Journal of Environment and Water Engineernig
ISSN: 2476-3683

مجله محیط زیست و مهندسی آب
شابک : ۲۴۷۶-۳۶۸۳

# ارزیابی شاخص‌های پایداری زیست‌محیطی و کشاورزی در حوزه‌های آبریز زرینه‌رود و سیمینه‌رود

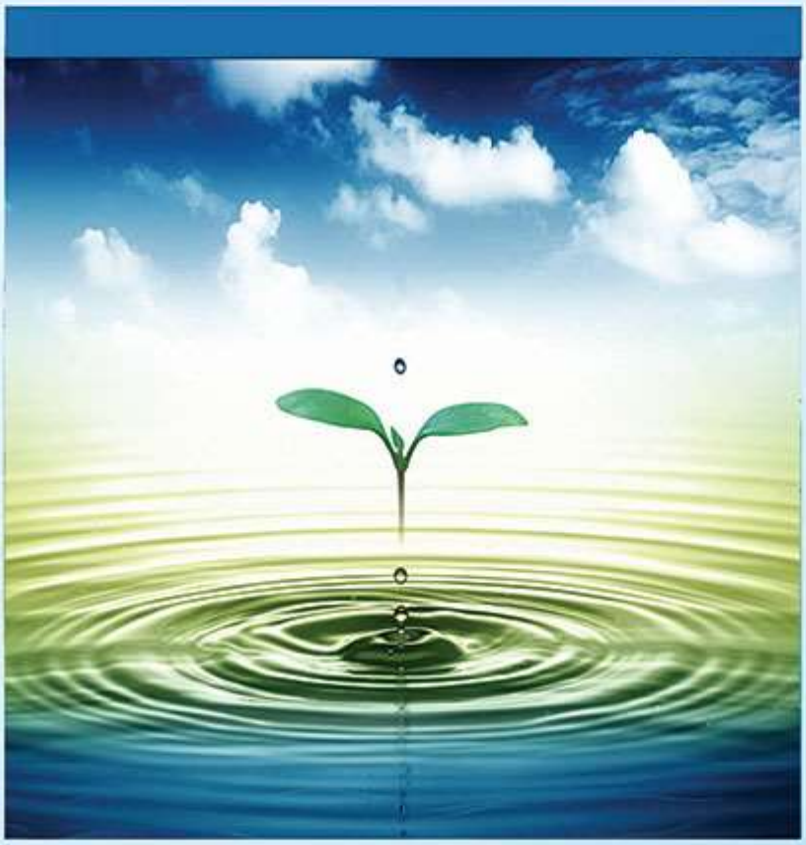
جمال احمدآلی، غلامعباس بارانی، کوروش قادری و بهزاد حصاری

**دوره ۳، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۶، صفحات ۳۱۱-۲۹۸**

**Vol. 3(4), Winter 2018, 298 – 311**

**Evaluation of Environmental and Agricultural Sustainability Indices of Zarrinehrud and Siminehrud River Basins**

Ahmadaali J., Barani G. A., Qaderi K. and Hessari B.



www.jewe.ir

OPEN ACCESS

**ارجاع به این مقاله:** احمدآلی ج.، بارانی غ. ع.، قادری ک. و حصاری ب. (۱۳۹۶). ارزیابی شاخص‌های پایداری زیست‌محیطی و کشاورزی در حوزه‌های آبریز زرینه‌رود و سیمینه‌رود. محیط‌زیست و مهندسی آب، دوره ۳، شماره ۴، صفحات: ۳۱۱ – ۲۹۸

**Citing this paper:** Ahmadaali J., Barani G. A., Qaderi K. and Hessari B. (2018). Evaluation of environmental and agricultural sustainability indices of Zarrinehrud and Siminehrud river basins. J. Environ. Water Eng., 3(4), 298 – 311.

# ارزیابی شاخص‌های پایداری زیست‌محیطی و کشاورزی در حوزه‌های آبریز زرینه‌رود و سیمینه‌رود

**جمال احمدآلی*[۱]، غلام‌عباس بارانی[۲]، کوروش قادری[۳] و بهزاد حصاری[۴]**

[۱]دانشجوی دکترا، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
[۲]استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
[۲]دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
[۲]استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
*نویسنده مسئول: jamalahmadaali@gmail.com

**مقاله اصلی**
**تاریخ دریافت: [۱۳۹۶/۰۳/۲۳]** **تاریخ پذیرش: [۱۳۹۶/۰۸/۲۴]**

**چکیده**

در مناطق خشک و نیمه‌خشک، کشاورزی منجر به کاهش تراز سطح آب دریاچه‌های بزرگ مانند دریاچه آرال، دریاچه ارومیه، دریاچه هامون و دریاچه بختگان شده‌است. هدف اصلی از انجام این تحقیق ارزیابی پایداری زیست‌محیطی و کشاورزی حوزه‌های آبریز زرینه‌رود و سیمینه‌رود به‌عنوان بزرگ‌ترین زیرحوضه‌های دریاچه ارومیه می‌باشد. شاخص پایداری با استفاده از معیارهای عملکرد اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری محاسبه شد. در این تحقیق هم‌چنین شاخص کمبود آب آبیاری برای مناطق کشاورزی مورد تحلیل قرارگرفت. مقادیر تقاضای آبیاری و شاخص کمبود آب آبیاری (تقاضای برآورد نشده) با استفاده از مدل WEAP21 محاسبه و شاخص‌های پایداری کشاورزی و زیست محیطی بدست آمد. نتایج نشان‌داد که شاخص پایداری زیست‌محیطی حوزه‌های آبریز زرینه‌رود و سیمینه‌رود در جهت تأمین نیاز زیست‌محیطی دریاچه ارومیه در طی دوره مورد مطالعه به‌ترتیب برابر ۰/۳۹ و ۰/۴۱ می‌باشد. هم‌چنین شاخص پایداری کشاورزی به‌ترتیب برابر ۰/۶۴ و ۰/۷۴ به‌دست آمد. مقادیر شاخص کمبود آب آبیاری نیز نشان‌داد که تقاضای آبیاری برای کلیه مناطق کشاورزی به‌طور کامل تأمین نشده است. نتایج فوق نشان داد که حوزه‌های آبریز زرینه‌رود و سیمینه‌رود هم از لحاظ زیست‌محیطی و هم از لحاظ کشاورزی ناپایدار است. با توجه به اینکه در طی دوره مطالعه تغییرات سطح زیرکشت در اکثر مناطق کشاورزی روند افزایشی داشته است، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که توسعه کشاورزی و اضافه شدن برداشت‌های آب برای مصارف کشاورزی عامل اصلی ناپایداری زیست‌محیطی و کشاورزی است.

**واژه‌های کلیدی:** آسیب‌پذیری؛ اطمینان‌پذیری؛ برگشت‌پذیری؛ دریاچه ارومیه؛ مدل WEAP21

## ۱- مقدمه

با افزایش جمعیت انسانی همراه با گسترش فعالیت‌های اقتصادی و بهبود استانداردهای زندگی، منابع آب شیرین در جهان تحت فشار فزاینده‌ای است (Hashemi 2012). در مناطق خشک و نیمه‌خشک، کشاورزی منجر به کاهش سطح آب دریاچه‌های بزرگ مانند دریاچه آرال، دریاچه ارومیه، دریاچه هامون و دریاچه بختگان شده است (Kløve and Haghighi 2017). شرایط کنونی دریاچه ارومیه پیامد توسعه نامتوازن و ناپایدار در حوزه آبریز آن و برداشت بی‌رویه از منابع آب تجدیدپذیر حوضه به‌ویژه در دو دهه اخیر می‌باشد. مجموعه عوامل انسانی و طبیعی مختلف به‌مانند اجرای طرح‌های متعدد توسعه منابع آب، توسعه روزافزون بخش کشاورزی، تغییر الگوی کشت و تولید محصولات پرآب‌بر در سطح حوضه، بهره‌وری پایین مصرف آب و عدم حفاظت مؤثر از منابع زیست‌محیطی و اکولوژیکی حوضه و از طرف دیگر نوسانات اقلیمی و کاهش میزان بارش‌ها و رواناب‌ها در سطح حوضه چنین شرایطی را برای پهناورترین دریاچه داخلی ایران به همراه داشته است (Anonymous 2015). AghaKouchak et al. (2015) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالا نشان دادند که سطح دریاچه ارومیه حدود ۸۸ درصد نسبت به دهه‌های قبل کاهش داشته‌است. آن‌ها نتیجه گرفتند که تغییرات شدید حجم دریاچه ارومیه در درجه اول ناشی از عواقب طرح‌های توسعه منابع آب مهاجم منطقه‌ای، فعالیت‌های کشاورزی فشرده، تغییرات انسانی در سیستم و رقابت بر سر آب در بالادست است. Khatami (2013) روند تغییرات تراز سطح آب دریاچه ارومیه را بررسی نمود. نتایج برای دوره ۲۰۱۲-۱۹۹۶ نشان داد حدود ۱۴-۱۱ درصد تغییرات تراز سطح آب دریاچه در فصل پرمصرف (مارس تا آوریل) و ۳۵ درصد در دسامبر (فصل کم مصرف) می‌تواند ناشی از تغییرات اقلیمی یا علل طبیعی باشد. با توجه به فعالیت‌های گسترده انسانی شامل تغییرات کاربری اراضی، برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی، پل میان‌گذر شهید کلانتری، پروژه‌های سدسازی یا انحراف آب که در طول دو دهه اخیر اتفاق افتاده یا تشدید شده‌اند، به‌طور قیاسی می‌توان نتیجه گرفت فعالیت‌های انسانی عامل اصلی کاهش تراز سطح آب دریاچه ارومیه می‌باشد.

بسیاری از مناطق در جهان با چالش‌های قابل‌توجه در مدیریت آب‌های شیرین روبرو هستند. تخصیص منابع محدود آب، کیفیت محیط‌زیست و سیاست‌های استفاده پایدار از آب، مسائلی هستند که نگرانی در مورد آن‌ها رو به افزایش است. مدل WEAP[1] با هدف دخیل کردن این مقادیر (مدیریت مصرف، کیفیت آب و حفاظت از اکوسیستم) در یک ابزار کاربردی برای برنامه‌ریزی منابع آب توسعه داده‌شده است (Anonymous 2016 b). مدل WEAP یکی از مدل‌های قدرتمند نیمه‌توزیعی شبیه‌سازی هیدرولوژی حوزه آبریز و مدیریت بیلان آب و رواناب در پایه‌های زمانی متفاوت است (Mohamadpoor et al. 2016). McCartney et al. (2010) وضعیت جاری و آینده توسعه منابع آب در حوضه دریاچه تانا[2] واقع در کشور اتیوپی را با استفاده از مدل WEAP (Yates et al. 2005a,b) مورد ارزیابی قراردادند. نتایج نشان داد که توسعه منابع آب موجود، برای تولید انرژی برقابی، جریان در پایین‌دست دریاچه را تغییر داده و باعث کاهش سطح آب دریاچه شده است. اگر تمام طرح‌های توسعه اتفاق بیفتد، متوسط تراز سطح دریاچه ۰/۴۴ متر افت خواهد کرد. Loucks برای اولین بار شاخصی را برای کمّی کردن پایداری سیستم‌های منابع آب با استفاده از سه معیار اطمینان‌پذیری[3]، برگشت‌پذیری[4] و آسیب‌پذیری توسعه داد. وی شاخص پایداری را برای ارزیابی کارآیی گزینه‌های مختلف مدیریتی از دیدگاه ذی‌نفعان آب و محیط‌زیست تعریف نمود. شاخص پایداری، تخمینی بر ظرفیت سیستم در کاهش آسیب‌پذیری آن می‌باشد. اگر یک سیاست پیشنهادی باعث شود که یک سیستم پایدارتر گردد، این شاخص نشان می‌دهد که سیستم ظرفیت بالایی در کاهش آسیب‌پذیری در آینده دارد. شاخص پیشنهادی در تحقیقات متعددی توسط محققان مورداستفاده قرارگرفت. (Safavi and Golmohammadi 2016) معیارهای اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری جنبه‌های مختلف عملکرد سیستم‌های منابع آب را اندازه‌گیری می‌نماید. این سه معیار باهم، یکی از جامع‌ترین رویکردها را برای تجزیه‌وتحلیل احتمال موفقیت یا شکست یک سیستم،

[1]- Water Evaluation and Planning System (WEAP)
[2]- Lake Tana Basin
[3]- Reliability
[4]- Resilience

میزان بهبودی (یا برگشت) یک سیستم از حالت‌های نامطلوب، هم‌چنین تعیین کمیت نتیجه مورد انتظار در حالت‌های رضایت‌بخش برای دوره‌های طولانی‌مدت را فراهم می‌کند (Asefa et al. 2014). Safavi et al. (2016) شاخص پایداری منابع و مصارف آب در حوزه آبریز زاینده‌رود تحت سناریوهای برنامه‌ریزی و مدیریت جامع منابع آب را مورد تجزیه‌وتحلیل قراردادند. ایشان شاخص پایداری منابع آب را بر اساس معیارهای عملکرد اطمینان‌پذیری زمانی و حجمی، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و حداکثر کمبود تعریف نمودند. نتایج نشان داد که کاهش مصرف شرب، صنعت و کشاورزی به ترتیب به‌اندازه ۱۰، ۱۵ و ۳۰ درصد در راستای سناریوی مدیریت تقاضا و اجرای طرح‌های کوهرنگ سه و بهشت‌آباد در راستای سناریوی مدیریت تأمین راهکاری است که اجرای توأمان آن در آینده می‌تواند منجر به بهبود یا شروع بهبود پایداری منابع آب از حالت ضعیف به حالت متوسط تا خوب شود.

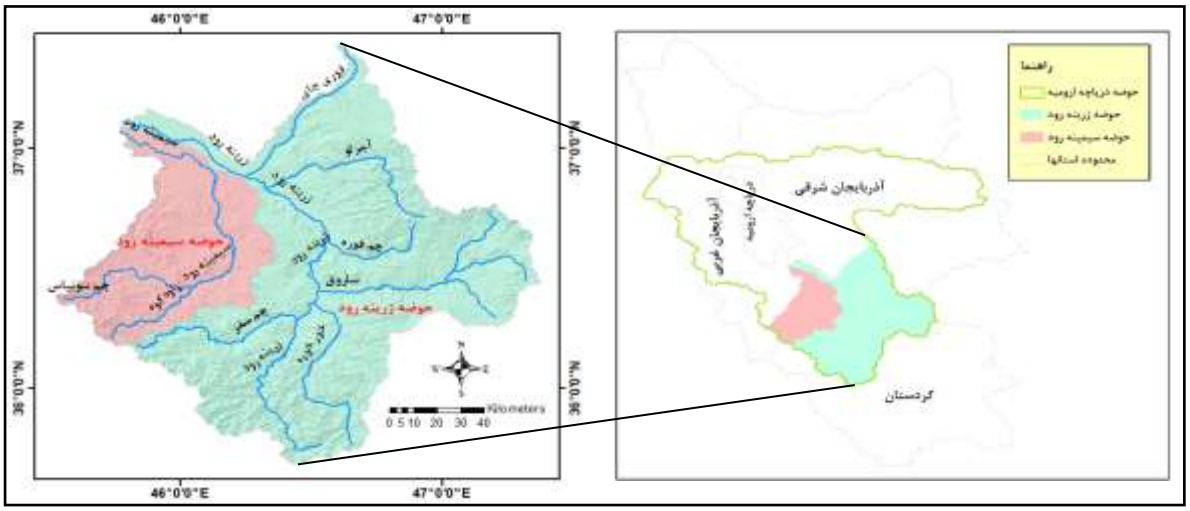
Yilmaz and Harmancioglu (2010) با استفاده از مدل WEAP مدیریت منابع آب را در حوزه آبریز رودخانه گدیز در ترکیه مورد ارزیابی قراردادند. ورودی اولیه مدل ارائه‌شده مقدار آب سطحی است که تا حد زیادی به مصارف آبیاری اختصاص داده‌شده است. بنابراین، روابط متقابل عرضه و تقاضا در مصرف آب کشاورزی تمرکز اصلی مطالعه ایشان را تشکیل داده است. نتایج مطالعه ایشان بر اساس شاخص‌های مختلف ازجمله شاخص پایداری نشان‌داد که حوزه آبریز رودخانه گدیز کاملاً به شرایط خشکسالی حساس است و بخش کشاورزی به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر کسری آبیاری قرارگرفته که به‌خصوص در دوره‌های خشکسالی شدت آن بیشتر می‌باشد. ارزیابی وضعیت موجود زیر حوضه‌های دریاچه ارومیه از جنبه‌های مختلف ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به اینکه حوزه‌های آبریز زرینه‌رود و سیمینه‌رود سهمی حدود ۵۲ درصدی (Anonymous 2015) در تأمین نیاز زیست‌محیطی دریاچه ارومیه را دارا می‌باشند، هدف اصلی از این تحقیق بررسی اثر تغییرات منابع و مصارف این دو حوضه بر ورودی آب به دریاچه ارومیه با استفاده از مدل WEAP21 و ارزیابی آن به‌وسیله شاخص‌های پایداری زیست‌محیطی، پایداری کشاورزی و کمبود آب آبیاری می‌باشد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مطالعه شده

حوزه آبریز دریاچه ارومیه با وسعت ۵۱۸۷۶ کیلومترمربع 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 ۱۰ درصد مساحت حوضه واقع‌شده است. دریاچه ارومیه نیز با وسعتی در حدود ۵۰۰۰ کیلومترمربع ۱۱ درصد مساحت حوضه را به خود اختصاص داده و بین استان‌های آذربایجان غربی و آذربایجان شرقی مشترک است (Anonymous 2016a). با توجه به اینکه حوزه‌های آبریز زرینه‌رود و سیمینه‌رود حدود ۵۲ درصد نیاز زیست‌محیطی دریاچه ارومیه را تأمین نموده و از زیر حوضه‌های مهم حوزه آبریز دریاچه ارومیه می‌باشند، این تحقیق بر روی این دو زیر حوضه انجام‌گرفته است.

زیرحوضه زرینه‌رود- سیمینه‌رود در جنوب و جنوب شرقی دریاچه ارومیه واقع‌شده و ازنظر وسعت بزرگ‌ترین زیرحوضه دریاچه ارومیه می‌باشد. حدود جغرافیایی آن از شمال به زیرحوضه صوفی‌چای و دریاچه ارومیه، از غرب به حوزه آبریز خلیج‌فارس و دریای عمان و از شرق به حوزه آبریز دریای خزر محصور می‌گردد (شکل ۱). رودخانه‌های زرینه‌رود و سیمینه‌رود با پتانسیل آبدهی حدود ۳ میلیارد مترمکعب در سال، ازجمله رودخانه‌های پر آب کشور محسوب می‌شوند که به همراه پتانسیل‌های طبیعی و اجتماعی متعدد، موجب توسعه فعالیت‌های کشاورزی در دشت‌های آبخور حوضه خود شده‌اند. احداث شبکه‌های آبیاری چون زرینه‌رود (میاندوآب) به همراه مخازن سدهایی مانند شهید کاظمی بوکان امکاناتی را در سطح حوضه ایجاد نموده‌اند که در حال حاضر در حدود ۱۳۰۰۰۰ هکتار از اراضی حوضه تحت کشت آبی به‌صورت سنتی و مدرن قرار گیرد.




شکل ۱- موقعیت حوزه‌های آبریز زرینه‌رود و سیمینه‌رود

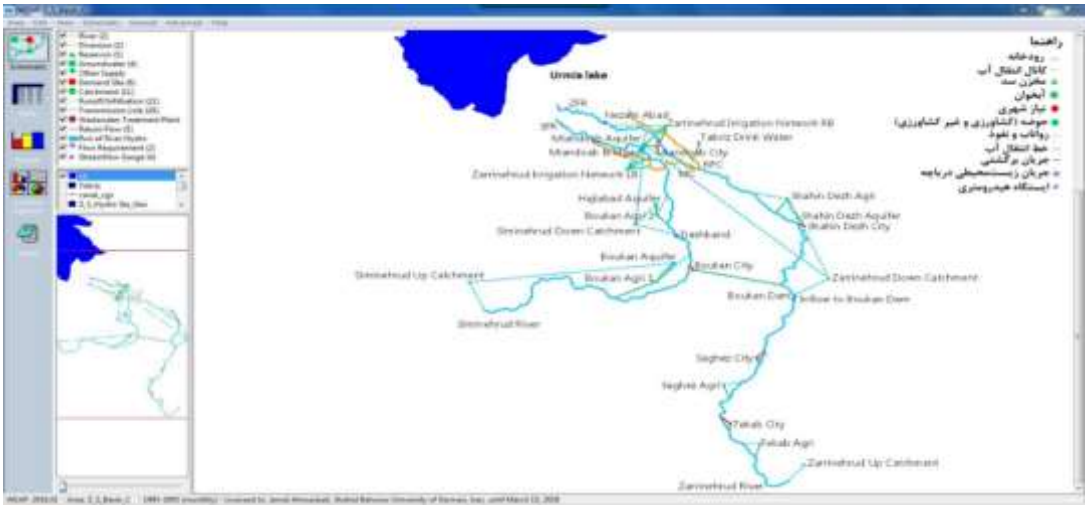
### ۲-۲- مدل WEAP

WEAP یک ابزار مدل‌سازی است که قادر به ارزیابی یکپارچه‌ای از اقلیم، هیدرولوژی، کاربری اراضی، تأسیسات آبیاری و اولویت‌های مدیریت آب حوزه آبریز می‌باشد. مدل WEAP، از یک مدل برنامه‌ریزی خطی استاندارد برای حل مسائل تخصیص آب در هر گام زمانی استفاده می‌کند که تابع هدف آن حداکثر کردن درصد تأمین نیازهای مراکز تقاضا با توجه به اولویت عرضه و تقاضا، تعادل جرمی و سایر قیود می‌باشد. تمامی قیود به‌طور متناوب برای هر گام زمانی و با توجه به اولویت عرضه و تقاضا تعریف می‌شود. مدل WEAP در هر گام زمانی معادله تعادل جرمی آب را برای هر گره و شاخه محاسبه می‌کند (Yates et al. 2005 a, b). با استفاده ازسری‌های زمانی اقلیم، مدل WEAP مؤلفه‌های چرخه هیدرولوژیکی را با شبیه‌سازی فرایند بارش-رواناب در سطح حوزه آبریز محاسبه می‌کند (Esteve et al. 2015).

### ۲-۳- ساختار مدل

مدل برای حوزه‌های آبریز زرینه‌رود و سیمینه‌رود با استفاده از نرم‌افزار ارزیابی و برنامه‌ریزی منابع آب (WP21) ساخته شد. فرآیند مدل و نیازهای آبی حوضه در شکل (۲) نشان داده‌شده‌است. این مدل‌سازی شامل ۲ رودخانه اصلی (زرینه‌رود و سیمینه‌رود)، ۲ کانال انحراف آب (کانال ساحل راست شبکه آبیاری زرینه‌رود (RPC) و کانال ساحل چپ شبکه آبیاری زرینه‌رود (MC))، ۱ مخزن سد (سد شهید کاظمی بوکان)، ۴ آبخوان (آبخوان‌های میاندوآب، شاهین‌دژ، بوکان و حاجی‌آباد)، ۶ نقطه نیاز شرب (آب شرب شهرستان‌های تکاب، سقز، بوکان، شاهین‌دژ، میاندوآب و تبریز)، ۱۱ حوضه (۴ حوضه غیر کشاورزی شامل بالادست و پایین‌دست زرینه‌رود و بالادست و پایین‌دست سیمینه‌رود و ۷ حوضه کشاورزی شامل تکاب، سقز، شاهین‌دژ، بوکان ۱، بوکان ۲، ساحل راست شبکه آبیاری زرینه‌رود و ساحل چپ شبکه آبیاری زرینه‌رود)، ۲۱ خط رواناب و نفوذ، ۲۰ خط انتقال آب، ۵ خط جریان آب برگشتی (از آب شرب شهرستان‌ها)، ۲ نقطه نیاز آب زیست‌محیطی دریاچه ارومیه (از رودخانه‌های زرینه‌رود (ZFR) و سیمینه‌رود (SFR) و ۴ ایستگاه هیدرومتری (شامل ورودی سد بوکان و نظام‌آباد واقع بر روی رودخانه زرینه‌رود و داشبند بوکان و پل میاندوآب واقع بر روی رودخانه سیمینه‌رود) می‌باشد.

در این تحقیق از روش رطوبت خاکِ مدل WEAP برای مدل‌سازی واکنش هیدرولوژیکی حوضه‌ها استفاده گردید (Ahmadaali et al. 2017).




شکل ۲- طرح مدل WEAP برای حوزه‌های آبریز زرینه‌رود و سیمینه‌رود

**۲-۴- منابع داده‌ها و اطلاعات**

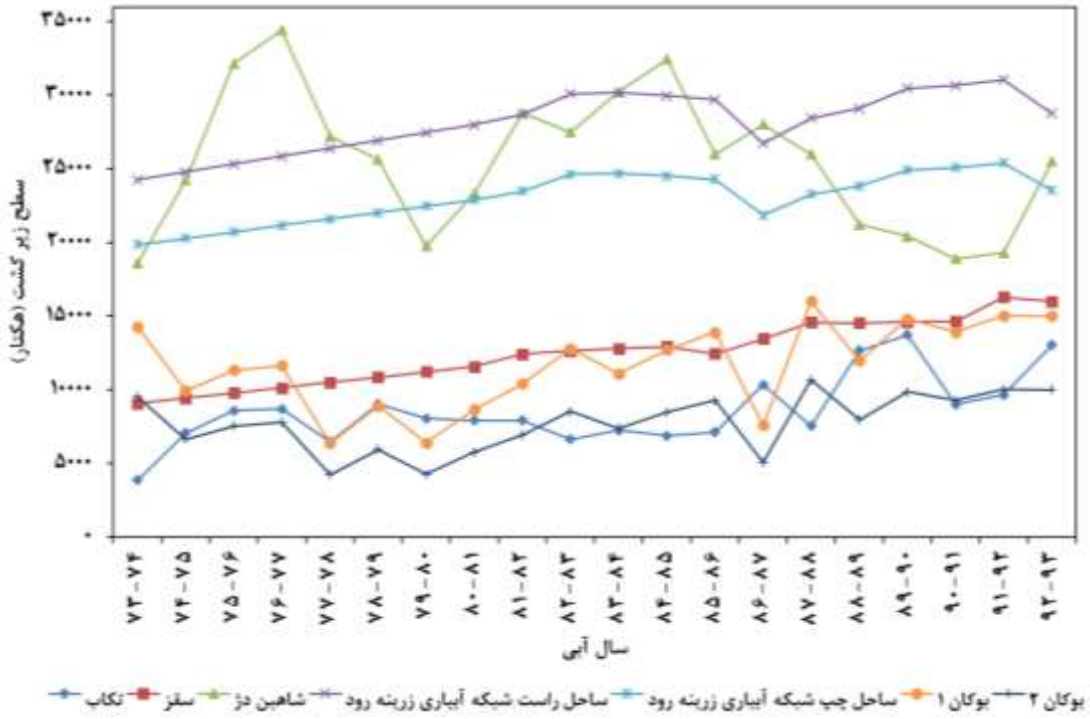
در این تحقیق دوره آماری ۲۰ ساله (۱۳۷۴-۱۳۹۳) برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل درنظر گرفته‌شد. ایستگاه‌های هواشناسی داخل و نزدیک حوزه‌های آبریز موردمطالعه به تعداد ۲۸ ایستگاه (۴ ایستگاه سینوپتیک، ۱۱ ایستگاه تبخیرسنجی و ۱۳ ایستگاه باران‌سنجی) برای پارامترهای هواشناسی بارش، دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و کسر ابرناکی مورداستفاده قرارگرفت. مقادیر متوسط هرکدام از پارامترهای هواشناسی برای هرکدام از زیرحوضه‌ها با استفاده از روش چندضلعی‌های تیسن برآورد گردید. در مدل WEAP21، حوزه‌های آبریز زرینه‌رود و سیمینه‌رود بر اساس ایستگاه‌های هیدرومتری مورداستفاده به زیر حوضه‌های بالادست و پایین‌دست تقسیم شدند. آمار ماهانه دبی چهار ایستگاه هیدرومتری مورداستفاده قرار گرفت.

در این تحقیق حوضه زرینه‌رود شامل مناطق کشاورزی تکاب، سقز، شاهین‌دژ، ساحل راست و ساحل چپ شبکه آبیاری زرینه‌رود و حوضه سیمینه‌رود شامل مناطق کشاورزی بوکان ۱ و ۲ می‌باشد. مصارف آب برای مناطق کشاورزی به‌صورت زیر در مدل‌سازی و محاسبات در نظر گرفته‌شده است: برای منطقه تکاب از رودخانه ساروق و زیرشاخه‌های آن، برای منطقه سقز از رودخانه‌های خور خوره، زرینه‌رود و چم سقز و از چشمه‌های موجود، برای منطقه شاهین‌دژ از رودخانه‌های زرینه‌رود، چم قوره، آجرلو، قوری چای و زیرشاخه‌های آن‌ها و از آبخوان شاهین‌دژ، برای ساحل راست شبکه زرینه‌رود از آب رودخانه زرینه‌رود منحرف‌شده از سد انحرافی نوروزلو به کانال ساحل راست یا RPC، از رودخانه زرینه‌رود واقع در محدوده شبکه و از آبخوان میاندوآب، برای ساحل چپ شبکه زرینه‌رود از آب رودخانه زرینه‌رود منحرف‌شده از سد انحرافی نوروزلو به کانال ساحل چپ یا MC، از رودخانه سیمینه‌رود واقع در محدوده شبکه و از آبخوان میاندوآب، برای منطقه بوکان ۱ از رودخانه‌های زاوه کوه، چم سونیاس و سیمینه‌رود و از آبخوان بوکان، برای منطقه بوکان ۲ از رودخانه سیمینه‌رود و از آبخوان حاجی‌آباد.

برای مناطق کشاورزی، ترکیب کشت و سطح زیرکشت محصولات زراعی و باغی در سال‌های مختلف لحاظ گردیده است که مقادیر آن‌ها در جدول (۱) و نمودار شکل (۳) نشان داده‌شده است (Agriculture Jihad Organization of Kurdistan 2016; Agriculture Jihad Organization of West Azarbaijan 2016; West Azarbaijan Regional Water Authority 2017).

جدول ۱- محصولات غالب زراعی و باغی حوضه‌های کشاورزی موردمطالعه

| نام حوضه کشاورزی | محصولات غالب |
|---|---|
| تکاب | گندم، یونجه، سیب و صنوبر (تبریزی) |
| سقز | گندم، جو، یونجه، چغندرقند، سیب، انگور و گردو |
| شاهین‌دژ | گندم، جو، یونجه، چغندرقند، سیب، هلو، بادام، گردو و صنوبر (تبریزی) |
| ساحل راست شبکه آبیاری زرینه‌رود | گندم، جو، یونجه، چغندرقند، گوجه‌فرنگی، سیب و انگور |
| ساحل چپ شبکه آبیاری زرینه‌رود | گندم، جو، یونجه، چغندرقند، گوجه‌فرنگی، سیب و انگور |
| بوکان ۱ | گندم، جو، یونجه، چغندرقند، سیب، انگور، بادام و گردو |
| بوکان ۲ | گندم، جو، یونجه، چغندرقند، سیب، انگور، بادام و گردو |




شکل ۳- نمودار تغییرات سطح زیر کشت حوضه‌های کشاورزی موردمطالعه در طول دوره آماری ۲۰ ساله

بیشترین سطح زیر کشت برای کل حوضه زرینه‌رود (شامل مناطق کشاورزی تکاب، سقز، شاهین‌دژ، ساحل راست و ساحل چپ شبکه زرینه‌رود) برابر با ۱۰۹۵۰۰ هکتار و بیشترین سطح زیر کشت برای کل حوضه سیمینه‌رود (شامل مناطق کشاورزی بوکان ۱ و ۲) برابر با ۲۶۵۰۰ هکتار می‌باشد. سیستم‌های آبیاری مورداستفاده در مدل شامل آبیاری سطحی، آبیاری بارانی و آبیاری قطره‌ای می‌باشد.

### ۲-۵- واسنجی و اعتبارسنجی مدل

در این تحقیق مدل با مقایسه داده‌های دبی جریان شبیه‌سازی‌شده در مقیاس ماهانه با داده‌های مشاهداتی در ایستگاه‌های هیدرومتری منتخب واسنجی گردید. یک دوره آماری ۱۱ ساله (از سال آبی ۷۴-۱۳۷۳ تا ۸۴-۱۳۸۳) برای واسنجی مدل و یک دوره ۹ ساله (از سال آبی ۸۵-۱۳۸۴ تا ۹۳-۱۳۹۲) برای اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شد. برای ارزیابی کمّی نتایج حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی مدل از سه شاخص ضریب تبیین ($R^2$)، ضریب نش- ساتکلیف (NSE) و شاخص تطابق (d) استفاده شد. مقادیر

شاخص‌های مربوط به ارزیابی کمّی نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل در جدول (۲) نشان داده‌شده است.

جدول ۲- مقادیر شاخص‌های ارزیابی مدل برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی

| شاخص/ ایستگاه هیدرومتری | ورودی سد بوکان | نظام‌آباد | داشبند بوکان | پل میاندوآب |
|---|---|---|---|---|
| دوره واسنجی | | | | |
| $R^2$ | ۰/۹۰ | ۰/۷۵ | ۰/۸۲ | ۰/۷۵ |
| NSE | ۰/۸۳ | ۰/۷۴ | ۰/۸۱ | ۰/۷۵ |
| D | ۰/۹۵ | ۰/۹۲ | ۰/۹۵ | ۰/۹۲ |
| دوره اعتبارسنجی | | | | |
| $R^2$ | ۰/۸۸ | ۰/۷۲ | ۰/۸۶ | ۰/۸۰ |
| NSE | ۰/۸۵ | ۰/۷۰ | ۰/۸۵ | ۰/۷۸ |
| D | ۰/۹۶ | ۰/۹۱ | ۰/۹۶ | ۰/۹۳ |

**۲-۶- شاخص‌های ارزیابی**

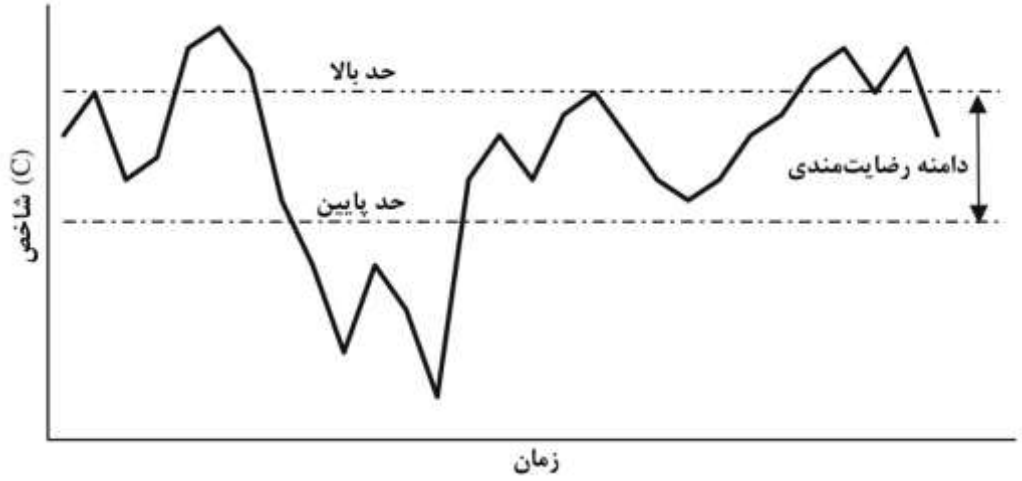
شاخص پایداری زیست‌محیطی برای ارزیابی وضعیت تأمین سهم نیاز زیست‌محیطی دریاچه ارومیه از حوزه‌های آبریز زرینه‌رود و سیمینه‌رود و شاخص‌های پایداری کشاورزی و کمبود آب آبیاری برای ارزیابی وضعیت حوزه‌های آبریز زرینه‌رود و سیمینه‌رود به‌کاررفته است. به‌منظور ارزیابی وضعیت منطقه موردمطالعه، سه شاخص پایداری زیست‌محیطی[1]، پایداری کشاورزی[2] و کمبود آب آبیاری[3] بر اساس نتایج Yilmaz and Harmancioglu (2010) برای دوره آماری موردمطالعه (۱۳۹۳-۱۳۷۴) به شرح جدول (۳) در نظر گرفته شد.

در این تحقیق شاخص‌های پایداری زیست‌محیطی و پایداری کشاورزی بر اساس رویکرد پیشنهادی به‌وسیله انجمن مهندسین عمران آمریکا و برنامه هیدرولوژیکی بین‌المللی (گروه کاری یونسکو) محاسبه شد. این رویکرد بر اساس جمع زمانی سری‌های زمانی شاخص مربوطه با استفاده از معیارهای عملکرد اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری محاسبه گردید. این روش می‌تواند با در نظر گرفتن هر شاخص انتخابی C نشان داده شود، که در آن سری‌های زمانی مقادیر با Ct نشان داده می‌شود. دوره زمانی شبیه‌سازی (t) به زمان در آینده (T) ادامه می‌یابد (شکل ۴).

جدول ۳- شاخص‌های ارزیابی (Yilmaz and Harmancioglu 2010)

| شاخص | شرح |
|---|---|
| پایداری زیست‌محیطی | جمع زمانی سری‌های زمانی نسبت عرضه به تقاضا (فقط برای نیاز زیست‌محیطی) بر اساس معیار عملکرد وقتی‌که مقدار رضایت‌بخش برابر ۱ می‌باشد (پوشش کامل) |
| پایداری کشاورزی | جمع زمانی سری‌های زمانی نسبت عرضه به تقاضا (فقط برای آبیاری) بر اساس معیار عملکرد وقتی‌که مقدار رضایت‌بخش بین ۰/۸ و ۱ در نظر گرفته شود |
| کمبود آب آبیاری | نشان‌دهنده تقاضای برآورد نشده سالیانه برای آبیاری می‌باشد (متوسط سالیانه در ارزیابی‌ها مورداستفاده قرار می‌گیرد)؛ $10^6$ $m^3$ |

[1]- Environmental Sustainability Index (ESI)
[2]- Agricultural Sustainability Index (ASI)
[3]- Irrigation Water Deficit (IWD)




شکل ۴- نمودار سری‌های زمانی شاخص و مقادیر دامنه رضایت‌مندی (Yilmaz and Harmancioglu 2010)

برای تعریف معیارهای عملکرد، حد پایین[1] و حد بالای[2] دامنه رضایت‌مندی بر اساس جدول (۳) و شکل (۴) تعیین گردید. در این تحقیق، دامنه رضایت‌مندی در شکل (۴) برای اهداف آبیاری بین ۰/۸ و ۱ انتخاب‌شده است که به‌ترتیب حد پایین و حد بالای نسبت عرضه به تقاضای آبیاری می‌باشد. باوجوداین، برای نیاز زیست‌محیطی، مطلوب این است که کل نیاز برآورده شود؛ بنابراین، مقادیر حد پایین و حد بالای نیاز زیست‌محیطی هر دو برابر ۱ در نظر گرفته شد. شاخص‌های عملکرد در ادامه تعریف می‌شوند (Loucks et al. 2005; Yilmaz and Harmancioglu 2010). در این تحقیق از این شاخص‌های برای محاسبه شاخص پایداری استفاده گردید.

### ۲-۶-۱- اطمینان‌پذیری

اطمینان‌پذیری به‌عنوان احتمال هر مقدار $C_t$ خاص در داخل دامنه مقادیر رضایت‌بخش به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$RE(C) = \frac{\text{تعداد مقادیر رضایت‌بخش}}{\text{تعداد کل مقادیر دوره شبیه‌سازی}} \quad (۱)$$

که در این رابطه، RE(C) شاخص اطمینان‌پذیری می‌باشد.

### ۲-۶-۲- برگشت‌پذیری

برگشت‌پذیری معیاری برای توصیف سرعت بهبود از یک شرایط غیر رضایت‌بخش می‌باشد. برگشت‌پذیری احتمال وقوع یک مقدار رضایت‌بخش $C_{t+1}$ در پی یک مقدار غیر رضایت‌بخش $C_t$ می‌باشد که به‌صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$RS(C) = \frac{\text{تعداد دفعاتی که یک مقدار رضایت‌بخش در پی یک مقدار غیر رضایت‌بخش اتفاق می‌افتد}}{\text{تعداد دفعاتی که مقدار غیر رضایت‌بخش اتفاق می‌افتد}} \quad (۲)$$

در این رابطه، RS(C) شاخص برگشت‌پذیری می‌باشد.

### ۲-۶-۳- آسیب‌پذیری

آسیب‌پذیری یک معیار آماری اندازه (بزرگی) یا طول مدت شکست‌ها در یک سری زمانی می‌باشد. اندازه (بزرگی) یک شکست میزانی است که یک مقدار $C_t$ از حد بالای مقادیر رضایت‌بخش فراتر می‌رود، یا زیر حد پایین مقادیر رضایت‌بخش قرار می‌گیرد. در این تحقیق، آسیب‌پذیری به‌صورت میزان آسیب‌پذیری مورد انتظار[3] تعریف می‌شود، که در آن مدت‌زمان شکست‌ها حذف‌شده‌اند و به‌صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود.

1- Lower Limit (LL)
2- Upper Limit (UL)
[1]- Expected Extent-Vulnerability

$$VU(C) = \frac{\text{مجموع مقادیر تکی شکست‌ها}}{\text{تعداد کل مقادیر تکی شکست‌ها}} \quad (۳)$$

که، در رابطه (۳)، VU(C) شاخص آسیب‌پذیری می‌باشد.

### ۲-۶-۴- شاخص پایداری

شاخص پایداری یک مفهوم نسبتاً جدید برای اندازه‌گیری عملکرد سیستم‌های منابع آب در دوره‌های زمانی طولانی است (Srdjevic and Srdjevic 2017). شاخص پایداری از مقدار صفر، برای پایین‌ترین و بدترین مقدار ممکن، تا مقدار ۱، برای بالاترین و بهترین مقدار ممکن تغییر می‌کند. این شاخص از حاصل‌ضرب مقادیر اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و (۱-آسیب‌پذیری) به‌دست می‌آید، نظر به اینکه اطمینان‌پذیری و برگشت‌پذیری در حالت بیشینه و آسیب‌پذیری در حالت کمینه معیار پایداری می‌باشد. بدین ترتیب، شاخص پایداری زیست‌محیطی و شاخص پایداری کشاورزی با روابط (۴) و (۵) محاسبه می‌شوند (Sandoval-Solis et al. 2011). شاخص بکار رفته برای پایداری زیست‌محیطی نسبت عرضه به تقاضای[1] نیاز زیست‌محیطی دریاچه ارومیه و شاخص به‌کار رفته برای پایداری کشاورزی نسبت عرضه به تقاضای مناطق آبیاری[2] (حوضه‌های کشاورزی) در نظر گرفته‌شده است.

$$ESI = \left[RE_{\left(\frac{Se}{De}\right)} * RS_{\left(\frac{Se}{De}\right)} * \left(1 - VU_{\left(\frac{Se}{De}\right)}\right)\right]^{\frac{1}{3}} \quad (۴)$$

$$ASI = \left[RE_{\left(\frac{Si}{Di}\right)} * RS_{\left(\frac{Si}{Di}\right)} * \left(1 - VU_{\left(\frac{Si}{Di}\right)}\right)\right]^{\frac{1}{3}} \quad (۵)$$

در این روابط، ESI شاخص پایداری زیست‌محیطی، $RE_{(Se/De)}$ اطمینان‌پذیری نسبت عرضه به تقاضای نیاز زیست‌محیطی دریاچه ارومیه، $RS_{(Se/De)}$ برگشت‌پذیری نسبت عرضه به تقاضای نیاز زیست‌محیطی دریاچه ارومیه، $VU_{(Se/De)}$ آسیب‌پذیری نسبت عرضه به تقاضای نیاز زیست‌محیطی دریاچه ارومیه، ASI شاخص پایداری کشاورزی، $RE_{(Si/Di)}$اطمینان‌پذیری نسبت عرضه به تقاضای مناطق آبیاری، $RS_{(Si/Di)}$ برگشت‌پذیری نسبت عرضه به تقاضای مناطق آبیاری و $VU_{(Si/Di)}$ آسیب‌پذیری نسبت عرضه به تقاضای مناطق آبیاری می‌باشد.

مقادیر تقاضای آبیاری برای مناطق آبیاری با استفاده از مدل WEAP به‌صورت ماهانه محاسبه گردید. برای مقادیر عرضه یا مصارف آبیاری نیز از داده‌های اخذشده از شرکت سهامی آب منطقه‌ای و سازمان جهاد کشاورزی استان‌های آذربایجان غربی و کردستان استفاده گردید. هم‌چنین در این تحقیق شاخص کمبود آب آبیاری (تقاضای برآورد نشده) بر اساس مقادیر متوسط سری‌های زمانی که به‌صورت سالیانه از دوره شبیه‌سازی از مدل WEAP به دست می‌آید محاسبه گردید. در این تحقیق سهم نیاز زیست‌محیطی دریاچه ارومیه با توجه به برنامه مدیریت جامع دریاچه ارومیه (Anonymous 2013) بر اساس جدول (۴) برابر ۳۱۰۰ میلیون مترمکعب در سال و سهم رودخانه‌های زرینه‌رود و سیمینه‌رود در تأمین نیاز زیست‌محیطی دریاچه به ترتیب برابر ۴۱ و ۱۱ درصد در نظر گرفته‌شده‌است. بنابراین سهم تأمین نیاز زیست‌محیطی دریاچه ارومیه از حوزه‌های آبریز زرینه‌رود و سیمینه‌رود به ترتیب برابر ۱۲۷۱ و ۳۴۱ میلیون مترمکعب در سال در محاسبات در نظر گرفته شد.

جدول ۴- پتانسیل منابع آب استان‌ها و سهم آن‌ها در تأمین نیاز زیست‌محیطی دریاچه ارومیه (میلیون مترمکعب در سال) (Anonymous 2013 b)

| ردیف | استان | پتانسیل منابع آبی | سهم استان‌ها برای تأمین نیاز زیست‌محیطی دریاچه ارومیه | درصد سهم برای تأمین نیاز زیست‌محیطی دریاچه ارومیه |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | آذربایجان غربی | ۳۹۸۲/۷۳ | ۱۸۷۰/۵ | ۶۰/۴ |
| ۲ | آذربایجان شرقی | ۱۳۶۰/۸۵ | ۲۷۰/۴ | ۸/۷ |
| ۳ | کردستان | ۱۵۸۳/۴۷ | ۹۵۹/۱ | ۳۰/۹ |
| | جمع | ۶۹۲۷ | ۳۱۰۰ | ۱۰۰ |

[1]- Supply/Demand (S/D) Ratio

[2]- Irrigation Districts

## ۳- یافته‌ها و بحث

### ۳-۱- شاخص پایداری زیست‌محیطی

با استفاده از روابط (۱) تا (۳) معیارهای عملکرد و با استفاده از رابطه (۴) شاخص پایداری زیست‌محیطی محاسبه‌شده و مقادیر آن برای دوره موردمطالعه (۱۳۷۴-۱۳۹۳) در جدول (۵) نشان داده‌شده است.

جدول ۵- معیارهای عملکرد و شاخص پایداری زیست‌محیطی

| حوزه آبریز/ معیار | اطمینان‌پذیری | برگشت‌پذیری | آسیب‌پذیری | شاخص پایداری زیست‌محیطی |
|---|---|---|---|---|
| زرینه‌رود | ۰/۳۶ | ۰/۳۴ | ۰/۵۲ | ۰/۳۹ |
| سیمینه‌رود | ۰/۳۸ | ۰/۳۶ | ۰/۵ | ۰/۴۱ |

همان‌طور که در جدول (۵) آمده است مقدار شاخص پایداری زیست‌محیطی حوزه‌های آبریز زرینه‌رود و سیمینه‌رود در جهت تأمین نیاز زیست‌محیطی دریاچه ارومیه به‌ترتیب برابر ۰/۳۹ و ۰/۴۱ می‌باشد که کمتر از ۱ بوده و نشان از ناپایداری هر دو حوضه برای تأمین نیاز زیست‌محیطی دریاچه می‌باشد. حجم دریاچه ارومیه در سال شروع مطالعه (سال آبی ۷۴-۷۳) حدود ۳۶ میلیارد مترمکعب بوده که در پایان دوره مطالعه (سال آبی ۹۳-۹۲) به حدود ۱/۶۷ میلیارد مترمکعب رسیده است. با توجه به اینکه حوزه‌های آبریز زرینه‌رود و سیمینه‌رود حدود ۵۲ درصد نیاز زیست‌محیطی دریاچه ارومیه را تأمین می‌نمایند. این مسئله بیانگر ناپایداری زیست‌محیطی این حوضه‌ها در جهت تأمین نیاز زیست‌محیطی دریاچه می‌باشد.

### ۳-۲- شاخص پایداری کشاورزی

با استفاده از روابط (۱) تا (۳) معیارهای عملکرد و بر اساس رابطه (۵) شاخص پایداری کشاورزی برای مناطق آبیاری و حوزه‌های آبریز محاسبه‌شده و مقادیر آن برای دوره موردمطالعه (۱۳۷۴-۱۳۹۳) در جدول (۶) نشان داده‌شده است.

جدول ۶- معیارهای عملکرد و شاخص پایداری کشاورزی برای مناطق آبیاری و کل حوضه‌ها

| منطقه آبیاری/معیار | اطمینان‌پذیری | برگشت‌پذیری | آسیب‌پذیری | شاخص پایداری کشاورزی |
|---|---|---|---|---|
| تکاب | ۰/۴۰ | ۰/۳۲ | ۰/۳۷ | ۰/۴۳ |
| سقز | ۰/۵۹ | ۰/۵۳ | ۰/۱۹ | ۰/۶۳ |
| شاهین‌دژ | ۰/۵۳ | ۰/۴۶ | ۰/۲۳ | ۰/۵۷ |
| ساحل راست شبکه آبیاری زرینه‌رود | ۰/۷ | ۰/۶۶ | ۰/۰۵ | ۰/۷۶ |
| ساحل چپ شبکه آبیاری زرینه‌رود | ۰/۶۹ | ۰/۶۵ | ۰/۰۶ | ۰/۷۵ |
| بوکان ۱ | ۰/۶۹ | ۰/۶۴ | ۰/۰۷ | ۰/۷۴ |
| بوکان ۲ | ۰/۷ | ۰/۶۴ | ۰/۰۶ | ۰/۷۵ |
| حوضه زرینه‌رود | - | - | - | ۰/۶۴ |
| حوضه سیمینه‌رود | - | - | - | ۰/۷۴ |

با توجه به نتایج جدول (۶) ملاحظه می‌شود که معیارهای اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری از مقادیر نسبتاً خوبی برای شبکه آبیاری میاندوآب و منطقه بوکان برخوردارند. حال‌آنکه مناطق آبیاری دیگر وضعیت خوبی ندارند. شبکه آبیاری زرینه‌رود با مقدار برابر ۰/۷۵ دارای بیشترین پایداری کشاورزی و منطقه تکاب با مقدار برابر ۰/۴۳ دارای کمترین پایداری کشاورزی می‌باشد. هم‌چنین مقدار شاخص پایداری کشاورزی بر اساس میانگین وزنی

تقاضای آب (Sandoval-Solis et al. 2011)، برای کل حوضه زرینه‌رود برابر ۰/۶۴ و برای کل حوضه سیمینه‌رود برابر ۰/۷۴ می‌باشد. بررسی مقادیر شاخص پایداری کشاورزی برای اغلب مناطق کشاورزی نشان از شرایط نسبتاً ناپایدار برای این مناطق می‌باشد. هم‌چنانکه در شکل (۳) مشاهده می‌شود روند تغییرات سطح زیر کشت از شروع دوره مطالعه (سال آبی ۷۴-۷۳) تا انتهای دوره (سال آبی ۹۳-۹۲) برای بیشتر مناطق کشاورزی افزایشی می‌باشد. این مسئله باعث افزایش برداشت از منابع آب سطحی و زیرزمینی برای مصارف کشاورزی و در نتیجه کاهش تخصیص آب برای تأمین نیاز زیست‌محیطی دریاچه ارومیه می‌باشد. نتایج این تحقیق با نتایج AghaKouchak et al. (2015) و Khatami (2013) مطابقت دارد. محققین فوق نتیجه گرفتند که عامل انسانی و توسعه کشاورزی علت اصلی کاهش تراز سطح آب دریاچه ارومیه می‌باشد.

### ۳-۳- شاخص کمبود آب آبیاری

مقادیر متوسط سالیانه شاخص کمبود آب آبیاری برای مناطق آبیاری و کل حوضه‌ها در طی دوره ۲۰ ساله موردمطالعه در جدول (۷) نشان داده‌شده است. برای مقادیر تقاضای آبیاری و شاخص کمبود آب آبیاری (تقاضای برآورد نشده) از مقادیر مدل توسعه داده‌شده و کالیبره شده در نرم‌افزار WEAP21 استفاده گردید.

جدول ۷- مقادیر متوسط سالیانه شاخص کمبود آب آبیاری برای مناطق آبیاری و کل حوضه‌ها (میلیون مترمکعب)

| منطقه آبیاری | تکاب | سقز | شاهین‌دژ | ساحل راست شبکه آبیاری زرینه‌رود | ساحل چپ شبکه آبیاری زرینه‌رود | حوضه زرینه‌رود | بوکان ۱ | بوکان ۲ | حوضه سیمینه‌رود |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| شاخص کمبود آب آبیاری | ۵۸/۷ | ۳۸/۶ | ۸۸/۳ | ۳۱/۵ | ۳۳/۹ | ۲۵۱ | ۲۸/۴ | ۱۳/۸ | ۴۲/۲ |

با توجه به جدول (۷) مقادیر این شاخص نشان می‌دهد که تقاضای آبیاری برای کلیه مناطق کشاورزی به‌طور کامل تأمین نشده است. این مسئله بیانگر این است که در دوره موردمطالعه همه مناطق آبیاری با کمبود آب مواجه بوده و تحت تنش آبی بوده‌اند. البته برای شبکه آبیاری زرینه‌رود بیشتر کمبود آب در انتهای شبکه وجود داشته و در ابتدای شبکه کمبود آب وجود نداشته یا خیلی کم بوده است. با اتخاذ تدابیری ازجمله افزایش راندمان آبیاری و مدیریت تقاضا می‌توان مقدار این شاخص را کاهش داده و پایداری کشاورزی و زیست‌محیطی را افزایش داد.

## ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق ابتدا به عوامل مؤثر در خشک شدن دریاچه ارومیه پرداخته‌شده و سپس شاخص‌های پایداری زیست‌محیطی و پایداری کشاورزی حوزه‌های آبریز زرینه‌رود و سیمینه‌رود به‌وسیله معیارهای اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری محاسبه شد. هم‌چنین شاخص کمبود آب آبیاری نیز برای مناطق کشاورزی مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج اصلی به‌دست‌آمده از این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

۱- مقدار شاخص پایداری زیست‌محیطی به‌ترتیب برابر ۰/۳۹ و ۰/۴۱ برای حوزه‌های آبریز زرینه‌رود و سیمینه‌رود در جهت تأمین نیاز زیست‌محیطی دریاچه ارومیه نشان‌دهنده ناپایداری هر دو حوضه برای تأمین نیاز زیست‌محیطی دریاچه می‌باشد.

۲- مقدار شاخص پایداری کشاورزی به‌ترتیب برابر ۰/۶۴ و ۰/۷۴ برای حوزه‌های آبریز زرینه‌رود و سیمینه‌رود نشان از شرایط نسبتاً ناپایدار برای مناطق کشاورزی می‌باشد.

۳- مقادیر شاخص کمبود آب آبیاری برای حوضه‌های آبریز زرینه‌رود و سیمینه‌رود نشان می‌دهد که مناطق آبیاری در دوره موردمطالعه تحت تنش آبی بوده‌اند.

۴- با توجه به اینکه در طی دوره موردمطالعه تغییرات سطح زیرکشت در اکثر مناطق کشاورزی روند افزایشی داشته است، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که توسعه کشاورزی و اضافه شدن برداشت‌های آب برای مصارف کشاورزی عامل اصلی ناپایداری زیست‌محیطی و کشاورزی است.

با توجه به نتایج این تحقیق پیشنهاد می‌گردد که در راستای پایداری بیشتر زیست‌محیطی و کشاورزی حوزه‌های آبریز زرینه‌رود و سیمینه‌رود، سیاست مدیریت توأمان تأمین و تقاضا اعمال و از آب صرفه‌جویی شده در بخش کشاورزی جهت تأمین بیشتر نیاز زیست‌محیطی دریاچه ارومیه و احیای آن استفاده شود.

## ۵- سپاسگزاری

از محققین موسسه محیط‌زیست استکهلم (SEI) به‌خصوص از Jack Sieber، Stephanie Galaitsi، Brian Joyce و (Devaraj de Condappa) به خاطر راهنمایی‌های ارزنده‌شان در خصوص مدل WEAP21 تشکر و قدردانی می‌گردد.

## References

AghaKouchak A., Norouzi H., Madani K., Mirchi A., Azarderakhsh M., Nazemi A., Nasrollahi N., Farahmand A., Mehran A. and Hasanzadeh E. (2015). Aral Sea syndrome desiccates Lake Urmia: call for action. J. Great Lakes Res., 41(1), 307-311.

Agriculture Jihad Organization of Kurdistan. (2016). Agricultural statistics and the information center, Sanandaj, Iran [In Persian].

Agriculture Jihad Organization of West Azarbaijan. (2016). Agricultural statistics and the information center, Urmia, Iran [In Persian].

Ahmadaali J., Barani G. A., Qaderi K. and Hessari B. (2017). Calibration and validation of model WEAP21 for Zarrinehrud and Siminehrud basins. Iranian J. Soil Water Res., (In Press) [In Persian].

Anonymous. (2013). The Urmia Lake basin's drought risk management program. Report of agriculture and allocation of water during droughts. Working group on sustainable water management and agriculture. Regional Council of Urmia Lake Basin, volume 8 [In Persian].

Anonymous. (2015). Necessity of Lake Urmia resuscitation, causes of drought and threats. Urmia Lake Restoration Program [In Persian].

Anonymous. (2016 a). Water consumption reduction of agricultural sector in Simineh Roud and Zarrineh Roud watershed basin. Yekom Consulting Engineers. Urmia Lake Restoration National Committee, Ministry of Energy [In Persian].

Anonymous, (2016 b). Water evaluation and planning system, WEAP. Stockholm Environment Institute (SEI), Boston, USA. Available on: http://www.weap21.org.

Asefa T., Clayton J., Adams A. and Anderson D. (2014). Performance evaluation of a water resources system under varying climatic conditions: reliability, resilience, vulnerability and beyond. J. Hydrol., 508, 53-65.

Esteve P., Varela-Ortega C., Blanco-Gutiérrez I. and Downing T. E. (2015). A hydro-economic model for the assessment of climate change impacts and adaptation in irrigated agriculture. Ecol. Econ., 120, 49-58.

Haghighi A. T. and Kløve B. (2017). Design of environmental flow regimes to maintain lakes and wetlands in regions with high seasonal irrigation demand. Ecol. Eng., 100, 120-129.

Hashemi M. (2012). A socio-technical assessment framework for integrated water resources management (IWRM) in Lake Urmia Basin, Iran. PhD Thesis, University of Newcastle, Newcastle, England. 369 pp.

Khatami S. (2013). Nonlinear chaotic and trend analyses of water level at Urmia Lake, Iran. Master's Thesis, Lund University, Lund, Sweden. 126 pp.

Loucks D. P., Van Beek E., Stedinger J. R., Dijkman J. P. and Villars M. T. (2005). Water resources systems planning and management: an introduction to methods, models and applications. Paris, Unesco, 690 pp.

McCartney M., Alemayehu T., Shiferaw A. and Awulachew S. (2010). Evaluation of current and future water resources development in the Lake Tana Basin, Ethiopia. IWMI Research Report 134, 44 pp.

Mohamadpoor M., Zeinalzade K., Rezaverdineghad V. and Hessari B. (2016). WEAP model calibration and validation in simulating the impact of irrigation systems change on the Ahar-Chai basin hydrological response. Iranian J. Ecohydrol., 3(3), 477-490 [In Persian].

Safavi H. R., Golmohammadi M. H. and Sandoval-Solis S. (2016). Scenario analysis for integrated water resources planning and management under uncertainty in the Zayandehrud river basin. J. Hydrol., 539, 625-639.

Safavi H. R. and Golmohammadi, M. H. (2016). Evaluating the water resource systems performance using fuzzy reliability, resilience and vulnerability. Iran-Water Resour. Res., 12(1), 68-83 [In Persian].

Sandoval-Solis S., McKinney D. C. and Loucks, D. P. (2011). Sustainability index for water resources planning and management. J. Water Resour. Plann. Manag., 137, 381-390.

Srdjevic Z. and Srdjevic B. (2017) An extension of the sustainability index definition in water resources planning and management. Water Resour. Manag., 31(5), 1695-1712.

West Azarbaijan Regional Water Authority. (2017). Available on: http://www.agrw.ir [In Persian].

Yates D., Purkey D., Sieber J., Huber-Lee A. and Galbraith H. (2005a). WEAP21—A demand-, priority-, and preference-driven water planning model: part 2: aiding freshwater ecosystem service evaluation. Water Int., 30(4), 501-512.

Yates D, Sieber J., Purkey D. and Huber-Lee A. (2005b). WEAP21—A demand-, priority-, and preference-driven water planning model: part 1: model characteristics. Water Int., 30(4), 487-500.

Yilmaz B. and Harmancioglu N. B. (2010). An indicator based assessment for water resources management in Gediz river basin, Turkey. Water Resour. Manag., 24(15), 4359-4379.

# Evaluation of Environmental and Agricultural Sustainability Indices of Zarrinehrud and Siminehrud River Basins

**Jamal Ahmadaali[1*], GholamAbbas Barani[2], Kourosh Qaderi[3] and Behzad Hessari[4]**

[1]Ph.D. Scholar, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

[2]Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

[3]Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

[4]Assist. Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

***Corresponding author:** f.abbasi@stu.sku.ac.ir

**Orginal Paper**

**Received:** June 13, 2017 **Accepted:** November 15, 2017

## Abstract

In the arid and semi-arid regions, agriculture has led to decline in water levels in major lakes such as the Aral Sea, Urmia, Hamoun and Bakhtegan lakes. The major objective of the present study was to evaluate the environmental and agricultural sustainability of Zarrinehrud and Siminehrud river basins as the largest sub-basin of Urmia Lake basin. The sustainability index was calculated using reliability, resilience, and vulnerability performance criteria. In this study, the irrigation water deficit (IWD) index was calculated for the irrigation districts. Irrigation demand and irrigation water deficit indices were calculated using WEAP21 model. Results showed that the environmental sustainability of Zarrinehrud and Siminehrud river basins to supply the environmental flow requirements of the Urmia Lake during the studied period was 0.39 and 0.41 respectively. Nevertheless, the agricultural sustainability index of Zarrinehrud and Siminehrud river basins was 0.64 and 0.74 respectively. Moreover, the amount of IWD index showed that water demand for all irrigation districts has not been fully met. The above results indicated that the Zarrinehrud and Siminehrud river basins were unstable both in terms of the environment and agriculture. Whereas during the study, the changes in land under cultivation in most irrigation districts had an increasing trend, ttherefore, it can be concluded that agricultural development and the addition of water harvests for agricultural use have been the main cause of environmental and agricultural instability.

**Keywords**: Vulnerability; Reliability; Resilience; Urmia Lake; WEAP21 Model