار ASI زیادتر است.

طبق جدول ۵، استراتژی‌های مدیریت آب (سناریوهای S1 تا S4) به کاهش تقاضای آب (با تغییر الگوی کشت) و افزایش عرضه آب (با افزایش راندمان آبیاری)، و در نتیجه کاهش آثار تغییر اقلیم منجر می‌شود. کمبود آب آبیاری (IWD) یا تقاضای برآوردشده یک شاخص ارزشمند برای ارزیابی است. با توجه به جدول ۵ در سناریوی مرجع یا S0، مقادیر IWD برای تمامی مناطق کشاورزی در حد درخور توجه است. این کمبود در بسیاری

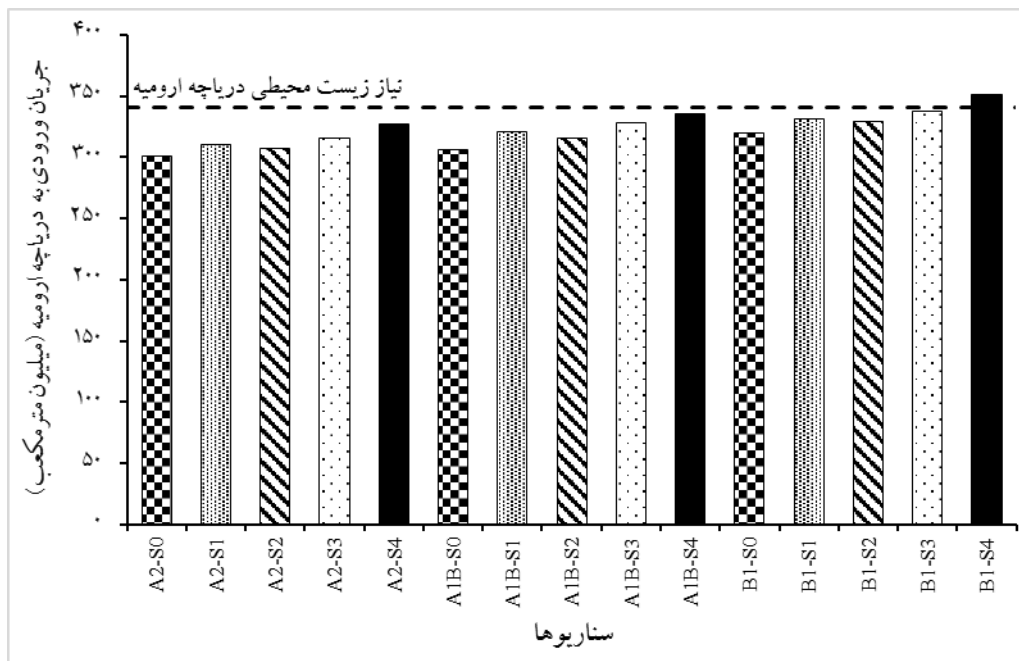


شکل ۶. مقدار متوسط جریان ورودی به دریاچه ارومیه از حوضه آبریز زرينه‌رود تحت سناریوهای مختلف (۲۰۱۵-۲۰۴۰)

برابر ۳۵۱ میلیون مترمکعب در سال شده و در نتیجه نیاز زیست‌محیطی دریاچه از این حوضه تأمین خواهد شد.

در جدول ۶ شاخص‌های پایداری زیست‌محیطی (بر اساس جدول ۴)، پایداری کشاورزی و کمبود آب آبیاری (بر اساس جدول ۵) برای حوضه‌های آبریز زربنه‌رود و سیمینه‌رود آمده است. با توجه به جدول ۶ ملاحظه می‌شود که بیشترین مقدار ESI و ASI برای هر دو حوضه آبریز مربوط به سناریوی B1S4 است. همچنین، بیشترین بهبود در IWD نیز مربوط به سناریوی B1S4 است. در سناریوی B1S4 هم کشاورزی و هم محیط زیست (نیاز زیست‌محیطی دریاچه ارومیه) حالت پایدار دارند.

در شکل ۷ مقدار متوسط آب ورودی به دریاچه ارومیه از حوضه آبریز سیمینه‌رود در شرایط آینده (۲۰۱۵-۲۰۴۰) تحت سناریوهای مختلف آمده است. سهم تأمین نیاز زیست‌محیطی دریاچه ارومیه از حوضه آبریز سیمینه‌رود برابر ۳۴۱ میلیون مترمکعب در سال در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل ۷ مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار متوسط آب ورودی به دریاچه از این حوضه‌ها مربوط به سناریوی ترکیب تغییر الگوی کشت با بهبود راندمان کل آبیاری تحت سناریوی انتشار B1 (B1S4) است. تحت این سناریو مقدار جریان متوسط سالیانه ورودی به دریاچه ارومیه از حوضه آبریز سیمینه‌رود



شکل ۷. مقدار متوسط جریان ورودی به دریاچه ارومیه از حوضه آبریز سیمینه‌رود تحت سناریوهای مختلف (۲۰۱۵-۲۰۴۰)

جدول ۶. ارزیابی شاخص‌های پایداری زیست‌محیطی، پایداری کشاورزی و کمبود آب آبیاری برای حوضه‌های آبریز زربنه‌رود و سیمینه‌رود

IWD		ASI				ESI				سناریوها					
S4	S3	S2	S1	S0	S4	S3	S2	S1	S0		S4	S3	S2	S1	S0
A2															
۵۵/۸	۱۴۰/۶	۲۶۵/۱	۲۰۲	۳۲۰/۲	۰/۸	۰/۷۴	۰/۶۸	۰/۷۳	۰/۶۵	۰/۶۶	۰/۵۳	۰/۴۶	۰/۵۲	۰/۴	حوضه زربنه‌رود
۸/۹	۱۴/۷	۲۴/۱	۱۶/۹	۲۹/۳	۰/۸۱	۰/۷۸	۰/۷۶	۰/۷۷	۰/۷۵	۰/۶۱	۰/۵	۰/۴۷	۰/۴۹	۰/۴۲	حوضه سیمینه‌رود
A1B															
۴۸/۴	۱۳۰/۸	۲۵۰/۲	۱۹۰/۳	۳۰۹/۷	۰/۸۱	۰/۷۵	۰/۷	۰/۷۴	۰/۶۶	۰/۷۳	۰/۵۵	۰/۴۷	۰/۵۴	۰/۴۱	حوضه زربنه‌رود
۷/۹	۱۳/۳	۲۰/۳	۱۵/۵	۲۷/۴	۰/۸۲	۰/۸	۰/۷۷	۰/۷۸	۰/۷۶	۰/۶۸	۰/۵۱	۰/۴۸	۰/۵	۰/۴۳	حوضه سیمینه‌رود
B1															
۳۳/۱	۱۱۳/۹	۲۱۷/۷	۱۶۳/۸	۲۸۳/۵	۰/۸۳	۰/۷۷	۰/۷۲	۰/۷۶	۰/۶۸	۰/۷۷	۰/۵۸	۰/۴۹	۰/۵۷	۰/۴۳	حوضه زربنه‌رود
۵/۲	۱۰/۶	۱۶/۳	۱۲/۵	۲۳/۳	۰/۸۴	۰/۸۲	۰/۷۹	۰/۸	۰/۷۷	۰/۷۳	۰/۵۴	۰/۵۱	۰/۵۲	۰/۴۵	حوضه سیمینه‌رود

سقر است، زیرا در این مناطق هم راندمان آبیاری پایین است و هم محصولات با نیاز آبی زیاد، بیشتر کشت می‌شود.

#### منابع

- [1]. Haghghi AT, Kløve B. Design of environmental flow regimes to maintain lakes and wetlands in regions with high seasonal irrigation demand. *Ecological Engineering*. 2017;100:120-129.
- [2]. Shadkam S, Ludwig F, van Vliet MT, Pastor A, Kabat P. Preserving the world second largest hypersaline lake under future irrigation and climate change. *Science of the Total Environment*. 2016;559:317-325.
- [3]. Richter BD, Brown JD, DiBenedetto R, Gorsky A, Keenan E, Madray C, Morris M, Rowell D, Ryu S. Opportunities for saving and reallocating agricultural water to alleviate water scarcity. *Water Policy*. 2017;19(5):886-907.
- [4]. Heydari N. Assessment of agricultural water productivity (WP) in Iran, and the performance of water policies and plans of the government in this regard. *Journal of Majlis and Rahbord*. 2014;21(78):177-200. [Persian].
- [5]. Shadkam S. Preserving Urmia Lake in a changing world: reconciling anthropogenic and climate drivers by hydrological modelling and policy assessment (Doctoral dissertation). Wageningen University. 2017.
- [6]. Li F, Zhang G, Xu YJ. Separating the impacts of climate variation and human activities on runoff in the Songhua River Basin, Northeast China. *Water*. 2014;6(11):3320-3238.
- [7]. Zhai R, Tao F. Contributions of climate change and human activities to runoff change in seven typical catchments across China. *Science of The Total Environment*. 2017;605:219-229.
- [8]. Jalili S, Hamidi SA, Namdar Ghanbari R. Climate variability and anthropogenic effects on Lake Urmia water level fluctuations, northwestern Iran. *Hydrological Sciences Journal*. 2016;61(10):1759-1769.
- [9]. Delavar, M, Babaee, O, Fattahi, I. Evaluation of climate change impacts on Urmia lake water level fluctuations. *Journal of Climate Research*. 2016;1393(19):53-65. [Persian].
- [10]. Goodarzi M, Salahi B, Hosseini A. Performance Analysis of LARS-WG and SDSM Downscaling Models in Simulation of Climate Changes in Urmia Lake Basin. *Iranian Journal of Watershed Management Science*. 2016;9(31):11-23. [Persian].

نتایج یادشده نشان می‌دهد می‌توان با به‌کارگیری راه‌کارهای مدیریتی مناسب، در مصرف آب صرفه‌جویی کرده و آب صرفه‌جویی‌شده را برای مصارف محیط زیست (دریاچه ارومیه) استفاده کرد و پایداری آن را بهبود بخشید.

نتایج تحقیق حاضر با نتایج سایر پژوهشگران از جمله ریچتر و همکارانش [۳]، مهتا و همکارانش [۱۳] و ییلماز و هارمانسیگولو [۱۶] همخوانی دارد. این محققان نتیجه گرفتند که بهبود راندمان آبیاری و تغییر الگوی کشت، سبب افزایش پایداری کشاورزی و صرفه‌جویی در مصرف آب می‌شود و می‌توان آب صرفه‌جویی‌شده را برای دیگر مصارف از جمله محیط زیست استفاده کرد.

#### نتیجه‌گیری

مهم‌ترین نتایجی که از پژوهش حاضر به دست آمد به شرح زیر است:

۱. سناریوهای اقلیمی مطالعه حاضر افزایش دمای متوسط، بارندگی، تبخیر-تعرق واقعی و کاهش جریان در دوره آینده (۲۰۱۵-۲۰۴۰) نسبت به دوره پایه (۱۹۸۶-۲۰۱۰) برای حوضه‌های آبریز زرينه‌رود و سيمينه‌رود را نشان می‌دهند.
۲. بیشترین مقدار شاخص پایداری زیست‌محیطی مربوط به سناریوی ترکیب تغییر الگوی کشت با بهبود راندمان کل آبیاری تحت سناریوی انتشار B۱ (B۱S۴) است. در این سناریو متوسط جریان سالانه آب ورودی به دریاچه ارومیه از حوضه‌های زرينه‌رود و سيمينه‌رود به ترتیب برابر ۱۲۹۲ و ۳۵۱ میلیون مترمکعب در سال خواهد بود و در نتیجه، نیاز زیست‌محیطی دریاچه ارومیه از این حوضه‌ها تأمین می‌شود.
۳. بیشترین مقدار شاخص پایداری کشاورزی نیز مربوط به سناریوی ترکیب تغییر الگوی کشت با بهبود راندمان کل آبیاری تحت سناریوی انتشار B۱ (B۱S۴) است. در این سناریو میانگین مقدار کمبود آب آبیاری برای حوضه‌های زرينه‌رود و سيمينه‌رود به ترتیب برابر ۳۳/۱ و ۵/۲ میلیون مترمکعب در سال خواهد بود.
۴. بیشترین بهبود برای IWD در تمامی سناریوهای انتشار مربوط به مناطق کشاورزی شاهین‌دژ، تکاب و

- [11]. Blanco-Gutiérrez, I. Economic-hydrologic analysis of water management strategies for balancing water for nature and water for food: Implications for the Guadiana River Basin. Spain. Doctoral Thesis. Polytechnical University of Madrid. 2010.
- [12]. Joyce BA, Mehta VK, Purkey DR, Dale LL, Hanemann M. Modifying agricultural water management to adapt to climate change in California's central valley. *Climatic Change*. 2011;109(1):299-316.
- [13]. Mehta VK, Haden VR, Joyce BA, Purkey DR, Jackson LE. Irrigation demand and supply, given projections of climate and land-use change, in Yolo County, California. *Agricultural Water Management*. 2013;117:70-82.
- [14]. Hunter C, Gironás J, Bolster D, Karavitis CA. A dynamic, multivariate sustainability measure for robust analysis of water management under climate and demand uncertainty in an arid environment. *Water*. 2015;7(11):5928-58.
- [15]. Safavi, H., Gol Mohammadi, M. Evaluating the water resource systems performance using fuzzy reliability, resilience and vulnerability. *Iran Water Resources Research*, 2016;12(1): 68-83. [Persian].
- [16]. Yilmaz B, Harmancioglu NB. An indicator based assessment for water resources management in Gediz river basin, Turkey. *Water Resources Management*. 2010;24(15): 4359-4379.
- [17]. Santikayasa IP, Babel MS, Shrestha S, Jourdain D, Clemente RS. Evaluation of water use sustainability under future climate and irrigation management scenarios in Citarum River Basin, Indonesia. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*. 2014;21(2):181-194.
- [18]. Yekom Consulting Engineers. Water consumption reduction of agricultural sector in Simineh Roud and Zarrineh Roud watershed basin. Urmia Lake Restoration National Committee, Ministry of Energy. 2016. [Persian].
- [19]. Urmia Lake Restoration National Committee. Necessity of Lake Urmia Resuscitation, Causes of Drought and Threats; Report No: ULRP-6-4-3-Rep 1. Tehran, Iran, 2015. [Persian].
- [20]. Yates D, Sieber J, Purkey D, Huber-Lee A. WEAP21—A demand-, priority-, and preference-driven water planning model: part 1: model characteristics. *Water International*. 2005;30(4):487-500.
- [21]. Yates D, Purkey D, Sieber J, Huber-Lee A, Galbraith H. WEAP21—A demand-, priority-, and preference-driven water planning model: part 2: aiding freshwater ecosystem service evaluation. *Water International*. 2005;30(4):501-512.
- [22]. Ahmadaali J, Barani GA, Qaderi K, Hessari B. Calibration and validation of model WEAP21 for Zarrinehrud and Siminehrud river basins. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 2017; 48(4): 823-839. [Persian].
- [23]. Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Fourth Assessment Report. *Climate Change: Synthesis Report*; Intergovernmental Panel on Climate Change: Geneva, Switzerland, 2007.
- [24]. Agriculture Jihad Organization of West Azarbaijan. *Agricultural statistics and the information center*, Urmia, Iran. 2016. [Persian].
- [25]. Agriculture Jihad Organization of Kurdistan. *Agricultural statistics and the information center*, Sanandaj, Iran. 2016. [Persian].
- [26]. West Azarbaijan Regional Water Authority. 2017. from <http://www.agrw.ir>. [Persian].
- [27]. Iran Ministry of Energy, Deputy of Water and WasteWater, Macro Planning Bureau. *The Comprehensive Water Management in the Aras, Sefidrood, between Sefidrood and Haraz, Atrac and Urmia Basins\_Agricultural Water Use Study in Urmia Lake Basin*; Report Number: 2385070-4420-19464; Iran Ministry of Energy: Tehran, Iran. 2013.
- [28]. Srdjevic Z, Srdjevic B. An extension of the sustainability index definition in water resources planning and management. *Water Resources Management*. 2017;31(5):1695-1712.
- [29]. Sandoval-Solis S, McKinney DC, Loucks DP. Sustainability index for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2011;137(5):381-390.
- [30]. Abbaspour M, Nazaridouost A. Determination of environmental water requirements of Lake Urmia, Iran: an ecological approach. *International Journal of Environmental Studies*. 2007;64(2):161-169.