جغرافیا و پایداری محیط، شمارهٔ ۱۸، بهار ۱۳۹۵
صص. ۳۳-۲۱

محاسبهٔ شاخص‌های پایداری آب و پایداری حوضهٔ آبریز در راستای حفظ توسعهٔ پایدار (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ آبریز گاماسیاب)

مریم حافظ‌پرست* - استادیار مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
سید احسان فاطمی - استادیار مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

وصول: ۱۳۹۴/۹/۲۸ **پذیرش:** ۱۳۹۵/۲/۱۵

چکیده

به منظور حفظ و بقای حوضه‌های آبریز، ارزیابی پایداری آنها بر اساس شاخص‌های پایداری منابع آب و شاخص‌های توسعهٔ پایدار حوضهٔ آبریز در برابر وقایع و رخدادهای آینده ضروری است. در این پژوهش، شاخص‌های پایداری منابع آب و حوضهٔ آبریز به صورت ترکیبی با استفاده از خروجی مدل شبیه‌سازی WEAP در محیط اکسل محاسبه شده است. شاخص‌های پایداری منابع آب، مقادیر و میزان دسترسی منابع آب سطحی و زیرزمینی را بررسی می‌کند در حالی که شاخص‌های پایداری حوضهٔ آبریز، از ترکیب شاخص‌های اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری به دست می‌آید. در همین راستا، حوضهٔ آبریز گاماسیاب، توسّط دو سناریو یکی شامل تنها سدّ جامیشان و دیگری شامل سدهای جامیشان، قشلاق و آناهیتا، راهکارهای مدیریتی برای حفظ و پایداری در آن شبیه‌سازی شد و شاخص‌های پایداری آن محاسبه گردید. در نهایت، بهترین راهکار اجرایی در این حوضه با تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) و روش برنامه‌ریزی سازشی در هر سناریو محاسبه شد. در سناریو، تنها سدّ جامیشان بهترین راهکار سازه‌ای برای بهترشدن وضعیّت پایداری حوضه، تلفیق کاهش تلفات و افزایش راندمان و در سناریو هر سه سد، بهترین راهکار کاهش تلفات است.

واژگان کلیدی: پایداری حوضهٔ آبریز، شاخص، WEAP، تصمیم‌گیری چندمعیاره، برنامه‌ریزی سازشی.

*. نویسندهٔ مسئول: ۰۸۳۳۸۳۲۳۷۲۷
E-mail: m.hafezparast@razi.ac.ir

مقدّمه

برای اندازه‌گیری میزان دوری و یا نزدیکی به معیارهای پایداری، از شاخص‌های پایداری استفاده می‌شود. پارامترها و شاخص‌های پایداری در صورتی که به خوبی انتخاب شوند برخی از اهداف اوّلیّهٔ حوضهٔ آبریز را پوشش می‌دهند. شاخص‌های حوضهٔ آبریز باید از ویژگی‌های زیر برخوردار باشند (ییلماز و هارمانسیگلو،۲۰۱۰):

۱- قابل دسترس[1] باشند: داده‌های مورد نیاز برای برآورد شاخص بایستی قابل دسترس باشند به این صورت که پس از جمع‌آوری داده‌ها از حوضه، منابع آن برای عموم قابل استفاده باشد.

۲- قابل درک[2] باشند: شاخص‌ها بایستی توسّط محدوده متفاوتی از شنوندگان غیر تکنیکی به راحتی قابل درک باشند.

۳- بایستی معتبر[3] باشند: شاخص‌ها بایستی با اطّلاعات صحیح و قابل اعتماد پشتیبانی شود و به صورت علمی تفسیر شود و قابل دفاع باشد.

۴- متناسب و مربوط[4] باشند: شاخص‌ها بایستی بازتاب تغییرات در مدیریت و فعّالیّت‌های حوضهٔ آبریز باشد و بتواند تغییرات ایجادشده در زمان را اندازه‌گیری کند.

۵- یکپارچه[5] باشد: شاخص‌ها بایستی ارتباطات جنبه‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی پایداری را نشان دهند.

سولیوان[6] (۲۰۰۲) و چاوز و آلیپاز[7] (۲۰۰۷) در مؤسّسهٔ تحقیقاتی سیاست‌گذاری[8] برای رسیدن به پایداری، تشخیص تمام فاکتورهای شرکت‌کننده در پایداری منابع آب سطحی و زیرزمینی را امری بسیار ضروری می‌دانند. شاخص پایداری آب به عنوان ابزاری برای تعیین تمام فاکتورهای دخیل در بهبود منابع آب، مورد استفاده قرار می‌گیرد. شاخص، همچنین می‌تواند برای حمایت از تصمیم‌گیرندگان، اولویّت‌بندی موضوعات و برنامه‌های مربوط به بهبود منابع آب مورد استفاده قرار گیرد. در مجموع این فاکتورها برای ارتباط شرایط موجود منابع آب برای جوامع بزرگتر مفید است. مک لارن و سیمونوویچ[9] (۱۹۹۹) معتقدند شاخص‌ها با مدیریت متغیّرها برای پایش و اندازه‌گیری وضعیّت پایداری، مفید هستند. مشکل اصلی این است که چگونه شاخص‌های پایداری حقیقی را اندازه‌گیری نمایند. به عبارت دیگر، شاخص‌ها به تنهایی مفید نیستند بلکه آنها با نشان دادن تغییرات وضعیّت محیط، مورد توجّه قرار می‌گیرند.

لاکس[10] (۲۰۰۰) و مارگروم[11] (۱۹۹۹)، مفهوم پارادایم پایداری را برای طرح‌های چندمنظوره لزوم به دست آوردن رضایت ذی‌نفعان در فرایند تصمیم‌گیری بیان کردند. در این راستا، چاوز و آلیپاز (۲۰۰۷)، پایداری منابع آب را وابسته به شرایط سیاستی، حیات، زیست‌محیطی و هیدرولوژیکی می‌دانند، امّا تلاش‌های اندکی برای یکپارچه‌کردن آنها به صورت یکسان انجام داده‌اند. سولیوان و می[12] (۲۰۰۵)، اظهار داشتند میل شدیدی برای

1- Available
2- Understandable
3- Credible
4- Relevant
5- Integrative
6- Sullivan
7- Chaves & Alipaz
8- Policy Research Initiative
9- McLaren & Simonovic
10- Loucks
11- Margerum
12- Sullivan & Meigh

اندازه‌گیری و توصیف جنبه‌های مختلف شاخص‌های توسعهٔ پایدار برای منابع آب به وجود آمده است و کوندراتیو[1] و همکاران (۲۰۰۲) و یوریس[2] و همکاران (۲۰۰۸) معتقدند محدودیت‌های رایج در بیشتر روش‌ها در جنبه‌های بیوفیزیکی پایداری است، اغلب استخراج فاکتورهای اقتصادی – اجتماعی از نیروهای محرّکهٔ تغییرات زیست‌محیطی ناشی می‌شود. وانگ و اینس[3] (۲۰۰۵) از رویکرد سیستم‌های حسابرسی تأییدشدهٔ مدیریت پایدار جنگل[4] همراه با به هم پیوستن ارزیابی توسعهٔ پایدار ناحیه‌ای برای آزمایش پایداری اراضی و استفاده از منابع آب در حوضهٔ رودخانهٔ مین، فوجین، چین استفاده کردند. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که حوضهٔ آبریز توان کمی برای توسعهٔ پایدار دارد. جوانا[5] و همکاران (۲۰۰۹)، چارچوب مفهومی برای توسعهٔ شاخص پایداری آب در غرب جاوا ارائه کردند. مبانی اصلی این پژوهش، مربوط به پایداری منابع آب در غرب جاوا را نشان می‌دهد که جنبه‌های اقتصادی - اجتماعی و منابع طبیعی برای استفاده در مدیریت منابع آب یکپارچه در اندونزی را به یکدیگر مرتبط می‌کند.

دو معیار اصلی برای انتخاب اجزا و شاخص پایداری شامل اوّلاً: تناسب شاخص‌ها و اجزای زیست‌محیطی و زمینه‌های اقتصادی - اجتماعی و دوّماً: دسترسی محتمل به داده‌های موجود برای مطالعات مدّنظر انتخاب شده است. عطاری و مجاهدی (۲۰۰۹)، شاخص پایداری آب کانادایی[6] را برای شهر اهواز استفاده کردند. داده‌های مورد نیاز برای رتبهٔ این شاخص که میانگین پنج مورد صالی منابع، سلامتی اکوسیستم، سازمان‌ها، سلامتی انسان‌ها است، توسّط روش ارزیابی PRI جمع‌آوری شده است. در مجموع، به منظور استانداردسازی، شاخص نهایی بر اساس تخمین وزنی و روش مقایسهٔ دو دویی تحلیل سلسله‌مراتبی محاسبه شد. در نهایت، نتایج نشان داد، استفاده از این شاخص، به عنوان ابزار سیاست‌گذاری با تصحیح در وزن‌ها برای مطالعهٔ موردی دانشگاهی رضایت‌بخش است. شیه و وانگ[7] (۲۰۰۸) مطالعه‌ای بر شاخص‌های توسعهٔ پایدار منابع آب در تایوان انجام دادند. این مطالعه، بر اساس شاخص‌های توسعهٔ پایدار سیستم منابع آب در تایوان پایه‌گذاری شده است و بر اساس چارچوب نیروهای محرّکه – حالت - پاسخ[8] است که توسّط کمیتهٔ اتّحادیهٔ ملّی توسعهٔ پایدار گسترش یافته است. این الگو به چهار بعد زیست‌محیطی، اقتصادی، اجتماعی و سازمانی طبقه‌بندی شده است. تمامی شاخص توسعهٔ پایدار منابع آب ۲۲ گانه در تایوان از ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۴ محاسبه و ارزیابی شده است. نتایج این مجموعه مطالعات، رتبه‌های شاخص‌ها را برای شدّت مصرف آب زیرزمینی، مصرف آب کشاورزی، سرعت نشت لوله‌های تأمین آب در مقابل پایداری را مشخّص می‌کند. برای کاهش مصرف آب زیرزمینی، کشاورزی و نرخ نشت لوله‌های تأمین آب، بایستی برای بهبود پایداری منابع آب در تایوان تلاش بیشتری صورت گیرد. می‌می و ساوالهی[9] (۲۰۰۳) اظهار داشتند نقطهٔ شروع بیشتر مباحثات مربوط به منابع آب، برنامهٔ تخصیص آب بین بخش‌های مربوطه است و هدف اصلی، اجرای تخصیص عادلانهٔ منابع آب است. دینار[10] و همکاران (۲۰۰۷) مکانیسم تخصیص آب را در چهار مرحله بررسی کردند. مرحلهٔ اوّل، قیمت‌گذاری بر مبنای هزینهٔ نهایی، بر

1- Kondratyev
2- Ioris
3- Wang & Innes
4- SFMCAS
5- Juwana
6- Canadian Water Sustainable Index
7- Shieh & Wang
8- Driving Force-State-Response
9- Mimi & Sawalhi
10- Dinar

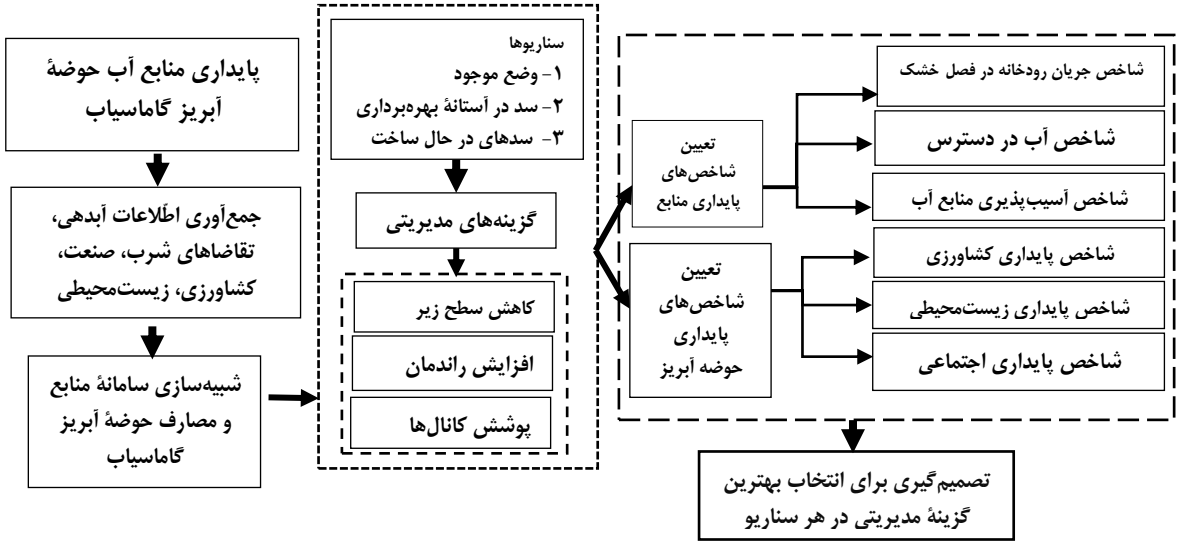
اساس قیمت آب، برابر با هزینهٔ حاشیه‌ای تأمین؛ مرحلهٔ دوّم، تخصیص عادلانهٔ آب شرب که اثرات اجتماعی آب را پشتیبانی کند. مرحلهٔ سوّم، بازار آب مربوط به تغییرات حقابه‌های مصرف آب و مرحلهٔ چهارم، تخصیص بر اساس مصرف بر مبنای پتانسیل سازمانی منطقه. حافظ‌پرست و همکاران (۱۳۹۴)، معیارهای پایداری در ارزیابی مدیریت یکپارچهٔ منابع آب حوضهٔ آبریز ارس را بر اساس چارچوب DPSIR بررسی کردند و در این راستا، زیرحوضه‌های حوضهٔ آبریز ارس را نسبت به شاخص‌های پایداری محاسبه‌شدهٔ آن اولویّت‌بندی کردند. آنچه از مطالعات انجام‌شده در زمینهٔ شاخص‌های پایدار و توسعهٔ پایدار حوضهٔ آبریز مشهود است ذکر این نکته است که در شاخص‌های توسعهٔ پایدار حوضهٔ آبریز بایستی علاوه بر بررسی اثرات تخصیص آب بر جنبه‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی، شاخص‌هایی محاسبه شوند که به طور مستقیم از مسئلهٔ تخصیص آب تأثیر می‌پذیرند. از این رو، هدف از این پژوهش، محاسبهٔ شاخص‌های پایداری آب و حوضهٔ آبریز است که در فرایندهای برنامه‌ریزی سامانه‌های منابع آب برای مدیریت یکپارچهٔ حوضه‌های آبریز ضروری است.

مواد و روش‌ها

مراحل انجام این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است که شامل مراحل جمع‌آوری اطّلاعات آبدهی، تقاضاهای شرب، صنعت، کشاورزی و زیست‌محیطی و مشخّصات سدهای منطقه شروع شده و سپس سامانهٔ منابع و مصارف حوضهٔ گاماسیاب در مدل WEAP شبیه‌سازی شد. این شبیه‌سازی، در سه سناریو شامل وضع موجود، سدّ جامیشان به تنهایی و هر سه سد قشلاق، آناهیتا و جامیشان انجام شده و برای هر سناریو چهار گزینهٔ مدیریتی کاهش سطح زیر کشت، افزایش راندمان و پوشش کانال‌ها، پوشش کانال‌ها و افزایش راندمان در مدل اجرا شده است و خروجی‌ها به اکسل منتقل شده است. در ادامه، شاخص‌های پایداری آب و حوضهٔ آبریز محاسبه‌شده و تصمیم‌گیری چندمعیاره به روش برنامه‌ریزی سازشی انجام شد که به این ترتیب، در هر سناریو بهترین گزینهٔ مدیریتی مشخّص شد.

معرّفی منطقهٔ مورد بررسی

حوضهٔ رودخانهٔ گاماسیاب در استان کرمانشاه واقع شده است که طول جغرافیایی '۰۴ °۴۷ تا '۰۳ °۴۸ و عرض جغرافیای '۱۳ °۳۴ تا '۵۳ °۳۴ دارد. بیشترین و متوسّط ارتفاع حوضه به ترتیب ۳۶۴۵ و ۱۸۸۹ متر از سطح



شکل ۱. مراحل انجام پژوهش حاضر

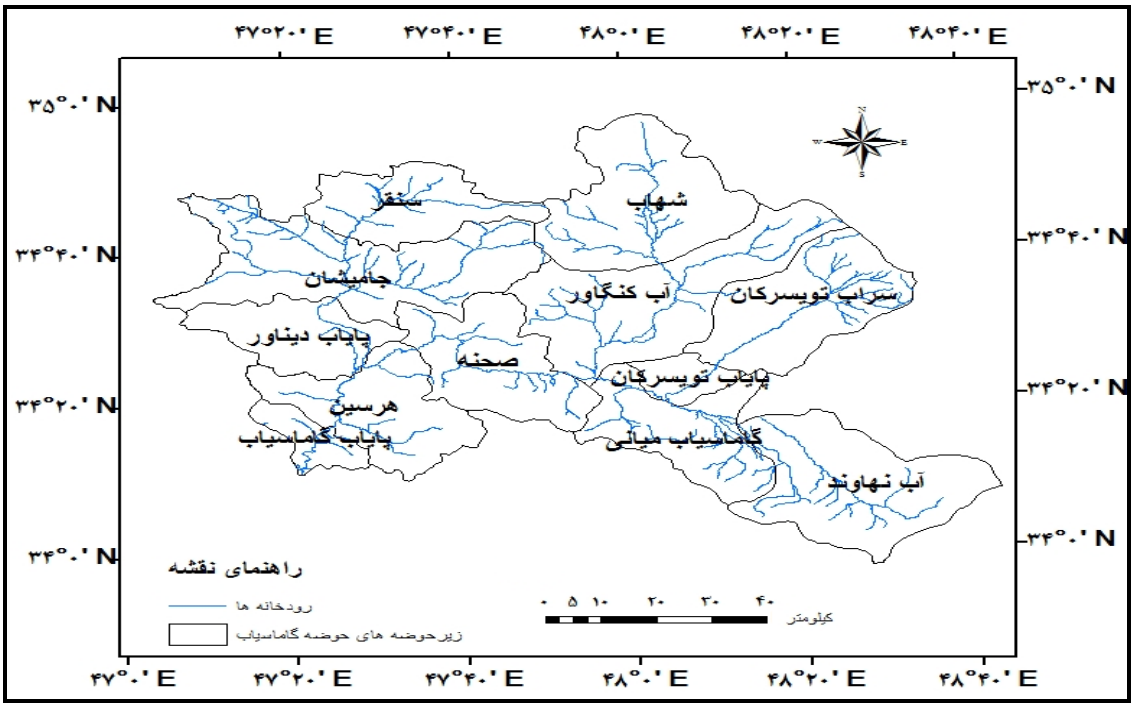
دریا است. مقدار ریزش نزولات جوّی در حوضهٔ آبریز مورد مطالعه به طور متوسّط ۳۰۰ تا ۴۵۰ میلی‌متر در سال است. همچنین تغییرات درجهٔ حرارت این حوضهٔ آبریز (در طول سال) از ۵/۲۹- تا ۴۷ درجهٔ سانتی‌گراد و معدّل روزانهٔ آن، ۱۴/۲ درجهٔ سیلسیوس در محلّ ایستگاه پل‌چهر ثبت شده است. لازم به ذکر است سرچشمهٔ حوضهٔ آبریز مذکور در استان همدان قرار دارد که بخش‌های اصلی آن در مرز کرمانشاه شامل دشت‌های هرسین، بیستون، دینور - میان‌راهان، سنقر، صحنه و کنگاور است (مطالعات مرحلهٔ اوّل سد جامیشان، ۱۳۸۳). جدول ۱، مشخّصات فیزیوگرافی دشت‌های مطالعاتی رودخانهٔ گاماسیاب را نشان می‌دهد و شکل ۲، زیرحوضه‌های حوضهٔ آبریز گاماسیاب را نشان می‌دهد.

شاخص‌های پایداری

این شاخص‌ها به دو شاخهٔ شاخص‌های پایداری آب و شاخص‌های پایداری حوضهٔ آبریز تقسیم می‌شوند. در این پژوهش، تعدادی از آنها که به طور مستقیم از تغییرات سامانهٔ منابع و مصارف تأثیر می‌پذیرند برای حوضهٔ آبریز گاماسیاب محاسبه شده است.

جدول ۱. مشخّصات فیزیوگرافی دشت‌های مطالعاتی رودخانهٔ گاماسیاب

نام زیرحوضه	مساحت (کیلومترمربع)			محیط (کیلومتر)	ارتفاع (متر از سطح دریا)			شیب متوسّط
	کوه	دشت	کل		حداقل	حداکثر	میانگین	
هرسین بیستون	۴۳۲	۲۵۲/۳	۶۸۴/۲	۱۴۰/۹	۱۲۶۲	۳۳۳۲	۱۶۰۶	۱۸/۷
دینور	۴۰۵/۸	۷۵/۵	۴۸۱/۷	۱۰۹/۸	۱۲۷۴	۳۱۳۸	۱۹۰۰	۳۴
میان‌راهان	۹۶۹/۱	۲۰۱	۱۱۷۰/۱	۲۳۲/۴	۱۳۲۸	۳۳۰۴	۱۸۶۸	۲۵/۴
سنقر	۳۲۷/۳	۲۱۲/۷	۵۴۰	۱۲۴/۹	۱۵۳۱	۳۱۴۹	۱۸۶۹/۷	۱۵/۲
صحنه	۵۵۳/۹	۱۴۸/۶	۷۰۲/۵	۱۳۱/۹	۱۲۷۹	۳۱۷۶	۱۶۹۳/۷	۲۲/۷
کنگاور	۶۷۱/۴	۴۱۱/۶	۱۰۸۳	۱۸۵/۷	۱۳۹۹	۳۴۲۹	۱۷۴۹	۱۵/۵



شکل ۲. زیرحوضه‌های حوضهٔ آبریز گاماسیاب

شاخص‌های پایداری منابع آب

این شاخص‌ها مربوط به کلّ منابع آب سطحی و زیرزمینی حوضه‌ها و قابلیّت دسترسی آن برای هر حوضه است.

شاخص جریان رودخانه در فصل خشک[1]

این شاخص، توسّط سازمان منابع جهانی[2] (۲۰۰۰) به عنوان بخشی از تحلیل آزمایش توصیف شرایط آب در حوضهٔ رودخانه توسعه داده شده است. این شاخص، تغییرات زمانی دسترسی به آب را به طور مثال برای فصول خشک و بارانی محاسبه می‌کند. حوضه‌ها با فصل خشک آنهایی هستند که کمتر از ۲٪ رواناب سطحی در چهار ماه از خشک‌ترین ماه‌های سال (جمع کمترین رواناب در طول چهار ماه متوالی) را دارا باشند. این شاخص، از تقسیم حجم رواناب در فصل خشک به جمعیّت به دست می‌آید.

شاخص آب در دسترس (WAI[3])

می[4] و همکاران (۱۹۹۹) تغییرات زمانی آب در دسترس را محاسبه کردند. این شاخص، شامل منابع آب سطحی و زیرزمینی و تفاوت آنها از نظرگاه مقادیر تقاضای همهٔ بخش‌های شهری، صنعتی و کشاورزی است. شاخص در محدوده ۱- تا ۱ معنی‌دار است (رابطهٔ ۱). زمانی که مقدار شاخص برابر صفر باشد یعنی عرضه و تقاضا برابرند. دسترسی به آب سطحی از ۹۰٪ رواناب حاصل می‌شود.

$$WAI = \frac{(R + G - D)}{R + G + D}$$ رابطهٔ ۱

در رابطهٔ ۱، R = رواناب سطحی؛ G = منابع آب زیرزمینی؛ D = جمع تقاضاهای همهٔ بخش‌ها است.

شاخص آسیب‌پذیری منابع آب[5]

گلیک[6] (۱۹۹۰)، این شاخص را برای حوضه‌های آبریز ایالات متّحده به عنوان بخشی از ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر منابع و سیستم‌های آب توسعه داد. این شاخص، آسیب‌پذیری سیستم‌های منابع آب را بر اساس پنج معیار و آستانهٔ مربوط به هرکدام که به طور خلاصه در زیر توضیح داده شده‌اند توصیف می‌کند. برای هر ناحیه تعدادی از مقاطع آسیب‌پذیر ارائه می‌شود. این رویکرد، بر بخش‌هایی از حوضهٔ آبریز که در خطر هستند تأکید می‌کند. تغییرات جریان: این شاخص با تقسیم رواناب مازاد در ۵٪ از دوره، نسبت به رواناب مازاد در ۹۵٪ از دوره حاصل می‌شود. مقدار کم این نسبت، نشان‌دهندهٔ تغییرات کم رواناب و به همین دلیل دارای ریسک کمی از لحاظ سیلاب و خشکسالی است. مقدار بیشتر از ۳، نشان‌دهندهٔ آسیب‌پذیری حوضه نسبت به سیل و خشکسالی است.

شاخص‌های پایداری حوضهٔ آبریز

ارزیابی همبستگی زمانی سری زمانی شاخص‌های پایداری حوضهٔ آبریز در سامانه‌های آبی با شبیه‌سازی سامانه و بررسی عرضه و تقاضا و تعیین مقادیر تخصیص و کمبود و اندازه‌گیری عملکرد اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری امکان‌پذیر است (سازمان مهندسی ارتش آمریکا، ۱۹۹۸).

1- Dry Season Flow by River Basin
2- World Resources Institute
3- Water Availability Index
4- Meigh
5- Vulnerability of Water Systems
6- Gleick

شاخص پایداری کشاورزی

این فرایند، برای هر شاخص C که سری زمانی آن با C_t نشان داده می‌شود و t نشان‌دهندهٔ طول دورهٔ شبیه‌سازی است، قابل محاسبه می‌باشد. برای محاسبهٔ این شاخص‌ها، بایستی حدّ بالا و پایین محدودهٔ مورد قبول تعریف شود. این حدود بر اساس قضاوت تصمیم‌گیرندگان تعیین می‌شود. اطمینان‌پذیری (RE) احتمال اینکه مقدار C_t در محدودهٔ قابل قبول قرار گیرد به صورت رابطهٔ ۲ محاسبه می‌شود.

$$RE(C) = \frac{\text{تعداد مقادیر رضایت بخش هر شاخص } (Ct)}{\text{کل دوره شبیه سازی}}$$ رابطهٔ ۲

برگشت‌پذیری (RS) شاخصی است که سرعت بازگشت از شرایط نارضایت‌بخش را نشان می‌دهد. به عبارت بهتر، احتمال اینکه مقدار رضایت‌بخش C_{t+1} پس از مقدار شکست C_t ظاهر شود در رابطهٔ ۳ آمده است.

$$RS(C) = \frac{\text{تعداد مقادیر رضایت بخش هر شاخص } (Ct+1) \text{که پس از شکست } (Ct) \text{ظاهر شود}}{\text{کل مجموع کست}}$$ رابطهٔ ۳

آسیب‌پذیری (VU) نشان‌دهندهٔ بزرگی و یا مدّت‌زمان شکست در یک سری زمانی است. بزرگی شکست مقداری است که C_t از حدّ بالا و یا حدّ پایین مقدار رضایت‌بخش تجاوز کند که در رابطهٔ ۴، آمده است. شاخص پایداری که محدودهٔ آن از ۰ برای بدترین مقدار تا ۱ برای بهترین مقدار است، با ضرب مقادیر اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری محاسبه شده‌اند. برای پایداری، معیارهای اطمینان‌پذیری و برگشت‌پذیری حداکثر و آسیب‌پذیری حداقل است؛ بنابراین، شاخص پایداری کشاورزی (ASI) و شاخص پایداری زیست‌محیطی (ESI) با توجّه به معادلهٔ ۵ محاسبه می‌شوند. (S/D) نسبت تأمین به تقاضا در شاخص پایداری کشاورزی برای تقاضاهای کشاورزی و در شاخص پایداری زیست‌محیطی برای تقاضاهای زیست‌محیطی است. محدودهٔ قابل قبول برای تأمین تقاضای کشاورزی بین ۰/۸ و ۱ و برای تقاضای زیست‌محیطی، حدّ بالا و پایین ۱ در نظر گرفته شده است که در واقع باید کلّ نیاز برطرف شود. معادلهٔ ۲، برای محاسبهٔ شاخص‌های اطمینان‌پذیری تأمین آب شرب به کار می‌رود که البتّه حدّ بالا و پایین آن ۰/۹۵ در نظر گرفته می‌شود.

$$VU(C) = \frac{\text{جمع مقادیر شکست هر شاخص } (Ct)}{\text{تعداد کل شکست ها برای هر شاخص } (Ct)}$$ رابطهٔ ۴

$$ASI = RE_{(Si/Di)} * RS_{(Si/Di)} * \left(1 - VU_{(Si/Di)}\right)$$ رابطهٔ ۵

شاخص پایداری اجتماعی

این شاخص از اطمینان‌پذیری تأمین تقاضای شرب حاصل می‌شود که در واقع تعداد دفعاتی که تقاضای شرب به صورت ۱۰۰٪ تأمین می‌شود به کلّ دورهٔ شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

شبیه‌سازی سامانهٔ منابع و مصارف حوضهٔ گاماسیاب

در حوضهٔ گاماسیاب، سه سد در دست ساخت و یک سد هم در دست مطالعه است که به زودی عملیات ساخت آن آغاز می‌گردد. سدّ مخزنی جامیشان بر روی رودخانهٔ جامیشان در جنوب غربی شهرستان سنقر، نزدیکی روستای پیرسلمان و ایستگاه هیدرومتری پیرسلمان واقع شده است. این سد، با حجم نرمال ۶۲/۸ میلیون مترمکعب با هدف کمک به بهبود آب اراضی چمچمال، تأمین آب زراعی مورد نیاز منطقه، به‌ویژه بهبود و توسعهٔ

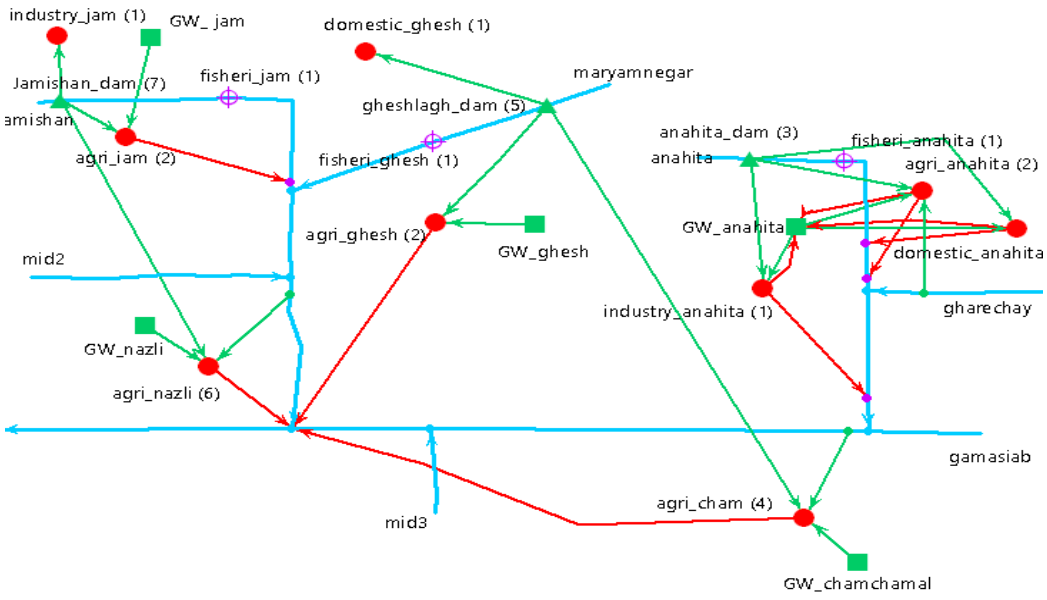
اراضی کشاورزی منطقهٔ میان‌راهان کنترل و جلوگیری از وقوع سیلاب و خسارت آسیب‌های ناشی از آن ساخته شده است. سدّ قشلاق، از نوع سنگ‌ریزه‌ای با هستهٔ رسی بر روی رودخانهٔ مریم‌نگار در دست ساخت است. حجم ۵۰ میلیون مترمکعبی این سد، جهت تأمین نیاز کشاورزی، منابع آب شرب و مصارف صنعت شهرستان صحنه و همچنین کمک به جبران بخشی از کمبودهای شبکهٔ دشت چمچمال مورد استفاده قرار خواهد گرفت. سدّ مخزنی کبوترلانه، بر روی سرابی به همین نام در دست ساخت است. این سد، از نوع خاکی با هستهٔ رسی با حوضهٔ آبریزی به وسعت ۹۱ کیلومترمربع است. حجم سد در تراز نرمال ۲۴/۶ میلیون مترمکعب است. هدف از ساخت این سد، توسعه و بهبود کشاورزی منطقه تا ۴۱۰۰ هکتار، تأمین آب شرب شهرستان کنگاور و همچنین نیاز صنعت این شهرستان است. سامانهٔ منابع و مصارف این حوضه، با بهره‌برداری از سه سد در شکل ۳، نشان داده شده است.

سناریوها

در این پژوهش، شاخص‌های پایداری آب و پایداری حوضهٔ آبریز در سه سناریو مجزّا بررسی خواهد شد. نخست وضع موجود منطقه، یعنی بدون در نظر گرفتن سدها و شرایط حاکم بر منطقه، در سال پایهٔ ۱۳۸۷ و بدون نیازهای شرب و زیست‌محیطی است. سناریو بعدی، شامل شرایطی که فقط سدّ جامیشان بهره‌برداری شود و در آخر، شرایطی که سدهای آناهیتا و قشلاق نیز وارد سیستم شوند، بررسی می‌گردد. در هر سناریو، سامانهٔ منابع و مصارف حوضهٔ گاماسیاب در مدل WEAP شبیه‌سازی شده و خروجی‌های آن به نرم‌افزار اکسل منتقل شده و شاخص‌ها محاسبه شده است.

گزینه‌های مدیریتی

با توجّه به مطالعات انجام‌شده در حوضهٔ گاماسیاب و در راستای تحقّق اهداف منطقه در حفظ پایداری حوضهٔ آبریز، اقداماتی نظیر افزایش راندمان آبیاری با اجرای طرح‌های آبیاری تحت فشار، افزایش راندمان انتقال با مرمّت و لایروبی کانال‌ها و لوله‌های انتقال آب قابل اجراست (مطالعات مرحلهٔ اوّل سدّ جامیشان، ۱۳۸۳). هر یک از این مجموعه عملیات‌های قابل اجرا، تحت عنوان گزینه‌های مدیریتی در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۳. منابع و مصارف در مدل WEAP در سناریو هر سه سد

جدول ۲. ارزیابی گزینه‌های مدیریتی

گزینه‌ها	اقدامات
گزینهٔ ۱: بدون تغییر	هیچ‌گونه تغییری در سیستم داده نشود.
گزینهٔ ۲: کاهش تلفات نشت از کانال‌ها	پوشش و تعمیر کانال‌ها و شبکه‌های توزیع آب
گزینهٔ ۳: افزایش راندمان	تغییر در سیستم‌های آبیاری و آموزش کشاورزان
گزینهٔ ۴: کاهش تلفات و افزایش راندمان	در نظر گرفتن هر دو گزینه به صورت هم‌زمان

تصمیم‌گیری

تصمیم‌گیری، حرکت در مسیر خاصّی است که با تأمّل و به صورت آگاهانه از بین روش‌های مختلف برای رسیدن به یک هدف مطلوب و بهینه انتخاب شده است. اجزای فرایند تصمیم‌گیری شامل ماتریس ارزیابی، وزن‌دهی به شاخص‌ها و معیارها و استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره برای حلّ ماتریس سه‌بعدی، معیارها، گزینه‌ها و سناریوهاست. آخرین گام در تصمیم‌گیری چندشاخصه، انتخاب یک مدل تصمیم‌گیری به منظور اولویّت‌بندی و با انتخاب گزینه‌هاست. در این پژوهش، از روش برنامه‌ریزی سازشی[1] برای رتبه‌بندی گزینه‌ها استفاده شده است.

روش برنامه‌ریزی سازشی

در این روش، بر اساس فاصله از نقطهٔ نامطلوب اولویّت‌بندی گزینه‌ها صورت می‌گیرد. مطلوبیت هر گزینه، با Li با توجّه به رابطهٔ ۶ محاسبه می‌گردد.

$$L_i = \left[\sum_{j=1}^{m} w_j^p \left(\frac{a_{ij} - f_j^w}{f_j^* - f_j^w}\right)^p\right]^{\frac{1}{p}}$$

رابطهٔ ۶

در رابطهٔ اخیر، f_j^*: مقدار مطلوب برای معیار j در بین تمام مقادیر ممکن برای گزینه‌هاست. P: عاملی است که حسّاسیّت تصمیم‌گیر به فاصله از نقطهٔ ایده‌آل را از دید هریک از معیارها بیان می‌دارد. با $p = 1$ همهٔ فاصله‌ها به اندازهٔ وزن خود در نظر گرفته می‌شود و بر اساس $p = 2$، فاصلهٔ بیشتر اثر بیشتر دارد (صفاری و ضرغامی، ۱۳۹۲)

نتایج

نتایج مربوط به محاسبهٔ شاخص‌های اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری که در محیط نرم‌افزار اکسل برای هر یک از تقاضاهای کشاورزی، زیست‌محیطی و شرب به صورت مجزّا در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج شاخص‌های پایداری منابع آب و شاخص‌های پایداری حوضهٔ آبریز نیز که به همین ترتیب محاسبه شده‌اند در جدول ۴ برای هر سناریو و در هر گزینه ارائه شده است. همچنین جدول ۵، خروجی‌های مربوط به روش برنامه‌ریزی سازشی را به صورت مرحله به مرحله را ارائه می‌دهد.

همان‌طور که از جدول ۵ مشخّص است بر اساس رابطهٔ ۶، در بخش قبل در روش اولویّت‌بندی برنامه‌ریزی سازشی هرچه شاخص Li کمتر باشد یعنی فاصله از مطلوبیت مورد نظر کمتر است و آن گزینه بهتر است؛ بنابراین، در سناریو سوّم که هر سه سد در سامانهٔ منابع و مصارف تأثیرگذار هستند، گزینهٔ دوّم یعنی کاهش تلفات سیستم با مقدار $Li = ۰/۱۰۸$ دارای بالاترین اولویّت، به همین ترتیب اولویّت‌های بعدی مشخّص می‌شود. نتیجهٔ اولویّت‌بندی گزینه‌ها در هر دو سناریو، شامل فقط سدّ جامیشان و هر سه سد در جدول ۶ نشان داده شده است.

1- Compromise Programming (CP)

جدول ۳. شاخص‌های اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری در ۳ سناریو مورد بررسی

شاخص‌ها		اطمینان‌پذیری		آسیب‌پذیری		برگشت‌پذیری	
		زیست-محیطی	کشاورزی	زیست‌محیطی	کشاورزی	زیست‌محیطی	کشاورزی
وضع موجود		-	۰/۷۴	-	۰/۵۷	-	۰/۲۳
سدّ جامیشان	بدون تغییر	۰/۷۷	۰/۷۴	۰/۶۲	۰/۷	۰/۲۷	۰/۲۳
	کاهش تلفات سیستم	۰/۷۸	۰/۷۵	۰/۶۳	۰/۷۲	۰/۲۷	۰/۲۳
	افزایش راندمان	۰/۷۸	۰/۷۶	۰/۶۳	۰/۷۳	۰/۲۷	۰/۲۳
	کاهش تلفات و افزایش راندمان	۰/۷۹	۰/۷۷	۰/۶۳	۰/۷۴	۰/۲۷	۰/۲۳
هر سه سد	بدون تغییر	۰/۸۵	۰/۸۲	۰/۶۶	۰/۶۹	۰/۳۴	۰/۲۸
	کاهش تلفات سیستم	۰/۸۹	۰/۸۹	۰/۶۵	۰/۴۶	۰/۳۹	۰/۳۶
	افزایش راندمان	۰/۸۷	۰/۸۶	۰/۶۷	۰/۷۴	۰/۳۴	۰/۲۷
	کاهش تلفات و افزایش راندمان	۰/۸۹	۰/۸۷	۰/۶۷	۰/۷۵	۰/۳۴	۰/۲۷

جدول ۴. نتایج محاسبهٔ شاخص‌های پایداری منابع آب و پایداری حوضهٔ آبریز در ۳ سناریو مورد بررسی

سناریو	شاخص‌ها / گزینه‌ها	شاخص پایداری اجتماعی	شاخص پایداری زیست‌محیطی	شاخص پایداری کشاورزی	شاخص آسیب‌پذیری منابع آب	شاخص آب در دسترس	شاخص جریان رودخانه در فصل خشک
وضع موجود	-	-	-	۰/۰۷	۲۷۸/۱۳	۰/۵۸	۴۸/۴۴
سدّ جامیشان	بدون تغییر	۰/۷۴۵	۰/۰۷۹	۰/۰۴۹	۲۳۷/۶	۰/۵۸	۶۳/۲
	کاهش تلفات سیستم	۰/۷۵	۰/۰۸۱	۰/۰۴۸	۲۳۰/۲	۰/۵۸	۶۳/۶
	افزایش راندمان	۰/۷۷	۰/۰۸۵	۰/۰۴۸	۲۳۸/۲	۰/۶۷	۶۸/۶۶
	کاهش تلفات و افزایش راندمان	۰/۷۹	۰/۰۹	۰/۰۴۶	۲۲۲/۹	۰/۶۷	۶۹/۱
هر سه سد	بدون تغییر	۰/۸۱	۰/۱	۰/۰۷	۲۳۰	۰/۵۸	۵۰/۲۶
	کاهش تلفات سیستم	۰/۹۵	۰/۱۲	۰/۱۸	۲۱۶/۲	۰/۵۸	۸۹/۳
	افزایش راندمان	۰/۸۲	۰/۰۹۹	۰/۰۶	۲۲۰/۷	۰/۶۷	۸۰
	کاهش تلفات و افزایش راندمان	۰/۸۴	۰/۱	۰/۰۵۹	۲۰۶/۳	۰/۶۷	۸۲/۲۳

جدول ۵. مراحل محاسبهٔ تعیین رتبهٔ گزینه‌ها در روش برنامه‌ریزی سازشی برای سناریوی سوّم

شاخص‌ها	پایداری اجتماعی	پایداری زیست‌محیطی	پایداری کشاورزی	آسیب‌پذیری منابع آب	شاخص آب در دسترس	شاخص جریان رودخانه در فصل خشک	Li
ماکزیمم مقدار هر شاخص	۰/۹۵	۰/۱۲	۰/۱۸	۲۳۰	۰/۶۷	۸۹/۳	
مینیمم مقدار هر شاخص	۰/۸۱	۰/۰۹۹	۰/۰۵۹	۲۰۶/۳	۰/۵۸	۵۰/۲۶	
^{2}(ماکزیمم-مینیمم)	۰/۰۲	۰	۰/۰۱۵	۵۶۱/۷	۰/۰۰۸	۱۵۲۴/۱۲	
بدون تغییر	۰/۰۱	۰/۰۰۹	۰/۰۰۸	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۲۳۹
کاهش تلفات سیستم	۰	۰	۰	۰/۰۰۲	۰/۰۱	۰	۰/۱۰۸
افزایش راندمان	۰/۰۰۹	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰۴	۰	۰/۰۰۱	۰/۱۸
کاهش تلفات و افزایش راندمان	۰/۰۰۶	۰/۰۰۹	۰/۰۱	۰	۰	۰	۰/۱۶

جدول ۶. نتایج اولویّت‌بندی گزینه‌ها در ۳ سناریو مورد بررسی با روش برنامه‌ریزی سازشی

گزینه - سناریو	بدون تغییر	کاهش تلفات سیستم	افزایش راندمان	کاهش تلفات و افزایش راندمان
سدّ جامیشان	۴	۳	۲	۱
هر سه سد	۴	۱	۳	۲

نتایج اولویّت‌بندی گزینه‌ها نشان می‌دهد در سناریو سدّ جامیشان به تنهایی، رتبهٔ اوّل به راهکار تلفیق کاهش تلفات سیستم انتقال آب و افزایش راندمان آب تعلّق گرفته و در سناریوی هر سه سد، رتبهٔ اوّل به کاهش تلفات سیستم تعلّق گرفته است. به همین ترتیب، اولویّت دیگر گزینه‌ها نیز در منطقه مشخّص شده است.

بحث

آنچه از نتایج این پژوهش قابل بحث است شامل مقایسهٔ پژوهش‌های مختلف در زمینهٔ شاخص‌های پایداری منابع آب، شاخص‌های توسعهٔ پایدار حوضهٔ آبریز و شاخص‌های پایداری سامانه‌های تأمین و تقاضاست. در شاخص‌های پایداری منابع آب، تنها کمیّت منابع آب سطحی و زیرزمینی و قابلیّت دسترسی آنها مدّنظر است (فالکن مارک[1]، ۱۹۸۶؛ می و همکاران، ۱۹۹۹؛ ون بیک[2] و همکاران، ۲۰۱۱). در شاخص‌های توسعهٔ پایدار، مباحث کیفیّت و کمیّت به طور کامل در حوضهٔ آبریز در شاخص‌ها و زیرشاخص‌های متعدّدی سنجیده می‌شود که نرخ مرگ‌ومیر، تحصیلات، اکولوژی و مباحث متعدّدی از معیارهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی را شامل می‌شود (پاستور[3] و همکاران، ۲۰۱۳). از این جمله می‌توان به شاخص‌های توسعهٔ پایدار کانادایی که توسّط (مؤسّسهٔ CIER و مورین، ۲۰۰۶)[4] ارائه شد و چاوز و آلیپاز (۲۰۰۷) اشاره کرد که بررسی این شاخص‌ها، وضعیّت منابع و مصارف حوضه را مشخّص نمی‌کند و تغییر مقادیر تخصیص و یا کمبودها در تقاضاهای متعدّد کشاورزی، شرب و صنعت در مقادیر این شاخص‌ها تغییر ایجاد نمی‌کند.

در این پژوهش، شاخص‌هایی محاسبه شده‌اند که ترکیبی از شاخص‌های پایداری آب (ییلماز و هارمانسیگلو[5]، ۲۰۱۰) و پایداری حوضهٔ آبریز است که بتواند در شرایط آیندهٔ یک سامانهٔ آبی، با تغییر تقاضاهای شرب و صنعت و کشاورزی و گزینه‌های مختلف مدیریتی، پایداری حوضهٔ آبریز را از لحاظ منابع آب و مباحث تأمین و تقاضا ارزیابی کند؛ بنابراین، با هر سناریویی برای آیندهٔ حوضهٔ آبریز گاماسیاب و پیشنهاد راهکارهای مدیریتی مختلف در جهت تعدیل اثرات سناریوها می‌توان منطقه را برای سناریوهای مدّنظر و راهکارهای سازه‌ای قابل اجرا در مدل WEAP شبیه‌سازی نمود و شاخص‌های مطرح‌شده در این پژوهش را بر اساس خروجی‌های مدل در محیط اکسل برای هر سناریو و هر گزینه محاسبه نمود و با روش‌های تصمیم‌گیری مناسب اولویّت اجرای بهترین راهکار برای پایداری حوضهٔ آبریز در سناریوی مدّنظر را مشخّص کرد.

شاخص‌های مدّنظر این پژوهش، به سامانهٔ منابع و مصارف متّصل است به این معنی که هر تغییری در سامانه شامل راهکارهای مدیریت سازه‌ای و غیر سازه‌ای و یا سناریوهای مختلف مثل سناریوهای انتقال بین حوضه‌ای و یا سناریوهای اقلیمی و... قابل اندازه‌گیری است. در حالی که در پژوهش‌های دیگر در زمینهٔ پایداری عموماً مقادیر کلّی مورد بحث قرار می‌گیرد به طور مثال کلّ آب زیرزمینی آبخوان یا کلّ آب سطحی حوضه و یا

1- Falkenmark
2- Van Beek
3- Pastor
4- The Centre for Indigenous Environmental Resources (CIER) & Morin, A.
5- Yilmaz & Harmancioglu

ورودی‌ها و خروجی‌های دیگر حوضه، در حالی که در این پژوهش شبیه‌سازی ماهانهٔ حوضهٔ آبریز در تمام گره‌های منابع و مصارف انجام شده و خروجی هر سناریو و هر گزینه در اکسل در محاسبهٔ شاخص‌ها نقش داشته است.

نتایج این پژوهش با پژوهش‌های (بیلماز و هارمانسیگلو، ۲۰۱۰) در منطقهٔ گدیز ترکیه و (حافظ‌پرست و همکاران، ۱۳۹۴) در حوضهٔ آبریز ارس همخوانی دارد. این همخوانی، در راستای حفظ پایداری حوضهٔ آبریز و با استفاده از گزینه‌های ترکیبی است. در تحقیقات قبلی نیز تلفیق روش‌های مدیریتی از جمله افزایش راندمان و کاهش تلفات در بهبود معیارهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی اثربخش بوده است و این اثربخشی، با توجّه به بهبود شاخص‌های پایداری در معیارهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی به دست آمده است.

نتیجه‌گیری

محاسبهٔ شاخص‌های پایداری در هر یک از گزینه‌های اجرایی در این پژوهش، در هر سناریو نتایج متفاوتی ایجاد کرده است که همهٔ این مقادیر حاصل‌شده از مدل شبیه‌سازی منابع و مصارف WEAP به اکسل منتقل شده و شاخص‌های پایداری محاسبه شده‌اند. تجزیه و تحلیل این شاخص‌ها در ماتریس‌های سه‌بعدی سناریو - گزینه - شاخص با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره برنامه‌ریزی سازشی نشان می‌دهد در هر سناریو کدام راهکار مدیریتی در رتبهٔ نخست قرار می‌گیرد که برای تصمیم‌گیری در حوضهٔ آبریز در سناریوهای مختلف بسیار مؤثّر و کارا است. در این پژوهش، گزینهٔ کاهش تلفات نشت از کانال‌ها با پوشش انهار و کانال‌ها در سناریوی سدّ جامیشان به تنهایی رتبهٔ اوّل و در سناریوی هر سه سد رتبهٔ دوّم را کسب نموده است و گزینهٔ افزایش راندمان با تغییر سیستم‌های آبیاری سنّتی به آبیاری تحت فشار که بر اساس مطالعات انجام‌شده در منطقه تنها برای قسمت‌هایی از منطقه امکان‌پذیر است در گزینهٔ سدّ جامیشان به تنهایی رتبهٔ دوّم و در گزینهٔ هر سه سد، رتبهٔ سوّم را اخذ نموده است.

منابع

حافظ‌پرست، مریم؛ عراقی‌نژاد، شهاب؛ شریف آذری، سلمان (۱۳۹۴) معیارهای پایداری در ارزیابی مدیریت یکپارچهٔ منابع آب حوضهٔ آبریز ارس بر اساس رویکرد DPSIR، **پژوهش‌های حفاظت آب‌وخاک گرگان**، (۲) ۲۲، صص. ۷۷-۶۱.

صفاری، نسیم؛ ضرغامی، مهدی (۱۳۹۲)، تخصیص بهینهٔ منابع آب سطحی حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه به استان‌های ذی‌نفع با روش‌های تصمیم‌گیری فاصله محور، **دانش آب‌وخاک**، (۱) ۲۳، صص. ۱۴۹-۱۳۵.

مطالعهٔ مرحلهٔ اوّل سدّ مخزنی جامیشان (۱۳۸۳) **ادارهٔ کلّ امور آب استان کرمانشاه، نیازها، برنامه‌ریزی منابع آب و به‌گزینی سد و شبکه**، وزارت نیرو، آب منطقه‌ای غرب.

ASCE/UNESCO (1998) **Sustainability Criteria for Water Resource Systems**, American Society of Civil Engineers (ASCE), Task Committee on Sustainability Criteria and Working Group of UNESCO/IHP-IV Project M-4.3.

Attari, J., Mojahedi, S. A. (2009) Water Sustainability Index: Application of CWSI for Ahwaz County, **World Environmental and Water Resources Congress: Great Rivers**, pp. 1-7.

Chaves, H. M. L., Alipaz, S. (2007) An Integrated Indicator Based on Basin Hydrology Environment, Life, and Policy: The Watershed Sustainability Index, **Water Resource Management**, 21 (5), pp. 883–895.

Dinar, A., Kemper, C., Blomquist, W., Kurukulasuriya, P. (2007) Whitewater: Process and Performance of Decentralization Reform of River Basin Water Resource Management,

Policy Modeling, 29 (6), pp. 851-867.

Falkenmark, B. (1986) **Fresh Water-Time for a Modified Approach**. AMBIO. 15, pp. 192–200.

Gleick, P. H. (1990) **Vulnerability of Water Systems, in Climate Change and US Water Resources**, P. E.Waggoner, ed., New York, John Wiley and Sons, pp. 223-240.

Ioris, A. A. R., Hunter, C., Walker, S. (2008) The Development and Application of Water Management Sustainability Indicators in Brazil and Scotland, **Environmental Management**, 88 (4), 1190-1201.

Juwana, I., Perera, B. J., Muttil, N. (2009) **Conceptual Framework for the Development of West Java Water Sustainability Index**,18th World IMACS/ MODSIM Congress, Cairns, Australia 13-17 July.

Kondratyev, S., Gronskaya, T., Ignatieva, N., Blinova, I., Telesh, I., Yefremova, L. (2002) Assessment of Present State of Water Resources of Lake Ladoga and its Drainage Basin Using Sustainable Development Indicators, **Ecological Indicators**, 2(1-2), pp. 79-92.

Loucks, D. P. (2000) Sustainable Water Resources Management, **Water International**, 25 (1), pp. 3-11.

Margerum, R. D. (1999) Integrated Environmental Management: The Foundations for Successful Practice, **Environmental Management**, 24, pp. 151-166.

McLaren, R. A., Simonovic, S. P. (1999) Evaluating Sustainability Criteria for Water Resources Decision Making: Assiniboine Delta Case Study, **Canadian Water Resources Journal**, 24 (2), pp. 147-163.

Meigh, J. R., McKenzie, A., Sene, K. (1999) A Gride-Based Approach to Water Scarcity. Estimates for Eastern and Southern Africa, **Water Resources Management**, 13, pp. 85-115.

Mimi, Z., Sawalhi, B. (2003) A Decision Tool for Allocating the Waters of the Jordan River Basin between all Riaprian Parties, **Water Resources Management**, 17, 447-461.

Pastor, A., Ludwig, V., Biemans, F., Hoff, H., Kabat, P. (2013) Accounting for Environmental Flow Requirements in Global Water Assessments, **Hydrology and Earth System Science Discussion**, 10, 5059–5041.

Shieh, H. J., Wang, Y. M. (2008) **The Computation and Assessment of the Indicators on Sustainable Development of Water Resources in Taiwa**, World Environmental and Water Resources Congress, Ahupua'a, Diwan Univwersity.

Sullivan, C. (2002) Calculating a Water Poverty Index. **World Development**, 30 (7), 1195-1210.

Sullivan, C. A., Meigh, J. R. (2005) Targeting Attention on Local Vulnerabilities Using an Integrated Indicator Approach: the Example of the Climate Vulnerability Index, **Water Science Technology**, 51 (5), pp. 69–78.

The Centre for Indigenous Environmental Resources (CIER) & Morin, A. (2006) **The Canadian Water Sustainability Index (CWSI): Case Study Report**, Ottawa: Policy Research Initiative.

Van Be, L. P. H., Wada, Y., Bierkens, F. (2011), Global Monthly Water Stress: I. Water Balance and Water Availability, **Water Resources Research**, 47. W07517.

Wang, G. Y., Innes, J. L. (2005) Watershed Sustainability: Strategic and Tactical Level Assessment in the Min River Watershed, China, **Environmental Informatics Archives**, 3, pp. 76–83.

World Resources Institute. (2000) **World Resources: 2000-2001: People and Ecosystems**. The Fraying Web of Life, Oxford (UK): Elsevier Science Limited.

Yilmaz, B., Harmancioglu. N. (2010) An Indicator Based Assessment for Water Resources Management in Gediz River Basin, Turkey, **Water Resources Management**, 24 (15), pp. 4359–4379, doi:10.1007/s11269-010-9663-3.