

## ارزیابی سناریوهای تخصیص بهینه منابع آب با استفاده از مدل WEAP (مطالعه موردی: حوضه سد کلان ملایر)

امیر ظروفی<sup>۱</sup> و جواد مظفری<sup>۲\*</sup>

### چکیده

برای مدیریت تخصیص منابع آب در سطح یک حوضه، مدل WEAP به دلیل سیستم مدیریت یکپارچه منابع آب و اولویت بندی تخصیص آب، در سال های اخیر مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. در این پژوهش، سامانه های آبی حوضه مطالعاتی سد کلان ملایر واقع در استان همدان در دوره زمانی ۱۳۷۳ تا ۱۳۹۷ با هدف بررسی سناریوهای مدیریتی مدل سازی شد. شاخص  $R^2$ ، RMSE و ME برای دو متغیر حجم مخزن سد کلان ملایر و دبی ماهانه رودخانه در ایستگاه هیدرومتری درودگران استفاده شد و نتایج به دست آمده نشان دهنده مطلوبیت در مدل سازی است. سپس سه سناریو محتمل علاوه بر شرایط موجود طرح ریزی شد. سناریوهای مورد بررسی عبارت اند از: ۱- سناریو غیرمحافظة کارانه (افزایش مصرف بدون توجه به میزان موجود منابع آبی)، ۲- سناریو محافظة کارانه (تعدیل بخش کشاورزی متناسب با توان منابع آبی) و ۳- سناریو توسعه کامل (سناریو بهبود ساختاری به علاوه نیاز زیست محیطی در سطح خوب). نتایج نشان داد که در بخش کشاورزی که مصرف کننده عمده منابع آب است، به طور تقریبی در سناریو مرجع ۲۶ درصد، در سناریو غیرمحافظة کارانه ۴۳ درصد، در سناریو محافظة کارانه ۱۳ درصد و در سناریو توسعه کامل ۹ درصد کمبود آب به وجود خواهد آمد. همچنین نتایج نشان داد که سناریو توسعه کامل با دربر داشتن بهبود ساختار شبکه انتقال و توزیع آب و همچنین اصلاح سرائه مصرف و افزایش سهم ۳۰ درصدی اراضی کشاورزی که با روش های مدرن آبیاری می شوند، بالاترین شاخص اعتماد پذیری (بیش از ۹۰ درصد) برای هر یک از بخش های مصرف را به دست آورد. همچنین افزایش غیرمحافظة کارانه نیازهای آبی باعث کاهش معنادار اعتماد پذیری سیستم می شود؛ به طوری که باعث اتمام ذخیره آب زیرزمینی به عنوان ذخایر حیاتی منطقه طی ۱۵ سال از اجرای این سناریو خواهد شد.

**واژه های کلیدی:** تخصیص منابع آب، WEAP، مصارف کشاورزی، سناریو.

ارجاع: ظروفی ا. و مظفری ج. ۱۴۰۲. ارزیابی سناریوهای تخصیص بهینه منابع آب با استفاده از مدل WEAP (مطالعه موردی: حوضه سد کلان ملایر).  
مجله پژوهش آب ایران. ۴۸: ۱۱۹-۱۲۸. <https://dx.doi.org/10.22034/TWRJ.2022.14073.2453>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه اراک.

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه اراک.

\* نویسنده مسئول: [j-mozafari@araku.ac.ir](mailto:j-mozafari@araku.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۷

## مقدمه

برنامه‌ریزی مناسب و ارائه راهکارهای مدیریتی برای بهره‌برداری پایدار منابع آب، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. در ایران طی سال‌های اخیر به دلیل وقوع خشکسالی‌ها و محدودیت‌های منابع، چالش‌هایی در مدیریت منابع آب و مصارف حوضه به وجود آمده است. در این راستا با توجه به نیازهای مختلف زیست‌محیطی، کشاورزی، شرب و صنعت بایستی مناسب‌ترین برنامه‌ریزی در جهت بهره‌برداری از منابع موجود صورت گیرد؛ در نتیجه، برنامه‌ریزی مناسب و ارائه راهکارهای مدیریتی مختلف برای بهره‌برداری سازگار با منابع موجود و پاسخگویی به تمام نیازها، به عنوان ضرورتی اجتناب‌ناپذیر شناخته شده است. برای تخصیص بهینه منابع آب، مدل‌های مختلفی توسعه داده شده‌اند. مدل WEAP به دلیل جامعیت در لحاظ کردن توأم فرایندهای فیزیکی، هیدرولوژیکی و مدیریتی یکی از مدل‌های پرکاربرد در سال‌های اخیر بوده است. لویت و همکاران (۲۰۰۳) در پژوهشی، بیان آب حوضه رودخانه استیلپرت آفریقای جنوبی را مدل کردند. آن‌ها نشان دادند که نرم‌افزار WEAP برای ارزیابی سریع تصمیمات تخصیص آب مناسب است؛ اما نمی‌تواند تغییرات شدید هیدرولوژیکی را مدل کند. جنیفر و همکاران (۲۰۱۰) طی تحقیقی، به تخصیص آب با نرم‌افزار WEAP در کنیا پرداختند. آن‌ها نشان دادند که اصلاح بهره‌وری آبیاری به میزان قابل‌توجهی تأمین آب موردنیاز پایین‌دست را بهبود بخشیده است. دهقان و همکاران (۱۳۹۴) به منظور برنامه‌ریزی تخصیص منابع آب در حوضه گرگانرود از مدل WEAP استفاده کردند و درصد حجم آب قابل‌تخصیص برای نیازهای کشاورزی، صنعت، آبی‌پروری و زیست‌محیطی را به دست آوردند. رفیعی دارانی و همکاران (۱۳۹۶) مدل WEAP را در دشت نیشابور استفاده کردند و نتیجه گرفتند که بیشترین تأثیر در کاهش مصرف آب مربوط به تغییر و کاهش سطح زیر کشت محصولات کشاورزی است. ناصری و همکاران (۲۰۱۷) به ارزیابی مدیریت منابع آب دشت تبریز با استفاده از پویایی سیستم پرداختند و سناریوهای مختلف مدیریتی را ارائه دادند. کو و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از مدل WEAP به بررسی نیازها و مصارف شهر ژیا من در چین پرداختند و نشان دادند که پس از سال ۲۰۳۰ و با رشد مصرف فعلی، کمبود آب به وجود خواهد آمد. تکلو و

همکاران (۲۰۲۰) به شبیه‌سازی حوضه رودخانه آواش اتیوپی با استفاده از مدل WEAP پرداختند که نتایج به دست آمده بیانگر دقت مناسب مدل بوده است. فیضی و آقاجانی (۱۴۰۰) به تخصیص منابع آب در حوضه سد یامچی با مدل WEAP پرداختند و نتیجه گرفتند سناریوی تغییر همزمان الگوی کشت و افزایش بازدهی آبیاری، مناسب‌ترین گزینه در منطقه مورد مطالعه بوده و باعث کاهش ۴۴ درصدی تقاضا می‌شود. احمدی (۱۴۰۱) به بررسی تأثیر افزایش راندمان کاربری آب بر بهبود وضعیت منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل WEAP در دشت قزوین پرداخت. نتایج این پژوهش نشان داد که جایگزینی سامانه‌های نوین آبیاری، سبب کاهش هدررفت حجم عظیمی از منابع آبی منطقه می‌شود؛ ولی این تغییر هم نمی‌تواند مشکل آب منطقه را به تنهایی حل کند. مقدم و همکاران (۲۰۲۲) به بهینه‌سازی تخصیص منابع آب با مدل WEAP و با در نظرگیری تغییر اقلیم حوضه خرم‌آباد پرداختند. آن‌ها ۲۴ سناریو را تحت تغییر اقلیم بررسی کردند که تغییرات تا ۶۰ درصد در مصرف آب کشاورزی و تا ۳۰ درصد در مصارف صنعتی و شرب را نشان داد. نیوش و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی تقاضای آینده در حوضه رودخانه داشان هند با مدل WEAP پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که تا سال ۲۰۵۰، رشد فزاینده جمعیت، توسعه صنعتی و افزایش سطح کشاورزی، تقاضای آب را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد؛ بنابراین اجرای فناوری‌های آبیاری بهبود یافته و ساخت سازه‌های حفظ و نگهداری آب می‌تواند به طور قابل‌توجهی تقاضاهای برآورده نشده را کاهش دهد. محدودیت منابع آب، افزایش غیرمحافظة کارانه مصارف آبی و روند روزافزون رشد تقاضا در زمینه‌های مختلف، شرایط بحرانی را برای منابع آب حوضه سد کلان ملایر رقم زده است. از طرفی وقوع دوره‌های خشکسالی و برداشت‌های بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، منجر به کاهش شدید تراز آب سفره‌های زیرزمینی شده است. در این پژوهش به بررسی وضعیت عرضه و تقاضای حوضه واقع در بالادست سد کلان ملایر در استان همدان با استفاده از مدل WEAP پرداخته شد. هدف تحقیق بررسی منابع و مصارف در بازه میان‌مدت و ارائه راهکارهای مدیریتی با تعریف سناریوهای مختلف برای مدیریت یکپارچه منابع آب‌های سطحی حوضه است. مدل

شده که به‌عنوان ورودی مخزن در مدل‌سازی در نظر گرفته شده است.

مصارف محدوده مطالعاتی حوضه بالادست سد کلان ملایر شامل نیازهای آب شرب، کشاورزی و صنعت است. در این بخش مصارف آب با توجه به شرایط موجود در سال پایه مطالعه (سال ۱۳۷۳ شمسی) و افق زمانی طرح یعنی سال ۱۳۹۷، مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای صحت‌سنجی مدل از مقایسه دو متغیر حجم مخزن و دبی استفاده شد. برای این کار از ایستگاه هیدرومتری درودگران بعد از سد کلان ملایر با مختصات جغرافیایی  $34^{\circ} 01'$  شمالی و  $48^{\circ} 55'$  شرقی و مخزن سد کلان استفاده شد. برای صحت‌سنجی مدل سه شاخص  $R^2$ ، RMSE و ME استفاده شد. همچنین، برای بررسی اثر سال‌های کم‌آبی از شاخص SIAP استفاده شد که سال آبی را از بسیار تر تا بسیار خشک طبقه‌بندی می‌کند (وخشوری و همکاران، ۱۳۹۶).

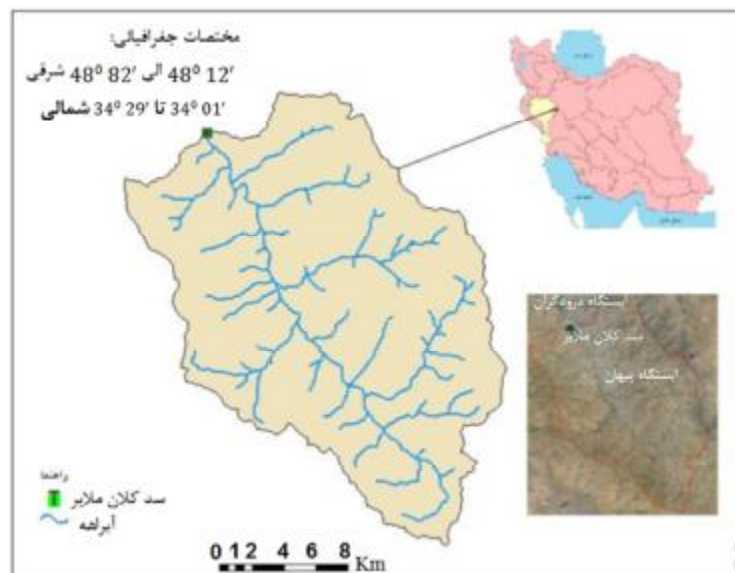
$$SIAP = \frac{P_i - \bar{P}}{SD} \quad (1)$$

Pi: بارندگی در سال،  $\bar{P}$ : میانگین بارش‌های سالانه و SD: انحراف استاندارد بارش‌های سالانه است.

WEAP به‌دلیل توانایی در شبیه‌سازی و ارزیابی وضعیت فعلی رقابت بین کاربران آب، سیستم تقسیم آب اولویت‌محور، توانایی در ایجاد و مقایسه سناریوها، توانایی در تشریح ارتباط بین فعالیت‌های مختلف انسانی و هیدرولوژیکی، توانایی در نظر گرفتن فرایندهای مهم تأثیرگذار در سیستم‌های منابع آب در سطح حوضه رودخانه و قابلیت بالا و انعطاف‌پذیری آن در تعریف سناریوها در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت.

### مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی حوضه سد کلان ملایر دارای مختصات جغرافیایی  $48^{\circ} 12'$  تا  $48^{\circ} 82'$  شرقی و  $34^{\circ} 01'$  تا  $34^{\circ} 29'$  شمالی است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی حوضه بالادست سد کلان ملایر را نشان می‌دهد. رودخانه اصلی دشت ملایر رودخانه خرم‌آباد (آب ملایر) نامیده می‌شود که بعد از یکی شدن با رودخانه کلان، به طرف ملایر جاری می‌شود. این رودخانه در نهایت از حوزه خارج و به رودخانه گاماسیاب نهند متصل می‌شود. در منطقه ملایر، سد مخزنی کلان با حجم مفید ۴۴ میلیون مترمکعب وجود دارد. ایستگاه پیهان در مختصات جغرافیایی  $34^{\circ} 08'$  شمالی و  $48^{\circ} 52'$  شرقی قبل از سد کلان ملایر واقع



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز کلان ملایر

طرح‌ریزی شده است که به طور خلاصه در جدول ۱ بیان شده است.

در این تحقیق سه سناریو علاوه بر سناریو پایه یا همان سناریو وضع موجود برای بررسی شرایط محتمل

جدول ۱- شرح سناریوهای تعریف شده برای مدل سازی تخصیص آب دشت ملایر

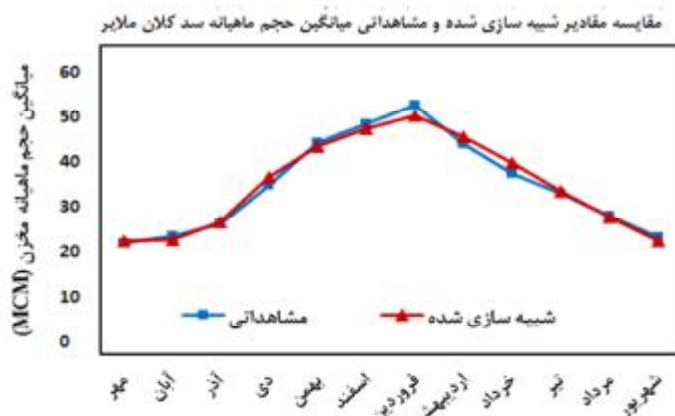
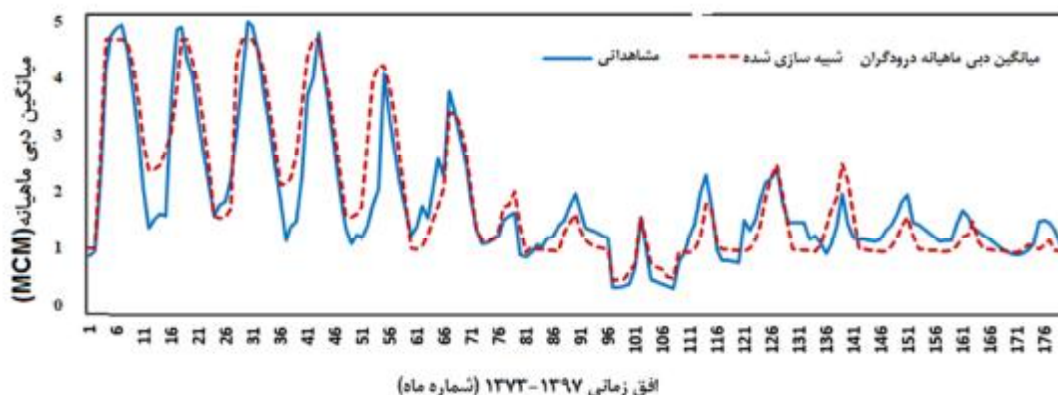
علامت اختصاری	عنوان سناریو	شرح سناریو
RS	وضع موجود Reference Scenario	شرایط موجود: نیاز کشاورزی ۱۵۰۰۰ هکتار با الگوی کشت رایج منطقه آبیاری با راندمان ۵۶ درصد، نیاز شرب شهرستان ملایر با نرخ رشد جمعیت ۲/۳۵ درصد، نیاز صنعت ۰/۷۳ میلیون مترمکعب در سال و حداقل نیاز زیست محیطی رودخانه.
NCS	سناریو غیرمحافظة کارانه Non-Conservative Scenario	افزایش غیرمحافظة کارانه سطح فعال نقاط مصرف بدون توجه به منابع آبی موجود: افزایش سطح زیرکشت اراضی کشاورزی به ۱۸۰۰۰ هکتار، نرخ رشد ۳/۶ برای منطقه، افزایش ۳۰ درصدی واحدهای صنعتی و حداقل نیاز زیست محیطی برای رودخانه کلان.
CS	سناریو محافظة کارانه Conservative Scenario	تعدیل سطح فعال سالیانه بخش کشاورزی متناسب با توان منابع آبی موجود: تعدیل سطح اراضی کشاورزی با الگوی کشت رایج منطقه با رعایت حد برداشت مجاز از آب های زیرزمینی در سال های نرمال و پرابی و تأمین حداقل نیاز زیست محیطی (سطح قابل قبول) با روش مونتانا برای رودخانه کلان ملایر.
FDS	سناریو توسعه کامل Full Development Scenario	بهبود ساختار سیستم: نیاز کشاورزی ۱۵۰۰۰ هکتار با الگوی کشت رایج منطقه با افزایش سهم اراضی آبیاری شده مدرن از ۲۰ درصد به ۵۰ درصد، نیاز شرب شهر ملایر اعم از روستایی و شهری با اصلاح سرانه آب مصرفی، نیاز صنعت ۰/۷۳ میلیون مترمکعب در سال و تأمین نیاز زیست محیطی (سطح خوب) برای رودخانه (تأمین ۲۰ درصد آورد رودخانه در شش ماه اول سال آبی و ۴۰ درصد در شش ماه دوم سال آبی)

## نتایج و بحث

## ارزیابی و اعتبارسنجی نتایج مدل سازی حوضه

شاخص های اعتبارسنجی مدل در مورد دو متغیر حجم مخزن و دبی ماهانه رودخانه به ترتیب در مخازن مدل سازی شده و ایستگاه هیدرومتری درودگران بعد از سد کلان ملایر در جدول ۲ نشان داده شده است.

همان گونه که در جدول ۲ و شکل ۲ مشاهده می شود ضریب  $R^2$  در حد مطلوب بالای ۰/۸ قرار دارد. درصد RMSE نیز در حد قابل قبول است. همچنین شاخص ME نیز نزدیک به یک است و این نشان از مطلوبیت مدل سازی و کالیبره بودن مدل دارد.

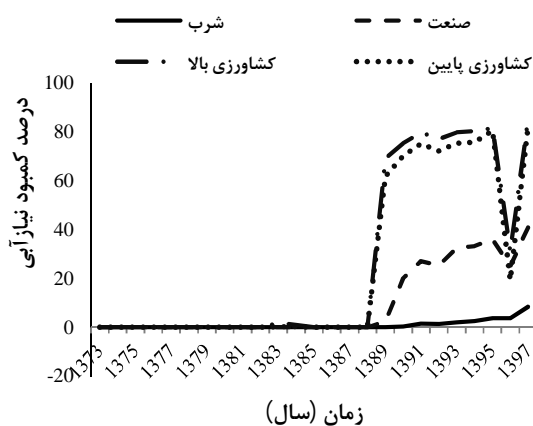


شکل ۲- صحت سنجی برای دو متغیر دبی ماهانه ایستگاه درودگران و حجم ذخیره سد کلان

جدول ۲- معیارهای صحت‌سنجی برای متغیر حجم مخازن (MCM) و دبی ماهانه رودخانه (CMS)

ME	RMSE%	RMSE	R <sup>۲</sup>	متغیر صحت‌سنجی شده
0/9۸۴۶	۱۰/3	1/75	0/8۵۰	دبی ماهانه ایستگاه هیدرومتری درودگران
0/9۹۱۸	۱۶/7	۳/96	0/9۸۴	میانگین ماهانه حجم ذخیره سد

نتایج شکل ۳، نیاز آبی بخش‌های صنعت و کشاورزی با درصد کمبود بالایی در سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۷ مواجه شده‌اند. تحت شرایط موجود، تمام نیازها در ۱۵ سال اول به‌صورت کامل تأمین می‌شود. در سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۷ هم‌زمان با تشدید وضعیت کم‌آبی، میزان نیاز آبی، بیشتر از تغذیه آبخوان و حجم تنظیمی سد کلان ملایر است. در این سناریو، حداقل سطح برای تخصیص نیاز آبی محیط زیست پایین‌دست سد کلان ملایر به‌دست‌آمده از جدول مونتانا را می‌توان قابل قبول دانست.



شکل ۳- درصد کمبود نیاز آبی نقاط مصرف در سناریو وضع موجود (RS)

## بررسی اثرات سناریوها

### سناریو مرجع

سناریو مرجع به‌عنوان سناریو پایه، چگونگی الگوی مصرف در شرایط موجود را نشان می‌دهد. در شرایط موجود ۱۲۶/۱ میلیون مترمکعب آب در سال موردنیاز است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی این سناریو در کل دوره زمانی ۱۳۷۳-۱۳۹۷ به‌صورت کلی در جدول ۳ آورده شده است. مطابق نتایج جدول ۳، نیاز شرب در طول دوره به میزان ۹۸/۸ درصد تأمین شده است. نیاز کشاورزی بیشترین کمبود را در بین نقاط تقاضا داراست که بخش عمده نیاز آبی کشاورزی بالا با کمبود ۲۶/۵ درصدی روبروست. اراضی کشاورزی منطقه دشت ملایر با روش‌های سنتی آبیاری می‌شوند که با راندمان پایین ۵۶ درصد برای تأمین نیاز این بخش باید مقادیر بیشتری برای تأمین نیاز ناخالص این محصولات تخصیص داده شود. شکل ۳، درصد کمبود نیاز آبی در سناریو وضع موجود را نشان می‌دهد. در کل دوره نیاز شرب با ۹۱ درصد شاخص اعتمادپذیری بیشترین مقدار و نیاز کشاورزی بالا و پایین با مقدار به‌ترتیب ۷۳ و ۷۷ کمترین مقدار را دارند. شاخص اعتمادپذیری یا اطمینان‌پذیری زمانی حاکی از این است که در گام زمانی ماهیانه در کل دوره هر نیاز به‌صورت کامل تأمین شده است. مطابق

جدول ۳- وضعیت تأمین نیاز بخش‌های مختلف- سناریو RS

اعتمادپذیری	درصد تأمین نشده	درصد تأمین شده	حجم تأمین نشده (MCM)	حجم تأمین شده (MCM)	حجم کل نیاز (MCM)	
91	1/2	98/8	3/0	241/6	244/6	شرب
89	9/7	90/3	1/8	16/5	18/2	صنعت
73	26/5	73/5	663/0	1841/2	2504/1	کشاورزی بالا
77	۵/۲۴	۵/۷۵	۲/۷۳	225/8	299/0	کشاورزی پایین
	24/2	75/8	740/9	2325/0	3066/0	مجموع

در مجموع نیاز آبی کل حوضه از ۱۲۶ میلیون مترمکعب در وضعیت موجود (RS) به حدود ۱۵۰ میلیون مترمکعب رسید. نتایج حاصل از شبیه‌سازی این سناریو در کل دوره زمانی ۱۳۷۳-۱۳۹۷ در جدول ۴ آورده شده است.

### سناریو افزایش غیرمحافظة کارانه NCS

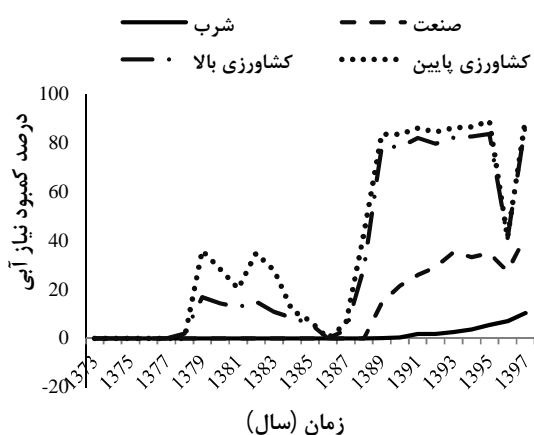
سناریو افزایش غیرمحافظة کارانه (NCS)، بیان می‌دارد که اگر بدون توجه به میزان منابع آب موجود، سطح نیازها افزایش یابد، به چه میزان کسری آب وجود خواهد داشت.

جدول ۴- وضعیت تأمین نیاز بخش‌های مختلف- سناریو NCS

اعتمادپذیری	درصد تأمین نشده	درصد تأمین شده	حجم تأمین نشده (MCM)	حجم تأمین شده (MCM)	حجم کل نیاز (MCM)	
90	1/8	98/2	4/4	234/0	238/4	شرب
87	10/6	89/4	2/5	21/0	23/5	صنعت
57	32/7	67/3	912/2	1879/0	2791/2	کشاورزی بالا
57	38/6	61/4	212/1	338/1	550/2	کشاورزی پایین
	31/4	68/6	1131/1	2472/1	3603/2	مجموع

### سناریو تعدیل سطح اراضی کشاورزی به صورت محافظه کارانه (CS)

سناریو CS به بررسی تأثیر تعدیل سطح زیرکشت متناسب با توان تأمین سیستم می‌پردازد. در این سناریو، سطح زیرکشت اراضی متناسب با منابع موجود تعدیل شده است. این تعدیل به صورتی انجام شده که درصد تأمین نیاز کشاورزی در کل دوره بالای ۸۵ درصد (سطح خوب) تأمین شده باشد.



شکل ۴- درصد کمبود نیاز آبی نقاط مصرف در سناریو (NCS)

مطابق با نتایج جدول ۵، شاخص درصد کمبود حجمی نیازهای آبی بخش‌های مختلف به کمتر از ۱۵ درصد رسیده است. هدف این سناریو به دست آوردن سطح فعال

براساس نتایج به دست آمده، به صورت حجمی بخش کشاورزی با بیشترین کمبود آب به میزان ۴۳ درصد مواجه است. در این سناریو نیاز شرب به پایین سطح قابل قبول ۹۵ درصد رسیده است؛ یعنی حداقل در ۱۰ درصد مواقع، بخش شرب با کمبود روبه‌رو می‌شود. روند کمبود نیازها در شکل ۴ قابل مشاهده است. مطابق با این روند در سال‌های ۱۳۷۸ تا ۱۳۸۴، فقط نیاز بخش کشاورزی با کمبود بالای ۱۵ درصد مواجه است. در انتهای دوره، کمبود بخش کشاورزی و بخش صنعت نیز به طرز چشمگیری افزایش یافته است. مطابق با شکل ۴ در سال ۱۳۹۶ درصد کمبود کاهش پیدا می‌کند که با توجه به قرار گرفتن سال ۱۳۹۶ در وضعیت پرآبی، نیازها با کمبود کمتری مواجه هستند. در این سناریو نیاز شرب به پایین سطح اعتمادپذیری قابل قبول ۹۵ درصد رسیده است؛ یعنی حداقل در ۱۰ درصد مواقع، بخش شرب با کمبود روبه‌رو می‌شود. سطح شاخص اعتمادپذیری ۵۷ درصد برای بخش کشاورزی بسیار پایین است. لازم به ذکر است سطح قابل قبول در تحقیقات دیگر محققان سطح بالای ۸۰ درصد برای بخش کشاورزی در نظر گرفته می‌شود (شفاییان فرد و همکاران، ۱۳۹۳).

درصد تأمین شده است. نیاز شرب با کمترین کمبود و بالای سطح ۹۷ درصد تأمین شده است. پس از آن نیاز صنعت با درصد تأمین بالای ۹۰ درصد تأمین شده است. سپس نیاز بخش کشاورزی که مطابق با مدل‌سازی حد کمبود حداکثر ۱۵ درصد حجم موردنیاز در نظر گرفته شده بود نیز حاصل شد. بدین ترتیب شاخص اعتمادپذیری این نیازها با توجه به تعدیل صورت‌گرفته در بخش کشاورزی مطابق با جدول ۵، برای بخش‌های شرب، صنعت، کشاورزی بالا و کشاورزی پایین به ترتیب برابر ۹۲، ۸۷، ۷۹ و ۸۳ درصد است.

سالانه بخش کشاورزی متناسب با توان سیستم با درصد تأمین سطح نسبتاً خوب نیازها باشد. این تعدیل با فرض ثابت‌ماندن نوع آبیاری و راندمان سیستم در شرایط موجود انجام گرفته است. برای بخش‌های شرب و صنعت به ترتیب سطح اطمینان‌پذیری ۹۵ درصد و ۹۰ درصد به دست آمد. جدول زیر سطح تعدیل به دست آمده بخش کشاورزی را در مجموع برای ۲۵ سال با وضعیت آب و هوایی متفاوت نشان می‌دهد. با سطوح تعدیل‌شده بخش کشاورزی در سال‌های نرمال و پرآبی درصد کمبود به صورت شکل ۵ حاصل شده است. مطابق با شکل، نیازهای آبی بخش‌های مختلف بالاتر از سطح تأمین ۸۵

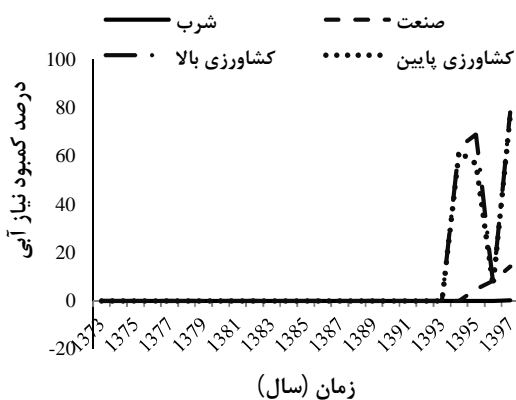
جدول ۵- وضعیت تأمین نیاز بخش‌های مختلف- سناریو CS

اعتدادپذیری	درصد تأمین نشده	درصد تأمین شده	حجم تأمین نشده (MCM)	حجم تأمین شده (MCM)	حجم کل نیاز (MCM)	
92	2/7	97/3	3/6	240/0	244/6	شرب
87	8/7	91/3	1/6	17/0	18/2	صنعت
79	13/2	86/8	306/3	1652/7	1939/0	کشاورزی بالا
83	11/3	88/7	23/5	149/0	155/5	کشاورزی پایین
	11/7	88/3	274/7	2082/7	2357/3	مجموع

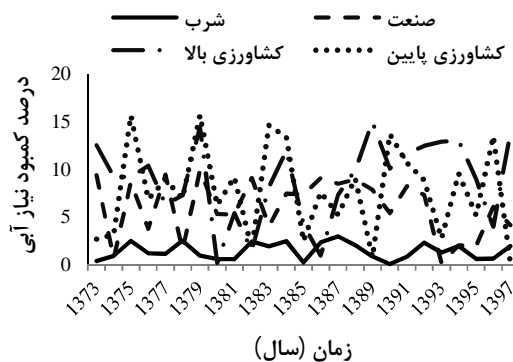
جدول ۶- روند وضعیت آبی بر اساس شاخ SIAP

سال	شاخص SIAP	سطح فعال بخش کشاورزی (هزار هکتار)	سال	شاخص SIAP	سطح فعال بخش کشاورزی (هزار هکتار)
1373	پرآبی	18/34	1385	پرآبی	15/29
۱۳۷۴	پرآبی	20/42	1386	پرآبی	18/90
۱۳۷۵	پرآبی	18/20	1387	نرمال	13/10
۱۳۷۶	کم‌آبی	12/33	1388	کم‌آبی	11/48
۱۳۷۷	نرمال	14/94	1389	کم‌آبی	11/29
۱۳۷۸	نرمال	12/05	1390	نرمال	11/16
۱۳۷۹	کم‌آبی	12/33	1391	نرمال	11/11
۱۳۸۰	نرمال	13/05	1392	کم‌آبی	9/80
1381	نرمال	13/68	1393	کم‌آبی	9/26
1382	نرمال	12/62	1394	کم‌آبی	9/16
1383	نرمال	13/33	1395	کم‌آبی	11/31
1384	نرمال	13/85	۱۳۹۶	پرآبی	14/83
1385	پرآبی	15/29	1397	کم‌آبی	10/42

مواجه هستند. تأمین حداکثری نیاز شرب و صنعت بالای سطح ۹۵ درصد نتایج از تعریف مناسب سطوح مورد نیاز در بخش‌های دیگر است. در بررسی روند عدم تأمین نیازها فقط در سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۵ و سال ۱۳۹۷ نیاز بخش کشاورزی کماکان با کمبود زیادی روبه‌رو هستند. این مهم نتیجه کاهش سطح آب آبخوان‌ها در دشت ملایر با توجه به مصارف سال‌های گذشته دارد. نتایج شکل ۶ درصد کمبود نیاز آبی را از سال ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ نشان داد که نسبت به سناریوهای پیشین شرایط بسیار مناسب‌تری را نشان می‌دهد.



شکل ۶- کمبود نیاز آبی نقاط مصرف در سناریو (FDS)



شکل ۵- درصد کمبود نیاز آبی نقاط مصرف در سناریو (CS)

### سناریو توسعه کامل FDS

در این سناریو با توجه به اصلاح الگوی مصرف در بخش شرب و افزایش راندمان انتقال آب در کانال‌های انتقال آب و افزایش سهم اراضی کشاورزی آبی که با روش آبیاری تحت فشار آبیاری می‌شوند، مجموع نیاز آبی کاهش خواهد یافت. در مجموع برای یکسال آب مورد نیاز منطقه مطالعاتی برابر ۹۴/۲ میلیون مترمکعب برآورد شده است. بررسی وضعیت تأمین مطابق با نتایج به دست آمده در جدول ۷ انجام می‌شود. در کل دوره ۲۳۱۵/۷ میلیون مترمکعب آب مورد نیاز است که از این میزان ۹۲/۳ درصد حجمی این نیاز در طول دوره تأمین شده است و کل نیازها به طور میانگین فقط با ۸ درصد کمبود حجمی

جدول ۷- وضعیت تأمین نیاز بخش‌های مختلف- سناریو FDS

اعتمادپذیری	درصد تأمین نشده	درصد تأمین شده	حجم تأمین نشده (MCM)	حجم تأمین شده (MCM)	حجم کل نیاز (MCM)	
100	0/0	100/0	0/0	200/9	200/9	شرب
98/9	1/1	98/9	0/2	15/0	15/1	صنعت
91/4	8/6	91/4	161/4	1714/3	1875/7	کشاورزی بالا
92	8/0	92/0	17/8	206/1	224/0	کشاورزی پایین
	7/7	92/3	179/4	2136/3	2315/7	مجموع

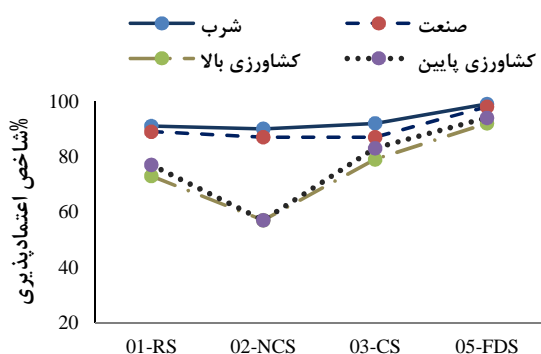
### مقایسه سناریوها

برای بررسی عملکرد سیستم در برابر تخصیص منصفانه همه بخش‌های سناریوها مقایسه می‌شوند. شاخص اعتمادپذیری سیستم و سطح برداشت آب زیرزمینی در هر یک از سناریوها در شکل ۷ و شکل ۸ نشان داده شده است.

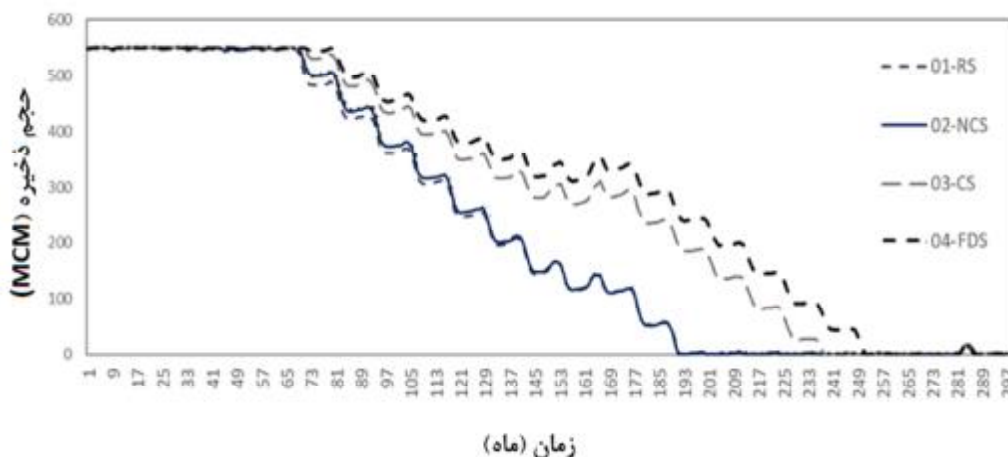
شاخص اعتمادپذیری برای سناریو توسعه کامل برای کلیه بخش‌های مصرف بالای ۹۰ درصد به دست آمد. این مقادیر با تخصیص سطح خوب برای حبابه محیط‌زیستی رودخانه کلان ملایر است؛ از این رو می‌توان با سری اقداماتی در جهت دستیابی به شاخص‌های تعریف شده در سناریو توسعه کامل، به سطح خیلی خوبی از شاخص اعتمادپذیری دست یافت.



حداکثری از آبخوان برای تأمین قسمت عمده نقاط مصرف شده است.



شکل ۷- شاخص اعتمادپذیری نقاط مصرف تحت سناریوهای مختلف



شکل ۸- سری زمانی ذخیره آبخوان دشت ملایر تحت سناریوهای مختلف

است. افزایش سطح فعال بخش کشاورزی به ۱۸ هزار هکتار بدون توجه به منابع آبی موجود و همچنین پایداری منابع آب، باعث اتمام ذخیره آب زیرزمینی به عنوان ذخایر حیاتی منطقه طی ۱۵ سال از اجرای این سناریو خواهد بود. در سناریو تعدیل سطح اراضی کشاورزی، در هر سه دوره پرآبی، نرمال و کم‌آبی نیاز کشاورزی بالای ۸۰ درصد تأمین می‌شود. در مجموع سناریو توسعه با شاخص اعتمادپذیری بالای ۹۰ درصد برای هر بخش مصرف و همچنین تأمین نیاز زیست‌محیطی به عنوان کامل‌ترین سناریو حاصل شد.

مطابق با شکل ۷ روند شاخص اعتمادپذیری در سناریو NCS در کمترین سطح است. در این سناریو با توجه به افزایش غیرمحافظة کارانه سطح فعال نقاط مصرف کمترین اعتمادپذیری برای بخش‌های کشاورزی به میزان ۵۷ درصد به دست آمده است. مجموع سناریوهای محتمل، اصلاح راندمان‌ها و الگوی مصرف در سناریو توسعه، توأم با تأمین نیاز محیط‌زیستی پایین‌دست رودخانه کلان ملایر در سطح خوب بهترین نتیجه را برای عملکرد سیستم منتج شده است. شاخص اعتمادپذیری برای همه بخش‌ها در این سناریو بالای سطح ۹۵ درصد است. مقایسه سناریوها در شکل ۸ از منظر مصرف آب زیرزمینی نیز نشان از مصرف زیاد در سناریو شرایط موجود و سناریو NCS دارد. نتایج سطح ذخیره آبخوان برای این دو سناریو مشابه هم به دست آمده است که نشان از برداشت

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از مدل WEAP مخازن موجود در حوضه سد کلان ملایر شبیه‌سازی شد و ۳ سناریو در جهت بررسی عرضه و تقاضا تعریف شد و مورد تحلیل قرار گرفت. بررسی شرایط موجود حاکی از آن است که میزان سطح سالیانه نقاط مصرف در شرایط موجود متناسب با وضعیت پرآبی حوضه مطالعاتی تعریف شده است و در سال‌هایی با منابع آبی بحرانی و نرمال، مصارف بخش کشاورزی با کمبود در سطح ۲۰ تا ۳۰ درصد مواجه می‌شوند. سناریو NCS، بیانگر آن است که در شرایط غیرمحافظة کارانه، میزان مصرف بخش کشاورزی در سال‌های نرمال و کم‌آبی با کمبود زیادی مواجه شده

## منابع

10. Moghadam S. H. Ashofteh P. S. and Loáiciga H. A. 2022. Optimal Water Allocation of Surface and Ground Water Resources under Climate Change with WEAP and IWOA Modeling. *Water Resource Management Journal*. 36: 3181–3205.
11. Nassery H. R. Adinehvand R. Salavitabar A. and Barati R. 2017. Water Management Using System Dynamics Modeling in Semi-arid Regions. *Civil Engineering Journal*. Ital Publication. 3(9): 766-78.
12. Nivesh S. Patil J. P. and Goyal V. C. 2022. Assessment of future water demand and supply using WEAP model in Dhasan River Basin, Madhya Pradesh, India. *Environment Science and Pollution Research Journal*.
13. Teklu S. Soliman A. H. and El-Zawahry A. 2020. Testing the WEAP Hydrologic Model for Awash Basin, Ethiopia Soil Moisture Module with Watershed Demand Approach. *Civil and Environmental Research Journal*. 12(3): 59-74.
1. احمدی ع. ۱۴۰۱. اثر افزایش راندمان کاربری آب بر بهبود وضعیت منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل WEAP در دشت قزوین. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک. ۲(۱): ۵۳-۶۲.
2. دهقان ز. دلبری م. و محمدرضاپور ا. ۱۳۹۴. برنامه‌ریزی تخصیص منابع آب تحت سناریوهای مدیریتی در حوضه گرگان‌رود. نشریه دانش آب و خاک. ۲۵(۳): ۱۱۷-۱۳۲.
3. رفیعی دارانی ه. کهنسال م. قربانی م. و صبحی م. ۱۳۹۶. مدل‌سازی هیدرواقتصادی در تحلیل راهبردهای مدیریت منابع آب در دشت نیشابور. مجله اقتصاد و توسعه کشاورزی. ۹۹: ۴۱-۷۷.
4. شفا بیان فرد د. کوهیان افضل ف. و یخکشی م. ا. ۱۳۹۳. تعیین گزینه‌های برتر بهره‌برداری از منابع آب با استفاده از مدل WEAP و تحلیل تصمیم‌گیری چندشاخصه (مطالعه موردی: حوزه زرينگل). پژوهشنامه مدیریت حوضه آبریز. ۵(۹): ۱۰۱-۱۱۵.
5. فیضی ا. و آقاجانی جمایران ر. ۱۴۰۰. تخصیص و مدیریت منابع آب حوضه آبریز سد یامچی با رویکرد تحلیل سناریوها با استفاده از مدل WEAP. فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست. ۲۳(۹): ۸۹-۱۰۷.
6. وخشوری ع. جعفرپور ز. و کردوانی پ. ۱۳۹۶. مقایسه شاخص‌های خشکسالی اقلیمی در ایستگاه‌های بارشی ایران. مجله جغرافیای طبیعی. ۱۰(۳۶): ۸۹-۱۰۸.
7. Jeniffer K. M. Shadrack T. Mavengano S. Z. Tsehaie W. and Robert B. 2010. Water allocation as a planning tool to minimise water use conflicts in the upper EwasoNgiro North basin. Kenya. *Water Resource Management*. 24: 3939–3959.
8. Kou L. Li X. Lin J. and Kang J. 2018. Simulation of Urban Water Resources in Xiamen Based on a WEAP Model. *Water Journal*. 10(6): 1-16.
9. Léville H. Sally H. and Cour J. 2003. Testing water demand management scenarios in a water-stressed basin in South Africa: application of the WEAP model. *Physics and Chemistry of the Earth*. 28(20): 779–786.