

Locating areas with infiltration potential by using the mixture discriminant analysis model

Maryam Sadat Jaafarzadeh^{*1}  | Ali Haghizadeh²  | Iraj Vayskarami³ 

1. Department of Reclamation of Arid and Mountainous Regions, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

2. Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Lorestan, Iran

3. Research and Education Center for Agriculture and Natural Resources of Lorestan Province, Lorestan, Iran

E-mail: m.s.Jaafarzadeh@ut.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 02 May. 2023

Received: 18 Jun. 2023

Accepted: 30 Jul. 2023

Published online: 21 Nov. 2023

Keywords:

Classification,
Groundwater Recharge,
Infiltration,
Marboreh Watershed,
Mixture Discriminant Analysis.

Abstract

Agriculture not only represents the largest user of groundwater resources worldwide but also exhibits a high dependency on these sources for its economy. Classification methods, which offer more effective parameters and subsequently more accurate results, have been considered in various fields, including sustainable agriculture. Discriminant analysis models, compared to modern methods, are more complex, accurate, and efficient. In the current study, the infiltration potential areas in Khomein, Shazand, Azna, Aligudarz, and Durood areas (Marboreh watershed) were investigated using the mixture discriminant analysis (MDA) model. For this purpose, infiltration samples obtained through the double-ring test, along with environment-affecting layers for infiltration, were prepared and introduced into R_studio, which was employed for running MDA. Validation indices (ROC curve, CCI, TSS, Recall, and Precision indices) were used to assess the results. According to the findings, highly potential infiltration areas accounted for 6.2%, 6.1%, 12.7%, 13.3%, and 15.9% of Shazand, Khomein, Durood, Azna, and Aligodarz, respectively. Additionally, extremely potential infiltration areas comprised 1.1%, 16.5%, 14.3%, 19.6%, and 10.8% of those respective areas. Most of these regions have sandy soil texture and Quaternary formations, and are utilized for agriculture and range land purposes. The accuracy indices obtained, which were 0.89%, 76.66, 0.53%, 0.91%, and 0.73%, confirm the acceptance and excellence of the model's performance. The results of this study can serve as useful inputs for decision-making by managers and planners concerning groundwater recharge in alignment with urban and agricultural needs.

Cite this article: Jaafarzadeh, M.S., Haghizadeh, A., Vayskarami, I. (2023). Locating areas with infiltration potential by using the mixture discriminant analysis model. *Journal of Range & Watershed Management*, 76 (3), 287-304.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jrwm.2023.358556.1706>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

مکان‌یابی مناطق دارای قابلیت نفوذپذیری با استفاده از مدل تجزیه و تحلیل تشخیصی آمیخته

مریم سادات جعفرزاده^{۱*} | علی حقی‌زاده^۲ | ایرج ویس‌کرمی^۳

۱. گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
 ۲. گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران
 ۳. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، لرستان، ایران
 رایانامه: m.s.Jaafarzadeh@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۸/۳۰

کلیدواژه‌ها:

تحلیل تشخیصی آمیخته،
 طبقه‌بندی،
 تغذیه زیرزمینی،
 نفوذپذیری،
 ماربره.

کشاورزی، متداول‌ترین مصرف‌کننده منابع آب زیرزمینی در دنیا بوده و اقتصاد زراعی شدیداً وابسته به آب زیرزمینی می‌باشد. استفاده از روش‌های طبقه‌بندی در زمینه‌های علمی بسیاری، از جمله کشاورزی پایدار، به دلیل دخالت پارامترهای موثر بیشتر و متعاقباً نتایج دقیق‌تر، مورد توجه قرار گرفته است. مدل‌های تحلیل تشخیصی نسبت به روش‌های مدرن پیچیده‌تر، دقیق‌تر بوده و کارایی بهتری دارند. در پژوهش حاضر، پتانسیل‌یابی مناطق مستعد نفوذ آب به داخل خاک در بخش‌هایی از شهرهای خمین، شازند، ازنا، الیگودرز و دورود (منطقه مطالعاتی ماربره)، با استفاده از روش تحلیل تشخیصی آمیخته (Mixture Discriminant Analysis; MDA) مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور، نمونه‌های نفوذ برداشت شده با استفاده از روش استوانه مضاعف، همراه با لایه‌های محیطی موثر بر فرایند نفوذپذیری، تهیه و به مدل معرفی شدند. MDA در محیط RStudio اجرا شد. به منظور صحت‌سنجی نتایج نیز از شاخص‌های صحت‌سنجی (منحنی ROC، شاخص‌های Precision و Recall، TSS، CCI) استفاده گردید. بر اساس نتایج، بخش‌هایی از شازند، خمین، دورود، ازنا و الیگودرز به ترتیب ۶/۲، ۶/۱، ۱۲/۷، ۱۳/۳ و ۱۵/۹٪ دارای پتانسیل نفوذپذیری زیاد و ۵/۱، ۱۶/۲، ۱۴/۳، ۱۹/۶ و ۱۰/۸٪ دارای پتانسیل نفوذپذیری بسیار زیاد برآورد شدند. عمده این مناطق دارای بافت سنی و از نوع سازندهای کواترنری با کاربری کشاورزی و مرتع می‌باشند. ارزیابی صحت نتایج نیز با استفاده از شاخص‌های صحت‌سنجی که به ترتیب ۷۶/۶۶، ۰/۵۳، ۰/۹۱ و ۰/۷۳٪ بدست آمدند، نشان‌دهنده کارایی قابل قبول، خوب و عالی مدل می‌باشد. استفاده از نتایج این بررسی، می‌تواند در اتخاذ تصمیمات توسط مدیران و برنامه‌ریزان در رابطه با تغذیه آب‌های زیرزمینی متناسب با نیازهای شهری و کشاورزی، مفید باشد.

استناد: جعفرزاده، مریم سادات؛ حقی‌زاده، علی؛ ویس‌کرمی، ایرج (۱۴۰۲). مکان‌یابی مناطق دارای قابلیت نفوذپذیری با استفاده از مدل تجزیه و تحلیل تشخیصی مخلوط. نشریه مرتع و آبخیزداری، ۷۶(۳)، ۲۸۷-۳۰۴.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jrwm.2023.358556.1706>



© نویسندگان.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

۱. مقدمه

دخالت انسان با ایجاد تغییر در کاربری و پوشش اراضی و متعاقباً هیدرولوژی مرتبط با آنها، سطح کره زمین را به طرز چشم‌گیری تغییر داده است. طی ۱۰۰ سال اخیر جمعیت جهان از ۱.۷ میلیارد (در سال ۱۹۰۰) به بیش از ۷.۳ میلیارد (در سال ۲۰۱۴) رسیده است که ضمن این افزایش چهار برابری، انتظار می‌رود این رشد در آینده نیز به طور قابل توجهی ادامه یابد (Gerland et al, 2014). رشد جمعیت، با افزایش سطح زیرکشت و تولید محصولات کشاورزی آبی، افزایش میزان بهره‌برداری از آب‌های سطحی و زیرزمینی و در نتیجه تقلیل و نابودی آبخوان‌های اصلی جهان (تقلیل و نابودی ۲۱ آبخوان از ۳۷ آبخوان اصلی دنیا) همراه است (Richey et al, 2015). برداشت ناپایدار آب‌های زیرزمینی برای آبیاری و تولید مواد غذایی همچنان به عنوان یک چالش جهانی در زمینه منابع آب در بسیاری از سیستم‌های آبخوان آبرفتی مطرح است (Foster & Chilton, 2003). اراضی نیمه خشک کشور مانند دشت‌های ورامین، پریشان، کاشان، قزوین، داراب و ... نمونه بارز این امر هستند که دارای سطح زیر کشت بالا و جمعیت قابل توجهی می‌باشند. این مناطق از مناطق اصلی کشت گندم، ذرت، پنبه و ... بوده و از جمله مناطقی با تولید بسیار بالای محصولات زراعی و غذایی محسوب می‌شوند (زهتابیان و همکاران، ۲۰۰۴؛ فلاح و همکاران، ۲۰۱۲؛ خواجه و همکاران، ۲۰۱۲؛ صمدی و صمدی، ۲۰۱۷؛ میرهاشمی و همکاران، ۲۰۱۸). در برخی مناطق، رشد پایدار در بخش کشاورزی، از طریق آبیاری با منابع آب زیرزمینی کم عمق و همچنین شبکه کانال گسترده‌ای که توزیع آب از حوزه آبخیز کوه‌های بالادست به دشت‌ها را میسر می‌کند، امکان‌پذیر است (Fishman et al, 2011). سطح آب‌های زیرزمینی حداقل به مدت دو دهه گذشته در بخش‌هایی از این مناطق در حال افت بوده است که به دلیل برداشت بیش از حد آب‌های زیرزمینی، به صورت محلی با استفاده از مشاهده مستقیم سطح آب‌های زیرزمینی آشکار گردیده است. از جمله افت ۲۷/۲۳ متری سطح آب زیرزمینی در دشت داراب (فلاح و همکاران، ۲۰۱۲)، افت ۶/۲۵ متری سطح آب زیرزمینی دشت پریشان استان فارس (خواجه و همکاران، ۲۰۱۲)، افت ۵/۵ متری سطح آب زیرزمینی دشت کاشان (صمدی و صمدی، ۲۰۱۷)، افت ۴ - ۲۶۳ میلی‌متری پتانسیل تغذیه آبخوان شهری ارومیه و تغییر ۱ - ۳۴ متری عمق آب زیرزمینی این منطقه (آقازاده و همکاران، ۲۰۱۹) را می‌توان نام برد.

پهنه‌بندی آب‌های زیرزمینی نقش مهمی در تصمیم‌گیری و مدیریت استفاده پایدار از منابع آب زیرزمینی دارد (Khan et al, 2015; Raghavendra & Deka, 2015). تغذیه آب‌های زیرزمینی از مهمترین عوامل محدود کننده برای برداشت آب‌های زیرزمینی بوده و پتانسیل توسعه آب‌های زیرزمینی یک منطقه را تعیین می‌کند (Döll & Flörke, 2005). این فرایند به مؤلفه‌های جوی، سطحی و زیرسطحی بیلان آب مرتبط بوده و دو فاکتور اقلیمی و انسانی (غیر طبیعی) در آن موثر می‌باشند (Jyrkama & Sykes, 2007; Gurdak et al, 2008; Herrera-Pantoja & Hiscock, 2008, Holman et al, 2009). از نظر شرایط اقلیمی، بخش عمده ایران دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک می‌باشد. در بسیاری از مناطق کشور، برداشت مازاد از سفره‌های زیرزمینی در مقایسه با تغذیه طبیعی باعث افت سطح منابع آب زیرزمینی شده است. علاوه بر توزیع نامتعادل بارندگی (از لحاظ زمانی و مکانی)، بارش‌های با شدت نسبتاً زیاد، از دیگر مشخصات مهم این مناطق است که منجر به سیلاب‌های بزرگ و مخرب می‌شود. با توجه به تلفات جانی و خسارات مالی در چنین شرایطی، مدیریت و بهره‌برداری از سیل و ایجاد شرایط نفوذپذیری آن جهت تغذیه منابع زیرزمینی، می‌تواند در کاهش اثرات مخرب و همچنین حل مشکلات کمبود آب بسیار حائز اهمیت باشد (صمدی و صمدی، ۲۰۱۷؛ آقازاده و همکاران، ۲۰۱۹).

ویژگی‌های هیدرولوژیک سطحی و زیرسطحی نظیر سنگ‌شناسی، سازندهای زمین‌شناسی، تراکم زهکشی، جریان آب زیرزمینی و شرایط مرزی سیستم آبخوان، نقش مهمی در تغذیه^۱ آب‌های زیرزمینی ایفا می‌کنند. اما از آنجا که بسیاری از پارامترهای کنترل‌کننده باید بطور مستقل مشتق و یکپارچه شوند که مستلزم هزینه‌های اضافی، زمان و نیروی انسانی می‌باشد، لذا شناسایی مناطق مناسب تغذیه از طریق مطالعه پارامترهای یک حوزه هیدروژئولوژیک با روش‌های متداول، کار ساده‌ای نیست (Chenini et al, 2010). تغذیه واقعی آبخوان کمتر از پتانسیل تغذیه بوده زیرا هدررفت و جریان‌ات جانبی در منطقه غیر اشباع باعث کاهش تغذیه واقعی آبخوان می‌شوند. شرایط

¹ Replenishment

رطوبتی خاک، تخلخل، توانایی ذخیره خاک، نفوذپذیری مؤثر خاک، ناهمسانی (اختلاف) نفوذپذیری، درصد رس خاک و شیب از عوامل مؤثر در جریانات جانبی منطقه غیر اشباع می‌باشند (Thomas & Tellam, 2009). در مطالعات مختلف از روش‌های مختلفی برای برآورد پتانسیل تغذیه آب‌های زیرزمینی استفاده شده است، مانند روش‌های ردیابی، انواع مدل‌ها مانند مدل عامل تاثیر چندگانه^۱ (Fagbohun, 2018)، مدل تابع اطمینان شهودی^۲ (Mogaji et al, 2016)، مدل تصمیم‌گیری چند معیاره^۳ (Agarwal & Garg, 2016) و... که تمام روش‌ها را می‌توان به پنج طبقه تقسیم بندی کرد (Sekertekin et al, 2017): پهنه‌بندی مستقیم با استفاده از لندفرم، تجزیه و تحلیل پهنه‌بندی‌های موجود (قبلی) تغذیه آب‌های زیرزمینی، مدل‌های مفهومی مبتنی بر فرآیند، روش‌های اکتشافی و روش‌های آماری. روش اول با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی مناطق دارای پتانسیل تغذیه آب‌های زیرزمینی را پهنه‌بندی می‌کند. روش دوم، نقشه‌های تراکم تغذیه آب‌های زیرزمینی را شامل می‌شود. روش سوم مکانیزم‌های مرتبط با تحلیل پایداری را مورد مطالعه قرار می‌دهد (Malet, 2007). روش اکتشافی نیز یک تحلیل کیفی است که بر مبنای دانش کارشناسی و تجارب حاصل از مطالعات قبلی انجام می‌شود (Malet, 2007; Chen et al, 2020b).

روش‌های طبقه‌بندی در بسیاری از مطالعات علمی مورد استفاده قرار گرفته و همچنین در زمینه‌های بسیاری کاربرد دارند (Naghbi et al, 2015). هدف اصلی روش‌های طبقه‌بندی، مرتب کردن صحیح شیء یا عامل^۴ مورد نظر به دو یا چند گروه منحصر به فرد است. طبقه‌بندی شامل دو زیر گروه تحت نظارت و بدون نظارت می‌باشد (Hastie & Tibshirani, 1996; Hastie et al, 2001; Naghibi et al, 2015). در این میان طبقه‌بندی نظارت شده به عنوان تحلیل تشخیصی^۵ شناخته شده است (یا همان تحلیل تشخیصی پیش‌بینی^۶ - (Huberty, 1984)). قبلاً از رگرسیون لجستیک برای مشکلات طبقه‌بندی دو طبقه (یعنی وقتی که برای متغیر هدف، دو مقدار ممکن بدست می‌آید، مانند ۱/۰، نه / بله، منفی / مثبت) استفاده می‌شد. این در حالی است که برای پیش‌بینی طبقه‌ای از مشاهدات در شرایطی که متغیر هدف، شامل بیش از دو کلاس باشد، تحلیل تشخیصی در مقایسه با رگرسیون لجستیک، بهتر عمل می‌کند. به عبارت دیگر، طبقه‌بندی تشخیصی برای مشکلات طبقه‌بندی چند کلاسه، پایدارتر از رگرسیون لجستیک می‌باشد که از مزایای مدل‌های تشخیصی محسوب می‌شود (Malet, 2007; STHDA^۷, 2018). تحلیل تشخیصی آمیخته (MDA) یک تکنیک داده‌کاوی است با این فرض که متغیرها در هر کلاس به طور معمول توزیع می‌شوند و تخمین چگالی برای هر کلاس از ترکیب توزیع‌های عادی حاصل می‌گردد (Li, & Wang, 2013). این مدل عمدتاً برای مدل‌سازی توزیع گونه‌ها (خواجه و همکاران، ۲۰۱۴)، طبقه‌بندی فرسایش خاک، زمین‌لغزش (Hoang & Bui, 2018)، پوشش زمین (Ju et al, 2003)، پهنه‌بندی آسیب‌پذیری به سیلاب (Chen et al, 2020a; Zhao et al, 2019)، پهنه‌بندی مناطق با پتانسیل منابع آب زیرزمینی (Kalantar et al, 2019; Chen et al, 2018) و... مورد استفاده قرار گرفته است و از دقت مکانی بالاتری برخوردار است. در مقایسه با روش‌های طبقه‌بندی کننده، مطالعات کمتری با استفاده از MDA انجام شده است که از جمله آنها مطالعات لیم (۲۰۰۰)^۸، ژو (۲۰۰۳)^۹، اشמיד (۲۰۰۹)^{۱۰} و راش و کلی (۲۰۰۹)^{۱۱} می‌باشند.

بخش عمده حوزه مورد مطالعه در این پژوهش، کوهستانی بوده و بخش کمی از آن دشت می‌باشد که با توجه به عمده کاربری حوزه (۴۹٪/۶) که کشاورزی و مرتع می‌باشد، در مواقع کم آبی، دچار بحران آب می‌شود. از طرفی بخش عمده بارش‌ها در قسمت جنوبی حوزه (ایستگاه کمندان، بطور میانگین ۶۸۰/۸ میلی‌متر) و سپس بخش شمالی آن (ارتفاعات مشرف به دشت ازنا و الیگودرز، بطور میانگین

¹ Multi Influence Factor

² Evidential Belief Function

³ Multi-Criteria Decision Making

⁴ Object

⁵ Discriminant Analysis

⁶ Predictive Discriminant Analysis; PDA

⁷ <http://www.sthda.com/english/articles/36-classification-methods-essentials/146-discriminant-analysis-essentials-in-r/> 11/03/2018

⁸ Lim

⁹ Ju

¹⁰ Schmid

¹¹ Rausch & Kelley

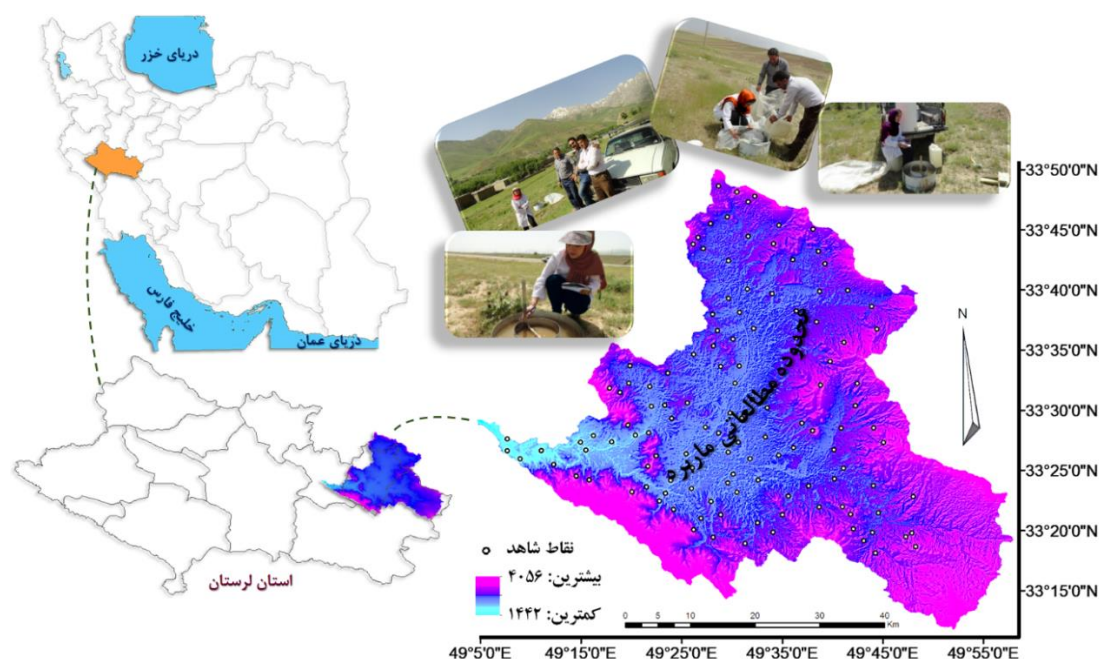
۴۷۱/۳ میلی‌متر) و کمترین میزان بارش در قسمت شرقی حوزه (دشت چمن سلطان، بطور میانگین ۴۱۲ میلی‌متر) و در ماه‌های اسفند و فروردین رخ می‌دهد. با توجه به بیلان هیدروکلیماتولوژی ارتفاعات و بیلان عمومی حوزه دشت ازنا-الیگودرز (گزارش جامع الیگودرز، ۲۰۱۳) بیش از ۸۰ میلیون مترمکعب از بارش نفوذ یافته در ارتفاعات به صورت زهکشی (دبی پایه) توسط رودخانه‌ها و در نهایت رودخانه اصلی حوزه (رود ماربره)، از محدوده خارج می‌شود. برای انجام مطالعات مربوط به آب‌های زیرزمینی و تغذیه و نفوذ، عمدتاً از آمار و اندازه‌گیری‌های حاصل از چاه‌های پیژومتری استفاده می‌شود. اما پراکنش نامناسب این چاه‌ها که ناشی از هزینه زیادشان می‌باشد دلیل عمده محدودیت در تعداد حفر آنها می‌باشد. بنابراین آمار و در نتیجه برآورد دقیقی نمی‌توان از منابع آب زیرزمینی بدست آورد. به این منظور بحث نفوذپذیری و تغذیه منابع آب زیرزمینی در این منطقه بسیار حائز اهمیت می‌باشد و مطالعاتی نیز در این راستا با روش‌های مختلف انجام شده است (Jaafarzadeh et al, 2021 & 2022). این پژوهش با هدف بررسی منطقه از نظر تاثیر برخی فاکتورهای محیطی بر تغذیه منابع آب زیرزمینی حوزه مورد مطالعه، با استفاده از مدل MDA (ارزیابی کارایی مدل) انجام شد. اگرچه روش‌های مختلفی در این زمینه وجود دارد اما این مدل به دلیل توانایی آن در مدل‌سازی روابط غیرخطی چند متغیره بین متغیرها، بعنوان یک ابزار قوی، نیاز به بررسی را دارد. بنابراین با توجه به مشکلات کمبود آب در بسیاری از مناطق کشور و اهمیت منابع آب زیرزمینی به ویژه در چنین شرایطی، پهنه‌بندی سطوح مستعد تغذیه آب‌های زیرزمینی در این حوزه آبخیز با توجه به افت آبخوان‌های موجود در آن، می‌تواند مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی را در منطقه مورد بررسی، بهبود بخشد.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی ماربره که از سرشاخه‌های رود سزار است، با مساحت ۲۵۵۹ کیلومتر مربع در شرق استان لرستان و در مختصات جغرافیایی ۴۹°۳۰' - ۴۹°۵۷' طول شرقی و ۳۳°۱۲' - ۳۳°۵۱' عرض شمالی قرار گرفته است. حوزه مطالعاتی با در بر گرفتن محدوده بخشی از استان مرکزی (شهرهای شازند، خمین) و استان لرستان (شهرهای دورود، ازنا و الیگودرز) دارای ارتفاع متوسط ۲۷۵۰ متر از سطح دریا، بارش متوسط سالانه ۵۶۰ میلی‌متر و دمای متوسط سالانه ۱۳/۸ درجه سانتی‌گراد (اداره کل هواشناسی استان لرستان)، دارای اقلیم نیمه خشک و سرد (با استفاده از روش دومارتن) می‌باشد. منطقه مورد بررسی به لحاظ کاربری اراضی، مراتع، اراضی کشاورزی (دیم و آبی)، باغات، اراضی مسکونی، اراضی بایر و اراضی صخره‌ای را شامل می‌شود. بخش کوچکی از منطقه را دو دشت اصلی به نام‌های دشت چمن سلطان و ازنا-الیگودرز و قسمت عمده آن را مناطق ارتفاعی تشکیل می‌دهند. دشت چمن سلطان با وسعت ۱۹۸/۶ کیلومتر مربع در نواحی جنوب شرقی محدوده مطالعاتی قرار دارد. دشت ازنا-الیگودرز نیز با وسعت ۵۷۰/۲ کیلومتر مربع از شمال به سمت جنوب محدوده مطالعاتی گسترش یافته است. موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی و واقع شدن آن در انتهای کمربند کوهستانی زاگرس موجب شده است که توده‌های غربی و شمال‌غربی که تأمین‌کننده بارش این محدوده می‌باشند با عبور از ارتفاعات زاگرس رطوبت خود را تا حدودی از دست داده و سبب کاهش بارش در محدوده مطالعاتی و عدم همبستگی مناسب بارندگی با تغییرات ارتفاعی شود. زمین‌شناسی حوزه عمدتاً شامل سازندهای کامبرین بوده که از آمفیبولیت، گنیس، آهک و دولومیت به شدت دگرگون شده تشکیل شده‌اند و به علت تحمل فشارهای کوهزایی شکسته و شکاف‌دار شده‌اند. بنابراین رسوبات پرمین از جمله رسوبات تریاس-ژوراسیک با رخساره شیستی، شیلی و ماسه‌سنگ‌های دگرگون شده همراه با شیست‌های کمی دگرگون شده بوده که در قسمت‌هایی به دلیل دارا بودن درز و شکاف، به شکل ضعیفی سفره آبرفتی را تغذیه می‌کنند (ملکی‌راد و همکاران، ۲۰۱۸). شکل شماره ۱ موقعیت منطقه مطالعاتی و نقاط نمونه‌برداری شده را با پس‌زمینه پستی و بلندی حوضه برای دید بهتر، نشان می‌دهد.

از کل محدوده مطالعاتی، ۱۸۰/۶۱ کیلومتر مربع در شازند، ۲۰۲/۶۲ کیلومتر مربع در خمین، ۱۲۰۸/۲۶ کیلومتر مربع در ازنا، ۷۲/۸۵ کیلومتر مربع در دورود و ۸۹۵/۳۶ کیلومتر مربع در الیگودرز قرار گرفته است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

۲-۲. روش کار

در مطالعه آب‌های زیرزمینی بسته به نوع هدف مطالعه، مجموعه‌ای از متغیرهای موثر، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مطالعه حاضر، هدف اصلی بررسی میزان پتانسیل نفوذپذیری منطقه به منظور تغذیه آب‌های زیرزمینی، تحت اثر متغیرهای محیطی، شکل زمین و زمین‌شناختی بود که برای انجام این بررسی تعدادی نمونه با استفاده از روش استوانه مضاعف (به عنوان پارامتر وابسته در فرایند آموزش و آزمون مدل) تهیه شد. به دلیل وسعت منطقه، همچنین زمان‌بر و هزینه‌بر بودن فرایند اندازه‌گیری، از مجموعه اطلاعات نمونه‌برداری‌های قبلی کار شده در این منطقه با همین روش که از شرکت آب منطقه‌ای و مرکز تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان تهیه شد، نیز استفاده گردید (گزارش جامع از نا الیگودرز، ۲۰۱۳؛ مطالعات توجیهی حفاظت خاک و آبخیزداری حوزه‌های آبخیز ماربره و بخشی از رودخانه تیره در شمال دورود، ۲۰۰۱). نقاط نمونه‌برداری بعنوان شاهد برای بررسی صحت فرایند مدل‌سازی استفاده شدند. برای اجرای مدل، بر اساس منابع و مطالعات مشابه قبلی، متغیرهای محیطی، شکل زمین و زمین‌شناختی منطقه، تهیه و به مدل وارد شدند که در ادامه توضیح مختصری از هر یک ارائه شده است. همچنین نقشه مربوط به تمام لایه‌های اطلاعاتی بکار رفته نیز در شکل شماره ۲ ارائه گردیده است.

۲-۳. متغیرهای منتخب موثر بر فرایند نفوذ

۲-۳-۱. متغیرهای توپوگرافی

۲-۳-۱-۱. مدل رقومی ارتفاعی (DEM)^۱

در این مطالعه نقشه لایه DEM منطقه با استفاده از تصاویر ماهواره ASTER با قدرت تفکیک سلولی ۳۰×۳۰ متر _ در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.6 تهیه شد.

^۱ Digital Elevation Model

۲-۱-۳-۲. گرادیان و جهت شیب

کاهش شیب، سبب کم شدن سرعت حرکت رواناب‌های سطحی و امکان ایجاد فرصتی برای نفوذ به عمق می‌گردد. لایه جهت شیب نیز برای مشخص کردن سطوحی با احتمال تولید بیشتر آب از جمله موقعیت‌هایی با احتمال ذوب زودتر برف نسبت به سایر مناطق (مانند تمامی مناطق دارای سطوح شیب‌دار رو به جنوب در یک منطقه کوهستانی) خصوصاً در بحث تعیین مناطق مستعد نفوذپذیری، حائز اهمیت می‌باشد. هر دو لایه جهت و گرادیان شیب با استفاده از لایه مدل رقومی ارتفاع و در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.6 تهیه شدند.

۲-۱-۳-۲. انحنا سطح ۱ و انحنا پروفیل^۲

برای تعیین ویژگی‌های ژئومورفومتری اشکال، از اندازه‌گیری مشتق دوم در مدل‌های رقومی ارتفاع (انحناء) استفاده می‌شود. اندازه تغییر جهت در طول یک منحنی میزان توسط انحنا سطح نشان داده می‌شود که توسط تقاطع یک صفحه افقی با سطح تشکیل گردیده و بیان‌گر همگرایی و واگرایی توپوگرافیک می‌باشد (Conforti et al, 2011؛ سلمانی و همکاران، ۲۰۱۶). مقدار تغییر پتانسیل گرادیان شیب منحنی‌های میزان در طی مسیر جریان و تغییرات شدت جریان به وسیله انحنا پروفیل نشان داده می‌شوند. هر دو نوع انحنا، به سه دسته مقعر، محدب و تخت طبقه‌بندی می‌شوند (سلمانی و همکاران، ۲۰۱۶). این عوامل نیز با استفاده از ArcGIS 10.6 محاسبه شدند.

۲-۳-۲. متغیرهای هیدرولوژیک

۲-۳-۲-۱. شاخص رطوبت پستی و بلندی (TWI)^۳

این شاخص پارامتر ساده‌ای از وضعیت رطوبت خاک است (Lucà et al, 2011؛ مهربان و همکاران، ۲۰۱۷)، که برای ارزیابی کمی پستی و بلندی بر فرایندهای هیدرولوژیک اثر آن بر موقعیت و اندازه جریان آب زیرزمینی، رطوبت خاک (Naghibi et al, 2015) و مناطق منبع اشباع تولید رواناب (Beven & Freer, 2001) استفاده می‌شود (سلمانی و همکاران، ۲۰۱۶).

۲-۳-۲-۲. شاخص قدرت جریان (SPI)^۴

این شاخص نشان‌دهنده میزان قدرت فرسایندهای جریان آب است و با شیب و مساحت ویژه حوضه متناسب می‌باشد (Lucà et al, 2011؛ مهربان و همکاران، ۲۰۱۷). شاخص اندازه‌گیری قدرت جریان با فرض متناسب بودن مقدار زهکشی با سطح حوزه آبخیز، یک ویژگی ترکیبی توپوگرافی می‌باشد (Conforti et al, 2011; Regmi et al, 2014).

۲-۳-۲-۳. تراکم زهکشی^۵

هرچه تراکم زهکش‌ها بیشتر باشد، سرعت جریان‌های سطحی افزایش و امکان نفوذ کاهش می‌یابد. این لایه عمدتاً در بخش‌های مرکزی حوزه، تراکم بالایی داشت که محل اتصال آبراهه‌ها به یکدیگر می‌باشند.

۲-۳-۲-۴. فاصله از رودخانه

آبراهه‌ها با ایجاد شیارها و گسستن لایه‌های به هم پیوسته خاک، باعث افزایش نفوذ آب‌های سطحی و ناپایداری دامنه‌ها و تغییر شیب در منطقه می‌شوند. در نتیجه با ایجاد سطوح ضعیف در دامنه‌ها، سازه‌های اطراف را تحت تأثیر قرار می‌دهد (بهباری و همکاران، ۲۰۱۷).

¹ Plan Curvature

² Profile Curvature

³ Topographic Wetness Index

⁴ Stream Power Index

⁵ Drainage Density

۲-۳-۲. متغیرهای زمین‌شناختی

۲-۳-۳-۱. سنگ‌شناسی

لایه سنگ‌شناسی حوزه مورد بررسی با استفاده از نقشه زمین‌شناسی منطقه (۱:۲۵۰۰۰۰) بدست آمد. بر این اساس محدوده مورد مطالعه، دارای ۲۶ لایه سنگ‌شناسی، از جمله سیلتستون، آهک مارن‌دار، شیل، آهک خاکستری، ماسه سنگ و انیدریت بوده و در کل، رسوبات دوره کواترنری (دو کلاس Qft1 و Qft2)، که دارای حساسیت بیشتری نسبت به نفوذپذیری می‌باشند بیشترین محدوده (۳۴/۱٪) را در بر می‌گیرند.

۲-۳-۳-۲. فاصله از گسل

گسل‌ها با ایجاد پهنه‌های خرد شده و همچنین شکل‌گیری مجاری انتقال آب، منجر به تسهیل در نفوذ آب به ترازهای پایین‌تر و افزایش پتانسیل شکل‌گیری حفرات انحلالی زیرزمینی می‌شوند (بهیاری و همکاران، ۲۰۱۷). در پژوهش حاضر، لایه فاصله از گسل با استفاده از نقشه گسل‌های استان لرستان (۱:۱۰۰۰۰۰) در محیط نرم‌افزاری ArcGIS 10.6 تهیه شد.

۲-۳-۳-۴. متغیرهای محیطی

۲-۳-۳-۴-۲. کاربری اراضی^۱ و شاخص نرمال شده تفاضل پوشش گیاهی (NDVI)^۲

پوشش گیاهی با فرصت نفوذ رابطه مستقیم دارد. در فرایند نفوذ و تعیین مناطق دارای پتانسیل تغذیه عمقی، نوع کاربری‌ها و همچنین شاخص پوشش گیاهی نقش حائز اهمیت دارند. در مطالعه حاضر دو لایه NDVI و کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ (۱۷ ژوئن ۲۰۱۸) تهیه شدند. لایه NDVI با استفاده از رابطه ۱ در نرم‌افزار ArcGIS 10.6 تهیه گردید.

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad \text{رابطه (۱)}$$

به منظور تهیه نقشه کاربری اراضی حوضه، بعد از دانلود^۳ تصویر منطقه مورد بررسی، در محیط نرم‌افزاری ENVI 5.3 روش طبقه‌بندی نظارت شده حداکثر احتمال، استفاده شد. حوزه مورد مطالعه دارای ۸ نوع کاربری بوده که کاربری‌های غالب آن، زراعت و مرتع می‌باشند. مشخصات هر یک از کاربری‌های منطقه مورد مطالعه در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. کلاس‌های کاربری اراضی حوضه و درصد مساحت هر کلاس

کلاس کاربری	سطح (%)	کلاس کاربری	سطح (%)
زراعت	۴۹/۶	مرتج	۴۳/۴
زمین بایر	۱/۸	برونزد سنگی	۰/۳
جنگل	۲/۱	منطقه مسکونی	۰/۵
باغ	۲/۳	آب	۰/۰۴

۲-۳-۳-۴-۲. بافت خاک

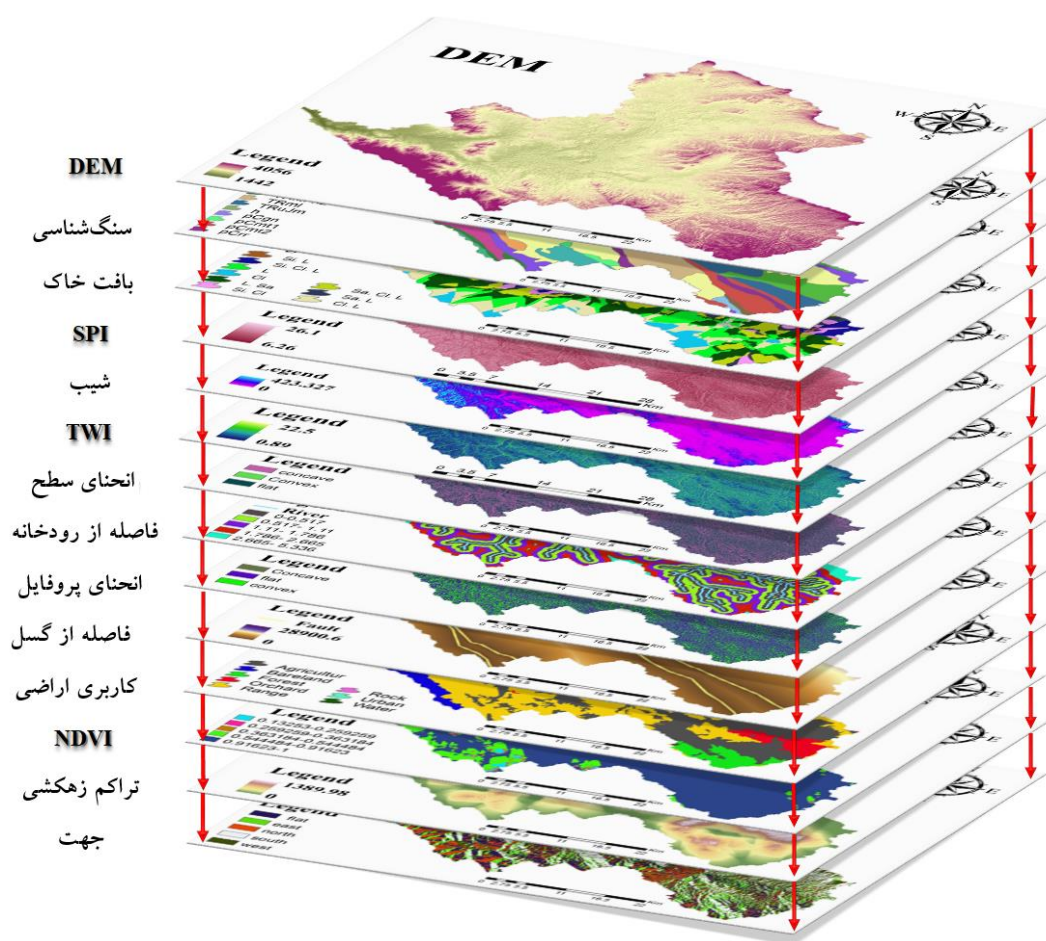
نقشه بافت خاک، از اطلاعات حاصل از مطالعات خاکشناسی منطقه (گزارش جامع از نا الیگودرز، ۲۰۱۳؛ مطالعات توجیهی حفاظت خاک و

^۱ Land Use

^۲ Normalized Difference Vegetation Index

^۳ www.Earthexplorer.usgs.gov

آبخیزداری حوزه‌های آبخیز ماربره و بخشی از رودخانه تیره در شمال دورود، (۲۰۰۱) و نیز نقشه بافت خاک استان لرستان (۲۰۱۱) که از مرکز تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان دریافت شد، استفاده و در نرم‌افزار ArcGIS 10.6 تهیه گردید. با توجه به بافت خاک منطقه، بافت‌های شنی - رسی - لومی (با ۱۳/۹۳٪) و شنی - لومی (با ۱۴/۳۳٪)، نسبت به سایر بافت‌های موجود، بیشترین قابلیت نفوذ را دارند. لایه‌های محیطی و مورفولوژیک موثر در پدیده نفوذ محدود مطالعاتی ماربره (شکل ۲) به مدل معرفی شدند و شبیه‌سازی مکانی پیش‌بینی مناطق دارای پتانسیل نفوذپذیری با استفاده از نرم‌افزار MDA انجام شد.



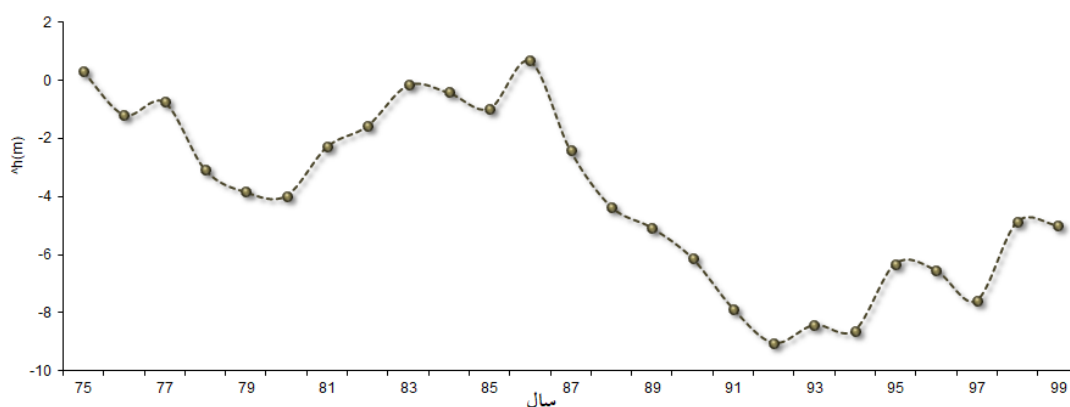
شکل ۲. لایه‌های اطلاعاتی محدوده مطالعاتی

۲-۴. بررسی آبنمود معرف و وضعیت سطح تراز آبخوان‌های موجود در این حوضه

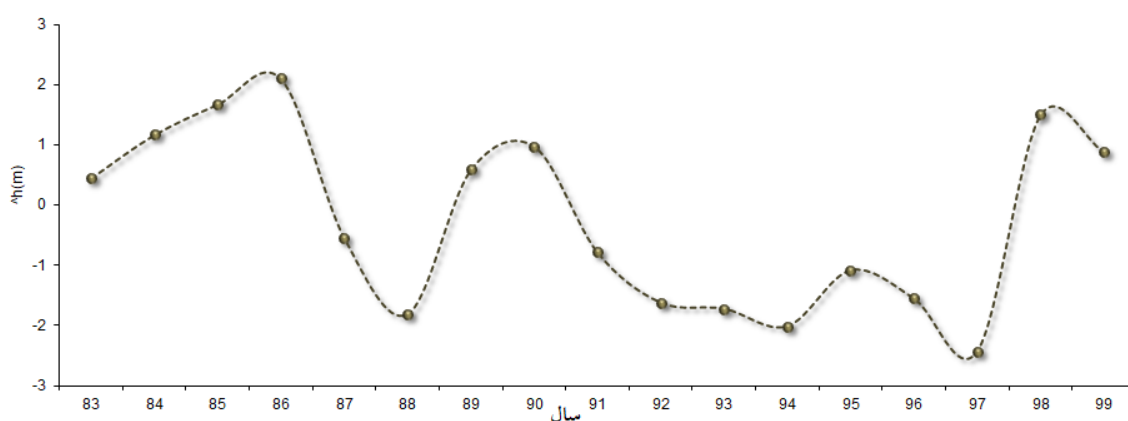
به منظور بررسی وضعیت نوسانات سطح آب زیرزمینی آبخوان‌های حوزه آبخیز ماربره از اطلاعات دریافتی از دفتر داده‌ها و اطلاعات آبی کشور، شرکت مدیریت منابع آب ایران (۲۰۲۰)، استفاده گردید. آبنمود معرف تغییرات سطح آب زیرزمینی که از متوسط مجموع تغییرات سطح آب طولانی‌مدت چاه‌های مشاهده‌ای برای یک آبخوان رسم می‌گردد، معرف تغییرات عمومی سطح آب زیرزمینی آن آبخوان در طول زمان می‌باشد. آبنمود معرف تغییرات سطح آب در سال‌های پر باران که تغذیه آبخوان بیشتر است، حالت بالا روندگی را نشان می‌دهد و در سال‌های خشک که از تغذیه آبخوان توسط بارندگی کاسته می‌شود و معمولاً بهره‌برداری از آب زیرزمینی هم برای جایگزینی

کمبود آب مصرفی سطحی افزایش می‌یابد، حالت پایین رفت یا افت را مشخص می‌نماید. شکل نوسانات سالانه آبنمود نیز برای ماه‌های مرطوب (دارای بارش) حالت بالا روندگی را نشان می‌دهد، در طولانی مدت، صرف نظر از سال‌های خشک و مرطوب، چنانچه هیدروگراف معرف تغییرات سطح آب زیرزمینی یک آبخوان در یک ماه معین برای اولین سال و آخرین سال آماری یکسان باشد و یا تغییرات جزئی داشته باشد آبنمود حالت متعادل بودن سطح آب زیرزمینی را نشان می‌دهد و اگر در طول زمان کاهش تدریجی داشته باشد آبنمود حالت افت سطح آب در آبخوان را مشخص می‌نماید.

برای آبخوان محدوده‌های مطالعاتی ازنا-الیگودرز و اشترینان آبنمود معرف تغییرات سطح آب زیرزمینی، از اطلاعات اندازه‌گیری چاه‌های مشاهده‌ای ۱۸ سال (از مهر ۱۳۸۱ الی شهریور ۱۳۹۹ برای آبخوان ازنا-الیگودرز و ۱۶ سال از مهر ۱۳۸۳ الی شهریور ۱۳۹۹ برای آبخوان اشترینان) استفاده شده است (شکل ۳). هیدروگراف (آبنمود) نشان‌دهنده افت مستمر سطح آب زیرزمینی آبخوان‌های مورد نظر می‌باشد. بر این اساس متوسط افت در طی دوره موجود سال مذکور به ترتیب برابر با ۰/۲ و ۰/۱ متر برای آبخوان‌های الیگودرز و اشترینان می‌باشد.



افت آبخوان ازنا-الیگودرز



افت آبخوان اشترینان

شکل ۳. وضعیت آبخوان‌های حوزه آبخیز ماربره

۲-۵. مدل MDA و اجرای آن

تحلیل تشخیصی می‌تواند به عنوان یک روش طبقه‌بندی استفاده شود. هدف تحلیل تشخیصی آمیخته (MDA) فراهم‌سازی امکان طبقه‌بندی دقیق‌تر مدل‌سازی روابط غیرمتعارف چند متغیره یا روابط غیرخطی بین متغیرهای درون هر گروه و همچنین تعیین زیرکلاس‌های ممکن موجود در هر گروه می‌باشد. تحلیل‌های آمیخته و طبقه‌بندی، منحصر به فرد نیستند، یکی از موارد استفاده غیرمستقیم آنها، تولید نقشه‌های طبقه‌بندی گسسته از هر نوع، با استفاده از اطلاعات سطح زمین می‌باشد (Ju et al, 2003). در این مطالعه، ابتدا لایه‌های محیطی تهیه و با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.6 به فرمت ASCII تبدیل شدند. نقاط اندازه‌گیری نفوذ نیز در قالب شیپ فایل تهیه شد. مدل MDA در محیط RStudio ورژن ۳.۵.۱ اجرا شد. به این منظور قبل از کدنویسی، ابتدا بسته‌های مورد نیاز از کتابخانه R نصب گردید. کدنویسی انجام، تمام لایه‌ها آدرس‌دهی و در نهایت خروجی حاصل از اجرای مدل در محیط RStudio، وارد ArcGIS شد و در این محیط، طبقه‌بندی گردید و محاسبات مربوط به سطح هر کلاس نیز انجام شد. بعد از بدست آوردن نقشه پهنه‌بندی توسط مدل، اقدام به ارزیابی کارایی مدل با استفاده چند شاخص صحت‌سنجی شد.

۲-۵-۱. ارزیابی مدل

برای صحت‌سنجی نقشه حضور و عدم حضور حاصل از مدل (شکل شماره ۳)، چند شاخص عملکرد از جمله: منحنی ROC، شاخص حساسیت (Recall)، شاخص صحت (Precision)، شاخص آمار مهارت درست (TSS)^۱ و شاخص نمونه‌های صحیح طبقه‌بندی شده (CCI)^۲ استفاده گردید. در مدل‌سازی‌های مکانی و پیش‌بینی پدیده‌های طبیعی، منحنی ROC رایج‌ترین روش کمی صحت‌سنجی می‌باشد که بر اساس دو ضریب حساسیت و اختصاصی بودن رسم و سپس بر اساس این ضرایب، سطح زیر منحنی (نشانگر دقت خروجی نهایی پیش‌بینی مناطق مستعد نفوذپذیری) محاسبه می‌شود (Liu et al, 2017; Sekertekin et al, 2017). واحد این شاخص به درصد می‌باشد. شاخص صحت معیاری است که مشخص می‌کند دسته‌بندی یا تفکیک‌کننده، به چه اندازه در تشخیص نقاطی که به درستی در جای منفی (فاقد پتانسیل نفوذپذیری) قرار گرفته‌اند (FP)^۳ موفق بوده‌است. به عبارت دیگر، هدف این شاخص، دستیابی به نهایت دقت در تشخیص نمونه‌های کلاس مثبت می‌باشد. شاخص فراخوانی یا حساسیت (Recall)، بر عکس شاخص صحت، نشان‌دهنده موفق بودن مدل در تشخیص نقاطی که به اشتباه در جای منفی (دارای پتانسیل نفوذپذیری) قرار گرفته‌اند (FN)^۴، می‌باشد. به بیان ساده‌تر، نسبت مقداری موارد صحیح طبقه‌بندی شده (TPR)^۵ توسط الگوریتم از یک کلاس به تعداد موارد حاضر در کلاس مذکور را نشان می‌دهد. محدوده و روش محاسبه هر یک از شاخص‌ها در جدول شماره ۲ (روابط شماره ۲ تا ۵) و مفهوم اعتبارسنجی هر کدام نیز در جدول ۳ ارائه گردیده است. برای مطالعه بیشتر در مورد شاخص‌های استفاده شده، به منابع معرفی شده مراجعه شود.

۳. یافته‌های پژوهش

در مطالعه حاضر، به منظور پتانسیل‌یابی سطوح مستعد تغذیه آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی ماربره، از روش تحلیل تشخیصی آمیخته استفاده شد. بر این اساس، در ابتدا لایه‌های محیطی موثر بر فرایند نفوذپذیری طبق منابع و مطالعات قبلی تعیین و تهیه شدند. سپس نقاط شاهد با استفاده از برداشت صحرائی و نیز استفاده از مجموعه اطلاعات اندازه‌گیری شده قبلی همراه با لایه‌های محیطی به مدل موردنظر معرفی شدند. مدل تحلیل تشخیصی آمیخته در محیط RStudio کدنویسی و اجرا شد. در نهایت، خروجی مدل، در محیط

¹ True Skill Statistic

² Correctly Classified Instances

³ False Positive

⁴ False Negative

⁵ True Positive Rate

ArcGIS 10.6 فراخوانی و سپس به کلاس‌های نفوذپذیری (قابلیت نفوذپذیری بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد) طبقه‌بندی شد. از آنجا که واژه غیرقابل نفوذ یک واژه نسبی می‌باشد، چرا که کلیه خاک‌ها کم و بیش قابل نفوذ هستند، حتی در خاک‌های عمقی نیز که قابلیت نفوذ آنها خیلی کم است مقداری نفوذ عمقی وجود دارد (Mogaji et al, 2016)، به همین دلیل، طبقه‌ای با عنوان غیر قابل نفوذ تعریف نشد. نقشه طبقه‌بندی شده حاصل از پیش‌بینی مدل مورد نظر بطور جداگانه برای محدوده هر پنج شهر، در شکل شماره ۴ قابل مشاهده می‌باشد.

سطح هر یک از کلاس‌های نفوذپذیری محاسبه گردید (جدول شماره ۴). بر اساس نتایج بدست آمده کلاس با نفوذپذیری بسیار کم، بیشترین سطح (۴۲/۸٪) و کلاس نفوذپذیری متوسط کمترین سطح (۱۱/۹٪) را نشان دادند. کلاس‌های دارای نفوذپذیری متوسط، زیاد و بسیار زیاد، جمعاً ۴۱/۱٪ سطح حوضه را تشکیل می‌دهند. بر اساس جدول ۴، از بخشی از شازند که در این محدوده است، ۶/۲ و ۲۰/۱ درصد به ترتیب دارای پتانسیل نفوذپذیری زیاد و بسیار زیاد است. در محدوده خمین نیز، ۶/۱ و ۱۶/۵ درصد اراضی به ترتیب دارای پتانسیل نفوذپذیری زیاد و بسیار زیاد بودند. این در حالی است که ۱۳/۳ و ۱۹/۶ درصد از مساحت محدوده ازنا، به ترتیب دارای قابلیت نفوذپذیری زیاد و بسیار زیاد برای تغذیه آب‌های زیرزمینی مشاهده شد. در دورود، ۱۲/۷ و ۱۴/۳ درصد اراضی، با پتانسیل بالا و بسیار زیاد نفوذپذیری بدست آمدند و این مقادیر در الیگودرز نیز به ترتیب ۱۵/۹ و ۱۰/۸ درصد شناسایی شد.

جدول ۲. روابط محاسباتی و محدوده هر یک از شاخص‌های تعیین عملکرد (Malet et al, 2007؛ سلمانی و همکاران، ۲۰۱۶)

رابطه	شاخص	فرمول	محدوده
۲	TSS	$TSS = Sensitivity + Specificity - 1$	۱ - ۰
۳	CCI	$CCI = \frac{TN + TP}{100}$	۱۰۰ - ۰
۴	Precision	$Precision = TP / (TP + FP)$	(٪) ۱ - ۰
۵	Recall	$Recall = TP / (TP + FN)$	(٪) ۱ - ۰

TN^۱ (نقاط منفی که در جای درست قرار گرفته‌اند)، TP^۲ (نقاط مثبتی که در جای درست قرار گرفته‌اند)، FP^۳ (نقاط مثبتی که در جای اشتباه قرار گرفته‌اند)، FN (نقاط منفی که در جای اشتباه قرار گرفته‌اند)، n (تعداد داده)

جدول ۳. مفهوم اعتبارسنجی شاخص‌های تعیین عملکرد

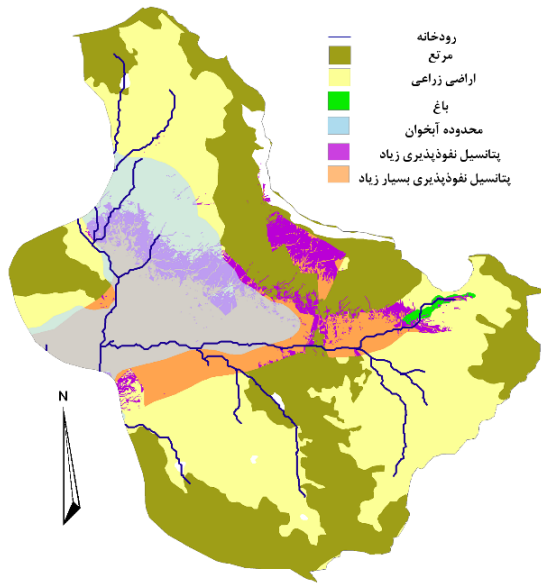
(Malet et al, 2007؛ Liu et al, 2000؛ Thomas & Tellam, 2006؛ Li & Wang, 2013؛ سلمانی و همکاران، ۲۰۱۶)

مفهوم اعتبارسنجی	ROC	CCI	TSS	Recall	Precision
عالی	> ۰/۹	۱ - ۰/۸	۱ - ۰/۸	> ۰/۹	> ۰/۹
خوب	۰/۹ - ۰/۸	۰/۸ - ۰/۶	۰/۸ - ۰/۶	۰/۹ - ۰/۸	۰/۹ - ۰/۸
قابل قبول	۰/۸ - ۰/۶	۰/۶ - ۰/۵	۰/۶ - ۰/۴	۰/۸ - ۰/۶	۰/۸ - ۰/۶
ضعیف	۰/۶ - ۰/۵	۰/۵ - ۰/۳	۰/۴ - ۰/۲	۰/۶ - ۰/۵	۰/۶ - ۰/۵
بسیار ضعیف	< ۰/۵	۰/۳ - ۰	۰/۲ - ۰	< ۰/۵	< ۰/۵

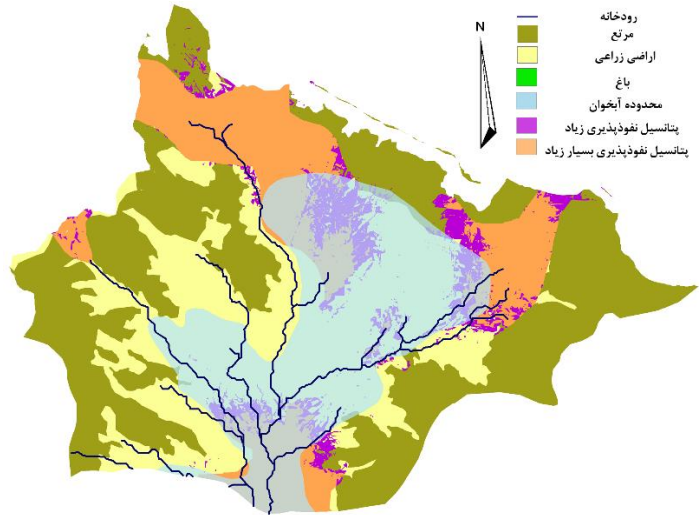
^۱ True Negative

^۲ True Positive

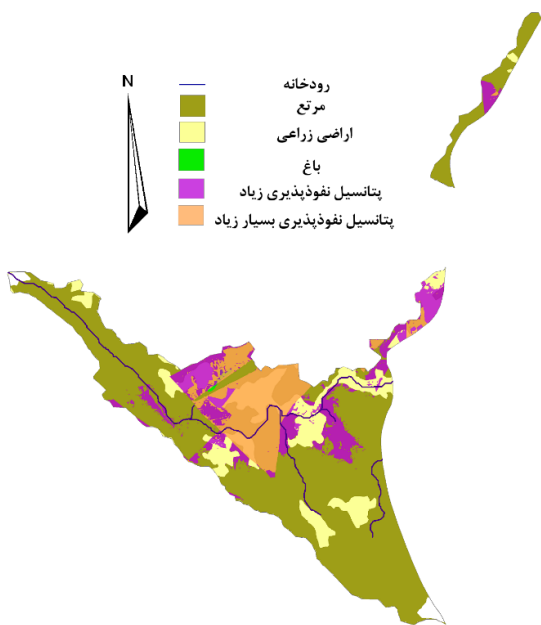
^۳ False Positive



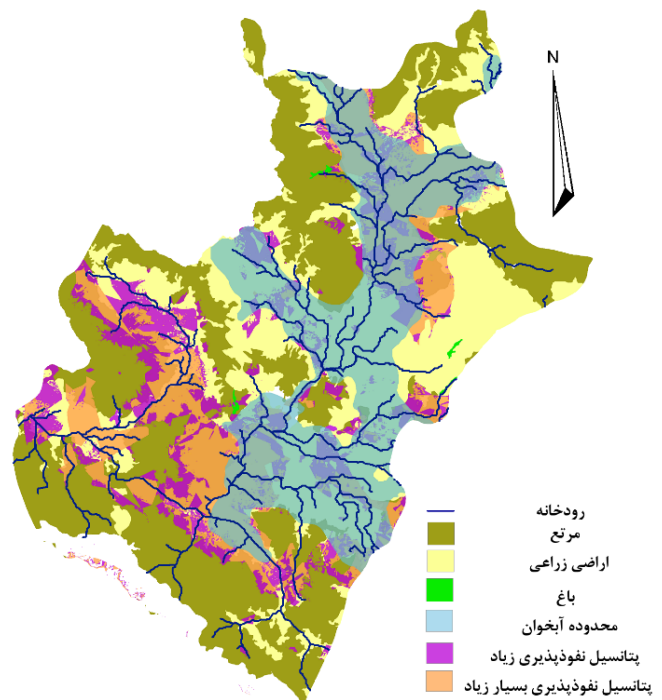
(خمین)



(شازند)

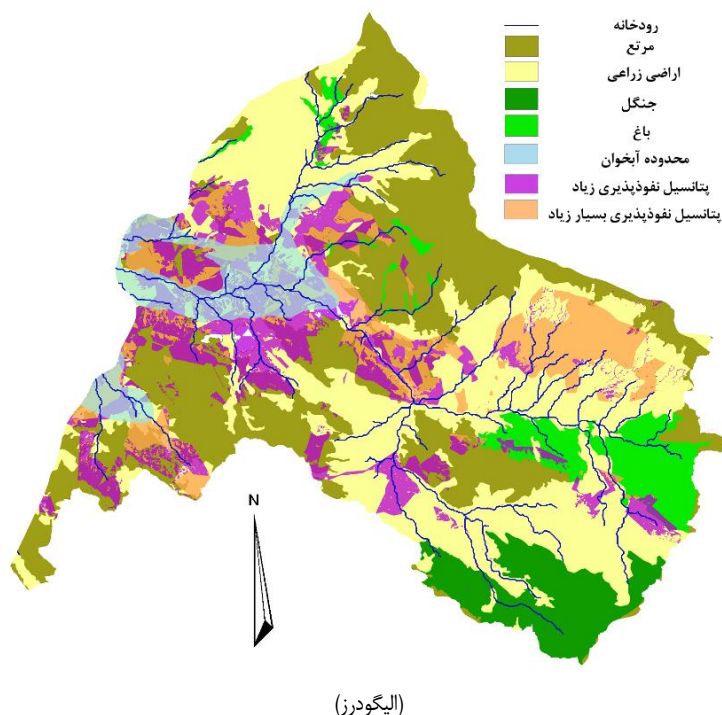


(دورود)



(ازنا)

شکل ۴. نقشه طبقه‌بندی شده پیش‌بینی مناطق مستعد نفوذپذیری بر اساس مدل MDA



ادامه شکل ۴

جدول ۴. مساحت کلاس‌های مناطق دارای قابلیت نفوذپذیری بر اساس مدل MDA

کلاس	شازند سطح	خمین سطح	ازنا سطح	دورود سطح	الیگودرز سطح
	(Km ²)	(Km ²)	(Km ²)	(Km ²)	(Km ²)
نفوذپذیری خیلی کم	۹۸/۶۷	۱۲۹/۳۵	۴۲۷/۶	۲۴/۶	۴۱۰/۹۶
نفوذپذیری کم	۲۰/۸	۱۵/۳۶	۲۲۵/۳۷	۱۲/۴	۱۳۹/۱۷
نفوذپذیری متوسط	۱۳/۶	۱۲/۰۴	۱۵۷/۶	۱۶/۱	۱۰۵/۸۵
نفوذپذیری زیاد	۱۱/۲	۱۲/۳	۱۶۱/۲	۹/۲۷	۱۴۲/۶۷
نفوذپذیری بسیار زیاد	۳۶/۲۸	۳۳/۵	۲۳۶/۴۷	۱۰/۳۹	۹۶/۶۹

کارایی مدل در مقایسه با نقاط شاهد، مورد ارزیابی قرار گرفت. به این منظور از چند شاخص صحت‌سنجی استفاده شد که نتایج این شاخص‌ها در جدول شماره ۵ ارائه شده است. با توجه به این نتایج، پیش‌بینی حاصل از مدل بر اساس منحنی ROC و CCI، در سطح خوب و بر اساس شاخص‌های TSS و Precision قابل قبول ارزیابی شد. این در حالی است که بر اساس شاخص Recall، نتیجه پیش‌بینی مدل، عالی ارزیابی گردید.

جدول ۵. مقادیر شاخص‌های ارزیابی کارایی مدل برای صحت‌سنجی نقشه نهایی

شاخص	AUROC (%)	CCI	TSS	Recall (%)	Precision (%)
مقدار	۰/۸۹	۷۶/۶۶	۰/۵۳	۰/۹۱	۰/۷۳

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، پتانسیل‌یابی مناطق دارای قابلیت نفوذ در محدوده مطالعاتی ماربره که بخش‌هایی از شهرهای الیگودرز، ازنا، شازند، خمین و دورود را در بر می‌گیرد، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. به این منظور و به رغم بررسی مدل‌های مختلف، به دلیل پایداری بودن مدل‌های تشخیصی برای طبقه‌بندی چندکلاسه، در این مطالعه از مدل تحلیل تشخیصی آمیخته استفاده شد تا قابلیت آن در این زمینه، مورد ارزیابی قرار گیرد. بنابراین، لایه‌های اطلاعات محیطی تهیه و همراه با نقاط شاهد (نمونه‌برداری شده)، وارد مدل گردید. برای صحت‌سنجی نتایج بدست آمده از چندین شاخص استفاده شد. ارزیابی این شاخص‌ها از کارایی مدل، در سطح، قابل قبول، خوب و عالی بدست آمد که با نتایج مطالعات Lim و همکاران (۲۰۰۰) و همچنین Kelley و Rausch (۲۰۰۹) مطابقت دارد. با توجه به نتایج، سطح دارای قابلیت نفوذپذیری زیاد (۱۳/۱٪) و خیلی زیاد (۱۶/۱٪)، جمعاً کمتر از یک سوم سطح کل حوزه را در بر می‌گیرد. بخش عمده این مناطق، از نظر بافت خاک، دارای بافت شنی و از نظر نوع سازند، از نوع سازندهای کواترنری هستند. از لحاظ نوع کاربری اراضی نیز، عمدتاً دارای کاربری‌های مرتعی و زراعی می‌باشند. با توجه به نتایج، در برخی قسمت‌های حوزه با کاربری کشاورزی، پتانسیل کم نفوذ مشاهده شد. کم بودن قابلیت نفوذپذیری این بخش‌ها، ممکن است ناشی از پایین بودن نفوذپذیری خاک این قسمت‌ها بر اساس ویژگی‌های سنگ‌شناسی و ژئوتکنیکی باشد. با وجود منابع خاکی مناسب با پتانسیل نفوذپذیری خوب در برخی قسمت‌های حوزه، به دلیل کمبود منابع آبی، حفر چاه‌های عمیق به صورت مجاز یا غیر مجاز و برداشت بیش از حد مطلوب از آب‌های زیرزمینی سبب افت سطح آب زیرزمینی می‌گردد و اگر روند برداشت آب‌های زیرزمینی در دشت‌ها به همین منوال ادامه یابد و تدابیری برای تغذیه آنها اندیشیده نشود، احتمالاً در آینده نزدیک تخریب منابع آب زیرزمینی بصورت شوری‌زایی و متعاقباً تخریب خاک و کاهش عملکرد آن در حوزه اتفاق خواهد افتاد. بنابراین با توجه به سطح نه چندان زیاد این حوضه از حیث دارا بودن قابلیت نفوذپذیری جهت تغذیه آبخوان، نیاز به راهکارهای دقیق مدیریتی می‌باشد، چرا که اجرای پروژه‌های نفوذ آب و تغذیه منابع آب‌های زیرزمینی، اقدام ساده‌ای نیست. چرخه هیدرولوژیک بسیار پیچیده و بهم پیوسته است، از این رو برگرداندن آب به داخل زمین (به ویژه در سال‌های مرطوب)، برای اطمینان از آینده منابع آب یک استان، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. مباحث مربوط به تأمین بودجه، زمین مناسب، قابلیت‌های زیرساخت‌های مناسب، مدیریت مناطق دشتی و کناره‌های رودخانه‌ها، سیاست‌های اقلیمی و تنظیم آب موجود برای شارژ مجدد از جمله مواردی هستند که با نفوذ و تغذیه آب‌های زیرزمینی، اثر متقابل دارند. این پیچیدگی چالشی است که مدیران آب باید هر روز با آن روبرو شوند، زیرا نیاز به تعادل بخشی آب برای تغذیه مجدد آب‌های زیرزمینی با تقاضای شهری و کشاورزی دارند. نتایج تحقیق و مطالعه حاضر در رابطه با مکان‌یابی شهرهای تازه تاسیس نیز دارای اهمیت است. چرا که به دلیل پتانسیل جذب و نفوذپذیری بالا که منجر به تغذیه آبخوان‌ها می‌شود، این مناطق باید به حالت محیط طبیعی حفظ شده و تا حد امکان سازه‌ای در آنها بنا نشود. احداث هر گونه سازه انسانی (ساختمان، جاده آسفالت و...) که درصد زیادی از سطح طبیعی زمین را پوشش می‌دهند) و سایت‌های شهری، سبب از بین رفتن قابلیت نفوذ در این مناطق، در نتیجه افزایش رواناب‌ها و از دسترس خارج شدن این منابع و در کل، نابودی تدریجی منابع زیرزمینی خواهد شد. ممکن است بر حسب شرایط ظاهری، نفوذپذیری مناطق مورد بررسی، کم یا زیاد به نظر برسد. در حالیکه با استفاده از مدل‌ها، به دلیل دخالت دادن پارامترهای موثر بیشتر، نتایج دقیق‌تری بدست می‌آید. از آنجا که مدل تحلیل تشخیصی آمیخته در رابطه با نفوذ و تغذیه آب‌های زیرزمینی بررسی نشده، توصیه می‌شود در حوزه‌های مختلف کارایی این مدل مورد ارزیابی قرار گیرد.

References

A comprehensive report of Aligoders, the second, third, sixth and sixteenth chapters. (2013). *Pars Rai Ab Consulting Engineering Company*.

- Agarwal, R. & Garg, P.K. (2016). Remote sensing and GIS based groundwater potential & recharge zones mapping using multi-criteria decision-making technique. *Water resources management*, 30(1), pp. 243-260.
- Aghazadeh, N., Chitsazam, M. & Mirzayi, Y. (2019). Assessing the potential and actual amounts of aquifer recharge in urban areas and mapping the areas prone to artificial recharge using GIS and AHP. Case study: Urmia urban aquifer. *Advanced Applied Geology*, 9(2), pp. 56-67. (In Persian)
- Alizadeh, A. (1988). Drainage irrigation, the fifth chapter. *Publications of Ferdowsi University of Mashhad*. (In Persian)
- Behyari, M., Alizadeh, A. & Mahmoodian, S. (2017). Evaluation of active structure effect on subsidence hazard insight to Analytical Hierachy Process. *Advanced Applied Geology*, 7(2), pp. 49-56. (In Persian)
- Beven, K. & Freer, J. (2001) A dynamic TOPMODEL, *Hydrological Processes*, 15(10), pp. 1993-2011.
- Chen, W., Li, Y., Xue, W., Shahabi, H., Li, S., Hong, H., Wang, X., Bian, H., Zhang, S. & Pradhan, B. (2020a). Modeling flood susceptibility using data-driven approaches of naïve bayes tree, alternating decision tree, and random forest methods. *Sci. Total Environ.* 701, 134979.
- Chen, W., Pourghasemi, H.R. & Naghibi, S.A. (2018). Prioritization of landslide conditioning factors and its spatial modeling in shangnan county, china using gis-based data mining algorithms. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 77, pp. 611–629.
- Chen, W., Zhao, X., Tsangaratos, P., Shahabi, H., Ilija, I., Xue, W., Wang, X. & Ahmad, B.B. (2020b). Evaluating the usage of tree-based ensemble methods in groundwater spring potential mapping. *J. Hydrol.* 583, 124602.
- Chenini, I., Mammou, A.B. & El May, M. (2010). Groundwater recharge zone mapping using GIS-based multi-criteria analysis: a case study in Central Tunisia (Maknassy Basin). *Water resources management*, 24(5), pp. 921-939.
- Conforti, M., Aucelli, P. P, Robustelli, G. & Scarciglia, F. (2011). Geomorphology and GIS analysis for mapping gully erosion susceptibility in the Turbolo stream catchment (Northern Calabria, Italy), *Nat Hazards*, 56(3), pp. 881–898.
- Döll, P., & Flörke, M. (2005). Global-scale estimation of diffuse groundwater recharge: model tuning to local data for semi-arid and arid regions and assessment of climate change impact.
- Explanatory studies of soil protection and watershed management of Marbareh watershed and a small part of Tireh River in the north of Dorud. (2001). Lorestan Regional Water Company, management of basic studies of water resources.
- Fagbohun, B.J. (2018). Integrating GIS and multi-influencing factor technique for delineation of potential groundwater recharge zones in parts of Ilesha schist belt, southwestern Nigeria. *Environmental earth sciences*, 77(3), p.69.
- Fallah, S., Ghobadina, M., Shokrgozar Darabi, M. & Ghorbani Dashtaki, S. (2012). A study on sustainability of groundwater resources of Darab plain, Iran. *Iranian Journal of Water Research in Agriculture*, 26(2), pp. 161- 172. (In Persian)
- Fishman, R. M., Siegfried, T., Raj, P., Modi, V., & Lall, U. (2011). Over-extraction from shallow bedrock versus deep alluvial aquifers: Reliability versus sustainability considerations for India's groundwater irrigation. *Water Resources Research*, 47(6).
- Foster, S.S.D. & Chilton, P.J. (2003). Groundwater: the processes and global significance of aquifer degradation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 358(1440), pp. 1957-1972.
- Gerland, P., Raftery, A. E., Ševčíková, H., Li, N., Gu, D., Spoorenberg, T. & Bay, G. (2014). World population stabilization unlikely this century. *Science*, 346(6206), pp. 234-237.
- Gurdak, J. J., Walvoord, M. A. & McMahon, P. B. (2008). Susceptibility to Enhanced Chemical Migration from Depression-Focused Preferential Flow, High Plains Aquifer All rights reserved. *Vadose Zone Journal*, 7(4), pp. 1218-1230.
- Hastie, T., & Tibshirani, R. (1996). Discriminant analysis by Gaussian mixtures. *Journal of the Royal Statistical Society B*, 58, pp. 155-176.
- Hastie, T., Tibshirani, R. & Friedman, J. (2001). *The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction*. New York: Springer.

- Herrera-Pantoja, M. & Hiscock, K. M. (2008). The effects of climate change on potential groundwater recharge in Great Britain. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(1), pp. 73-86.
- Hoang, N.D. & Bui, D.T. (2018). Predicting earthquake-induced soil liquefaction based on a hybridization of kernel Fisher discriminant analysis and a least squares support vector machine: A multi-dataset study. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 77, pp. 191–204.
- Holman, R. R., Farmer, A. J., Davies, M. J., Levy, J. C., Darbyshire, J. L., Keenan, J. F. & Paul, S. K. (2009). Three-year efficacy of complex insulin regimens in type 2 diabetes. *New England Journal of Medicine*, 361(18), pp. 1736-1747.
- Huberty, C. J. (1984). Issues in the use and interpretation of discriminant analysis. *Psychological bulletin*, 95(1), 156.
- Huberty, C. J. (1994). Why multivariable analyses?. *Educational and Psychological Measurement*, 54(3), pp. 620-627.
- Jaafarzadeh, M. S., Tahmasebipour, N., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H. R. & Rouhani, H. (2021). Groundwater recharge potential zonation using an ensemble of machine learning and bivariate statistical models. *Scientific Reports*, 11(1), 5587.
- Jaafarzadeh, M. S., Tahmasebipour, N., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H. R. & Rouhani, H. (2022). Prediction of susceptible areas for groundwater recharge based on maximum entropy model. *Advanced Applied Geology*, 11(4), pp. 723-739. (In Persian)
- Ju, J., Kolaczyk, E.D. & Gopal, S. (2003). Gaussian mixture discriminant analysis and sub-pixel land cover characterization in remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 84(4), pp. 550-560.
- Jyrkama, M. I. & Sykes, J. F. (2007). The impact of climate change on spatially varying groundwater recharge in the Grand River watershed (Ontario). *Journal of Hydrology*, 338(3-4), pp. 237-250.
- Kalantar, B., Al-Najjar, H.A., Pradhan, B., Saeidi, V., Halin, A.A., Ueda, N. & Naghibi, S.A. (2019). Optimized conditioning factors using machine learning techniques for groundwater potential mapping. *Water*, 11(9), pp. 1909.
- Khajeh, M., Bazrafshan, O., Vagharfard, H. & Esmaeelpoor, Y. (2014). An Investigation on the Quantity and Quality of Groundwater in the Parishan Plain. *The Journal of Spatial Planning*, 18(4), pp. 71-96 (In Persian)
- Khan, D., Ejaz, N., Khan, T. A., Saeed, T. U. & Attaullah, H. (2015). Sustainable groundwater—a need of sustainable agriculture. *International Journal of Civil Engineering*, 13(3), pp. 305-320.
- Li, X. & Wang, Y. (2013). Applying various algorithms for species distribution modelling. *Integr. Zool.* 8, pp. 124–135.
- Li, X., Zhao, S., Yang, H., Cong, D. & Zhang, Z. (2017). A bi-band binary mask-based land-use change detection using Landsat 8 OLI imagery. *Sustainability*, 9(3), pp: 479.
- Lim, T. S., Loh, W. Y. & Shih, Y. S. (2000). A comparison of prediction accuracy, complexity, and training time of thirty-three old and new classification algorithms. *Machine learning*, 40, pp. 203-228.
- Liu, X., He, J., Yao, Y., Zhang, J., Liang, H., Wang, H. & Hong, Y. (2017). Classifying urban land use by integrating remote sensing and social media data. *International Journal of Geographical Information Science*, 31(8), pp. 1675-1696.
- 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), pp. 297-308.
- Maleki Rad, Z., Almasian, M., Pourkarmani, M. & Zarei Sahamiyeh, R. (2018). Application of GIS in the study of faults in Lorestan province. *The first national geological conference of Iran*.
- Malet, J.-P., Maquaire, O., Thiery, Y., Puissant, A., van Beek, L.P., van Asch, T.W. & Remaître, A. (2007). Landslide risk zoning-what can be expected from model simulations? A tentative application in the south french alps. *Guidel. Mapp. Areas Risk Landslides Eur.* 23, 31.
- Marker, M., Pelacani, S. & Schroder, B. (2012). A functional entity approach to predict soil erosion processes in a small Plio -Pleistocene Mediterranean catchment in Northern Chianti, Italy. *Geomorphology*, 125(4), pp. 530-540.
- McLachlan, G.J. (2004). *Discriminant analysis and statistical pattern recognition* (Vol. 544). John Wiley & Sons.

- Mehraban, M., Golkarian, A. & Khosravi, K. (2017). Evaluation of gully erosion sensitivity using the maximum entropy model (case study: Shorluk area, Razavi Khorasan province). *The Third National Conference on Soil and Watershed Conservation*, pp. 964-975. (In Persian)
- Mirhashemi, S. H., Haghightajou, P., Mirzaei, F. & Panahi, M. (2018). Using CART algorithm in predicting groundwater table fluctuations inside and outside of an irrigation system (case study: irrigating area of Qazvin). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(2), pp. 385-395. (In Persian)
- Mogaji, K.A., Omosuyi, G.O., Adelusi, A.O. & Lim, H.S. (2016). Application of GIS-based evidential belief function model to regional groundwater recharge potential zones mapping in hardrock geologic terrain. *Environmental Processes*, 3(1), pp. 93-123.
- Naghibi, S. A., Pourghasemi, H. R., Pourtaghi, Z. S. & Rezaei, A. (2015). Groundwater qanat potential mapping using frequency ratio and Shannon's entropy models in the Moghan watershed, Iran. *Earth Science Informatics*, 8(1), pp. 171-186.
- National Research Council. Panel on Discriminant Analysis Classification and Clustering (1988). *Discriminant Analysis and Clustering*.
- Panel on Discriminant Analysis, Classification, and Clustering. (1989). *Discriminant analysis and clustering. Statistical Science*, 4, pp. 34-69.
- Raghavendra, N. S. & Deka, P. C. (2015). Sustainable development and management of groundwater resources in mining affected areas: a review. *Procedia Earth and Planetary Science*, 11, pp. 598-604.
- Rausch, J.R. & Kelley, K. (2009). A comparison of linear and mixture models for discriminant analysis under nonnormality. *Behavior Research Methods*, 41(1), pp.85-98.
- Regmi. A.D., Devkota. K.C., Yoshida. K., Pradhan. B., Pourghasemi. H.R., Kumamoto. T. & Akgun. A. (2014). Application of frequency ratio, statistical index, and weights-of-evidence models and their comparison in landslide susceptibility mapping in Central Nepal Himalaya, *Arab J Geosci*, 7 (2), pp. 725-742.
- Richey, A. S., Thomas, B. F., Lo, M. H., Famiglietti, J. S., Swenson, S. & Rodell, M. (2015). Uncertainty in global groundwater storage estimates in a Total Groundwater Stress framework. *Water Resources Research*, 51(7), pp. 5198-5216.
- Rwanga. S.S. & Ndambuki. J.M. (2017), Accuracy assessment of land use/land cover classification using remote sensing and GIS, *International Journal of Geosciences*, 8(04), pp: 611.
- Salmani, H., Saber Chenari, K., Rostami Khalaj, M. & Jahandideh, O. (2016). Performance comparison of Information Value and Density Area Methods for spring potential in Ghurchay Watershed, Golestan Province. *Hydrogeology*, 1(1), pp. 12-28. (In Persian)
- Samadi, J. & Samadi, J. (2017). Spatial-Temporal Modeling of Groundwater Level Variations of Urban and Rural Areas in Kashan Aquifer Using GIS Techniques. *Journal of Environment Science and Technology*, 19(1), pp. 63-77. (In Persian)
- Schmid, U., Roesch, P., Krause, M., Harz, M., Popp, J. & Baumann, K. (2009). Gaussian mixture discriminant analysis for the single-cell differentiation of bacteria using micro-Raman spectroscopy. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 96(2), pp. 159-171.
- Sekertekin. A., Marangoz. M. & Akcin. H. (2017). Pixel-based classification analysis of land use land cover using sentinel-2 and landsat-8 data, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*.
- Thomas, A. & Tellam, J. (2006). Modelling of recharge and pollutant fluxes to urban groundwaters. *Science of the total environment*, 360(1-3), pp.158-179.
- Wang, Guirong, Xi Chen, & Wei Chen. "Spatial prediction of landslide susceptibility based on GIS and discriminant functions." *ISPRS International Journal of Geo-Information* 9, no. 3 (2020): 144.
- Zehtabian, G., Rafiei Imam, A., Alavi Panah, K. & Jafari, M. (2004). Investigating the underground water of Varamin plain for irrigation of agricultural lands. *Geographical Research*, 48, pp. 91-102. (In Persian)
- Zhao, G. Pang, B. Xu, Z. Peng, D. & Xu, L. (2019). Assessment of urban flood susceptibility using semi-supervised machine learning model. *Sci. Total Environ.* 659, 94.