

ارزیابی کیفی آبخوان ساحلی دشت تالش با استفاده از مدل آسیب پذیری DRASTIC اصلاح شده

هیدی محمودپور، سمیه جنت رستمی*، افشین اشرف زاده^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۲/۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۱۱)

چکیده

با توجه به ناکارآمد بودن شاخص DRASTIC در مسائل مربوط به بالا آمدن آب شور در مناطق ساحلی، در این پژوهش، برای ارزیابی آسیب پذیری آبخوان ساحلی تالش، سه پارامتر کاربری اراضی، فاصله تا ساحل و اختلاف تراز سطح آب زیرزمینی با سطح آب دریا به شاخص DRASTIC اضافه شد. نتایج حاصل از صحت سنجی مدل ها با داده های EC اندازه گیری شده از چاه های کیفی در دشت تالش نشان داد که DRASTIC اصلاح شده با ضریب همبستگی ۰/۵۲ نسبت به DRASTIC با ضریب ۰/۴۵ تطابق به نسبت بیشتری با نقشه پهنه بندی EC دارد. همچنین آنالیز حساسیت حذف پارامترهای مدل نیز نشان داد، که تغییر شاخص آسیب پذیری با حذف پارامتر عمق تا سطح ایستابی (D) در روش DRASTIC و پارامتر کاربری اراضی (Lu) در روش DRASTIC اصلاح شده، بیشتر از سایر پارامترهاست. در ادامه، براساس آنالیز حساسیت تک پارامتری، مؤثرترین پارامترها در روش DRASTIC، عمق تا سطح ایستابی و تغذیه خالص است در حالی که در روش DRASTIC اصلاح شده، پارامترهای کاربری اراضی و عمق تا سطح ایستابی مؤثرترین پارامترها هستند. به طور کلی نتایج این مطالعه نشان داد، که با اصلاح روش DRASTIC درصد مساحت طبقات با آسیب پذیری زیاد تا خیلی زیاد کاهش یافته است در حالی که طبقات با آسیب پذیری خیلی کم تا متوسط، بیشتر شده است.

واژه های کلیدی: آنالیز حساسیت، آب زیرزمینی، کاربری اراضی، صحت سنجی

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: janatrostami@guilan.ac.ir

مقدمه

در بسیاری از کشورهای جهان، جمعیت زیادی در مناطق ساحلی زندگی می‌کنند و به علت در دسترس نبودن منابع آب سطحی قابل اطمینان برای بهره‌برداری و همچنین نامنظم بودن الگوهای بارش، تنها منبع آب مناسب، آب زیرزمینی ذخیره شده در آبخوان است. برداشت غیراصولی آبخوان‌های ساحلی سبب پیشروی آب شور دریاها و شور شدن آب زیرزمینی خواهد شد. بنابراین، پیشروی آب شور دریاها، مهم‌ترین مسئله‌ای است که کیفیت آب زیرزمینی را در آبخوان‌های ساحلی به خطر می‌اندازد. از طرفی، فعالیت‌های انسانی در بخش کشاورزی، صنعتی شدن شهرها و شهرنشینی نیز باعث کاهش کیفیت آب‌های زیرزمینی می‌شود (۹).

افزایش آلودگی آب‌های زیرزمینی در سراسر جهان باعث به‌وجود آمدن مفهوم آسیب‌پذیری آبخوان شده است که به‌طور گسترده در طول چند دهه گذشته توسط پژوهشگران و سیاست‌گذاران به‌منظور حفاظت از آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته است. آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی نسبت به پیشروی آب دریا، با کاهش ظرفیت‌های نفوذ و تغذیه ناشی از کاربری اراضی و تغییرات پوشش زمین، به‌طور پیوسته در حال افزایش است (۱۴). این تغییرات در اثر استفاده از روش‌های استخراج ناپایدار در امتداد مناطق شهری ساحلی و مناطقی که رشد و افزایش جمعیت بیش از تغذیه طبیعی آبخوان است، ایجاد شده است. با در نظر گرفتن خطر افزایش آلودگی آب‌های زیرزمینی به دلیل افزایش فعالیت‌های انسانی در سراسر جهان، بررسی روش‌های موجود و شناسایی چالش‌های مهم مرتبط با ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان ضروری است.

یکی از شاخص‌هایی که بیشترین کاربرد را در زمینه ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی نسبت به دامنه وسیعی از آلاینده‌های بالقوه دارد، روش DRASTIC است (۳). DRASTIC، یک روش همپوشانی است، که در آن اطلاعات به دست آمده از پارامترهای مختلف به صورت تلفیقی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند و سپس توسط سامانه اطلاعات

جغرافیایی (GIS) پردازش می‌شوند.

بوغریبا و همکاران به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان آنگد در کشور مراکش از مدل DRASTIC استفاده کردند. آنها نقشه اصلاح شده DRASTIC حاصل از مجموع شاخص DRASTIC و نقشه‌های کوچک شبکه پایش را در دو طبقه متوسط و زیاد تهیه کردند. سپس این نقشه را با نقشه کاربری اراضی ادغام کردند تا نقشه ریسک پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی ایجاد شود. نتایج آنها نشان داد که نقشه جدید تهیه شده شامل سه طبقه‌بندی متوسط، زیاد و خیلی زیاد است (۶). مومجیان و همکاران پیشروی آب دریا در آبخوان ساحلی لبنان، را با استفاده از روش DRASTIC و EPIK مورد ارزیابی قرار دادند. برای این منظور، غلظت کل مواد جامد حل شده (TDS) در نمونه‌های آب زیرزمینی برداشت شده از سه ناحیه Beirut، Jal el Dib و Tripoli واقع در امتداد دریای مدیترانه را با نتایج نقشه‌های آسیب‌پذیری مقایسه کردند. اندازه‌گیری‌های میدانی نشان داد که سطح بالایی از شوری آب‌های زیرزمینی به تراکم شهرنشینی بستگی دارد و هر دو روش ارزیابی آسیب‌پذیری، توانایی محدودی در ردیابی نفوذ آب شور داشتند (۱۵). موندال و همکاران، به منظور بررسی آسیب‌پذیری آبخوان کم‌عمقی در شمال هند از روش DRASTIC استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که محدوده مورد مطالعه بر اساس آسیب‌پذیری به چهار منطقه با آسیب‌پذیری خیلی کم، کم، متوسط و زیاد (بین ۱۳۲-۳۹)، طبقه‌بندی می‌شود. همچنین با استفاده از ترکیبات هیدروشیمیایی نظیر TDS ، CL^- ، HCO_3^- ، SO_4^{2-} و CL^- / HCO_3^- نشان داده شد که ۵۷ درصد از محدوده مورد مطالعه در قسمت مرکزی دارای آسیب‌پذیری متوسط به بالاست و مقادیر بالای این ترکیبات با مناطق آسیب‌پذیر ارتباط دارد (۱۶).

خوشدوز و همکاران با بررسی آسیب‌پذیری سفره آب زیرزمینی جزیره کیش با استفاده از مدل DRASTIC و نیز اصلاح آن برای شرایط سفره ساحلی جزیره کیش و مقایسه نتایج مدل‌ها با نقشه‌های پهنه‌بندی هدایت الکتریکی و کل جامدات

به بالا آمدن آب شور در مناطق ساحلی ناکارآمد است (۸)؛ از این رو برای نشان دادن اثرات بالا آمدن آب دریا در این آبخوان‌ها به دلیل شرایط ویژه آنها نسبت به اصلاح روش DRATIC با اضافه کردن پارامترهای ویژه برای مناطق ساحلی اقدام شد. با توجه به اینکه محدوده مطالعاتی تالش خارج از شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود واقع شده است و منابع اصلی تأمین نیازهای آبی منطقه شامل منابع آب سطحی رودخانه‌ها و منابع آب زیرزمینی موجود در منطقه است؛ محدودیت منابع آب سطحی در این منطقه سبب استخراج بی‌رویه منابع آب زیرزمینی آبخوان تالش شده است که به دلیل ساحلی بودن این آبخوان، پدیده پیشروی آب شور باعث کاهش کیفیت منابع آب زیرزمینی این منطقه شده است. بنابراین در این مطالعه، به منظور تهیه نقشه آسیب پذیری و ارائه گزینه‌های مدیریتی مناسب برای حفاظت آبخوان ساحلی تالش، مدل آسیب پذیری DRATIC در این منطقه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه، برای انطباق بیشتر نقشه‌های آسیب پذیری با شرایط موجود در منطقه، روش DRATIC با توجه به موقعیت ویژه منطقه و خصوصیات آبخوان ساحلی تالش با اضافه کردن نقشه‌های کاربری اراضی، فاصله از ساحل و اختلاف تراز سطح آب زیرزمینی با سطح آب دریا به نقشه‌های هفتگانه مدل DRATIC اصلاح می‌شود.

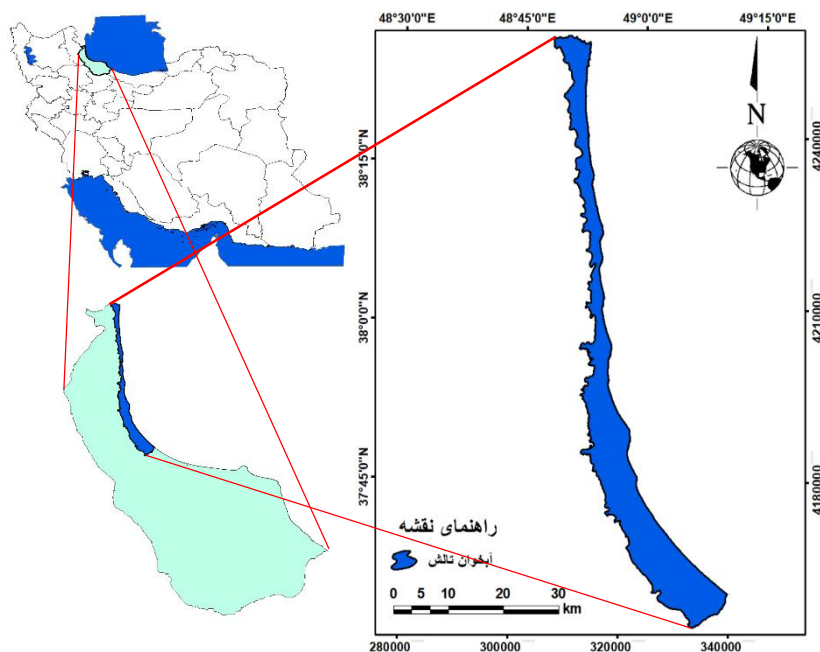
مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مورد مطالعه

دشت تالش در شمال ایران و شمال غرب استان گیلان قرار دارد. وسعت این دشت حدود ۴۸۸/۵ کیلومتر مربع است که حدود ۱۵/۷ درصد از کل محدوده مطالعاتی را دربرمی‌گیرد. این دشت به صورت نوار طویل و کم‌عرض به طول تقریبی ۱۰۶/۶ کیلومتر و عرض متوسط ۵/۷۲ کیلومتر بین رودخانه‌های آستاراچای (شمال دشت) و سفارود (جنوب دشت)، دریای خزر (شرق دشت) و ارتفاعات تالش (غرب دشت) قرار دارد (شکل ۱). کمترین ارتفاع دشت حدود ۲۶- متر و بیشترین ارتفاع آن برابر ۷۶ متر و متوسط ارتفاع دشت

محلول (TDS) نشان دادند که میانگین اختلاف‌ها با نقشه هدایت الکتریکی برای نقشه مدل DRATIC برابر ۱۷/۴۱ و برای مدل DRATIC اصلاح شد ۰/۶۹ است. به همین ترتیب میانگین اختلاف‌ها با نقشه TDS برای دو مدل به ترتیب ۱۰/۲۴ و ۰/۵۵ است که در هر دو حالت حاکی از مطابقت بیشتر مدل اصلاح شده با نقشه‌های هدایت الکتریکی و TDS است. در حالت کلی نتایج آنها نشان داد که مدل DRATIC اصلاح شده مطابقت بیشتری با داده‌های مشاهده‌ای دارد (۱۰). مهدوی و زارع در تحقیقی در آبخوان دشت همدان- بهار بر اساس مدل‌های DRATIC و منطق فازی نشان دادند که هر دو روش، پتانسیل آسیب‌پذیری را در آبخوان دشت با دقت تقریباً یکسانی پیش‌بینی کردند. بر اساس تحلیل حساسیت انجام شده، مؤثرترین پارامتر بر پتانسیل آسیب‌پذیری، عمق تا سطح ایستابی بود (۱۲). موسوی و همکاران به منظور مدیریت کاربری اراضی در آبخوان خوین واقع در استان خوزستان به ارزیابی آسیب‌پذیری با به‌کارگیری مدل DRATIC و SINTACS پرداختند. نتایج همبستگی دو مدل با نقشه‌های هم‌غلظت نترات، نشان داد که میزان همبستگی مدل SINTACS نسبت به مدل DRATIC در پیش‌بینی آسیب‌پذیری آبخوان دارای دقت بیشتری است. علاوه بر این نقشه هم‌غلظت نترات و نقشه‌های نهایی آسیب‌پذیری منطبق با نقشه کاربری اراضی هستند (۱۷). اروجی و سلگی به کمک ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت اسدآباد همدان توسط سه مدل DRATIC، SI و DRATIC اصلاح شده به کمک نقشه کاربری اراضی، مشخص کردند که هر سه مدل نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آلودگی را با دقت خوبی ارائه کرده اما DRATIC اصلاح شده دقت بالاتری در ارزیابی آسیب‌پذیری در دشت دارد (۲۰).

یکی از قابلیت‌های مدل DRATIC انعطاف‌پذیری زیاد آن در انطباق با شرایط ویژه هر منطقه است (۱). در حالی که روش DRATIC به طور گسترده‌ای برای ارزیابی آسیب‌پذیری در مقیاس محلی مورد استفاده قرار گرفته است و برای سفره‌های غیرساحلی مناسب‌تر است، لذا این شاخص در مسائل مربوط



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

سنگ‌های دگرگونی مربوط به قبل از دوران اول و جوان‌ترین سازند متعلق به رسوبات ناپیوسته عهد حاضر است. سنگ‌های آذرین تخریبی به میزان ۵۴/۸ درصد، بیشترین بیرونزدگی را دارند. انواع سنگ‌های کربناته حدود ۱۶/۶ درصد است.

نتایج حاصل از حفاری چاه‌های مشاهده‌ای و مطالعات ژئوفیزیک نشان داد که آبخوان ساحلی دشت تالش از نوع آزاد است. آبخوان آزاد از رسوبات رودخانه‌ای تشکیل یافته و مواد تشکیل‌دهنده رسوبات شن، ماسه، سیلت و رس است. در قسمت مرکزی دشت رسوبات دارای حداکثر اندازه و هرچه به سمت بالادست و پایین‌دست حرکت شود از اندازه رسوبات کاسته می‌شود به طوری که رسوبات بالادست نسبت به رسوبات پایین‌دست درشت‌دانه‌تر هستند. با توجه به نتایج مطالعات ژئوفیزیک در محدوده مطالعاتی تالش حداکثر ضخامت آبخوان در نواحی مرکزی مخروط افکنه رودخانه‌های تیزنه‌رود، خاله سرا، ناورود و دینچال با ضخامت بیش از ۲۲۲ متر بوده و حداقل ضخامت نیز در حاشیه شمالی محدوده کمتر از ۱۲ متر است. شکل‌های ۲ و ۳ دو نمونه از لوگ حفاری چاه اکتشافی محدوده و نقشه زمین‌شناسی منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهد.

۱/۶۷- متر نسبت به دریای آزاد است.

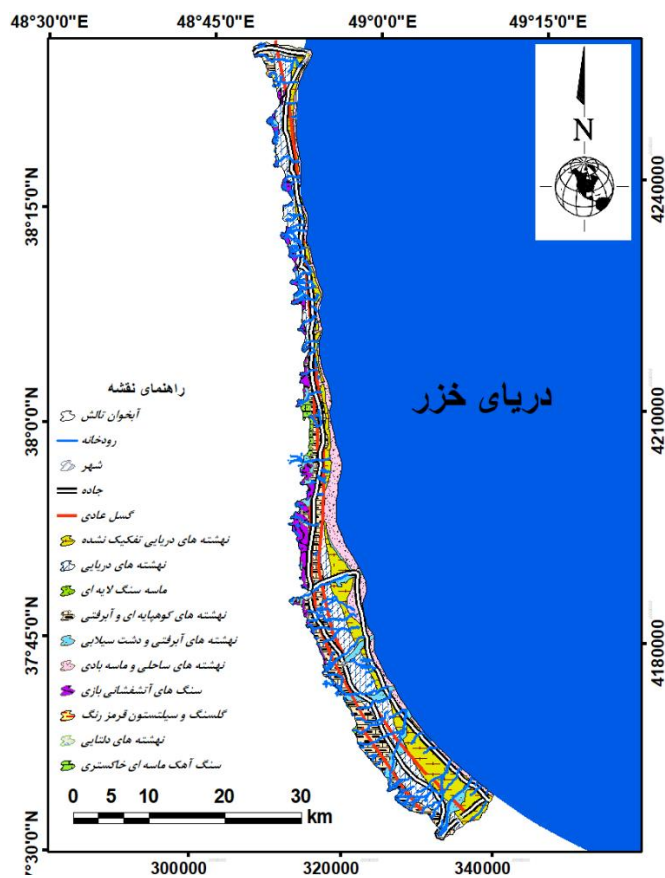
بر اساس گزارش بیلان سال آبی ۹۳-۹۲ میزان برداشت از منابع آب زیرزمینی معادل ۱۳۷/۶۶ میلیون متر مکعب در سال و تفکیک آن بر اساس چاه و چشمه به ترتیب ۱۱۸/۳ و ۱۹/۳۶ میلیون متر مکعب است. که این میزان آب بیشتر به مصارف کشاورزی می‌رسد. حجم آب ورودی سفره آب زیرزمینی و خروجی از آن برابر بوده و سفره در شرایط متعادل است.

زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی منطقه

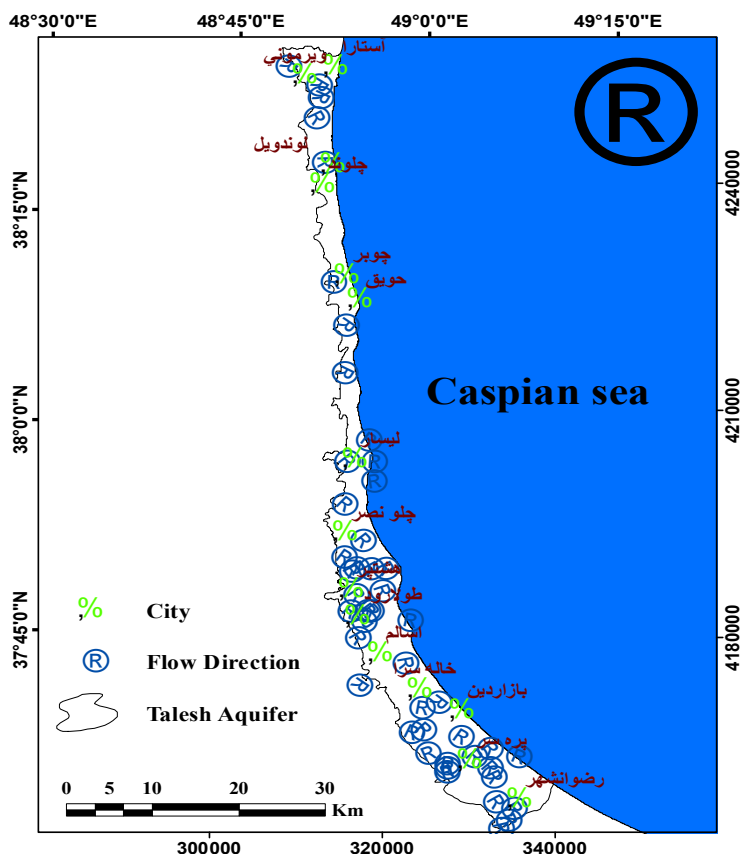
قدیمی‌ترین سنگ‌های محدوده مطالعاتی تالش مربوط به مجموعه دگرگونی کهر و وسیع‌ترین آنها مربوط به واحد رسوبات توفی و گدازه‌های رنگی متعلق به کرتاسه است. در این محدوده مطالعاتی در واحدهای آهکی سازند لار، آهک‌های متعلق به کرتاسه و واحدهای آهکی سازندهای زیارت و کرج به دلیل شرایط مساعد، آبخوان کارستی تشکیل شده است. در میان سازندهای غیرکربناته، رسوبات توفی در تغذیه آبخوان آبرفتی مؤثر هستند. از نظر تأثیر بر کیفیت آب زیرزمینی سازندهای شور کننده در این محدوده وجود ندارد. قدیمی‌ترین سازند این محدوده از نوع

هدایت الکتریکی $EC \times 10^6$	قطر حفاری و لوله گذاری (بج)	صفحه (متر)	شرح برش	رسم برش	نام محدوده مطالعاتی : تالش	هدایت الکتریکی $EC \times 10^6$	قطر حفاری و لوله گذاری (بج)	صفحه (متر)	شرح برش	رسم برش	نام محدوده مطالعاتی : تالش
	18"		خاک زراعی		نام استان: گیلان		28"		ریگ، شن، ماسه و سیلت		نام استان: گیلان
	14"		سنگریزه و شن و ماسه		نام شهرستان: آستارا		12"		تالاب رس سیلتی و ماسه و شن		نام شهرستان: تالش
	16"		سنگریزه و شن و ماسه		نام آبادی: باغچه سرا		18"		شن و ماسه و سیلت		نام آبادی: اسپیدور
	8"		رس خاکستری		مختصات:				شن و ماسه و سیلت		مختصات:
	2075%		سنگریزه و شن و ماسه		X: 311994 Y: 425713				رس سیلتی و ماسه		X: 319909 Y: 4188622
			رس سیاه		نوع چاه:				رس سیلتی و ماسه		نوع چاه:
			وماسه کمی شن		<input type="checkbox"/> بهره برداری <input type="checkbox"/> بیزومتر				شن باسیلت		<input type="checkbox"/> بهره برداری <input type="checkbox"/> بیزومتر
					<input type="checkbox"/> مشاهده ای <input checked="" type="checkbox"/> اکتشافی						<input type="checkbox"/> مشاهده ای <input checked="" type="checkbox"/> اکتشافی
					N ↑						N ↑

شکل ۲. نمونه لوگ حفاری چاه اکتشافی



شکل ۳. نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه



شکل ۴. نقشه برای جریان آب زیرزمینی

آسیب پذیری به روش DRASTIC

عبارت آسیب پذیری در هیدروژئولوژی برای اولین بار توسط مارگات در سال ۱۹۶۸ مورد استفاده قرار گرفت (۱۳). وی آسیب پذیری آبخوان را سهولت امکان نفوذ و پخش آلودگی از سطح زمین به سفره آب زیرزمینی در شرایط طبیعی تعریف می کند. آسیب پذیری نوعی خصوصیت نسبی، بدون بعد و غیرقابل اندازه گیری است و به ویژگی های آبخوان، محیط زمین شناسی و هیدروژئولوژی آن بستگی دارد (۴).

در ادامه، لایه های معیار به منظور تهیه نقشه آسیب پذیری آبخوان در روش DRASTIC و مراحل آماده سازی هر یک ارائه شده است. با توجه به رتبه های مربوط به پارامترها و ضرایب وزنی که اهمیت نسبی آنها را نسبت به آسیب پذیری آبخوان

در اراضی پره سر واقع در جنوب دشت رقوم منحنی های تراز آب زیرزمینی بین ۸۸ متر واقع در اراضی مخروط افکنه ای لومیر تا ۲۶- متر در اراضی ساحلی دشت متغیر است حال آنکه در اراضی غربی آستارا واقع در شمال دشت رقوم منحنی های تراز آب زیرزمینی بین ۶ تا ۲۶- متر متغیر است. به طور کلی منحنی ۲۶- متر به موازات ساحل دریا از جنوب به سمت شمال کشیده شده است و جریان زیرزمینی خروجی از دشت تالش وارد دریا می شود. به طور کلی رقوم منحنی های تراز آب زیرزمینی در نیمه جنوبی دشت بیش از نیمه شمالی دشت است و روند عمومی منحنی های تراز آب زیرزمینی در این دشت شمالی - جنوبی بوده و رقوم آنها از غرب به شرق کاهش می یابد. شکل (۴) نقشه برای جریان آب زیرزمینی را نشان می دهد.

جدول ۱. بازه‌ها و رتبه‌های پارامترهای شاخص DRASTIC و اصلاح شده (۲، ۳ و ۷)

توپوگرافی (درصد)		محیط خاک		محیط آبخوان		تغذیه خالص (میلی متر در سال)		عمق تا سطح ایستایی (متر)	
وزن نسبی: ۱		وزن نسبی: ۲		وزن نسبی: ۳		وزن نسبی: ۴		وزن نسبی: ۵	
رتبه	بازه	رتبه	بازه	رتبه	بازه	رتبه	بازه	رتبه	بازه
۱۰	۰-۲	۱۰	گراول	۸	شن و ماسه	۱	۰-۵۰/۸	۱۰	۰-۱/۵
۹	۲-۶	۹	ماسه	۶	ماسه همراه با مقداری رس یا سیلت	۳	۵۰/۸-۱۰۱/۶	۹	۱/۵-۴/۶
۵	۶-۱۲	۶	لومی ماسه‌ای	۴	رس و سیلت همراه با مقداری ماسه	۶	۱۰۱/۶-۱۷۷/۸	۷	۴/۶-۹/۱
۳	۱۲-۱۸	۵	لومی	۲	رس و سیلت	۸	۱۷۷/۸-۲۵۴	۵	۹/۱-۱۵/۲
۱	>۱۸	۳	لومی سیلتی رسی			۹	>۲۵۴	۳	۱۵/۲-۲۲/۹
								۲	۲۲-۹-۳۰/۵
								۱	>۳۰/۵

فاصله تا ساحل (متر)		اختلاف تراز سطح آب زیرزمینی با آب دریا (متر)		محیط غیراشباع		هدایت هیدرولیکی (متر در روز)		کاربری اراضی	
وزن نسبی: ۴		وزن نسبی: ۴		وزن نسبی: ۵		وزن نسبی: ۳		وزن نسبی: ۵	
رتبه	بازه	رتبه	بازه	رتبه	بازه	رتبه	بازه	رتبه	بازه
۱۰	<۱۰۰	۱۰	<۲	۱۰	گراول و ماسه	۱	<۴	۹	شهری
۹	۱۰۰-۲۰۰	۸	۲-۴	۹	ماسه و گراول همراه کمی سیلت و رس	۲	۴-۱۲	۷	کشاورزی
۸	۲۰۰-۳۰۰	۶	۴-۶	۸	ماسه و گراول همراه با سیلت	۴	۱۲-۲۸	۵	آب
۷	۳۰۰-۴۰۰	۵	۶-۹	۷	رس و سیلت همراه با مقدار کمی ماسه	۶	۲۸-۴۰	۴	جنگل
۶	۴۰۰-۵۰۰	۳	۹-۱۵			۸	۴۰-۸۰		
۵	۵۰۰-۶۰۰	۲	۱۵-۲۰			۹	۸۰-۱۰۰		
۴	۶۰۰-۸۰۰	۱	>۲۰			۱۰	>۱۰۰		
۳	۸۰۰-۱۰۰۰								
۲	۱۰۰۰-۳۰۰۰								
۱	>۳۰۰۰								

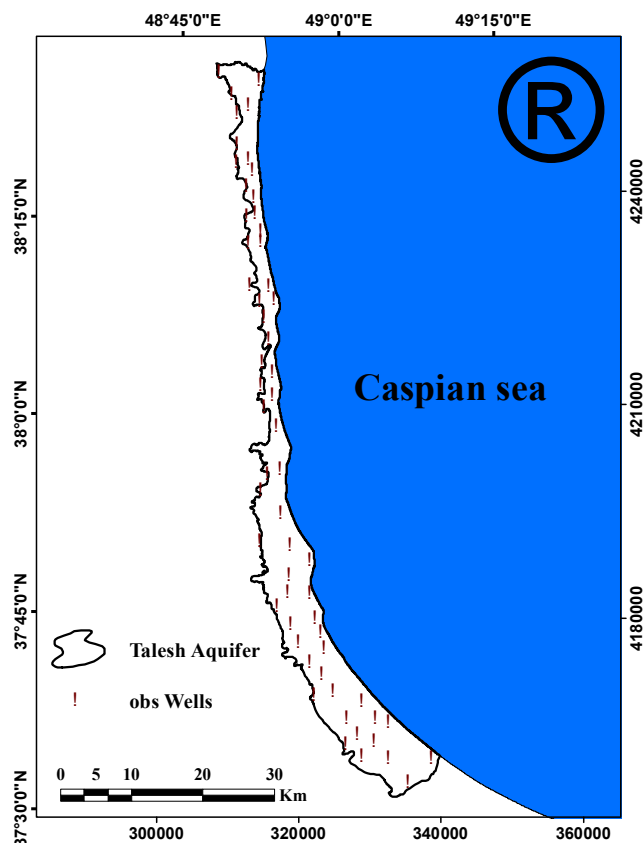
نشان می‌دهد (جدول ۱)، نقشه شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC، بر اساس رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$\text{DRASTIC Index} = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w \quad (1)$$

که در این رابطه، D, R, A, S, T, I, C و هفت پارامتر تأثیرگذار بر آسیب‌پذیری آب زیرزمینی هستند که در سیستم هیدروژئولوژیکی کنترل کننده آلودگی آب زیرزمینی وجود دارند و در ادامه، نحوه محاسبه آنها تشریح شده است؛ اندیس‌های W و I نیز به ترتیب نشان‌دهنده وزن و رتبه هر یک

از این پارامترها هستند.

عمق تا سطح ایستایی (Depth to groundwater table): در دشت تالش رقوم منحنی‌های هم‌عمق آب زیرزمینی بین ۰/۵ تا ۲۴ متر متغیر است. منحنی‌های هم‌عمق دارای راستای تقریباً شمالی - جنوبی بوده و رقوم آنها از غرب به سمت شرق کاهش می‌یابد. در اراضی مخروط افکنه‌ای عمق سطح آب زیرزمینی بیش از ۱۰ متر است که به سمت دریا کاهش یافته و در اراضی ساحلی آبخوان آبرفتی به کمتر از ۲ متر می‌رسد. وسعت نواحی با عمق برخورد به سطح آب زیرزمینی کمتر از ۱، بین ۱ تا ۳ و



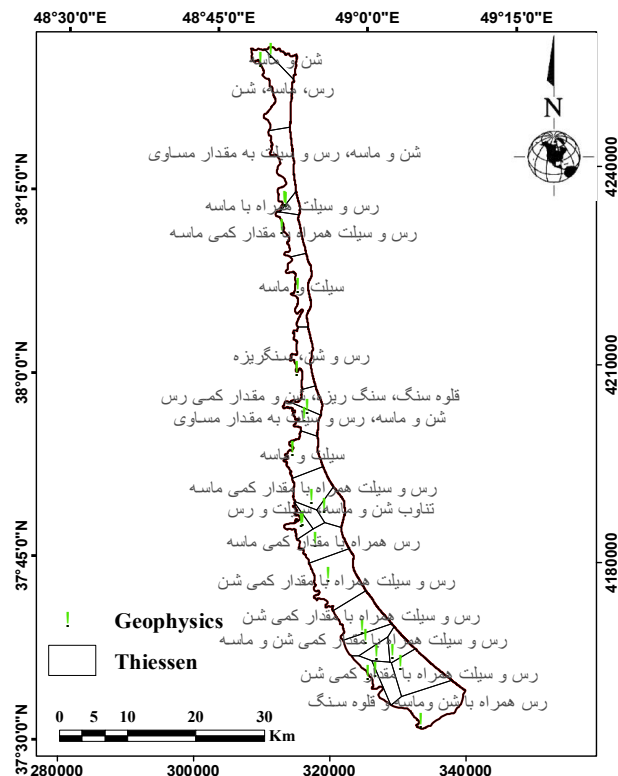
شکل ۵. نقشه موقعیت چاه‌های مشاهداتی

زیرزمینی ورودی به آبخوان تأثیری در انتقال آلودگی از سطح به عمق ندارد، لذا مقدار جریان ورودی زیرزمینی (معادل ۶۴/۲۲ میلیون متر مکعب در سال) از مقدار کل کسر شده و مقدار تغذیه نهایی ۱۳۶/۸۴ میلیون متر مکعب در سال به دست آمد. با تقسیم این مقدار بر مساحت آبخوان میزان تغذیه در کل سطح آبخوان ۲۸۰/۱۲ میلی‌متر در سال محاسبه شد. با توجه به نوع بافت خاک، محیط غیراشباع و هدایت هیدرولیکی آبخوان این میزان تغذیه برای نقاط مختلف یکسان نبوده و در هر منطقه مقدار آن متفاوت است. پس برای تهیه نقشه تغذیه خالص از داده‌های این سه پارامتر استفاده شد. بدین صورت که ابتدا برای چاه‌های اکتشافی و پیزومتری منطقه مورد مطالعه پلیگون تیسن شکل (۶) رسم شد، سپس بر اساس نقشه پهنه‌بندی پارامترها رتبه هر پلیگون به دست آمد. بنابراین هر پلیگون دارای سه رتبه (رتبه میانگین هدایت هیدرولیکی، رتبه میانگین محیط اشباع و

بین ۳ تا ۵ متر در این دشت به ترتیب ۱۳۸/۴۹، ۱۶۰/۲۹ و ۲۴/۴۸ کیلومتر مربع است.

برای تهیه نقشه عمق تا سطح ایستابی، از داده‌های ماهانه سطح آب زیرزمینی بالغ بر ۵۹ حلقه چاه مشاهده‌ای دشت تالش برای سال آبی ۹۲-۹۳ استفاده شده است. داده‌های نقطه‌ای میانگین سالانه عمق تا سطح ایستابی با استفاده از روش IDW درون‌یابی شد و فایل رستری حاصل با استفاده از جدول (۱) در محدوده‌های مختلف رتبه‌بندی شد. شکل (۵) موقعیت و پراکنش مکانی چاه‌های مشاهداتی را نشان می‌دهد.

تغذیه خالص (Net Recharge): مهم‌ترین عامل در حرکت عمودی آب، میزان تغذیه توسط نزولات جوی است. طبق گزارش بیلان آب زیرزمینی آبخوان آبرفتی دشت تالش میزان آب ورودی به آبخوان طی سال آبی ۹۲-۹۳ معادل ۲۰۱/۰۵ میلیون متر مکعب در سال است. با توجه به اینکه جریان



شکل ۶. نقشه پلیگون تیسن چاه‌های اکتشافی و پیزومتری منطقه مورد مطالعه

شرکت آب منطقه‌ای استان گیلان جمع‌آوری شد. همچنین با توجه به سطحی بودن و عمق کم آب‌های زیرزمینی در بعضی نقاط برای ارزیابی این پارامتر از نمونه‌های خاک اندازه‌گیری شده مؤسسه تحقیقات برنج نیز استفاده شد. با توجه به موقعیت لوگ حفاری‌ها، جنس و بافت آن نقطه تعیین شد و بر اساس جدول (۱) رتبه‌بندی شد. سپس با استفاده از روش درون‌یابی IDW نقشه محیط خاک به فرمت رستری تهیه شد.

توپوگرافی (Topography): برای تهیه لایه توپوگرافی از نقشه مدل رقومی ارتفاعی (DEM) منطقه و سپس تهیه نقشه درصد شیب منطقه در محیط نرم‌افزار Arc GIS استفاده شد.

محیط غیراشباع (Impact of Vadose Zone): برای تهیه محیط غیراشباع همانند نقشه پارامتر محیط آبخوان از داده‌های لوگ حفاری استفاده شد و نقشه آن با پیکسل سایز متناسب با سایر پارامترها تهیه شد.

رتبه میانگین محیط خاک) بوده و در ادامه با حاصل‌ضرب این سه رتبه یک عدد به‌دست آمد و بر اساس آن میزان تغذیه خالص رتبه‌بندی شده و نقشه رستری آن با استفاده از روش درون‌یابی IDW تهیه شد.

محیط آبخوان (Aquifer media): برای تهیه نقشه محیط آبخوان دشت تالش از کاوش‌های زیرسطحی (لوگ حفاری‌های پیزومتری و اکتشافی و چاه‌های بهره‌برداری)، کاوش‌های ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه استفاده شد. بدین صورت که برحسب نسبت جنس مواد تشکیل دهنده آبخوان در هر چاه، رتبه‌هایی بر اساس جدول (۱) به هر نقطه اختصاص داده شد و با درون‌یابی نقاط با استفاده از روش IDW نقشه محیط آبخوان به فرمت رستری تهیه شد.

محیط خاک (Soil media): به‌علت فقدان نقشه‌های خاک در اکثر مطالعات از لوگ‌های حفاری استفاده می‌شود. در این پژوهش نیز لوگ حفاری چاه‌ها در سطح دشت تالش از

پلی گون محدوده مورد نظر به عنوان نوار ساحلی در نظر گرفته شد و با استفاده از ابزار Euclidean Distance فایل رستری دارای فاصله مستقیم هر پیکسل با نوار ساحلی تهیه شد و با استفاده از جدول (۱) رتبه بندی شد.

اختلاف تراز سطح آب زیرزمینی و سطح آب دریا (Height of groundwater level of above sea level): با توجه به گزارش نوسانات آب دریای خزر در سال آبی ۱۳۹۳-۱۳۹۲ متوسط تراز آب دریای خزر ۲۶/۶۷- متر برآورد شد. پس از آن میانگین سالانه تراز سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای برای سال آبی مورد نظر نیز محاسبه شد و از اختلاف آن با متوسط تراز سطح آب دریای خزر به عنوان داده‌های نقطه‌ای این پارامتر در نظر گرفته شد. با انجام مراحل تهیه نقشه رستری و رتبه‌بندی آن بر اساس جدول (۱) نقشه پهنه‌بندی آن تهیه شد.

با توجه به رتبه‌های مربوط به پارامترها و ضرایب وزنی که اهمیت نسبی آنها را نسبت به آسیب‌پذیری آبخوان نشان می‌دهد (جدول ۱)، نقشه شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC اصلاح شده، بر اساس رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$\text{DRASTIC Index} = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w + Di_r Di_w + Le_r Le_w + Lu_r Lu_w \quad (2)$$

که در این رابطه، $D, R, A, S, T, I, C, Di, Le, Lu$ پارامترهای تأثیرگذار بر آسیب‌پذیری آب زیرزمینی هستند، اندیس‌های W و r نیز به ترتیب نشان‌دهنده وزن و رتبه هر یک از این پارامترها هستند.

آنالیز حساسیت

برخی از دانشمندان معتقدند که برای ارزیابی آسیب‌پذیری آلودگی آب‌های زیرزمینی با تعداد کمتری از پارامترها و با دقت بیشتر و هزینه کمتر می‌توان به نتایجی معادل مدل DRASTIC دست یافت (۵). برای ارزیابی مدل و کسب اطلاعات از اثرات

هدایت هیدرولیکی (Hydraulic Conductivity): اطلاعات مربوط به این پارامتر از محاسبات آزمایش پمپاژ حاصل می‌شود. با توجه به آنکه در آزمایشات 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 آمد. اطلاعات و نقاط جغرافیایی مربوط به ضریب قابلیت انتقال و هم‌ضخامت آبخوان دشت از نقشه‌های موجود تهیه شده و کلیه مراحل تهیه نقشه مطابق پارامترهای قبلی در محیط Arc GIS انجام گرفت. سپس به کمک قابلیت این نرم‌افزار از تقسیم نقشه ضریب قابلیت انتقال بر نقشه ضخامت آبخوان نقشه هدایت هیدرولیکی دشت به دست آمد.

آسیب‌پذیری به‌روش DRASTIC اصلاح شده

اگرچه روش DRASTIC به‌طور گسترده برای مناطق مختلف به‌کار برده می‌شود، اما می‌توان آن را بر اساس ویژگی‌های خاص هر منطقه و نوع آلاینده، برای هر منطقه اصلاح کرد (۱۹ و ۲۲). آبخوان تالش یک آبخوان ساحلی است و عمده کاربری‌های اراضی آن شامل شهری، کشاورزی، جنگل و آب است. بر اساس این ویژگی‌ها پارامترهای فاصله از ساحل، اختلاف تراز سطح آب زیرزمینی با سطح آب دریا و کاربری اراضی با مشخصات زیر برای اصلاح مدل DRASTIC به مدل اصلی اضافه شده‌اند:

کاربری اراضی (Land use): برای تهیه نقشه کاربری اراضی از نقشه کاربری اراضی دشت تالش استفاده شد. عمده کاربری‌های دشت تالش شامل کاربری شهری، کشاورزی، آب و جنگل است. پس از مشخص کردن کاربری‌ها در محدوده مطالعاتی رتبه‌بندی برای هر کاربری بر اساس جدول (۱) انجام شد. بقیه مراحل تهیه این نقشه همانند پارامترهای قبلی انجام شد.

فاصله تا ساحل (Distance from the shoreline): تهیه نقشه فاصله تا نوار ساحلی به این صورت انجام شد که ضلع شرقی

آنالیز حساسیت تک پارامتری (پارامتر واحد)

آنالیز حساسیت تک پارامتری توسط ناپولیتانو و فبری در سال ۱۹۹۶ معرفی شد (۱۸)، که در آن به منظور محاسبه تأثیر هر پارامتر، ابتدا شاخص آسیب پذیری با تلفیق لایه‌های آن برآورد شده (V)؛ سپس وزن واقعی یا مؤثر هر پارامتر با استفاده از رابطه ۴ به دست می‌آید. در واقع این آنالیز اثر هر کدام از پارامترهای DRASTIC را بر روی شاخص آسیب‌پذیری ارزیابی می‌کند. این آنالیز برای مقایسه وزن مؤثر هر کدام از پارامترها با وزن تئوریک اختصاص داده شده در مدل تحلیلی انجام می‌شود. وزن مؤثر تابعی از مقدار پارامتر منفرد با توجه به پارامترهای دیگر و همچنین وزن اختصاص داده شده به آن از طریق مدل DRASTIC است. وزن مؤثر یا وزن واقعی هر پارامتر با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$S = \left(\frac{P_r P_w}{V} \right) \times 100 \quad (4)$$

در این رابطه W وزن مؤثر هر پارامتر و Pr و Pw به ترتیب رتبه و وزن مربوط به آن پارامتر و V شاخص آسیب‌پذیری است. وزن مؤثر پارامترهای DRASTIC انحراف از مقادیر تئوریک آنها را نشان می‌دهد.

صحت‌سنجی مدل

یکی از روش‌های اعتبارسنجی شاخص‌های آسیب‌پذیری استفاده از پارامترهای کیفی و همبستگی بین غلظت پارامترهای کیفی و شاخص محاسبه شده است. با توجه به موقعیت جغرافیایی و ساحلی بودن منطقه مورد مطالعه برای ارزیابی مدل‌های نهایی آسیب‌پذیری، بررسی میزان همبستگی بین شاخص‌های آسیب‌پذیری و میزان پارامتر کیفی EC چاه‌های مورد آزمایش منطقه صورت پذیرفت. در نمونه‌های برداشت شده از ۴۴ چاه موجود در منطقه مورد مطالعه، نقشه توزیع غلظت EC به دست آمد. با توجه به شکل (V) میزان EC در در منطقه مورد مطالعه در محدوده ۱۷۹۴-۱۴۳ است. از ضریب همبستگی پیرسون برای بررسی همبستگی نتایج استفاده شد و نتایج حاصل از میزان همبستگی شاخص‌های آسیب‌پذیری با پارامتر کیفی در جدول (۲) آورده شده است.

مقادیر رتبه و وزن اختصاص یافته به پارامترهای ورودی مدل DRASTIC و عکس‌العمل مدل به تغییرات اعمال شده، انجام آنالیز حساسیت به ارزیابی نقشه آسیب‌پذیری و همچنین ارزیابی سازگاری آن کمک زیادی می‌کند (۲۱). در مقایسه با سایر روش‌های آسیب‌پذیری، یکی از مزیت‌های اصلی مدل DRASTIC، انجام ارزیابی با استفاده از تعداد زیادی از لایه‌های داده‌های ورودی است که اعتقاد بر این است که اثرات خطاها و عدم قطعیت‌های پارامتر منفرد در خروجی نهایی محدود می‌شود. برخی نیز معتقدند که وزن‌ها و رتبه‌های مورد استفاده در مدل، ذهنی هستند و هیچ دلیلی وجود ندارد که دقت روش‌های آسیب‌پذیری به نتیجه برسد (۱۸). با وجود این هنوز برخی نتایج این مدل را در غیاب شواهد تجربی حمایت می‌کنند.

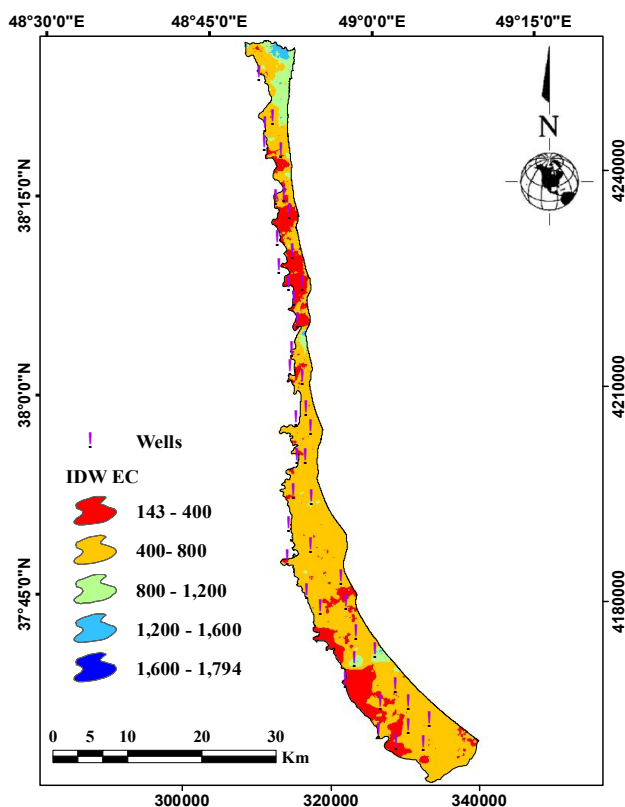
آیا همه پارامترها برای بررسی آسیب‌پذیری آبخوان دشت تالش لازم است یا با تعداد کمتری از پارامترها نیز می‌توان به نتیجه مطلوب دست یافت؟ نتیجه این صحت‌سنجی با استفاده از آنالیز حساسیت روش‌های مورد استفاده، مشخص می‌شود. دو نوع آنالیز حساسیت در این تحقیق انجام شده است:

آنالیز حساسیت حذف نقشه

این آنالیز که برای اولین بار توسط لودویک و همکاران در سال ۱۹۹۰ انجام شد (۱۱)، حساسیت نقشه آسیب‌پذیری را به حذف یک یا چند پارامتر نشان می‌دهد و با حذف هر یک از پارامترها میزان حساسیت شاخص آسیب‌پذیری به هر پارامتر به دست می‌آید. این آنالیز از طریق رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$S = \left(\frac{V - v/n}{V} \right) \times 100 \quad (3)$$

در این رابطه، S میزان حساسیت را نشان می‌دهد؛ V و v به ترتیب شاخص آسیب‌پذیری بدون حذف و با حذف پارامتر؛ N و n تعداد لایه‌های مورد استفاده برای محاسبه V و v هستند. شاخص آسیب‌پذیری اصلی حاصل از تمامی پارامتر به‌عنوان V و شاخص حاصل از حذف یک یا چند پارامتر به‌عنوان v در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۷. الف) نقشه پهنه‌بندی EC و موقعیت چاه‌های اندازه‌گیری پارامترهای کیفی

جدول ۲. همبستگی بین غلظت پارامتر EC و شاخص‌های آسیب‌پذیری DRASTIC و DRATIC اصلاح شده

پارامتر کیفی	ضریب تبیین (R^2)	
	DRASTIC	DRATIC اصلاح شده
EC	۰/۴۵	۰/۵۲

بین ۱۷۳-۴۹۰/۹ میلی‌متر در سال متغیر است. شکل (۸-ب) نقشه رتبه‌بندی این پارامتر را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود؛ قسمت شمالی و مرکزی محدوده مورد مطالعه دارای حداکثر میزان تغذیه به مقدار بیش از ۲۵۴ میلی‌متر در سال (رتبه ۹) هستند و بیشترین مساحت محدوده آبخوان را به خود اختصاص داده است.

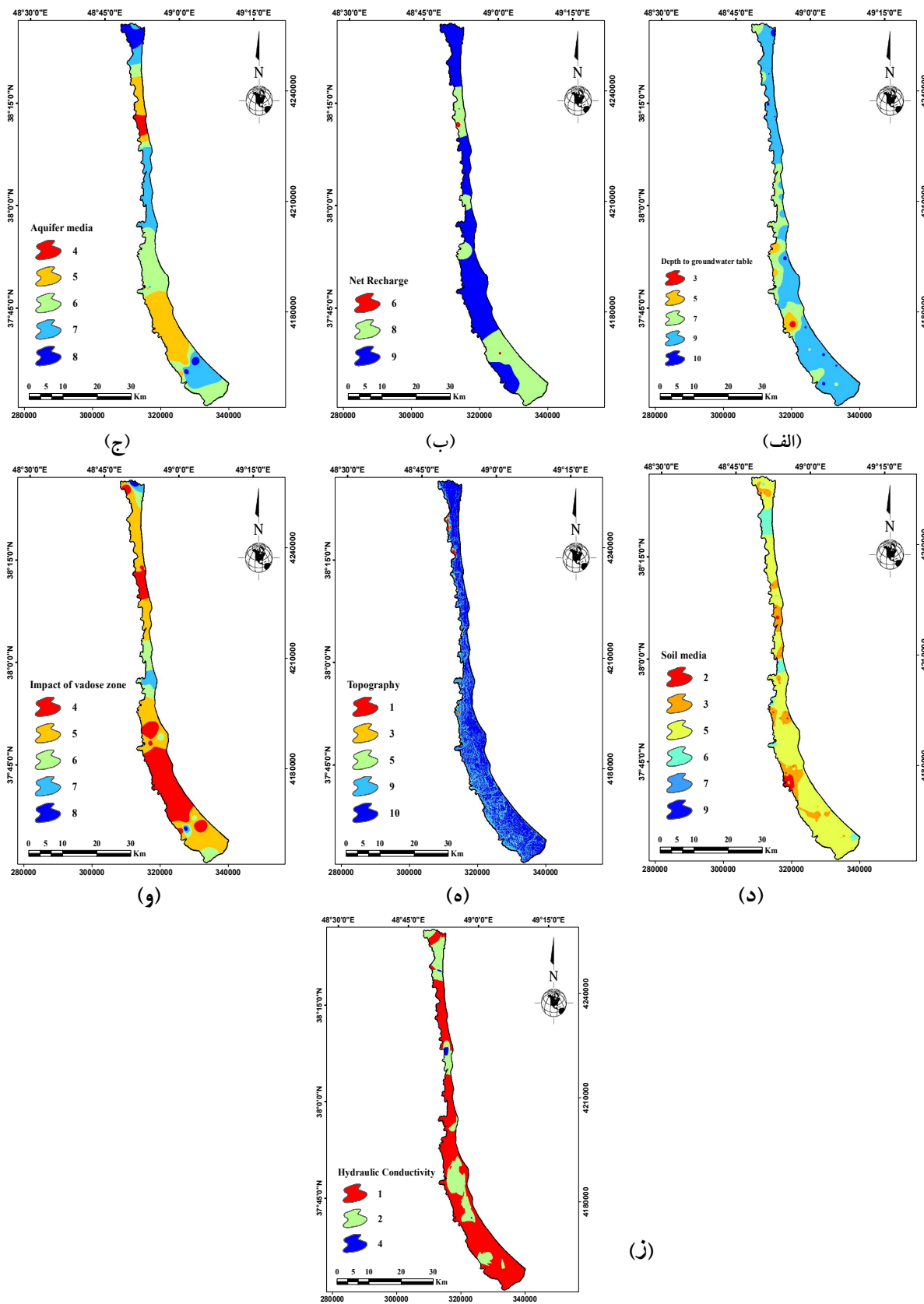
بافت رسوبات در محیط اشباع آبخوان از رس و سیلت تا شن و ماسه متغیر است. مناطق با بافت شن و ماسه‌ای بیشترین رتبه و مناطق با بافت رسی کمترین رتبه را به خود اختصاص داده‌اند. با توجه به شکل (۸-ج) می‌توان نتیجه گرفت؛

نتایج و بحث

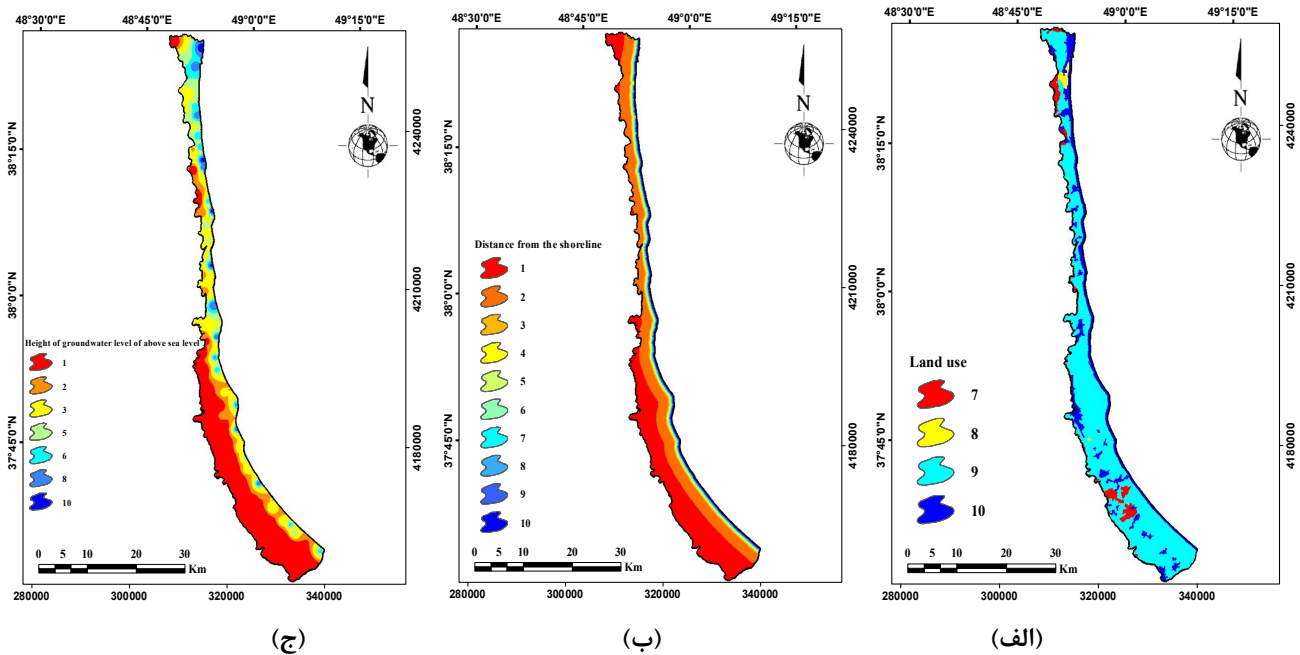
تحلیل نقشه‌های پهنه‌بندی پارامترهای DRASTIC

عمق تا سطح ایستابی در آبخوان دشت تالش بین ۱/۰۸ و ۱۹/۶۷ متر متغیر است. همان‌طور که در شکل (۸-الف) ملاحظه می‌شود، بیشترین مساحت آبخوان دارای عمق بین ۴/۶-۱/۵ متر (رتبه ۹) است و در قسمت‌های مرکزی دشت بیشتر عمق آب زیرزمینی بین ۴/۶ تا ۱۵/۲ متر است (رتبه ۷ و ۵).

با توجه به نوع بافت خاک، محیط غیراشباع و هدایت هیدرولیکی آبخوان، مقدار تغذیه خالص در دشت تالش



شکل ۸. نقشه‌های: الف) عمق تا سطح ایستابی، ب) تغذیه خالص، ج) محیط آبخوان، د) محیط خاک، ه) توپوگرافی، و) محیط غیراشباع و ز) هدایت هیدرولیکی



شکل ۹. نقشه‌های: الف) کاربری اراضی، ب) فاصله تا ساحل و ج) اختلاف تراز سطح آب زیرزمینی با سطح آب دریا

عظیمی از محیط غیراشباع آبخوان را تشکیل می‌دهند و در ناحیه مرکزی محدوده مطالعاتی سهم ذرات ماسه بیشتر است. هدایت هیدرولیکی آبخوان دشت تالش بین ۰/۵ تا ۲۱/۳۴ متر بر روز متغیر است. همان‌طور که در شکل (۸-۱) مشاهده می‌شود قسمت عمده آبخوان دارای هدایت هیدرولیکی کمتر از ۴ (رتبه ۱) است، و بخش‌های شمالی دشت از هدایت هیدرولیکی بیشتری نسبت به نواحی دیگر برخوردار هستند.

تحلیل نقشه‌های پهنه‌بندی پارامترهای DRASTIC اصلاح شده

طبق نقشه پهنه‌بندی این پارامتر در شکل (۹-الف) کاربری کشاورزی (رتبه ۹) بیشترین مساحت محدوده را دربرگرفته و پس از آن کاربری شهری، جنگل و آب در درجات بعدی قرار گرفته‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود؛ کاربری شهری بیشتر در نوار ساحلی و حاشیه‌های این دشت قرار گرفته است. نقشه پهنه‌بندی پارامتر فاصله تا ساحل در شکل (۹-ب) آورده شده است. با فاصله گرفتن از ساحل رتبه‌بندی این پارامتر

که آبخوان دشت تالش به صورت متناوب از ذرات ریزدانه نظیر رس و سیلت تا ذرات درشت‌تر شن و ماسه با درصد بیشتر در قسمت شمالی، تشکیل شده است. نقشه پهنه‌بندی پارامتر محیط خاک در شکل (۸-د) آورده شده است. بافت خاک در بخش‌های مختلف دشت متفاوت است ولی در حالت کلی بافت خاک غالب در محدوده دشت تالش بافت لومی (رتبه ۵) است؛ که به نسبت اثر متوسطی روی آسیب‌پذیری دارد.

شیب منطقه بین صفر تا ۹۳/۷۳ درصد متغیر است. شیب صفر تا ۲ درصد حداکثر رتبه (رتبه ۱۰) را به‌خود اختصاص می‌دهد. شکل (۸-ه) نقشه پهنه‌بندی درصد شیب منطقه را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که شیب در منطقه کم بوده و اکثراً در محدوده ۰-۲ درصد (رتبه ۱۰) و محدوده ۲-۶ درصد (رتبه ۹) است.

بافت رسوبات در محیط غیراشباع بین رس تا شن و ماسه همراه با سنگریزه متغیر است. شکل (۸-و) نقشه پهنه‌بندی این پارامتر را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود ذرات رس و سیلت به‌همراه مقدار کمی ماسه (رتبه ۴ و ۵) بخش

جدول ۳. تحلیل آماری آنالیز حساسیت حذف تک نقشه

شاخص تغییرات (%)					پارامتر حذف شده
ضریب تغییرات (%)	انحراف معیار	حداکثر	حداقل	میانگین	
DRASTIC					
۵۰/۷۴	۱/۲۴	۵/۹۵	۰/۰۲	۲/۴۴	D
۵۲/۲۳	۱/۱۲	۶/۳۴	۰	۲/۱۵	R
۱۰۱/۰۸	۱/۰۶	۷/۲۶	۰	۱/۰۵	A
۸۸/۲۳	۱/۲۸	۶/۵۵	۰	۱/۴۶	S
۸۷/۲۴	۱/۴۹	۶/۴۵	۰	۱/۷۰	T
۷۲/۰۹	۰/۸۷	۴/۸۹	۰	۱/۲۱	I
۸۱/۹۴	۱/۵۸	۸/۰۷	۰	۱/۹۳	C
DRASTIC اصلاح شده					
۶۶/۲۶	۰/۸۹	۵/۳۲	۰	۱/۳۵	D
۶۵/۰۷	۰/۷۹	۴/۶۰	۰	۱/۲۱	R
۸۰/۲۸	۰/۸۷	۸/۵۹	۰	۱/۰۹	A
۸۰/۲۰	۰/۹۵	۷/۲۸	۰	۱/۱۹	S
۸۳/۰۸	۱/۰۸	۹/۸۱	۰	۱/۳۰	T
۷۵/۹۷	۰/۷۹	۸/۵۲	۰	۱/۰۴	I
۸۱/۴۶	۱/۰۷	۸/۵۲	۰	۱/۳۲	C
۶۱/۱۴	۰/۹۸	۴/۷۹	۰	۱/۶۰	Lu*
۷۹/۶۲	۰/۷۵	۵/۷۸	۰	۰/۹۴	Di*
۸۶/۵۵	۰/۸۷	۶/۸۴	۰	۱/۰۱	Le*

Di*: فاصله تا ساحل، Le*: اختلاف تراز سطح آب زیرزمینی با سطح آب دریا و Lu*: کاربری اراضی

ایستایی (D) در روش DRASTIC و حذف پارامتر کاربری اراضی (Lu) در روش DRASTIC اصلاح شده بیشتر از سایر پارامترها است، زیرا متوسط تغییر شاخص به ترتیب ۲/۴۴ و ۱/۶ درصد است. این امر می‌تواند به دلیل وزن تثوریک بالا برای این دو پارامتر باشد. علاوه بر این، شاخص DRASTIC نسبت به حذف پارامترهای تغذیه خالص و هدایت هیدرلیکی (به ترتیب با شاخص تغییرات میانگین ۲/۱۵ و ۱/۹۳ درصد) و شاخص DRASTIC اصلاح شده نسبت به حذف پارامترهای عمق تا سطح ایستایی، هدایت هیدرولیکی و توپوگرافی (به ترتیب با شاخص تغییرات میانگین ۱/۳۵، ۱/۳۲ و ۱/۳۰ درصد) حساس هستند.

کمتر شده به طوری که بیشتر محدوده آبخوان در فاصله بیش از ۱۰۰۰ متر (رتبه ۱ و ۲) از نوار ساحلی واقع شده است. طبق شکل (۹-ج) در نواحی جنوبی محدوده مورد بررسی اختلاف تراز بیش از ۲۰ متر (رتبه ۱) بوده و در نواحی ساحلی (غرب محدوده مورد مطالعه) این مقدار تا نزدیک به زیر ۲ متر کاهش می‌یابد.

تحلیل نتایج آنالیز حساسیت

آنالیز حساسیت حذف تک نقشه (جدول ۳) نشان می‌دهد که با توجه به تغییرات شاخص پارامترها، تغییر شاخص آسیب پذیری آب زیرزمینی با حذف پارامتر عمق تا سطح

جدول ۴. تحلیل آماری آنالیز حساسیت حذف چند نقشه

شاخص تغییرات (%)					پارامترهای استفاده شده
ضریب تغییرات (%)	انحراف معیار	حداکثر	حداقل	میانگین	
					DRASTIC
۷۸/۲۱	۰/۲۱	۰/۹۲	۰	۰/۲۷	DRSTIC
۶۸/۸۶	۰/۵۴	۲/۴۹	۰	۰/۷۹	DRSTC
۶۱/۴۶	۰/۸۱	۳/۵۷	۰	۱/۳۱	DRTC
۲۸/۳۴	۱/۲۷	۸/۱۲	۱/۳۷	۷/۴۷	DRC
۱۵/۰۴	۱/۸۶	۱۸/۰۷	۷/۷۶	۱۲/۳۷	DR
۳۱/۷۰	۴/۳۹	۲۳/۵۳	۰	۱۳/۸۴	D
					DRASTIC اصلاح شده
۵۵/۳۸	۰/۲۷	۰/۹۲	۰	۰/۴۹	DRASTIC_LuLe
۷۲/۹۵	۰/۶۳	۲/۰۵	۰	۰/۸۶	DRASTIC_Lu
۷۵/۳۲	۰/۶۱	۲/۳۲	۰	۰/۸۱	DRASTC_Lu
۷۳/۲۰	۰/۷۷	۳/۰۸	۰	۱/۰۵	DRSTC_Lu
۴۴/۵۹	۱/۰۳	۵	۰	۲/۳۱	DRTC_Lu
۶۳/۸۲	۰/۹۳	۴/۴۴	۰	۱/۴۶	DTC_Lu
۳۱/۶۲	۱/۲۳	۷/۷۵	۱/۰۳	۳/۸۹	DC_Lu
۱۷/۸۰	۱/۷۷	۱۵/۸۲	۵/۹۸	۹/۹۳	D_Lu
۲۰/۷۸	۲/۲۶	۱۹/۸۰	۵/۳۳	۱۰/۸۹	Lu

ضروری هستند.

جدول (۵) نتایج آماری مربوط به وزن مؤثر و تثوریک هر پارامتر طبق روش آنالیز حساسیت پارامتر واحد برای هر دو روش DRASTIC و DRASTIC اصلاح شده را نشان می‌دهد. طبق جدول در روش DRASTIC پارامترهای عمق تا سطح ایستابی و تغذیه خالص مؤثرترین پارامترها در ارزیابی آسیب‌پذیری هستند، زیرا میانگین وزن مؤثر آنها (به ترتیب ۲۸/۱۲ درصد و ۲۵/۱۸ درصد) بالاتر از وزن تثوریک آنها است. همچنین وزن مؤثر توپوگرافی و محیط آبخوان نسبت به وزن تثوریک آنها بیشتر است، بقیه پارامترها وزن مؤثر کمتری را نسبت به وزن تثوریکشان نشان می‌دهند. اما در روش DRASTIC اصلاح شده پارامترهای کاربری اراضی، عمق تا سطح ایستابی و تغذیه خالص مؤثرترین پارامترها در ارزیابی

جدول (۴) تغییرات شاخص آسیب‌پذیری ناشی از حذف یک یا چند نقشه (چند پارامتر) را در شاخص DRASTIC و DRASTIC اصلاح شده نشان می‌دهد. حذف نقشه‌ها بر اساس اندازه‌گیری حساسیت حذف نقشه اولیه (جدول ۳) بود. لایه‌ها، که تغییر کمتری در شاخص آسیب‌پذیری نهایی را ایجاد می‌کنند، به ترتیب یکی پس از دیگری حذف شدند. کمترین میانگین تغییرات شاخص در روش DRASTIC با حذف پارامتر محیط آبخوان (A) و در روش DRASTIC اصلاح شده با حذف پارامتر فاصله تا ساحل (Di) یافت شد. ناپایداری در روند میانگین تغییرات شاخص در هر دو روش زمانی مشاهده می‌شود که لایه‌های بیشتری حذف می‌شوند. این روند نشان می‌دهد که تقریباً تمامی پارامترها برای تشخیص شاخص آسیب‌پذیری

جدول ۵. تحلیل آماری آنالیز حساسیت تک پارامتری

پارامتر	وزن تئوریک	وزن مؤثر (%)			
		میانگین	حداقل	حداکثر	انحراف معیار
DRASTIC					
D	۵	۲۸/۱۲	۱۳/۸۹	۳۷/۸۲	۴/۴۰
R	۴	۲۵/۱۸	۱۸/۹۰	۳۶/۷۳	۲/۷۳
A	۳	۱۳/۵۹	۸/۷۶	۱۸/۶۰	۱/۹۱
S	۲	۶/۲۲	۲/۶۱	۱۲/۱۶	۱/۸۶
T	۱	۵/۷۰	۰/۶۸	۹/۷۱	۱/۸۵
I	۵	۲۱/۷۴	۱۳/۵۱	۲۵/۶۴	۲/۶۶
C	۳	۱۳/۰۴	۱/۷۹	۸/۱۶	۱/۱۹
DRASTIC اصلاح شده					
D	۵	۱۸/۹۷	۹/۲۶	۲۶/۷۹	۲/۵۶
R	۴	۱۵/۸۴	۱۱/۵۴	۲۳/۸۴	۱/۹۳
A	۳	۸/۴۲	۴/۷۲	۱۲/۹۰	۱/۴۴
S	۲	۴/۲۲	۱/۷۳	۸/۸۷	۰/۹۹
T	۱	۴/۰۷	۰/۴۵	۶/۴۱	۰/۸۳
I	۵	۱۱/۵۴	۷/۶۶	۱۹/۶۱	۱/۹۱
C	۳	۸/۳۳	۱/۸۰	۵/۷۷	۰/۷۴
Lu	۵	۲۰/۸۹	۱۵/۳۳	۲۹/۸۰	۲/۲۶
Di	۴	۷/۳۶	۱/۷۲	۱۷/۷۸	۴/۳۲
Le	۴	۱۱/۱۱	۱/۷۹	۱۷/۲۴	۳/۳۷

مؤثری است که قبلاً به صورت کارشناسی به آن اختصاص داده شده بود. نتایج حاصل از این تحلیل و مقایسه وزن‌های جدید و قدیم برای هر پارامتر در جدول (۶) آورده شده است.

در حالت کلی از وزن‌های جدید ارائه شده برای هر روش برای تهیه نقشه‌های آسیب پذیری استفاده شد و در نهایت دو نقشه DRASTIC و DRASTIC اصلاح شده به عنوان نقشه‌های معرف آسیب پذیری آبخوان مورد بررسی انتخاب شدند و نقشه‌های آسیب پذیری هر کدام از شاخص‌ها که از همپوشانی نقشه پارامترها با استفاده از روابط ۱ و ۲ حاصل شد، در شکل (۱۰) آورده شده‌اند. در نهایت شاخص‌های مورد نظر به صورت توصیفی طبقه‌بندی شدند و نتایج در جدول‌های (۷) و (۸)

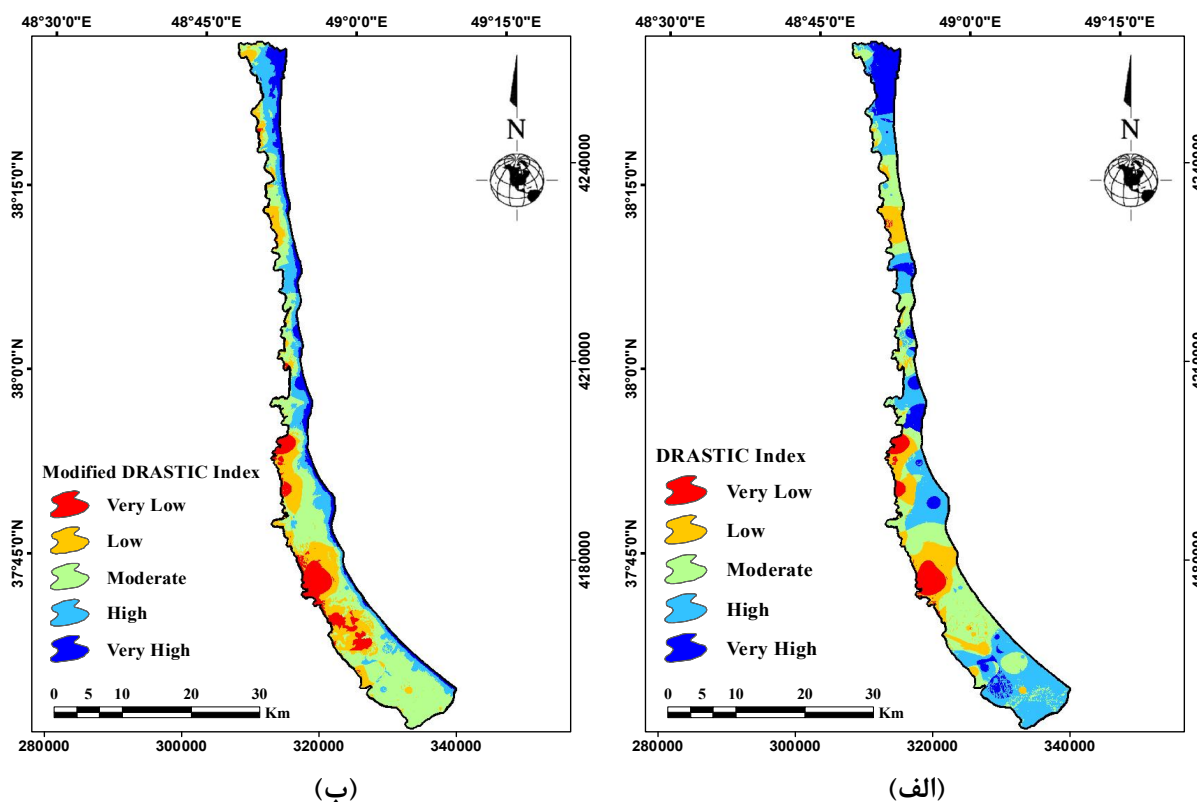
آسیب پذیری (به ترتیب با وزن مؤثر ۲۰/۸۹ درصد، ۱۸/۹۷ درصد و ۱۵/۸۴ درصد) هستند. همچنین توپوگرافی و محیط آبخوان وزن مؤثرتری را نسبت به وزن تئوریک‌شان نشان می‌دهند. بقیه پارامترها دارای وزن مؤثر کمتری نسبت به وزن تئوریک هستند.

تحلیل نقشه‌های آسیب‌پذیری آبخوان دشت تالش

نتایج حاصل از آنالیز حساسیت تک‌پارامتری باعث تولید وزن جدید برای هر یک از پارامترها شد. پارامترهایی که درصد وزن مؤثر بیشتری نسبت به درصد وزن تئوریک دارند در رتبه‌بندی جدید، مقدار رتبه جدیدی که به آنها داده می‌شود بیشتر از وزن

جدول ۶. نتایج تحلیلی درصد وزن تئوری و درصد وزن مؤثر در شاخص DRASTIC و اصلاح شده DRASTIC

										پارامتر										
										D	R	A	S	T	I	C				
										۵	۴	۳	۲	۱	۵	۳	وزن قدیم	DRASTIC		
										۶/۴۷	۵/۷۹	۳/۱۳	۱/۴۳	۱/۳۱	۴/۱۹	۰/۶۸	وزن جدید			
										D	R	A	S	T	I	C	Le	Di	Lu	
										۵	۴	۳	۲	۱	۵	۳	۴	۴	۵	۴
										۶/۸۳	۵/۷۰	۳/۰۳	۱/۵۲	۱/۴۶	۴/۱۶	۰/۶۵	۲/۴۸	۲/۶۵	۷/۵۲	
										وزن جدید	اصلاح شده			DRASTIC						



شکل ۱۰. نقشه آسیب پذیری آبخوان ساحلی تالش: الف) DRASTIC و ب) اصلاح شده DRASTIC

جدول ۷. طبقه بندی و مساحت مناطق آسیب پذیر آبخوان ساحلی تالش به روش DRASTIC

طبقه آسیب پذیری	محدوده	مساحت (km ²)	مساحت (%)
خیلی کم (Very low)	۱۱۴-۱۴۲	۲۶/۹۶	۵/۵۶
کم (Low)	۱۴۲-۱۵۵	۷۸/۵۰	۱۶/۱۹
متوسط (Moderate)	۱۵۵-۱۶۴	۱۵۳/۶۱	۳۱/۶۷
زیاد (High)	۱۶۴-۱۷۳	۱۶۳/۱۵	۳۳/۶۴
خیلی زیاد (Very high)	۱۷۳-۱۹۲	۶۲/۷۸	۱۲/۹۴
جمع		۴۸۴/۹۹	۱۰۰

جدول ۸. طبقه‌بندی و مساحت مناطق آسیب‌پذیر آبخوان ساحلی تالش به روش DRASTIC اصلاح شده

طبقه آسیب‌پذیری	محدوده	مساحت (km ²)	مساحت (%)
خیلی کم (Very low)	۱۸۶-۲۲۲	۴۴/۰۱	۹/۰۷
کم (Low)	۲۲۲-۲۳۸	۹۶/۴۵	۱۹/۸۹
متوسط (Moderate)	۲۳۸-۲۵۳	۲۰۲/۴۴	۴۱/۷۴
زیاد (High)	۲۵۳-۲۷۳	۱۰۰/۶۴	۲۰/۷۵
خیلی زیاد (Very high)	۲۷۳-۳۲۲	۴۱/۴۵	۸/۵۵
جمع		۴۸۴/۹۹	۱۰۰

نزدیک بودن سطح آب زیرزمینی به سطح زمین در بیشتر نواحی محدوده مورد بررسی، تغذیه بیشتر در قسمت مرکزی و شمال منطقه و تا حدی درشت دانه بودن بافت خاک در محیط غیراشباع سبب آسیب‌پذیری متوسط تا زیاد و خیلی زیاد در محدوده دشت تالش شده است. همچنین در روش DRASTIC اصلاح شده عمق کم آب زیرزمینی، تغذیه آبخوان در قسمت‌های شمالی محدوده، کاربری شهری در پارامتر نوع کاربری اراضی، کم بودن فاصله تا ساحل و اختلاف تراز پایین بین سطح آب زیرزمینی با سطح آب دریا بیشترین تأثیرگذاری را در طبقه آسیب‌پذیری زیاد تا خیلی زیاد در آبخوان دشت تالش در روش اصلاح شده دارند؛ به طوری که اکثر نواحی با کاربری شهری، فاصله تا ساحل زیر ۵۰۰ متر و اختلاف تراز کمتر از ۵ متر در محدوده آسیب‌پذیری زیاد تا خیلی زیاد روش اصلاح شده قرار گرفته‌اند.

با توجه به نتایج آزمون تحلیل همبستگی شاخص‌ها با داده‌های اندازه‌گیری شده EC، ضریب همبستگی پیرسون در سطح احتمال ۱٪، بین شاخص DRASTIC و EC برابر با ۰/۴۵ و بین شاخص DRASTIC اصلاح شده و EC برابر با ۰/۵۲ به دست آمد. افزایش جزئی مقدار ضریب همبستگی در روش اصلاح شده را می‌توان به اضافه کردن پارامترهای کاربری اراضی، فاصله تا ساحل و اختلاف تراز سطح آب زیرزمینی با سطح آب دریا ربط داد.

آورده شده است. عدد محاسبه شده نشان‌دهنده میزان حساسیت سفره به آلوده شدن بوده به این ترتیب که اعداد بزرگ‌تر تعیین‌کننده استعداد بیشتر آبخوان برای آلوده شدن است.

نتایج حاصل از روش DRASTIC نشان داد که مقدار شاخص در دشت بین ۱۱۴ تا ۱۹۲ متغیر است و این نقشه به پنج کلاس طبقه‌بندی شد. بدین ترتیب که ۵/۵۶ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه دارای پتانسیل آسیب‌پذیری خیلی کم، ۱۶/۱۹ درصد دارای پتانسیل آسیب‌پذیری کم، ۳۱/۶۷ درصد دارای پتانسیل آسیب‌پذیری متوسط، ۳۳/۶۴ درصد دارای پتانسیل آسیب‌پذیری زیاد و ۱۲/۹۴ درصد دارای پتانسیل آسیب‌پذیری خیلی زیاد است. در صورتی که نتایج روش DRASTIC اصلاح شده نشان داد که مقدار شاخص در دشت بین ۱۸۶ تا ۳۲۲ متغیر است و این نقشه به پنج کلاس طبقه‌بندی شد بدین ترتیب که ۹/۰۷ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه دارای پتانسیل آسیب‌پذیری خیلی کم، ۱۹/۸۹ درصد دارای پتانسیل آسیب‌پذیری کم، ۴۱/۷۴ درصد دارای پتانسیل آسیب‌پذیری متوسط، ۲۰/۷۵ درصد دارای پتانسیل آسیب‌پذیری زیاد و ۸/۵۵ درصد دارای پتانسیل آسیب‌پذیری خیلی زیاد است. در روش DRASTIC بیشترین مساحت آبخوان را طبقه آسیب‌پذیری زیاد با درصد مساحت ۳۳/۶۴ و در روش DRASTIC اصلاح شده طبقه آسیب‌پذیری متوسط با درصد مساحت ۴۱/۷۴ تشکیل می‌دهند. به طور کلی می‌توان گفت که در روش DRASTIC

نتیجه گیری

کاربری‌های شهری در مناطق کاملاً آسیب پذیر قرار گرفته‌اند. بدین ترتیب نقشه آسیب پذیری در شناسایی مناطقی که احتمال دارد نسبت به آلودگی آب‌های زیرزمینی نسبت به یکدیگر آسیب پذیر باشند، کمک می‌کند. در حالت کلی در روش DRASTIC اصلاح شده درصد مساحت طبقات با آسیب پذیری خیلی کم تا متوسط نسبت به روش DRASTIC بیشتر شده است ولی درصد مساحت طبقات با آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیاد آن کاهش یافته است.

نتایج حاصل از آنالیز حساسیت تک‌پارامتری نشان داد که پارامترهای عمق تا سطح ایستابی و تغذیه خالص در روش DRASTIC و پارامترهای کاربری اراضی، عمق تا سطح ایستابی و تغذیه خالص در روش DRASTIC اصلاح شده مؤثرترین پارامترها در ارزیابی آسیب پذیری هستند. همچنین بر اساس آنالیز حساسیت حذف نقشه، پارامترهای عمق تا سطح ایستابی، تغذیه خالص و هدایت هیدرولیکی در شاخص DRASTIC و پارامترهای کاربری اراضی و عمق تا سطح ایستابی در شاخص DRASTIC اصلاح شده جزء حساس‌ترین پارامترها به حساب می‌آیند. همچنین صحت‌سنجی مدل‌ها با استفاده از داده‌های EC برتری DRASTIC اصلاح شده را نسبت به DRASTIC اصلی نشان داد؛ یعنی اینکه روش اصلاح شده توانایی به نسبت بیشتری در جهت نشان دادن شوری آب زیرزمینی دارد.

مدل DRASTIC یک مدل کمی مدیریتی برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان آب زیرزمینی بوده که شامل ۷ پارامتر مؤثر در انتقال آلودگی (عمق تا سطح ایستابی، تغذیه خالص، محیط خاک، توپوگرافی، محیط آبخوان، محیط غیراشباع و هدایت هیدرولیکی) است. در روش DRASTIC اصلاح شده پارامترهای کاربری اراضی، فاصله تا ساحل و اختلاف تراز سطح آب زیرزمینی با سطح دریا نیز دخالت داده شده‌اند. آسیب‌پذیری آبخوان تالش با استفاده از شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC و اصلاح آن با استفاده از پارامترهای ویژه مناطق ساحلی، مورد ارزیابی قرار گرفت. شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC بین ۱۱۴ تا ۱۹۲ متغیر است و این مناطق به ترتیب به پنج کلاس ۱۴۲-۱۱۴، ۱۵۵-۱۴۲، ۱۶۴-۱۵۵، ۱۷۳-۱۶۴ و ۱۹۲-۱۷۳ مربوط به مناطق دارای آسیب‌پذیری خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی می‌شوند. همچنین شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC اصلاح شده نیز بین ۱۸۶ تا ۳۲۲ متغیر بوده و به پنج کلاس ۲۲۲-۱۸۶، ۲۳۸-۲۲۲، ۲۵۳-۲۳۸، ۲۷۳-۲۵۳ و ۳۲۲-۲۷۳ مربوط به مناطق با آسیب‌پذیری خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی می‌شود. نقشه پتانسیل آسیب‌پذیری DRASTIC اصلاح شده (شکل ۹-ب) نشان می‌دهد که نوار ساحلی محدوده مورد بررسی کاملاً آسیب‌پذیر است. نقشه آسیب‌پذیری نهایی نشان می‌دهد که اکثر

منابع مورد استفاده

1. Afonso, M. J., A. Pires, I. Helder and J. M. Chamine Marques. 2008. Aquifer Vulnerability Assessment of Urban Areas using a GIS-Based Cartography: Paranhos Groundwater Pilot Site, Porto, NW Portugal.
2. Ali Khan, M. M., R. Umar and H. Lateh. 2010. Assessment of aquifer vulnerability in parts of Indo Gangetic plain, India. *International Journal of the Physical Sciences* 5(11): 1711-1720.
3. Aller, L., T. Bennet, J. H. Lehr, R. J. Petty and G. Hackett. 1987. DRASTIC: a Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeological Settings. EPA/600/2-87/035, US EPA, Ada, OK, USA.
4. Antonakos, A. K. and N. J. Lambrakis. 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.
5. Barber, C., L. E. Bates, R. Barron and H. Allison. 1993. Assessment of the relative vulnerability of groundwater to pollution: A review and background paper for the conference workshop on vulnerability assessment. *Journal of Australian Geology and Geophysics* 14(2-3): 147-154.

6. Boughriba, M., A. Barkaoui, Y. Zarhloule, Z. Lahmer, B. El Houadi and M. Verdoya. 2010. Groundwater vulnerability and risk mapping of the Angad transboundary aquifer using DRASTIC index method in GIS environment. *Arabian Journal of Geosciences* 3: 207-220.
7. Chachadi, A. G., 2005. Seawater intrusion mapping using modified GALDIT indicator model-case study in Goa. *Jalvigyan Sameeksha* 20: 29-45.
8. Kardan Moghaddam, H., F. Jafari and S. Javadi. 2015. Evaluation vulnerability of coastal aquifer via GALDIT model and comparison with DRASTIC index using quality parameters. *Hydrological Sciences Journal* 62(1): 137-146.
9. Kazakis, N. and K. S. Voudouris. 2015. Groundwater vulnerability and pollution risk assessment of porous aquifers to nitrate: modifying the drastic method using quantitative parameters. *Journal of Hydrology* 525: 13-25.
10. Khoshdooz, N., H. Babazadeh, S. H. Tabatabaei and M. Naderi. 2013. Modifying DRASTIC model to determine groundwater vulnerability in a coastal region. In: *Water and Soil Resources Conservation* 3(1): 19-31.
11. Lodwick, W. A., W. Monson and L. Svoboda. 1990. Attribute error and sensitivity analysis of map operations in geographical information systems: suitability analysis. *International Journal of Geographic Information System* 4(4):413-428.
12. Mahdavi, A. and H. Zare. 2016. Determination of aquifer vulnerability potential based on DRASTIC and FUZZY logic models (case study: Hamedan- Bahar Plain). *Water and Soil Science* 26(1): 1-17.
13. Margat, J. 1968. Groundwater Vulnerability to Contamination, Bases de la Cartographie, Doc. 68 SGC 198 HYD, BRGM, Orleans.
14. Michalopoulos, D. and E. Dimitriou. 2018. Assessment of pollution risk mapping methods in an Eastern Mediterranean catchment. *Journal of Ecological Engineering* 19(1): 55-68.
15. Momejian, N., M. Abou Najm, I. Alameddine and M. El-Fadel. 2018. Can groundwater vulnerability models assess seawater intrusion? *Environmental Impact Assessment Review* 75: 13-26.
16. Mondal, N. C., S. Adike, V. S. Singh, S. Ahmed and K. V. Jayakumar. 2016. Determining shallow aquifer vulnerability by the DRASTIC model and hydrochemistry in granitic terrain, southern India. *Journal of Earth System Science* 126: 89.
17. Mousavi, F., M. Yaghoubi and M. Chitsazan. 2016. Land use management by assessing aquifer vulnerability in Khovayes plain using the DRASTIC and SINTACS models. *Journal of Water and Wastewater* 3: 75-79.
18. Napolitano, P. and A. G. Fabbri. 1996. Single-parameter sensitivity analysis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS. Proceedings of the Vienna conference on HydroGIS 96: Application of geographic information systems in hydrology and water resources management, IAHS Pub 235: 559-566.
19. Neshat A, Pradhan B. 2017. Evaluation of groundwater vulnerability to pollution using DRASTIC framework and GIS. *Arabian Journal of Geosciences* 10(22): 501.
20. Oroji, B. and E. Solgi. 2016. Vulnerability assessment of Asadabad (Hamadan) plain groundwater by GIS. *Environmental Sciences* 14(1): 91-104.
21. Saidi, S., S. Bouri and H. B. Dhia. 2011. Sensitivity analysis in groundwater vulnerability assessment based on GIS in the Mahdia-Ksour Essaf aquifer, Tunisia: a validation study. *Hydrological Sciences Journal* 56(2): 288-304.
22. Xiaoyu, W., L. Bin and M. Chuanming. 2018. Assessment of groundwater vulnerability by applying the modified DRASTIC model in Beihai City, China. *Environmental Science and Pollution Research* 21: 1-5.

Qualitative Assessment of the Coastal Plain of Talesh using the Modified DRASTIC Vulnerability Method

H. Mahmoudpour¹, S. Janatrostami^{2*}, A. Ashrafzadeh³

(Received: April 29-2019; Accepted: January 1-2020)

Abstract

Given the fact that the DRASTIC index is ineffective in addressing the saltwater uprising issue in coastal plains, in the present study, three factors including land use, distance to shoreline, and differences between groundwater and sea level were added to the DRASTIC index. The proposed modification to DRASTIC was validated using the measured electrical conductivity (EC) data gathered from groundwater monitoring wells throughout the Talesh Plain. The results showed that the coefficient of correlation between the map of EC over the region and the modified DRASTIC was 0.52, while for the original DRASTIC, the coefficient was 0.45, thereby implying a stronger relationship between EC and the modified DRASTIC in the Talesh Plain. Sensitivity analysis also showed that DRASTIC and the modified DRASTIC were the most sensitive to, respectively, depth to groundwater (D) and land use (Lu). According to the single-parameter sensitivity analysis results, depth to water table and net recharge were the most effective parameters in DRASTIC, whereas the modified DRASTIC was the most sensitive to land use and depth to groundwater. It could be concluded that modifying the DRASTIC index would result in decreasing the area of very high and high vulnerable classes, and the area classified as low and moderate vulnerable could be increased.

Keywords: Sensitivity analysis, Groundwater, Land use, Validation.

1. Department of Water Engineering, College of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran.

*: Corresponding author, Email: janatrostami@guilan.ac.ir