

## تهیه‌ی نقشه آسیب پذیری آلودگی آبخوان بقیع خراسان رضوی با کاربرد دو روش COP و

### PaPRIKa، استفاده از سنجش از دور و GIS

محمدعلی زنگنه اسدی<sup>۱</sup>، نادیا بقائی نژاد<sup>۲\*</sup>، شیرین غلامپور<sup>۳</sup>، علی بهشتی قله زو<sup>۴</sup>

#### چکیده

آبخوانهای کربناته در مقیاس جهانی از مهمترین منابع تامین کننده‌ی آب می‌باشند. ارزیابی آسیب پذیری و تهیه‌ی نقشه‌ی پهنه بندی خطر، راهکاری مهم در مدیریت منابع آب کارست به شمار می‌روند. گاهی به دلیل نازک بودن ضخامت خاک، جریان متمرکز در اپی کارست، و تغذیه‌ی نقطه‌ای از طریق حفره‌های بلعنده نسبت به آلودگیها آسیب پذیرترند. هدف از این پژوهش، تهیه‌ی نقشه‌ی آسیب پذیری آبخوان حوضه‌ی بقیع نیشابور در برابر انتشار آلودگی با استفاده از دو شبیه COP و PaPRIKa و ارائه‌ی راهکارهای مدیریتی برای حفظ این منابع است. فراسنجهای مربوط به هر دو روش مذکور در محیط نرم‌افزار GIS تعیین، و بعد از یکسان سازی مقیاس و ترکیب لایه‌ها، فراسنجهای بر طبق جداول یک و دو ارزش گذاری شده و در نقشه-ی آسیب پذیری هر دو روش به دست آمد. در نهایت، نتایج مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند. برپایه‌ی نتایج به دست آمده با کاربرد روش PaPRIKa، منطقه‌ی مورد مطالعه از نظر میزان آسیب پذیری به سه رده‌ی خیلی زیاد، زیاد و متوسط پهنه بندی گردید، که به ترتیب ۸.۹ درصد، ۶۳.۸ درصد و ۲۷.۲ درصد از مساحت منطقه را در بر گرفته‌اند. نتایج نشان دادند که شاخص COP برای منطقه مورد مطالعه بین ۰.۵ تا ۱۲ متغیر می‌باشد؛ بنابراین محدوده‌ی مورد مطالعه از نظر آسیب پذیری به چهار رده‌ی مختلف پهنه بندی گردید که عبارتند از: آسیب پذیری زیاد، متوسط، کم و خیلی کم، که به ترتیب ۹.۸ درصد، ۵۰ درصد، ۲۵.۶ درصد و ۱۴.۶ درصد از مساحت منطقه را در بر گرفته‌اند.

**واژه‌های کلیدی:** آسیب پذیری، حوضه‌ی بقیع، کارست، نمایه‌ی COP، روش PaPRIKa

<sup>۱</sup> - دانشیار گروه زمین ریخت شناسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

<sup>۲</sup> - دانشجوی کارشناسی ارشد هیدروژئومورفولوژی در برنامه ریزی محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

<sup>۳</sup> - دانشجوی کارشناسی ارشد هیدروژئومورفولوژی در برنامه ریزی محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

<sup>۴</sup> - دانشجوی کارشناسی ارشد هیدروژئومورفولوژی در برنامه ریزی محیطی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

\*- نویسنده مسوول مقاله: n.baghaei1990@gmail.com

## مقدمه

نگهداری محیط‌های آبی بخصوص آب‌های زیر زمینی، معضلی است که امروزه بشر با آن درگیر است (مظفری زاده و سجادی، ۱۳۹۱). اشکال و فرایندهای زمین ریخت شناسی از مهمترین عوامل تأثیرگذار در شکل گیری و حجم منابع آب زیرزمینی محسوب می شوند. از میان این شکلها، منابع کارستیک، و همچنین عوامل زمین ساختی هر منطقه نقش مهمی را در نفوذپذیری و تغذیه‌ی آب‌های زیرزمینی ایفا می‌کنند (کریشنامورثی و سرینویاس، ۱۹۹۵). نفوذ آلاینده‌ها را به درون سامانه‌ی آب زیرزمینی آسیب پذیری می‌نامند. آسیب پذیری از نظر مفهومی به دو دسته‌ی ذاتی و ویژه تقسیم بندی شده (افروزی و محمد زاده، ۱۳۹۲)؛ و این امر می تواند وابسته به تأثیرات انسانی و طبیعی باشد (وربا و زاپورازس، ۱۹۹۴). ساختار سامانه‌های کارست بسیار پیچیده و ناهمگن می‌باشند (منجین، ۱۹۹۵؛ باکالوویژ، ۱۹۹۵؛ فورد و ویلیمز، ۲۰۰۷ و وایت، ۲۰۰۷)؛ با وجود این پیچیدگی، آلودگی می تواند به سرعت به آب‌های زیرزمینی پیوسته گردیده و در مجاری کارستی و در مسافتهای طولانی مهاجرت کند (گلداسچیر، ۲۰۰۵). سرعت نفوذ آب در سامانه‌های کارستی می‌تواند تحت تاثیر ویژگیهایی مانند ته‌نشینه‌های پوشاننده‌ی این سامانه‌ها باشد (اندرو و همکاران، ۲۰۰۹؛ زوواهلن ۲۰۰۴). در مناطق کارستی، آب جمع شده در حفره‌های بسته یا فرو چاله‌ها از راه چاه‌های فروکش بطور مستقیم به مجراهای زیرزمینی نفوذ می‌کند (قربانی و اونق، ۱۳۹۱). به دلیل این که پاکسازی آبخوانهای کارستی نسبت به سایر منابع مستلزم زمان و هزینه زیادی می باشد، حفاظت از آبخوانهای کارستی و ارزیابی این منابع بسیار مهم و حیاتی است (افراسیایان، ۲۰۰۷). علاوه بر ارزیابی آسیب-پذیری تهیه‌ی نقشه‌ی خطر، و پهنه بندی منطقه راهکاری مهم در مدیریت منابع آب کارستی می باشد (عباسی و محمدی، ۱۳۹۲). نگهداری آب‌های زیرزمینی نه تنها برای شرب انسان مهم است؛ بلکه برای حفظ جریان پایه رودخانه‌ها نیز در هر منطقه ضروری است (پیری و بامری، ۱۳۹۳). مدیریت آب‌های زیرزمینی کارستی نقش بسیار مهمی بخصوص در مناطق خشک و نیمه خشک، دارد (دیجونگ و همکاران، ۲۰۱۱). منابع آب زیرزمینی، به

مدیریت کمی و کیفی این منابع نیازمند است. مطالعه‌ی سازندهای کارستی از آن جهت که ۲۰٪ از مساحت کره زمین بر روی آنها واقع شده و آب مورد نیاز جمعیت قابل توجهی از جهان را تامین می کنند حائز اهمیت است؛ بدین ترتیب، در این پژوهش از دو روش PaPRIKa و COP در محیط GIS برای تهیه بندی آسیب پذیری آبخوان کارستی استفاده شده است. روش PaPRIKa، ویژگیهای کارست را در ارزیابی آسیب پذیری آبخوان در نظر می‌گیرد که این خصوصیات شامل: عامل P (لایه‌های بالایی محافظ آب‌های زیر زمینی)، عامل R (نوع سنگ در ناحیه‌ی اشباع)، عامل I (نفوذ سطحی)، و عامل Ka (ویژگیهای کارست) می باشند (کاووری و همکاران، ۲۰۱۱). روش COP برای ارزیابی آسیب پذیری ذاتی آبخوانهای کربناته در چهارچوب معیار اروپایی European COSTAction620 ارائه شده است (معصومی خوش و همکاران، ۲۰۱۳). این روش خصوصیات لایه‌های پوشاننده سطح آب زیرزمینی (عامل O)، تجمع جریان آب زیرزمینی (عامل C)، و بارش بر روی آبخوان (عامل P)، را به عنوان فراسنجهای ارزیابی آسیب پذیری ذاتی آب زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌دهد (باقرزاده و همکاران، ۱۳۸۹). در سالیان گذشته، روشهای EPIK و PI بطور ویژه برای ارزیابی آسیب پذیری در نواحی کارستی ارائه شده، اما نتایج آنها چندان رضایت بخش نبوده اند (گلداسچیر، ۲۰۰۵). و یاس و همکاران، (۲۰۰۴) روش COP را به منظور ارزیابی آسیب پذیری ذاتی آبخوانهای کربناته ارائه داده و نتایج قابل قبولی به دست آوردند. کاووری و همکاران (۲۰۰۶) روش جدیدی را برای ارزیابی آسیب پذیری در مناطق کارستی جنوب فرانسه عرضه نموده، و آن را PaPRIKa نام نهادند. مارین و همکاران (۲۰۱۲) دو روش COP و PRI را در مناطق اسپانیا و فرانسه مورد مقایسه قرار دادند. آنها در پی نتایج خود به موثرند بودن این دو روش نسبت به روشهای دیگر در ارزیابی آبخوانهای کارستی دست یافتند. چالیکاکیس و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی سهم روشهای ژئوفیزیکی در اکتشاف سامانه‌های کارستی پرداختند. آنها پس از انجام آزمایشهای ژئوفیزیکی پی بردند که این کار، جزء روشهای رایج برای کشف آبخوانهای کارستی می‌باشند. وجه مشخصه‌ی این مقاله، مقایسه این دو روش در

عاملهای فوق به دست می‌آید. در نقشه‌ی R (نوع سنگ)، سنگ‌شناسی و میزان شکستگی در ناحیه‌ی اشباع مورد توجه است. نقشه‌ی I (نفوذ سطحی)، بیانگر تمرکز انتشار نفوذ سطحی و اندازه‌ی شیب است. نقشه‌ی Ka (توسعه‌ی کارست شدگی)، تعیین کننده‌ی ظرفیت زهکشی و شبکه‌ی مجاری کارست است که بر پایه تحلیل آب نگار، و یا آزمون ردیابهای مصنوعی قرار دارد. برای محاسبه‌ی شاخص آسیب پذیری، چهار نقشه یاد شده با استفاده از اعمال ضرایب طبق رابطه‌ی زیر ترکیب می‌شود:

$$\text{PaPRIKa Index} = 0.2 P + 0.2 R + 0.4 I + 0.2 Ka$$

عاملهای ذکر شده در هر کدام از روشها در محیط GIS ایجاد گردیده، بعد از یکسان سازی مقیاس و ترکیب لایه‌ها، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته و نقشه‌ی نهایی آن بر اساس جدول مربوطه ارزش گذاری و تهیه شده است (جدول ۱).

روش COP به ویژگیهای حوضه‌ی کارستی توجه دارد؛ بنابراین لایه‌های مورد نیاز با توجه به الگوی روش COP ایجاد شدند (ویاس، ۲۰۰۶). این روش خصوصیات لایه‌های پوشاننده‌ی سطح آب زیرزمینی (عامل O)، تمرکز جریان آب زیرزمینی (عامل C)، و بارش بر روی آبخوان (عامل P)، را به عنوان فراسنجهای ارزیابی آسیب پذیری ذاتی آب زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌دهد (باقرزاده و همکاران، ۱۳۸۹). عامل O نشان دهنده‌ی ظرفیت خاک پوشاننده آبخوان (بافت و ضخامت) و سنگ‌شناسی ناحیه‌ی غیراشباع (شکستگی، ضخامت هر لایه و شرایط محدوده) است. برای عامل C، زمین ریخت شناسی کارست، شیب و پوشش گیاهی مورد توجه است. عامل P، متغیرهای مکانی و زمانی بارش را مورد توجه قرار می‌دهد که در انتقال آلودگی بخصوص در آبخوانهای بزرگ، نقش ایفا می‌کند. شاخص آسیب پذیری COP، از ضرب عاملهای فوق به دست می‌آید (رابطه‌ی ۱)، (جدول ۲).

$$\text{COP index} = C.O.P \quad \text{رابطه‌ی (۱)}$$

هر دو روش COP و PaPRIKa به خصوصیات حوضه‌ی کارستی توجه دارند، لایه‌های مورد نیاز با توجه به الگوی روش COP و PaPRIKa در محیط نرم افزار GIS تعیین شده، پس از آن تمام لایه‌ها با یکدیگر ترکیب گردیده، و در نهایت، با توجه به جداول یک و دو ارزش-

ارزیابی آسیب پذیری آبخوانهای کارستی نسبت به روشهای به کار برده شده در پژوهشهای قبلی می‌باشد.

### منطقه‌ی مورد مطالعه

منطقه‌ی کارستی بقیع در شمال غرب نیشابور قرار دارد. این حوضه با مساحتی حدود ۶۶۶۳ هکتار در فاصله‌ی ۳۲ کیلومتری شمال غرب شهر نیشابور، بین مدارهای ۳۶ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۶۱ دقیقه عرض شمالی و نصف النهارهای ۵۸ درجه ۶۵ دقیقه تا ۵۸ درجه و ۶۶ دقیقه طول شرقی واقع شده است (شکل ۱). متوسط بارندگی سالانه منطقه مورد مطالعه برابر با ۲۴۷/۴ میلی-متر، و دارای اقلیم نیمه خشک می‌باشد. این حوضه با ارتفاع متوسط ۲۰۲۰ متر از سطح دریا، از زیر حوضه‌های آبخیز کویر مرکزی ایران است. از نظر زمین شناسی، حوضه‌ی مزبور دارای سازندهای چمن بید، کشف رود، مزدوران و نهشته‌های کواترنری می‌باشد. (درویش زاده، ۱۳۷۱).

### مواد و روشها

هر دو روش COP و PaPRIKa برای تعیین آسیب پذیری و تعیین آلودگی در آبخوانهای کارستی طراحی شده، و بر پایه‌ی انواع متغیرهای مبنی بر خصوصیات فیزیکی پهنه‌ی اشباع و غیر اشباع قرار دارند. روش PaPRIKa ویژگیهای کارست را در ارزیابی آسیب پذیری آبخوان در نظر می‌گیرد؛ این خصوصیات شامل: عامل P (لایه‌های بالایی محافظ آبهای زیر زمینی)، عامل R (نوع سنگ در ناحیه‌ی اشباع)، عامل I (نفوذ سطحی)، و عامل Ka (ویژگیهای کارست) می‌باشند (کاووری و همکاران، ۲۰۱۱). عامل P خود از چهار زیر عامل (تراوایی سازند) Ca (پوشش خاک) S، (ناحیه‌ی اپی کارست) E، و (ترکیبی از جنس سازند، ضخامت و شکستگی در ناحیه‌ی غیر اشباع) UZ تشکیل شده است. نقشه‌ی P (نقشه حفاظت)، به حفاظت آبخوان آب به وسیله‌ی لایه‌های پوشاننده سطحی توجه دارد. این لایه شامل: خاک (بافت، ساختمان و ضخامت)، ناحیه‌ی غیر اشباع (ضخامت، سنگ‌شناسی و میزان شکستگیها) و آبخوان اپی کارستی می‌باشد. نقشه‌ی P در روش PaPRIKa از ترکیب زیر

گذاری شده، و نقشه‌ی آسیب پذیری با کاربرد هر دو روش تهیه گردید (ویاس، ۲۰۰۶)

#### بحث

#### تهیه‌ی لایه‌های روش PaPRIKa

##### عامل P

برای به دست آوردن این عامل باید از ۴ زیر عامل UZ, S, CA و E استفاده کرد. نقشه‌ی مربوط به هر کدام از زیرعاملها در محیط نرم افزار GIS تهیه و بعد از یکسان سازی با هم تلفیق گردیدند. در این عامل، زمین شناسی منطقه اهمیت زیادی دارد. سنگهای رخنمون یافته در حوضه‌ی بقیع بیشتر مربوط به دوران دوم زمین شناسی می‌باشند. سه سازند اصلی در این حوضه وجود دارند: سازند چمن بید (Jch) دارای سنگ شناسی آهک ریز بلور با میان لایه‌های پلمه سنگها تیره رنگ؛ سازند کشف رود (Jks) با سنگ‌شناسی پلمه‌سنگ و پلمه‌سنگهای لایسی و ماسه سنگ نازک، و سازند مزدوران (Jm) با سنگ‌شناسی آهک و دولومیت خاکستری همراه پلمه سنگ و آهکرس، همچنین، در این حوضه، آبرفت (Qal) در مسیر رود خانه دیده می‌شود. زمین ریخت شناسی کارست در سازند مزدوران که دارای کربنات زیادی است، بیشتر دیده می‌شود (شکل ۲). با توجه به جدول (۱)، زیرعاملها ارزش گذاری شده و تلفیق می‌گردند.

##### عامل R

در این عامل نوع سنگ و میزان شکستگی آن در ناحیه‌ی اشباع بررسی می‌شود؛ با توجه به زمین شناسی منطقه که ذکر گردید، ارزش گذاری به صورت زیر انجام می‌گردد (جدول ۳، شکل ۳).

##### عامل I

عامل I به میزان نفوذ پذیری سازندها و شیب آنها بستگی دارد (جدول ۴)، هر چه شیب کمتر، کارست توسعه یافته تر و تعداد نقاط بلع زیادتر باشد، نفوذ بیشتری صورت می‌گیرد. برای به دست آوردن نقشه‌ی عامل I، ابتدا نقشه‌ی شیب منطقه تهیه گردید و با توجه به آن ارزش گذاری انجام شد (شکل ۴).

#### عامل Ka

این عامل میزان کارستی شدن منطقه را نشان می‌دهد. در شبیه PaPRIKa، بر اساس مساحت منطقه، مشاهدات و بررسیهای میدانی ارزش گذاری انجام می‌شود. کارستی شدن پدیده‌ای است فرسایشی که ساز و کار آن انحلال و خوردگی توده‌ی سنگهای کربناته به وسیله‌ی اسید کربنیک محلول در آبهای جاری و زیرزمینی می‌باشد. مسلماً، توسعه‌ی کارست در آب و هوای سرد بیشتر از آب و هوای گرم می‌باشد، چه، افزایش دما باعث تشدید واکنشهای شیمیایی و کاهش مقدار CO<sub>2</sub> محلول در آب می‌گردد. هرچه کارست توسعه یافته‌تر باشد، میزان نفوذ آلودگی بیشتر است، زیرا شکافها و سوراخهای بلع گسترده‌تر می‌گردند، که این خود سبب می‌شود که میزان تماس آب نفوذی با سطح سنگ کمتر، و نفوذ سریعتر انجام گیرد. در این حالت، آلودگی بیشتر و سریعتری به آبخوان منتقل می‌شود. با توجه به جدول (۱) به کل منطقه‌ی مورد مطالعه ارزشی یکسان تعلق می‌گیرد.

#### نقشه‌ی آسیب پذیری با کاربرد روش PaPRIKa

برای تهیه‌ی نقشه‌ی نهایی در نرم افزار GIS، تمام نقشه‌های به دست آمده در مراحل قبل بر طبق ضرایب مورد نظر با هم جمع گردید و نقشه آسیب پذیری مطابق شکل ۵ حاصل آمد.

#### تهیه‌ی لایه‌های روش COP

**لایه‌ی تمرکز جریان (عامل C):** این عامل نشانگر میزان بارندگی است که در حفرات فرورونده، متمرکز گردیده و از ناحیه‌ی غیراشباع پر می‌شود (ویاس، ۲۰۰۶). تمرکز جریان برای مناطق کارستی در قالب دو نمایشنامه تعریف شده است، که با توجه به خصوصیات آب و زمین ریخت شناسی، ریخت شناسی، و همچنین زمین شناسی ساختمانی منطقه یکی یا هر دو نمایشنامه انتخاب و اجرا می‌شود. جهت ارزیابی عامل C نیاز به تهیه‌ی دو نقشه‌ی زیر عامل سطحی (S<sub>f</sub>) شیب و پوشش گیاهی (S<sub>v</sub>) می‌باشد تا نقشه‌ی نهایی عامل C تهیه گردد.

**سنگ شناسی ( $O_1$ ):** به منظور تهیه نقشه سنگ شناسی، به سنگ‌شناسی هر لایه‌ی موجود در ناحیه غیراشباع یک ارزش داده می‌شود، و با توجه به ضخامت هر لایه مطابق با رابطه‌ی (۱) (کاربرد این رابطه مانند روش AVI و PI می‌باشد) یک نمایه به دست می‌آید بعد از تهیه‌ی مجموعه‌ی اطلاعاتی در محیط اکسل و تبدیل به شکل قابل قبول در محیط GIS درون یابی، طبقه بندی و ارزش گذاری می‌شود. در مرحله‌ی بعد، رتبه‌ی فراسنج  $cn$  برای منطقه‌ی مورد مطالعه مشخص می‌گردد، که به علت آزاد بودن آبخوان، برابر با یک بوده و در نقشه‌ی مرحله‌ی قبل ضرب می‌شود؛ در نتیجه، نقشه‌ی نهایی  $ol$  حاصل می‌گردد. در نهایت، نقشه‌های خاک و سنگ‌شناسی همپوشانی و طبقه بندی شده و نقشه‌ی لایه‌های پوششی حاصل گردید. همان طور که در شکل (۷) مشاهده می‌گردد در قسمت جنوب و مرکز حوضه، حفاظت زیادی در برابر آسیب پذیری آبخوان ایجاد می‌گردد (که با رنگ قرمز و سبز مشخص شده است).

**لایه‌ی بارش (عامل  $p$ ):** این عامل شامل مقدار بارش و عواملی است که نرخ نفوذ را افزایش می‌دهند، مانند تناوب، توزیع زمانی، مدت و شدت بارشهای سیل آسا، می‌باشد. این عاملها به تعیین توانایی بارش برای حمل آلاینده‌ها از سطح به آب زیرزمینی کمک می‌کنند (ویاس و همکاران، ۲۰۰۶). این عامل به دو زیر عامل مقدار بارش ( $pq$ ) و توزیع زمانی بارش ( $pi$ ) ارزیابی می‌گردد.

**مقدار بارش ( $pi$ ):** متداولترین و در عین حال مناسبترین روشهای محاسبه‌ی مقدار بارش حوضه‌ای از طریق ترسیم نقشه‌ی همباران میسر می‌گردد، بدین منظور اقدام به ترسیم نقشه‌ی همباران جهت محاسبه مقدار بارش منطقه مورد مطالعه گردید. در نتیجه، نقشه‌ای که تمام حوضه‌ی آبخیز را در بر گرفته، و دارای مقیاس و رقوم ارتفاعی مناسب است (شبه رقوم بارش  $drm$ ) که جهت ترسیم بهتر خطوط همباران الزامی است. بعد از تهیه‌ی شبه رقوم بارش ( $drm$ ) منطقه‌ی مورد مطالعه، طبقه بندی و ارزش گذاری شد، و نقشه‌ی مقدار بارش ( $pq$ ) تهیه گردید. مقدار بارش ( $pq$ ) برای منطقه‌ی مورد مطالعه در رده‌ی

**عوارض سطحی ( $S_f$ ):** فراسنج عوارض سطحی آن دسته از اشکال زمین ریخت شناسی مختص به سنگهای کربناته و حضور یا فقدان هر گونه لایه‌ی پوشاننده‌ای (نفوذپذیر یا نفوذناپذیر) که تعیین کننده‌ی اهمیت فرایندهای رواناب و یا نفوذ می‌باشد را در نظر می‌گیرد. عوارض سطحی منطقه کارستی بقیع، با توجه به وجود خطواره‌ها و شکستگیها وجود لایه‌های پوشاننده‌ی نفوذپذیر یا نفوذناپذیر، و مطابق با معیارهایی که در شکل (۱) آمده‌اند، به بخشهای مختلفی تقسیم می‌شود. در نهایت، نقشه‌های عوارض سطحی و شیب - پوشش گیاهی همپوشانی و طبقه بندی شده و نقشه‌ی تمرکز جریان حاصل گردید (شکل ۲) با توجه به شکل (۲)، نواحی که با رنگ سبز مشخص شده‌اند نشان دهنده‌ی تأثیر بیشتر عامل  $C$ ، به این معنی که حفاظت آبخوان کارستی کمتر می‌گردد، و برعکس آن نواحی که با رنگ قرمز مشخص شده‌اند نشان دهنده‌ی تأثیر کمتر عامل  $C$  بوده و در نتیجه حفاظت آبخوان کارستی بیشتر می‌گردد.

**لایه‌ی پوشش (عامل  $O$ ):** این لایه حفاظت آبخوان را در نظر گرفته و به وسیله‌ی خصوصیات فیزیکی و ضخامت لایه‌های بالای منطقه‌ی غیراشباع نمایان می‌شود. در روش COP فقط دو عامل با نقش آب و زمین شناسی به منظور ارزیابی عامل  $O$  در نظر گرفته می‌شود، که شامل خاک ( $O_s$ ) و سنگ‌شناسی لایه‌های ناحیه‌ی غیراشباع ( $O_L$ ) می‌باشد (ویاس، ۲۰۰۶).

**خاک ( $O_s$ ):** به منظور تهیه‌ی نقشه‌ی خاک منطقه‌ی مورد مطالعه، پس از انجام عملیات میدانی مشخص شد که به علت کوهستانی بودن، پوشش خاکی ضخیم فقط در نواحی آبرفتی حوضه‌ی مورد مطالعه و در رودخانه موجود است. در دیگر مناطق حوضه، پوشش نازکی از خاک دیده می‌شد که بعد از تحلیل و نمونه‌گیری نوع بافت منطقه مشخص گردید.

بافت خاک در حوضه‌ی بقیع از بالا دست به سمت پایین دست، از ریگی به ماسه‌ای و در نهایت خاک دارای بافتی متوسط تغییر می‌کند. بطور کلی، پوشش خاکی منطقه مورد مطالعه دارای بافت متوسط - لایه‌ی می‌باشد. بعد از مشخص کردن بافت خاک با در نظر گرفتن ضخامت خاک در منطقه، به هر نمونه یک ارزش داده شد.

PaPRIKa و COP ارزیابی شد، به این صورت که عامل‌های این دو روش در محیط GIS تهیه، ارزش گذاری، طبقه‌بندی و همپوشانی شدند؛ در نتیجه نقشه‌ی نهایی آسیب‌پذیری آبخوان مذکور حاصل گردید.

برطبق نتایج به‌دست آمده از کاربرد روش PaPRIKa منطقه‌ی مورد مطالعه از نظر میزان آسیب پذیری به سه رده‌ی خیلی زیاد، زیاد و متوسط پهنه بندی گردید که به ترتیب ۸.۹ درصد، ۶۳.۸ درصد و ۲۷.۲ درصد از مساحت منطقه را در بر گرفته اند.

نمایه‌ی شاخص COP برای منطقه‌ی مورد مطالعه بین ۰.۵ تا ۱۲ متغیر می باشد؛ بنابراین، محدوده‌ی مزبور از نظر آسیب پذیری به چهار رده‌ی مختلف پهنه بندی گردید که عبارتند از: آسیب پذیری زیاد، متوسط، کم و خیلی کم که به ترتیب ۹.۸ درصد، ۵۰ درصد، ۲۵.۶ درصد و ۱۴.۶ درصد از مساحت منطقه را در بر گرفته اند.

بنابراین، تغییرات میزان آسیب پذیری با زمین ریخت‌شناسی کارست منطقه، و نیز با میزان توسعه‌ی کارست آن ارتباط مستقیمی دارد، چه نواحی دارای آسیب پذیری خیلی زیاد و زیاد، در منطقه‌ی منطبق با نواحی کارستی توسعه یافته واقع شده اند. نتایج به دست آمده در این پژوهش قابل مقایسه با دیگر نتایج تحقیقات صورت گرفته در این زمینه بوده و می‌توان گفت که دو روش PaPRIKa و COP دارای نتایج قابل قبولتری نسبت به سایر روشهای ارزیابی آسیب پذیری آبخوانهای کارستی می باشند. ریخته‌های کارستی به دلیل انتقال سریع آلودگی، نقش انکارناپذیری را در بالا بودن اندازه‌ی آسیب پذیری منطقه دارند. در این راستا اقدامات مدیریتی، مانند تعیین حریم سوراخهای بلع و جلوگیری از ورود عوامل آلاینده، بخصوص آلودگیهای ناشی از فعالیتهای دامپروری، جلوگیری از تخریب جنگلها و فرسایش خاک منطقه برای حفظ ویژگیهای آب و زمین ریخت شناسی منطقه، و درنهایت، تعیین حریم آبخوان برای اجرای اقدامات مدیریتی و حفاظتی از آبخوان، پیشنهاد می شود.

۸۰۰-۴۰۰ میلی متر در سال قرار دارد که دارای ارزش ۰.۳ می باشد (جدول ۲).

**توزیع زمانی بارش (pi):** عامل Pi توزیع زمانی بارش را در یک دوره‌ی زمانی معین در نظر گرفته و از این رو نمایانگر شدت بارش می باشد (ویاس، ۲۰۰۶). به منظور تهیه‌ی نقشه توزیع زمانی بارش، برای هر ایستگاه باران سنجی بر طبق نمایشنامه‌ی سوم در جدول (۱) محاسبه می شد. بعد از تهیه‌ی مجموعه‌ی اطلاعاتی در محیط اکسل، به شکل قابل قبول در محیط GIS تبدیل گردید، سپس با درون یابی و طبقه بندی و ارزش گذاری، نقشه‌ی توزیع زمانی بارش تهیه شد. توزیع زمانی بارش برای کل منطقه‌ی مورد مطالعه در رده‌ی  $> 10$  میلی متر بر روز، که دارای ارزش ۰.۶ می باشد. قرار گرفت. در نهایت نقشه‌ی مقدار بارش برای منطقه تهیه شد، اندازه‌ی بارش برای حوضه‌ی بقیع در رده‌ی خیلی کم قرار دارد (شکل ۸).

#### نقشه‌ی آسیب پذیری با کاربرد روش COP:

همان طور که در بالا اشاره شد، در این تحقیق، به منظور ارزیابی آسیب پذیری آبخوان بقیع از روش COP نیز بهره بردیم که از رابطه‌ی (۱) استفاده شد؛ این نمایه برای منطقه بین ۰.۵ تا ۱۲ بوده و به چهار طبقه‌ی آسیب‌پذیری زیاد، متوسط، خیلی کم و کم تقسیم می‌گردد. بطور کلی ۹.۷ درصد در محدوده‌ی آسیب پذیری زیاد، حدود ۵۰ درصد حوضه در محدوده‌ی آسیب پذیری متوسط، حدود ۲۵.۶ درصد حوضه دارای آسیب پذیری کم، ۱۴.۶ درصد حوضه در محدوده‌ی آسیب پذیری خیلی کم قرار دارد.

شکل (۹) نقشه‌ی آسیب پذیری آبخوان بقیع را با کاربرد روش COP نشان می دهد. با توجه به این شکل، نواحی شمالی حوضه که منطبق بر سازند چمن بید است به علت پوشش نازک خاک آسیب پذیر تر از بقیه‌ی قسمتهای منطقه بوده، و بخشهای جنوب حوضه دارای آسیب پذیری خیلی کمی است. این امر می تواند به دلیل جنس پلمه-سنگها و ضخامت خاک در قسمت مزبور باشد.

#### نتیجه گیری

در این تحقیق با استفاده از GIS و سنجش از دور آسیب پذیری آبخوان کارستی بقیع با کاربرد دو روش

- fonctionnement, Infiltration zones in karst aquifers: methods of study structure and functioning. *Hydrogéologie*. 4:3-21
10. De Jong, C., S., Cappy, and D. Funk, 2008 Transdisciplinary analysis of water problems in the mountainous karst areas of Morocco. *Eng. Geol.* 99: 228-238
  11. Ford, DC. and PW. Williams. 2007 .Karst geomorphology and hydrology. Chapman and Hall, New York, 601p.
  12. Goldscheider, N. 2005. Karst groundwater vulnerability mapping: Application of a new method in the Swabia Alba, Germany. *Hydrogeol J.* 13:555-564.
  13. Hartmann, M. T. Weiler, J. Wager, M, Lange, F. Kralik, N. Humer, A. Mizyed, J. A. Rimmer, B. Barber'a, C. Andreo, A. Butscher, and P. Huggenberger. 2013. Process-based karst modelling to relate hydrodynamic and hydrochemical characteristics to system properties., *Hydrol. Earth Sys. Sci.* 10: 2835-2878.
  14. Kavouri, K., V., Plagnes, J, Tremoulet, N., Dorfliger, F., Rejiba, and P. Marchet, 2011. "paprika: A method for estimating karst resource and source vulnerability-application to the Ouyse Karst System (Southwest France), *Hydrogeol. J.* 19: 339-353
  15. Konstantin's. Ch., P. Valérie, G, Roger, and P. Rémi Frank, 2011. Bosch, Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview. *Hydrogeol. J.* 19: 1169-1180.
  16. Krishnamurthy. J., and G. Srinivas, 1995. Role of geological and geomorphological factors in ground water exploration. A study using IRS LISS data. *Inte. J. Remote Sens.* 16: 2595-2618.
  17. Mangin, A. 1975. Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifers karstiques [Contribution to the
- منابع**
۱. افروزی، م. و ح. محمدزاده، ۱۳۹۲. ارزیابی آسیب پذیری دشت بروجن- فردانیه با استفاده از شبیه DRASTIC براساس نیترات. مجله پژوهش آب ایران. ۷: ۲۱۸-۲۱۳
  ۲. باقرزاده، س.، کلانتری، ن. مراد زاده، م. رحیمی، م. فاضلی، م. م. کشاورزی، ۱۳۸۹. استفاده از تکنیکهای GIS و سنجش از دور به روش COP مطالعه موردی آبخوان کارستی شیمبا. همایش ملی ژئوماتیک، تهران.
  ۳. پیری، ح. و ا. بامری. ۱۳۹۳. برآورد نسبت جذبی سدیم (SAR) در آبهای زیر زمینی با استفاده از وایازی خطی چند متغیره شبکه ی عصبی مصنوعی (مطالعه ی موردی دشت بجستان). مجله مهندسی منابع آب. ۷: ۸۰-۶۷
  ۴. عباسی، م. و ا. محمدی، ۱۳۹۲. تهیه نقشه آسیب پذیری آلودگی آبخوان کارستی مانشت با استفاده از شبیه ریسک. پژوهشهای ژئومورفولوژی کمی ۲: ۱۶۸-۱۵۵
  ۵. قربانی، م. م. اونق، ۱۳۹۱. پهنه بندی تحول و حساسیت کارست با استفاده از شبیه رگرسیون خطی چند متغیره در منطقه ی کارستی شاهو. پژوهشهای ژئومورفولوژی کمی، ۱: ۳۲-۱۹.
  ۶. مظفری زاده، ج. و ز. سجادی، ۱۳۹۱. بررسی علل شوری و نفوذ آب شور رودهای دالکی و حله به آبخوان برازجان. مجله‌ی مهندسی منابع آب ۶: ۱۳۹۲: ۶۹-۷۸
  7. Afrasiabian, A. 2007. The importance of protection and management of karst Water as drinking water resources in Iran. *Environ. Geol.* 52:673-677
  8. Andreo, B., N., Ravbar, and J.M. Vias .2009. Source vulnerability mapping in carbonate (karst) aquifers by extension of the COP method: Application to pilot sites. *Hydrogeol, J* 17:749-758.
  9. Bakalowicz, M .1995. La zoned' infiltration des aquifères karstiques: methods d'étude structure ET

20. Vías. JM, B., Andreo. MJ. Perles, F., Carrasco, I., Vadillo, P, Jime´nez. .2004. The COP method. In: P.71-163. Zwahlen F, (ed). Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers, EUR 20912. Brussels7 European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development.
21. White, W.B. 2007. A brief history of karst hydrogeology: Contributions of the NSS. *J Cave Karst Stud.* 69:13–26.
22. Zwahlen, F .2004. COST Action 620: vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. Final report, European Water Framework Directive, EC, Brussels. 297p.
- hydrodynamic study of karst aquifers]. PhD Thesis, Université de Dijon, France. 298p.
18. Marin, AI., N. Dorfliger, and B. Andreo, .2012. Comparative application of two methods (cop and PaPRIKa) for groundwater vulnerability mapping in Mediterranean karst aquifers (France and Spain) *Environ. Earth. Sci.*65: 2407- 2421.
19. Massomisamakosh, J. s. Bagheri, m. davoodi, D, Yarahmadi, D. jafari, aghadamand., and M. Soltani, 2013. Assessing and mapping the vulnerability of karstic aquifers using GIS and COP model. *Global Nest J.* 15:384-393.