



مدیریت آب و آبیاری (نشریه علمی)

دوره ۱۱ ■ شماره ۲ ■ تابستان ۱۴۰۰

صفحه‌های ۲۰۶-۱۸۹

DOI: 10.22059/jwim.2021.323848.872

مقاله پژوهشی:

ارزیابی پایداری مکانی آبخوان ورامین در سه بعد کمی، کیفی و محیط زیستی

سعیده سامانی^{۱*}، حمید کاردان مقدم^۱

۱. استادیار پژوهشی، پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، مؤسسه تحقیقات آب، تهران، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۱۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۲۹

چکیده

به منظور حفظ و بقای منابع آب زیرزمینی، ارزیابی پایداری آبخوان‌ها در برابر وقایع و تنش‌های مختلف اعم از انسانی و اقلیمی ضروری است. بدین منظور در این پژوهش با استفاده از شاخص‌های پایداری منابع آب زیرزمینی در سه بعد کمی، کیفی و محیط زیستی ارزیابی پایداری مکانی در آبخوان ورامین مورد سنجش قرار گرفته است. این شاخص‌ها شامل شاخص تغییر در ذخیره آب زیرزمینی (شاخص هیدروژئولوژی کمی)، شاخص تغییر در کیفیت آب زیرزمینی و شاخص مشکلات کیفیت آب زیرزمینی (شاخص‌های هیدروژئولوژی کیفی)، شاخص آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی و شاخص خشک‌سالی آب زیرزمینی (شاخص‌های محیط زیستی) هستند. پس از ارزیابی هر شاخص، پایداری کلی آبخوان با تلفیق شاخص‌ها با دو روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و آنتروپی انجام گرفته است. بر این اساس نتایج نهایی ارزیابی پایداری آبخوان در دشت ورامین نشان می‌دهد که بخش شرقی آبخوان پایداری بالاتری نسبت به بخش غربی آبخوان دارد. پایداری پایین آبخوان در بخش‌های غربی بین عدد صفر تا ۲۵ نمایانگر نیاز شدید پیاده‌سازی طرح‌های مدیریت احیای آبخوان است. وضعیت هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمی آبخوان نتایج به دست آمده از وضعیت پایداری آبخوان را تأیید می‌نماید. از لحاظ هیدروژئولوژیکی بخش شمالی و شرقی آبخوان ضخامت زیاد و قابلیت انتقال بالایی وجود دارد، در حالی که در غرب دشت ضخامت به شدت کاهش پیدا می‌کند و آبرفت‌ها نیز دانه‌ریز با قابلیت انتقال پایین هستند. هم‌چنین حضور رودخانه شور در بخش غربی آبخوان که مسیر عبور فاضلاب است باعث کاهش پایداری کیفی و افزایش آسیب‌پذیری آبخوان در بخش غربی آبخوان شده است.

کلیدواژه‌ها: احیای آبخوان، آنتروپی شانون، تحلیل سلسله مراتبی، شاخص‌های پایداری.

Evaluation of spatial stability of Varamin aquifer in three dimensions of quantity, quality and environment

Saeideh Samani^{1*}, Hamid Kardan Moghaddam

1. Assistant Professor, Department of Water Resources Study and Research, Water Research Institute (WRI), Tehran, Iran.

Received: May, 19, 2021

Accepted: July, 03, 2021

Abstract

To protect aquifers, it is necessary to assess their current and future stresses. For this purpose, in this paper, the indicators of groundwater resources sustainability in three dimensions of quantity, quality, and environment in the Varamin aquifer have been used to evaluate the spatial sustainability of different parts of this aquifer. In this study, a quantitative hydrogeological index; two qualitative hydrogeological indicators and two environmental indicators, and a total of 5 sustainability indicators have been used to study the spatial sustainability of the Varamin aquifer. The overall sustainability of the aquifer has been evaluated by AHP weight averaging and entropy methods from different dimensions of sustainability assessment indicators with the opinions of experts. The final results of the spatial sustainability assessment of the Varamin aquifer show that the eastern part of the aquifer is more stable than the western part of the aquifer. The low stability of the aquifer in the western parts between zero and 25 indicates the urgent need to implement aquifer sustainability management plans. The hydrogeological and hydrogeochemical status of the aquifer confirms the results obtained from the spatial sustainability of the aquifer. Hydrogeologically, the northern and eastern parts of the aquifer are very thick and have high transmissivity, while in the west the thickness decreases sharply and the alluvium is granular with low transmissivity. Also, the presence of the saline river in the western part of the aquifer, which is the passage of sewage, has reduced the quality stability and increased the vulnerability of the aquifer in the western part of the aquifer.

Keywords: AHP method, Aquifer recovery, Shannon entropy, Sustainability indicators.

مقدمه

امروزه با کاهش کمی و کیفی منابع آب بسیاری از کشورهای جهان دیدگاه خود را در زمینه مدیریت منابع آب مورد بازبینی قرار داده‌اند. توجه به تأثیر آب بر ابعاد سیاسی، فرهنگی، اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی، مدیریت منابع آب را به یکی از ابزارهای مهم دستیابی به توسعه پایدار تبدیل ساخته است (Samani et al., 2020). محدودیت منابع طبیعی در دسترس و نامحدود بودن نیازهای انسانی موجب شده تا جوامع انسانی با برنامه‌ریزی و بررسی‌های بیش‌تر علمی، در جهت حفظ بیش‌تر این منابع گام بردارند. لذا در جهت نیل به این هدف مسأله توسعه پایدار سیستم‌ها مورد توجه قرار گرفته است. اصطلاح "توسعه پایدار" اولین بار توسط کمیسیون جهانی محیط‌زیست و توسعه در گزارشی به نام "آینده مشترک ما" توسط Brundtland et al. (1987) مطرح شد و همان سال در مجمع عمومی سازمان ملل متحد، طی مصوبه شماره A/RES/42/187 به تصویب رسید. طبق تعریف ارائه‌شده در مصوبه مزبور، توسعه پایدار به معنای تأمین نیازهای نسل فعلی بشر بدون تعارض با توانایی نسل‌های آینده برای تأمین نیازهایشان است. تعریف مزبور پایداری محیط‌زیست را نیز مورد توجه قرار داده است.

Alley et al. (1999) پایداری آب زیرزمینی را به معنای توسعه و بهره‌برداری از این منابع در زمانی نامتناهی، به طوری که اثرات مخرب زیست‌محیطی، اقتصادی و یا اجتماعی نداشته باشد، دانسته‌اند. طبق تعبیر ایشان، تعریف "اثرات مخرب" به قضاوت کارشناسی بسیار وابسته بوده و مستلزم به‌کارگیری معیارهای متعددی است. علاوه بر این، پایداری آب زیرزمینی باید در قالب چرخه هیدرولوژیکی، که آب زیرزمینی بخشی از آن است، تعریف شود. زیرا یک نرخ بهره‌برداری قابل قبول از آب زیرزمینی با در نظرگیری تغییرات سطح ایستابی،

ممکن است منجر به کاهش شدید غیرمطلوب منابع آب سطحی شود. شاخص‌های پایداری منابع آب شامل شاخص فقر آب (Lawrence et al., 2003)، شاخص پایداری آب کانادا (Policy Research Initiative, 2007)، شاخص پایداری حوضه آبریز (Chaves & Alipaz, 2007) و شاخص پایداری آب (Juwana et al., 2009) است. به‌عنوان بخشی از به‌روزرسانی برنامه آب کالیفرنیا در سال ۲۰۱۳، مؤسسه منابع آب کالیفرنیا با دانشگاه کالیفرنیا و آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا (EPA) برای ایجاد یک چارچوب تحلیلی برای سنجش پایداری منابع آب در کالیفرنیا، یک تیم همکاری را تشکیل دادند. در این چارچوب یک سری شاخص‌های پایداری آب معرفی شد که این شاخص‌ها قادر به مطلع ساختن مدیران در مورد شرایط سیستم هستند و ارتباط بین اکوسیستم و سیستم اجتماعی اقتصادی را تعیین می‌کنند. شاخص‌های موجود در این چارچوب در قالب هفت هدف پایداری مدیریت پایدار آب، افزایش قابلیت اطمینان در تأمین منابع آب، افزایش مزایای اجتماعی و زیست‌محیطی مدیریت آب، افزایش کیفیت آب، مدیریت بهتر سیلاب، اعمال تصمیمات مدیریتی سازگار با شرایط تعریف گردیده‌اند.

Anbazzhagan & Jothbasu (2016)، هفت شاخص ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی را شامل شاخص تغییرات بارندگی، شاخص کیفیت آب زیرزمینی، شاخص آلودگی، شاخص حساسیت، شاخص مربوط به سطح استفاده از آب زیرزمینی، شاخص مشکلات اضافه برداشت آب زیرزمینی و شاخص میزان وابستگی به منابع آب زیرزمینی را معرفی نمودند. نتایج این مطالعه نشان داد که ارزیابی پایداری از طریق شاخص‌ها منجر به دستیابی به توسعه پایدار، مدیریت و حفاظت از محیط‌زیست و حفظ کیفیت منابع آب زیرزمینی، می‌شود. Hosseini et al. (2019) به‌منظور ارزیابی پایداری آبخوان، به‌ویژه در

تأمین نیازهایشان است) به عنوان متغیرهای قابل اندازه گیری معرفی شده اند. این شاخص ها اطلاعاتی در مورد کمیت و کیفیت منابع آب زیرزمینی (وضعیت و روند موجود) را ارائه می دهند و بر مسائل محیط زیستی تمرکز دارند. ارائه وضعیت پایداری مکانی آبخوان با توجه به سه بعد کمی، کیفی و محیط زیستی می تواند به اجرای هدف مند و اولویت بندی طرح های مدیریت آب زیرزمینی در بخش های مختلف آبخوان کمک کند.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه

دشت ورامین با وسعت ۹۷۱ کیلومتر مربع بخشی از حوضه دریاچه نمک است که در شرق تهران واقع شده است. منطقه مورد مطالعه جزو مناطق خشک با میانگین بارندگی سالانه ۱۵۰ میلی متر محسوب می شود. آبخوان آبرفتی ورامین در اراضی شمالی دشت از نوع آزاد بوده در نیمه جنوبی دارای دو لایه است. وجود میان لایه های ریزدانه که از جنوب تا بخش میانی از ضخامت آن ها کم می شود، آبخوان تحت فشار جنوبی به صورت تدریجی و میان انگشتی به لایه آبخوان آزاد تبدیل می شود. در بخش جنوبی لایه آزاد کم ضخامت بالایی به علت بهره برداری بیش از حد و افت سطح آب در عمل از بین رفته است، به طوری که برداشت اصلی از آبخوان زیرین انجام می شود. در حال حاضر، با افت سطح پیژومتریک به زیر لایه محبوس کننده در عمل رفتار آبخوان تحت فشار در بخش جنوبی به تدریج مشابه آبخوان آزاد شده است. به طور کلی، در دشت ورامین یک آبخوان آزاد اصلی وجود دارد که میان لایه های رسی در بخش های جنوبی آن وجود دارند. چاه ها نیز در این لایه اصلی قرار دارند. بیشترین ضخامت آبخوان در شمال شرق دشت با ۲۸۰ متر و کمترین ضخامت آبرفت در جنوب غربی منطقه با ۱۵۰ متر است. به طور کلی، سنگ کف آبخوان اصلی از رسوبات رسی،

مناطق خشک، بسته به میزان دسترسی به داده ها و ارتباط شاخص ها، سیزده شاخص ارزیابی پایداری آبخوان را معرفی کردند. در این مطالعه شاخص ها برای ۳۰ آبخوان مهم در ایران محاسبه شد و نتایج وضعیت ناپایدار را برای هر ۳۰ آبخوان نشان داده است. این مطالعه نشان داد که این شاخص ها ابزار مناسب جهت تعیین وضعیت کمی و کیفی آبخوان هستند و با بررسی تأثیر اقدامات و سیاست ها مدیریتی به مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی کمک می کنند. در کل شاخص های ارزیابی منابع آب زیرزمینی روی کمیت منابع آب زیرزمینی، بیلان، کاهش سطح آب زیرزمینی، حجم بهره برداری، تغذیه آب زیرزمینی، ارتباط آب های زیرزمینی با آب های سطحی به علاوه فاکتورهای مربوط به کیفیت، آلودگی و دمای آب زیرزمینی، آسیب پذیری ذاتی، وسعت آلودگی، وضعیت شبکه پایش (تراکم چاه های مشاهداتی)، وابستگی جمعیت به منابع آب زیرزمینی، تنوع زیستی و فعالیت های بیولوژیکی، تغییر در کاربری زمین، فرونشست زمین و رد پای آب زیرزمینی، متمرکز هستند (Bui et al., 2018; Mattas et al., 2014; Steinman, 2007; Lavapuro et al., 2008; Bocanegra et al., 2008; Korbel & Hose, al., 2011; Gleeson et al., 2012; Preda et al., 2013; WESA, 2013).

بررسی مطالعات انجام شده نشان می دهد که پایداری آبخوان از دیدگاه موقعیت مکانی مورد بررسی و آنالیز قرار نگرفته و وضعیت پایداری آبخوان به صورت یکپارچه در کل آبخوان (با مقیاس حوضه ای) ارزیابی شده است. لذا در این مقاله جهت بررسی وضعیت پایداری توزیعی آبخوان دشت ورامین، شاخص های پایداری آب زیرزمینی با رویکرد حفاظت از منابع آب زیرزمینی در راستای توسعه پایدار (توسعه پایدار به معنای تأمین نیازهای نسل فعلی بشر بدون تعارض با توانایی نسل های آینده برای

منابع آب ایران ۲۲۰۷ حلقه با حجم تخلیه ۴۱۳ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد. تعیین پایداری مکانی این آبخوان نقش مهمی در بررسی وضعیت توسعه آبخوان در آینده خواهد داشت.

شاخص‌های پایداری

جهت بهره‌برداری مطمئن از آبخوان به‌ویژه در شرایط توسعه، شناخت وضعیت آبخوان، هم‌چنین ارزیابی وضعیت پایداری آن، بسیار حائز اهمیت است (Samani, 2020). 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. به‌عبارت دیگر، شاخص‌های پایداری آب زیرزمینی به‌عنوان متغیرهای قابل‌اندازه‌گیری تعریف می‌شوند که اطلاعات مربوط به سیستم آب زیرزمینی را در یک روش قابل‌درک، ارائه می‌دهند (Gordon, 2011; Steinman, 2007) و در واقع ابزار بسیار مفید برای اندازه‌گیری و ارزیابی پایداری منابع طبیعی هستند.

مارنی، کنگلومرای میوسن و میوپلیوسن با نفوذپذیری کم تشکیل شده است (Jahromi, 2019). عمق آب زیرزمینی در آبخوان اصلی بین ۳۰-۱۷۰ متر زیر سطح زمین است. جهت عمومی جریان آب زیرزمینی در منطقه از شمال‌شرق به سمت جنوب‌غرب است (Jahromi, 2019). میزان تخلیه و برداشت سالانه از این آبخوان ۴۴۷/۳۸ میلیون مترمکعب می‌باشد، به این ترتیب قدرت آب‌دهی آبخوان آبرفتی این محدوده مطالعاتی ۴۲۹/۲۲ هزار مترمکعب در سال در کیلومترمربع برآورد می‌شود. تنها رودخانه مهم و پرآبی که در شهرستان جریان دارد، جاجرود است که از ارتفاعات رشته کوه البرز مرکزی سرچشمه می‌گیرد. دیگر رودخانه دشت ورامین رودخانه شور است که از ضلع شمال‌غربی وارد منطقه ورامین می‌شود. موقعیت محدوده مطالعاتی در شکل (۱) ارائه شده است. اقتصاد مردم در این گستره وابسته به فعالیت‌های کشاورزی است. منابع آب زیرزمینی آبخوان ورامین تأمین‌کننده آب شرب، صنعت و بخش بزرگی از آب کشاورزی است. تعداد چاه‌های فعال در منطقه براساس آخرین آمار تأییدشده شرکت مدیریت

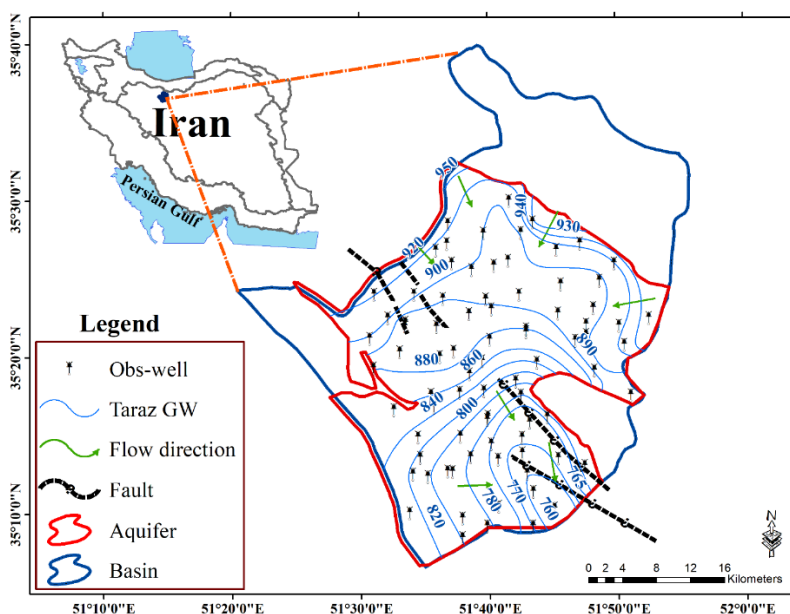


Figure 1. Location of the study area

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۱۱ ■ شماره ۲ ■ تابستان ۱۴۰۰

شاخص تغییر در ذخیره آب زیرزمینی (شاخص کمی)^۱

بررسی تغییرات ذخیره منابع آب زیرزمینی در برنامه ریزی و مدیریت پایدار این منابع اهمیت فراوانی دارد (Kardan & Moghaddam & Roozbahani, 2015). در این مطالعه تغییر در ذخیره آب زیرزمینی از طریق شاخص وضعیت پیرومتریک در نظر گرفته شده است (Pernía Llera & Corral, 2001). در این شاخص وضعیت سطح آب زیرزمینی، نسبت به سطح آب حداقل و حداکثر در طول دوره مطالعاتی سنجیده می شود. هر چه قدر عدد این شاخص به ۱۰۰ نزدیک تر باشد، پایداری بیش تر است. امتیازات مربوط به این شاخص در جدول (۱) ارائه شده است.

$$I(\Delta H)_i = \frac{H_i - H_{min}}{H_{max} - H_{min}} \times 100 \quad (1)$$

$I(\Delta H)_i$: شاخص تغییر در ذخیره آب زیرزمینی، H_i : سطح آب زیرزمینی در ماه i و یا میانگین سطح آب زیرزمین در کل دوره، H_{max} : حداکثر سطح آب زیرزمینی در دوره مطالعاتی، H_{min} : حداقل سطح آب زیرزمینی در دوره مطالعاتی.

شاخص تغییر در کیفیت آب زیرزمینی (شاخص کیفی)^۲

در این شاخص وضعیت کنونی کیفیت آب زیرزمینی نسبت به دوره مطالعاتی مورد بررسی قرار می گیرد (Mays, 2007). به طوری که در این شاخص وضعیت کنونی آلاینده نسبت به حداکثر و حداقل دوره سنجیده می شوند. با توجه به رابطه (۲) هرچه قدر که غلظت کنونی آلاینده به مقدار حداکثر دوره نزدیک تر باشد، مقدار این شاخص کم تر خواهد شد. امتیازات مربوط به این شاخص در جدول (۱) ارائه شده است.

$$I_Q = \frac{[p_{max}] - [p]}{[p_{max}] - [p_{min}]} \times 100 \quad (2)$$

I_Q : شاخص تغییر در کیفیت آب زیرزمینی در یک دوره

لازم به ذکر است که شاخص برای شناسایی مشکل در طول زمان (دوره بهره برداری) استفاده می شود و برای حل مشکلات به کار نمی رود. شاخص های پایداری سنجش بخش های از سیستم را نسبت به شرایط مطلوب و نامطلوب انجام می دهند. استفاده از شاخص می تواند، شناسایی وضعیت سیستم، عوامل تأثیرگذار در شرایط سیستم، تصمیم گیری و اولویت بندی را برای متولیان آب فراهم سازد (Juwana *et al.*, 2010). به کارگیری شاخص های پایداری برای سیستم منابع آب زیرزمینی، شامل شناسایی سیستم، فرایند انتخاب شاخص، توسعه رابطه شاخص و استفاده واقعی از شاخص برای سنجش ابعاد مختلف پایداری منابع آب زیرزمینی می باشد. در این مطالعه از پنج شاخص پایداری در سه بعد کمی، کیفی و محیط زیستی استفاده شده است. این شاخص ها شامل شاخص تغییر در ذخیره آب زیرزمینی (شاخص هیدروژئولوژی کمی)، شاخص تغییر در کیفیت آب زیرزمینی و شاخص مشکلات کیفیت آب زیرزمینی (شاخص های هیدروژئولوژی کیفی)، شاخص آسیب پذیری آب های زیرزمینی و شاخص خشک سالی آب زیرزمینی (شاخص های محیط زیستی) هستند که جهت تحلیل و ارزیابی پایداری مکانی آبخوان ورامین مورد استفاده قرار گرفته اند. جهت یکنواختی در نتایج خروجی این شاخص ها براساس منابع موجود امتیازبندی همه شاخص ها بین عدد صفر تا ۱۰۰ صورت گرفته است. به گونه ای که امتیاز ۱۰۰ نمایانگر حداکثر پایداری و امتیاز صفر نمایانگر وضعیت ناپایدار است. امتیاز ۲۵ نمایانگر پایداری پایین آبخوان، امتیاز ۵۰ نمایانگر پایداری متوسط و امتیاز ۷۵ وضعیت تقریباً پایدار را نشان می دهد (Pernía Llera & Corral, 2001; Mays, 2007; Vrba & Lipponen, 2007).

زیرزمینی با همکاری آژانس حفاظت محیطی ایالت متحده ایجاد شده است (Aller *et al.*, 1987). در این روش هفت عامل یا مشخصه قابل اندازه‌گیری برای سیستم هیدروژئولوژیکی برآورد می‌شود. این عوامل شامل عمق آب زیرزمینی، تغذیه، محیط آبخوان، محیط خاک، توپوگرافی یا شیب سطح زمین، مواد تشکیل‌دهنده زون غیراشباع و هدایت هیدرولیکی هستند. امتیازات مربوط به این عوامل در جدول (۱) پیوست ارائه شده است. بعد از تعیین مناطقی که مستعد آلودگی هستند، از فرمول زیر برای محاسبه شاخص آسیب‌پذیری استفاده می‌شود (Kardan Moghaddam *et al.*, 2020):

$$I_v = \frac{\sum A_v}{\sum A} \times 100 \quad (4)$$

I_v : شاخص آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی، $\sum A_v$: مساحتی از محدوده مطالعاتی که پتانسیل آسیب‌پذیری بالایی دارد (مترمربع)، $\sum A$: کل مساحت محدوده مطالعاتی (مترمربع). امتیازات مربوط به این شاخص در جدول (۱) ارائه شده است.

شاخص خشک‌سالی آب زیرزمینی (شاخص محیط‌زیستی)^۵

خشک‌سالی یکی از پدیده‌های جوی است که بخش‌های مختلف محیطی را در طول دوره حاکمیت خود تحت تأثیر قرار می‌دهد. اگرچه تعاریف متفاوتی برای این پدیده ارائه شده است، اما به‌طور کلی، خشک‌سالی نتیجه کمبود بارش طی یک دوره معین زمانی است. کاهش ذخایر آب سطحی شامل کاهش ذخایر مخازن سدها، خشک‌شدن قنات‌ها و چشمه‌ها، پیشروی بیابان، کاهش پوشش گیاهی، افت سطح آب زیرزمینی، خشک‌شدن مراتع، کاهش نفوذپذیری خاک، کاهش آب رودخانه‌ها، مشکلات اقتصادی اجتماعی، مهاجرت کشاورزان و خالی‌شدن روستاها از جمله پیامدهای خشک‌سالی است. یکی از بخش‌های متأثر از

مطالعاتی، P_{max} : حداکثر غلظت اندازه‌گیری شده یون موردنظر در طول دوره؛ P_{min} : حداقل غلظت اندازه‌گیری شده یون موردنظر در طول دوره، P : غلظت کنونی یون موردنظر. برای جلوگیری از تأثیر داده‌های غیرنرمال (آلودگی ناشی از منابع نقطه، خطاهای اندازه‌گیری و غیره) در این شاخص حداکثر غلظت، را می‌توان با میانگین طول دوره جایگزین نمود. در این وضعیت در صورتی که غلظت کنونی آلاینده از میانگین دوره بیش‌تر باشد، مقدار شاخص منفی خواهد شد و امتیاز صفر به این شاخص تعلق خواهد گرفت.

شاخص مشکلات کیفیت آب زیرزمینی (شاخص کیفی)^۳

شاخص پیشنهادی برای مشکلات کیفیتی که به صورت طبیعی حاصل می‌شود به صورت زیر تعریف می‌شود (Mays, 2007):

$$I_{QP} = \frac{\sum A_{NQP}}{\sum A} \times 100 \quad (3)$$

I_{QP} : شاخص مشکلات کیفیت آب زیرزمینی، $\sum A_{NQP}$: مجموع مساحت محدوده‌هایی که در منطقه مطالعاتی، با مشکل کیفیت آب زیرزمینی مواجه شده‌اند (مترمربع)، $\sum A$: کل مساحت محدوده مطالعاتی (مترمربع). امتیازات مربوط به این شاخص در جدول (۱) ارائه شده است.

شاخص آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی (شاخص محیط‌زیستی)^۴

آسیب‌پذیری نوعی خصوصیت نسبی و بدون بعد است و به ویژگی‌های آبخوان، محیط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی بستگی دارد (Antonakos & Lambrakis, 2007). ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی به روش‌های مختلفی صورت می‌گیرد (Moghaddam *et al.*, 2020 Kardan). یکی از روش‌های متداول برای ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان، روش دراستیک است که کاربرد زیادی دارد (Vrba & Lipponen, 2007). روش دراستیک توسط انجمن ملی آب

هستند. تأثیر بر تغذیه در اثر تغییر در مؤلفه‌های چرخه آب از جمله تبخیر و بارندگی، افزایش نفوذ آب‌شور دریا به آبخوان‌ها در اثر بالا آمدگی سطح آب دریا، افزایش تناوب دوره‌های خشک‌سالی که بر کیفیت آب در آبخوان‌های آبرفتی تأثیر می‌گذارد (Cullet, 2017; Nasiri *et al.*, 2020). شاخص خشک‌سالی آب زیرزمینی توسط Mendicino *et al.* (2008) به‌عنوان شاخص مفید و قابل‌اعتماد برای پیش و پیش‌بینی وضعیت خشک‌سالی آب و زمین‌شناسی معرفی شده است. این شاخص از یک مدل توازن آب ساده ایجاد شده است. براساس این شاخص می‌توان وضعیت خشک‌سالی آب زیرزمینی را تعیین نمود. امتیازات مربوط به این شاخص در جدول (۱) ارائه شده است. از رابطه (۵) برای محاسبه شاخص خشک‌سالی استفاده می‌شود:

$$GRI = \frac{H_i - \mu}{\sigma} \quad (5)$$

H_i : سطح آب در ماه موردنظر، μ : میانگین سطح آب در سال‌های موردنظر، σ : انحراف معیار سطح آب در سال‌های موردنظر.

تلفیق شاخص‌ها

چندین ابزار ارتباطی برای ارتباط نتایج در ارزیابی پایداری منابع آب وجود دارد، که یکی از آنها تلفیق ابعاد مختلف شاخص‌های ارزیابی پایداری است.

شرایط بلندمدت خشک‌سالی، منابع آب زیرزمینی هستند که متأسفانه کم‌تر از سایر بخش‌ها مورد توجه قرار گرفته است. برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی به دلیل کمبود بارش موجب افت سطح آب زیرزمینی می‌شود. خشک‌سالی سبب کاهش نزولات جوی و درنهایت کاهش میزان تغذیه آب‌های زیرزمینی خواهد شد. به‌علاوه کاهش نزولات جدید سبب نیاز به آبیاری بیشتر و پمپاژ بیشتر از آب‌ها و آبخوان‌ها می‌شود، مجموعه این عوامل سبب افت کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی خواهد شد. بین خشک‌سالی و آب‌های زیرزمینی ارتباط عمیقی وجود دارد، به‌طوری‌که فرایند خشک‌سالی بر چرخه آب از سطح محلی تا سطح جهانی تأثیر می‌گذارد. خشک‌سالی به‌طور مستقیم از طریق بارندگی که منبع تغذیه اصلی آبخوان است، روی سیستم آبخوان‌ها تأثیر می‌گذارد (Cullet, 2017). برداشت بیش از حد از منابع آب زیرزمینی در زمان خشک‌سالی منجر به خشک‌شدن رودخانه‌های سطحی مرتبط با منابع آب زیرزمینی می‌شود. این افزایش برداشت منجر به کاهش ذخیره آبخوان و افزایش آسیب‌پذیری اکوسیستم‌های وابسته می‌شود. در عین حال، آب‌های زیرزمینی نسبت به آب‌های سطحی تأثیرات کم‌تری در شرایط خشک‌سالی دارند. بنابراین منابع آب زیرزمینی در صورت مدیریت پایدار می‌توانند نقش مهمی در سازگاری با خشک‌سالی ایفا کنند. ازجمله تأثیرات خشک‌سالی بر منابع آب زیرزمینی شامل موارد زیر

Table 1. Scores related to five sustainability indicators in three dimensions: quantitative, qualitative and environmental

Dimension	Index name	Score				
		0	25	50	75	100
Quantities	Variation in groundwater storage	$I(\Delta H)_i \leq 20\%$	$20\% < I(\Delta H)_i \leq 40\%$	$40\% < I(\Delta H)_i \leq 60\%$	$60\% < I(\Delta H)_i \leq 90\%$	$I(\Delta H)_i > 90\%$
	Variation in groundwater quality	$I_Q \leq 20\%$	$20\% < I_Q \leq 40\%$	$40\% < I_Q \leq 60\%$	$60\% < I_Q \leq 80\%$	$I_Q > 80\%$
Quality	Groundwater quality problem	$I_{Qp} > 80\%$	$60\% < I_{Qp} \leq 80\%$	$40\% < I_{Qp} \leq 60\%$	$20\% < I_{Qp} \leq 40\%$	$I_{Qp} \leq 20\%$
	Groundwater vulnerability	$I_V > 80\%$	$60\% < I_V \leq 80\%$	$40\% < I_V \leq 60\%$	$20\% < I_V \leq 40\%$	$I_V \leq 20\%$
Environmental	Groundwater Drought	Index ≤ -2 =0 Intense drought	$-2 \leq$ Index ≤ -1 =25 Drought	$-1 \leq$ Index < 1.5 =50 Normal situation	$1.5 \leq$ Index < 2 =75 Wet situation	Index ≥ 2 Very intense wet situation

تصمیم‌گیری مسأله به‌صورت زیر است. در این مرحله ماتریس از طریق شاخص‌ها و وزن‌های کارشناسان و خبرگان تشکیل داده شد.

$$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

مرحله دوم: مرحله نرمال‌سازی یا بی‌مقیاس کردن جدول تصمیم‌گیری است. برای نرمال‌سازی از روش نرمال‌سازی ساده یا همان روش میانگین حسابی استفاده می‌شود. رابطه نرمال‌سازی ساده به‌صورت زیر است.

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (7)$$

مرحله سوم: محاسبه آنتروپی هر شاخص است که در این مرحله باید آنتروپی هر یک از شاخص‌ها را با استفاده از رابطه (۸) محاسبه نمود. در این رابطه، مقدار K باعث می‌شود تا مقدار آنتروپی هر شاخص بین صفر و یک باقی بماند.

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m P_{ij} \times \ln P_{ij} \quad K = \frac{1}{\ln m} \quad (8)$$

مرحله چهارم: محاسبه فاصله هر شاخص از آنتروپی آن است. در این مرحله باید فاصله هر یک از شاخص‌ها را از مقدار آنتروپی آن که در مرحله قبل محاسبه شد، به‌دست آوریم. برای این کار از رابطه (۹) استفاده می‌شود.

$$d_j = 1 - E_j \quad (9)$$

مرحله پنجم: محاسبه وزن هر شاخص است. در این مرحله وزن هر شاخص از طریق رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود.

$$W_j = \frac{d_j}{\sum d_j} \quad (10)$$

روش تحلیل سلسله مراتبی^۲

یکی از روش‌های محاسبه وزن شاخص، روش مقایسه زوجی تحلیل سلسله مراتبی (AHP) است. روش AHP توسط Saaty (1980) ارائه شد. این روش امکان

شاخص‌ها را می‌توان در یک نمایه ترکیب کرد تا اطلاعات جمع‌بندی‌شده 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 قابل‌اعمال است. این عملکرد منجر به ارائه و انتقال نتایج پژوهش به شیوه‌ای مختصر می‌شود. در رابطه با وزن‌دهی به شاخص‌ها و تلفیق آن‌ها در جهت رسیدن به نقشه نهایی پایداری از نظرات سی کارشناس و خبره بهره برده شده است. در این راستا، پرسش‌نامه‌هایی در قالب دو جدول تهیه شد. در یکی از جدول‌ها از کارشناسان درخواست شد تا در هر شاخص امتیاز مدنظرشان را اعمال نمایند تا امتیاز کلی پنج شاخص به ۱۰۰ برسد و در یکی از دیگر جدول‌ها رتبه اهمیت شاخص‌ها نسبت به یکدیگر مطرح شد. سپس امتیازات دریافت‌شده با استفاده از دو روش AHP و آنتروپی به شرح زیر جهت وزن‌دهی به شاخص‌ها به‌کار گرفته شده است.

روش آنتروپی شانون^۱

مدل آنتروپی شانون یکی از روش‌های وزن‌دهی است. این مدل برگرفته از تئوری اطلاعات است و اولین بار توسط Shannon (1984) ارائه شده است. تکنیک وزن‌دهی آنتروپی شانون یکی از مهم‌ترین تکنیک‌های تصمیم‌گیری کمی است که می‌تواند در بسیاری از موارد تصمیم‌گیری گروهی و غیر گروهی به‌کار گرفته شود. رویکرد آسان، دقیق و عملی آن باعث شده که تحلیل‌گران بتوانند نتایج دقیق، سریع و گویا را فراهم سازند. مراحل انجام روش آنتروپی به شرح زیر است (Shannon, 1984).

مرحله اول: اولین مرحله در روش آنتروپی تشکیل جدول تصمیم‌گیری است. جدول تصمیم‌گیری به‌عنوان ورودی روش آنتروپی در نظر گرفته می‌شود. ماتریس

مجموع اعداد هر ستون ماتریس مقایسات زوجی را محاسبه، سپس هر ستون را بر مجموع اعداد آن ستون تقسیم می‌نماییم. ماتریس جدیدی که به این صورت به دست می‌آید ماتریس مقایسات نرمال شده نامیده می‌شود.

میانگین اعداد هر سطر ماتریس مقایسات نرمال شده را پیدا می‌کنیم. این میانگین وزن نسبی عناصر تصمیم متناظر با سطرهای ماتریس را نشان می‌دهد.

در نهایت برای تعیین بهترین گزینه، ماتریس اولویت (وزن) شاخص‌ها را در بردار وزن شاخص‌ها ضرب می‌نماییم. یا به عبارت دیگر، برای مقایسه گزینه‌ها وزن‌های هر شاخص در وزن‌های معیارها ضرب، و مقادیر حاصل با هم جمع می‌شود و بدین ترتیب بهترین گزینه از نظر معیارها مختلف انتخاب می‌گردد (Buchanan et al., 1999).

گام چهارم ادغام وزن‌های نسبی: این گام به منظور وزن‌دهی نهایی به شاخص‌ها صورت می‌گیرد.

گام پنجم محاسبه سازگاری در قضاوت‌ها است. تقریباً همه محاسبات مربوط به AHP براساس قضاوت اولیه تصمیم‌گیرنده در قالب ماتریس، صورت می‌پذیرد. هرگونه خطا و ناسازگاری در مقایسه و تعیین اهمیت بین گزینه‌ها و شاخص‌ها نتیجه نهایی حاصل از محاسبات را با خطا روبه‌رو می‌کند. نسبت سازگاری وسیله‌ای است که سازگاری قضاوت‌ها را مشخص می‌کند. این نسبت برای ماتریس مقایسات زوجی باید کم‌تر از $0/1$ باشد. در غیر این صورت قضاوت‌های ترجیحی صورت گرفته دارای ناسازگاری بوده و باید این ناسازگاری حذف گردد.

محدودیت پژوهش

بررسی شاخص‌های پایداری در سطح آبخوان‌ها حاکی از وجود ارتباط بین پارامترهای مختلف هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی آبخوان است که این موضوع نیاز به

فرموله کردن مسأله 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. این تکنیک، روشی توانمند و منعطف در دسته روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که به وسیله آن می‌توان مسائل پیچیده را در سطوح مختلف حل کرد. به این دلیل به آن مدل سلسله مراتب گفته می‌شود که به صورت مدلی درختی و مراتب می‌باشد. روش AHP هر دو ارزیابی عینی و ذهنی را در یک ساختار یکپارچه بر مبنای مقیاس‌هایی با زوج مقایسه ترکیب نموده و به تحلیل‌گران کمک می‌کند تا جوانب اساسی یک مسأله را در یک قالب سلسله مراتبی سازمان‌دهی کنند (Bui et al., 2016, 2017, 2018). به کارگیری این روش مستلزم پنج گام عمده زیر است.

گام اول مدل‌سازی: در این گام مسأله و هدف از تصمیم‌گیری به صورت سلسله مراتبی از عناصر تصمیم که با هم در ارتباط هستند، تعیین می‌شود. عناصر تصمیم شامل شاخص‌ها و وزن‌های کارشناسان و نخبگان به شاخص‌ها هستند.

گام دوم قضاوت ترجیحی: در این گام مقایسه‌هایی بین گزینه‌های مختلف تصمیم براساس هر شاخص صورت می‌گیرد. در این مرحله تصمیم‌گیرنده باید شاخص یا گزینه‌ای هر سطح را نسبت به عنصر مربوط به خود در سطح بالاتر و به صورت دو به دو مقایسه و وزن آن‌ها را محاسبه کند. برای این کار معمولاً از مقیاس‌های تعیین‌شده برای مقایسه گزینه‌ها استفاده می‌شود (Saaty, 1980).

گام سوم محاسبات وزنی نسبی: در این گام وزن و اهمیت عناصر نسبت به هم از طریق مجموعه‌ای از محاسبات عددی تعیین می‌شود. در این مرحله خلاصه عملیات به صورت زیر است.

سطح آب چاه‌های مشاهداتی و داده‌های کیفی آب زیرزمینی در چاه‌های معرف کیفی استفاده شده است.

شاخص تغییر در ذخیره آب زیرزمینی

برای محاسبه این شاخص دوره آماری سطح آب چاه‌های مشاهداتی آبخوان دشت ورامین بین سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۸ در نظر گرفته شده است. در این شاخص وضعیت سطح آب زیرزمینی در ماه موردنظر (در اینجا شهریورماه ۹۸ در نظر گرفته شده است)، نسبت به سطح آب حداقل و حداکثر در طول دوره مطالعاتی سنجیده شده است. این شاخص براساس رابطه (۲) برای بخش‌های مختلف آبخوان محاسبه شده است و در نهایت امتیاز پایداری بخش‌های مختلف آبخوان برای این شاخص براساس جدول (۱) محاسبه شده است. نقشه پایداری مکانی آبخوان ورامین براساس این شاخص در شکل (۲) ارائه شده است. براساس این نقشه، از سمت شرق به غرب از پایداری کمی آبخوان ورامین کاسته می‌شود.

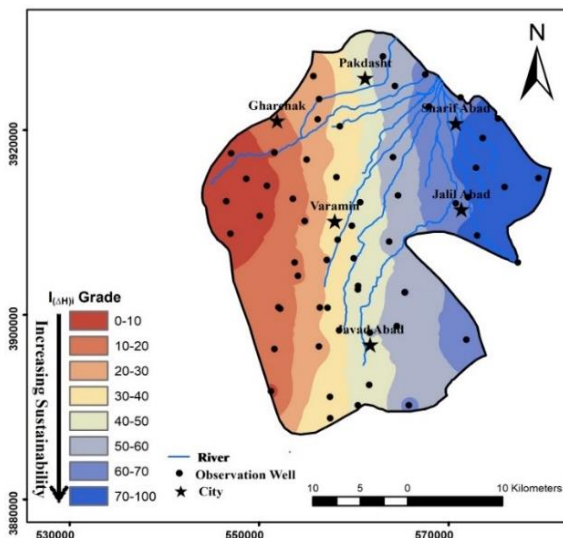


Figure 2. Quantitative spatial sustainability map of Varamin aquifer based on change in groundwater storage index

شناخت دقیق وضعیت منابع آب براساس داده‌های موجود در یک بازه زمانی و مکانی دارد. لذا نبودن آمار و اطلاعات منظم از این نظر بسیار مهم و حائز اهمیت است. از طرفی پایداری یک سیستم که در برگیرنده ویژگی‌های آن است، مبتنی بر در نظرگرفتن کلیه ابعاد آن باشد. بنابراین نیاز است که پایداری اقتصادی-اجتماعی آبخوان در کنار پایداری کمی و کیفی آن موردارزیابی قرار گیرد. همچنین یکی از مهم‌ترین ارکان محاسبه یک شاخص پایداری، تدوین چارچوبی برای تلفیق ابعاد پایداری است که معمولاً مبتنی بر نظرسنجی و تکمیل پرسشنامه‌ها است. این موضوع سبب می‌شود تا به دلیل عدم درک کامل از ابعاد شاخص پایداری توسط متخصصان پاسخ غیرواقعی داده باشند. برای غلبه بر این محدودیت سعی شده است که نظرات غیر واقعی از لحاظ علمی، در امتیازدهی حذف شوند.

نتایج و بحث

با توجه به تعریف پنج شاخص برای ارزیابی پایداری آبخوان، برای محاسبه سه شاخص تغییر در ذخیره آب زیرزمینی، تغییر در کیفیت آب زیرزمینی و شاخص خشک‌سالی از داده‌های کمی و کیفی آب زیرزمینی در دوره آماری ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۸ استفاده شده است. هر یک از این شاخص‌ها به صورت جداگانه محاسبه و در نهایت برای نمایش وضعیت پایداری نهایی آبخوان دشت ورامین، از طریق روش‌های وزنی آنتروپی شانون و AHP ادغام شده‌اند. در تمام نقشه‌های ارائه شده در این قسمت، عدد ۱۰۰ نمایانگر حداکثر پایداری و عدد صفر نمایانگر وضعیت ناپایدار است و عدد پایداری به صورت مقداری بین ۲۵-۵۰ (ناپایدار)، ۵۰-۷۵ (پایداری کم)، ۷۵-۱۰۰ (پایدار متوسط)، ۱۰۰-۷۵ (پایدار) نمایش داده شده است. در کل برای محاسبه شاخص‌ها از داده‌های

این وضعیت در مکان‌هایی که غلظت کنونی آلاینده از میانگین دوره بیش‌تر بوده است، مقدار شاخص منفی شده است و امتیاز صفر به این شاخص تعلق گرفته است. از اطلاعات سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۸ برای اندازه‌گیری این شاخص براساس رابطه (۳) استفاده شده است. امتیازات این شاخص براساس جدول (۱) محاسبه شده است. نقشه پایداری محدوده‌های مطالعاتی براساس این شاخص در شکل (۳) نشان داده شده است. براساس این نقشه بیش‌ترین میزان پایداری کیفی در بخش‌های شمالی و شرقی آبخوان دشت ورامین مشاهده می‌شود. در واقع در نیمه شمالی دشت که منطقه تغذیه است کیفیت آب عالی است، درحالی‌که در بخش‌های غرب و جنوب‌غرب منطقه به دلیل تبادل آبخوان با رودخانه شور که در تمام طول سال فاضلاب جریان دارد، هم‌چنین بخش‌هایی در اطراف شهر ورامین که تحت تأثیر فاضلاب‌های شهری هستند کیفیت آب آبخوان ضعیف ارزیابی شده است.

شاخص مشکلات کیفیت آب زیرزمینی (شاخص کیفی)
 برای محاسبه این شاخص از داده‌های هدایت الکتریکی (EC) در سال ۱۳۹۸ استفاده شده است. مساحتی از آبخوان که EC بالاتر از ۴۰۰۰ دارد را عدد پایداری صفر، مساحتی از آبخوان که EC بین ۴۰۰۰ تا ۲۲۵۰ را دارد عدد پایداری ۲۵، مساحتی از آبخوان که EC بین ۲۲۵۰ تا ۷۵۰ را دارد عدد پایداری ۵۰، مساحتی از آبخوان که EC بین ۷۵۰ تا ۲۵۰ را دارد عدد پایداری ۷۵ و برای EC کم‌تر از ۲۵۰ عدد پایداری ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. این شاخص براساس رابطه (۳) محاسبه شده است. هم‌چنین امتیازات این شاخص براساس جدول (۱) محاسبه شده است. نقشه پایداری مکانی آبخوان براساس این شاخص در شکل (۴) ارائه شده است. نسبت به بخش غربی آبخوان بالاتر است. این نقشه پایداری

شاخص تغییر در کیفیت آب زیرزمینی (شاخص کیفی)
 در این شاخص وضعیت کنونی کیفیت آب زیرزمینی نسبت به دوره مطالعاتی موردبررسی قرار می‌گیرد (Mays, 2007). برای محاسبه این شاخص از داده‌های کیفی سطح آب زیرزمینی چاه‌های معرف استفاده شده است. اطلاعات کیفی آب زیرزمینی از چاه‌های معرف کیفی (چاه‌های انتخابی کیفی از منابع بهره‌برداری) آب زیرزمینی شرکت مدیریت منابع آب ایران تهیه شده است. هدایت الکتریکی منابع آب زیرزمینی در این آبخوان در ۷۹ چاه به مدت دو بار در سال اندازه‌گیری شده است و با واحد اندازه‌گیری میکروموس بر سانتی‌متر ارائه شده است. موقعیت مکانی این چاه‌های معرف در شکل (۳) نمایش داده شده است.

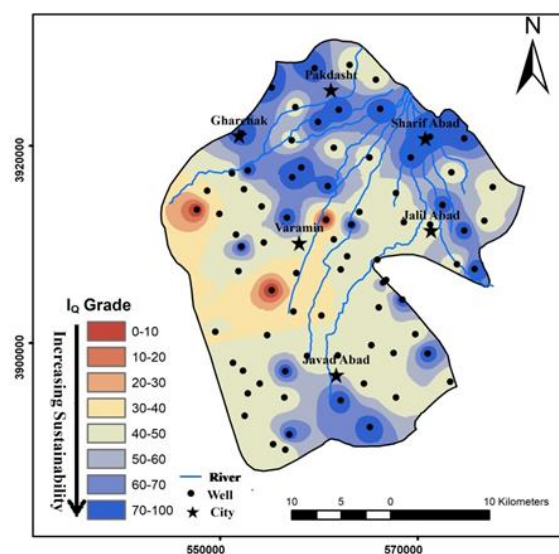


Figure 3. Spatial sustainability map of Varamin aquifer based on the qualitative index of change in groundwater quality

در این شاخص وضعیت کنونی میزان هدایت الکتریکی نسبت به حداکثر و حداقل دوره سنجیده شده است. برای جلوگیری از تأثیر داده‌های غیرنرمال (آلودگی ناشی از منابع نقطه، خط‌های اندازه‌گیری و غیره) در این شاخص مقدار کنونی غلظت با میانگین طول دوره جایگزین شده است. در

هفت نقشه محاسبه شده است. در نهایت براساس امتیازهای ارائه شده در جدول (۱)، نقشه پایداری با امتیازات بین صفر تا ۱۰۰ برای آبخوان ورامین تهیه شده است و در شکل (۵) ارائه شده است. براساس این نقشه پایداری بخش شمالی نسبت به بخش جنوبی آبخوان بالاتر است. در کل بیشترین آسیب پذیری آبخوان در مجاورت رودخانه شور در بخش های غربی و جنوبی آبخوان مشاهده می شود.

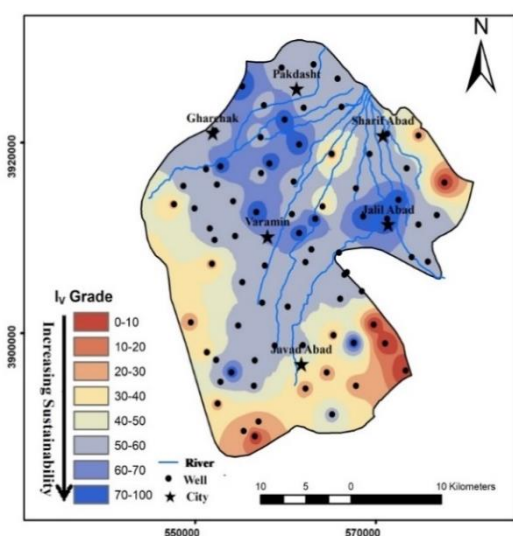


Figure 5. Spatial sustainability map of Varamin aquifer based on vulnerability index

شاخص خشک سالی آب زیرزمینی

شاخص خشک سالی بعد پایداری محیط زیست در آبخوان ورامین را مورد بررسی قرار می دهد. براساس این شاخص می توان وضعیت خشک سالی آب زیرزمینی را تعیین نمود. برای محاسبه میانگین و انحراف معیار در این شاخص از داده های سطح آب زیرزمینی بین سال های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۸ استفاده شده است و شاخص برای همه ماه های سال ۱۳۹۸ براساس رابطه (۵) محاسبه و میانگین گرفته شده است. امتیازات این شاخص براساس جدول (۱) محاسبه شده است. نقشه پایداری آبخوان براساس این شاخص در شکل (۶) ارائه شده است. این شاخص برخلاف دیگر شاخص ها،

با پایداری کمی آبخوان تا حدی مطابقت دارد. در نواحی غرب و جنوب غربی آبخوان ورامین به دلیل وجود نهشته های ریزدانه تبخیری، آب زیرزمینی دارای کیفیت پایین تری نسبت به سایر نواحی آبخوان مورد مطالعه است. در نواحی شمالی و در محدوده مسیر رودخانه جاجرود (شمال شرق محدوده)، نهشته های دانه درشت نهشته شده و کیفیت آب زیرزمینی در این بخش نسبت به سایر بخش ها بالا است (EC کم تر از $500 \mu\text{S/cm}$). در واقع نواحی غربی آبخوان که در مجاورت رودخانه شور هستند، از لحاظ پایداری کیفی در وضعیت نامناسب قرار دارند.

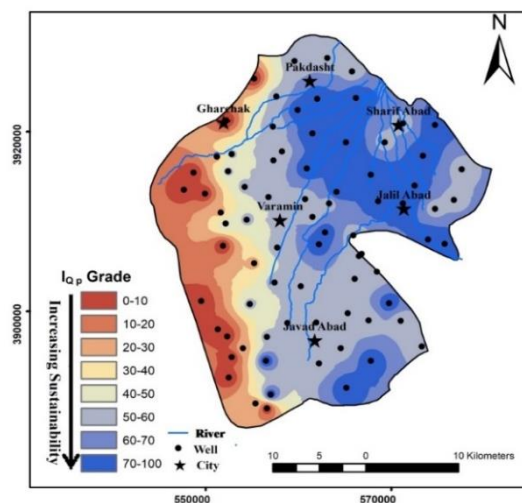


Figure 4. Spatial sustainability map of Varamin aquifer based on the qualitative index of groundwater quality problem

شاخص آسیب پذیری آب های زیرزمینی (شاخص محیط زیستی)

برای تهیه نقشه پایداری براساس این شاخص در ابتدا هفت نقشه عمق آب زیرزمینی، تغذیه، محیط آبخوان، محیط خاک، توپوگرافی یا شیب سطح زمین، مواد تشکیل دهنده زون غیراشباع و هدایت هیدرولیکی تهیه شده است (نقشه ها و جدول های امتیازبندی مربوط به آن ها در پیوست (۱) ارائه شده است)، و سپس نقشه نهایی آسیب پذیری از ادغام این

ذکر است که هر دو روش وزن‌دهی براساس شکل (۷) نتایج تقریباً یکسانی را نشان می‌دهند، بنابراین می‌توان بیان کرد که در مطالعات بعدی می‌توان به یکی از این روش‌ها به تنهایی استناد نمود.

Table 2. Weights assigned to indicators based on Shannon and AHP entropy methods

Index	(GRI)	(I _v)	(I _{QP})	(I _Q)	(I(ΔH) _i)
Entropy methods	14.7	7.3	19.6	16.8	41.6
AHP	10.9	5.8	29.3	15.2	38.8

نقشه پایداری مکانی آبخوان دشت ورامین براساس میانگین وزنی شاخص‌های کمی، کیفی و محیط زیستی در شکل (۷) ارائه شده است.

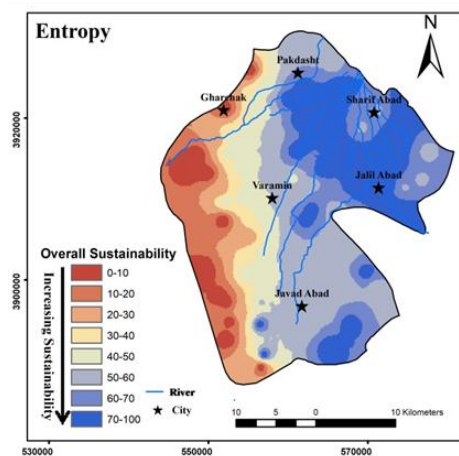
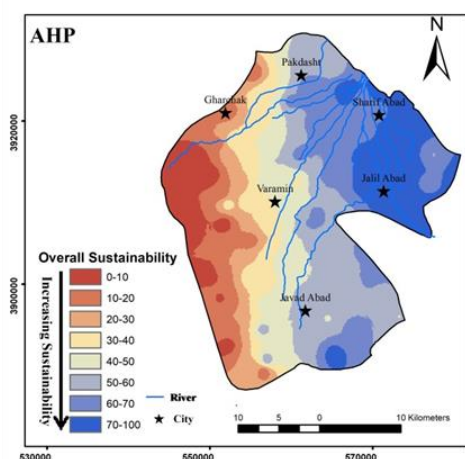


Figure 7. Overall sustainability map based on Shannon entropy and AHP methods

کم‌ترین میزان پایداری را در بخش شمالی نشان می‌دهد. این بدان معنی است که بخش شمالی آبخوان بیش‌تر از دیگر نقاط آبخوان تحت تأثیر فرایند خشک‌سالی قرار دارد. تمامی شاخص‌ها و امتیازات محاسبه‌شده آن‌ها در جدول (۲) پیوست ارائه شده است.

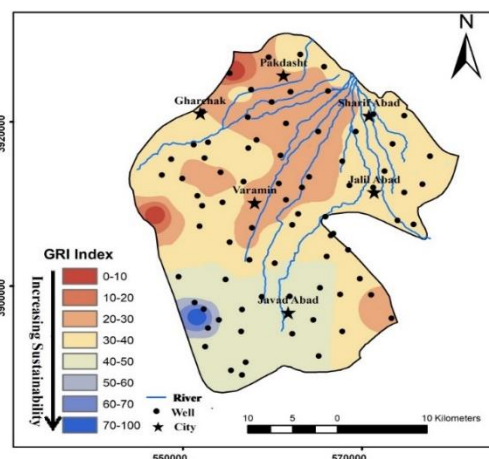


Figure 6. Spatial sustainability map of Varamin aquifer based on drought index

تلفیق شاخص‌ها

در این بخش از روش‌های آنتروپی شانون و AHP جهت در نظرگرفتن وزن‌های متناسب براساس نظرات خبرگان برای هر یک از شاخص‌ها، استفاده شده است. برای استفاده از دو روش آنتروپی و AHP جهت وزن‌دهی به شاخص‌ها، پرسش‌نامه‌هایی تهیه گردیده است و در اختیار کارشناسان درگیر در طرح احیا و تعادل‌بخشی در شرکت مدیریت منابع آب و پژوهش‌گران هیدروژئولوژیست کشور قرار داده شد. سپس نتایج گردآوری و وزن‌دهی انجام شده است. وزن‌های تعلق‌گرفته به شاخص‌ها براساس هر دو روش آنتروپی شانون و AHP در جدول (۲) ارائه شده است. براساس هر دو روش بیش‌ترین وزن به شاخص کمی تغییر در ذخیره آب زیرزمینی و کم‌ترین وزن به شاخص آسیب‌پذیری تعلق گرفته است. لازم به

شرکت مدیریت منابع آب ایران و پژوهشگران هیدروژئولوژیست در سطح کشور استفاده شد. سپس نتایج گردآوری و وزندهی با دو روش مذکور انجام گرفت. هر دو روش وزنی AHP و آنتروپی در محاسبه پایداری آبخوان ورامین حاکی از نتایج یکسانی است. بنابراین در مطالعات آینده استفاده از یکی از این روش‌ها جهت وزندهی اکتفا می‌کند. ادغام سه بعد از شاخص‌های پایداری در آبخوان ورامین نشان می‌دهد که پایداری بخش شرقی آبخوان بالاتر از بخش غربی آبخوان است. پایداری آبخوان در بخش‌های غربی بین عدد صفر تا ۲۵ محاسبه شده که با وضعیت هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمی منطقه کاملاً مطابقت دارد. پایین بودن میزان پایداری آبخوان در بخش غربی با توجه به ضخامت کم‌تر لایه آبرفتی، پایین بودن ضریب آبرفتی ویژه و قابلیت انتقال نسبت به بخش‌های شمالی و شرقی آبخوان قابل‌توجه است. علاوه بر این تمرکز بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در این منطقه بیش‌تر بوده و حجم آب بالاتری در این منطقه استخراج می‌شود. همچنین در نواحی غرب و جنوب‌غربی آبخوان ورامین دو عامل حضور رودخانه شور با مسیر عبور فاضلاب و نهشته‌های ریزدانه تبخیری، باعث شده است تا آب زیرزمینی در این بخش‌ها کیفیت پایین‌تری و در نتیجه پایداری منابع آب کم‌تری نسبت به سایر نواحی آبخوان مورد مطالعه داشته باشد. بررسی شاخص پایداری منابع آب زیرزمینی به صورت توزیعی در سطح آبخوان ورامین این موضوع را نشان می‌دهد که مدیریت بهره‌برداری در این منطقه بسیار حساس بوده و نمایان‌گر نیاز به اقدامات مدیریتی سریع جهت حفاظت از منابع آب زیرزمینی در بخش غربی آبخوان دشت ورامین است. برای مطالعات آینده تهیه نقشه‌های پایداری مکانی برای همه آبخوان‌های کشور جهت تصمیمات مدیریتی صحیح براساس وضعیت پایداری هر آبخوان توصیه می‌شود.

براساس هر دو روش میانگین وزنی آنتروپی شانون و AHP پایداری کلی آبخوان در بخش شرقی بالاتر از بخش غربی آبخوان است. نتایج به دست آمده با ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی منطقه نیز کاملاً مطابقت دارد به گونه‌ای که ضخامت آبرفت در بخش شمالی و شرقی (مخروطافکنه جاجرود) زیاد (تا بیش از ۳۰۰) و آبرفت‌ها نیز از اجزای بسیار دانه درشت به وجود آمده‌اند. به همین دلیل مقدار قابلیت انتقال آبخوان در این منطقه تا بیش از ۳۰۰۰ مترمربع در روز برآورد می‌شود. مقدار قابلیت انتقال آبخوان از میانه شمالی مخروطافکنه جاجرود به سمت پیرامون آن به دلیل کاهش ضخامت لایه آبار و دانه ریزتر شدن آبرفت‌ها به تدریج کاهش می‌یابد، ضخامت آبرفت در غرب دشت به شدت کاهش پیدا می‌کند و آبرفت‌ها نیز دانه‌ریز هستند. به همین دلیل قابلیت انتقال در بخش غربی دشت پایین است، این مقدار در منطقه قرچک و کناره‌های رود شور به کم‌تر از ۱۰۰ مترمربع در روز می‌رسد. مقدار آبرفتی ویژه نیز به همین صورت در بخش‌های شمالی بین ۱۸ تا ۲۴ درصد و در بخش‌های مرکزی حدود ۱۲ درصد و به سمت غرب منطقه بین ۲ تا ۶ درصد تغییر می‌کند. همچنین حضور رودخانه شور در بخش غربی آبخوان که مسیر عبور فاضلاب است باعث کاهش پایداری کیفی و افزایش آسیب‌پذیری آبخوان در بخش غربی آبخوان شده است.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه از سه بعد هیدروژئولوژی کمی، هیدروژئولوژی کیفی و محیط‌زیستی، پایداری مکانی آبخوان دشت ورامین مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور تحلیل وضعیت پایداری از دو روش آنتروپی و AHP جهت وزندهی به شاخص‌ها و محاسبه پایداری نهایی، پرسش‌نامه‌هایی تهیه شد. محاسبه و ارزیابی پرسشنامه‌ها توسط کارشناسان درگیر در طرح احیا و تعادل بخشی در

methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates, based on the drastic model, an example from NE Korinthia, Greece. *Journal of Hydrology*, 333(2-4), 288-304.

5. Bocanegra, E. M., Massone, H. E., Cionchi, J. L., & Martínez, D. E. (2008). Integrated management of the coastal aquifer in Mar del Plata, Argentina. In *Proceedings 1rst SWIM-SWICA Joint Saltwater Intrusion Conference*, 129-134.
6. Brundtland, G. H., Khalid, M., Agnelli, S., & Al-Athel, S. (1987). *Our common future*. New York.
7. Buchanan, J., Phillip, S. and Daniel, V., 1999. Project Ranking Using ELECTRE III, Department of Management Systems University of Waikato, Hamilton. New Zealand, Research Report Series.
8. Bui, N. T., Kawamura, A., Amaguchi, H., Du BUI, D., & Truong, N. T. (2016). Environmental Sustainability Assessment of Groundwater Resources in Hanoi, Vietnam by a simple AHP Approach, *土木学会論文集 G (環境)*. 72(5), 137-146.
9. Bui, N. T., Kawamura, A., Amaguchi, H., Du Bui, D., Truong, N. T., & Nam, H. (2017). Economic Sustainability Assessment of Groundwater Resources: Case Study of Hanoi, Vietnam. *Journal of Environmental Science*, 6, 624-633.
10. Bui, N. T., Kawamura, A., Amaguchi, H., Du Bui, D., Truong, N. T., & Nakagawa, K. (2018). Social sustainability assessment of groundwater resources: A case study of Hanoi, Vietnam. *Ecological Indicators*, 93, 1034-1042.
11. Chaves, H. M. L., & Alipaz, S. (2007). An Integrated Indicator Based on Basin Hydrology, Environment, Life, and Policy: The Watershed Sustainability Index. *Water Resources Management*, 21(5), 883-895.
12. Cullet, P. (2017). Water Regulation and Public Participation in the Indian Context. Public Participation and Water Resources Management. *International Conference, Geneva*, 20-29.
13. Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M. F., & van Beek, L. P. (2012). Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*, 488(7410), 197.
14. Gordon Groundwater Consultancy (Gordon Report). (2011). Sustainable Groundwater Management: Preliminary Approach for Assessing the Sustainability of Groundwater, *CCME Water Management Development Committee*. 48.

تشکر و قدردانی

این مقاله بخشی از یک طرح پژوهشی داخلی با شماره قرارداد «WR-WRE4-1399-A» است که با حمایت معاونت پژوهشی، در پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، گروه مدیریت کمی و کیفی حوضه‌های آبریز در مؤسسه تحقیقات آب انجام شده است.

پی‌نوشت‌ها

1. Variation in Groundwater Storage Index ($I(\Delta H)_i$)
2. Variation in Groundwater Quality Index (I_Q)
3. Groundwater Quality Problem Index (I_{QP})
4. Groundwater Vulnerability Index (I_v)
5. Groundwater Drought Index
6. Shannon Entropy method
7. Analytic Hierarchy Process (AHP) Method

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها حسب درخواست، از طرف نویسنده مسئول از طریق ایمیل قابل ارسال می‌باشد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

منابع

1. Aller, L., Lehr, J. H., Petty, R., & Bennett, T. (1987). DRASTIC: a standardized system to evaluate groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. *National Water Well Association*, Worthington, Ohio, United States of America.
2. Alley, W. M., Reilly, T. E., & Franke, O. L. (1999). Sustainability of ground-water resources: US Department of the Interior, *US Geological Survey*. Circular 1186, 79.
3. Anbazhagan, S., & Jothibas, 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.
4. Antonakos, A. K., & Lambrakis, N. J. (2007). Development and testing of three hybrid

15. Hosseini, SM., Parizi, E., Ataie-Ashtiani, B., & 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.
16. Jahromi, Z. (2019). *Determination Sources of Nitrate Contamination in Varamin Plain Aquifer Using Isotopic Indicators and Simulation of Contaminant Transport*. Ph.D. dissertation, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. 165. (In Persian).
17. Juwana, I., Perera, B., & Muttil, N. (2010). A water sustainability index for West Java-Part 2: refining the conceptual framework using Delphi technique. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 62(7), 1641-1652.
18. Juwana, I., Perera, B.J.C., & Muttil, N. (2009). Conceptual framework for the development of West Java water sustainability index. *18th World IMACS/MODSIM Congress*, Cairns.
19. Kardan Moghadam, H., & Roozbahani, A. (2015). 'Evaluation of Bayesian networks model in monthly groundwater level prediction (Case study: Birjand aquifer)', *Water and Irrigation Management*, 5(2), 139-151. (In Persian).
20. Kardan Moghaddam, H., Javadi, S., & Rahimzadeh, Z. (2020). 'Evaluation of Aquifer Vulnerability Assessment Methods for Alluvial and Coastal Aquifers, Case Study in Astaneh-Koochesfahan Aquifer, Guilan, Iran', *Water and Irrigation Management*, 10(2), 203-220. (In Persian).
21. Korbil, K. L., & Hose, G. C. (2011). A tiered framework for assessing groundwater ecosystem health. *Hydrobiologia*, 661(1), 329-349.
22. Lavapuro, M., Lipponen, A., Artimo, A., & Katko, T. S. (2008). Groundwater sustainability indicators: testing with Finnish data.
23. Lawrence, P., Meigh, J., & Sullivan, C. (2003). *The Water Poverty Index: an International Comparison Retrieved 25 June 2007*.
24. Mattas, C., Voudouris, K., & 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 Greece. *Water*, 6(4), 1043-1068.
25. Mays, L.W. (2007). *Water resources sustainability*. McGraw-Hill Education.
26. Mendicino, G., Senatore, A., & Versace, P. (2008). A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate. *Journal of Hydrology*, 357(3-4), 282-302.
27. Nasiri, M., Kardan Moghaddam, H., & Hamidi, M. (2020). A hybrid approach with SWARA and COPRAS methods in ranking management strategies to control seawater intrusion in coastal aquifers. *Water and Irrigation Management*, 10(3), 365-379. (In Persian).
28. Pernía Llera, J. M., & Corral, M. (2001). Análisis del Llenado de los acuíferos en función de diferentes periodos históricos de referencia. *Hidrogeología y Recursos hidráulicos*, 3-12.
29. Preda, E., Klove, B., Kvarner, J., Lundberg, A., Siergieiev, D., Boukalova, Z., & Ertürk, A. (2013). New indicators for assessing GDE vulnerability.
30. Policy Research Initiative. (2007). Canadian Water Sustainability Index (CWSI) project report. *Government of Canada*.
31. Saaty, T. L. (1980). *The Analytical Hierarchy Process, Planning, Priority, Resource Allocation*. RWS Publications, USA.
32. Samani, S., Roozbahani, R., Kavooosi Heydari, A., Kardan Moghaddam, H. (2020). A Framework for Indicator-Based Water Sustainability Assessment, *Journal of Water and Sustainable Development*, 7(1), 49-60. (In Persian).
33. Samani, S. (2020). Providing Sustainable Global Groundwater Resources Management Models to Improve the Sustainability Plan in Iran. *Iran-Water Resources Research*, 16(2), 271-291. (In Persian).
34. Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bulletin System Technol Jouranal*, 27, 379-423.
35. Steinman, A. (2007). Report to the Michigan Legislature on: Recommended Criteria and Indicators of Groundwater Sustainability for the State of Michigan. Presented on behalf of the Michigan Groundwater Conservation Advisory Council.
36. Vrba, J., & Lipponen, A. (2007). Groundwater resources sustainability indicators. UNESCO, IAEA, IAH. IHP-VI, Series on Groundwater.
37. WESA. (2013). *Assessment Report Analysis of Groundwater Pilot Pro*.

Table 1 Appendix. Classification of drastic model parameters

Parameters	Grade	Parameters	Grade
Recharge (mm/year)		Depth (m)	
0-25.4	1	0-1.5	10
25.4-50.8	3	1.5-4.6	9
50.8-101.6	6	4.6-9.1	7
101.6-152.4	8	9.1-15.2	5
>152.4	9	15.2-22.9	3
		22.9-30.5	2
		>30.5	1
Soil		Aquifer	
Gravel	10	Gravel	10
Sand	9	Sand	8
Loamy Sand	7	Sand and Gravel	5
Loam	5	Sand and clay	3
Silt	3	clay	2
clay	2		
Unsaturated Zone		Slope	
Sand and Gravel	10	0-2	10
Silty Sand	7	2-6	9
Silty Clay	4	6-12	5
clay	1	12-18	3
		18<	1
K			
		Feb-01	1
		Jun-02	2
		Jun-14	4
		20-14	6
		40-20	8
		40<	10

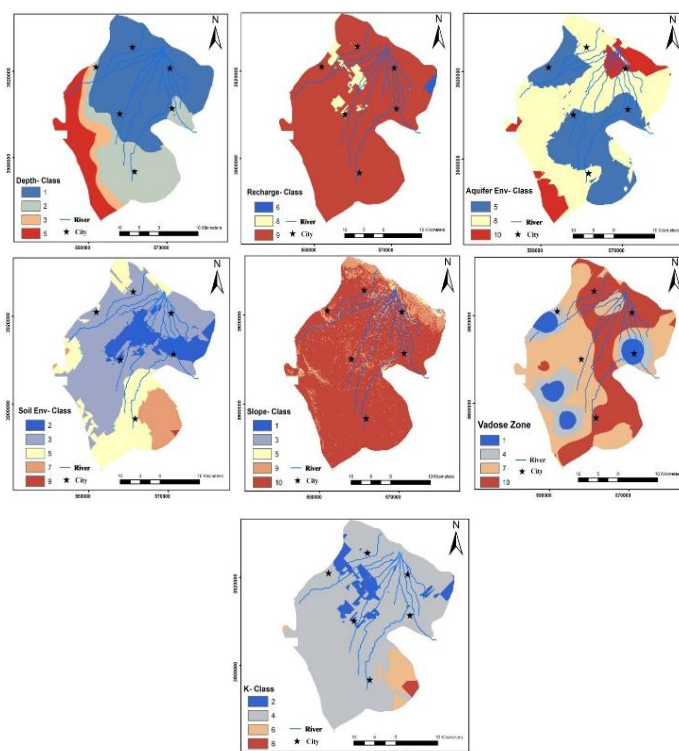


Figure 1 Appendix. Drastic model parameter classification map

Table 2 Appendix. Calculated index and grade related to five sustainability indicators

UTMX	UTMY	Index I _a	Grade(I _a)	Index I(Q _p)	Grade I(Q _p)	Index I _v	Grade(I _v)	UTMX	UTMY	Index I _{an}	Graded (I _{dh})	Index GRI	Grade GRI
557400	3903200	44	50	1251	50	40	50	546535	3912300	15	0	-0.56	50
554750	3900800	49	50	1554	50	42	50	546983	3908785	16	0	-2.06	0
561900	3898750	53	50	837	50	45	50	547050	3917492	17	0	0.18	50
554400	3910200	43	50	890	50	43	50	548657	3914717	18	0	-0.63	50
575760	3907500	74	75	647	75	45	50	550068	3910717	19	0	1.31	50
566200	3923750	67	75	588	75	42	50	550846	3913960	20	25	-4.14	0
555200	3905350	39	25	2864	25	43	50	551257	3891717	21	25	1.36	50
573278	3896075	45	50	1023	50	85	0	551627	3917579	22	25	2.20	100
551600	3911000	54	50	2847	25	41	50	551633	3896289	23	25	2.74	100
566798	3906395	37	25	811	50	43	50	552057	3900800	24	25	1.41	50
560700	3912500	36	25	1070	50	42	50	552234	3900655	25	25	0.75	50
552400	3915587	58	50	1366	50	44	50	553587	3912567	26	25	-1.85	25
571000	3898950	67	75	1009	50	88	0	553766	3905669	27	25	2.00	100
565750	3926700	54	50	834	50	41	50	554110	3904214	28	25	1.34	50
558800	3898700	45	50	984	50	48	50	554826	3910156	29	25	-0.50	50
565100	3918800	49	50	500	75	70	25	555028	3916817	30	25	0.98	50
563300	3912000	62	75	902	50	30	75	555733	3925863	31	25	-4.02	0
555356	3889753	51	50	3305	25	72	25	556194	3921183	32	25	-1.98	25
552472	3892628	49	50	6569	0	76	25	556313	3896574	33	25	1.01	50
554000	3895900	49	50	2805	25	28	75	556341	3923373	34	25	1.42	50
552800	3894900	44	50	7946	0	45	50	556430	3900778	35	25	-0.12	50
551850	3907300	55	50	5355	0	72	25	557150	3905926	36	25	-1.19	25
562000	3923650	63	75	549	75	44	50	557500	3891092	37	25	0.08	50
567800	3894500	51	50	632	75	78	25	557242	3900752	38	25	1.59	75
564550	3895900	56	50	816	50	79	25	557514	3888798	39	25	0.94	50
562200	3894200	63	75	829	50	70	25	558164	3914897	40	25	0.60	50
572500	3914000	62	75	705	75	38	75	558300	3908112	41	50	-1.85	25
559574	3927862	70	75	1329	50	44	50	558457	3898306	42	50	-1.30	25
557700	3907100	49	50	1085	50	43	50	558536	3920410	43	50	-1.30	25
558200	3917800	69	75	823	50	50	75	559800	3909657	44	50	1.04	50
547632	3913525	34	25	6502	0	70	25	560008	3906121	45	50	1.60	75
548666	3915434	60	50	8199	0	55	50	560426	3890177	46	50	-0.48	50
556500	3894500	49	50	719	75	54	50	560429	3902738	47	50	1.42	50
565300	3899800	44	50	989	50	77	25	560467	3903109	48	50	1.32	50
568446	3904405	69	75	784	50	45	50	560689	3912178	49	50	-1.28	25
566500	3906150	63	75	838	50	44	50	561633	3892389	50	50	1.56	75
560900	3915900	77	75	587	75	43	50	561700	3898058	51	50	1.93	75
569750	3900900	53	50	496	75	95	0	561703	3898058	52	50	-0.90	50
571250	3920900	73	75	1292	50	50	50	563079	3927995	53	50	1.33	50
564100	3913300	54	50	601	75	70	25	563751	3907926	54	50	0.33	50
552800	3917500	64	75	1637	50	23	75	564138	3917069	55	50	-1.74	25
556600	3897150	76	75	1012	50	45	50	564338	3924790	56	50	-1.03	25
574700	3920750	62	75	690	75	70	25	564552	3898778	57	50	0.54	50
556600	3889200	53	50	7452	0	90	0	564674	3912915	58	50	-1.74	25
577600	3915800	56	50	995	50	88	0	565401	3902421	59	50	0.32	50
570550	3891990	47	50	618	75	24	75	565824	3890180	60	50	-0.50	50
568600	3912250	59	50	655	75	25	75	567540	3926026	61	75	0.46	50
567550	3899000	55	50	1187	50	22	75	567953	3922552	62	75	-1.76	25
571255	3912000	58	50	701	75	26	75	570782	3912087	63	75	1.04	50
552300	3897200	48	50	9129	0	44	50	571298	3923549	64	75	1.25	50
551300	3898000	45	50	10746	0	78	25	571902	3897300	65	75	-1.79	25
559900	3922400	63	75	665	75	28	75	572069	3912759	66	75	0.99	50
557250	3920550	59	50	1070	50	55	50	572909	3915930	67	75	1.53	75
549500	3901150	57	50	4499	0	76	25	573039	3908572	68	75	1.05	50
573950	3908000	55	50	555	75	43	50	573627	3919155	69	75	0.42	50
552200	3921250	61	75	6327	0	44	50	575251	3921253	70	75	-0.45	50
551200	3917200	57	50	3482	25	41	50	575928	3913838	71	75	-1.43	25
560250	3902800	54	50	857	50	40	50	577343	3905652	72	75	1.19	50
562850	3908800	53	50	605	75	46	50	579513	3914814	73	75	-0.46	50
562200	3907450	54	50	597	75	45	50						
565900	3908450	53	50	1262	50	55	50						
565150	3891500	72	75	635	75	47	50						
555200	3925900	60	75	5674	0	38	75						
567800	3915200	51	50	513	75	50	50						
556750	3912700	63	75	758	50	30	75						
573400	3917300	51	50	685	75	57	50						
557000	3890750	61	75	715	75	75	25						
557600	3923900	55	50	1531	50	48	50						
569300	3918800	63	75	764	50	44	50						
576750	3912400	40	50	810	50	53	50						
554200	3913850	52	50	1085	50	48	50						
557300	3916800	74	75	824	50	54	50						
542300	3905050	50	50	7980	0	90	0						
566050	3903600	51	50	845	50	45	50						
561500	3919800	45	50	477	75	35	75						
574700	3911400	67	75	787	50	55	50						
549900	3913100	55	50	7811	0	54	50						
552139	3909777	72	75	1703	50	45	50						
563090	3928192	55	50	1585	50	44	50						