

تعیین مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تخلیه آب زیرزمینی زبردیایی به سواحل خلیج فارس با استفاده از رگرسیون چندمتغیره

محسن فرزین^{*}، علی‌اکبر نظری سامانی^۲، محمدرضا میرزایی قره‌لر^۱، محسن آرمین^۱

۱. استادیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یاسوج

۲. دانشیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۷/۰۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۰۹/۱۳)

چکیده

هدف از پژوهش حاضر، تعیین مهم‌ترین شاخص‌های ژئومورفومتری و ویژگی‌های ساختاری مؤثر بر تخلیه جریان آب زیرزمینی زبردیایی در سواحل خلیج فارس است. به این منظور، ابتدا نقشه ۲۳ عامل احتمالی مؤثر در سه شعاع ۱۰ (بافر ۱)، ۲۰ (بافر ۲) و ۳۰ (بافر ۳) کیلومتری از ساحل به سمت خشکی شامل نقشه‌های سنگ‌شناسی، تراکم خطواره و گسل، پهنه‌بندی بارندگی و دما، پوشش گیاهی، تراکم آبراهه، شیب، طبقات ارتفاع، فراوانی و پراکنش چشمه‌ها و همچنین انحناهای پروفیل، طول، مقطع عرضی، عمومی، صفحه‌ای، مماسی، کل و نسبت سطح، زبری توپوگرافی، اندازه قدرت بردار، موقعیت توپوگرافی، رطوبت توپوگرافی در محیط نرم‌افزارهای Arc GIS 10.3.1، ENVI 5.3 و SAGA GIS 2.1.0 تهیه شدند. سپس، با استفاده از روش تحلیل رگرسیون چندمتغیره، مهم‌ترین عوامل مؤثر و سهم هر یک از آنها در حضور نواحی تخلیه جریان آب زیرزمینی زبردیایی تعیین شد. نتایج نشان داد انحناهای صفحه‌ای و پروفیل مهم‌ترین انحناهایی هستند که نتایج و مقادیری متضاد با هم دارند. شاخص‌های مؤثر بر حضور نواحی تخلیه جریان آب زیرزمینی زبردیایی در فصل سرد عبارت‌اند از: تعداد چشمه بافر ۲ و ۳، خیسی توپوگرافی بافر ۳، تراکم آبراهه بافر ۱ و ۳، تراکم گسل بافر ۲ و سطح آبخوان بافر ۱ و در فصل گرم عبارت‌اند از: تعداد چشمه بافر ۲ و ۳، خیسی توپوگرافی بافر ۱، انحناهای مقطع عرضی بافر ۲، انحناهای کل بافر ۲، شاخص دما در بافر ۳، تراکم گسل بافر ۳ و سطح آبخوان بافر ۱. به‌طور کلی، می‌توان نقشه شاخص‌های تعداد چشمه، خیسی توپوگرافی، انحناهای مقطع عرضی، انحناهای کل، شاخص دما، تراکم گسل و سطح آبخوان برای کل سواحل خلیج فارس را مبنا قرار داد و نقشه نواحی دارای پتانسیل حضور چشمه زبردیایی را ترسیم کرد.

کلیدواژگان: تخلیه آب زیرزمینی زبردیایی، خلیج فارس، ژئومورفومتری، ویژگی‌های ساختاری.

مقدمه

هر جا که آبخوان ساحلی به دریا متصل است، آب‌های زیرزمینی قاره‌ای نیز به‌طور مستقیم به درون آب‌های آزاد وارد می‌شوند؛ سفره‌های آرتزین نیز می‌توانند در فواصل درخور توجهی از ساحل در زیر پوسته قاره‌ای در نقاط رخنمون‌یافته آنها با دریاها و اقیانوس‌ها جریان یابند [۱]. در واقع، تراوش آرام و در عین حال مداوم آب زیرزمینی در جاهایی که سفره آب زیرزمینی گرایان هیدرولیکی نسبی مثبت با سطح دریا دارد و به‌صورت هیدرولیکی به پیکره آب‌های سطحی متصل است، رخ می‌دهد که در این حالت به آن تخلیه زیردریایی آب زیرزمینی شیرین یا FSGD^۱ می‌گویند. همچنین، وقتی بازچرخانی آب دریا که به درون خشکی نفوذ کرده است، رخ دهد به آن تخلیه زیردریایی آب زیرزمینی بازچرخان یا RSGD^۲ گفته می‌شود. این دو اتفاق در دو حالت ناشی از جزر و مد (TDR) و نیز اختلاف چگالی آب دریا و آب زیرزمینی (DDR) رخ می‌دهد [۲]. به‌طور کلی، تخلیه آب زیرزمینی زیردریایی^۳ (SGD) هرگونه جریان زیرسطحی آب است که از طرف خشکی به طرف دریا وجود دارد؛ بنابراین تقریباً تمامی مناطق ساحلی در معرض چنین جریان‌هایی قرار دارند [۳]؛ این جریان می‌تواند تا عمق زیاد (۴۴ متری) آب سواحل نیز وجود داشته باشد [۴].

تخلیه آب زیرزمینی یا چشمه‌های زیردریایی به‌دلیل دشواری در ارزیابی و درک آن، برای سال‌های متمادی از نظر علمی مورد توجه قرار نگرفته بود، ولی امروزه این رویکرد تغییر کرده است. اکنون بدون استفاده از اندازه‌گیری می‌توان پیشگویی کرد که جریان‌های SGD حاشیه سواحل که از اراضی ساحلی به طرف دریا در جریان هستند، در نواحی با نفوذپذیری زیاد (کارست)، ناهمواری‌های مرتفع نزدیک ساحل، نواحی بدون سیستم‌های رودخانه‌ای خوب توسعه‌یافته (برخی از جزایر بزرگ) و مناطقی با میزان زیاد تغذیه آب زیرزمینی (حاره مرطوب) افزون‌تر خواهد بود [۱]. به‌طور کلی، نواحی با بیشترین احتمال بروز SGD را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد [۵]:

۱. سواحل کارستیک؛ از جمله شکل‌های انحلالی و مجاری هستند که می‌توانند تبادل آب سطحی و

آب زیرزمینی را افزایش دهند؛ برای مثال، برآورد شده است که ۷۵ درصد جریان آب شیرین ورودی به دریای مدیترانه از تخلیه آبخوان‌های کارستی به دست می‌آید [۶].

۲. کانال‌های رودخانه‌ای قدیمی و جدید؛ به‌طور مثال چین‌بندی لایه‌ای می‌تواند مجاری آبی را شکل دهد.
۳. سفره‌های آب زیرزمینی تحت فشار؛
۴. سفره‌های آب زیرزمینی زمین‌گرایی (ژئوترمال)؛
۵. خطوط ساحلی که کوهستانی هستند یا گسترش جذر و مدی وسیعی دارند؛
۶. تالاب‌ها.

شاخص‌های ژئومورفومتری (از جمله انواع انحنای، نسبت سطح، وضعیت زهکشی، قدرت بردار و...) و ویژگی‌های ساختاری هر منطقه بر وضعیت هیدرولوژیک آن منطقه تأثیر بسزایی دارد. بنابراین، با تعیین و تلفیق هر یک از این عوامل می‌توان پتانسیل آب زیرزمینی و آبدهی چشمه‌های هر منطقه را با دقت قابل قبولی برآورد کرد.

پیشینه تحقیق

فرزین و همکارانش [۷] نواحی احتمالی تخلیه آب زیرزمینی زیردریایی به سواحل خلیج فارس در استان بوشهر را با استفاده از نقشه ناهنجاری دمایی استاندارد تعیین کردند. نتایج مطالعه آنها، احتمال حضور این جریان را در سطحی معادل ۲۲ هزار هکتار در سواحل خلیج فارس استان بوشهر نشان می‌دهد.

کلانتری و همکارانش [۸] مهم‌ترین عوامل مؤثر بر ظهور چشمه‌های حوضه آبخیز دشت ایذه از جمله چینه‌شناسی، ویژگی‌های ساختاری (چین‌خوردگی‌ها، گسل‌ها، شکستگی‌ها) و توپوگرافی را با استفاده از GIS بررسی کردند. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش آنها ارتباط نزدیک بین موقعیت رخنمون چشمه‌ها و فاصله شکستگی‌ها را بیان می‌کند، به‌طوری که محل وقوع چشمه‌ها با شکستگی‌ها انطباق خوبی دارد. در پژوهش یادشده آهک آسماری به‌عنوان مهم‌ترین سازند آب‌دار در منطقه معرفی شده است. خدروی و همکارانش [۹] توسعه کارست در تاقدیس پیون واقع در جنوب غرب ایران را با استفاده از پارامترهای سنگ‌شناسی، شیب، پوشش گیاهی، تراکم گسل‌ها، فاصله از گسل‌ها، تراکم خطواره، فاصله از

1. Fresh Submarine Groundwater Discharge
2. Recirculated Submarine Groundwater Discharge
3. Submarine Groundwater Discharge

بخشی از سازند آهکی (مرمر) بیشترین پتانسیل آب زیرزمینی را دارند. آنها معتقدند که استفاده از این روش نه تنها محدوده وجود آب زیرزمینی را نشان می‌دهد، بلکه قادر است نواحی با کیفیت خوب آب زیرزمینی را نیز مشخص کند. ابراهیم-باتیس و احمد [۱۴] به منظور تعیین زون‌های پتانسیل آب زیرزمینی حوضه آبخیز دوداهالا هندوستان، مؤثرترین لایه‌های اطلاعاتی شامل کاربری اراضی، عمق و بافت خاک، بارندگی، شیب، تراکم زهکشی، خطواره و ژئومورفولوژی را در محیط نرم‌افزار GIS با یکدیگر ادغام کردند. وزن دهی هر یک از عوامل، بر اساس ویژگی و رابطه درونی هر یک از لایه‌های اطلاعاتی با آب زیرزمینی تعیین شده و نقشه نهایی ارائه شد. نتایج پژوهش آنها نشان می‌دهد فقط ۱۵ درصد از منطقه پتانسیل بالای آب زیرزمینی دارد. موراسینگ و همکارانش [۱۵] نواحی دارای پتانسیل آب زیرزمینی زیرحوضه سامیج در هندوستان را با استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژی، شیب، کاربری اراضی، تراکم خطواره، تراکم آبراهه و خاک تعیین کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد حدود ۷۵ درصد از کل ناحیه مطالعه شده، پتانسیل آب زیرزمینی متوسط تا خوب را دارد.

چن و همکارانش [۱۶] نقشه پتانسیل حضور چشمه آب زیرزمینی را با استفاده از روش وزن شواهد، رگرسیون لاجستیک و درخت عملکرد برای ۱۴ عامل مؤثر شامل جهت، ارتفاع، شیب، انحنای صفحه‌ای، انحنای پروفیل، شاخص قدرت آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، شاخص انتقال رسوب، سنگ‌شناسی، NDVI، کاربری اراضی، خاک، فاصله از جاده و آبراهه تهیه کردند. پژوهش آنها نشان داد درخت عملکرد در مقایسه با دو مدل دیگر، نتایج بهتری ارائه می‌دهد.

رویگرد اصلی در تحقیق حاضر، تعیین مهم‌ترین پارامترهای ژئومورفومتری و ویژگی‌های ساختاری مؤثر در تعیین پتانسیل حضور محل تخلیه جریان آب زیرزمینی در سواحل خلیج فارس با استفاده از تحلیل رگرسیون چندمتغیره است.

مواد و روش‌ها

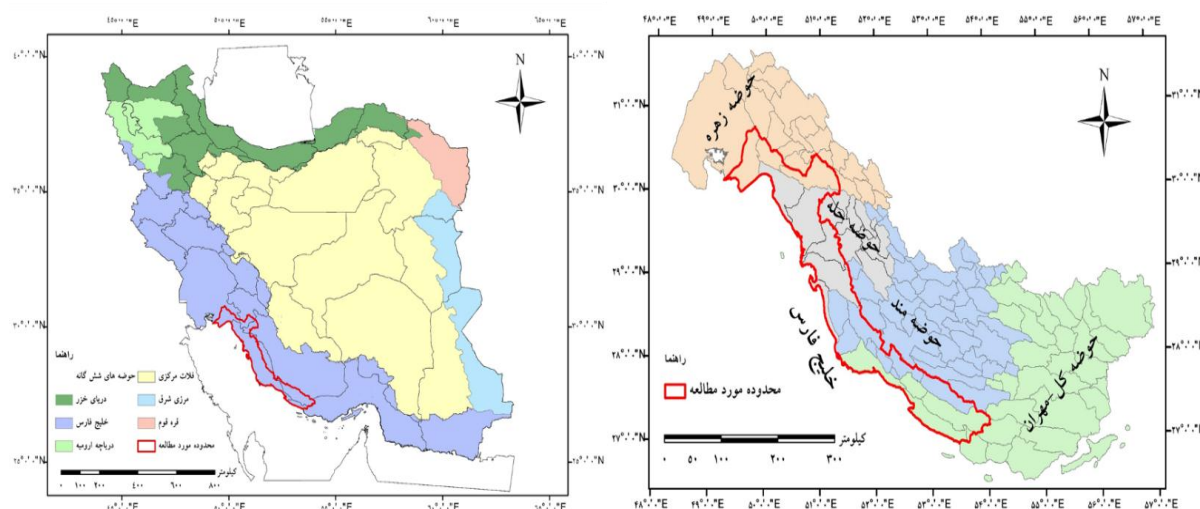
منطقه مطالعه شده

منطقه مطالعه شده بخشی از حوضه چهار رودخانه مند، حله، کل‌مهران و زهره است که به خلیج فارس منتهی می‌شود. این

خطواره، بارش و دما بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد بیشتر چشمه‌ها با آبدهی زیاد در محدوده با پتانسیل زیاد کارست‌شدگی قرار دارند.

قهرودی و همکارانش [۱۰] فروچاله‌ها، خطواره‌ها و چشمه‌ها را به‌عنوان نمایان‌کننده‌های سیستم جریان آب زیرزمینی، به‌ترتیب برای شناسایی مناطق تغذیه، مناطق میانی و تخلیه منطقه کارستی پرآب‌بیستون به کار گرفتند. ایشان به این نتیجه رسیدند که آبخوان کارستی موجود در منطقه به واسطه فروچاله‌ها تغذیه می‌شود و توسط کانال‌های توسعه‌یافته‌ای که همچون رودخانه‌های زیرزمینی عمل می‌کنند، آب را به چشمه‌ها انتقال می‌دهند. همه چشمه‌های مطالعه‌شده، روی خطواره‌های منطقه قرار دارند.

زروش و همکارانش [۱۱] با استفاده از تعیین نقش لایه‌های اطلاعاتی لیتولوژی، تراکم خطواره‌ها، شیب، بارش، ارتفاع، پوشش گیاهی و تراکم آبراهه‌ها در توسعه کارست، نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی تاقدیس کبیرکوه استان ایلام را تهیه کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد حوضه چشمه‌های پرآب منطقه همخوانی مطلوبی با توسعه کارست دارد و مناطق دارای شکستگی در سازندهای آهکی از جمله آسماری و سروک و تا حدودی در مرز سازندها قرار گرفته‌اند. آنها همچنین باور دارند که مهم‌ترین عامل مؤثر بر توسعه کارست در تاقدیس کبیرکوه، سنگ‌شناسی است و بر لزوم اعمال تمامی پارامترها در مدل نهایی به‌دست‌آمده تأکید می‌کنند. بالاکرایا و کالیموتا [۱۲] پارامترهای هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی در زمینه پتانسیل منابع آب زیرزمینی در سازندهای سخت کشور هند را بررسی کردند. در مطالعه یادشده عواملی همچون سنگ‌شناسی، خطواره، زهکشی، لندفرم‌ها، کاربری اراضی و شیب مد نظر بوده است. تمامی عوامل براساس وزن کلاس‌بندی شده و در محیط GIS ادغام شدند. آنها با بیان اهمیت پارامترهای ژئومورفولوژی و لزوم مطالعه روی منابع آب زیرزمینی در سازندهای سخت، می‌گویند که نقشه ایجادشده می‌تواند پایه و اساس برنامه‌ریزی برای توسعه بیشتر آب‌های زیرزمینی در منطقه باشد. اویکونومایدیس و همکارانش [۱۳] پتانسیل آب زیرزمینی ناحیه تیرناوس یونان را با ترکیب GIS و RS بر مبنای هفت شاخص بارش، تغذیه بالقوه، سنگ‌شناسی، تراکم خطواره، شیب، تراکم زهکشی و عمق سطح ایستایی آب زیرزمینی ارزیابی کردند و نتیجه گرفتند رسوبات آبرفتی و



شکل ۱. محدوده مطالعه شده در سطح کشور و حوضه‌های منتهی به خلیج فارس

استخراج داده‌های مورد نیاز و تحلیل آماری

به‌منظور تجزیه و تحلیل آماری و تعیین مهم‌ترین شاخص‌های مؤثر بر حضور احتمالی SGD، وجود انبوه داده‌ها اجتناب‌ناپذیر است. از این‌رو، پس از تهیه نقشه‌های مربوط به ویژگی‌های ساختاری، شاخص‌های ژئومورفومتری و هیدرواقليم محدوده مطالعه شده، داده‌های مورد نیاز برای ورود به تجزیه و تحلیل آماری به‌ترتیب زیر استخراج شد:

۱. نقشه حدافل سطح مشترک ناهنجاری دمایی

استاندارد (STA) (شکل ۲) [۷] مبنا قرار داده شده

و با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS 10.3.1، نقاط

مرکزی هر یک از لکه‌های ناهنجاری تعیین شد.

۲. سطح نقشه ناهنجاری با استفاده از دستور Fishnet

به‌صورت شبکه‌ای با مربعات یک کیلومتری آماده شد.

۳. هر یک از نقاط ناهنجاری که در یکی از مربعات

شبکه واقع شده بود، به‌عنوان نقطه شاخص

ناهنجاری انتخاب شد. شایان یادآوری است از آنجا

که در هر مربع، ممکن است چندین ناهنجاری

مشاهده شود، از مجموع نقاط ناهنجاری در هر

مربع، فقط یک نقطه مد نظر قرار گرفت. در نهایت،

تعداد ۱۹۷ نقطه با فاصله حداکثر یک کیلومتری در

نواحی حضور، به‌عنوان نقاط حضور SGD در کل

سواحل استان بوشهر شناسایی و تعیین شد؛ که از

۸۰ درصد این تعداد برای آموزش و ۲۰ درصد برای

صحت‌سنجی مدل رگرسیونی در نظر گرفته شد.

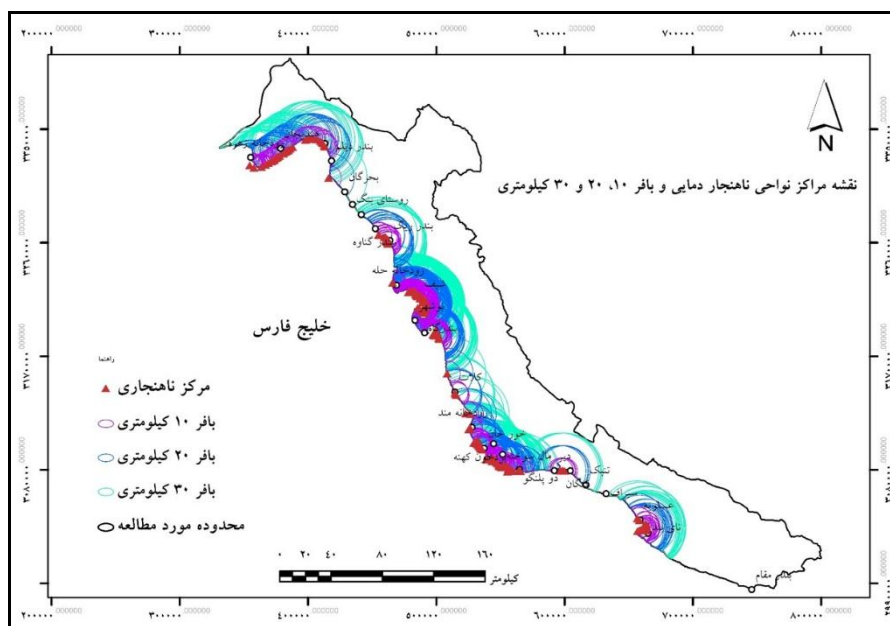
حوضه‌ها از چندین زیرحوضه تشکیل شده‌اند و وسعت بسیار زیادی را نیز در بر می‌گیرند. با توجه به اهمیت احتمالی زیرحوضه‌های نزدیک به ساحل خلیج فارس در بروز و ظهور چشمه‌های زیردریایی ساحلی و نیز محدودیت‌های مربوط به زمان، هزینه و تحلیل نرم‌افزاری، از هر یک از چهار حوضه یادشده، نزدیک‌ترین زیرحوضه‌ها به سواحل خلیج فارس در محدوده مطالعه شده انتخاب شده و برای تجزیه و تحلیل آماری و بررسی‌های یادشده در روش تحقیق، تفکیک شد (شکل ۱).

روش تحقیق

تهیه نقشه شاخص‌ها

ویژگی‌ها و شاخص‌های زمینی، ژئومورفومتری و ساختاری مانند نقشه‌های سنگ‌شناسی، تراکم خطواره‌ها، پهنه‌بندی بارندگی، پهنه‌بندی دما، شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، تراکم آبراهه، شیب، طبقات ارتفاع، فراوانی و پراکنش چشمه‌ها و ژئومورفومتری (انحنای پروفیل، طول، مقطع عرضی، عمومی، صفحه‌ای، مماسی، کل و نسبت سطح، زبری توپوگرافی، اندازه قدرت بردار، موقعیت توپوگرافی، خیسی توپوگرافی) با استفاده از نرم‌افزارهای Arc ENVI 5.3، Arc GIS 10.3.1 و SAGA^۱ GIS 2.1.0 محاسبه و نقشه آن تهیه شد.

1. System for Automated Geoscientific Analyses



شکل ۲. نقشه مراکز نواحی ناهنجار دمایی و بافر ۱۰، ۲۰ و ۳۰ کیلومتری

نواحی ناهنجار نشان می‌دهد. نقشه نواحی احتمالی تخلیه آب زیرزمینی زیر دریایی (SGD) به سواحل استان بوشهر براساس تعیین حداقل سطح مشترک بین ناهنجاری‌های مشاهده شده طی دو سال ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ توسط فرزین و همکارانش [۷] تعیین شده است.

شکل ۳ نقشه سازندهای زمین‌شناسی منطقه مطالعه شده را همراه با وسعت و سنگ‌شناسی آن را بر مبنای نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ شرکت ملی نفت نشان می‌دهد. جدول ۱، سازندهای زمین‌شناسی بر اساس وسعت، سنگ‌شناسی، اهمیت کارستی شدن و به ترتیب سن مشخص شده است.

شکل ۴ نقشه شاخص‌های ژئومورفومتری شامل انحنای پروفیل، طولی، مقطع عرضی، عمومی، صفحه‌ای، مماسی، کل و نیز نسبت سطح، زبری توپوگرافی، اندازه قدرت بردار، موقعیت توپوگرافی و خیسی توپوگرافی را نشان می‌دهد. شکل ۵ نقشه طبقات ارتفاعی، سطح آبخوان، شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، فراوانی و پراکنش چشمه‌ها، تراکم خطواره‌ها، پهنه‌بندی بارندگی، شیب، تراکم آبراهه، پهنه‌بندی دما را به نمایش گذاشته است.

۴. از هر یک از نقاط تعیین شده، بافرهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ کیلومتری به طرف خشکی تهیه شد (شکل ۳).

۵. با استفاده از دستور Zonal Statistics as Table، ویژگی‌های ساختاری، مقادیر میانگین شاخص‌های ژئومورفومتری و هیدرواقليمی هر یک از بافرها برای هر نقطه ناهنجار، به صورت یک جدول با انبوه داده‌ها در محیط Excel آماده شد.

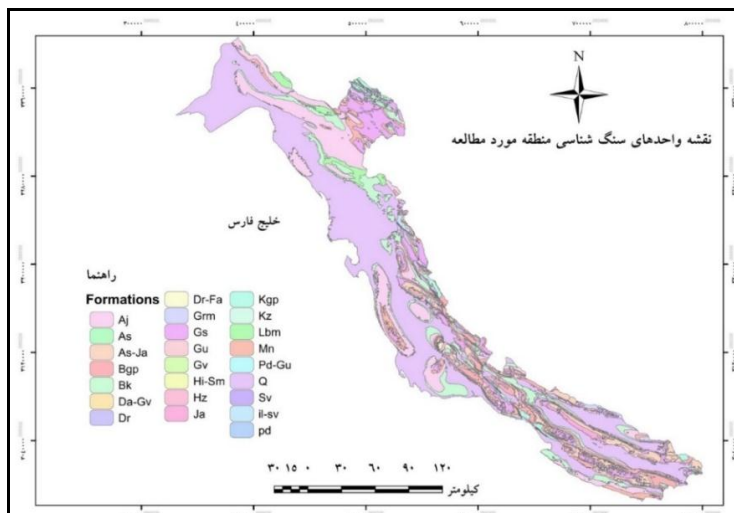
در نهایت، به منظور بررسی و تعیین هر گونه رابطه با نواحی احتمالی حضور SGD، مقدار عددی ناهنجاری دمایی استاندارد نواحی مشخص شده طی فصل‌های سرد (STA1) و گرم (STA2) [۷] به عنوان متغیر وابسته انتخاب شده و سایر متغیرها به عنوان متغیر مستقل وارد نرم‌افزار IBM SPSS Statistics 24 شد. سپس، با محاسبه ضرایب هر متغیر مؤثر با استفاده از روش تحلیل رگرسیونی گام‌به‌گام^۱، رابطه رگرسیونی چندمتغیره ارائه شد. همچنین، ارزیابی عملکرد رگرسیون چندمتغیره با محاسبه پارامترهای میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تعیین (R^2) بررسی شد.

نتایج

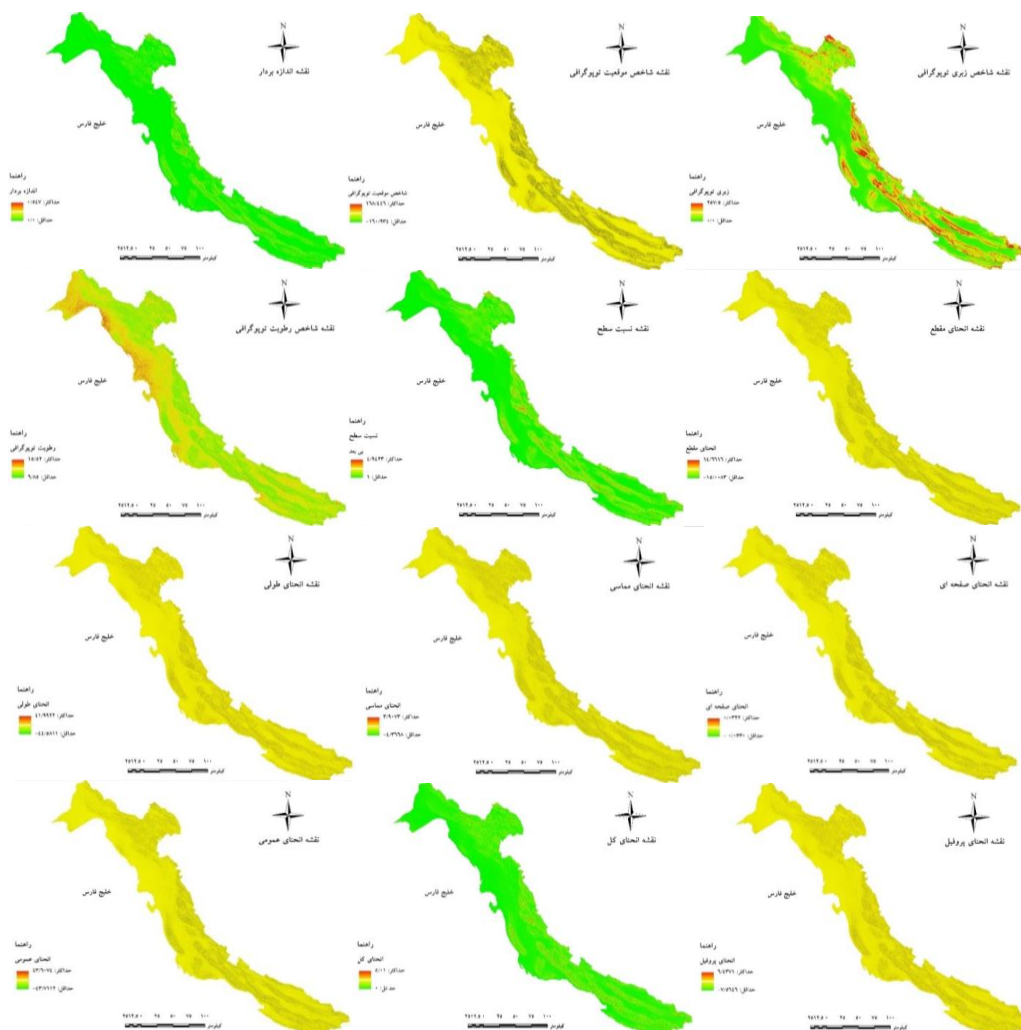
شکل ۲ نقشه بافرهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ کیلومتری را از مراکز

جدول ۱. سازندهای زمین‌شناسی برگرفته از نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ شرکت ملی نفت ایران

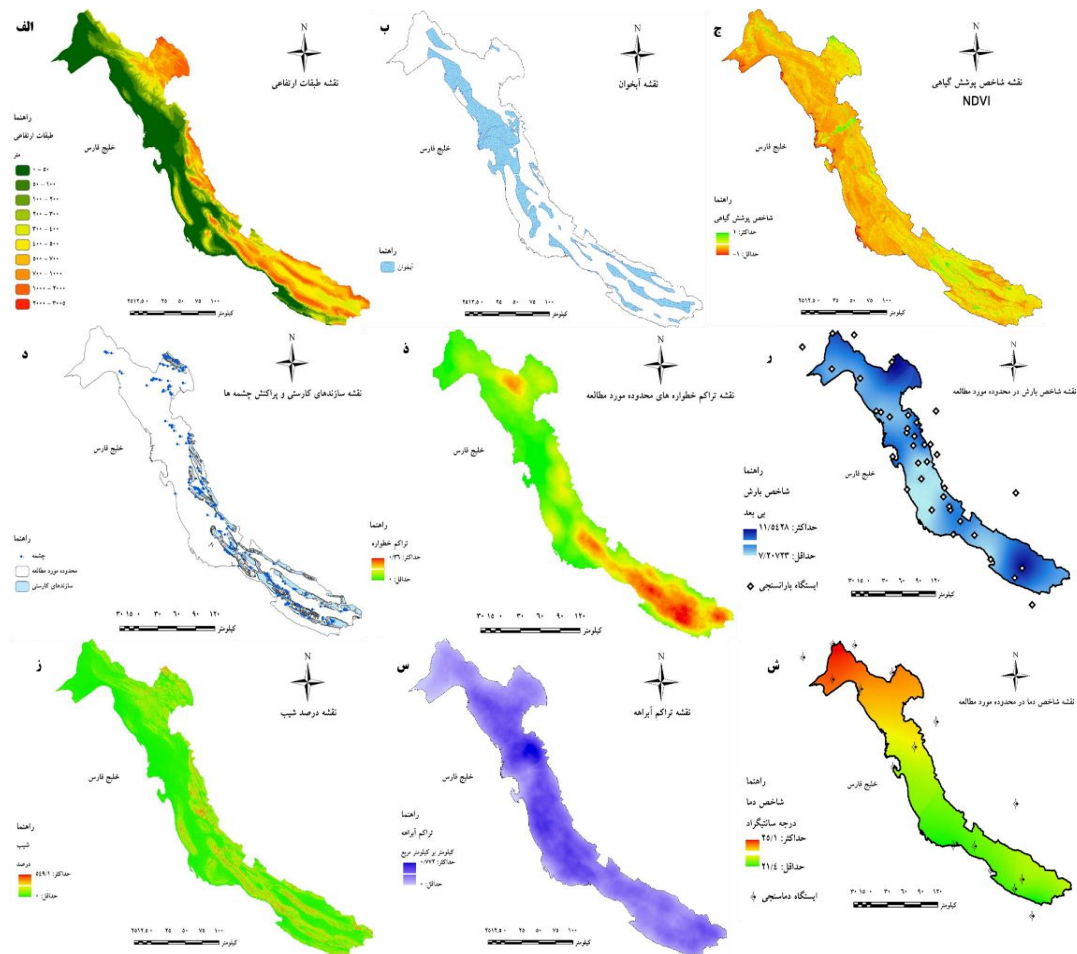
پتانسیل کارستی شدن	مساحت		نام سازند	سنگ‌شناسی	علامت	سن		دوران
	درصد	هکتار (ha)				دوره	دور	
	۴۴/۷	۱۵۴۱۳۲۱	کواترنری	نهشته‌های عهد حاضر - خاک‌های کواترنری	Q	-	کواترنر	
	۹	۳۱۰۱۰۴	بختیاری	کنگومرا، کنگومرای مارنی ماسه‌ای	Bk	پلیستوسن		
	۱/۸	۶۱۶۷۷	بخش لهری (آجاجاری)	سیلت‌سنگ، مارن	Lbm	میوسن-پلیستوسن		
	۱۵/۳	۵۲۹۱۰۲	آجاجاری	ماسه‌سنگ، مارن، سیلت‌سنگ	Aj	میوسن-پلیستوسن		
	۵/۳	۱۸۱۱۷۰	میشان	مارن خاکستری با میان‌لایه‌های آهک رسی	Mn	میوسن	سنوزوئیک ترسیر	
*	۲	۶۸۹۷۳	آهک گوری	آهک	Grm	میوسن		
	۸/۷	۲۹۸۸۱۴	گچساران	مارن، انیدریت و نمک	Gs	میوسن		
*	۰/۴	۱۴۴۲۰	آسماری	آهک درزه‌دار	As	الیگومیوسن		
*	۵/۲	۱۷۹۱۷۰	آسماری- چهرم	آهک- دولومیت	As-Ja	ائوسن-الیگوسن		
*	۰/۶	۲۲۱۳۱	چهرم	آهک- دولومیت	Ja	پالتوسن-میوسن		
	۰/۱	۳۴۹۳	پابده	شیل آهکی و مارن	Pd	پالتوسن		
	۰/۶	۱۹۲۸۷	پابده- گوری	شیل و مارن	Pd-Gu	پالتوسن		
	۱/۴	۴۷۰۹۸	گورپی	مارن، شیل و آهک نازک لایه	Gu	کامپانین		
*	۰/۲	۶۴۱۰	ایلام- سروک	سنگ آهک نازک لایه خاکستری	Il-Sv	سانتونین		
*	۳/۱	۱۰۸۲۴۵	گروه بنگستان	آهک رسی	Bgp	آلبین - کامپانین		
*	۰/۱	۵۱۰۸	سروک	آهک رسی	Sv	آلبین-تورونین		
	۰/۱	۲۴۷۲	کزدمی	شیل	Kz	آلبین-سنومانین		
*	۰/۲	۵۸۱۳	داریان	آهک توده‌ای خاکستری تا قهوه‌ای	Dr	آپتین - آلبین	کرتاسه	
	۰/۰۱	۲۴۹	گدوان	شیل خاکستری با میان لایه‌های آهکی	Gv	آپتین - آلبین	مزوزوئیک	
*	۰/۰۲	۸۴۶	داریان-گدوان	سنگ آهک و آهک دولومیتی ضخیم	Da-Gv	آپتین - آلبین		
*	۰/۱	۴۴۳۰	داریان-فهلپیان	سنگ آهک دولومیت	Dr-Fa	نئوکومین - آپتین		
*	۱	۳۳۶۷۱	گروه خامی	آهک، آهک شیلی، آهک دولومیتی	Kgp	نئوکومین - آلبین		
*	۰/۰۳	۱۱۲۱	هیث-سورمه	انیدریت، آهک دولومیتی و دولومیت	Hi-Sm	تیتونین	زوراسیک	
	۰/۱	۴۴۸۱	سری هرمز	رسوبات تبخیری و گنبد نمکی	Hs	-	کامبرین	پالتوزوئیک
		۳۴۴۹۶۰۶					جمع	
٪۱۳		٪۱۰۰						



شکل ۳. نقشه سازندهای زمین‌شناسی منطقه مطالعه شده



شکل ۴. نقشه شاخص‌های ژئومورفومتری (انحنای پروفیل، طول، مقطع عرضی، عمومی، صفحه‌ای، مماسی، کل و نسبت سطح، زبری توپوگرافی، اندازه قدرت بردار، موقعیت توپوگرافی، خبسی توپوگرافی)



شکل ۵. نقشه‌های الف) طبقات ارتفاعی، ب) سطح آبخوان، ج) شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، د) فراوانی و پراکنش چشمه‌ها، ذ) تراکم خطواره‌ها، ر) پهنه‌بندی بارندگی، ز) شیب، س) تراکم آبراهه، ش) پهنه‌بندی دما

جدول ۲. ضریب تعیین رگرسیون خطی چندمتغیره STA1 با استفاده از روش گام‌به‌گام

مدل	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Durbin- Watson
STA1	۰/۵۷۷	۰/۳۳۳	۰/۳۰۳	۱/۰۴	۱/۵۶۵

جدول ۳. ضرایب رگرسیون خطی چندمتغیره STA1 با استفاده از روش گام‌به‌گام

متغیرهای مدل	ضریب غیراستاندارد		ضریب استاندارد	t	معناداری	همبستگی			هم خطی آماری	
	B	خطای استاندارد				مرتبه صفر	جزئی	نیمه‌جزئی	تلورانس	VIF
تعداد چشمه ۲	۲۶/۰۸	۵/۱۶۲	۰/۵۹۶	۵/۰۵۳	۰	۰/۲۱۰	۰/۳۷۲	۰/۳۲۷	۰/۳۰۲	۳/۳۱
تعداد چشمه ۳	-۱۴/۲۱۱	۷/۹۴۷	-۰/۲۶۰	-۱/۷۸۸	۰/۰۷۶	۰/۰۶۶	-۰/۱۴۰	-۰/۱۱۶	۰/۱۱۹	۵/۰۲۱
TW3	-۱/۵۰۵	۰/۳۴۹	-۰/۵۵۳	-۴/۳۱	۰	-۰/۱۵۶	-۰/۳۲۳	-۰/۲۷۹	۰/۲۵۵	۳/۹۲
تراکم آبراهه ۱	۳/۷۵	۱/۵۷۱	۰/۲۶۰	۲/۳۸۷	۰/۰۱۸	۰/۱۶۴	۰/۱۸۶	۰/۱۵۵	۰/۳۵۴	۲/۸۳
تراکم آبراهه ۳	-۴/۴۰۳	۱/۰۱	-۰/۴۵۰	-۴/۳۶	۰	-۰/۰۴۹	-۰/۳۲۷	-۰/۲۸۳	۰/۳۹۴	۲/۵۴
تراکم گسل ۲	-۱۸/۱۳۵	۵/۸۱۲	-۰/۴۳۰	-۳/۱۲	۰/۰۰۲	۰/۰۵۲	-۰/۲۴	-۰/۲۰۲	۰/۲۲۱	۴/۵۲
سطح آبخوان ۱	۰/۰۰۹	۰/۰۰۲	۰/۴۷۵	۵/۵۲۳	۰	۰/۲۰۳	۰/۴۰۱	۰/۳۵۸	۰/۵۶۷	۱/۷۶
مقدار ثابت	۲/۷۷۶	۱۰/۶۱۱	-	۰/۲۶۲	۰/۷۹۴	-	-	-	-	-

STA1 = 26.08 (SP2) - 14.211 (SP3) - 1.505 (TWI3) + 3.75 (SD1) - 4.403 (SD3) - 18.135 (FD2) + 0.009 (AQ1) + 2.776

جدول ۴ ضریب تعیین رگرسیون خطی را برای مقدار عددی STA2 نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار ضریب تعیین (R^2) درخور توجه است (۰/۸۸۸) و ارتباط خوب شاخص‌های بررسی شده با نواحی احتمالی حضور چشمه‌های زیردریایی را نشان می‌دهد که خود می‌تواند نشان‌دهنده صحت و اطمینان بسیار خوب در دقت رگرسیون باشد. مقایسه میزان RMSE (۰/۱۵۲) بین داده‌های آموزشی و آزمایشی نیز نشان‌دهنده اعتبار در برآورد مدل است. جدول ۵ نیز ضرایب رگرسیونی آن را نشان می‌دهد.

جدول ۲ ضریب تعیین رگرسیون خطی را برای مقدار عددی STA1 نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار ضریب تعیین (R^2) زیاد نیست (۰/۳۳) و نمی‌توان ارتباط چندانی را برای شاخص‌های بررسی شده و نواحی احتمالی حضور چشمه‌های زیردریایی متصور شد که خود می‌تواند نشان‌دهنده صحت و اطمینان کم در دقت رگرسیون باشد. مقایسه میزان RMSE (۱/۴) بین داده‌های آموزشی و آزمایشی تفاوت بیشتری را نسبت به STA2 در مدل رگرسیونی نشان می‌دهد. جدول ۳ نیز ضرایب رگرسیونی آن را نشان می‌دهد. بنابراین، رابطه رگرسیونی STA1 با متغیرهای بررسی شده به صورت زیر خواهد بود:

جدول ۴. ضریب تعیین رگرسیون خطی چندمتغیره STA2 با استفاده از روش گام‌به‌گام

مدل	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Durbin- Watson
STA2	۰/۸۸۸	۰/۷۸۹	۰/۷۷۸	۰/۹۴۶	۱/۶۷۸

جدول ۵. ضرایب رگرسیون خطی چندمتغیره STA2 با استفاده از روش گام‌به‌گام

متغیرهای مدل	ضریب غیراستاندارد		ضریب استاندارد	t	معناداری	همبستگی		هم خطی آماری		
	B	خطای استاندارد				مرتبه صفر	جزئی	نیمه‌جزئی	تلورانس	VIF
تعداد چشمه ۲	-۰/۱۶۵	۰/۰۸۵	-۰/۱۷۲	-۱/۹۴	۰/۰۵۴	۰/۱۳۵	-۰/۱۵۳	-۰/۰۷۱	۰/۱۷۱	۵/۸۵
تعداد چشمه ۳	۰/۰۹	۰/۰۲۴	۰/۳۴۹	۳/۷۱	۰	۰/۲۲۷	۰/۲۸۳	۰/۱۳۶	۰/۱۵۱	۶/۶۲
TWII	-۰/۷۳۶	۰/۲۱۷	-۰/۱۷۰	-۳/۳۸۴	۰/۰۰۱	۰/۲۵۳	-۰/۲۶	-۰/۱۲۴	۰/۵۳۱	۱/۸۸
انحنای عرضی ۲	۹۶/۰۵۶	۲۲/۷۴	۰/۵	۴/۲۲۴	۰	۰/۰۰۱	۰/۳۱۹	-۰/۱۵۴	۰/۰۹۵	۱۰/۴۸۷
انحنای کل ۲	-۱۳۲/۴۷۵	۴۲/۵۴	-۰/۳۷۹	-۳/۱۱۴	۰/۰۰۲	-۰/۰۴۲	-۰/۲۴	-۰/۱۱۴	۰/۰۹	۱۱/۰۷۷
شاخص دما ۳	۱/۷۵۴	۰/۰۹۶	۰/۸۹۴	۱۸/۲۶۶	۰	۰/۷۶	۰/۸۲۴	۰/۶۶۸	۰/۵۵۸	۱/۷۹۲
تراکم گسل ۳	۱۵/۰۷۱	۴/۹۵	۰/۱۹۹	۳/۰۴۸	۰/۰۰۳	-۰/۲۶۴	۰/۲۳۶	۰/۱۱۱	۰/۳۱۳	۳/۱۹۵
سطح آبخوان ۱	۰/۰۰۹	۰/۰۰۲	۰/۳۱۱	۶/۰۰۹	۰	۰/۴۲۵	۰/۴۳۱	۰/۲۲۰	۰/۴۹۸	۲/۰۰۸
مقدار ثابت	-۳۳/۵۷۵	۳/۰۳۳	-	-۱۱/۰۷	۰	-	-	-	-	-

سفره‌های آب زیرزمینی نواحی ساحلی و ویژگی‌های هیدروژئولوژیک آنها، مهم‌ترین عامل مؤثر در تخلیه آب زیرزمینی به سواحل و دریاهاست.

مهم‌ترین عوامل اساسی مد نظر برای تعیین توزیع مکانی کلاس‌های مختلف پتانسیل آب زیرزمینی، بر پایه واحدهای هیدروژئومورفولوژیک است؛ از جمله این عوامل می‌توان ویژگی لندفرم‌های مختلف، وضعیت زهکشی، ویژگی‌های ساختاری (سنگ‌شناسی و خطوارگی) و ژئومورفومتری را نام برد.

بنابراین، رابطه رگرسیونی STA2 با متغیرهای بررسی شده به صورت زیر خواهد بود:

$$STA2 = -0.165 (SP2) + 0.09 (SP3) - 0.736 (TWI1) + 96.056 (CC2) + 132.475 (TC2) + 1.754 (TI3) + 15.071 (FD3) + 0.009 (AQ1) - 33.575$$

بحث و نتیجه‌گیری

تحقیقات در سطح جهان در زمینه جریان آب زیرزمینی زیردریایی (SGD) درخور توجه است [۱۷] و از دو جنبه اکولوژیک و هیدروژئولوژیک اهمیت فراوانی دارد [۱۸-۲۳].

تخلیه جریان‌های سطحی به صورت متمرکز (رودخانه‌ای) دانست. به بیان دیگر، آبراهه‌های رتبه ۱ و ۲ که مستقیم به سواحل تخلیه جریان دارند، تأثیر زیادی بر ایجاد ناهنجاری دمایی در فصل سرد می‌گذارند. وجود چشمه‌ها نیز می‌تواند کارکرد مشابه آبراهه را در حضور نواحی ناهنجار داشته باشد.

شاخص‌های مؤثر بر STA2 در رگرسیون چندمتغیره عبارت‌اند از: تعداد چشمه بافر ۲ و ۳، خیسی توپوگرافی بافر ۱، انحنای مقطع عرضی بافر ۲، انحنای کل بافر ۲، شاخص دما در بافر ۳، تراکم گسل بافر ۳ و سطح آبخوان بافر ۱. ضریب تعیین این مدل ($R^2=0.888$) زیاد است که قدرت زیاد رگرسیون چندمتغیره در تشخیص شاخص‌های مؤثر بر ناهنجاری دمایی استاندارد در فصل گرم را نشان می‌دهد. همان‌طور که گفته شد، فصل گرم منطقه مطالعه شده تقریباً بدون بارش است، بنابراین جریان‌های موقتی سطحی که توسط آبراهه‌ها تخلیه می‌شوند نیز وجود ندارد. از این‌رو، شاخص تراکم آبراهه‌ها در STA2 تأثیری نخواهد داشت. نقش تعداد چشمه‌ها را نیز می‌توان تا حدودی مشابه تراکم آبراهه دانست؛ همچنین کارکرد تعداد چشمه را می‌توان مشابه کارکرد سازندهای کارستی دانست (با توجه به همبستگی زیاد). تأثیر شاخص خیسی توپوگرافی در STA2 معکوس است به طوری که با افزایش مقدار خیسی توپوگرافی در نواحی ساحلی، مقدار عددی STA2 نیز کاهش می‌یابد که توجیه منطقی بر افزایش تخلیه زیرسطحی به دریا را دارد؛ برای STA1 نیز همین حالت صادق است. شاخص مهم دیگری که تأثیر زیادی در مقدار عددی STA هم در فصل گرم و هم در فصل سرد دارد با توجه به ضریب بسیار کم این شاخص در مدل رگرسیون چندمتغیره (۰/۰۰۹) و تقریباً خنثی بودن آن (نه مثبت و نه منفی)، شاخص سطح آبخوان است که شاید بتوان گفت حضور SGD در محدوده ناهنجاری دمایی، ناشی از تخلیه آبخوان به نواحی ساحلی است.

به‌طور کلی، منشأ تخلیه جریان آب زیرزمینی زیردریایی به سواحل، آبخوان‌های ساحلی است. از این‌رو، تمامی عوامل مؤثر بر پتانسیل آب زیرزمینی می‌تواند به عنوان یک شاخص مستقل و مؤثر در تعیین نواحی پتانسیل حضور چشمه‌های زیردریایی در نظر گرفته شود. بنابراین، می‌توان با پهنه‌بندی مقادیر عددی و نقشه‌های

در پژوهش حاضر، با بررسی و مقایسه شاخص‌های ژئومورفومتری با یکدیگر می‌توان دریافت که نتایج به‌دست‌آمده از محاسبه بسیاری از این شاخص‌ها به‌ویژه نقشه آنها، تفکیک مشابهی از اراضی ارائه می‌دهند. مهم‌ترین آنها از میان انواع ژئومورفومتری آن (طولی، مقطع عرضی، عمومی و...) انحنای صفحه‌ای و پروفیل هستند که نتایج و مقادیری متضاد با هم دارند. شاخص TRI تأثیرپذیری زیادی از شیب منطقه دارد. سایر شاخص‌ها از جمله TPI، VRM و TWI به‌خوبی می‌توانند ویژگی ژئومورفومتری مختص هر نقطه را با توجه به تعریف مشخص شده برای آن شاخص بیان کنند که با نتایج نقیسی و همکارانش [۲۴ و ۲۵] و چن و همکارانش [۱۶] مطابقت دارد.

به‌منظور تعیین شاخص‌های مؤثر بر حضور احتمالی نواحی دارای SGD، از رگرسیون چندمتغیره استفاده شد. به این صورت که مقدار عددی STA1 (ناهنجاری دمایی استاندارد در فصل سرد) و STA2 (ناهنجاری دمایی استاندارد در فصل گرم) به‌طور جداگانه به‌عنوان متغیر وابسته و سایر شاخص‌ها در هر سه بافر به‌عنوان متغیر مستقل وارد مدل شد.

شاخص‌های مؤثر بر STA1 در رگرسیون چندمتغیره عبارت‌اند از: تعداد چشمه بافر ۲ و ۳، رطوبت توپوگرافی بافر ۳، تراکم آبراهه بافر ۱ و ۳، تراکم گسل بافر ۲ و سطح آبخوان بافر ۱. هر چند که ضریب تعیین ($R^2=0.333$) این مدل زیاد نیست، چندین شاخص تأثیرگذار بر STA1 را مشابه STA2 تشخیص داده و شاخص تراکم آبراهه را به خلاف مدل رگرسیون چندمتغیره STA2، نیز مؤثر دانسته است. STA1 مقدار عددی شاخص ناهنجاری دمایی استاندارد در فصل سرد است. بارش منطقه نیز در این فصل اتفاق می‌افتد، بنابراین می‌توان گفت که آبراهه‌های منتهی به نواحی ساحلی در فصل سرد (بارش) نقش تخلیه جریان‌های سطحی و موقتی حاصل از بارندگی را به‌خوبی ایفا کرده و موجب ایجاد ناهنجاری دمایی در نواحی ساحلی شده‌اند. به این ترتیب، در نواحی با تراکم زیاد آبراهه تا فاصله ۱۰ کیلومتری، حداکثر ایجاد ناهنجاری در فصل سرد مشاهده می‌شود. این در حالی است که چنانچه فاصله تراکم آبراهه‌ای را تا فاصله ۳۰ کیلومتری از ساحل (بافر ۳) در نظر بگیریم، نقش شاخص آبراهه معکوس می‌شود. شاید بتوان دلیل این حالت را در اتصال آبراهه‌ها و

- [8]. Kalantari N, Keshavarzi MR, Charchi A. Assessment of Factors Influencing Occurrence of Izeh Plain Watershed Springs. *Journal of Geotechnical Geology*. 2010;5(2): 135-147. [Persian]
- [9]. Khedri A, Rezaei M, Ashjari J. Assessing Karst Development Potential in Pion Poyon Anticline using GIS,RS and Analytical Hierarchy Process (AHP). *Journal of Iran-Water Resources Research*. 2014;9(3): 37-46. [Persian]
- [10]. Ghahrodi M, Jalilian T, Alijani F. Detection of Karstic Groundwater Flow System: A Case Study of Prao-Bisetoun Limestone Mass, Kermanshah Province, Iran. *International Bulletin of Water Resources & Development*. 2014;2(4): 27-39. [Persian]
- [11]. Zarvash N, Vaezi A, Karimi H. Evaluation of Karst Development potential in Kebirkouh Tomb of Ilam province using Fuzzy Combination and Analysis of Helicopter Analysis (AHP) and Remote Sensing and GIS. *Quantitative Geomorphological Research*. 2015;3(3): 144-157. [Persian]
- [12]. Ballukraya PN, Kalimuthu R. Quantitative hydrogeological geomorphological analyses for groundwater potential assessment in hard rock terrains. *Current Science*. 2010;98(2): 253-259.
- [13]. Oikonomidis D, Dimogianni S, Kazakis N and Voudouris K. A GIS/Remote Sensing-based methodology for groundwater potentiality assessment in Tirnavos area, Greece. *Journal of Hydrology*. 2015;525: 197-208.
- [14]. Ibrahim-Bathis K, Ahmed SA. Geospatial technology for delineating groundwater potential zones in Doddahalla watershed of Chitradurga district, India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. 2016;19(2): 223-234.
- [15]. Murasingh S, Jha R, Adamala S. Geospatial technique for delineation of groundwater potential zones in mine and dense forest area using weighted index overlay technique. *Groundwater for Sustainable Development*. 2018;7: 387-399
- [16]. Chen W, Li H, Hou E, Wang S, Wang G, Panahi M, et al. GIS-based groundwater potential analysis using novel ensemble weights-of-evidence with logistic regression and functional tree models. *Science of the Total Environment*. 2018;634: 853-867.
- [17]. Moore WS. The Effect of Submarine Groundwater Discharge on the Ocean. *Annual Review of Marine Science*. 2010;2(1): 59-88.

کمتی مهم‌ترین شاخص‌های ژئومورفومتری، ویژگی‌های ساختاری و عوامل اقلیمی خشکی‌های منتهی به سواحل، نقشه پتانسیل حضور چشمه‌ها و نواحی تخلیه آب زیرزمینی زبردربایی را تهیه کرد. برای پژوهش حاضر نیز می‌توان نقشه شاخص‌های تعداد چشمه، خیسی توپوگرافی، انحنای مقطع عرضی، انحنای کل، شاخص دما، تراکم گسل و سطح آبخوان برای کل سواحل خلیج فارس را مبنای قرار داد و نقشه نواحی دارای پتانسیل حضور چشمه زبردربایی را ترسیم کرد.

منابع

- [1]. Burnett WC, Bokuniewicz H, Huettel M, Moore WS, Taniguchi M. Groundwater and pore water inputs to the coastal zone. *Biogeochemistry*. 2003;66: 3-33.
- [2]. Lee E, Hyun Y, Lee K-K. Sea level periodic change and its impact on submarine groundwater discharge rate in coastal aquifer. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2013;121-122: 51-60.
- [3]. Burnett WC, Aggarwal PK, Aureli A, Bokuniewicz H, Cable JE, Charette MA, et al. Quantifying submarine groundwater discharge in the coastal zone via multiple methods. *Science of the Total Environment*. 2006;367: 498-543.
- [4]. Oehler T, Mogollon JM, Moosdorf N, Winkler A, Kopf A, Pichler T. Submarine groundwater discharge within a landslide scar at the French Mediterranean coast. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2017; 198(A):128-137.
- [5]. Swarzenski, PW, Reich CD, Spechler RM, Kindinger JL, Moore WS. Using multiple geochemical tracers to characterize the hydrogeology of the submarine spring off Crescent Beach, Florida. *Chemical Geology*. 2001;179: 187-202
- [6]. Hennig H, Mallast U, Merz R. Multi-temporal thermal analyses for submarine groundwater discharge (SGD) detection over large spatial scales in the Mediterranean. *Geophysical Research Abstracts*. 2015;17: 4929.
- [7]. Farzin M, Nazari Samani AK, Feiznia S, Kazemi GA. Determination of Submarine Groundwater Discharge Probable Areas into the Persian Gulf on Coastlines of Bushehr Province Using Standard Thermal Anomaly Map. *Ecohydrology*. 2017;4(2): 477-488. [Persian]

- [18]. Garcia-Orellana J, Rodellas V, Casacuberta N, Lopez-Castillo E, Vilarrasa M, Moreno V, Garcia-Solsona E, Masque P. Submarine groundwater discharge: Natural radioactivity accumulation in a wetland ecosystem. *Marine Chemistry*. 2013;156: 61–72.
- [19]. Hwang DW, Lee IS, Choi M, Kim TH. Estimating the input of submarine groundwater discharge (SGD) and SGD-derived nutrients in Geoje Bay, Korea using ^{222}Rn -Si mass balance model. *Marine Pollution Bulletin*. 2016;110: 119–126.
- [20]. Lecher AL, Fisher AT, Paytan A. Submarine groundwater discharge in Northern Monterey Bay, California: Evaluation by mixing and mass balance models. *Marine Chemistry*. 2016;179: 44–55.
- [21]. Russoniello CJ, Konikow LF, Kroeger KD, Fernandez C, Andres AS, Michael HA. Hydrogeologic controls on groundwater discharge and nitrogen loads in a coastal watershed. *Journal of Hydrology*. 2016;538: 783–793.
- [22]. Shaw GD, White ES, Gammons CH. Characterizing groundwater-lake interactions and its impact on lake water quality. *Journal of Hydrology*. 2013;492: 69–78.
- [23]. Szymczycha B, D Kroeger K, Pempkowiak J. Significance of groundwater discharge along the coast of Poland as a source of dissolved metals to the southern Baltic Sea. *Marine Pollution Bulletin*. 2016;109: 151–162.
- [24]. Naghibi SA, Pourghasemi HR, Dixon B.. GIS-based groundwater potential mapping using boosted regression tree, classification and regression tree, and random forest machine learning models in Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2016;188 (1): 1–27.
- [25]. Naghibi SA, Moghaddam DD, Kalantar B, Pradhan B, Kisi O. A comparative assessment of GIS-based data mining models and a novel ensemble model in groundwater well potential mapping. *Journal of Hydrology*. 2017: 548: 471–483.