

Prediction of susceptible areas for groundwater recharge based on maximum entropy model

Maryam Sadat Jaafarzadeh^{1*}, Naser Tahmasebi¹, Ali Hagizaeh¹, Hamid Reza Pourghasemi², Hamed Rouhani³

1- Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Iran

2- Department of Natural Resources and Environmental Engineering, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran

3- Department of Range and Watershed, Management, Collage of Agriculture Science and Natural Resource, Gonbad-e-Kavous University, Golestan, Iran

Keywords: MaxNET, Marboreh watershed, Infiltration, Jackknife, Groundwater recharge

1-Introduction

Groundwater provides freshwater for nearly 50% of the global population and accounts for 43% of all water used for irrigation (FAO, 2010). The Marboreh watershed is one of the vital areas in Iran that is being threatened by a high level of groundwater exploitation due to the rapid expansion of human activities. Thus, groundwater recharge is essential for sustainable groundwater management. Groundwater recharge refers to the deep percolation of water from the land surface through the vadose zone and replenishing the groundwater aquifer (Rukundo and Dogan, 2019). To meet the established goal for sustainable management, identifying potential zones, and prioritizing a susceptible area for groundwater recharge is a necessary process (Kalirajet al., 2013). Also, groundwater sources must be protected against both point and diffuse pollution (Sasakova et al., 2018). Therefore, zoning provides one of the primary means of implementing a general policy regarding recharge effectiveness. Furthermore, with the increasing availability of spatial databases and the analytical capabilities of Geographic Information Systems (GIS), more effective decision support systems can be developed for landscape planning (Londono et al., 2016) in achieving sustainable development. Related to this study's objective, the maximum entropy model has been applied for identifying the potential recharge zones in the Marboreh watershed, Lorestan Province, Iran. Also, we used Jackknife tests to investigate the relative importance of causal factors on groundwater recharge potential zones.

2- Material and methods

The Marboreh watershed (33 12'- 33 51'N, 49 03'- 49 57'E) in Lorestan Province, Iran, covers an area of about 2560 Km². The average annual rainfall and temperature over the watershed are 490 mm and 13.8°C, respectively. The groundwater recharge map was randomly split into two dataset groups: (a) the training dataset (comprised 70% of the samples); (b) the testing dataset (comprised 30% of the samples). Here we applied the MaxENT model, which is based on the statistical physics principle of entropy maximization (Banavar et al., 2010) derived from information theory (Ruddell et al., 2013) and is pattern-oriented. On the other hand, the model extracts the driving factors, their importance, and interactions, representing the observed potential infiltration patterns without making a priori assumptions on these factors. In the present study, fourteen conditioning environmental factors that influence groundwater recharge is considered: Elevation, slope, aspect, drainage density, soil texture, lithology, distance from faults, distance from river, land use, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Topographic Wetness Index (TWI), Stream Power Index (SPI), plan and profile curve. In addition, the jackknife test was used to determine the Influence of Predictive Variables (IPV). Finally, the tested dataset was compared with the MaxENT model, generated groundwater recharge potential (GWRP) map. Finally, the dataset was evaluated using four indices,

*Corresponding author: Raana.jafarzadeh@gmail.com

DOI: 10.22055/AAG.2020.29115.1967

Received 2019-04-19

Accepted 2020-10-07

which have been widely used for the data-mining model's evaluation: area under the receiver-operator characteristic curve (AUROC), Correctly Classified Instances (CCI), True Skill Statistic (TSS) and Cohen's KAPPA coefficient (KP).

3- Results and discussion

Based on the Jackknife test, soil texture with 59.2% variable contribution (VC) and lithology with 38.9% VC are the main factors influencing the GWR. The generated map was reclassified into four classes of recharge potential based on natural breaks classification. The resulting GWR map is based on the maximum entropy containing 0.02%, and 3.1% of the total area falls in its very high and high potential zone. In contrast, those of the intermediate and low classes contained 0.7% and 96.18% of the total area. The results demonstrated well to excellent performance with area under the Receiver-Operator Characteristic Curve (AUROC = 0.95), Correctly Classified Instances (CCI = 86.6), True Skill Statistic (TSS = 0.75), and Cohen's KAPPA coefficient (KP = 0.75). The greatest potential was observed in the middle part of the watershed, the plains. Areas with a low slope gradient, sandy soil texture, and quaternary sediments showed the highest groundwater recharge potential.

4-Conclusion

Recharge is a critical component of sustainable groundwater management. The present study used an entropy-based MaxENT algorithm for groundwater recharge potential mapping and identified the main factors influencing the recharge. According to the results, the plain areas of the Marboreh watershed are suitable for groundwater recharge. This study indicates that the MaxENT model can study groundwater recharge potential in the Marboreh watershed. Furthermore, soil conservation practices in the Marboreh watershed could reduce runoff or increase percolation by increasing the runoff water residence time.

On the other hand, managing the amount of runoff and flooding caused by precipitation and snow melting makes it possible to strengthen the groundwater aquifers. This paper applied the Jackknife test to the relative importance of causal factors in mapping the groundwater recharge potential. Future research would be interesting to compare different filter algorithms under the spatial casual factor important ranking. Another potential future development to improve susceptibility models is to combine ensemble methods to obtain a more accurate and reliable model.

References

- Banavar, J.R., Maritan, A., Volkov, I., 2010. Applications of the principle of maximum entropy: from physics to ecology. *Journal of Physics: Condensed Matter* 22(6), p.063101.
- FAO, 2010. Main findings and short- and medium-term recommendations. FAO, Rome, <http://www.fao.org/nr/water/news/clim-change.html>.
- Kaliraj, S., Chandrasekar, N., Magesh, N.S., 2014. Identification of potential groundwater recharge zones in Vaigai upper basin, Tamil Nadu, using GIS-based analytical hierarchical process (AHP) technique. *Arabian Journal of Geosciences* 7(4), 1385-1401.
- Londono, O.M.Q., Romanelli, A., Lima, M.L., Massone, H.E., Martínez, D.E., 2016. Fuzzy logic-based assessment for mapping potential infiltration areas in low-gradient watersheds. *Journal of Environmental Management* 176, 101-111.
- Ruddell, B.L., Brunsell, N.A., Stoy, P., 2013. Applying information theory in the geosciences to quantify process uncertainty, feedback, scale. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 94(5), 56-56.
- Rukundo, E., Doğan, A., 2019. Dominant Influencing Factors of Groundwater Recharge Spatial Patterns in Ergene River Catchment, Turkey. *Water* 11(4), p.653.
- Sasakova, N., Gregova, G., Takacova, D., Mojzisoava, J., Papajova, I., Venglovsky, J., Szaboova, T., Kovacova, S., 2018. Pollution of surface and ground water by sources related to agricultural activities. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 2, p.42.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Jaafarzadeh, M., Tahmasebi, N., Hagizaeh, A., Pourghasemi, H.R., Rouhani, H., 2022. Prediction of susceptible areas for groundwater recharge based on maximum entropy model. *Adv. Appl. Geol.* 11(4), 723-739.
DOI: 10.22055/AAG.2020.29115.1967
https://aag.scu.ac.ir/article_16215.html?lang=en

پهنه‌بندی مناطق مستعد تغذیه آب‌های زیرزمینی بر اساس مدل حداکثر انتروپی

مریم سادات جعفرزاده *

دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان

ناصر طهماسبی پور

هیئت علمی گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان

علی حقی‌زاده

هیئت علمی گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان

حمیدرضا پورقاسمی

هیئت علمی گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه شیراز

حامد روحانی

هیئت علمی گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۵/۲۱

*Raana.jafarzadeh@gmail.com

چکیده

کمبود منابع آب سطحی و متعاقب آن برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی این منابع را با تهدید جدی روبرو نموده است. افت سطح سفره‌های آب زیرزمینی و پدیده فرو نشست زمین از جمله آثار زیانبار ناشی از بهره‌برداری زیاد و تغذیه کمتر منابع آب زیرزمینی است که تبدیل به یک چالش اجتماعی شده است. لذا مدیریت و استفاده پایدار از این منابع آبی یک ضرورت حیاتی به نظر می‌رسد. ذخیره‌سازی و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی روشی بالقوه برای دستیابی به اهداف تامین آب در آینده به نظر می‌رسد. برای توسعه پایدار منابع آب زیرزمینی، باید برنامه‌ای برای مدیریت منظم منابع آب زیرزمینی بر اساس درک کمی از پتانسیل توسعه ایجاد گردد. در این پژوهش پتانسیل پهنه‌های دارای قابلیت نفوذ برای تغذیه آب‌های زیرزمینی با استفاده از مدل حداکثر انتروپی در حوزه آبخیز ماربره در شرق استان لرستان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه براساس آزمون جک نایف نشان داد که مهم‌ترین فاکتورهای تاثیرگذار در پیش‌بینی نواحی دارای پتانسیل نفوذ، بافت خاک و سنگ‌شناسی می‌باشند و فاکتور انحنا سطح و شاخص رطوبت توپوگرافیکی تاثیر کمی دارند. نتایج مدل انتروپی حداکثر نشان داد که بیشترین پتانسیل نفوذ در قسمت‌های میانی حوزه که مناطق دشتی با درصد شیب کم، بافت عمدتاً شنی و دارای رسوبات کواترتری می‌باشند، مشاهده می‌شود. مناطق با نفوذپذیری بسیار زیاد، 0.7 کیلومتر مربع (0.02%) از کل منطقه مورد مطالعه را در بر می‌گیرد. در حالی که منطقه با نفوذپذیری زیاد، متوسط و کم به ترتیب $78/4$ km^2 ($3/1\%$)، $18/2$ km^2 (0.7%) و $262/5$ km^2 ($96/18\%$) را در بر می‌گیرد. دقت و توانایی مدل پیش‌بینی پتانسیل نفوذ بر اساس شاخص‌های مختلف صحت‌سنجی از خوب تا عالی ارزیابی شد. با توجه به نتایج بدست آمده، مناطق دشتی حوزه ماربره، مستعد نفوذپذیری بوده و با مدیریت میزان رواناب و سیلاب‌های ناشی از بارش‌ها و ذوب برف، می‌توان به تقویت منابع آب زیرزمینی کمک نمود. انتظار می‌رود نتایج مطالعه حاضر، برای ایجاد یک برنامه مدیریتی موثر در آب‌های زیرزمینی در آینده مفید باشد.

کلمات کلیدی: مکسنت، منحنی ROC، نفوذ، جک‌نایف، تغذیه آب زیرزمینی

مقدمه

دسترسی به آب برای تبخیر و تعرق، تغذیه مجدد آب‌های زیرزمینی و رواناب سطحی است. نفوذ بستگی به تعداد زیادی از عوامل تعاملی مرتبط با اقلیم، عناصر فیزیکی و کاربری ارضی است. نفوذ حوزه را به مخزن پویایی از سیستم هیدرولوژیکی تبدیل می‌کند، چرا که یک

به طور کلی بیلان آب از نظر ورودی‌ها و خروجی‌ها، با ورودی اصلی، بارش قابل مشاهده است. بیلان آبی تعادل فرایندهای تبخیر، تعرق، رواناب، نفوذ سطحی، نفوذ عمقی، تغذیه / تخلیه آب زیرزمینی می‌باشد. نفوذ یک فرآیند مهم سیستم محیطی، تعیین میزان

مدل‌های گوناگون به وفور استفاده می‌شود. مدل حداکثر انترپوی از جمله مدل‌هایی است که اخیراً در بحث منابع آب زیرزمینی و تعیین نقاط دارای پتانسیل آب زیرزمینی، چشمه، قنات و چاه‌ها مورد توجه قرار گرفته است (Ozdemir, 2011a, b; Naghibi et al., 2015; Naghibi and Pourghasemi, 2015). همکاران (۲۰۱۵) اقدام به تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های انترپوی شانون در دشت بجنورد نمودند. نتایج این پژوهش بیانگر دقت خیلی خوب مدل حداکثر انترپوی (۸۵/۵۵ درصد سطح زیر منحنی ROC) بوده و بر اساس این مدل در منطقه مورد مطالعه، لایه‌های کاربری اراضی، لیتولوژی، فاصله از آبراهه و طبقه ارتفاعی بیشترین تاثیر را بر پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه مطالعاتی داشته‌اند. Razandi و همکاران (۲۰۱۷) نیز با استفاده از الگوریتم حداکثر انترپوی به بررسی پتانسیل منابع آب زیرزمینی در دشت همدان پرداختند. بر اساس یافته‌های این پژوهش مشخص شد که ۲۷/۲ درصد سطح دشت دارای پتانسیل آب زیرزمین می‌باشد. همچنین بر اساس نمودار جک نایف متغیرهای DEM، ضخامت آبخوان و زمین‌شناسی مهمترین عوامل اثرگذار بر پیش‌بینی نواحی دارای پتانسیل بودند. Oliyayi و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه‌ای در حوزه آبخیز کلات نادری، با بررسی نقاط دارای پتانسیل منابع آب زیرزمینی در سازندهای سخت با استفاده از مدل حداکثر انترپوی، با نتیجه ۹۲/۳ درصد مکان‌یابی را انجام دادند که نشان‌دهنده دقت بالای مدل در موضوع مورد مطالعه بوده است.

وجود دشتهای کشاورزی ازنا و الیگودرز در حوزه آبخیز ماربره و عدم دسترسی کافی به منابع آب سطحی سبب وابستگی شدید کشاورزی به منابع آب زیرزمینی در این حوزه گردیده است، از این رو در این منطقه منابع آب زیرزمین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده که این امر به نوبه خود نمایانگر لزوم مدیریت هرچه بهتر این منابع می‌باشد و پتانسیل‌یابی نقاط دارای قابلیت نفوذپذیری آب زیرزمینی، یکی از ابزارهای کارآمد در این راستا خواهد بود. در این پژوهش اهمیت عوامل موثر بر نفوذ و نیز پتانسیل‌یابی مناطق مستعد تغذیه آب‌های زیرزمینی با استفاده از مدل حداکثر انترپوی در محیط نرم‌افزار MaxENT انجام شد.

مواد و روش

منطقه تحقیق

حوزه آبخیز ماربره در شرق استان لرستان با مساحت ۲۵۵۹ کیلومتر مربع و ارتفاع متوسط ۲۷۵۰ متر از سطح دریا یکی از سرشاخه‌های رودخانه سزار می‌باشد که در محدوده جغرافیایی ۳۰°۴۹' _ ۵۷°۴۹' طول شرقی و ۱۲°۳۳' _ ۵۱°۳۳' عرض شمالی قرار گرفته است. این حوزه شامل اراضی کشاورزی دیم و آبی، مراتع، باغات،

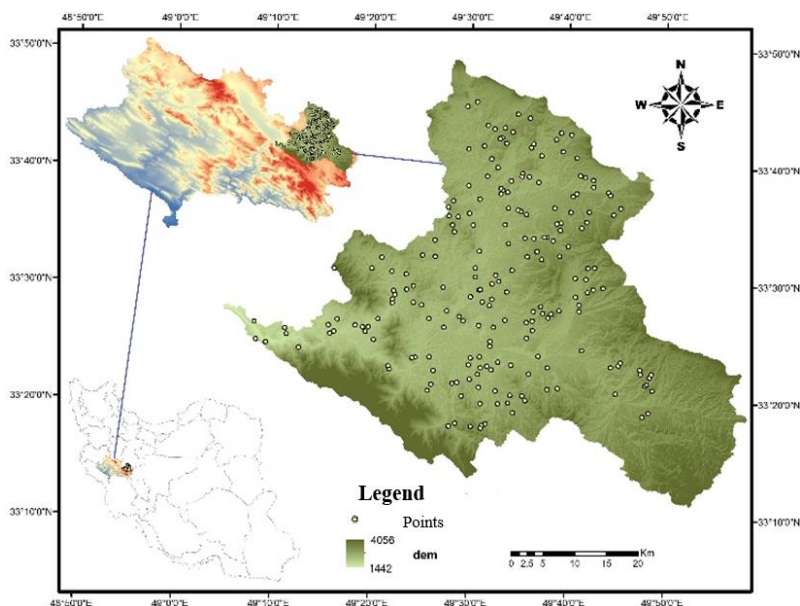
ذخیره زیرزمینی و همچنین یک جریان پایه رودخانه در دوره‌های خشک ضروری است.

تنوع مکانی، از مهمترین جنبه‌های فرآیند نفوذ محسوب می‌شود. بسیاری از مشکلات به دلیل ناهمگونی‌های طبیعی که مشخصه بسیاری از مطالعات میدانی است وجود می‌آیند. این ویژگی (مشخصه)، توسعه توصیفات تحلیلی را به منظور توصیف و پیش‌بینی فرایند نفوذ پیچیده می‌کند (Achouri and Gifford, 1984). به طور کلی، تجزیه و تحلیل نفوذ مبتنی بر آزمایش‌های دقیق در خاک است که بعضاً به اشتباه درون‌یابی می‌شوند تا نمایانگر تنوع مکانی نفوذ از مجموعه داده‌های بسیار کمی باشند (Paige and Stone, 1996; Van Schaik, 2009; Soares et al., 2012). دستگاه‌ها و ابزارهای میدانی می‌توانند مقادیر پارامترها را تأمین کنند، اما فقط در مقیاس بسیار کوچک (اساساً یک نقطه)، بنابراین تعمیم نتایج آزمایش برای مناطق بزرگتر، با توجه به شرایط متنوع و زیادی که می‌تواند بر نفوذ و رواناب رخ داده در سراسر حوزه آبخیز تأثیر بگذارد، دشوار است (Sullivan et al., 1996).

استفاده و مدیریت پایدار از آب‌های زیرزمینی یک تحقیق حیاتی و چالش اجتماعی است (Rittel and Webber, 1973; Arshad, 2015). وابستگی جوامع انسانی و محیط زیست به آب‌های زیرزمینی و چالش‌های مربوطه در سراسر جهان بسیار متفاوت است. به طور متوسط، آب‌های زیرزمینی حدود ۲۰ درصد از مصرف آب جهان را به خود اختصاص می‌دهد (Zektser, 2012). در مناطق خشک و نیمه خشک آب‌های زیرزمینی عمدتاً برای اهداف کشاورزی، به ویژه برای آبیاری استفاده می‌شود و بسیاری از آبخوان‌های بزرگ که برای کشاورزی اهمیت دارند، به ویژه در ایران، پاکستان، عربستان سعودی، هند، ایالات متحده آمریکا، چین و مکزیک، به دلیل برداشت بیش از حد تحت تأثیر قرار گرفته‌اند (Gleeson et al., 2012; Wada et al., 2012; Arshad, 2015). کاهش میزان نفوذپذیری توام با ادامه و افزایش بهره‌برداری از این منابع، سبب کاهش آب‌های زیرزمینی خواهد شد که این امر نیز منجر به اثراتی دیگر چون افزایش آلودگی جریان‌های وابسته به آب زیرزمینی، تالاب‌ها و اکوسیستم‌ها شده است. در نتیجه کارایی چاه‌ها را کاهش و هزینه پمپاژ را افزایش می‌دهد و در موارد شدیدتر منجر به فرونشست می‌گردد (Konikow and Kendy, 2005; Wada et al., 2010; Qureshi et al., 2012). مدیریت تغذیه آبخوان اصطلاحی است که بعنوان یک چتر (Dillon, 2005) روش‌های مختلف نفوذ عمقی آب در زمین را در بر می‌گیرد. امروزه استفاده گسترده از مدل‌های مختلف در تمام زمینه‌ها به دلیل مزایای مدل‌سازی (صرفه جویی در وقت و هزینه و ارائه پیش‌بینی و دید آتی از پدیده مورد نظر) اهمیت زیادی یافته است، بطوریکه در تغذیه و تعیین قابلیت نفوذپذیری آب‌های زیرزمینی نیز از

پرمین در منطقه شامل شیست‌های کمی دگرگون شده بوده و رسوبات تریاس- ژوراسیک با رخساره شیستی، شیلی و ماسه سنگ‌های دگرگون شده قابل روئیت است که در بعضی نواحی دارای درز و شکاف بوده و به شکل ضعیفی سفره آبرفتی را تغذیه و چشمه‌هایی با آبدهی کم از آن منشا می‌گیرد. رسوبات زمان حاضر نیز بیشتر از آبرفت‌های قدیمی هستند اما به طور کلی گسترش اندکی در منطقه دارند (Malekirad et al., 2010). موقعیت حوزه مورد بررسی و نقاط نمونه‌برداری شده بصورت شماتیک در شکل شماره ۱ ارائه شده است.

اراضی فاقد پوشش گیاهی، اراضی مسکونی و اراضی صخره‌ای و محدوده سه شهر دورود، ازنا و الیگودرز را در بر گرفته است. میانگین بلند مدت بارش حوزه ۵۶۰ میلی‌متر می‌باشد و بر اساس روش دومارتن، دارای اقلیم نیمه خشک و سرد و دمای متوسط سالانه ۱۳/۸ درجه سلسیوس می‌باشد. این منطقه فاقد آب سطحی قابل توجهی بوده و بیشتر استفاده از منابع آبی سفره‌ها می‌باشد. سازندهای کامبرین در منطقه از گنیس، آمفیولیت، آهک و دولومیت به شدت دگرگون شده تشکیل شده‌اند که به علت تحمل فشارهای کوهزایی شکسته و شکافدار شده است (Malekirad et al., 2010). رسوبات



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه مورد مطالعه و نقاط مشاهداتی.

Fig. 1. Geographical position of study area and location of sampling sites.

پیوسته را در مدل‌سازی مورد توجه قرار داد. از جمله مهمترین مزیت‌های این مدل، تعیین مهمترین عامل موثر بر پدیده مورد نظر می‌باشد (Shannon, 1948; Phillips et al., 2006; Banavar et al., 2010; Khalasi Ahvazi et al., 2015; Oliyayi et al., 2017; Zabihi et al., 2018). در این مقاله، مدل حداکثر انتروپی با استفاده از ۷۰٪ داده‌های مربوط به لایه نقاط نمونه‌برداری شده نفوذ در منطقه مورد بررسی، به منزله متغیر وابسته (سایر لایه‌ها بعنوان متغیرهای مستقل)، آموزش دید سپس ۳۰٪ این نقاط نیز برای بخش آزمون (تست) مدل استفاده شدند.

مدل حداکثر انتروپی

الگوریتم حداکثر انتروپی که از قانون دوم ترمودینامیک گرفته شده، نوعی مدل‌سازی مبتنی بر تکنیک یادگیری ماشینی است که صرفاً به نقاط حضور وابسته بوده و احتمال توزیع مقادیر ماکزیمم انتروپی متأثر از فاکتورهای محیطی موثر 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 انتروپی سیستم)، در مقایسه با سایر روش‌های مدل‌سازی دارای عملکرد بهتری در پیش‌بینی حضور پدیده مورد نظر می‌باشد. در این فرایند مدل‌سازی می‌توان با داشتن نقاط، هم متغیرهای کلاسه‌بندی شده و هم وابسته

اصل حداکثر انتروپی

مراحل محاسبه حداکثر انتروپی به این صورت می‌باشد که اگر X یک متغیر تصادفی با توزیعی پیوسته باشد، آنگاه انتروپی به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود:

$$E(x) = -C \int_{-\infty}^{+\infty} m(x) \log[m(x)] dx \quad \text{رابطه (۱)}$$

$E(x)$ انتروپی سیستم

$m(x)$ تابع چگالی احتمال

C ثابت مثبت است که به صورت فاکتور مقیاس تعریف شده و به انتخاب واحد اندازه گیری وابسته می‌باشد. مفهوم انتروپی را می‌توان برای جفت متغیرهای (X, Y) از طریق انتروپی توأم تعمیم داد که به صورت رابطه ۲ بیان می‌شود:

$$E(x, y) = -C \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} m(x, y) \log[m(x, y)] dx dy \quad \text{رابطه (۲)}$$

$E(x, y)$ انتروپی توأم سیستم

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

انتروپی یک سیستم را می‌توان با استفاده از 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 (Agrawal et al., 2005; Mirabbasi, 2011). محدودیت‌های زیر (روابط ۳ تا ۶) برای بهینه‌سازی انتروپی توأم $E(x, y)$ در نظر گرفته می‌شوند:

$$\sum_{x,y} m(x, y) = 1 \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$\sum_{x,y} x m(x, y) = \bar{x} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\sum_{x,y} y m(x, y) = \bar{y} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\sum_{x,y} x y m(x, y) = T x y + \bar{x} \bar{y} \quad \text{رابطه (۶)}$$

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

\bar{x} و \bar{y} میانگین‌های مربوطه

$T x y$ کواریانس بین X و Y

نهایتاً برای بهینه‌سازی از تابع انتروپی توأم دیفرانسیل گرفته و معادل صفر (رابطه ۷) قرار داده می‌شود (Mirabbasi, 2011):

$$d(E(x)) = -(\sum_{x,y} [1 + \ln m_{xy}] dm(xy)) = 0 \quad \text{رابطه (۷)}$$

روش کار

برای انجام پژوهش حاضر، نقشه نقاط دارای نفوذپذیری اندازه‌گیری شده (با استفاده از استوانه مضاعف) در منطقه ماربره به عنوان پارامتر وابسته در فرایند آموزش و آزمون از طریق بازدید صحرایی و برداشت میدانی تهیه شد (Ghorbani Vagheyi, 2004; SZCEC, 2012). سپس لایه‌های ورودی (شکل شماره ۲) در محیط ArcGIS 10.6 تهیه و به فرمت ASCII تبدیل شدند. فایل نقاط نفوذ اندازه‌گیری شده نیز با استفاده از روش کریجینگ میان‌یابی شده و سپس در نرم‌افزار SPSS به فرمت *.csv تبدیل و سپس به نرم‌افزار MaxENT معرفی شدند. روش ماکزیمم انتروپی یا حداکثر انتروپی در نرم‌افزار MaxENT ورژن 3.3.3 اجرا شد. بعد از آزمون هم‌خطی بودن عوامل و اجرای مدل به منظور تعیین اثرات تقریبی هر متغیر مستقل بر میزان نفوذپذیری، از روش ارزیابی بوت استرپ^۱ برای ایجاد مدل کالیبراسیون و مدل تست استفاده شد (Boria et al., 2014; Hoffman et al., 2008). ۷۰ درصد نقاط پدیده مورد نظر بصورت تصادفی برای داده‌های آموزشی (برای کالیبراسیون مدل) و ۳۰ درصد دیگر برای ارزیابی نتایج مدل (برای صحت سنجی مدل) بکار گرفته شد. الگوریتم مدل بعد از ۵۰۰ تکرار آموزش تعیین شد و صحت‌سنجی مدل بر اساس این الگوریتم انجام شد. آنالیز حساسیت به وسیله آزمون چک‌نایف انجام گردید که خروجی آن بصورت نمودار در شکل شماره ۳ ارائه شده است. در این مدل از رگرسیون لجستیک برای تحلیل رابطه بین متغیرها استفاده شد. بعد از انجام مدل‌سازی به دلیل اینکه خروجی مدل، یک نقشه احتمالاتی پیوسته است، تبدیل به مناطق حضور یا عدم حضور گردید تا آستانه بهینه حضور برای پدیده مورد مطالعه انتخاب شود.

لایه‌های ورودی مدل

عوامل متعددی در تغذیه آب‌های زیرزمینی و نفوذ آب به عمق سفره‌ها نقش دارند. اطلاعات مورد نیاز مدل ماکزیمم انتروپی به منظور انجام مطالعه حاضر، شامل عوامل محیطی و مورفولوژیکی موثر بر نقاط دارای پتانسیل نفوذپذیری و تغذیه آب‌های زیرزمینی می‌باشند (Oh et al., 2011; Pourtaghi and Pourghasemi, 2014; Zabihi et al., 2015). از جمله این عوامل که در این پژوهش استفاده شدند، ۱۴ لایه اطلاعاتی فاکتورهای مورفولوژیکی و محیطی موثر بر تغذیه آب‌های زیرزمینی بودند که متعاقباً هر یک بطور مختصر توضیح داده شده‌اند. نقشه مربوط به تمام لایه‌های ورودی بکار رفته برای اجرای مدل، در شکل شماره ۲ ارائه شده‌اند.

1- Sangab Zagros Consulting Engineering Company

2- Boot strap

مدل رقومی ارتفاعی (DEM)

DEM یک نقشه رقومی رستری است که برای هر سلول مقدار ارتفاع موجود می‌باشد و در حالت برداری یا وکتوری نیز مجموعه مشاهدات نقطه‌ای منظم است که هر نقطه دارای مختصات جغرافیایی و مقدار ارتفاعی می‌باشد در DEM این مجموعه نقاط ارتفاعی به صورت مکانی ثبت می‌شوند و مجموع سطح توپوگرافی را توصیف می‌کنند (Montgomery and Dietrich, 1994; Piroozinejad et al., 2018). در این مطالعه نقشه لایه DEM منطقه با استفاده از تصاویر ماهواره ASTER_ قدرت تفکیک سلولی ۳۰ * ۳۰ متر در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.6 تهیه شد. چند لایه اطلاعاتی دیگر از جمله انحنای سطح و انحنای پروفیل، جهت و زاویه شیب، شاخص رطوبت توپوگرافیکی (TWI)، شاخص قدرت جریان (SPI) و شبکه آبراه‌های نیز بر اساس لایه DEM و در محیط ArcGIS 10.6 تهیه شدند.

جهت و مقدار شیب

از جمله عوامل موثر در تغذیه مصنوعی، جهت و مقدار شیب می‌باشد. شیب مشتق درجه اول از مدل رقومی ارتفاع و عامل مهمی در ارزیابی بی‌ثباتی حوزه است و اغلب در نقشه‌برداری حساسیت تغذیه مصنوعی استفاده می‌شود (Lee and Min, 2001; Saha et al., 2005; Pourghasemi et al., 2012; Althuwaynee et al., 2015; Guo et al., 2014). 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 ArcGIS 10.6 تهیه و به پنج کلاس تقسیم شدند.

انحنای سطح و انحنای پروفیل

به منظور تعیین ویژگی‌های ژئومورفومتری اشکال، از اندازه‌گیری مشتق دوم در مدل‌های رقومی ارتفاع (انحنا) استفاده می‌شود. این روش بسیار مناسب بوده و با فرایندهای ژئومورفولوژیکی در ارتباط است. این ویژگی همچنین دارای دو نوع متمایز انحنای با ویژگی قائم است که انحنای سطح و انحنای پروفیل نامیده می‌شود (Evans, 1972; Shayan et al., 2011). اندازه تغییر جهت در طول یک منحنی میزان توسط انحنای سطح نشان داده می‌شود که توسط تقاطع یک صفحه افقی با سطح تشکیل گردیده و بیانگر همگرایی و واگرایی توپوگرافیکی می‌باشد (Pourghasemi and Beheshtirad, 2018).

مقدار تغییر پتانسیل گرادیان شیب منحنی‌های میزان در طی مسیر جریان و تغییرات شدت جریان به وسیله انحنای پروفیل نشان داده می‌شوند (Salmani et al., 2016). هر دو نوع انحنای به سه دسته مقعر، محدب و تخت طبقه‌بندی (Salmani et al., 2016) و از طریق اکستنشن DEM Surface در نرم افزار ArcGIS 10.6 محاسبه شدند.

شاخص رطوبت توپوگرافیکی

شاخص TWI که یک پارامتر ساده ریاضی از وضعیت رطوبت خاک است (Lucà et al., 2011; Mehraban et al., 2018)، عمدتاً به منظور ارزیابی کمی توپوگرافی بر فرایندهای هیدرولوژیکی و نیز نشان دادن اثر توپوگرافی بر موقعیت و اندازه جریان آب زیرزمینی و رطوبت خاک (Naghibi et al., 2015) و مناطق منبع اشباع تولید رواناب (Beven and Freer, 2001) استفاده می‌شود (Salmani et al., 2016). تمایل آب برای تجمع در هر نقطه از حوزه (θ) و تمایل نیروی گرانشی برای حرکت دادن آب به سمت پایین دست شیب ($\tan \theta$) توسط شاخص TWI بدست می‌آید. رابطه ۸ فرمول محاسباتی این شاخص را نشان می‌دهد.

$$TWI = \ln \left(\frac{\theta s}{\tan \theta} \right) \quad \text{رابطه (۸)}$$

شاخص قدرت جریان

شاخص اندازه‌گیری قدرت جریان با فرض متناسب بودن مقدار زهکشی با سطح حوزه آبخیز، یک ویژگی ترکیبی توپوگرافی می‌باشد (Regmi et al., 2014; Conforti et al., 2011). این شاخص گویای میزان قدرت فرسایندهای جریان آب است و با شیب و مساحت ویژه حوزه متناسب می‌باشد (Lucà et al., 2011; Mehraban et al., 2018). این شاخص با استفاده از رابطه شماره ۹ قابل محاسبه می‌باشد.

$$SPI = (fa * cellsize / 22.3)^{0.4} * (\sin \theta / 0.0896)^{1.3} \quad \text{رابطه (۹)}$$

fa: تجمع جریان

θ : درجه شیب

تراکم زهکشی

تراکم زهکشی نسبت طول کل آبراه‌ها به مساحت حوزه آبریز است. هرچه تراکم زهکشی بیشتر باشد، سرعت جریان‌های سطحی افزایش و امکان نفوذ کاهش می‌یابد. لایه تراکم زهکشی حوزه مورد بررسی نیز با استفاده از نقشه آبراه منطقه در محیط نرم‌افزاری ArcGIS 10.6 تهیه گردید. این لایه عمدتاً در بخش‌های مرکزی حوزه، تراکم بالایی داشت که محل اتصال آبراه‌ها به یکدیگر

تهیه شدند. لایه NDVI با توجه به دو باند قرمز و مادون قرمز تصویر لندست ۸، با استفاده از رابطه ۱۱ در نرم افزار ArcGIS 10.6 تهیه گردید. مشخصات مربوط به تصویر در جدول شماره ۱ ارائه شده است. نقشه کاربری اراضی حوزه نیز بعد از دانلود تصویر مربوطه به منطقه مورد مطالعه، در محیط نرم افزاری ENVI 5.3 با روش طبقه بندی نظارت شده حداکثر احتمال، تهیه گردید. کلاس های کاربری اراضی حوزه همراه با سطح مربوط به هر یک، در جدول شماره ۲ قابل مشاهده می باشد. با توجه به سطح گسترده منطقه مورد بررسی، ۸ نوع کاربری در منطقه مشاهده شد. عمده کاربری حوزه مربوط به کلاس زراعت و مراتع بدست آمد.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

می باشند. مقدار لایه تراکم زهکشی منطقه بین صفر تا ۱/۳۹ و با استفاده از رابطه شماره ۱۰ محاسبه گردید:

$$Dg = \sum_{k=1}^{k=n} \left(\frac{Dg}{S} \right) km^{-1} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

لایه کاربری اراضی و شاخص پوشش گیاهی (NDVI)

نوع کاربری ها و همچنین شاخص پوشش گیاهی اهمیت بسیار بالایی در فرایندهای نفوذ، تخییر و فرسایش دارند. پوشش گیاهی نشانه خوبی از آب های زیرزمینی است و با فرصت نفوذ رابطه مستقیم دارد بطوریکه هرچه میزان پوشش گیاهی در یک منطقه بیشتر باشد، امکان نفوذ پذیری نیز بیشتر خواهد بود. لذا این دو لایه نیز به عنوان پارامترهای ورودی برای بررسی پدیده مورد نظر تهیه و استفاده شدند. دو لایه NDVI و کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ و در محیط نرم افزاری ArcGIS 10.6 و ENVI 5.3

جدول ۱- مشخصات تصویر مورد استفاده از ماهواره لندست ۸

Table 1. The information of Landsat 8 image.

Row	Band	Imaging date
165 - 37	11	17.06.2018

جدول ۲- کلاس های کاربری اراضی حوزه و سطح هر کلاس.

Table 2. The Land use classes of study area.

Lu class	Area (Km ²)	Lu class	Area (Km ²)
Agriculture	1269.1	Rangeland	1109.9
Bare land	44.8	Rock	8.5
Forest	53.9	Urban	13.8
Garden	58.7	Water	1.1

سنگ شناسی

پارامتر دیگری که نقش بسیار تعیین کننده‌ای در پتانسیل‌یابی نقاط تغذیه دارد، لایه لیتولوژی یا سنگ‌شناسی منطقه است (Prasad et al., 2008; Chowdhury et al., 2011; Razandi et al., 2017). این لایه برای حوزه مورد بررسی با استفاده از نقشه زمین‌شناسی حوزه با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ که از سازمان زمین‌شناسی تهیه گردید، بدست آمد. حوزه مطالعاتی دارای ۲۶ لایه سنگ‌شناسی، از جمله آهک مارن‌دار، آهک خاکستری، شیل، سیلتستون، ماسه سنگ و انیدریت بوده که از این بین، دو کلاس Qft1 و Qft2 که مربوط به رسوبات دوره کواترنری هستند، دارای حساسیت بیشتری نسبت به نفوذپذیری می‌باشند.

فاصله از گسل

گسل‌ها، با توجه به ایجاد پهنه‌های خرد شده و همچنین شکل‌گیری مجاری انتقال آب، اهمیت فراوانی در توسعه مورفولوژی و شکل‌گیری منطقه دارند. گسل‌ها سبب تسهیل در نفوذ آب به ترازهای پایین‌تر گردیده و سبب افزایش پتانسیل شکل‌گیری حفرات انحلالی زیرزمینی می‌شوند (Behyari et al., 2017). در این مطالعه، لایه فاصله از گسل با استفاده از نقشه گسل‌های استان لرستان با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ در محیط نرم‌افزاری ArcGIS 10.6 تهیه گردید.

فاصله از رودخانه

شاخص فاصله از مسیر آبراهه‌ها بدین منظور مورد توجه قرار می‌گیرد که آبراهه‌ها با ایجاد شیارها و گسستن لایه‌های به هم پیوسته خاک، باعث افزایش نفوذ آب‌های سطحی می‌گردند. همچنین باعث ناپایداری دامنه‌ها و تغییر شیب در منطقه می‌شوند که خود باعث ایجاد سطوح ضعف در دامنه‌ها بوده و سازه‌های اطراف را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Behyari et al., 2017). این لایه نیز با استفاده از نقشه توپوگرافی و در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.6 تهیه و به پنج کلاس تقسیم گردید.

بافت خاک

نقشه بافت خاک منطقه با استفاده از نمونه‌های تهیه شده از منطقه (Ghorbani Vagheyi, 2004) و نیز نقشه بافت خاک استان لرستان که از اداره مرکز تحقیقات استان دریافت شد، در محیط نرم‌افزاری ArcGIS 10.6 تهیه شد. بر اساس این نقشه، بافت خاک

منطقه متشکل از ۹ کلاس خاک بود که کلاس‌های شنی - رسی - لومی و شنی - لومی، بیشترین قابلیت نفوذ را داشتند.

تمام لایه‌های محیطی و مورفولوژیکی موثر در پدیده نفوذ حوزه آبخیز ماربره تهیه و سپس به مدل معرفی شدند. شبیه‌سازی مکانی پیش‌بینی مناطق دارای پتانسیل نفوذپذیری با استفاده از نرم‌افزار MaxENT انجام شد. برای صحت‌سنجی نقشه حضور و عدم حضور حاصل از مدل (شکل شماره ۳) از شاخص‌های عملکرد مانند؛ شاخص نمونه‌های صحیح طبقه‌بندی شده (CCI)، شاخص آمار مهارت درست (TSS)، ضریب کاپا (KP) و شاخص ROC استفاده گردید (Jafari et al., 2016; Jaafarzadeh et al., 2021). روابط شماره ۱۲ تا ۱۴، روش محاسبه هر کدام از این شاخص‌ها را نشان می‌دهد.

رابطه (۱۲)

$$Kp = \frac{(TP + TN) - \{[(TP + FN)(TP + FP) + (FN + TN)(FP + TN)]/n\}}{n - \{[(TP + FN)(TP + FP) + (FN + TN)(FP + TN)]/n\}}$$

رابطه (۱۳)

$$TSS = Sensitivity + Specificity - 1$$

$$CCI = \frac{TN+TP}{100}$$

رابطه (۱۴)

TN: نقاط منفی که در جای درست قرار گرفته‌اند

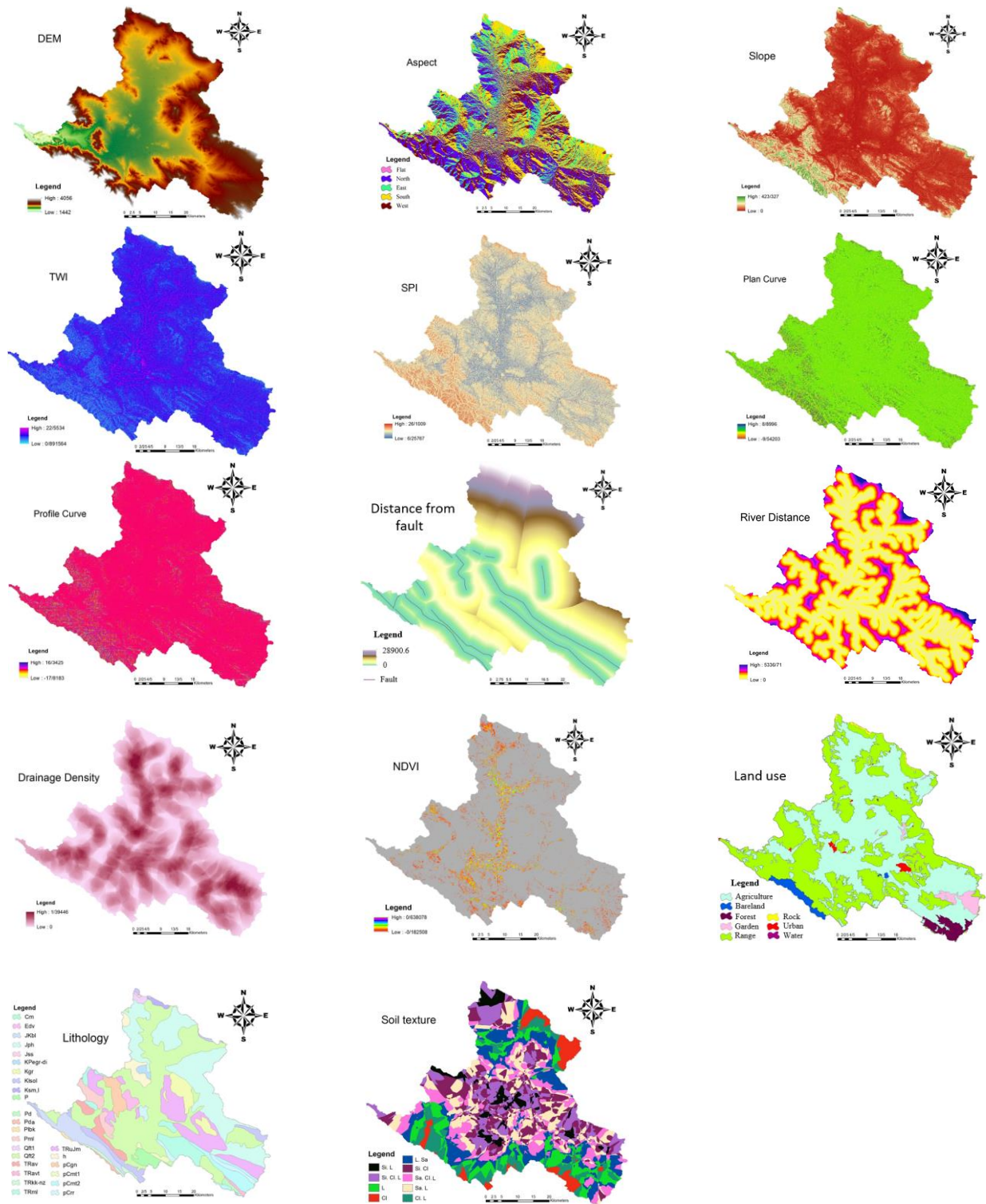
TP: نقاط مثبتی که در جای درست قرار گرفته‌اند

FP: نقاط مثبتی که در جای اشتباه قرار گرفته‌اند

FN: نقاط منفی که در جای اشتباه قرار گرفته‌اند

n: تعداد داده

منحنی ROC رایج‌ترین روش کمی صحت‌سنجی در مدل‌سازی‌های مکانی و پیش‌بینی پدیده‌های طبیعی است که بر اساس دو ضریب حساسیت و اختصاصی بودن ترسیم می‌شود. بعد از تعیین منحنی ROC بر اساس ضرایب مذکور، سطح زیر این منحنی نیز (نشانگر دقت خروجی نهایی پیش‌بینی مناطق مستعد نفوذپذیری) محاسبه گردید. محدوده شاخص سطح زیر منحنی، در حالت کلی بین صفر و ۱ بوده و مقادیر بالاتر از ۰/۷ نشان‌دهنده قابل قبول بودن پیش‌بینی‌های انجام شده توسط مدل می‌باشد (Liu et al., 2017; Sekertekin et al., 2017).



شکل ۲- نقشه لایه‌های محیطی استفاده شده در مدل مکسنت.

Fig. 2. Environmental factors used for maximum entropy modeling.

نتایج

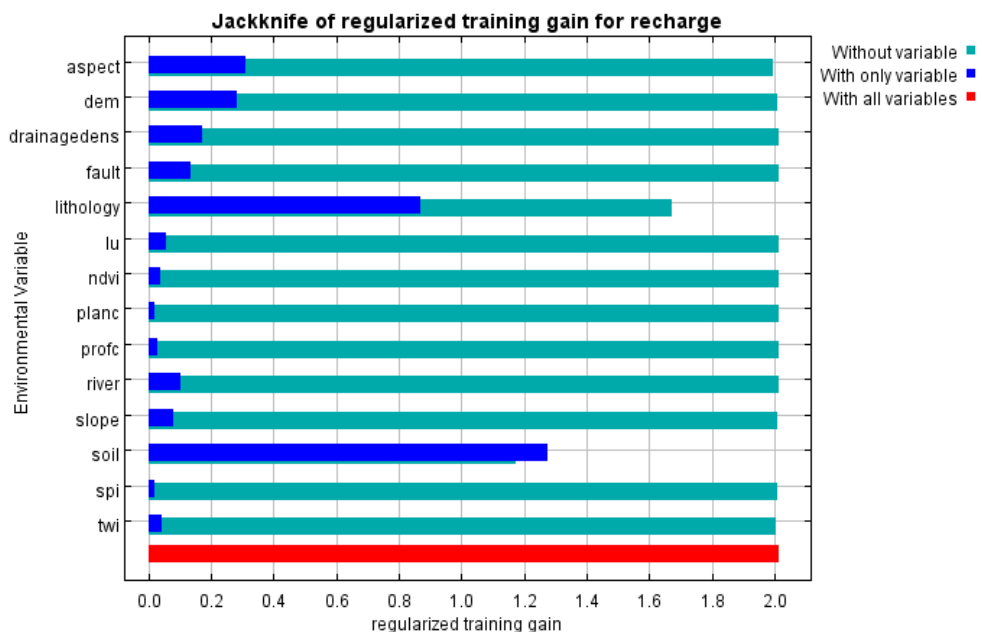
بر اساس اطلاعات میدانی از منطقه مطالعاتی موقعیت نقاط شاهد نفوذ و نیز شناسایی عوامل مؤثر در وقوع نفوذ در محیط نرم‌افزاری ArcGIS 10.6 اقدام به تهیه لایه‌های اطلاعاتی مربوط به هر یک از عوامل مؤثر در تغذیه زیرزمینی شد. آنالیز حساسیت مدل توسط آزمون جک‌نایف انجام شد که نتایج آن بصورت نمودار در بخش بعدی ارائه شده است. سپس با استفاده از منحنی عملکرد ROC نتایج کار، اعتبارسنجی شدند. برای این کار، از چند شاخص عملکرد دیگر استفاده شد و در نهایت نقشه پیش‌بینی مناطق دارای پتانسیل برای تغذیه سفره آب‌های زیرزمینی ارائه گردید. در ادامه نتایج مربوط به هر کدام از مراحل، ارائه و تشریح گردیده است.

آزمون جک‌نایف

آزمون جک‌نایف، شاخص تعیین اهمیت عوامل مؤثر در وقوع پدیده مورد بررسی می‌باشد که نشان می‌دهد از متغیرهای مستقل ورودی، چه عواملی بیشترین و چه عواملی کمترین تاثیر را دارند. این منحنی شامل سه حالت مختلف است. در حالت اول (خطوط آبی کم رنگ) که نشانه تاثیر همه ورودی‌ها بر پدیده مورد مطالعه بدون وجود لایه مشخص شده است، فاکتور بافت خاک دارای بیشترین اثر بر میزان نفوذپذیری می‌باشد که با حذف آن بیشترین کاهش در رخداد

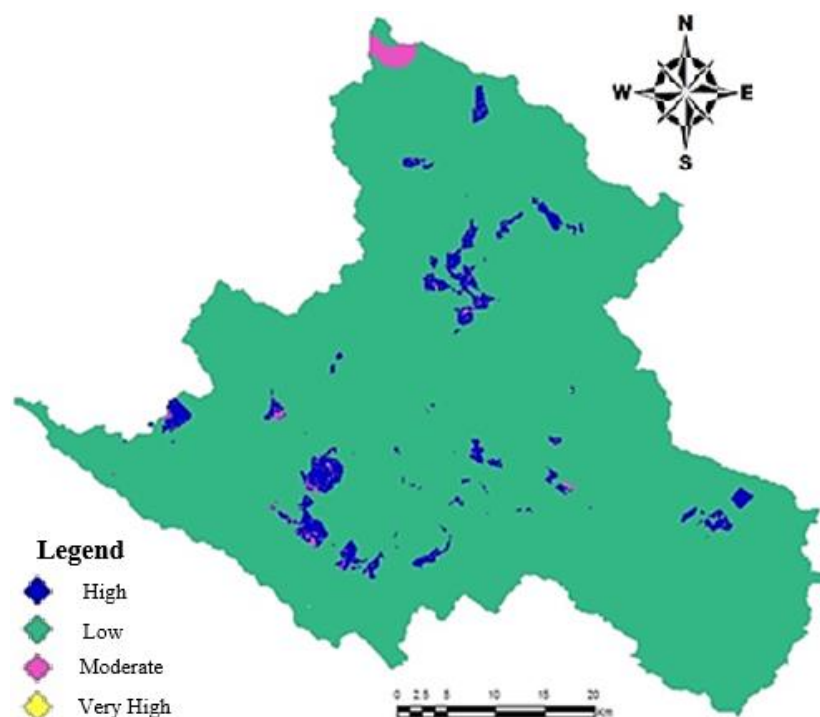
مورد بررسی (نفوذ) اتفاق می‌افتد. حالت دوم (خطوط آبی پر رنگ) که نشانه تاثیر آن فاکتور یا لایه بوده یا به عبارتی مربوط به زمانی است که مدل‌سازی تنها بر اساس یک متغیر انجام می‌شود و بر اساس آن میزان رخداد مورد بررسی برآورد می‌گردد. در این حالت نیز مهمترین متغیر برای وقوع پتانسیل تغذیه زیرزمینی بافت خاک و لیتولوژی است. حالت آخر (خط قرمز رنگ) نشان‌دهنده تاثیر توأم همه پارامترها یا لایه‌ها می‌باشد. نمودار جک‌نایف در شکل شماره ۲ نشان داده شده است.

در نهایت نقشه پتانسیل تغذیه آب‌های زیرزمینی حاصل از مدل‌سازی، با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.6 به چهار کلاس، دارای قابلیت نفوذپذیری کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد، طبقه‌بندی شد که در شکل شماره ۴ قابل مشاهده می‌باشد. مساحت مربوط به هر یک از چهار کلاس دارای قابلیت نفوذپذیری طبق شبیه‌سازی انجام یافته، محاسبه شد. نتایج نشان داد مناطق با نفوذپذیری بسیار زیاد، ۰/۷ کیلومتر مربع (۰/۰۲٪) از کل منطقه مورد مطالعه را در بر می‌گیرد. در حالی که منطقه با نفوذپذیری زیاد، متوسط و کم به ترتیب $78/4 \text{ km}^2$ (۳/۱٪)، $18/2 \text{ km}^2$ (۰/۷٪) و $2462/5 \text{ km}^2$ (۹۶/۱۸٪) در بر می‌گیرد (جدول شماره ۳).



شکل ۳- نمودار آزمون جک‌نایف نشان‌دهنده اهمیت لایه‌های ورودی مدل.

Fig. 3. Jackknife results of variable importance.



شکل ۴- مناطق مستعد تغذیه آب‌های زیرزمینی بر اساس مدل حداکثر انتروپی.

Fig. 4. GWRP areas in Marboreh watershed by using MaxENT model.

جدول ۳- سطح کلاس‌های مناطق دارای قابلیت نفوذپذیری بر اساس مدل حداکثر انتروپی.

Table 3. The area of GWRP classes by MaxEnt model.

Class	Area (Km ²)	Area (%)
Low	2462.5	96.18
Moderate	18.2	0.7
High	78.4	3.1
Very high	0.7	0.02

مستعد نفوذ بیشتر هستند و نیز با مطالعه Fagbohun (۲۰۱۸) در نیجریه که مشخص شد لایه لیتولوژی موثرترین فاکتور بر نفوذ بود، و با پژوهش صورت گرفته توسط Selvam و همکاران (۲۰۱۶) در هند که نشان داد زمین‌های کشاورزی، تراس‌های رودخانه‌ای و دشت‌ها دارای پتانسیل بالایی برای نفوذپذیری و در نتیجه تغذیه آب‌های زیرزمینی هستند، مطابقت دارد. همچنین با مطالعه انجام شده توسط Nasiri و همکاران (۲۰۱۳) در بخشی از استان فارس نیز که نشان داد مناطقی با زمین‌شناسی کواترنری و نیز شیب متوسط تا کم، دارای بیشترین اثر بر تغذیه آب‌های زیرزمینی می‌باشند، مطابق است.

حوزه مورد مطالعه عمدتاً کوهستانی و مرتفع بوده و بخش کمی از آن بصورت دشت می‌باشد. بیشترین پتانسیل برای نفوذ دادن آب و در نتیجه تغذیه آب‌های زیرزمینی، در قسمت‌های میانی حوزه که مناطق دشتی می‌باشند، مشاهده گردید. این مناطق بر اساس توضیحات فوق در رابطه با لایه‌های ورودی، مناطقی با درصد شیب کم، بافت عمدتاً شنی با زمین‌شناسی رسوبات کواترنری که جزو زمین‌های زراعی و مرتعی بودند، بیشترین پتانسیل را نشان دادند. این نتایج با مطالعات Huang و همکاران (۲۰۱۳) در مورد مکان‌یابی نقاط دارای پتانسیل تغذیه آب‌های زیرزمینی در تایوان که نشان داد مناطقی با شیب کم

اعتبارسنجی مدل

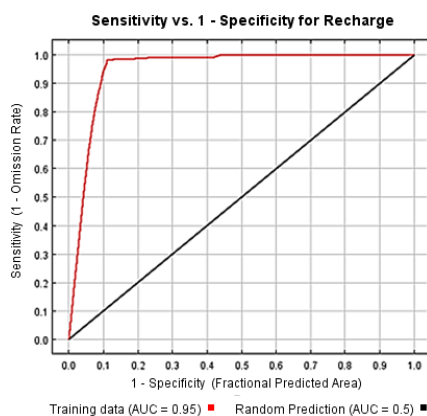
دقت پیش‌بینی نقشه نهایی نتایج حاصل از مدل با استفاده از منحنی ROC ارزیابی شد. حد مربوط به شاخص AUC و درجه اعتبار نتایج بر اساس آن در جدول شماره ۴ ارائه شده است. مقدار AUC برای مطالعه حاضر ۰/۹۵ محاسبه گردید که باتوجه به جدول ۴، نشان‌دهنده عالی بودن پیش‌بینی انجام شده توسط مدل می‌باشد (Marker et al., 2012; Liu et al., 2017; Sekertekin et al., 2017).

(al., 2017). منحنی ROC نقشه پیش‌بینی مناطق مستعد نفوذپذیری بصورت شماتیک در شکل شماره ۵ نشان داده شده است. مقادیر مربوط به دیگر شاخص‌های عملکرد بکار رفته در این پژوهش در جدول شماره ۶ ارائه شده است. با توجه به محدوده هر کدام از شاخص‌ها (جدول شماره ۵) و نیز مقادیر بدست آمده، بر اساس شاخص KP و TSS، در طبقه خوب و بر اساس شاخص CCI، در طبقه عالی ارزیابی شدند (Li et al., 2017; Rwanga and Ndambuki, 2017).

جدول ۴- محدوده اعتبارسنجی شاخص AUC.

Table 4. Threshold values for Area under the ROC (AUCROC).

Category	AUROC
Poor	0.5
Fair	0.7
Good	0.9
Excellent	> 0.9



شکل ۵- منحنی ROC نقشه پیش‌بینی مناطق مستعد نفوذپذیری بر اساس مدل حداکثر انتروپی.

Fig. 5. ROC curve for predicted areas of GWR potential base on MaxEnt model.

جدول ۵- محدوده اعتبارسنجی شاخص TSS و CCI.

Table 5. Threshold values for Cohen's kappa statistic (KP), true skill statistic (TSS) and correctly classified instances (CCI).

Category	KP	TSS	CCI
Excellent	0.8 - 1	0.8 - 1	0.8 - 1
Good	0.6 - 0.8	0.6 - 0.8	0.6 - 0.8
Fair	0.4 - 0.6	0.4 - 0.6	0.5 - 0.6
Poor	0.2 - 0.4	0.2 - 0.4	0.3 - 0.5
Fail	0 - 0.2	0 - 0.2	0 - 0.3

جدول ۶- مقادیر شاخص‌های عملکرد برای صحت سنجی نقشه‌های حضور و عدم حضور.

Table 6. The values of classifying model predictive accuracy.

Index	CCI (1-100)	TSS (± 1)	KP
Value	86.6	0.75	0.75

نتیجه گیری

باقیمانده آب‌های زیرزمینی طی دوره‌های مرطوب برای استفاده بعدی در طول دوره‌های خشک، می‌توان کمبود آب را تا حدی جبران کرد. از مزایای تغذیه و ذخیره‌سازی زیرزمینی، تقویت آبخوان‌های تخلیه شده و مدیریت اضافه برداشت، افزایش قابلیت اطمینان تامین آب در طول دوره خشکسالی، ذخیره‌سازی‌های بزرگ بدون ساخت سد جدید، کاهش تلفات تبخیر، اتصال مجدد آب‌های سطحی و زیرزمینی و ایجاد ذخایر آب‌های استراتژیک برای آینده می‌باشد. امید است نتایج حاصل از این بررسی در برنامه‌ریزی‌های آتی به منظور مدیریت صحیح منابع ارزشمند آب‌های زیرزمینی مورد توجه قرار گیرد. در این مطالعه یک سیستم استاتیک پهنه‌بندی پتانسیل نفوذ بدون در نظر گرفتن واحد زمان و وابستگی زمانی استفاده شد که در نهایت با توجه به نتایج وضعیت پایدار را نشان می‌دهد. با این حال، فعالیت‌های بشری سبب ایجاد تغییر در سناریوهای کاربری اراضی و یا استخراج آب شده و پویایی سیستم آب زیرزمینی را تغییر خواهد داد.

تشکر و قدردانی

از زحمات جناب آقای دکتر ایرج ویس‌کرمی، عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، که در جمع‌آوری برخی داده‌های مورد نیاز این تحقیق همکاری کردند، نهایت تقدیر و تشکر را داریم.

تغییرات و نوسانات اقلیمی، رشد و توسعه جوامع و صنایع، افزایش مصرف آب، افزایش روند دما و کاهش روند بارش خصوصا در مناطق خشک و نیمه خشک مانند ایران و در نتیجه ناکافی بودن منابع آب سطحی، باعث افزایش بهره‌وری‌های مختلف از منابع آب زیرزمینی و بحران‌های کم آبی شده است. عدم توجه و مدیریت صحیح این منابع منجر به تخریب و نابودی تدریجی آنها نیز خواهد شد. لذا توجه به تغذیه آبخوان‌ها و تقویت این منابع، از جمله نگرانی‌های اصلی بسیاری از جوامع می‌باشد. با توجه به این امر، در پژوهش حاضر، با بررسی عوامل مختلف موثر بر میزان نفوذپذیری و قابلیت تغذیه آب‌های زیرزمینی، با استفاده از مدل‌سازی با مدل حداکثر انتروپی، اقدام به پتانسیل‌یابی نقاط مستعد تغذیه در حوزه آبخیز ماربره واقع در استان لرستان شد. با توجه به نتایج حاصل از این فرایند و شاخص‌های بکار گرفته شده به منظور ارزیابی این یافته‌ها، از جمله منحنی ROC و چند شاخص عملکرد، نتایج شبیه‌سازی با در نظر گرفتن محدوده هر شاخص، قابل قبول و عالی ارزیابی گردید. با نظر به محاسبات صورت گرفته در این تحقیق و منابع مختلف مرتبط با این موضوع، در میان گزینه‌های موجود به منظور تقویت منابع آب، مانند بازیافت آب، نمک‌زدایی و ...، تغذیه و ذخیره‌سازی آب زیرزمینی روش بالقوه‌ای برای دستیابی به اهداف تامین آب در آینده به نظر می‌رسد. با ذخیره

منابع

- Achouri, M., Gifford, G.F., 1984. Spatial and seasonal variability of field measured infiltration rates on a rangeland site in Utah. *Journal of Range Management* 37, 451- 455.
- Agrawal, D., Singh. J.K., Kumar, A., 2005. Maximum entropy-based conditional probability distribution runoff model. *Biosystem Engineering* 90(1), 103-113.
- Althuwaynee, O.F., Pradhan. B., Park. H.J., Lee. J.H., 2014. A novel ensemble bivariate statistical evidential belief function with knowledge-based analytical hierarchy process and multivariate statistical logistic regression for landslide susceptibility mapping. *Catena* 11(4), 21-36.
- Arshad, M., 2015. Assessing the feasibility of managed aquifer recharge under uncertainty. *The Australian National University*, 1-152.
- Banavar, J.R., Maritan, A., Volkov, I., 2010. Applications of the principle of maximum entropy: from physics to ecology. *Journal of Physics: Condensed Matter* 22(6), p.063101.
- Behyari, M., Alizadeh, A., Mahmoudian, Sh., 2017. Evaluation of the effect of active structures on the risk of land subsidence using multivariate decision models. *Journal of Advanced Applied Geology*, 24, 49-56 (In Persian).
- Beven, K., Freer, J., 2001. A dynamic TOPMODEL, *Hydrological Processes*, 15 (10), 1993-2011.
- Boria, R.A., Olson, L.E., Goodman, S.M., Anderson, R.P., 2014. Spatial filtering to reduce sampling bias can improve the performance of ecological niche models. *Ecological Modelling* 275, 73-77.
- Chowdhury, A., Jha, M.K., Chowdhury, V.M., 2011. Delineation of groundwater recharge zones and identification of artificial recharge sites in West Medinipur District, West Bengal using RS, GIS and MCDM techniques. *Environmental Earth Science* 59 (6), 1209-1222.
- 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), 881-898.

- Dillon, P., 2005. Future management of aquifer recharge. *Hydrogeology Journal* 13, 313-316.
- Evans, I.S., 1972. General Geomorphology, Derivatives of altitude and descriptive statistics. In R.J. Chorley (Ed.), *Spatial Analysis in Geomorphology*, London, 17-90.
- 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), 69.
- Ghorbani Vagheyi, H., 2004. Evaluation of changes in soil erodibility factor in USLE and RUSLE models using GIS in northeastern soils of Lorestan province, Tarbiat Modarres University, M.Sc. thesis (In Persian).
- Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M.F., van Beek, L.P., 2012. Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature* 488(7410), 197-200.
- Guo, C., Montgomery, D.R., Zhang, Y., Wang, K., Yang, Z., 2015. Quantitative assessment of landslide susceptibility along the Xianshuihe fault zone, Tibetan Plateau, China. *Geomorphology* 248, 93-110.
- Hoffman, D.J., Narumalani, S., Mishra, D.R., Merani, P., Wilson, R.J., 2008. Predicting Potential Occurrence and Spread of Invasive Plant Species along the North Platte River, Nebraska. *Invasive Plant Science and Management* 1, 359-367.
- Huang, C.C., Yeh, H.F., Lin, H.I., Lee, S.T., Hsu, K.C., Lee, C.H., 2013. Groundwater recharge and exploitative potential zone mapping using GIS and GOD techniques. *Environmental Earth Sciences* 68(1), 267-280.
- Jafari, A., Mirzaei, R., Zamani Ahmad Mahmoudi, R., 2016. modeling the distribution of Isfahan rams and ewes in the Tang Sayad protected area based on the oblique improvement of attendance data and selection of appropriate variables using maximum entropy. *Applied Ecology*, 5(15), 39-48 (In Persian).
- 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 Repots* 11, 1- 18.
- Khalasi Ahvazi, L., Zare Chahouki, M., Hosseini, Z., 2015. 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* 8(8), 50 (In Persian).
- Konikow, L.F., Kendy, E., 2005. Groundwater depletion: A global problem. *Hydrogeology Journal* 13(1), 317-320.
- Lee, S., Min, K., 2001. Statistical analysis of landslide susceptibility at Youngin, Korea. *Environmental Geology* 40, 1095-1113.
- 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), 479.
- 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), 1675-1696.
- Lucà, F., Conforti, M., Robustelli, G., 2011. Comparison of GIS-based gullying susceptibility mapping using bivariate and multivariate statistics: Northern Calabria, South Italy. *Geomorphology* 134(3), 297-308.
- Malekirad, Z., Baharvand, S., Nourizdan, A., Amini Kia, A., 2010. Geological study of Lorestan plains and its effect on the quality and quantity of water resources using satellite data, Conference on Geological Regions of Iran Zamin Plateau, Zarand Islamic Azad University, 411-417 (In Persian).
- 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), 530-540.
- Mehraban, M., Golkarian, A., Khosravi, Kh., 2018. Evaluation of trench erosion susceptibility using maximum entropy model (Case study: Shorluq region of Khorasan Razavi province), 3rd National Conference on Soil Conservation and Watershed Management , 964-975 (In Persian).
- Mir Abbasi Najafabadi, R., Din Pajhooh, Y., Fakheri Fard, A., 2011. 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*, 15 (58), 39-51 (In Persian).

- Montgomery, D.R., Dietrich, W.E., 1994. A physically based model for the topographic control on shallow land sliding. *Water Resources Research* 30, 1153-1171.
- 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 in groundwater potential mapping. *Water Resources Management* 29(14), 5217-5236.
- 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), 171-186.
- Nasiri, H., Bolorani, A.D., Sabokbar, H.A.F., Jafari, H.R., Hamzeh, M., Rafii, Y., 2013. Determining the most suitable areas for artificial groundwater recharge via an integrated PROMETHEE II-AHP method in GIS environment (case study: Garabayghan Basin, Iran). *Environmental Monitoring and Assessment* 185(1), 707-718.
- Oh., H.J., Kim, Y.S., Choi, J.K., Park, E., Lee, S., 2011. GIS mapping of regional probabilistic groundwater potential in the area of Pohang City, Korea. *Journal of Hydrology* 399, 158-172.
- Oliyayi, A., Parvian, N., Khsravi, O., 2017. 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* 24, 143-158 (In Persian).
- Ozdemir, A., 2011a. GIS-based groundwater spring potential mapping in the Sultan Mountains (Konya, Turkey) using frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods and their comparison. *Journal of Hydrology* 411, 290-308.
- Ozdemir, A., 2011b. Using a binary logistic regression method and GIS for evaluating and mapping the groundwater spring potential in the Sultan Mountains (Aksehir, Turkey). *Journal of Hydrology* 405, 123-136.
- Paige, G., Stone, J., 1996. Measurement methods to identify and quantify spatial variability of infiltration on rangelands. In: *ARS Workshop on "Real World" Infiltration*, 109-121.
- Piroozinejad, S., Soleimani, K., Habibnejhad, M., Zakerinejad, R., 2018. Prediction of gully erosion using Alos sensors and Maxent model in Alvand basin. *Iranian Remote Sensing & GIS* 9(4), 95-110.
- Pourghasemi, H.R., Beheshtirad, M., 2014. Assessment of a data-driven evidential belief function model and GIS for groundwater potential mapping in the Koohrang Watershed, Iran. *Geocarto International* 30(6), 662-685.
- Pourghasemi, H.R., Mohammady, M., Pradhan, B., 2012. Landslide susceptibility mapping using index of entropy and conditional probability models in GIS: Safarood Basin, Iran. *Catena* 97, 71-84.
- Pourtaghi, Z.S., Pourghasemi, H.R., 2014. GIS-based groundwater spring potential assessment and mapping in the Birjand Township, southern Khorasan Province, Iran. *Hydrogeology Journal* 22, 643-662.
- Prasad, R.K., Mondal, N.C., Banerjee, P., Nandakumar, M.V., Singh, V.S., 2008. Deciphering potential groundwater zone in hard rock through the application of GIS. *Environmental Geology* 55 (3), 467-475.
- Qureshi, M.E., Reeson, A., Reinelt, P., Brozović, N., Whitten, S., 2012. Factors determining the economic value of groundwater. *Hydrogeology* 21(3), 1-9.
- Razandi, Y., Farokhzadeh, B., Yousefzadeh Chabok, M., Teimurian, T., 2017. Applying Maximum Entropy algorithm (MAXENT) in Groundwater potential mapping, Case study: Hamedan-Bahar Plain. *Journal of Irrigation and Water Engineering* 8(29), 110-123 (In Persian).
- 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. *Arabian Journal of Geoscience* 7(2), 725-742.
- Rittel, H.W., Webber, M. M., 1973. Dilemmas in a general theory of planning. *Policy Sciences* 4(2), 155-169.
- 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), 611.
- Saha, A.K., Gupta, R.P., Sarkar, I., Arora, M.K., Csaplovics, E., 2005. An approach for GIS-based statistical landslide susceptibility zonation with a case study in the Himalayas. *Landslides* 2(1), 61-69.

- Salmani, H., Saber Chenari, K., Rostami Khalaj, M., Jahandideh, O., 2016. Performance Comparison of Information Value and Density Area Methods for Spring Existence Potential in Ghurchay Watershed, Golestan Province. *Journal of Hydrogeology* 1(1), 12- 28 (In Persian).
- Sangab Zagros Consulting Engineering Company (SZCEC), 2012. Comprehensive studies of Azna and Aligodarz watershed, Lorestan Province, Project report; Regional Water Company of Lorestan Province: Lorestan, Iran (In Persian).
- Sekertekin, A., Marangoz, M., Akcin, H., 2017. Pixel-based classification analysis of land use land cover using Sentinel-2 and Landsat-8 data. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 42, 91-93.
- Selvam, S., Dar, F.A., Magesh, N.S., Singaraja, C., Venkatramanan, S., Chung, S.Y., 2016. Application of remote sensing and GIS for delineating groundwater recharge potential zones of Kovilpatti Municipality, Tamil Nadu using IF technique. *Earth Science Informatics* 9(2), 137-150.
- Shannon, C., 1948. A mathematical theory of communication, *Bulletin System. Technology Journal* 27, 379-423.
- Shayan, S., Ahmadabadi, A., Yamani, M., Farajzadeh Asl, M., Kabir, A., 1390. Evaluation of the efficiency of geomorphometric indices by Wood method in the classification of landforms in dry areas. *The Journal of Spatial Planning* 16 (1), 105-120 (In Persian).
- Soares, P.V., Pereira, S.Y., Simoes, S.J.C., de Paula Bernardes, G., Barbosa, S.A., Trannin, I.C.B., 2012. The definition of potential infiltration areas in Guaratingueta watershed, Paraíba do Sul Basin, Southeastern Brazil: an integrated approach using physical and land-use elements. *Environmental Earth Science* 67, 1685-1694.
- Sullivan, M., Warwick, J.J., Tyler, S.W., 1996. Quantifying and delineating spatial variations of surface infiltration in a small watershed. *Journal of Hydrology* 181, 149-168.
- Van Schaik, N., 2009. Spatial variability of infiltration patterns related to site characteristics in a semi-arid watershed. *Catena* 78, 36- 47.
- Wada, Y., Van Beek, L.P.H., Sperna Weiland, F.C., Chao, B.F., Wu, Y.H., Bierkens, M.F.P., 2012. Past and future contribution of global groundwater depletion to sea-level rise. *Geophysical Research Letters* 39(9), p.09402.
- Wada, Y., Van Beek, L.P.H., Van Kempen, C.M., Reckman, J.W.T.M., Vasak, S., Bierkens, M.F.P., 2010. Global depletion of groundwater resources. *Geophysical Research Letters* 37(20), p.20402.
- Zabihi, M., Pourghasemi, H., Behzadfar, M., 2015. Preparation of groundwater potential map using Shannon entropy and stochastic forest models in Bojnourd plain. *Echo Hydrology* 2, 221-232 (In Persian).
- Zektser, I.S., 2012. Investigation of Transboundary Aquifers in Russia: Modern State and Main Tasks, *Proceedings of NATO Advanced Research Workshop on Sustainable Use and Protection of Groundwater Resources - Transboundary Water Management*, pp.79-85.

