



Investigating the Effectiveness of the Maximum Entropy Model in Measuring the Potential of Areas Prone to Hydrological Drought of groundwater Resources (case study: Jiroft Plain)

Mina Eghtedarnejad¹ | Hossein Malekinezhad^{2*} | Elham Rafiei-Sardooi³

1. Ph.D Student in Watershed Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources, Yazd University, Yazd, eghtedarnejad.m@stu.yazd.ac.ir
2. Associate Professor, Faculty of Natural Resources, Yazd University, Yazd, hmalekinezhad@yazd.ac.ir
3. Associate Professor, Faculty of Natural Resources, University of Jiroft, Jiroft, ellrafiei@ujiroft.ac.ir

Article History

Received November 14, 2023

Revised February 20, 2024

Accepted March 13, 2024

Abstract

Iran is located in an arid and semi-arid region, where a large part of its water needs is provided by underground water sources. In severe and prolonged periods of drought when it is not possible to supply water from surface water sources; Groundwater will be the only source of water supply. Therefore, it is very important to investigate the status of these resources and determine the influencing factors on them. In this research, the areas that are exposed to severe groundwater drought were identified using the GRI groundwater drought index, and in order to measure the potential of drought-prone areas, 70 percent of the drought points were randomly selected for training purposes. model and 30% were selected to validate the results of the model. The influence of factors affecting groundwater drought such as distance from waterways, vegetation cover, height, slope, slope direction, topographic moisture index (TWI), soil surface moisture, rainfall It was determined by using the maximum entropy model and using MAXENT software in the watershed of Jiroft Plain. The results of this study based on the Jackknife test showed that the most important factors affecting groundwater drought are height, distance from the river and moisture of the soil surface and the model showed the most sensitivity to these parameters. The value of the area under the relative performance recognition curve (ROC) is 0.85 and 0.76 respectively for the samples Educational and experimental shows the acceptable level of results.

Key words

Jackknife test, GRI index, ROC curve, MAXENT



بررسی کارایی مدل حداکثر آنتروپی در پتانسیل سنجی مناطق مستعد به خشکسالی هیدرولوژیک منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت جیرفت) مینا اقتدارنژاد^۱ | حسین ملکی نژاد^{۲*} | الهام رفیعی ساردوئی^۳

۱. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیز، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، eghtedarnejad.m@stu.yazd.ac.ir
۲. دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، hmalekinezhad@yazd.ac.ir
۳. دانشیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ellrafiei@ujiroft.ac.ir

تاریخ‌های مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۳

چکیده

کشور ایران در منطقه‌ای خشک و نیمه خشک واقع شده، که بخش بزرگی از نیازهای آبی آن از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود. در دوره‌های خشکسالی شدید و طولانی مدت که امکان تأمین آب از منابع آب سطحی وجود ندارد؛ آب زیرزمینی یگانه منبع تأمین آب خواهد بود. بنابراین بررسی وضعیت این منابع و تعیین عوامل اثرگذار روی آن‌ها از اهمیت شایانی برخوردار است. در این پژوهش مناطقی که در معرض خشکسالی شدید آب زیرزمینی قرار دارند با استفاده از شاخص خشکسالی آب زیرزمینی GRI شناسایی شدند و به منظور پتانسیل سنجی مناطق مستعد به خشکسالی به صورت تصادفی ۷۰ درصد نقاط خشکسالی به منظور آموزش (واسنجی) مدل و ۳۰ درصد برای اعتبارسنجی نتایج مدل انتخاب شدند. میزان تأثیر عوامل مؤثر بر خشکسالی آب‌های زیرزمینی همانند فاصله از آبراهه، پوشش گیاهی، ارتفاع، شیب، جهت شیب، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، رطوبت سطح خاک، بارندگی با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی و با بهره‌گیری از نرم‌افزار MAXENT در حوضه آبخیز دشت جیرفت مشخص شد. نتایج این مطالعه براساس آزمون جکنایف نشان داد مهم‌ترین فاکتورهای تأثیرگذار بر خشکسالی آب‌های زیرزمینی، ارتفاع، فاصله از رودخانه و رطوبت سطح خاک هستند و مدل بیشترین حساسیت را نسبت به این پارامترها نشان داد. مقدار سطح زیرمنحنی منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) ۰/۸۵ و ۰/۷۶ به ترتیب برای نمونه‌های تعلیمی و آزمایشی نشان دهنده سطح قابل قبول نتایج است.

کلیدواژگان

آزمون جکنایف، شاخص GRI، منحنی MAXENT، ROC

مقدمه

آب های زیرزمینی در سطح جهان همیشه از مطمئن ترین منابع تأمین کننده آب مورد نیاز بشر بوده است. این منابع به دلیل اینکه دارای ثبات نسبتاً مناسبی در کمیت و کیفیت خود هستند، همیشه مورد توجه بوده اند. همچنین این منابع به عنوان یکی از منابع طبیعی باارزش [۱] و مهم آبی جهان است که به طور گسترده برای اهداف کشاورزی، خانگی و فعالیت های صنعتی استفاده می شود [۲ و ۳]. افزایش جمعیت، استفاده بی رویه از آب های زیرزمینی در بخش کشاورزی، بارش نامنظم در نتیجه تغییرات اقلیمی اثر منفی روی پتانسیل آب های زیرزمینی دارد. تعیین پتانسیل آب زیرزمینی هر حوضه آبخیز برای پایش منظم تغییرات سطح آب بسیار مهم است [۴]. با این حال، برداشت بی رویه و مدیریت ضعیف به مشکلات تخلیه شدید آب زیرزمینی و بدتر شدن کیفیت آن منجر می شود [۵ و ۶]. علاوه بر این، تغییرات در کیفیت و کمیت آب های زیرزمینی به پیامدهای شدید زیست محیطی و اجتماعی-اقتصادی منجر می شود [۷]. کاهش پیوسته سطح آب زیرزمینی در نتیجه بهره برداری بیش از اندازه یا کاهش تغذیه در بسیاری از مناطق دنیا موجب کاهش ذخایر آب زیرزمینی در مقیاس بزرگ شده است [۸]. تخلیه آب های زیرزمینی و افت سطح آن به عنوان جزئی از خشکسالی هیدرولوژیکی به شمار می رود [۹]. خشکسالی وضعیتی از کمبود بارندگی و افزایش دماست که در هر وضعیت اقلیمی ممکن است رخ دهد. خشکسالی غالباً به عنوان یک پدیده خزنده توصیف می شود و توصیف زمانی و مکانی آن بسیار مشکل است [۱۰] و به خلاف خشکی که پدیده دائمی اقلیمی است، خشکسالی در مناطق خشک و مرطوب نیز رخ می دهد و حالت طبیعی و نرمال از اقلیم است [۱۱]. خشکسالی را به چهار نوع اصلی یعنی خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیکی، کشاورزی و اقتصادی-اجتماعی می توان دسته بندی کرد [۹، ۱۲ و ۱۳]. خشکسالی آب زیرزمینی شرایط خطر آب های زیرزمینی طی یک خشکسالی هواشناسی طولانی مدت را نشان می دهد که خود باعث کاهش، غیرقابل دسترس و غیر قابل استفاده شدن منابع آب های زیرزمینی برای استفاده انسان می شود. اصطلاح خشکسالی آب زیرزمینی برای توصیف وضعیت مکانی است که سطح منابع آب زیرزمینی به عنوان پیامد مستقیم خشکسالی، افت پیدا می کند [۱۴]. زمانی که سیستم های آب زیرزمینی تحت تأثیر خشکسالی قرار می گیرد، ابتدا تغذیه، سپس سطح آب زیرزمینی و در نهایت تخلیه آب زیرزمینی کاهش می یابد که این نوع خشکسالی را خشکسالی آب زیرزمینی می نامند و در اصل در مقیاس های زمانی سالانه و ماهانه اتفاق می افتد [۱۵]. مدل حداکثر آنتروپی یک تکنیک تخمین احتمالاتی و یکی از روش های یادگیری ماشین است که به صورت گسترده ای در سال های اخیر به منظور مدیریت جنبه های مختلف منابع طبیعی و زیست محیطی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۶].

محققان زیادی از جمله رجب زاده و همکاران [۱۷]، تیموری و همکاران [۱۸]، پارك و همکاران [۱۹]، کرنژادی و همکاران [۲۰]، کرکس [۲۱]، پاندی و همکاران [۲۲] در مطالعات خود به توانایی بالای این مدل در پیش بینی حساسیت وقوع زمین لغزش تأکید کردند. رحمتی و همکاران [۲۳]، رازندی و همکاران [۲۴]، ذبیحی و همکاران [۲۵]، اولیایی و همکاران [۲۶]، کاستیلو و همکاران [۲۷]، رهامان و همکاران [۲۸]، حقیقی و همکاران [۲۹] به بررسی پتانسیل منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی پرداخته اند.

ذاکری نژاد و مارکر [۳۰] تحقیقی با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی برای اولین بار جهت تهیه نقشه خطر فرسایش خندقی و به کارگیری شاخص های توپوگرافی در حوضه آبخیز مزایجان استان فارس انجام دادند که نتایج پژوهش بیانگر دقت زیاد این مدل در پهنه بندی و تهیه نقشه خطر فرسایش خندقی بود. دثو و ساهین [۳۱] با استفاده از روش حداکثر یادگیری ماشین (ELM) برای پیش بینی شاخص خشکسالی مؤثر در شرق استرالیا پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد سرعت یادگیری حداکثر یادگیری ماشین سریع تر از مدل های شبکه عصبی مصنوعی بود. متغیرهای ماهانه شاخص

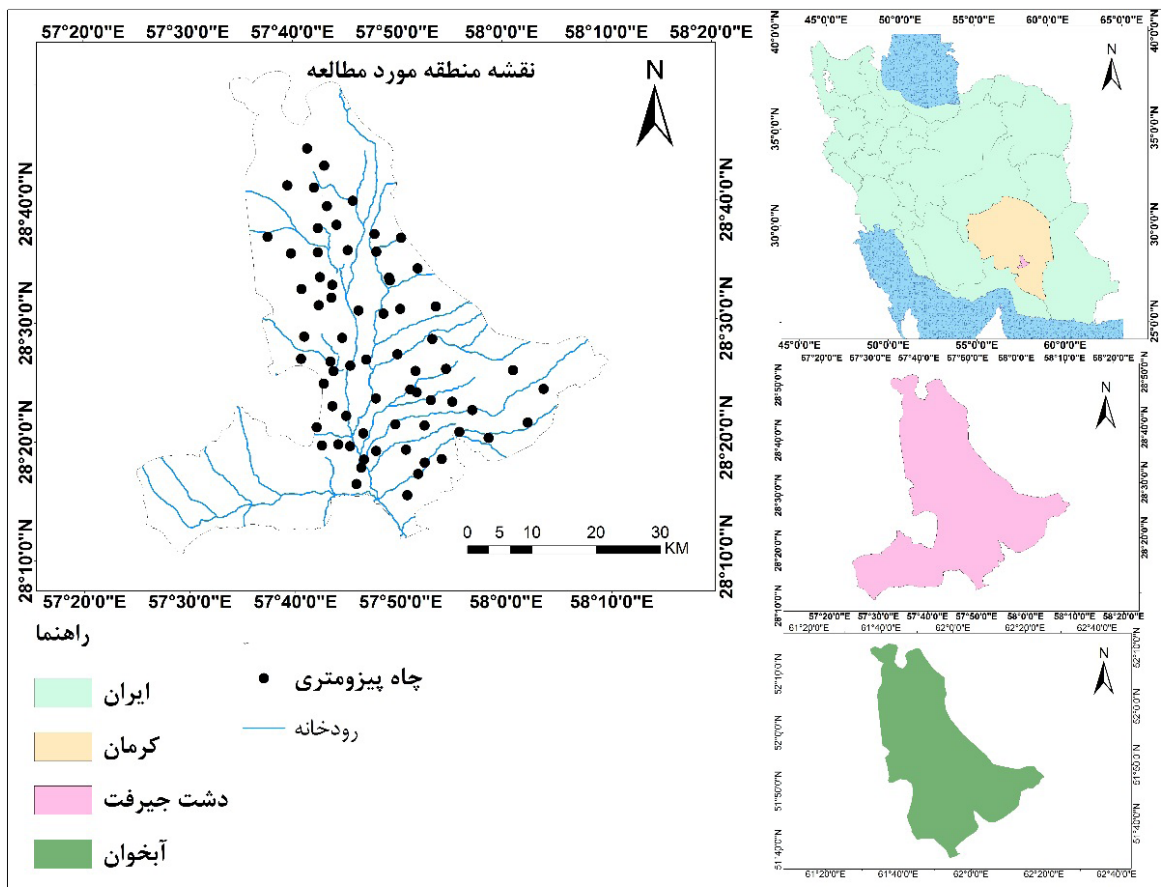
خشکسالی مؤثر (EDI) که با مدل ELM به دست آمد بسیار نزدیک به مقادیر متوسط مشاهده شده‌ای که مستقیم از داده‌های بارش به دست آمده است. بنابراین مدل ELM نسبت به مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی برای تشخیص و پیش‌بینی شاخص خشکسالی مؤثرتر است. پارک و همکاران [۳۲] به ارزیابی خشکسالی و نظارت از طریق ترکیب چند شاخص با استفاده از روش یادگیری ماشین برای مناطق آب‌وهوایی مختلف در ایالات متحده آمریکا پرداختند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد مدل جنگل تصادفی بهترین عملکرد را برای پیش‌بینی SPI در سه روش مورد نظر دارد ($R^2 = 0.93$, $RMSE = 0.3$). عوامل خشکی مربوط به سطح زمین، به عنوان مثال، دمای سطح زمین (LST)، تعرق (ET) اهمیت نسبی بالاتری برای خشکسالی هواشناسی کوتاه مدت دارد، در حالی که عوامل خشکسالی مربوط به پوشش گیاهی اهمیت نسبی بالاتری برای خشکسالی هواشناسی بلندمدت با روش جنگل تصادفی دارد و همچنین شاخص‌های دمای سطح زمین (LST) و پوشش گیاهی نرمال (NDVI) با اهمیت نسبی بالاتری برای خشکسالی کشاورزی در مناطق خشک و مرطوب برآورد شد. جعفرزاده و همکاران [۳۳] در پژوهشی پتانسیل پهنه‌های دارای قابلیت نفوذ برای تغذیه آب‌های زیرزمینی را با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی در حوضه آبخیز ماربره در شرق استان لرستان مورد بررسی قرار دادند. با توجه به نتایج به دست آمده، مناطق دشتی حوضه ماربره، مستعد نفوذپذیری بوده و با مدیریت میزان رواناب و سیلاب‌های ناشی از بارش‌ها و ذوب برف، می‌توان به تقویت منابع آب زیرزمینی کمک کرد. نتایج مدل آنتروپی حداکثر نشان داد بیشترین پتانسیل نفوذ در قسمت‌های میانی حوضه که مناطق دشتی با درصد شیب کم، بافت عمدتاً شنی و دارای رسوبات کواترنری هستند.

رحمتی و همکاران [۳۴] به بررسی قابلیت مدل حداکثر آنتروپی برای پیش‌بینی مکانی استعداد وقوع فرسایش آبکندی در حوضه آبخیز کشکان-پلدختر واقع بین استان‌های لرستان و ایلام پرداختند. براساس نتایج اعتبارسنجی، نقشه مناطق مستعد فرسایش آبکندی حاصل از مدل حداکثر آنتروپی ۹۰/۷ درصد دقت داشت. پیش‌بینی دقیق استعداد فرسایش آبکندی با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی در مطالعه آن‌ها مورد تأیید قرار گرفت. پژوهش حاضر با استفاده از عوامل مختلفی همچون ارتفاع، شیب و جهت شیب، شاخص رطوبت توپوگرافی، فاصله از آبراهه، دمای سطح زمین، رطوبت سطح خاک و پوشش گیاهی ابتدا با استفاده از روش MAXENT اقدام به تعیین مناطق مستعد خشکسالی آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه کرد و در ادامه مهم‌ترین عوامل مؤثر بر خشکسالی آب زیرزمینی را تعیین کرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت جیرفت بخشی از حوضه غربی جازموریان است که بین طول جغرافیایی $۵۸^{\circ}۱۰'$ تا $۵۷^{\circ}۲۵'$ درجه شرقی و عرض جغرافیایی $۲۸^{\circ}۱۰'$ تا $۲۸^{\circ}۵۵'$ درجه شمالی و در جنوب شرق ایران در استان کرمان قرار گرفته است. وسعت محدوده مطالعاتی جیرفت ۵۰۵۰ کیلومتر مربع و وسعت دشت ۲۲۴۷ کیلومتر مربع و ارتفاع از سطح دریا بین ۸۰۰ تا ۵۰۰ متر متغیر است. شیب کلی این محدوده از سمت شمال به سمت جنوب و متوسط بارندگی سالانه آن ۱۷۰ میلی‌متر است. این منطقه از نظر آب‌وهوایی جزء مناطق نیمه خشک به شمار می‌آید که دارای تابستان‌های گرم و نسبتاً مرطوب و زمستان‌های معتدل و کوتاه است. نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و استان کرمان در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱. نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و استان کرمان

روش کار

در این تحقیق داده‌های مربوط به سطح آب پیزومترها از شرکت مطالعات پایه منابع آب استان کرمان اخذ شد. مقدار شاخص خشکسالی منبع آب زیرزمینی GRI در مقیاس زمانی سالانه با داده‌های مربوط به سطح آب پیزومترهای موجود در منطقه مورد مطالعه که دارای آمار کامل بود (۷۰ پیزومتر) با نرم افزار Matlab محاسبه شد. پس از محاسبه شاخص GRI و رسم نمودارهای این شاخص ۴۷ نقطه که روی این نمودار سیر نزولی داشته، به عنوان نقاط خشکسالی در نظر گرفته شد. به همان تعداد نقاط عدم خشکسالی توسط مدل MAXENT در نظر گرفته شد. بنابراین نقاط خشکسالی با استفاده از شاخص خشکسالی GRI تعیین و با توجه به این که برای اعتبارسنجی مدل نمی توان از نقاط خشکسالی مدل سازی شده استفاده کرد، به منظور پتانسیل سنجی مناطق مستعد به خشکسالی به صورت تصادفی ۷۰ درصد نقاط خشکسالی برای آموزش (واسنجی) مدل و ۳۰ درصد برای اعتبارسنجی نتایج مدل انتخاب شدند. فایل نقاط خشکسالی در نرم افزار EXCELL به فرمت CSV تبدیل و سپس به عنوان ورودی به نرم افزار MAXENT معرفی شدند. مختصات جغرافیایی پیزومترها و مقادیر شاخص GRI در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. مختصات پیزومترها و مقادیر شاخص GRI

مقدار شاخص GRI	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	نام پیزومتر	مقدار شاخص GRI	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	نام پیزومتر
-۱/۶۵	۳۱۵۸۵۳۲	۵۷۱۱۹۷	باغ باغوئییه	-۱/۶۰	۳۱۴۲۳۱۸	۵۸۳۳۰۳	لشکر جنب دامپروری
-۱/۵۴	۳۱۳۳۸۱۰	۵۷۲۱۴۴	تل سیاه	-۱/۳۰	۳۱۳۲۷۷۲	۵۷۸۰۱۳	مهتابی
-۱/۱۰	۳۱۴۰۳۹۹	۵۸۹۸۴۲	تل شیراز	-۱/۷۵	۳۱۴۳۲۱۱	۵۶۹۹۰۰	ورامین
-۱/۹۳	۳۱۳۶۷۳۹	۵۸۵۵۳۲	بهار کهور	-۲/۴۶	۳۱۵۵۳۹۱	۵۶۹۰۹۱	کریم آباد
-۱/۸۶	۳۱۳۱۴۴۲	۵۷۶۱۳۸	جنگل آباد موسوی	-۱/۰۱	۳۱۴۶۰۱۸	۵۷۴۰۱۲	شرف آباد
-۱/۴۳	۳۱۳۹۷۱۷	۵۷۱۲۳۲	چهر آباد	-۱/۴۵	۳۱۳۸۲۱۶	۵۷۳۳۷۰	جز صالح
-۱/۰۶	۳۱۴۵۲۰۰	۵۸۴۱۵۰	حجت آباد	-۲/۰۶	۳۱۶۶۴۴۴	۵۷۷۷۴۸	جنگل آباد
-۱/۴۴	۳۱۳۳۶۱۶	۵۶۹۶۲۰	حسین آباد دهنو	-۱/۸۲	۳۱۳۷۱۹۷	۶۰۱۵۲۵	جاده مردهک
-۱/۰۱	۳۱۴۵۵۰۸	۵۸۸۸۵۴	دوساری	-۲/۱۶	۳۱۴۷۰۶۳	۵۶۶۳۶۰	جنگل گرگی
-۱/۶۲	۳۱۶۳۹۱۰	۵۷۳۶۱۰	ده پیش بالا	-۱/۸۹	۳۱۵۰۱۵۴	۵۸۶۷۳۹	جنوب کوه خریشت
-۲/۲۸	۳۱۳۳۵۰۳	۵۷۳۹۸۲	زاروکی	-۲/۵۹	۳۱۵۰۵۰۵	۵۶۶۸۶۶	حسین آباد جدید
-۱/۰۵	۳۱۳۱۵۳۳	۵۸۸۲۱۷	سبز گزی	-۲/۴۰	۳۱۲۷۶۳۷	۵۷۴۹۵۷	حسین آباد زین آباد
-۱/۸۱	۳۱۴۰۹۱۲	۵۷۷۹۹۹	سید آباد	-۱/۷۱	۳۱۶۳۵۸۶	۵۶۸۹۵۷	خاتون آباد
-۱/۶۴	۳۱۳۹۱۲۲	۵۹۲۹۴۵	شرق تل شیراز	-۱/۰۴	۳۱۳۶۹۰۰	۵۸۱۰۰۰	خیر آباد
-۱/۹۵	۳۱۵۵۱۹۴	۵۸۷۲۷۲	شمال کوه خریشت	-۱/۳۶	۳۱۵۴۵۵۴	۵۷۵۲۹۰	زحمت آباد
-۲/۲۶	۳۱۳۲۹۷۴	۵۸۲۶۶۹	غرب نظم آباد	-۱/۴۹	۳۱۵۹۲۲۱	۵۸۰۱۳۹	ساغری
-۱/۵۶	۳۱۴۶۹۶۲	۵۷۶۴۸۳	کنار صندل	-۲/۲۵	۳۱۷۰۶۰۰	۵۶۹۹۵۲	سلمانیه
-۲/۰۴	۳۱۶۳۶۹۸	۵۷۸۰۵۴	کهنک سلمانزاده	-۱/۸۵	۳۱۴۵۱۷۰	۵۷۱۴۱۸	آبگرم
-۱/۶۴	۳۱۷۳۶۳۲	۵۶۸۳۶۸	اردوگاه	-۱/۵۶	۳۱۷۰۷۵۴	۵۷۰۳۷۷	کلرود
-۱/۲۹	۳۱۴۲۳۱۸	۵۸۳۳۰۸	الله آباد شگرف	-۲/۰۴	۳۱۳۶۴۳۳	۵۶۸۷۸۹	کوگوئییه
				-۱/۲۰	۳۱۷۱۵۹۸	۵۷۴۴۰۳	کشتارگاه
				-۱/۳۲	۳۱۲۵۸۹۹	۵۸۲۸۵۴	عباس آیاد
				-۲/۶۴	۳۱۶۵۹۹۶	۵۶۱۱۷۱	شمال ماران قلعه
				-۱/۶۸	۳۱۵۴۸۲۵	۵۸۱۷۵۶	اکبر آباد
				-۳/۷۷	۳۱۵۹۷۳۷	۵۶۹۳۱۱	غرب باغباغوئییه
				-۱/۰۱	۳۱۳۰۱۹۰	۵۷۵۷۰۹	محمد آباد انوری
				-۱/۹۷	۳۱۶۷۳۳۳	۵۶۸۹۶۹	شهرک هوکرد

آبخوان دشت جیرفت یک آبخوان آبرفتی با مساحت ۱۴۰۰/۹۵ کیلومتر مربع است که مهم ترین منبع تأمین آب در منطقه است [۳۵]. با توجه به برداشت بیش از حد از سفره آب زیرزمینی دشت جیرفت، سطح آب در اکثر چاه های مشاهده ای روندی نزولی را طی می کند که این امر می تواند بخش کشاورزی منطقه را تحت الشعاع قرار دهد و اثر اقتصادی زیانباری برای ساکنان منطقه داشته باشد. برای مقابله با این وضعیت باید میزان برداشت از آبخوان کاهش یابد تا بین تغذیه و تخلیه آبخوان تعادل برقرار شود [۳۶].

خشکسالی، یکی از بلاهای طبیعی است که ممکن است در هر اقلیمی رخ دهد. خشکسالی آب های زیرزمینی بر اثر تغذیه ناکافی مخازن سفره های زیرزمینی تحت تأثیر کمبود بارش، کاهش جریان های سطحی و زیرسطحی و پمپاژ زیاد به وجود می آید. شدت این خشکسالی با استفاده از حجم سنجی ذخیره سفره های آب زیرزمینی قابل اندازه گیری است. اما این داده ها به سادگی قابل دسترس نیست. به نظر می رسد که ارزیابی سطح آب های زیرزمینی شاخص مناسب تر و بهتر است [۳۷]. جهت پایش و ارزیابی خشکسالی و مقایسه آن از منطقه ای به منطقه دیگر، تعیین مجموعه ای از شاخص های مناسب و دقیق از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در زمینه خشکسالی آب زیرزمینی شاخص GRI معرفی شده است [۳۸].

شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) اولین بار توسط مندیسینو و همکاران [۳۸] در کالابریای ایتالیا آزمایش و ارائه شد. این شاخص برای ارزیابی وضعیت سفره آب زیرزمینی و همچنین ارزیابی واقعی از میزان ذخیره آبخوان به کار می رود. می توان گفت که GRI شاخصی است که با استفاده از پارامتر سطح ایستابی در مقیاس ماهانه و سالانه قابل محاسبه بوده و از نتایج آن می توان جهت پیش بینی اهداف و تصمیم گیری های مدیریت آبخوان استفاده کرد. در محاسبه این نمایه از آمار بلند مدت سطح ایستابی سفره آب زیرزمینی در نقاط مختلف سفره استفاده می شود. شاخص GRI از رابطه ۱ محاسبه می شود:

$$GRI = \frac{D_{y,m} \mu_{D,m}}{\sigma_{D,m}} \quad (1)$$

که در آن، GRI: ارزش شاخص منبع آب زیرزمینی در ماه m از سال y، : ارزش سطح ایستابی در ماه m از سال y، : میانگین داده های سطح ایستابی ماه m برای D سال، انحراف معیار داده های سطح ایستابی ماه m برای D سال. تغییرات این شاخص و چگونگی طبقه بندی خشکسالی براساس آن در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲. طبقه بندی شاخص GRI

مقادیر GRI	طبقه بندی خشکسالی
< ۰	بدون خشکسالی
۰ - ۹۹/۰ -	خشکسالی ملایم
۱ - ۴۹/۱ -	خشکسالی متوسط
۴۹/۱ - ۹۹/۱ -	خشکسالی شدید
۲ - >=	خشکسالی بسیار شدید

یادگیری ماشین روشی برای استخراج داده ها با حجم زیاد داده کاوی است. عمل یادگیری اطلاعات پایه را از محیط استخراج می کند و در تحلیل حوادث آینده از آن بهره می گیرند. این روش ها از مهم ترین شاخه های هوش مصنوعی هستند. هدف از تحقیقات در این زمینه دستیابی به تکنیک هایی است که امکان شبیه سازی رفتار یادگیری را به عنوان یک رفتار هوشمندانه توسط رایانه فراهم می کند.

یکی از قابلیت‌های مورد انتظار در روش‌های ماشین‌لرنینگ پیش‌بینی و تعیین مهم‌ترین عوامل مؤثر در خشکسالی آب زیرزمینی است. در این پژوهش با بررسی منابع موجود تعدادی از عوامل مؤثر در وقوع خشکسالی آب زیرزمینی همانند فاصله از آبراهه، پوشش گیاهی، ارتفاع، شیب، جهت شیب، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)¹، رطوبت سطح خاک، بارندگی انتخاب و مورد بررسی قرار گرفت.

نقشه‌لایه‌های اطلاعاتی مربوط به هر یک از عوامل مؤثر در وقوع خشکسالی آب زیرزمینی در محیط ArcGIS ۱۰٫۸ تهیه و به فرمت ASCII تبدیل شدند. جهت اجرای مدل ماکزیمم آنتروپی به عنوان ورودی به نرم‌افزار MAXENT معرفی شدند. لایه‌های اطلاعاتی عوامل مؤثر بر وقوع خشکسالی آب زیرزمینی در شکل ۲ آورده شده است. به منظور تهیه نقشه فاصله از آبراهه، شبکه آبراهه از روی نقشه توپوگرافی به دست آمد. برای بررسی پوشش گیاهی به کمک اطلاعات ماهواره‌ای نمایه‌های گوناگونی وجود دارد. این نمایه‌ها مانند شاخص نرمال پوشش گیاهی و نمایه گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI) از معروف‌ترین و ساده‌ترین نمایه‌های گیاهی مورد استفاده بر حسب دو باند قرمز و مادون قرمز نزدیک است. دلیل استفاده از این باندها خاصیت جذب نور قرمز توسط رنگ دانه‌های موجود در سبزینه است که باعث می‌شود گیاهان انعکاس کمتری در این باند داشته باشند و در عین حال گیاهان در بخش مادون قرمز طیف الکترومغناطیس انعکاس شدیدی دارند [۳۹]. این نمایه از شاخص‌های محاسبه شده در سنجنده LANDSAT استخراج شد.

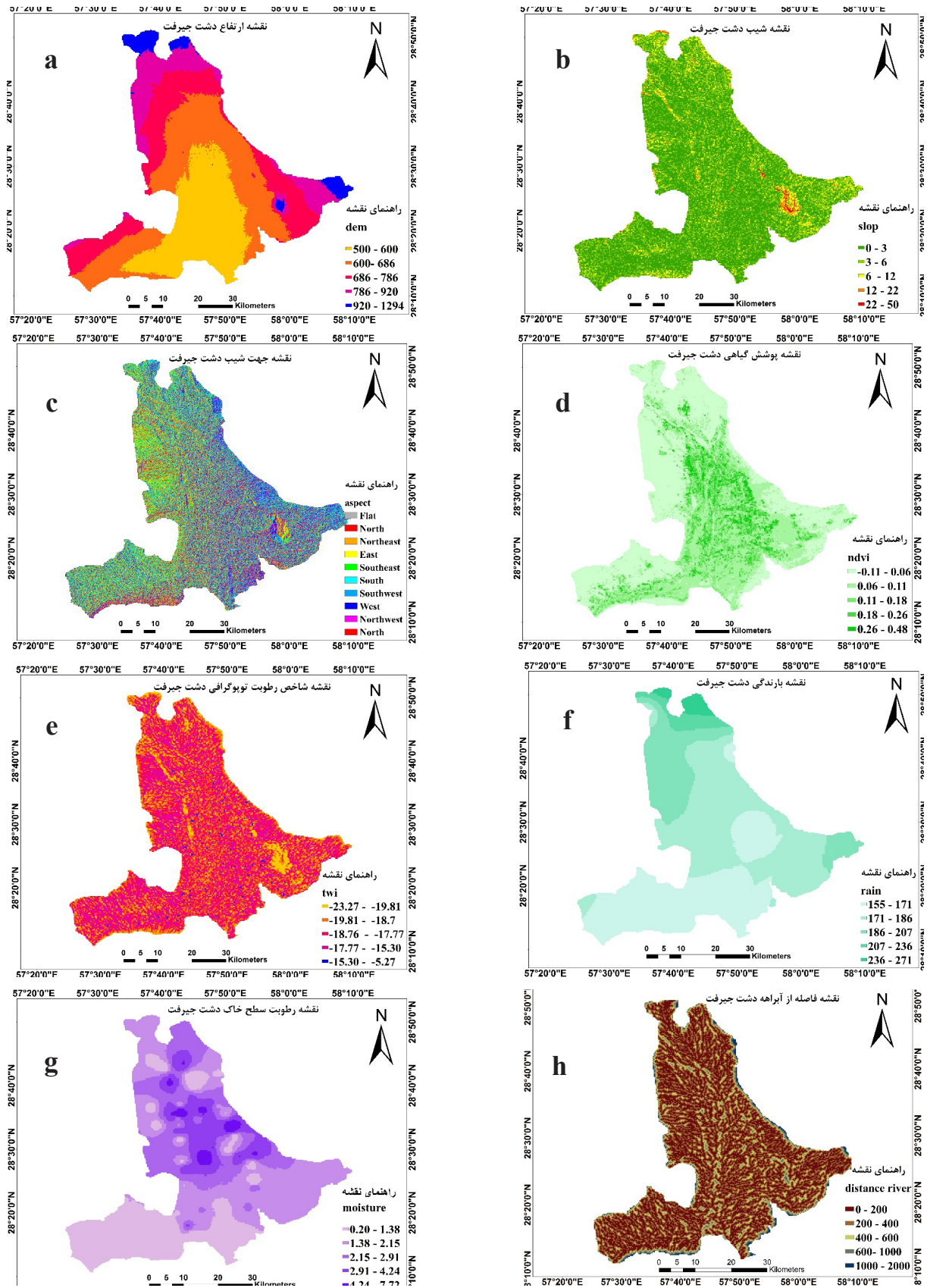
شیب یکی از فاکتورهای مؤثر در نفوذ آب‌های سطحی در زمین بوده به گونه‌ای که در شیب ملایم، رواناب سطحی به آرامی حرکت کرده و زمان بیشتری جهت نفوذ داشته و شیب‌های تندتر، رواناب بیشتری داشته و بنابراین آب‌های زیرزمینی کمتر تغذیه می‌شوند [۴۰]. بر این اساس، از نقشه مدل رقومی ارتفاعی منطقه بهره گرفته شد لایه شیب و جهت شیب پس از کلاسه‌بندی در محیط ArcGIS تهیه شدند. نقشه پهنه‌بندی بارندگی با استفاده از داده‌های بارندگی ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه مورد مطالعه بر اساس روش درون‌یابی کریجینگ در ArcGIS تهیه شد. شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) پارامتر ساده ریاضی از وضعیت رطوبت خاک است. در این مطالعه نقشه شاخص رطوبت توپوگرافی در محیط نرم‌افزار SAGGIS تهیه شد. این شاخص گرایش آب را به جمع شدن در هر نقطه از حوضه و تمایل نیروهای گرانشی را به انتقال آب به سمت پایین دست توصیف می‌کند. نظریه TWI اولین بار به وسیله بون و کرکبی [۴۱] در مدل بارش-رواناب TOPMODEL معرفی شد. شاخص رطوبت توپوگرافی که از ترکیب مساحت حوضه بالادست و شیب به دست می‌آید، معمولاً برای کمی کردن کنترل توپوگرافی روی فرایندهای هیدرولوژیکی است. این شاخص تعیین‌کننده تأثیر توپوگرافی روی میزان سطوح اشباع جهت تولید رواناب است که با استفاده از رابطه ۲ محاسبه می‌شود [۴۲].

$$TWI = \ln\left(\frac{As}{\tan\sigma}\right) \quad (2)$$

TWI: شاخص رطوبت توپوگرافی

As: مساحت ویژه حوضه (متر)

σ : درجه شیب



شکل ۲. عوامل مؤثر بر وقوع خشکسالی آب زیرزمینی: ارتفاع (a)، شیب (b)، جهت شیب (c)، شاخص پوشش گیاهی (d)، شاخص رطوبت توپوگرافی (e)، بارندگی (f)، رطوبت سطح خاک (g)، فاصله از آبراهه (h)

مدل حداکثر آنتروپی

تئوری آنتروپی اولین بار توسط شانون در سال ۱۹۴۸ [۴۳] توسعه داده شد و پس از آن به طور گسترده در مسائل مختلف علمی مورد استفاده قرار گرفته است. آنتروپی یک شاخص عدم قطعیت است که برای پیشامد خاصی از یک فرایند تصادفی قابل تخمین است. آنتروپی یک سیستم را می‌توان به وسیله به کار بردن روش بهینه‌سازی کلاسیک برای استخراج تابع توزیع احتمال بهینه کرد. اطلاعات مورد نیاز برای استخراج تابع توزیع اساساً بر حسب محدودیت‌هایی است که بر اساس، داده‌های مشاهداتی، تجربه، روابط ریاضی یا از هر منبع دیگر استخراج شده‌اند. پس از اینکه محدودیت‌ها مشخص شدند، تابع توزیع به طور واحد تعیین می‌شود. در واقع آنتروپی معیاری از عدم قطعیت فرایندهای تصادفی محیطی است که به طور غیر مستقیم محتوای اطلاعاتی اندازه‌گیری‌های زمانی-مکانی این فرایندها را منعکس می‌سازد.

الگوریتم حداکثر آنتروپی که از قانون دوم ترمودینامیک گرفته شده، نوعی مدل‌سازی مبتنی بر تکنیک یادگیری ماشینی است که فقط به نقاط حضور وابسته بوده و احتمال توزیع مقادیر حداکثر آنتروپی متأثر از فاکتورهای محیطی مؤثر بر توزیع مکانی پدیده مورد بررسی را ارزیابی می‌کند. این الگوریتم که در آن از اصل استفان بولتزمن استفاده شده (رابطه یک به یک بین درجه آشفستگی و آنتروپی سیستم)، در مقایسه با سایر روش‌های مدل‌سازی دارای عملکرد بهتری در پیش‌بینی حضور پدیده مورد نظر است. در این فرایند مدل‌سازی می‌توان با داشتن نقاط، هم متغیرهای کلاسه‌بندی شده و هم وابسته پیوسته را در مدل‌سازی مورد توجه قرار داد. از جمله مهم‌ترین مزیت‌های این مدل، تعیین مهم‌ترین عامل مؤثر بر پدیده مورد نظر است [۲۶، ۴۱، ۴۳ و ۴۴].

مدل ME یک تکنیک ماشینی یادگیری عامه‌پسند است که امکان بررسی رابطه متقابل بین متغیر وابسته و چندین متغیر مستقل را فراهم می‌کند. در ادامه با اجرای روش MAXENT بر اساس لایه‌های اطلاعاتی تهیه شده و نقاط خشکسالی اقدام به پتانسیل سنجی مناطق مستعد به خشکسالی آب زیرزمینی شده و مهم‌ترین عوامل مؤثر در خشکسالی سفره آب‌های زیرزمینی مشخص شد.

اصل حداکثر آنتروپی

مراحل محاسبه حداکثر آنتروپی به این صورت است که اگر X یک متغیر تصادفی با توزیعی پیوسته باشد، آنگاه آنتروپی به صورت رابطه ۳ تعریف می‌شود:

$$E(x) = -C \int_{-\infty}^{+\infty} m(x) \log[m(x)] dx \quad (3)$$

$E(x)$ آنتروپی سیستم

$m(x)$ تابع چگالی احتمال

C ثابت مثبت است که به صورت فاکتور مقیاس تعریف شده و به انتخاب واحد اندازه‌گیری وابسته است. مفهوم آنتروپی را می‌توان برای جفت متغیرهای (x, y) از طریق آنتروپی توأم تعمیم داد که به صورت رابطه ۴ بیان می‌شود:

$$E(x, y) = -C \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} m(x, y) \log[m(x, y)] dx dy \quad (4)$$

$E(x, y)$ آنتروپی توأم سیستم

$m(x, y)$ تابع چگالی احتمال توأم x و y

آنتروپی یک سیستم را می توان با استفاده از روش بهینه سازی کلاسیک برای استخراج تابع توزیع احتمال، بهینه کرد. اطلاعات مورد نیاز برای استخراج تابع توزیع اساساً بر حسب محدودیت هایی است که بر اساس داده های مشاهده ای، تجربه، روابط ریاضی یا از هر منبع دیگر استخراج شده اند [۴۵ و ۴۶]. محدودیت های زیر (روابط ۵ تا ۸) برای بهینه سازی آنتروپی توأم $E(x,y)$ در نظر گرفته می شوند:

$$\sum_{x,y} m(x,y) = 1 \quad (۵)$$

$$\sum_{x,y} xm(x,y) = \bar{x} \quad (۶)$$

$$\sum_{x,y} ym(x,y) = \bar{y} \quad (۷)$$

$$\sum_{x,y} xym(x,y) = Txy + \frac{\bar{x}\bar{y}}{T} \quad (۸)$$

$m(x,y)$ تابع چگالی احتمال توأم x و y

x و y میانگین های مربوطه

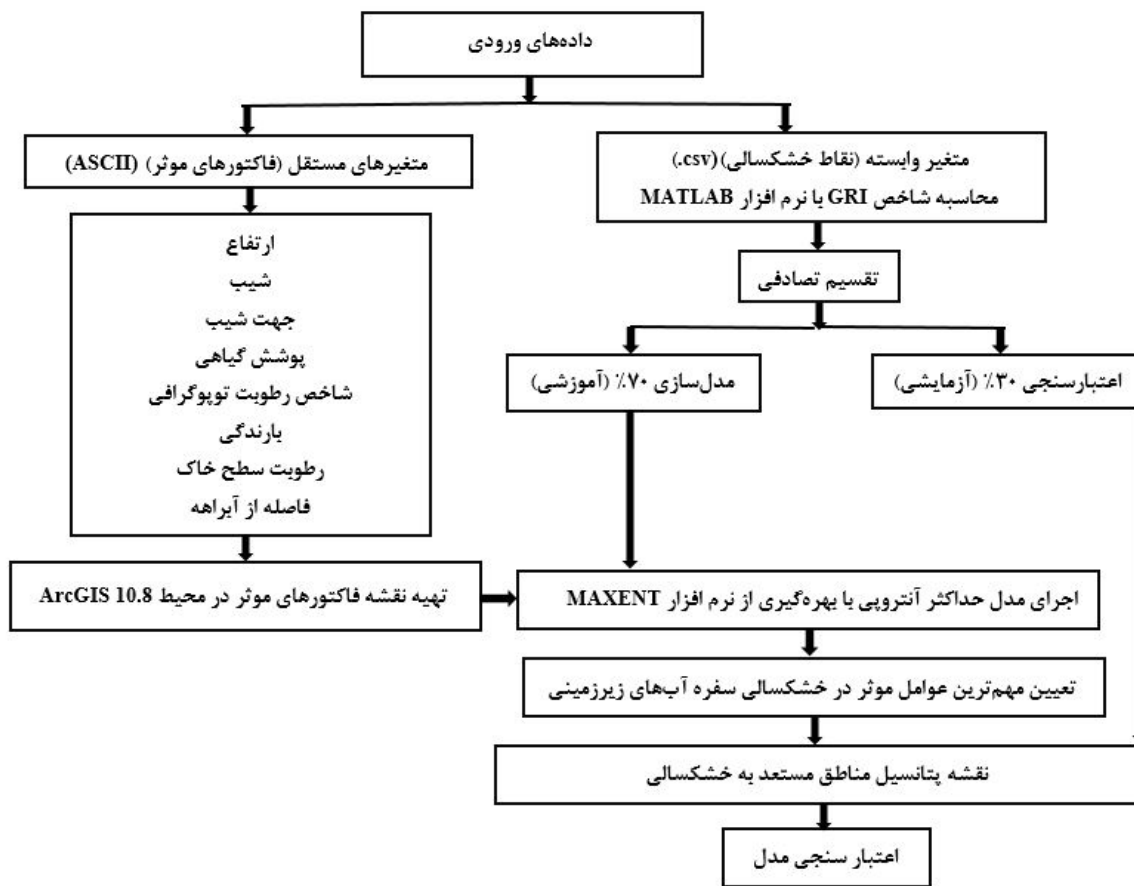
$T_{x,y}$ کوواریانس بین x و y

در نهایت، برای بهینه سازی از تابع آنتروپی توأم دیفرانسیل گرفته و معادل صفر (رابطه ۹) قرار داده می شود [۴۶].

$$d(E(x)) = -(\sum_{x,y} [1 + \ln mxy] dm(xy)) = 0 \quad (۹)$$

ارزیابی دقت مدل

منحنی ROC یک تکنیک علمی برای توصیف بازدهی سیستم های شناسایی و پیش بینی احتمالی و قطعی است. این منحنی برای داده های آزمون و آزمایشی در نظر گرفته می شود و مقدار آن بین ۰ تا ۱ متغیر است. هر چه مقدار به ۱ نزدیک تر باشد مدل از دقت بالاتری برخوردار است. AUC یک روش ارزیابی پارامتری برای مشکلات طبقه بندی باینری است و توانایی و عدم اطمینان مدل ها را برای تهیه نقشه مورد نظر با استفاده از سطح زیر منحنی ROC بررسی می کند. به طور معمول، هرگاه مساحت زیر منحنی ROC بیشتر از ۰/۷ (۷۰ درصد) باشد دقت مدل قابل قبول در نظر گرفته می شود [۴۷]. فلوجارت پژوهش در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. فلوچارت مراحل انجام تحقیق

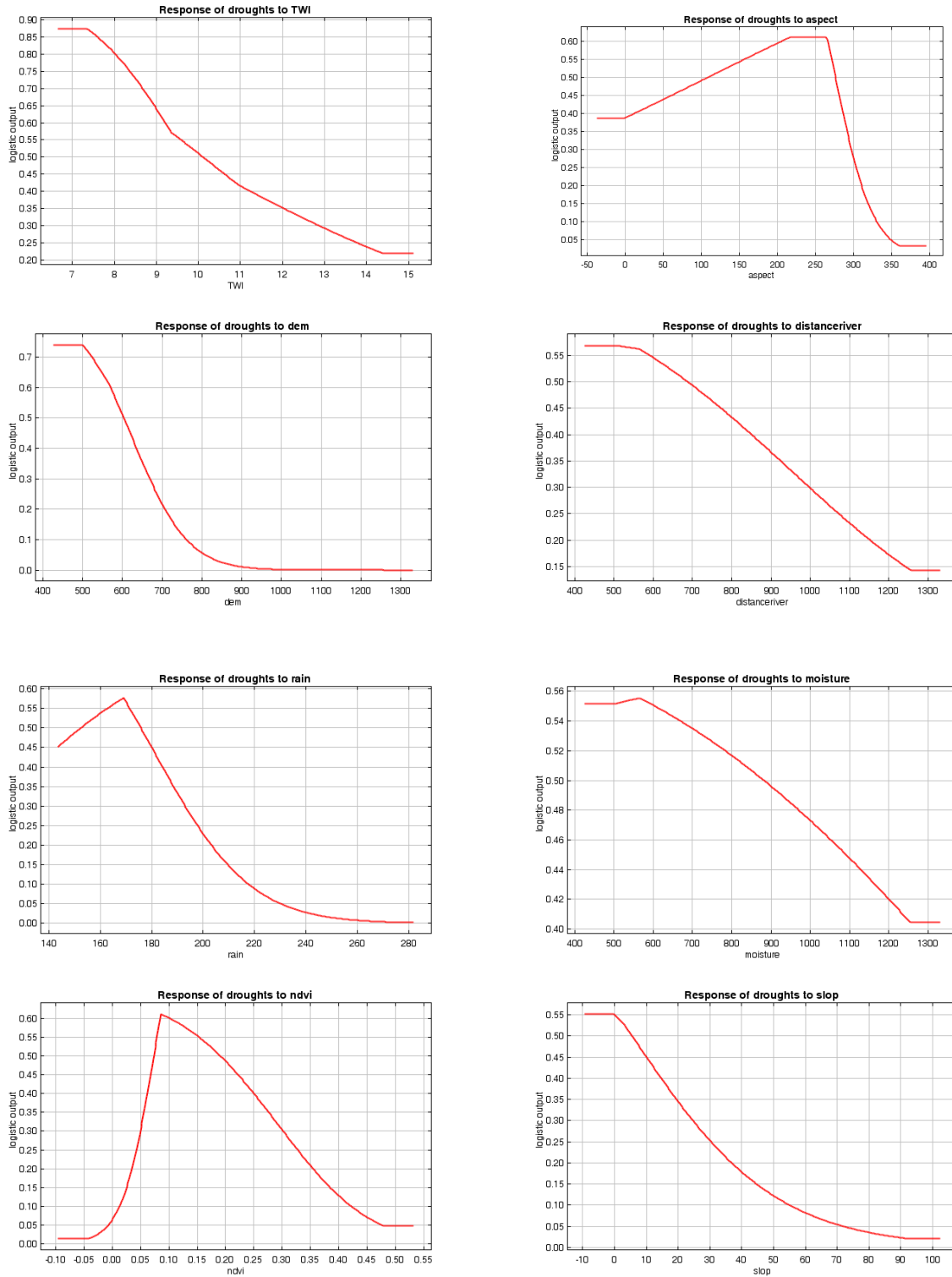
نتایج

پس از اجرای مدل در نرم‌افزار MaxEnt درصد سهم نسبی متغیرها در مدل سازی به دست آمد که در جدول ۳ آورده شده است. هر چه سهم بیشتر باشد، آن متغیر تأثیر بیشتری در مدل سازی دارد. ارتفاع با ۵۴/۴ درصد سهم مؤثرترین عامل و پوشش گیاهی و شیب با ۲/۸ درصد سهم کم‌اثرترین عوامل در مدل سازی بودند.

جدول ۳. درصد سهم نسبی متغیرها در مدل سازی

متغیر	نام اختصاری	درصد سهم
ارتفاع	dem	۵۴/۴
جهت شیب	aspect	۱۸/۱
شاخص رطوبت توپوگرافی	twi	۱۰/۸
فاصله از آبراهه	Distance_river	۵/۱
رطوبت	moisture	۳/۲
بارندگی	rain	۲/۹
شیب	slop	۲/۸
پوشش گیاهی	ndvi	۲/۸

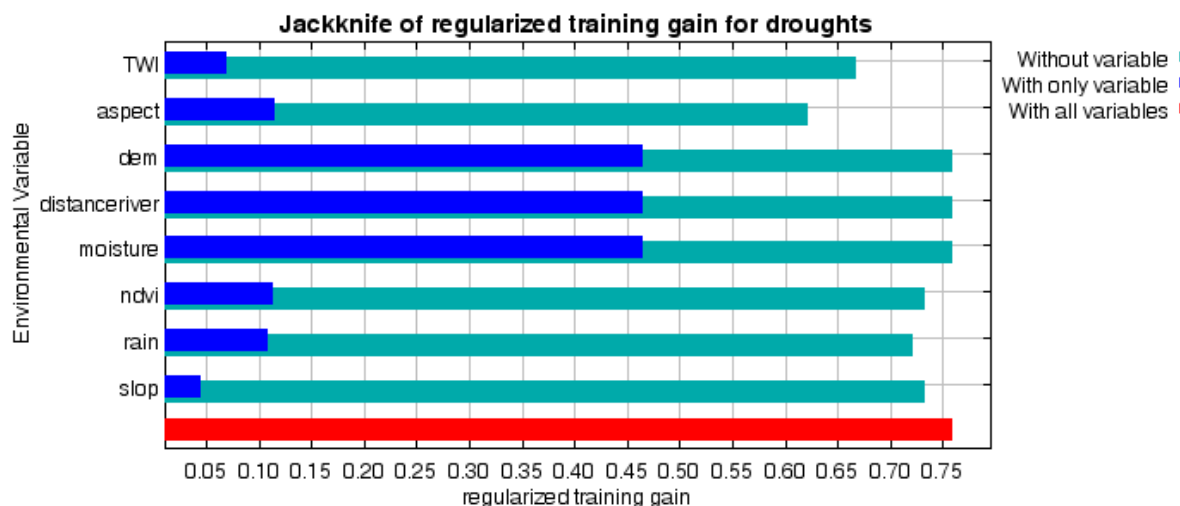
منحنی پاسخ هر یک از عوامل مؤثر در پتانسیل سنجی مناطق مستعد به خشکسالی در شکل ۴ آمده است. ارتفاع بیشترین سهم در مدل سازی راداشته است. با توجه به منحنی پاسخ مربوط به ارتفاع، در این حوضه با افزایش ارتفاع احتمال وقوع خشکسالی کاهش یافته و نمودار سیر نزولی داشته است. با افزایش شیب، وقوع خشکسالی کمتر بوده است. هر چه رطوبت سطحی بیشتر باشد خشکسالی آب زیرزمینی کمتر رخ می دهد. با افزایش بارندگی وقوع خشکسالی کمتر می شود. در این منطقه با افزایش شاخص رطوبت توپوگرافی و فاصله از رودخانه نمودار روند نزولی و احتمال خشکسالی کمتر شده است.



شکل ۴. منحنی پاسخ ۸ عامل مؤثر در خشکسالی آب زیرزمینی مورد استفاده برای پتانسیل سنجی در مدل

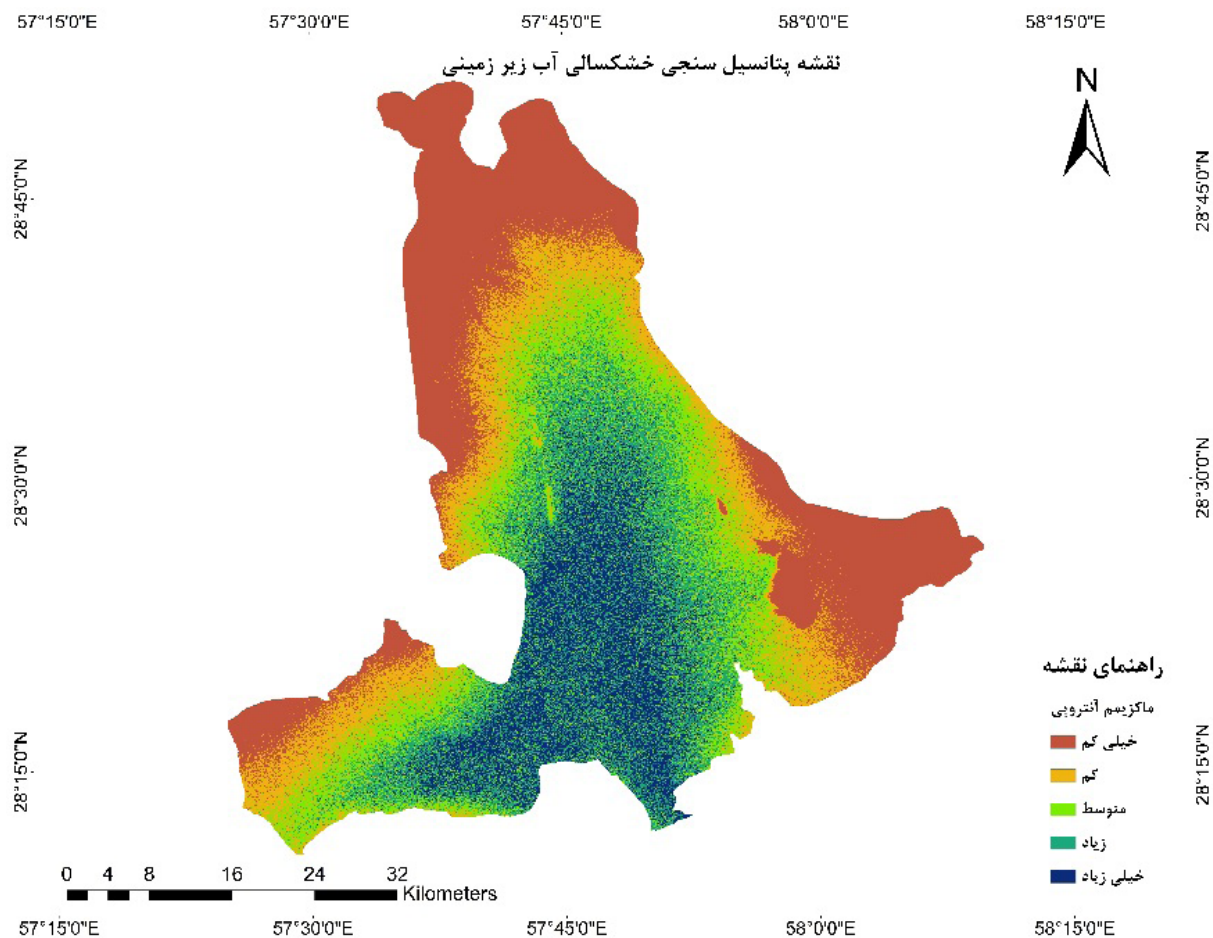
آزمون جکنایف

آنالیز حساسیت مدل توسط آزمون جکنایف انجام شد که نتایج آن به صورت نمودار ارائه شده است. آزمون جکنایف، شاخص تعیین اهمیت عوامل مؤثر در وقوع پدیده مورد بررسی است که نشان می‌دهد از متغیرهای مستقل ورودی، چه عواملی بیشترین و چه عواملی کمترین تأثیر را دارند. این منحنی شامل سه حالت مختلف است. در حالت اول (خطوط آبی کم‌رنگ) که نشانه تأثیر همه ورودی‌ها بر پدیده مورد مطالعه بدون وجود لایه مشخص شده است. حالت دوم (خطوط آبی پررنگ) که نشانه تأثیر آن فاکتور یا لایه بوده یا به عبارتی مربوط به زمانی است که مدل سازی تنها بر اساس یک متغیر انجام می‌شود و بر اساس آن میزان رخداد مورد بررسی برآورد می‌شود. حالت آخر (خط قرمز رنگ) نشان دهنده تأثیر توأم همه پارامترها یا لایه‌ها است. نتایج حاصل از آزمون جکنایف جهت تعیین مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار و سهم هر یک از پارامترها در پیش‌بینی مدل در شکل ۵ نشان داده شده است. بر این اساس ارتفاع، فاصله از رودخانه و رطوبت سطح خاک مهم‌ترین پارامترهای اثرگذار بر پیش‌بینی هستند و مدل نسبت به این پارامترها بیشترین حساسیت را نشان می‌دهد. مدل نسبت به پارامترهای جهت شیب، پوشش گیاهی، بارندگی، شاخص رطوبت توپوگرافی و شیب به ترتیب حساسیت کمتری دارد.



شکل ۵. آزمون جکنایف برای بررسی اهمیت هر کدام از متغیرهای محیطی

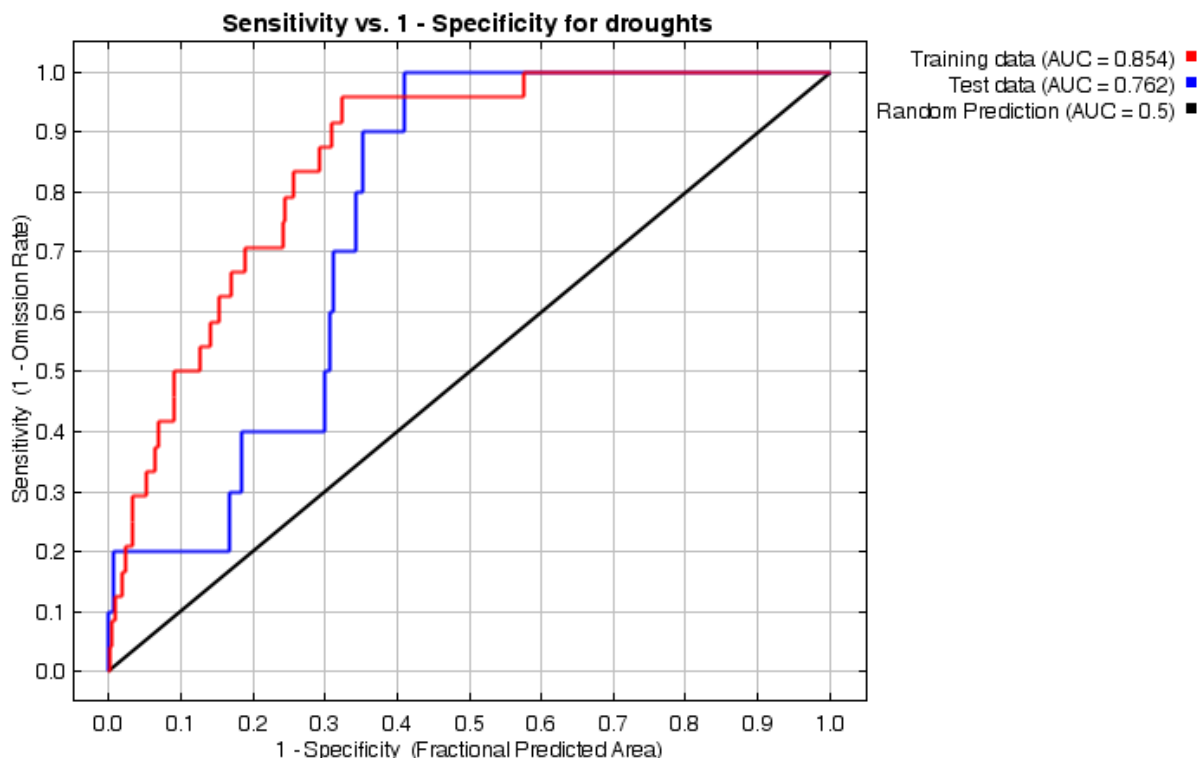
با در نظر گرفتن متغیرهای محیطی تأثیرگذار و با استفاده از روش حداکثر آنتروپی، نقشه پتانسیل مناطق مستعد به خشکسالی آب‌های زیرزمینی پس از کلاسه‌بندی تهیه شد که در شکل ۶ قابل مشاهده است. ۳۹/۲۷ درصد مساحت منطقه دارای پتانسیل خیلی کم، ۱۸/۹۷ درصد مساحت منطقه دارای پتانسیل کم، ۲۰/۳۵ درصد مساحت منطقه دارای پتانسیل متوسط، ۱۸/۲۳ درصد مساحت منطقه دارای پتانسیل زیاد، ۳/۱۸ درصد مساحت منطقه دارای پتانسیل خیلی زیاد وقوع خشکسالی آب زیرزمینی است، به طوری که جنوب دشت بالاترین پتانسیل وقوع خشکسالی آب زیرزمینی را دارد.



شکل ۶. نقشه پتانسیل سنجی خشکسالی آب زیرزمینی

اعتبارسنجی مدل

نتایج حاصل از اعتبارسنجی در شکل ۷ نمایش داده می شود. این منحنی، شامل نمودارهایی هستند که روی محور X ها، معیار معینی برای پارامتر مورد بررسی را دارند و روی محور Y ها، میزان احتمال پیش بینی شده که توسط خروجی منطقی تعیین شده اند را نمایش می دهند. روند رو به بالا در منحنی، مشخص کننده رابطه مثبت و حرکت رو به پایین نشان دهنده رابطه منفی است. روند این نمودار در واقع، مشخص کننده میزان رابطه پارامتر با احتمال مورد بررسی است. مقدار سطح زیر منحنی مدل ۰/۸۵ و ۰/۷۶ به ترتیب برای نمونه های تعلیمی و آزمایشی است. که نشان دهنده سطح قابل قبول نتایج است.



شکل ۷. نتایج حاصل از اعتبارسنجی مدل

بحث و نتیجه‌گیری

منابع آب زیرزمینی به دلیل ضریب اطمینان بالاتر و نوسانات کمتر به عنوان یک گزینه مطمئن از دیرباز مورد استفاده انسان بوده و طی دهه‌های اخیر بر اثر برداشت بیشتر از تغذیه با کاهش کمی و کیفی روبه‌رو شده است. پژوهش حاضر با هدف تعیین تأثیر هر کدام از عوامل تأثیرگذار در خشکسالی آب زیرزمینی در دشت جیرفت بررسی شد. بر اساس نتایج به دست آمده روابط بین عوامل مؤثر و وقوع خشکسالی آب زیرزمینی به شرح زیر است:

تحلیل منحنی‌های پاسخ مربوط به عوامل محیطی نشان داد در این منطقه با افزایش ارتفاع میزان وقوع خشکسالی کمتر شده است و نمودار سیر نزولی داشته است. با افزایش شیب، وقوع خشکسالی کمتر بوده است. هر چه رطوبت سطحی بیشتر باشد خشکسالی آب زیرزمینی کمتر رخ می‌دهد. با افزایش بارندگی وقوع خشکسالی کمتر می‌شود. در این منطقه با افزایش شاخص رطوبت توپوگرافی و فاصله از رودخانه نمودار روند نزولی و احتمال خشکسالی کمتر شده است. پس از اجرای مدل در نرم‌افزار MaxEnt درصد سهم نسبی متغیرها در مدل‌سازی به دست آمد. هر چه سهم متغیر بیشتر باشد، آن متغیر تأثیر بیشتری در مدل‌سازی دارد. ارتفاع با ۵۴/۴ درصد سهم بیشترین تأثیر در مدل‌سازی را داشته است. بر اساس نتایج حاصل از آزمون جک‌نایف جهت تعیین مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار و سهم هر یک از پارامترها در پیش‌بینی مدل ارتفاع، فاصله از رودخانه و رطوبت سطح خاک مهم‌ترین پارامترهای اثرگذار بر پیش‌بینی بوده و مدل نسبت به این پارامترها بیشترین حساسیت را نشان داد. از آنجا که ارتفاع یک منطقه در میزان وقوع بارندگی، دما و تغییرات آن، میزان تبخیر و تعرق، شدت تشعشعات خورشیدی و تشکیل و توسعه خاک، نوع و تراکم پوشش گیاهی اثر دارد که این عوامل نیز به نوبه خود در میزان تشکیل رواناب و مقدار نفوذپذیری آب در لایه‌های زمین مؤثر است. به این ترتیب هر چه تراز ارتفاعی نسبت به سطح دریا در یک منطقه کمتر باشد، احتمال تشکیل آب زیرزمینی بیشتر

خواهد بود [۴۸].

فواصل مجاور رودخانه به دلیل دسترسی به آب سطحی و نفوذ بیشتر، پتانسیل آب زیرزمینی بیشتری دارند و کمتر مستعد وقوع خشکسالی آب زیرزمینی هستند. میزان رطوبت خاک به عوامل متعددی مثل بارندگی، تبخیر به دلیل تابش مستقیم نور خورشید و... وابسته است. براساس نقشه پتانسیل مناطق مستعد به خشکسالی آب های زیرزمینی ۳۹/۲۷ درصد مساحت منطقه دارای پتانسیل خیلی کم، ۱۸/۹۷ درصد مساحت منطقه دارای پتانسیل کم، ۲۰/۳۵ درصد مساحت منطقه دارای پتانسیل متوسط، ۱۸/۲۳ درصد مساحت منطقه دارای پتانسیل زیاد، ۳/۱۸ درصد مساحت منطقه دارای پتانسیل خیلی زیاد وقوع خشکسالی آب زیرزمینی است، به طوری که جنوب دشت بالاترین پتانسیل وقوع خشکسالی آب زیرزمینی را دارد. نتایج حاصل از اعتبارسنجی نشان داد مقدار سطح زیر منحنی مدل ۰/۸۵ و ۰/۷۶ به ترتیب برای نمونه های آموزشی و تست است که نشان دهنده سطح قابل قبول نتایج است که با نتایج [۴۹] مطابقت دارد.

ترکیب سیستم اطلاعات جغرافیایی باروش حداکثر آنتروپی پتانسیل سنجی مناطق مستعد خشکسالی آب زیرزمینی را با کمترین امکانات امکان پذیر می کند که با یافته های [۵۰] همخوانی دارد. نتایج حاصل از این پژوهش می تواند به سیاست گذاران و مدیران در مدیریت منابع آب زیرزمینی حوضه مورد نظر کمک کند. با توجه به خشک بودن منطقه مورد مطالعه و فشار بیش از حد بر روی منابع آب زیرزمینی این دشت، سناریوهای کاهش برداشت و راهکارهای لازم از قبیل تدابیری جهت اصلاح نظام آبیاری، روش هایی به منظور کاهش تبخیر و اصلاح نظام کشت در این منطقه توصیه می شود.

منابع

- [1] Jha M.K, Chowdhury A, Chowdary V.M and Peiffer S. Groundwater management and development by integrated remote sensing and geographic information systems: prospects and constraints. *Water Resource Management*. 2006; 21(2):427-467.
- [2] Han J.Ch, Huang Y, Li Zh, Zhao Ch, Cheng G and Huang P. Groundwater level prediction using a SOM-aided stepwise cluster inference model. *Journal of Environmental Management*. 2016; 182:308-321.
- [3] Nourani V and Mousavi Sh. Spatiotemporal groundwater level modeling using hybrid artificial intelligence-meshless method. *Journal of Hydrology*. 2016; 536:10-25.
- [4] Recep C. Temporal Changes in the Groundwater Level in the Upper Tigris Basin, Turkey, Determined by a GIS Technique. *Journal of African Earth Sciences*. 2015; 107:134-143.
- [5] Lijzen J.P, Otte P and Van Dreumel M. Towards sustainable management of groundwater: policy developments in The Netherlands. *Sci. Total Environ*. 2014; (485-486):804-809.
- [6] Sun R, Jin M, Giordano M and Villholth K.G. Urban and rural groundwater use in Zhengzhou, China: challenges in joint management. *Hydrogeol. J*. 2009; 17(6):1495-1506.
- [7] Hua Sh, Liang J, Zeng G, Xu M, Zhang Ch, Yuan Y, et al. How to manage future groundwater resource of China under climate change and urbanization: An optimal stage investment design from modern portfolio theory. *Water Research*. 2015; 85:31-37.
- [8] Samadi R., Behmanesh J and Rezaei H. Investigation of groundwater level changes trend (Case study: Urmia plain). *J. of Water and Soil Conservation*. 2015; 22(4):67-84 (Persian).
- [9] Choi M, Jacobs J.M, Anderson M.C, Bosch D.D. Evaluation of drought indices via remotely sensed data with hydrological variables. *Journal of Hydrology*. 2013; 476: 265-273.
- [10] Alizadeh A. Principles of Applied Hydrology. 40th Reprint, 7th Edition, Astan Quds Razavi Publication. 2015; 941pp (Persian).
- [11] Bordi I. and Sutera A. Drought variability and its climatic implications. *Global and Planetary Change*. 2004; 40 (1, 2): 115- 127.
- [12] Dracup J.A., Lee K.S and Paulson E.G. on the definition of drought. *Water Resources Research*. 1980; 16(2): 297-302.
- [13] Wilhite D.A. and Glantz M.H. Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. *Water International*. 1985; 10(3):111-120.
- [14] Villholth K.G, Tottrup C, Stendel M, Maherry A. Integrated mapping of groundwater drought risk in the Southern African Development Community (SADC) region, *Hydrogeology Journal*, 21(4):863-885.
- [15] Peters E, Bier G, Van Lanen H.A.J and Torfs P.J.J.F. Drought Propagation and Spatial Distribution of Drought in a Groundwater Catchment. *Hydrology Journal*. 2006; 321(1-4):257-275.
- [16] Allard D, D'Or D, Froidevau R. An efficient maximum entropy approach for categorical variable prediction. *Europ J Soil Sci*. 2011; 62 (3): 381-393.
- [17] Rajabzadeh F, Ghiasi S, Zahmati A. Effectiveness of maximum entropy algorithm and geographic information system in assessing the sensitivity of shallow landslides. *Water and Soil Resources Protection Quarterly*. 2018; 8 (2): 57-74 (Persian).
- [18] Teimuri M, Asadi Nelivan A. Sensitivity zoning and prioritization of factors affecting the occurrence of landslides using the maximum entropy model (case study: Lorestan province). *Hydrogeomorphology Journal*. 2019; 6 (21):

- 155-179 (Persian).
- [19] Park N.W. Using maximum entropy modeling for landslide susceptibility mapping with multiple geoenvironmental data sets. *Environ Earth Sci.* 2015; 73: 937-949.
- [20] Kornejady A, Ownegh M, Bahremand A. Landslide susceptibility assessment using maximum entropy model with two different data sampling methods. *Catena.* 2017; 152: 144-162.
- [21] Kerekes A.H, Poszet S.L, Andrea G.Á.L. Landslide susceptibility assessment using the maximum entropy model in a sector of the Cluj–Napoca Municipality, Romania. *Revista de Geomorfologie.* 2018; 20 (1): 130-146.
- [22] Pandey V.K, Pourghasemi H.R, Sharma M.C. Landslide susceptibility mapping using maximum entropy and support vector machine models along the Highway Corridor, Garhwal Himalaya. *Geocarto International.* 2020; 35(2): 168-187.
- [23] Rahmati O, Pourghasemi H.R, Meless A.M. Application of GIS-Based Data Driven Random Forest and Maximum Entropy Models for Groundwater Potential Mapping: A case Study at Mehran Region, Iran. *Catena.* 2016; 137: 360-372.
- [24] Razandi Y, Farokhzadeh B, Yousefzadeh Chabok M, Teimurian T. Applying Maximum Entropy algorithm (MAXENT) in Ground water potential mapping Case study: Hamedan-Bahar Plain. *Journal of Irrigation and Water Engineering.* 2017; 8(29): 110-123 (Persian).
- [25] Zabihi M, Purghasemi H.R, Behzadfar M. Preparation of groundwater potential map using Shannon entropy models and random forest in Bojnourd plain. *Ecohydrology.* 2015; 2 (2): 221-232.
- [26] Oliyayi A, Parvian N, Khsravi O. Identifying the potential of groundwater resources in hard formations as a solution to manage the water crisis (Case study: Kalat Naderi watershed). *Geography and Environmental Hazards.* 2017; 24: 143-158 (Persian).
- [27] Castillo J.L, Martínez Cruz D. A, Ramos Leal J. A, Tuxpan Vargas J, Rodríguez Tapia, S. A & Marín Celestino A. E. Delineation of groundwater potential zones (GWPZs) in a semi-arid basin through remote sensing, GIS, and AHP approaches. *Water.* 2022; 14(13): 2138 (Persian).
- [28] Rahaman M. H, Sajjad H, Masroor M, Bhuyan N. & Rehman S. Delineating groundwater potential zones using geospatial techniques and fuzzy analytical hierarchy process (FAHP) ensemble in the data-scarce region: evidence from the lower Thoubal river watershed of Manipur, India. *Arabian Journal of Geosciences.* 2022; 15(8): 677 (Persian).
- [29] Haghighi A, Nohtani M, Dahmardeh Ghaleno M.R. & Rafiei Sardooi E. Evaluating and detecting potential of groundwater resources using Fuzzy-AHP method and remote sensing data (Case study: Bam-Narmashir plain). *Integrated Watershed Management.* 2023; 3 (1): 16-37 (Persian).
- [30] Zakerinejad R, Maerker M. Prediction of Gully erosion susceptibilities using detailed terrain analysis and maximum entropy modeling: a case study in the Mazayejan Plain. Southwest Iran. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria.* 2014; 37(1): 67-76.
- [31] Deo R.C, Sahin M. Application of the extreme learning machine algorithm for the prediction of monthly Effective Drought Index in eastern Australia. *Atmospheric Research.* 2015; 153: 512-525.
- [32] Park S, Im J, Jang E, Rhee J. Drought assessment and monitoring through blending of multi-sensor indices using machine learning approaches for different climate regions. *Agricultural and Forest Meteorology.* 2016; 216: 157-169.
- [33] Jaafarzadeh M, Tahmasebi N, Hagizadeh A, Pourghasemi H.R, Rouhani H Prediction of susceptible areas for groundwater recharge based on maximum entropy model. *Adv. Appl. Geol.* 2022; 11(4): 723-739 (Persian).
- [34] Rahmati A, Tahmasbpour N, Haqizadeh A, Pourqasmi H, Faizizadeh B. Evaluation of the effectiveness of the

- maximum entropy model in predicting the potential for watershed erosion in the Keshkan-Poldakhter watershed. *Scientific-Research Journal of Watershed Engineering and Management*. 2019; 10(4): 727-738 (Persian).
- [35] Faryabi M. Investigating the impact of large floods of the Halilroud river on the groundwater level of the aquifer in the Jiroft plain. The 10th International Conference on Rain Catchment Surface Systems, November 1400 (Persian).
- [36] Porsidi A, Kashkouli H. A. study of the underground water condition of Jiroft Plain with the help of PMWIN model, *Irrigation Science and Engineering (Scientific Journal of Agriculture)*. 35(2) (Persian).
- [37] Saif M, Mosaedi A, and Mohammadzadeh H. Investigation of hydrological drought of Fasa plain aquifer using underground water resource index (GRI). 2013; The 15th conference of the Geological Society of Iran.
- [38] Mendicino G, Senatore A, Versace P. A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate. *Hydrology Journal*. 2008; 357: 282-302 (Persian).
- [39] Fatehi Merj A, Vahidian S. Survey of meteorological drought, hydrological agriculture using GIS in Khuzestan province. *Iran Watershed Science and Engineering Journal*. 2014; 7(23): 19-32 (Persian).
- [40] Vijith H. Groundwater potential in the hard rock terrain of Western Ghats: a case study from Kottayam District, Kerala using resourcesat (IRS-P6) data and GIS techniques. *Journal of Indian Society of Remote sensing*. 2007; 35(2): 163–171.
- [41] Banavar J.R, Maritan A, Volkov I. Applications of the principle of maximum entropy: from physics to ecology. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2010; 22 (6): p.063101.
- [42] Luca F, Conforti M, Robustelli G. Comparison of GIS-based gully susceptibility mapping using bivariate and multivariate statistics: Northern Calabria, South Italy. *Geomorphology*. 2011; 134 (3): 297-308.
- [43] Shannon C. A mathematical theory of communication, *Bulletin System. Technology Journal*. 1948; 27: 379–423.
- [44] Khalasi Ahvazi L, Zare Chahouki M, Hosseini Z. Modeling the geographical distribution of the habitat of *Artemisia aucheri* and *Artemisia sieberi* based on presence-based methods (MaxEnt and ENFA). *Journal of Renewable Natural Resources Research*. 2015; 6 (1): 57-74 (Persian).
- [45] Agrawal D, Singh J.K, Kumar A. Maximum entropy-based conditional probability distribution runoff model. *Biosystem Engineering*. 2005; 90 (1): 103–113.
- [46] MirAbbasi Najafabadi R, Din Pajhooh Y, Fakheri Fard A. Runoff modeling using the principle of maximum entropy (Case study: Kasilian basin). *Journal of Agricultural Science and Technology and Natural Resources, Soil and Water Sciences*. 2011; 15 (58): 39-51 (Persian).
- [47] Yesilnacar E.K. The application of computational intelligence to landslide susceptibility mapping in Turkey. PhD Thesis, University of Melbourne. 2005; 423 pages.
- [48] Damavandi A. A, Rezaei F. & Panahi M. Potential of Groundwater Resources Using Remote Sensing and Geographic Information System Case Study: Saleh Ben Watershed. 2011; 2nd Earth Sciences Conference. 1-9 (Persian).
- [49] Hosmer D. W, Lemeshow S. *Applied Logistic Regression*. Second edition. New York 392 pp, NY, USA: John Wiley and Sons. 2000.
- [50] Kheirkhah M, Mohebi Tafreshi GH, Majidi A, Asadian F. Using Integration GIS and Remote Sensing Techniques by Decision Support System to Locate Suitable Areas construction of Underground Dam (The Case Study of Qazvin province). *Iranian Journal of Watershed Management Science*. 2014; 8 (26): 35-50 (Persian).