



دوره ۳۵، شماره ۳، شماره‌ی پیاپی ۱۳۶، پاییز ۱۴۰۱، صفحه‌های ۱۴-۲
شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2021.355779.1432

پژوهش‌های آبخیزداری

مقاله‌ی پژوهشی



ارزیابی احتمال خطر شوری آب‌های زیرزمینی در دشت‌های جنوبی آبخیز بختگان با مدل‌های آماری، داده‌مبنا و تحلیل سلسله‌مراتبی فازی

حمیدرضا قره‌چایی

کارشناس فنی طرح حفاظت از تالاب‌های ایران، سازمان حفاظت محیط زیست

علی اکبر نظری سامانی

(نویسنده‌ی مسئول)* دانشیار گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشگاه تهران

شهرام خلیقی سیگارودی

دانشیار گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشگاه تهران

خالد احمدآلی

استادیار گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشگاه تهران

ابوالحسن فتح‌آبادی

استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه گنبدکاووس

*رایانامه‌ی نویسنده‌ی مسئول: aknazari@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲۷ شهریور ۱۴۰۰ تاریخ پذیرش: ۲۷ آذر ۱۴۰۰

چکیده

مسائل مرتبط با پیاده‌سازی سیاست‌های ملی در زمینه‌ی کاهش آسیب‌های طبیعی در کشورهای توسعه‌یافته نگرانی فراگیری است. در این پژوهش عوامل مؤثر بر خطر، آسیب‌پذیری و احتمال خطر (ریسک) شوری آب‌های زیرزمینی در دشت‌های جنوبی آبخیز بختگان با مساحت ۶۱۳۷ کیلومتر مربع با دو مدل شاخص آماری و الگوریتم رده‌بندی درخت تصمیم، و فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی ارزیابی شد. در گام نخست با بررسی داده‌های کیفی آب‌های زیرزمینی از ۱۲۴ چاه، نقطه‌های رخداد شوری آب‌های زیرزمینی (بر مبنای شاخص هدایت الکتریکی) شناسایی شد. روش حذف ویژگی بازگشتی برای یافتن و انتخاب کردن ترکیب اصلی شاخص‌ها در تهیه‌ی نقشه‌های خطر شوری آب‌های زیرزمینی به کار برده شد. پس از تعیین کردن اهمیت هر شاخص با محاسبه‌ی آزمون جک‌نایف، نقشه‌ی خطر شوری آب‌های زیرزمینی با دو مدل شاخص آماری و الگوریتم رده‌بندی درخت تصمیم پیش‌بینی شد. اندازه‌ی آسیب‌پذیری منطقه به شوری آب‌های زیرزمینی با فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی سنجیده شد. برای ارزیابی کارکرد مدل‌های دومتغیری و اعتبارسنجی مدل‌سازی‌ها آماره‌های حساسیت، ویژگی، صحت و ضریب کاپا، و برای مدل‌های چندمتغیره چهار معیار ضریب تعیین، ضریب تطابق، ضریب کلینگ گوپتا، و ضریب همبستگی به کار برده شد. نقشه‌ی احتمال خطر شوری آب‌های زیرزمینی از روی هم‌گذاشتن نقشه‌های خطر و آسیب‌پذیری تهیه شد. نتیجه‌ها نشان داد که ۴/۱۳ کیلومتر مربع از منطقه‌های آبیاری‌شده در رده‌ی احتمال خطر بسیار زیاد است، که بیش‌ترین مساحت در میان کاربری‌های گوناگون با آسیب‌پذیری خیلی زیاد است. برپایه‌ی نتیجه‌ی این پژوهش می‌توان گفت که تدوین طرح‌های جامع مدیریتی، نظارت و پایش فعالیت‌های اجرایی مانند تغییر کاربری‌ها، یا در نظر گرفتن شرایط حاکم در پیاده‌سازی کنش‌های احیایی ممکن است به مهار و مدیریت کردن احتمال خطر این منطقه‌ها کمک شایانی کند.

واژگان کلیدی: ارزیابی احتمال خطر (ریسک)، حذف ویژگی بازگشتی، شوری، مدل‌های دو و چند متغیره

مقدمه

حوزه‌ی اقیانوس آرام جنوبی در گزارش سال ۲۰۰۴ در نظر گرفته شد (کالی و همکاران ۲۰۰۴). در مقیاس منطقه‌ی نیز بیش‌تر عامل‌هایی مانند زمین (کاربری سرزمین و نوع خاک)، اقلیم (دما و بارش)، پستی‌بلندی (شیب و بلندی) فرسایش، و تراکم جمعیت به‌کار برده‌شده است (ساهو و همکاران ۲۰۱۶). برای تهیه‌ی نقشه‌های آسیب‌پذیری نیز از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی که روشی کارآمد است بهره گرفته شده است (لیو و همکاران ۲۰۱۷). پژوهش‌های تقی‌زاده و همکاران ۲۰۱۷ نشان داد که از میان ۱۳۱۱ چاه عمیق در دشت نمدان، ۴۳۳ چاه (۳۳/۰۲٪) در محدوده‌ی شوری بسیار زیاد و زیاد است، اما این اندازه برای چاه‌های نیمه عمیق ۱۲/۶۶٪ است. در نتیجه آن‌ها آشکار کردند که موقعیت چاه‌های عمیق و برداشت بی‌رویه از آن‌ها تأثیر بسیار زیادی بر شورشیدن آب‌های زیرزمینی دشت نمدان دارد. جنوب آبخیز بختگان از دشت‌های حاصل‌خیز کشور است، که به‌علت موقعیت ویژه‌ی خود، و نیز به‌دلیل برداشت‌های بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی با خطر جدی افزایش اندازه‌ی شوری آب‌های زیرزمینی روبه‌رو است. قره‌چایی و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که عامل‌های بلندی، فاصله از کفه‌های نمکی، فاصله از ناودیس‌ها و تاقدیس‌ها، و فاصله از دریاچه بیش‌ترین اهمیت در رخ‌داد شوری آب زیرزمینی بخش‌های جنوبی آبخیز بختگان دارد.

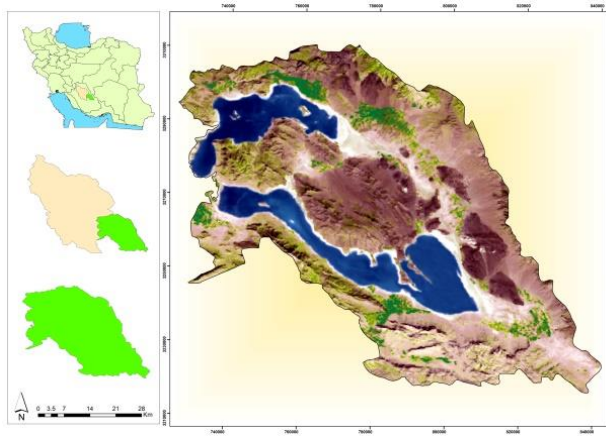
پژوهش‌های پیشین تأیید می‌کند که اندازه‌ی شوری آب زیرزمینی این حوزه بر اثر خشک‌سالی و تشدید برداشت‌های بی‌رویه در سال‌های پیشین افزایش یافته است. از سوی دیگر، توزیع مکانی اندازه‌ی شوری آب‌های زیرزمینی در این حوزه کاملاً یک نواخت نیست، و وضعیت در برخی منطقه‌ها بحرانی و در برخی دل‌خواه‌تر به‌نظر می‌رسد. با توجه به شرایط منطقه‌های خشک و نیمه‌خشک از دید آمادگی در برابر فاجعه‌ی شوری آب‌های زیرزمینی، توجه به احتمال خطر و آسیب‌پذیری، و اولویت‌بندی عامل‌های موثر بر شوری آب‌های زیرزمینی اهمیت بسیاری دارد. بنابراین هدف‌های اصلی این پژوهش اولویت‌بندی عامل‌های موثر بر شوری آب‌های زیرزمینی و پهنه‌بندی ناحیه‌های درخطر، و ساختن نقشه‌ی احتمال خطر مبتنی بر درجه‌ی آسیب‌پذیری به شوری آب‌های زیرزمینی است. از آن‌جا که ارزیابی احتمال خطر و سنجش تراز آسیب‌پذیری یکی از جنبه‌های اصلی کاهش‌دادن اثر آسیب‌های طبیعی است، این پژوهش ممکن است برای شماری از سودمندان به‌ویژه ستاد بحران، سازمان مدیریت، برنامه و بودجه، شوراهای برنامه‌ریزی، مسئولان آموزش و پرورش، و شرکت‌های بیمه مفید باشد. این پژوهش‌ها کمک زیادی نیز به هدایت‌کردن پاسخ و کنش‌های سازمان‌های گوناگون به‌سوی مدیریت سازگار آسیب‌ها خواهد کرد.

شوری آب‌های زیرزمینی در این سال‌ها مسأله‌ی پایه‌ی دانسته شده است. خطر شوری از سوی فرآیندهایی است که نتیجه عامل‌های طبیعی و فعالیت‌های نادرست انسانی است، به شکلی که اندازه‌ی شوری آب از یک طرف با کاهش فاصله از منابع نمکی (عامل طبیعی)، و از طرف دیگر با برداشت بی‌رویه و کاهش تراز آب زیرزمینی افزایش می‌یابد (عامل انسانی)، و این آسیب‌های جبران‌ناپذیری به زندگی گیاهی و جانوری بوم‌نظام وارد می‌کند. در این شرایط مدیریت احتمال خطر (ریسک) آسیب‌هایی همچون شوری آب‌های زیرزمینی باید بر پایه‌ی یافتن درک جامعی از احتمال خطر در همه‌ی جنبه‌های آسیب‌پذیری، در خطر افتادن مردم، ویژگی‌های خطر، و شرایط محیط باشد (نصرالهی و همکاران ۲۰۱۸). کاهش احتمال خطر و جنبه‌های مرتبط با پیاده‌سازی سیاست‌های ملی در کاهش آسیب‌های طبیعی در کشورهای توسعه‌یافته نگرانی فراگیری برای همه‌ی کشورها است، و بنابراین راه‌برد کاهش احتمال خطر و آسیب‌پذیری برای توسعه‌ی کارآمد ضروری است (کتیلر و همکاران ۲۰۱۲). از همین رو اهمیت دادن به مدیریت احتمال خطر، نیازمند داشتن چارچوب مناسبی است که نه‌تنها شامل فرآیندهای شناسایی، اندازه‌گیری و مدیریت احتمال خطر باشد، بل که سازوکاری فراهم آورد تا در برابر تغییر احتمال خطر و روبه‌های مدیریت بحران که قبلاً پیش‌بینی نشده است، بازخور دریافت شود (نصرالهی و همکاران ۲۰۱۸). پژوهش‌های پیشین بر بررسی احتمال خطر مبتنی بر خطر و آسیب‌پذیری متمرکز بوده است، مانند احتمال خطر خشک‌سالی (نصرالهی و همکاران ۲۰۱۸)، احتمال خطر بیابان‌زایی (خسروی و همکاران ۲۰۱۷)، و احتمال خطر فرونشست (بی‌بی ۲۰۰۹). برای تهیه‌ی نقشه‌های پهنه‌بندی خطر، پژوهشگران از طیف وسیعی از روش‌ها مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی (چن ۲۰۱۷)، لوکا و همکاران (۲۰۱۱)، سامانه‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (اشرف و کاوود ۲۰۱۵، دویت ۲۰۱۵)، تحلیل وایازی پشتیبان (اوه و لی ۲۰۱۱)، الگوریتم درخت تصمیم (هاستی ۲۰۰۹)، نزدیک‌ترین همسایه (اوزدمیر ۲۰۱۳) وزن نشان‌گر و ماشین‌های بردار پشتیبان (دویت ۲۰۱۵)، سامانه‌های عصبی‌فازی (پارداهان ۲۰۱۷) و روش شاخص آماری (خسروی و همکاران ۲۰۱۶) به‌کار برده‌اند. اولین پژوهش‌ها برای تعیین پهنه‌ها و عامل‌های موثر در شوری آب‌های زیرزمینی را براد و همکاران (۱۹۹۷) انجام دادند. پژوهش‌های گوناگونی در ترازهای ملی، منطقه‌ی و محلی با نوع‌های گوناگونی از روش‌های تجزیه‌تحلیل داده‌ها با سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی و سنجش‌ازدور برای بررسی آسیب‌پذیری انجام شده‌است. در مقیاس ملی، عامل‌های ارزیابی بر پایه‌ی ۵۰ شاخص تدوین شده‌ی کارگروه کاربردی علوم زمین

مواد و روش‌ها

ارزیابی اندازه‌ی هدایت الکتریکی است، زیرا بازتابی از کل مواد جامد محلول در آب است. داده‌های هدایت الکتریکی برای ۱۲۴ چاه گرفته شد (شرکت مدیریت منابع آب ایران، مراجعه‌ی شخصی). میانگین سالانه‌ی هدایت الکتریکی چاه‌ها برای سال ۱۳۹۸-۱۳۹۷ محاسبه شد. کیفیت آب با بیش از $1000 \mu\text{Scm}^{-1}$ برای کاربرد آشامیدن، صنعت و حتا آبیاری نامناسب است (شورای ملی تحقیقات آمریکا ۱۹۸۹). بنابراین برای جداکردن چاه‌های شور و نا شور آستانه‌ی هدایت الکتریکی $1000 \mu\text{Scm}^{-1}$ به کار برده شد.

منطقه‌ی پژوهش با گستره‌ی تقریبی ۶۱۳۷ کیلومترمربع در بخش جنوبی آبخیز بختگان در استان فارس (میان طول‌های جغرافیایی $10^{\circ} 54'$ تا $22^{\circ} 54'$ و عرض‌های جغرافیایی $29^{\circ} 10'$ تا $29^{\circ} 22'$) نزدیک شهر بختگان، ۲۰ کیلومتر شهر نی‌ریز و ۲۱۰ کیلومتر جنوب شرقی شهر شیراز است (شکل ۱). بلندی آن از تراز دریا ۱۶۳۲ متر، متوسط بارندگی سالانه‌ی آن در حدود ۱۸۵ میلی‌متر، میانگین دمای آن $19/4^{\circ}\text{C}$ و متوسط تبخیر سالانه‌ی آن در حدود ۹۳ میلی‌متر است (قره چایی و همکاران ۲۰۱۴). بهترین روش برای بیان شوری آب



شکل ۱- موقعیت منطقه‌ی پژوهش.

پیشنهاد شد (بونهام ۱۹۹۴). در این مدل ارزش وزنی هر رده از ویژگی‌ها با لگاریتم‌گیری از نسبت تراکم رخداد در رده‌ی دل‌خواه بر تراکم رخداد در کل نقشه به دست می‌آید. اگر تعداد رخداد در رده‌ی از حد بهنجار منطقه کم‌تر باشد وزن آن کم‌تر از ۰، و اگر بیش‌تر باشد وزن آن بیش‌تر از ۰ است (رابطه‌ی ۱).

$$W_{ij} = \ln\left(\frac{f_{ij}}{f}\right) = \ln\left(\frac{A * ij}{A_{ij}}\right) * \ln\left(\frac{A^*}{A}\right) \quad 1$$

W_{ij} وزن داده‌شده به رده‌ی i از ویژگی j
 F_{ij} تراکم نقطه‌های روی داد در رده‌ی i از ویژگی j
 f تراکم نقطه‌های روی داد در کل نقشه
 $A * ij$ مساحت منطقه‌ها با شوری آب‌های زیرزمینی در رده‌ی i از ویژگی j
 A_{ij} مساحت رده‌ی i از ویژگی j
 A^* مساحت کل منطقه‌ها با شوری آب‌های زیرزمینی و A کل مساحت نقشه است.

برای تهیه‌ی نقشه‌ی خطر شوری آب زیرزمینی، داده‌های پژوهش‌های پیشین با درنظر گرفتن سه ویژگی کلیدی مرتبط بودن، دسترس بودن، و مقیاس، ابتدا مجموعه‌ی از شاخص‌های اثرگذار و اثرپذیر از شوری آب‌های زیرزمینی شناسایی شد. برای تعیین بهترین شاخص‌ها روش RFE^۱ به کار برده شد. بر همین پایه شاخص‌های بلندی، فاصله از تاقدیس‌ها، ناودیس‌ها، کفه‌های نمکی، دریاچه‌های شور، فاصله‌ی سدها، شاخص شوری خاک، شاخص رطوبت پستی‌بلندی، انحنا‌ی کلی، انحنا‌ی دشت، انحنا‌ی نیم‌رخ، جریان تجمعی، جهت جریان، شیب، جهت، کاربری زمین، خاک، اقلیم، پوشش زمین، افت آب‌های زیرزمینی، و تراز آب‌های زیرزمینی برای شاخص‌های موثر بر خطر شوری آب‌های زیرزمینی برگزیده شد. نقشه‌ی هر شاخص در آرک‌جی‌آی‌اس نسخه‌ی ۱۰.۵ ترسیم شد. روش دو متغیره‌ی شاخص آماری و الگوریتم رده‌بندی درخت تصمیم برای مدل‌سازی و تهیه‌ی نقشه‌ی خطر به کار برده شد. نقشه‌های خطر تولیدشده اعتبارسنجی شد. مدل شاخص آماری (SI) برای تحلیل حساسیت زمین‌لغزش

برابر تعداد نقطه‌هایی که نادرست پیش‌بینی کرد (درست منفی) ترسیم شد. مساحت زیر منحنی توانایی مدل را در پیش‌بینی درست روی دادن و روی ندادن بازگو می‌کند. مدل با مساحت زیر منحنی زیاد بهترین مدل در نظر گرفته شد. اگر سطح زیر منحنی ۱ شود نتیجه‌ی آزمون عالی است (بریزینسکی ۲۰۱۷). اگر مدل نتواند به خوبی رده‌های گوناگون را شناسایی کند مساحت زیر منحنی ۰/۵، و اگر بتواند همه‌ی رده‌ها را به خوبی شناسایی کند ۱ می‌شود. برای محاسبه کردن رسم منحنی ویژگی کارکرد و مساحت زیر آن آستانه‌های گوناگونی از ۰ تا ۱ در نظر گرفته، و برای هر آستانه تعداد نقطه‌هایی که در آن‌ها مدل شوری آب‌های زیرزمینی تشخیص داده شده با نقطه‌هایی با شوری مشاهده شده مقایسه و شاخص‌های ویژگی و حساسیت محاسبه شد. این دو شاخص صعودی مرتب شد و برای محاسبه کردن، منحنی ویژگی کارکرد ترسیم شد.

برای ارزیابی کارکرد مدل‌های دومتغیره و اعتبارسنجی مدل‌سازی‌ها آماره‌های حساسیت، ویژگی، صحت و ضریب کاپا، و برای ارزیابی کارکرد مدل‌های چندمتغیره ۴ معیار ضریب تعیین (R^2)، ضریب تطابق (CC)، ضریب کلینگ گوپتا (KGE)، و ضریب همبستگی (COR) به کار برده شد. برای مقایسه‌ی مدل‌های دو و چندمتغیره داده‌های پیوسته‌ی شوری (برای مدل الگوریتم رده‌بندی درخت تصمیم) و ۰ برای اندازه‌های هدایت الکتریکی کم‌تر از $1000 \mu\text{Scm}^{-1}$ و شوری ۱ برای اندازه‌های شاخص هدایت الکتریکی بیش‌تر از $1000 \mu\text{Scm}^{-1}$ (برای مدل شاخص آماری) به کار برده شد.

برای به دست آوردن نقشه‌ی آسیب‌پذیری شوری آب‌های زیرزمینی ابتدا معیارها و شاخص‌ها شناسایی شد. عامل‌های محیطی، طبیعی و انسانی برای گروه‌بندی معیارها در نظر گرفته شد. غربال‌گری معیارها و شاخص‌ها با روش دلفی بود (لینستون ۱۹۷۵) که شاید معروف‌ترین و فراگیرترین روش باشد. در جایی که هیچ داده‌ی واقعی نیست، این روش در تشکیل دادن مجموعه‌ی معیارهای مکان‌یابی یگانه است (براونسون ۲۰۱۸). به گروهی از متخصصان که جدا از هم اند و از نظر یکدیگر آگاهی ندارند پرسش‌نامه‌ی داده می‌شود. ماهیت مستقل این فرآیند تایید می‌کند که پاسخ‌ها مستقل داده شود و از نظر دیگر افراد گروه تاثیر نگیرد. معیارهای شناسایی شده در قالب پرسش‌نامه‌ی بسته که دسته‌های پنج‌گانه‌ی ارزشی لیکرت برای هر معیار در آن است، برای هر کارشناس فرستاده شد، و پس از جمع‌آوری، دو شاخص درصد اهمیت و درجه‌ی اهمیت برای هر معیار و زیرمعیار محاسبه، و با جدول اهمیت معیارها غربال کرده شد. معیارهایی در فرآیند وارد کرده شد که دست کم دربرگیرنده‌ی نیمی از کل ارزش درجه و درصد اهمیت بود. روش FAHP برای اولویت‌بندی و وزن‌دهی معیارها به کار

روش شاخص آماری بر پایه‌ی همبستگی نقشه‌ی شوری آب‌های زیرزمینی با ویژگی‌های موثر بر روی داد آن‌ها است، و وزن‌ها فقط برای رده‌هایی از ویژگی‌های روی داده محاسبه می‌شود. اگر یک رده از ویژگی مشخص بررسی نشده باشد هیچ همبستگی با نقشه‌ی منطقه ندارد (بوئی ۲۰۱۱).

الگوریتم رده‌بندی درخت تصمیم یکی از ابزارهای قوی و فراگیر برای دسته‌بندی و پیش‌بینی کردن است (بیرمان و همکاران ۱۹۸۴)، که برای متغیرهای کمی طراحی شد، ولی برای هر نوع متغیر به کار برده می‌شود. بر پایه‌ی این الگوریتم، نرم‌افزار آماری CART نیز ساخته شد. این مدل شاخص‌های گوناگونی می‌دهد تا بر پایه‌ی قانون‌های موجود پیش‌بینی خود را انجام دهد. این مدل موجب تشکیل نموداری شبیه درخت تصمیم با تقسیم‌های دوتایی برای معرفی کردن الگوی رده‌بندی و تشخیص می‌شود. برای به کارگیری مدل CART از تابع ناچوری و شاخص جینی همچون معیاری برای انتخاب متغیرهای مناسب بهره برده شد. تابع ناچوری برای گروهی مانند t و یک متغیر وابسته با k رده با رابطه‌ی ۲ تعریف شد.

$$I(t) = \Phi [P(C = C_1 | t), \dots, P(C = C_k | t)] \quad 2$$

شاخص جینی اغلب در مدل‌های درختی با تقسیم‌های دوتایی در هر گره به کار برده شد (رابطه‌ی ۳). در این روش همه‌ی متغیرها در گره امتحان کرده شد و متغیری که از همه کوچک‌تر بود انتخاب شد.

$$I(t) = gini(t) - \sum_{j=1}^k P^2(C = C_j | t) \quad 3$$

اندازه‌ی تابع ناچوری در حالت کلی برای متغیر پاسخ محاسبه شد. برای همه‌ی متغیرهای کمکی با نگاه به بهترین تقسیم‌های دوتایی برای متغیر پاسخ، مقدار تابع ناچوری در هر دو زیر مجموعه‌ی ایجاد شده محاسبه، و میانگین وزنی آن‌ها از مقدار تابع ناچوری کل کم شد. از میان متغیرهای کمکی متغیری که اندازه‌ی آن برای این رابطه بیش‌ترین بود در گام اول برای رده‌بندی درختی انتخاب شد. برای اجرا کردن روش الگوریتم رده‌بندی درخت تصمیم نرم‌افزار R بسته‌ی ۳.۶.۳ به کار برده شد.

رای اعتبارسنجی نقشه‌های خطر شوری آب‌های زیرزمینی از نمودار مشخصه‌ی کارکرد که روشی مفید برای نشان دادن کیفیت مدل‌های تعیین شده و احتمالی در شناسایی و پیش‌بینی کردن سامانه‌ها است (Egan ۱۹۷۵) بهره برده شد. در نمودار ویژگی کارکرد نسبت نقطه‌هایی که مدل روی داد شوری آب‌های زیرزمینی را در آن به درستی پیش‌بینی کرد (درست مثبت) در

برده‌شد. فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی یکی از جامع‌ترین سامانه‌های طراحی‌شده برای تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه است که با آن می‌توان، فرآیند تصمیم‌گیری را قالب‌بندی کرد، معیارهای کمی و کیفی گوناگون در نظر گرفت، گزینه‌های تصمیم‌گیری را وارد مسئله کرد، و حساسیت بر معیارها و زیرمعیارها را تحلیل کرد (گویندان و همکاران ۲۰۱۴؛ سراجدویک و همکاران ۲۰۰۷). در جایی که امکان مقایسه‌ی دو به دو هست، FAHP باید مناسب‌تر و کارآتر از AHP مرسوم باشد. مرحله‌های AHP فازی ساختن سلسله‌مراتبی برای معیارها و گزینه‌ها، تعیین جدول‌های مقایسه‌ی زوجی و محاسبه‌ی وزن معیارها و گزینه‌ها، و بررسی سازگاری سامانه است (ساعتی ۱۹۸۰).

شاخص‌ها با تابع عضویت فازی در محیط آرک جی‌آی‌اس نسخه‌ی ۱۰.۵ بمعیار شد. به هر شاخص وزنی داده شد، که نشان دهنده‌ی اهمیت آن نسبت به شاخص‌های دیگر است. وزن هر شاخص در نقشه‌ی بمعیارشده‌ی آن ضرب شد، و نتیجه‌ها با هم جمع کرده‌شد. وزن‌دهی به شاخص‌ها با روش مقایسه‌ی زوجی در متن فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی بود. تجربه نشان می‌دهد که روش مبتنی بر مقایسه‌ی دو به دو به‌دلیل کاربرد آسان و دقت مناسب از موثرترین و پرکاربردترین روش‌های تصمیم‌گیری است، که به شیوه‌ی نظری و تجربی در دامنه‌ی گسترده‌ی از وضعیت‌های تصمیم‌گیری آزموده شده است (زاهو ۲۰۰۶). برای تعیین وزن عامل‌ها جدول مربعی مقایسه‌ی زوجی عامل‌ها تهیه شد. مقایسه‌ی درجه‌ی اهمیت عامل‌ها با هم (وزن‌های نسبی) بر پایه‌ی مقیاس پایه به‌دست کارشناسان خبره انجام شد. با وارد کردن وزن‌های نسبی جدول به نرم‌افزار آرک جی‌آی‌اس وزن نهایی عامل‌ها محاسبه شد (ایستمن ۲۰۰۶). نتیجه‌ی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی به‌دلیل سادگی، انعطاف‌پذیری، به‌کارگیری هم‌زمان معیارهای کمی و کیفی، و توان بررسی سازگاری در قضاوت‌ها ممکن است در بررسی موضوع مکان‌یابی کاربرد درستی داشته باشد. برای ارزیابی سازگاری وزن‌ها، ضریب ناسازگاری محاسبه شد، که در حالت کلی بنابر پیشنهاد ساعتی (۱۹۸۰) کم‌تر از ۰/۱ بود. الگوریتم‌های گوناگونی برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری چندمعیاره

در چند دهه‌ی پیشین داده شده است. مساله‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره‌ی مکانی معمولاً شامل مجموعه‌ی از موقعیت‌های مکانی است که باید بر پایه‌ی چند معیار گوناگون ارزیابی شود (کرمی و همکاران ۲۰۰۹). در این پژوهش روش بولین به‌کار برده‌شد، که بر مبنای منطق ۰ و ۱ است و خروجی نهایی مدل به دو حالت کاملاً مناسب (۱) و کاملاً نامناسب (۰) است. نقشه‌های آسیب‌پذیری میان ۰ تا ۱ به پنج رده تقسیم شد، که هرچه ارزش رده بیش‌تر باشد، آسیب‌پذیری بیش‌تری خواهد داشت (نصرالهی و همکاران ۲۰۱۸).

با نقشه‌ی آسیب‌پذیری تهیه شده با روش AHP فازی، و نقشه‌ی برگزیده‌ی خطر شوری آب‌های زیرزمینی تولیدشده با روش شاخص آماری و الگوریتم رده‌بندی درخت تصمیم، نقشه‌ی احتمال خطر بر پایه‌ی رابطه‌ی ۴ (وارنز ۱۹۸۴) تهیه شد.

$$H * V = R_s \quad 4$$

RS احتمال خطر، H خطر، و V آسیب‌پذیری است.

نتایج

در روش شاخص آماری ارزش وزنی کاربری‌های زمین آبیاری‌شونده و شورزارها مثبت بود، و بیش‌ترین وزن در زمین آبیاری‌شونده بود. بیش‌ترین ارزش وزنی در خاک‌های اینسپتی‌سویل بود. بر پایه‌ی نتیجه‌ی این روش آماری ارزش وزنی در بلندی میان ۱۴۹۰ متر تا ۱۶۵۷ متر مثبت، و در بیش از ۱۶۵۷ متر ۰ بود. پراکندگی شوری آب‌های زیرزمینی در برابر فاصله از دریاچه‌های شور نشان داد که بیش‌ترین ارزش وزنی در فاصله‌ی ۰ تا ۶۸۵۵ متر نزدیک دریاچه‌های شور، و در فاصله‌ی کم‌تر از ۳۸۸۹ متر از کفه‌های نمکی بود. بیش‌ترین ارزش وزنی جریان تجمعی در رده‌ی ۷۴۴-۱۸۶ و در جهت جریان در رده‌ی ۱۴۰-۹۶ دیده شد. ارزش وزنی به‌دست آمده از شاخص رطوبت پستی‌بلندی نشان داد که هنگامی که اندازه‌های شاخص رطوبت پستی‌بلندی بیش از ۷/۲۶ شود ارزش وزنی مثبت است، و ارزش وزنی اندازه‌های کم‌تر از ۷/۲۶ منفی است. بیش‌ترین ارزش وزنی شیب در شیب‌های ۰

جدول ۲- مساحت رده‌های خطر شوری آب‌های زیرزمینی با روش الگوریتم رده‌بندی درخت تصمیم.

رده‌های خطر	مساحت (km ²)	مساحت (%)
بسیار کم	۱۹/۶۷	۳۲/۰۵
کم	۱۷/۹۳	۲۹/۲۱
متوسط	۹/۰۰	۱۴/۶۶
زیاد	۶/۱۰	۹/۹۳
بسیار زیاد	۸/۶۷	۱۴/۱۲

جدول ۱- مساحت رده‌های خطر شوری آب‌های زیرزمینی با روش شاخص آماری.

رده‌های خطر	مساحت (km ²)	مساحت (%)
بسیار کم	۵/۷۰	۹/۲۸
کم	۱۴/۶۳	۲۳/۸۳
متوسط	۱۹/۳۳	۳۱/۴۹
زیاد	۱۳/۵۲	۲۲/۰۳
بسیار زیاد	۸/۱۸	۱۳/۳۲

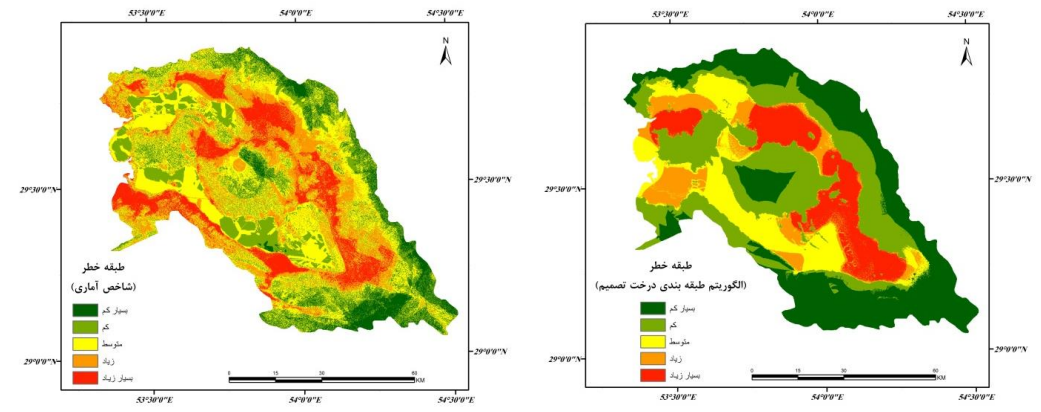
از ناودیس‌ها مهم‌ترین عامل‌های موثر در خطر روی داد شوری آب‌های زیرزمینی است، در حالی که انحنا کلی، انحنا دشت، نوع اقلیم، شیب، و انحنا نیم‌رخ تأثیر معناداری در شوری آب‌های زیرزمینی نداشت (جدول ۲).

پس از محاسبه‌ی آماره‌های روش شاخص آماری و ویژگی‌های روش الگوریتم رده‌بندی درخت تصمیم، این مدل‌ها برای کل منطقه اجرا شد. با در نظر گرفتن مختصه‌های نقطه‌ها، لایه‌ی نهایی خطر در نرم‌افزار آرک جی‌آی‌اس تهیه شد. بیش‌ترین اندازه‌های خطر به شوری آب‌های زیرزمینی در بخش‌های مرکزی و حاشیه‌ی دریاچه بود (شکل ۲).

پس از این که نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر به شوری آب‌های زیرزمینی با دو روش شاخص آماری و الگوریتم رده‌بندی درخت تصمیم به‌دست آمد، با روش شکست طبیعی به ۵ گروه خطر بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد رده‌بندی شد (شکل ۲).

تا ۵٪ بود، و در شیب‌های بیش‌تر از ۲۰٪ ارزش وزنی صفر بود. نقشه‌ی خطر شوری آب‌های زیرزمینی با روش شاخص آماری نشان داد که بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین وزن‌ها ۱۱/۸۲ و ۱۵/۴۵ - است. بیش‌ترین درصد مساحت در رده‌ی متوسط، و کم‌ترین آن در رده‌ی بسیار کم بود (جدول ۱).

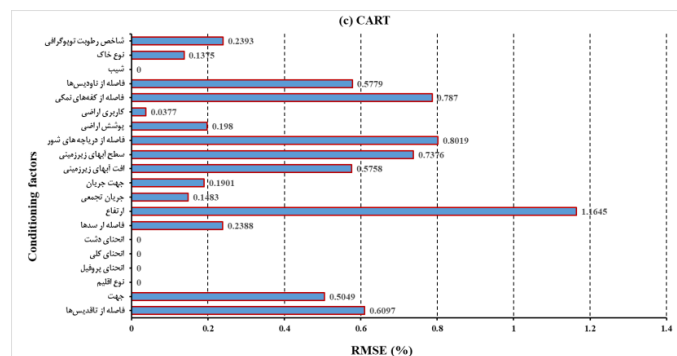
با کاربرد متغیرهای تأثیرگذار بر شوری آب‌های زیرزمینی و الگوریتم رده‌بندی درخت تصمیم، نقشه‌ی خطر برآورد شد (شکل ۲). نقشه‌ی تولیدشده نشان می‌دهد که زمین‌های جنوب و حاشیه‌ی دریاچه در رده‌ی خطر زیاد تا بسیار زیاد است. کم‌ترین مساحت در رده‌ی با خطر زیاد، و بیش‌ترین مساحت در رده‌ی با خطر بسیار کم بود. مساحت رده‌ی خطر بسیار زیاد ۸/۶۷ کیلومتر مربع (۱۴/۱۲٪) بود. نتیجه‌ی الگوریتم رده‌بندی درخت تصمیم نشان داد که به‌ترتیب متغیرهای بلندی، فاصله از دریاچه‌های شور، تراز آب زیرزمینی، فاصله از تاقدیس‌ها، و فاصله



شکل ۲- نقشه‌ی خطر شوری آب‌های زیرزمینی.

رده‌بندی درخت تصمیم ۱/۱۶۴ بود. در مدل‌سازی با روش الگوریتم رده‌بندی درخت تصمیم پس از عامل بلندی، بیش‌ترین اهمیت در فاصله از دریاچه‌های شور، فاصله از کفه‌های نمکی، تراز آب‌های زیرزمینی، فاصله از تاقدیس‌ها، فاصله از تاقدیس‌ها، و فاصله از ناودیس‌ها بود.

حساسیت ۲۱ شاخص به‌کاررفته در مدل‌سازی نقشه‌های خطر شوری آب‌های زیرزمینی با آزمون جک نایف بررسی شد. اهمیت عامل بلندی بیش‌تر از عامل‌های دیگر بود. آماره‌ی میانگین مربع‌های خطا اندازه‌ی افزایش خطا در مدل‌سازی در حالت حذف کردن یا نادیده گرفتن هر متغیر را نشان می‌دهد. بیش‌ترین زمین آبیاری‌شونده در بلندی‌های کم است. عامل بلندی در

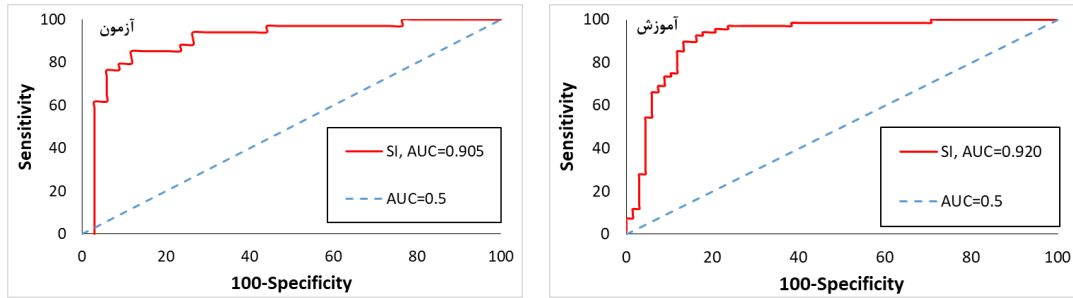


شکل ۳- تحلیل حساسیت الگوریتم رده‌بندی درخت تصمیم.

ارزیابی احتمال خطر شوری آبهای زیرزمینی در دشت‌های...

شاخص آماری در تهیه نقشه‌های خطر با نمودار ویژگی کارکرد بررسی شد. در شکل ۴ نمودار ویژگی کارکرد روش شاخص آماری برای داده‌های آزمون و آموزش آورده شده است. مساحت زیر منحنی برای داده‌های آزمون روش شاخص آماری ۰/۹۰۵ است. بنابراین می‌توان گفت که کارکرد روش شاخص آماری خوب بود. نتیجه‌ی ارزیابی کارکرد مدل چندمتغیره‌ی الگوریتم رده‌بندی درخت تصمیم (رابطه‌ی ۳) نشان می‌دهد که کارکرد نسبی روش CART خوب بود.

در تحلیل نقشه‌ی خطر شوری آبهای زیرزمینی، هدف اصلی شناسایی منطقه‌های با احتمال روی‌داد شوری آبهای زیرزمینی در آینده است. بنابراین، نیاز است که نتیجه‌ی نقشه‌ی خطر بر پایه‌ی روی‌داده‌های ناشناخته‌ی آینده ارزیابی شود، و از آنجا که دادن مدل بی‌ارزیابی و کارایی آن ارزش و اعتبار ندارد، نقشه‌های حساسیت شوری آبهای زیرزمینی به‌دست آمده با مجموعه‌ی داده‌های شوری آبهای زیرزمینی که در آموزش دو مدل کنار گذاشته شد، آزموده شد (شکل ۳). کارایی روش



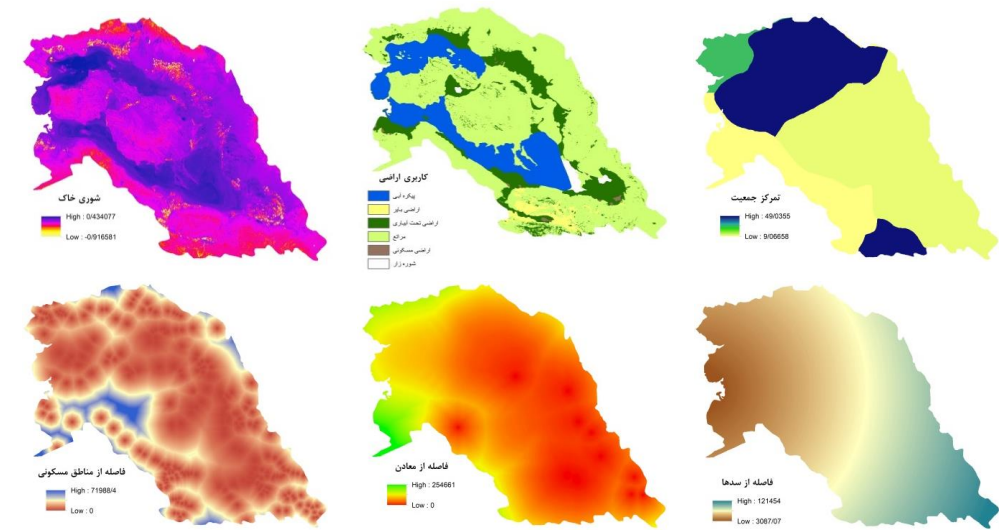
شکل ۴- نتیجه‌ی منحنی ویژگی کارکرد در ارزیابی کارکرد روش شاخص آماری.

جدول ۳- نتیجه‌ی معیارهای اعتبارسنجی مدل‌ها.

معیار	شاخص آماری	معیار	الگوریتم رده‌بندی درخت تصمیم
صحت	۰/۸۶۷	ضریب تطابق	۰/۸۹
حساسیت	۰/۷۳۵	ضریب همبستگی	۰/۸۲
ضریب کاپا	۰/۷۳۵	ضریب تعیین	۰/۶۷
مساحت زیر منحنی	۰/۹۰۵	ضریب کلیتگ گوپتا	۰/۷۵

(۱۴/۳۶٪)، زمین دیم (۲/۲۷٪)، شوره‌زار (۱/۰۶٪) و منطقه‌های مسکونی (۰/۲۶٪) بود. بیش‌ترین اندازه‌ی شوری خاک در زمین حاشیه‌ی دریاچه بود. کم‌ترین فاصله از معدن در بخش جنوبی حوزه است.

برای بمعيارسازی شاخص‌های آسیب‌پذیری منطق فازی به‌کار برده شد. شکل ۵ نقشه‌ی شاخص‌های به‌کاررفته در تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری شوری آبهای زیرزمینی را نشان می‌دهد. بیش‌ترین درصد کاربری زمین مرتع (۶۳/۱۵٪)، پیکره‌ی آبی (۱۸/۸۷٪)، زمین آبیاری‌شونده



شکل ۵- شاخص‌های به‌کاررفته در تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری به شوری آبهای زیرزمینی.

ممکن است ناشی از تعریف‌کردن مبهم مسئله، نبود اطلاعات کافی، اطلاعات نا قطعی، تمرکز نکردن خبرگان پاسخ‌گو، یا نداشتن دقت به هنگام پاسخ‌گویی باشد. بنابراین، پاسخ‌ها بازنگری شد. بیش‌ترین وزن در شوری خاک (۰/۵۹۲)، فاصله از معدن (۰/۱۳۷)، و کاربری زمین (۰/۱۰۸)، و کم‌ترین در فاصله از سدها (۰/۰۲۶) دیده شد (جدول ۴).

جدول ۴ وزن معیارهای موثر در تعیین آسیب‌پذیری منطقه به شوری آب‌های زیرزمینی را با روش فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی که از مقایسه‌های زوجی به دست آمده است نشان می‌دهد. نرخ ناسازگاری پس از وارد کردن داده‌های پرسش نامه به نرم‌افزار محاسبه شد. در آغاز بیش‌تر از ۰/۱ برآورد شد، از این رو در سازگاری قضاوت‌ها و ارزیابی‌ها تردید بود. این

جدول ۵- مساحت رده‌های آسیب‌پذیری به شوری آب‌های

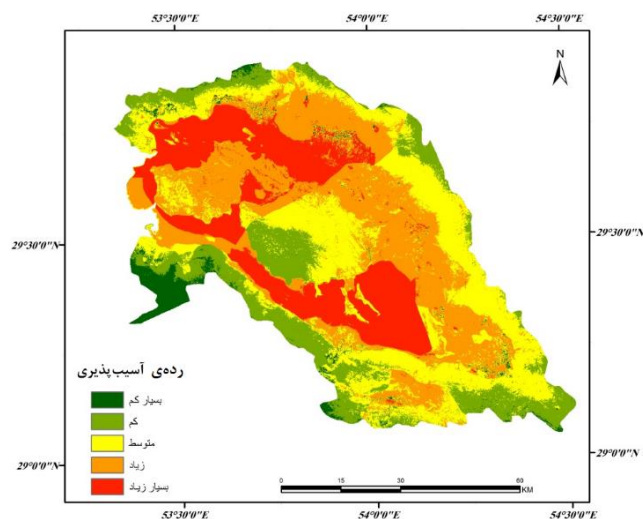
زیرزمینی با روش فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی.		
آسیب‌پذیری	مساحت (km ²)	مساحت (%)
بسیار کم	۱/۹۱۲	۳/۱۱
کم	۱۰/۶۸۳	۱۷/۴۱
متوسط	۱۷/۶۸۷	۲۸/۸۱
زیاد	۱۸/۸۰۳	۳۰/۶۳
بسیار زیاد	۱۲/۲۹۶	۲۰/۰۳

جدول ۴- ارزیابی معیارهای آسیب‌پذیری شوری آب‌های

زیرزمینی به روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی.	
معیارها (B _i)	وزن (W _i)
شوری خاک	۰/۵۹۲
فاصله از معدن	۰/۱۳۷
کاربری زمین	۰/۱۰۸
فاصله از منطقه‌های مسکونی	۰/۰۸۷
تمرکز جمعیت	۰/۰۴۸
فاصله از سدها	۰/۰۲۶
ضریب ناسازگاری	۰/۰۷۸

کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد بود. جدول ۵ مساحت و درصد مساحت در هر رده را نشان می‌دهد. مساحت رده‌ی زیاد (حدود ۱۸/۸۰۳ کیلومترمربع) آسیب‌پذیری به شوری آب‌های زیرزمینی بیش‌ترین، و رده‌ی بسیار کم (۱/۹۱۲ کیلومترمربع) کم‌ترین بود.

پس از محاسبه‌ی وزن معیارها با نظر کارشناسان، لایه‌های رستری ویژگی‌های گوناگون در هم ادغام، و نقشه‌های آسیب‌پذیری منطقه به شوری آب‌های زیرزمینی تهیه شد (شکل ۶). رده‌های آسیب‌پذیری شناخته‌شده در منطقه بسیار کم،



شکل ۶- نقشه‌ی آسیب‌پذیری به شوری آب‌های زیرزمینی در جنوب آبخیز بختگان با روش فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی.

مشخص شد (جدول ۶ و ۷) کم‌ترین آسیب‌پذیری در بیش‌ترین رده‌ی بلندی و بیش‌ترین آسیب‌پذیری در رده‌ی اول بلندی دیده شد. در ۲۵۰ متر آغازین بلندی منطقه، بیش‌ترین مساحت در

ارتباط میان تغییر بلندی زمین و کاربری‌های گوناگون با درجه‌ی آسیب‌پذیری به شوری آب‌های زیرزمینی بررسی، و توزیع مساحت رده‌های آسیب‌پذیری در رده‌های بلندی منطقه

ارزیابی احتمال خطر شوری آب‌های زیرزمینی در دشت‌های...

مساحت ۴/۴۱۲ کیلومترمربع بود. از زمین منطقه‌های مسکونی ۰/۱۱۸ کیلومترمربع در رده‌ی آسیب‌پذیری زیاد و بسیار زیاد بود، که مساحت اندکی داشت.

رده‌ی زیاد و بسیار زیاد به ترتیب با مساحت ۱۲/۲۳۴ و ۱۲/۱۸۳ کیلومترمربع بود. بیش‌ترین مساحت در کاربری‌های گوناگون به کاربری مرتعی با رده‌ی متوسط دیده شد، در حالی که در زمین آبیاری‌شونده بیش‌ترین مساحت آسیب‌پذیری در رده‌ی زیاد با

جدول ۶- مساحت (km²) رده‌های آسیب‌پذیری به شوری آب‌های زیرزمینی در رده‌های بلندی گوناگون.

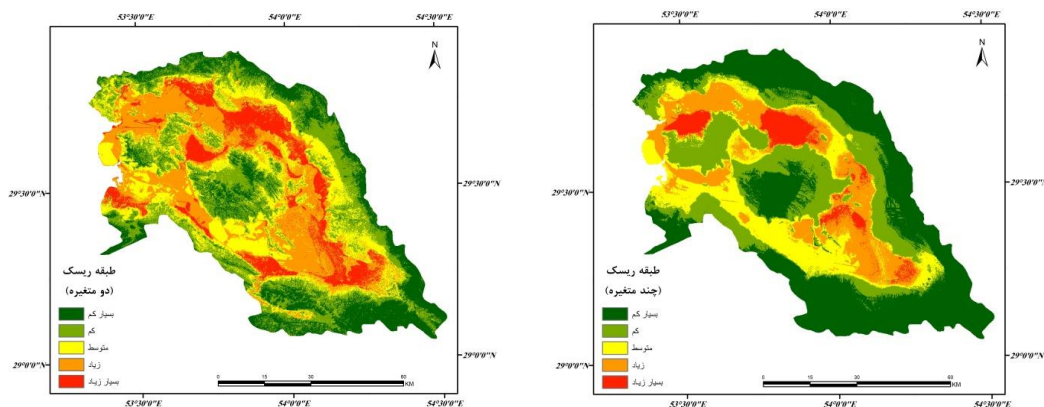
بلندی (m)	۲۴۲۳-۳۲۴۷	۲۱۰۵-۲۴۲۳	۱۸۵۴-۲۱۰۵	۱۶۵۷-۱۸۵۴	۱۴۹۰-۱۶۵۷
آسیب‌پذیری بسیار کم	۰/۲۲۲	۰/۳۶۶	۰/۳۵۸	۰/۱۲۳	۰/۴۲۰
کم	۱/۴۸۷	۲/۵۷۷	۲/۸۵۹	۲/۰۶۸	۱/۶۷۸
متوسط	۰/۷۳۵	۱/۶۹۷	۳/۷۷۸	۶/۳۰۱	۵/۳۱۷
زیاد	۰/۰۸۸	۰/۴۶۱	۱/۷۱۳	۴/۳۱۸	۱۲/۲۳۴
بسیار زیاد	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۹۹	۱۲/۱۸۳

جدول ۷- مساحت (km²) رده‌های آسیب‌پذیری به شوری آب‌های زیرزمینی در کاربری‌های زمین گوناگون.

کاربری زمین (km ²)	پیکره‌ی آبی	زمین دیم	آبیاری‌شونده	مرتع	مسکونی	شوره‌زار	پیکره‌ی آبی
آسیب‌پذیری بسیار کم	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۷	۰/۲۶۶	۱/۵۶۱	۰/۰۰۶	۰/۰۰۱
کم	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۱۷۶	۰/۶۹۰	۹/۷۶۹	۰/۰۱۲	۰/۰۰۸
متوسط	۰/۱۷۱	۰/۷۳۵	۱/۷۳۸	۱۴/۵۶۴	۰/۲۴	۰/۰۲۴	۰/۶۴۲
زیاد	۱/۴۶۴	۰/۴۷۲	۴/۴۱۲	۱۲/۲۴۹	۰/۰۸۱	۰/۱۷۸	۰/۱۷۸
بسیار زیاد	۹/۹۴۶	۰/۰۰۱	۱/۶۰۹	۰/۷۳۵	۰/۰۳۷	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۴

خطر بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی‌زیاد برای روش الگوریتم رده‌بندی درخت تصمیم به ترتیب ۳۸/۴۱، ۲۴/۱۹، ۱۶/۲۶، ۱۶/۱۴، ۴/۹۸٪ از کل منطقه بود (جدول ۸). توزیع رده‌های خطر شوری آب‌های زیرزمینی در کاربری‌های گوناگون نیز نشان داد که رده‌ی زیاد و بسیار زیاد درصد بزرگی (۴/۱۹) کیلومترمربع، روش الگوریتم رده‌بندی درخت تصمیم) از کاربری زمین آبیاری‌شونده است. کم‌ترین مساحت در رده‌ی آسیب‌پذیری زیاد و بسیار زیاد در شوره‌زارها و زمین دیم بود (جدول ۹).

بر پایه‌ی مقایسه‌ی نقشه‌های خطر شوری آب‌های زیرزمینی با روش‌های دو متغیره و چندمتغیره، نقشه‌هایی نهایی خطر نقشه‌ی خطر تولیدشده با مدل شاخص آماری و الگوریتم رده‌بندی درخت تصمیم انتخاب شد. پس از ضرب کردن دو نقشه‌ی خطر شوری آب‌های زیرزمینی و آسیب‌پذیری، نقشه‌ی احتمال خطر منطقه تولید شد (شکل ۷). در بخش جنوبی آبخیز بختگان (شکل ۶) در منطقه‌هایی که خطر شوری آب‌های زیرزمینی بیش‌تر است، آسیب‌پذیری نیز بیش‌تر است. مساحت منطقه‌ها با رده‌ی احتمال



شکل ۷- نقشه‌ی احتمال خطر شوری آب‌های زیرزمینی محاسبه‌شده از روی هم‌گذاری نقشه‌ی خطر و آسیب‌پذیری شوری آب‌های زیرزمینی.

بحث و نتیجه‌گیری

برای مدل‌سازی خطر شوری آب‌های زیرزمینی نقشه‌ی رده‌های بلندی، فاصله از تاقدیس‌ها و ناودیس‌ها، کفه‌های نمکی، دریاچه‌های شور، فاصله از سدها، شاخص شوری خاک، شاخص رطوبت پستی‌بلندی، انحنا کلی، انحنا دشت، انحنا نیم رخ، جریان تجمعی، جهت جریان، شیب، جهت، کاربری زمین، خاک، اقلیم، پوشش زمین، افت آب‌های زیرزمینی، تراز آب‌های زیرزمینی ورودی مدل‌های آماری و داده‌ی مینا گرفته شد. نتیجه‌ی روش شاخص آماری و الگوریتم رده‌بندی درخت تصمیم نشان داد که در دشت‌های جنوبی آبخیز بختگان عامل بلندی، فاصله از کفه‌های نمکی و دریاچه‌های شور، فاصله از ناودیس‌ها و تاقدیس‌ها اهمیت بیش‌تری در رخداد شوری آب‌های زیرزمینی دارد. بررسی نقشه‌های خطر شوری آب‌های زیرزمینی نشان داد که با کاهش بلندی به سوی منطقه‌های دشتی، درجه‌ی شوری آب‌های زیرزمینی بیش‌تر می‌شود، که علت آن را می‌توان به دست‌رس بودن این منطقه‌ها برای برداشت بیش‌تر از آب‌های زیرزمینی و نوع کاربری این منطقه‌ها که عمدتاً زمین آبیاری‌شونده است، نسبت داد. عامل تاثیرگذار دیگر در شوری آب‌های زیرزمینی در هر دو دسته مدل فاصله از کفه‌های نمکی و فاصله از دریاچه‌های شور است. منطقه‌های نزدیک به کفه‌های نمکی و دریاچه‌های شور به دلیل درهم رفتن جبهه‌ی آب‌های شور و تراز ایست‌آبی، بیش‌تر از شوری آب‌های زیرزمینی تاثیر می‌گیرد. فاصله از ناودیس‌ها عامل مهم دیگری در شوری آب‌های زیرزمینی بود، و برعکس، در منطقه‌های کوهستانی که آب‌های زیرزمینی کم‌تر در آن برداشته می‌شود، حساسیت کم‌تر است.

کاربرد فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی در تهیه‌ی نقشه‌ی آسیب‌پذیری و یکی‌کردن روش شاخص آماری و الگوریتم رده‌بندی درخت تصمیم در تهیه‌ی نقشه‌ی خطر، و برآورد کردن نقشه‌ی احتمال خطر شوری آب‌های زیرزمینی از نوآوری‌های

این پژوهش حاضر است. در شناسایی منطقه‌های آسیب‌پذیر به شوری آب‌های زیرزمینی بلندی، فاصله از کفه‌های نمکی، تراز آب زیرزمینی، فاصله از ناودیس‌ها و فاصله از تاقدیس‌ها، شاخص رطوبت پستی‌بلندی، و فاصله از دریاچه‌های آب شور از مهم‌ترین عامل‌های اثرگذار بود.

توزیع رده‌های خطر شوری آب‌های زیرزمینی در کاربری‌های گوناگون نیز نشان داد که احتمال خطر زیاد و بسیار زیاد درصد بزرگی (۴/۱۹ کیلومترمربع) از کاربری زمین آبیاری‌شونده را داشت، اما شوره‌زارها و زمین دیم کم‌ترین مساحت را آسیب‌پذیری زیاد و بسیار زیاد بود.

حدود ۳۴٪ از مساحت منطقه در رده‌ی احتمال خطر زیاد و بسیار زیاد بود. بر پایه‌ی اهمیت بسیار عامل کاربری زمین، و به ویژه زمین آبیاری‌شونده در نقشه‌های احتمال خطر، منطقه‌های با این نوع کاربری از دید احتمال خطر شوری آب‌های زیرزمینی در وضعیت مناسبی نیست. بنابراین پیشنهاد می‌شود با جلوگیری از صدور مجور کردن چاه‌های جدید، یا کف شکنی چاه‌های موجود، یا کنترل‌گذاری روی چاه‌ها، اندازه‌ی برداشت از چاه‌های عمیق مهار شود.

مدیریت زمین‌های مرتعی بر پایه‌ی گستردگی زیاد آن‌ها، و بودن بخش بزرگی از مساحت این نوع کاربری در رده‌های احتمال خطر زیاد و بسیار زیاد ضروری و مهم است. بودن رده‌های خطر، آسیب‌پذیری و احتمال خطر زیاد در رده‌های بلندی کم نشان‌دهنده‌ی درخطر بودن بوم‌نظام‌های این منطقه‌ها است. بر پایه‌ی محدوده‌های با احتمال خطر زیاد، که به نظر می‌رسد در منطقه‌های دشتی و پست بیش‌تر دیده می‌شود، تدوین طرح‌های جامع مدیریتی و اشاره به آن‌ها در سند‌های بالادستی، نظارت و پایش کنش‌های اجرایی مانند تغییر کاربری‌ها، یا درنظر گرفتن شرایط پیاده‌سازی کنش‌های احیایی ممکن است به مهار و مدیریت کردن احتمال خطر در این منطقه‌ها کمک کند.

- Ashraf H, Cawood F. 2015. Geospatial subsidence hazard modelling at Sterkfontein Caves. *South African Journal of Geomatics*, 4 (3): 273–284.
- Bierman. 1984. Signal detection theory and ROC analysis. *Cognition and Perception*. Academic Press, London.
- Bonham-Carter GF, Bonham-Carter G. 1994. Geographic information systems for geoscientists: Modelling with GIS. *Elsevier*, 2(13): 431–522.
- Bradd J, Gates G. 1997. Overview of factors leading to dryland salinity and its potential hazard in New South Wales, Australia. *Hydrogeology Journal*, 5(1): 51–67.
- Breiman L. 2001. Random forests. *Machine Learning*, 45(1): 5–32.
- Brownson RC, Fielding JE, Green LW. 2018. Building capacity for evidence-based public health: reconciling the pulls of practice and the push of research. *Annual Review of Public Health*, 39 (1): 27–43
- Brzezinski D, Stefanowski J. 2017. Prequential AUC: Properties of the area under the ROC curve for data streams with concept drift. *Knowledge and Information Systems*, 52(2): 531–562.
- Chen W. 2017. Spatial prediction of landslide susceptibility using an adaptive neuro-fuzzy inference system combined with frequency ratio, generalized additive model, and support vector machine techniques. *Geomorphology*, 297 (15): 69–85.
- Dewitte O, Daoudi M, Bosco C, Van Den M. 2015. Predicting the susceptibility to gully initiation in data-poor regions. *Geomorphology*, 228 (1): 101–115.
- Eastman JR. 2006. *Idrisi andes. Guide to GIS and Image Processing*. Clark Labs, Clark University, Worcester, MA. 3(1): 52–66.
- Evans R, Horstman C, Conzemius M. 2005. Accuracy and optimization of force platform gait analysis in Labradors with cranial cruciate disease evaluated at a walking gait. *Vet. Surg.* 34 (5): 445–449.
- Gharechae H, Moghaddam Nia A, Malekian A, Ahmadi A. 2014. Separation of the effects of climate variability and human activities on runoff of Bakhtegan Basin, *Iranian Journal of Eco Hydrology*, 2 (4): 445–454. (In Persian).
- Gharechae H, Nazari Samani A, Khalighi Sh, Fathabadi A, Khaledali A. 2020. Assessing the factors affecting the salinity risk of groundwater using data mining and statistical methods in arid and semi-arid regions, *Degradation and Rehabilitation of Natural Land*, 1(1): 45–60. (In Persian).
- Govindan K, Kaliyan M, Kannan D, Haq A. 2014. Barriers analysis for green supply chain management implementation in Indian industries using analytic hierarchy process. *Int. J. Prod. Econ.* 147 (2): 555–568.
- Haštie T, Tibshirani R, Friedman JH, Friedman JH. 2009. The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction, 24 (2): 1–758.
- Hu B, Zhou J, Wang J, Chen Z, Wang D, Xu S. 2009. Risk assessment of land subsidence at Tianjin coastal area in China. *Environmental Earth Sciences*, 59(2): 269–276.
- Kaly, Ursula, Lino Briguglio, Helena McLeod, Susana Schmall, Craig Pratt, Reginald Pal. Environmental Vulnerability Index (EVI) to summarise national environmental vulnerability profiles. *SOPAC*, 1999, 1(1): 45–60
- Khosravi K, Pourghasemi H, Chapi K, Bahri M. 2016. Flash flood susceptibility analysis and its mapping using different bivariate models in Iran: a comparison between Shannon's entropy, statistical index, and weighting factor models. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(12): 1–21.

- Liao X, Li W, Hou J. 2013. Application of GIS based ecological vulnerability evaluation in environmental impact assessment of master plan of coal mining area, *Procedia Environmental Sciences*, pp. 271–276.
- Linstone HA, Turoff M. 1975. *The Delphi survey: Method techniques and applications*. Reading: Addison-Wesley, 21 (1): 3–12.
- Liu D, Cao Ch, Dubovyk O, Tian R, Chen W, Zhuang Q, Zhao Y, Menz G. 2017. Using fuzzy analytic hierarchy process for Spatio-Temporal Analysis of eco environmental vulnerability change during 1990-2010 in Sanjiangyuan region, *Ecological Indicators*, pp. 612–625.
- Lucà F, Conforti M, Robustelli G. 2011. Comparison of GIS-based gully susceptibility mapping using bivariate and multivariate statistics: Northern Calabria, South Italy. *Geomorphology*, 134(3–4): 297–308.
- Lyu H, Shen M, Zhou S, Yang J. 2020. Risk assessment of mega-city infrastructures related to land subsidence using improved trapezoidal FAHP. *Science of the Total Environment*, 717 (2): 135–310.
- Lyu HM, Shen SL, Zhou A, Yang J. 2020. Risk assessment of mega-city infrastructures related to land subsidence using improved trapezoidal FAHP. *Science of the Total Environment*, 717:135–310.
- Nasrollahi M, Khosravi H, Moghaddamnia A, Malekian A, Shahid S. 2018. Assessment of drought risk index using drought hazard and vulnerability indices. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(20): 1–12.
- National Research Council. 1989. *Irrigation-induced water quality problems*. National Academies Press.
- Oh HJ, Lee S. 2011. Integration of ground subsidence hazard maps of abandoned coal mines in Samcheok, Korea. *International Journal of Coal Geology*, 86(1): 58–72.
- Ozdemir A, Altural T. 2013. A comparative study of frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods for landslide susceptibility mapping: Sultan Mountains, SW Turkey, *Journal of Asian Earth Sciences*, 64 (3):180–197.
- Pradhan B, Jebur M. 2017. Spatial prediction of landslide-prone areas through k-nearest neighbor algorithm and logistic regression model using high resolution airborne laser scanning data. In: B. Pradhan, ed., *Laser scanning applications in landslide assessment*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, pp. 151–165.
- Saaty TL. 1980. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1): 83–98.
- Sahoo S, Dhar A, Kar A. 2016. Environmental vulnerability assessment using grey analytic hierarchy process based model, *Environmental Impact Assessment Review*, pp. 145–154.
- Srdjevic Z, Kolarov V, Srdjevic B. 2007. Finding the best location for pumping stations in the Galovica drainage area of Serbia: The AHP approach for sustainable development. *Bus. Strateg. Environ*, 16 (7): 502–511.
- Taghi Zadeh MM, Halabian AH, Ali Por M, Kiumarsi H. 2017. Identifying and zoning of groundwater salinity using GIS case study: Namdan plain of Eghlid county. *Geography and Environmental Planning*, 28(3): 133–146.
- Varnes DJ. 1984. Landslide hazard zonation: A review of principles and practice, 3(1): 50–65.
- Wang L, Zhang P, Tan S, Zhao X, Cheng D, Wei W., ... Pan X. 2013. Assessment of urban air quality in China using air pollution indices (APIs). *Journal of the Air & Waste Management Association*, 63(2): 170–178.



Watershed Management Research

VOL. 35, No.3, Ser. No: 136, Autumn 2022, pp. 2-14

DOI: 10.22092/WMRJ.2021.355779.1432

Research Paper



Groundwater Salinity Risk Assessment in the Southern Plains of the Bakhtegan Watershed Using Statistical and Data Mining Models and Fuzzy Hierarchical Analysis Process

Hamid Reza Gharechaee

Technical Expert of Conservation of Iranian Wetlands Project, Department of Environment, Tehran

Aliakbar Nazari Smani

(Corresponding Author)* Associate professor, Department of Arid & Mountainous Region Reclamation, Faculty of Natural Resources College, University of Tehran, Karaj, Iran

Shahram Khalighi Sigaroodi

Associate professor, Department of Arid & Mountainous Region Reclamation, Faculty of Natural Resources College, University of Tehran, Karaj, Iran

Khaled Ahmadaali

Assistant Professor, Department of Arid & Mountainous Region Reclamation, Faculty of Natural Resources College, University of Tehran, Karaj, Iran

Abolhassan Fathabadi

Assistant Professor, Faculty of Natural Resources, University of Gonbad Kavoods, Gonbad Kavoods

Corresponding Author's Email: aknazari@ut.ac.ir

Received: 18 September 2021

Accepted: 18 December 2021

Abstract

Issues related to implanting national policies for reducing natural hazards in developing countries are seen as an important and worrying challenge. In this research, the factors affecting the vulnerability, hazard, and risk of groundwater salinity in the southern plains of the Bakhtegan watershed with an area of 6137 km² were assessed using statistical index models, Classification and Regression Tree (CART), and fuzzy analytic hierarchy process (FAHP). At first, by assessing the data of groundwater quality from 124 wells in the watershed, the points of groundwater salinity occurrence (based on the electrical conductivity parameter) were recognized. After calculating and preparing basic maps related to each of the indicators, we looked for a way for selecting indicators to identify key indicators. To this end, the recursive feature removal (FRE) method was utilized for finding and selecting the main combination of indicators to prepare a map of groundwater salinity hazards. Accordingly, after determining the significance of each indicator by calculating the jackknife test, the salinity hazard map of groundwater was predicted using two models (SI) and (CART). Also, the degree of vulnerability of the region to the salinity of the groundwater was determined using the (FAHP) process. The sensitivity, specificity, accuracy and kappa coefficient statistics were used to evaluate the performance of two-variable models. Also, in order to evaluate the performance of multivariate models, fore criteria of coefficient of determination (R^2), conformity coefficient (CC), Kling-Gupta efficiency (KGE), and correlation coefficient (COR) were used. The results of groundwater salinity class risk study showed that 4.13 square kilometers of irrigated areas are in a very high-risk class, which among the various land uses with the highest vulnerability is related to this type of land use. Based on the results of this study, it can be stated that the development of comprehensive management plans, monitoring of executive activities, including change of uses, or taking into account the prevailing conditions in the implementation of rehabilitation operations can help control and manage risk in these areas.

■ **Keywords:** Bivariate and multivariate models, salinity, risk assessment, recursive feature elimination ■