

آسیب‌پذیری آبخوان ساحلی لاهیجان-چابکسر با استفاده از ارزیابی مقایسه‌ای سه شاخص AVI و SINTACS، GALDIT

مأده قراداغی^۱، حامد کتابچی^{۲*} و جمال محمدولی سامانی^۳

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- استاد، گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

* نویسنده مسئول: h.ketabchi@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۱۰

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۵/۱۶

چکیده

در بسیاری از کشورهای جهان جمعیت زیادی در مناطق ساحلی زندگی می‌کنند، از این رو تأمین آب مناسب در این نواحی اهمیت ویژه‌ای دارد. توسعه روزافزون جوامع بشری، سهم عمده‌ای در آلودگی محیط‌زیست بخصوص در بخش آب دارد. پهنه‌بندی آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی برای حفاظت از کیفیت این منابع استفاده می‌شود. در این مطالعه به ارزیابی مقایسه‌ای آسیب‌پذیری با استفاده از سه شاخص AVI، SINTACS، GALDIT برای تعیین و بررسی نواحی آسیب‌پذیر آبخوان ساحلی لاهیجان-چابکسر پرداخته شده است. شاخص GALDIT نتایج بهتری نسبت به آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در برابر پیشروی آب شور دریا به‌ویژه در مناطقی که دارای شیب کم هستند ارائه می‌دهد که توسط AVI و SINTACS قابل‌شناسایی نیستند. نتایج شاخص AVI نشان‌دهنده مساحت بیشتر آسیب‌پذیری بسیار بالا نسبت به SINTACS است، اما هر دو روش آسیب‌پذیری زیاد آب‌های زیرزمینی در آبخوان لاهیجان-چابکسر به دلیل آلودگی از منابع سطح زمین را نشان می‌دهد. در کل، این آبخوان در محدوده ساحلی و نزدیک به دریای خزر و بخصوص در بخش‌های شمالی محدوده مورد مطالعه، آسیب‌پذیری بیشتری را به آلاینده‌ها نشان می‌دهد و لازم است تمهیدات بیشتری در این مناطق برای کنترل و حفاظت آبخوان اتخاذ شود. شاخص‌های AVI و SINTACS در حقیقت می‌توانند برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های غیرساحلی به‌کار رفته و در ترکیب با GALDIT ابزاری مفید در جهت ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی نسبت به هر نوع آلودگی در سطح زمین و پیشروی آب شور دریا در آبخوان‌های ساحلی مورد استفاده قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: آبخوان ساحلی لاهیجان-چابکسر، آسیب‌پذیری، پیشروی آب شور دریا، AVI، SINTACS، GALDIT.

مقدمه

زیرزمینی می‌باشد. برداشت غیراصولی از این آبخوان‌ها موجب پیشروی آب شور دریا^۲ و شور شدن آب زیرزمینی سواحل خواهد شد. پیشروی آب شور دریا جدی‌ترین مسئله‌ای است که کیفیت آب زیرزمینی را در سواحل به خطر می‌اندازد (Ataie-Ashtiani et al., 2013؛ میرعباسی نجف‌آبادی و همکاران، ۱۳۹۵).

در بسیاری از کشورهای جهان، جمعیت زیادی در مناطق ساحلی زندگی می‌کنند. مناطق ساحلی تبدیل به مراکز مهم تجاری، اقتصادی و گردشگری شده و جمعیت بسیاری را در خود جای داده‌اند. از این رو تأمین آب مناسب در آن‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. مسئله آلودگی آب‌های زیرزمینی در آبخوان‌های ساحلی^۱ به‌مراتب پیچیده‌تر و بحرانی‌تر از سایر سفره‌های آب

² Seawater intrusion

¹ Coastal aquifers

فرایندی متفاوت و پیچیده‌تر در مقایسه با آلودگی از طریق منابع سطح زمین است را ندارند.

شاخص GALDIT روش شناخته شده جهت ارزیابی آسیب-پذیری آبخوان‌های ساحلی نسبت به پیشروی آب شور دریا است. نقشه شاخص GALDIT نشان دهنده آسیب‌پذیری آبخوان در امتداد خط ساحلی است که تحت تأثیر پیشروی آب شور دریا قرار گرفته است. سادگی این روش سبب می‌شود که برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های ساحلی نسبت به پیشروی آب دریا در سراسر جهان از این روش استفاده کنند. شاخص AVI دارای بعد زمانی بوده و نشان دهنده مقاومت هیدرولیکی آبخوان نسبت به جریان قائم است؛ بنابراین آسیب-پذیری را بر اساس مقاومت هیدرولیکی ارزیابی می‌کند.

(Luoma et al. (2016) آسیب‌پذیری آبخوان کم‌عمق ساحلی هانکو در جنوب فنلاند تحت شرایط تغییر اقلیم را بررسی کردند. برای بررسی آسیب‌پذیری در این منطقه سه نوع شاخص به نام‌های AVI، SINTACS و GALDIT به کار رفته و نتایج مقایسه شدند با توجه به نتایج این مطالعه در منطقه ساحلی، افزایش تغذیه آب زیرزمینی موجب تخلیه بیشتر آب‌های زیرزمینی به دریا می‌شود و در نتیجه همان‌طور که Werner et al. (2012) بیان کرده‌اند، آسیب‌پذیری نسبت به پیشروی آب شور دریا کاهش می‌یابد؛ این نتایج از طریق روش AVI به دست آمده‌اند که نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بیشتر نسبت به روش SINTACS بود. روش GALDIT نتایج بهتری نسبت به آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی از پیشروی آب شور دریا در آبخوان ساحلی، به‌ویژه در مناطقی که دارای گرادیان هیدرولیکی کم هستند ارائه می‌دهند که با SINTACS و AVI قابل بررسی نبودند.

(Allouche et al. (2017) در مطالعه خود به روش‌شناسی تعیین آسیب‌پذیری آب زیرزمینی نسبت به آلودگی ناشی از فعالیت‌های انسانی و پیشروی آب شور دریا در منطقه شرق تونس (آفریقا)، پرداختند و مدل‌های DRASTIC و GALDIT همراه با پارامتر کاربری اراضی را در رویکردی جدید استفاده نمودند. در این مطالعه عامل کاربری اراضی به‌عنوان یک وزن

واضح است که جلوگیری از آلودگی منابع آب زیرزمینی از رفع آلودگی آن بسیار آسان‌تر است. به‌منظور مدیریت پایدار و مؤثر و حفاظت از منابع آب زیرزمینی، لازم است که ارزیابی آسیب-پذیری آبخوان^۳ هر منطقه به‌عنوان شاخص آسیب‌پذیری صورت گیرد. آبخوان‌های ساحلی نه تنها نسبت به آلودگی منابع سطح زمین بلکه نسبت به پیشروی آب شور دریا آسیب‌پذیر هستند. بررسی آسیب‌پذیری آبخوان در مقابل این آلودگی یکی از روش‌ها برای حفاظت از آب‌های زیرزمینی است (Ketabchi and Ataie-Ashtiani, 2015).

آسیب‌پذیری نوعی خصوصیت نسبی، بدون بعد و غیرقابل اندازه‌گیری است و به ویژگی‌های آبخوان، زمین‌شناسی محیط و هیدروژئولوژی آن بستگی دارد (Antonakos and Lambrakis, 2007). آسیب‌پذیری در هیدروژئولوژی برای اولین بار در سال ۱۹۷۰ مطرح گردید (Margat, 1970). به‌طور کلی می‌توان آسیب‌پذیری را تمایل یا احتمال رسیدن آلاینده‌ها از یک منطقه مشخص در سطح زمین و رسیدن آن به سطح سفره آب زیرزمینی عنوان نمود. آسیب‌پذیری از نظر مفهوم، به دو دسته ذاتی و ویژه تقسیم می‌گردد. روش‌های متعددی وجود دارند که آسیب‌پذیری را ارزیابی می‌کنند. به‌طور کلی ارزیابی‌های آسیب‌پذیری به سه دسته روش‌های همپوشانی و شاخص^۴، روش‌های شبیه‌سازی پردازش‌محور^۵ و روش‌های آماری^۶ تقسیم‌بندی می‌شوند (Ribiro et al., 2017). برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌ها روش‌های متعددی وجود دارد که در این میان GOD، SINTACS، DRASTIC و AVI روش‌های شناخته شده هستند. شاخص SINTACS، روش DRASTIC اصلاح شده با عوامل مرتبط با فعالیت‌های انسانی و جریان آب است. این روش معمولاً برای تعیین آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی نسبت به آلودگی از منابع انسانی شناخته شده از سطح زمین استفاده می‌شود. با این وجود، این روش عوامل مرتبط با جریان‌های دریاچه‌ها و یا رودخانه‌هایی که به آبخوان متصل می‌شوند را در نظر نمی‌گیرد. با این وجود برای آبخوان ساحلی هر دو روش DRASTIC و SINTACS هیچ عاملی برای تعیین میزان آلودگی از پیشروی آب شور دریا که

⁵ Process-based methods

⁶ Statistical models

³ Aquifer vulnerability

⁴ Overlay and index methods

هرکدام از این شاخص‌ها، آسیب‌پذیری را با در نظر گرفتن حالت خاص بررسی می‌کنند و با کنار هم گذاشتن این سه شاخص یک دید کلی و کامل از وضعیت آبخوان نشان داده می‌شود. بررسی جامع و مقایسه‌ای ارزیابی آسیب‌پذیری این پژوهش یک کار جدید در ایران است و برای اولین بار به این صورت ارائه می‌گردد.

مواد و روش‌ها منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی لاهیجان-چابکسر در شرق استان گیلان، ایران قرار دارد (شکل ۱). لاهیجان، چابکسر، لنگرود و رودسر از مهم‌ترین شهرهای منطقه مطالعاتی هستند. رودخانه پلرود مهم‌ترین و بزرگ‌ترین رودخانه این محدوده است. محدوده مذکور از شمال به دریای خزر، از جنوب به محدوده مطالعاتی طالقان-الموت، از شرق به محدوده مطالعاتی رامسر-چالوس و از غرب به محدوده آستانه-کوچصفهان منتهی می‌گردد.

مساحت این محدوده ۸۵۴/۷۷ کیلومترمربع است که مساحت دشت در این منطقه می‌باشد. بالاترین نقطه ارتفاعی این محدوده ۱۸۳ متر و پایین‌ترین نقطه آن با ارتفاع ۲۶- متر از سطح دریای آزاد در خروجی حوضه قرار دارد. امتداد کوه‌ها در این محدوده شرقی-غربی است که با امتداد کلی البرز هم‌خوانی دارد.

دشت آبرفتی بین دامنه شمالی ارتفاعات و دریای خزر واقع شده است. در دشت لاهیجان-چابکسر آبخوان آبرفتی آزاد با وسعت ۸۴۷/۳۴ کیلومترمربع می‌باشد. سنگ‌هایی که در این محدوده مشاهده می‌شوند از نوع سنگ‌های آذرین درونی (گرانیت لاهیجان)، سنگ‌های آذرین بیرونی (آندزیت، بازالت)، کنگلومرا و ماسه‌سنگ، شیل و سنگ‌های کربناته می‌باشد. در شرق دشت رسوبات آبرفتی عمدتاً دانه‌درشت و تمیز هستند و از توان آبدهی خوبی برخوردار می‌باشند.

متوسط بارندگی سالانه محدوده مطالعاتی ۷۸۸/۸ میلی‌متر و متوسط تبخیر سالانه ۱۰۳۶/۷ میلی‌متر است. بالاترین تراز سطح آب زیرزمینی دشت ۵۰+ متر و پایین‌ترین آن ۲۵- متر نسبت به دریای آزاد است. جهت کلی جریان آب‌های زیرزمینی در شرق دشت از جنوب به شمال، در میانه دشت از جنوب غرب به شمال شرق و در غرب دشت در ابتدا جنوب به شمال

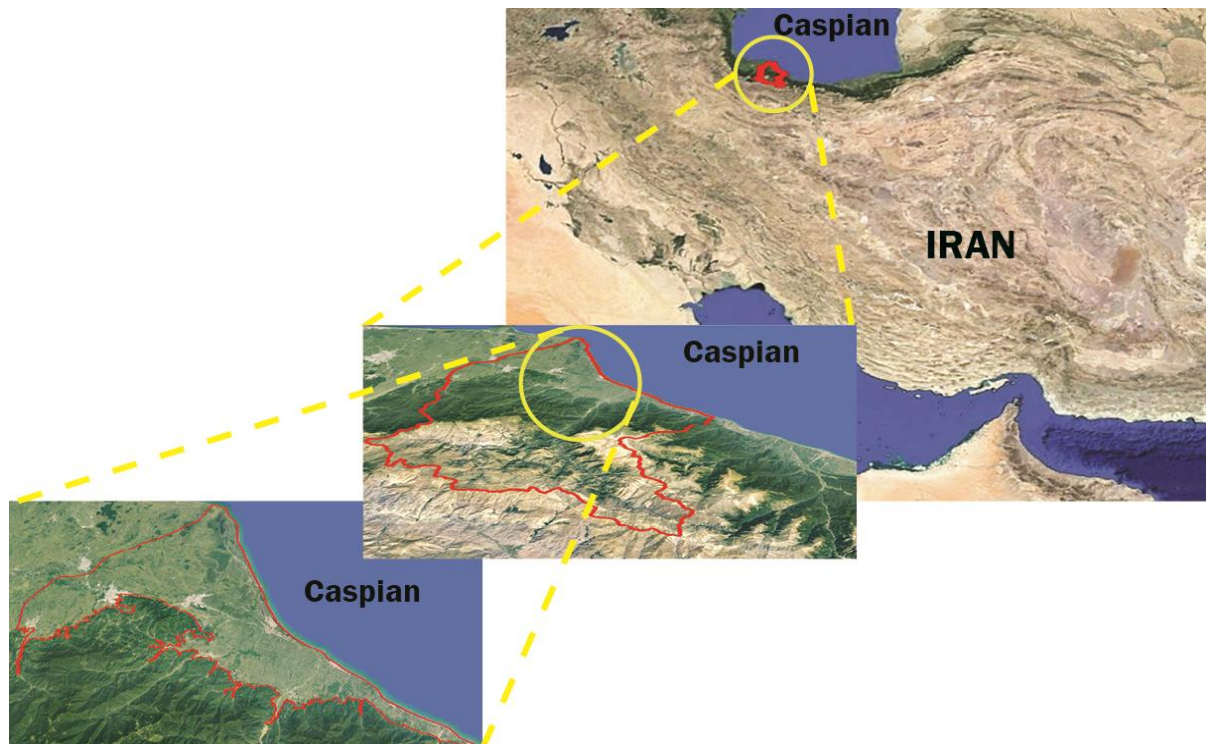
مؤثر جدید برای توسعه مدل‌های DRASTIC و GALDIT مورد استفاده قرار گرفت.

Trabelsi et al. (2016) روی آبخوان ساحلی سفاکس در تونس مطالعاتی انجام دادند که روشی برای ارزیابی پیشروی آب شور دریا در آب‌های زیرزمینی را برای اولین بار از طریق ادغام روش GALDIT، روش GISWI، شاخص هیدروژئوشیمیایی، داده‌های ژئوآماری، مدل گیبین-هرزبرگ و GIS در منطقه نیمه‌خشک ارائه دادند. مهم‌ترین مزیت این روش صرفه‌جویی در زمان و هزینه و ابزاری مناسب برای مدیریت آب‌های زیرزمینی است. نتایج نشان می‌دهند که ارزیابی آسیب‌پذیری با شاخص GALDIT متقاعدکننده‌تر از شاخص GISWI است. در واقع مدل GISWI ابزاری برای تکمیل، تأیید و بحث برای مدل GALDIT است.

ندیری و صدقی (۱۳۹۸)، از روش‌های DRASTIC و SINTACS، برای ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان دشت ورزقان استفاده کردند. نسخه اصلاح‌شده SINTACS برای اولین بار در آبخوان تحت‌فشار این محدوده به‌کار گرفته شد. بررسی داده‌های غلظت نیترات و ضریب همبستگی آن با شاخص آسیب‌پذیری در منطقه نشان داد که روش DRASTIC با داشتن ضریب تبیین و شاخص همبستگی بالاتر نسبت به SINTACS، روش بهتری برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت ورزقان در بخش آزاد است ولی در بخش تحت‌فشار، SINTACS نتایج بهتری را داشته است. سعیدی‌رضوی (۱۳۹۹) با روش DRASTIC معمولی، بررسی آسیب‌پذیری دشت گلپایگان را انجام داد و سپس بهینه‌سازی روش دراستیک با استفاده از الگوریتم ژنتیک را انجام داد و وزن‌های پارامترهای روش خود را بهینه نمود و برای این کار از داده‌های غلظت نیترات و شاخص همبستگی آنها با بهره جست.

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، آبخوان ساحلی لاهیجان-چابکسر در استان گیلان است. پیشروی آب شور دریا از یک‌سو و آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی از طرف دیگر این آبخوان را تحت‌تأثیر قرار داده است. در این مطالعه از روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری GALDIT، SINTACS و AVI که از دسته روش‌های شاخص و همپوشانی هستند برای ارزیابی جامع و مقایسه‌ای این آبخوان ساحلی استفاده شده است.

و سپس از جنوب غرب به شمال شرق می‌باشد. میانگین دما در طول دوره ۴۵ ساله آماری ثبت‌شده در ارتفاعات ۱۱/۵ (GILC, 2011). درجه‌سانتی‌گراد و در دشت ۱۶/۴ درجه سانتی‌گراد است



شکل ۱- منطقه مطالعاتی لاهیجان - چابکسر، استان گیلان، ایران.

شاخص‌های آسیب‌پذیری

در این مطالعه سه روش ارزیابی آسیب‌پذیری به کار رفته و مقایسه شده‌اند. شاخص آسیب‌پذیری SINTACS به نسبت سایر شاخص‌های آسیب‌پذیری، پارامترهای هیدروژئولوژی بیشتری را در برمی‌گیرد، آسیب‌پذیری را بر اساس انواع محیط آبخوان ارائه می‌دهد و عواملی که مرتبط با فعالیت‌های انسانی و جریان آب هستند را دربر می‌گیرد. AVI ساده‌تر از SINTACS است و تنها دو عامل برای تجزیه و تحلیل آسیب‌پذیری نیاز دارد. این روش به منظور مقایسه با SINTACS در ارزیابی تعداد عوامل وارد شده در شاخص‌های آسیب‌پذیری انتخاب شده است. با این حال هیچ‌یک از دو روش SINTACS و AVI عاملی به صورت اختصاصی برای تفکیک آلودگی ناشی از پیشروی آب شور دریا ندارند، بنابراین جهت ارزیابی آسیب‌پذیری ناشی از پیشروی آب شور دریا به آبخوان ساحلی انتخاب شده است. روش‌های SINTACS و GALDIT بر پایه شاخص وزن بوده و با استفاده

از Arc MAP عمل تحلیل را انجام می‌دهد، اما روش AVI بر پایه نوع و ضخامت رسوبات بالاتر از سطح آب زیرزمینی است (لوما و همکاران، ۲۰۱۶). شرح مختصری از هر سه روش در ادامه آمده است.

شاخص GALDIT

این شاخص ۶ پارامتر دارد که مخفف کلمه GALDIT می‌باشد، حرف G نوع آبخوان، A هدایت هیدرولیکی آبخوان، L ارتفاع آب زیرزمینی که بالاتر از سطح آب دریا قرار دارد، D فاصله تا ساحل دریا، I تأثیر کیفی پیشروی آب شور دریا در نواحی ساحلی و T ضخامت آبخوان می‌باشد. هر پارامتر بر اساس ویژگی‌هایش و نیز حساسیت به آلودگی آب‌های زیرزمینی از ۵ (کمترین آسیب‌پذیری) تا ۲۰ (بیشترین آسیب‌پذیری) رتبه‌بندی می‌شود و سپس به هر پارامتر با توجه به اهمیتی که در آسیب‌پذیری دارد، به ترتیب وزن ۴ (مهم‌ترین) تا ۱ اختصاص داده شده است (جدول ۱). مقادیر شاخص

آسیب‌پذیری در رابطه ۱ نشان داده شده است (Chachadi and Lobo-Ferreira, 2003). نقشه نهایی شاخص GALDIT بر اساس جدول ۲ طبقه‌بندی می‌شود.

W در این رابطه وزن هر پارامتر و R رتبه است. نمره شاخص آسیب‌پذیری GALDIT از ۲/۵ تا ۱۰ متغیر بوده و مطابق با جدول ۲ شامل سه درجه آسیب‌پذیری است.

$$GALDIT = \frac{\sum_{i=1}^6 W_i R_i}{\sum_{i=1}^6 W_i} \quad (1)$$

جدول ۱- رتبه‌دهی و وزن‌دهی شاخص GALDIT.

| پارامتر | وزن | ۵ | ۱۰ | ۱۵ | ۲۰ |
|--|-----|--------------|-------------|-------------|-----------------|
| نوع آبخوان | ۱ | آبخوان محدود | آبخوان نشتی | آبخوان آزاد | آبخوان تحت فشار |
| هدایت هیدرولیکی (متر بر روز) | ۳ | <۵ | ۱۰-۵ | ۴۰-۱۰ | >۴۰ |
| ارتفاع سطح آب زیرزمینی بالای سطح آب دریا (متر) | ۴ | >۲ | ۲-۱/۵ | ۱/۵-۱ | <۱ |
| فاصله از ساحل دریا (متر) | ۴ | >۱۰۰۰ | ۱۰۰-۷۵۰ | ۷۵۰-۵۰۰ | <۵۰۰ |
| تأثیر وضعیت موجود از پیشروی آب دریا | ۱ | <۱ | ۱/۵-۱ | ۲-۱/۵ | >۲ |
| ضخامت آبخوان (متر) | ۲ | <۵ | ۷/۵-۵ | ۱۰-۷/۵ | >۱۰ |

جدول ۲- طبقه‌بندی آسیب‌پذیری مدل GALDIT.

| ردیف | طبقه‌بندی | آسیب‌پذیری |
|------|-----------|------------------|
| ۱ | <۵ | آسیب‌پذیری کم |
| ۲ | ۷/۵-۵ | آسیب‌پذیری متوسط |
| ۳ | >۷/۵ | آسیب‌پذیری زیاد |

پذیری (بسیار زیاد، زیاد، متوسط، کم، بسیار کم) تقسیم می‌شود تا نقشه نهایی شاخص آسیب‌پذیری SINTACS تهیه شود.

شاخص AVI

شاخص آسیب‌پذیری آبخوان AVI روشی برای طبقه‌بندی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی بر اساس دو پارامتر است: ضخامت هر لایه رسوبی بالاتر از منطقه اشباع آبخوان (d) و هدایت هیدرولیکی (k) در هر یک از لایه‌ها. این شاخص مطابق با رابطه ۳ از دو پارامتر به دست می‌آید (Stempvoort et al., 2010):

$$C = \frac{\sum d_i}{k_i} \quad (3)$$

در این رابطه C مقاومت هیدرولیکی آبخوان می‌باشد. مشخصه مقاومت هیدرولیکی دارای بعد زمان است که بیان‌کننده زمان حرکت آب زیرزمینی از لایه‌های خلل و فرج سطح فوقانی بخش اشباع به سمت طبقات پایین به صورت قائم است. بر اساس این مقاومت هیدرولیکی، AVI به ۵ دسته تقسیم می‌شود: آسیب‌پذیری بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد. این تقسیمات در جدول ۵ نشان داده شده است.

شاخص SINTACS

روش SINTACS که به منظور پهنه‌بندی آسیب‌پذیری به کار می‌رود ۷ پارامتر دارد که حرف S عمق سطح ایستابی، تغذیه خالص، N ناحیه غیراشباع، T لایه سطحی خاک، A ویژگی هیدروژئولوژی آبخوان، C هدایت هیدرولیکی و S توپوگرافی می‌باشد. هر پارامتر مطابق با جدول ۳ بر اساس ویژگی‌هایش و نیز حساسیت به آلودگی آب‌های زیرزمینی، از ۱ (کم‌ترین آسیب‌پذیری) تا ۱۰ (بیشترین آسیب‌پذیری) رتبه‌بندی می‌شود و به هر پارامتر با توجه به اهمیتی که در آسیب‌پذیری دارد، وزن ۵ (مهم‌ترین) تا ۱ اختصاص داده شده است (Civita, 2010). مقادیر شاخص آسیب‌پذیری در رابطه ۲ نشان داده شده است. نقشه نهایی شاخص SINTACS بر اساس جدول ۴ طبقه‌بندی می‌شود.

$$SINTACS = \sum_{i=1}^7 W_i P_i \quad (2)$$

که در آن W_i و P_i به ترتیب رتبه و وزن هر کدام از پارامترها می‌باشد. نمره شاخص آسیب‌پذیری نهایی به درجات آسیب-

جدول ۳- رتبه‌دهی و وزن‌دهی شاخص SINTACS.

| امتیاز | عمق سطح ایستابی (متر) | تغذیه خالص (میلی‌متر بر سال) | ناحیه غیراشباع | لایه سطحی خاک | ناحیه آبخوان | هدایت هیدرولیکی شیب (متر بر روز) | شیب (%) |
|--------|-----------------------|------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|---|----------------------------------|---------|
| ۱ | >۴۰ | ۲۴-۰ | لایه محصورکننده، رس | رس | رس، سیلت | <۰/۰۰۴۳ | ۳۰-۲۶ |
| ۲ | ۴۰-۲۴ | ۴۲-۲۵ | سیلت | هوموس-رس سیلتی | سنگ‌های آذرین نفوذی شکسته شده | ۰/۰۴۳-۰/۰۴۳ | ۲۵-۲۲ |
| ۳ | ۲۴-۱۶ | ۶۶-۴۳ | شیل | لوم رس، لوم رس سیلتی | سنگ‌های دگرگونی شکسته شده | ۰/۱۷-۰/۰۴۳ | ۲۱-۱۹ |
| ۴ | ۱۶-۱۲ | ۹۲-۶۶ | سنگ‌آهک | لوم سیلتی، لوم | رسوبات ریزدانه | ۰/۶۱-۰/۱۷ | ۱۸-۱۶ |
| ۵ | ۱۲-۸ | ۱۱۰-۹۳ | ماسه‌سنگ | لوم سیلتی ماسه‌ای | سنگ‌های دگرگونی شکسته شده، فلیش | ۲/۵۹-۰/۶۱ | ۱۵-۱۳ |
| ۶ | ۸-۶ | ۱۳۵-۱۱۱ | ماسه و گراول با بخش زیادی سیلت و رس | لوم ماسه‌ای | سنگ‌آهک شکسته شده | ۶/۴۸-۲/۵۹ | ۱۲-۱۰ |
| ۷ | ۶-۴ | ۱۶۲-۱۳۶ | سنگ دگرگونی یا آذرین | رس ماسه‌ای | رسوبات درشت‌دانه | ۲۳/۳۳-۶/۴۸ | ۹-۷ |
| ۸ | ۴-۳ | ۱۹۴-۱۶۳ | ماسه و گراول | ماسه | رسوبات آبرفتی ریزدانه | ۶۲/۲۱-۲۳/۳۳ | ۶-۵ |
| ۹ | ۳-۱/۵ | ۲۳۵-۱۹۵ | بازالت | ماسه شسته | ماسه، کنگلومرا | ۳۴۵-۶۲/۲۱ | ۴-۳ |
| ۱۰ | <۱/۵ | >۲۳۵ | سنگ‌آهک کارستی | بدونه پوشش، گراول | سنگ‌آهک کارستی، رسوبات آبرفتی درشت‌دانه | >۳۴۵ | ۲-۰ |
| وزن | ۵ | ۴ | ۳ | ۲ | ۱ | ۵ | ۳ |

جدول ۴- طبقه‌بندی آسیب‌پذیری مدل SINTACS.

| ردیف | طبقه‌بندی | آسیب‌پذیری |
|------|-----------|-----------------------|
| ۱ | > ۸۰ | کم خیلی آسیب‌پذیری |
| ۲ | ۸۰-۱۰۵ | کم آسیب‌پذیری |
| ۳ | ۱۰۵-۱۴۰ | آسیب‌پذیری متوسط |
| ۴ | ۱۴۰-۱۸۶ | آسیب‌پذیری زیاد |
| ۵ | < ۲۱۰ | آسیب‌پذیری بسیار زیاد |

جدول ۵- طبقه‌بندی آسیب‌پذیری بر اساس مقاومت هیدرولیکی شاخص AVI.

| آسیب‌پذیری | Log C | مقاومت هیدرولیکی (سال) |
|------------|-------|------------------------|
| خیلی زیاد | > ۱ | ۰-۱۰ |
| زیاد | ۱-۲ | ۱۰-۱۰۰ |
| متوسط | ۲-۳ | ۱۰۰-۱۰۰۰ |
| پایین | ۳-۴ | ۱۰۰۰-۱۰۰۰۰ |
| خیلی پایین | > ۴ | > ۱۰۰۰۰ |

نتایج و بحث

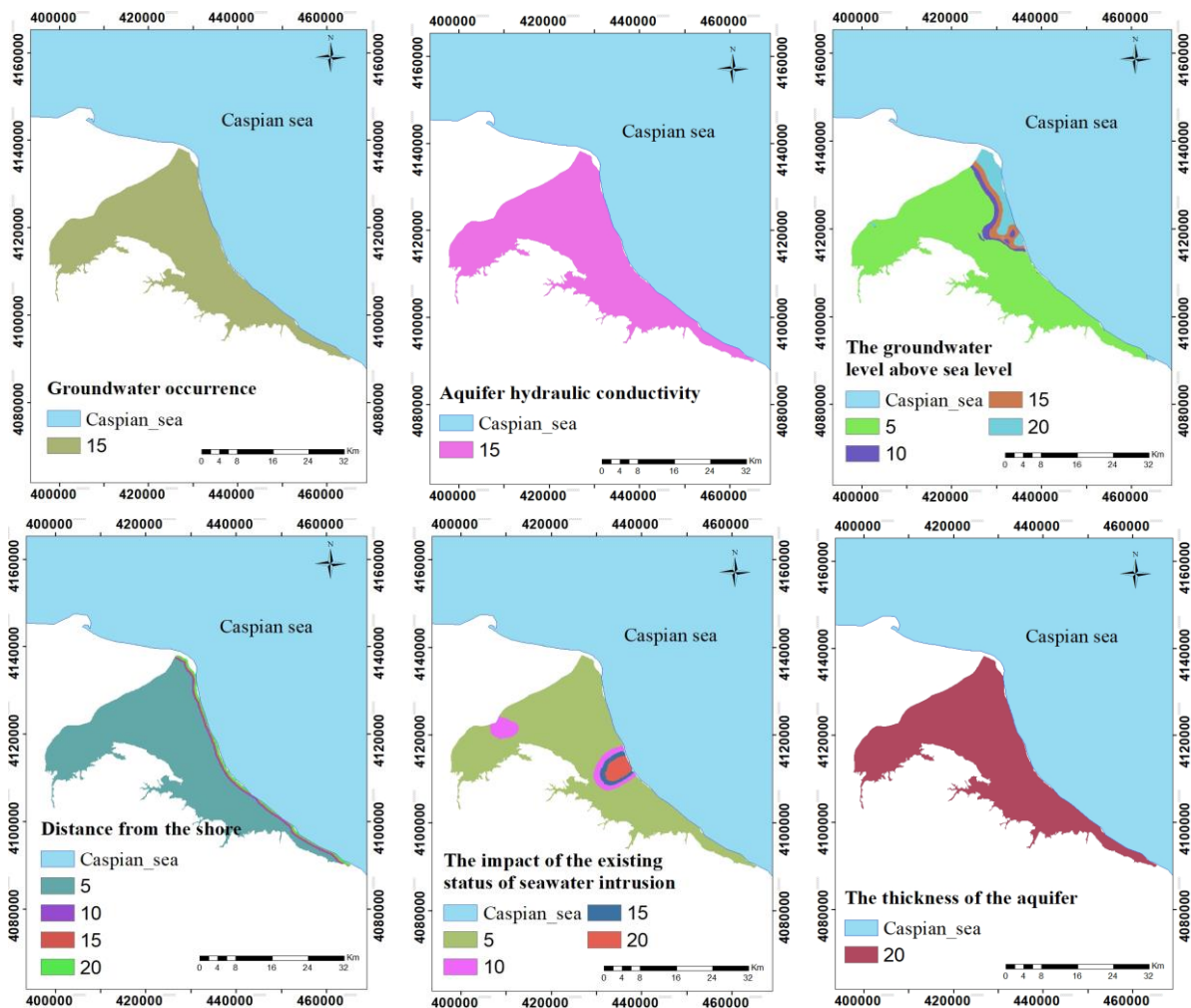
برآورد پارامترهای شاخص GALDIT

به‌دست‌آمده (GILC, 2011)، نقشه وزن هدایت هیدرولیکی ارائه شد. پارامتر D که بر اساس فاصله از دریا است، با استفاده از نرم‌افزار Arc MAP در چهار کلاس طبقه‌بندی شد. ارتفاع آب زیرزمینی که بالاتر از سطح دریا قرار دارد با توجه به نقشه-های آب زیرزمینی و سطح آب دریای خزر ترسیم شد. پارامتر T و I با توجه به اطلاعات موجود برای هر یک، کلاس‌بندی شدند و در نهایت در شکل ۲ نتایج وزن مربوط به هر ۶ پارامتر ارائه شده است. نسبت $Cl/(HCO_3+CO_3)$ به‌عنوان معیاری برای

در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS، کلاس‌بندی و وزن‌دهی هر یک از ۶ پارامتر شاخص GALDIT بر اساس جدول ۱ انجام می‌شود. پارامتر G با توجه به نوع آبخوان محدوده مطالعاتی که از نوع آزاد است، در یک کلاس تقسیم‌بندی شد. با توجه به نتایج استخراجی از آزمایش‌های ژئوفیزیک و پمپاژ در منطقه و مقادیر هدایت هیدرولیکی

اطلاعات ضخامت آبخوان نیز از اطلاعات چاه‌های اکتشافی ارائه شده در (2011) GILC استفاده شده است. جدول (۳-۶) رتبه بندی اهمیت تأثیر آب شور نفوذ کرده را نشان می‌دهد. جهت تهیه نقشه شاخص GALDIT پس از تهیه نقشه‌های پارامترهای آن و با توجه به وزن‌های ۶ پارامتر از رابطه ۱ نقشه این شاخص به دست آمد و بر اساس جدول ۲ تقسیم‌بندی شده است.

تشخیص نفوذ آب شور به آبخوان ساحلی استفاده می‌شود (Revelle, 1941). کلرید فراوان‌ترین یون موجود در آب دریا بوده، درحالی‌که مقدار آن در آب زیرزمینی خیلی کم است. مقدار بی‌کربنات در آب زیرزمینی در مقایسه با آب دریا خیلی بیشتر است. این نسبت معمولاً برای رتبه‌بندی عامل تأثیر وجود آب شور نفوذ کرده استفاده می‌شود که در این مطالعه نیز بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده کیفی در چاه‌های مشاهده‌ای محدوده مورد مطالعه از همین نسبت برای I استفاده شده است.



شکل ۲- نقشه عوامل شاخص GALDIT برای منطقه مطالعاتی لاهیجان-چابکسر، استان گیلان، ایران.

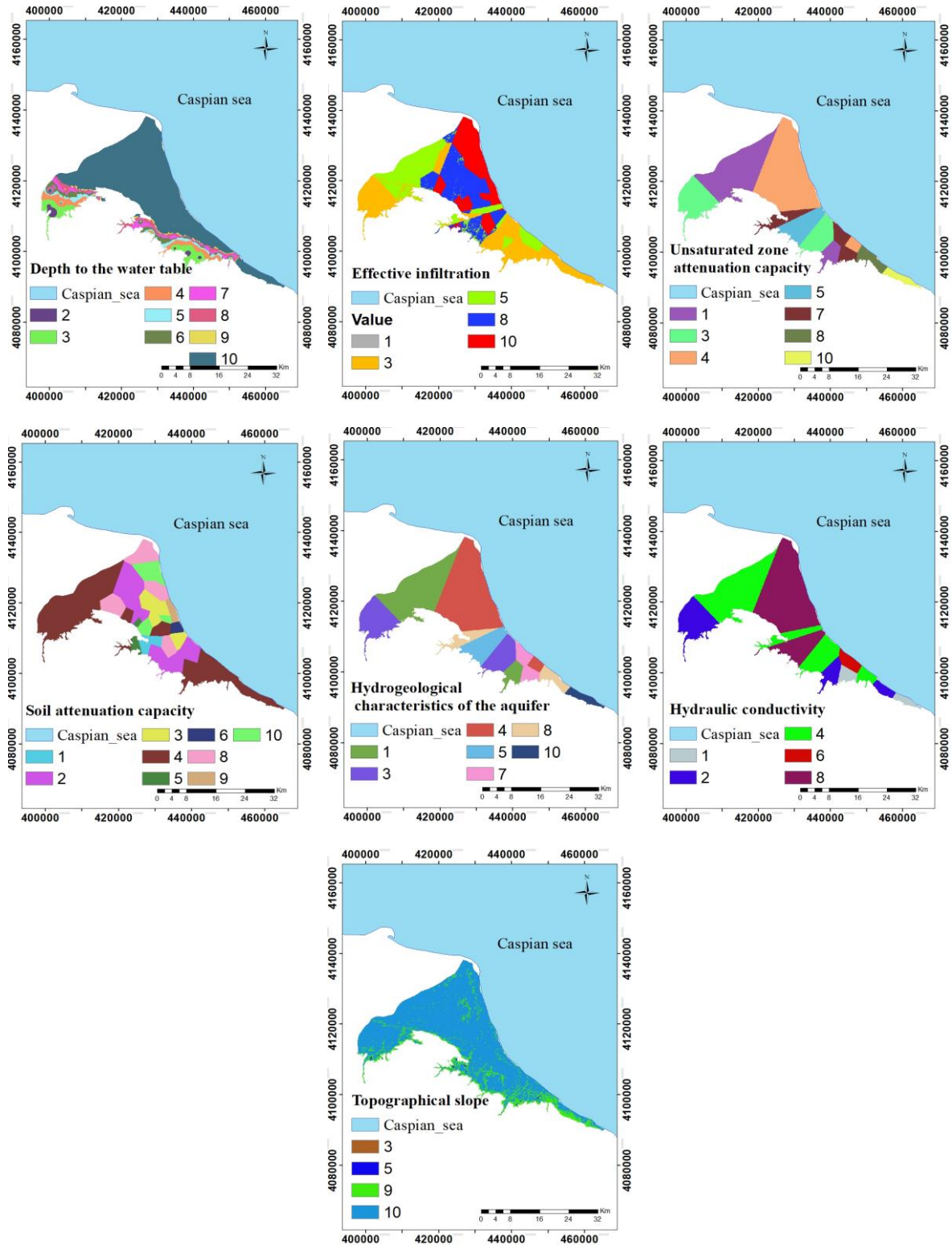
پارامتر تغذیه خالص با استفاده از معادله پیسکوپو در ۵ کلاس آسیب‌پذیری تقسیم شدند. پارامتر N و A با توجه به چاه‌های اکتشافی حفاری (GILC, 2011) هر دو در ۷ کلاس و پارامتر T با استفاده از نقشه خاک (GILC, 2011) محدوده مطالعاتی به ۹ کلاس طبقه‌بندی شدند. پارامتر C با استفاده از نتایج

برآورد پارامترهای شاخص SINTACS

در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS، کلاس‌بندی و وزن‌دهی هر یک از ۷ پارامتر شاخص SINTACS بر اساس جدول ۳ انجام می‌شود. برای پارامتر عمق آب زیرزمینی با توجه به اطلاعات چاه‌های پیژومتری محدوده مطالعاتی در ۹ کلاس،

استخراجی از آزمایش‌های ژئوفیزیک و در آخر نفوذپذیری در منطقه در ۵ کلاس با توجه به نقشه هدایت هیدرولیکی که در بخش فوق هم تشریح شد، ارائه شد. پارامتر S با استفاده از DEM منطقه به ۴ کلاس طبقه‌بندی شد و در نهایت در شکل ۳

۳ نتایج مربوط به هر ۶ پارامتر ارائه شده است. نقشه شاخص SINTACS پس از تهیه نقشه‌های پارامترهای آن و با توجه به وزن‌های ۷ پارامتر به دست آمد.

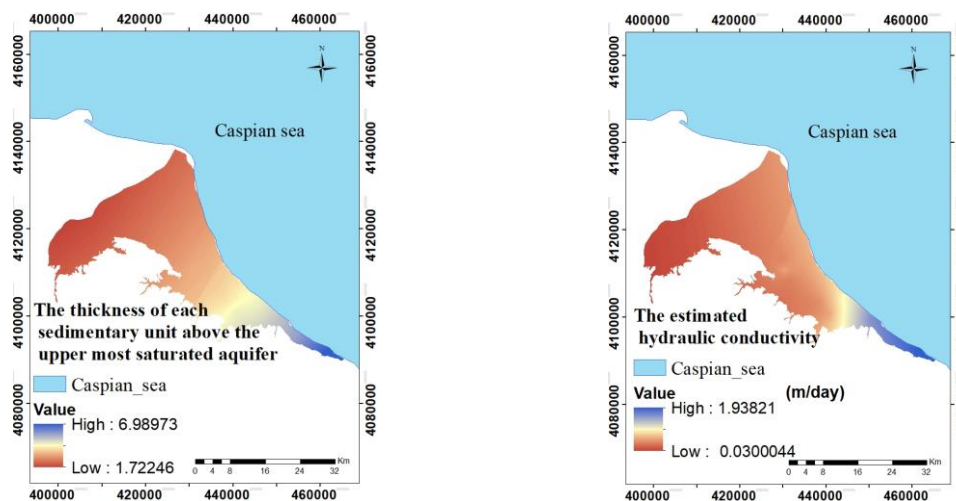


شکل ۳- نقشه عوامل شاخص SINTACS برای منطقه مطالعاتی لاهیجان-چابکسر، استان گیلان، ایران.

برآورد پارامترهای شاخص AVI

هیدرولیکی (C) محاسبه و پس از لگاریتم‌گیری از آن با استفاده از نرم‌افزار Arc MAP خطوط هم‌مقدار مقاومت هیدرولیکی آبخوان رسم شد. پس از محاسبه میزان شاخص آسیب‌پذیری، از طریق مقایسه آن با جدول ۵ میزان نیروی آلودگی آب زیرزمینی مشخص و کلاس‌بندی گردید. نقشه نهایی آسیب‌پذیری بر اساس شاخص‌های GALDIT، SINTACS و AVI در شکل ۵ آورده شده است. در ادامه به تحلیل مقایسه‌ای نتایج حاصل پرداخته می‌شود.

در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS و استفاده از اطلاعات لاگ‌های حفاری لایه اطلاعاتی مربوط به d تولید شد. همچنین با استفاده از نتایج استخراجی از آزمایش‌های ژئوفیزیک و نفوذپذیری در منطقه، لایه اطلاعاتی مربوط به K نیز به وجود آمد. در شکل ۴ لایه‌های اطلاعاتی از محدوده مطالعاتی که به‌عنوان ورودی برای محاسبه شاخص آسیب‌پذیری نهایی AVI مورد استفاده قرار می‌گیرد آورده شده است. طبق پیشنهاد این روش، ابتدا مقدار مشخصه مقاومت



شکل ۴- نقشه عوامل شاخص AVI برای منطقه مطالعاتی لاهیجان-چابکسر، استان گیلان، ایران.

کیلومترمربع) این آبخوان در رده آسیب‌پذیری بسیار بالا، ۳۱/۲۴٪ (۲۵۹۶۳ کیلومترمربع) در رده بالا، ۴/۰۵٪ (۳۳۷۱ کیلومترمربع) در رده متوسط، ۳/۹۶٪ (۱۳۳۰ کیلومترمربع) در رده بسیار پایین و ۱/۶٪ (۷۱۰۴۰ کیلومترمربع) به ترتیب ۸۵/۵۵٪ (۱۰۱۴۰ کیلومترمربع) در محدوده کم آسیب‌پذیری، ۱۲/۴۵٪ (۱۹۰۲ کیلومترمربع) در محدوده متوسط آسیب‌پذیری و ۲/۳۳٪ (۱۹۰۲ کیلومترمربع) در محدوده بسیار آسیب‌پذیر در شرایط فعلی دسته‌بندی شده است (شکل ۵).

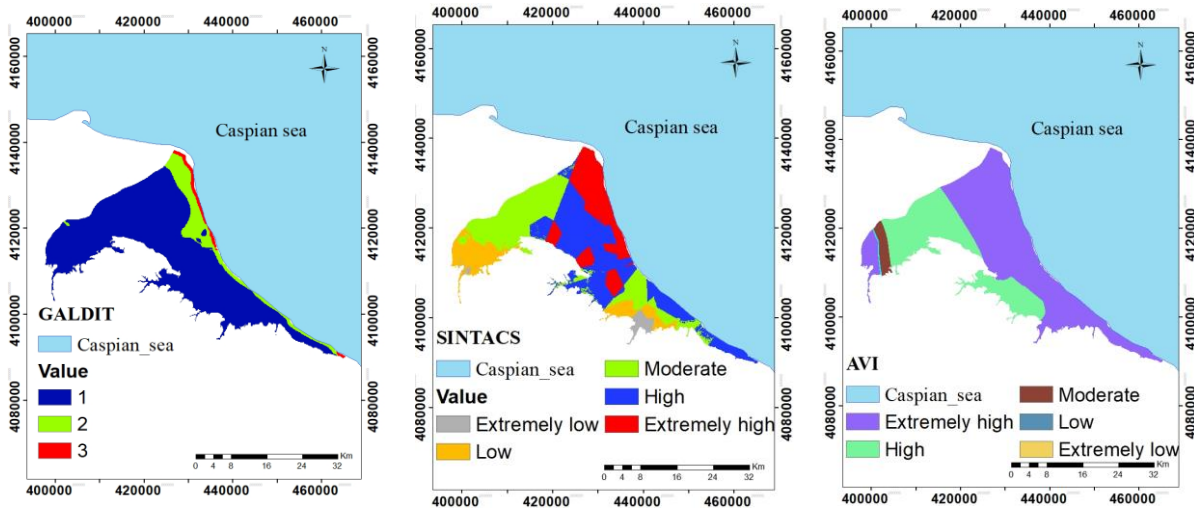
طبق نتایج SINTACS و AVI آبخوان لاهیجان-چابکسر در رده آسیب‌پذیری بسیار بالا تا بسیار پایین است. اگرچه AVI نشان‌دهنده مساحت بیشتر آسیب‌پذیری بسیار بالا نسبت به SINTACS است، اما هر دو روش آسیب‌پذیری بسیار بالایی را

نتایج و بحث

نقشه آسیب‌پذیری SINTACS محدوده مطالعاتی لاهیجان-چابکسر در محدوده ۵۹ تا ۲۰۹ به‌عنوان آسیب‌پذیری بسیار بالا تا بسیار کم درجه‌بندی می‌شود. این مطالعه موردی نشان می‌دهد بر اساس شاخص SINTACS، ۱۸/۹۴٪ (۱۵۷۳۸ کیلومترمربع) مساحت محدوده مطالعاتی در محدوده بسیار آسیب‌پذیر، ۳۵/۸۸٪ (۲۹۸۱۴ کیلومترمربع) در محدوده آسیب‌پذیر، ۳۰/۰۶٪ (۲۴۹۸۳ کیلومترمربع) در محدوده متوسط آسیب‌پذیری، ۱۲/۶۷٪ (۱۰۵۲۹ کیلومترمربع) در محدوده آسیب‌پذیری کم و ۲/۴۳٪ (۲۰۲۵ کیلومترمربع) در محدوده آسیب‌پذیری بسیار کم قرار دارد. در ناحیه کم ارتفاع نزدیک ساحل مقاومت هیدرولیکی آبخوان لاهیجان-چابکسر درحالی‌که حاضر به کمک روش AVI محاسبه شده است که بر اساس طبقه‌بندی این شاخص، ۵۹/۱۳٪ (۴۹۱۳۳)

اطلاعات بهتری از آسیب‌پذیری آبخوان به پیشروی آب شور دریا در مقایسه با SINTACS و AVI در ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در آبخوان ساحلی به کار رود. شاخص‌های آسیب‌پذیری آب زیرزمینی محاسبه‌شده از طریق روش‌های AVI و SINTACS نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بالای آب‌های زیرزمینی در آبخوان لاهیجان-چابکسر به دلیل آلودگی از منابع سطح زمین است. این نتایج از طریق روش AVI به دست آمده‌اند که نشان‌دهنده مساحت آسیب‌پذیری بسیار بالا، بیشتر نسبت به روش SINTACS بود. بخش‌هایی از آبخوان دارای شاخص آسیب‌پذیری بالا در نواحی کم‌عمق شامل رسوبات نفوذپذیرند، یعنی محلی که سطح آب زیرزمینی نزدیک به سطح خاک است و به سرعت نسبت به تغییرات تغذیه آب زیرزمینی پاسخ می‌دهد. نتایج حاصل از روش GALDIT نتایج بهتری نسبت به آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی از پیشروی آب شور دریا در آبخوان ساحلی، به‌ویژه در مناطقی که دارای گرادیان هیدرولیکی کم هستند ارائه می‌دهند که توسط SINTACS و AVI قابل‌شناسایی نیستند.

در نواحی کم ارتفاع نشان می‌دهند که شامل امتداد خط ساحلی و اکثر نقاط مرکزی آبخوان لاهیجان-چابکسر است. این مناطق شامل مناطقی از جنس آبخوان نفوذپذیر بوده و سطح آب زیرزمینی نزدیک سطح خاک می‌باشد و به سرعت طی ذوب برف و بارندگی سنگین واکنش نشان می‌دهد. هدف AVI کاهش پارامترهای به‌کاررفته در SINTACS است. در واقع توپوگرافی را نادیده می‌گیرد، زیرا این موضوع را به‌عنوان یک پارامتر غیربحرانی و همچنین اطلاعات اقلیمی مانند تغذیه آب زیرزمینی را بررسی نمی‌کند و علت این امر دشوار بودن دسترسی به چنین داده‌هایی است. همچنین AVI هیچ پارامتری برای تعیین آسیب‌پذیری آبخوان تحت پیشروی آب شور دریا ندارد. این در حالی است که SINTACS پارامتری را که نفوذ جریان را نشان دهد دارا می‌باشد و آسیب‌پذیری مناطقی را که تحت نفوذ به‌صورت جریان قائم قرار گرفته‌اند را تعیین می‌کند. به همین دلیل شاخص GALDIT که ارتفاع سطح آب زیرزمینی نسبت به سطح دریا، فاصله از خط ساحلی و پارامتر پیشروی آب شور دریا را ارائه می‌دهد می‌تواند



شکل ۵- نقشه نهایی آسیب‌پذیری منطقه مطالعاتی لاهیجان - چابکسر با شاخص‌های GALDIT، SINTACS و AVI.

برآورد آسیب‌پذیری برای هر سه شاخص صورت گرفت. نتایج GALDIT ۸۵/۵٪ آسیب‌پذیری کم، ۱۲/۴۵٪ متوسط و ۲/۳۳٪ آسیب‌پذیری بالای محدوده مطالعاتی را نشان داد، نواحی بسیار آسیب‌پذیر در امتداد خط ساحلی می‌باشند که وضعیت آسیب‌پذیری آبخوان در نواحی ساحلی با توجه به پارامترهای کیفی اندازه‌گیری شده و پیشروی آب شور دریا و بالا آمدن آب

نتیجه‌گیری

به‌منظور بررسی جامع وضعیت آسیب‌پذیری آبخوان لاهیجان-چابکسر سه روش ارزیابی آسیب‌پذیری GALDIT، SINTACS و AVI به‌کاررفته و مقایسه شده‌اند. برای این کار با استفاده از نرم‌افزار Arc MAP وزن و رتبه‌دهی هر یک از پارامترهای سه شاخص به‌صورت منطقه‌ای انجام شد و در نهایت

ندیری، ع.، صدقی، ز.، ۱۳۹۸. ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های چندگانه با استفاده از چهارچوب‌های عملی DRASTIC، SINTACS. هیدروژئولوژی، ۴(۲): ۱۷۱-۱۸۸.

Allouche, N., Maanan, M., Gontara, M., Rollo, N., Jmal, I., Bouri, S., 2017. A global risk approach to assessing groundwater vulnerability. Environmental Modelling and Software. Elsevier Ltd, 88: 168-182.

Antonakos, A.K., Lambrakis, N.J., 2007. Development and testing of three hybrid methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates, based on the drastic model, an example from NE Korinthia, Greece. Journal of Hydrology, 333(2-4): 288-304.

Ataie-Ashtiani, B., Ketabchi, H., Rajabi, M.M., 2013. Optimal management of a freshwater lens in a small island using surrogate models and evolutionary algorithms. Journal of Hydrologic Engineering, 19: 339-354.

Chachadi, A.G., Lobo-Ferreira, J.P., 2003. Assessing the impact of sea-level rise on salt water intrusion in coastal aquifers using GALDIT model. APRH/CEAS, Seminário Sobre Águas Subterrâneas, Lisboa, Fev, (1):1-13

Civita, V.M., 2010. The Combined Approach When Assessing and Mapping Groundwater Vulnerability to Contamination. Journal of Water Resource and Protection, 02(01):14-28.

GILC, Engineers, 2011. Investigation of updating the water resources of the second-grade watershed in the rivers between the Sefidrud and Heraz and the rivers between Haraz and Gharasu: Report of the Lahijan-Chaboksar study area.

Ketabchi, H., Ataie-Ashtiani, B., 2015. Review: Coastal groundwater optimization - advances, challenges, and practical solutions. Hydrogeology Journal, 23(6): 1129-1154.

Luoma, S., Okkonen, J., Korkka-Niemi, K., 2016. Comparison of the AVI, modified SINTACS and GALDIT vulnerability methods under future climate-change scenarios for a shallow low-lying coastal aquifer in southern Finland. Hydrogeology Journal, 25(1): 203-222.

Revelle, R., 1941. Criteria for recognition of the sea water in ground-waters. Eos, Transactions American Geophysical Union, 22: 593-597.

Ribiro, L., Pindo, J.C., Dominguez-Granda, L., 2017. Assessment of groundwater vulnerability in the Daule aquifer, Ecuador, using the susceptibility

شور در چاه‌ها در اثر برداشت، سبب شور شدن اراضی شده است. بنابراین استفاده از شاخص‌های آسیب‌پذیری که ارتباط بین پارامترهای کیفی در زمینه شوری آب را در نظر نمی‌گیرند، نمی‌توان اثربخشی زیادی در منطقه داشته باشد. همچنین نتایج شاخص AVI برای این محدوده ۵۹/۱۳٪ آسیب‌پذیری بسیار بالا، ۳۱/۲۴٪ بالا، ۴/۰۵٪ متوسط، ۳/۹۶٪ پایین و ۱/۶٪ بسیار پایین را نشان داد و SINTACS محدوده را با ۱۸/۹۴٪ بسیار بالا، ۳۵/۸۸٪ بالا، ۳۰/۰۶٪ متوسط، ۱۲/۶۷٪ پایین و ۲/۴۳٪ بسیار پایین پهنه‌بندی کرد. دلیل آسیب‌پذیری بالای آب‌های زیرزمینی با توجه به دو شاخص AVI و SINTACS در آبخوان لاهیجان - چابکسر آلودگی از منابع سطح زمین است. نتایجی که از روش AVI به دست آمد نشان می‌دهد مساحت آسیب‌پذیری بسیار بالا، در این شاخص نسبت به روش SINTACS بیشتر است. ارزیابی این شاخص در نوار ساحلی کشور می‌تواند راهکارهای زیادی در مدیریت برداشت و ممنوعیت این مناطق جهت حفر چاه داشته باشد. با توجه به نتایج به دست آمده در آبخوان ساحلی لاهیجان-چابکسر و نتایج کیفی وضعیت آبخوان باید در آبخوان ساحلی تمهیدات خاص مدیریتی به‌گونه‌ای سنجیده شود که اثر پیشروی آب شور دریا را تا حد ممکن تعدیل کند. نقشه‌های آسیب‌پذیری حاصل می‌توانند در تصمیم‌گیری، برنامه‌ریزی، مدیریت و حفاظت از کیفیت آب زیرزمینی در آبخوان‌های ساحلی مفید و کارآمد باشند. با توجه به اینکه آبخوان لاهیجان-چابکسر از نظر پتانسیل آلودگی تاکنون موردبررسی قرار نگرفته است، بدین ترتیب مطالعه و شناخت مناطق با پتانسیل بالای آلودگی در منطقه می‌تواند در مدیریت منابع آب و تهیه نقشه خطر مفید واقع شود.

منابع

سعیدی‌رضوی، ب.، ۱۳۹۹. بررسی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی دشت گلپایگان با استفاده از بهینه‌سازی روش دراستیک. هیدروژئولوژی، ۵(۲): ۶۱-۷۴.

میرعباسی نجف‌آبادی، ر.، ستاری م.ت.، برقی‌ولینجق، و.، ۱۳۹۵. شبیه‌سازی و مدیریت بهره‌برداری از آب زیرزمینی دشت عجب‌شیر. هیدروژئولوژی، ۱(۱): ۵۷-۷۵.

- Trabelsi, N., Triki, I., Hentati, I., Zairi, M., 2016. Aquifer vulnerability and seawater intrusion risk using GALDIT, GQI SWI and GIS: case of a coastal aquifer in Tunisia. *Environmental Earth Sciences*. Springer Berlin Heidelberg, 75(8): 1-19.
- Werner, A.D., Ward, J.D., Morgan, L.K., Simmons, C.T., Robinson, N.I., Teubner, M.D., 2012. Vulnerability indicators of sea water intrusion. *Ground Water*, 50(1): 48-58.
- index method. *Science of The Total Environment*, 574: 1674-1683.
- Margat, 1970. Cartographie de la vulnerabilite a la pollution des nappes d'eau souterraine. *Bulet in BRGM 2nd Series*, 3(4):13-22.
- Stempvoort, D., Van, Ewert, L., Wassenaar, L., 2010. Aquifer Vulnerability Index: a GIS-Compatible Method for Groundwater Vulnerability Mapping. *Canadian Water Resources Journal*, 18(1): 25-37