

## ارزیابی آسیب پذیری آبخوان ساحلی قره‌سو-گرگان رود با استفاده از روش GALDIT و SINTACS و بهینه‌سازی آن با ابزار SPSA و GIS

مژگان بردبار<sup>۱</sup>، امین‌رضا نشاط<sup>۲\*</sup>، سامان جوادی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست،

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات تهران

۲. استادیار گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی،

واحد علوم تحقیقات تهران

۳. استادیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۴/۳۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۱۰/۱۴)

### چکیده

آب‌های زیرزمینی مهم‌ترین منبع تأمین آب در بسیاری از نواحی ساحلی جهان هستند. با توجه به برداشت بی‌رویه از آبخوان‌ها و هجوم آب شور، باید در آبخوان‌های ساحلی مدیریت صحیح اعمال شود. در این مطالعه، آسیب‌پذیری آبخوان ساحلی قره‌سو-گرگان رود برای شناسایی نواحی آسیب‌پذیر با استفاده از روش SINTACS و GALDIT بررسی شده است. نقشه‌های آسیب‌پذیری این دو مدل در محیط نرم‌افزار GIS تولید، طبقه‌بندی و تلفیق شدند. به‌منظور دستیابی به مدل بهینه، ضریب همبستگی بین شاخص‌های آسیب‌پذیری و غلظت TDS محاسبه شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد مدل GALDIT ضریب همبستگی بیشتری نسبت به مدل SINTACS برای تهیه نقشه آسیب‌پذیری در منطقه مطالعه شده دارد. علاوه بر این، برای اصلاح مدل GALDIT از روش تحلیل حساسیت تک‌پارامتری استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده از این تحلیل نشان داد مؤثرترین پارامترها در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان منطقه مد نظر، هدایت هیدرولیکی و ارتفاع سطح آب زیرزمینی بالاتر از سطح دریا هستند.

**کلیدواژه‌گان:** آبخوان ساحلی، آسیب‌پذیری، GIS، GALDIT، SINTACS.

## مقدمه

آب‌های زیرزمینی از مهم‌ترین منابع آب آشامیدنی و کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند که به‌طور فزاینده توسط آلاینده‌ها تهدید شده‌اند [۱]. علاوه بر این، آب‌های زیرزمینی در جایی که آب سطحی مناسب نیست، یا ساختار شبکه آب گسترش نیافته است مانند نواحی روستایی، منبعی قابل اعتمادند. بنابراین، برای استفاده از این منابع لازم است از نظر کمی و کیفی، با حفظ کیفیت و به‌طور مؤثری طی دوره‌های بلندمدت مدیریت شوند [۲]. پتانسیل آلودگی آب‌های زیرزمینی بر اثر فعالیت‌های انسانی معمولاً در سطح یا نزدیک سطح زمین است که باید بر اساس سیاست‌های پیشگیرانه اجرایی، به مدیریت این منابع مهم آبی توجه شود [۳]. تأثیرات آلودگی آب زیرزمینی درازمدت و جبران‌ناپذیر است [۴]. بسیاری از آبخوان‌های ساحلی نسبت به تجاوز آب شور آسیب‌پذیرند. هجوم آب شور می‌تواند موجب تخریب کیفیت آب و کاهش آب شیرین در دسترس شود [۵]. مفهوم آسیب‌پذیری برای نخستین‌بار در فرانسه در اواخر ۱۹۶۰ میلادی برای آگاهی‌بخشی درباره آب زیرزمینی به‌کار گرفته شد [۶]. کمیته انجمن ملی تحقیقات آمریکا، آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی را به صورت «تمایل یا احتمال رسیدن آلاینده‌ها به یک مکان مشخص در سیستم آب زیرزمینی بعد از به‌وجودآمدن آنها در برخی مکان‌ها، در بالاترین سطح آبخوان» تعریف می‌کند [۷]. آسیب‌پذیری شامل دو نوع ذاتی و ویژه می‌شود. آسیب‌پذیری ذاتی به خصوصیات آبخوان بستگی دارد، اما به آلودگی ناشی از فعالیت‌های انسانی ربطی ندارد، در صورتی که آسیب‌پذیری ویژه ناشی از فعالیت‌های انسانی می‌شود. از مهم‌ترین منابع آلودگی آب زیرزمینی بر اثر فعالیت‌های انسانی، افزایش شوری به دلیل استخراج بی‌رویه آب زیرزمینی و برداشت غیرمجاز این منابع است. اساس ارزیابی آسیب‌پذیری، تعیین پتانسیل آبخوان به منابع آلودگی است که بر کیفیت آب‌های زیرزمینی تأثیر می‌گذارد [۸]. ارزیابی درجه آسیب‌پذیری آب زیرزمینی اهمیت زیادی دارد، به طوری که ابزار بسیار مفیدی برای مدیریت قوی به منظور حفاظت از حوضه دشت آبی است [۹]. روش‌های مختلفی برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی با دقت زیاد معرفی شده است [۱۰]. روش‌های ارزیابی به سه گروه روش‌های شبیه‌سازی، آماری و شاخص و هم‌پوشانی تقسیم می‌شوند [۳]. روش‌های شاخص و هم‌پوشانی بر مبنای ترکیبی از

اطلاعات مربوط به پارامترهای مؤثر بر مهاجرت آلاینده‌ها در آبخوان است [۱۱]. روش‌های شاخص و هم‌پوشانی بر ترکیب نقشه‌های مختلف منطقه با اختصاص شاخص عددی تأکید دارند [۳]. این روش‌ها به دلیل استفاده آسان، نیاز به داده کمتر و نیز توصیف صریح آسیب‌پذیری به‌طور گسترده استفاده می‌شوند [۱۲]. روش‌های شاخص و هم‌پوشانی شامل روش‌های SINTACS، GOD، GALDIT، DRASTIC و SINTACS می‌شود. مدل SINTACS برای ارزیابی در نواحی با مقیاس بزرگ و متوسط کاربرد دارد. این مدل مانند مدل DRASTIC از هفت پارامتر هیدروژئولوژیکی تشکیل شده است، گرچه از نظر وزنی و رتبه‌بندی انعطاف‌پذیرتر است [۲]. علاوه بر این، مدل GALDIT مدلی توسعه‌یافته برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی به نفوذ آب شور در نواحی ساحلی است. در سال‌های اخیر چندین مطالعه برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان ساحلی انجام شده است. در پژوهشی Bouderbala و همکارانش آسیب‌پذیری آب زیرزمینی و کیفیت سفره‌های آب ساحلی در شمال الجزایر را با استفاده از روش GALDIT و AVI ارزیابی کردند. نتایج GALDIT بیان‌کننده آسیب‌پذیری آبخوان تا دو کیلومتری داخلی دشت بوده است. همچنین، نتایج روش AVI نشان داد بیش از ۸۰ درصد آبخوان آسیب‌پذیری متوسط-زیاد دارد [۱۳].

ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در آبخوان ساحلی در تونس بر مبنای روش GALDIT توسط Gontara و همکارانش انجام شد. نتایج تحقیق آنها نشان داد بخش ساحلی در معرض خطر شدید نفوذ آب شور است. همچنین، نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل حساسیت بیان می‌کند که هدایت هیدرولیکی آبخوان و ضخامت آبخوان عوامل تعیین‌کننده در مدل آسیب‌پذیری اصلاح‌شده هستند [۱۴]. Gorgij و همکارانش آسیب‌پذیری نفوذ آب شور به روش GALDIT و GAPDIT در منطقه آبخوان دشت آذرشهر را ارزیابی کردند. نتایج پژوهش آنها بیان‌کننده آسیب‌پذیری زیاد در شمال غرب و غرب ناحیه مطالعه‌شده بود و نیز برای اصلاح مدل از روش AHP استفاده کردند [۱۵]. Allouche و همکارانش آسیب‌پذیری آب زیرزمینی به روش GALDIT و DRASTIC در آبخوان اسفاکس را ارزیابی کردند. نتایج نقشه DRASTIC مقادیر ۶۴-۱۷۹ را نشان داد و قسمت شمالی و مرکزی آبخوان آسیب‌پذیری کم دارند، در صورتی که نتایج مدل GALDIT مقادیر ۲۳-۸۴ را نشان داد و قسمت‌های

اقلیمی از نظر نفوذپذیری وضعیت نسبتاً مناسبی دارند. سازندهای این منطقه از نوع لار، مزدوران، خوش‌یلاق، چمن بید، شمشک و الیکاست. آب و هوای منطقه مطالعه‌شده از نوع خشک سرد تا نیمه‌خشک سرد است. دمای هوا در این منطقه از غرب به شرق افزایش و از شمال به جنوب روند کاهشی دارد. ارتفاع بارندگی در ارتفاعات محدوده مطالعاتی گرگان و قره‌سو به ترتیب ۵۷۴/۸ و ۲۴۵/۲ میلی‌متر است. میزان تبخیر در این ناحیه ۱۹۰۰ میلی‌متر در سال است. همچنین، بیشترین و کمترین دمای مطلق منطقه به ترتیب ۴۹ و ۲۸- است. متوسط رطوبت نسبی ماهانه از ۴۷ تا ۸۹ درصد در نوسان است.

#### مدل SINTACS

مدل SINTACS توسط Civita برای ارزیابی آسیب‌پذیری به آلودگی نسبی آب‌های زیرزمینی با استفاده از هفت پارامتر هیدروژئولوژیکی به کار گرفته شد [۱۹]. این مدل از مدل DRASTIC آمریکایی تکامل یافته و با شرایط مدیترانه‌ای سازگار است [۲۰]. در مدل SINTACS ابتدا هر پارامتر به صورت منفرد رتبه‌بندی و سپس بر اساس اهمیت، وزن‌دهی می‌شود. این مدل از هفت پارامتر عمق سطح ایستابی<sup>۱</sup>، نفوذ مؤثر<sup>۲</sup>، شرایط اشباع‌نشده<sup>۳</sup>، محیط خاک<sup>۴</sup>، خصوصیات هیدروژئولوژیکی آبخوان<sup>۵</sup>، هدایت هیدرولیکی<sup>۶</sup> و شیب توپوگرافی<sup>۷</sup> تشکیل شده است. به هر فاکتور براساس اهمیت آن در آسیب‌پذیری، نمره‌ای بین یک تا ۱۰ نسبت داده می‌شود. سپس، نمرات به واسطه وزن‌ها اصلاح می‌شوند (جدول ۱). شاخص آسیب‌پذیری ذاتی (I) از طریق رابطه ۱ به دست می‌آید. در این رابطه  $P_i$  رتبه هر هفت پارامتر و  $W_i$  وزن نسبی پارامترهاست [۲۱].

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

جنوبی آبخوان آسیب‌پذیری بیشتری دارند [۱۶]. Kura و همکارانش در پژوهشی از روش‌های GALDIT و DRASTIC برای ارزیابی آسیب‌پذیری در جزیره کاپاس استفاده کردند. در این پژوهش برای بررسی قابلیت اطمینان مدل در پیش‌بینی از روش رگرسیون پیرسون و برای اصلاح مدل از تحلیل حساسیت استفاده کردند [۱۷]. ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان از روش AVI و GALDIT در آبخوان تونس توسط Saidi و همکارانش انجام شد. نتایج تحقیق آنها نشان داد با توجه به شاخص AVI ۷۰ درصد از کل منطقه آسیب‌پذیری متوسط تا بسیار زیاد دارد. روش GALDIT و تجزیه و تحلیل‌های شیمیایی بیان‌کننده نفوذ آب شور در بخش ساحلی آبخوان است [۱۸].

مطالعه حاضر به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی به نفوذ آب شور و شناسایی نواحی آسیب‌پذیر در آبخوان ساحلی قره‌سو-گرگان‌رود، در استان گلستان با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، روش‌های GALDIT، SINTACS و داده‌های هیدروژئولوژیکی انجام شده است. سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) ابزاری کارآمد و مؤثر برای دستیابی به این اهداف است. هدف دیگر آن، تعیین بهترین مدل ارزیابی آسیب‌پذیری در منطقه مطالعه‌شده با استفاده از مقایسه نتایج نقشه‌ها است. علاوه بر این، روش تحلیل حساسیت تک‌پارامتری برای بهینه‌سازی مدل GALDIT به کار رفته است.

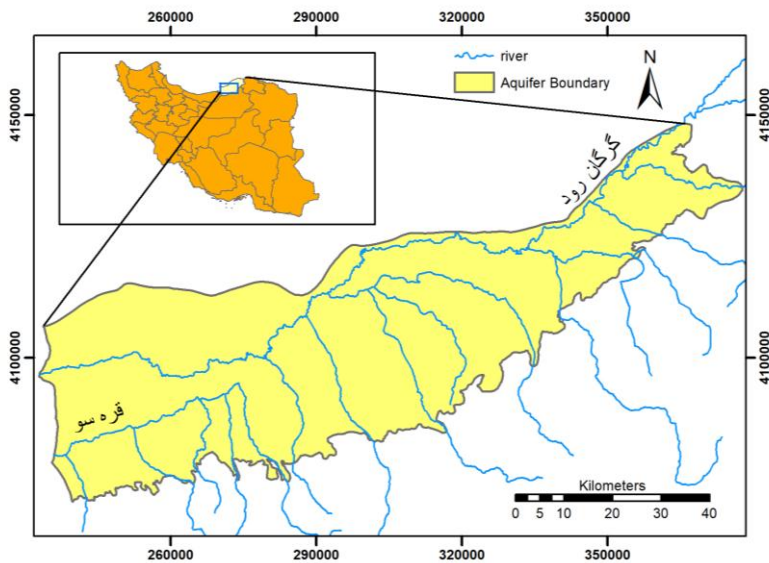
#### مواد و روش‌ها

##### ناحیه مطالعه‌شده

حوضه آبریز رودخانه‌های قره‌سو و گرگان‌رود در استان گلستان در بخش شرقی رشته‌کوه البرز بین ۵۴°-۰۰' تا ۲۹°-۵۶' طول شرقی و ۳۶°-۳۶' تا ۳۷°-۴۷' عرض شمالی واقع شده است. وسعت این حوضه ۴۳۷۹ کیلومتر مربع است. این حوضه از شمال و شرق با حوضه آبریز اترک و از جنوب با حوضه آبریز کویر مرکزی و از جنوب غربی با حوضه آبریز هراز-نکا هم‌مرز است. شکل ۱ موقعیت این آبخوان را در سطح کشور نشان می‌دهد. حوضه آبریز رودخانه‌های قره‌سو و گرگان‌رود در دو زون زمین‌شناسی گرگان-رشت و هزارمسجد-کپه‌داغ واقع شده است.

سازندهای سخت این حوضه آبریز تحت تأثیر نیروهای تکتونیکی، فرسایشی، تخریب و شرایط خاص چینه‌شناسی و

1. Water Table Depth (S)
2. Effective Infiltration (I)
3. Unsaturated Zone (N)
4. Soil Media (T)
5. Aquifer Hydrogeologic Characteristics (A)
6. Hydraulic Conductivity (C)
7. Topographic Slope (S)



شکل ۱. منطقه مطالعه شده

جدول ۱. پارامترهای مدل SINTACS [۲۱]

عمق سطح آب (S)													
محدوده	۱-۰	۴-۱	۶-۴	۸-۶	۱۰-۸	۲۰-۱۰	>۲۰	۴	۵	۶	۷		
رتبه	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴						
تغذیه مؤثر													
محدوده	۳۳۵-۲۵۰	۲۵۰-۱۷۵	۱۷۵-۱۵۰	۱۵۰-۱۲۵	۱۲۵-۱۰۰	۱۰۰-۷۵	۷۵-۶۰	۶۰-۵۰	<۵۰				
رتبه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱				
محیط غیر اشباع (N) / محیط آبخوان (A)													
محدوده	آبرفت درشت	سنگ آهک کارستی	سنگ آهک شکسته	دولومیت شکسته	آبرفت متوسط ریز	مخلوط شن	کگلومرا	سنگ تزییدیاتی	سنگ آهک آتش فشانی	مارل، رس	رس و سیلت	آذر آوری	دگرگونی شکافدار
رتبه (N)	۹-۶	۱۰-۸	۸-۴	۵-۲	۶-۳	۷-۴	۸-۵	۵-۲	۱۰-۵	۳-۱	۲-۱	۵-۲	۶-۲
رتبه (A)	۹-۸	۱۰-۹	۹-۶	۷-۴	۸-۶	۹-۷	۹-۴	۸-۵	۱۰-۸	۳-۱	۳-۱	۸-۴	۸-۲
محیط خاک (T)													
محدوده	رس	رس سیلتی	رس لومی	رس سیلت لومی	سیلت لومی	لوم	شن رس لومی	ماسه لومی	رس شن	زغال سنگ	شن	ماسه تمیز	
رتبه	۱/۵-۱	۲-۱/۵	۳-۲	۴-۳	۴-۳/۵	۵-۴	۵-۴/۵	۶-۵/۵	۷-۶/۳	۸-۷/۵	۸/۵-۸	۹/۵-۹	
هدایت هیدرولیکی (C)													
محدوده	۸۶۴-۴۳۲	۸۶۴-۴۳۲	۸۶۴-۴۳۲	۸۶۴-۴۳۲	۸۶۴-۴۳۲	۴۳۲-۱۸۶	۰/۸۶-۰/۴۳	۰/۴۳-۰/۱	<۰/۱				
رتبه	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۲	۱				
شیب (S)													
محدوده	۲-۰	۴-۳	۶-۵	۹-۷	۱۲-۱۰	۱۵-۱۳	۱۸-۱۶	۲۱-۱۹	۲۵-۲۲	>۲۶			
رتبه	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱			

## مدل GALDIT

مدل GALDIT شامل شش عامل هیدروژئولوژیکی، ماهیت آبخوان (G)، هدایت هیدرولیکی آبخوان (A)، ارتفاع سطح آب زیرزمینی بالاتر از سطح دریا (L)، فاصله از ساحل (D)، تأثیر بزرگی و گستردگی آب شور نفوذ کرده (I) و ضخامت آبخوان (T) است. این مدل برای ارزیابی نفوذ آب شور در نواحی ساحلی و مدیریت آن به کار می‌رود. با تجاوز آب شور در آبخوان‌های ساحلی حجم آب شیرین کم شده و غلظت یون‌ها در آب بیشتر می‌شود. در این مدل وزن هر عامل با توجه به اهمیت آن در نفوذ آب شور مشخص می‌شود. به مهم‌ترین

عامل وزن چهار و کم‌اهمیت‌ترین عامل، وزن یک نسبت داده می‌شود. رتبه‌بندی بر اساس چهار محدوده ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ است (جدول ۲). بیشترین رتبه نشان‌دهنده بیشترین آسیب‌پذیری است [۲۲]. شاخص نهایی مدل GALDIT از مجموع همه پارامترهای مدل به دست می‌آید. این شاخص نشان‌دهنده درجه آسیب‌پذیری آب زیرزمینی در یک منطقه است. شاخص GALDIT از رابطه ۲ به دست‌آید [۲۳].

$$\text{GALDIT index} = (1 * G) + (3 * A) + (4 * L) + (4 * D) + (1 * I) + (2 * T) \quad (2)$$

جدول ۲. رتبه‌بندی و وزن‌دهی پارامترهای مدل GALDIT [۲۳]

پارامتر	وزن	۲/۵	۵	۷/۵	۱۰
G	۱	آبخوان محدود	آبخوان نشستی	آبخوان آزاد	آبخوان تحت فشار
A	۳	<۵	۱۰-۵	۴۰-۱۰	>۴۰
L	۴	>۲	۲-۱/۵	۱/۵-۱	<۱
D	۴	>۱۰۰۰	۱۰۰۰-۷۵۰	۷۵۰-۵۰۰	<۵۰۰
I	۱	<۱	۱/۵-۱	۲-۱/۵	>۲
T	۲	<۵	۷/۵-۵	۱۰-۷/۵	>۱۰

تحلیل حساسیت حذف نقشه<sup>۲</sup> و تحلیل حساسیت تک‌پارامتری (SPSA) تقسیم می‌شود. تحلیل حساسیت تک‌پارامتری اطلاعات مفیدی درباره تأثیر مقادیر وزنی اختصاص داده‌شده به هر پارامتر را ارائه می‌دهد و به تحلیل‌گران کمک می‌کند تا اهمیت هر پارامتر را کارشناسی کنند [۲۶]. در این مطالعه تحلیل حساسیت تک‌پارامتری به منظور تحلیل حساسیت پارامترهای مدل GALDIT به کار رفته است. میزان حساسیت تک‌پارامتری برای ارزیابی تأثیر هر یک از پارامترهای مدل GALDIT روی شاخص آسیب‌پذیری استفاده می‌شود. در این روش تحلیل، وزن مؤثر یا واقعی هر پارامتر ورودی در هر پلی‌گون با وزن تئوریک اختصاص‌یافته از طریق مدل تحلیلی مقایسه می‌شود [۲۶]. وزن مؤثر هر پلی‌گون با استفاده از رابطه ۳ به دست می‌آید.

$$W = (P_r P_w / V) * 100 \quad (3)$$

در این رابطه، w وزن مؤثر هر پارامتر، P<sub>r</sub> و P<sub>w</sub> به ترتیب مقدار رتبه و وزن هر پارامتر و V شاخص کلی آسیب‌پذیری است.

## تأثیر سیستم اطلاعات جغرافیایی در ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی

سیستم اطلاعات جغرافیایی کارکرد مؤثری در ارزیابی و شناسایی مناطق آسیب‌پذیر در نواحی ساحلی ایفا می‌کند. این سیستم‌ها سامانه‌ای قدرتمند برای ذخیره‌سازی، تحلیل و نمایش داده‌های مکانی محسوب می‌شوند و این داده‌ها به منظور تصمیم‌گیری در مناطق مختلف، در رشته‌های مهندسی و زیست‌محیطی کاربرد دارند [۲۴]. با ترکیب لایه‌های متفاوت داده در این نرم‌افزار اطلاعات زیادی به دست می‌آید و این سیستم امکان تجزیه و تحلیل داده‌های مختلف را میسر می‌سازد. در این پژوهش از ابزارهای آنالیز زمین‌آماري و آنالیز مکانی در نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی برای تولید نقشه‌ها به روش GALDIT و SINTACS استفاده شده است.

روش تحلیل حساسیت<sup>۱</sup>

تحلیل حساسیت یکی از مؤلفه‌های اصلی پروژه‌های مدل‌سازی محسوب می‌شود، زیرا امکان ارزیابی صحت نتیجه را فراهم می‌کند [۲۵]. تحلیل حساسیت به دو نوع

## نتایج و بحث

## تهیه لایه‌های مدل SINTACS

عمق سطح ایستابی: فاصله‌ای که آلاینده طی می‌کند تا به آب زیرزمینی برسد را نشان می‌دهد [۳]. عمق سطح آب ضخامت موادی که از طریق آب نفوذ یافته که باید قبل از رسیدن به آبخوان یا محیط اشباع طی کند را تعیین می‌کند [۱۶]. آسیب‌پذیری آب زیرزمینی با توجه به رتبه‌بندی SINTACS برای این پارامتر نشان می‌دهد با افزایش عمق، آسیب‌پذیری کاهش می‌یابد [۲۷]. برای تهیه نقشه عمق سطح ایستابی از آمار و اطلاعات چاه‌های مشاهده‌ای موجود در دشت استفاده شده است. لایه عمق سطح آب ناحیه مطالعه شده از درون‌یابی داده‌های چاه‌ها و درون‌یابی Kriging از ابزار Geostatistical Analyst در محیط GIS تهیه شد (شکل ۲).

نفوذ مؤثر: حرکت آب از سطح زمین از طریق خاک است به طوری که نفوذ مشخص است [۲۸]. نقشه نفوذ مؤثر تغذیه از تغذیه خالص‌های مربوط به بارندگی، ارتفاعات، رواناب و پساب، که با توجه به رابطه بیلان به دست آمده است، تهیه شد.

محیط غیراشباع: حد فاصل سطح ایستابی تا زیر سطح خاک است. نقشه محیط غیراشباع از موقعیت چاه‌های حفاری، نوع و جنس منطقه غیراشباع و جدول پارامترهای SINTACS به دست آمد. همچنین، نقشه محیط غیراشباع بر اساس جنس و ضخامت بخش غیراشباع هر چاه و اثر آن بر انتقال آلاینده رتبه‌بندی می‌شود. در نهایت، نقشه محیط غیراشباع به صورت رستری با اندازه پیکسل ۱۰۰ متر تهیه شد. جنس منطقه غیراشباع در ناحیه مطالعه شده sand/gravel، sand/gravel/silt، Silt/clay است.

محیط خاک: خصوصیات بافت خاک به مقدار تغذیه بستگی دارد که می‌تواند به زمین نفوذ کند و پتانسیل آلاینده‌ها که به صورت عمودی به طرف محیط غیراشباع حرکت می‌کنند را نشان می‌دهد. وجود بافت خوب مانند سیلت و رس می‌تواند موجب کاهش نفوذپذیری خاک و محدود کردن مهاجرت آلاینده شود [۲۰]. محیط خاک بر اساس خصوصیات بافت خاک طبقه‌بندی می‌شود که بافت خاک بر نفوذ و انتقال آلاینده‌ها کارکرد مؤثری دارد. نوع خاک

منطقه مطالعه شده Silty loam، sand/gravel، Clay loam و Sandy loam است.

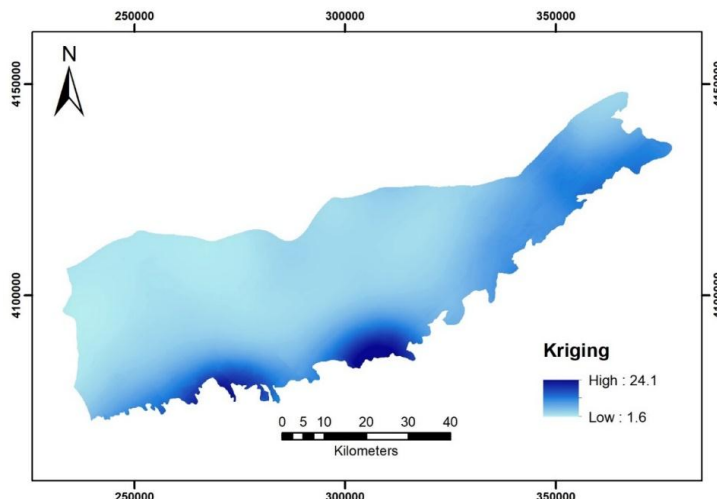
خصوصیات هیدروژئولوژیکی آبخوان: با توجه به مدل‌های ارزیابی آسیب‌پذیری، خصوصیات آبخوان فرایند مکانی زیر سطح پیرومتری را زمانی که آلاینده با آب زیرزمینی مخلوط شده را توصیف می‌کند. در نتیجه، غلظت آلاینده اصلی رقیق می‌شود به طوری که آلاینده از طریق خاک و لایه غیراشباع حرکت می‌کند [۲]. نوع محیط آبخوان و نوع سنگ‌های آن در انتقال آلاینده کارکرد مؤثری دارد. نقشه محیط آبخوان از موقعیت لاگ‌های حفاری، نوع و جنس آبخوان تهیه شد. سنگ‌های منطقه به سه نوع sand and gravel، massive sandstone، bedded sandstone تقسیم می‌شود.

هدایت هیدرولیکی: توانایی آبخوان برای انتقال آب با توجه به گرادیان هیدرولیکی است [۲۹]. هدایت هیدرولیکی زیاد نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بیشتر آبخوان است. مقدار هدایت هیدرولیکی از تقسیم ضریب قابلیت انتقال آب بر ضخامت اشباع آبخوان به دست می‌آید. نقشه هدایت هیدرولیکی منطقه با اندازه پیکسل ۱۰۰ متر تولید شد.

شیب: در ارزیابی آسیب‌پذیری، شیب توپوگرافی ناحیه در جایی که آلاینده از سطح به وسیله رواناب یا ماندن روی سطح تا نفوذ کند انتقال خواهد یافت، شناسایی می‌شود [۲۹]. شیب تأثیر زیادی بر حرکت آلاینده دارد. هر چه شیب کمتر باشد، خطر آسیب‌پذیری آبخوان بیشتر می‌شود. نقشه درصد شیب منطقه از داده DEM موجود تولید شده و سپس با استفاده از جدول SINTACS رتبه‌بندی و ارزش‌گذاری شد (شکل ۴).

## نقشه نهایی مدل SINTACS

نقشه نهایی مدل SINTACS از هم‌پوشانی نقشه‌های هفت پارامتر این مدل در محیط GIS به دست آمد. همه نقشه‌ها در محیط GIS به فرمت رستر و با اندازه پیکسل ۱۰۰ متر تولید شد. نقشه آسیب‌پذیری SINTACS منطقه مطالعه شده به چهار کلاس آسیب‌پذیری تقسیم می‌شود که شامل آسیب‌پذیری کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد است که به ترتیب ۷، ۲۹، ۴۹ و ۱۵ درصد از ناحیه مد نظر را شامل می‌شود (شکل ۷). نقشه نهایی نشان داد قسمت‌های مرکزی آسیب‌پذیری بیشتری به تجاوز آب شور دارند (شکل ۶).



شکل ۲. نقشه درونیابی کریجینگ برای پارامتر عمق سطح ایستابی

وجود دارد (روابط ۴-۷). تجاوز آب شور به آبخوان ساحلی در شکل ۳ نشان داده شده است [۳۰]. در این روابط،  $K$  هدایت هیدرولیکی ( $m/day$ )،  $B$  ضخامت منطقه اشباع ( $m$ )،  $\rho$  چگالی آب ( $kg/m^3$ )،  $w$  تغذیه طبیعی ( $mm$ ) است. در آبخوان تحت فشار:

$$L = \frac{K \cdot B^2}{2q\delta} \quad L > B \quad (4)$$

$$\delta = \frac{\rho_{fresh}}{\rho_{sea} - \rho_{fresh}} \approx 40 \quad (5)$$

در آبخوان آزاد:

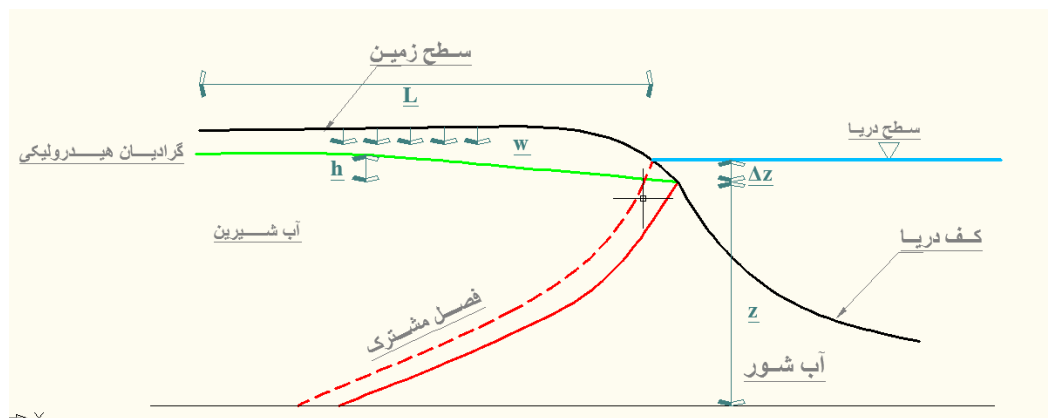
$$q = \left[ \frac{KB^2}{2L} \right] \cdot \left[ \frac{1+\delta}{\delta^2} \right] - \frac{WL}{2} \quad \text{If } W = 0 \quad (6)$$

$$L = 0.725 \gamma \left[ \frac{KB^2}{2q} \right] \quad (7)$$

### تهیه لایه‌های مدل GALDIT

نوع آبخوان: آب زیرزمینی در سازندهای زمین‌شناسی ایجاد می‌شود و به چهار دسته آبخوان آزاد، تحت فشار، نشتی و محدود تقسیم‌بندی می‌شوند. نوع آبخوان منطقه از نوع آزاد با رتبه ۷/۵ و آبخوان تحت فشار با رتبه ۱۰ است.

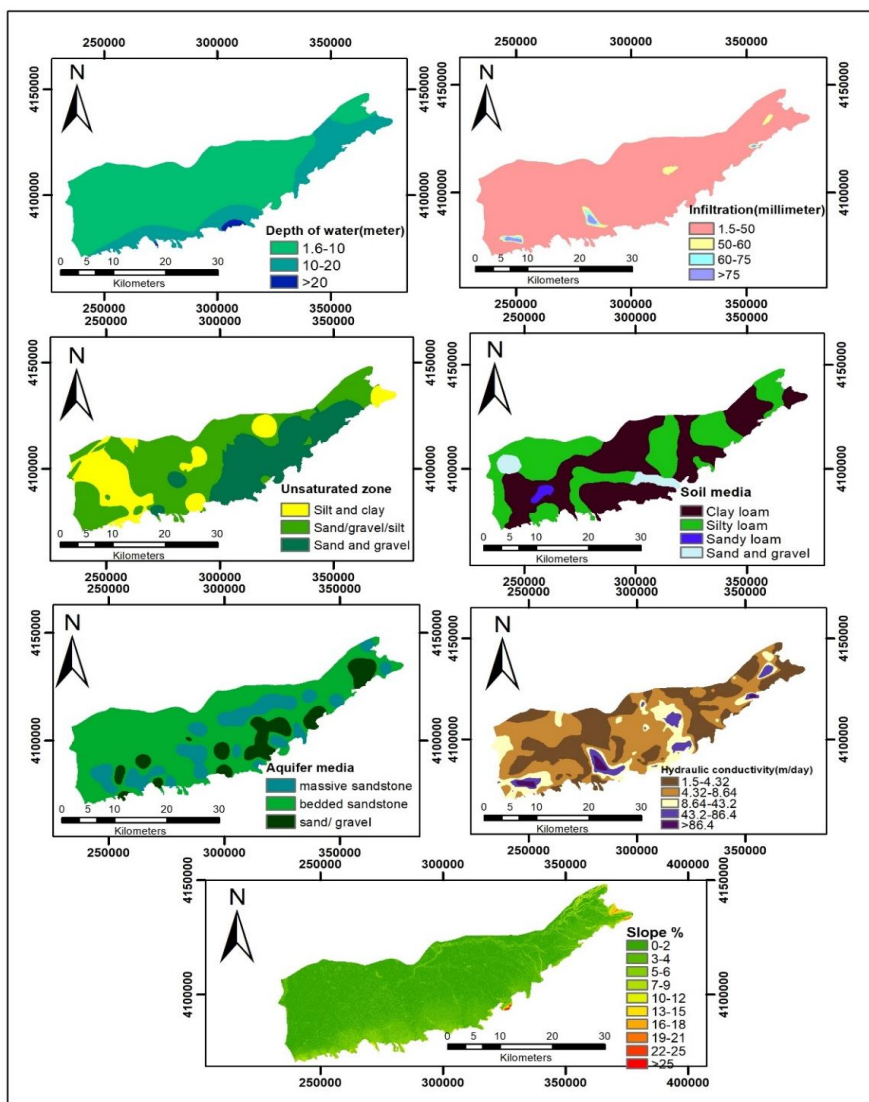
هدایت هیدرولیکی: هدایت هیدرولیکی، توانایی آبخوان برای انتقال آب با توجه به گرادیان هیدرولیکی است [۲۹]. هدایت هیدرولیکی یکی از خصوصیات آبخوان است که حرکت آب از طریق خلل و فرج و شکافها را نشان می‌دهد. هدایت هیدرولیکی آبخوان بر گسترش تجاوز آب شور اثر دارد [۱۴]. نقشه هدایت هیدرولیکی آبخوان از تقسیم نقشه ضریب قابلیت انتقال ( $T$ ) بر نقشه ضخامت آبخوان ( $B$ ) در محیط GIS به دست می‌آید ( $K=T/B$ ). رابطه‌ای بین گسترش تجاوز آب شور ( $L$ ) و جریان آب زیرزمینی به سمت دریا برای آبخوان تحت فشار و آزاد



شکل ۳. طول تجاوز آب شور به آبخوان ساحلی

آسیب‌پذیری زیادی را نشان داد. همچنین، ۸۰ درصد از ناحیه در فاصله بیشتر از ۱۰۰۰ متر قرار دارد. تأثیر وضعیت موجود از نفوذ آب دریا: در صورتی که سطح منطقه مطالعه شده ثابت باشد، گرادیان هیدرولیکی متعادلی بین جبهه‌های آب شور و شیرین در آبخوان ایجاد می‌شود. با توجه به برداشت آب زیرزمینی و تجاوز آب شور، غلظت TDS افزایش می‌یابد. ریویل نسبت  $Cl/HCO_3$  را به‌عنوان معیار شناسایی گسترش تجاوز شوری در آبخوان ساحلی معرفی کرده است. کلراید در آب دریا یون غالب است و در آب زیرزمینی مقدار کمی وجود دارد، در حالی که، بی‌کربنات در آب زیرزمینی بیشتر وجود دارد و مقدار کمی در آب دریا یافت می‌شود.

ارتفاع سطح آب زیرزمینی بالای سطح آب دریا: از مهم‌ترین پارامترها در ارزیابی آسیب‌پذیری، سطح آب زیرزمینی نسبت به ارتفاع دریاست. براساس رابطه گیبین-هرزبرگ با برداشت هر متر آب شیرین ذخیره شده بالای ارتفاع متوسط دریا، ۴۰ متر آب شور بالا می‌آید [۳۱ و ۳۲]. فاصله از خط ساحلی: تأثیر حرکات جزر و مد با فاصله از ساحل کمتر می‌شود. بنابراین، هر چه فاصله از ساحل بیشتر شود، آسیب‌پذیری آبخوان به آلودگی کاهش می‌یابد. برای تهیه نقشه فاصله از ساحل از ابزار Buffer در نرم‌افزار ArcMap استفاده شد. بر اساس جدول رتبه‌بندی GALDIT رتبه ۲/۵ آسیب‌پذیری کم و رتبه ۱۰ آسیب‌پذیری زیاد را نشان می‌دهد. در این منطقه، ناحیه نزدیک به ساحل



شکل ۴. نقشه پارامترهای مدل SINTACS



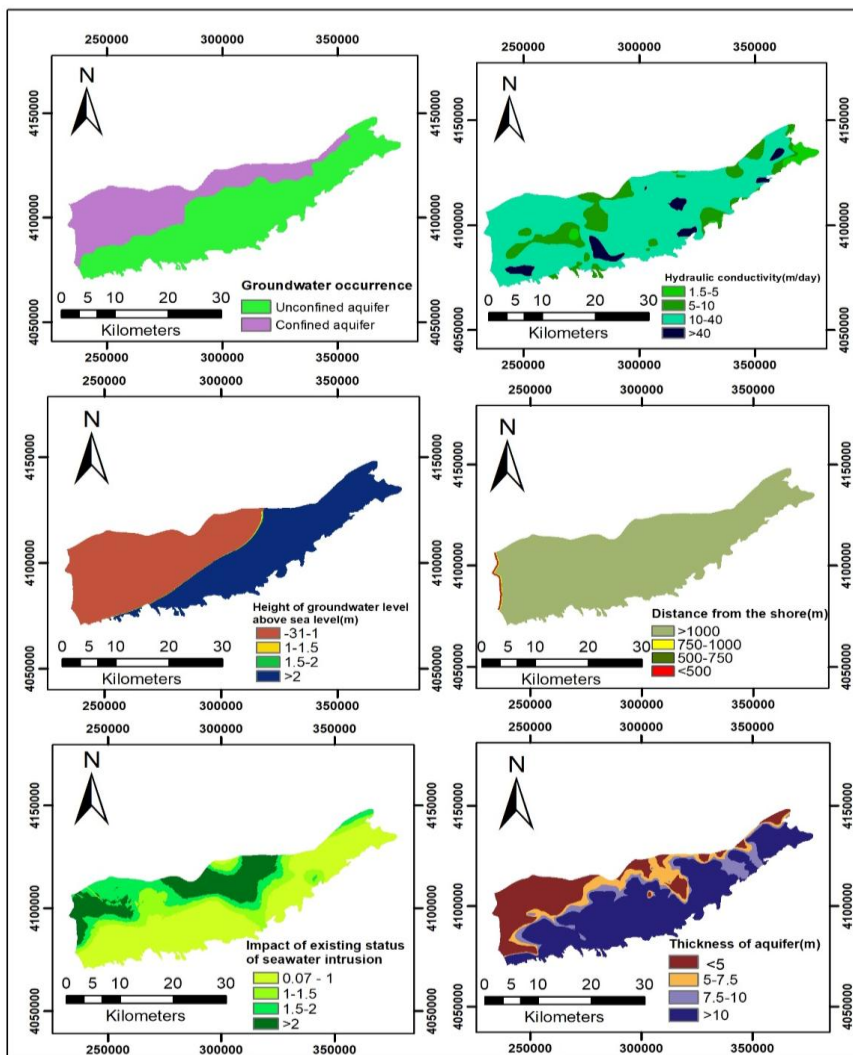
منطقه نیز نقشه ضخامت آبخوان با پیکسل سایز ۱۰۰ متر تولید شد. در نواحی‌ای که ضخامت آبخوان بیشتر است، گستردگی آب شور نفوذی بیشتر می‌شود (شکل ۵).

**صحت‌سنجی مدل‌های SINTACS و GALDIT**

به‌منظور صحت‌سنجی مدل‌ها، از رگرسیون پیرسون برای تعیین همبستگی بین نقشه‌های آسیب‌پذیری و غلظت TDS استفاده شد. در این آنالیز غلظت TDS به‌عنوان متغیر وابسته و مقادیر آسیب‌پذیری هر یک از چاه‌ها به‌عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شد. با توجه به غلظت TDS ضریب همبستگی پیرسون برای مدل SINTACS و GALDIT به‌ترتیب ۰/۲۳ و ۰/۴۳ به دست آمد. بنابراین، مدل بهینه برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان ساحلی قره‌سو-گرگان رود مدل GALDIT است. با توجه به رابطه پیرسون در مدل GALDIT رابطه

**نقشه نهایی مدل GALDIT**

نقشه نهایی مدل GALDIT از هم‌پوشانی شش نقشه پارامترهای این مدل به فرمت رستری به دست آمد. همه نقشه‌ها در محیط GIS با استفاده از ابزار Geostatistical Analyst، Spatial Analyst و درون‌یابی تولید شد. همچنین، نقشه نهایی به چهار کلاس آسیب‌پذیری کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد تقسیم می‌شود که به‌ترتیب ۱۴، ۳۲، ۳۰ و ۲۴ درصد از ناحیه را شامل می‌شود (شکل ۷). با توجه به این نقشه شمال غرب، جنوب غرب و غرب آسیب‌پذیری زیاد-بسیار زیاد را نشان می‌دهد. همچنین، بخش نزدیک به ساحل بیشترین آسیب‌پذیری را دارد (شکل ۶).  
 ضخامت آبخوان: ضخامت آبخوان فاصله بین سطح ایستابی تا لایه نفوذناپذیر است. بر اساس لاگ سنگ‌شناسی



شکل ۵. نقشه پارامترهای مدل GALDIT

هدایت هیدرولیکی (میانگین وزن مؤثر ۲۸/۳) است. حساسیت شاخص آسیب‌پذیری تک‌پارامتری ارتفاع سطح آب زیرزمینی بالاتر از سطح دریا (میانگین وزن مؤثر ۲۷/۴) در رتبه دوم قرار می‌گیرد. نقشه اصلاح‌شده Galdit از محاسبه وزن جدول ۳ به دست آمده است (شکل ۶). نقشه بهینه مدل Galdit چهار کلاس آسیب‌پذیری کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد را نشان می‌دهد که بخش اعظم منطقه آسیب‌پذیری متوسط-زیاد را نشان می‌دهد. ضریب همبستگی بین نقشه تحلیل حساسیت تک‌پارامتری و غلظت TDS برابر ۰/۵۳ است.

معنادار در سطح خطای کوچک‌تر از ۰/۰۱ و اطمینان ۰/۹۹ وجود دارد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده می‌توان به نتایج به‌دست‌آمده از مدل Galdit در این منطقه مطمئن شد.

### تحلیل حساسیت

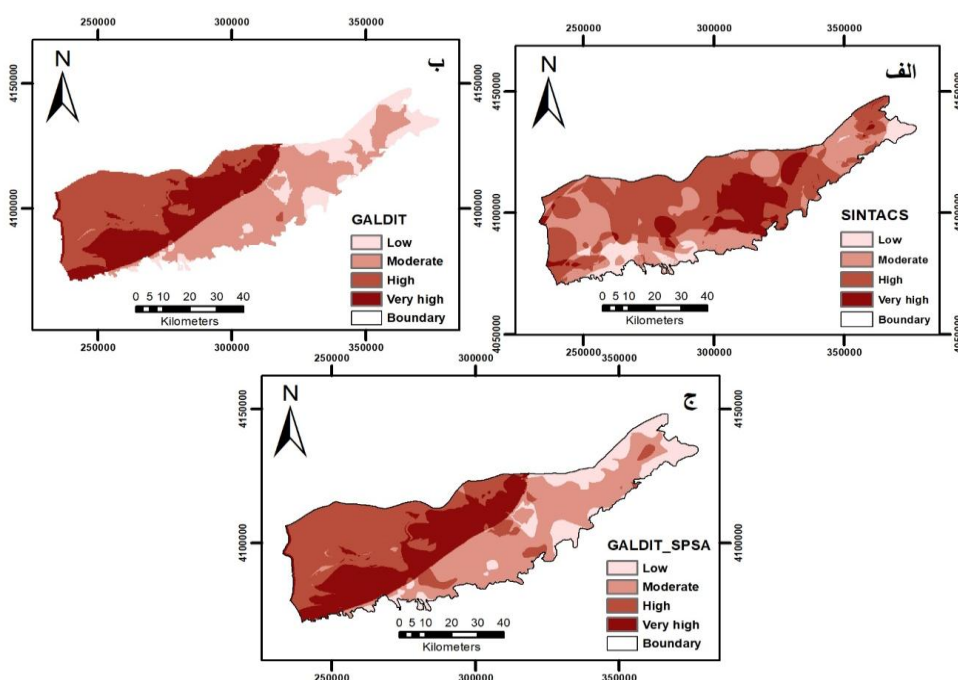
در روش تحلیل حساسیت وزن مؤثر جدید برای اصلاح مدل Galdit ارائه شده است. نتایج آماری تحلیل حساسیت تک‌پارامتری مدل Galdit در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. همان‌طور که این جدول‌ها نشان می‌دهند، مؤثرترین پارامتر در ارزیابی آسیب‌پذیری منطقه مطالعه‌شده، پارامتر

جدول ۳. آنالیز تحلیل حساسیت مدل Galdit

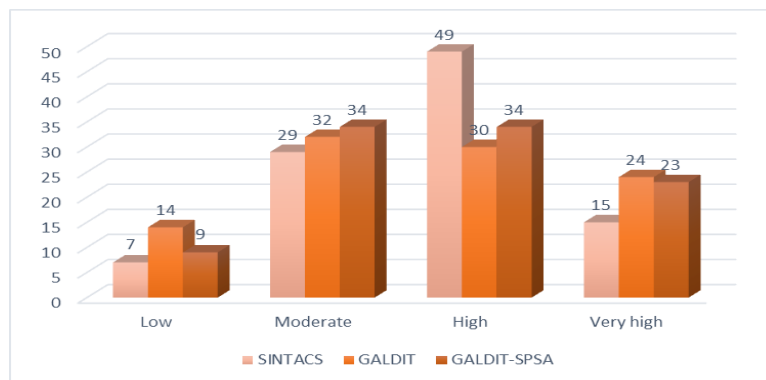
پارامتر	وزن Galdit	وزن اصلاح‌شده Galdit	وزن مؤثر	وزن ثنوریک
G	۱	۱/۸	۱۲/۲	۶/۷
A	۳	۴/۲	۲۸/۳	۲۰
L	۴	۴/۱	۲۷/۴	۲۶/۷
D	۴	۲/۱	۱۴	۲۶/۷
I	۱	۱/۴	۹	۶/۷
T	۲	۱/۴	۹/۱	۱۳/۲

جدول ۴. آنالیز تحلیل حساسیت تک‌پارامتری مدل Galdit

پارامتر	G	A	L	D	I	T
Min	۶/۹	۱۰/۹	۱۰/۵	۷/۶	۲/۰	۳/۲
Max	۲۱/۳	۵۶/۶	۵۹/۷	۳۸/۱	۱۸/۲	۲۲/۷
SD	۳/۱	۸/۴	۱۴/۵	۵/۸	۴/۰	۵/۹



شکل ۶. نقشه‌های آسیب‌پذیری الف) روش SINTACS، ب) روش Galdit، ج) روش Galdit-SPSA



شکل ۷. درصد نواحی آسیب پذیر

حساسیت را دارد. این مطالعه می تواند کمک فراوانی برای برنامه ریزی های حفاظت از منابع آب زیرزمینی و مدیریت صحیح این منابع در آینده باشد.

#### منابع

- [1].Javadi S, Hashemy SM, Mohammadi K, Howard KWF, Neshat A. Classification of aquifer vulnerability using K-means cluster analysis. *Journal of Hydrology*. 2017;549:27–37 .
- [2].Majandang J, Sarapirome S. Groundwater vulnerability assessment and sensitivity analysis in Nong Rua, Khon Kaen, Thailand, using a GIS-based SINTACS model. *Environmental earth sciences*. 2013;68(7):2025–39.
- [3].Neshat A, Pradhan B, Pirasteh S, Shafri HZM. Estimating groundwater vulnerability to pollution using a modified DRASTIC model in the Kerman agricultural area. *Iran. Environmental Earth Sciences*.Doi. 2014;10.
- [4].Neshat A, Pradhan B. An integrated DRASTIC model using frequency ratio and two new hybrid methods for groundwater vulnerability assessment. *Nat Hazards*. 2015;76(1):543–63.
- [5].Werner AD. A review of seawater intrusion and its management in Australia. *Hydrogeology Journal*. 2010;18(1):281–5.
- [6].Vrba J, Zaporozec A. *Guidebook on mapping groundwater vulnerability*. Heise; 1994.
- [7].Samey AA, Gang C. A GIS based DRASTIC Model for the assessment of groundwater vulnerability to pollution in West Mitidja: Blida City, Algeria. *J Appl Sci*. 2008;3(7):500–7.
- [8].Neshat A, Pradhan B. Evaluation of groundwater vulnerability to pollution using DRASTIC framework and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*. 2017;1;10(22):501.

#### نتیجه گیری

ارزیابی آسیب پذیری آب زیرزمینی در نواحی ساحلی قره‌سو-گرگان رود با استفاده از مدل های SINTACS, GALDIT و ابزار سیستم اطلاعات جغرافیایی از اهداف اصلی تحقیق حاضر است. از این رو، نقشه های پارامترهای هر دو روش GALDIT و SINTACS در محیط نرم افزار ArcMap به صورت رستری تهیه و نقشه های نهایی از تلفیق لایه ها به دست آمد. نقشه های نهایی در هر دو روش، نواحی آسیب پذیری متفاوتی را برای منطقه مطالعه شده نشان دادند. نقشه نهایی مدل SINTACS نشان داد قسمت های مرکزی آسیب پذیری بیشتری به تجاوز آب شور دارند. در حالی که، نقشه نهایی مدل GALDIT بیشترین آسیب پذیری به هجوم آب شور را در شمال غرب، جنوب غرب و غرب منطقه نشان می دهد. همچنین، در این مطالعه به منظور تعیین همبستگی بین نقشه های آسیب پذیری و غلظت TDS، از رگرسیون پیرسون استفاده شد که ضریب همبستگی پیرسون برای مدل SINTACS و GALDIT به ترتیب ۰/۲۳ و ۰/۴۳ محاسبه شد. در نهایت، نتایج نشان داد مدل بهینه برای ارزیابی آسیب پذیری آبخوان ساحلی قره‌سو-گرگان رود مدل GALDIT است. بنابراین، می توان به نتایج به دست آمده از مدل یاد شده در این منطقه اطمینان حاصل کرد. علاوه بر این، برای ارزیابی صحت وزن های پارامترهای مدل GALDIT از تحلیل حساسیت تک پارامتری استفاده شد. ضریب همبستگی بین این مدل و غلظت TDS برابر ۰/۵۳ است. نتایج به دست آمده از این تحلیل نشان داد مؤثرترین پارامتر در ارزیابی آسیب پذیری منطقه مطالعه شده، پارامتر هدایت هیدرولیکی است. همچنین، آب شور نفوذی نیز کمترین

- [9]. Ribeiro L, Pindo JC, Dominguez-Granda L. Assessment of groundwater vulnerability in the Daule aquifer, Ecuador, using the susceptibility index method. *Science of The Total Environment*. 2017;574:1674–83.
- [10]. Javadi S, Kavehkar N, Mousavizadeh MH, Mohammadi K. Modification of DRASTIC model to map groundwater vulnerability to pollution using nitrate measurements in agricultural areas. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2010;13:239–49.
- [11]. Neshat A, Pradhan B, Shafri HZM. An integrated GIS based statistical model to compute groundwater vulnerability index for decision maker in agricultural area. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 2014;42(4):777–88.
- [12]. Huan H, Wang J, Teng Y. Assessment and validation of groundwater vulnerability to nitrate based on a modified DRASTIC model: a case study in Jilin City of northeast China. *Science of the Total Environment*. 2012;440:14–23.
- [13]. Bouderbala A, Remini B, Hamoudi AS, Pulido-Bosch A. Assessment of groundwater vulnerability and quality in coastal aquifers: a case study (Tipaza, North Algeria). *Arabian Journal of Geosciences*. 2016;9(3):181.
- [14]. Gontara M, Allouche N, Jmal I, Bouri S. Sensitivity analysis for the GALDIT method based on the assessment of vulnerability to pollution in the northern Sfax coastal aquifer, Tunisia. *Arab J Geosci*. 2016;9(5):416.
- [15]. Gorgij AD, Moghaddam AA. Vulnerability Assessment of saltwater intrusion using simplified GAPDIT method: a case study of Azarshahr Plain Aquifer, East Azerbaijan, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*. 2016;9(2):106.
- [16]. Allouche N, Brahim FB, Gontara M, Khanfir H, Bouri S. Validation of two applied methods of groundwater vulnerability mapping: application to the coastal aquifer system of Southern Sfax (Tunisia). *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*. 2015;64(6):719–37.
- [17]. Kura NU, Ramli MF, Ibrahim S, Sulaiman WNA, Aris AZ, Tanko AI, et al. Assessment of groundwater vulnerability to anthropogenic pollution and seawater intrusion in a small tropical island using index-based methods. *Environmental Science and Pollution Research*. 2015;22(2):1512–33.
- [18]. Saidi S, Bouri S, Dhia HB. Groundwater management based on GIS techniques, chemical indicators and vulnerability to seawater intrusion modelling: application to the Mahdia–Ksour Essaf aquifer, Tunisia. *Environmental earth sciences*. 2013;70(4):1551–68.
- [19]. Civita MV. Le carte della vulnerabilita 'degli acquiferi all'inquinamento (Aquifer pollution vulnerability maps). *Teor Pract Pitagora Bologna Ital*. 1993.
- [20]. Al Kuisi M, El-Naqa A, Hammouri N. Vulnerability mapping of shallow groundwater aquifer using SINTACS model in the Jordan Valley area, Jordan. *Environ Geol*. 2006;50(5):651–67.
- [21]. Civita M, De Maio M, Berberi F. Sintacs: un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilita degli acquiferi all'inquinamento: metodologia e automatizzazione. *Pitagora Editrice*; 1997.
- [22]. Chachadi AG, Lobo-Ferreira JP. Sea water intrusion vulnerability mapping of aquifers using GALDIT method. *Coastin—A Coast Policy Res Newsl*. 2001;4:7–9.
- [23]. Chachadi AG. Seawater intrusion mapping using modified GALDIT indicator model—case study in Goa. *Jalvigyan Sameeksha*. 2005;20:29–45.
- [24]. Balakrishnan P, Saleem A, Mallikarjun ND. Groundwater quality mapping using geographic information system (GIS): A case study of Gulbarga City, Karnataka, India. *African Journal of Environmental Science and Technology*. 2011;5(12):1069–84.
- [25]. Hasiniaina F, Zhou J, Guoyi L. Regional assessment of groundwater vulnerability in Tamtsag basin, Mongolia using drastic model. *J Am Sci*. 2010;6(11):65–78.
- [26]. Babiker IS, Mohamed MA, Hiyama T, Kato K. A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan. *Science of the Total Environment*. 2005;345(1):127–40.
- [27]. Civita M, De Maio M. Assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination: the Italian combined approach. *Geofisica Int*. 2004;43(4):513–32.
- [28]. Linsley Jr RK, Kohler MA, Paulhus JL. *Hydrology for engineers*. 1975.
- [29]. Aller L, Lehr JH, Petty R, Bennett T. DRASTIC: a standardized system to evaluate groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. *National Water Well Association, Worthington, Ohio, United States of America*. 1987.

[30]. Bear J, Verruijt A. Modeling Groundwater Flow and Pollution. D. D. Reidel Publication Company, Dordrecht, Holland. 1987.

[32]. Herzberg A. Die wasserversorgung einiger Nordseebäder. J Gasbeleucht Wasserversorg. 1901;44:842-4.

[31]. Badon-Ghyben W. Nota in verband met de voorgenomen putboring nabij Amsterdam. Tijdschr K Inst Ing Hague. 1889;27:1888-9.