

Prediction model for archaeological site locations- comparison of maximum entropy and Weights-of-Evidence: A case study of North Khorasan province

Javad Koohpayma¹ , Meysam Argany²  

1. Department of RS and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

Email: javad.koohpayma@ut.ac.ir

2. (Corresponding Author) Department of RS and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

Email: argany@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article History:

Received:

23 November 2024

Received in revised form:

25 February 2025

Accepted:

4 April 2025

Available online:

10 May 2025

Keywords:

Prediction Map,
Weights-of-evidence,
Maximum Entropy,
Archaeological settlements,
North Khorasan.

ABSTRACT

The protection and identification of archaeological sites have become increasingly important due to threats posed by urbanization, agricultural expansion, and infrastructure development. While traditional field surveys are effective, they are often time-consuming and costly. Spatial predictive modeling using environmental variables and known site data provides an efficient tool for identifying areas with high archaeological potential. This study compares two predictive modeling methods—Weights of Evidence (WoE) and Maximum Entropy (MaxEnt)—for identifying archaeological sites in North Khorasan Province, Iran. This region holds archaeological significance following the recent discovery of an Achaemenid palace near Ashkhaneh. A dataset of 980 archaeological sites was randomly divided into training (70%) and validation (30%) sets. Six environmental variables—elevation, slope, distance from rivers, vegetation cover, proximity to settlements, and geology—were processed in a GIS environment at a 30-meter resolution. The WoE model was implemented using a Bayesian approach and conditional independence testing (Chi-square), while MaxEnt was applied without requiring variable independence. Results showed that MaxEnt outperformed WoE, with training and validation success rates of 88.65% and 88.20%, respectively, compared to 83.26% and 83.00% for WoE. Proximity to settlements and rivers were the most influential predictive factors. Due to its flexibility and independence from variable assumptions, MaxEnt is more suitable for complex environments, whereas WoE remains effective for smaller-scale projects due to its simplicity. Future research is recommended to incorporate hybrid models and high-resolution datasets to enhance prediction accuracy.

Cite this article: Koohpayma, J., & Argany, M. (2025). Prediction model for archaeological site locations-comparison of maximum entropy and Weights-of-Evidence: A case study of North Khorasan province. *Physical Geography Research Quarterly*, 57 (1), 1-17.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2025.355689.1007752>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

Extended Abstract

Introduction

In recent decades, the protection and identification of archaeological sites have become increasingly critical due to the growing threats posed by urbanization, agricultural expansion, and infrastructure development. Conventional archaeological field surveys, while effective, are typically time-consuming, labor-intensive, and costly. Additionally, unintentional damage to undiscovered sites during construction or land conversion is a growing concern. To address these challenges, predictive spatial modeling has emerged as a powerful tool in archaeological research. By integrating environmental factors and the known locations of archaeological sites into statistical and geospatial models, researchers can generate potential maps that estimate the likelihood of undiscovered settlements. These maps are invaluable for guiding targeted surveys, preserving cultural heritage, and allocating research resources more effectively.

This study aims to compare two prominent predictive modeling approaches, Weights of Evidence (WoE) and Maximum Entropy (MaxEnt), in their ability to identify areas with high potential for archaeological settlements. The research focuses on North Khorasan Province in northeastern Iran, a region of emerging archaeological significance following the discovery of a large Achaemenid structure near the city of Ashkhaneh. Given the limited number of previously documented sites in the area, especially from the Achaemenid period, the region offers a compelling test case for evaluating the utility of predictive modeling in uncovering hidden archaeological landscapes.

Methodology

The research utilized a dataset comprising 980 known archaeological sites in North Khorasan. These were randomly divided into training (70%) and validation (30%) subsets. Six environmental variables, elevation, slope, distance from rivers, distance from vegetation, distance from villages, and geology, were selected based on their hypothesized influence on ancient human settlement patterns. All

environmental data were resampled to a 30-meter spatial resolution and processed using GIS tools. For the WoE model, a Bayesian approach was employed, requiring an initial independence test among variable pairs using the chi-square method. Based on the test results, six combinations of conditionally independent variables were selected to create potential maps. Each map was generated by overlaying weighted raster layers corresponding to the chosen variables. In contrast, the MaxEnt model did not require conditional independence among variables. It utilized all selected environmental factors simultaneously, applying the principle of maximum entropy to estimate the most uniform probability distribution consistent with the input data. MaxEnt's flexibility makes it particularly suitable for complex ecological or archaeological contexts where variable interdependence is likely to occur. To ensure consistency between the two modeling approaches, the same variable combinations used in the WoE model were applied in MaxEnt. For both models, success rates were calculated by measuring the proportion of known site locations falling within high-probability areas on the generated maps.

Results and discussion

The analysis revealed that MaxEnt consistently outperformed WoE in terms of predictive accuracy. In the best-performing scenario, MaxEnt achieved a training success rate of 88.65% and a validation rate of 88.20%, while WoE's top result was 83.26% for training and 83.00% for validation. This difference, although not drastic, suggests that MaxEnt may be more reliable in identifying areas with high archaeological potential, particularly in data-rich or complex environments. Variable contribution analysis in MaxEnt showed that proximity to villages and rivers was the most significant predictor of site locations. In some combinations, these two variables accounted for over 90% of the model's predictive power. This result aligns with archaeological theory, which emphasizes access to water, arable land, and inter-settlement connectivity as key factors influencing ancient settlement

decisions. Slope and elevation were moderately influential, while geological factors played a relatively minor role.

Visual inspection of the predictive maps further demonstrated the superiority of MaxEnt. The maps it produced featured clearer transitions between high- and low-potential areas, as well as more precise delineation of low-probability zones. This level of detail is essential for guiding field surveys and minimizing effort in areas with low archaeological potential. While WoE also produced reasonable results, its performance was limited by the requirement for variable independence and its comparatively lower spatial resolution in modeling subtle environmental gradients. From a practical standpoint, WoE has the advantage of simplicity. It requires less computational power and is easier to interpret, making it suitable for smaller-scale projects or regions with limited data availability. However, the methodological constraints inherent to WoE, particularly the assumption of conditional independence, can reduce model flexibility and accuracy when dealing with complex real-world environments.

Conclusion

This comparative study demonstrates that MaxEnt offers a more robust and flexible framework for predictive archaeological modeling in North Khorasan. Its ability to incorporate multiple environmental variables without imposing statistical independence assumptions, along with its transparent variable contribution metrics, makes it especially advantageous for exploratory research and regional planning. Moreover, the superior predictive accuracy of MaxEnt suggests that it can play a critical role in heritage management, conservation planning, and the efficient allocation of archaeological survey resources. Despite these advantages, WoE should not be overlooked. Its lower computational requirements and intuitive Bayesian foundation still make it a valuable tool, particularly in resource-constrained settings. Future research should consider hybrid approaches that combine the strengths of both methods, for instance,

using WoE to narrow down variable sets before applying MaxEnt for final predictions. Further studies should also incorporate high-resolution satellite imagery, socio-cultural and historical datasets, and alternative modeling techniques such as machine learning and fuzzy logic. Validation of models in different regions and landscape types will be essential for assessing the transferability and robustness of the predictive frameworks established in this study.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

مدل پیش‌بینی برای نقاط باستانی - مقایسه روش ماکزیمم آنتروپی و وزن‌های شواهد مطالعه موردی: استان خراسان شمالی

✉ جواد کوه‌پیما^۱، میثم ارگانی^۲

۱- گروه سنجش‌ازدور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: javad.koohpayma@ut.ac.ir
۲- نویسنده مسئول، گروه سنجش‌ازدور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: argany@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۰۹/۰۳

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۳/۱۲/۰۷

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۱/۱۵

تاریخ چاپ:

۱۴۰۴/۰۲/۲۰

واژگان کلیدی:

نقشه پتانسیل،
وزن‌های شواهد،
ماکزیمم آنتروپی،
استقرارگاه‌های باستانی،
خراسان شمالی.

حفاظت و شناسایی محوطه‌های باستانی با توجه به تهدیدات ناشی از شهرسازی، گسترش کشاورزی و توسعه زیرساخت‌ها اهمیت روزافزونی یافته است. کاوش‌های میدانی سنتی، اگرچه مؤثر، اما زمان‌بر و پرهزینه‌اند. مدل‌سازی پیش‌بینی فضایی با استفاده از عوامل محیطی و داده‌های مکان‌های شناخته‌شده، ابزاری کارآمد برای شناسایی مناطق با پتانسیل باستانی بالاست. این مطالعه به مقایسه دو روش مدل‌سازی پیش‌بینی، وزن‌های شواهد (WoE) و ماکزیمم آنتروپی (MaxEnt)، در شناسایی محوطه‌های باستانی در استان خراسان شمالی، ایران، می‌پردازد. این منطقه به دلیل کشف اخیر یک کاخ هخامنشی در نزدیکی آشخانه از اهمیت باستانی برخوردار است. در این پژوهش، داده‌های ۹۸۰ محوطه باستانی به صورت تصادفی به مجموعه‌های آموزشی (۷۰٪) و اعتبارسنجی (۳۰٪) تقسیم شدند. شش متغیر محیطی شامل ارتفاع، شیب، فاصله از رودخانه‌ها، پوشش گیاهی، آبادی‌ها و زمین‌شناسی با رزولوشن ۳۰ متر در محیط GIS پردازش شدند. مدل WoE با رویکرد بیزین و آزمون استقلال شرطی (کای اسکوتر) و مدل MaxEnt بدون نیاز به استقلال متغیرها اجرا شدند. نتایج نشان داد MaxEnt با نرخ موفقیت آموزشی ۸۸٫۶۵٪ و اعتبارسنجی ۸۸٫۲۰٪ نسبت به WoE (۸۳٫۲۶٪ و ۸۳٫۰۰٪) عملکرد بهتری دارد. نزدیکی به آبادی‌ها و رودخانه‌ها مهم‌ترین عوامل پیش‌بینی کننده بودند. MaxEnt به دلیل انعطاف‌پذیری و عدم نیاز به استقلال متغیرها، برای محیط‌های پیچیده مناسب‌تر است، درحالی‌که WoE به دلیل سادگی برای پروژه‌های کوچک‌تر کارآمد است. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی از روش‌های ترکیبی و داده‌های با وضوح بالا برای بهبود دقت استفاده شود.

استناد: کوه‌پیما، جواد و ارگانی، میثم. (۱۴۰۴). مدل پیش‌بینی برای نقاط باستانی - مقایسه روش ماکزیمم آنتروپی و وزن‌های شواهد مطالعه موردی: استان خراسان شمالی. مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۷ (۱)، ۱۷-۵۱.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2025.355689.1007752>

مقدمه

کاوش‌های سیستماتیک میدانی برای کشف سایت‌های باستانی کاری پرهزینه، زمان‌بر و طاقت فرساست. بنابراین مدل‌های پیش‌بینی در باستان‌شناسی می‌توانند به ارزیابی و شناسایی مناطق با پتانسیل باستان‌شناسی بالا کمک و روند تحقیقات میدانی را سرعت بخشیده (Vaughn & Crawford, 2009; Mehrer & Wescott, 2005) و زمان، انرژی و هزینه‌های لازم برای اکتشاف را کاهش دهند. از طرفی مدل‌های پیش‌بینی در جلوگیری از تخریب محوطه‌های باستانی بسیار مورد توجه قرار گرفته است (Kohler & Parker, 1986)، مخصوصاً در سال‌های اخیر که به دلیل افزایش جمعیت و روند رو به رشد نیاز به مواد غذایی بسیاری از محوطه‌های باستانی برای تبدیل آن‌ها به مزارع کشاورزی در خطر تخریب قرار دارند (Fry et al., 2004).

دو فرض اساسی در مدل‌های پیش‌بینی باستان‌شناسی در نظر گرفته می‌شود، اول اینکه موقعیت استقرارگاه‌های باستانی تصادفی نیستند و انتخاب آن‌ها تحت شرایط طبیعی خاص و دسترسی به منابع طبیعی انتخاب می‌شوند. دوم اینکه متغیرهای محیطی موجود در محوطه‌های باستانی هنوز هم در چشم‌انداز وجود دارند (Wachtel et al., 2018). به عبارت دیگر مدل پیش‌بینی تأثیر عوامل محیطی در موقعیت‌های شناخته را محاسبه کرده و سپس آن عوامل را در سایر مناطق اعمال می‌کند که می‌توان آن را به صورت نقشه گرافیکی برای یافتن سایت‌های باستانی ناشناخته به کار برد (Kvamme, 2005). در این مقاله به مقایسه دو روش پر کاربرد در تهیه نقشه‌های پتانسیل پرداخته شده و قدرت و ضعف آن‌ها در پیش‌بینی موقعیت‌های باستانی در استان خراسان شمالی بررسی می‌شود. به دلیل توانایی روش‌های مذکور در مدیریت عوامل محیطی و داده‌های موجود، به طور گسترده‌ای در پیش‌بینی مکان‌های باستان‌شناسی استفاده می‌شوند. MaxEnt برای مجموعه داده‌های پیچیده با اطلاعات محدود کارایی خوبی دارد و شناخت دقیقی در مورد توزیع سایت‌های باستانی ارائه می‌دهد. در عوض روش WoE، ساده‌تر بوده و به محاسبات کمتری نیاز دارد و تفسیرهای مفیدی از روابط عوامل مؤثر ارائه می‌دهد. هر دو روش به زمینه‌های باستان‌شناسی مرتبط بوده و در مطالعات مشابه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مقایسه این دو روش، تفاوت بین مدل‌سازی پیشرفته و ساده را نشان داده و تأثیر آن را در مدل‌سازی نقاط باستانی برجسته می‌نماید.

مدل‌سازی برای پیش‌بینی سکونتگاه‌های باستانی به ابزاری حیاتی برای شناسایی مکان‌های سکونتگاهی بالقوه قبل از انجام کار میدانی تبدیل شده است، و باعث صرفه‌جویی در زمان، منابع و کاهش آسیب‌های ناخواسته به مکان‌های کشف نشده می‌شود. در چند دهه گذشته، روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی احتمال حضور سایت‌های باستانی بر اساس عوامل محیطی و جغرافیایی ایجاد شده است. رویکردهای اولیه در پیش‌بینی مکان‌های باستانی بر اساس متخصصان بود، و باستان‌شناسان با ارزیابی‌های کیفی زمین و نزدیکی به منابع طبیعی مانند آب، زمین‌های قابل کشت و مواد خام اقدام پیش‌بینی موقعیت احتمالی سکونتگاه‌ها می‌کردند. این رویکردها، اغلب به دلیل ذهنی بودن و دشواری محدود به مناطق بزرگ می‌شدند. با ظهور سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS)، مدل‌سازی فضایی محوطه‌های باستان‌شناسی محبوبیت پیدا کردند. GIS به محققان اجازه می‌دهد تا عوامل محیطی مختلفی (به عنوان مثال، شیب، فاصله تا منابع آب) را در مدل‌های آماری که احتمال سکونتگاه‌ها را پیش‌بینی می‌کنند، بگنجانند. افزایش قدرت محاسباتی و دسترسی به داده‌های مکانی، افق‌های جدیدی را برای مدل‌سازی پیش‌بینی‌های پیچیده‌تر باز کرد.

یکی از روش‌های آماری پرکاربرد WoE است که در اصل برای اکتشافات معدنی توسعه یافت اما بعدها برای پیش‌بینی مکان‌های باستان‌شناسی نیز استفاده شد. WoE یک رویکرد بیزین است که از توزیع مکان‌های شناخته شده برای

محاسبه اهمیت نسبی عوامل محیطی استفاده می‌کند. گودچیلد^۱ (۲۰۰۰) و کوام^۲ (۱۹۹۰) نشان دادند که این روش در تولید نقشه‌های احتمال دارای دقت آماری بالایی است. باین‌حال، WoE مستلزم فرض استقلال شرطی بین عوامل مؤثر است، و لذا هنگام استفاده از عوامل محیطی که دارای روابط پیچیده‌ای هستند، یک محدودیت به شمار می‌رود. مدل‌سازی ماکزیمم آنتروپی به‌عنوان یک ابزار قدرتمند برای پیش‌بینی موقعیت، به‌ویژه در زمینه‌های اکولوژیکی و باستان‌شناسی استفاده می‌شود. MaxEnt با داده‌های حاضر^۳ بدون هیچ مشکلی کار می‌کند، که این امر برای مطالعات باستان‌شناسی که در آن داده‌های به‌ندرت داده‌های غایب وجود دارد، بسیار ایده‌آل است. MaxEnt توسط فیلیپس و همکاران (۲۰۰۶)، برای مطالعات مختلفی از جمله شناسایی زیستگاه‌های مناسب در اکولوژی و پیش‌بینی استقرارگاه‌های باستانی به کار گرفته شده است. این روش توزیع احتمال وقوع سایت را با به حداکثر کردن آنتروپی مشروط به محدودیت‌های محیطی تخمین می‌زند و روشی مؤثر برای مدل‌سازی سایت‌های باستانی بدون نیاز به داده‌های غایب ارائه می‌دهد.

هر دو روش WoE و MaxEnt در تحقیقات باستان‌شناسی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که هرکدام دارای نقاط قوت متفاوتی هستند. WoE نسبتاً ساده، قابل تفسیر و از نظر محاسباتی سبک است، اما استقلال بین متغیرها را فرض می‌کند. از سوی دیگر، MaxEnt انعطاف‌پذیرتر است و قادر به مدیریت تعاملات پیچیده بین عوامل محیطی است، اما نیاز به پردازش داده‌های پیچیده‌تری دارد. مطالعاتی مانند وراگن و همکاران^۴ (۲۰۱۳) و برگلوند و همکاران^۵ (۲۰۱۴) این روش‌ها را مقایسه کرده‌اند و اغلب دریافت‌اند که MaxEnt در محیط‌های کم داده‌تر عملکرد بهتری دارد، درحالی‌که WoE به دلیل سهولت استفاده در برخی موارد به کار گرفته می‌شود.

بالینکه دو روش مذکور در مطالعات زیادی مورد بررسی قرار گرفته‌اند، اما هنوز دقت نتایج آن‌ها در زمینه باستان‌شناسی در مقایسه باهم مخصوصاً در شرایط محیطی مختلف مورد سؤال است. علاوه بر این، نیاز است که تعادل بین پیچیدگی محاسباتی یک روش و استفاده آسان روش دیگر (تعادل بین کیفیت و سرعت) در دنیای واقعی مورد بررسی قرار گیرند. هدف این مطالعه پر کردن این شکاف با مقایسه MaxEnt و WoE در پیش‌بینی مکان‌های استقرارگاه‌های باستانی، با استفاده از مجموعه‌ای از عوامل محیطی است.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه (استان خراسان شمالی) در شمال-شرقی ایران بین عرض جغرافیایی ۳۶/۵۶ و ۳۸/۲۸ درجه و طول جغرافیایی ۵۵/۸۵ و ۵۸/۴۳ درجه قرار دارد. منطقه آب‌وهوای نیمه‌خشک با زمستان‌های سرد و تابستان‌های نسبتاً گرم دارد و بیشترین ارتفاع آن ۳۰۶۶ متر و کمترین ارتفاع ۳۱۳ متر است. پرآب‌ترین رودخانه منطقه اترک نام دارد که در جهت شرق غرب امتداد دارد. استان خراسان شمالی را می‌توان به‌عنوان منطقه‌ای ناشناخته در زمینه باستان‌شناسی در نظر گرفت اما پس از کشف یک کاخ هخامنشی با وسعت ۱۱۰ هکتار در منطقه ریوی در نزدیکی شهر آشخانه توجهات زیادی را به خود جلب کرد. قبل از آن هیچ آثاری از دوره هخامنشی در شمال شرق ایران کشف نشده بود. متأسفانه بیش از سی درصد از فضای این محوطه به دلیل خاک‌برداری‌ها تخریب شده است. شکل (۱) منطقه مورد مطالعه و نقاط

1. Goodchild

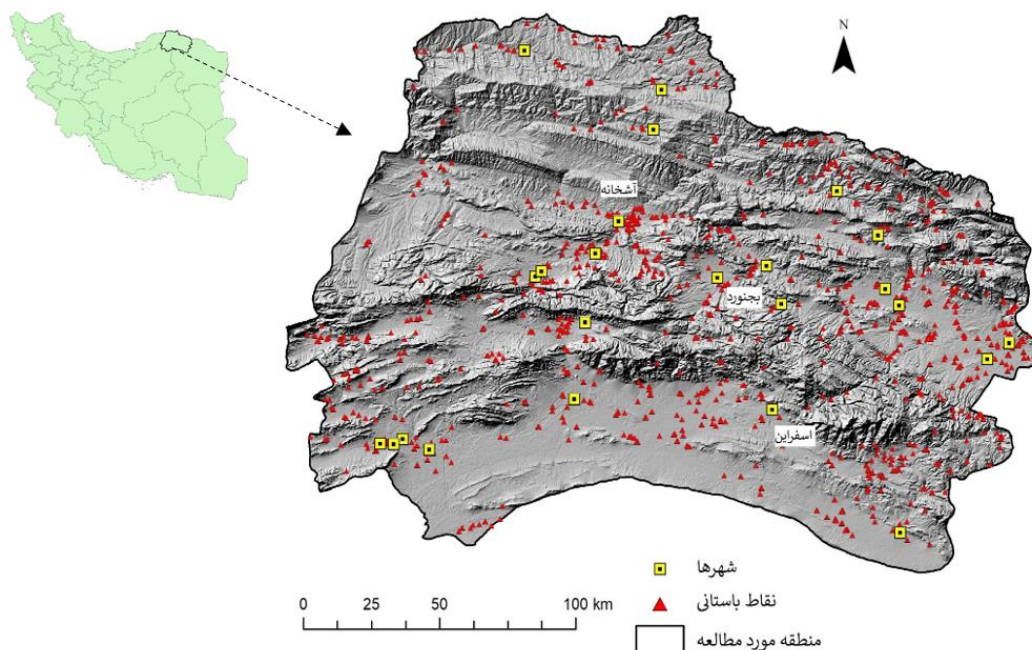
2. Kvamme

۳. در اینجا از داده‌هایی که از وجود آن‌ها مطلع هستیم، به‌عنوان داده حاضر و داده‌هایی که از وجود آن‌ها مطلع نیستیم داده غایب یاد شده است.

4. Verhagen et al.

5. Berglund et al.

باستانی را نشان می‌دهد. بیشترین تراکم استقرارگاه‌های باستانی در مناطق مرکزی استان پراکنده شده‌اند.



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه و نقاط باستانی

روش پژوهش

تعداد ۹۸۰ نقطه باستانی در منطقه مورد مطالعه شناسایی شده است که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. ۷۰٪ از نقاط به عنوان نقاط آموزشی و ۳۰٪ نیز به عنوان نقاط آزمایشی در نظر گرفته شدند. در پیش‌بینی موقعیت سایت‌های باستانی، عوامل محیطی در مکان‌گزینی سکونتگاه‌ها بسیار مهم هستند. به عنوان مثال، مکان‌های مرتفع به دلیل شرایط دفاعی و ارتفاعات پایین به خاطر دسترسی به آب و زمین‌های حاصلخیز انتخاب می‌شوند. زمین‌های مسطح و کم شیب برای کشاورزی و ساخت سکونتگاه مناسب بوده و باعث جذب مردم به این موقعیت‌ها می‌شود. دسترسی به منابع آب برای آشامیدن، کشاورزی و حمل و نقل یک عنصر حیاتی در انتخاب سکونتگاه‌ها است. پوشش گیاهی نیز منبع خوبی برای دسترسی به مواد اولیه برای ساخت مسکن، کشاورزی و دامداری است. سکونتگاه‌ها اغلب اطراف سکونتگاه‌های دیگر برای اهداف تجاری، امنیت و تعاملات اجتماعی ساخته می‌شوند، و در نهایت، زمین‌شناسی یک منطقه، دسترسی به مواد لازم برای ساخت سکونتگاه، منابع آب و مناسب بودن زمین برای کشاورزی را مشخص می‌کند. عوامل محیطی تأثیرگذار (از لحاظ آماری) در منطقه با استفاده از معادله کای اسکوئر (χ^2) مشخص شدند که در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. عوامل محیطی مؤثر در مکان‌گزینی استقرارگاه‌های باستانی

عامل تأثیرگذار	کمترین مقدار	بیشترین مقدار	متوسط	انحراف معیار
ارتفاع (متر)	۳۱۰	۳۰۶۶	۱۳۲۴	۴۲۵
شیب (درجه)	۰	۸۳	۱۰	۹
فاصله از رودخانه (متر)	۰	۷۸۰۰	۱۴۷۰	۱۱۶۲
فاصله از پوشش گیاهی (متر)	۰	۱۸۱۵۶	۱۱۷۴	۱۸۶۳
فاصله از آبادی‌ها (متر)	۰	۱۳۷۲۴	۲۵۸۳	۱۸۶۰
نقشه زمین‌شناسی (کد بدون بعد)	۱	۵۲	-	-

برای نقشه ارتفاع از مدل ارتفاعی SRTM با رزولوشن ۳۰ متری استفاده شد این اندازه برای کل نقشه‌ها اعمال شد، شیب و جهت شیب منطقه نیز استخراج گردید. کای اسکوتر (χ^2) مشخص کرد که بین جهت شیب و موقعیت قرارگیری نقاط باستانی رابطه ضعیفی برقرار است لذا جهت شیب از محاسبات کنار گذاشته شد. رودخانه‌های منطقه نیز از مدل ارتفاعی استخراج شدند زیرا داده‌های موجود از رودخانه‌ها دارای خطاهای متعددی بودند. پوشش گیاهی منطقه با استفاده از تصاویر لندست ۸ برای اواسط خرداد سال ۱۳۹۷ که دارای کمترین میزان ابر بودند استخراج شدند. نقاط با شاخص پوشش گیاهی بزرگ‌تر از ۰/۲۵ جزو محدوده دارای پوشش گیاهی در نظر گرفته شدند. موقعیت آبادی‌ها از سازمان آمار دریافت و با استفاده از تصاویر گوگل ارث صحت سنجی شدند. فواصل اقلیدسی از رودخانه، پوشش گیاهی و آبادی‌ها استخراج شدند. نقشه زمین‌شناسی نیز از وبسایت سازمان زمین‌شناسی دانلود و تصحیحات لازم برای یکسان‌سازی با مرز منطقه مورد مطالعه انجام شد

مدل وزن‌های شواهد (WOE^1)

روش وزن‌های شواهد از روش‌های پرکاربرد و مهم داده مبنا به شمار می‌رود و اساس آن بر احتمال وجود یا عدم وجود یک عارضه در حضور یک عامل دیگر است (Bonham-Carter, 1994). از این روش در مطالعات متعددی مانند زمین‌لغزش (Zhang et al., 2023)، ارزیابی کیفیت رسوبات (Chapman et al., 2002)، مخاطرات طبیعی (Martin et al., 2018)، نقشه‌برداری آب‌های زیرزمینی (Thanh et al., 2022) و تولید نقشه پتانسیل نقاط باستانی (Betts et al., 2024) استفاده شده است. این روش یک فرآیند مدل‌سازی در یک چارچوب احتمالی است که هر یک از نقشه‌های معیار بر اساس مدل احتمالی بیزین وزن دهی می‌شوند. به عبارت دیگر، در این روش ابتدا یک احتمال اولیه در نظر گرفته شده و سپس تأثیر عامل‌های تأثیرگذار به صورت افزایش یا کاهش این احتمال در نظر گرفته می‌شود. مثلاً اگر ۱۰۰ نقطه در یک محدوده با ۱۰۰۰۰ پیکسل داشته باشیم احتمال اولیه برابر یک درصد خواهد بود، سپس هر یک از عوامل تأثیرگذار دیگر مانند نزدیک بودن به رودخانه یا شیب در هر نقطه به صورت یک ضریب (بزرگ‌تر یا کوچک‌تر از یک)، احتمال اولیه را افزایش یا کاهش می‌دهد.

در حالت کلی اگر B یک عامل تأثیرگذار و D یک نقطه شناخته شده باشد، احتمال شرطی به صورت زیر خواهد بود:

$$P(B|D) = P(D \cap B) / P(D) \quad \text{معادله (۱)}$$

و وزن دهی برای وجود یک نقطه به صورت معادله زیر خواهد بود:

$$\text{Logit}(D|B) = \text{Logit}(D) + W^+ \quad \text{معادله (۲)}$$

که در معادله ۲ Logit لگاریتم طبیعی است. وزن دهی برای عدم وجود یک نقطه نیز به صورت معادله ۳ خواهد بود:

$$\text{Logit}(D|\bar{B}) = \text{Logit}(D) + W^- \quad \text{معادله (۳)}$$

در معادلات (۲) و (۳) $+W$ وزن مثبت و $-W$ وزن منفی را برای هر عامل نشان می‌دهد. اگر یک عامل دارای همبستگی مثبت با یک عارضه باشد وزن مثبت یک عدد مثبت و وزن منفی یک عدد منفی خواهد بود ولیکن اگر این همبستگی منفی باشد برعکس خواهد شد. وزن‌های برای معیار موردنظر با معادله زیر تعیین خواهد شد:

$$W_f = W^+ - W^- \quad \text{معادله (۴)}$$

معادله‌های مذکور فقط برای یک معیار هستند حال اگر چندین معیار وجود داشته باشند به صورت زیر خواهند بود:

$$\text{Logit}(D|B_1 \cap B_2 \cap B_3 \cap \dots B_n) = \text{Logit}(D) + \sum W_i^+ \quad \text{معادله (۵)}$$

$$\text{Logit}(D|\bar{B}_1 \cap \bar{B}_2 \cap \bar{B}_3 \cap \dots \bar{B}_n) = \text{Logit}(D) + \sum W_i^- \quad \text{معادله (۶)}$$

اما معادله‌های (۵) و (۶) در صورتی می‌توانند برای وزن دهی استفاده شوند که معیارهای B_1 تا B_n به صورت دو به دو مستقل شرطی باشند. استقلال شرطی در صورتی برقرار است که تساوی زیر را داشته باشیم. به عبارت دیگر دو معادله (۵) و (۶) وقتی برقرار هستند که داشته باشیم:

برای تعیین استقلال شرطی، همبستگی شرطی دو معیار با استفاده از جدول ۱ محاسبه می‌شود. برای هر جفت از معیارها مقادیر مورد انتظار و مشاهده شده اندازه‌گیری شده، سپس مقدار کای اسکوتر (χ) محاسبه می‌شود.

جدول ۲. روابط بین جفت‌ها برای تست استقلال شرطی معیارها

	B_1 Present	B_1 Absent	Totals
B_2 Present	$P(B_1 \cap B_2 \cap D)$	$P(\bar{B}_1 \cap B_2 \cap D)$	$P(B_2 \cap D)$
B_2 Absent	$P(B_1 \cap \bar{B}_2 \cap D)$	$P(\bar{B}_1 \cap \bar{B}_2 \cap D)$	$P(\bar{B}_2 \cap D)$
Totals	$P(B_1 \cap D)$	$P(\bar{B}_1 \cap D)$	$P(D)$

مقدار کای اسکوتر (χ) از معادله (۸) قابل محاسبه است.

$$\chi^2 = \sum_{t=1}^m \frac{(O_t - E_t)^2}{E_t} \quad \text{معادله (۸)}$$

در نهایت نقشه‌های وزن دار که دارای استقلال شرطی هستند روی هم گذاری می‌شوند. برای جزئیات بیشتر به (Dahal et al., 2008) مراجعه شود.

مدل ماکزیمم آنتروپی

مدل سازی ماکزیمم آنتروپی از دهه ۱۹۶۰ در موضوعات مختلفی مانند پردازش تصویر (Gull & Skilling, 1984)، زبان شناسی (Berger et al., 1996)، مطالعه توزیع جمعیت شهری (Haynes & Storbeck, 1978) و مطالعات باستان شناسی (Muttuqin, 2019; Li et al., 2009; Johnson, 2019) مورد استفاده قرار گرفته است. آنتروپی توسط ریاضیدان آمریکایی کلود شانون فرمول بندی شد که به صورت رابطه زیر نوشته می‌شود:

$$\text{Entropy} = - \sum_x P(x) \ln(P(x)) \quad \text{معادله (۹)}$$

از آنجایی که احتمال همیشه عددی کوچک تر از یک است و لگاریتم آن منفی خواهد بود یک منفی قبل از علامت سیگما قرار داده می‌شود تا رابطه همیشه یک عدد مثبت باشد. در معادله فوق x متغیری است که موقعیت یک نقطه باستانی را نشان می‌دهد. منشأ حداکثر آنتروپی (رسیدن به ماکزیمم بی نظمی) در نظریه داده‌ها و مکانیک آماری مورد مطالعه قرار گرفت و سپس به سرعت در سایر موضوعات استفاده شد. این مدل یک تابع توزیع تقریباً یکنواخت را با در نظر گرفتن حداکثر آنتروپی برای هر عامل تأثیرگذار برآورد می‌کند به طوری که مقدار پیش‌بینی شده با مقدار مشاهده شده کاملاً مطابقت داشته باشد (Märker & Bolus, 2018).

آنتروپی به معنی بی نظمی یا آزادی است و فرض اساسی این است که پدیده‌های طبیعی تمایل به بی نظمی دارند، مگر اینکه تلاشی در جهت مخالف آن انجام شود. به عبارت دیگر، انسان‌های باستان سکونتگاه‌های خود را به صورت جهت دار انتخاب می‌کرده‌اند و موقعیت مکانی استقرارگاه‌ها تصادفی نیست. با این حال، ما انتظار داریم در جهت غیر از آن پدیده آزادی یا تصادفی بودن حفظ شده باشد. به عنوان مثال اگر یک رودخانه را به عنوان پدیده طبیعی در نظر بگیریم تمایل

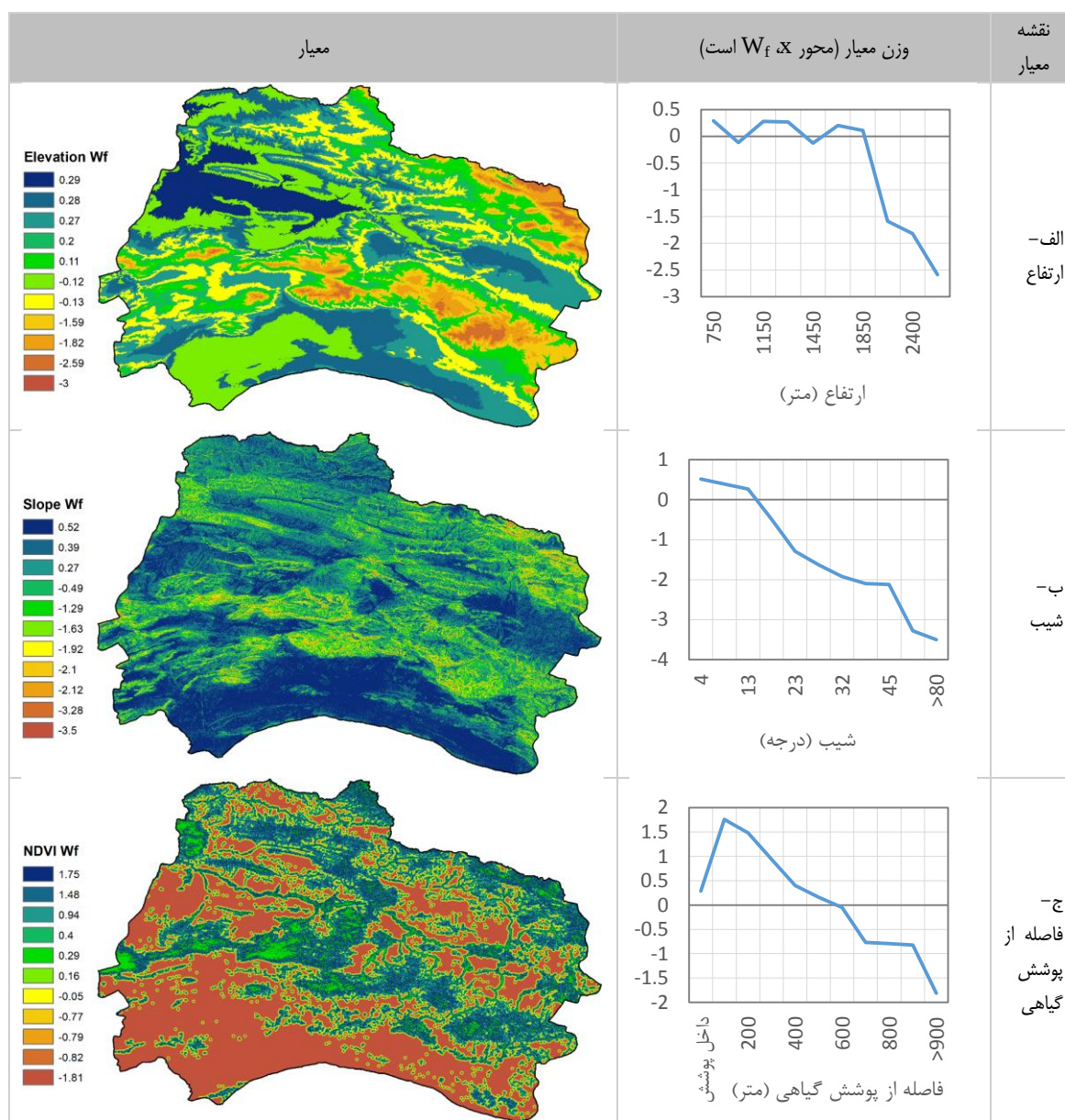
مردم برای ایجاد سکونتگاه به نزدیک بودن به رودخانه است اما انتظار بر این است که در امتداد رودخانه سکونتگاه‌ها به‌طور تصادفی پراکنده شوند. با انتخاب توزیعی که انتظارات آن با انتظارات مشاهدات منطبق باشد، مؤلفه‌های جهت‌دار برآورد می‌شوند. سپس با انتخاب توزیعی که بیشترین آنتروپی را دارد، اطمینان حاصل می‌شود که همه ملاحظات دیگر به‌صورت تصادفی باقی می‌مانند و هیچ تأثیر دیگری بر نقشه وجود ندارد.

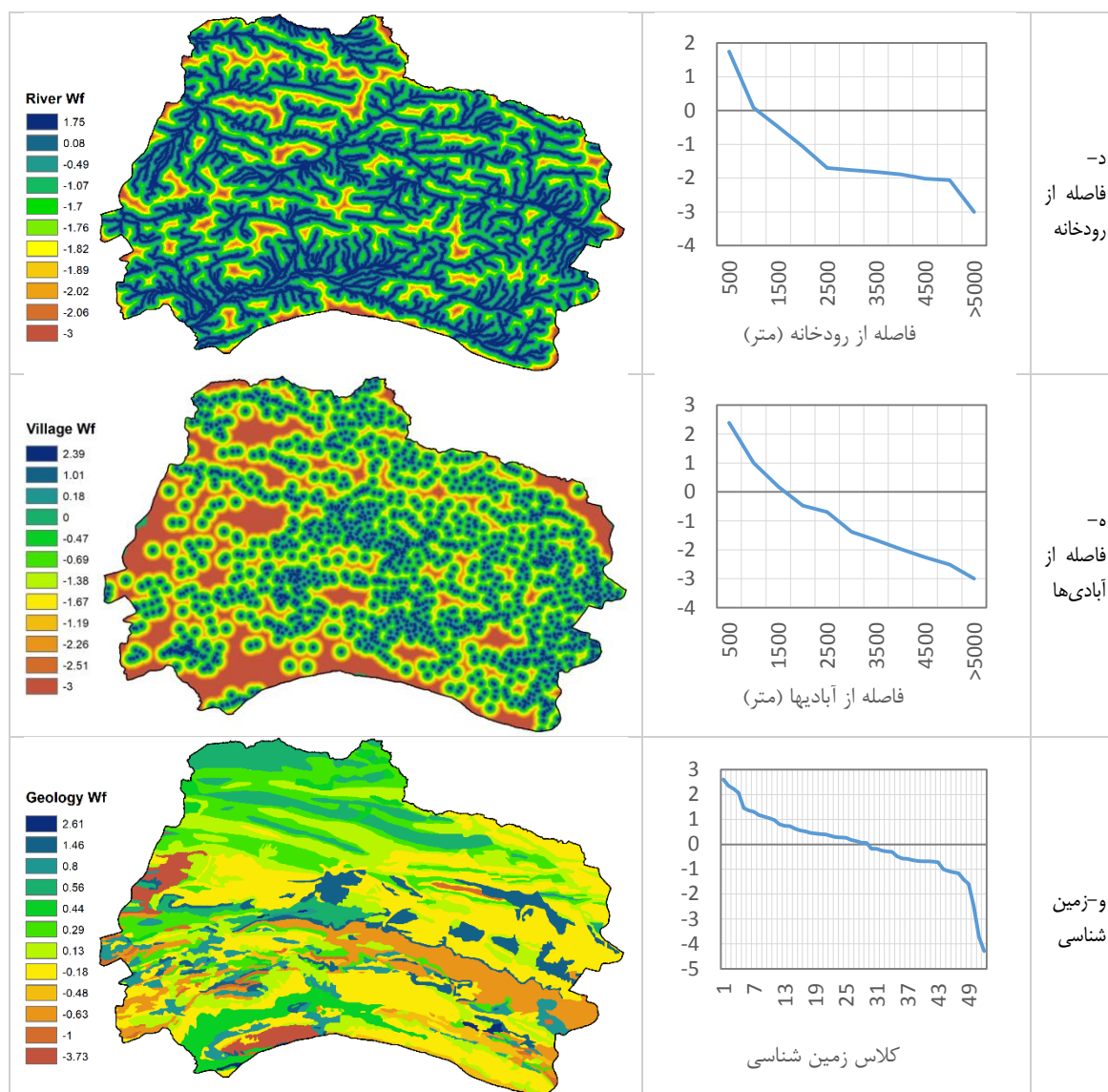
یافته‌ها

وزن دهی شهودی

وزن و نقشه‌های معیار

با استفاده از معادلات (۲)، (۳) و (۴) وزن معیارها و نقشه‌های معیار تهیه شدند. شکل ۲ وزن معیارها در زیرمعیارها و نقشه‌های وزن دهی شده معیارها را نشان می‌دهد.





شکل ۲. وزن و نقشه‌های معیار برای عوامل محیطی مؤثر در منطقه

معیارهای مستقل شرطی و ترکیبات مجاز

برای داده‌های محیطی مؤثر در جدول ۲، شرط استقلال شرطی با استفاده از جدول ۱ محاسبه شدند. عدد بحرانی برای سطح اطمینان ۹۹ درصد برای کای اسکوتر (χ) با درجه آزادی یک برابر ۶٫۶۳۵ است بنابراین هرگاه عدد کای اسکوتر (χ) کوچک‌تر از این عدد بحرانی باشد دو معیار را می‌توان مستقل شرطی در نظر گرفت. جدول ۳ کای اسکوتر (χ) محاسبه‌شده برای هر جفت از معیارها را نشان می‌دهد.

جدول ۳. مقادیر کای اسکوتر (χ) برای استقلال شرطی معیارها (جفت‌های دارای * مستقل شرطی هستند)

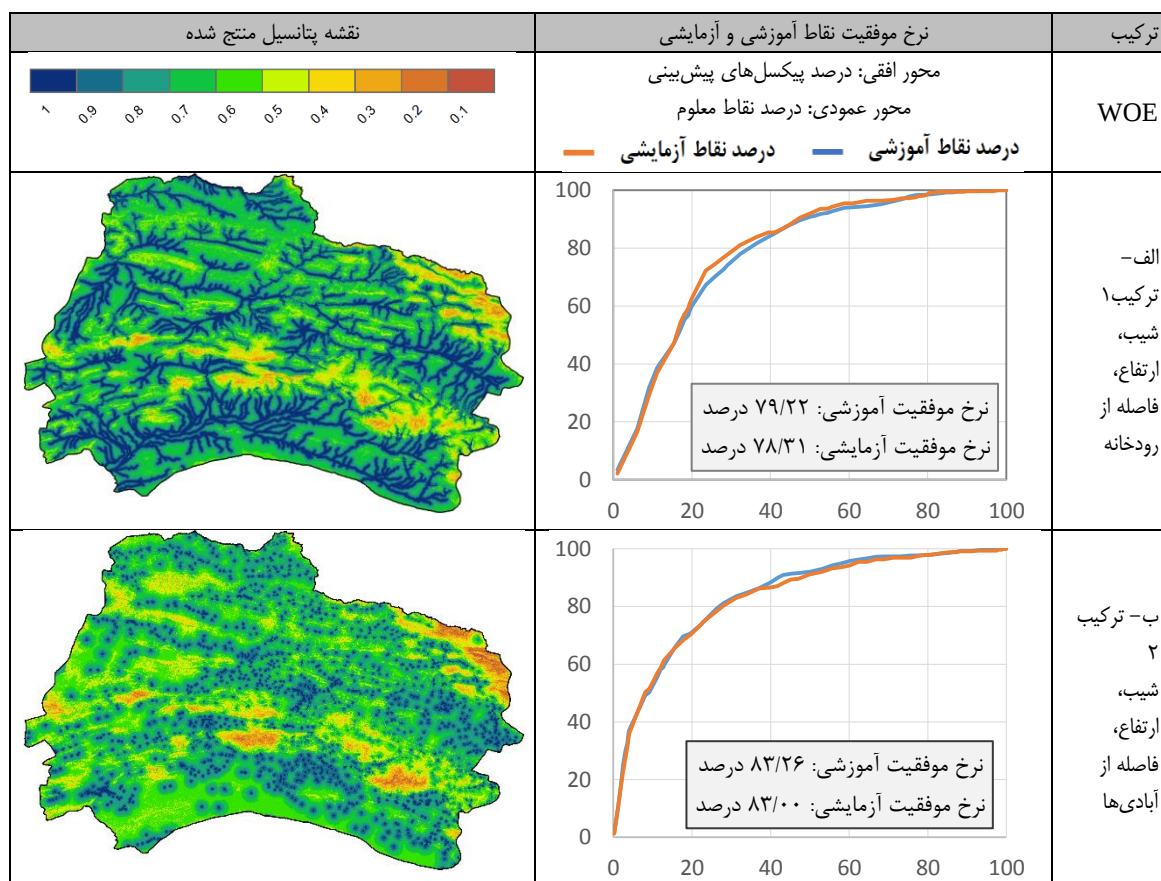
معیار	ارتفاع	زمین‌شناسی	فاصله از آبادی‌ها	فاصله از رودخانه	شیب
فاصله از پوشش گیاهی	0.02*	2.08*	49.66	14.74	0.4*
شیب	3.7*	1.38*	1.93*	2.55*	
فاصله از رودخانه	2.69*	0.98*	7.75		
فاصله از آبادی‌ها	0.11*	1.03*			
زمین‌شناسی	34.17				

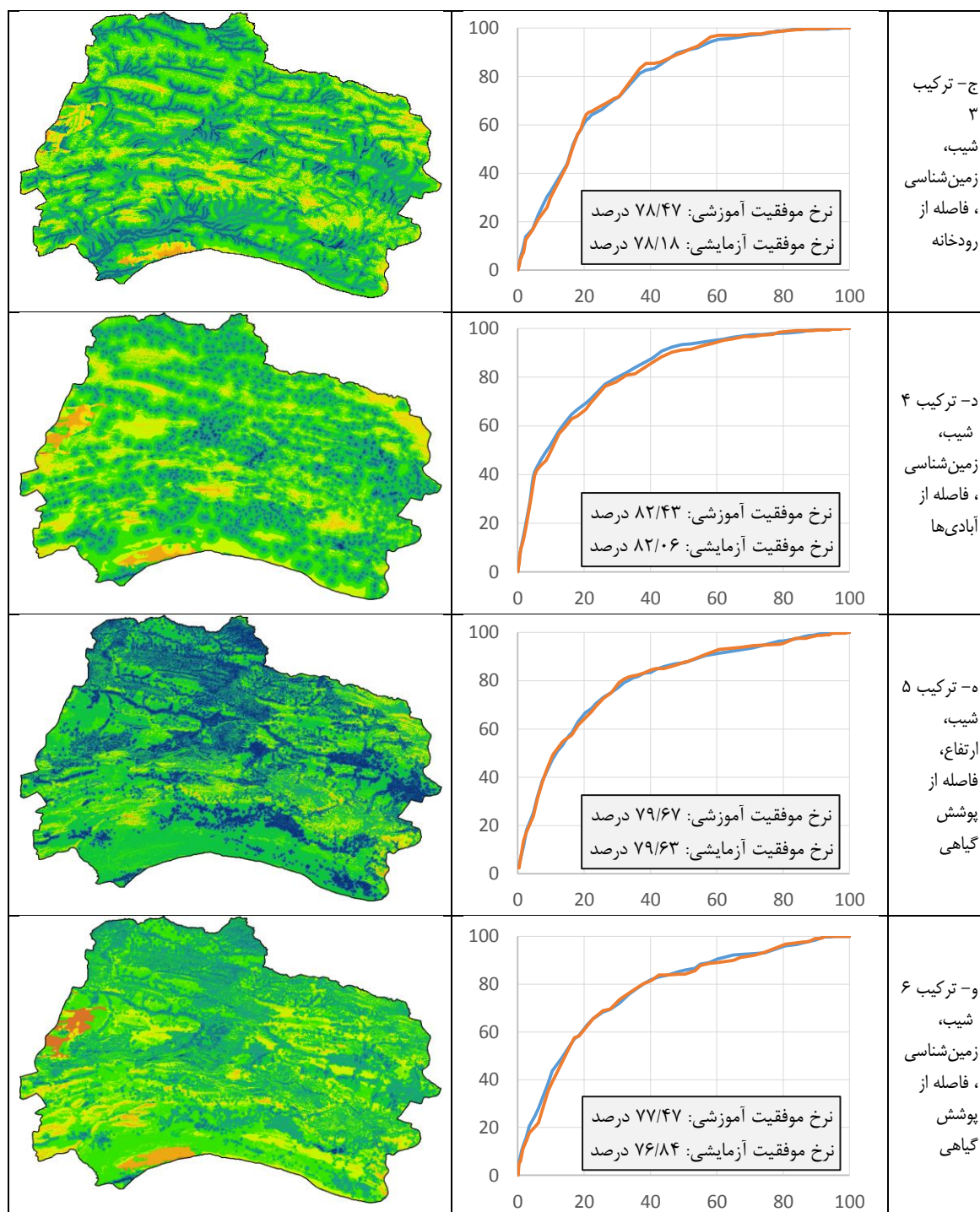
طبق جدول ۳ هر جفت از معیارها که دارای عدد کمتر از ۶,۶۳۵ هستند می‌توانند در رابطه وزن دهی (۵) و (۶) استفاده شوند. با استفاده از این جدول شش ترکیب می‌توان تشکیل داد که اجزای آن‌ها دو به دو مستقل شرطی هستند که در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴. ترکیبات دارای استقلال شرطی دو به دو

ترکیب ۱	شیب	ارتفاع	فاصله از رودخانه
ترکیب ۲	شیب	ارتفاع	فاصله از آبادی‌ها
ترکیب ۳	شیب	فاصله‌ها از رودخانه	زمین‌شناسی
ترکیب ۴	شیب	فاصله از آبادی‌ها	زمین‌شناسی
ترکیب ۵	شیب	ارتفاع	فاصله از پوشش گیاهی
ترکیب ۶	شیب	زمین‌شناسی	فاصله از پوشش گیاهی

نقشه‌های معیار به صورت روی هم گذاری رستری با هم جمع و ضرایب آن‌ها نرمال شده و بین صفر تا یک قرار گرفتند. برای مقایسه میزان پیش‌بینی‌کنندگی هر کدام از ترکیبات از روش نرخ موفقیت استفاده شد. نرخ موفقیت هر کدام از مدل‌ها بیان می‌کند که چند درصد از نقاط باستانی معلوم، در پیکسل‌هایی با بالاترین احتمال قرار دارند. نرخ موفقیت برای نقاط آموزشی و آزمایشی به همراه نقشه‌های پتانسیل در شکل‌های ۳ آورده شده است.



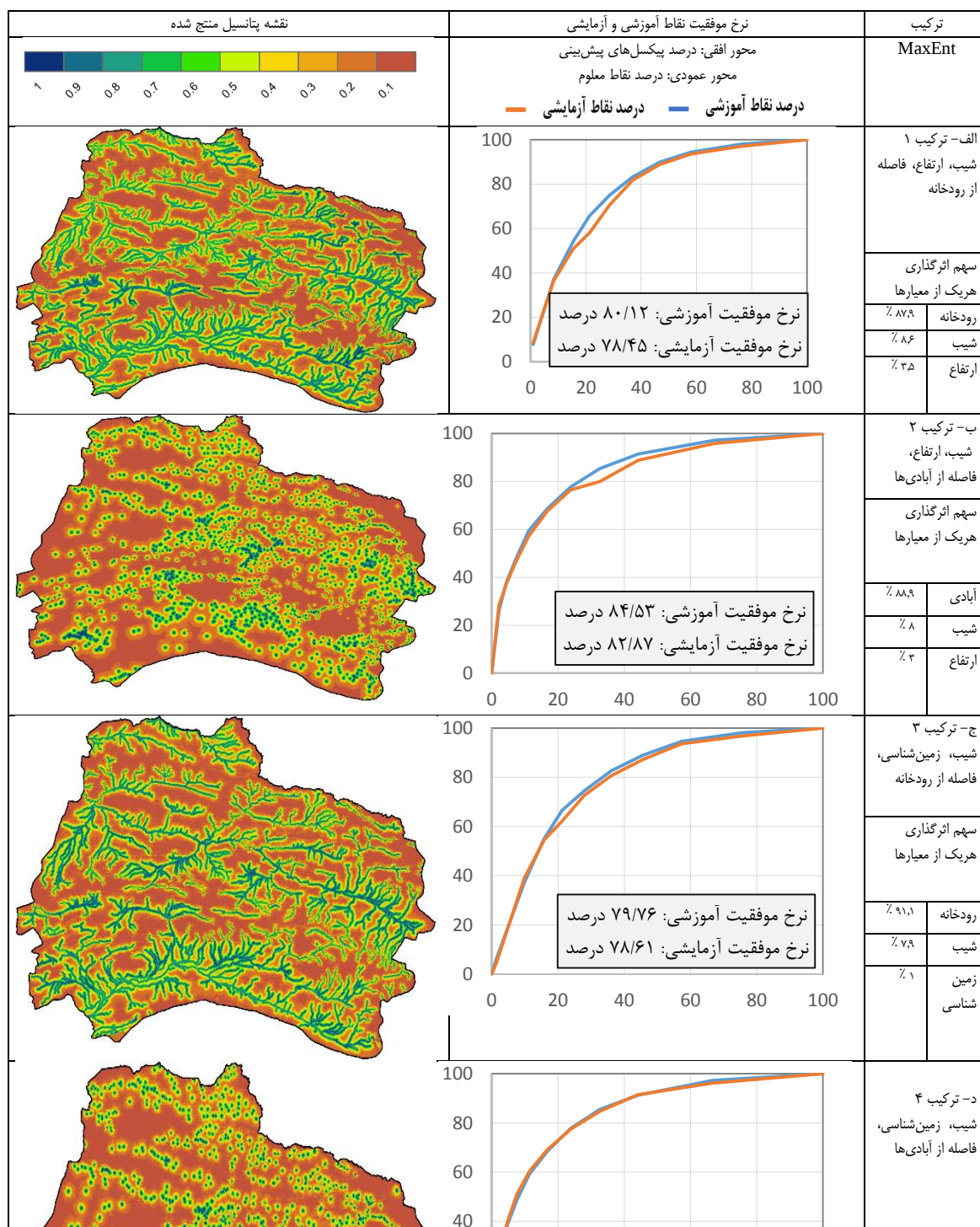


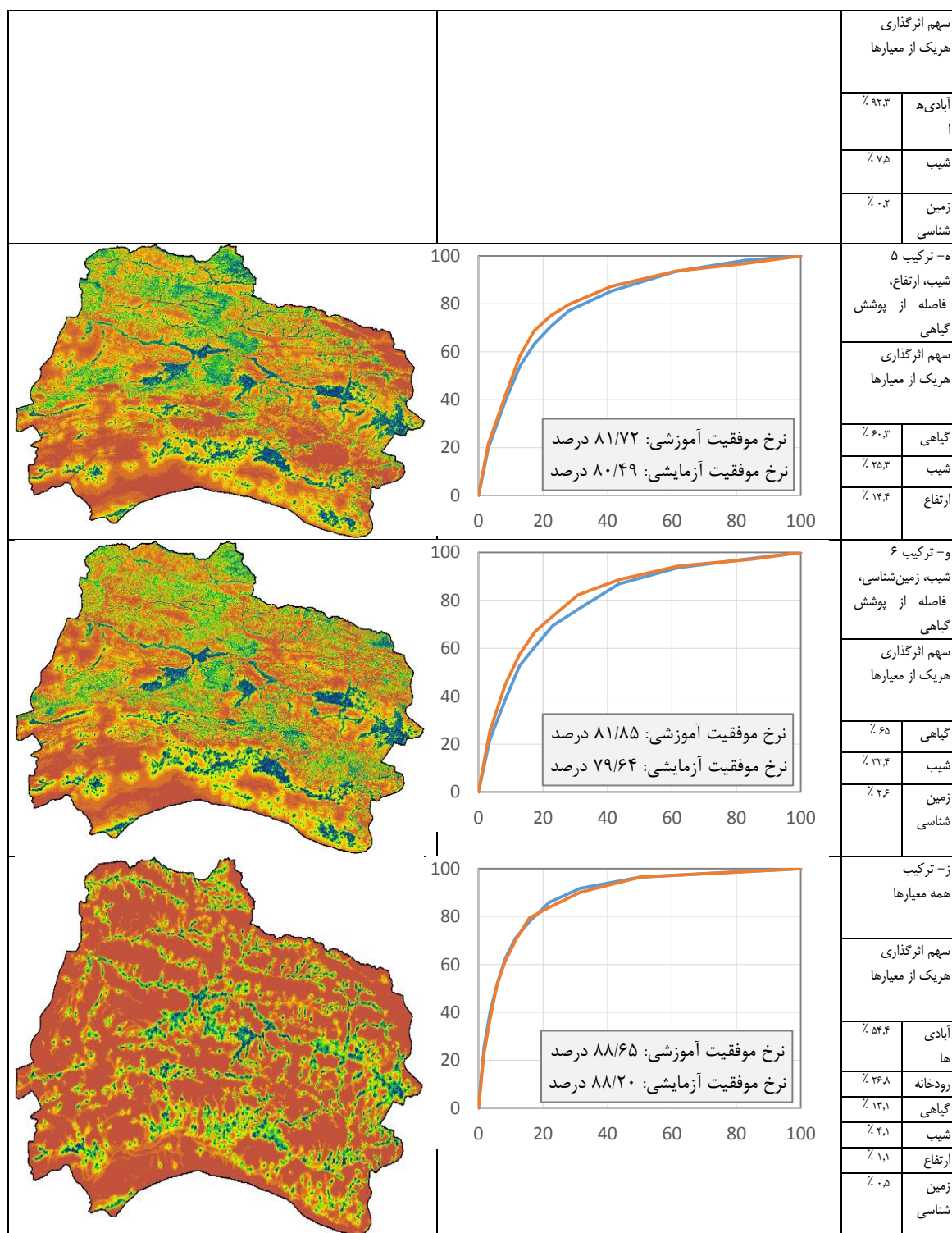
شکل ۳. نرخ موفقیت و نقشه‌های پتانسیل برای نقاط آموزشی و آزمایشی در یک از ترکیبات مجاز

ماکزیمم آنتروپی

برای تولید نقشه‌های پتانسیل هیچ پیش‌شرطی وجود ندارد و می‌توان با هر تعداد و هر ترکیبی از معیارهای موجود نقشه پتانسیل را تولید کرد. به همین دلیل برای مقایسه دقیق دو روش ابتدا با معیارهای موجود در شش ترکیب قبل را با روش ماکزیمم آنتروپی نیز تولید کردیم تا خروجی دو روش بهتر قابل مقایسه باشد. ایجاد نقشه‌های پتانسیل یا پیش‌بینی با استفاده از MaxEnt قابل انجام است. همه نقشه‌های معیار باید مرزهای کاملاً یکسان داشته و تعداد پیکسل‌ها نیز در

سطر و ستون‌های تصویر نیز کاملاً یکسان باشد. بنابراین یکی از نقشه‌های معیار به‌عنوان مرجع انتخاب و بقیه نقشه‌ها بر اساس مرز و پیکسل‌های این نقشه مرجع تولید گردیدند. در شکل‌های ۴ علاوه بر نرخ موفقیت نقاط آموزشی و آزمایشی و نقشه‌های پتانسیل، سهم اثرگذاری هریک از معیارها در تولید نقشه مذکور نیز آورده شده است. همان‌طور که بیان شد در استفاده از معیارها برای تولید نقشه پتانسیل در این روش پیش‌شرطی وجود ندارد لذا در انتها نقشه پتانسیل با استفاده از همه عوامل محیطی نیز آورده شده است.



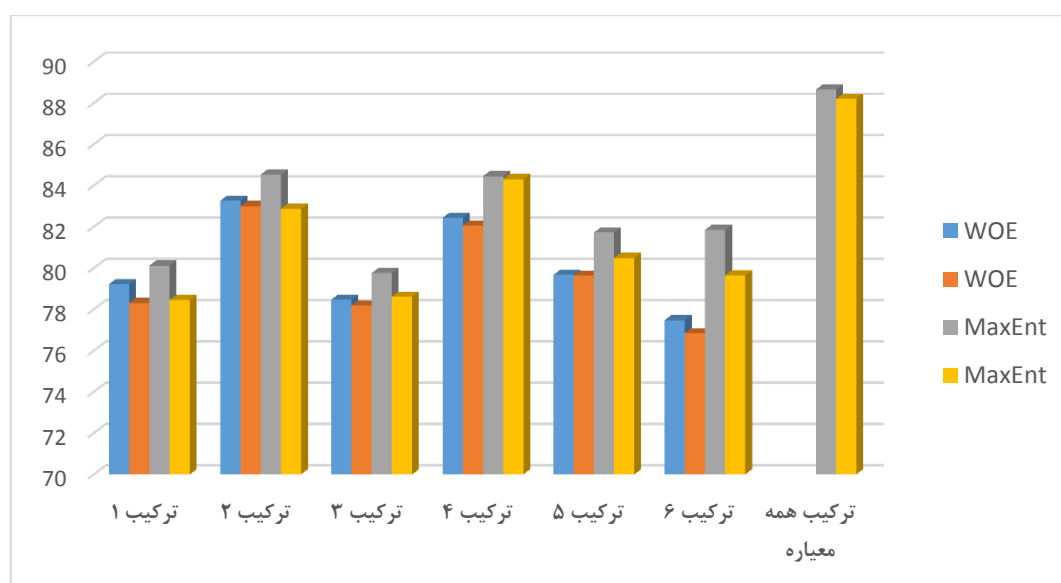


شکل ۴. نقشه‌های پتانسیل با استفاده از معیارهای تعیین‌شده برای ترکیبات در روش WOE، نرخ موفقیت برای نقاط آموزشی و آزمایشی و سهم هر یک از معیارها در تعیین میزان پیش‌بینی کنندگی نقشه پتانسیل، (در مدل ماکزیمم آنتروپی نیازی به تعیین ترکیب نیست، اما برای مقایسه راحت‌تر دو مدل، مدل ماکزیمم آنتروپی با ترکیبات مجاز برای مدل وزن‌های شواهد انجام‌شده است)

بحث

تولید نقشه‌های پتانسیل علاوه بر تسهیل کاوشگران در جستجوی هدف‌دار نقاط باستانی برای جلوگیری از تخریب

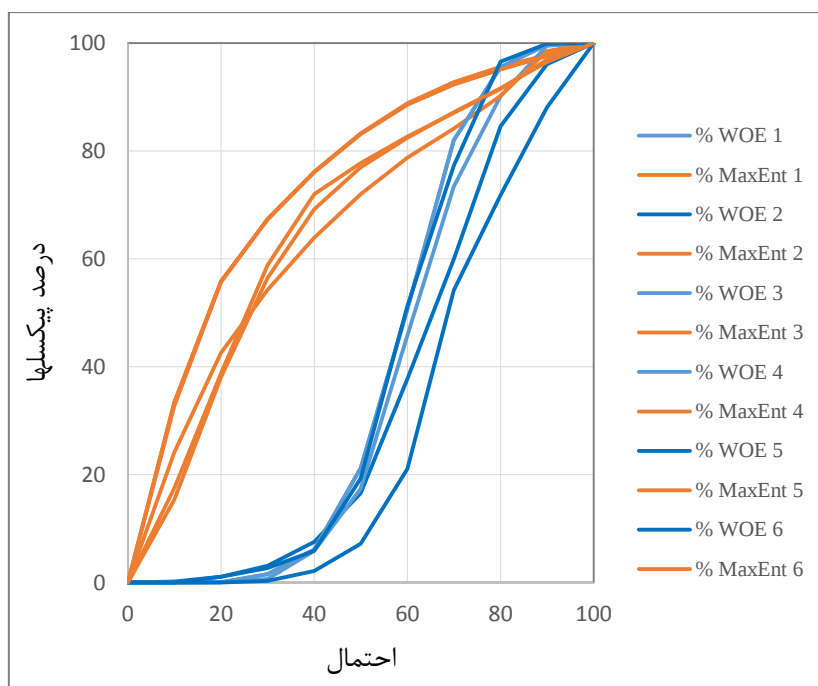
موقعیت‌های ناشناخته که احتمال وجود آثار باستانی بالایی دارند نیز مفید است. در این مطالعه دو روش وزن دهی شهودی (Weights-Of-Evidence) و ماکزیمم آنتروپی (Maximum Entropy) در پیش‌بینی وجود استقرارگاه‌های باستانی موردبررسی قرارگرفته است. در تهیه نقشه از ۹۸۰ استقرارگاه باستانی که موقعیت آن‌ها معلوم بود استفاده شد که ۷۰ درصد این نقاط برای آموزش مدل و ۳۰ درصد نقاط نیز برای تست مدل به کار رفت. نتایج مقایسه دو روش از طریق نرخ موفقیت نشان می‌دهد که روش ماکزیمم آنتروپی اندکی از روش وزن‌های شواهد بهتر عمل می‌کند.



شکل ۵. مقایسه نرخ موفقیت ماکزیمم آنتروپی و وزن‌های شواهد برای ترکیبات مختلف در حالت آموزشی و آزمایشی

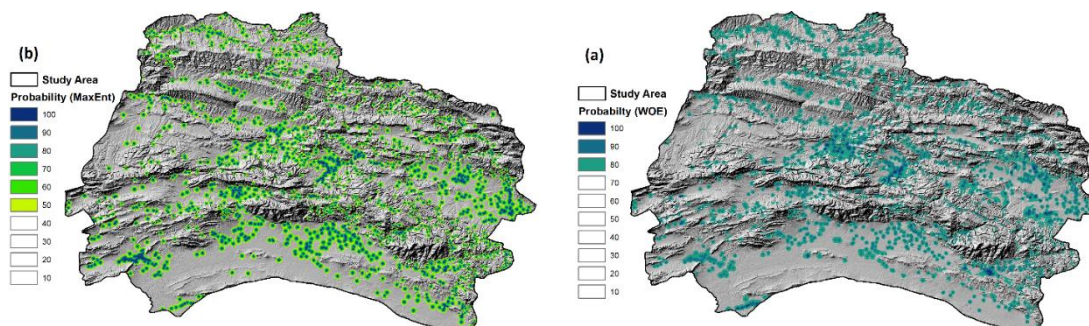
مطابق شکل ۵، نرخ موفقیت روش ماکزیمم آنتروپی در همه ترکیبات به جز ترکیب ۲ هم در حالت آموزشی و هم آزمایشی بیشتر از روش وزن دهی شهودی است. به غیر از برتر بودن روش ماکزیمم آنتروپی در میزان موفقیت آن در پیش‌بینی نقاط باستانی، این روش سهم هریک از معیارها را در پیش‌بینی مکان‌های پر احتمال را نیز نشان می‌دهد. ترکیب‌های شماره ۲ و شماره ۴ بهترین نتایج را ارائه می‌دهند که ترکیب شماره ۲ بهترین نتیجه را در روش وزن‌های شواهد و ترکیب شماره ۴ بهترین نتیجه را در روش ماکزیمم آنتروپی دارند.

مقایسه بصری نقشه‌های پتانسیل تولیدشده با دو روش برتری کامل روش ماکزیمم آنتروپی را نشان می‌دهد اما همان‌طور که اشاره شد از لحاظ پیش‌بینی کنندگی روش ماکزیمم آنتروپی تنها کمتر از ۵ درصد بیشتر از روش وزن‌های شواهد است. به نظر می‌رسد برتری اصلی روش ماکزیمم آنتروپی در تشخیص نقاطی است که کمترین احتمال وجود نقاط باستانی باشد. شکل ۶ توزیع پیکسل‌های نقشه‌های احتمال در ترکیبات مجاز را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه دو مدل در ترکیب‌های مجاز دارای نرخ موفقیت‌های تقریباً نزدیک به هم داشتند به نظر می‌رسد که باید فاصله بحرانی متفاوتی برای هر روش در نظر گرفت.



شکل ۶. توزیع مقادیر پیکسل‌های نقشه‌های پتانسیل در دو روش ماکزیمم آنترופی و وزن‌های شواهد

با مقایسه پیکسل‌های نقشه‌های پتانسیل در شکل ۷ دیده می‌شود که نحوه مرزگذاری برای تعیین نقاط با بالاترین احتمال در دو روش متفاوت است. با این حال خروجی دو روش تقریباً یکسان است. به عبارت دیگر، دو روش دارای نتایج تقریباً یکسانی هستند و آنچه به صورت بصری به نظر می‌آید به دلیل تفاوت در انتخاب فاصله بحرانی است. همان‌طور که ذکر شد مزیت اصلی روش ماکزیمم آنترופی عدم نیاز به تعیین ارتباط بین معیارهاست و هر چه معیارها بیشتر باشد نقشه دقیق‌تری تولید خواهد شد اما تولید نقشه‌هایی معیار با فرمت ASCII که هم دارای مرز یکسان و هم تعداد پیکسل‌های یکسان باشند کاری زمان‌بر بوده است همچنین اگر منطقه مورد مطالعه بزرگ باشد یا رزولوشن پیکسل‌ها کوچک باشد یا به عبارتی تعداد پیکسل‌های منطقه از عددی بزرگ باشد انجام محاسبات توسط کامپیوتر بسیار طولانی خواهد شد که البته بدیهی است زمان لازم بستگی به پیچیدگی سیستم کامپیوتر دارد. در مقایسه با روش ماکزیمم آنترופی، روش وزن‌های شواهد از پیچیدگی کمتری برخوردار است و نیاز به عملیات سنگین ندارد و از طرفی نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد.



شکل ۷. مقایسه نقشه پتانسیل به دست آمده از دو روش وزن‌های شواهد (a) و ماکزیمم آنترופی (b) برای ترکیب ۴

نتیجه‌گیری

پیش‌بینی‌کنندگی مدل‌ها:

نرخ موفقیت بالای مدل MaxEnt نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌کنندگی این مدل برای استقرارگاه‌های باستانی بالقوه در منطقه مورد مطالعه بیشتر است. این مدل اهمیت عوامل محیطی مانند ارتفاع، شیب و نزدیکی به رودخانه‌ها را متمایز می‌سازد. مدل WoE میزان موفقیت پایین‌تری دارد، با این حال پیش‌بینی این مدل هم قابل توجه است. ضرورت استقلال شرطی به این معنی است که تنها ترکیب معینی از عوامل می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، لذا نتایج مدل را محدود می‌کند.

تأثیر عوامل محیطی:

ارتفاع و شیب: سکونتگاه‌ها احتمالاً به دلیل دسترسی و مناسب بودن کشاورزی مناطقی را ترجیح می‌دهند که خیلی مرتفع یا شیب‌دار نباشند.

فاصله از رودخانه‌ها: دسترسی به آب بسیار مهم بود، زیرا رودخانه‌ها منبع مهم آب آشامیدنی، کشاورزی و حمل‌ونقل را فراهم می‌کردند.

نزدیکی پوشش گیاهی و آبدی‌ها: به دلیل لزوم شرط استقلال مشروط در ترکیب WoE در ترکیبات با بهترین عملکرد نیستند، با این حال جزو عوامل مهم هستند. پوشش گیاهی نشان‌دهنده دسترسی به منابع غذایی و نزدیکی به دیگر سکونتگاه‌ها نشان‌دهنده وجود شبکه‌های اجتماعی یا اقتصادی است.

محدودیت‌های مدل‌ها:

روش MaxEnt دارای محاسبات نسبتاً زیادی است که ممکن است برای بسیاری امکان‌پذیر نباشد و از طرفی برای اطمینان از صحت خروجی‌ها، نیاز به آماده‌سازی دقیق داده‌ها دارد.

در روش WoE شرط استقلال شرطی ترکیب متغیرها را محدود می‌کند. همچنین ممکن است پیچیدگی عوامل مؤثر در مکان استقرارگاه‌ها به خوبی درک نشود.

توصیه و پیشنهادها برای تحقیقات آتی:

❖ استفاده از تصاویر با وضوح بالا و افزایش دقت داده‌های محیطی

❖ در صورت امکان افزایش متغیرهای مرتبط

❖ استفاده از مدل‌های ترکیبی به‌طوری که نقاط قوت MaxEnt و WoE را با هم ترکیب نمایند.

❖ برای آزمایش تعمیم‌پذیری مدل‌ها، در مناطق دیگری نیز مورد مطالعه قرار گیرند.

❖ بررسی عوامل تاریخی و فرهنگی، زیرا ممکن است این عوامل بیشتر از متغیرهای محیطی در تعیین الگوهای استقرارگاه‌های باستانی اثرگذار باشند.

حامی مالی

این مقاله حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان

نویسندگان در تمام مراحل و بخش‌های انجام پژوهش سهم برابر داشتند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در ارتباط با نویسندگی یا انتشار مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از تمامی کسانی که در انجام پژوهش حاضر یاری‌رسان بوده‌اند، به‌ویژه کسانی که کار ارزیابی کیفیت مقاله را انجام دادند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

References

- Berger, A., Della Pietra, S. A., & Della Pietra, V. J. (1996). A maximum entropy approach to natural language processing. *Computational Linguistics*, 22(1), 39–71. doi: 10.5555/234285.234289
- Berglund, B. E., Birks, H. J. B., Ralska-Jasiewiczowa, M., & Wright, H. E. (2014). Predictive models in archaeological site location studies. *Archaeological Prospection*, 21(3), 175–187.
- Betts, A., Jia, P. W., & Dodson, J. (2014). The origins of wheat in China and potential pathways for its introduction: A review. *Quaternary International*, 348, 158–168. doi: 10.1016/j.quaint.2013.07.044
- Bonham-Carter, G. F., & Bonham-Carter, G. (1994). *Geographic information systems for geoscientists: Modelling with GIS*. Elsevier.
- Chapman, P. M., McDonald, B. G., & Lawrence, G. S. (2002). Weight-of-evidence issues and frameworks for sediment quality (and other) assessments. *Human and Ecological Risk Assessment*, 8(7), 1489–1515. doi: 10.1080/20028091057457
- Dahal, R. K., Hasegawa, S., Nonomura, A., Yamanaka, M., Dhakal, S., & Paudyal, P. (2008). Predictive modelling of rainfall-induced landslide hazard in the Lesser Himalaya of Nepal based on weights-of-evidence. *Geomorphology*, 102(3–4), 496–510. doi: 10.1016/j.geomorph.2008.05.041
- Fry, G. L., Skar, B., Jerpåsen, G., Bakkestuen, V., & Erikstad, L. (2004). Locating archaeological sites in the landscape: A hierarchical approach based on landscape indicators. *Landscape and Urban Planning*, 67(1–4), 97–107. doi: 10.1016/S0169-2046(03)00031-8
- Goodchild, M. F. (2000). *GIS and archaeological site location modeling*. In *Spatial Models and GIS* (pp. 115–129). Taylor & Francis.
- Gull, S. F., & Skilling, J. (1984). Maximum entropy method in image processing. IEE Proceedings F: Communications. *Radar and Signal Processing*, 131(6), 646–659. doi: 10.1049/ip-f-1:19840099
- Haynes, K. E., & Storbeck, J. E. (1978). The entropy paradox and the distribution of urban population. *Socio-Economic Planning Sciences*, 12(1), 1–6. doi: 10.1016/0038-0121(78)90002-4
- Johnson, G. A. (1977). Aspects of regional analysis in archaeology. *Annual Review of Anthropology*, 6, 479–508. doi: 10.1146/annurev.an.06.100177.002403
- Kohler, T. A., & Parker, S. C. (1986). *Predictive models for archaeological resource location*. In *Advances in Archaeological Method and Theory* (pp. 397–452). Elsevier.
- Kvamme, K. L. (1990). *The use of geographic information systems for archaeological predictive modeling*. In *Quantitative Methods in Archaeology* (pp. 345–362). Academic Press.
- Kvamme, K. L. (2005). *There and back again: Revisiting archaeological locational modeling*. In *GIS and Archaeological Site Location Modeling* (pp. 3–38). CRC Press.
- Li, B., Wei, W., Ma, J., & Zhang, R. (2009). Maximum entropy niche-based modeling (Maxent) of potential geographical distributions of fruit flies *Dacus bivittatus*, *D. ciliatus*, and *D. vertebrates* (Diptera: Tephritidae). *Acta Entomologica Sinica*, 52(10), 1122–1131.
- Märker, M., & Bolus, M. (2018). Explorative spatial analysis of Neandertal sites using terrain analysis and stochastic environmental modelling. *Journal of Geographic Information Science*, 6, 21–38.
- Martin, P., Bladier, C., Meek, B., Bruyere, O., Feinblatt, E., Touvier, M., Watier, L., & Makowski, D. (2018). Weight of evidence for hazard identification: A critical review of the literature. *Environmental Health Perspectives*, 126(7), 076001. doi: 10.1289/EHP3068
- Mehrer, M. W., & Wescott, K. L. (2005). *GIS and archaeological site location modeling*. CRC

- Press.
- Muttaqin, L. A., Murti, S. H., & Susilo, B. (2019). MaxEnt (Maximum Entropy) model for predicting prehistoric cave sites in Karst area of Gunung Sewu, Gunung Kidul, Yogyakarta. *Sixth Geoinformation Science Symposium*, 11287, 87–95. doi: 10.1117/12.2547296
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3–4), 231–259. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026
- Thanh, N. N., Thunyawatcharakul, P., Ngu, N. H., & Chotpantarat, S. (2022). Global review of groundwater potential models in the last decade: Parameters, model techniques, and validation. *Journal of Hydrology*, 615, 128501. doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.128501
- Vaughn, S., & Crawford, T. (2009). A predictive model of archaeological potential: An example from northwestern Belize. *Applied Geography*, 29(4), 542–555. doi: 10.1016/j.apgeog.2009.03.001
- Verhagen, P., & Whitley, T. G. (2013). Integrating archaeological theory and predictive modeling: A live report from the scene. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 19(1), 49–100. doi: 10.1007/s10816-011-9102-3
- Wachtel, I., Zidon, R., Garti, S., & Shelach-Lavi, G. (2018). Predictive modeling for archaeological site locations: Comparing logistic regression and maximal entropy in north Israel and north-east China. *Journal of Archaeological Science*, 92, 28–36. doi: 10.1016/j.jas.2018.02.001
- Zhang, G., Wang, S., Chen, Z., Liu, Y., Xu, Z., & Zhao, R. (2023). Landslide susceptibility evaluation integrating weight of evidence model and InSAR results, west of Hubei Province, China. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 26(1), 95–106. doi: 10.1016/j.ejrs.2023.01.001