



Determination of Groundwater Spring Potential Using Maximum Entropy, GIS and RS Emphasizing HAND Topographic-Hydrologic New Index (Case Study: Urmia Lake Basin)

Mehdi Teimouri.^{1*} and Omid Asadi Nalivan.²

1. Assistant prof., Higher Education Complex of Shirvan, Shirvan, Iran
2. Ph.D. of Watershed Management Sciences and Engineering, University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Abstract

The purpose of this research is to determine the groundwater potential of areas and to prioritize the factors affecting it using the maximum entropy method and the new height above the nearest drainage index. In the present study, 14 effective indicators have been used for groundwater potential including topographic, geological, climatic, hydrological and land use factors as well as a new height above the nearest drainage index (HAND). First, the factors were divided into two parts including of topographic and other factors such as geology, climate, hydrology and land use, and groundwater potential map was prepared based on them. Then, with the integration of the indices, the final groundwater potential map was prepared. Of the 2547 springs, using the Mahalanobis distance method, 60% of the data was classified as test data and 40% as validation data. The results showed that according to topographic indices, other factors and the combination of all indicators, 38.5, 27.4 and 34.7 percent of the area have groundwater potential, respectively. Also based on Jackknife Diagram, the altitude, land use, slope, relative slope, HAND index and lithology were the most important factors influencing groundwater potential. The area under curvature (AUC) based on ROC diagram indicates accuracy of 83, 83 and 85% (very good) at the training stage and 82, 81 and 84% (very good) in the validation step based on topographic indicators, other factors and the integration of all indicators. Given that the HAND index has been an effective factor of groundwater, it has a crucial role in identifying areas with groundwater potential.

Keywords: Maximum entropy, Groundwater spring potential, Urmia lake, HAND index, Machine learning.

* Correspondence Address: Dep. of Range and Watershed Management, Higher Education Complex of Shirvan.
Email: teimouri@cheshirvan.ac.ir
<https://doi.org/10.52547/gisj.13.2.119>



نسخه از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران سال سیزدهم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۰
Vol.13, No.2, Summer 2021 Iranian Remote Sensing & GIS

۱۱۹-۱۳۸

مقاله پژوهشی

تعیین پتانسیل وقوع چشمه آب زیرزمینی با استفاده از روش حداکثر آنتروپی، GIS و RS با تأکید بر شاخص جدید توپوگرافیکی- هیدرولوژیکی HAND (مطالعه موردی: حوزه آبخیز دریاچه ارومیه)

مهدی تیموری^{۱*} و امید اسدی نلیوان^۲

۱. استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، مجتمع آموزش عالی شیروان، شیروان، ایران

۲. دکتری آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۰۶

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۱۵

چکیده

هدف از این تحقیق تعیین مناطق دارای پتانسیل حضور چشمه آب زیرزمینی و اولویت‌بندی عوامل مؤثر در آن، با استفاده از روش حداکثر آنتروپی (مدل MaxEnt)، سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور است. در تحقیق حاضر، از چهارده شاخص تأثیرگذار در پتانسیل آب زیرزمینی شامل شاخص‌های توپوگرافیکی، زمین‌شناسی، اقلیمی، هیدرولوژیکی و کاربری اراضی و همچنین، شاخص جدید ارتفاع از سطح نزدیک‌ترین زهکش (HAND) استفاده شده است. ابتدا، شاخص‌ها به دو بخش شاخص‌های توپوگرافیکی و سایر عوامل شامل زمین‌شناسی، اقلیمی، هیدرولوژیکی و کاربری اراضی تقسیم شدند و نقشه پتانسیل آب زیرزمینی براساس آنها تهیه شد. سپس، از تلفیق شاخص‌ها، نقشه نهایی پتانسیل آب زیرزمینی به دست آمد. از مجموع ۲۵۴۷ چشمه، با استفاده از روش فاصله ماخالانویسی، ۶۰٪ به‌منزله داده‌های آزمون و ۴۰٪ به‌منزله داده‌های اعتبارسنجی طبقه‌بندی شدند. نتایج نشان داد که به‌ترتیب، براساس شاخص‌های توپوگرافیکی، سایر عوامل و تلفیق تمامی شاخص‌ها ۳۸.۵٪، ۲۷.۴٪ و ۳۴.۷٪ حوزه دارای پتانسیل آب زیرزمینی است. همچنین، طبق نمودار چکنایف لایه‌های ارتفاع، کاربری اراضی، شیب، موقعیت شیب نسبی، شاخص HAND و لیتولوژی به‌ترتیب مهم‌ترین عوامل مؤثر در پتانسیل چشمه آب زیرزمینی بودند. سطح زیر منحنی (AUC) براساس نمودار ROC نشان‌دهنده دقت ۸۳٪، ۸۳٪ و ۸۵٪ (خیلی خوب) در مرحله آموزش و ۸۲٪، ۸۱٪ و ۸۴٪ (خیلی خوب) در مرحله اعتبارسنجی، مطابق با شاخص‌های توپوگرافیکی، سایر عوامل و تلفیق تمامی شاخص‌ها بود. با توجه به اینکه شاخص HAND جزء شاخص‌های تأثیرگذار در آب زیرزمینی محسوب می‌شود؛ نقش تعیین‌کننده و مهمی در تعیین مناطق دارای پتانسیل چشمه آب زیرزمینی دارد.

کلید واژه‌ها: حداکثر آنتروپی، پتانسیل چشمه آب زیرزمینی، دریاچه ارومیه، شاخص HAND، یادگیری ماشینی.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: گروه آبخیزداری، مجتمع آموزش عالی شیروان.

۱- مقدمه

منابع آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین منابع طبیعی‌اند که از جنبه‌های گوناگون آب آشامیدنی، فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی و نیز حمایت از توسعه اقتصادی، سلامت انسان و تنوع اکولوژیکی اهمیت دارند (Rahmati et al., 2016). در ایران، در مناطق خشک و نیمه‌خشک، بیش از ۲۲٪ آب‌های زیرزمینی برای آشامیدن، بیش از ۷۵٪ آن برای کشاورزی و کمتر از ۲٪ در صنعت استفاده می‌شود (اسدی نلیوان، ۱۳۹۷). آب‌های زیرزمینی سیستمی دینامیک‌اند که بسیاری از متغیرها همچون هیدرولوژی، ژئومورفولوژی، توپوگرافی سطح، آب‌هوا، ویژگی‌های زمین‌شناسی و بارندگی عوامل تعیین‌کننده‌ای در مورد آنها محسوب می‌شوند (Lee et al., 2012). روش‌های متداول برای تعیین مناطق دارای آب زیرزمینی شامل آزمایش‌های هیدروژئولوژیکی، حفاری، روش‌های زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی و ژئوفیزیکی می‌شود که روش‌هایی بسیار هزینه‌بر و زمان‌برند. بنابراین، استفاده از داده‌های مورفولوژیکی و ژئومورفولوژیکی برای تعیین مناطق دارای آب‌های زیرزمینی رویکرد اقتصادی و مؤثری است؛ به‌ویژه در مناطقی که کمبود داده وجود دارد (Yin et al., 2018; Nampak et al., 2014). به‌تازگی، بسیاری از محققان سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور را برای تعیین نقشه پتانسیل آب زیرزمینی و ارزیابی آن به‌کار برده‌اند (Rahmati et al., 2018; Agarwal & Garg, 2016). نقشه پتانسیل چشمه آب‌های زیرزمینی یکی از جنبه‌های اصلی مطالعات آب زیرزمینی است که می‌تواند به مدیران منابع آب کمک کند تا برنامه بهره‌برداری و حفاظت بهتری داشته باشند (Naghibi et al., 2017). در سال‌های اخیر، تکنیک‌های یادگیری ماشینی توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است زیرا این روش‌ها الگوهای پنهان در آب‌های زیرزمینی را شناسایی می‌کنند و رابطه غیرخطی بین متغیرها را به‌دست می‌آورند (Chen et al., 2018; Mogaji & Lim, 2018).

روش‌های متفاوت یادگیری ماشینی مانند شبکه عصبی مصنوعی (Lee et al., 2012)، جنگل تصادفی (Golkarian et al., 2018)، حداکثر آنتروپی (Rahmati et al., 2016)، درخت رگرسیون (Naghibi & Pourghasemi, 2015)، درخت رگرسیون تقویت‌شده (Golkarian et al., 2018) در زمینه تعیین مناطق احتمالی وجود آب‌های زیرزمینی مفید بوده‌اند و به‌کار رفته‌اند.

عوامل گوناگونی همچون شاخص توان آبراهه (SPI)، تراکم آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، کاربری اراضی، بارندگی، ارتفاع، شیب، جهت شیب، موقعیت شیب نسبی، شاخص موقعیت توپوگرافیک، شاخص ارتفاع از سطح نزدیک‌ترین زهکش (HAND)، انحنای سطح، لیتولوژی و تراکم گسل در میزان پتانسیل آب زیرزمینی تأثیرگذارند (Miraki et al., 2019; Golkarian & Rahmati, 2018; Lee et al., 2019; Kordestani et al., 2019; Etikala et al., 2019; Rahmati et al., 2018). در این تحقیق، از روش آنتروپی حداکثر (مدل MaxEnt) استفاده شده است. روش آنتروپی حداکثر، اولین بار، در سال ۲۰۱۶ و به‌منظور تعیین پتانسیل منابع آب زیرزمینی به‌کار رفته است (رزندی و همکاران، ۱۳۹۶). در زمینه تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی تحقیقات فراوانی انجام گرفته است. میرکی^۱ و همکاران (۲۰۱۹) براساس روش جدید (RS-RF) و مقایسه آن با روش‌های رگرسیون لجستیک، جنگل تصادفی و NB به این نتیجه رسیدند که روش مذکور دقت بسیار بالاتری در مقایسه با دیگر روش‌های مورد استفاده برای تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی دارد. رضوی و همکاران (۱۳۹۶) در بررسی سه روش نسبت فراوانی، شاخص آماری و آنتروپی در شهرستان جهرم به این نتیجه رسیدند که روش آنتروپی برتری بیشتری بر دو مدل دیگر دارد و تأثیر فاکتورهای شاخص قدرت

1. Miraki

شاخص‌ها شامل عوامل زمین‌شناسی، اقلیمی، هیدرولوژیکی و کاربری اراضی و تلفیقی از این شاخص‌ها می‌شوند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز دریاچه ارومیه یکی از کلان‌حوزه‌های آبخیز کشور با مساحت ۵۱۸۷۶۶۸ هکتار است که در مختصات جغرافیایی بین ۴۳ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۱۷ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۴۹ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۵۴ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. حوزه آبخیز دریاچه ارومیه در سه استان آذربایجان غربی، شرقی و کردستان واقع شده و میانگین بارندگی و دمای این حوزه آبخیز به ترتیب ۳۷۹ میلی‌متر و ۱۲.۲ درجه سانتی‌گراد است. مساحت دریاچه ارومیه ۵۲۰۰ کیلومتر مربع، عرض آن ۵۵ کیلومتر و طول آن نیز ۱۴۰ کیلومتر می‌شود. شکل ۱ موقعیت حوزه آبخیز و موقعیت چشمه‌های آموزش و اعتبارسنجی را نشان می‌دهد (شکل ۱).

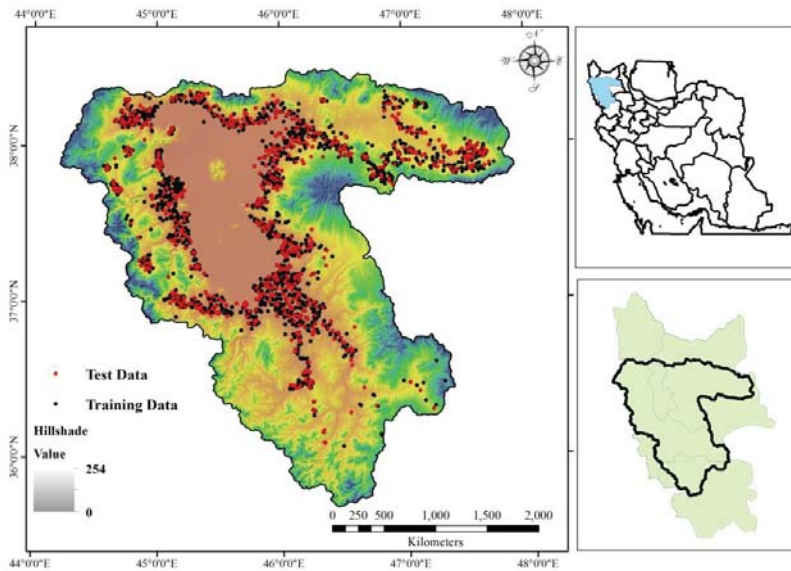
۲-۲- داده‌های مورد استفاده و روش مطالعه

در تحقیق حاضر، برای تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی و براساس مرور منابع گسترده در این زمینه (Rajan et al., 2019; Machireddy, 2019; Chen et al., 2019) از پانزده شاخص مؤثر در پتانسیل آب زیرزمینی شامل ارتفاع (متر)، شیب (درصد)، جهت شیب، انحنای سطح، فاصله از آبراهه (متر)، تراکم زهکشی (کیلومتر بر کیلومتر مربع)، فاصله از غسل (متر)، تراکم غسل (کیلومتر بر کیلومتر مربع)، لیتولوژی، بارندگی، کاربری اراضی، شاخص قدرت آبراهه (SPI)، شاخص موقعیت توپوگرافیک (TPI)، موقعیت شیب نسبی (RSP) و شاخص جدید ارتفاع از سطح

آبراهه، ارتفاع، شیب و کاربری اراضی در پتانسیل آب زیرزمینی بیشتر است. رزندی و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از الگوریتم حداکثر آنتروپی در دشت همدان - بهار نشان دادند روش مورد اشاره توانایی شناسایی مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی را دارد و فاکتورهای DEM، ضخامت آبخوان و زمین‌شناسی را از عوامل مؤثر در پتانسیل آب زیرزمینی معرفی کردند. رحمتی^۱ و همکاران (۲۰۱۸) در استفاده از شاخص HAND برای حوزه آبخیز چهل‌چای به این نتیجه رسیدند که این شاخص سهم بزرگی در مدل‌سازی پتانسیل آب زیرزمینی، در میان سایر عوامل دارد. ایتیکالا^۲ و همکاران (۲۰۱۹)، با استفاده از تکنیک MIF و شاخص هم‌پوشانی وزنی، مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی در هند را تعیین کردند. آنها منطقه را به چهار کلاس پتانسیل تقسیم و روش‌های مذکور را مناسب ارزیابی کردند.

حوزه آبخیز دریاچه ارومیه، به علت کاهش سطح آب این دریاچه در سال‌های اخیر، به یکی از حوزه‌های بحرانی کشور تبدیل شده است. این حوزه، براساس آخرین اطلاعات شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۴۴۷۱۰ چاه مجاز دارد و بهره‌برداری از آن‌ها مشکلات فراوانی برای این حوزه ایجاد کرده است. هدف از این تحقیق تعیین مناطق دارای پتانسیل وقوع چشمه آب زیرزمینی به‌منزله یکی از مشخصه‌های استعداد مناطق دارای منابع مناسب آب است؛ چرا که به‌صورت کاملاً بی‌رویه و در تمامی سطح حوزه آبخیز چاه‌های آب به چشم می‌خورد و از همه آنها بهره‌برداری صورت می‌گیرد که خود این مسئله از دلایل کاهش سطح آبخوان در این مناطق و نیز پیشروی آب شور دریاچه به سمت آب‌های شیرین شمرده می‌شود. نوآوری تحقیق حاضر استفاده از شاخص HAND برای اولین بار در ایران و استفاده از روش فاصله‌ماهالانوبیس به‌جای تقسیم‌بندی تصادفی داده‌ها و همچنین تعیین مناطق دارای پتانسیل چشمه آب زیرزمینی، با استفاده از شاخص‌های توپوگرافیکی و سایر شاخص‌هاست. این

1. Rahmati
2. Etikala



شکل ۱. موقعیت حوزه آبخیز دریاچه ارومیه در ایران و استان و چشمه‌های آموزش و اعتبارسنجی مدل

عوامل، T معکوس ماتریس مقادیر عوامل و Σ^{-1} کواریانس معکوس ماتریس شمرده می‌شود. روش فاصله ماهالانوبیس به غنای تقسیم‌بندی داده‌ها کمک می‌کند و از تصادفی‌بودن انتخاب نقاط برای اعتبارسنجی جلوگیری می‌کند (Kornejady et al., 2017).

ابتدا لایه مدل رقومی ارتفاعی با استفاده از تصاویر ماهواره لندست-۸ در ابعاد ۳۰ متر تهیه شد. ارتفاع در شرایط آب‌وهوایی و پوشش گیاهی تأثیرگذار است. لایه‌های شیب، جهت شیب و انحنای سطح با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی و به ترتیب از توابع Slope، Aspect و Plan Curvature تهیه شده‌اند. افزایش شیب زمین باعث کاهش میزان آب نفوذی به زمین و افزایش رواناب می‌شود. جهت شیب در میزان بارندگی، تأثیرات باد و میزان دریافت نور خورشید نقش دارد (Zabihi et al., 2016). لایه‌های فاصله از آبراهه و فاصله از گسل براساس نقشه آبراهه‌ها (استخراج از نرم‌افزار SAGA GIS) و گسل‌های موجود در منطقه (نقشه Euclidean distance زمین‌شناسی) و با استفاده از تابع

نزدیک‌ترین زهکش (HAND) استفاده شده است. در این تحقیق از مجموع ۲۵۴۷ چشمه، با استفاده از روش فاصله ماهالانوبیس^۱، ۱۰۱۹ چشمه (۴۰٪) به منزله داده‌های اعتبارسنجی و ۱۵۲۸ چشمه (۶۰٪) به منزله داده‌های آزمون (آموزش) طبقه‌بندی شدند. این نوع از فاصله را ماهالانوبیس (۱۹۳۶) پیشنهاد داد. در محیطی فیزیکی، مشاهده پدیده‌ای نظیر چشمه برآمده از شرایطی خاص و تحت تأثیر مجموعه‌ای متغیر (عوامل تأثیرگذار در ظهور چشمه) است. در این روش، پیکسل‌هایی که در آنها چشمه ظهور کرده است تعیین می‌شود، مقادیر عوامل مؤثر در ظهور چشمه در این سلول‌ها فهرست و از مقادیر هریک از عوامل میانگین گرفته می‌شود. این مقادیر میانگین به صورت مقادیری تعریف می‌شوند که سبب حداکثر احتمال ظهور چشمه شده‌اند. اکنون، احتمال ظهور چشمه در سایر سلول‌ها (سلول‌های عدم حضور چشمه) طبق رابطه (۱) و در قالب فاصله بیان می‌شود.

$$Dm = \sqrt{(x - m)^T \Sigma^{-1} (x - m)} \quad (1)$$

در این رابطه، x بردار یا ماتریس هریک از عوامل مؤثر در ظهور چشمه، m میانگین مقادیر هریک از

1. Mahalanobis
2. Landsat-8

زیرقشری سریع) و زون فلات (دارای جریان نفوذ عمقی) است.

$$\text{RSP} = \left(\frac{z(s) - z(s)_v}{z(s)_r - z(s)_v} \right) \times 100 + 0.5 \quad (2)$$

که در آن $Z(s)$ ارتفاع، $z(s)_v$ ارتفاع دره، $z(s)_r$ ارتفاع خطالرأس است.

$$\text{TPI} = Z_0 - \frac{\sum_{i=1}^n Z_n}{n} \quad (3)$$

که در آن Z_0 ارتفاع نقطه مورد ارزیابی، Z_n ارتفاع شبکه اطراف نقطه مورد ارزیابی، و n تعداد کل نقاط مورد استفاده در ارزیابی است. مقادیر مثبت نشان دهنده مکان‌هایی‌اند که بالاتر از میانگین اطراف نقطه قرار دارند؛ مانند خطالرأس‌ها. مقادیر منفی مکان‌هایی را نشان می‌دهند که پایین‌تر از میانگین اطراف نقطه قرار گرفته‌اند؛ مثل دره‌ها و چاله‌های محلی. مقادیر صفر به مناطق مسطح و جایی که شیب صفر است اشاره دارند.

$$\text{SPI} = A_s * \tan \beta \quad (4)$$

A_s مساحت حوزه آبخیز و β گرادیان شیب برحسب درجه است.

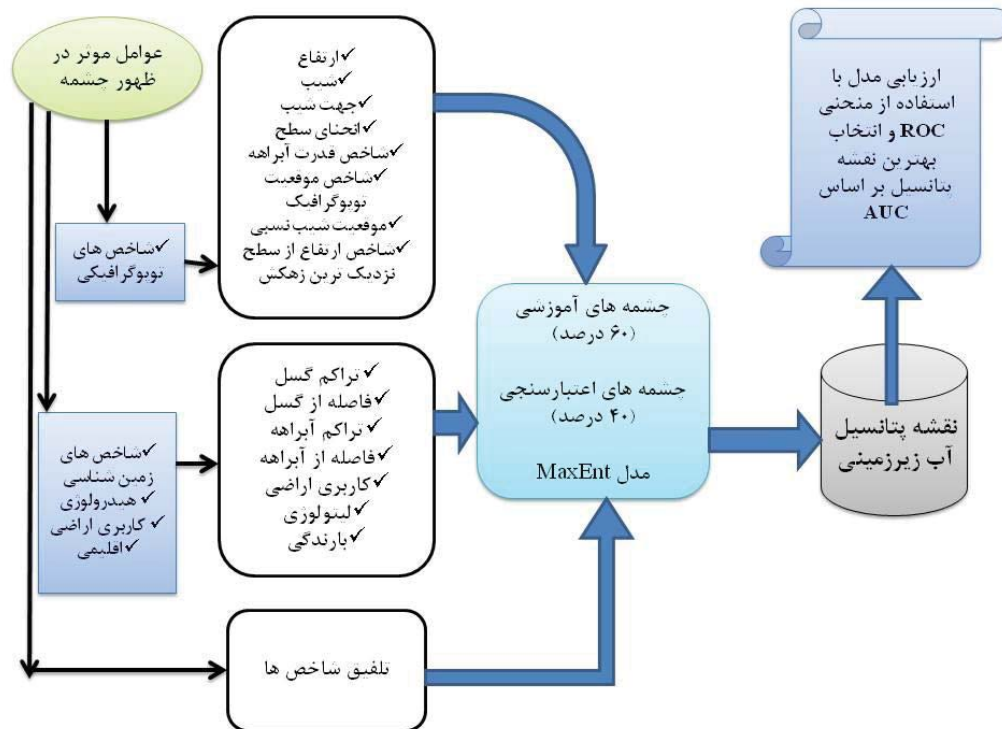
در مرحله بعدی، عوامل و شاخص‌های مورد استفاده در این تحقیق به دو بخش شاخص‌های توپوگرافیکی و عوامل دیگر، شامل عوامل زمین‌شناسی، اقلیمی، هیدرولوژیکی و کاربری اراضی تقسیم شدند و نقشه پتانسیل وقوع چشمه آب زیرزمینی برپایه آنها تهیه شد. سپس، از تلفیق شاخص‌ها، نقشه نهایی پتانسیل آب زیرزمینی به دست آمد. پس از آن، طبق منحنی ROC و سطح زیر نمودار AUC، ارزیابی نقشه‌های پتانسیل صورت گرفت و بهترین پهنه‌بندی و مدل‌سازی انتخاب شد. با توجه به آنچه در منابع آمده است، مقدار AUC دامنه ۰.۵ تا ۱ را دارد که به ترتیب نشان‌دهنده دقت ضعیف تا عالی مدل برای پیش‌بینی و آموزش است. سطح زیر نمودار AUC به دست آمده، به منزله معیاری برای قدرت تفکیک مدل در تشخیص نقاط حضور و عدم حضور، مورد توجه قرار می‌گیرد.

در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شدند. لایه‌های تراکم آبراهه و تراکم گسل بر مبنای نقشه آبراهه‌ها و گسل‌های موجود در منطقه و با استفاده از تابع Line Density در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شدند. لایه لیتولوژی از نقشه زمین‌شناسی منطقه استخراج شده و لایه کاربری اراضی از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان آذربایجان غربی دریافت شده است. لایه‌های موقعیت شیب نسبی، شاخص موقعیت توپوگرافیک، شاخص قدرت آبراهه و شاخص ارتفاع از سطح نزدیک‌ترین زهکش از مدل رقومی ارتفاعی و با استفاده از نرم‌افزار SAGA GIS تهیه شدند. شاخص RSP نشان‌دهنده موقعیت شیب هر سلول و موقعیت نسبی آن بین کف دره (۰) تا خطالرأس (۱) است (رابطه ۲). شاخص TPI ارتفاع هر یک از سلول‌ها در مدل رقومی ارتفاعی را با ارتفاع متوسط محدوده مشخص شده در اطراف این سلول، مقایسه می‌کند (Yeh et al., 2016). در واقع، این شاخص تفاوت بین پیکسل مرکزی و میانگین سلول‌های اطراف را نشان می‌دهد (رابطه ۳). شاخص SPI اندازه‌گیری نیروی فرسایش جریان (رابطه ۴) است و افزایش آن باعث کاهش نفوذ و افزایش گل‌آلودگی می‌شود. شاخص HAND شاخص جدید توپوگرافیکی-هیدرولوژیکی ارتفاع از سطح نزدیک‌ترین زهکش، نماینده رفتار هیدرولوژیکی حوزه آبخیز محسوب می‌شود و می‌توان آن را جایگزین مناسبی برای شاخص رطوبت توپوگرافیکی (TWI) در نظر گرفت. این شاخص حوزه را با توجه به ارتفاع نسبی در طول شبکه زهکشی، اصلاح می‌کند و وضعیت پتانسیل گرانشی و زهکشی نسبی زمین را مشخص می‌نماید (Rahmati et al., 2018). این شاخص با استفاده از نقشه DEM ۳۰*۳۰ متری و در نظر گرفتن آستانه مساحتی ۵۰۰ هکتار به دست آمده است. شاخص یادشده در بازه اعداد مثبت قرار دارد و از کم (عدد صفر) به زیاد (حد خاصی ندارد)، نماینده زون‌های پاسخ اشباع (دارای جریان اشباع)، دامنه (دارای جریان

۳-۲- روش حداکثر آنتروپی و مدل MaxEnt

حضور (چشمه‌ها) محاسبه و با همبستگی متغیرها، با ۱۰۰۰۰ نقطه تصادفی از منطقه، به‌منزله نقاط شبه‌عدم‌حضور مقایسه می‌شود. یکی از مهم‌ترین مزایای مدل MaxEnt قابلیت این مدل در شناسایی مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار و تحلیل حساسیت متغیرها به‌روش جک‌نایف^۱ محسوب می‌شود (Phillips et al., 2006) که در این تحقیق، این مهم انجام شده است. شکل ۲ مراحل جریان تحقیق را نشان می‌دهد.

مدل حداکثر آنتروپی یکی از روش‌های یادگیری ماشینی است که طی سال‌های اخیر، در پتانسیل آب زیرزمینی، کاربرد گسترده‌ای داشته و مبتنی بر نقاط حضور است. مزیت این روش آن است که برای پیش‌بینی رفتار پدیده‌ها نیاز به نقاط عدم حضور آن پدیده ندارد بلکه از مجموعه‌ای عوامل تأثیرگذار و نقاط مشاهده‌شده آن پدیده بهره می‌برد. در این روش، همبستگی پارامترهای مؤثر در آب زیرزمینی با نقاط



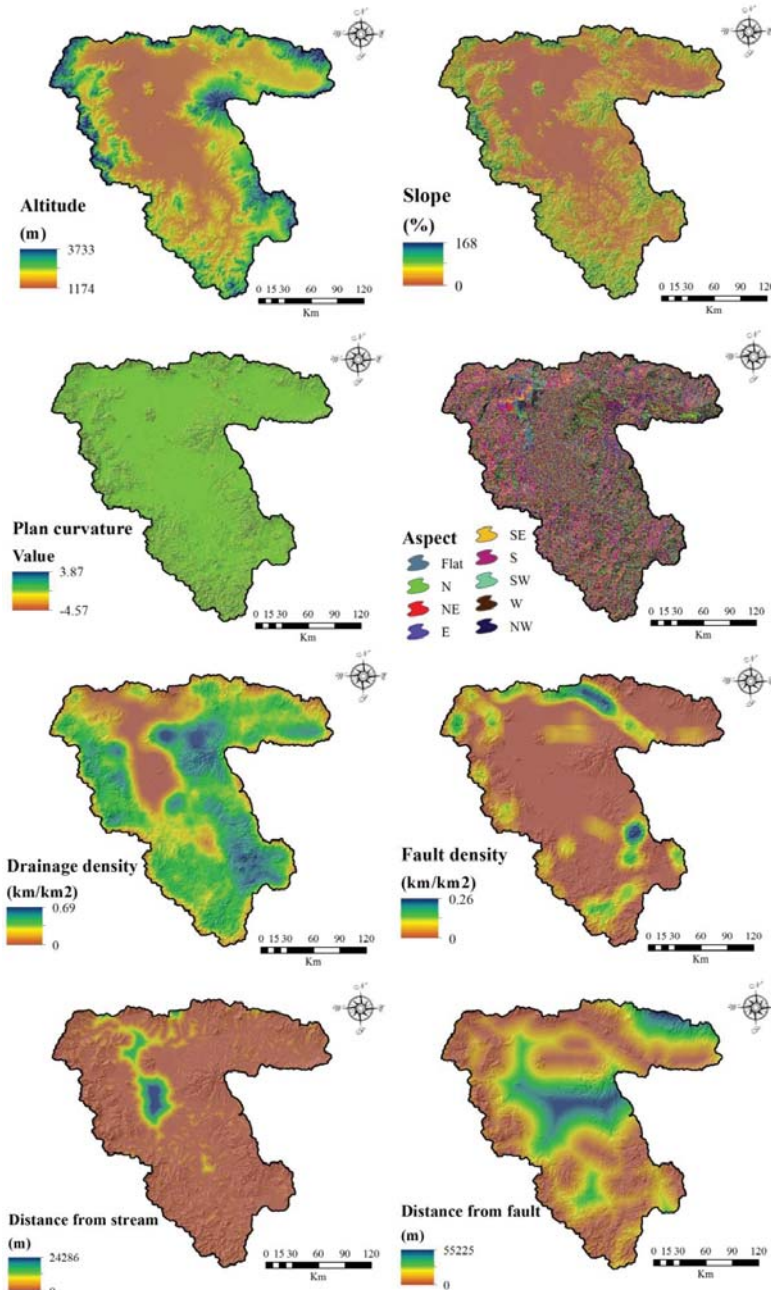
شکل ۲. فلوجارت تعیین مناطق دارای پتانسیل چشمه آب زیرزمینی در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه

1. Jackknife

۳- نتایج

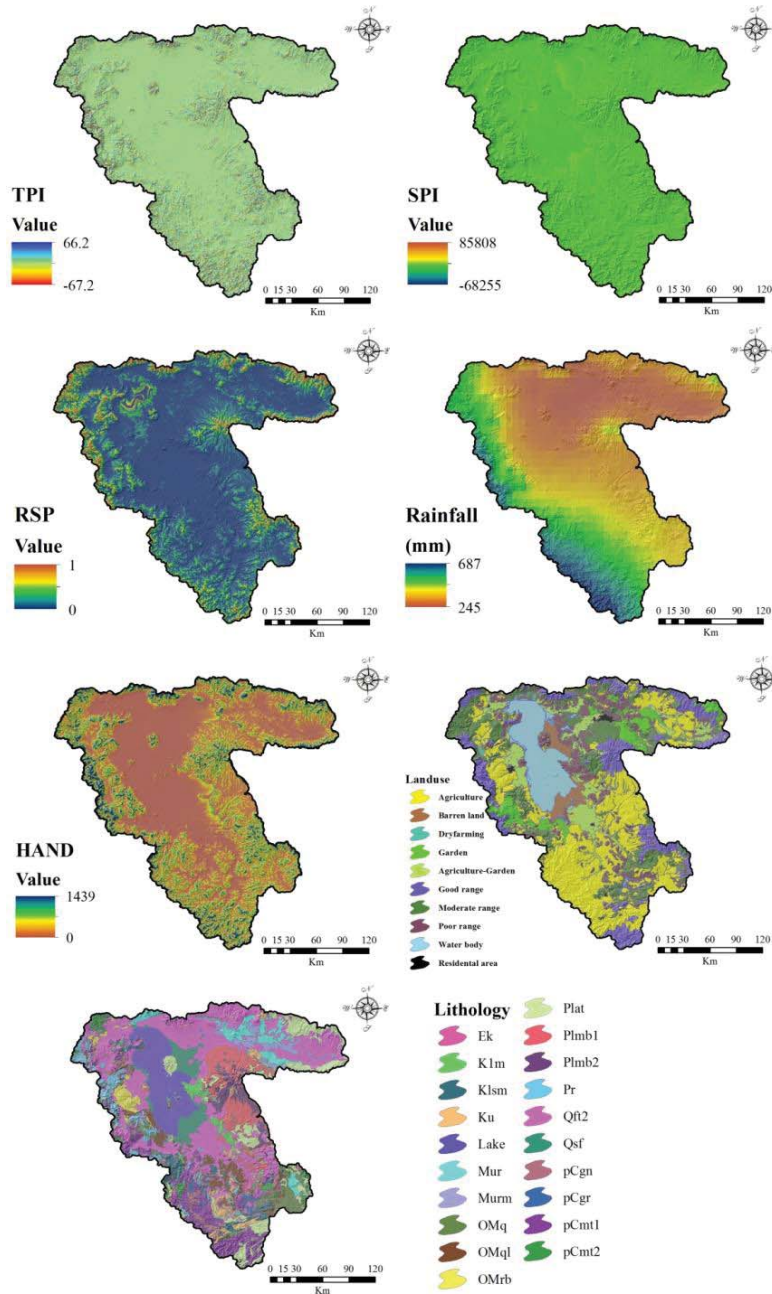
ارتفاعی ۱۱۷۴ تا ۳۷۳۳ متر، شیب صفر تا ۱۶۸٪ و نیز دارای ده گونه کاربری اراضی است. با توجه به وسعت بالای این حوزه، تنوع سازندهای زمین‌شناسی و نوع لیتولوژی متفاوت در آن بسیار بالاست.

شکل ۳ نقشه شاخص‌های مورد استفاده در تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. طبق این شکل، حوزه آبخیز دریاچه ارومیه دارای دامنه



شکل ۳. نقشه شاخص‌های تأثیرگذار در پتانسیل آب زیرزمینی در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه

مهدی تیموری و امید اسدی نلیوان

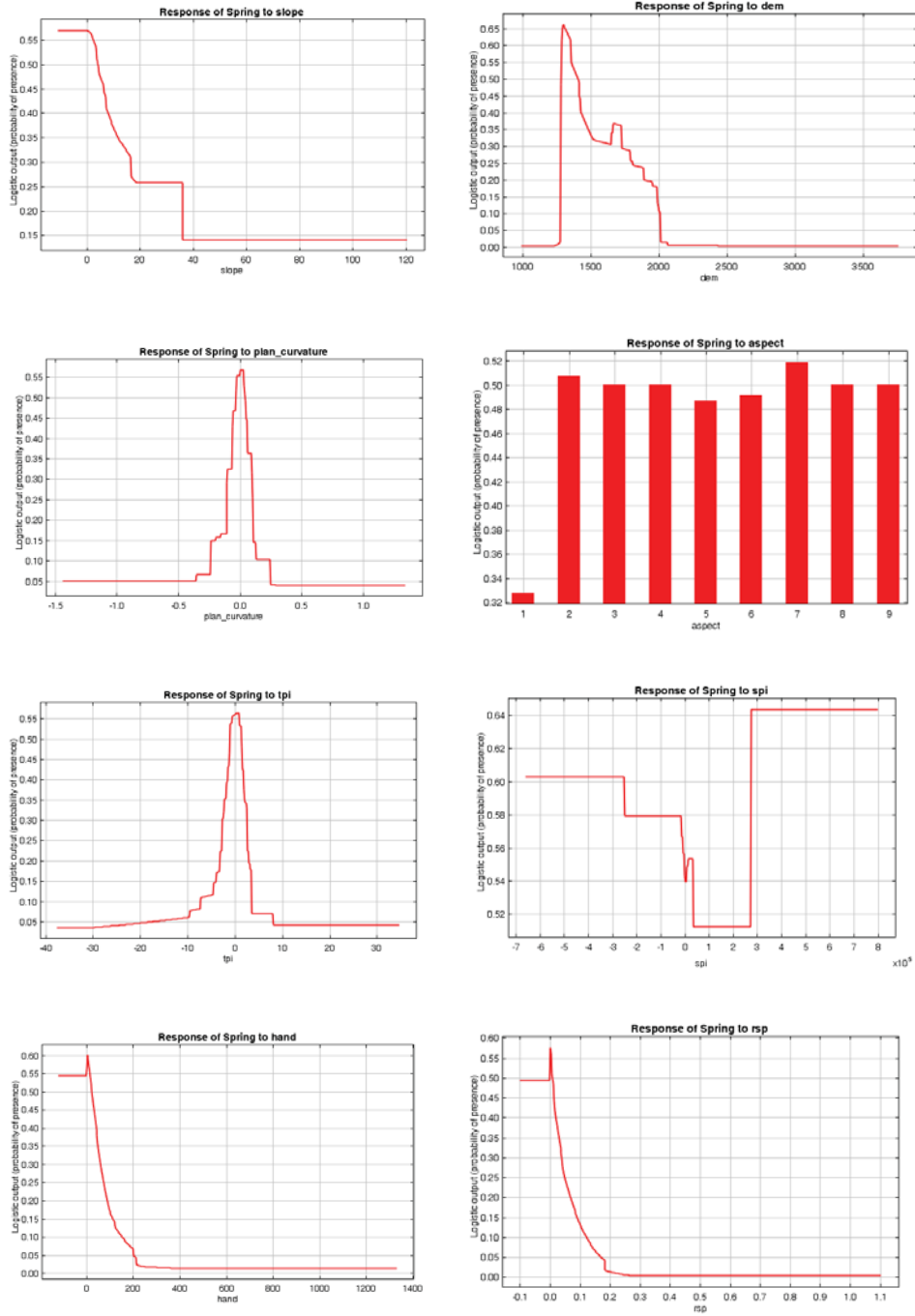


ادامه شکل ۳

سپس دیگر شاخص‌های مورد استفاده مشخص شده است که شامل شاخص‌های زمین‌شناسی، هیدرولوژی، کاربری اراضی و اقلیمی برای تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی می‌شوند.

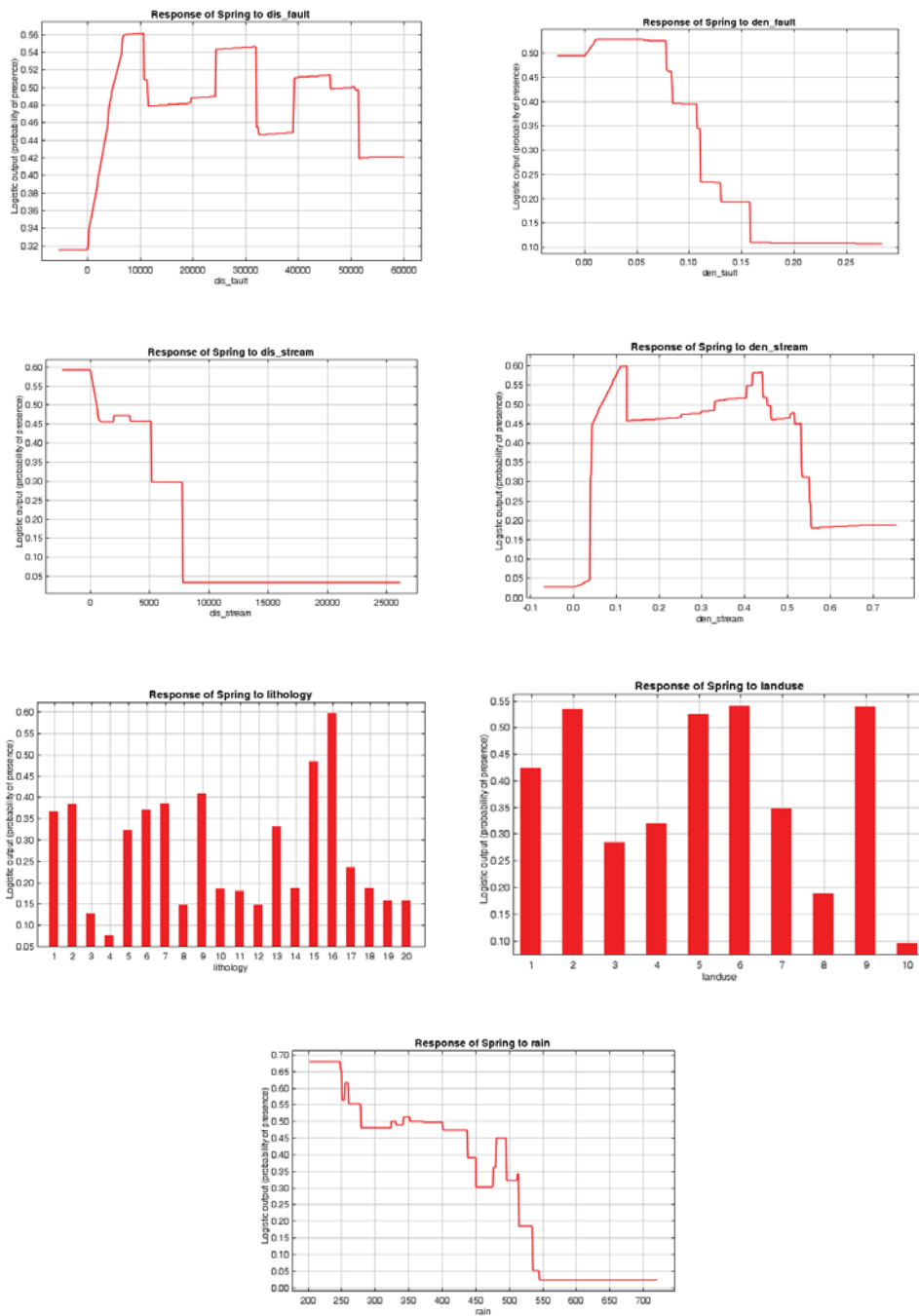
شکل ۴ منحنی پاسخ پارامترهای مورد استفاده برای تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی و نحوه تأثیر آنها در پیش‌بینی مدل MaxEnt را نشان می‌دهد. در این شکل، ابتدا شاخص‌های توپوگرافیک و

تعیین پتانسیل وقوع چشمه آب زیرزمینی با استفاده از روش ...



شکل ۴. تأثیر پارامترهای مورد استفاده در پیش‌بینی مدل MaxEnt

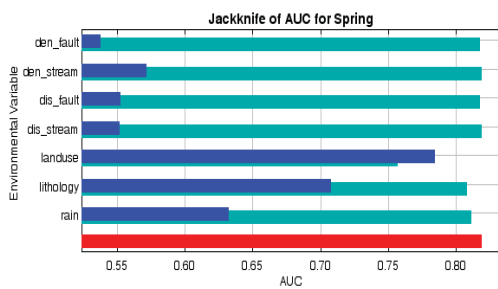
مهدی تیموری و امید اسدی نلیوان



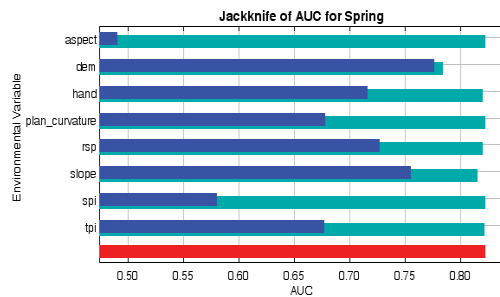
ادامه شکل ۴.

مراحل آموزش و اعتبارسنجی را طبق AUC به دست آمده از منحنی ROC نشان می‌دهد. براین اساس، مدل در مرحله آموزش، به ترتیب دقت ۸۳٪ و ۸۳٪ و در مرحله اعتبارسنجی، دقت ۸۲٪ و ۸۱٪ و ۸۴٪ را برپایه شاخص‌های توپوگرافیکی، عوامل دیگر و تلفیق تمامی شاخص‌ها دارد.

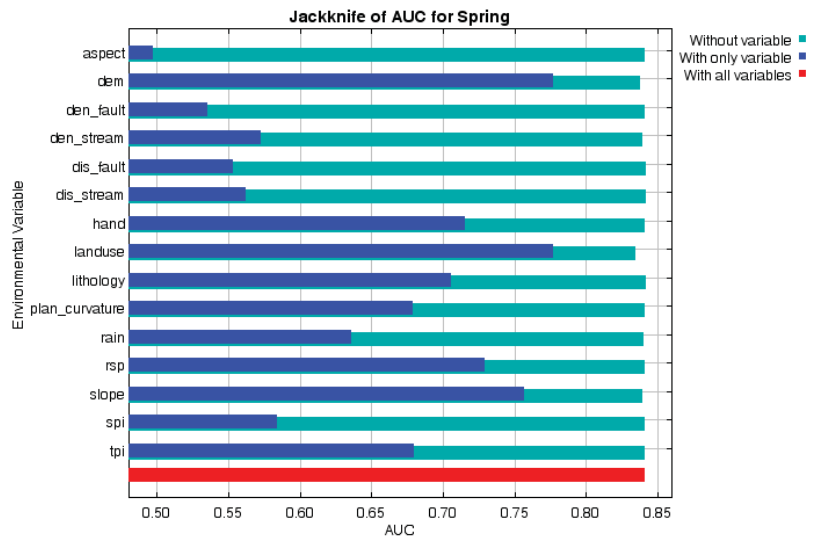
شکل ۵ نتایج حاصل از نمودار جکنایف، به منظور تعیین مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار، و سهم هر یک از پارامترها را در پیش‌بینی مدل نشان می‌دهد. ارتفاع و کاربری اراضی به ترتیب مهم‌ترین عوامل شاخص توپوگرافیکی و دیگر عوامل شده‌اند. شکل ۶ نتایج حاصل از ارزیابی عملکرد مدل در



(b)

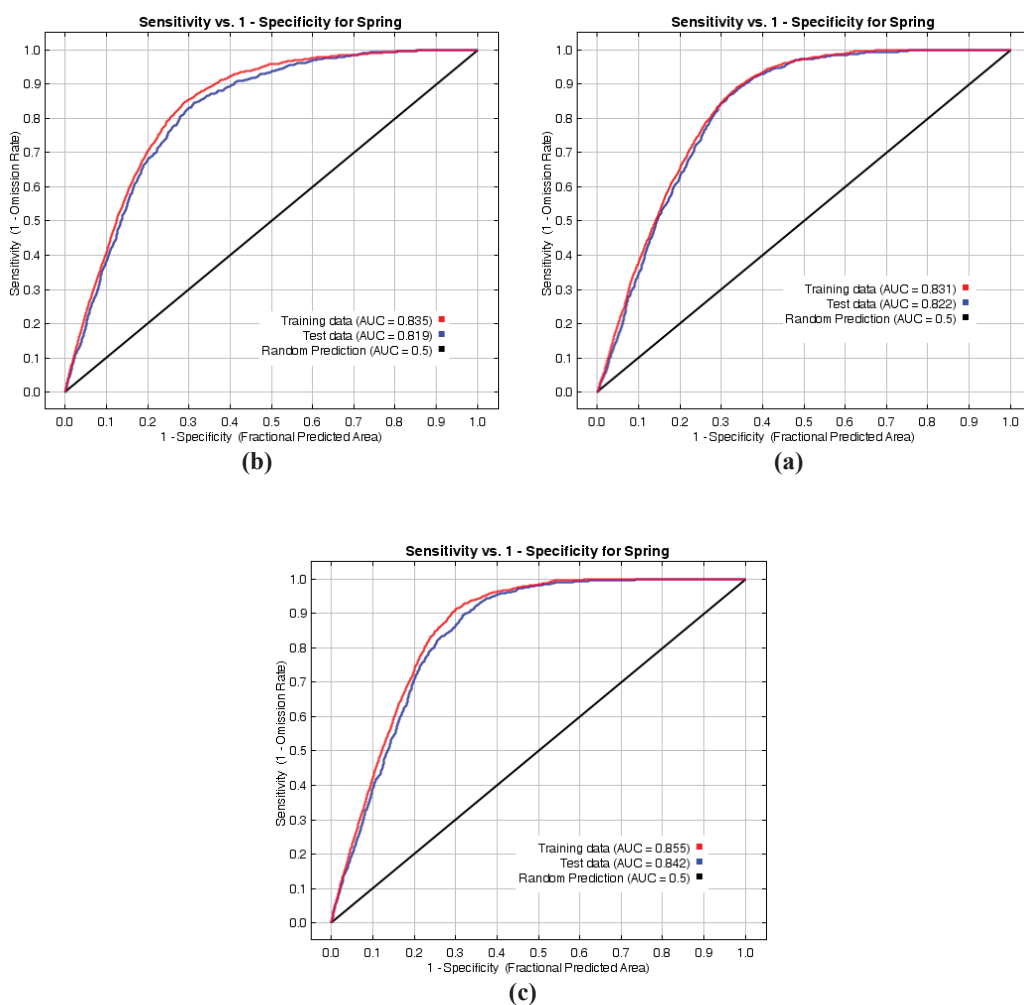


(a)



(c)

شکل ۵. نتایج حاصل از آزمون جکنایف برای تعیین مهم‌ترین پارامترها: شاخص‌های توپوگرافیکی (a); سایر عوامل (b); تلفیق همه شاخص‌ها (c)



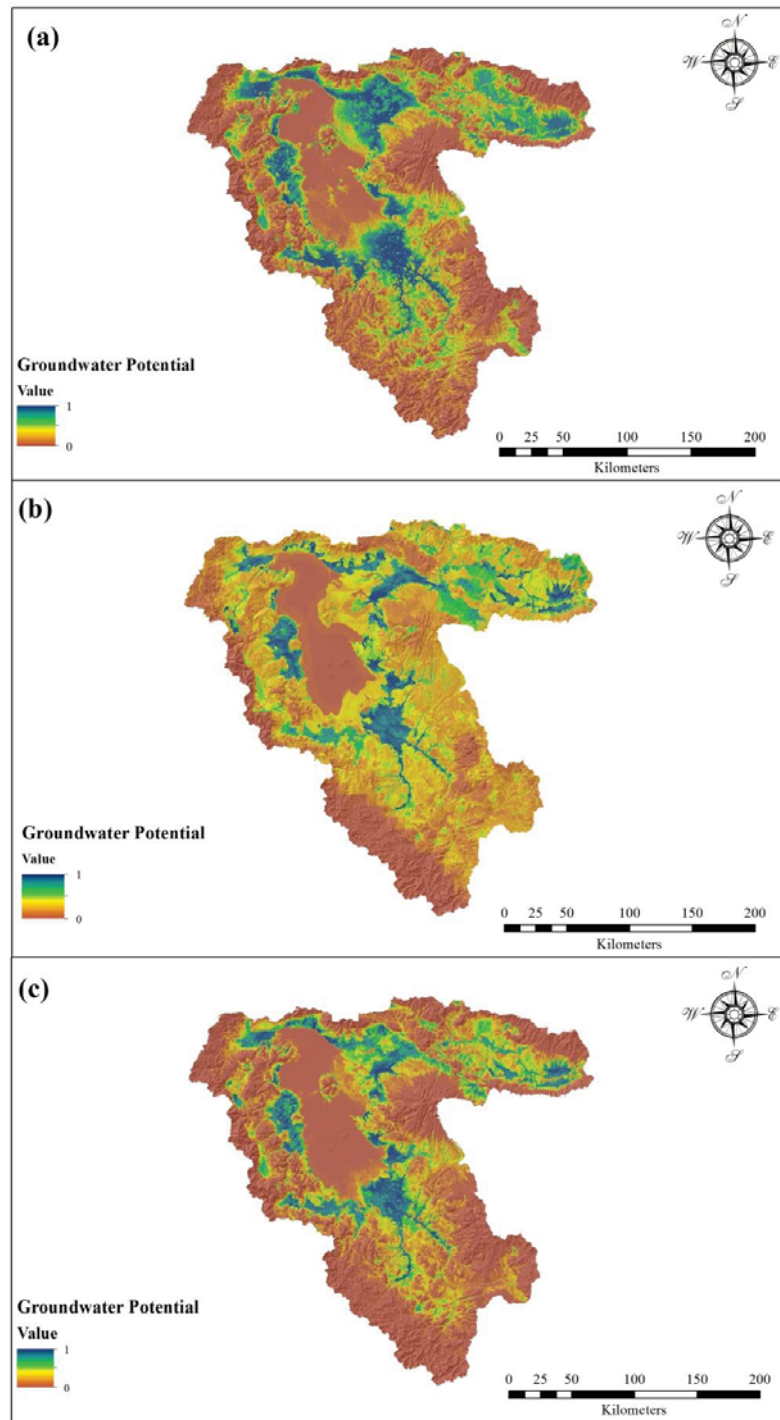
شکل ۶. منحنی ROC و مقدار AUC محاسبه شده برای ارزیابی عملکرد مدل: شاخص‌های توپوگرافیکی (a)؛ سایر عوامل (b)؛ تلفیق همه شاخص‌ها (c)

۴- بحث و نتیجه‌گیری

شناسایی مناطق دارای آب زیرزمینی با روش‌های معمول و سنتی هزینه‌بر و زمان‌بر است؛ بنابراین، تهیه نقشه پتانسیل چشمه آب زیرزمینی، با استفاده از روش‌های نوین یادگیری، امری ضروری است. در این مطالعه، با در نظر گرفتن متغیرهای محیطی تأثیرگذار و با استفاده از روش حداکثر آنتروپی، نقشه پتانسیل آب زیرزمینی حوزه آبخیز دریاچه ارومیه تهیه شد.

شکل ۷ نقشه نهایی پتانسیل آب زیرزمینی را در حوزه مورد مطالعه نشان می‌دهد. مطابق با این شکل، به ترتیب و بر مبنای شاخص‌های توپوگرافیکی، دیگر عوامل و تلفیق تمامی شاخص‌ها ۳۸.۵، ۲۷.۴ و ۳۴.۷٪ از حوزه دارای پتانسیل وقوع چشمه آب زیرزمینی است. در این شکل، هرچه به سمت عدد ۱ (رنگ آبی) نزدیک می‌شویم، امکان وجود چشمه آب زیرزمینی بیشتر است.

تعیین پتانسیل وقوع چشمه آب زیرزمینی با استفاده از روش ...



شکل ۷. نقشه پتانسیل چشمه آب زیرزمینی در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه: پتانسیل آب براساس شاخص‌های توپوگرافیکی (a)؛ براساس دیگر عوامل (b)؛ براساس تلفیق همه شاخص‌ها (c)

میزان انحنای سطح از صفر به بالا، پتانسیل آب زیرزمینی روند ثابت کاهشی داشته است. بین تراکم گسل و پتانسیل آب زیرزمینی رابطه‌ای معکوس برقرار بوده است که با نتایج ذبیحی و همکاران (۱۳۹۴) مطابقت دارد و دلیل آن نیز نفوذ آب به اعماق، بر اثر تراکم زیاد گسل و عدم ظهور آب (کوتاهمدت) در سطح زمین است. از دیگر سو، کاهش پتانسیل آب زیرزمینی به دنبال افزایش تراکم گسل، نشان‌دهنده اثر گسل در انتقال آب به مناطق دیگر است (Golkarian & Rahmati, 2018). محققانی مانند آروبلالاجی^۱ و همکاران (۲۰۱۹)، حقی‌زاده^۲ و همکاران (۲۰۱۷)، رحیمی و سلیمانی (۱۳۹۵) بیان داشته‌اند که بین تراکم گسل و پتانسیل آب زیرزمینی رابطه‌ای مستقیم برقرار است. با افزایش تراکم آبراهه تا حدود ۰.۴۵ کیلومتر بر کیلومتر مربع، پتانسیل آب زیرزمینی افزایش پیدا کرده است که نشان از افزایش نفوذ آب در این مناطق، به دلیل ارتباط آب سطحی و زیرزمینی دارد. این در حالی است که عرب‌عامری و همکاران (۱۳۹۷) بین تراکم آبراهه و پتانسیل آب زیرزمینی رابطه‌ای ندیده‌اند. آگاروال و گارگ^۳ (۲۰۱۶) و ذبیحی و همکاران (۱۳۹۴) نیز اشاره داشته‌اند که بین تراکم آبراهه و پتانسیل آب زیرزمینی رابطه‌ای معکوس وجود دارد. این گفته با نتایج این تحقیق، در بخش تراکم بالاتر از ۰.۴۵ کیلومتر بر کیلومتر مربع، مطابقت دارد و دلیل این تطابق افزایش رواناب در مناطق دارای تراکم زهکشی بالاتر است. نتایج نشان داد که با افزایش فاصله از گسل، پتانسیل آب زیرزمینی به صورت نامنظم افزایش و کاهش پیدا کرده است و در حالت کلی، روند نزولی دارد. یکی از دلایل این وضعیت افزایش میزان نفوذ آب زیرزمینی در مناطق نزدیک به گسل است که با نتایج ذبیحی و همکاران (۱۳۹۴) و عرب‌عامری و

نتایج براساس نمودار جکنایف نشان داد که لایه‌های ارتفاع (Miraki et al., 2019) (رضوی و همکاران، ۱۳۹۶)، کاربری اراضی (Miraki et al., 2019; Arulbalaji et al., 2019)، شیب (Miraki et al., 2019; Haghizade et al., 2017) (رضوی و همکاران، ۱۳۹۶)، موقعیت شیب نسبی، شاخص ارتفاع از سطح نزدیک‌ترین زهکش، لیتولوژی (Miraki et al., 2019; Muniraj et al., 2018; Golkarian and Rahmati, 2018) (رزنندی و همکاران، ۱۳۹۶)، انحنای سطح (Miraki et al., 2019)، شاخص موقعیت توپوگرافیک، بارندگی (رضایی مقدم و همکاران، ۱۳۹۵)، شاخص قدرت جریان (Golkarian & Rahmati, 2018)، تراکم آبراهه (رضایی مقدم و همکاران، ۱۳۹۵)، فاصله از آبراهه (Golkarian & Rahmati, 2018)، فاصله از گسل (عرب‌عامری و همکاران، ۱۳۹۷) تراکم گسل (Arulbalaji et al., 2019; Muniraj et al., 2019) و جهت شیب به ترتیب مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در پتانسیل آب زیرزمینی بودند.

براساس منحنی‌های پاسخ، نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع، کاهش پتانسیل آب زیرزمینی رخ داده است و این رخداد روند ثابت نزولی دارد که با نتایج لی و همکاران (۲۰۱۹)، رزنندی و همکاران (۲۰۱۵) و آل‌آبادی و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد. دلیل آن تشکیل نشدن آبخوان با ضخامت زیاد در ارتفاعات بالا بیان شده است که در مورد تحقیق حاضر نیز صدق می‌کند. همچنین در ارتفاعات بالادست، به دلیل افزایش شیب، رواناب بیشتری تولید و از میزان تغذیه کاسته می‌شود (عرب‌عامری و همکاران، ۱۳۹۷). دامنه میانی (۰.۵-۰) انحنای سطح بیشترین سهم را در پتانسیل آب زیرزمینی داشته است که بیشتر مناطق مسطح و مقعر را نشان می‌دهد و دلیل آن نیز کاهش شیب در این مناطق است. عرب‌عامری و همکاران (۱۳۹۷) و آل‌آبادی و همکاران (۲۰۱۶) نیز بیان کردند که انحنای کمتر از ۱ و نزدیک به ۰ بیشترین تأثیر را در پتانسیل آب زیرزمینی دارد. شایان ذکر است که با افزایش

1. Arulbalaji
2. Haghizade
3. Agarwal & Garg

همکاران (Thilagavathi et al., 2015) (رزندی و همکاران، ۱۳۹۶؛ رضایی مقدم و همکاران، ۱۳۹۵). نتایج نشان داد که با افزایش موقعیت شیب نسبی، پتانسیل آب زیرزمینی کاهش پیدا کرده است. یکی از دلایل این امر آن است که با افزایش RSP، به مناطق خطالرأس نزدیک می‌شویم که در این مناطق، بیشتر صخره‌سنگ وجود دارد و کاهش پتانسیل امری بدیهی محسوب می‌شود. طبق نتایج، با افزایش مقدار HAND، پتانسیل آب زیرزمینی کاهش پیدا می‌کند. این بدان معنی است که با افزایش شاخص HAND، فاصله از آبراهه افزایش می‌یابد و مقدار پایین HAND نیز نشان‌دهنده مناطق زون اشباع است (Speckhann et al., 2018) که در آن پتانسیل آب زیرزمینی افزایش پیدا می‌کند. این نتیجه با واقعیت زمینی تطابق مورد قبولی دارد. در واقع، مقادیر بالای HAND بیانگر زون فلات است که در آن نفوذ عمقی به‌منزله پاسخ هیدرولوژیکی غالب مطرح می‌شود و عمق آب زیرزمینی از سطح زمین فاصله زیادی دارد که خود این نکته به پتانسیل آب زیرزمینی پایین اشاره می‌کند (Rahmati et al., 2018). با افزایش میزان بارندگی، پتانسیل آب زیرزمینی کاهش پیدا کرده است. به دلیل میزان بارندگی بالاتر در مناطق مرتفع و صخره‌ای، در این مناطق امکان تشکیل آبخوان وجود ندارد و به همین علت، پتانسیل آب زیرزمینی کاهش می‌یابد. شایان توجه است که بارندگی مناطق بالادست، از طریق نفوذ عمقی و آبراهه‌ها، به مناطق پایین دست انتقال پیدا می‌کند و بنابراین، در پایین دست، پتانسیل آب زیرزمینی افزایش یافته است. عرب‌عامری و همکاران (۱۳۹۷) نیز به نتایجی مشابه رسیده‌اند. نتایج نشان داد که با افزایش شاخص قدرت جریان، ابتدا پتانسیل آب زیرزمینی کاهش (تا مقدار صفر) و سپس افزایش داشته است. افزایش شاخص SPI باعث افزایش گل‌آلودگی و در نتیجه، کاهش نفوذ می‌شود که این شرایط در پتانسیل آب زیرزمینی تأثیرگذار است (Golkarian & Rahmati, 2018).

همکاران (۱۳۹۷) مطابقت دارد. بین فاصله از آبراهه و پتانسیل آب، رابطه معکوس برقرار بوده و با افزایش فاصله از آبراهه، پتانسیل آب زیرزمینی کمتر شده است. نتایج این دو پژوهش مورد اشاره نیز همین واقعیت را تأیید می‌کند. این نکته ارتباط بین آب زیرزمینی و آب سطحی را نشان می‌دهد. نتایج بیانگر روندی کاملاً ثابت در افزایش پتانسیل آب زیرزمینی، با افزایش TPI تا مقدار صفر، و سپس کاهش پتانسیل آب زیرزمینی است. افزایش مقدار TPI نشان‌دهنده مناطق با شیب بالا و مناطق تپه‌مانند است که باعث افزایش رواناب می‌شود؛ از این رو، این نتیجه کاملاً منطقی است و با نتایج پژوهش آرولبالاجی و همکاران (۲۰۱۹) مطابقت دارد. با افزایش شیب، پتانسیل آب زیرزمینی کاهش داشته است. دلیل آن افزایش رواناب در شیب‌های بالاست و این وضعیت با نتایجی که عرب‌عامری و همکاران (۱۳۹۷)، آل‌آبادی و همکاران (۲۰۱۶)، آگاروال و گارگ (۲۰۱۶) و لی و همکاران (۲۰۱۹) به دست آورده‌اند مطابقت دارد. جهت غرب و جنوب‌غرب، در این تحقیق، بیشترین نقش را در پتانسیل آب ایفا کرده که نشان‌دهنده دریافت بارش بیشتر در این جهت است. البته تراکم آبراهه نیز مزید بر علت بوده که بیشترین نمود را در این جهات داشته است. کاربری مراتع متوسط، باغ، مناطق مسکونی و کشاورزی - باغ بیشترین تأثیر را در پتانسیل آب زیرزمینی داشته‌اند که از دلایل آن، می‌توان به استفاده بیش از حد آب در مصارف گوناگون کشاورزی، باغی و مصارف انسانی و بارندگی مناسب در مراتع متوسط اشاره کرد. نتایج این بخش با نتایج ثیلاگواتی^۱ و همکاران (۲۰۱۵) و آل‌آبادی و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد. در بخش لیتولوژی رسوبات تراس دره‌ای و دشت رسوبی ضخیم، کنگلومرا و سنگ آهک بیشترین میزان مشارکت در پتانسیل آب زیرزمینی را داشته‌اند. این نتیجه دور از انتظار نیست زیرا این سنگ‌ها توانایی بالایی در جذب و ذخیره آب دارند (Haghizade et al., 2017; Agarwal & Garg, 2016;)

1. Thilagavathi

سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور با استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره، مجله علوم و مهندسی آب‌خیزداری ایران، جلد دهم، شماره ۳۵، صص. ۲۷-۳۸.

رزدی، ی.، فرخزاده، ب.، یوسفزاده، م.، تیموریان، ت.، ۱۳۹۶، پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از الگوریتم حداکثر آنتروپی و سامانه اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: دشت همدان- بهار)، فصلنامه علمی- پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، دوره هشتم، شماره ۲۹، صص. ۱۱۰-۱۲۳.

رضایی‌مقدم، م.ح.، رحیم‌پور، ت.، نخستین‌روچی، م.، ۱۳۹۵، پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از فرایند تحلیل شبکه‌ای در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: حوضه‌های آبریز منتهی به دشت تبریز)، اکوهیدرولوژی، دوره سوم، شماره ۳، صص. ۳۸۹-۳۷۹.

رضوی، و.، مسگری، م.س.، کاظمی، ک.، ۱۳۹۶، ارزیابی و مقایسه روش‌های نسبت فراوانی، شاخص آماری و آنتروپی برای تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: شهرستان جهرم)، اکوهیدرولوژی، دوره چهارم، شماره ۳، صص. ۷۳۶-۷۲۵.

عرب‌عامری، ع.، سهرابی، م.، رضایی، خ.، یمانی، م.، شیرانی، ک.، ۱۳۹۷، شبیه‌سازی آب‌های زیرزمینی حوضه نجف‌آباد با روش ترکیبی داده‌محور تابع شواهد قطعی - شاخص آنتروپی، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب‌و خاک، دوره بیست‌ونجم، شماره ۲، صص. ۴۸-۲۵.

منحنی ROC رسم‌شده نشان داد دقت مدل در برآورد مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی، هم در مرحله آزمون و هم در مرحله اعتبارسنجی، خیلی خوب بوده است که این نکته، براساس نظر فیلیپس^۱ و همکاران (۲۰۰۶)، به معنی عملکرد عالی مدل است. با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان گفت مدل MaxEnt توانایی بالایی در تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی دارد و با توجه به سرعت و دقت بالای مدل، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات مشابه از آن استفاده شود. محققان دیگر (Rahmati et al., 2016; Elith et al., 2011; Yang et al., 2013; Golkarian and Rahmati, 2018; Kariminejad et al., 2019) نیز توانایی این مدل را تأیید کرده‌اند. ترکیب سیستم اطلاعات جغرافیایی با روش حداکثر آنتروپی به منظور تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی، به ویژه در کشورهای درحال توسعه همچون ایران که دسترسی به اطلاعات داده‌های ژئوفیزیکی با محدودیت زمان و هزینه مواجه‌اند، پیشنهاد می‌شود. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند به سیاست‌گذاران و مدیران در مدیریت منابع آب زیرزمینی حوزه آبخیز دریاچه ارومیه کمک کند.

۵- منابع

اسدی نلیوان، ا.، ۱۳۹۷، ارزیابی و نقشه‌بندی منابع و مصارف آب زیرزمینی در راستای ارائه برنامه مدیریت حوضه رودخانه حبله‌رود، رساله دکتری علوم و مهندسی آب‌خیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

ذبیحی، م.، پورقاسمی، ح.ر.، بهزادفر، م.، ۱۳۹۴، تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های آنتروپی شانون و جنگل تصادفی در دشت بجنورد، اکوهیدرولوژی، دوره دوم، شماره ۲، صص. ۲۳۲-۲۲۱.

رحیمی، م.، سلیمانی، ک.، ۱۳۹۵، ارزیابی پتانسیل منابع آب زیرزمینی دشت دهگلان برپایه

- Agarwal, R. & Garg, P.K., 2016, **Remote Sensing and GIS Based Groundwater Potential & Recharge Zones Mapping Using Multi Criteria Decision Analysis Making Technique**, Water Resources Management, 30(1), PP. 243-260.
- Al-Abadi, A., Al-Temmeme, A. & Al-Ghanimy, A., 2016, **A GIS-Based Combining of Frequency Ratio and Index of Entropy Approaches for Mapping Groundwater Availability Zones at Badra-Al-Gharbi-Teeb Areas, Iraq**, Water Resources Management, 2(3), PP. 265-283.
- Arulbalaji, P., Padmalal, D. & Sreelash, K., 2019, **GIS and AHP Techniques Based Delineation of Groundwater Potential Zones: A Case Study from Southern Western Ghats, India**, Scientific Reports, 9(1), P. 2082, Access: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-38567-x>.
- Chen, W., Li, H., Hou, E., Wang, S., Wang, G., Panahi, M., Li, T., Peng, T., Guo, C., Niu, C., Xiao, L., Wang, J., Xie, X. & Ahmad, B.B., 2018, **GIS-Based Groundwater Potential Analysis Using Novel Ensemble Weights-of-Evidence with Logistic Regression and Functional Tree Models**, Science of the Total Environment, 634, PP. 853-867.
- Chen, W., Pradhan, B., Li, S., Shahabi, H., Rizaeei, H., Hou, E. & Wang, S., 2019, **Novel Hybrid Integration Approach of Bagging-Based Fishers Linear Discriminate Function for Groundwater Potential Analysis**, Natural Resources Research, 28, PP. 1239-1258, Access: <https://doi.org/10.1007/s11053-019-09465-w>.
- Elith, J., Phillips, S.J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y.E. & Yates, C.J., 2011, **A Statistical Explanation of MaxEnt for Ecologists**, Divers Distribution, 17(1), PP. 43-57.
- Etikala, B., Golla, V., Li, P. & Renati, S., 2019, **Deciphering Groundwater Potential Zones Using MIF Technique and GIS: A Study from Tirupati Area, Chittoor District, Andhra Pradesh, India**, Hydro Research, 1, PP. 1-7.
- Golkarian, A., Naghibi, S.A., Kalantar, B. & Pradhan, B., 2018, **Groundwater Potential Mapping Using C5.0, Random Forest, and Multivariate Adaptive Regression Spline Models in GIS**, Environmental Monitoring and Assessment, 190(3), P. 149.
- Golkarian, A. & Rahmati, O., 2018, **Use of a Maximum Entropy Model to Identify the Key Factors that Influence Groundwater Availability on the Gonabad Plain, Iran**, Environmental Earth Sciences, 77(369), P. 369.
- Haghizade, A., Moghaddam, D. & Pourghasemi, H., 2017, **GIS-Based Bivariate Statistical Techniques for Groundwater Potential Analysis (An Example of Iran)**, Journal of Earth System Science, 126(109), P. 109.
- Kariminejad, N., Hosseinalizadeh, M., Pourghasemi, H.R., Jakiel, A.B., Campetella, G. & Ownegh, M., 2019, **Evaluation of Factors Affecting Gully Headcut Location Using Summary Statistics and the Maximum Entropy Model: Golestan Province, NE Iran**, Science of the Total Environment, 677, PP. 281-298.
- Kordestani, M.D., Naghibi, S.A., Hashemi, H., Ahmadi, K., Kalantar, B. & Pradhan, B., 2019, **Groundwater Potential Mapping Using a Novel Data-Mining Ensemble Model**, Hydrogeology, 27, PP. 211-224.
- Kornejady, A., Ownegh, M. & Bahremand, A., 2017, **Landslide Susceptibility Assessment Using Maximum Entropy Model with Two Different Data Sampling Methods**, Catena, 152, PP. 144-162.
- Lee, S., Hyun, Y. & Lee, M., 2019, **Groundwater Potential Mapping Using Data Mining Models of Big Data Analysis in Goyang-si, South Korea**, Sustainability, 11(6), P. 1678.
- Lee, S., Song, K.Y., Kim, Y. & Park, I., 2012, **Regional Groundwater Productivity Potential Mapping Using a Geographic Information System (GIS) Based**

- Artificial Neural Network Model**, Hydrogeology Journal, 20, PP. 1511-1527.
- Machireddy, S.R., 2019, **Delineation of Groundwater Potential Zones in South East Part of Anantapur District Using Remote Sensing and GIS Applications**, Sustainable Water Resources Management, 5, PP. 1695-1709, Access: <https://doi.org/10.1007/s40899-019-00324-3>.
- Mahalanobis, P.C., 1936, **On the Generalized Distance in Statistics**, Proceedings of the National Institute of Sciences (Calcutta), 2, PP. 49-55.
- Miraki, S.H., Zanganeh, S., Chapi, K., Singh, V.P., Shirzadi, A., Shahabi, H. & Pham, B.T., 2019, **Mapping Groundwater Potential Using a Novel Hybrid Intelligence Approach**, Water Resources Management, 33(1), PP. 281-302.
- Mogaji, K.A. & Lim, H.S., 2018, **Application of Dempster-Shafer Theory of Evidence Model to Geoelectric and Hydraulic Parameters for Groundwater Potential Zonation**, Journal of Astronomy and Geophysics, 7(1), PP. 134-148.
- Muniraj, K., Jesudhas, C.J. & Chinnasamy, A., 2019, **Delineating the Groundwater Potential Zone in Tirunelveli Taluk, South Tamil Nadu, India, Using Remote Sensing, Geographical Information System (GIS) and Analytic Hierarchy Process (AHP) Techniques**, Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences, Access: <https://doi.org/10.1007/s40010-019-00608-5>.
- Naghibi, S.A., Moghaddam, D., Kalantari, B., Pradhan, B. & Kisi, O., 2017, **A Comparative Assessment of GIS-Based Data Mining Models and a Novel Ensemble Model in Groundwater Well Potential Mapping**, Journal of Hydrology, 548, PP. 471-483.
- Naghibi, S.A. & Pourghasemi, H.R., 2015, **A Comparative Assessment between Three Machine Learning Models and their Performance Comparison by Bivariate and Multivariate Statistical Methods for Groundwater Potential Mapping in Iran**, Water Resources Management, 29(14), PP. 5217-5236.
- Nampak, H., Pradhan, B. & Manap, M.A., 2014, **Application of GIS Based Data Driven Evidential Belief Function Model to Predict Groundwater Potential Zonation**, Journal of Hydrology, 513, PP. 283-300.
- Phillips, S.J., Anderson, R.P. & Schapire, R.E., 2006, **Maximum Entropy Modeling of Species Geographic Distributions**, Ecological Modeling, 190(3-4), PP. 231-259.
- Rahmati, O., Kornejady, A., Samadi, M., Nobre, A.D. & Melesse, A.M., 2018, **Development of an Automated GIS Tool for Reproducing the HAND Terrain Model**, Environmental Modelling & Software, 102, PP. 1-12.
- Rahmati, O., Naghibi, S.A., Shahabi, H., Bui, D.T., Pradhan, B., Azareh, A. et al., 2018, **Groundwater Spring Potential Modeling: Comprising the Capability and Robustness of Three Different Modeling Approaches**, Journal of Hydrology, 565, PP. 248-261.
- Rahmati, O., Pourghasemi, H.R. & Melesse, A.M., 2016, **Application of GIS-Based Data Driven Random Forest and Maximum Entropy Models for Groundwater Potential Mapping: A Case Study at Mehran Region, Iran**, Catena, 137, PP. 360-372.
- Rajan, S.S., Shenbagam, R. & Anitha, M., 2019, **Investigation of Groundwater Potential Zones Using RS & GIS in Western part of Krishnagiri District**, Journal of IJRREM, 3(3), PP. 22-46.
- Razandi, Y., Pourghasemi, H.R., Samani Neisani, N. & Rahmati, O., 2015, **Application of Analytical Hierarchy Process, Frequency Ratio, and Certainty Factor Models for Groundwater Potential Mapping Using GIS**, Earth Science Informatics, 8(4), PP. 867-883.
- Speckhann, G.A., Borges Chaffe, P.L., Fabris Goerl, R., Abreu, J.J.D. & Altamirano Flores, J.A., 2018, **Flood Hazard Mapping in Southern Brazil: A Combination of**

- Flow Frequency Analysis and the HAND Model**, Hydrology Sciences Journal, 63(1), PP. 87-100 Access: <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1409896>.
- Thilagavathi, N., Subramani, T., Suresh, M. & Karunanidhi, D., 2015, **Mapping of Groundwater Potential Zones in Salem Chalk Hills, Tamil Nadu, India, Using Remote Sensing and GIS Techniques**, Environment Monitoring Assessment, 187(164), PP. 1-17.
- Yang, X.Q., Kushwaha, S.P., Saran, S., Xu, J. & Roy, P.S., 2013, **Maxent Modeling for Predicting the Potential Distribution of Medicinal Plant, Justicia Adhatoda L. in Lesser Himalayan Foothills**, Ecological Engineering, 51, PP. 83-87.
- Yeh, H.F., Cheng, Y.S., Lin, H. & Lee, C., 2016, **Mapping Groundwater Recharge Potential Zone Using a GIS Approach in Hualian River, Taiwan**, Sustainable Environment Research, 26(1), PP. 33-43.
- Yin, H., Shi, Y., Niu, H., Xie, D., Wei, J., Leftriciariu, L. & Xu, S., 2018, **A GIS-Based Model of Potential Groundwater Yield Zonation for a Sandstone Aquifer in the Juye Coalfield, Shangdong, China**, Journal of Hydrology, 557, PP. 434-447.
- Zabihi, M., Pourghasemi, H.R., Sadat Pourtaghi, Z. & Behzadfar, M., 2016, **GIS-Based Multivariate Adaptive Regression Spline and Random Forest Models for Groundwater Potential Mapping in Iran**, Environment Earth Science, 75(8), P. 665.