2020, Vol.7, No.1, Pages 49 to 60
Journal of Water and Sustainable Development

سال هفتم، شماره ۱، ۱۳۹۹، صفحات ۴۹ تا ۶۰
نشریه آب و توسعه پایدار

Article Type: Conceptual

نوع مقاله: مفهومی

A Framework for Indicator-Based Water Sustainability Assessment

S. Samani[1*], R. Roozbahani[2], A. Kavoosi Heydari[3], H. Kardan Moghaddam[4]

1,2,3&4- PhD in Hydrogeology, PhD in Water Management, PhD in Hydrogeology & PhD in Water Engineering, Research Assistant Professor, Water Research Institute, Ministry of Energy, Tehran, Iran.

*(Corresponding Author Email: : s.samani@wri.ac.ir)

Received: 26-05-2019
Accepted: 19-10-2019

ارائه چارچوب ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی از طریق شاخص

سعیده سامانی[۱*]، رضا روزبهانی[۲]، علیرضا کاوسی حیدری[۳]، حمید کاردان مقدم[۴]

۱، ۲، ۳ و ۴- به ترتیب دکتری هیدروژئولوژی، دکتری منابع آب، دکتری هیدروژئولوژی و دکتری مهندسی آب، استادیار پژوهشی، موسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران.

*(نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: s.samani@wri.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۳/۰۵
تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۷/۲۷

Abstract

In order to preserve aquifers, their sustainability assessment against current and future stresses is of vital importance. For this purpose, groundwater sustainability indicators are introduced as measurable variables to provide groundwater system information in a comprehensive way. The indicators can be also served as useful tools to assess sustainability of these natural resources. It should be noted that these indicators are applied to identify sustainability over time (exploitation period) and are not designated to resolve the problem. Every sustainability indicator describes a specific aspect of groundwater systems. These indicators assess groundwater resources sustainability, based on the measurable data to provide information on the quantity and quality of the resources (status and current trends), as well as focusing on social (groundwater accessibility, exploitation and utilisation), environmental (vulnerability and pollution), political, economic, and managerial aspects of the resources. The main objective of this paper is to set up a framework to evaluate the sustainability of groundwater resources, in order to ensure the implementation of sustainable groundwater management across the country and to inform the decision and policymakers on the state of sustainability for a specified groundwater resource. In this regard, 21 indicators are presented in the framework of DPSIR in six categories of quantity and quality, environmental, social, economic, and political aspects of groundwater. With the purpose of integrating the indicators to reach the final number of sustainability, the categorical scaling method has been used with a minimum score of zero (least stable) and a maximum score of 100 (maximum sustainability), and each indicator is divided into five categories.

Keywords: Sustainability assessment, Indicators, Development and exploitation, Groundwater resource.

چکیده

به منظور حفظ و بقای آبخوان‌ها، ارزیابی پایداری آن‌ها در برابر وقایع و تنش‌های کنونی و آینده، ضروری است. بدین منظور شاخص‌های پایداری منابع آب زیرزمینی به عنوان متغیرهای قابل اندازه‌گیری جهت ارائه اطلاعات مربوط به وضعیت سیستم آب زیرزمینی به صورت قابل درک، معرفی می‌گردند. لازم به ذکر است که شاخص‌های پایداری ابزار بسیار مفید برای پایش و ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی در طول زمان (دورهٔ بهره‌برداری) هستند و برای حل مشکل ناپایداری به کار نمی‌روند. هر کدام از شاخص‌های پایداری آب زیرزمینی یک جنبه خاص از سیستم‌های آب زیرزمینی را توصیف می‌کند. این شاخص‌ها، در ارزیابی پایداری آب زیرزمینی بر اساس داده‌های قابل اندازه‌گیری و قابل مشاهده، اطلاعاتی در مورد کمیت و کیفیت منابع آب زیرزمینی (وضعیت و روند موجود) را ارائه می‌دهند و بر روی مسائل اجتماعی (دسترسی آب زیرزمینی، بهره‌برداری و استفاده)، محیط‌زیست (آسیب‌پذیری و آلودگی) و جنبه‌های سیاسی و اقتصادی مدیریت منابع آب زیرزمینی تمرکز دارند. هدف اصلی از این مقاله ارائه چارچوبی جهت ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی در راستای اطمینان از اجرای مدیریت پایدار آب زیرزمینی در سراسر کشور و مطلع کردن تصمیم‌گیرندگان و توسعه‌دهندگان سیاست در مورد وضعیت پایداری آب‌های زیرزمینی می‌باشد. در این راستا ۲۱ شاخص در ۶ بخش کمی آب زیرزمینی، کیفی آب زیرزمینی، محیط‌زیستی، اجتماعی، اقتصادی و سیاسی در قالب چارچوب DPSIR ارائه شده است. جهت یکسان‌سازی نتایج شاخص‌ها و ادغام شاخص‌ها برای رسیدن به عدد نهایی پایداری، از روش مقیاس طبقه‌بندی با حداقل امتیاز صفر (کمترین پایداری) و حداکثر امتیاز صد (بیشترین پایداری) استفاده گردیده است و هر شاخص به پنج دسته طبقه‌بندی شده است.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی پایداری، شاخص، توسعه و بهره‌برداری، منابع آب زیرزمینی.

DOI: 10.22067/jwsd.v7i1.80946

مقدمه

آب‌های زیرزمینی در بسیاری از مناطق جهان مهم‌ترین منبع تأمین آب هستند که برای مصرف آب شرب، کشاورزی، صنعت و اکوسیستم‌های مرتبط به کار می‌روند. با این حال، فقدان کنترل فعالیت‌های انسانی بر روی آن و تغییرات اقلیمی می‌تواند باعث تخریب این منابع با ارزش گردد. از سوی دیگر، تغییرات کمیت و کیفیت آب زیرزمینی در روندی بسیار آهسته و نامشهود صورت می‌گیرد. بنابراین، ارزیابی رفتار سیستم آبخوان و تغییرات آن در زمان، چالشی غیرقابل اجتناب برای اطمینان از استفادهٔ آب‌های زیرزمینی در یک مسیر پایدار است. با توجه به پتانسیل و اطمینان‌پذیری منابع آب زیرزمینی جهت تأمین آب، بخصوص در مناطق خشک کشور، بهره‌برداری از این منابع در دو دههٔ اخیر رشد شایانی داشته است. این افزایش برداشت به همراه عدم مدیریت صحیح، مشکلات متعدد کمی و کیفی در کشور از جمله افت سفره و کاهش حجم آبخوان (Du و همکاران، ۲۰۱۳؛ Campos-Gaytan و همکاران، ۲۰۱۴)، کاهش کیفیت آب (Zhai و همکاران، ۲۰۱۳؛ Pophare و همکاران، ۲۰۱۴)، تهاجم جبهه‌های آب شور ساحلی و کویری (Werner و همکاران، ۲۰۱۳؛ Kardan moghaddam و Banihabib، ۲۰۱۷)، افزایش هزینه‌های استحصال آب و نشست زمین (Zhang و همکاران، ۲۰۱۴؛ Jafari و همکاران، ۲۰۱۵) را به همراه داشته است. همچنین بحران منابع آب زیرزمینی، علاوه بر مشکلات بیان شده سبب بروز بحران‌های سیاسی و اجتماعی نیز می‌گردد؛ لذا جهت بهره‌برداری مطمئن از آبخوان بخصوص در شرایط توسعه، شناخت وضعیت فعلی و آتی آبخوان، همچنین ارزیابی وضعیت پایداری آن، بسیار حائز اهمیت است. یکی از معیارهای ارزیابی پایداری و شناخت وضعیت آبخوان، ارائه شاخص است. شاخص یک معیار آماری است که تغییرات نسبی یک یا چند متغیر را نشان می‌دهد. استفاده از شاخص می‌تواند، شناسایی وضعیت سیستم، عوامل تأثیرگذار در شرایط سیستم، تصمیم‌گیری و اولویت‌بندی را برای متولیان آب فراهم سازد (Juwana و همکاران، ۲۰۱۲). به کارگیری شاخص‌های پایداری برای سیستم منابع آب زیرزمینی، شامل شناسایی سیستم، فرآیند انتخاب شاخص، توسعه رابطه شاخص و استفاده واقعی از شاخص برای سنجش ابعاد مختلف پایداری منابع آب زیرزمینی می‌باشد.

شاخص‌های ارزیابی وضعیت پایداری منابع آب زیرزمینی در چند دههٔ اخیر، بسیار مورد توجه برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران این حوزه بوده است. جهت شناسایی و توسعه شاخص‌ها در زمینه کلی ارزیابی منابع آب زیرزمینی در سال ۲۰۰۷، پس از معرفی چارچوب DPSIR توسط سازمان بین المللی، گروهی از کارشناسان و متخصصان از یونسکو، برنامه بین‌المللی هیدرولوژیکی (IHP)[1]، آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA)[2] و انجمن بین‌المللی هیدروژئولوژی (IAH)[3] تشکیل داده شد؛ این گروه مجموعه‌ای از شاخص‌های آب زیرزمینی را، توسعه دادند (Lipponen، ۲۰۰۷). در ضمن در سال ۲۰۱۰، کمیته مدیریت آب (WMC)[4] شرکت مشاوره زمین‌شناسی Gordon را برای توسعه رویکرد مقدماتی و ارائه چارچوب جهت ارزیابی پایداری آب‌های زیرزمینی به کار گرفت (Gordon، ۲۰۱۱). همه این شاخص‌ها یک هدف مشابه برای اندازه‌گیری پایداری دارند که می‌تواند برای کمک به تصمیم گیرندگان و سایر ذینفعان در دستیابی به پایداری استفاده شود. علاوه بر این، شاخص‌ها می‌توانند برای ارزیابی میزان پیشرفت پایداری، مورد استفاده قرار گیرند. شاخص‌های ارزیابی منابع آب زیرزمینی ارائه شده در منابع مختلف روی کمیت منابع آب زیرزمینی، بیلان، کاهش سطح آب زیرزمینی، حجم بهره‌برداری، تغذیه آب زیرزمینی، ارتباط آب‌های زیرزمینی با آب‌های سطحی، به علاوه فاکتورهای مربوط به کیفیت، آلودگی و دمای آب زیرزمینی، آسیب‌پذیری ذاتی، وسعت آلودگی، وضعیت شبکه پایش (تراکم چاه‌های مشاهداتی)، وابستگی جمعیت به منابع آب زیرزمینی، تنوع زیستی و فعالیت‌های بیولوژیکی، تغییر در کاربری زمین، فرونشست زمین و ردپای آب زیرزمینی، متمرکز هستند (Hosseini و همکاران، ۲۰۱۹؛ Anbazhagan و jothbasu، ۲۰۱۶؛ Senent-Aparicio و همکاران، ۲۰۱۵؛ Mattas و همکاران، ۲۰۱۴) .به عنوان مثال شاخص زیربنایی پایداری آب زیرزمینی (GSII)[5] توسط Pandey و همکاران در سال ۲۰۱۱ به عنوان ابزاری برای ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی تعریف شده است. Bui و همکاران در سال ۲۰۱۶، یک سری شاخص‌های محیط‌زیستی را جهت ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی معرفی نموده‌اند. Bui و همکاران در سال ۲۰۱۸ در تحقیقی دیگر به ارزیابی پایداری اجتماعی منابع آب زیرزمینی از طریق معرفی یک سری شاخص در این زمینه پرداخته‌اند. با این وجود شاخص‌های ارائه شده به ندرت به صورت هدفمند و در قالب یک چارچوب کلی برای ارزیابی وضعیت پایداری منابع آب زیرزمینی به کار گرفته شده‌اند.

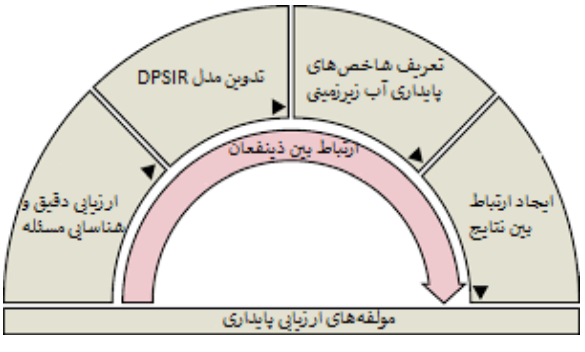
جمع‌بندی مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که در ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی باید پنج هدف اصلیِ جلوگیری از کاهش منابع آب زیرزمینی (کمیت آب‌های زیرزمینی)، حفاظت آب‌های زیرزمینی از آلودگی (کیفیت آب زیرزمینی)، حفاظت از حیات اکوسیستم، دستیابی به رفاه اقتصادی و اجتماعی و اعمال مدیریت مناسب، دنبال گردد (Gordon، ۲۰۱۱). هدف اصلی این مقاله، ارائه چارچوبی جهت ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی مبتنی بر شاخص، جهت ارزیابی توسعه و بهره‌برداری پایدار از این منابع است. محاسبه این شاخص‌ها امکان اطمینان از اجرای مدیریت پایدار آب زیرزمینی در سراسر کشور و مطلع کردن تصمیم‌گیرندگان و توسعه دهندگان سیاست در مورد وضعیت پایداری آب‌های زیرزمینی را فراهم می‌نماید. در این راستا شاخص‌های ارزیابی پایداری جهت بررسی کمیت،

کیفیت، امنیت و پایداری منابع آب زیرزمینی به عنوان یک منبع استراتژیک برای زندگی (برای مصارف شرب و سایر اهداف بهداشتی) و توسعه اقتصادی (به عنوان مثال کشاورزی، صنعت) و مولفه مهم در بهبود اکوسیستم طبیعی، معرفی می‌گردد. این چارچوب ارزیابی پایداری به عنوان یک ابزار جهت سنجش میزان موفقیت پروژه‌های طرح احیا و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی کشور (که مشتمل بر ۱۵ پروژه اجرائی است و در جلسه پانزدهم شورای عالی آب کشور در تاریخ ۲۵ شهریور ۱۳۹۳ تصویب و سپس عملیاتی گردیده) قابل کاربرد است.

مواد و روش‌ها

• معرفی چارچوب ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی

مهندسین مشاور Gordon (۲۰۱۱) اولین بار روش GSAA[۶] را برای ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی معرفی نموده‌اند (شکل ۱). در طرح پیشنهادی ایشان، شناسایی و کمی نمودن شاخص‌ها به عنوان نقطه اصلی برای ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی در نظر گرفته شده است.



شکل ۱- مولفه‌های ارزیابی پایداری

مراحل و چارچوب ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی به شرح زیر بیان می‌شود:

۱- ارزیابی دقیق[۷] و شناسایی مسئله[۸]: این مرحله به عنوان نقطه شروع در ارزیابی، جهت توصیف وضعیت فعلی مهم است. در توصیف وضعیت فعلی، باید یک رابطه بین موقعیت موجود و هر یک از پنج هدف پایداری آب زیرزمینی، برقرار گردد. در این مرحله از ارزیابی در نظر گرفتن خطرات احتمالی و اولویت‌های اجرایی، می‌تواند مفید واقع شود.

۲- تدوین مدل DPSIR (نیروی محرکه- فشار-وضعیت- تأثیر- پاسخ)[۹]: تدوین یک چارچوب جهت سازمان‌دهی اطلاعات و اجرای پروژه‌های ارزیابی پایداری آب زیرزمینی ضروری می‌باشد. مدل DPSIR، یک چارچوب مفید برای تهیه یک مدل منطقی به منظور ارزیابی و پایش پایداری منابع آب در طول زمان می‌باشد(Kristensen، ۲۰۰۳) (شکل ۲). اجزای مدل DPSIR شامل موارد زیر است (Lipponen، ۲۰۰۷):

- **شاخص نیروی محرکه (D):** شاخصی است که تحولات اجتماعی، جمعیتی و اقتصادی در جوامع و تأثیرات آن را روی شیوه زندگی، سطح کلی مصرف و الگوهای تولید را توصیف می‌کند. گزینه‌های مدیریتی جدید اعمال شده در راستای بهبود وضعیت، تغییر اقلیم و رشد جمعیت، به عنوان نیروی محرکه در سیستم آبخوان محسوب می‌شوند.
- **شاخص فشار (P):** این شاخص تحولات مرتبط با فعالیت‌های انسانی که از منابع آب زیرزمینی استفاده می‌کنند و منجر به ورود آلاینده‌ها به منابع آب زیرزمینی می‌شود را شرح می‌دهد. افزایش تقاضا، تغییر سطح آب زیرزمینی و تغییر کیفیت آب زیرزمینی به عنوان عوامل فشار بر آبخوان محسوب می‌شوند.
- **شاخص وضعیت (S):** شاخصی است که آب‌های زیرزمینی را از لحاظ پدیده‌های فیزیکی، بیولوژیکی و شیمیایی در یک منطقهٔ خاص توصیف می‌کند. در این مرحله از مدل، از طریق محاسبه شاخص‌ها، وضعیت فیزیکی و شیمیایی محدودهٔ مطالعاتی مشخص می‌گردد.
- **شاخص تأثیر (I):** شاخصی است که تأثیر تغییرات در وضعیت پایداری سیستم‌های آب زیرزمینی را توضیح می‌دهد.
- **شاخص پاسخ (R):** شاخصی است که به واکنش گروه‌ها و افراد جامعه و نیز تلاش‌های دولت برای جلوگیری، جبران، بهبود و یا سازگاری با تغییرات در وضعیت سیستم‌های آب زیرزمینی، اشاره دارد.

جهت روشن شدن این مدل در قالب یک مثال می‌توان آن را تدوین کرد: در صورتی که در یک آبخوان بعد از محاسبهٔ شاخص‌های پایداری، از لحاظ کمی وضعیت ناپایدار تشخیص داده شود، در طرح مدیریتی پایدار، به عنوان مثال اعمال طرح تغذیه مصنوعی می‌تواند به عنوان یک گزینه مدیریتی جدید پیشنهاد گردد. این طرح مدیریتی جدید در مدل DPSIR به عنوان شاخص نیروی محرکه در نظر گرفته می‌شود. بعد از اعمال طرح پیشنهادی، جهت مشاهده میزان موفقیت طرح در طول زمان، نیاز به محاسبه مجدد شاخص‌های پایداری می‌باشد. از طریق شاخص‌های معرف فشار، میزان تغییرات اعمال شده در آبخوان تحت تأثیر طرح تغذیه مصنوعی، از طریق شاخص‌های وضعیت، تعیین وضعیت فیزیکی و شیمیایی محدوده مطالعاتی در طول زمان، از طریق شاخص‌های تأثیر، میزان تأثیر تغییرات در دستیابی به پایداری آبخوان، سنجیده می‌شود. در صورت مشاهده وضعیت پایداری، گزینه مدیریتی اعمال شده به عنوان گزینهٔ مناسب تلقی شده و پایش پایداری در طول زمان جهت اطمینان از دستیابی و حفظ وضعیت مطلوب، ادامه پیدا خواهد کرد و در غیر این صورت نیاز به اعمال طرح جدید مدیریتی و شروع مجدد چرخه در ارزیابی وضعیت پایداری می‌باشد.

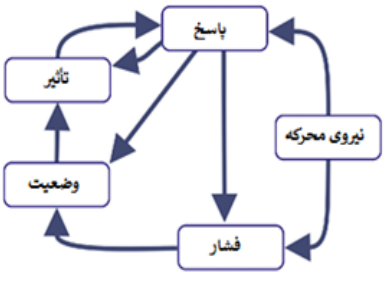
۳- تعریف شاخص‌های پایداری آب زیرزمینی: شاخص‌های پایداری برای هر جزء از چارچوب مدل DPSIR قابل تعریف می‌باشند. از طریق پاسخ به سوالات زیر می‌توان شاخص‌های جدید را توسعه داد و آن‌ها را در چارچوب DPSIR به کار برد. وضعیت فعلی آب‌های زیرزمینی چگونه است؟ چرا این وضعیت به وجود آمده است؟ چه اقداماتی برای سیستم مورد نیاز است؟ شاخص‌های وضعیت و تأثیر، جوابگوی سوال اول، شاخص فشار و نیروی محرکه، جوابگوی سوال دوم، و شاخص‌های پاسخ، جوابگوی آخرین سوال خواهد داد. در این مطالعه جهت ایجاد یکپارچگی در شاخص‌ها از روش مقیاس طبقه‌بندی، استفاده شده است. در این روش، برای شاخص‌ها بر اساس معیارهای عددی (ارزش ها از ۱ تا ۵) یا کیفی (مانند "بسیار خوب"، "خوب" یا "ضعیف") مقیاس، تعیین می‌گردد. برای محاسبه امتیاز شاخص‌ها حداقل امتیاز صفر (کمترین پایداری) و حداکثر امتیاز ۱۰۰ (بیشترین پایداری) استفاده شده است و هر شاخص به ۵ دسته طبقه‌بندی شده است.

۴- ایجاد ارتباط بین نتایج: ابزارهای ارتباطی متعددی برای ارتباط نتایج در پروژهٔ ارزیابی پایداری آب وجود دارد که در این جا به دو مورد از آنها اشاره می‌شود:

الف) ترکیب و ادغام ابعاد مختلف شاخص‌های ارزیابی پایداری: شاخص‌ها را می‌توان در یک نمایه ترکیب کرد تا اطلاعات جمع‌بندی شده و هدفمند را برای برنامه‌ریزی، سیاست‌گذاری و مدیریت منابع آب زیرزمینی، فراهم نمایند. این نمایه بدون بعد است و سیستم‌های مختلف وزن‌گذاری و رتبه‌بندی در ساختار آن، قابل اعمال است. این عملکرد منجر به ارائه و انتقال نتایج تحقیق به شیوه‌ای مختصر می‌شود.

ب) استفاده از نقشه، گرافیک و مدل.

۵- ارتباط بین ذی‌نفعان: در چارچوب پروژه ارزیابی پایداری، ذی‌نفعان به عنوان افراد و سازمان‌هایی تعریف می‌شوند که ممکن است تحت تأثیر پروژه قرار گیرند یا اینکه می‌توانند بر اجرای آن تأثیر بگذارند. این گروه شامل افرادی است که در منطقه، مطالعه و زندگی می‌کنند، از جمله اعضای تیم پروژه برنامه‌ریزان، تصمیم‌گیرندگان و مردم هستند. در کل مشارکت ذینفعان باید بخشی از تمام اجزای پروژهٔ ارزیابی پایداری آب زیرزمینی باشد.



شکل ۲- چارچوب DPSIR برای توسعه مدل مفهومی در جهت ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی

• انواع شاخص‌های ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی

از شاخص‌های ارزیابی پایداری برای مشاهده، توصیف، سنجش شرایط واقعی،کمی‌کردن شرایط مورد نظر و مقایسهٔ وضعیت موجود با وضعیت ایده‌آل، استفاده می‌شود. شاخص‌های مزبور می‌توانند نشان‌دهندهٔ وضعیت کمی و کیفی اطلاعات باشند و همچنین می‌توانند برای نشان دادن ابعاد مکانی و زمانی به کار گرفته شوند. این شاخص‌ها به صورت یك دادهٔ ساده، یك متغیر یا یك متغیر ساده منتج از یك الگوریتم پیچیده می‌باشند. در مجموع می‌توان گفت که شاخص‌های مزبور، ابزارهای ارزیابی هستند که ساختار و اطلاعات لازم برای ارزیابی وضعیت منابع آب را در اختیار قرار می‌دهند و به اندازه‌گیری میزان پیشرفت در جهت توسعه پایدار کمك شایانی می‌نمایند. در این مقاله ۲۱ شاخص در ۶ بخش کمی آب زیرزمینی، کیفی آب زیرزمینی، محیط‌زیستی، اجتماعی، اقتصادی و سیاسی در قالب چارچوب DPSIR ارائه شده است. شاخص‌های پیشنهادی، هر کدام بر جنبهٔ خاصی از سیستم و یا فرآیند آب زیرزمینی که بر اساس داده‌های کمی و کیفی پایه‌ریزی شده، تأکید دارند.

۱- شاخص‌های کمی آب زیرزمینی

الف) شاخص سرانه منابع آب زیرزمینی تجدیدپذیر: این شاخص مقدار کل منابع آب زیرزمینی تجدیدپذیر سالانه نسبت به جمعیت را در سطح ملی یا منطقه‌ای نشان می‌دهد. هدف از این شاخص، برآورد میزان آب شرب بهداشتی، آب برای مصارف کشاورزی (به ویژه برای آبیاری)، صنعت و اکوسیستم موجود در یک منطقه مشخص است (Lipponen، ۲۰۰۷).

$$I_{GW_R} = GW_R/\Sigma P \qquad (۱)$$

I_{GW_R}: شاخص سرانه منابع آب زیرزمینی تجدیدپذیر؛ GW_R: مقدار کل سالانه منابع آب زیرزمینی تجدیدپذیر (مترمکعب در سال)؛ ΣP: جمعیت ساکن در محدوده مطالعاتی.

به صورت نسبی، مقادیر بزرگتر این شاخص امکان استفاده بیشتر از منابع تجدیدپذیر برای اهداف توسعه را فراهم می‌کند. در چارچوب این شاخص، نیروی محرکه، رشد جمعیت و تغییرات آب و هوایی است که می‌تواند تأثیرات قابل توجهی در زمینهٔ دسترسی به منابع آب زیرزمینی داشته باشد.

ب) شاخص نسبت میزان برداشت آب به تغذیه آب زیرزمینی: تغذیه طبیعی و مصنوعی از طریق منطقهٔ غیراشباع برای این شاخص به کار برده می‌شود. منابع اصلی تغذیه عبارتند از بارندگی، منابع آب سطحی، تلفات آبیاری و نشت آب از سیستم توزیع آب، تأمین آب شهری و سیستم‌های جمع‌آوری پسماندها. برداشت کل آب‌های زیرزمینی به معنی خروج آب از یک آبخوان با استفاده از چاه، قنات، چشمه و سایر روش‌ها برای هدف تأمین آب عمومی برای استفاده کشاورزی، صنعتی و دیگر مصارف است (Lipponen، ۲۰۰۷).

$$I_{Ab/R} = (\Sigma Ab/\Sigma R) \times 100 \qquad (۲)$$

$I_{Ab/R}$: شاخص میزان برداشت و تغذیه آب زیرزمینی؛ ΣAb: مجموع برداشت منابع آب زیرزمینی (مترمکعب در سال)؛ ΣR: مجموع تغذیه منابع آب زیرزمینی (مترمکعب در سال).

سه سناریو برای تفسیر مقادیر این شاخص پیشنهاد شده است: سناریوی اول میزان برداشت کمتر از میزان تغذیه و میزان این شاخص کمتر از ۱۰۰ درصد باشد (وضعیت پایداری)؛ سناریوی دوم میزان برداشت بیشتر از میزان تغذیه و میزان شاخص بیشتر از ۱۰۰ درصد باشد (وضعیت ناپایداری)؛ و در سناریوی سوم میزان برداشت برابر با تغذیه باشد و میزان این شاخص ۱۰۰ درصد باشد، لازم به ذکر است که سناریوی برداشت برابر با تغذیه به معنای توسعه پایدار آب زیرزمینی نیست (امتیازات مربوط به این شاخص در جدول (۱) ارائه شده است).

ج) شاخص سهم آب زیرزمینی در تأمین سایر مصارف آب: این شاخص میزان مشارکت آب‌های زیرزمینی در تأمین آب را برای همهٔ موارد کاربری بیان می‌کند، یعنی میزان تقاضای آب‌های زیرزمینی در مقایسه با کل آب‌های موجود (آب‌های سطحی و زیرزمینی) مورد مقایسه قرار می‌گیرد (Lipponen، ۲۰۰۷).

$$I_{GWs} = [\Sigma Ab/(\Sigma GW + \Sigma S)] \times 100 \quad (۳)$$

I_{GWs}: شاخص سهم آب‌های زیرزمینی در تأمین آب برای همه موارد کاربری؛ ΣAb: مجموع برداشت منابع آب زیرزمینی برای همه موارد کاربری(مترمکعب در سال)؛ ΣGW: مجموع منابع آب زیرزمینی موجود (مترمکعب در سال)؛ ΣS: مجموع منابع آب سطحی موجود (مترمکعب در سال).

در این شاخص مقادیر کمتر از ۲۵٪، سهم کم آب زیرزمینی، ۲۵ تا ۵۰٪، سهم متوسط و مقادیر و بیش از ۵۰٪، سهم بالای آب زیرزمینی در تأمین آب را نشان می‌دهد (Hirata و همکاران، ۲۰۰۷).

د) شاخص تغییر در ذخیره آب زیرزمینی در مقایسه با دو دورهٔ کوتاه‌مدت و بلندمدت: از دیدگاه کمی، در مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی، کاهش سطح پیزومتریک که منجر به تغییر در ذخیره آب زیرزمینی می‌شود، باید مورد بررسی قرار گیرد (Senent-Aparicio و همکاران، ۲۰۱۵). بررسی تغییر در ذخیره آب زیرزمینی در آبخوان در این شاخص، از مقایسه میانگین سطح آب زیرزمینی در یک دوره کوتاه‌مدت و در یک دوره بلندمدت، صورت می‌گیرد. در این مقایسه دو وضعیت ممکن است حاصل شود، در وضعیت اول میانگین سطح آب زیرزمینی در یک دوره بلندمدت بیشتر از میانگین سطح آب زیرزمینی در یک دوره کوتاه‌مدت باشد، که در این صورت محاسبه شاخص از رابطه (۴) انجام می‌شود و در حالت برعکس آن، محاسبه شاخص از طریق رابطه (۵) انجام می‌گیرد.

$$If\ \overline{H}_S < \overline{H}_L \quad I(\Delta H)_1 = \frac{\overline{H}_S - H_{Lmin}}{\overline{H}_L - H_{Lmin}} \times 100 \quad (۴)$$

$$If\ \overline{H}_S \geq \overline{H}_L \quad I(\Delta H)_2 = \frac{\overline{H}_S - \overline{H}_L}{H_{Lmax} - \overline{H}_L} \times 100 \quad (۵)$$

$\overline{H}_S$: میانگین سطح آب زیرزمینی در یک دوره کوتاه‌مدت؛ $\overline{H}_L$: میانگین سطح آب زیرزمینی در یک دوره بلندمدت؛ H_{Lmin}: حداقل سطح آب زیرزمینی در دوره طولانی‌مدت؛ H_{Lmax}: حداکثر سطح آب زیرزمینی در دوره طولانی‌مدت.

ه) شاخص آسیب‌پذیری تأمین منابع آب زیرزمینی: این شاخص براساس روند عمومی تغییرات سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای تعیین می‌شود. در این شاخص از روند تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی به عنوان یک شاخص آبی، با تعیین اینکه چه تعداد از چاه‌ها در حال افزایش سطح است، چه تعداد بدون تغییر است و چه تعداد در حال کاهش سطح است، استفاده می‌شود. از این رویکرد در ارزیابی پایداری منابع آب در کشور کانادا استفاده شده است (Policy Research Initiative، ۲۰۰۷).

$$I_{SV} = [(r+0.5n)/\Sigma W] \times 100 \quad (۶)$$

I_{SV}: شاخص آسیب‌پذیری تأمین منابع آب زیرزمینی؛ r: تعداد چاه‌هایی که سطح آب افزایش داشته است؛ n: تعداد چاه‌هایی که سطح آب تغییری نداشته است؛ ΣW: کل تعداد چاه‌های موجود.

۲- شاخص‌های کیفی آب زیرزمینی

شاخص‌های کیفی آب زیرزمینی منجر به شناخت وضعیت فعلی و روند کیفیت آب‌های زیرزمینی و تجزیه و تحلیل مشکلات کیفیت آب زیرزمینی در مقیاس زمان و مکان می‌شوند. شاخص‌های مزبور با توجه به استانداردهای آب آشامیدنی، نیازهای آبیاری، استفاده صنعتی و نیز برای شرایط ویژه‌ای از آلودگی‌های طبیعی، توسعه داده شده‌اند. این شاخص‌ها همچنین امکان شناسایی فرایندهایی را که منجر به آلودگی آب های زیرزمینی شده‌اند را فراهم می‌آورند.

الف) شاخص تغییر در کیفیت آب زیرزمینی در مقایسه با دو دورهٔ کوتاه‌مدت و بلندمدت: از این شاخص می‌توان برای بررسی تغییر کیفیت هر کدام از آلاینده‌ها در طول زمان در محیط استفاده نمود. برای تحلیل فشار، در این شاخص، میانگین غلظت آلاینده در طول دورهٔ مطالعه با میانگین طولانی‌مدت مقایسه می‌گردد (Senent-Aparicio و همکاران، ۲۰۱۵).

$$I_{\Delta Q} = \frac{[\overline{P}_S] - [\overline{P}_L]}{[\overline{P}_S]} \times 100 \quad (۷)$$

$I_{\Delta Q}$: شاخص تغییر در کیفیت آب زیرزمینی در مقایسه دو دورهٔ کوتاه‌مدت و بلندمدت؛ $\overline{P}_S$: میانگین غلظت آلاینده در یک دوره کوتاه‌مدت؛ $\overline{P}_L$: میانگین غلظت آلاینده در یک دوره طولانی‌مدت.

ب) شاخص درصد نقاط نمونه‌برداری نسبت به استانداردهای کیفیت: آلودگی منابع آب زیرزمینی به وسیلهٔ نیترات دارای منشأ کشاورزی یکی از جدی‌ترین مسائل محیط‌زیستی و سلامت عمومی است که به دلیل فعالیت‌های کشاورزی حاصل می‌شود. شاخص زیر برای ارزیابی وضعیت کیفی آب زیرزمینی از نظر وجود آلاینده نیترات تعریف شده است. البته لازم به ذکر است که این شاخص قابل کاربرد برای بقیه آلاینده‌ها نیز می‌باشد (Senent-Aparicio و

همکاران، ۲۰۱۵). شاخص مزبور با محاسبهٔ تعداد نقاط نمونه‌برداری، که با مقدار استاندارد (کمتر از ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر) مطابقت دارد، ارزیابی می‌شود (European Commission، ۲۰۰۶).

$$I_{QS}=(\Sigma SSP/\Sigma SP)\times 100 \quad (۸)$$

I_{QS}: شاخص درصد نقاط نمونه‌برداری که با استانداردهای کیفیت در دورهٔ مورد مطالعه مطابقت دارند؛ ΣSSP: تعداد نقاط نمونه‌برداری که غلظت نیترات در آن‌ها کمتر از ۵۰ میلی‌گرم در لیتر است؛ ΣSP: کل تعداد نقاط نمونه‌برداری.

ج) شاخص مشکلات کیفی آب زیرزمینی: شاخص پیشنهادی برای مشکلات کیفی که به صورت طبیعی حاصل می‌شود به صورت زیر تعریف می‌شود (Lipponen، ۲۰۰۷):

$$I_{Qp}=(\Sigma A_{NQp}/\Sigma_A)\times 100 \quad (۹)$$

I_{Qp}: شاخص مشکلات کیفی آب زیرزمینی؛ ΣA_{NQp}: مجموع مساحت محدوده‌هایی که در منطقه مطالعاتی، با مشکل کیفیت آب زیرزمینی تحت تأثیر آلاینده‌های طبیعی مواجه شده‌اند (مترمربع)؛ ΣA: کل مساحت محدوده مطالعاتی (مترمربع).

شاخص پیشنهاد شده برای آب‌های زیرزمینی تحت تأثیر آلودگی انسانی نیز بر اساس رابطه زیر می‌باشد (Lipponen، ۲۰۰۷):

$$I_{Qp}=(\Sigma A_{Qp}/\Sigma_A)\times 100 \quad (۱۰)$$

I_{Qp}: شاخص مشکلات کیفی آب زیرزمینی؛ ΣA_{Qp}: مساحتی از محدوده مطالعاتی که با افزایش غلظت یک متغیر خاص همراه است (مترمربع)؛ ΣA: کل مساحت محدوده مطالعاتی (مترمربع). در این رابطه، مساحتی از محدوده مطالعاتی که با افزایش غلظت یک متغیر خاص همراه است، در نظر گرفته می‌شود. در واقع این مساحت، مجموع تمام مناطقی است، که در طول دوره، افزایش غلظت کلرید، نیترات یا EC در آن‌ها تشخیص داده شده است.

۳- شاخص‌های محیط‌زیستی

بررسی نقش متقابل آب و عوامل زیست‌محیطی، نقش مهمی در دستیابی به توسعه پایدار منابع آب خواهد داشت. برای ارزیابی میزان پایداری آب زیرزمینی از نظر زیست‌محیطی نیز شاخص‌هایی به شرح زیر ارائه شده است.

الف) شاخص آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی: آسیب‌پذیری نوعی خصوصیت نسبی و بدون بعد است و به ویژگی‌های آبخوان، محیط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی بستگی دارد (Antonakos و Lambrakis، ۲۰۰۷). ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی به روش‌های مختلفی صورت می‌گیرد. یکی از روش‌های متداول برای ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان، روش دراستیک است که استفاده از آن بسیار مرسوم است (Vrba و Zaporozec، ۱۹۹۴). در این روش هفت عامل یا مشخصهٔ قابل اندازه‌گیری برای سیستم هیدروژئولوژیکی برآورد می‌شود (Evans و Myers، ۱۹۹۰). این عوامل شامل عمق آب زیرزمینی، تغذیه، محیط آبخوان، محیط خاک، توپوگرافی یا شیب سطح زمین، مواد تشکیل‌دهنده ناحیهٔ غیر اشباع و هدایت هیدرولیکی هستند. بعد از تعیین مناطقی که مستعد آلودگی هستند، از رابطه زیر برای محاسبه شاخص آسیب‌پذیری استفاده می‌شود (Lipponen، ۲۰۰۷):

$$I_V=(\Sigma A_V/\Sigma A)\times 100 \quad (۱۱)$$

I_V: شاخص آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی؛ ΣA_V: مساحتی از محدوده مطالعاتی که پتانسیل آسیب‌پذیری بالایی دارد (مترمربع)؛ ΣA: کل مساحت محدوده مطالعاتی (مترمربع).

ب) شاخص ریسک: در هر ناحیه از محدوده مطالعاتی، نوع استفاده از زمین متغیر می‌باشد و تأثیر آلاینده‌ها بر اساس نوع کاربری در قسمت‌های مختلف، متفاوت است. ترکیب نقشه کاربری اراضی با نقشه میزان آسیب‌پذیری هر مکان، میزان ریسک را به وجود می آورد. تعیین میزان ریسک یعنی مشخص کردن این موضوع که ورود آلودگی در منطقه با توجه به نوع کاربری زمین به چه میزان زیان‌آور است. برای پهنه‌بندی ریسک‌پذیری در یک آبخوان، نیاز به تعیین کاربری اراضی در محدودهٔ آبخوان می‌باشد. در نقشه کاربری اراضی، بالاترین امتیاز به باغات، سپس به زمین‌های کشاورزی، زمین‌های مسکونی، مرتع و در نهایت به جنگل تعلق می‌گیرد. بعد از ادغام این دو نقشه در محیط نرم افزار GIS، بر اساس جدول (۱) می‌توان قسمت‌های مختلف آبخوان را از لحاظ پایداری در زمینهٔ این شاخص امتیازبندی نمود (Remesan و Panda، ۲۰۰۸).

ج) شاخص استرس: این شاخص برای انعکاس انواع فشارهای اعمال شده بر روی اکوسیستم طراحی شده است. با توجه به نظر سازمان همکاری و توسعه اقتصادی، ۶۰ درصد از جریان آب تجدیدپذیر برای سلامت اکوسیستم ضروری است، به همین دلیل در رابطهٔ این شاخص (رابطه ۱۲)، مصرف بالاتر از ۴۰ درصد به عنوان امتیاز صفر در نظر گرفته شده است (Policy Research Initiative، ۲۰۰۷).

$$I_S = [(0.4 -(C/GW_R))/0.4]\times 100 \quad (۱۲)$$

I_S: شاخص استرس؛ C: مقدار آب مصرفی سالانه (مترمکعب)؛ GW_R: منابع آب زیرزمینی تجدیدپذیر (مترمکعب).

د) شاخص میانگین تغییرات سطح مناطق کشاورزی و جمعیت شهری: فشار بر محیط‌زیست بر مبنای تغییر در بخشی از اراضی مورد استفاده برای کشاورزی و تغییر جمعیت ساکن در طول دورهٔ مطالعه، مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به نتایج مطالعات (Hunsaker و Levine، ۱۹۹۵)، نسبت مناطق شهری و کشاورزی با کیفیت منابع آب مرتبط است. رشد جمعیت یکی از عناصر مهم تأثیرگذار در پایداری طولانی‌مدت منابع آب می‌باشد. محاسبه این شاخص از طریق روابط زیر انجام می‌شود (Senent-Aparicio و همکاران، ۲۰۱۵):

$$\Delta_{AA} =(AA_{End}-AA_{Start})/AA_{Start}\times 100 \quad (۱۳)$$

$$\Delta_P =(P_{End}-P_{Start})/P_{Start}\times 100 \quad (۱۴)$$

$$I_{VAP} = (\Delta_{AA} + \Delta_P) / 2 \quad (۱۵)$$

I_{VAP}: شاخص میانگین تغییرات سطح مناطق کشاورزی و جمعیت شهری؛ Start: جمعیت و مساحت مناطق کشاورزی در زمان آغازین دوره مطالعاتی؛ End: جمعیت و مساحت مناطق کشاورزی در زمان پایانی دوره مطالعاتی؛ AA: مساحت زمین‌های کشاورزی (متر مربع)؛ Δ_{AA}: تغییرات در مساحت زمین‌های کشاورزی؛ Δ_P: تغییرات جمعیت.

ه) شاخص مشکلات اضافه برداشت منابع آب زیرزمینی: هر گونه بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی که منجر به کاهش میزان ذخیره حجم آب می‌شود. در مبحث ارزیابی پایداری، مسئله اساسی تعیین میزان حجم آبی است که بدون ایجاد اثرات غیر قابل برگشت روی کمیت، کیفیت آب‌های زیرزمینی و اکوسیستم منطقه، قابل برداشت گردد. یک شاخص قابل اعتماد برای تخلیه آب‌های زیرزمینی، باید مشکلات احتمالی تخلیه همراه با کاهش سطح آب را شناسایی کند. این مشکلات شامل: کاهش سطح آب زیرزمینی (با افزایش هزینه پمپاژ و کاهش آبدهی چاه و چشمه در آبخوان)، تغییر جریان پایه (پایش از طریق رودخانه مرتبط با آب سطحی)، تغییر کیفیت آب زیرزمینی و فرونشست زمین هستند (Lipponen، ۲۰۰۷). شاخص مشکلات اضافه برداشت منابع آب زیرزمینی از طریق رابطه (۱۶) محاسبه می‌گردد.

$$I_{DP}=(\Sigma A_{DP}/\Sigma A) \times 100 \quad (۱۶)$$

I_{DP}: شاخص مشکلات اضافه برداشت منابع آب زیرزمینی؛ ΣA_{DP}: مساحتی از محدوده مطالعاتی که با مشکلات اضافه برداشت منابع آب زیرزمینی مواجه شده است (مترمربع)؛ ΣA: کل مساحت محدوده مطالعاتی (مترمربع).

و) شاخص درصد حوضه تحت پوشش گیاهی طبیعی: وضعیت محیط‌زیستی در محدوده مطالعاتی از طریق شاخص درصد حوضه تحت پوشش گیاهی طبیعی (Av) تعریف می‌شود (Senent-Aparicio و همکاران، ۲۰۱۵). در این شاخص اگر درصد حوضه تحت پوشش گیاهی طبیعی کمتر از ۵ درصد باشد، امتیاز صفر است و اگر این درصد بالاتر از ۴۰ درصد باشد، امتیاز به ۱۰۰ خواهد رسید. شاخص مزبور به روش سنجش از دور قابل برآورد می‌باشد.

ی) شاخص نسبت تأمین منابع آب غیرمتعارف به منابع آب متعارف: هدف این شاخص، نسبت تأمین منابع آب غیر متعارف به منابع آب متعارف، ارزیابی پاسخ جامعه در رابطه با جبران کمبود آب از طریق استفاده از منابع آب غیر متعارف در محدوده مطالعاتی است (Senent-Aparicio و همکاران، ۲۰۱۵). پساب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، شوری‌زدایی، بارورسازی ابرها، استخراج آب از مه، استحصال آب باران و آب‌های زیرزمینی ژرف از جمله منابع آب غیرمتعارفی هستند که امروزه در مبحث مدیریت کمی و کیفی منابع آب، به خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک، اهمیت ویژه‌ای دارند. شاخص مورد بحث از طریق رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود.

$$I_{NC} = (V_{NC} / V_C) \times 100 \quad (۱۷)$$

I_{NC}: شاخص نسبت تأمین منابع غیر متعارف آب در منطقه مطالعه به منابع آب متعارف؛ V_C: حجم منابع آب متعارف در محدوده مطالعاتی (مترمکعب)؛ V_{NC}: حجم منابع آب غیر متعارف مورد استفاده در محدوده مطالعاتی (مترمکعب).

۴- شاخص‌های اجتماعی

بررسی تأثیر آب در عوامل اجتماعی، نقش مهمی در مدیریت منابع آب و دستیابی به توسعه پایدار خواهد داشت. با توجه به اهمیت توسعه پایدار، کمی کردن این مفهوم توسط شاخص‌های مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی با در نظر گرفتن ملاحظات اجتماعی به شرح زیر صورت می‌گیرد.

الف) شاخص وابستگی جمعیت به آب‌های زیرزمینی: این شاخص مربوط به وابستگی جمعیت به آب‌های زیرزمینی است و از طریق رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود.

$$I_{Dp}=(GW_{ps}/\Sigma P) \times 100 \quad (۱۸)$$

I_{Dp}: شاخص وابستگی جمعیت به آب‌های زیرزمینی؛ GW_{ps}: جمعیتی که برای تأمین آب برای مصارف عمومی وابسته به منابع آب زیرزمینی هستند؛ ΣP: کل جمعیت موجود در محدوده مطالعاتی.

مقادیر کمتر از ۲۰٪ در این شاخص وابستگی کم، مقادیر ۲۰ تا ۸۰٪، وابستگی متوسط و مقادیر بیش از ۸۰٪، نمایانگر وابستگی بالای جمعیت به آب‌های زیرزمینی است (Hirata و همکاران، ۲۰۰۷).

ب) شاخص وابستگی جمعیت کشاورزان به آب زیرزمینی: این شاخص برای نشان دادن اهمیت آب‌های زیرزمینی در مناطق روستایی و درآمد خانوار طراحی شده است و درصد جمعیت یک محدوده مطالعاتی که برای معیشت و درآمد خانوار به آب‌های زیرزمینی وابسته هستند را نشان می‌دهد (Lipponen، ۲۰۰۷). برای محاسبه این شاخص از رابطهٔ ۱۹ استفاده می‌شود.

$$I_{Df} = (\Sigma GW_f/\Sigma P) \times 100 \quad (۱۹)$$

I_{Df}: شاخص وابستگی جمعیت کشاورزان به آب زیرزمینی؛ ΣGW_f: جمعیتی از کشاورزان که برای تأمین آب کشاورزی وابسته به منابع آب زیرزمینی هستند؛ ΣP: کل جمعیت موجود در محدوده مطالعاتی.

ج) شاخص محدودیت آب: این شاخص نمایانگر تعداد افرادی است که در محدوده مطالعاتی با محدودیت آب مواجه شده‌اند و با رابطهٔ زیر محاسبه می‌گردد (Bui و همکاران، ۲۰۱۸).

$$I_R=(\Sigma RP/\Sigma P) \times 100 \quad (۲۰)$$

I_R: شاخص محدودیت آب؛ ΣRP: تعداد جمعیتی که در محدوده مطالعاتی با محدودیت منابع آب زیرزمینی روبرو شده است؛ ΣP: کل جمعیت در محدوده مطالعاتی.

د) شاخص تمایل افراد برای مشارکت در طرح‌های مدیریتی: این شاخص پاسخ جامعه را به شرایط و مقررات کنونیِ وضع شده

در زمینهٔ مدیریت منابع آب نشان می‌دهد و بیانگر میزان تمایل افراد جامعه برای شرکت در برنامه‌های مدیریتی است (Bui و همکاران، ۲۰۱۸).

$$I_W=(\Sigma WP/\Sigma P)\times 100 \quad (۲۱)$$

I_W: شاخص تمایل افراد برای مشارکت در طرح‌های مدیریتی؛ ΣWP: تعداد جمعیتی که در محدوده مطالعاتی تمایل به مشارکت در طرح‌های مدیریتی منابع آب دارند؛ ΣP: کل جمعیت در محدوده مطالعاتی.

۵- شاخص‌های اقتصادی

الف) شاخص تغییر در هزینه‌های مدیریتی منابع آب در طول دورهٔ مطالعه: در این شاخص میزان سرمایه‌گذاری در زمینهٔ مدیریت منابع آب آبخوان در طول دورهٔ مطالعه از طریق رابطهٔ (۲۲) مورد بررسی قرار می‌گیرد (Senent-Aparicio و همکاران، ۲۰۱۵).

$$I_{exp}=(WRMexp_{End}-WRMexp_{Start})/WRMexp_{Start}\times 100 \quad (۲۲)$$

I_{exp}: شاخص تغییر در هزینه‌های مدیریتی منابع آب در طول دوره مطالعه؛ $WRMexp_{Start}$: میزان سرمایه‌گذاری در زمینهٔ مدیریت منابع آب آبخوان در ابتدای دوره مطالعاتی؛ $WRMexp_{End}$: میزان سرمایه‌گذاری در زمینه مدیریت منابع آب آبخوان در انتهای دوره مطالعاتی.

ب) شاخص تأمین هزینه‌های مدیریتی: این شاخص مربوط به سرمایه‌گذاری سالانه در مقایسه با هزینهٔ برآورد شده مورد نیاز مدیریت منابع آب است و توجه دولت در تأمین بودجه در بخش توسعه منابع آب را نشان می‌دهد (Bui و همکاران، ۲۰۱۷). محاسبه این شاخص از طریق رابطهٔ (۲۳) صورت می‌گیرد.

$$I_I=S/E\times 100 \quad (۲۳)$$

I_I: شاخص تأمین هزینه‌های مدیریتی؛ S: میزان هزینهٔ سالانه صرف شده در زمینه مدیریت پایدار منابع آب در محدوده مطالعاتی؛ E: میزان هزینهٔ برآورد شده در زمینه مدیریت پایدار منابع آب در محدوده مطالعاتی.

۶- شاخص سیاسی

الف) شاخص ظرفیت سازمانی حوضه: وضعیت سیاسی در محدوده مطالعاتی از طریق شاخص ظرفیت سازمانی حوضه تعریف شده است. این شاخص به صورت توصیفی در پنج دسته از بسیار ضعیف (۰) تا عالی (۱۰۰) در نظر گرفته می‌شود. اگر قوانین مدیریت منابع آب مناسب وجود داشته باشد، اما آنها هنوز اجرا نشده یا تنظیم نشده‌اند، نمره متوسط (۵۰) اختصاص داده می‌شود. امتیازات مربوط به این شاخص در جدول (۱) ارائه گردیده است (Senent-Aparicio و همکاران، ۲۰۱۵).

• نحوه تعیین میزان پایداری منابع آب زیرزمینی با استفاده از شاخص‌ها

بعد از انتخاب و محاسبهٔ شاخص، نیاز به کلاسه‌بندی مقادیر محاسباتی جهت طبقه‌بندی وضعیت پایداری آبخوان‌ها است. برای ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی با استفاده از شاخص‌های پایداری، امتیازات صفر تا ۱۰۰ برای هر شاخص تعیین گردیده است. امتیاز صفر، بیانگر کمترین میزان پایداری و امتیاز ۱۰۰ معادل بیشترین میزان پایداری در شاخص مورد نظر است. جدول (۱)، دسته‌بندی کمی انواع شاخص‌های ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی را ارائه می‌دهد. توضیحات لازم در مورد محاسبات هریک از شاخص‌ها و جایگاه آن‌ها در ساختار مدل DPSIR در ادامه ارائه شده است.

جدول ۱- دسته‌بندی کمی انواع شاخص‌های ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی (نحوه محاسبه شاخص‌ها در روابط ۱ تا ۲۳ ارائه شده است)

نوع شاخص	شاخص پایداری	واحد	چارچوب DPSIR	امتیازات				
				۰ (ناپایدار)	۲۵	۵۰	۷۵	۱۰۰ (پایداری)
کمیت آب زیرزمینی	شاخص سرانه منابع آب زیرزمینی تجدیدپذیر	m3/in-hab/year	نیروی محرکه	$I_{GW_R}<۵۰۰$	-	$۵۰۰ \le I_{GW_R}<۱۰۰۰$	$۱۰۰۰ \le I_{GW_R}<۱۷۰۰$	$I_{GW_R}\ge ۱۷۰۰$
	شاخص میزان برداشت و تغذیه آب زیرزمینی	Percent	وضعیت	$I_{Ab/R}>۱۰۰$	$۷۰< I_{GW_R} \le ۱۰۰$	$۴۰< I_{GW_R} \le ۷۰$	$۲۰< I_{GW_R} \le ۴۰$	$I_{GW_R} \le ۲۰$
	شاخص سهم آب زیرزمینی در تأمین سایر مصارف آب	Percent	وضعیت-تأثیر	$I_{GW_R}>۵۰$	-	$۲۵< I_{GW_R} \le ۵۰$	-	$I_{GW_R} \le ۲۵$
	شاخص تغییر در ذخیره آب زیرزمینی	Percent	فشار	$I\Delta H_1 \le ۴۰$	$۴۰< I\Delta H_1 < ۸۰$	$I\Delta H_1 \ge ۸۰$ or $I\Delta H_2 \le ۲۰$	$۲۰< I\Delta H_2 < ۶۰$	$I\Delta H_2 \ge ۶۰$
	شاخص آسیب‌پذیری تأمین منابع آب زیرزمینی	Percent	تأثیر	$I_{SV} \le ۲۰$	$۲۰< I_{SV} \le ۴۰$	$۴۰< I_{SV} \le ۶۰$	$۶۰< I_{SV} \le ۸۰$	$I_{SV} > ۸۰$

ادامه جدول ۱- دسته‌بندی کمی انواع شاخص‌های ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی

نوع شاخص	شاخص پایداری	واحد	چارچوب DPSIR	امتیازات				
				۰(ناپایدار)	۲۵	۵۰	۷۵	۱۰۰ (پایداری)
کیفیت آب زیرزمینی	شاخص تغییر در کیفیت آب زیرزمینی	Percent	پاسخ	$I_{\Delta Q} \geq ۲۰$	$۱۰ \leq I_{\Delta Q} < ۲۰$	$-۱۰ \leq I_{\Delta Q} < ۱۰$	$-۲۰ \leq I_{\Delta Q} < -۱۰$	$I_{\Delta Q} < -۲۰$
	شاخص درصد نقاط نمونه‌برداری نسبت به استانداردهای کیفیت	Percent	وضعیت	$I_{QS} \leq ۲۰$	$۲۰ < I_{QS} \leq ۴۰$	$۴۰ < I_{QS} \leq ۶۰$	$۶۰ < I_{QS} \leq ۸۰$	$I_{QS} > ۸۰$
	شاخص مشکلات کیفی آب زیرزمینی	Percent	وضعیت-تأثیر	$I_{Qp} > ۸۰$	$۶۰ < I_{Qp} \leq ۸۰$	$۴۰ < I_{Qp} \leq ۶۰$	$۲۰ < I_{Qp} \leq ۴۰$	$I_{Qp} \leq ۲۰$
محیط‌زیست	شاخص آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی	Percent	وضعیت	$I_V > ۸۰$	$۶۰ < I_V \leq ۸۰$	$۴۰ < I_V \leq ۶۰$	$۲۰ < I_V \leq ۴۰$	$I_V \leq ۲۰$
	شاخص ریسک	Percent	وضعیت	$R_i > ۸۰$	$۶۰ < R_i \leq ۸۰$	$۴۰ < R_i \leq ۶۰$	$۲۰ < R_i \leq ۴۰$	$R_i \leq ۲۰$
	شاخص استرس	Percent	فشار	$I_S \leq ۲۰$	$۲۰ < I_S \leq ۴۰$	$۴۰ < I_S \leq ۶۰$	$۶۰ < I_S \leq ۸۰$	$I_S > ۸۰$
	شاخص میانگین تغییرات سطح مناطق کشاورزی و جمعیت شهری	Percent	فشار	$I_{VAP} \geq ۲۰$	$۱۰ \leq I_{VAP} < ۲۰$	$۵ \leq I_{VAP} < ۱۰$	$۰ \leq I_{VAP} < ۵$	$I_{VAP} < ۰$
	شاخص مشکلات اضافه برداشت منابع آب زیرزمینی	Percent	وضعیت-تأثیر	$I_{DP} > ۸۰$	$۶۰ < I_{DP} \leq ۸۰$	$۴۰ < I_{DP} \leq ۶۰$	$۲۰ < I_{DP} \leq ۴۰$	$I_{DP} \leq ۲۰$
	شاخص درصد حوضه تحت پوشش گیاهی طبیعی	Percent	وضعیت	$I_{Av} \leq ۵$	$۵ < I_{Av} \leq ۱۰$	$۱۰ < I_{Av} \leq ۲۵$	$۲۵ < I_{Av} \leq ۴۰$	$I_{Av} > ۴۰$
	شاخص نسبت تأمین منابع غیرمتعارف آب در منطقه مطالعه به منابع آب متعارف	Percent	پاسخ	$I_{NC} = ۰$	$۰ < I_{NC} \leq ۵$	$۵ < I_{NC} \leq ۱۰$	$۱۰ < I_{NC} \leq ۲۰$	$I_{NC} > ۲۰$
اجتماعی	شاخص وابستگی جمعیت به آب‌های زیرزمینی	Percent	نیروی محرکه	$I_{Dp} > ۸۰$	$۶۰ < I_{Dp} \leq ۸۰$	$۴۰ < I_{Dp} \leq ۶۰$	$۲۰ < I_{Dp} \leq ۴۰$	$I_{Dp} \leq ۲۰$
	شاخص وابستگی جمعیت کشاورزان به آب زیرزمینی	Percent	نیروی محرکه	$I_{Df} > ۸۰$	$۶۰ < I_{Df} \leq ۸۰$	$۴۰ < I_{Df} \leq ۶۰$	$۲۰ < I_{Df} \leq ۴۰$	$I_{Df} \leq ۲۰$
	شاخص محدودیت آب	Percent	فشار	$I_R > ۹۰$	$۶۰ < I_R \leq ۹۰$	$۴۰ < I_R \leq ۶۰$	$۱۰ < I_R \leq ۴۰$	$I_R \leq ۱۰$
	شاخص تمایل افراد برای مشارکت در طرح‌های مدیریتی	Percent	پاسخ	$I_W \leq ۲۰$	$۲۰ < I_W \leq ۴۰$	$۴۰ < I_W \leq ۶۰$	$۶۰ < I_W \leq ۸۰$	$I_W > ۸۰$

ادامه جدول ۱- دسته‌بندی کمی انواع شاخص‌های ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی

نوع شاخص	شاخص پایداری	واحد	چارچوب DPSIR	امتیازات				
				۰(ناپایدار)	۲۵	۵۰	۷۵	۱۰۰ (پایداری)
اقتصادی	شاخص تغییر در هزینه‌های مدیریتی منابع آب	Percent	پاسخ	$I_{exp} \leq -10$	$-10 < I_{exp} \leq 0$	$0 < I_{exp} \leq 10$	$10 < I_{exp} \leq 20$	$I_{exp} > 20$
	شاخص تأمین هزینه‌های مدیریتی	Percent	پاسخ	$I_I \leq 20$	$20 < I_I \leq 40$	$40 < I_It \leq 60$	$60 < I_I \leq 90$	$I_I > 90$
سیاسی	شاخص ظرفیت سازمانی حوضه	-	تأثیر	خیلی ضعیف	ضعیف	متوسط	خوب	عالی

• روش‌های ترکیب و ادغام شاخص‌ها

همان‌طور که در بخش‌های قبل ذکر شد، یکی از مراحل چارچوب ارزیابی پایداری منابع آب بعد از ارزیابی و شناسایی مسئله، تعریف شاخص‌ها و تعیین وضعیت آن‌ها در چارچوب DPSIR، ایجاد ارتباط بین نتایج است. چندین ابزار ارتباطی برای ارتباط نتایج در ارزیابی پایداری منابع آب وجود دارد که یکی از آن‌ها، ترکیب و ادغام ابعاد مختلف شاخص‌های ارزیابی پایداری است. شاخص‌ها را می‌توان در یک نمایه ترکیب کرد تا اطلاعات جمع‌بندی شده و هدفمند را برای برنامه‌ریزی، سیاست‌گذاری و مدیریت آب زیرزمینی فراهم نمایند. این نمایه بدون بعد است و سیستم‌های مختلف وزن‌گذاری و رتبه‌بندی در ساختار آن قابل اعمال است.

۱- در نظر گرفتن وزن یکسان برای همه شاخص‌ها

در این بخش، ادغام شاخص‌ها از طریق یک روش میانگین‌گیری ساده برای رسیدن به عدد نهایی در ارزیابی پایداری، با استفاده از رابطهٔ (۲۴) انجام می‌گردد (Senent-Aparicio و همکاران، ۲۰۱۵؛ Policy Research Initiative، ۲۰۰۷):

$$I_F=(I_{HQ}+I_{Hq}+I_E+I_S+I_e+I_p)/7 \quad (۲۴)$$

I_F: شاخص نهایی ارزیابی پایداری؛ I_{HQ}: شاخص هیدروژئولوژی کیفی؛ I_{Hq}: شاخص هیدروژئولوژی کمی؛ I_E: شاخص محیط‌زیست؛ I_S: شاخص اجتماعی؛ I_e: شاخص اقتصادی؛ I_p: شاخص سیاسی.

۲- در نظر گرفتن وزن‌های متغیر برای هر یک از شاخص‌ها

در این روش از طریق روابط زیر، عدد نهایی در ارزیابی پایداری حاصل می‌شود (Policy Research Initiative، ۲۰۰۷؛ Bui، ۲۰۱۶):

$$Ii=\sum WSubI_{ij} \times SubI_{ij} \quad (۲۵)$$

$$I_F=\sum WI_i \times I_i \quad (۲۶)$$

$$0 \leq WSubI_{ij}, WI_i \leq 1 \quad (۲۷)$$

$WSubI_{ij}$: وزن شاخص jم در زیرمجموعه iم. منظور از زیرمجموعه، شاخص‌های موجود در هر مجموعه از شاخص‌های هیدروژئولوژی، میحط‌زیست، اجتماعی، اقتصادی و سیاسی است؛ $SubI_{ij}$: مقدار شاخص jم در زیرمجموعه iم؛ I_i: شاخص پایداری در کل زیرمجموعه iم؛ I_F: شاخص نهایی ارزیابی پایداری.

روش‌های متعددی برای محاسبه وزن شاخص در روابط بالا وجود دارد. یکی از این روش‌ها، روش مقایسه زوجی (AHP)[۱۰] می‌باشد (Bui و همکاران، ۲۰۱۶، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸). روش AHP توسط Saaty در سال ۱۹۸۰ ارائه گردید. این روش امکان کمی کردن مساله به صورت ساختار سلسله مراتبی چند سطحی را فراهم می‌کند و در ضمن امکان بررسی سناریوهای مختلف با توجه به محدوده مطالعاتی را به مدیران می‌دهد.

مدل آنتروپی شانون یکی دیگر از روش‌های وزن‌دهی می‌باشد. این مدل برگرفته از تئوری اطلاعات می‌باشد و اولین بار توسط Shannon در سال ۱۹۸۴ ارائه گردیده است. تکنیک وزن‌دهی آنتروپی شانون یکی از مهم‌ترین تکنیک‌های تصمیم‌گیری کمی است که می‌تواند در بسیاری از موارد تصمیم‌گیری گروهی و غیرگروهی، به کار گرفته شود.

۳- ادغام شاخص‌هایی که در طول زمان محاسبه شده‌اند

اگر هدف، ارزیابی پایداری منابع آب در دوره‌های زمانی مختلف باشد، شاخص‌های پایداری در زمان‌های مورد نظر محاسبه می‌شود و در نهایت عدد پایداری نهایی برای مجموعه‌ای از شاخص‌ها در زمان‌های مختلف از طریق روابط زیر محاسبه خواهد شد (Wang و Wu، ۲۰۰۶):

$$I_j \ (j= 1, 2, 3,\ldots,m) \quad (۲۸)$$

$$I_i= (I_{1j}, I_{2j}, I_{3j},\ldots, I_{nj}) \quad (۲۹)$$

$$i_{ij} = \frac{I_{ij}}{\sum_{j=1}^{m} I_{ij}} \quad (۳۰)$$

$$I_F = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} {i_{ij}}^2} \quad (۳۱)$$

n: تعداد شاخص‌ها؛ m: مولفه زمان؛ I_{ij}: مقدار شاخص jم در زمان iم؛ I_F: شاخص نهایی پایداری.

با استفاده از این روش می‌توان شاخص پایداری را در زمان‌های مختلف به صورت جداگانه محاسبه کرد و به عنوان مثال می‌توان روند طرح احیا و تعادل‌بخشی را در طول زمان‌های مختلف ارزیابی نمود.

جمع‌بندی و پیشنهادات

ارزیابی رفتار سیستم آبخوان و تغییرات آن در زمان، چالشی غیرقابل اجتناب برای اطمینان از استفادهٔ آب‌های زیرزمینی در یک مسیر پایدار است. این ارزیابی بهتر است که در یک چارچوب سازمان‌یافته با مولفه‌های ۱) شناسایی مسئله؛ ۲) مدل مفهومی DPSIR (نیروی محرکه- فشار-وضعیت- تأثیر- پاسخ)؛ ۳) تعریف شاخص‌های پایداری آب زیرزمینی؛ ۴) ایجاد ارتباط بین نتایج و ۵) ارتباط بین ذینفعان صورت گیرد. از طریق شاخص‌های ارزیابی پایداری می‌توان وضعیت منابع آب زیرزمینی را مورد بررسی قرار داد و با تصمیم‌گیری‌های صحیح مدیریتی، از وقوع خسارات جبران‌ناپذیر به این منابع جلوگیری کرد. این تصمیم‌گیری می‌تواند اهداف پایداری از جمله حفاظت از برداشت بی‌رویه منابع آب زیرزمینی، حفاظت از کیفیت منابع آب زیرزمینی، حفاظت از حیات اکوسیستم موجود، رفاه اقتصادی و اجتماعی و اعمال مدیریت مناسب را به ارمغان آورد. این مطالعه با ارائه ۲۱ شاخص در ۶ بخش کمی آب زیرزمینی، کیفی آب زیرزمینی، محیط‌زیستی، اجتماعی، اقتصادی و سیاسی در قالب مدل DPSIR، چارچوبی را برای ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی مبتنی بر شاخص‌های مزبور، تبیین نموده است. جهت یکسان‌سازی نتایج شاخص‌ها و ادغام شاخص‌ها برای رسیدن به عدد نهایی پایداری از روش مقیاس طبقه‌بندی با حداقل امتیاز صفر (کمترین پایداری) و حداکثر امتیاز صد (بیشترین پایداری) استفاده گردیده است و هر شاخص به پنج دسته طبقه‌بندی شده است. عدد پایداری محاسبه شده برای هر شاخص به تنهایی قادر به بیان میزان پایداری در یک محدوده مطالعاتی در مقوله مرتبط با شاخص خواهد بود. علاوه بر این از طریق ادغام نتایج شاخص‌ها با روش‌های وزن‌دهی، می‌توان به میزان پایداری کلی در محدوده مطالعاتی مورد نظر پی برد. شاخص‌های ارائه شده در این مطالعه در مقیاس آبخوان، حوضه‌آبریز و کل کشور قابل کاربرد می‌باشند. پیشنهاد می‌گردد شاخص‌های ارائه شده برای محاسبه میزان پایداری تمامی آبخوان‌های کشور به کار گرفته شود تا بتوان طبقه‌بندی صحیحی از وضعیت پایداری منابع آب زیرزمینی موجود در دست داشت. تهیه طبقه‌بندی مزبور می‌تواند به ارتقای هدفمند و اولویت‌بندی شدهٔ پروژه‌های طرح احیا و تعادل‌بخشی آب‌های زیرزمینی کمک شایانی نماید.

پی‌نوشت

1- Intergovernmental Hydrological Programme (IHP)
2- International Atomic Energy Agency (IAEA)
3- International Association of Hydrogeologists (IAH)
4- Water Management Committee (WMC)
5-Groundwater Sustainability Infrastructure Index (GSII)
6- Groundwater Sustainability Assessment Approach
7- Jurisdictional Assessment
8- Issue Identification
9- DPSIR (Drivers, Pressures, States, Impacts, Responses)
10- Analytical Hierarchy Process

منابع

Anbazhagan S. and Jothibasu A. 2016. Groundwater sustainability indicators in parts of Tiruppur and Coimbatore districts, Tamil Nadu. Journal of the Geological Society of India, 87(2): 161-168.

Antonakos A.K. and Lambrakis N.J. 2007. Development and testing of three hybrid methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates, based on the drastic model, an example from NE Korinthia, Greece. Journal of Hydrology, 333(2): 288-304.

Bui N.T., Kawamura A., Amaguchi H., Du BUI D., and Truong N.T. 2016. Environmental Sustainability Assessment of Groundwater Resources in Hanoi, Vietnam by a simple AHP Approach. Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. G (Environmental Research), 72(5): 137- 146.

Bui N.T., Kawamura A., Amaguchi H., Du Bui D., Truong N.T. and Nam H. 2017. Economic Sustainability Assessment of Groundwater Resources: Case Study of Hanoi, Vietnam. Journal of Environmental Science and Engineering, 6: 624-633.

Bui N.T., Kawamura A., Amaguchi H., Du Bui D., Truong N.T. and Nakagawa K. 2018. Social sustainability assessment of groundwater resources: A case study of Hanoi, Vietnam. Ecological indicators, 93: 1034-1042.

Campos-Gaytan J.R., Kretzschmar T. and Herrera-Oliva C.S. 2014. Future groundwater extraction scenarios for an aquifer in a semiarid environment: case study of Guadalupe Valley Aquifer, Baja California, Northwest Mexico. Environmental monitoring and assessment, 186(11): 7961-7985.

Greece. Water, 6(4): 1043-1068.

Pandey V.P., Shrestha S., Chapagain S.K. and Kazama F. 2011. A framework for measuring groundwater sustainability. Environmental Science & Policy, 14(4):396-407.

Policy Research Initiative. 2007. Canadian Water Sustainability Index (CWSI) project report. Government of Canada.

Pophare A.M., Lamsoge B.R., Katpatal Y.B. and Nawale V.P. 2014. Impact of over-exploitation on groundwater quality: a case study from WR-2 Watershed, India. Journal of earth system science, 123(7): 1541-1566.

Saaty T. L. 1980. The Analytical Hierarchy Process, Planning, Priority. Resource Allocation. RWS Publications, USA.

Remesan R. and Panda R.K. 2008. Groundwater vulnerability assessment, risk mapping, and nitrate evaluation in a small agricultural watershed: using the DRASTIC model and GIS. Environmental Quality Management, 17(4): 53-75.

Senent-Aparicio J., Pérez-Sánchez J., García-Aróstegui J., Bielsa-Artero A. and Domingo-Pinillos J. 2015. Evaluating groundwater management sustainability under limited data availability in semiarid zones. Water, 7(8): 4305-4322.

Shannon C.E. 1948. A mathematical theory of communication. Bulletin System Technol journal, 27: 379-423.

Lipponen A. ed. 2007. Groundwater resources sustainability indicators. Paris: UNESCO.

Vrba J. and Zaporozec A. 1994. Guidebook on mapping groundwater vulnerability. Heise.

Wang Z. and Wu Q.I.A.N.G. 2006. Development of groundwater sustainability indicators. IAHS Publication, 302, p.29.

Werner A.D., Bakker M., Post V.E., Vandenbohede A., Lu C., Ataie-Ashtiani B., Simmons C.T. and Barry D.A. 2013. Seawater intrusion processes, investigation and management: recent advances and future challenges. Advances in Water Resources, 51: 3-26.

Zhang W., Gao L., Jiao X., Yu J., Su X. and Du S. 2014. Occurrence assessment of earth fissure based on genetic algorithms and artificial neural networks in Su-Xi-Chang land subsidence area, China. Geosciences Journal, 18(4): 485-493.

Zhai Y., Wang J., Huan H., Zhou J. and Wei W. 2013. Characterizing the groundwater renewability and evolution of the strongly exploited aquifers of the North China Plain by major ions and environmental tracers. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 296(3): 1263-1274.

Du S., Su X. and Zhang W. 2013. Effective storage rates analysis of groundwater reservoir with surplus local and transferred water used in Shijiazhuang City, China. Water and Environment Journal, 27(2): 157-169.

Evans B.M. and Myers W.L. 1990. A GIS-based approach to evaluating regional groundwater pollution potential with DRASTIC. Journal of Soil and Water Conservation, 45(2): 242-245.

European Commission. 2006. On the Protection of Groundwater against Pollution and Deterioration; European Commission: Kirchberg, Luxembourg.

Gordon Groundwater Consultancy (Gordon Report). 2011. Sustainable Groundwater Management: Preliminary Approach for Assessing the Sustainability of Groundwater, submitted to CCME Water Management Development Committee, 48 p.

Hirata R., Suhogusoff A. and Fernandes A. 2007. Groundwater resources in the State of São Paulo (Brazil): The application of indicators. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 79(1): 141-152.

Hosseini SM., Parizi E., Ataie-Ashtiani B. and Simmons T. 2019. Assessment of sustainable groundwater resources management using integrated environmental index: Case studies across Iran. Science of the Total Environment, 676: 792–810.

Hunsaker C.T., and Levine D.A. 1995. Hierarchical approaches to the study of water quality in rivers. BioScience, 45(3): 193-203.

Kardan moghaddam H. and Banihabib M.E. 2017. Investidation of interference of salt water in desert aquifer (Case study: South khorasan, sarayan aquifer). Journal of water and soil. 31(3): 673- 688.

Kristensen P. 2003. EEA core set of indicators. European Environment Agency.

Jafari F., Javadi S. and Karimi N. 2015. Forecasting of subsidence due to groundwater over exploitation using MODFLOW and interferometry technique in Radar imagery. 36th IAHR World Congress, Netherlands.

Juwana I., Muttil N. and Perera B.J.C. 2012. Indicator-based water sustainability assessment, A review. Science of the Total Environment, 438: 357-371.

Mattas C., Voudouris K., and Panagopoulos A. 2014. Integrated Groundwater Resources Management Using the DPSIR Approach in a GIS Environment Context: A Case Study from the Gallikos River Basin, North