Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN: 2423-7833
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

Integrated vulnerability assessment of surface and groundwater resources by combining two indices DRASTIC and WRASTIC

Naser Asgarbioki [1] | Ahmad Sharafati[2]✉ | Hamid Kardan moghaddam[3]
1. Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: naserasgari15@yahoo.com
2. Corresponding Author, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: asharafati@gmail.com
3. Water Research Institute, Ministry of Energy, Tehran, Iran. E-mail: h.kardan@wri.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: March. 3, 2023

Revised: July. 8, 2023

Accepted: July. 17, 2023

Published online: Jan. 21, 2024

Keywords:
AHP,
DRASTIC Index,
Hierarchical Analysis,
WRASTIC Index.

ABSTRACT

Today, human activities are one of the most important challenges in issues related to the quality of water resources, which is currently considered one of the management threats in the exploitation sector. This issue will require the identification and evaluation of water resources from different perspectives, of which the vulnerability of water resources is one. This study evaluates the vulnerability of water resources by combining two DRASTIC vulnerability indices in the aquifer sector and WRASTIC vulnerability index in the upland sector of Astana-Kuchsefahan region. In this study, after assessing the vulnerability with the relevant indicators, two methods of entropy and hierarchical analysis were used for scaling based on maximizing the correlation with nitrate concentration. The results showed that the most importance in both indices based on recalibrated weights include industrial use in the WRASTIC index and underground water depth in the DRASTIC index. The analysis of the calibration results showed that the correlation of nitrate with the DRASTIC vulnerability index using the AHP method was 0.61 and with the WRASTIC index was 0.58 using the Shannon entropy method. Also, the measurement results showed that the WRASTIC index ranges from 17 to 46 and the DRASTIC index ranges from 119 to 180. Based on the consolidated results in the western and eastern parts of the highlands, the level of vulnerability using the WRASTIC index is lower and there is a higher vulnerability in the western part of the aquifer compared to the eastern part.

Cite this article: Asgarbioki, N., Sharafati, A., & Kardan Moghaddam, H., (2024) Integrated vulnerability assessment of surface and groundwater resources by combining two indices DRASTIC and WRASTIC, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54 (11), 1715-1732. https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.356270.669463
© The Author(s).
Publisher: The University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.356270.669463

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۴، شماره ۱۱ شاپا: ۷۸۳۳-۲۴۲۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

ارزیابی آسیب‌پذیری تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی با ترکیب دو شاخص DRASTIC و WRASTIC

ناصر عسکربیوکی[۱] | احمد شرافتی[۲]✉ | حمید کاردان مقدم[۳]

۱. گروه مدیریت ساخت و آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: Naserasgari15@yahoo.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مدیریت ساخت و آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: asharafati@gmail.com

۳. موسسه تحقیقات آب. وزارت نیرو، تهران، ایران. رایانامه: h.kardan@wri.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۴/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۴/۲۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۱/۱

واژه‌های کلیدی:
شاخص DRASTIC،
شاخص WRASTIC،
روش آنتروپی،
تحلیل سلسله مراتبی.

چکیده

امروزه فعالیت‌های بشری یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در مسائل مرتبط با کیفیت منابع آب است که در حال حاضر یکی از تهدیدهای مدیریت در بخش بهره‌برداری بشمار می‌رود. این موضوع ضرورت شناسایی و ارزیابی منابع آب را از دیدگاه‌های مختلف خواهد داشت که یکی از این رویکردها، آسیب‌پذیری منابع آب است. این مطالعه به ارزیابی آسیب‌پذیری منابع آب با تلفیق دو شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC در بخش آبخوان و شاخص آسیب‌پذیری WRASTIC در بخش ارتفاعات منطقه آستانه-کوچصفهان می‌پردازد. در این مطالعه پس از ارزیابی آسیب‌پذیری با شاخص‌های مربوطه از دو روش آنتروپی و تحلیل سلسله مراتبی برای واسنجی براساس حداکثرسازی همبستگی با غلظت نیترات انجام گرفت. بررسی نتایج نشان داد که بیشترین اهمیت در هر دو شاخص بر اساس وزن‌های واسنجی شده شامل کاربری صنعتی در شاخص WRASTIC و عمق آب زیرزمینی در شاخص DRASTIC است. بررسی نتایج واسنجی نشان داد که میزان همبستگی نیترات با شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC با روش AHP مقدار ۰/۶۱ و شاخص WRASTIC با روش شانون آنتروپی مقدار ۰/۵۸ بدست آمد. همچنین نتایج واسنجی نشان داد که شاخص WRASTIC بین مقادیر ۱۷ تا ۴۶ و شاخص DRASTIC بین ۱۱۹ تا ۱۸۰ متغیر است. براساس نتایج تلفیقی در بخش غربی و شرقی ارتفاعات، میزان آسیب‌پذیری با استفاده از شاخص WRASTIC کمتر و در بخش غربی آبخوان نسبت به بخش شرقی آسیب‌پذیری بالاتری وجود دارد.

استناد: عسکربیوکی؛ ناصر، شرافتی؛ احمد، کاردان مقدم؛ حمید، (۱۴۰۲) ارزیابی آسیب‌پذیری تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی با ترکیب دو شاخص DRASTIC و WRASTIC، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۴ (۱۱)، ۱۷۳۲-۱۷۱۵. https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.356270.669463

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.356270.669463

مقدمه

استفاده از مفهوم آسیب‌پذیری در منابع آب در چند دهه اخیر به‌عنوان یک ابزار مدیریتی در شناسایی و پهنه‌های حساس و مستعد برای توسعه مورد پذیرش قرار گرفته است(Kardan Moghaddam et al., 2022). این موضوع در کنار افزایش جمعیت، توسعه شهرنشینی و همچنین توسعه در بخش‌های صنعت و کشاورزی سبب افزایش ریسک آلایندگی منابع آبی شده است(Atashi Yazdi et al., 2023). بهبود منابع آب برای حفاظت از محیط‌زیست و توسعه اقتصادی، سیاسی، اجتماعی و فرهنگی در یک کشور ضروری است (Hülsmann et al., 2019). از طرفی در سال‌های اخیر، افزایش نیاز به آب و کاهش کیفیت و آلودگی منابع آب موجب بالا رفتن اهمیت بهره‌برداری مناسب از منابع آب زیرزمینی و سطحی شده است. یکی از راه‌های مؤثر برای جلوگیری از آلودگی آب‌های زیرزمینی و آب‌های سطحی شناسایی مناطق آسیب‌پذیر آبخوان و مدیریت بهره‌برداری از منابع آب و کاربری اراضی است. وجود منابع مهم آلاینده‌های انتشاری و نقطه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی در سطح زمین و نفوذ این آلاینده‌ها به آبخوان موجب کاهش کیفیت آب زیرزمینی می‌شود. ارزیابی آسیب‌پذیری روشی کم‌هزینه در شناسایی نواحی مستعد به آلودگی است که در مدیریت منابع آب نقش اساسی دارد(Elzain et al., 2022). آسیب‌پذیری، به‌عنوان حساسیت کیفیت آب‌های زیرزمینی و آب‌های سطحی به بار آلودگی اعمال‌شده تعریف می‌شود و توسط خصوصیات ذاتی محیط تعیین می‌گردد. در بحث آسیب‌پذیری منابع آب سطحی روش جامعی بدین منظور وجود نداشته و روش‌های موجود تنها به بررسی منفرد برخی از معیارها می‌پردازند. یکی از شاخص‌هایی که برای ارزیابی آسیب‌پذیری منابع آب سطحی مورد استفاده قرار می‌گیرد، شاخص آسیب‌پذیری WRASTIC[1] است. این شاخص مبتنی بر نمره‌دهی هفت پارامتر فاضلاب انسانی و حیوانی، فعالیت‌های تفریحی و تفرجی، فعالیت‌های کشاورزی، فعالیت‌های صنعتی، اندازه حوضه، راه و حمل و نقل و تراکم پوشش گیاهی بوده که نتایج آن یک ارزیابی کلی فاقد مکان از وضعیت ریسک را ارائه می‌دهد(Maleki et al., 2020). در بحث آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی، شاخص دراستیک یکی از معتبرترین ابزارهای ارزیابی بوده که سهولت امکان نفوذ و پخش آلودگی از سطح زمین به سفره آب زیرزمینی در شرایط طبیعی را توصیف می‌کند(Baghapour et al., 2016). حساسیت منابع آب در اصل مستقل از پتانسیل آلودگی منابع آلاینده بوده و ناشی از استعداد ذاتی منبع آب در آلوده شدن توسط پارامترهای آلودگی است. اما آسیب‌پذیری اثر متقابل منبع آب و آلاینده است و پتانسیل منابع آلاینده نیز علاوه بر استعداد ذاتی منابع آب در آلوده شدن منابع آب نقش دارند. روش‌های تعیین حساسیت زیادی وجود دارد که دو روش DRASTIC و WRASTIC از معروف‌ترین آن‌ها می‌باشند. در بیشتر کشورها، جمعیت زیادی در مناطق ساحلی زندگی می‌کنند و با توجه به بالا بود سطح آب‌های زیرزمینی در این مناطق و در اندرکنش بودن با آب‌های سطحی، تلفیق شاخص DRASTIC و WRASTIC حائز اهمیت است. از آنجا که تعداد پارامترهای مدل‌سازی پهنه‌بندی آلودگی آب زیرزمینی در روش DRASTIC نسبت به سایر روش‌های دیگر بیشتر بوده، لذا از تکامل بیشتری برخوردار بوده و پرکاربردترین روش نسبت به سایر روش‌های رتبه‌دهی و وزن‌دهی است. با تلفیق مدل DRASTIC و WRASTIC، استفاده از تمام داده‌های هیدرولوژی و هیدروژئولوژی واقعی موجود، اجرای مدل DRASTIC و WRASTIC از نظر وضعیت آسیب‌پذیری آلودگی آب‌های زیرزمینی و آب‌های سطحی میسر می‌گردد. خروجی مدل DRASTIC و WRASTIC آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان را نشان می‌دهد و می‌توان به‌عنوان ابزار اولیه در توسعه و مدیریت منابع آب در آینده نیز بکار رود. در مدل DRASTIC و WRASTIC پارامترهای زیادی وجود دارد و با ترکیب این دو روش باهم نتایج دقیق‌تر و گسترده‌تری ایجاد می‌شود و با در دست داشتن این نتایج می‌توان میزان پتانسیل توسعه را براساس حجم منابع آب‌زیرزمینی و سطحی به دست آورد، همچنین می‌توان میزان آب شیرین و قابل‌استفاده برای کشاورزی را در مناطق مختلف محاسبه کرد. هدف از این مطالعه ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان بر مبنای ترکیب دو شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC و WRASTIC است که در محیط GIS انجام می‌گردد. این ارزیابی در واقع دربرگیرنده کلیه منابع آب سطحی و زیرزمینی حائز اهمیت و ارتباط بین این منابع است که برای اولین بار مورد بررسی قرار گرفته است. به عبارتی با تولید نقشه‌های پتانسیل آلودگی و ترکیب این دو شاخص، امکان تولید نقشه نهایی آسیب‌پذیری منطقه به‌صورت فضایی و مکانی فراهم می‌گردد. مدل ارائه‌شده قابلیت تولید سناریوهای مختلف ارزیابی ریسک را فراهم می‌آورد. همچنین احتمال آلودگی با استفاده از شاخص آسیب‌پذیری باعث شناخت هر چه بیشتر وضعیت آسیب‌پذیری آبخوان و نحوه شکل‌گیری آن می‌شود که براین اساس می‌توان تصمیمات مدیریتی لازم را جهت حفاظت و توسعه آب‌های زیرزمینی و سطحی کشور اتخاذ کرد.

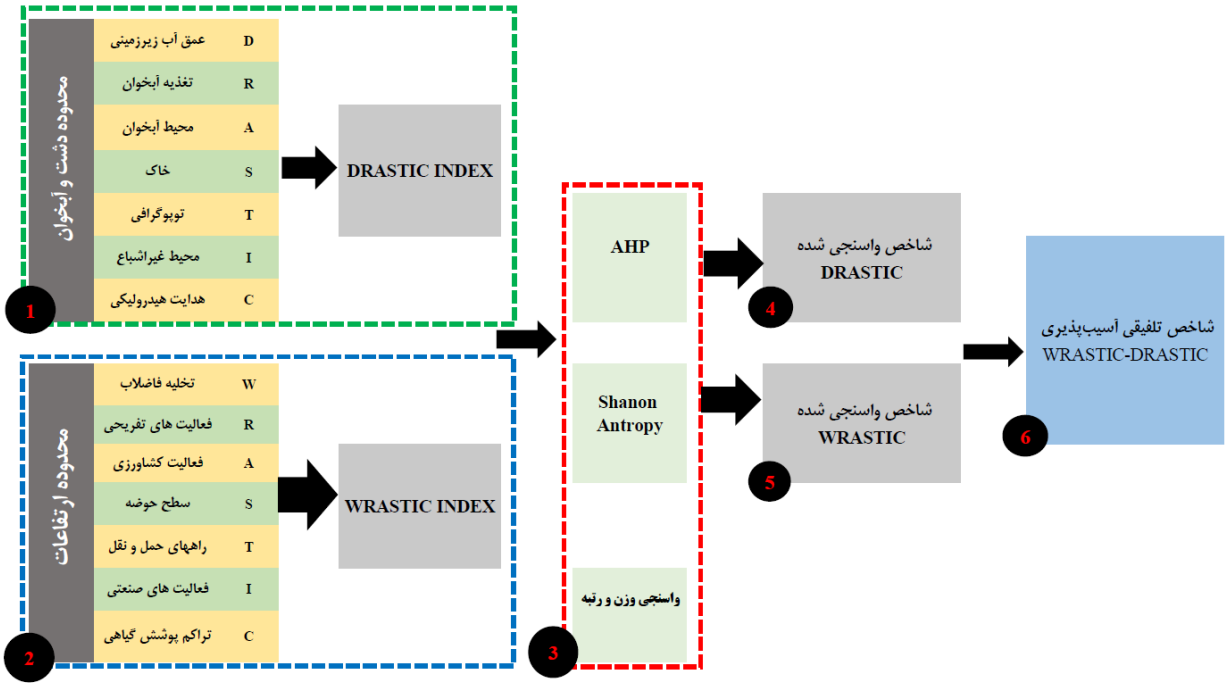
---

1 - Wastewater–Recreation–Agriculture–Size–Transportation–Industry–Cover

مواد و روش‌ها

روش پژوهش

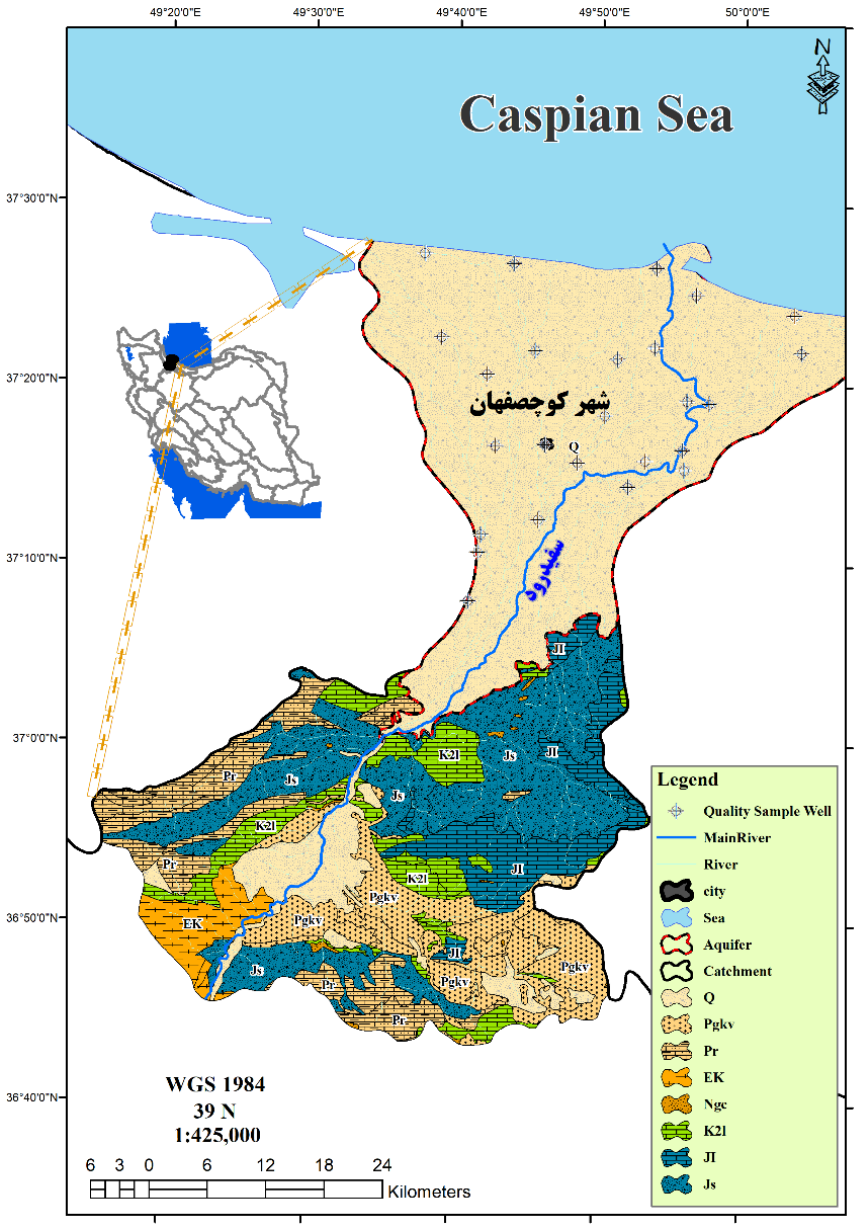
این پژوهش با رویکرد تحلیل پیمایشی و تحلیلی در محیط GIS استفاده شده است. ۷ پارامتر دو شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC و WRASTIC در محدوده مطالعاتی آستانه–کوچصفهان تعیین و پس از وزن‌دهی و رتبه‌دهی، شاخص نهایی آسیب‌پذیری محاسبه می‌گردد. پس از ارزیابی آسیب‌پذیری، با توجه به نتایج پارامترهای کیفی منابع آب واسنجی دو شاخص آسیب‌پذیری با روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و شانون آنتروپی انجام گرفته و ترکیب دو شاخص بیانگر آسیب‌پذیری تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی برای منطقه است. در شکل (۱) فلوچارت انجام پژوهش ارائه‌شده است.



شکل ۱- فلوچارت روش انجام تحقیق

منطقه موردمطالعه

محدوده مطالعاتی آستانه –کوچصفهان یکی از زیرحوضه‌های، حوضه آبریز سفیدرود بوده که در پایین‌دست سد سفیدرود واقع‌شده است. این محدوده دارای وسعت معادل ۲۸۳۵ کیلومترمربع در جنوب غربی دریای خزر قرار دارد. آبخوان این محدوده مطالعاتی از نوع آزاد و بخش غربی آن تحت‌فشار است. این آبخوان با مساحت ۹۸۹ کیلومترمربع از جنس آبرفت از مخروط افکنه سفیدرود تا دریا ادامه دارد(Beheshti et al., 2022). این منطقه از نظر نزولات آسمانی غنی بوده به‌گونه‌ای که بارش‌های فراوان جوی در این منطقه تا ۱۶۰۰ میلیمتر در سال نیز می‌رسد که عامل مهمی در تغذیه آبخوان می‌باشد. اما در بیشتر نقاط دشت آستانه با وجود حجم بالای سفره‌های آبرفتی، به دلیل وجود نهشته‌های ریزدانه، بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی به‌سادگی صورت نمی‌گیرد. از نظر ساختار زمین‌شناسی سازندهای این منطقه از پرکامبرین تا کواترنر رخنمون داشته و شامل سنگ‌ها و نهشته‌های مختلف از قبیل سنگ آهک، شیل، ماسه سنگ، کنگلومرا، سنگهای آذرین درونی و بیرونی و انواع نهشته‌های تخریبی نظیر ماسه، شن، قلوه سنگ و نهشته‌های ساحلی است. براساس مطالعات ژئوفیزیک انجام شده در منطقه بیشترین ضخامت آبرفت ۲۵۰ متر و حداقل ضخامت ۱۰۰ متر است. سنگ کف دشت، نهشته‌های دریاچه‌ای است که براساس اطلاعات موجود، ضخامت آن تا ۱۰۰۰ متر نیز بالغ می‌شود. طی بررسی‌های اکتشافی که شامل حفر ۸ حلقه چاه اکتشافی است، قابلیت انتقال آب زیرزمینی در این دشت بین ۱۰۰ تا ۶۰۰۰ متر مربع در روز و ضریب ذخیره متوسط ۲ درصد برآورد گردیده است. عمق سطح آب در این دشت عموماً بین ۱تا ۴ متر متغیر می‌باشد(Javadi et al., 2020). در این منطقه با توجه به ریزش‌های جوی و جریان‌های سطحی سالانه مناسب، مخازن آب زیرزمینی با پتانسیل نسبتاً خوب وجود دارد. منابع آب سطحی این منطقه تحت تاثیر جریان خروجی از سد سفیدرود بوده و شبکه آبیاری این منطقه است. پتانسیل بالای جریان سطحی در این منطقه وجود داشته که از بخش ارتفاعات رواناب سطحی را به طرف دریا منتقل می‌کند. در شکل (۲) موقعیت این حوضه آبریز نمایش داده شده است.



شکل ۲- موقعیت منطقه مورد مطالعه

شاخص آسیب‌پذیری WRASTIC

شاخص WRASTIC یک شاخص تعریف شده برای ارزیابی آسیب‌پذیری منابع آب سطحی است که براساس هفت پارامتر فاضلاب انسانی و حیوانی، وضعیت تفریحی و تفرجی، فعالیت‌های کشاورزی، فعالیت‌های صنعتی، اندازه حوضه، راه و حمل و نقل و تراکم پوشش گیاهی در سطح حوزه یک رودخانه تعریف می‌گردد(Pirali Zefrehei et al., 2020). در این روش ارزیابی ریسک و آسیب‌پذیری آلودگی منابع آب براساس شرایط حوزه آبریز در ایجاد آلودگی منابع آب‌سطحی در هر محیط هیدرولوژیکی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (Moghadam Yekta et al., 2022). این شاخص براساس تاثیر آلودگی آب سطحی وزن‌دهی و در نهایت یک ارزش منفرد برای کل منطقه محاسبه می‌شود. این شاخص براساس رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$\text{WRASTIC-Index: } W_R W_W + R_R R_W + A_R A_W + S_R S_W + T_R T_W + I_R I_W + C_R C_W \quad \text{رابطه ۱)}$$

در این رابطه اندیس W وزن و اندیس R نرخ مربوط به هر یک از پارامترهای مدل است. بزرگ بودن این شاخص نشان‌دهنده قابلیت بیشتر منطقه مورد مطالعه در ایجاد آلودگی و میزان آسیب‌پذیری بالای منطقه نسبت به آلودگی است. تقسیم‌بندی پارامترهای این شاخص بصورت جدول ۱ بیان شده است. در جدول ۲ نیز تقسیم‌بندی نهایی شاخص از نظر آسیب‌پذیری بیان شده است.

جدول ۱- کلاس‌بندی، وزن و رتبه پارامترهای شاخص WRASTIC–(Nsfwqi, 2016)

پارامتر	زیر بخش	محدوده	رتبه	وزن
تخلیه فاضلاب (W)	دپوی فاصلاب و تجمیع	فرآیند طبیعی	۱ – ۴	۳
	فرآیند تصفیه	تصفیه مقدماتی	۳	
		تصفیه ثانویه	۲	
		تصفیه تکمیلی	۱	
فعالیت‌های تفریحی (R)	ورزش‌های آبی	فعالیت‌های موتوری در آب مجاز است.	۵	۳
		فعالیت‌های موتوری در آب مجاز نیست.	۴	
	دسترسی	دسترسی محلی به وسیله نقلیه در حوضه وجود دارد.	۳	
		دسترسی محلی بصورت گذرگاه عابرپیاده در حوضه وجود دارد.	۲	
		دسترسی به وسیله نقلیه وجود ندارد.	۱	
	زیرساخت‌های گردشگری	در فاصله ۵۰ متری قرار دارد	۴	
		در فاصله ۵۰ متری وجود ندارد	۰	
فعالیت‌های کشاورزی (A)	آبیاری دائمی	< ٪۱۰	۱	۳
		٪ ۱۰–۲۵	۲	
		٪ ۲۵–۵۰	۳	
		٪ ۵۰–۷۵	۴	
		٪ ۷۵–۱۰۰	۵	
	تغییر کاربری اراضی کشاورزی	< ٪۲۰	۱	۵
		٪ ۲۰–۴۰	۲	
		> ٪۴۰	۳	
سطح حوضه (S)	---	< ۱۹۴۲/۳۵ کیلومترمربع	۵	۱
		۳۸۸/۴۷ – ۱۹۴۲/۳۵ کیلومترمربع	۴	
		۱۵۵/۳۹ – ۳۸۸/۴۷ کیلومترمربع	۳	
		۳۸/۸۵ – ۱۵۵/۳۹ کیلومترمربع	۲	
		> ۳۸/۸۵ کیلومترمربع	۱	
راه‌های حمل و نقل (T)	راه آهن	مسیر اصلی راه‌آهن از داخل حوضه عبور می‌کند.	۴	۱
		قرار داشتن راه‌آهن توریستی در نزدیکی حوضه	۱	
	راه دسترسی	وجود بزرگراه در حوضه مورد مطالعه.	۵	
		وجود شاهراه یا هر نوع راه آسفالت اصلی در حوضه.	۴	
		وجود راه‌های محلی در حوضه.	۳	
		جاده آسفالت نشده وجود دارد.	۱	
		هیچ نقل و انتقالی در حوضه وجود ندارد.	۰	
فعالیت‌های صنعتی (I)	فعالیت‌های صنعتی	فعالیت‌های صنعتی وجود دارد.	۳	۴
		فعالیت‌های صنعتی وجود ندارد.	۰	
	فعالیت‌های استخراجی	معادن و محل دفن زباله	۵	
		محدوده‌های بهره‌برداری	۱	
		عدم محدوده بهره‌برداری	۰	
میزان تراکم پوشش گیاهی سطح زمین (C)	---	٪ ۰–۵	۵	۱
		٪ ۶–۱۹	۴	
		٪ ۲۰–۳۴	۳	
		٪ ۳۵–۵۰	۲	
		٪ >۵۰	۱	

جدول ۲- تقسیم‌بندی میزان آسیب‌پذیری-(Nsfwqi, 2016)

کلاس آسیب‌پذیری	شاخص WRASTIC
پایین (آسیب‌پذیری کم- آلودگی کم)	۱۰ – ۴۰
متوسط (آسیب‌پذیری متوسط-آلودگی متوسط)	۴۰ – ۷۰
بالا (آسیب‌پذیری بالا-آلودگی بالا)	۷۰ – ۹۰
خیلی بالا (آسیب‌پذیری خیلی بالا- آلودگی خیلی بالا)	۹۰ – ۱۰۰

شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC

شاخص آسیب‌پذیری دراستیک از ۷ پارامتر جهت بررسی و آنالیزاستفاده می‌شود که معمولاً با استفاده از نرم‌افزارهای GIS ترسیم و در نهایت شاخص نهایی ارزیابی می‌شود. این هفت پارامتر عبارتند از: عمق تا سطح ایستابی (D)، تغذیه خالص(R)، محیط آبخوان(A) ، محیط خاک(S)، توپوگرافی(T)، محیط غیراشباع(I) و هدایت هیدرولیکی آبخوان(C). پس از تهیه پارامترهای مورد نیاز برای ارزیابی آسیب پذیری به روش دراستیک اقدام به تهیه نقشه آسیب پذیری شده است. در این روش از تلفیق پارامترهای هفت گانه بر اساس رابطه ۲ شاخص آسیب پذیری بدست می‌آید که در آن r ارزش کلاسه بندی شده هر پارامتر و w وزن هر یک از پارامترها است.

$$DRASTIC\text{-}Index = D_rD_w + R_rR_w + A_rA_w + S_rS_w + T_rT_w + I_rI_w + C_rC_w$$ رابطه ۲)

دراین رابطه اندیس r برای رتبه هر پارامتر و اندیس w برای وزن هر پارامتر تعریف شده است. کلاسه بندی و ارزش گذاری کلاسهای مختلف مربوط به هر کدام از پارامترها بر اساس روش استاندارد دراستیک در محیط GIS انجام می‌شود. به هر پارامتر مدل دراستیک و نسبت به اهمیت هر یک از آنها در آسیب‌پذیری، وزنی برابر ۱ تا ۵ اختصاص داده می‌شود. به مهمترین آنها وزن ۵ و کم‌اهمیت‌ترین آنها وزن یک داده می‌شود. از تلفیق این پارامترها نقشه‌ای حاصل خواهد شد که آسیب‌پذیری ذاتی آب زیرزمینی را در مقابل آلودگی در تک تک سلولها به صورت طیف رنگی نشان می‌دهد. در جدول ۳ وزن و رتبه‌های پارامترهای شاخص آسیب‌پذیری دراستیک و در جدول ۴ کلاس‌بندی آسیب‌پذیری نمایش داده شده است.

جدول ۳- معرفی پارامترهای شاخص DRASTIC و وزن بندی آنها-(Aller, 1987)

S		I		A		C (m/day)		T (%)		R (mm)		D (m)	
رتبه	دامنه	رتبه	دامنه	رتبه	دامنه	رتبه	دامنه	رتبه	دامنه	رتبه	دامنه	رتبه	دامنه
۱۰	گراول	۱	لایه محبوس	۲	سنگ‌های آتشفشانی	۱	-۴/۱ ۰/۴	۱۰	۰-۲	۱	۰-۵۰/۸	۱۰	۰/۱-۱/۵
۹	شن	۳	سیلت/رس	۳	پهنه‌های رسی	۲	-۱۲/۳ ۴/۱	۹	۲-۶	۳	۵۰/۸-۱۰۱/۶	۹	۱/۵-۴/۶
۸	پیت	۳	شیل	۵	ماسه سنگ با شیل ورس	۴	-۲۸/۷ ۱۲/۳	۵	۶-۱۲	۶	-۱۷۷/۸ ۱۰۱/۶	۷	۴/۶-۹/۱
۷	ماسه لومی	۳	سنگ آهک	۶	شن و ماسه	۶	-۴۱ ۲۸/۷	۳	۱۲-۱۸	۸	۱۷۷/۸-۲۵۴	۵	۹/۱-۱۵/۲
۶	شنی لوم	۶	شن و ماسه	۸	کنگومرا	۸	۴۱-۸۲	۱	>۱۸	۹	>۲۵۴	۳	-۲۲/۸ ۱۵/۲
۵	لوم	۸	شن و گراول	۸	شن و گراول	۱۰	>۸۲					۲	-۳۰/۴ ۲۲/۸
۴	سیلتی رسی	۹	بازالت	۹	بازالت							۱	>۳۰/۴
۳	لوم رسی	۱۰	ماسه و رس	۱۰	کارست								
۲	رس متراکم												
۱	اراضی غیرقابل نفوذ												
وزن	۲	وزن	۵	وزن	۳	وزن	۳	وزن	۱	وزن	۴	وزن	۵

جدول ٤- کلاس بندی شاخص DRASTIC بر مبنای آسیب پذیری- (Aller, 1987)

کلاس	طبقه بندی آسیب پذیری	کلاس	طبقه بندی آسیب پذیری
۱۸۴-۱۳۷	آسیب‌پذیری زیاد	>۴۶	قابل اغماض
> ۱۸۴	آسیب‌پذیری خیلی زیاد	۹۲- ۴۷	آسیب‌پذیری کم
		۱۳۶-۹۳	آسیب‌پذیری متوسط

تلفیق دو شاخص DRASTIC و WRASTIC

با توجه به هدف این پژوهش که استفاده از دو شاخص آسیب‌پذیری منابع سطحی و زیرزمینی در دو بخش ارتفاعات و آبخوان است، ترکیب این دو شاخص انجام می‌گیرد. با توجه به خصوصیات منطقه، پارامترهای دو شاخص آسیب‌پذیری محاسبه و با استفاده از نرم‌افزار GIS طبقه‌بندی و پهنه‌بندی انجام می‌گیرد. براین اساس در بخش آبخوان محدوده مطالعاتی آستانه-کوچصفهان که فعالیت‌های بیشتر بر منابع آب زیرزمینی تاثیرگذار است شاخص DRASTIC و در بخش ارتفاعات نیز از شاخص WRASTIC که تابع شرایط منابع آب سطحی است استفاده می‌گردد. بدین‌ترتیب تلفیق دو شاخص DRASTIC و WRASTIC برای تعیین آسیب‌پذیری محدوده مطالعاتی آستانه-کوچصفهان بکار برده می‌شود. با قرار دهی لایه های WRASTIC و DRASTIC در محدوده آبخوان و امتیازدهی و وزن‌دهی پارامترهای آن‌ها، تلفیقی از آسیب‌پذیری محاسبه و سپس با واسنجی به کمک داده‌های کیفی میزان دقت نتایج را افزایش داده می‌شود.

واسنجی شاخص‌های آسیب‌پذیری

با توجه به نقش و اهمیت نوع منطقه و فعالیت‌های انجام گرفته شده در یک منطقه، لزوم ارزیابی و واسنجی شاخص‌های آسیب‌پذیری است(Javadi et al., 2011). روش‌های متفاوتی برای تعیین و دستیابی به وزن معیارهای هدف وجود دارد که این روش‌ها در کل به دو دسته عینی و ذهنی تقسیم می‌شوندکه تفاوت اصلی این دو دسته در کاربرد یک سری محاسبات عددی و ریاضی است. در گروه عینی همانند روش آنتروپی وزن معیارهای هدف از طریق محاسبات عددی تعیین و ترجیحات تصمیم گیرنده در آن اعمال نمی‌شود. در مورد دوم تحت عنوان گروه ذهنی همچون روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، وزن‌ها توسط ترجیحات تصمیم‌گیرنده تعیین و تصمیم‌گیری براساس این ترجیحات صورت می‌گیرد. این مطالعه بر مبنای دو روش شانون آنتروپی و تحلیل سلسله مراتبی واسنجی وزن و رتبه‌های دو شاخص انجام گرفت. مبنای هر دو روش براساس تکمیل پرسشنامه و تحلیل آن انجام گرفت.

در روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، وزن‌ها توسط ترجیحات تصمیم‌گیرنده تعیین و تصمیم‌گیری براساس این ترجیحات صورت می‌گیرد(Saravanan et al., 2023). به منظور بررسی و اثربخشی شاخص‌های آسیب‌پذیری در منطقه آستانه-کوچصفهان از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) جهت ارزیابی وزن و رتبه‌های پارامترهای هر شاخص با در نظر گرفتن غلظت پارامتر موثر در محدوده منطقه مورد مطالعه می‌شود. در نهایت پس از محاسبه میزان انحراف برای هر پارامتر، وزن واسنجی شده برای هر پارامتر شاخص آسیب‌پذیری بدست می‌آید. پس از تعیین وزن‌های واسنجی شده، به منظور ارزیابی این وزن بین مقدار شاخص آسیب‌پذیری ارزیابی شده و مقدار غلظت پارامترهای کیفی از روش همبستگی اسپیرمن انجام می‌دهیم. انتخاب پارامترهای کیفی براساس اثرگذاری هر کدام بر وضعیت کیفی منابع آب تعیین می‌شود.

در روش آنتروپی شانون برای تعیین وزن معیارهای هدف بوده و سه گزینه دیگر از این مقوله مستثنی می‌باشند و در مباحث ترمودینامیکی و تعیین پارامترهای مجهول از داده های ناکافی بکار می‌روند(Lakshminarayanan et al., 2021). آنتروپی شانون یکی از چندین تکنیک کّمی و کاربردی برای رتبه بندی معیارها (عوامل، متغیرها و ...) در علوم اجتماعی، فیزیک، تئوری اطلاعات، تحقیقات بازاریابی و کسب و کار وغیره است و جزو تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌باشد که ریشه در علم تحقیق در عملیات دارد. این روش بر مبنای احتمال وقوع رخداد و در نهایت تحلیل درجه انحراف وزن مولفه‌ها یا معیارها را محاسبه و ارزیابی می‌کند.

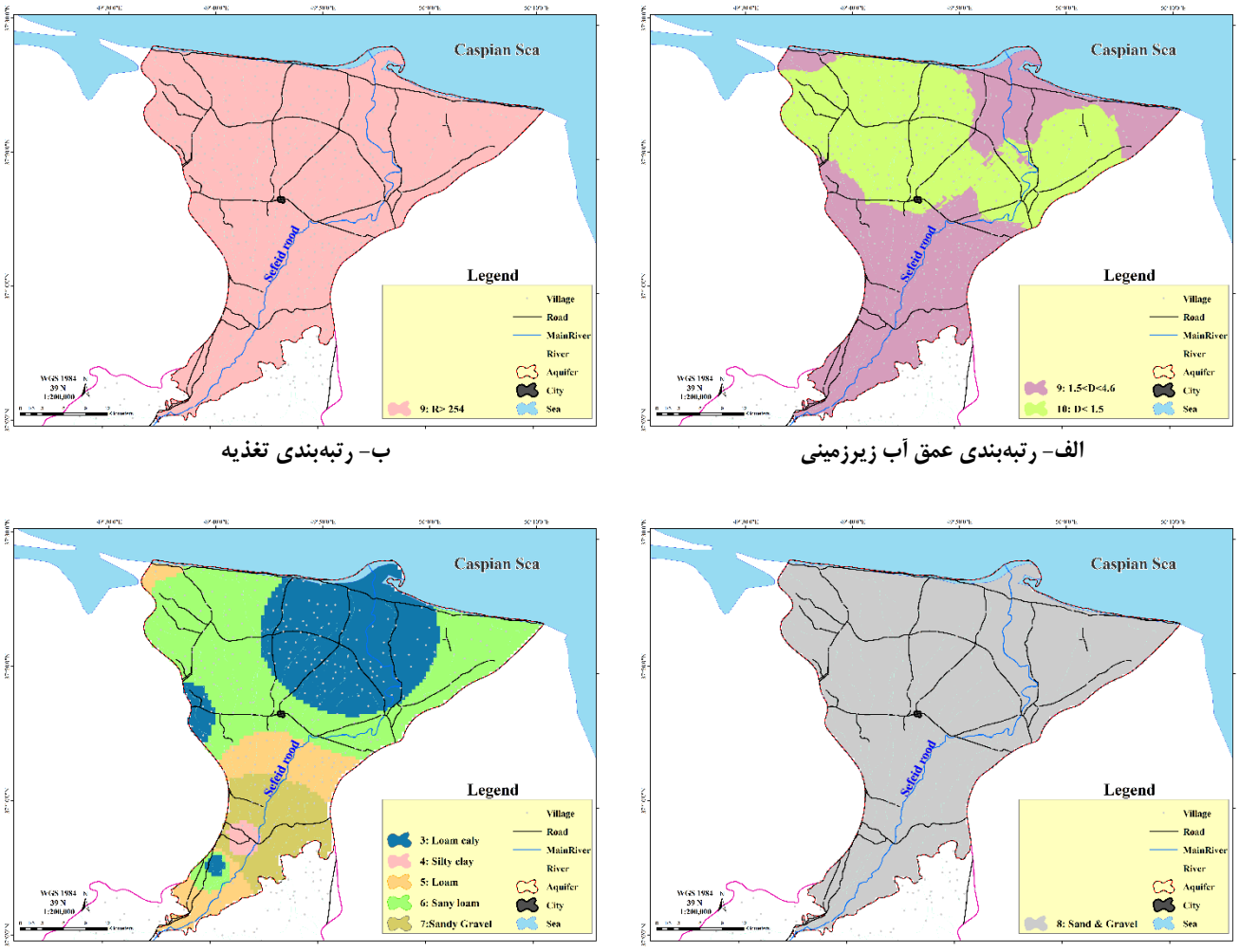
نتایج و بحث

ارزیابی شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC

شاخص آسیب‌پذیری دراستیک از مجموع هفت لایه تشکیل شده که هر یک از آنها نقش مهمی در میزان آسب پذیری آبخوان می‌توانند داشته باشند. به منظور تهیه یک نقشه آسیب‌پذیری مناسب در محیط GIS اندازه پیکسل ۱۰۰*۱۰۰ متر برای کلیه هفت لایه انتخاب و براساس آن نقشه های آسیب‌پذیری تهیه می‌شود. در شکل ۳ لایه‌های مدل دراستیک آورده شده‌است. با استفاده از آمار و اطلاعات عمق

آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای و کلاس‌بندی انجام شده، رتبه‌بندی عمق آب زیرزمینی تعیین می‌شود (شکل ۳-الف). میزان تغذیه خالص مقدار نفوذ ناشی از جریانات مختلف در تغذیه آب زیرزمینی است. بدین منظور تغذیه خالص دشت براساس نتایج بیلان آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی و براساس میزان ضریب آبدهی میزان تغذیه برآورد و در مجموع با حجم نفوذ در ارتفاعات، بارندگی، رواناب و پساب را با هم جمع کرده و سپس با توجه به نقشه هدایت هیدرولیکی دشت و مقدار نفوذپذیری آن، میزان تغذیه خالص تقسیم بندی می‌شود (شکل ۳-ب). براساس لوگ‌های حفاری در آرشیو شرکت آب منطقه‌ی استان گیلان، اطلاعات حفاری، محیط آبخوان، خاکشناسی و محیط غیراشباع آبخوان بصورت نقطه ای برای تهیه نقشه‌های محیط آبخوان، خاک و منطقه غیراشباع مورد استفاده قرار گرفت. از لوگ‌های حفاری نوع و جنس خاک تا عمق ۲ متری و پس از آن تا عمق آب زیرزمینی برای محیط غیراشباع و کل محدوده آبخوان برای پارامتر محیط آبخوان استفاده شد (شکل ۳- ج، د، و). با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی در هر محدوده مطالعاتی با استفاده از ابزار 3D Analyst tools نقشه شیب برای محدوده آبخوان در محدوده مطالعاتی تهیه می‌شود (شکل ۳-ه). با توجه به آنکه در آزمایش‌های پمپاژ، مقدار پارامتر ضریب قابلیت انتقال آب اندازه‌گیری می‌شود، با استفاده از ضخامت اشباع آبخوان، مقدار هدایت هیدرولیکی از تقسیم ضریب قابلیت انتقال آب بر ضخامت اشباع آبخوان به دست می‌آید. اطلاعات و نقاط جغرافیایی مربوط به ضریب قابلیت انتقال و هم ضخامت آبرفت دشت از نقشه‌های موجود تهیه شده و کلیه مراحل تهیه نقشه از تلفیق نقشه هم ضخامت آبرفت و ArcMap انجام گیرد (شکل ۳-ز).

با توجه به وزن و رتبه‌های تخصیص داده شده به ۷ پارامتر شاخص آسیب‌پذیری دراستیک، این شاخص محاسبه گردید. براساس نتایج بدست آمده مطابق جدول۵ مساحت و درصد پوشش وضعیت آسیب‌پذیری آبخوان آستانه-کوچصفهان و در شکل ۴ نقشه نهایی شاخص آسیب‌پذیری دراستیک محاسبه شده است.



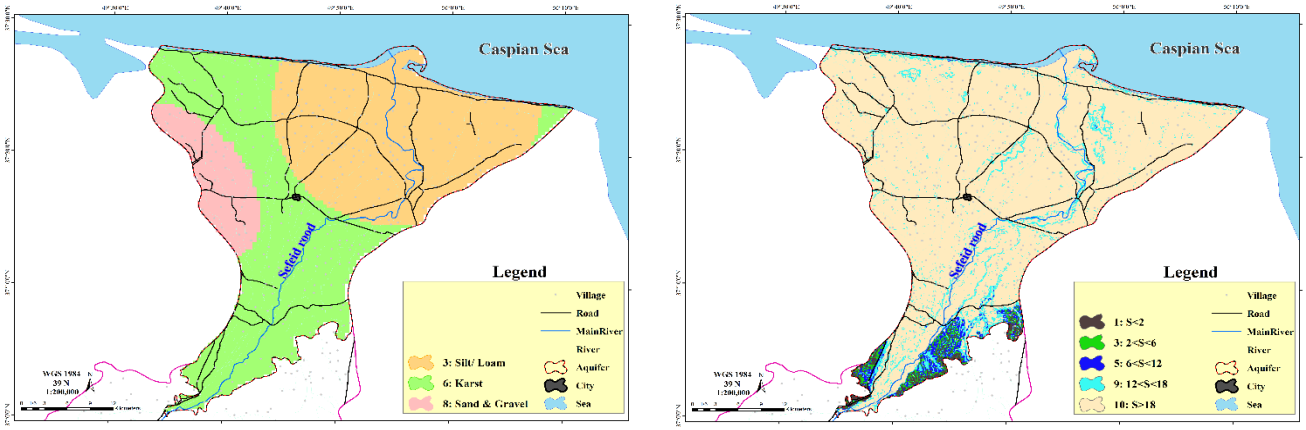
الف- رتبه‌بندی عمق آب زیرزمینی

ب- رتبه‌بندی تغذیه

ج- رتبه‌بندی محیط آبخوان

د- رتبه‌بندی خاک

شکل ۳- پارامترهای شاخص آسیب‌پذیری دراستیک در آبخوان آستانه-کوچصفهان

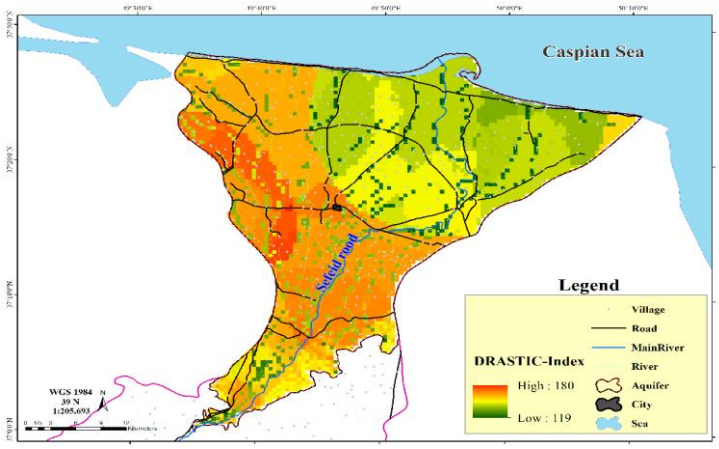


ه- رتبه‌بندی شیب

و- رتبه‌بندی محیط غیراشباع

ز- رتبه‌بندی هدایت هیدرولیکی

ادامه شکل ۳- پارامترهای شاخص آسیب‌پذیری دراستیک در آبخوان آستانه-کوچصفهان



شکل ۴- شاخص آسیب‌پذیری دراستیک در آبخوان آستانه-کوچصفهان

جدول۵- رتبه‌بندی شاخص آسیب‌پذیری دراستیک در آبخوان آستانه-کوچصفهان

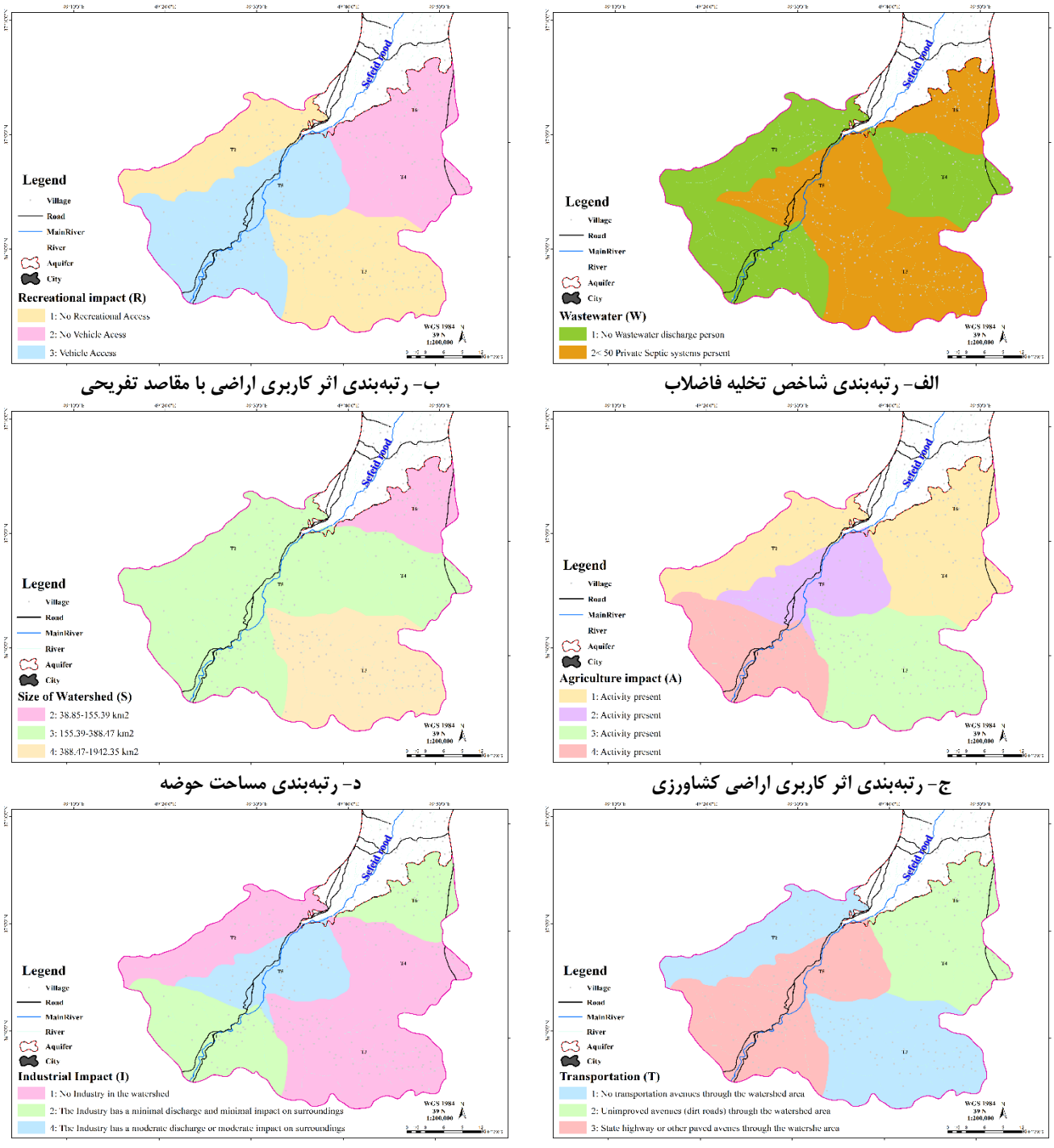
ردیف	کلاس	مساحت (کیلومترمربع)	درصد مساحت(٪)	کلاس بندی
۱	آسیب‌پذیری متوسط	۵۷/۱	۴/۴	۱۱۹-۱۳۹
۲	آسیب‌پذیری متوسط به بالا	۶۷۸/۸	۵۱/۹	۱۳۹-۱۵۹
۳	آسیب‌پذیری بالا	۵۷۱/۴	۴۳/۷	۱۳۹-۱۷۹

نتایج بدست آمده از شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC نشان می‌دهد که بخش غربی آبخوان دارای آسیب‌پذیری بالاتری نسبت به بخش شرقی است. با توجه به موقعیت شبکه رودخانه و توسعه بیشتر در بخش غربی این آبخوان، نتایج آسیب‌پذیری مناسب است. همچنین

موقعیت شهر کوچصفهان در بخش مرکزی آبخوان نیز با توجه به عدم درنظرگرفتن کاربری‌اراضی و فعالیت‌های مربوطه تاثیر نداشته است.

ارزیابی شاخص آسیب‌پذیری WRASTIC

با توجه به انتخاب شاخص آسیب‌پذیری WRASTIC جهت تحلیل وضعیت منابع آب سطحی در محدوده مطالعاتی آستانه-کوچصفهان منطقه براساس خصوصیات هیدرولوژیکی و فیزیوگرافی به ۶ بخش تقسیم شد (مناطق T1 تا T6). بدین منظور با توجه به موقعیت عوارض مختلف، کاربری اراضی، شبکه هیدروگرافی و غیره، شاخص آسیب‌پذیری منطقه براساس شاخص تخلیه فاضلاب، شاخص کاربری اراضی با مقاصد تفریحی، اثر کاربری اراضی کشاورزی، مسات حوضه، مسیرهای حمل و نقل، اثر کاربری صنعتی و تراکم پوشش گیاهی مورد سنجش قرار گرفت. نقشه‌های مدل WRASTIC در شکل ۵ آورده شده است. مناطقی که تاثیر بیشتری دارد وزن بیشتری را دارا هستند.



الف- رتبه‌بندی شاخص تخلیه فاضلاب

ب- رتبه‌بندی اثر کاربری اراضی با مقاصد تفریحی

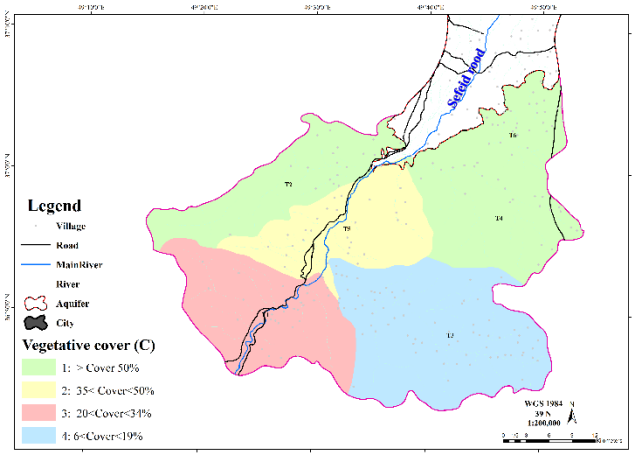
ج- رتبه‌بندی اثر کاربری اراضی کشاورزی

د- رتبه‌بندی مساحت حوضه

ه- رتبه‌بندی مسیرهای حمل و نقل

و - رتبه‌بندی اثر کاربری اراضی صنعتی

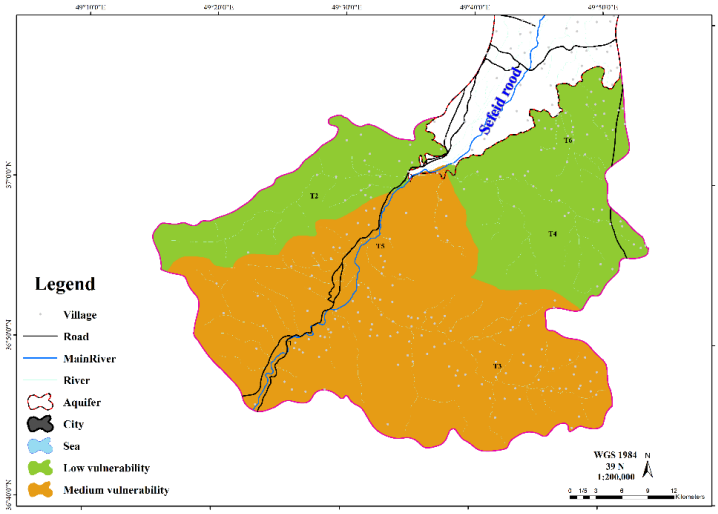
شکل ۵- پارامترهای رتبه‌بندی شده شاخص آسیب‌پذیری WRASTIC



ز- رتبه‌بندی میزان تراکم پوشش گیاهی

شکل ٥- پارامترهای رتبه‌بندی شده شاخص آسیب‌پذیری WRASTIC

پس از برآورد ۷ پارامتر شاخص آسیب‌پذیری بصورت رتبه‌بندی استاندارد، شاخص آسیب‌پذیری WRASTIC با اعمال وزن‌های در نظر گرفته شده بصورت شکل ۶ محاسبه و ارزیابی شده است. بررسی نتایج شاخص آسیب‌پذیری نشان می‌دهد که بخش اعظم محدوده در آسیب‌پذیری متوسط قرار دارد و تنها در بخش‌های شرقی و غربی که دارای توسعه کمتری هستند دارای آسیب‌پذیری کم است. مقدار عددی شاخص WRASTIC در منطقه نشان می‌دهد این شاخص بین ۱۶ در زیرحوضه T2 تا مقدار ۴۰ در زیرحوضه T5 متغیر است. زیرحوضه T1، T3 و T5 در کلاس آسیب‌پذیری متوسط و سایر زیرحوضه‌ها در کلاس آسیب‌پذیری کم قرار دارند.



شکل ٦- میزان آسیب‌پذیری با استفاده از شاخص WRASTIC

واسنجی شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC و WRASTIC

به منظور بررسی و ارزیابی دو شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC و WRASTIC در محدوده مطالعاتی آستانه-کوچصفهان، وزن و رتبه های ارائه شده با بکارگیری دو روش تحلیل سلسله مراتبی(AHP) با استفاده از نرم افزار Expert choice و شانون آنتروپی مدلسازی گردید. واسنجی وزن‌های ارائه شده در روش تحلیل سلسله مراتبی براساس ضریب ناسازگاری انجام شد. یکی از مزایای فرایند تحلیل سلسله مراتبی امکان بررسی سازگاری در قضاوت‌های انجام شده برای تعیین ضریب اهمیت معیارها و زیرمعیارهاست و نیز بررسی آنکه در تشکیل ماتریس زوجی معیارها، چقدر سازگاری در قضاوتها رعایت شده است. به منظور واسنجی دو شاخص آسیب‌پذیری تعداد ۴۵ پرسشنامه تکمیل و با تحلیل احتمال وزن در روش شانون آنتروپی و مقایسه زوجی در روش تحلیل سلسله مراتبی واسنجی وزن و رتبه‌دهی انجام گرفت. در جدول ۶ وزن و در جدول ۷ رتبه‌های واسنجی شده ارائه شده است.

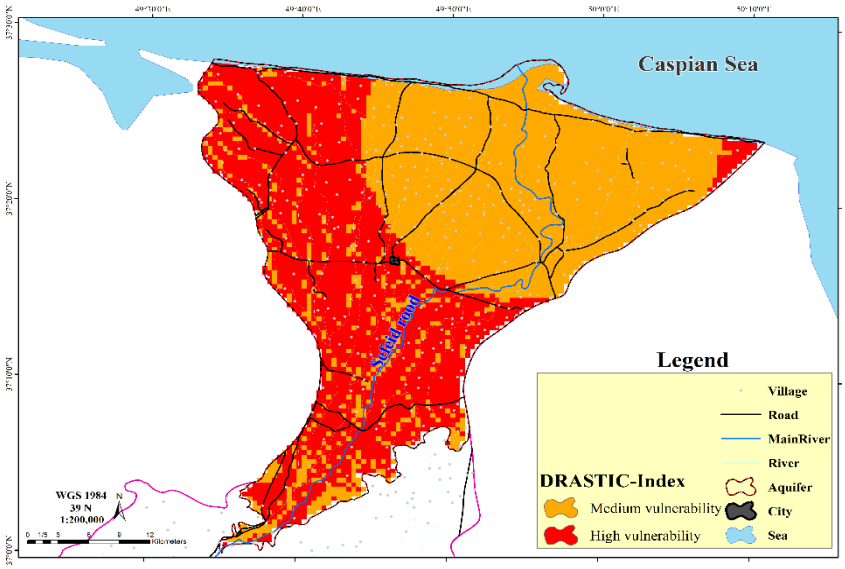
جدول ٦- وزن‌دهی پارامترهای شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC با روش انتروپی و AHP

پارامتر	عمق آب زیرزمینی	تغذیه آبخوان	محیط آبخوان	خاک	توپوگرافی	محیط غیراشباع	هدایت هیدرولیکی
وزن اولیه	۵	۴	۳	۲	۱	۵	۳
وزن واسنجی شده با روش آنتروپی	۵.۵	۳	۳.۵	۱.۵	۰.۵	۴	۳.۵
وزن واسنجی شده با روش AHP	۶/۹	۳/۳	۱/۲۵	۱/۶	۰/۷	۵/۵	۳/۸

جدول ۷- رتبه‌دهی پارامترهای موثر در شاخص آسیب‌پذیری دراستیک

رتبه واسنجی شده با روش AHP	رتبه واسنجی شده با روش آنتروپی	رتبه	پارامتر	رتبه واسنجی شده با روش AHP	رتبه واسنجی شده با روش آنتروپی	رتبه	پارامتر
۰/۴۲۸	۰/۱۴	۱	توپوگرافی- T	۰/۷۵	۰/۳	۹	عمق آب زیرزمینی- D
۰/۳	۰/۱۷	۳		۰/۲۵	۰/۷	۱۰	
۰/۱۳۹	۰/۲	۵		۰/۰۸۱	۰/۲۳	۳	تغذیه آب زیرزمینی- R
۰/۰۷۵	۰/۲۳	۹		۰/۳۴۲	۰/۳	۸	
۰/۰۵۸	۰/۲۵	۱۰		۰/۵۷۷	۰/۴۷	۹	
۰/۰۸۹	۰/۲۵	۳	محیط غیراشباع- I	۱	۱	۸	محیط آبخوان -A
۰/۳۲۳	۰/۳۴	۶		۰/۰۶۲	۰/۱۳	۳	محیط خاک- S
۰/۵۸۸	۰/۴۱	۸		۰/۰۹۷	۰/۱۷	۴	
۰/۱۰۱	۰/۲۹	۱	هدایت هیدرولیکی- C	۰/۱۶	۰/۲	۵	
۰/۲۲۶	۰/۳۳	۲		۰/۲۶۳	۰/۲۳	۶	
۰/۶۷۴	۰/۳۸	۴		۰/۴۱۹	۰/۲۷	۷	

پس از واسنجی انجام شده به منظور ارزیابی روش منتخب برای واسنجی شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC از شاخص آماری همبستگی استفاده شد. براین اساس نتایج بصورت جدول ۸ محاسبه گردید. پس از انتخاب روش AHP به عنوان روش منتخب واسنجی شاخص DRASTIC، مطابق شکل ۷ پهنه‌بندی آسیب‌پذیری ارائه شده است.



شکل ۷- نقشه آسیب‌پذیری آبخوان براساس روش AHP در آبخوان آستانه-کوچصفهان

جدول ۸- همبستگی شاخص آسیب‌پذیری با غلظت نیترات

نام آبخوان	همبستگی قبل از واسنجی	همبستگی با واسنجی با روش AHP	همبستگی با واسنجی به روش آنتروپی
آستانه-کوچصفهان	۰/۳۸	۰/۶۱	۰/۵۴

مشابه واسنجی شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC، با دو روش واسنجی شاخص آسیب‌پذیری WRASTIC نیز انجام گرفت. در جدول ۹ نتایج واسنجی وزن‌های انجام گرفته ارائه شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که پارامتر I که مربوط به کاربری صنعتی است دارای بیشترین وزن و پارامتر مساحت حوزه دارای کمترین وزن است. پس از واسنجی وزن در جدول ۱۰ نتایج رتبه‌های واسنجی شده به دو روش AHP و شانون آنتروپی ارائه شده است.

جدول ۹- وزن‌دهی پارامترهای شاخص آسیب‌پذیری WRASTIC در حالت واسنجی

پارامتر	تخلیه فاضلاب	کاربری مقاصد تفریحی	کاربری کشاورزی	مساحت حوضه	کاربری حمل و نقل	کاربری صنعتی	تراکم پوشش گیاهی
وزن اولیه	۳	۲	۲	۱	۱	۴	۱
وزن واسنجی شده با روش آنتروپی	۳/۵	۱/۳	۲/۵	۰/۷	۱/۶	۵	۱/۸
وزن واسنجی شده با روش AHP	۳/۴	۱/۱	۲	۰/۳	۰/۶	۵/۴	۱/۲

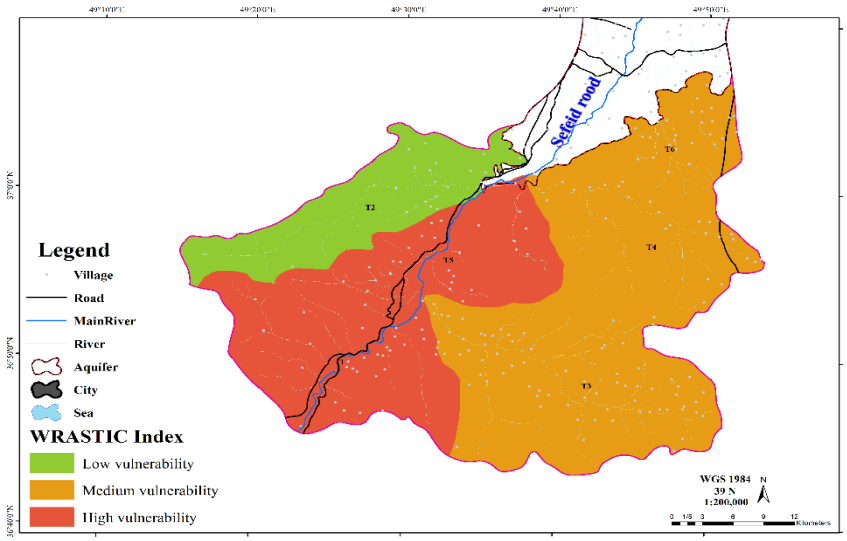
جدول ۱۰- واسنجی رتبه‌دهی پارامترهای موثر در شاخص آسیب‌پذیری WRASTIC

رتبه واسنجی شده با روش AHP	رتبه واسنجی شده با روش آنتروپی	رتبه	پارامتر	رتبه واسنجی شده با روش AHP	رتبه واسنجی شده با روش آنتروپی	رتبه	پارامتر
۰/۱۲۲	۰/۲۸	۱	T	۰/۲۵	۰/۴۱	۱	W
۰/۳۲	۰/۳۳	۲		۰/۷۵	۰/۵۹	۲	
۰/۵۵۸	۰/۳۹	۳		۰/۱۰۹	۰/۲۲	۱	R
۰/۰۶	۰/۱۴	۱	I	۰/۳۰۹	۰/۳۳	۲	
۰/۲۳۱	۰/۲۹	۲		۰/۵۸۲	۰/۴۴	۳	
۰/۷۰۹	۰/۵۷	۴		۰/۰۶۹	۰/۱۸	۱	A
۰/۰۵۷	۰/۱۳	۱	C	۰/۱۰۹	۰/۲۳	۲	
۰/۱۴۱	۰/۲۲	۲		۰/۲۵۸	۰/۲۷	۳	
۰/۲۴۶	۰/۳	۳		۰/۵۶۴	۰/۳۲	۴	
۰/۵۵۵	۰/۳۵	۴		۰/۱۰۵	۰/۲	۲	S
				۰/۲۵۸	۰/۳۳	۳	
				۰/۶۳۷	۰/۴۷	۴	

پس از واسنجی انجام شده به منظور ارزیابی روش منتخب برای واسنجی شاخص آسیب‌پذیری WRASTIC از شاخص آماری همبستگی استفاده شد. براین اساس نتایج بصورت جدول ۱۱ محاسبه گردید. پس از انتخاب روش AHP به عنوان روش منتخب واسنجی شاخص WRASTIC، مطابق شکل ۸ پهنه‌بندی آسیب‌پذیری ارائه شده است.

جدول ۱۱- همبستگی شاخص آسیب‌پذیری WRASTIC با غلظت نیترات

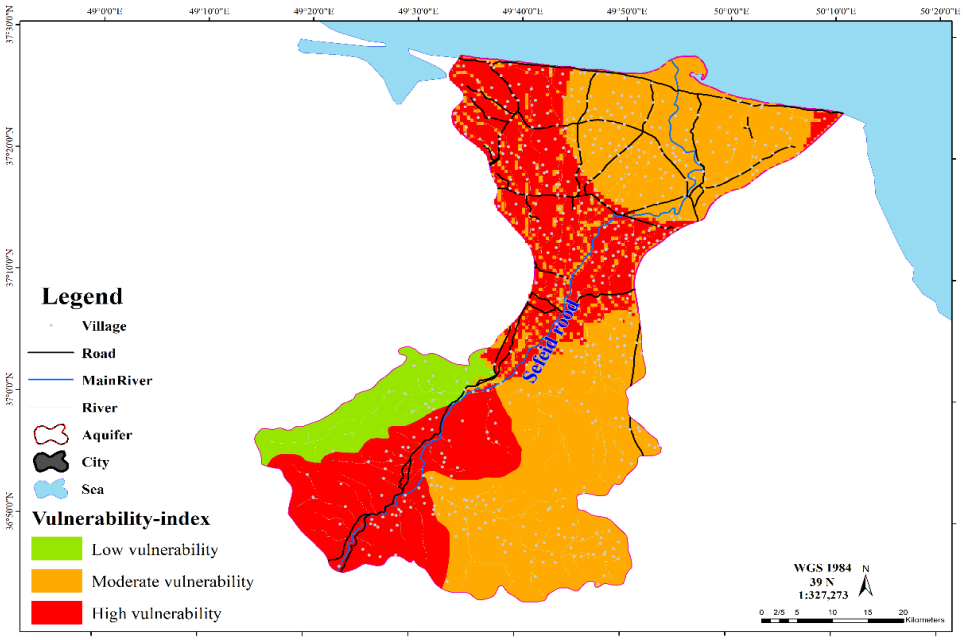
محدوده مطالعاتی	همبستگی قبل از واسنجی	همبستگی با واسنجی با روش AHP	همبستگی با واسنجی به روش آنتروپی
آستانه-کوچصفهان	۰/۴۳	۰/۴۹	۰/۵۸



شکل ۸- شاخص WRASTIC واسنجی شده در محدوده ارتفاعات آستانه-کوچصفهان

ارائه شاخص تلفیقی DRASTIC-WRASTIC

پس از تعیین آسیب‌پذیری در آبخوان به روش DRASTIC و در ارتفاعات با روش WRASTIC، تلفیق این دو شاخص جهت تعیین آسیب‌پذیری کل محدوده مطالعاتی که تلفیق منابع آب سطحی و زیرزمینی است انجام گرفت. در شکل ۹ پهنه‌بندی تلفیقی آسیب‌پذیری این محدوده نمایش داده شده است. همانطور که از شکل مشخص است میزان شاخص ترکیبی در بخش‌هایی از مرکز، جنوب غربی و شمال غربی آبخوان دارای مقادیر بحرانی است. بررسی نتایج بدست آمده نشان می‌دهد با توجه به تمرکز بالای سکونتگاه‌های روستایی در اطراف رودخانه سفیدرود، این مناطق از منظر هر دو شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC و WRASTIC در کلاس حساس قرار دارد. همچنین با توجه به موقعیت شهر کوچصفهان در مرکز آبخوان و نقش فعالیت‌های صنعتی و گردشگری، این منطق نیز در کلاس آسیب‌پذیری بالایی قرار دارد.



شکل ۹- شاخص آسیب‌پذیری تلفیقی DRASTIC-WRASTIC

بررسی نتایج بدست آمده از این مطالعه با مطالعات دیگر ارزیابی آسیب‌پذیری در آبخوان آستانه–کوچصفهان، حاکی ازدقت مناسب شاخص آسیب‌پذیری دراستیک بوده و دقت نتایج و همخوانی مکانی با این مطالعات وجود دارد. Javadi و همکاران در سال ۲۰۱۱ و Kardan moghaddam و همکاران در سال ۲۰۱۷ از نظر پهنه‌بندی آسیب‌پذیری بخش آبرفتی همخوانی دارد (Javadi et al., 2011; Kardan Moghaddam et al., 2017).

نتیجه‌گیری

این مطالعه به ارزیابی آسیب‌پذیری محدوده مطالعاتی با تلفیق دو شاخص DRASTIC در بخش آبخوان و WRASTIC در ارتفاعات مورد بررسی قرار گرفت. پس از محاسبه این دو شاخص با رویکرد تحلیل سلسله مراتبی با استفاده از غلظت نیترات در منابع آب انتخابی واسنجی دو شاخص انجام گرفت و در نهایت با تلفیق دو شاخص، آسیب‌پذیری کل محدوده مطالعاتی آستانه–کوچصفهان محاسبه شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد در ارتفاعات در بخش غربی کمترین میزان آسیب‌پذیری را داشته و در بخش شرقی نیز آسیب‌پذیری در کلاس متوسط قرار دارد. همچنین در ارزیابی آسیب‌پذیری DRASTIC نیز بخش غربی آبخوان نسبت به بخش شرقی دارای آسیب‌پذیری بالاتری است. بررسی اجمالی شاخص آسیب‌پذیری نشان می‌دهد که نقش رودخانه سفیدرود در مرکز این محدوده مطالعاتی بسیار حائز اهمیت است و باعث شده در مجاورت آن میزان آسیب‌پذیری افزایش داشته باشد. لذا توسعه در بخش‌های منتهی به رودخانه می‌بایست کمتر مورد نظر قرار گیرد. بطورکلی نتایج این مطالعه حاکی از این موضوع است که در آبخوان آستانه–کوچصفهان که یک آبخوان ساحلی با عمق کم آب زیرزمینی و تغذیه بالا است، پارامتر عمق آب زیرزمینی در شاخص DRASTIC دارای بیشترین اهمیت بوده و نقش مهمی در انتقال و ایجاد آلودگی دارد. در شاخص WRASTIC نیز کاربری صنعتی که می‌تواند حجم بالای آلودگی را تولید کند در مرتبه اهمیت بالا است. بیشترین اهمیت در هر دو شاخص براساس وزن‌های واسنجی شده مورد ارزیابی قرار گرفت که براین اساس کاربری صنعتی در شاخص WRASTIC با وزن ۵ و عمق آب زیرزمینی با وزن ۵/۵ دارای بیشترین وزن است. همچنین شیب در شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC با وزن ۰/۵ و مساحت حوضه در شاخص WRASTIC با وزن ۰/۷ دارای کمترین وزن است. نتایج بدست آمده با توجه به هدف این مطالعه کاملاً قابل ارزیابی بوده و دو شاخص DRASTIC در بخش شمالی محدوده (آبخوان) و شاخص WRASTIC در بخش جنوبی و ارتفاعات منطقه محاسبه و در نهایت با تلفیق این دو شاخص، میزان آسیب‌پذیری کل محدوده مطالعاتی محاسبه گردید که این موضوع به عنوان هدف اصلی این تحقیق بوده است. هدف اصلی این تحقیق تلفیق ارزیابی آسیب‌پذیری توامان منابع آب سطحی و آب زیرزمینی است. واسنجی دو شاخص با استفاده از پارامتر کیفی نیترات نشان داد که میزان همبستگی ۰/۶۱ با شاخص DRASTIC با روش AHP و مقدار ۰/۵۸ با شاخص WRASTIC با روش آنتروپی بدست آمد. همچنین نتایج واسنجی نشان داد که شاخص WRASTIC بین مقادیر ۱۷ تا ۴۶ و شاخص DRASTIC بین ۱۱۹ تا ۱۸۰ متغیر است. براساس نتایج تلفیقی در بخش غربی و شرقی ارتفاعات، میزان آسیب‌پذیری با استفاده از شاخص WRASTIC کمتر و در بخش غربی آبخوان نسبت به بخش شرقی آسیب‌پذیری بالاتری وجود دارد.

"هیچ گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

Aller. (1987). *DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution ... - Google Books*. https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=UrTEoGnVlkEC&oi=fnd&pg=PR9&dq=DRASTIC:+A+Standardised+System+for+EvaluatingGroundwater+Pollution+Potential+Using+Hydrogeologic+Settings+(EPA+600/2-00).+&ots=UwkRW_1wSi&sig=54p-_n1tOlfI0c_Bqj2GNGK1fMw#v=onepage&q

Atashi Yazdi, S. S., Motamedvaziri, B., Hosseini, S. Z., & Ahmadi, H. (2023). Reciprocal analysis of groundwater potentiality and vulnerability modeling in the Bahabad Plain, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(14), 39586–39604. https://doi.org/10.1007/S11356-022-24810-Y/METRICS

Baghapour, M. A., Nobandegani, A. F., Talebbeydokhti, N., Bagherzadeh, S., Nadiri, A. A., Gharekhani, M., & Chitsazan, N. (2016). Optimization of DRASTIC method by artificial neural network, nitrate vulnerability index, and composite DRASTIC models to assess groundwater vulnerability for unconfined aquifer of Shiraz Plain, Iran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, *14*(1), 1–16. https://doi.org/10.1186/S40201-016-0254-Y/TABLES/6

Beheshti, J., Javadi, S., Hosseini, S. A., & Moghaddam, H. K. (2022). Evaluation of strategies for pumping

optimization of coastal aquifers using numerical simulation and game theory. *Environmental Earth Sciences*, *81*(12), 1–16. https://doi.org/10.1007/S12665-022-10459-W/METRICS

Elzain, H. E., Chung, S. Y., Senapathi, V., Sekar, S., Lee, S. Y., Roy, P. D., Hassan, A., & Sabarathinam, C. (2022). Comparative study of machine learning models for evaluating groundwater vulnerability to nitrate contamination. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *229*, 113061. https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2021.113061

Hülsmann, S., Sušnik, J., Rinke, K., Langan, S., van Wijk, D., Janssen, A. B., & Mooij, W. M. (2019). Integrated modelling and management of water resources: the ecosystem perspective on the nexus approach. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, *40*, 14–20. https://doi.org/10.1016/J.COSUST.2019.07.003

Javadi, S., Kardan Moghaddam, H., & Neshat, A. (2020). A new approach for vulnerability assessment of coastal aquifers using combined index. *Https://Doi.Org/10.1080/10106049.2020.1797185*, *37*(6), 1681–1703. https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1797185

Javadi, S., Kavehkar, N., Mohammadi, K., Khodadadi, A., & Kahawita, R. (2011). Calibrating DRASTIC using field measurements, sensitivity analysis and statistical methods to assess groundwater vulnerability. *Water International*, *36*(6), 719–732. https://doi.org/10.1080/02508060.2011.610921

Kardan Moghaddam, H., Jafari, F., & Javadi, S. (2017). Vulnerability evaluation of a coastal aquifer via GALDIT model and comparison with DRASTIC index using quality parameters. *Hydrological Sciences Journal*, *62*(1), 137–146. https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1080827

Kardan Moghaddam, H., Rahimzadeh kivi, Z., Bahreinimotlagh, M., & Moghddam, H. K. (2022). Evaluation of the groundwater resources vulnerability index using nitrate concentration prediction approach. *Geocarto International*, *37*(6), 1664–1680. https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1797184

Lakshminarayanan, B., Ramasamy, S., Anuthaman, S. N., & Karuppanan, S. (2021). New DRASTIC framework for groundwater vulnerability assessment: bivariate and multi-criteria decision-making approach coupled with metaheuristic algorithm. *Environmental Science and Pollution Research 2021 29:3*, *29*(3), 4474–4496. https://doi.org/10.1007/S11356-021-15966-0

Maleki, P., Rahman, P., Jafariyan, H. A., Salmanmahiny, A., Ghorbani, R., Gholizadeh, M., & Harsij, M. (2020). The risk assessment of water pollution in the Gorgan Bay catchment using the WRASTIC index. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, *14*, 100393. https://doi.org/10.1016/J.ENMM.2020.100393

Moghadam Yekta, N., Rafati, M., Karimi, A., & Sadjadi, N. (2022). Investigation of Water Quality of Urban Rivers and Assessing their Suitability to Protect the Environment (Case Study: Kan River, Tehran City). *Environment and Water Engineering*, *8*(3), 738–752. https://doi.org/10.22034/JEWE.2022.315256.1675

Nsfwqi, B. (2016). • Evaluation of Surface Water Quality. *Archives of Hygiene Sciences*, *5*(4), 265–277.

Pirali Zefrehei, A. R., Hedayati, A., Pourmanafi, S., Beyraghdar Kashkooli, O., & Ghorbani, R. (2020). Environmental vulnerability assessment of Choghakhor International Wetland during 1985 to 2018. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, *25*(1), 49–60. https://doi.org/10.1111/LRE.12298

Saravanan, S., Pitchaikani, S., Thambiraja, M., Sathiyamurthi, S., Sivakumar, V., Velusamy, S., & Shanmugamoorthy, M. (2023). Comparative assessment of groundwater vulnerability using GIS-based DRASTIC and DRASTIC-AHP for Thoothukudi District, Tamil Nadu India. *Environmental Monitoring and Assessment*, *195*(1), 1–19. https://doi.org/10.1007/S10661-022-10601-Y/METRICS

Integrated vulnerability assessment of surface and groundwater resources by combining two indices DRASTIC and WRASTIC

EXTENDED ABSTRACT

Introduction:

Today, human activities are one of the most important challenges in issues related to the quality of water resources, which is currently considered one of the management threats in the exploitation sector. This issue will require the identification and evaluation of water resources from different perspectives, of which is the vulnerability of water resources is one. The concept of vulnerability shows the interaction of water sources and pollutants and the potential of polluting sources with regard to the inherent potential of pollution.

Objective:

Vulnerability is a term used to represent the natural ground and surface characteristics that describe the ease with which groundwater and surface may be contaminated by human activities. This study evaluates the vulnerability of water resources by combining DRASTIC vulnerability indices in the aquifer sector and the WRASTIC vulnerability index in the upland sector of the Astana-Kuchsefahan region. Different methods have been introduced to evaluate the vulnerability of alluvial aquifers of which the overlay method and index weight rating are among the most popular ones.

Methodology:

The DRASTIC vulnerability index proposed by Aller is one of the most important methods in determining vulnerability of alluvial aquifers and different studies are conducted based on it. WRASTIC index was provided as seven informational layers and the index number for each sub-basin was calculated by weighting, ranking, and integrating the layers. These two indicators have been emphasized in expressing the concept of vulnerability in the highlands and aquifers, that after calculating these two indicators, the state of vulnerability in a study area is determined. In this analysis, two methods of entropy and hierarchical analysis were used to balance two indicators based on maximizing the correlation with nitrate concentration. Examining the results showed that the most important in both indices based on recalibrated weights include industrial use in the WRASTIC index and underground water depth in the DRASTIC index.

Result:

The results showed that in the western and eastern parts of the highlands, the level of vulnerability using the WRASTIC index is lower, and in the western part of the aquifer, there is a higher vulnerability compared to the eastern part. The results of this study indicate that in the Astana-Kuchsefahan aquifer, which is a coastal aquifer with low groundwater depth and high nutrition, the groundwater depth parameter is the most important in the DRASTIC index and plays an important role in the transfer and creation of pollution. In the WRASTIC index, the industrial use that can produce a high volume of pollution is of very important. The most importance in both indices was evaluated based on the rescaled weights, which shows the industrial use has the highest weight in the WRASTIC index with a weight of 5 and underground water depth with a weight of 5.5. Also, the slope in the DRASTIC vulnerability index with a weight of 0.5 and the basin area in the WRASTIC index with a weight of 0.7 have the lowest weight.

Conclusion:

The obtained results can be fully evaluated according to the purpose of this study and two DRASTIC indices were calculated in the northern part of the area (aquifer) and WRASTIC index in the southern part and the heights of the area and finally by combining these two indices, the vulnerability of the entire study area was calculated.

Keywords: AHP, DRASTIC Index, Hierarchical Analysis, WRASTIC Index.