

## ارائه روشی جدید به منظور ارزیابی آسیب پذیری آبخوان دشت مغان بر مبنای ترکیب روش های دراستیک، سینتکس و اس آی

گلناز جوانشیر<sup>۱</sup>، عطاالله ندیری<sup>۲\*</sup>، سینا صادق فام<sup>۳</sup>، اسفندیار عباس نوین پور<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد زمین شناسی زیست محیطی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۲. استادیار گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۳. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه

۴. استادیار گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۰۹/۰۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۵/۱۰/۱۰)

### چکیده

رشد روزافزون جمعیت سبب افزایش فعالیت های انسانی از جمله فعالیت های کشاورزی و صنعتی شده و افزایش این فعالیت ها و استفاده بی رویه از کودها، آفت کش ها و حشره کش ها، موجب آلودگی خاک و آب های زیرزمینی شده است. در این میان ارزیابی آسیب پذیری می تواند تأثیر بسزایی در مدیریت فعالیت های آلاینده داشته باشد. در این پژوهش روش جدیدی برای ارزیابی آسیب پذیری دشت مغان به عنوان اصلی ترین تأمین کننده تولیدات کشاورزی و دامپروری استان اردبیل، ارائه شده است. این روش از ترکیب وزن دار سه روش رایج ارزیابی آسیب پذیری آب های زیرزمینی DRASTIC، SINTACS و SI بهره می برد. مقایسه نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی با داده های میدانی غلظت نیترات که از ۲۱ حلقه چاه در محدوده مطالعاتی در پاییز ۱۳۹۴ نمونه برداری شده است، نشان می دهد روش پیشنهادی شاخص همبستگی بیشتری نسبت به دیگر روش های DRASTIC، SINTACS و SI دارد. براساس این نتایج در روش پیشنهادی ۴۱، ۶۱ و ۱۳ درصد از آبخوان دشت مغان به ترتیب در مناطق با آسیب پذیری کم، متوسط و زیاد واقع شده است. روش شناسی ارائه شده در این تحقیق می تواند برای ارزیابی آسیب پذیری سایر آبخوان ها نیز استفاده شود.

**کلیدواژگان:** آبخوان دشت مغان، ارزیابی آسیب پذیری، روش های DRASTIC، SINTACS و SI، نیترات.

## مقدمه

دلیل مصرف بیش از حد از موجودی آب زیرزمینی به علت رشد بدون مدیریت صحیح جمعیت و صنعتی شدن، سبب افت سطح آب زیرزمینی و کاهش کیفیت بسیاری از آبخوان‌ها شده است. تصفیه این آب‌ها بسیار پرهزینه و اغلب غیرممکن است. از آنجا که همیشه پیشگیری بهتر از درمان است، بهترین راه حل جلوگیری از آلودگی منابع آب است که با شناختن مناطق دارای پتانسیل آلودگی این هدف امکان‌پذیر می‌شود [۱]. در کنار آن، صحیح میزان آسیب‌پذیری بخش‌های مختلف یک آبخوان آب زیرزمینی ممکن است سبب ایجاد آلودگی‌های شدید در این منابع شود و استفاده از این منابع آبی را غیرممکن سازد.

مفهوم آسیب‌پذیری آب زیرزمینی که اولین بار در اواخر دهه ۱۹۶۰ در فرانسه برای هشدار درباره آلودگی آب زیرزمینی ارائه شد [۲]، می‌تواند به عنوان پتانسیل نفوذ و پخش آلاینده‌ها از سطح زمین به سیستم آب زیرزمینی تعریف شود [۳]. این مفهوم بیانگر پتانسیل انتقال آلودگی تولیدشده در سطح زمین به جریان آب زیرزمینی و پراکندگی است [۴]. به بیان دیگر، آسیب‌پذیری معرف استعداد یک سیستم در تأثیرپذیری از عوامل آلوده‌کننده طبیعی و مصنوعی است [۵]. شاخص آسیب‌پذیری نیز یک شاخص بدون بعد و غیرقابل اندازه‌گیری است که به فاکتورهای نظیر ویژگی‌های آبخوان، خصوصیات زمین‌شناسی، هیدروژئولوژیکی و هیدرولوژی محیط، بافت خاک، تغذیه و توپوگرافی و غیره بستگی دارد [۶].

روش‌های مختلفی برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان آب زیرزمینی ارائه شده است که می‌توان آنها را در سه دسته کلی تقسیم کرد [۷]. این سه دسته شامل روش‌های نرخ‌گذاری و همپوشانی<sup>۱</sup>؛ روش‌های شبیه‌سازی کامپیوتری مبتنی بر فرایند<sup>۲</sup>؛ و روش تحلیل آماری است. روش‌های نرخ‌گذاری و همپوشانی براساس جمع‌بندی اطلاعات از عوامل مؤثر بر آسیب‌پذیری آبخوان استوار هستند. این روش‌ها برپایه تلفیق لایه‌های به‌دست‌آمده از پارامترهای مختلف بنا نهاده شده و اساس کار یکسانی دارند. تفاوت آنها در به‌کارگیری تعداد پارامترها و نوع آنهاست. از جمله این روش‌ها می‌توان

به روش‌های<sup>۳</sup> DRATIC،<sup>۴</sup> SINTACS،<sup>۵</sup> AVI.GOD و<sup>۶</sup> SI اشاره کرد. این روش‌ها، آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان را از آسیب‌پذیری کم تا زیاد در بخش‌های مختلف یک آبخوان تقسیم کرده و برای اتخاذ تصمیمات مدیریتی بیشترین کاربرد را دارند. در این میان، روش DRATIC نسبت به سایر روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان مبتنی بر رتبه‌دهی، از رایج‌ترین روش‌ها محسوب می‌شود. در این روش از تعداد پارامترهای بیشتری در ارزیابی آسیب‌پذیری استفاده می‌شود [۸]. در روش‌های شبیه‌سازی مبتنی بر کامپیوتر مدل‌هایی برای شبیه‌سازی تخمین حرکت آلاینده‌ها استفاده می‌شود. در روش‌های آماری از روابط همبستگی بین متغیرهای مکانی و میزان آلاینده‌های موجود در آب زیرزمینی استفاده می‌کنند.

کورنیلو و همکارانش (۱۹۹۷) در جنوب ایتالیا برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان روش‌های GOD، SINTACS، DRATIC و AVI را به کار بردند [۹]. در این پژوهش مشخص شد که محدوده رتبه‌دهی در روش DRATIC گسترده‌تر از بقیه روش‌ها و روش SINTACS برای بهره‌وری اراضی مناسب‌تر است.

دیکسون (۲۰۰۵) در پژوهشی به منظور بهبود روش‌های ارزیابی پتانسیل آلودگی، از اطلاعات کاربری اراضی، آفت‌کش‌ها و اطلاعات بافت خاک استفاده کرده که با پارامترهای انتخاب‌شده از روش DRATIC در ارتباط است [۱۰]. این مطالعه در شهر وودراف<sup>۶</sup> در منطقه دلتایی می‌سی‌سی‌پی آرکانزاس انجام شده است. دیکسون نقشه حساسیت را برای این منطقه توسط سه روش تهیه کرد. سپس نقشه‌های به‌دست‌آمده را با شاخص DRATIC و داده‌های صحرایی کیفیت آب مقایسه کرد. در نهایت، مشاهده کرد نقشه حساسیت روشی که براساس روش فازی و اطلاعات ساختار خاک ایجاد شده است، همبستگی بهتری را با داده‌های صحرایی کیفیت آب نشان می‌دهد.

معروفی و همکارانش (۱۳۹۰) آسیب‌پذیری آبخوان دشت ملایر با استفاده از روش‌های SINTACS، SI و DRATIC را ارزیابی کردند [۱۱]. نتایج پژوهش آنها نشان داد روش DRATIC اصلاحی با ضریب همبستگی ۰/۷۸ و روش SI

3. DRATIC  
4. SINTACS  
5. SI  
6. Woodruff

1. Index and overlay methods  
2. Process based computer simulations

عرض شمالی و ۴۷/۱۰ تا ۴۸/۱۰ طول شرقی دارد. مساحت منطقه مطالعه شده حدود ۵۱۵۲ کیلومتر مربع است. این منطقه شامل جلگه‌ای است که شیب عمومی آن از طرف جنوب غربی به طرف شمال شرقی و از نظر زمین‌شناسی شامل زمین‌های پست و کم‌ارتفاع و توده‌هایی متشکل از مواد رسوبی و ساختمان جوان تشکیل شده است. دشت مغان در قسمت شمالی از سطح دریا ۱۴ تا ۱۴۵ متر و در جنوب از ۲۰۰ تا ۴۰۰ متر بالاتر از سطح دریا قرار دارد. از نظر اقلیم‌شناسی به‌روش آمبرژه<sup>۱</sup> دشت مغان منطقه‌ای نیمه‌خشک و معتدل است. بیشترین دمای ثبت شده ۴۱ درجه سانتی‌گراد در تیرماه و کمترین دما ۱۶/۵- درجه سانتی‌گراد در دی‌ماه است. طبق دوره آماری ۲۶ ساله (۱۳۶۳ - ۱۳۸۹) تعداد روزهای یخبندان به‌طور متوسط ۶۵ روز در سال و در ماه‌های دی و بهمن بوده و متوسط رطوبت نسبی بین ۶۶ تا ۸۸ درصد در ماه‌های مختلف سال گزارش شده است [۱۲].

طبق آمار متوسط ۱۹ ساله دشت مغان، متوسط میزان بارندگی ۲۹۹ میلی‌متر و بیشترین مقدار بارندگی در ماه‌های نیمه دوم اسفند تا اوایل خردادماه گزارش شده است. براساس آمار ایستگاه‌های هواشناسی، بیشترین مقدار تبخیر در ماه‌های تیر و مرداد و کمترین میزان تبخیر در ماه‌های دی و بهمن است [۱۲]. در ایستگاه اصلان دوز سرعت باد در ارتفاع ۵۰ سانتی‌متری روی تشتک تبخیر اندازه‌گیری شده و تغییرات آن بین ۱/۴ متر در ثانیه در مردادماه و ۰/۹ متر در ثانیه در آبان‌ماه گزارش شده است. براساس گزارش‌های آب منطقه‌ای استان اردبیل تا کنون ۵۱ چاه مشاهداتی در محدوده دشت مغان حفر شده است. عمق آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی، بین ۵ تا ۲۰ متر در بخش‌های شمالی و حاشیه رودخانه ارس، و در بخش‌های جنوبی به بیش از ۱۰۰ متر می‌رسد. براساس نقشه‌های تراز و جهت جریان آب زیرزمینی، روند کلی جهت جریان هماهنگ با خطوط توپوگرافی دشت و از سمت جنوب به سمت شمال شرق و شرق محدوده است. مقدار ضریب ذخیره برای این دشت به‌طور متوسط ۵ درصد است. براساس آمار دریافت‌شده در این منطقه حدود ۶۳۳ چاه فعال وجود دارد.

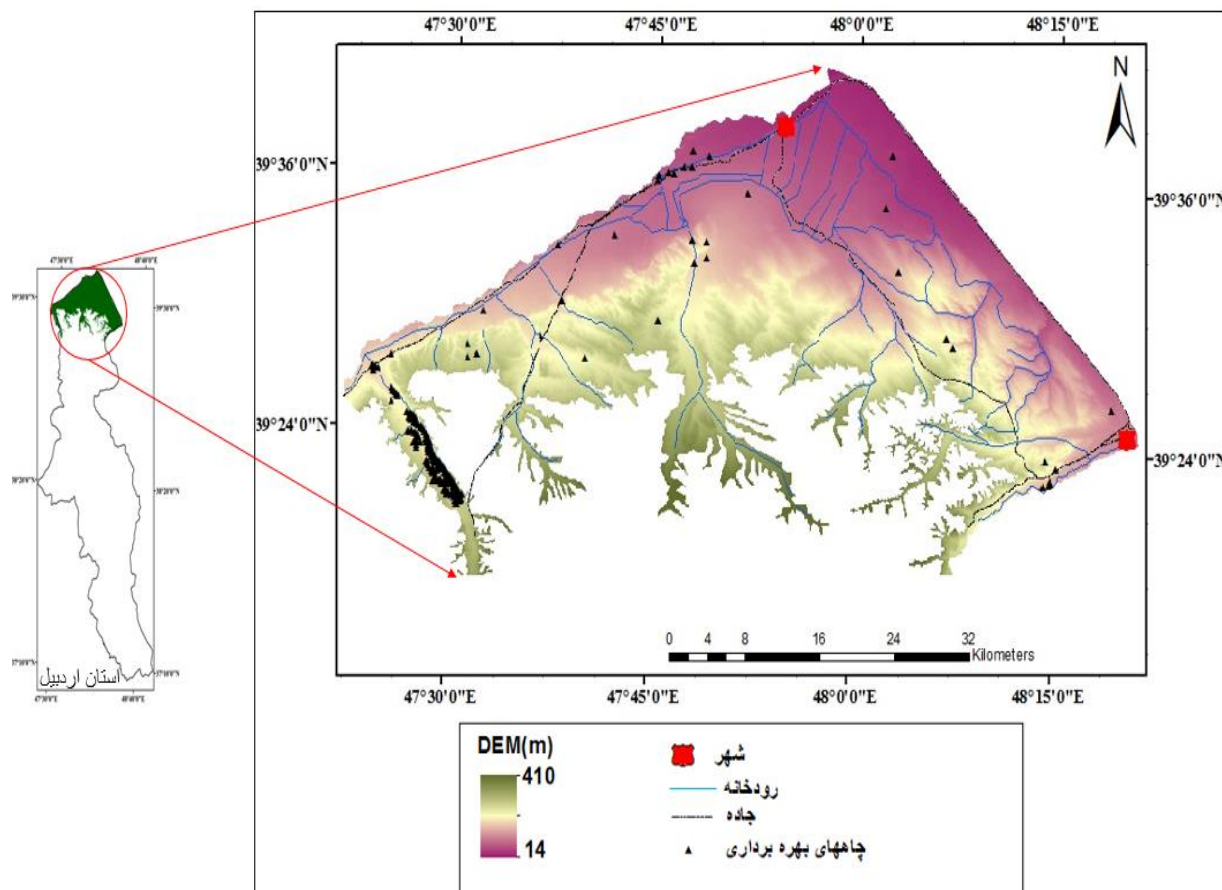
اصلاحی با ضریب همبستگی ۰/۷۳ می‌تواند به‌عنوان روش ارزیابی آسیب‌پذیری منطقه استفاده شود. مقایسه نتایج روش‌های SI و DRASTIC اصلاحی نشان داد در هر دو روش، آسیب‌پذیری آبخوان دشت ملایر در سه گروه آسیب‌پذیری کم، متوسط و زیاد قرار می‌گیرد. براساس نقشه نهایی به‌دست آمده از منطقه، ۱۵/۵ درصد از وسعت منطقه مطالعه شده در محدوده آسیب‌پذیری کم، ۷۱/۶۶ درصد در محدوده آسیب‌پذیری متوسط و ۱۲/۸۴ درصد از منطقه در محدوده آسیب‌پذیری زیاد قرار گرفته است.

اصغری مقدم و همکارانش (۱۳۸۸) آسیب‌پذیری دشت‌های بازرگان و پلدشت را با استفاده از روش DRASTIC براساس GIS بررسی کردند [۱۱]. در این پژوهش از روش DRASTIC و GIS به پردازش و تجزیه و تحلیل کیفی آبخوان پرداختند. شاخص DRASTIC برای کل منطقه ۷۱-۱۷۵ برآورد شد که ۳، ۳۷ و ۶۰ درصد از وسعت منطقه مطالعاتی به ترتیب در آسیب‌پذیری کم، متوسط و زیاد واقع شدند. برای صحت‌سنجی نقشه نهایی آسیب‌پذیری هم از داده‌های غلظت یون فلوراید استفاده شد.

دشت مغان از قطب‌های کشاورزی و دامپروری استان اردبیل محسوب می‌شود که به دلیل نبود مدیریت صحیح، آب‌های آلوده ناشی از کودهای کشاورزی و یا فضولات حیوانی موجب آلودگی لایه‌های خاک و آب زیرزمینی شده است. مطالعات قبلی بیشتر از یک یا چند روش منفرد برای تخمین آسیب‌پذیری آبخوان‌ها استفاده کرده‌اند. در حالی که در این تحقیق روش جدیدی ارائه خواهد شد که از ترکیب روش‌های رایج ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی (روش‌های DRASTIC، SINTACS و SI) بهره می‌برد. در ادامه، با به‌کارگیری روش پیشنهادی، برای نخستین بار به بررسی آسیب‌پذیری آبخوان دشت مغان در جهت حل مشکلات منطقه و مدیریت فعالیت‌های آلاینده پرداخته خواهد شد.

### منطقه مطالعه شده

آبخوان دشت مغان که توسط آبرفت‌های رودخانه ارس و شعبه‌های آن به‌وجود آمده، در شمال استان اردبیل و در مجاورت مرز جمهوری آذربایجان و رودخانه ارس قرار دارد (شکل ۱). این منطقه موقعیت جغرافیایی ۳۸/۵ تا ۳۹/۴



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و نقشه ارتفاعی رقومی (DEM) دشت مغان

( $I$ )؛ و هدایت هیدرولیکی آبخوان<sup>۷</sup> ( $C$ ). براساس روش DRASTIC، هریک از این پارامترها در محاسبه شاخص آسیب پذیری با اعمال یک ضریب وزنی (جدول ۱) و نرخ‌های توصیه شده، توسط رابطه ۱ مشارکت می کنند.

$$DI = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w \quad (1)$$

در رابطه ۱،  $DI$  بیانگر شاخص آسیب پذیری DRASTIC است. همچنین  $w$  بیانگر ضریب وزنی (به هر پارامتر DRASTIC با توجه به اهمیت تأثیر آن در محاسبه آسیب پذیری بین ۱ تا ۵ وزن داده می شود)،  $r$  بیانگر نرخ (برای هر قسمت از دشت نرخ در نظر گرفته می شود که عددی بین ۱ تا ۱۰ است) [۱۳] است. مقادیر بزرگ تر و کوچک تر شاخص  $DI$ ، به ترتیب نشان دهنده پتانسیل زیاد و کم آسیب پذیری آبخوان است.

## موارد و روش ها

### روش DRASTIC

روش DRASTIC برای نخستین بار توسط آلر و همکارانش در سال ۱۹۸۷ ارائه شده است [۴] و یکی از روش های ارزیابی آسیب پذیری مبتنی بر همپوشانی است و بر ارزیابی توصیفی و کمی آسیب پذیری تکیه دارد. این روش در مقیاس منطقه ای و براساس پارامترهای هیدروژئولوژیکی کنترل کننده آلودگی آب زیرزمینی به کار می رود. DRASTIC مخفف پارامترهای هیدروژئولوژیکی است که هفت پارامتر را شامل می شود: عمق آب زیرزمینی<sup>۱</sup> ( $D$ )؛ تغذیه خالص<sup>۲</sup> ( $R$ )؛ مواد تشکیل دهنده آبخوان<sup>۳</sup> ( $A$ )؛ بافت خاک<sup>۴</sup> ( $S$ )؛ توپوگرافی منطقه<sup>۵</sup> ( $T$ )؛ اثر منطقه غیراشباع<sup>۶</sup>

1. Depth of groundwater
2. Recharge
3. Aquifer media
4. Soil media
5. Topography (surface slope)
6. Impact of the vadose zone media

7. Conductivity

### پارامترهای روش DRASTIC

#### عمق آب زیرزمینی (D)

این پارامتر تعیین کننده مسیری است که آلاینده باید طی کند تا به سطح ایستابی برسد. عمق کم آب زیرزمینی سبب می شود آلاینده ها سریع تر به آب زیرزمینی راه یابند. برای تهیه این لایه از داده های سطح آب در چاه های مشاهداتی سال ۱۳۹۲، در محیط Arc GIS استفاده شده است. برای تهیه این لایه، ابتدا موقعیت جغرافیایی و عمق سطح ایستابی هر یک از چاه ها به محیط اکسل وارد شد، سپس در محیط Arc GIS به روش Kriging درون یابی و به حالت رستری درآمد.

#### تغذیه خالص (R)

تغذیه آب موجب می شود تا آلاینده به صورت عمودی انتقال یابد و به سطح ایستابی برسد و به صورت افقی در آبخوان حرکت کند. همچنین آب تغذیه ای حجم آب در دسترس برای پراکندگی و رقیق شدن آلاینده را در مناطق اشباع و غیراشباع کنترل می کند. این لایه از محاسبه میزان بیلان آب زیرزمینی و سپس درون یابی و رتبه دهی بر اساس نظریه آلر و همکارانش (۱۹۸۷) تهیه شد [۴].

#### محیط آبخوان (A)

خصوصیات مواد تشکیل دهنده منطقه اشباع مانند میزان تخلخل، جنس، اندازه ذرات و جورشدگی ذرات بر میزان پویایی و تحرک آلودگی و به بیانی فرایندهای رقیق سازی آلودگی مانند تجزیه شیمیایی، جذب و پخش تأثیرگذار است. با توجه به جنس مواد تشکیل دهنده آبخوان (بخش اشباع) و با استفاده از گزارش ها و نقشه های زمین شناسی و لاگ های حفاری، اقدام به تهیه این لایه شده است. برای این لایه ابتدا جنس مواد تشکیل دهنده بخش اشباع آبخوان مشخص و سپس رتبه دهی شد و در نهایت بعد از درون یابی به روش Kriging لایه رستری آن به دست آمد [۴].

#### لایه محیط خاک (S)

بافت محیط خاک بر میزان تغذیه و توانایی آلاینده ها برای نفوذ به محیط وادوز تأثیر می گذارد. وجود مواد دارای بافت

ریزدانه مانند سیلتورس، تراوایی خاک را کاهش می دهند و به عکس مواد دانه درشت تر مانند شن، نفوذ پذیری خاک و در نتیجه قابلیت انتقال آلاینده ها به سیستم آب زیرزمینی را افزایش می دهند. برای تهیه این لایه، از نقشه بافت محیط خاک استفاده شد و پس از درون یابی با استفاده از نظریه آلر و همکارانش (۱۹۸۷) رتبه دهی شد [۴].

#### توپوگرافی (T)

شیب توپوگرافی موجب کاهش ماندگاری آب روی سطح زمین و کاهش نرخ نفوذ می شود. به طوری که در شیب کم، فرصت نفوذ بیشتر و نیروی آلوده کننده گسیل افزایش می یابد. پس به ناحیه با شیب کمتر، رتبه بیشتر و ناحیه با شیب بیشتر رتبه کمتر تعلق خواهد گرفت. نقشه شیب با مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰، از طریق مدل ارتفاعی رقومی (DEM) منطقه تهیه شده است.

#### محیط غیراشباع (I)

تأثیر منطقه غیراشباع در آلودگی آبخوان، مشابه محیط خاک بوده و به نفوذ پذیری مواد تشکیل دهنده و خصوصیات محیط غیراشباع بستگی دارد. برای تهیه این لایه روشی مشابه با پارامتر محیط آبخوان استفاده می شود، با این تفاوت که ضخامت و جنس لایه های بالای سطح ایستابی در لاگ های حفاری استفاده می شود.

#### هدایت هیدرولیکی (C)

هدایت هیدرولیکی میزان آب نفوذ یافته به سیستم آب زیرزمینی را از طریق محیط آبخوان مشخص می سازد. پس مناطق دارای هدایت هیدرولیکی بیشتر در ارزیابی پتانسیل آب های زیرزمینی رتبه بیشتری را به خود اختصاص خواهند داد. برای به دست آوردن این لایه از اطلاعات مختص به نرخ هدایت هیدرولیکی در منطقه اشباع استفاده شده است، به این صورت که ابتدا قابلیت انتقال آب در محیط اشباع آبخوان با استفاده از لاگ های حفاری محاسبه شد. سپس با فرمت اکسل وارد محیط Arc GIS شد و با روش Kriging درون یابی و در نهایت رتبه دهی شد.

جدول ۱. مقایسه وزن نسبی پارامترهای روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی

وزن نسبی	پارامترهای روش		
	SI[۱۵]	SINTACS[۱۴]	DRASTIC[۴]
۰/۱۸۶	۵	۵	عمق آب زیرزمینی
۰/۲۱۲	۴	۴	تغذیه خالص
۰/۲۵۹	۳	۳	محیط آبخوان
-	۴	۲	نوع خاک
۰/۱۲۱	۲	۱	توپوگرافی
-	۵	۵	محیط غیراشباع
-	۳	۳	هدایت هیدرولیکی
۰/۲۲۲	-	-	کاربری اراضی

## روش SINTACS

روش SINTACS برای نخستین بار برای آسیب‌پذیری آبخوانی در جنوب ایتالیا به کار برده شده است [۱۴]. هفت پارامتر عمق سطح ایستابی (S)، تغذیه خالص (I)، اثر منطقه غیراشباع (N)، نوع خاک (T)، محیط آبخوان (A)، هدایت هیدرولیکی (C) و شیب (S) در این روش، مشابه با روش DRASTIC تهیه می‌شوند و تنها تفاوت این دو روش در فرایند وزن و رتبه‌دهی آنهاست (جدول ۱). در این روش نیز براساس میزان اهمیت پارامترها در انتقال آلودگی به جریان آب زیرزمینی رتبه‌ای بین ۱ تا ۱۰ و وزنی بین ۱ تا ۵ اختصاص داده می‌شود. در نهایت، شاخص آسیب‌پذیری SINTACS ( $I_{SINTACS}$ )، براساس رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$I_{SINTACS} = S_r S_w + I_r I_w + N_r N_w + T_r T_w + A_r A_w + C_r C_w + S_r S_w \quad (2)$$

## روش SI

روش SI برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان نسبت به آلاینده‌های کشاورزی ارائه شده است. پنج پارامتر عمق آب زیرزمینی (D)، تغذیه خالص (R)، محیط آبخوان (A)، توپوگرافی (T) و کاربری اراضی (LU) استفاده می‌شود [۱۵]. برای لایه کاربری اراضی از نقشه کاربری اراضی محدوده دشت مغان استفاده شد و رتبه‌دهی آن با استفاده از نظریه استایتر و همکارانش (۲۰۰۶) انجام گرفت؛ به این صورت که مناطق کشاورزی بیشترین رتبه و مراتع کمترین رتبه را به خود اختصاص دادند [۱۵]. هر پنج پارامتر براساس واحدهای تشکیل‌دهنده بین ۰ تا ۱۰۰ ارزش‌گذاری می‌شوند

و پس از وزن‌دهی (جدول ۱)، شاخص (SI) طبق معادله ۳ محاسبه می‌شود.

$$SI = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + T_r T_w + LU_r LU_w \quad (3)$$

## آلودگی نیترات

برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌های DRASTIC، SINTACS و SI از مقادیر غلظت نیترات اندازه‌گیری شده در ۲۱ چاه بهره‌برداری در پاییز ۱۳۹۴ استفاده شد. آنالیز نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر صورت گرفت. کمترین میزان غلظت نیترات ۴/۱۶ میلی‌گرم بر لیتر و بیشترین میزان آن ۱۴۱/۴۳ میلی‌گرم بر لیتر اندازه‌گیری شد. طبق اطلاعیه بهداشت جهانی (WHO) مقدار استاندارد نیترات در آب‌های آشامیدنی حداکثر باید ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر باشد که در این صورت میزان غلظت نیترات اندازه‌گیری شده در منطقه، حدود پنج برابر بیشتر از مقدار استاندارد اعلام‌شده توسط سازمان بهداشت جهانی است.

## مدل ترکیبی

در این بررسی، روش جدیدی به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی ارائه شده است. روش ارائه‌شده با ترکیب نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های رایج ارزیابی پتانسیل آب‌های زیرزمینی، شامل روش‌های DRASTIC، SINTACS و SI از مزایای هر سه روش بهره می‌برد. در ترکیب نتایج آسیب‌پذیری روش‌های یادشده، وزن هریک از روش‌ها توسط شاخص همبستگی (CI) بین نتایج نیترات و شاخص آسیب‌پذیری تعیین می‌شود. به بیان دیگر، روشی که شاخص همبستگی بیشتری داشته باشد، وزن بیشتری را نیز به خود

ارزشی ۱ دارند، در عدد ۲ و دسته‌ای که اختلاف ۲ دارند، در عدد ۱ ضرب می‌شوند. در نهایت، از جمع این مقادیر ضریب همبستگی (CI) به دست می‌آید [۱۶].

شایان یادآوری است برای چنین ترکیبی باید توزیع مکانی شاخص آسیب پذیری هر سه روش در بازه یکسانی تغییر کند. بدین منظور نتایج آسیب پذیری بین بازه صفر و یک نرمال سازی شده است. رابطه ۴ چگونگی ترکیب نتایج روش‌های DRASTIC، SINTACS و SI را نشان می‌دهد:

$$VI_{total} = \frac{CI_{DRASTIC} \times DRASTIC + CI_{SINTACS} \times SINTACS + CI_{SI} \times SI}{\sum CI_i} \quad (4)$$

#### نتایج به دست آمده از روش DRASTIC

پس از به کارگیری رابطه ۱ و جدول ۱، نقشه توزیع مکانی شاخص آسیب پذیری آب‌های زیرزمینی دشت مغان به روش DRASTIC به دست آمده است (شکل ۵). شاخص آسیب پذیری به دست آمده از این روش در بازه‌ای بین ۵۰ تا ۱۳۳ محاسبه شد. بر اساس طبقه بندی آلر و همکارانش (۱۹۸۷) [۴] ۴۴/۵۶ درصد از مساحت منطقه مطالعه شده در محدوده با آسیب پذیری کم، و باقی قسمت‌های دشت در محدوده آسیب پذیری متوسط واقع شده است. بخشی که در محدوده آسیب پذیری متوسط قرار دارد، بیشتر در قسمت‌های غربی و مرکزی دشت مطالعه شده واقع شده است که در این قسمت‌ها عمق آب زیرزمینی بسیار کمتر است.

#### نتایج به دست آمده از روش SINTACS

بعد از رتبه‌دهی و وزن‌دهی لایه‌های مختص به پارامترهای روش SINTACS مطابق با نرخ‌های توصیه شده در جدول ۱، نقشه نهایی آسیب پذیری به دست آمده از روش SINTACS با به کارگیری رابطه ۲ و جدول ۱ به دست آمده است (شکل ۵). شاخص آسیب پذیری به دست آمده از این روش در بازه‌ای بین ۵۸ تا ۱۶۰ محاسبه شده است که ۳۲ درصد از دشت مد نظر در محدوده آسیب پذیری کم، ۶۳ درصد در محدوده آسیب پذیری متوسط و ۵ درصد از منطقه مطالعاتی در محدوده آسیب پذیری زیاد قرار داشت. به طوری که بیشترین مساحت از دشت مد نظر در محدوده آسیب پذیری متوسط (بیشتر در بخش‌های مرکزی دشت) قرار دارد.

اختصاص خواهد داد [۱۶]. برای بررسی همبستگی این مدل‌ها از داده‌های نیترا اندازه‌گیری شده و ضریب همبستگی (CI) در سه سطح آسیب پذیری کم، متوسط و زیاد استفاده شده است. طی این محاسبات داده‌های غلظت نیترا و میزان آسیب پذیری در هر سه مدل، به سه دسته کم، متوسط و زیاد تقسیم می‌شود. سپس آن دسته از داده‌های نیترا که در رده یکسانی با نقشه‌های آسیب پذیری قرار می‌گیرند در سه ضرب می‌شوند. آن دسته‌ای که اختلاف

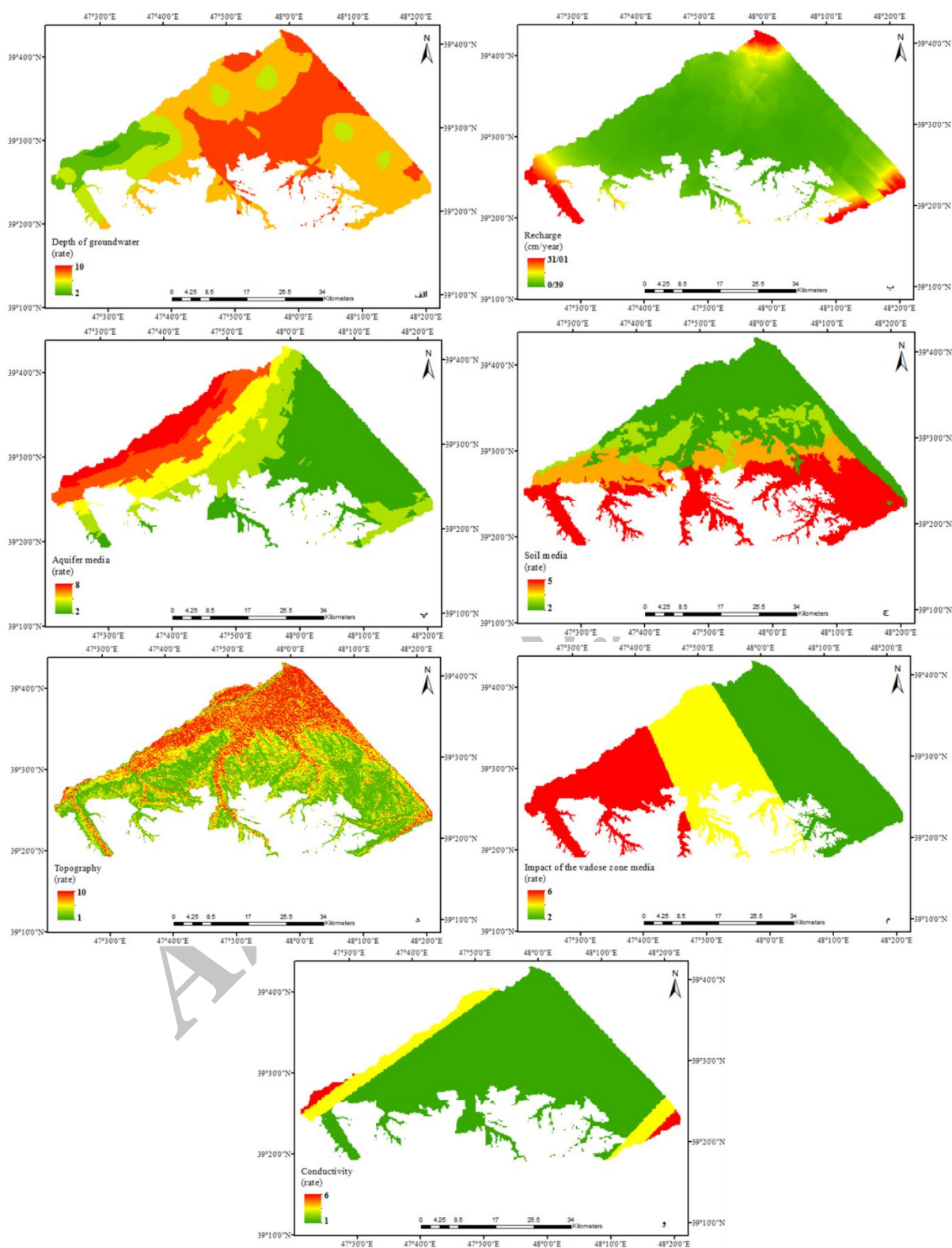
در رابطه یاد شده عبارت‌های DRASTIC، SINTACS و SI توزیع مکانی شاخص آسیب پذیری هر یک از روش‌ها را به صورت نرمال شده نشان می‌دهد. شایان یادآوری است نرمال سازی نتایج توزیع مکانی شاخص آسیب پذیری هر یک از روش‌ها توسط رابطه ۵ انجام شده است. در ادامه، چگونگی محاسبه هر یک از روش‌ها پرداخته بررسی خواهد شد. همچنین  $VI_{total}$  و  $CI_i$  به ترتیب بیانگر شاخص همبستگی (بین داده‌های نیترا و هر یک از روش‌ها) و شاخص آسیب پذیری به دست آمده از ترکیب روش‌هاست.

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (5)$$

در رابطه یاد شده  $X$  بیانگر شاخص آسیب پذیری و  $X_{norm}$  شاخص نرمال شده آسیب پذیری روش بررسی شده را نشان می‌دهد. همچنین  $X_{min}$  و  $X_{max}$  به ترتیب بیانگر حد بالا و پایین شاخص آسیب پذیری روش بررسی شده است.

#### بحث و نتایج

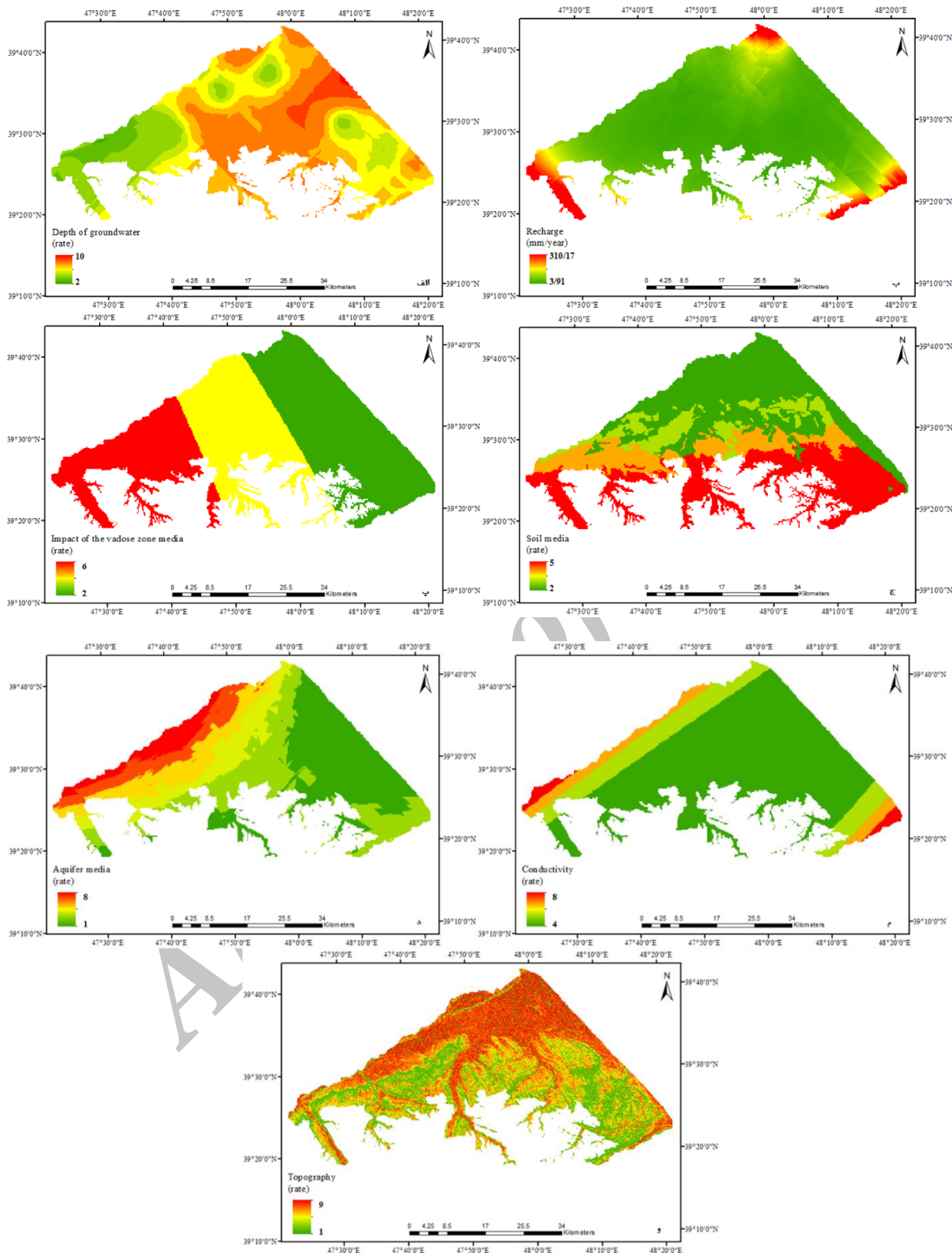
لایه‌های رستری تهیه شده از پارامترهای مورد نیاز در روش‌های ارزیابی آسیب پذیری DRASTIC، SINTACS و SI در شکل ۲ نشان داده شده است. این لایه‌ها پس از اعمال نرخ‌ها DRASTIC [۴]، SINTACS [۱۴] و SI [۱۵] در هر یک از روش‌ها و وزن‌های ارائه شده در جدول ۱، توسط روابط ۱-۳ همپوشانی شده است. در ادامه، به بررسی نتایج به دست آمده از هر یک از روش‌های یاد شده پرداخته خواهد شد.



شکل ۲. لایه‌های مختص به پارامترهای روش‌های DRASTIC

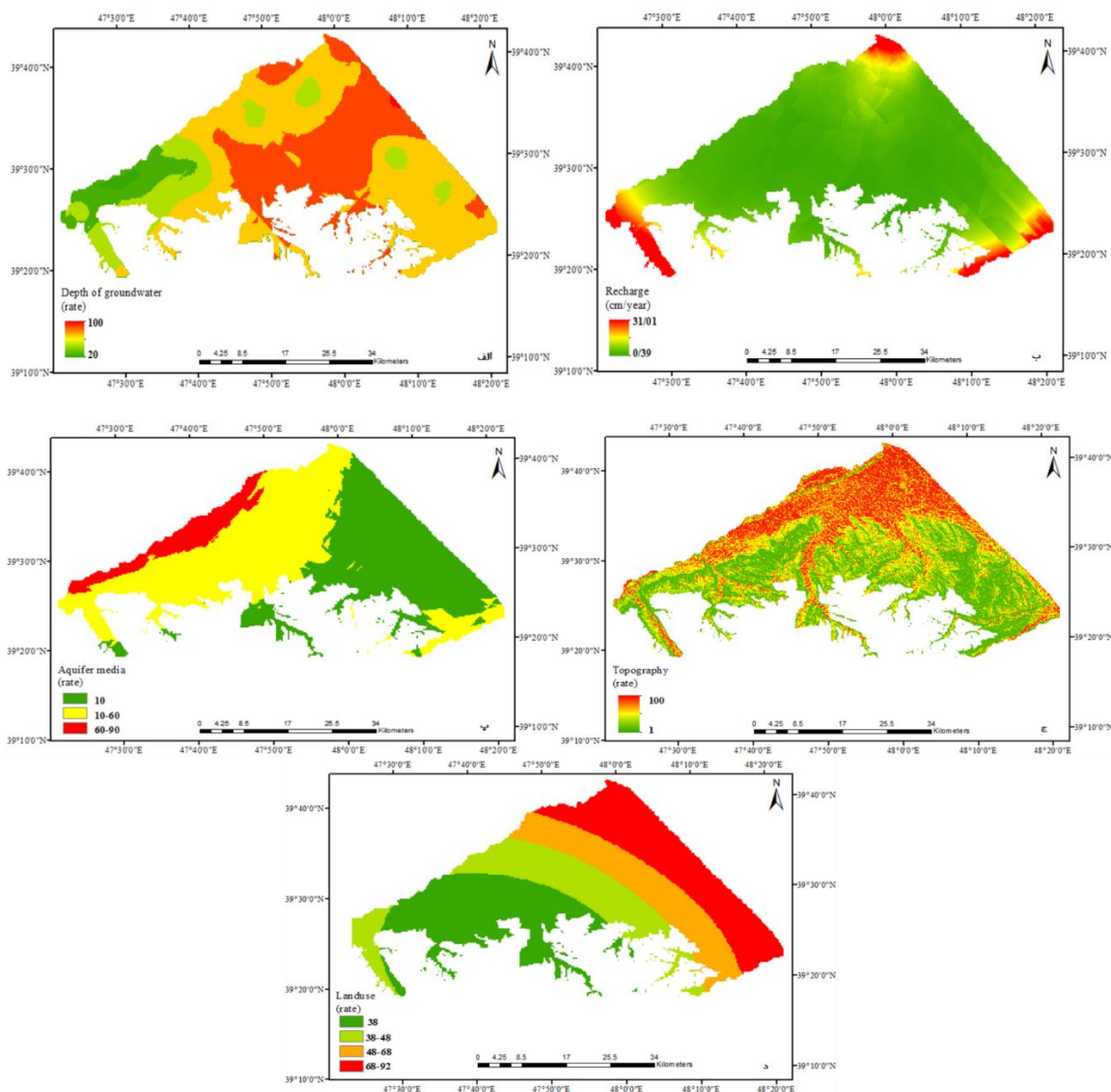
(الف) عمق آب زیرزمینی؛ (ب) تغذیه؛ (پ) مواد آبخوان؛ (ج) بافت خاک؛ (د) توپوگرافی؛ (م) ناحیه غیراشباع؛ (و) هدایت هیدرولیکی





شکل ۳. لایه‌های مختص به پارامترهای روش‌های SINTACS

(الف) عمق آب زیرزمینی؛ (ب) تغذیه؛ (پ) اثر محیط غیراشباع؛ (ج) بافت خاک؛ (د) محیط آبخوان؛ (م) هدایت هیدرولیکی؛ (و) توپوگرافی



شکل ۴. لایه‌های مختص به پارامترهای روش‌های SI

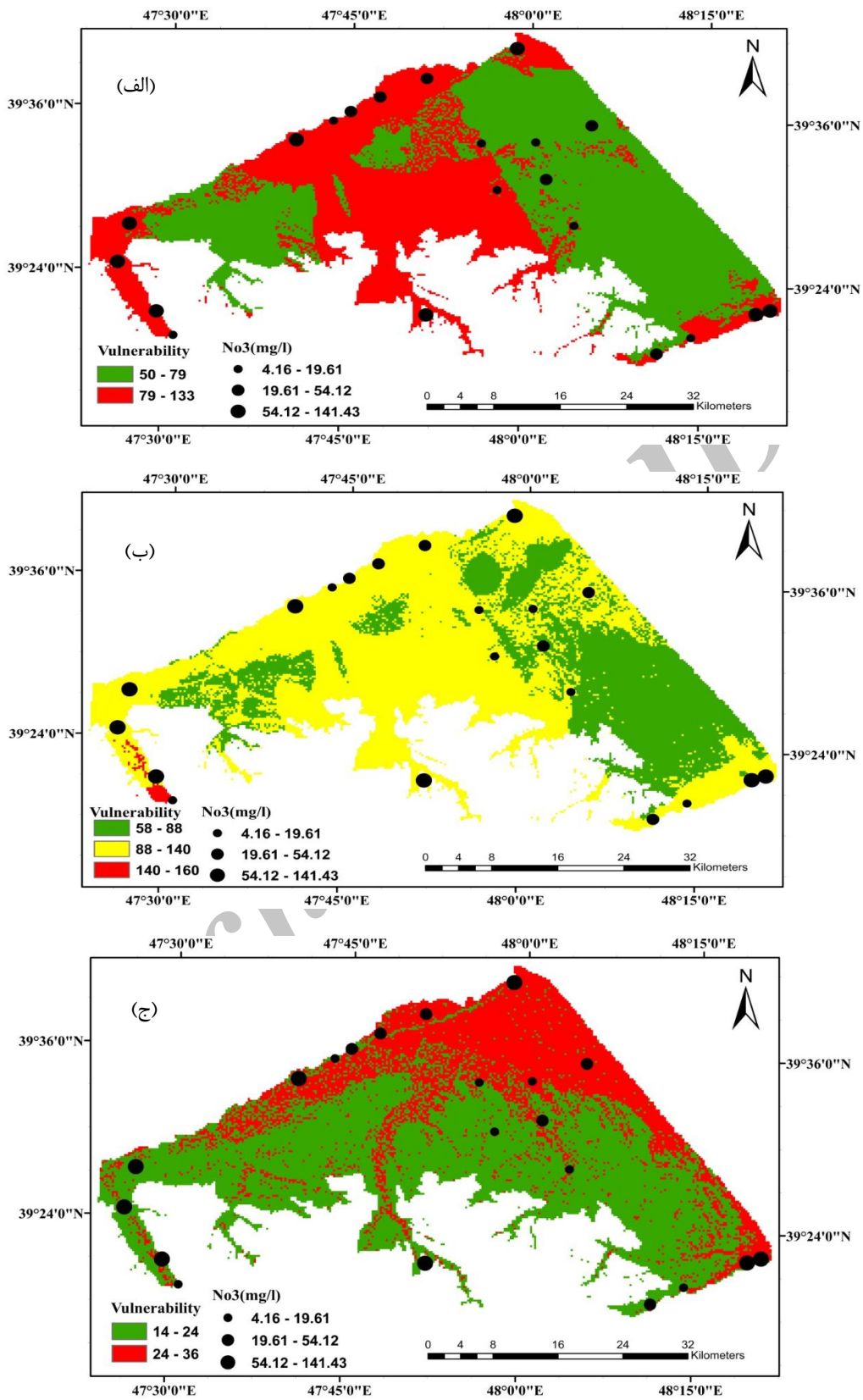
(الف) عمق آب زیرزمینی؛ (ب) تغذیه؛ (پ) محیط آبخوان؛ (ج) توپوگرافی؛ (د) اراضی کاربری

#### صحت‌سنجی

صحت‌سنجی روش‌های DRATIC، SINTACS و SI با استفاده از مقادیر غلظت نیترات صورت گرفته است. برای بررسی همبستگی این مدل‌ها از داده‌های نیترات اندازه‌گیری شده و ضریب همبستگی (CI) استفاده شده است. بر این اساس، ضریب همبستگی (CI) برای روش DRATIC ۵۰، برای روش SINTACS ۴۸ و برای روش SI ۴۷ برآورد شده است. بنابراین، روش DRATIC بیشترین میزان همبستگی را با داده‌های غلظت نیترات نشان داده است. بعد از آن به ترتیب روش SINTACS و روش SI همبستگی کمتری را نشان داده‌اند (شکل ۵).

#### نتایج به‌دست‌آمده از روش SI

نقشه توزیع مکانی آسیب‌پذیری منطقه مطالعه شده با استفاده از روش SI پس از به‌کارگیری رابطه ۳، نرخ‌های توصیه‌شده و وزن‌های ارائه‌شده در جدول ۱، در شکل ۵ نشان داده شده است. شاخص آسیب‌پذیری به‌دست‌آمده با روش SI در بازه‌ای بین ۱۴ تا ۳۶ محاسبه شده که ۶۵ درصد از مساحت دشت، در محدوده‌ای با آسیب‌پذیری کم (بیشتر در بخش‌های جنوبی دشت) واقع شده است که این قسمت‌ها بیشتر اراضی کاربری مراتع دارند و باقی مساحت دشت در محدوده آسیب‌پذیری متوسط قرار دارد.



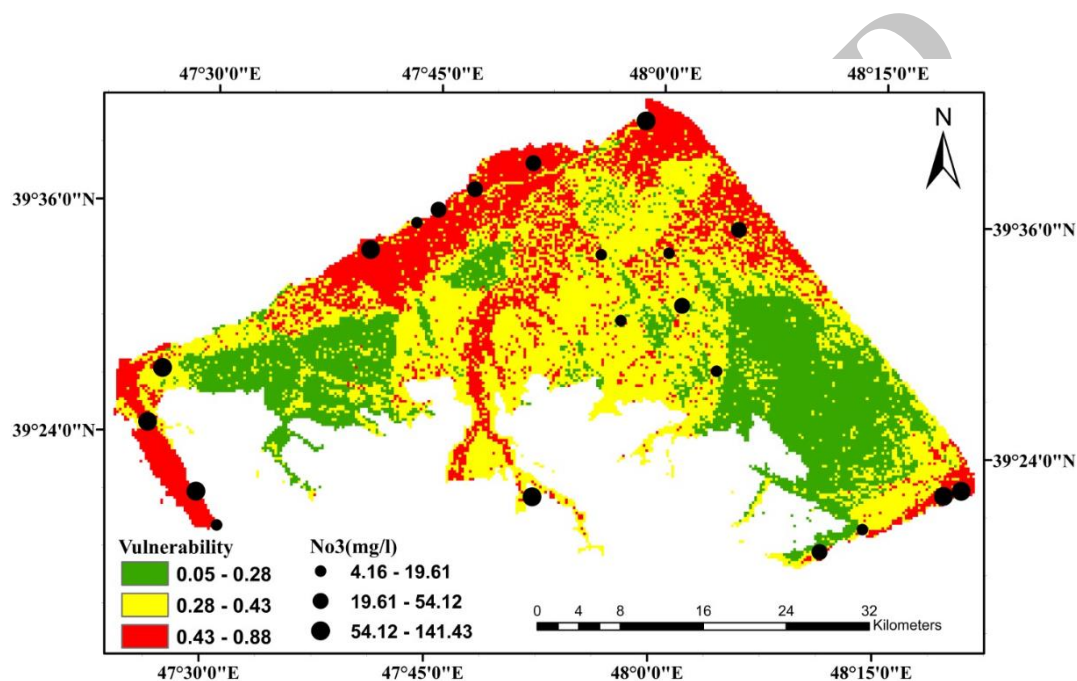
شکل ۵. انطباق یون نیترات با نقشه آسیب پذیری  
 الف) روش DRASTIC؛ ب) روش SINTACS؛ ج) روش SI

به دست آمده از ترکیب وزن دار، شاخص همبستگی زیادی نسبت به سه روش دیگر دارد ( $CI=52$ ).

جدول ۲. مقایسه مقادیر CI روش های مختلف ارزیابی آسیب پذیری آب های زیرزمینی

روش ها	ضریب همبستگی محاسباتی (CI)
DRASTIC	۵۰
SINTACS	۴۸
SI	۴۷
مدل ترکیبی	۵۲

با بررسی نتایج موجود در شکل ۶ می توان دریافت هریک از روش ها در برخی نواحی عملکرد مناسبی نداشته اند. به منظور حل این مشکل پس از اینکه لایه های مختص به توزیع مکانی شاخص آسیب پذیری هر سه روش تهیه و نرمال سازی شد و همچنین شاخص همبستگی بین نتایج آسیب پذیری و داده های نیترات محاسبه شد، نقشه ترکیبی شاخص آسیب پذیری آب های زیرزمینی توسط رابطه ۱ محاسبه شده است (شکل ۵). با بررسی نتیجه به دست آمده و محاسبه شاخص همبستگی مشاهده شد نقشه های



شکل ۶. نقشه آسیب پذیری دشت مغان با استفاده از روش ترکیبی

نسبت به سه روش یاد شده دارد. بنابراین، می توان اظهار داشت که روش پیشنهادی دارای عملکرد بهتری نسبت به دیگر روش ها برای بررسی آسیب پذیری دشت مغان است. این رویکرد جدید می تواند برای ارزیابی آسیب پذیری سایر آبخوان ها نیز مفید واقع شود. براساس نتایج به دست آمده مشاهده شد که قسمت های شمالی و غربی دشت، بیشتر در محدوده آسیب پذیری زیاد واقع شده که در این قسمت ها عمق آب زیرزمینی کم است. بخش های مرکزی دشت نیز در محدوده آسیب پذیری متوسط واقع شده که در این قسمت ها جنس منطقه غیر اشباع و محیط آبخوان از ذرات دانه درشت تشکیل شده است. بنابراین، به منظور حفاظت منابع آب زیرزمینی دشت مغان بهتر است که در

### نتیجه گیری

در این پژوهش آسیب پذیری آبخوان دشت مغان با استفاده از رویکرد جدیدی بررسی شده است که از ترکیب وزن دار روش های DRASTIC، SINTACS و SI بهره می برد. به منظور صحت سنجی نتایج روش های استفاده شده، از داده های غلظت نیترات اندازه گیری شده از چاه های بهره برداری منطقه و محاسبه شاخص همبستگی استفاده شده است. روش پیشنهادی از ترکیب وزن دار لایه های نرمال شده توزیع مکانی شاخص آسیب پذیری بهره می برد به طوری که شاخص همبستگی وزن هر روش را تعیین می کند. با بررسی نتایج مشاهده شد که روش پیشنهادی با داده های غلظت نیترات بیشترین میزان همبستگی را

- [9]. Corniello A, Ducci D, Napolitano P. Comparison between parametric methods to evaluate aquifer pollution vulnerability using a GIS: An example in the Piana Campana. *Engineering Geology and the Environment*, Balkema, Rotterdam, The Netherlands. 1997; P: 1721-1726.
- [10]. Dixon B. Groundwater vulnerability mapping: a GIS and fuzzy rule based integrated tool. *Journal of Applied Geography*. 2005b; 25, 327-347.
- [11]. Asghari Moghaddam A, Fijani E, Nadiri AA. Groundwater Vulnerability Assessment Using GIS-Based DRASTIC Model in the Bazargan and Poldasht Plains. *Journal of Environmental Studies*. 2010; 35, 52
- [12]. Meteorological Organization Ardabil. 2002.
- [13]. Panagopoulos G, Antonakos A, Lambrakis N. Optimization of DRASTIC model for groundwater vulnerability assessment, by the use of simple statistical methods and GIS. *Hydrology Journal*(published online). 2005.
- [14]. Civita M, Massimo. *Legenda unificata per le Carte della vulnerabilita dei corpi idrici sotterranei/ Unified legend for the aquifer pollution vulnerability Maps, Studi sulla Vulnerabilita degli Acquiferi*”, Pitagora Edit, Bologna. 1990.
- [15]. Stigter TY, Ribeiro L, Carvalho Dill AMM. Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinisation and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal. *Hydrogeology*. 2006; 14: 79-99.
- [16]. Nadiri AA, Garekhani M, Khatibi R, Sadeghfam S, Asghari Moghaddam A. Groundwater vulnerability indices conditioned by Supervised Intelligence Committee Machine (SICM). *Science of the Total Environment*. 2017; 574 (2017) 691–706.
- [17]. Fijani E, Nadiri AA, Asghari Moghaddam A, Tsai F, Dixon B. Optimization of DRASTIC Method by Supervised Committee Machine Artificial Intelligence to Assess Groundwater Vulnerability for Maragheh-Bonab Plain Aquifer, Iran. *Journal of Hydrology*. 2013; 530, 89-100.

این قسمت‌ها از کودهای شیمیایی و حیوانی کمتری استفاده شود. فعالیت‌های دامپروری در این محدوده‌ها با توجه به بخش‌های با آسیب‌پذیری کم توسعه داده شود و در بخش‌های با آسیب‌پذیری زیاد این فعالیت‌ها کمتر شود.

#### منابع

- [1]. Maarofi S, Soleymani S, Ghobadi M, Rahimi Gh, Maarofi H. Malayer aquifer vulnerability assessment using models DRASTIC, SI and SINTACS. *Soil and Water Research Journal*. 2011; 19(3). [Persian]
- [2]. Vrba J A, and Zaporozec A. *Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability*. International Contribution for Hydrogeology. Hannover, Germany. 1994: 131 p.
- [3]. Rangzan K, Firuzabadi P, Mirzaee L, and Alijani F. Interpolation varamin plain aquifer vulnerability by the DRASTIC models, experimental evaluation of unsaturated region in GIS environment. *Iranian Geology Journal*. 2008; 6: 21-32. [Persian].
- [4]. Aller L, Bennet T, Leher JH, Petty RJ, Hackett G. DRASTIC: A Standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydro-geological settings. *Kerr Environmental Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency Report*. 1987; (EPA/600/2-87/035).
- [5]. Lee S. Evaluation of waste disposal site using the DRASTIC system in Southern Korea. *Environmental Geology*. 2003; 44: 654-664.
- [6]. Antonakos A, Lambrakis N. 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*. 2007; 333, 288-304.
- [7]. Harter T, Walker L. *Assessing vulnerability of Groundwater*. US Natural Resources Conservation Service.
- [8]. Sadeghiravesh M, Zehtabian Gh. Khezrabad aquifer vulnerability assessment using models DRASTIC. *Environmental Journal*. 2013; 55