

تحلیل و پهنه‌بندی شدت تخریب بیابان‌زایی با استفاده از مدل بیابان‌زایی IMDPA و خوشه‌بندی (مطالعه موردی: دشت بم‌نرماشیر و رحمت‌آباد)

سامان معروف‌پور^۱، احمد فاخری‌فرد^{۲*}، جلال شیری^۳

۱. دانشجوی دکترای مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب، گروه آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

۲. استاد گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه تبریز

۳. استادیار گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه تبریز

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۲/۰۵؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۰۳/۳۰)

چکیده

اقدامات اجرایی در زمینه کنترل بیابان‌زایی باید بر شناخت وضعیت فعلی بیابانی شدن و شدت آن متکی باشد. با توجه به این موضوع، در تحقیق حاضر بررسی تخریب بیابان‌زایی آبخوان واقع در دشت‌های بم‌نرماشیر و رحمت‌آباد (استان کرمان) با استفاده از مدل IMDPA و سامانه اطلاعات جغرافیایی انجام شد. در این پژوهش با استفاده از شاخص‌های کمی (افت سطح آب زیرزمینی)، کیفی (هدایت الکتریکی (EC)، کلر (Cl) و نسبت جذب سدیم (SAR)) و میزان فرسایش خاک محدوده آبخوان، به بررسی کلاس خطر بیابان‌زایی پرداخته شد. هر شاخص کلاس‌بندی شده و نقشه تخریب آن ترسیم شد. در نهایت، نقشه تخریب کلی منطقه با در نظر گرفتن بیشترین محدودیت در شاخص‌های کیفی به دست آمد. برای صحت‌سنجی مدل از روش‌های خوشه‌بندی وارد و K-means استفاده شد. در نهایت، نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان داد از نظر تخریب بیابان‌زایی حدود ۹۰/۸۱ درصد و ۸/۶۱ درصد آبخوان به ترتیب در وضعیت خطر شدید و بسیار شدید قرار دارد که ۶۲/۵ درصد از نتایج مدل IMDPA توسط روش‌های خوشه‌بندی معنادار گزارش شد.

کلیدواژگان: آب‌های زیرزمینی، بم‌نرماشیر و رحمت‌آباد، خطر تخریب کمی، خطر تخریب کیفی، خوشه‌بندی، IMPDA.

مقدمه

شناخت آب از نظر کیفیت، کمیت و چگونگی حصول آن قدمی اساسی برای بهینه‌سازی مصرف است [۱]. آب‌های زیرزمینی به دلیل ارتباطات هیدروژئولوژی با دیگر منابع آبی همواره در معرض آلودگی با روند تخریبی هستند [۲]. منابع آب زیرزمینی دومین منبع آب شیرین موجود در جهان هستند. محاسبه منابع آب جهانی نشان می‌دهد منابع آب زیرزمینی چیزی حدود ۰/۶ درصد از کل منابع آب و ۶۰ درصد از منابع تجدیدپذیر قابل دسترس را به خود اختصاص می‌دهند [۳]. حدود یک سوم جمعیت جهان به آب زیرزمینی وابسته است و بیش از ۷۰ درصد منابع آب زیرزمینی به مصرف کشاورزی می‌رسد [۴]. منابع آب زیرزمینی در کشور ایران و بسیاری از کشورهای دیگر، که آب و هوایی مشابه دارند، مهم‌ترین منابع آب استفاده‌شده در کشاورزی و شرب به‌شمار می‌رود [۵]. بنابراین، شناخت کیفیت و کمیت آب‌های زیرزمینی به‌عنوان مهم‌ترین و آسیب‌پذیرترین منابع تأمین آب در دهه‌های اخیر یک امر کاملاً بدیهی است [۶]. نبود شناخت صحیح و یا درک‌نشده میزان آسیب‌پذیری سریع آب‌های زیرزمینی ممکن است سبب ایجاد آلودگی‌های شدید در این منابع شود [۷]. یکی از مدل‌هایی که در ایران برای سنجش میزان خسارت واردشده به محیط استفاده می‌شود، مدل ایرانی بیابان‌زایی IMDPA^۱ است. اهداف این پژوهش عبارت‌اند از:

۱. ارزیابی تخریب کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل IMDPA؛
۲. ترسیم نقشه پهنه‌بندی وضعیت هر یک از پارامترهای کیفی، کمی و فرسایش خاک در محدوده مطالعه‌شده؛
۳. نقشه پهنه‌بندی تخریب کلی بیابان‌زایی به‌منظور مدیریت حوضه مطالعه‌شده؛
۴. صحت‌سنجی مدل به‌کاررفته با استفاده از روش‌های خوشه‌بندی K-means و Ward.

پیشینه تحقیق

طباطبایی فر در سال ۲۰۰۹ در پژوهشی با استفاده از مدل ایرانی شدت بیابان‌زایی را در دشت گرمسار در قالب دو معیار اقلیم و آب در چهار دوره زمانی بررسی کرد. نتایج پژوهش ایشان نشان داد شاخص‌های نسبت

جذب سدیم و خشکسالی به‌ترتیب با ارزش‌های عددی ۱/۱۷ در کلاس کم و ۱/۶۳ در کلاس متوسط، کمترین تأثیر و شاخص خشکی ترانسو و افت آب زیرزمینی با ارزش عددی ۳/۸۱ و ۳/۱۷ در کلاس بسیار شدید، بیشترین تأثیر را در بیابان‌زایی دشت گرمسار داشته‌اند [۸]. ناطقی در سال ۲۰۰۹ شدت بیابان‌زایی دشت سگزی را با بهره‌گیری از مدل ایرانی ارزیابی کرد. در این بررسی سه معیار آب، زمین و پوشش گیاهی ارزیابی شد و با توجه به شرایط منطقه برای هر معیار چندین شاخص در نظر گرفته شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده کلاس شدید و بسیار شدید روند بیابان‌زایی و تأثیر بسزای معیار آب در بیابان‌زایی منطقه بوده است [۹]. ذوالفقاری (۲۰۱۰) با استفاده از روش IMDPA، حساسیت اراضی دشت سیستان به بیابان‌زایی را ارزیابی کرد. به این‌منظور پس از بررسی و ارزیابی‌های اولیه، چهار معیار اقلیم، پوشش گیاهی، خاک و فرسایش بادی به‌عنوان مهم‌ترین معیارهای مؤثر در بیابان‌زایی منطقه در نظر گرفته و ارزش‌دهی شد. نتایج به‌دست‌آمده از این ارزیابی نشان داد ۴۷/۰۲ درصد منطقه از نظر درجه بیابان‌زایی در کلاس متوسط و ۴۹/۱۶ درصد آن در کلاس شدید قرار دارد و ۳/۸۲ درصد منطقه، که شامل مناطق مسکونی و مخازن آب چاه بود، در هیچ کلاسی قرار نگرفت [۱۰]. نیکو (۲۰۱۱) برای شناخت عوامل مؤثر در تخریب اراضی، پتانسیل بیابان‌زایی را براساس روش IMDPA و با دخیل کردن همه معیارها و شاخص‌های مربوط به آن ارزیابی کرد. در مجموع، شدت و وضعیت فعلی بیابان‌زایی در منطقه مطالعه‌شده با ارزش عددی ۲/۲۷ متوسط و در آستانه افزایش کلاس بیابان‌زایی (شدید)، ارزیابی شد [۱۱]. پهلوان‌روی و همکارانش در سال ۲۰۱۲ به‌منظور ارزیابی و تهیه نقشه بیابان‌زایی در محدوده‌ای با وسعت ۸۸۳۵۰ هکتار در منطقه زهک سیستان از روش تلفیقی مدل IMDPA و GIS بهره‌گیری کردند و در نهایت وضعیت فعلی شدت بیابان‌زایی منطقه را با تأکید بر معیار فرسایش بادی در چهار کلاس ناچیز و کم، متوسط، شدید و بسیار شدید برآورد کردند [۱۲]. مصباح‌زاده (۲۰۱۳) با واسنجی مدل IMDPA با تأکید بر معیارهای زمین در منطقه ابوزید کاشان، بیان کردند که با توجه به شرایط منطقه سه معیار زمین‌شناسی، خاک و فرسایش بادی معیارهای کلیدی مؤثر در بیابان‌زایی‌اند [۱۳]. شکوهی و همکارانش (۲۰۱۳) پهنه‌بندی وضعیت بیابان‌زایی

کیلومترمربع باقی‌مانده نیز در دو کلاس کم و شدید قرار دارد [۱۶].

روش کار (مواد و روش‌ها)

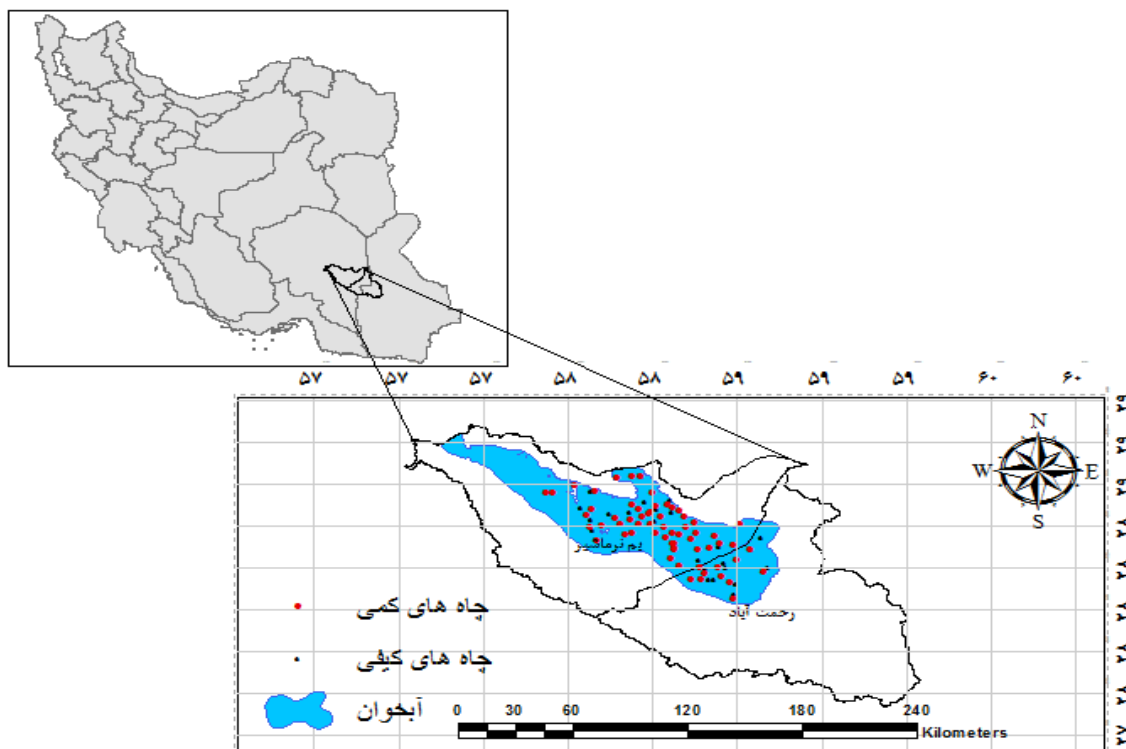
منطقه مطالعه‌شده

منطقه مطالعه‌شده در این تحقیق آبخوان قرارگرفته در دشت بم‌نرماشیر و رحمت‌آباد واقع در مختصات $34^{\circ} 58'$ تا $33^{\circ} 57'$ و $43^{\circ} 00'$ تا $43^{\circ} 27'$ طول جغرافیایی و $29^{\circ} 39'$ عرض جغرافیایی در استان کرمان قرار دارد. این محدوده یکی از مناطق کویری ایران به‌شمار می‌آید، زیرا حاشیه شمالی آن به کویر لوت ختم می‌شود و از این نظر تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های کم‌باران دارد. شکل ۱ آبخوان مطالعه‌شده و موقعیت چاه‌های انتخابی برای ارزیابی کیفی و کمی را نشان می‌دهد.

مدل IMDPA

برای ارزیابی شدت بیابان‌زایی و تهیه نقشه آن از جنبه معیار آب زیرزمینی با توجه به شرایط منطقه از مدل جدیدی به نام مدل ایرانی ارزیابی پتانسیل بیابان‌زایی (IMDPA) استفاده می‌شود که با همکاری معاونت امور مراتع و خاک سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور و دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران در سال ۱۳۸۴ تعیین شده و جدیدترین مدل برای ارزیابی شدت بیابان‌زایی است [۱۷]. در این مدل نه معیار کلیدی شامل اقلیم، زمین‌شناسی- ژئومورفولوژی، خاک، پوشش گیاهی، کشاورزی، فرسایش (آبی و بادی)، اقتصادی- اجتماعی و توسعه شهری- صنعتی به عنوان عوامل اصلی و کلیدی بیابان‌زایی ارزیابی می‌شوند. کلاس‌های هر یک از شاخص‌ها و نیز نقشه نهایی بیابان‌زایی در چهار کلاس خطر کم (ناچیز)، متوسط، شدید و بسیار شدید است به این صورت که به هر لایه بر اساس تأثیر آن بر بیابان‌زایی با توجه به بررسی منابع و استناد به کار محققان و با توجه به شرایط منطقه، وزنی بین یک تا چهار داده می‌شود و چگونگی وزن‌دهی به صورت برابر است، به طوری که ارزش یک بهترین و ارزش چهار بدترین یکسان است. هر معیار از میانگین هندسی شاخص‌های خود به‌دست می‌آید.

منطقه خضرآباد- الهدشت یزد را با استفاده از مدل IMDPA با تکیه بر دو معیار آب و خاک ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که متوسط هندسی ارزش کمی شدت بیابان‌زایی برای کل منطقه بر اساس دو معیار بررسی‌شده $1/76$ است و نشان‌دهنده شدت بیابان‌زایی منطقه در کلاس متوسط است [۱۴]. سیلاخوری و همکارانش (۲۰۱۴) برای منطقه سبزوآباد ابتدا خطر بیابان‌زایی را با دو مدل ایرانی IMPDA و MICD ارزیابی و سپس مدل برتر را انتخاب کردند. پس از ارزش‌دهی به شاخص‌های بیابان‌زایی هر مدل در واحدهای کاری، نقشه خطر برای هر مدل را تهیه کردند. با توجه به بازدیدهای میدانی و مشاوره کارشناسان باتجربه بومی در این زمینه نقشه حقایق زمینی را به دست آوردند و سپس، به ارزیابی کارایی دو مدل پرداختند. برای بررسی میزان انطباق بین نقشه‌های شدت خطر بیابان‌زایی توسط دو مدل IMPDA و MICD با حقایق زمینی از شاخص کاپا استفاده کردند. برای انتخاب مدل برتر علاوه بر شاخص کاپا، از ضریب همبستگی ناپارامتریک اسپیرمن و کندانال استفاده کردند. نتایج مقایسه آماری کلاس بیابان‌زایی مدل‌های IMPDA و MICD با حقایق زمینی نشان داد مدل IMPDA و MICD در سطح ۱ درصد اختلاف معناداری با یکدیگر و حقایق زمینی داشتند. تطابق نقشه‌های خطر IMPDA و MICD با حقایق زمینی به ترتیب متوسط و کم برآورد شد. در نهایت، مدل MICD را به عنوان مدل برتر انتخاب کردند [۱۵]. عباسعلی ولی و همکارانش (۲۰۱۵) با استفاده از مدل IMDPA، که یکی از روش‌های ارزیابی بیابان‌زایی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است، حساسیت اراضی حوضه مسجدسلیمان به بیابان‌زایی را ارزیابی کردند. به این منظور پس از بررسی‌های اولیه، معیار اقلیم با شاخص‌های بارش، خشکی ترانسو و خشکسالی، معیار خاک با شاخص‌های بافت، عمق مؤثر، درصد سنگریزه و هدایت الکتریکی، و معیار آب با شاخص افت سالانه آب زیرزمینی را به عنوان عوامل مؤثر در بیابان‌زایی ملاک عمل قرار دادند. سپس، با استفاده از مدل IMDPA امتیازهای هر شاخص در معیار مربوط را مشخص کرده و با روش میانگین هندسی، امتیازهای شاخص‌های آن را محاسبه کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد از نظر درجه بیابان‌زایی حدود ۲۷۷۴ کیلومترمربع از مساحت حوضه در کلاس متوسط و حدود ۲۳



شکل ۱. منطقه مطالعه شده و موقعیت چاه های انتخابی

روش وارد (۱۹۶۷) ارائه شد. تعداد خوشه ها در این روش ثابت و از پیش تعیین شده است. این روش بر اساس کمینه کردن مربعات خطا یا واریانس درون گروهی، که معادل با بیشینه کردن واریانس بین خوشه هاست، بنا نهاده شده است [۱۹]. بنابراین، هدف کلی این الگوریتم به دست آوردن قسمت هایی است که با تعداد ثابت خوشه ها به طور کلی مربع خطاها را کمینه کند. با توجه به K خوشه اولیه، از طریق تخصیص داده های باقی مانده به نزدیک ترین مرکز و پس از آن بارها تغییر عضویت در خوشه ها بر اساس تابع خطا، صورت می گیرد. تا زمانی که تابع خطا به طور معناداری تغییر نکند یا اعضای خوشه ها تغییرات زیادی نداشته باشند. این روش برای خوشه بندی داده هایی طراحی شد که به صورت عددی (کمی) باشند و خوشه مرکزی به نام میانگین داشته باشد. در این روش، ابتدا بردار به صورت تصادفی به K خوشه تقسیم می شود. در گام بعد، فاصله هر بردار از مرکز خوشه خود محاسبه می شود. در صورتی که فاصله شیء مد نظر از میانگین خوشه خود زیاد و به خوشه دیگری نزدیک تر باشد، این شیء به خوشه ای که نزدیک تر است اختصاص می یابد. این کار آن قدر تکرار می شود تا تابع خطا حداقل شود، و یا اعضای خوشه ها تغییر نکنند. اگر D

روش وارد

وارد (۱۹۶۳) روشی برای خوشه بندی داده ها ارائه کرد که یکی از روش های خوشه بندی سلسله مراتبی است. در این روش ابتدا هر بردار به صورت خوشه جداگانه ای در نظر گرفته می شود. سپس، در هر گام دو شیء با هم ادغام می شوند. این کار آن قدر تکرار می شود تا در پایان کار، خوشه یکتایی شکل گیرد. در این روش، در هر گام، همه ترکیب های دوتایی ممکن از ادغام دیده می شود و شاخصی به نام مجموع مربعات خطا (sse)^۱ محاسبه می شود. هر ترکیبی که خطای کمتری داشته باشد، برگزیده می شود و بر پایه آن ادغام انجام می پذیرد. روشن است که هر بار مقدار کمترین خطا افزایش می یابد. این کار آن قدر تکرار می شود تا همه بردار با هم ادغام شوند و خوشه یکتایی به وجود آید. گاهی از این روش با نام روش «کمترین واریانس» یاد می شود. الگوریتم روش تجزیه خوشه ای وارد به طور مختصر شرح داده می شود [۱۸].

روش K-means

روش K-means، از کاربردی ترین روش های خوشه بندی داده هاست. این روش نخستین بار توسط مک کوین

1. Sum of squares error index

مرکز خوشه خودش دارد، به خوشه‌ای که کمترین فاصله را با آن دارد.

دستور توقف: تغییرنیافتن اعضای خوشه‌ها یا کاهش نیافتن مقدار تابع خطا [۲۰].

در تحقیق حاضر برای تعیین تعداد خوشه بهینه از شاخص عرض سیلهوت استفاده می‌شود. این شاخص توسط روسیو (۱۹۸۷) به صورت رابطه ۲ معرفی شد:

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}} \quad (2)$$

$a(i)$ در این رابطه متوسط فاصله آامین عضو موجود در یک خوشه با دیگر اعضای آن خوشه، $b(i)$ حداقل متوسط فاصله آامین عضو موجود در یک خوشه با همه اعضای خوشه بوده و همواره $1 - s(i) < 1$ است. پس از محاسبه $s(i)$ هر یک از اعضا در هر خوشه، مقادیر متوسط عرض سیلهوت برای تعداد مشخص خوشه به دست می‌آید. خوشه‌بندی‌ای که به تولید بیشترین عرض سیلهوت متوسط منجر شود، خوشه‌بندی بهینه خواهد بود [۲۱].

یافته‌ها

در این پژوهش برای آنالیزهای کیفی و کمی از پارامترهای افت سطح آب زیرزمینی، میزان کلر، هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم استفاده شد. سطح آب‌های زیرزمینی در ۶۳ چاه به صورت ماهانه برای سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۱ و پارامترهای کیفی در ۲۴ چاه عمیق در بازه زمانی سال ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۱، که شامل ۳۵ نمونه برای هر چاه است، اندازه‌گیری شد. خصوصیات آماری و دامنه داده‌های مطالعه‌شده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. خصوصیات آماری و دامنه داده‌های مطالعه‌شده

| پارامترها | کمینه | بیشینه | میانگین | ضریب تغییرات | انحراف از معیار | جولگی | میانه |
|--------------------------------|---------|----------|----------|--------------|-----------------|-------|----------|
| افت سطح آب (m) | ۰ | ۵۴/۸۸۶ | ۲/۷۲۷ | ۰/۹۳۴ | ۲/۹۲۰ | ۶/۶۶۰ | ۰/۵۱۳ |
| SAR | ۳/۳۰۳ | ۱۴/۳۶۶ | ۷/۴۵۷ | ۲/۰۵۰ | ۳/۶۳۸ | ۰/۶۴۲ | ۶/۸۲۴ |
| EC ($\mu\text{moh cm}^{-1}$) | ۶۷۹/۶۸۱ | ۵۲۴۱/۸۸۸ | ۱۹۶۱/۴۹۵ | ۱/۵۷۸ | ۱۲۴۳/۲۵۶ | ۱/۳۷۵ | ۲۰۰۵/۹۱۳ |
| CL (mg lit^{-1}) | ۴۷/۵۹۰ | ۱۰۳۹/۱۴۲ | ۳۸۴/۸۹۴ | ۱/۳۸۴ | ۲۷۸/۰۲۷ | ۰/۹۳۸ | ۳۵۳/۹۱۶ |

مجموعه داده‌ها با n شیء باشد و C_1, C_2, \dots, C_K بیان‌کننده K خوشه مختلف حاوی کلیه عناصر D باشند، در این صورت تابع خطا (EF) مجموع فواصل هر شیء از مرکز خوشه خودش است که به شرح زیر تعریف می‌شود:

$$EF = \sum_{i=1}^K \sum_{X=C_i} d(X, \mu(C_i)) \quad (1)$$

که در آن μ نشان‌دهنده مرکز (میانگین) خوشه، $d(X, \mu(C_i))$ فاصله هر شیء از مرکز خوشه‌ای است که خود درون آن قرار دارد. فاصله هر شیء از خوشه خود بر پایه فاصله اقلیدسی محاسبه می‌شود.

به دلیل اینکه در خوشه‌بندی‌های مرکزگرا، تابع خطایی وجود دارد که باید کمینه شود، می‌توان به مسائل خوشه‌بندی مرکزگرا با دید مسائل بهینه‌سازی نگریست. در این نوع خوشه‌بندی تابع هدفی وجود دارد که از نوع تابع خطاست و باید کمینه شود و محدودیت‌هایی به این شرح دارد:

الف) تعداد خوشه‌ها از پیش تعیین شده است و نمی‌توان آنها را کم یا زیاد کرد؛

ب) تعداد اعضای هیچ‌یک از خوشه‌ها نمی‌تواند صفر باشد. برای خوشه‌بندی K-means، گام‌هایی به شکل زیر طی می‌شود:

گام نخست: تفکیک کلیه بردارها به K خوشه به صورت دلخواه؛

گام تکراری:

الف) محاسبه فاصله هر شیء از مرکز خود؛

ب) محاسبه تابع خطا.

گام بهبود: جابه‌جایی عضو که بیشترین فاصله را با

با توجه به نقشه‌ها بیشترین مقادیر هدایت الکتریکی در قسمت‌های شمالی آبخوان مستقر شده است که ناشی از وضعیت زمین‌شناسی منطقه و نیز هم‌جواری با کویر لوت است. در مناطقی از دشت که میزان EC و CL متوسط برآورد شده و مطلوب است به دلیل مسیر رودخانه‌ها و مسیل‌ها است که آب زیرزمینی از آب سطحی تغذیه کرده و کیفیت مطلوب‌تری پیدا می‌کند. از نظر شاخص SAR دشت مد نظر در سطح مطلوب قرار گرفته است.

تحلیل کمی منابع آب زیرزمینی

در ارزیابی کمی از شاخص افت سطح آب زیرزمینی برای تعیین شدت تخریب کمی منابع آب زیرزمینی استفاده می‌شود. سطح آب‌های زیرزمینی در ۶۳ چاه به‌صورت ماهانه برای سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۱ اندازه‌گیری شد. با استفاده از میانگین سطح آب چاه‌ها در سال‌های اولیه و سال‌های آخر میزان افت سطح آب زیرزمینی برای هر یک از چاه‌ها به‌دست آمد. سپس، اطلاعات به‌دست‌آمده از میزان افت در دشت مطالعه‌شده با استفاده از جدول ۲ طبقه‌بندی شد. اساس این طبقه‌بندی برگرفته از مدل IMDPA است. در نهایت، نقشه خطر افت سطح آب زیرزمینی براساس طبقه‌بندی انجام‌شده در محیط GIS رسم شد (شکل ۳).

با توجه به نقشه کاملاً مشهود است که بیشتر سطح آبخوان در خطر شدید قرار دارد؛ به‌بیان دیگر ۵۵/۵۷ درصد از منطقه مطالعه‌شده افت سطح آب زیرزمینی بیشتر از ۵۰ سانتی‌متر در سال دارد که این نتیجه با پژوهش طباطبایی‌فر (۲۰۰۹) همسوست [۸]. باقی منطقه هم در شرایط افت شدید قرار دارد (۲۳/۵۴ درصد) و فقط ۱۵/۶۱ درصد از آبخوان در خطر متوسط قرار دارد. ارزیابی شدت تخریب کیفی منابع آب زیرزمینی براساس بیشترین محدودیت شاخص‌های کیفی (شاخصی که بدترین کلاس خطر را در بین سایر شاخص‌ها داشته باشد) است. برای تهیه نقشه تخریب کیفی منابع آب زیرزمینی از بیشترین محدودیت شاخص‌های کیفی استفاده شد که با توجه به شکل هم مشخص است که EC بیشترین محدودیت را ایجاد کرده است که این نتیجه با پژوهش مسعودی و برزگر (۲۰۱۵) تطابق دارد [۲۳].

تحلیل کیفی منابع آب زیرزمینی

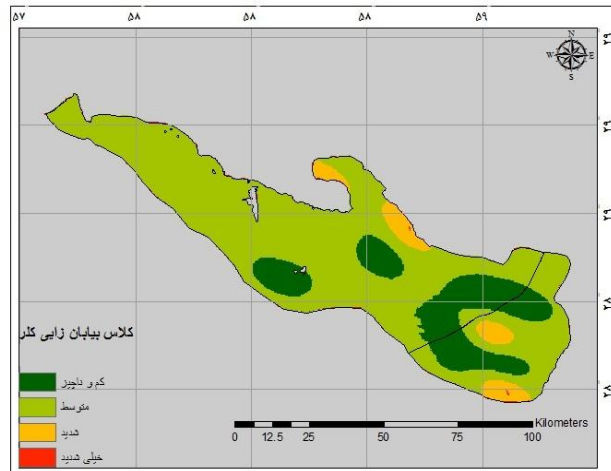
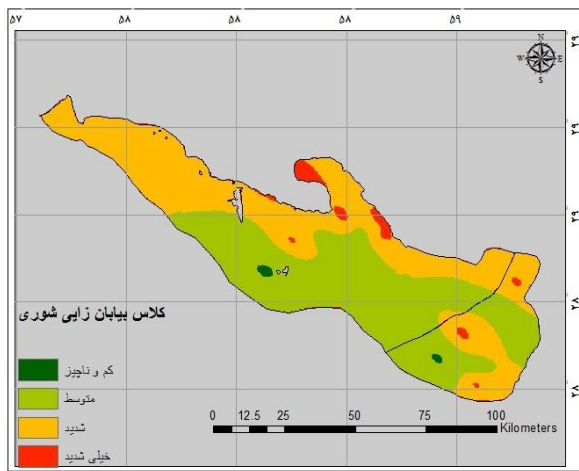
برای بررسی وضعیت کیفیت آب منطقه مطالعه‌شده سه شاخص EC ، CL و SAR انتخاب شد. منظور از SAR نسبت جذب سطحی سدیم است و از رابطه ۳ محاسبه می‌شود. در این فرمول Ca و Mg برحسب meq/lit هستند.

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{(Ca + Mg)}{2}}} \quad (3)$$

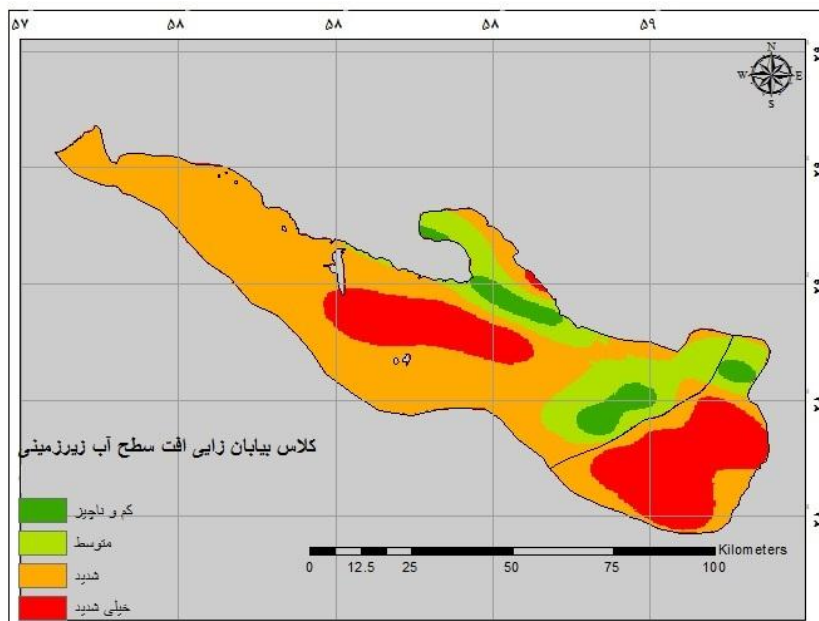
شاخص هدایت الکتریکی (EC) نشان‌دهنده میزان املاح کاتیونی و آنیونی محلول موجود در آب است که می‌تواند هدایت جریان الکتریسیته در آب را سرعت بخشد. هدایت مخصوص الکتریکی که برحسب میکروزیمنس بر متر در ۲۵ درجه سانتی‌گراد محاسبه می‌شود [۲۲]. این پارامتر که در جهت عکس مقاومت الکتریکی با واحد اهم در مقیاس کوچک‌تر عمل می‌کند را می‌توان به‌صورت آزمایش‌های آزمایشگاهی و حتی صحرایی اندازه‌گیری کرد. هرچه میزان هدایت الکتریکی یک نمونه آب بیشتر باشد، میزان املاح موجود در آن بیشتر و با توجه به تقسیم‌بندی‌های کیفیت می‌تواند نشان‌دهنده کیفیت نامطلوب آب باشد. برای ارزیابی کیفی منابع آب زیرزمینی از نمونه‌برداری‌های انجام‌شده در ۲۴ چاه عمیق در بازه زمانی سال ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۱ استفاده شد که شامل ۳۵ نمونه برای هر چاه است. کلاس‌بندی و درجات خطر شاخص‌های EC ، CL و SAR در جدول ۲ آمده است. با توجه به این جدول و نمونه‌برداری‌های کیفی، منطقه مطالعه‌شده از نظر شدت تخریب هر شاخص کلاس‌بندی شد و نتایج به لایه منطقه در نرم‌افزار GIS اضافه شده و با انتخاب روش کریجینگ (به‌صورت سعی و خطا و براساس معیار مجذور میانگین مربعات خطا ($RMSE$)) برای میان‌یابی، نقشه‌های پهنه‌بندی شاخص‌های EC و CL رسم شد (شکل ۲). در شاخص SAR کلیه چاه‌ها در محدوده ناچیز و کم قرار گرفتند، بنابراین کل محدوده از نظر این شاخص در وضعیت مناسب قرار گرفت و به همین دلیل نقشه پهنه‌بندی آن ترسیم نشد. با توجه به نتایج مشخص شد که بیشترین کمترین مساحت در شاخص EC به‌ترتیب عبارت‌اند از ۴۸/۶۲ درصد (کلاس متوسط) و ۴۸/۵۳ درصد (کلاس شدید) که برای شاخص کلر به‌صورت ۷۴/۴۳ درصد (کلاس متوسط) و ۱۹/۳۸ (کلاس ناچیز و کم) است.

جدول ۲. کلاس‌ها و درجات خطر شاخص‌ها

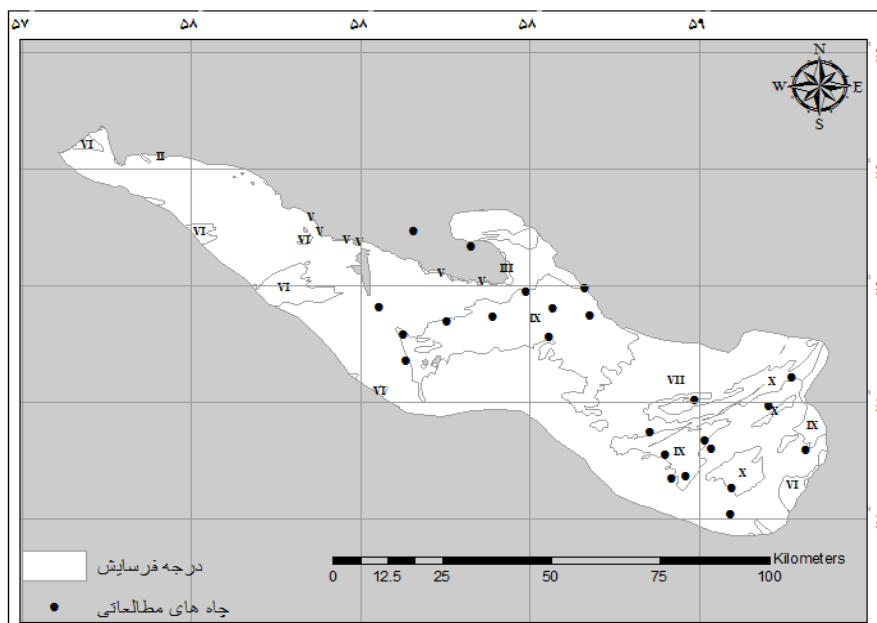
| بسیار شدید | شدید | متوسط | ناچیز و کم | کلاس بیابان‌زایی |
|------------|-----------|----------|------------|---------------------------------|
| ۳/۶-۴ | ۲/۶-۳/۵ | ۱/۶-۲/۵ | ۰-۱/۵ | امتیاز |
| >۵۰ | ۳۰-۵۰ | ۲۰-۳۰ | <۲۰ | افت سطح آب زیرزمینی (cm) |
| >۵۰۰۰ | ۲۲۵۰-۵۰۰۰ | ۷۵۰-۲۲۵۰ | <۷۵۰ | EC ($\mu\text{mho. cm}^{-1}$) |
| >۳۲ | ۲۶-۳۲ | ۱۸-۲۶ | <۱۸ | SAR |
| >۱۵۰۰ | ۵۰۰-۱۵۰۰ | ۲۵۰-۵۰۰ | <۲۵۰ | CI (mgr. lit^{-1}) |
| >۷ | IV | III | II و I | فرسایش در مدل PSIAC |



شکل ۲. پهنه‌بندی خطر شاخص‌های EC و CL



شکل ۳. پهنه‌بندی خطر شاخص افت سطح آب زیرزمینی



شکل ۴. درجه فرسایش پذیری محدوده آبخوان

مدل IMDPA برای ارزیابی شدت نهایی تخریب از میانگین هندسی استفاده شده و امتیاز هر چاه مشخص می‌شود. این امتیاز براساس جدول ۲ کلاس بندی و میزان تخریب هر چاه معلوم می‌شود، اما در پژوهش حاضر بنا به توصیه مسعودی و برزگر (۲۰۱۵) از میانگین حسابی و بیشترین محدودیت شاخص‌های کیفی (شاخصی که بدترین کلاس خطر را در بین سایر شاخص‌ها داشته باشد) استفاده شد. به این صورت که برای هر چاه شاخصی انتخاب خواهد شد که بیشترین خطر را ایجاد کند. در تحقیق حاضر شاخص هدایت الکتریکی بیشترین محدودیت کیفی را ایجاد کرد که با پژوهش مسعودی و برزگر (۲۰۱۵) هم‌راستاست [۲۳]. استفاده از بیشترین محدودیت کیفی به ما این امکان را می‌دهد که واقعیت آبخوان را بهتر در پژوهش لحاظ کنیم چراکه دیگر مقادیر کیفی مانند SAR و کلر با داشتن مقادیر مطلوب در زمان قرارگیری در میانگین هندسی سبب کاهش میزان خطر و مناسب دیده شدن آبخوان می‌شود. در نهایت، امتیاز هر چاه با استفاده از معیارهای کیفی (با در نظر گرفتن بیشترین محدودیت)، کمی (میزان افت سطح آب هر چاه) و میزان فرسایش به دست آمد. به این منظور به دلیل یکسان نبودن چاه‌های برداشت کیفی و کمی از معادل سازی چاه‌های کمی با کیفی استفاده شد. برای معادل سازی چاه‌های کمی و برابر کردن آنها با تعداد ۲۴ چاه

ارزیابی فرسایش خاک

برای تحلیل میزان فرسایش خاک محدوده مطالعاتی از نقشه‌های تهیه شده توسط سازمان زمین‌شناسی ایران براساس روش تجربی پسیاک^۱ استفاده شد. این روش در سال ۱۹۶۸ توسط کمیته آب آمریکا برای محاسبه فرسایش خاک و تولید رسوب مناطق خشک و نیمه خشک غرب ایالات متحده آمریکا ارائه شد. این روش بازده زیادی داشت (برای اطلاعات بیشتر درباره روش پسیاک به پژوهش جانسون و گبهارت (۱۹۹۴) مراجعه شود) [۲۴]. شکل ۴ نقشه محدوده مطالعاتی‌ای که براساس روش پسیاک درجه فرسایش آن محاسبه شده است، را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴ میزان فرسایش هر چاه مشخص و با استفاده از جدول ۲ کلاس بندی شد، که نشان داد کلیه چاه‌ها در محدوده خطر شدید از نظر فرسایش قرار دارند.

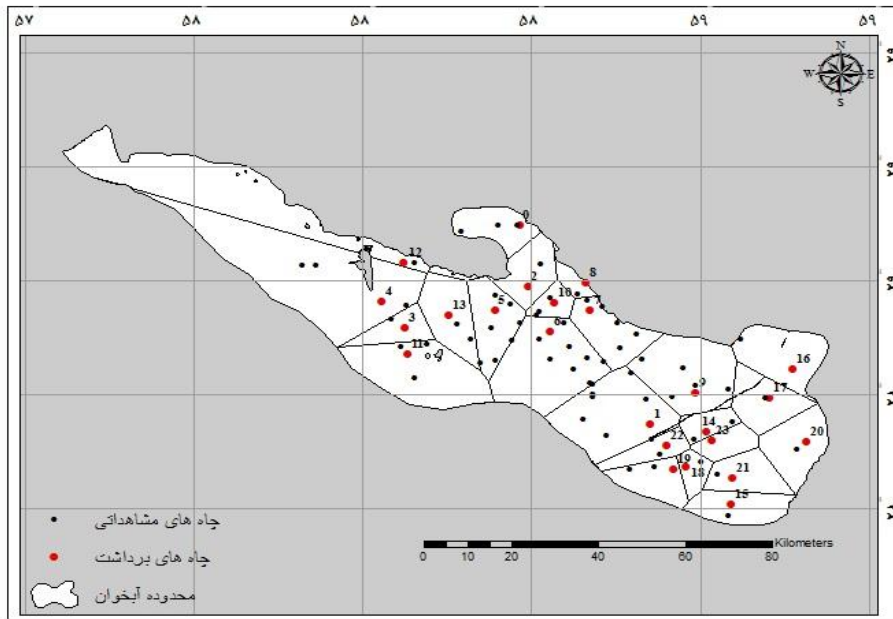
ارزیابی شدت بیابان‌زایی

یکی از قابلیت‌های مدل IMDPA توانایی ارزیابی منطقه با تعداد شاخص محدود است. در این مدل می‌توان با توجه به شرایط شاخص‌هایی را انتخاب کرد و با توجه به آنها تخریب بیابان‌زایی منطقه را بررسی کرد [۲۳]. در تحقیق حاضر به پارامترهای کیفی، کمی و فرسایش خاک توجه شد. براساس

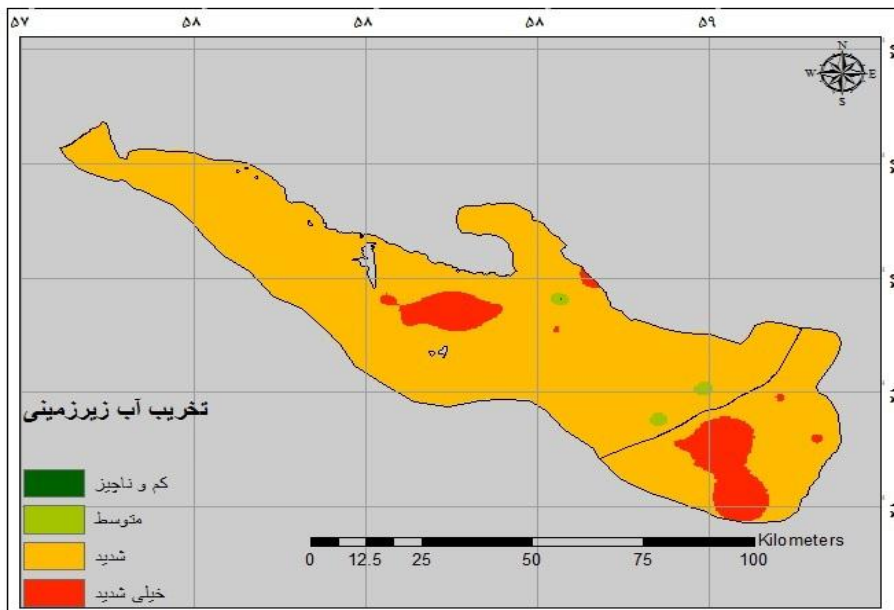
1. PSIAC

کلاس‌بندی تخریب بیابان‌زایی کلی توسط جدول ۲ انجام شد و نقشه تخریب بیابان‌زایی محدوده آبخوان ترسیم شد (شکل ۶). با توجه به نتایج میزان خطر بیابان‌زایی ۴ کلاس در آبخوان مطالعه‌شده (ناچیز و کم، متوسط، شدید و بسیار شدید) به ترتیب عبارت‌اند از: ۰/۰۱، ۰/۵۸، ۹۰/۸۱ و ۸/۶۱. بنابراین، غالب آبخوان در خطر شدید قرار دارد.

کیفی از تیس‌بندی چاه‌های کیفی استفاده شد و هر چاه کیفی برابر میانگین چاه‌هایی قرار گرفت که در محدوده پلی‌گون مد نظر قرار گرفت (شکل ۵). در نهایت، پس از تعیین امتیاز هر چاه براساس معیارهای کیفی (با در نظر گرفتن بیشترین محدودیت)، کمی (میزان افت سطح آب هر چاه) و میزان فرسایش،



شکل ۵. معادل‌سازی چاه‌های کمی با کیفی



شکل ۶. نقشه تخریب بیابان‌زایی آبخوان مطالعه‌شده

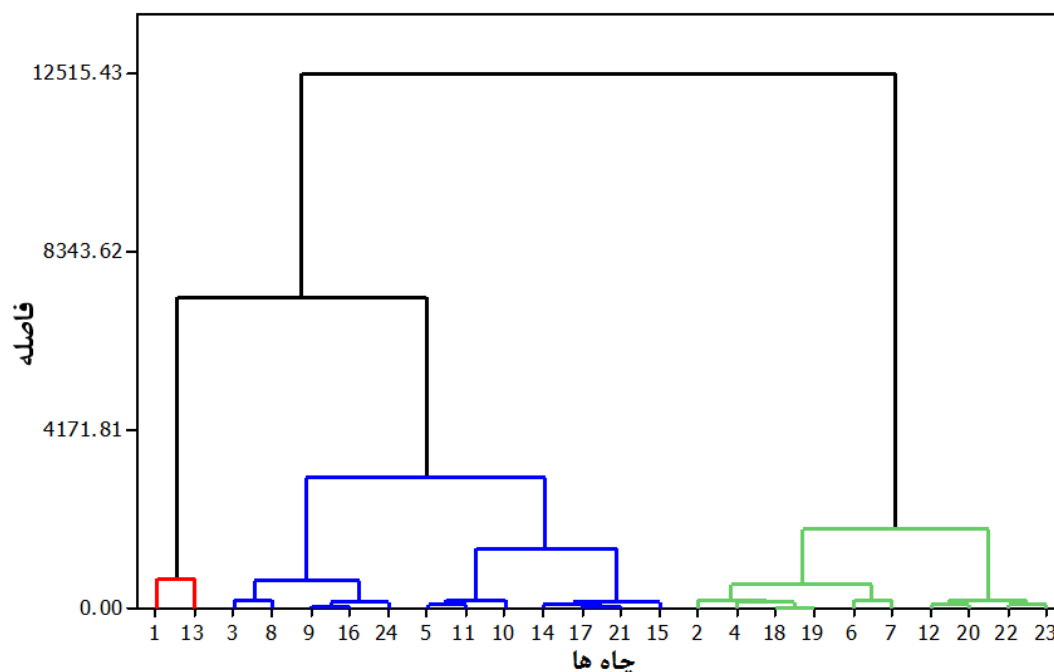
و تعداد خوشه بهینه از شاخص سیلهوت^۱ استفاده شد و نتایج این شاخص مطابق جدول ۳ است. با توجه به جدول ۳ کاملاً مشخص است که تعداد بهینه خوشه برای چاه‌های مطالعه شده سه خوشه است. در نهایت، در شکل ۸ نقشه شماتیک خوشه‌بندی با سه خوشه آمده است و این نقشه تطابقی ۶۲/۵ درصدی با نقشه تخریب بیابان‌زایی آبخوان (شکل ۶) دارد. بنابراین، مدل IMDPA به کاررفته صحت کامل دارد و قابل استناد است. همچنین، درخور یادآوری است ماتریس فاصله اقلیدوسی چاه بر مبنای تک‌تک متغیرها محاسبه شد و درصد آنها نسبت به فاصله کل به دست آمد. در نتیجه، چنین استنباط شد که تأثیر متغیرها در خوشه‌بندی به ترتیب عبارت است از: شاخص هدایت الکتریکی، فرسایش و افت سطح آب زیرزمینی.

صحت‌سنجی مدل IMDPA

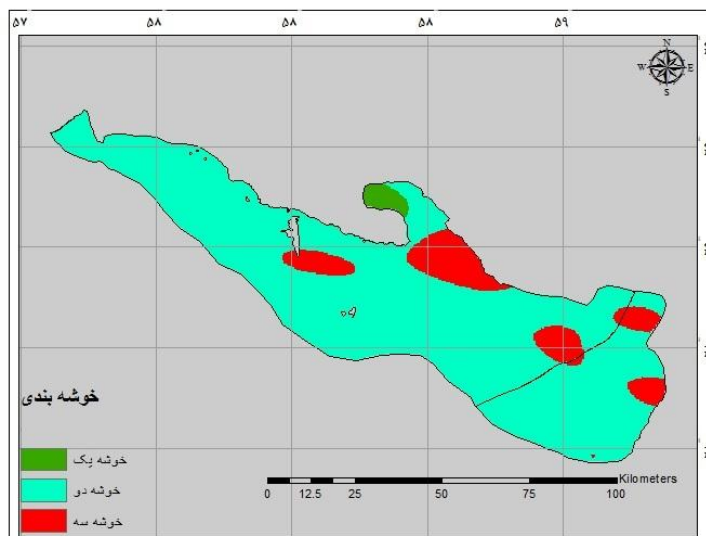
در این پژوهش خوشه‌بندی چاه‌های مطالعه شده براساس شاخص‌هایی انجام شد که برای ارزیابی بیابان‌زایی در مدل IMDPA استفاده شد. شکل ۷ دندوگرام مربوط به خوشه‌بندی روش وارد را نشان می‌دهد. براساس دندوگرام می‌توان مشاهده کرد دو خوشه کاملاً مجزا وجود دارد که هر یک به خوشه‌هایی تقسیم می‌شوند. در خوشه‌بندی با روش K-means (که در آن تعداد خوشه‌ها از قبل باید تعیین شود) با تعداد خوشه برابر با دندوگرام روش وارد، دسته‌بندی مشابه صورت گرفت. به بیان دیگر، روش K-means مانند روش وارد عمل کرده و هر دو در تعداد خوشه برابر، چاه‌های یکسانی را قرار دادند. بنابراین، از آوردن نتایج روش K-means خودداری شد. برای تعیین آستانه خوشه‌ها

جدول ۳. مقادیر متوسط شاخص عرض سیلهوت در تعداد خوشه متفاوت

| تعداد خوشه | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|
| متوسط شاخص عرض سیلهوت | ۰/۶۳۱۲ | ۰/۸۰۲۴ | ۰/۷۴۷۹ | ۰/۷۵۲۵ |



شکل ۷. دندوگرام مربوط به خوشه‌بندی توسط روش وارد



شکل ۸. نقشه شماتیک خوشه‌بندی آبخوان با سه خوشه

شد. نتایج خوشه‌بندی تطابق ۶۲/۵ درصد را با نتایج مدل IMDPA دارد و تأییدی بر صحت این مدل است. همچنین، با استفاده از ماتریس‌های فاصله اقلیدوسی چاه‌ها، بیشترین تأثیر در خوشه‌بندی در مرتبه اول هدایت الکتریکی و پس از آن فرسایش و افت سطح آب زیرزمینی بوده است. وجود تعداد نسبتاً کافی از معیارها و شاخص‌های منطبق با شرایط منطقه موجب شده است تا برآورد دقیقی از شدت و وضعیت تخریب آبخوان صورت گیرد. درنهایت، پیشنهاد می‌شود به‌منظور آمایش سرزمین (برنامه‌ریزی و مدیریت منطقه) از نقشه تهیه‌شده استفاده شود.

منابع

- [1]. Roux P, Preez C.C, Strydo M.G. Significance of soil modifiers in naturally degraded Vertisols of the Peninsular Indian in redefining the sodic soils. *Journal of Geoderma*. 2007; 136(1-2): 210-228.
- [2]. Zarei H, Akhondali E. The evaluation of quality trend of water resource in Abolabads reservoir river basin and irrigation and drainage network. *Network Management Articles National Conference of Irrigation and Drainage*, martyr Chamran University. 2006; 3: 1626-1620. (In Persian)
- [3]. The Department of Environment and Conservation (NSW). 2007. Guidelines for the Assessment and Management of groundwater Contamination. Published by: Department of Environment and Conservation NSW, Website: www.environment.nsw.gov.au.

بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق از مدل IMDPA برای ارزیابی شدت بیابان‌زایی آبخوان واقع در دشت‌های بم‌نرماشیر و رحمت‌آباد استفاده شد. از جمله تغییرات انجام‌شده در مدل IMDPA به تفکیک شاخص‌های کیفی و کمی در مدل، استفاده از بیشترین محدودیت بین شاخص‌های کیفی اشاره کرد. شاخص‌های بررسی‌شده در ارزیابی شدت بیابان‌زایی، تأثیرات متفاوتی بر وضعیت تخریب منطقه مطالعه‌شده دارند که در مدل IMDPA ارزش لایه‌ها یکسان فرض شده و در واقع تأثیر کلیه شاخص‌ها یکسان است که این از معایب مدل IMDPA است، زیرا با یکسان فرض کردن تأثیر کلیه شاخص‌ها، تأثیر شاخص غالب با ضرب شاخص‌ها در هم کم‌رنگ‌تر می‌شود که در این تحقیق با استفاده از بیشترین محدودیت در ارزیابی کیفی این مشکل برطرف شد. در این پژوهش برای ارزیابی کیفی از شاخص‌های EC، SAR و CL و برای ارزیابی کمی از افت سطح آب زیرزمینی استفاده شد. همچنین، فرسایش منطقه در نقشه نهایی در نظر گرفته شد. نقشه پهنه‌بندی هر شاخص رسم شد و درنهایت نقشه تخریب بیابان‌زایی آبخوان به‌دست آمد. نتایج نشان می‌دهد بیشترین و کمترین خطر به‌ترتیب ۹۰/۸۱ و ۰/۰۱ درصد از مساحت کل آبخوان در وضعیت خطر تخریب شدید و کم قرار دارد. برای اطمینان از صحت مدل IMDPA از روش‌های خوشه‌بندی وارد و K-means استفاده شد. تعداد خوشه بهینه با استفاده از شاخص عرض سیلهوت تعیین و براساس آن آبخوان به سه خوشه تقسیم

- [4]. Vahabzadeh E. Understanding the environment: planet earth live. Sixth Edition. University of Mashhad Press. 2009.
- [5]. Mahdavi M. Applied Hydrology. Volume II Tehran University Press. 2005.
- [6]. Rizzo D.M, Mouser J.M. Evaluation of Geostatistics for Combined Hydrochemistry and Microbial Community Fingerprinting at a Waste Disposal Site. 2000; 1-11.
- [7]. Thapinta A, Hudak P. Use of geographic information systems for assessing groundwater pollution potential by pesticides in Central Thailand. Journal of Environmental International. 2003; 29: 87-93.
- [8]. Tabatabaefar SM, Zehtabian Gh.R, Rahimi M, Khosravi H, Nikoo Sh. The impact assessment of temporal variation of climatological and groundwater condition on desertification intensity in Garmsar Plain. Journal of Desert Management. 2013; 2:39-48. (In Persian)
- [9]. Nateghi S, Zehtabian Gh.R, Ahmadi H. Evaluation of desertification intensity in Segzi Plain using IMDPA model. J. Range Water Manage. 2009; 62(3):419-430. (In Persian)
- [10]. Zolfaghari F. Identification of present desertification status in Sistan plain using IMDPA method. M.Sc thesis, Faculty of Natural Resources. University of Zabol. 2010. (In Persian)
- [11]. Niko S.H. Assessment of potential desertification, land degradation to identify the effective factors by using IMDPA method (Case study: Damghan region). A thesis of Ph.D. in combating desertification, University of Tehran. 2011; 233p. (In Persian)
- [12]. Pahlavanravi A, Moghaddamnia A.R, Hashemi Z, Javadi M.R, Miri, A, Evaluation of desertification intensity with wind erosion criterion using MICD and FAO-UNEP models in Zahak region of Sistan. Iranian Journal of Range and Desert Reseach. 2012; 19(4): 624-639. (In Persian)
- [13]. Mesbahzadeh T, Ahmadi H, Zehtabian Gh, Sarmadian F, Moghimi Nezhad F. Calibration of IMDPA model with regarding to land criteria to present regional model for desertification intensity (Case study: Abuzaidabad, Kashan). Journal of Range and Watershed Management. 2013; 66(3): 469-476.
- [14]. Shokoohi E.S, Zehtabian Gh.R, Tavili A. Study of desertification status using IMDPA model with emphasis on water and soil criteria (Case study: Khezr Abad - Elah Abad of Yazd plain). Journal of Range and Watershed Management. 2013; 65(4): 517-528.
- [15]. Silakhori A, Ownegh M, Saad Eddin A, Fylhksh A. Comparing the efficiency of the Iranian model of desertification potential assessment (IMDPA) and MICD models, case study: Sabzevar area. Journal of Preceding studies soil and water conservation. 2014; 4(21): 1-28. (In Persian)
- [16]. Vly A.A, Mousavi S.H, Ahmadi S.M. Assessment of desertification in Masjed Soleiman basin by using IMDPA model. Journal of Engineering desert ecosystem. 2015; 4(9):43-56. (In Persian)
- [17]. Ahmadi, H. Iranian Model of Desertification Potential Assessment. Faculty of Natural Resources, University of Tehran. 2004. (In Persian)
- [18]. Ward Jr. Hierarchical grouping to optimize an objective function. Journal of the American Statistical Association. 1963; 58 (301): 236-244.
- [19]. Macqueen J. Some methods for classtification and analysis ofmultivariate observation. In Proceeding of the 5th Berkeley symposiumon mathematical statistics and probability. Berkeley, CA: University of California. 1967; 1: 297-2871.
- [20]. Moameni M. clustering data. 2nd ed. Tehran: 2014. (In Persian)
- [21]. Rousseeuw P.J. Silhouette: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analasis, Journal of Computational and Applied Mathematics. 1987; 20: 53-65.
- [22]. Zakeri nazhad R, Masoudi M, Fallah Shamsi SR, Afzali SF. Evaluation of severity of desertification, groundwater assessment criteria and using geographic information system (Case study: Zarindasht plain). Journal of Irrigation and Water. 2008; 2(0):8-87. (In Persian)
- [23]. Masoudi M, Barzegar S. Assessment and Mapping of Qualitative and Quantitative Severity Degradation of Groundwater Resources using the Modified IMDPA Desertification Model and GIS (Case Study: Firuz-abad Plain of Fars province). Journal of Irrigation and Water. 2015; 5(20):88-95. (In Persian)
- [24]. Johnson C.W, Gebhardt K.A. Predicting sediment yields from saga brush rangeland in, Proceedings of the workshop on estimating erosion and sediment yield on rangeland Department of agriculture ARM-W. 1982. 26:145-156.