

## Water Balance Based Sustainability Analysis of Supply and Demand, Towards Developing a Hybrid Index (Case Study: Aharchay Watershed)

M. Karamouz<sup>1\*</sup> and P. Mohamadpour<sup>2</sup>

### Abstract

Planning of water systems in order to be ready for future development conditions needs further studies on the estimation sustainable levels of demands. In this study a threefold approach is taken for estimating sustainability level of supply and demand in Ahachay Watershed in northwestern part of Iran as a case study. In the first method, the internal flows and the origins and final uses of the total resources for each subsystem are estimated and sustainability use index is calculated by physical input output table. In the second method a simulation model is utilized to estimate reliability, resiliency, vulnerability, and maximum deficit for a watershed to determine a sustainability index. In the third method, for evaluating the movement toward sustainability, an index is developed. This index includes indicators which are the difference between supply and demand, percentage of the satisfied demand, productivity of water resources, and an indicator for evaluating the reduction of aquifer storage. Finally these methods are compared and a hybrid index combining the indices is developed. This hybrid index can be used for evaluating the planning scenarios and for maintaining and improving the sustainable state of supply/demand for the region.

**Keywords:** Sustainable levels, Water Resources and Supplies sustainability, Available water, Hybrid Index.

Received: November 4, 2016

Accepted: December 29, 2016

## تحلیل پایداری تأمین و تقاضا مبتنی بر بیلان آب، حرکت بسوی تدوین یک شاخص ترکیبی (مطالعه موردی: حوضه آبریز اهرچای)

محمد کارآموز<sup>۱\*</sup> و پانیذ محمدپور<sup>۲</sup>

### چکیده

برنامه‌ریزی برای سیستم‌های آبی در جهت آمادگی برای توسعه، نیازمند مطالعات آبی به جهت تخمین سطوح پایداری برای تقاضا می‌باشد. از این رو در این مطالعه، از سه روش جهت تخمین سطوح پایداری برای تأمین و تقاضای آب در یک مطالعه موردی در حوضه آبریز اهرچای در ناحیه شمال غربی ایران استفاده شده است. در روش اول، جریانات داخلی و منشاء و استفاده‌های نهایی از کل منابع برای هر زیر سیستم تخمین زده شده است و در نهایت با کمک روش ورودی-خروجی بیلان، شاخص استفاده پایدار از منابع آب محاسبه شده است. در روش دوم از یک مدل شبیه‌سازی، برای تخمین اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری حوضه آبریز جهت محاسبه شاخص پایداری استفاده شده است. در روش سوم نیز جهت ارزیابی نحوه حرکت به سمت توسعه پایدار، شاخص ارزیابی توسعه پایدار محاسبه شده است. پارامترهای مدنظر در این شاخص، شاخص بهره‌وری، اختلاف بین عرضه و تقاضا، درصد نیاز تأمین شده و یک شاخص جهت ارزیابی کاهش حجم ذخیره آبخوان است. در نهایت این روش‌ها با هم مقایسه شده و یک شاخص ترکیبی شامل شاخص‌های مذکور توسعه داده شد. این شاخص می‌تواند جهت ارزیابی و بهبود وضعیت پایداری تأمین و تقاضای آب تحت سناریوهای مختلف مدیریتی مورد استفاده قرار گیرد.

**کلمات کلیدی:** سطوح پایداری، پایداری منابع و مصارف آب، آب قابل برنامه‌ریزی، شاخص ترکیبی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۸/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۱۰/۹

1- Professor, School of Civil Engineering, University of Tehran, Iran. Email: karamouz@ut.ac.ir

2- M.Sc. Student, School of Civil Engineering, University of Tehran, Iran.

\*- Corresponding Author

۱ - استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲ - دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - مدیریت منابع آب، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

\*- نویسنده مسئول

## ۱- مقدمه

امروزه یکی از مهم‌ترین دغدغه‌ها در بسیاری از کشورهای جهان تأمین آب در راستای توسعه پایدار است. افزایش جمعیت و به تبع آن نیاز به افزایش تولیدات کشاورزی و صنعتی موجب افزایش مصرف آب در بخش‌های شرب، صنعت و کشاورزی شده و توسعه بهره‌برداری از منابع آب را اجتناب‌ناپذیر نموده است. توسعه پایدار راه‌کارهایی را برای توسعه در جهت حل مشکلات اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی (حال و آینده) ارائه می‌نماید. بررسی روابط میان فرآیندهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی در رویکردهای مدیریتی به عنوان توسعه پایدار پذیرفته شده اما مدیران و تصمیم‌گیرندگان هنوز در به کارگیری توسعه پایدار و اندازه‌گیری آن با مشکل مواجه هستند. از راه‌های مقابله با این مشکل استفاده از شاخص‌های توسعه پایدار است. شاخص‌ها راه مؤثر و ساده‌ای را برای مرتبط کردن اطلاعات با مراحل مختلف حرکت به سوی هدف یعنی مدیریت پایدار منابع فراهم می‌کنند (Karamouz et al., 2006).

طبق تعریف Loucks (1997)، سیستم‌های پایدار منابع آب به نحوی طراحی و مدیریت می‌شوند تا کاملاً اهداف جامعه را در حال حاضر و آینده، در حالی که سازگاری اکولوژیکی و زیست‌محیطی و هیدرولوژیکی آنها را نیز حفظ می‌کنند، برآورده سازند. منابع آب از لحاظ اندازه‌گیری کمی فیزیکی‌شان منابع پیچیده‌ای هستند و اندازه‌گیری آنها نیاز به دانش کافی از کل آب در دسترس دارد. Gasco et al. (2005) از یک روش کمی‌سازی منابع به نام جدول ورودی-خروجی بیلان (PIOT)<sup>۱</sup> برای تخمین کل منابع آب و مقادیر کل آب در دسترس سالانه بهره برد. وی همچنین به کمک این روش، شاخص‌های قابل توجهی از جمله شاخص توسعه منابع آب و شاخص استفاده پایدار از منابع آب را محاسبه کرد.

Sandoval-Solis et al. (2011) شاخص پایداری منابع آب را که امکان ارزیابی و مقایسه سیاست‌های مختلف مدیریتی را بر اساس میزان پایداری فراهم می‌نماید، معرفی کردند. این شاخص اصلاح شده‌ی شاخص پایداری توسعه داده شده توسط Loucks (1997) است که به صورت حاصل ضرب سه معیار عملکرد اطمینان‌پذیری<sup>۲</sup>، برگشت‌پذیری<sup>۳</sup> و آسیب‌پذیری<sup>۴</sup> بود که در مطالعه فوق به صورت میانگین هندسی معیارهای عملکردی که ویژگی‌های ضروری و مطلوب برای پایداری حوضه را مشخص می‌کنند، اصلاح گردید. در این مطالعه، همچنین شاخص پایداری گروهی برای کاربران مختلف آب برای منطقه مورد مطالعه محاسبه شد. معیارهای عملکرد سیستم‌های منابع آب، از مهمترین اجزاء تخمین پایداری منابع آب

هستند. بنا بر گفته‌ی Vigerstol (2003)، معیارهای عملکرد می‌توانند میانگین پارامترهای مختلف از قبیل ظرفیت ذخیره مخزن، تأمین نیاز، تبخیر، کمبود آب شهری (میانگین کمبودها) و خروجی از سیستم باشند. معیارهای احتمالاتی عملکرد نیز می‌توانند شامل معیارهای قابلیت اطمینان بر پایه زمان (سالانه و ماهانه) و قابلیت اطمینان بر پایه حجم باشند (TCEQ, 2007).

Safavi et al. (2016) برای محاسبه شاخص پایداری یک رابطه فازی ارائه دادند تا بتوان از آن در محاسبه شاخص پایداری در منابع یا مصارف و همچنین در پایداری گروهی به صورت فازی بهره گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که مقادیر بدست آمده برای شاخص پایداری با استفاده از شاخص توسعه یافته فازی، مقادیری واقعی‌تر نسبت به روابط لاکس و سالیس ارائه کرده و در واقع عدم قطعیت‌های محاسبات را در نظر می‌گیرد. Ahmadi (2011) شاخص ارزیابی توسعه پایدار (SDAI)<sup>۵</sup> را برای ارزیابی نحوه حرکت به سمت توسعه پایدار ارائه کرد. این شاخص برای ارزیابی سناریوهای توسعه داده شده و تعیین وضعیت پایدار تأمین و تقاضا آب برای آینده مورد استفاده قرار خواهد گرفت و شامل شاخص بهره‌وری اقتصادی، اختلاف بین عرضه و تقاضا، درصد نیاز تأمین شده و یک شاخص جهت ارزیابی کاهش حجم ذخیره آبخوان است.

Karamouz et al. (2009) شاخص بارش استاندارد، شاخص تأمین آب سطحی و شاخص شدت خشکسالی پالمر را در راستای توسعه یک شاخص ترکیبی به نام شاخص ترکیبی خشکسالی (HDI)<sup>۶</sup> براساس آسیب‌های متناظر وقایع خشکسالی در هم ادغام نمودند. کاربرد این شاخص در پیش‌بینی شدت خشکسالی با استفاده از دو صورت متفاوت از شبکه عصبی مصنوعی به نام‌های شبکه عصبی احتمالاتی و شبکه پرسپترون چند لایه بررسی شد. Nayak et al. (2015) در تحقیقی به منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم بر ذخیره‌ی آب زیرزمینی در منطقه‌ای در هند از رویکرد بیلان آبی بهره گرفتند. در این تحقیق مدل ارزیابی و برنامه‌ریزی آب (WEAP)<sup>۷</sup> جهت تخمین ذخیره آب‌های زیرزمینی به کار گرفته شد. سناریوهای مختلف مدل WEAP توسعه داده شد و نتایج نشان داد که تغییر به سمت کشت مستقیم برنج و بهبود راندمان آبیاری می‌تواند پایداری مصرف آب زیرزمینی را بهبود بخشد. Wang et al. (2016) در تحقیقی شاخص‌هایی را برای ارزیابی پایداری مصرف آب بر پایه مدل DPSIR<sup>۸</sup> ایجاد کردند. با استفاده از این شاخص‌ها و بر اساس روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)<sup>۹</sup> یک ارزیابی جامع از تغییرات پایداری سیستم منابع آب در شهر بایانور انجام شد.

مطالعات پیشین نشان می‌دهد که ضرورت بیشتری برای در نظر گرفتن توأمان پایداری بین منابع و مصارف آب وجود دارد. این کمبود در این مقاله تشخیص داده شده و به آن پرداخته شده است. این مهم در تعیین شاخص پایداری از دیدگاه‌های مختلف و تعریف یک شاخص ترکیبی دیده شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

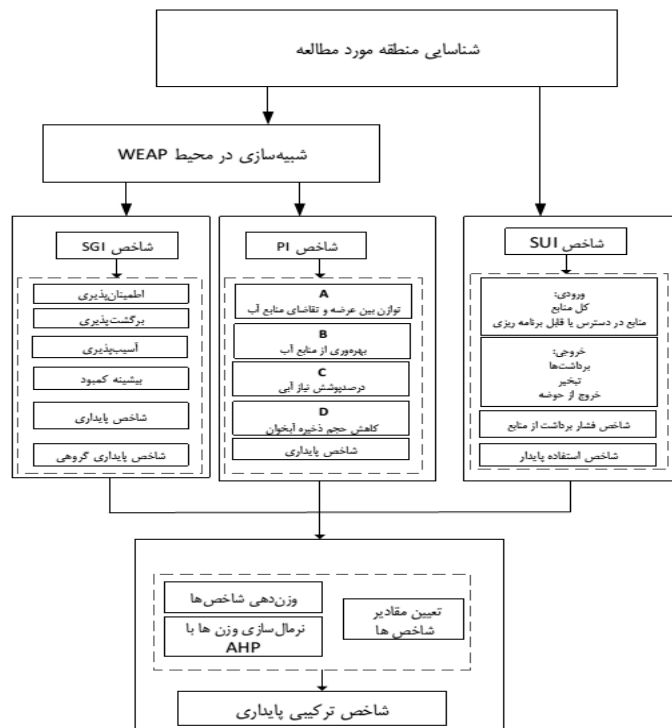
مراحل انجام مطالعه مطابق شکل ۱ آمده است. ابتدا منطقه مورد مطالعه شناسایی شده است و سپس شبیه‌سازی در محیط WEAP براساس اطلاعات منطقه مورد مطالعه انجام شده است. محاسبات در "روش ورودی خروجی بیلان" که به شاخص  $^{10}$ SUI منتهی می‌شود، بر اساس اطلاعات بیلان منطقه صورت گرفته است. در ادامه محاسبات مربوط به شاخص‌های پایداری (Paydari Index) PI (برای تمایز با SI (Sustainability Index)، در این مقاله به این شاخص PI اطلاق شده است) و  $^{11}$ SGI بر اساس خروجی‌های مدل شبیه‌سازی انجام شده است. این سه شاخص پس از محاسبه، برای تعیین اهمیت‌شان در ارزیابی وضعیت پایداری سیستم‌های منابع آب وزن‌دهی شدند. در نهایت شاخص ترکیبی  $^{12}$ HSI با ترکیب وزنی این شاخص‌ها بدست آمده است.

### ۱-۲- منطقه مورد مطالعه

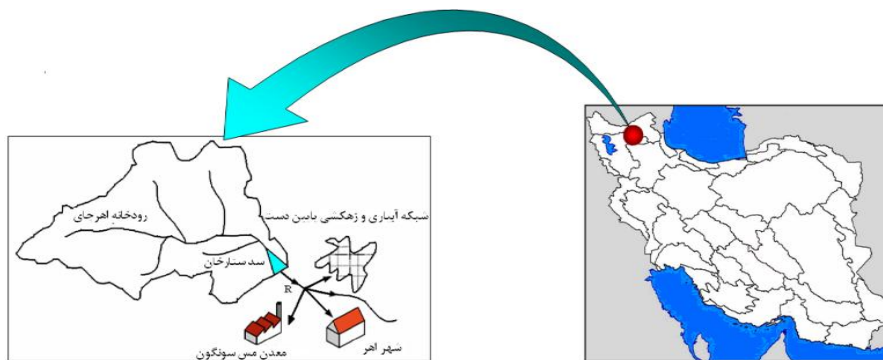
محدوده مورد مطالعه در این تحقیق، حوضه آبریز اهرچای با مساحتی

در حدود ۲۲۳۲ کیلومترمربع می‌باشد. این حوضه در شمال غربی ایران، در استان آذربایجان شرقی و در محدوده جغرافیایی  $38^{\circ} 20'$  تا  $45^{\circ} 45'$  عرض شرقی و  $46^{\circ} 20'$  تا  $47^{\circ} 30'$  طول شمالی قرار دارد. به لحاظ اقلیم‌شناسی کلان مقیاس، حوضه اهرچای دارای ویژگی‌های مناطق معتدل عرض‌های میانی کره زمین می‌باشد. در مجموع، آب و هوای این حوضه در سیستم طبقه‌بندی دومارتن، دارای تیپ اقلیمی نیمه‌خشک - سرد است. حوضه آبریز اهرچای به دلیل پوشش دادن بخش قابل توجهی از حوضه آبریز ارس، از اهمیت قابل توجهی در بخش شمال‌غرب کشور برخوردار است (Karamouz, 2008). در شکل ۲ محل قرارگیری سد ستارخان در حوضه آبریز اهرچای در نقشه ایران قابل مشاهده است. متوسط بارش منطقه براساس آمار درازمدت (۱۳۶۰-۱۳۹۰) حدود ۳۲۰ میلیمتر گزارش شده است. علی‌رغم اینکه بارش متوسط سالانه حوضه مقدار نسبتاً مناسبی است ولی به علت وجود تنها یک سد مخزنی، میزان آسیب‌پذیری حوضه نسبت به کم‌آبی بالا می‌باشد.

رودخانه اصلی حوضه آبریز اهرچای، رودخانه اهرچای است. با توجه به این که در حوضه اهرچای نیازهای آبی مختلفی که عمدتاً نیازهای شرب، صنعت، کشاورزی و زیست محیطی وجود دارد و از طرف دیگر این نیازها با ورودی‌های رودخانه همزمان نمی‌باشند، سد ستارخان، اهمیت ویژه‌ای در کنترل و ذخیره آورد رودخانه در مواقع پرآبی برای مصرف در مواقع کم‌آبی دارد.



شکل ۱- نمودار جریان‌ی پیشنهادی تدوین شاخص ترکیبی پایداری تأمین و تقاضای آب



شکل ۲- موقعیت قرارگیری حوضه آبریز سد ستارخان در نقشه حوضه‌های آبریز ایران و تقسیم‌بندی مصارف و منابع آب

محاسبه شاخص SUI نشان داده شده است. اطلاعات مربوط به بیان از اطلاعات محدوده مطالعاتی اهر-ورزقان واقع در حوضه آبریز ارس برداشته شده است. لازم به ذکر است که اطلاعات بیان آب در این منطقه هر پنج سال یک بار برداشت می‌شود و اطلاعات سال ۱۳۹۰ آخرین اطلاعات رسمی بیان است که از شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی دریافت گردید (Aras river basin master plan, 2016).

جدول ۱- اطلاعات مصارف در حوضه آبریز اهرچای (سال آبی ۱۳۹۰)

میزان مصرف آب سالانه (میلیون متر مکعب)	مصارف
۲۰/۰۶۸	شرب شهر اهر
۸۲/۶۸	کشاورزی
۳/۱۹۴	صنعتی (معدن مس سونگون)
۱۰۵/۶۶	مجموع

مهمترین ایستگاه هیدرومتری حوضه، به لحاظ قدمت دوره آماری، ایستگاه تازه‌کند اهر می‌باشد که در سال ۱۳۵۱ تأسیس شده است. بر اساس آمار درازمدت (۱۳۶۰-۱۳۹۰) دبی اندازه‌گیری شده در این ایستگاه به طور متوسط ۵ مترمکعب در ثانیه می‌باشد. ایستگاه هیدرومتری که می‌توان آن را به عنوان معرف وضعیت هیدرولوژیکی آورد رودخانه در نظر گرفت، ایستگاه اورنگ است که بر روی رودخانه اهرچای در ۲۵ کیلومتری از شهر اهر احداث شده‌است و سطح حوضه در محل این ایستگاه برابر با ۸۹۰ کیلومترمربع و ارتفاع آن ۱۴۳۰ متر از سطح دریا می‌باشد. مصارف در نظر گرفته شده در حوضه آبریز اهرچای، مصارف کشاورزی، مصارف شرب شهر اهر و مصارف صنعت، معدن مس سونگون می‌باشند. در جدول ۱ اطلاعات مصارف حوضه آبریز اهرچای منطقه آمده است. همچنین سد ستارخان با متوسط ورودی سالانه ۵۵ میلیون مترمکعب در مدل شبیه‌سازی شده است.

در جداول ۲ و ۳ ورودی-خروجی بیان برای حوضه آبریز اهرچای مربوط به سال آبی ۱۳۹۰ به ترتیب برای منابع و مصارف جهت

جدول ۲- ورودی - خروجی بیان (منابع) برای حوضه آبریز اهرچای (سال آبی ۱۳۹۰)

منابع	آبخوان (میلیون متر مکعب)	آبهای سطحی (میلیون متر مکعب)	کل ورودی (میلیون متر مکعب)
بارش	۱/۶۶	۷۲۴/۴۵	۷۲۶/۱۱
جریان‌های ورودی از خارج حوضه	۸	۰	۸
جریان‌ات ورودی انتقالی داخلی	۴/۷۸	۲۲/۲	۲۷/۰۷
جریان‌های برگشتی آبیاری به آبهای زیرزمینی و رودخانه‌ها	۱۰/۳۹	۱۴/۸۸	۲۵/۲۴
جریان‌های برگشتی غیرآبیاری به آبهای زیرزمینی و رودخانه‌ها	۷/۲۹	۴/۴۵	۱۱/۷۴
کل منابع	۳۲/۱۸	۷۶۵/۹۸	۷۹۸/۱۶

جدول ۳- ورودی - خروجی بیلان (مصارف) برای حوضه آبریز اهرچای (سال آبی ۱۳۹۰)

مصارف	آبخوان (میلیون متر مکعب)	آب‌های سطحی (میلیون متر مکعب)	مجموع (میلیون متر مکعب)
برداشت	۷/۲۲	۹۸/۴۴	۱۰۵/۶۶
تبخیر	۱/۰۱	۵	۶/۰۱
جریان‌ات خروجی	۳۳/۷۷	۱۱۸/۱۰	۱۵۱/۸۷
برداشت کل و استفاده‌های نهایی	۴۲	۲۲۱/۵۴	۲۶۳/۵۴

## ۲-۲- روش شناسی

و آبخوان اهرچای می‌باشند. اطلاعات ورودی مدل شامل مصرف آب شرب، مصرف آب کشاورزی، جریان ورودی به مخزن، آبخوان دشت اهرچای، حداقل جریان زیست محیطی مورد نیاز پایین دست سد ستارخان می‌باشند.

فرضیات شبیه‌سازی در این مطالعه به این صورت است که برداشت از آب‌های سطحی حوضه جهت مصارف کشاورزی دشت اهرچای و همچنین برداشت از آبخوان دشت اهرچای به صورت متمرکز در یک گره در نظر گرفته شده است. با توجه به اهمیت تأمین نیاز بخش شرب، اولویت تخصیص به این بخش همواره بالاتر از سایر بخش‌های مصرفی می‌باشد. در تمام نقاط آب شرب شهری، ۸۰ درصد از مصارف بخش شرب به عنوان آب بازگشتی به منابع سطحی و زیرزمینی فرض شده است. آب برگشتی از مصارف کشاورزی ۳۰ درصد مصارف این بخش و آب برگشتی صنعت، صفر در نظر گرفته شده است. اولویت تأمین آب از منابع به ترتیب سطحی و زیرزمینی فرض شده است. در این مطالعه از خروجی‌های این مدل که عبارت است از حجم مخزن در آخرین ماه سال، مقدار آب تأمین شده، حجم آب استحصال یافته از منابع زیرزمینی، جریان ورودی به مخزن، مجموع نیاز آبی ناخالص، آب تخصیصی به محصولات کشاورزی و نیاز آبی محصولات کشاورزی، مقدار آب مورد نیاز برای مصرف کننده، مقدار آب تأمین شده هر نیاز و میزان کمبود آب، برای محاسبه‌ی شاخص‌های پایداری استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که تفاوت آب مورد نیاز مصرف کننده و نیاز آبی ناخالص، در ملحوظ نمودن هدررفت آب در حین انتقال در تعریف نیاز ناخالص می‌باشد.

## ۲-۲-۲- شاخص پایداری SUI

در این مطالعه، روش ورودی خروجی بیلان که توسط Gasco et al. (2005) بررسی شده است، توسعه داده شده و برای حوضه آبریز اهرچای مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش برای کمی‌سازی منابع از روش ورودی خروجی بیلان، برای تخمین کل منابع آب و مقادیر کل آب در دسترس سالانه استفاده شده است.

در این مطالعه، یک رویکرد سه‌گانه برای محاسبه شاخص ترکیبی پایداری به کار برده شده است. در روش اول تعیین شاخص پایداری منابع آب (SUI) که توسط Gasco et al. (2005) پیشنهاد شده است، توسعه داده شده است که در آن تبخیر و خروجی‌های طبیعی ملحوظ گردید. شاخص محاسبه شده از روش دوم شاخص پایداری (SGI) است که با کمک روش ارائه شده توسط Sandoval-Solis (2011) برای محاسبه شاخص پایداری منابع آب محاسبه شد. شاخص بدست آمده از روش سوم شاخص ارزیابی توسعه پایدار (PI) است که با کمک رابطه ارائه شده برای تدوین این شاخص توسط Ahmadi (2011) و با اصلاح آن جهت تطابق با دو روش دیگر بدست آمده است. جهت محاسبه دو شاخص PI و SGI، از خروجی‌های مدل WEAP استفاده شد. در نهایت این روش‌ها باهم مقایسه شده و شاخص ترکیبی (HSI) شامل سه شاخص مذکور توسعه داده شد. در این بخش ابتدا به توصیف مدل‌سازی منطقه و سپس به توضیح هرکدام از روش‌ها پرداخته شد و پس از آن نحوه ادغام شاخص‌ها برای تدوین شاخص ترکیبی مطرح شده است.

## ۲-۲-۱- مدل‌سازی

در این مطالعه از یک مدل شبیه‌سازی برای حوضه آبریز اهرچای در محیط WEAP برای سال ۱۳۹۰ (سال پایه) استفاده شده است. اطلاعات مورد نیاز این مدل شامل سه دسته اطلاعات نیازهای آبی، اطلاعات هیدرولوژی (بیلان آب) و اطلاعات مربوط به منابع آب اعم از سطحی و زیرزمینی است. از اهداف به کارگیری این مدل در این مطالعه اولاً شبیه‌سازی سال پایه به عنوان سال مورد بررسی جهت محاسبه‌ی شاخص پایداری و ثانیاً به کارگیری آن در ادامه این تحقیق جهت ارزیابی سناریوهای مدیریتی برای حوضه‌ی مورد مطالعه می‌باشد. مؤلفه‌های در نظر گرفته شده در این مدل، رودخانه اهرچای، سد ستارخان، شهر اهر، معدن مس سنگون، کشاورزی بالادست سد، الگوی کشت کشاورزی محصولات منطقه پایین دست

$$NA = GAA - TWFU \quad (3)$$

که در این روابط،  ${}^{24}TWFU$  عبارت است از برداشت کل و استفاده‌های نهایی که برابر با مجموع  ${}^{25}PW$  برداشت اولیه و  ${}^{26}NO$  جریان‌های خروجی طبیعی به خارج از حوضه و  ${}^{27}RE$  تبخیر می‌باشد.  ${}^{28}NA$  تفاوت بین ذخیره نهایی و اولیه در زیرسیستم‌های هیدرولوژیکی یک سیستم منابع آب را نشان می‌دهد. شاخصی که فشار عوامل اقتصادی بر منابع در دسترس اعمال می‌کند مطابق رابطه ۴ توصیف می‌شود.

$$WPI = \frac{TWFU}{GAA} = \frac{NO+RE+PW}{GAA} \quad (4)$$

${}^{29}WPI$  شاخص فشار برداشت آب است که توسط OECD  ${}^{30}$  مطرح شده است و در این مطالعه بدین‌گونه اصلاح شده است که به جای  $PW$  به کار برده در صورت کسر در مطالعات Gasco et al. (2005)، از ترم  $TWFU$  استفاده شده است. ایراد این شاخص این بود که علی‌رغم اینکه در ظاهر در رابطه‌اش تبخیر وجود داشت، اما این پارامتر عملاً نقشی در محاسبه این شاخص نداشته و بدون آن هم شاخص بدست می‌آید. درحالی‌که تبخیر و دیگر تلفات نقش اساسی بر فشار وارد بر منابع دارند و باید به طور مستقیم در محاسبه این شاخص در نظر گرفته شوند. مقدار مکمل این شاخص، برای منابع آب شاخص استفاده پایدار را تشکیل می‌دهد که مطابق رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

$$SUI = 1 - WPI = 1 - \frac{NO+RE+PW}{GAA} \quad (5)$$

شاخص  $SUI$ ، حداکثر عدد یک را می‌تواند اتخاذ کند و هرچه به یک نزدیک‌تر باشد مطلوب‌تر خواهد بود (Gasco et al., 2005).

### ۲-۳- شاخص پایداری PI

در این مطالعه، روش ارزیابی توسعه پایدار (Ahmadi 2011) که بر اساس رویکرد علی و معلولی تهیه شده، بسط داده شده است. در روش احمدی، یک شاخص تعریف می‌شود که هدف از آن محاسبه یک مقدار کمی جهت ارزیابی استراتژی‌های مدیریتی و معرفی گزینه پایدار می‌باشد. رابطه ارائه شده در مطالعه (Ahmadi 2011) در این مطالعه توسعه و بسط داده شده است که به صورت رابطه ۶ می‌باشد.

$$PI_i = W_A \times A_i + W_B \times B_i + W_C \times C_i + W_D \times D_i \quad (6)$$

در این رابطه  $PI_i$  شاخص ارزیابی توسعه پایدار در سال  $i$  و پارامتر  $A_i$  نشان‌دهنده تعادل بین عرضه و تقاضا برای سال  $i$  است. پارامتر  $B_i$  نسبت بهره‌وری در یک سال بر حداکثر بهره‌وری از منابع آب در همان سال برای سال  $i$  می‌باشد که مقدار این عبارت همواره بین صفر و یک است. پارامتر  $C_i$  درصد پوشش نیاز آبی برای سال  $i$

انتقالات آب بین زیرسیستم‌های مختلف بوسیله‌ی جریان‌های داخلی مشخص می‌شوند که منابع آب در دسترس را کاهش می‌دهند. این روش، انتقالات داخلی و منشأ و استفاده نهایی از کل منابع برای هر زیر سیستم را بنا می‌کند و امکان محاسبه شاخص‌هایی از جمله شاخص استفاده پایدار از منابع آب را فراهم می‌کند. روابط جریان، ورودی‌های مورد نیاز برای محاسبه‌ی شاخص‌های استفاده پایدار از منابع آبی را تشکیل می‌دهند. بنابراین یک دانش خوب از چرخه‌ی هیدرولوژی برای شناسایی اجزاء منابع آب که برای بهره‌برداری سیستم تأمین حیاتی هستند، نیاز است. هدف از این روش، کاربرد جدول ورودی خروجی فیزیکی برای برقراری روابط جریان آب بین اجزاء مختلف هیدرولوژیکی حوضه آبریز اهرچای برای سال آبی ۱۳۹۰ و محاسبه‌ی شاخص استفاده پایدار از منابع آب است. پارامترها و روابط جریان مربوط به این روش در بخش‌های زیر بیان شده است.  ${}^{31}PrI$  عبارت است از ورودی اولیه که برابر با مجموع بارش (AP)  ${}^{32}$  و جریان‌های ورودی از خارج حوضه (IFO)  ${}^{33}$  است.  ${}^{34}SrI$  ورودی ثانویه که برابر با مجموع جریانات ورودی انتقالی داخلی (ITI)  ${}^{35}$ ، جریان‌های برگشتی غیرآبیاری به آب‌های زیرزمینی و رودخانه‌ها (NIBF)  ${}^{36}$  و جریان‌های برگشتی آبیاری به آب‌های زیرزمینی و رودخانه‌ها (IBF)  ${}^{37}$  است.

${}^{38}TR$  کل منابع است که برابر با مجموع جریان‌های اولیه و ثانویه است.  ${}^{39}TU$  کل مصارف است که با توجه به قانون بقای جرم، از نظر عددی، مقداری برابر با کل منابع دارد. همه‌ی منابع کل در دسترس نیستند چون اجزاء طبیعی و مصنوعی سیستم‌های منابع، به یک مقدار مینیمم آب برای انتقالات داخلی بین خودشان نیاز دارند. با استفاده از رابطه ۱ می‌توان مقدار آب در دسترس را محاسبه کرد.

$$GAA = TR - TIO \quad (1)$$

که در این رابطه،  ${}^{40}GAA$ ، کل منابع سالانه در دسترس است که در ساختار تخصیص آب وزارت نیرو به آن آب قابل برنامه‌ریزی نیز اطلاق می‌گردد.  ${}^{41}TIO$ ، کل جریان‌های خروجی داخلی بدست آمده از ماتریس انتقالات داخلی است. یک ماتریس انتقالات داخلی، ورودی‌ها و خروجی‌های هر زیر سیستم را توصیف می‌کند. بر اساس قانون بقای فیزیکی، کل جریان‌های خروجی داخلی، با کل جریان‌های ورودی داخلی برابرند و مقدار آنها بر اساس ویژگی‌های چرخه طبیعی - مصنوعی آب به داخل سیستم‌های منابع تغییر می‌کند که می‌تواند با توسعه، مدیریت و مصرف اصلاح شود. مصرف کل و ذخیره خالص سیستم‌های منابع آب به ترتیب با استفاده از روابط ۲ و ۳ محاسبه می‌شوند (Gasco et al., 2005).

$$TU = TIO + TWFU + NA \quad (2)$$

شد. ۱ نشان‌دهنده اهمیت کم است، ۵ نشان‌دهنده اهمیت متوسط و ۱۰ نشان‌دهنده بیشترین اهمیت است. در نهایت برای مقیاس و نرمال کردن وزن پارامترها از روش رتبه‌بندی AHP استفاده گردید. در رابطه ۶،  $W_A$  وزن مربوط به پارامتر  $A$ ،  $W_B$  وزن مربوط به پارامتر  $B$ ،  $W_C$  وزن مربوط به پارامتر  $C$  و  $W_D$  وزن مربوط به پارامتر  $D$  می‌باشند.

## ۲-۲-۴- شاخص پایداری SGI

به عنوان یک گزینه دیگر، روش شاخص پایداری ارائه شده توسط Sandoval-Solis (2011) که اصلاح شده‌ی شاخص پایداری Loucks (1997) است، در این مطالعه به کار برده شده است تا در تدوین روش ترکیبی ایجاد پایداری بین تأمین و مصرف، این عوامل بهتر دیده شود. شاخص ارائه شده توسط Loucks، رابطه ۱۱ را برای مصرف‌کننده  $i$  ام دارا می‌باشد.

$$SI^i = Rel^i \times Res^i \times (1 - Vul^i) \quad (11)$$

که در آن  $Rel^i$ ،  $Res^i$  و  $Vul^i$  به ترتیب اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری برای مصرف‌کننده  $i$  ام می‌باشند. مشخصات اصلی این شاخص بدین گونه است که مقدار آن از صفر تا یک یا از صفر تا صد درصد تغییر می‌کند؛ اگر یکی از معیارهای عملکرد برابر صفر باشد، شاخص پایداری هم برابر صفر خواهد بود و یک وزن‌دهی ضمنی به معیارهای عملکرد در این رابطه دیده می‌شود. (Sandoval-Solis et al. (2011) در اصلاح شاخص Loucks (1997) رابطه ۱۲ را برای شاخص پایداری برای کاربر  $i$  ام ارائه نمودند.

$$SI^i = \left[ \prod_{m=1}^M C_m^i \right]^{1/M} \quad (12)$$

در این رابطه  $M$  تعداد شاخص‌های عملکرد در نظر گرفته شده و  $C_m^i$  شاخص عملکرد  $m$  ام برای کاربر  $i$  ام می‌باشد. به عنوان مثال، چنانچه معیارهای عملکرد به صورت اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و بیشینه کمبود باشند، آنگاه شاخص پایداری مربوط به کاربر  $i$  ام برابر با رابطه ۱۳ می‌باشد.

$$SI^i = \left[ Rel^i \times Res^i \times (1 - Vul^i) \times (1 - Max.Def^i) \right]^{1/4} \quad (13)$$

این شاخص علاوه بر ویژگی‌های شاخص پیشنهادی Loucks (1997)، دارای ویژگی‌های محتوایی که این امکان را می‌دهد که کاربر معیارهای عملکرد دیگر را نیز به انتخاب و طبق اهمیت آن در سیستم مورد مطالعه در محاسبه شاخص پایداری

می‌باشد و مقدار این عبارت بین صفر و یک خواهد بود. پارامتر  $D_i$  نسبت اختلاف برداشت از منابع زیرزمینی و مقدار مجاز قابل برداشت از آن بر حجم آب قابل ذخیره در آبخوان برای سال  $i$  می‌باشد و این عبارت در شاخص، زمانی محاسبه می‌شود که دارای مقدار مثبت باشد و در صورت برداشت از منابع در حد مجاز برابر صفر فرض خواهد شد. در این مطالعه، ضرایب معادله ارائه داده شده این‌گونه بسط داده شده است که در رابطه ۶ به جای محصولات مختلف کشاورزی، کل نیاز کشاورزی در رابطه  $B_i$  ملحوظ گردید و کل نیاز پوشش داده شده به جای نیاز پوشش داده‌شده در بخش کشاورزی در رابطه  $C_i$  لحاظ شد. هرکدام از پارامترهای  $A_i$ ،  $B_i$ ،  $C_i$  و  $D_i$  در این مسأله مطابق روابط ۷ تا ۱۰ ارائه شده است.

$$A_i = \frac{(SGW + I_i + S - S_{min}) - (E_i + WR_i)}{S_{max} + S_{aquifer}} \quad (7)$$

$$B_i = \frac{\frac{Y_i}{AWA_i}}{\frac{Y_m}{CWR}} \quad (8)$$

$$C_i = \frac{SW_i}{WR_i} \quad (9)$$

$$D_i = 1 - \frac{GWW_i - SGW}{S_{aquifer}} \quad (10)$$

که در این روابط،  $S$  حجم مخزن در آخرین ماه سال،  $S_{min}$  حجم غیر فعال مخزن،  $S_{max}$  حداکثر حجم قابل ذخیره در مخزن،  $SGW$  حجم آب مجاز قابل برداشت از آبخوان،  $I_i$  جریان ورودی به مخزن در سال  $i$ ،  $E_i$  تبخیر از مخزن در سال  $i$ ،  $WR_i$  مجموع نیاز آبی ناخالص در سال  $i$ ،  $S_{aquifer}$  حجم قابل ذخیره آبخوان،  $Y_i$  عملکرد واقعی محصولات کشاورزی در سال  $i$ ،  $AWA_i$  آب تخصیصی به محصولات کشاورزی در سال  $i$ ،  $Y_m$  حداکثر عملکرد محصولات کشاورزی،  $CWR$  نیاز آبی محصولات کشاورزی،  $SW_i$  مقدار آب تأمین شده در سال  $i$  و  $GWW_i$  حجم آب استحصال یافته از منابع زیر زمینی در سال  $i$  می‌باشند. این پارامترها، برای تعیین اهمیت‌شان در ارزیابی وضعیت پایداری سیستم‌های منابع آب وزن‌دهی شدند. بدین جهت به هرکدام از پارامترها عددی بین ۱ تا ۱۰ با توجه به قضاوت مهندسی اختصاص داده شد. این امر در قالب طرح چندین سؤال و تکمیل آن توسط افراد متخصص نزدیک به مؤلفین انجام

$$\text{Max.Def}^i = \frac{\max_{t=1}^2 (D_{\text{Annual}}^i)}{\sum_{t=1}^2 \text{Demand}_t^i} \quad (18)$$

که در رابطه فوق گام‌های زمانی ماهانه فرض شده است و  $D_{\text{Annual}}^i$ ، مقادیر کمبود حجمی سالانه می‌باشد. همچنین برای در نظرگیری چند گروه مصارف در محاسبه شاخص پایداری که هر یک از اعضای آن گروه، خود دارای یک شاخص پایداری هستند، یک شاخص پایداری گروهی به صورت میانگین وزنی پایداری هریک از اعضای آن گروه تعریف شد. پایداری گروهی برای گروه مصارف  $k$  که شامل کاربر  $i$  ام تا  $j$  ام است می‌تواند به صورت رابطه ۱۹ تعریف شود (Sandoval-Solis et al., 2011).

$$\text{SGI}^k = \sum_{i=1}^{j+k} W^i \times \text{SI}^i \quad (19)$$

که در رابطه فوق  $\text{SI}^i$  شاخص پایداری مربوط به کاربر (بخش)  $i$  ام و  $W^i$  وزن متناظر با شاخص پایداری کاربر  $i$  ام می‌باشد. اگر وزن‌دهی شاخص‌ها بر اساس آب مورد نیاز سالانه آنها صورت گیرد، شاخص پایداری گروهی برای گروه  $k$  ام به صورت رابطه ۲۰ تعریف می‌شود. در این رابطه  $\text{Water demand}^k$  برابر مجموع نیازهای آبی مصارف گروه  $k$  می‌باشد. در این مطالعه شاخص گروهی شامل مصارف شهری، کشاورزی و صنعت می‌شود. بدین صورت که ابتدا میزان شاخص پایداری  $\text{SI}$  برای هر کدام از مصارف محاسبه شده و بر حسب نیازهای آبی‌شان وزن‌دهی شدند. در نهایت شاخص پایداری گروهی برای این گروه مصارف محاسبه شد.

$$\text{SGI}^k = \sum_{i=1}^{j+k} \frac{\text{Water demand}^i}{\text{Water demand}^k} \times \text{SI}^i \quad (20)$$

## ۲-۲-۵- شاخص پایداری ترکیبی

شاخص  $\text{SUI}$  شاخص استفاده پایدار از منابع آب می‌باشد که برای کنترل قرارگیری منابع آب در وضعیت مطلوب مورد استفاده قرار می‌گیرد. شاخص  $\text{SGI}$  برای کنترل تأمین تقاضا مورد استفاده قرار گرفته است و مطلوبیت منابع در آن مطرح نشده است.  $\text{PI}$  از نظر اطلاعاتی از جامعیت بیشتری برخوردار است اما دقت آن بستگی به توابع عملکرد کشاورزی دارد که محاسبات آن از عدم قطعیت‌های بیشتری برخوردار است. بنابراین تعریف شاخصی که هر سه شاخص فوق را پوشش دهد، ضرورت می‌یابد. پس از تعریف و محاسبه شاخص‌های پایداری منابع و مصارف آب با کمک سه روش فوق، با ترکیب آنها یک شاخص ترکیبی تعریف شده است. این شاخص که برابر با جمع وزنی هر کدام از مؤلفه‌های آن می‌باشد و با نماد  $\text{HSI}$

دخاله دهد، مقیاس کردن شاخص که با میانگین‌گیری هندسی معیارهای عملکرد انجام شد و انعطاف‌پذیری که نشان‌دهنده انعطاف در در نظرگیری معیارهای عملکرد مختلف دخیل در پایداری در محاسبات به فراخور اهداف مطالعات است، نیز می‌باشد. Sandoval-Solis در محاسبات خود، معیارهای عملکرد اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و بیشینه کمبود را دخیل کرد که در ادامه روابط و توضیحات مربوط به آنها مطرح شده است. کمبود آب برای کاربر (بخش)  $i$  ام  $(D_t^i)$  در هر گام زمانی  $t$ ، به صورت رابطه ۱۴ تعریف می‌شود.

$$D_t^i = \begin{cases} \text{Demand}_t^i - \text{Supply}_t^i & \text{if } \text{Demand}_t^i > \text{Supply}_t^i \\ 0 & \text{if } \text{Demand}_t^i = \text{Supply}_t^i \end{cases} \quad (14)$$

که در رابطه فوق  $\text{Demand}_t^i$  میزان آب مورد نیاز کاربر  $i$  ام در زمان  $t$  و  $\text{Supply}_t^i$  میزان تأمین نیاز کاربر  $i$  ام در زمان  $t$  می‌باشند. اطمینان‌پذیری نشان‌دهنده تعداد دفعاتی است که نیاز کاربر  $i$  ام در طول دوره شبیه‌سازی به طور کامل تأمین شده است  $(D_t^i=0)$  و به صورت رابطه ۱۵ نشان داده می‌شود.

$$\text{Rel}^i = \frac{N_{(D_t^i=0)}}{N}; \quad 0 \leq \text{Rel}^i \leq 1 \quad (15)$$

که در آن  $N_{(D_t^i=0)}$  عدد مربوط به تعداد دفعاتی است که نیاز کاربر (بخش)  $i$  ام به طور کامل تأمین شده است  $(D_t^i=0)$ .  $N$  تعداد کل گام‌های زمانی در طول دوره شبیه‌سازی می‌باشد. برگشت‌پذیری سیستم در اینجا بر اساس تعداد دفعاتی که در طول دوره شبیه‌سازی، سیستم از حالت شکست به حالت مطلوب برگشته به تعداد کل گام‌های زمانی که در آنها سیستم با کمبود مواجه بوده است  $(D_t^i>0)$ ، تعریف شده است و با رابطه ۱۶ نمایش داده می‌شود.

$$\text{Res}^i = \frac{\text{Number of times } D_t^i=0 \text{ after } D_t^i>0}{\text{Number of times } D_t^i>0 \text{ occurred}}; \quad 0 \leq \text{Res}^i \leq 1 \quad (16)$$

آسیب‌پذیری به صورت نسبت مجموع کل کمبودها به تعداد دفعاتی که در آنها کمبود اتفاق افتاده تقسیم بر کل نیاز کاربر  $i$  ام در طول دوره مورد بررسی تعریف گردیده است و رابطه‌ای مطابق رابطه ۱۷ را دارا می‌باشد. ماکزیمم کمبود، به عنوان بدترین کمبود اتفاق افتاده در طول سال برای کاربر  $i$  ام تعریف می‌شود. برای تعریف یک معیار بی‌بعد، این مقدار به نیاز سالانه کاربر (بخش) تقسیم شده که مطابق رابطه ۱۸ تعریف می‌شود.

$$\text{Vul}^i = \frac{\sum_{D_t^i>0} D_t^i}{\sum_{t=1}^N \text{Demand}_t^i}; \quad 0 \leq \text{Vul}^i \leq 1 \quad (17)$$



### ۳- نتایج و تحلیل نتایج

نتایج محاسبات روش ورودی-خروجی بیلان و در نتیجه شاخص استفاده پایدار از منابع آب برای حوضه مورد نظر در جدول ۴ نشان داده شده است.

مقدار محاسبه شده برای شاخص SUI، مقداری بالاتر از متوسط را نشان می‌دهد. جهت محاسبه شاخص SGI به کمک خروجی‌های مدل شبیه‌سازی و به کارگیری آنها در روابط ارائه شده جهت محاسبه‌ی این شاخص، ابتدا هریک از معیارهای عملکرد درگیر در شاخص پایداری SI و سپس این شاخص برای هر کدام از نیازها و در نهایت شاخص پایداری گروهی SGI برای کلیه نیازها مطابق جدول ۵ بدست آمد.

سپس با به کارگیری خروجی‌های مدل شبیه‌سازی در روابط ارائه شده برای شاخص پایداری PI، محاسبات این شاخص انجام شده و نتایج در جدول ۶ آورده شده است. جهت ارزیابی اثر مقایسه دو به دوی معیارها بر روی وزن آنها تحلیل حساسیت شده است و شاخص مذکور هم به ازای وزن‌های محاسبه شده از AHP و هم به ازای وزن ثابت و مساوی برای هر کدام از پارامترها محاسبه شده است.

نشان داده می‌شود، در قالب رابطه ۲۱ تعریف می‌شود. این شاخص‌ها، برای تعیین اهمیت‌شان در ارزیابی وضعیت پایداری سیستم‌های منابع آب وزن‌دهی شدند. این امر در قالب طرح چندین سؤال و تکمیل آن توسط افراد متخصص نزدیک به مؤلفین انجام شد. سؤالاتی از قبیل در نظرگیری عوامل بیلان آب، پویایی تأمین و تخصیص آب، توجه به آب زیرزمینی، توجه به تفکیک نیاز بخش‌های مختلف برای رتبه بندی شاخص‌ها مطرح گردید و سپس با توجه به ارزیابی نظری هر شاخص وزن هر یک مشخص شد.

$$HSI = w_{SUI} \times SUI + w_{SGI} \times SGI + w_{PI} \times PI \quad (21)$$

که در رابطه فوق HSI شاخص ترکیبی پایداری، SUI شاخص استفاده پایدار از منابع آب، SGI شاخص پایداری گروهی و PI شاخص ارزیابی توسعه پایدار می‌باشند.  $w_{SUI}$  وزن مربوط به شاخص SUI،  $w_{SGI}$  وزن مربوط به شاخص SGI و  $w_{PI}$  وزن محاسبه شده برای شاخص PI می‌باشند. اگر چه روش استفاده شده ساده می‌باشد ولی از انعطاف پذیری لازم جهت ملحوظ نمودن قوت‌های هر شاخص و اهمیت نسبی آنها در یک منطقه برخوردار است.

جدول ۴- محاسبات ورودی-خروجی بیلان برای حوضه آبریز اهر چای (سال آبی ۱۳۹۰)

<i>PrI</i>	<i>SrI</i>	<i>TR = TU</i>	<i>GAA</i>	<i>TWFU</i>	<i>NA</i>	<i>WPI</i>	<i>SUI</i>
۷۳۴/۱۱	۶۴/۰۴	۷۹۸/۱۱	۷۷۱/۰۹	۲۶۳/۴۵	۵۰۷/۶۴	۰/۳۴	۰/۶۶

جدول ۵- شاخص پایداری SGI برای حوضه آبریز اهر چای (سال آبی ۱۳۹۰)

نیاز آبی	اطمینان پذیری	برگشت پذیری	آسیب پذیری	بیشینه کمبود	SI	وزن	SGI
شرب شهر اهر	۰/۹۲	۱/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۹۷	۰/۱۸۹	۰/۵۹
کشاورزی	۰/۴۲	۰/۱۴	۰/۰۰۲	۰/۰۰۴	۰/۵۰	۰/۷۸	
معدن مس سونگون	۰/۵۰	۰/۱۷	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۵۳	۰/۰۳	

جدول ۶- شاخص پایداری PI برای حوضه آبریز اهر چای (سال آبی ۱۳۹۰)

پارامتر	مقدار محاسبه شده	وزن‌های مساوی	PI (وزن=۰/۲۵)	وزن‌های محاسبه شده	PI
A	۰/۴۲	۰/۲۵	۰/۶۵	۰/۳۸۵	۰/۶۲
B	۰/۴۴			۰/۱۵۴	
C	۰/۹۲			۰/۱۹۲	
D	۰/۸۱			۰/۲۶۹	

اعداد محاسبه شده حاکی از حساسیت کم شاخص پایداری PI به ازای تغییر وزن آنها می‌باشد. مقدار این شاخص از نظر کمی همواره عددی بین صفر و یک می‌باشد. هر چقدر که مقدار شاخص بزرگ‌تر بوده و به یک نزدیک‌تر باشد، نشان از پایداری بیشتر شرایط دارد. با استناد به این موضوع شاخص محاسبه شده با این روش مقداری بالاتر از متوسط را برای منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. در ادامه شاخص ترکیبی پایداری منابع و مصارف آب برای حوضه آبریز اهرچای و برای سال آبی ۱۳۹۰ مطابق رابطه ۲۱ محاسبه شد. نتایج محاسبات در جدول ۷ نشان داده شده است.

**جدول ۷- شاخص ترکیبی HSI برای حوضه آبریز اهرچای (سال آبی ۱۳۹۰)**

شاخص	مقدار محاسبه شده	وزن‌های محاسبه شده	HSI
SUI	۰/۶۶	۰/۳۲۵	۰/۶۲
SGI	۰/۵۹	۰/۲۷۵	
PI	۰/۶۲	۰/۴۰۰	

نتایج، نشان‌دهنده نزدیکی سه شاخص به یکدیگر با وجود رویکردهای مختلف قابل توجه در محاسبه آنها است. مقدار HSI تاحدی تغییرات در سه شاخص را تعدیل می‌نماید و می‌توان با اطمینان‌پذیری بیشتری از آن استفاده نمود. نحوه استفاده از شاخص HSI در برنامه‌ریزی می‌تواند با محاسبه آن برای سال‌های مختلف و تعیین محدوده تغییرات و همبستگی آن نسبت به آب قابل برنامه‌ریزی و برداشتها توسعه داده شود. در صورت ایجاد این ساختار، می‌توان حد قابل قبولی برای شاخص پایداری ترکیبی در یک منطقه رقم زد و با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف آب قابل برنامه‌ریزی مورد انتظار، مقادیر متناظر برداشت (مصرف) را برای حفظ حد شاخص پایداری ترکیبی و یا بهبود آن تعیین و در برنامه‌ریزی‌های کوتاه و میان‌مدت به کار برد.

#### ۴- جمع بندی

علیرغم تلاش‌های بسیاری که در جهت لحاظ کردن مفاهیم پایداری در توسعه سیستم‌های آبی صورت گرفته است، متأسفانه این فعالیت‌ها موفقیت‌های چندانی به دنبال نداشته است چرا که تعاریف کمی واحدی برای این مفاهیم ارائه نشده است که نشان‌دهنده نیاز به تفکر بیشتر در مورد این شاخص‌ها است. در این مطالعه به بررسی پایداری منابع و مصارف آب با یک رویکرد سه گانه برای حوضه آبریز

اهرچای برای سال آبی ۱۳۹۰ پرداخته شده است و شاخص پایداری ترکیبی تأمین و تقاضای آب با ترکیب سه شاخص پایداری محاسبه شده برای منطقه مورد مطالعه بدست آمد. در روش اول، شاخص SUI در حوضه ی آبریز اهرچای ۰/۶۶ بدست آمد که هرچند وضعیت متوسطی را نشان می‌دهد، بیانگر تعادل چندان پایداری بین آب موجود و آب مصرفی نمی‌باشد. در روش دوم شاخص پایداری SGI ۰/۵۹ بدست آمد که مجدداً وضعیت متوسطی را نشان می‌دهد. در روش سوم شاخص پایداری PI که شامل پارامترهایی هست که هم به تأمین نیاز و هم به مطلوبیت منابع توجه دارد برابر با ۰/۶۲ بدست آمده است. این عدد بیانگر حد متوسطی از تعادل بین عرضه و تقاضا می‌باشد ولی پایداری مطمئنی را نشان نمی‌دهد. نکته جالب توجه نزدیکی سه شاخص به یکدیگر با وجود برخورد متفاوت در محاسبه آنها می‌باشد. در نهایت شاخص ترکیبی مورد نظر به صورت یک شاخص وزنی با نسبت دادن وزنی به هرکدام از شاخص‌ها که بر اساس قضاوت مهندسی انجام شد، بدست آمد. مقدار عددی این شاخص برای حوضه آبریز اهرچای برابر با ۰/۶۲ بدست آمد. چنانچه این شاخص برای سال‌های خشک و تر محاسبه گردد، می‌توان نسبت به مناسب بودن این حد پایداری اظهار نظر نمود و برای بهبود آن برنامه‌ریزی کرد. ساختار تهیه شده با توجه به توضیحات تکمیلی در بخش تحلیل نتایج می‌تواند ساز و کار لازم برای استفاده از این شاخص در برنامه‌ریزی با توجه به آب قابل برنامه‌ریزی مورد انتظار فراهم سازد.

#### ۵- تشکر و قدردانی

این مقاله نسخه تکمیل و داوری شده مقاله ارائه شده در ششمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران می‌باشد. این کنفرانس در اردیبهشت ماه سال ۱۳۹۵ در شهر سمنان برگزار شد.

#### پی‌نوشت‌ها

1. Physical Input-Output Table
2. Reliability
3. Resiliency
4. Vulnerability
5. Sustainable Development Assessment Index
6. Hybrid Drought Index
7. Water Evaluation And Planning
8. Drive-Pressure-Status-Impact-Response
9. Analytic Hierarchy Process
10. Sustainable Use Index
11. Sustainability Group Index
12. Hybrid Sustainability Index

- Biennial Conference of Community of Environmental Professionals of Iran (In Persian)
- Karamouz M (2008) Updating the state of water supply and demand and drought management in the Aharchay watershed, University of Tehran-East Azerbaijan Regional Water Board Authority, East Azerbaijan, Iran, 350 pp (In Persian)
- Karamouz M, Rasouli K, Nazif S (2009) Development of a hybrid index for drought prediction: case study. *Journal of Hydrologic Engineering*, 14(6), 617-627
- Loucks DP (1997) Quantifying trends in system sustainability. *Hydrological Science Journal*, 42(4), 513-530
- Nayak PC, Wardlaw R, Kharya AK (2015) Water balance approach to study the effect of climate change on groundwater storage for Sirhind command area in India. *International Journal of River Basin Management* 13(2):243-261
- OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) (1993) Environmental indicators: basic concepts and terminology. Background paper No. 1. OECD, Paris, 150 pp
- Safavi HR, Golmohamadi MH (2016) Evaluating the water resource systems performance using fuzzy reliability, resilience and vulnerability. *Iran-Water Resources Research* 12(1):68-83 (In Persian)
- Sandoval-Solis S, McKinney DC, Loucks DP (2011) Sustainability index for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management* 137(5):381-390
- Sun S, Wang Y, Liu J, Cai H, Wu P, Geng Q, Xu L (2016) Sustainability assessment of regional water resources under the DHSIR framework. *Journal of Hydrology*, 532, 140-148
- TCEQ–Texas Commission on Environmental Quality (2007) Water availability. Technical Report
- Vigerstøl KL (2003) Drought management in Mexico's Rio Bravo basin, Doctoral Dissertation, University of Washington, Seattle, WA
13. Primary Inputs
  14. Atmospheric Precipitation
  15. Influent From Outside
  16. Secondary Inputs
  17. Internal Transfer Inflows
  18. Nonirrigation Backflows On Underground Waters And Rivers
  19. Irrigation Backflows On Underground Waters
  20. Total Resources
  21. Total Uses
  22. Gross Annual Availabilities
  23. Total Internal Outflows
  24. Total Withdrawals and Final Uses
  25. Primary Withdrawals
  26. Natural Outflow
  27. Real Evaporation
  28. Net Accumulation
  29. Water Withdrawal Pressure
  30. Organization For Economic Co-Operation And Development

## ۶- مراجع

Ahmadi B (2011) A climate driven model for increased in water productivity of agricultural sector. Master Thesis, University of Tehran, Tehran, Iran (In Persian)

Aras river basin master plan (2016) Evaluation of water resources report, Lar Consulting Engineering Company, Azerbaijan regional water board authority, East Azerbaijan, Iran (In Persian)

Gasco G, Hermosilla D, Gasco A, Nardeo JM (2005) Application of a physical input–output table to evaluate the development and sustainability of continental water resources in Spain. *Elsevier, Environmental Management*, 36(1):59–72

Hashimoto T, Stedinger JR., Loucks DP (1982) Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resources performance evaluation. *Water Resour. Res.* 18:14–20

Karamouz M, Nazif S, Ahmadi A (2006) Sustainability indexes in water resources management. 6th