دو فصلنامه کواترنری ایران (علمی-پژوهشی)، دوره ۱۰، شمارهٔ ٤ و ۳، پاییز و زمستان ۱٤۰۳

ص۳۱۵ تا ۳٤۸

ارزیابی ارتباط برآورد تولید رسوب و مطلوبیت مکانی در الگوهای استقرار پیش‌ازتاریخی دشت قزوین با بهره‌گیری از ترکیب مدل‌های یادگیری ماشین، فرایند سلسله‌مراتبی و تحلیل مؤلفه‌های اصلی

سوده افتخاری؛ دانشجوی دکتری باستان‌شناسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

حسن فاضلی نشلی*؛ استاد، گروه باستان شناسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۰/ ۰٦ /۱٤۰۳ تاریخ پذیرش: ۱٤۰۳/۱۰/۲۵

چکیده:

این پژوهش به بررسی ارتباط میان رسوب‌گذاری، مطلوبیت مکانی و الگوهای استقرار محوطه‌های پیش‌ازتاریخی (نوسنگی، مس‌سنگی) در سه زیرحوضه آبریز ابهررود، خررود و حاجی‌عرب در دشت قزوین می‌پردازد. در گام نخست نقشه‌های میزان تولید رسوب با استفاده از شاخص فورنیه و سه مدل یادگیری ماشین شامل شبکه‌های عصبی مصنوعی، جنگل تصادفی و رگرسیون خطی چندگانه بازسازی شد که شبکه‌های عصبی توانست الگوهای واقعی رسوب‌گذاری را با دقت بالاتری بازنمایی کند. در ادامه برای تعیین نواحی مستعد استقرار، هفت معیار محیطی و زمین‌ریخت‌شناسی شامل ارتفاع، شیب، جهتِ شیب، تجمع جریان سطحی، فاصله تا منابع آبی، فاصله تا گسل‌ها و شاخص پوشش گیاهی به‌کار گرفته شد. وزن‌دهی معیارها از طریق ترکیب روش فرایند سلسله‌مراتبی و تحلیل مؤلفه‌های اصلی انجام گرفت تا سوگیری ذهنی کاهش یابد. نتایج نشان داد محوطه‌های باستانی بیشتر در مناطقی با میزان تولید رسوب کمتر قرار داشته و میان رسوب‌گذاری و احتمال حضور محوطه‌ها همبستگی منفی معنادار وجود دارد. این امر احتمالاً بیانگر ترجیح جوامع باستانی برای انتخاب محل سکونت در مناطقی با شرایط زمین‌ریختی پایدارتر است. در عین حال باید محدودیت داده‌ها به‌ویژه در نواحیِ با رسوب‌گذاری شدید و احتمال دفن محوطه‌ها نیز در نظر گرفته شود. ترکیب روش‌های یادگیری ماشین و تحلیل‌های مکانی ابزاری کارآمد برای بازسازی الگوهای استقرار گذشته و هدایت پژوهش‌های آینده فراهم می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: شاخص فورنیه، الگوهای استقرار، یادگیری ماشین، تحلیل فرایند سلسله‌مراتبی، دشت قزوین.

*رایانامهٔ نویسندهٔ مسئول: hassanfazelinashli@gmail.com

مقدمه:

تحولات شگرف در فناوری‌های پیشرفته در دهه‌های اخیر، انقلابی بنیادین در بسیاری از رشته‌های علمی، به‌ویژه علوم انسانی، ایجاد کرده است. باستان‌شناسی نیز به‌عنوان یکی از حوزه‌های میان‌رشته‌ای از این تحولات بی‌نصیب نبوده و با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین، نظیر سنجش از راه دور، تحلیل‌های ژنتیکی، تاریخ‌گذاری دقیق و مدل‌سازی دیجیتال، افق‌های تازه‌ای را در بازسازی و تحلیل فرهنگ‌های جوامع گذشته بر روی پژوهشگران گشوده است (Williams, 2022). در این میان، شناخت بسترهای محیطی و جغرافیایی سکونتگاه‌های باستانی به‌عنوان یکی از ارکان اساسی باستان‌شناسی اهمیت ویژه‌ای دارد. بررسی تحولات زمین‌ریختی و تغییرات اقلیمی نه‌تنها در بازسازی چشم‌اندازهای پیش‌ازتاریخی نقش دارد، بلکه سرنخ‌هایی ارزشمند از نحوه انتخاب محل سکونت، شیوه‌های بهره‌برداری از منابع و میزان سازگاری جوامع باستانی با محیط طبیعی ارائه می‌دهد. بازسازی مدل‌های استقرار و بهره‌برداری از زمین در ادوار مختلف نیز نشان می‌دهد که اطلاعات محیطی و زمین‌شناسی نقش کلیدی در انتخاب مکان سکونت و سازگاری جوامع با شرایط طبیعی ایفا کرده‌اند (Vogelsang & Wendt, 2018). افزون بر این، علوم مرتبط با رسوب‌شناسی ـ شاخه‌ای از علوم زمین که به مطالعه رسوبات و فرایند شکل‌گیری آن‌ها می‌پردازد ـ جایگاه ویژه‌ای در تحلیل داده‌های باستان‌شناسی دارد. رسوب‌شناسی با روش‌هایی چون تحلیل خصوصیات دانه‌ای، شناسایی منشاء و ساختار لایه‌ها، و بررسی داده‌های ژئوشیمیایی و ایزوتوپی، امکان بازسازی شرایط زیست‌محیطی، اقلیمی و حتی فرهنگی را فراهم می‌سازد و بدین ترتیب به شناخت دقیق‌تر محوطه‌های باستانی و محیط‌های زیستی جوامع گذشته یاری می‌رساند. فرسایش خاک و رسوب‌گذاری از مهم‌ترین فرایندهای زمین‌ریخت‌شناسی به شمار می‌روند که آثار گسترده‌ای بر محیط‌زیست، کشاورزی، منابع آب و میراث فرهنگی دارند (Montgomery, 2007; Owens, 2020). درک و ارزیابی این پدیده‌ها، به‌ویژه در مقیاس حوضه‌های آبریز، برای مدیریت پایدار منابع طبیعی، حفاظت از چشم‌اندازهای باستانی و برنامه‌ریزی توسعه ضروری است (Hollesen et al., 2022). افزون بر آن، رسوب‌گذاری و فرسایش سطحی می‌توانند لایه‌های فرهنگی و بقایای باستانی را با تهدید جدی مواجه کنند (Huisman et al., 2019). ذکر این نکته ضروری است که تحلیل الگوهای فرسایش و رسوب زمانی معنا پیدا می‌کند که در چارچوب تعامل انسان و محیط مطالعه شود؛ چراکه این فرایندها در نهایت مسیر شکل‌گیری یا زوال بسیاری از استقرارهای انسانی را مشخص کرده‌اند. در دهه‌های اخیر، مدل‌ها و روش‌های متعددی برای ارزیابی و پیش‌بینی فرسایش خاک و میزان تولید رسوب توسعه یافته‌اند که هر یک بسته به مقیاس، داده‌های ورودی و هدف مطالعه، دارای مزایا و محدودیت‌های خاص خود هستند (de Vente et al., 2013). از جمله پرکاربردترینِ این مدل‌ها می‌توان به مدل جهانی فرسایش خاک (Universal Soil Loss Equation - USLE) (Wischmeier & Smith, 1978)، نسخه به‌روزشده آن (Revised Universal Soil Loss Equation - RUSLE) (Renard et al., 1997) و مدل‌های فرایندمحور مانند SWAT (Soil and Water Assessment Tool) و WEPP (Water Erosion Prediction Project) اشاره کرد (Arnold et al., 1998; Flanagan & Nearing, 1995).

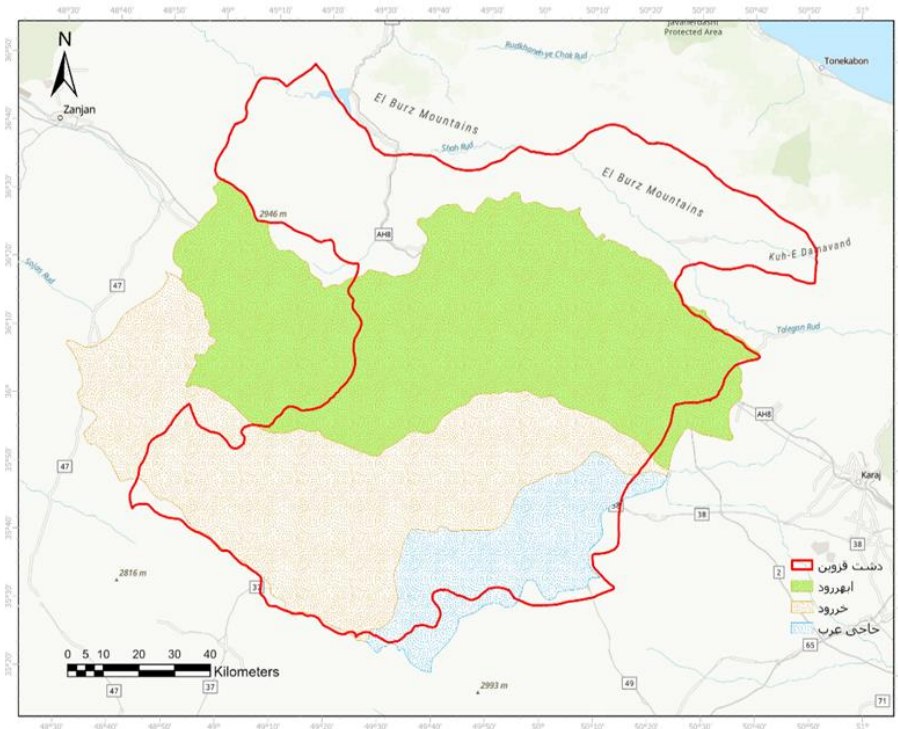
در کنار این مدل‌ها، روش‌های تجربی و ساده‌تری نیز وجود دارند که از داده‌های حداقلی برای برآورد میزان تولید رسوب و فرسایش‌پذیری خاک استفاده می‌کنند؛ از جمله این روش‌ها می‌توان به روش فورنیه (Fournier Index) و نسخه اصلاح‌شده آن (Modified Fournier Index) اشاره کرد که مبتنی بر شاخص شدت بارندگی است و یکی از روش‌های رایج برای برآورد اولیه فرسایش و رسوب در مناطق فاقد داده‌های گسترده می‌باشد (Fournier, 1960). همچنین روش‌های تجربی پیشرفته‌تری نظیر EPM (Erosion Productivity Method) و MPSIAC (Model for Predicting Sediment Yield from Instrumented Catchments) نیز در حوضه‌های آبریز مورد استفاده قرار می‌گیرند (Shahiri Tabarestani et al., 2022). شاخص فورنیه، که در دهه ۱۹۶۰ میلادی ارائه شد به‌عنوان ابزاری ساده و کم‌هزینه برای ارزیابی اولیه پتانسیل فرسایش و میزان رسوب‌گذاری کاربرد دارد و به دلیل سادگی در محاسبه، در بسیاری از مطالعات محیطی و منابع طبیعی، به‌ویژه در ترکیب با سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی و روش‌های یادگیری ماشین مورد استفاده قرار گرفته است. برای نمونه، در مطالعه‌ای در جنوب آفریقا با استفاده از شاخص فورنیهٔ اصلاح‌شده و الگوریتم شبکه‌های عصبی، مشاهده شد که مقادیر شاخص به‌طور سالیانه کاهش یافته و این موضوع می‌تواند احتمال خشکسالی و تغییر نوع فرسایش خاک از آبی به بادی را افزایش دهد (Hlalele, 2024). فرسایش خاک و میزان رسوب موجود می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر حفاظت سایت‌های باستانی و رسوبات تاریخی داشته باشد، به همین دلیل در حوزه باستان‌شناسی و حفاظت از میراث فرهنگی، تأثیر پدیده‌های فرسایشی بر چشم‌اندازهای تاریخی و پیش‌ازتاریخی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. باید در نظر داشت که در مطالعاتی که به بازسازی چشم‌اندازهای باستانی می‌پردازند، همیشه ترکیب داده‌های زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی نقش کلیدی ایفا می‌کند. به عنوان نمونه، با استفاده از مدل RUSLE و تصاویر UAV (Unmanned Aerial Vehicle)، مناطق آسیب‌پذیر پیرامون دو تپهٔ باستانی در منطقه کردستان عراق شناسایی و میزان فرسایش خاک و تهدیدات زمین‌ریخت‌شناسی ارزیابی گردید (Forti et al., 2023). یافته‌ها نشان می‌دهند که این مدل می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر برای شناسایی مناطق آسیب‌پذیر و برنامه‌ریزی مداخلات حفاظتی در محوطه‌های باستانی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، با تحلیل فرسایش ساحلی در سواحل لیبی، شدت و میزان فرسایش اطراف محوطه‌های باستانی منطقه برآورد و تأثیر تغییرات زمین‌ریخت‌شناسی بر بقای سایت‌های باستانی حاشیه بندر مستند شد (Westley et al., 2023). در مروری جامع نیز به تهدیدهای ناشی از تغییرات اقلیمی بر میراث فرهنگی توجه و نقش عواملی مانند کاهش پوشش گیاهی، فرسایش ساحلی و نوسانات رطوبتی در تخریب سایت‌های باستانی برجسته گردید (Hollesen et al., 2022). از سوی دیگر، تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر چشم‌اندازهای باستانی نیز با استفاده از مدل‌های فرسایش و رسوب مورد بررسی قرار گرفته است؛ در مطالعه‌ای از ترکیب روش‌های بین‌رشته‌ای و داده‌های منظرباستان‌شناسی استفاده و با بهره‌گیری از مدل RUSLE مشخص گردید که تغییرات کاربری اراضی بر فرسایش خاک و تولید رسوب اثرگذار است و این رویکرد می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر برای مدیریت پایدار محیط‌زیست و حفظ محوطه‌های باستانی مورد استفاده قرار گیرد (Brandolini et al., 2023). در حالی‌که مطالعات بین‌المللی متعددی به بررسی پیوند میان فرایندهای زمین‌ریخت‌شناسی، رسوب‌گذاری و پایداری محوطه‌های باستانی پرداخته‌اند، در ایران نیز طی دو دههٔ اخیر پژوهش‌های ارزشمندی در این حوزه انجام شده است. این تحقیقات اغلب

با تمرکز بر دشت‌های آبرفتی و محوطه‌های استقراری، تلاش کرده‌اند تا نقش عوامل محیطی و انسانی را در شکل‌گیری و تداوم لایه‌های فرهنگی روشن سازند. از جمله این مطالعات می‌توان به پژوهش مقصودی و همکاران اشاره کرد که در سال ۱۳۹۵ تپه‌های باستانی دشت قزوین و در سال ۱۳۹۷ محوطه‌های میمنت‌آباد و مافین‌آباد را مورد مطالعه قرار دادند. این تحقیقات با رویکرد زمین‌باستان‌شناسی به واکاوی آثار رسوبی ناشی از سکونت انسانی پرداخته و نتایج قابل‌توجهی در خصوص آشکار ساختن وابستگیِ الگوهای رسوبی به رفتارهای انسانی، ضرورت توجه به فرایندهای فرهنگی–اکولوژیکی در تفسیر پویایی‌های استقرار و ارزیابی شرایط محیطی مؤثر بر استقرارهای انسانی به دست آورد. زاهدی و همکاران نیز در سال ۱۴۰۴ در دشت ورامین مطالعه‌ای میان‌رشته‌ای با بهره‌گیری از رویکردهای رسوب‌شناسی، گرده‌شناسی و تاریخ‌گذاری مطلق (رادیوکربن و OSL) انجام داده و هدف اصلی از آن، بررسی تأثیر توسعه دشت‌های آبی و تغییرات شبکه‌های رودخانه‌ای بر الگوهای استقراری پیش‌ازتاریخ بوده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که پویایی‌های محیطی ناشی از جابه‌جایی و تحولات هیدرومورفولوژیک، نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری و تداوم یا زوال محوطه‌های باستانی این منطقه داشته‌اند. این مطالعه نمونه‌ای بارز از اهمیت استفاده از داده‌های زمین‌محیطی در بازسازی تعاملات انسان و محیط در فلات مرکزی ایران است. همچنین صبوری و همکاران در سال ۱۳۹۳ در تپه فریزی دشت سبزوار با رویکرد زمین‌باستان‌شناسی به بررسی رسوبات و فرایندهای پس از نهشت پرداخته و نتایج حاصله در این محوطه، به شناخت الگوهای رسوبی، تغییرات لایه‌های فرهنگی و عوامل مؤثر بر پویایی و تداوم استقرار در آن منطقه کمک نموده است.

در نتیجه می‌توان گفت تحقیقات متعدد نشان از آن دارند که درک الگوهای استقرار باستانی نیازمند تحلیل دقیق رابطه بین عوامل محیطی و تصمیمات مکان‌گزینی جوامع انسانی است و تحلیل فرسایش سطحی و رسوب‌گذاری می‌تواند در بازسازی چشم‌اندازهای باستانی و درک پویایی استقرارهای انسانی به‌ویژه در دوران پیش‌ازتاریخی نقشی مهم و شایان توجه ایفا کند. مطالعه حاضر با تمرکز بر سه زیرحوضه ابهررود، خررود و حاجی‌عرب در دشت قزوین و زنجان، با استفاده از شاخص فورنیه و نسخه بهبود یافته آن، الگوهای رسوب‌گذاری و عوامل مؤثر در گزینش مکان سکونت پیش‌ازتاریخی را تحلیل می‌کند. این تحقیق فصلی از رساله دکتری یکی از نگارندگان است و هدف آن بازسازی تعاملات انسان و محیط در دوره نوسنگی و ارائه مدلی جامع از پایداری زمین و مکان‌گزینی جوامع پیش‌ازتاریخی می‌باشد. تمرکز اصلی این مقاله، بر مدل‌سازی فرایندهای رسوب‌گذاری و ارتباط با مکان‌گزینی محوطه‌های پیش‌ازتاریخی است و نتایج کامل‌تری از تحلیل‌های انجام‌شده با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای و سایر داده‌های محیطی، در مقالات بعدی ارائه خواهد شد.

منطقه مورد مطالعه و اهمیت باستان‌شناختی آن

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش شامل حوضه‌های آبریز خررود، حاجی‌عرب و ابهررود در دشت قزوین است. اگرچه بخش‌هایی از حوضه‌های ابهررود و خررود در استان زنجان واقع شده‌اند، ولی به دلیل قرارگیری بخش عمده آنها در دشت قزوین، انتخاب این محدوده بر اساس ملاحظات زیست‌محیطی، پیوستگیِ اکولوژیکی و ویژگی‌های طبیعی و نه صرفاً بر پایه تقسیمات سیاسی ـ اداری صورت پذیرفته است. مرزبندی زیرحوضه‌های مورد مطالعه بر اساس دستورالعمل رسمی تقسیم‌بندی حوضه‌های آبریز و محدوده‌های مطالعاتی کشور (بخشنامه گروه سوم، شماره ۴۵۸۰۷/۱۰۰) معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری مشخص گردید و از این‌رو، با وجود عبور مرزهای استانی از درون این حوضه‌ها، کل محدوده به‌عنوان یک واحد زمین‌ریخت‌شناسی و هیدرولوژیک پیوسته، در چارچوب مطالعه حاضر مورد بررسی قرار گرفت. این پهنه به دلیل موقعیت جغرافیایی و استراتژیکی خاص و قرارگیری در قلب کریدور جنوبی کوه‌های البرز، تنوع اقلیمی و توپوگرافی متنوع، همچنین وفور منابع آبی و حاصلخیزی خاک‌ها، یکی از کانون‌های مهم استقرار انسانی در دوران پیش‌ازتاریخ ایران به‌شمار رفته و از دیرباز زیستگاه جوامع انسانی بوده است (شکل ۱).



شکل۱: موقعیت قرارگیری سه زیرحوضه ابهررود، خررود و حاجی‌عرب در دشت قزوین

دشت قزوین به‌عنوان یکی از غنی‌ترین حوزه‌های باستان‌شناختی فلات مرکزی ایران، از میانه قرن بیستم میلادی به‌طور نظام‌مند در کانون توجه پژوهشگران قرار گرفته است. آغاز مطالعات علمی این منطقه به سال ۱۳۴۹ خورشیدی (۱۹۷۰ میلادی) بازمی‌گردد که توسط گروه باستان‌شناسی دانشگاه تهران به سرپرستی عزت‌الله نگهبان آغاز شد و ۹ سال تداوم داشت (Fazeli, 2005). در ادامه نیز شواهد متنوعی از استقرار انسانی از دوران نوسنگی تا دوره‌های تاریخی آشکار گردید و این منطقه را به یکی از نقاط کلیدی در درک فرایندهای شکل‌گیری و تحول تمدن‌های اولیه در ایران بدل نمود.

عوامل محیطی همچون دسترسی به منابع آبِ سطحی، ویژگی‌های خاک به همراه موقعیت جغرافیایی در انتخاب این منطقه توسط جوامع پیش‌ازتاریخی، به‌ویژه در دوره نوسنگی، نقش اساسی داشته‌اند (Fazeli et al., 2019). تحلیل داده‌های زمین‌شناسی، زمین‌ریخت‌شناسی و باستان‌شناختی دشت قزوین نشان می‌دهد که تحولات محیطی هولوسن، شامل تغییرات اقلیمی، فعالیت‌های زمین‌لرزه‌ای و میزان رسوب‌گذاری، با تغییر الگوهای سکونت انسانی هم‌زمان بوده است. این یافته‌ها نشان‌دهنده پیوندهای پیچیده بین سیستم‌های طبیعی و انسانی در شکل‌گیری و تغییر سکونتگاه‌های پیش‌ازتاریخی هستند (Schmidt et al., 2011). همچنین یک مطالعه زمین‌باستان‌شناسی بر سه تپه باستانی در دشت قزوین نشان داد که رسوبات موجود، حامل آثار فعالیت‌های انسانی مانند بقایای مواد سوختنی، ضایعات خانگی و تولیدی هستند و تحلیل‌های رسوبی میکروسکوپی امکان شناسایی ورودی‌های انسانی و استنباط فعالیت‌هایی که منجر به ته‌نشینی رسوبات شده‌اند را فراهم کرد. این یافته‌ها اهمیت بررسی همزمان عوامل طبیعی و انسانی در درک الگوهای سکونتگاه‌های پیش‌ازتاریخی در دشت‌های فلات مرکزی ایران را برجسته نمود (Maghsoudi et al., 2013). در مطالعه دیگری عوامل طبیعی مؤثر بر استقرار محوطه‌های باستانی در دشت قزوین تحلیل و ویژگی‌های زمین‌ریخت‌شناسی و ارتفاعی، شبکه‌های زهکشی و شرایط اقلیمی دیرینه بررسی شدند. نتایج نشان داد که مخروط‌افکنه‌ها و دشت‌های آبرفتی به دلیل شیب مناسب، دسترسی به منابع آب و رسوبات ریزدانه، مهم‌ترین مکان‌ها برای استقرارگاه‌ها بوده‌اند. در این منطقه طی دوره‌های نوسنگی، مس‌وسنگ انتقالی و مس‌وسنگ، تغییرات اقلیمی و خشکی باعث گسست و جابجایی سکونتگاه‌ها به مناطق مرتفع‌تر شده است. همچنین دسترسی به آبراهه‌ها و شرایط هیدروگرافی در دوام و تداوم سکونت نقش کلیدی داشته است (ذنوبی و همکاران، ۱۴۰۴). در پژوهشی دیگر بر روی مخروط‌افکنه حاجی‌عرب مشخص گردید سکونت‌گاه‌ها عمدتاً در بخش‌های میانی و انتهایی مخروط‌افکنه قرار داشته تا ساکنان باستانی این منطقه به خاک و آب مناسب برای کشاورزی و ساخت سفال دسترسی داشته باشند. رسوب‌های ریزدانه شرایط مساعد و رسوب‌های جریانی در برخی موارد مخاطراتی ایجاد کرده و تغییر مسیر کانال‌های گیسویی نیز بر مکان‌یابی و جابجایی سکونت‌گاه‌ها تأثیر داشته است (مقصودی و همکاران، ۱۳۹۱). بااین‌حال و با وجود کیفیت بالای پژوهش‌های انجام‌شده و اهمیت داده‌های میدانی سنتی، استفاده از ظرفیت کامل ابزارهای نوینِ تحلیل مکانی، مانند مدل‌سازی‌های پیشرفته، داده‌های سنجش از دور و تحلیل‌های چندمتغیره، هنوز می‌تواند در تحقیقات آینده گسترش یابد. مطالعات جهانی نشان می‌دهند که رویکردهای تلفیقی، شامل بهره‌گیری هم‌زمان از تحلیل‌های محیطی و آماری پیشرفته و تصاویر ماهواره‌ای، می‌توانند درک دقیق‌تری از الگوهای استقرار انسانی ارائه دهند (Gillings, 2012). این موضوع به‌ویژه در مناطق وسیع و پیچیده‌ای مانند دشت قزوین از اهمیت دوچندان برخوردار است.

باید به این نکته نیز اشاره کرد دشت قزوین نه‌تنها از منظر فرهنگی و باستان‌شناختی، بلکه از نظر زیست‌محیطی نیز با تهدیدات جدی مواجه است. پدیده‌هایی مانند فرسایش خاک، تغییر مسیر رودخانه‌ها، کاهش پوشش گیاهی و رسوب‌گذاری در پیرامون محوطه‌های باستانی، موجب تخریب تدریجی لایه‌های فرهنگی شده‌اند (Esmaeili et al., 2022). این تحولات، با تأثیر بر شرایط رطوبتی خاک، می‌توانند فرایندهای تخریب شیمیایی و فیزیکی آثار مدفون را تسریع نمایند. از این‌رو، درک دینامیک‌های محیطی مانند الگوهای فرسایش، رسوب‌گذاری و تغییرات اقلیمی، برای تحلیل چگونگی شکل‌گیری، پایداری یا نابودی سکونتگاه‌های باستانی در این ناحیه، ضروری به‌نظر می‌رسد.

ویژگی‌های اکولوژیکی منطقه مورد مطالعه:

– زیرحوضه آبریز ابهررود: این منطقه با مساحت ۷.۵۹۲ کیلومتر مربع در بخش شمالی محدوده مورد بررسی قرار گرفته و به‌دلیل دشت‌های نسبتاً مسطح، بستر مناسبی برای فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی فراهم آورده است. زیرحوضه ابهررود جزء حوضه‌های آبریز فرعی دریاچه نمک بوده و از زیرحوضه‌های مهم حوضه آبریز فلات مرکزی ایران است (خسروی و همکاران، ۱۳۹۱). با این حال، توسعه بی‌رویه شهرنشینی، برداشت بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمینی و تغییر کاربری اراضی، آثار منفی قابل‌توجهی بر منابع طبیعی این منطقه گذاشته‌اند.

– زیرحوضه خررود: این منطقه با مساحت ۵.۷۷۵ کیلومتر مربع تقریباً در مرکز دشت قزوین واقع است و با برخورداری از منابع آبی غنی و تنوع زیستی بالا، ظرفیت مناسبی برای کشاورزی، دامداری و گردشگری فراهم کرده است. با این وجود، بهره‌برداری‌های ناپایدار از منابع آب، تخریب پوشش گیاهی و فرسایش خاک، تهدیداتی جدی برای تداوم پایداری این منطقه ایجاد کرده‌اند (پارسامنش و همکاران، ۱۳۹۰).

– زیرحوضه آبریز حاجی‌عرب: این منطقه با مساحت ۱.۸۲۲ کیلومتر مربع در بخش جنوبی دشت قزوین واقع شده و با شیب‌های تند و میزان بالای فرسایش آبی شناخته می‌شود. حاجی‌عرب به‌دلیل قرارگیری در منطقه‌ای نیمه‌خشک با کمبود منابع آب زیرزمینی نیز مواجه و شرایط آب و هوایی و توپوگرافی آن باعث شده تا ذخایر آبِ زیرسطحی آسیب‌پذیر باشند (قاسمی و همکاران، ۱۴۰۳). ساختار زمین‌شناسی این پهنه عمدتاً متشکل از سنگ‌های آذرین دوره ائوسن هستند که در چند مرحله شکل گرفته‌اند (یمانی و ابراهیم‌خانی، ۱۳۸۹).

در مجموع، منطقه مورد مطالعه برغم دارابودن موقعیت ژئواستراتژیک در کریدور جنوبی البرز، تنوع زیستی و بسترهای حاصلخیز، به دلیل تاثیرپذیری از عوامل طبیعی و انسانی، شناسایی و مستندسازی دقیق محوطه‌های باستانی را با چالش‌هایی مواجه کرده و درک کامل از فرایندهای محیطی مؤثر بر این ناحیه، برای بازسازی الگوهای استقرار انسانی در طول هزاره‌ها را ضروری جلوه داده است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش متمرکز بر سه زیرحوضه آبریز ابهررود، خررود و حاجی‌عرب بوده و فقط محوطه‌های باستانی مربوط به دوران پیش‌ازتاریخ (نوسنگی، مس‌سنگی) که دارای موقعیت مکانی نسبتاً دقیق و داده‌های محیطی معتبر بودند، در تحلیل‌ها لحاظ گردیدند. محوطه‌های فاقد اطلاعات کافی یا متعلق به دوره‌های متأخر، از دامنه بررسی حذف شدند.

برای تحلیل‌های محیطی، مجموعه‌ای از داده‌های مکانی از طریق پلتفرم گوگل ارث انجین (Google Earth Engine-GEE)، پایگاه‌های داده جهانی و نرم‌افزارهای تخصصی مانند جی آی اس پرو (GIS Pro)، ساگا (Saga)، گوگل مپ (Google Maps) و محیط‌های برنامه‌نویسی پایتون (Python)، R و ... گردآوری و پردازش شدند.

گام اول: برآورد میزان رسوب تولیدی با شاخص فورنیه

در ابتدا از شاخص فورنیه برای برآورد اولیه میزان رسوب‌گذاری سالیانه در سه زیرحوضه موردمطالعه، استفاده گردید. در مدل توسعه‌یافته این شاخص، میزان تولید رسوب سالیانه Qs به صورت تابعی از نسبت مربع بارندگیِ ماهیانهٔ بیشینه به بارندگی سالیانه، ارتفاع میانگین حوضه و میانگین شیب زمین مدل‌سازی می‌شود.

$$\log QS = 2.65 \log \frac{Pw^2}{Pa} + 0.46 \log(H) \times (tanS) - 1.56$$

QS: رسوب سالیانه (تن بر کیلومتر مربع)

Pw: حداکثر بارش ماهیانه

Pa: میانگین بارش سالیانه

H: ارتفاع میانگین

S: شیب میانگین

برای پیاده‌سازی مدل تجربی فورنیه در پلتفرم GEE، از داده‌های ماهواره‌ای و نقشه‌های جهانی با وضوح مکانی مناسب استفاده شد. هدف، محاسبه پارامترهای مؤثر شامل بارندگی، میانگین ارتفاع و میانگین شیب حوضه در قالب متغیرهای ورودی مدل بود:

-بارندگی (Pa-Pw):

برای استخراج بارندگی ماهیانه و سالیانه، از داده‌های لایهٔ OpenLandMap Precipitation Monthly بهره‌گیری شد. این داده‌ها دارای وضوح مکانی ۱۰۰۰ متر هستند و امکان استخراج مقادیر بارش ماهیانه به تفکیک پیکسل را برای کل محدوده فراهم می‌کنند. با استفاده از این داده‌ها، حداکثر بارش ماهیانه (P_w) و میانگین بارش سالیانه (P_a) برای هر پیکسل محاسبه شد.

-ارتفاع (H):

به‌منظور محاسبه ارتفاع میانگین حوضه، از مدل رقومی ارتفاعی NASA SRTM با دقت مکانی ۳۰ متر بهره گرفته شد.

این مدل به‌صورت گسترده در مطالعات هیدرولوژیکی به‌کار می‌رود و امکان محاسبه دقیق ارتفاع در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای را فراهم می‌سازد.

شیب زمین(S) :

لایهٔ شیب از مشتق‌گیری مدل ارتفاعی SRTM با استفاده از توابع درون‌ساخته پلتفرم GEE به‌دست آمد. مقدار شیب به‌صورت زاویه (درجه) محاسبه و سپس در معادله شاخص فورنیه با تبدیل به تابع تانژانت (tan S) استفاده شد.

در نهایت نقشه نهایی میزان رسوب تولیدی سالیانه به صورت رستر GeoTIFF و در سیستم مختصات UTM-Zone 39N تهیه و مقادیر نهایی، به‌عنوان متغیر وابسته وارد مرحله بعدی مدل‌سازی شدند.

گام دوم: بهبود مدل با روش‌های یادگیری ماشین

در مرحله دوم به‌منظور بهبود دقت مدل، از زبان برنامه نویسی R و بسته‌های تخصصی تحلیل داده‌های مکانی و یادگیری ماشین استفاده شد. در ابتدا، ۱۵ شاخص محیطی استخراج گردید که پس از بررسی همبستگی میان آنها، ۱۰ متغیر نهایی برای ارتقاء شاخص فورنیه و مدل‌سازی میزان تولید رسوب انتخاب شدند:

-شیب (Slope):

شیب زمین یکی از عوامل کلیدی در فرایندهای رسوب‌گذاری و فرسایش خاک است. افزایش شیب باعث افزایش سرعت جریان آب سطحی می‌شود که در نتیجه توان حمل رسوب را افزایش می‌دهد. این امر به ویژه در اراضی با پوشش گیاهی کم یا بدون پوشش، مانند زمین‌های کشاورزی و اراضی بایر، مشهود است (Wang Nang et al., 2023).

-ارتفاع (Elevation):

ارتفاع یک عامل اساسی در تعیین مکان سکونت انسان‌ها بوده و نقشی کلیدی در مدل‌سازی فرسایش و رسوب دارد؛ در دشت قزوین، اکثر محوطه‌ها به‌ویژه در دوره نوسنگی در ارتفاعی بین ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ متر واقع بوده که این موقعیت نه تنها شرایط اقلیمی معتدل و منابع آب و خاک حاصلخیز دشت‌های آبرفتی و مخروط‌افکنه‌ای را فراهم می‌کند، بلکه به دلیل شیب کم و رسوبات ریزدانه، برای کشاورزی و ساخت و ساز نیز مناسب است (ذنوبی و همکاران، ۱۴۰۴).

-درصد رس (Clay):

افزایش درصد رس در ترکیب‌های رسوبی به‌طور مستقیم بر مقاومت بستر در برابر فرسایش تأثیر می‌گذارد. این افزایش موجب افزایش چسبندگی بین ذرات و در نتیجه افزایش تنش برشی بحرانی (Critical Shear Stress) موردنیاز برای شروع جدایش ذرات می‌شود. بنابراین، حضور رس در رسوبات نقش اساسی در پایداری بستر و کاهش فرسایش دارد (Panagiotopoulos et al., 1997; Chen et al., 2021).

-درصد ماسه (Sand):

افزایش درصد ماسه در رسوبات رس‌دار، باعث کاهش چسبندگی ذرات رس و ساختار یکپارچه آن گردیده و در نتیجه ذرات سبک‌تر و راحت‌تر از بستر شسته شده و میزان فرسایش افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، ماسه به عنوان یک عامل

«اختلال‌گر» عمل می‌کند و مقاومت رسوب در برابر جریان آب را پایین می‌آورد (Perera et al., 2020). این اثر اهمیت تعیین دقیق ترکیب دانه‌ها، به ویژه سهم ماسه در مدل‌سازی فرسایش و رسوب‌گذاری را نشان می‌دهد.

–شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی (Normalized Difference Vegetation Index):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) که بر اساس تفاوت بازتاب طیفی در باندهای قرمز و فروسرخ نزدیک تعریف می‌شود معیاری مؤثر برای ارزیابی تراکم و سلامت پوشش گیاهی به‌ویژه در مطالعات فرسایش و رسوب‌گذاری است. تحقیقات نشان داده‌اند کاهش این شاخص که نشان‌دهنده کاهش پوشش گیاهی است، با افزایش فرسایش خاک ارتباط مستقیم دارد. به‌عنوان مثال، در مناطقی که پوشش گیاهی آنها بر اثر عوامل انسانی یا محیطی کاهش یافته با افزایش شدید فرسایش خاک همراه بوده است (Mu, Zhang, & Shi, 2022). این شاخص با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و مدل‌های محاسبه میزان تولید رسوب و فرسایش، به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک، برای پیش‌بینی حساسیت به فرسایش و برنامه‌ریزی مدیریت منابع طبیعی کاربرد دارد (Mahgoub et al., 2024).

–شاخص موقعیت توپوگرافی (Topographic Position Index):

$$TPI = z_0 - z_r$$

شاخص TPI به‌صورت اختلاف بین ارتفاع یک نقطه (Z_0) با میانگین ارتفاع همسایگی آن (Z_r) تعریف و در آن موقعیت نسبی یک نقطه در یک پستی–بلندی محلی مشخص می‌شود و برای شناسایی قله‌ها، دره‌ها و دامنه‌ها در مطالعات زمین‌شناسی و محیط‌زیست کاربرد دارد. مقادیر مثبت TPI نشان‌دهنده نقاط بالاتر از محیط اطراف (مانند تپه‌ها و قله‌ها) و مقادیر منفی آن نشان‌دهنده نقاط پایین‌تر (مانند دره‌ها) هستند. بنابراین، TPI می‌تواند در مدل‌سازی فرسایش و رسوب، مدیریت منابع آب و شناسایی مناطق مستعد تجمع رسوبات، نقش کلیدی ایفا کند.

– انحنای پروفیل طولی (Profile Curvature Index):

$$Profile\ Curvature = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}$$

این شاخص از مشتق دوم ارتفاع در راستای شیب اصلی به دست آمده و نشان‌دهنده میزان تجمع یا پراکنش جریان آب در جهتِ شیب است. انحنای پروفیل طولی نقش مهمی در تحلیل فرسایش و رسوب دارد، زیرا مناطق با انحنای مثبت باعث کند شدن جریان آب و تجمع رسوبات می‌شوند، در حالی که مناطق با انحنای منفی جریان آب را تسریع کرده و احتمال فرسایش را افزایش می‌دهند. بنابراین، بررسی انحنای پروفیل طولی در مطالعات زمین‌شناسی و هیدرولوژی ضروری است.

–انحنای پلان (Plan Curvature Index):

$$Plan\ Curvature = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}$$

حاصل مشتق دوم ارتفاع نسبت به محور افقی عمود بر جهتِ شیب اصلی زمین و بیانگر تمرکز یا پراکندگی جریان آب در جهت افقی سطح زمین است. انحنای پلان به عنوان یکی از شاخص‌های توپوگرافی نقش مهمی در کنترل جریان آب سطحی و پراکنش ذرات رسوبی دارد. این شاخص، تمرکز یا پراکندگی جریان آب را در جهت افقی سطح زمین نشان می‌دهد و به این ترتیب، مناطق با انحنای پلان منفی، جریان آب را متمرکز کرده و فرسایش بیشتری ایجاد می‌کنند، در حالی که مناطق با انحنای پلان مثبت، جریان آب را پراکنده کرده و باعث کاهش فرسایش می‌شوند. بنابراین، انحنای پلان به عنوان یک عامل کلیدی در مدل‌سازی فرسایش و رسوب‌گذاری عمل می‌کند و ترکیب آن با سایر شاخص‌های توپوگرافی مانند شیب و ارتفاع می‌تواند دقت پیش‌بینی مناطق پرخطر را افزایش دهد.

-نقشه سنگ‌شناسی (Lithological map):

نوع سنگ‌ها نیز بر مقاومت در برابر فرسایش و رسوب تأثیر مستقیم دارند. تفاوت در سختی، ترکیب شیمیایی و مقاومت مکانیکی سنگ‌ها می‌تواند فرسایش و میزان انتقال رسوب را به طور قابل توجهی تغییر دهد؛ سنگ‌های سخت مانند گرانیت (Granite) مقاومت بیشتری در برابر فرسایش داشته و بنابراین میزان رسوب منتقل شده از مناطق تحت پوشش آنها کمتر است، در حالی که سنگ‌های نرم‌تر مانند شیل (Shale) بیشتر مستعد فرسایش هستند و موجب افزایش رسوب‌گذاری در پایین‌دست می‌شوند (Haag et al., 2025). این موضوع اهمیت نوع سنگ در شکل‌گیری و تکامل چشم‌اندازها را در ادوار مختلف زمانی نشان می‌دهد.

-فاصله از شبکه زهکشی (Channel Network Distance):

مجاورت با آبراهه‌ها معمولاً با افزایش رواناب و فرسایش همراه بوده و فاصله از شبکه زهکشی، نقش مهمی در شدت فرسایش و رسوب‌گذاری دارد. مناطق نزدیک به آبراهه‌ها یا رودخانه‌ها به دلیل افزایش تمرکز رواناب و انرژی جریان آب، بیشتر در معرض فرسایش قرار می‌گیرند، در حالی که مناطق دورتر از آبراهه‌ها فرسایش کمتری را تجربه می‌کنند. این شاخص معمولاً در مدل‌های ارزیابی خطر فرسایش برای پیش‌بینی مکان‌هایی که تولید رسوب بیشتر است، استفاده می‌شود (Shi et al., 2025).

جدول شماره ۱ نوع داده‌ها، منابع، روش استخراج یا محاسبه و دقت/رزولوشن هر داده را نشان می‌دهد.

جدول ۱: نوع داده‌ها، منابع، روشِ استخراج یا محاسبه و دقت/رزولوشن هر داده

نوع داده	منبع داده	روش استخراج/محاسبه	دقت/رزولوشن
ارتفاع	مدل رقومی ارتفاع SRTM / ALOS PALSAR	اسکریپ‌نویسی در پلتفرم GEE	۳۰ متر / ۱۲.۵ متر
شیب	مدل رقومی ارتفاع	ابزار Slope (Spatial Analyst) در GIS Pro	۳۰ متر / ۱۲.۵ متر
جهتِ شیب	مدل رقومی ارتفاع	ابزارAspect (Spatial Analyst) در GIS Pro	۳۰ متر / ۱۲.۵ متر
تجمع جریان سطحی	مدل رقومی ارتفاع	ابزار هیدرولوژی در GIS Pro	۳۰ متر / ۱۲.۵ متر
فاصله تا منابع آبی	شیپ فایل آبراهه‌ها و منابع آبی	محاسبه فاصله با ابزار Euclidean Distance	۳۰ متر
فاصله تا گسل‌ها	شیپ فایل گسل‌ها	محاسبه فاصله با ابزار Euclidean Distance	۳۰ متر
شاخص پوشش گیاهی	تصاویرSentinel-2	اسکریپ‌نوسی در پلتفرم GEE	۱۰ متر
متغیرهای شاخص فورنیه	OpenLandMap Precipitation Monthly	اسکریپ‌نوسی در پلتفرم GEE	۳۰ متر
درصد ماسه–رس	OpenLandMap-USDA	اسکریپ‌نوسی در پلتفرم GEE	±۵٪
شاخص موقعیت توپوگرافی	مدل رقومی ارتفاع	نرم‌افزار SAGA GIS	۳۰ متر / ۱۲.۵ متر
انحنای پروفیل طولی	مدل رقومی ارتفاع	نرم‌افزار SAGA GIS	۳۰ متر / ۱۲.۵ متر
انحنای پلان	مدل رقومی ارتفاع	نرم‌افزار SAGA GIS	۳۰ متر / ۱۲.۵ متر
نقشه سنگ‌شناسی	شیپ فایل زمین‌شناسی	استخراج ویژگی‌ها و امتیازدهی حساسیت در GIS Pro	۳۰ متر / ۱۲.۵ متر
فاصله از شبکه زهکشی	مدل رقومی ارتفاع	نرم‌افزار SAGA GIS	۳۰ متر / ۱۲.۵ متر

گام سوم: پیاده‌سازی مدل‌های یادگیری ماشین

ده متغیر اصلی فوق در قالب نقشه‌های رستری، پس از آماده‌سازی در نرم‌افزار جی آی اس پرو، به محیط R منتقل و به صورت یک شیء چندلایه رستری سازمان‌دهی شدند. داده‌های نمونه‌برداری شده از نقشه خروجی شاخص فورنیه نیز با استفاده از تابع extract به فریم داده‌ها اضافه و مقادیر گمشده (No Data) حذف شدند. سپس داده‌ها به دو مجموعه ۷۰٪ برای آموزش مدل‌ها و ۳۰٪ برای آزمون و ارزیابی تقسیم شدند.

در ادامه برای دستیابی به نتایج بهتر سه مدل یادگیری ماشین برای پیش‌بینی شدت رسوب‌گذاری زیرحوضه‌ها اجرا شد:

–رگرسیون خطی چندگانه (Multiple Linear Regression-MLR):

رگرسیون خطی چندگانه یکی از رایج‌ترین و شناخته‌شده‌ترین روش‌های آماری برای بررسی روابط بین متغیرهاست. این مدل تلاش می‌کند تا رابطه بین یک متغیر وابسته و چندین متغیر مستقل را شناسایی کرده و با ایجاد یک معادله ریاضی، مقدار پیش‌بینی شده متغیر وابسته را بر اساس ترکیب خطی متغیرهای ورودی تخمین بزند (Baird & Bieber, 2023). از مزایای اصلی این روش می‌توان به سادگی، شفافیت و قابلیت تفسیر آسان نتایج اشاره کرد. با این حال، محدودیت‌هایی در مواجهه با روابط غیرخطی و پیچیده میان متغیرها دارد که در شرایط خاص ممکن است دقت پیش‌بینی را کاهش دهد.

-جنگل تصادفی (Random Forest-RF):

جنگل تصادفی یک الگوریتم یادگیری ماشین مبتنی بر مجموعه‌ای از درخت‌های تصمیم (Decision Trees) است که به‌طور مستقل هر یک از داده‌های ورودی را پردازش و پیش‌بینی می‌کند. خروجی نهایی مدل از ترکیب نتایج همه درخت‌ها حاصل می‌شود که این فرایند موجب افزایش دقت و کاهش واریانس پیش‌بینی نسبت به استفاده از یک درخت منفرد می‌گردد (Biau & Scornet, 2016). این الگوریتم به دلیل توانایی بالای خود در شناسایی روابط غیرخطی و پیچیده میان متغیرها، ابزار مناسبی برای مدل‌سازی فرایندهای محیطی مانند فرسایش خاک و میزان رسوب‌گذاری محسوب می‌شود.

-شبکه‌های عصبی مصنوعی (Artificial Neural Networks-ANN):

شبکه‌های عصبی مصنوعی یک مدل محاسباتی الهام‌گرفته از ساختار و عملکرد مغز انسان است که قادر به شناسایی و یادگیری روابط پیچیده و غیرخطی میان متغیرهاست (Kriegeskorte & Golan, 2019). این شبکه‌ها از چندین لایه شامل «نورون‌ها» تشکیل شده که هر نورون وظیفه پردازش و وزن‌دهی اطلاعات ورودی را بر عهده دارد و در نهایت با ترکیب نتایج حاصل از لایه‌ها، خروجی مورد نظر – در این مطالعه تولید رسوب – تولید می‌شود. ساختار چندلایه و قابلیت یادگیری الگوهای پیچیده باعث می‌شود این مدل نسبت به مدل‌های سنتی‌تر، به ویژه در مجموعه داده‌های بزرگ و دارای تنوع بالا، عملکرد پیش‌بینی قابل‌توجهی داشته باشد. به دلیل توانایی این مدل در آشکارسازی روابط غیرخطی میان شاخص‌های محیطی و شدت فرسایش و رسوب، استفاده از ANN در مطالعات مدل‌سازی فرسایش زمین و تحلیل داده‌های زیست‌محیطی به طور گسترده مورد توجه قرار گرفته است.

پس از محاسبات فوق با سه مدل یادشده در نهایت عملکرد هر مدل با دو شاخص اصلی، یعنی ضریب همبستگی پیرسون (Pearson correlation coefficient) برای اندازه‌گیری میزان تطابق پیش‌بینی‌ها با مقادیر واقعی و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای سنجش میزان خطای پیش‌بینی‌ها ارزیابی شد تا میزان دقت هر مدل مشخص شود.

گام چهارم: تهیه نقشه مطلوبیت مکانی

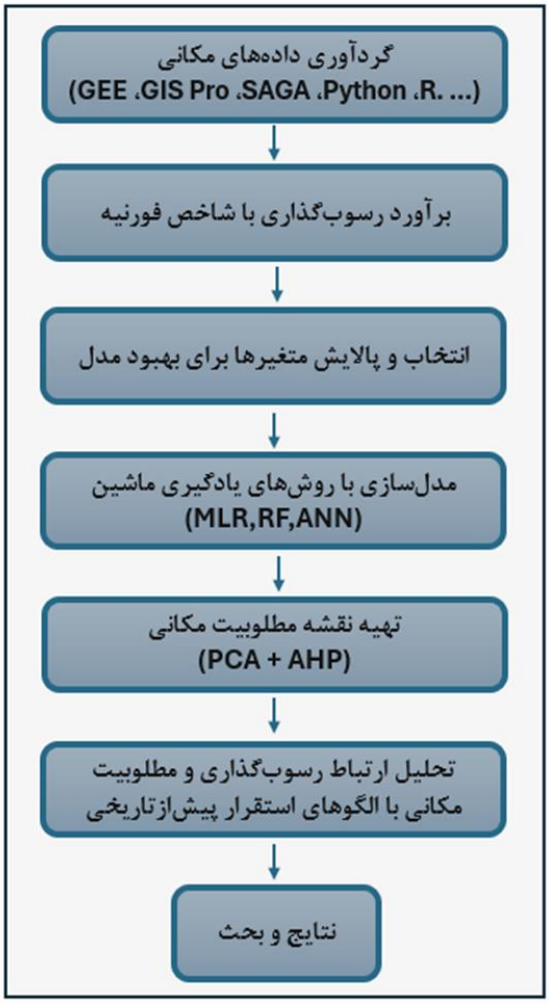
در این مرحله، نقشه مطلوبیت مکانی با استفاده از روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (Analytic Hierarchy Process - AHP) و هفت متغیر محیطی کلیدی توسط زبان برنامه نویسی پایتون تهیه شد تا رابطه بین ویژگی‌های طبیعی و الگوهای استقراری پیش‌ازتاریخی منطقه بررسی گردد. این متغیرها عبارت بودند از ارتفاع، شیب، جهتِ شیب، تجمع جریان سطحی، فاصله تا منابع آبی، فاصله تا گسل‌ها و شاخص پوشش گیاهی.

برای تعیین اولویت و وزن شاخص‌ها نیز از تحلیل مولفه‌های اصلی (Principal Component Analysis -PCA) استفاده شد تا سهم هر متغیر مذکور در واریانس کل داده‌ها محاسبه، وزن نسبی آنها به صورت کمی مشخص و در نتیجه مناطقی که بیشترین تناسب را برای سکونت‌های باستانی داشتند شناسایی شوند. نقشه خروجی با بازه عددی پیوسته ۰ تا ۱ نشان می‌دهد کدام مناطق در منطقه مورد مطالعه برای فعالیت‌های انسانی یا سکونت در گذشته بیشترین جذابیت و قابلیت را داشته‌اند، مقادیر بالاتر نشان‌دهنده مناطقی با شرایط طبیعی مناسب‌تر برای سکونت، کشاورزی یا دسترسی به منابع بوده و مقادیر پایین‌تر نمایانگر محدوده‌هایی هستند که به دلیل شرایط زمین یا دسترسی محدود، احتمالاً با استقبال کمتری از سوی

ساکنان باستانی برای سکونت روبرو شده‌اند. به بیان ساده‌تر، خروجی حکم نمای کلی از ترجیحات مکان‌گزینی در ادوار نوسنگی و مس‌سنگی منطقه بر اساس محیط طبیعی را دارد.

در نهایت، نقشه مطلوبیت مکانی با نقشه‌های پیش‌بینی میزان تولید رسوب همپوشانی داده شد تا رابطه میان ویژگی‌های محیطی، میزان رسوب و انتخاب مکان توسط جوامع باستانی تحلیل گردد. این روش امکان شناسایی دقیق مکان‌های بالقوه سکونت و درک الگوهای محیطی انتخاب مکان سکونت در گذشته را فراهم می‌کند.

به‌منظور تبیین گام‌های پژوهش و روشن‌سازی فرآیند انجام کار، فلوچارت مراحل تحقیق در شکل شماره ۲ ارائه شده است.



شکل ۲: فلوچارت مراحل و روش‌های انجام مطالعه

استنباط و استنتاج

پس از تهیه نقشه میزان تولید رسوب سالیانه با روش فورنیه از طریق اسکریپت‌نویسی در پلتفرم GEE و بهبود خروجی با مدل‌های سه‌گانه یادگیری ماشین شامل MLR، RF و ANN در راستای بررسی میزان رسوب‌گذاری در زیرحوضه‌های ابهررود، خررود و حاجی‌عرب و تأثیر آن بر محوطه‌های استقراری باستانی، عملکرد سه مدل مذکور ارزیابی شد. معیارهای سنجش عملکرد، ضریب همبستگی پیرسون (Pearson’s r) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بودند تا دقت مدل‌ها سنجیده شود (جدول۲).

جدول۲: عملکرد سه مدل پیش‌بینی برای میزان رسوب تولیدی در سه زیرحوضه بر اساس ضریب همبستگی پیرسون و ریشه میانگین مربعات خطا

زیرحوضه	مدل	Pearson's r	RMSE
ابهررود	MLR	۰.۶۱	۲۰.۱۲۳
	RF	۰.۸۲	۱۴.۹۶۱
	ANN	۰.۸۸	۱۳.۹۲۱
خررود	MLR	۰.۷۰	۱۸.۸۷۶
	RF	۰.۹۰	۱۴.۳۳۲
	ANN	۰.۹۲	۱۳.۱۲۶
حاجی‌عرب	MLR	۰.۶	۱۹.۴۶۵
	RF	۰.۸۵	۱۵.۰۲۰
	ANN	۰.۹۲	۱۳.۸۹۰

نتایج نشان داد که ANN جزئیات مکانی تولید رسوب را با بالاترین دقت بازسازی کرده و بیشترین تطابق را با شرایط واقعی محیطی دارد (بالاترین ضریب همبستگی و کمترین RMSE). مدل RF نیز نسبت به MLR عملکرد قابل توجهی داشت و در برخی نواحی، به ویژه در زیرحوضه ابهررود، توانست الگوی رسوب‌گذاری را به‌خوبی بازسازی کند. MLR به دلیل ساده بودن، جزئیات محیطی را کمتر نشان داده و بازنمایی آن یکنواخت و کلی بود؛ این موضوع حاکی از روابط پیچیده و غیرخطی میان پارامترهای محیطی و رسوب‌گذاری در این مناطق است (جدول ۳).

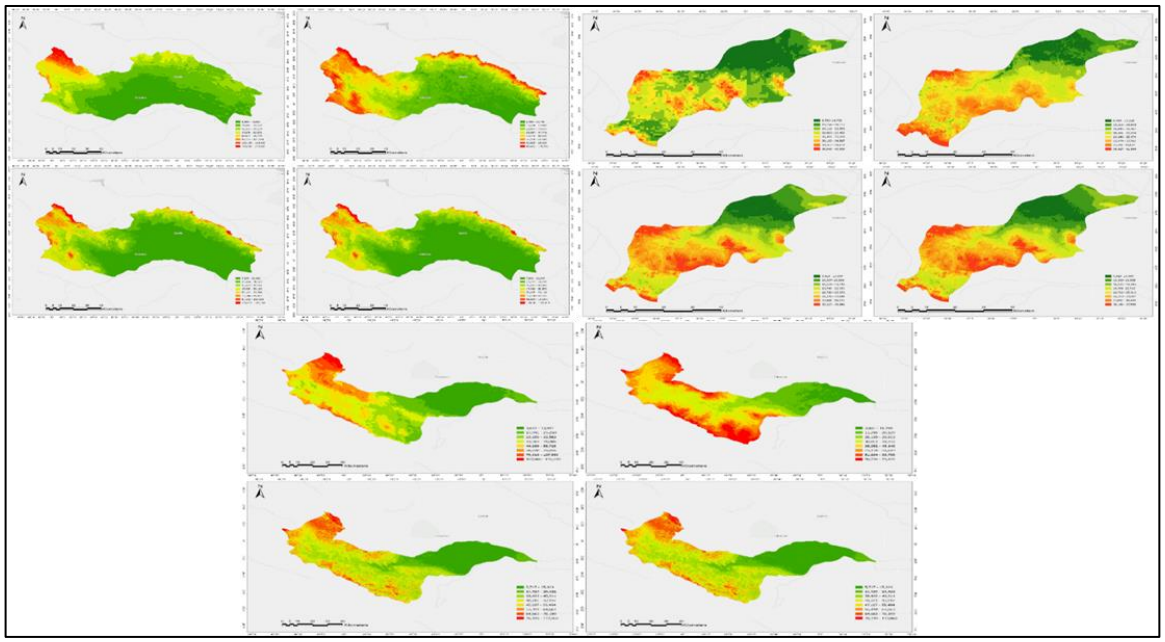
در ادامه، نقشه‌های پیش‌بینی تولید رسوب با مدل‌های یادگیری ماشین با نقشه شاخص فورنیه به عنوان نقشه مرجع مقایسه شدند (شکل ۳). نمایش بصری این داده‌ها نیز نتایج قبلی را تایید کرد و نشان داد که مدل MLR، توزیع میزان رسوب تولیدی را یکنواخت و با جزئیات کمتر نشان می‌دهد، در حالی که مدل‌های ANN و RF با قدرت تفکیک بالاتر، نواحی دارای میزان رسوب‌گذاری شدید یا کم را بهتر شناسایی کردند. مدل RF در شناسایی نواحی شیب‌دار با پوشش گیاهی ضعیف عملکرد خوبی داشت. همچنین، مدل ANN الگوی مکانی مشابهی ارائه داد، اما در برخی مناطق میزان رسوب‌گذاری را کمی بیش‌تر برآورد کرد.

در زیرحوضه‌های ابهررود و خررود، مدل MLR بازه تولید رسوب کمتری را پیش‌بینی کرده و نواحی با رسوب‌گذاری شدید را با دقت پایین‌تری شناسایی نمود. در مقابل، مدل‌های RF و ANN بازه وسیع‌تر و نزدیک‌تری به مقادیر شاخص فورنیه ارائه دادند. در زیرحوضه حاجی‌عرب، محدوده مقادیر پیش‌بینی شده توسط تمام مدل‌ها به شاخص فورنیه نزدیک بود، ولی مدل‌های RF و ANN جزئیات مکانی بیشتری نسبت به مدل MLR ارائه کردند (شکل ۴).

در نتیجه مقایسه بصری نقشه‌های مدل‌های سه‌گانه با نقشه فورنیه نشان می‌دهد که RF و ANN تطابق مکانی بیشتری با الگوی واقعی تولید رسوب دارند و در گام بعدی پژوهش می‌توانند به عنوان ورودی اصلی مورد استفاده قرار گیرند.

جدول۳: بازه میزان رسوب تولیدی بر حسب تن بر کیلومتر مربع در سال با استفاده از شاخص فورنیه و مدل‌های سه‌گانه

زیرحوضه	شاخص فورنیه	MLR	RF	ANN
ابهررود	۲۲۹.۶۶۳ – ۳.۸۹۶	۱۲.۱۷۸۳ – ۲.۰۰۰	۱۸.۱۲۰۴ – ۷.۲۵۹	۱۸۲.۵۱۵ – ۷.۰۹۲
خررود	۱۵۶.۶۱۰ – ۴.۶۷۲	۷۹.۱۲۴ – ۳.۰۶۱	۱۱.۷۰۶۰ – ۵.۷۱۷	۱۱۹.۱۹۳ – ۵.۶۵۲
حاجی‌عرب	۴۵.۹۳۹ – ۸.۷۶۰	۴۱.۹۰۸ – ۶.۳۹۵	۳۸.۰۶۴ – ۹.۹۱۵	۳۷.۵۵۸ – ۹.۹۲۵



شکل ۳ : مقایسه رسترهای خروجی برآورد تولید رسوب سالیانه در زیرحوضه‌ها توسط شاخص فورنیه و مدل‌های سه‌گانه

شکل ٤ : نمودار مقایسه برآورد تولید رسوب سالیانه توسط شاخص فورنیه و سه مدل MLR، RF و ANN

اجرای مدل‌سازی مطلوبیت مکانی با استفاده از روش AHP و داده‌های رستری

در این پژوهش، با هدف شناسایی نواحی مستعد حضور و استقرار محوطه‌های باستانیِ پیش‌ازتاریخی در سه زیرحوضه مورد مطالعه، از مدل‌سازی تصمیم‌گیری چندمعیاره (Multi Criteria Decision Analysis-MCDA) مبتنی بر AHP در محیط نرم‌افزار GIS Pro و پایتون استفاده شد.

روش تحلیل AHP یکی از برجسته‌ترین و معتبرترین ابزارهای تصمیم‌گیری چندمعیاره است که با تلفیق اصول ریاضی و روان‌شناسی، امکان تحلیل نظام‌مند و کمّی مسائل پیچیده چندبعدی را فراهم می‌سازد. در این رویکرد، معیارها و گزینه‌ها در یک ساختار سلسله‌مراتبی سامان‌دهی می‌شوند و از طریق مقایسات زوجی، اهمیت نسبی هر معیار به‌طور دقیق تعیین می‌گردد. وزن‌های حاصل از ماتریس مقایسه‌های زوجی (Pairwise Comparison)، به‌عنوان مبنای تصمیم‌گیری بهینه مورد استفاده قرار می‌گیرند و با سنجش سازگاری قضاوت‌ها، امکان تشخیص ناسازگاری‌ها و اصلاح آن‌ها فراهم می‌شود. چنین ویژگی‌هایی، AHP را به ابزاری داده‌محور، کمّی و تا حدود زیادی بی‌طرف برای تحلیل تصمیمات پیچیده و بهینه‌سازی مکان‌یابی در پژوهش‌های محیطی، زمین‌شناسی و مدیریتی تبدیل کرده است (Pant et al., 2022).

همچنین جهت تعیین وزن اولیه و اهمیت نسبی شاخص‌های محیطی از روش داده‌محور و کمّی تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) استفاده شد. PCA به‌عنوان یکی از پرکاربردترین تکنیک‌های آماری چندمتغیره، ابزاری کارآمد برای آشکار ساختن الگوهای پنهان در داده‌های پیچیده و شناسایی عواملی است که بیشترین نقش را در شکل‌دهی به چشم‌اندازهای استقراری

دارد، همچنین روشی موثر در کاهش ابعاد این داده‌ها به شمار می‌رود. طی این فرایند، مجموعه‌ای از متغیرهای اولیه که اغلب دارای همبستگی درونی هستند، به محورهایی جدید و مستقل تبدیل می‌شوند که هر یک ترکیبی خطی از متغیرهای اصلی را بازنمایی می‌کنند. این محورها یا مؤلفه‌ها به گونه‌ای سامان می‌یابند که نخستین مؤلفه بیشترین بخش از واریانس داده‌ها را توضیح داده و مؤلفه‌های بعدی نیز به‌ترتیب سهم کمتری را پوشش دهند در حالی که همگی نسبت به یکدیگر ناهمبسته باقی می‌مانند.

بدین‌ترتیب، این روش نه تنها امکان تمرکز بر مهم‌ترین ابعاد تبیین‌کنندهٔ پدیده را فراهم می‌سازد، بلکه با استخراج بارهای عاملی هر متغیر، نقش و اهمیت نسبی آنها در ساختار کلی داده‌ها را نیز نمایان می‌کند (Jolliffe & Cadima, 2016).

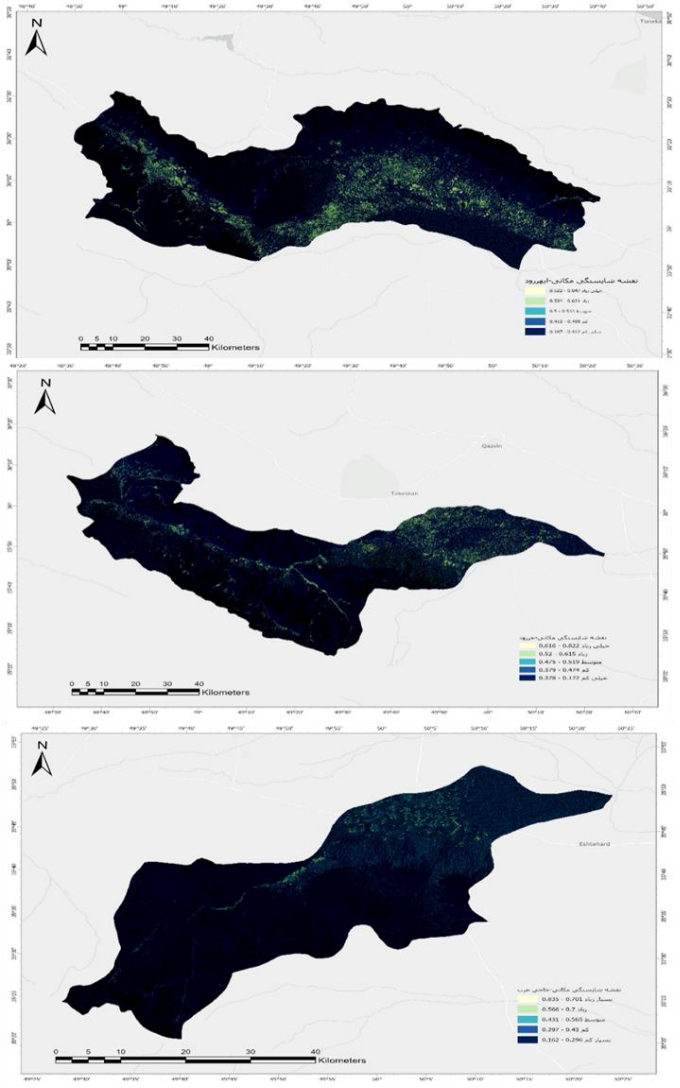
در این پژوهش، بهره‌گیری از PCA برای تحلیل داده‌های محیطی مرتبط با محوطه‌های باستانی، به شناسایی معیارهایی انجامید که بیشترین تأثیر را بر الگوی استقرار انسانی در چشم‌انداز مورد مطالعه داشتند. این نتایج به‌عنوان چهارچوبی داده‌محور برای ساخت ماتریس مقایسه‌های زوجی در روش AHP به کار گرفته شد و سهم نسبی هر متغیر در تبیین واریانس کل داده‌ها محاسبه گردید همچنین یک مبنای بی‌طرف، داده‌محور و کمّی برای وزن‌دهی به لایه‌های مکانی فراهم و از تأثیر ذهنیت در وزن‌دهی جلوگیری نمود. بر پایه تحلیل معیارهای گوناگون و شاخص‌های مختلف، در نهایت هفت عامل محیطی و زمین‌ریخت‌شناسی به ترتیب شامل پوشش گیاهی، فاصله تا منابع آبی، ارتفاع، شیب، فاصله تا گسل‌ها، جهت شیب و میزان تجمع جریان به‌عنوان مهم‌ترین متغیرهای مؤثر شناسایی شدند. این عوامل نقشی تعیین‌کننده در مکان‌گزینی جوامع نوسنگی و مس‌سنگی دشت قزوین داشته و همبستگی معناداری با الگوهای باستان‌شناختی انتخاب محل سکونت نشان می‌دهند. در واقع، این متغیرها بیانگر شرایط بالقوه‌ای بودند که مشخص می‌کردند جوامع باستانی در چه مکان‌هایی استقرار یابند، چگونه دسترسی خود به منابع حیاتی را سازمان‌دهی کنند و چه واکنشی در برابر تهدیدهای طبیعی از خود نشان دهند.

در ادامه با استفاده از روش بردار ویژه (Eigenvector Method)، وزن نهایی هر معیار برای جای‌گذاری در ماتریس استخراج شد و شاخص‌هایی که بار عاملی بالاتری داشتند، در ماتریس نیز وزن بالاتری دریافت کردند. به عبارت دیگر، ساختار ماتریس AHPبه‌طور کامل بر اساس تحلیل PCA شکل گرفت. ماتریس مقایسه‌های زوجی در روش AHP جدولی است که در آن معیارها به‌صورت دو به دو با هم مقایسه می‌شوند تا اهمیت نسبی هر کدام نسبت به دیگری مشخص شود. این ماتریس پایهٔ اصلی محاسبهٔ وزن‌هاست و نشان می‌دهد هر عامل محیطی یا جغرافیایی چه میزان بر گزینش مکانی محوطه‌های باستانی تأثیر دارد. در این روش، ماتریس از طریق محاسبات ریاضی به یک بردار تبدیل می‌شود؛ به بیان دیگر، بردار خروجی، توزیعی بهینه از وزن‌ها ارائه می‌کند که بیشترین سازگاری را با کل ساختار مقایسه‌ها دارد، در نتیجه معتبرترین برآورد از نقش هر معیار در مدل بازنمایی می‌گردد. مزیت اصلی این رویکرد در آن است که وزن‌های نهایی نه صرفاً بر پایه قضاوت ذهنی، بلکه بر اساس یک مبنای ریاضی دقیق و سازگار استخراج می‌شوند؛ بدین‌ترتیب اطمینان حاصل می‌شود که نتیجهٔ نهایی مدل همسو با منطق مقایسه‌های اولیه بوده و قابلیت تعمیم در تحلیل‌های مکانی را داراست. همچنین، برای ارزیابی اعتبار منطقی این ماتریس، نسبت سازگاری (CR) محاسبه گردید که مقدار آن کمتر از ۰.۱ به‌دست آمد و نشان‌دهندهٔ سازگاری قابل‌قبول ساختار تصمیم بود.

در نهایت، برای ساخت مدل مطلوبیت مکانی، پس از تهیه لایه‌های رستری متغیرهای هفتگانه، تمامی آنها ابتدا به بازهٔ نرمال‌شده [۰ تا ۱] تبدیل شدند تا مقیاس‌های مختلف به شکل یکسانی قابل مقایسه و ترکیب باشند، نقشه‌ی مطلوبیت با استفاده از مدل ترکیب خطی وزنی (Weighted Linear Combination) و اعمال وزن‌های به‌دست‌آمده بر روی لایه‌های نرمال‌شده به‌صورت زیر تولید شد:

$$\text{Suitability} = \sum_{i=1}^{n} w_i \times X_i$$

که در آن w_i وزن معیار و X_i لایهٔ نرمال‌شدهٔ مربوط به آن معیار است. خروجی نهایی مدل، میزان استعداد هر بخش از چشم‌انداز را برای استقرار محوطه‌های باستانی پیش‌ازتاریخ نمایش و هر پیکسل رستری بر اساس وزن‌دهی معیارهای محیطی و زمین‌ریخت‌شناسی، مقداری بین صفر تا یک به خود اختصاص می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که مقادیر بالاتر نشان‌دهندهٔ بیشترین قابلیت برای مکان‌گزینی و مقادیر پایین‌تر بیانگر نواحی کم‌تناسب هستند. بدین‌ترتیب، نقشهٔ حاصل نه تنها به‌عنوان ابزاری کمی در بازسازی الگوهای استقراری گذشته عمل می‌کند، بلکه می‌تواند در شناسایی نواحی با پتانسیل بالای باستان‌شناختی و هدایت پژوهش‌های میدانی آتی نیز مورد استفاده قرار گیرد (شکل ۵).

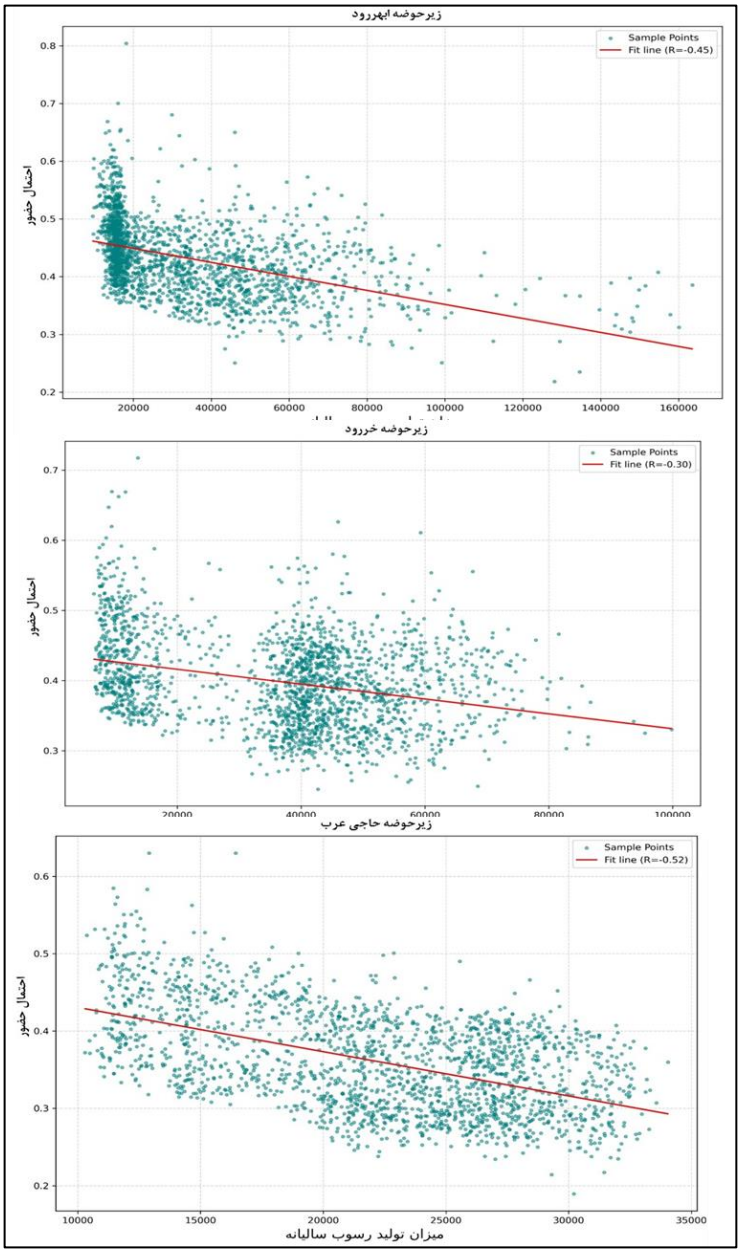


شکل ۵: رستر‌های خروجی مطلوبیت مکانی در سه زیرحوضه با ترکیب روش‌های AHP و PCA

تحلیل رابطه مکانی میان تولید رسوب و احتمال حضور استقرارگاه‌های باستانی

به‌منظور بررسی رابطه میان الگوهای رسوب‌گذاری و احتمال حضور محوطه‌های باستانی، از دو لایه رستری استفاده شد: نخست، نقشه رسوب‌گذاری که از طریق مدل ANN و به دلیل استخراج بهترین نتایج در مرحله قبل انتخاب شده بود و دوم، نقشه احتمال حضور محوطه‌های باستانی که بر پایه روش AHP تهیه گردید. هر دو نقشه به‌صورت مقادیر عددی پیوسته در واحدهای مستقل از مکان (رزولوشن مشابه) بودند. برای تحلیل این رابطه، ابتدا مقادیر نامعتبر یا فاقد داده (NoData) از هر دو نقشه حذف شدند. سپس برای کاهش بار محاسباتی و کنترل بر پراکندگی داده‌ها، تعداد ۲۰۰۰ نقطه از مناطق دارای داده

معتبر به‌صورت تصادفی استخراج و این نمونه‌ها به‌عنوان داده‌های آماری جهت تحلیل همبستگی و برازش مدل استفاده شدند. در گام بعد، از دو روش آماری ضریب همبستگی پیرسون برای سنجش ارتباط خطی بین دو متغیر و ضریب همبستگی اسپیرمن (Spearman correlation coefficient) برای ارزیابی ارتباط رتبه‌ای برای سنجش نوع و میزان ارتباط بین رسوب و احتمال وجود محوطه‌های باستانی بهره گرفته شد. همچنین، یک مدل رگرسیون خطی ساده نیز بین متغیر مستقل (میزان تولید رسوب) و متغیر وابسته (احتمال حضور) اجرا شد و امکان بررسی روند کلی تغییرات و شیب همبستگی بین دو متغیر را فراهم ساخت. نتایج حاصله در قالب نمودارِ پراکنش، همراه با خط برازش نمایش داده شد تا الگوی کلی رفتار داده‌ها در فضا قابل مشاهده باشد (شکل ۶). این سبک از تحلیل به‌ویژه در مطالعات باستان‌محیطی اهمیت بالایی دارد، زیرا می‌تواند نشان دهد که آیا الگوهای مکانی استقرار انسانی در گذشته با شدت یا الگوی رسوب‌گذاری و یا دیگر عوامل طبیعی مرتبط بوده‌اند یا خیر. برای مثال، در صورتی که نتایج حاکی از همبستگی منفی باشد، بر پایه پیش‌فرض‌های تعیین‌شده می‌توان تصور نمود که جوامع باستانی عمدتاً نواحی با شرایط محیطی پایدار را برای سکونت انتخاب کرده‌اند. نکته مهم آن است که چنین انتخاب‌هایی الزاماً آگاهانه و مبتنی بر شناخت علمی محیط نبوده، بلکه می‌تواند حاصل تجربه زیستی، مشاهده‌های روزمره و انتقال دانش بومی میان نسل‌ها بوده باشد. بدین‌ترتیب، حتی اگر انتخاب مکان‌های سکونتی در گذشته بدون درک مستقیم از فرایندهای زمین‌ریختی صورت گرفته باشد، نتیجه آن هم‌راستا با گزینش آگاهانه جلوه می‌کند؛ چراکه استمرار بقا، امنیت و پایداری معیشتی، به‌طور ناخودآگاه جوامع انسانی را به سمت مناطقی سوق داده که در بلندمدت از پایداری اکولوژیکی بیشتری برخوردار بوده‌اند. البته نباید از نظر دور داشت که احتمال مدفون بودن محوطه‌ها در مناطقی با تولید رسوب بالا نیز از قوت کمی برخوردار نیست. به بیان دیگر، کاهش شمار محوطه‌های شناسایی‌شده در این مناطق ممکن است نه به دلیل انتخاب آگاهانه جوامع برای اجتناب از آن‌ها، بلکه ناشی از دفن شدن آنها زیر لایه‌های رسوبی باشد. از این منظر تفسیر همبستگی‌ها باید با احتیاط صورت گیرد و مدفون بودن محوطه‌ها به‌عنوان یک عامل احتمالی در تحلیل پراکنش مکانی و ارزیابی الگوهای استقراری لحاظ شود.



شکل ٦: نمودار پراکنش بین رسوب‌گذاری و احتمال حضور محوطه‌های باستانی در سه زیرحوضه؛ خط قرمز نشان‌دهنده روند رگرسیون خطی است

تفسیر آماری رابطه تولید رسوب و احتمال حضور محوطه‌های باستانی

جهت ارزیابی ارتباط میان تولید رسوب و احتمال حضور استقرارهای باستانی، تحلیل همبستگی در سه زیرحوضهٔ ابهررود، خررود و حاجی‌عرب صورت گرفت. برای این منظور همان‌طور که قبلاً گفته شد از ضرایب همبستگی پیرسون و اسپیرمن استفاده گردید و نتایج زیر به‌دست آمد:

زیرحوضه حاجی‌عرب:

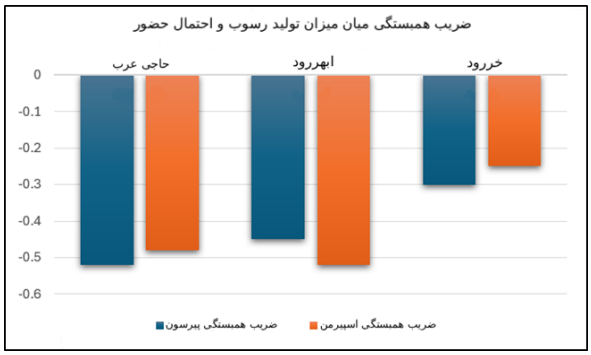
ضریب همبستگی پیرسون برابر با ۰.۵۲- و اسپیرمن برابر با ۰.۴۸- بود ($p < 0.001$) که نشان‌دهندهٔ یک رابطه منفی متوسط تا قوی بین تولید رسوب و احتمال حضور محوطه‌هاست. این خروجی بدان معناست که در این زیرحوضه، مناطق دارای رسوب کمتر با احتمال بالاتری از استقرار باستانی همراه هستند.

زیرحوضه ابهررود:

ضریب همبستگی پیرسون برابر با ۰.۴۵- و اسپیرمن برابر با ۰.۵۲- ($p < 0.001$) ، که همانند حاجی‌عرب بیانگر رابطه منفی مشابهی است. این الگو نیز به‌وضوح تأکید می‌کند که محوطه‌های احتمالی در نواحی با میزان تولید رسوب پایین‌تر تمرکز دارند، شاید به‌دلیل دسترسی راحت‌تر به منابع، ثبات زمین‌ریخت‌شناسی یا عوامل زیست‌محیطی دیگر.

زیرحوضه خررود:

ضریب همبستگی پیرسون برابر با ۰.۳۰- و اسپیرمن برابر با ۰.۲۵- ($p < 0.001$)، در این منطقه با اینکه میزان همبستگی به نسبت دو زیرحوضه دیگر کمتر بود ولی همچنان رابطه منفی معنادار مشاهده شد. این کاهش شدت ممکن است به‌دلیل ویژگی‌های محیطی متنوع‌تر، الگوهای پراکنش نامنظم‌تر محوطه‌های احتمالی و یا عدم کاوش‌های باستانی کافی برای مستندسازی محوطه‌ها در این ناحیه باشد (شکل ۷).



شکل ۷: نمودار مقایسه ضرایب همبستگی پیرسون و اسپیرمن بین تولید رسوب و احتمال حضور محوطه‌های باستانی در سه زیرحوضه

نتایج حاصل از تحلیل همبستگی میان رسوب‌گذاری و احتمال حضور محوطه‌های باستانی در هر سه زیرحوضه رابطه منفی معناداری میان این دو متغیر را نمایش می‌دهد، به‌گونه‌ای که مکان‌های محتمل برای حضور محوطه‌ها عمدتاً در نواحی با میزان تولید رسوب پایین‌تر قرار دارند. این الگو می‌تواند بیانگر ترجیح جوامع انسانی گذشته برای استقرار در مناطق با پایداری زمین‌ریخت‌شناسی بیشتر، قابلیت دسترسی بهتر و شرایط زیست‌محیطی مساعدتر باشد. با این حال، مجدداً لازم به تاکید است با توجه به اینکه مدل‌سازی احتمال حضور بر اساس داده‌های مکانی محوطه‌های باستانی موجود انجام شده، یکی از محدودیت‌های اساسی این رویکرد، ناتوانی در شناسایی و لحاظ‌کردن محوطه‌هایی است که احتمالاً در اثر فرایندهای رسوب‌گذاری در طول زمان مدفون شده‌اند. در این موارد، متغیرهای محیطی مرتبط با محوطه‌های پنهان در دسترس نبوده و بدین‌ترتیب در فرایند وزن‌دهی و تحلیل نهایی وارد نشده‌اند. بنابراین، مدل نهایی بیش از آنکه بازتاب‌دهندهٔ تمامی مکان‌های بالقوه استقرار باشد، منعکس‌کنندهٔ منتخب ویژگی‌های محیطی محوطه‌های قابل رؤیت در شرایط کنونی است.

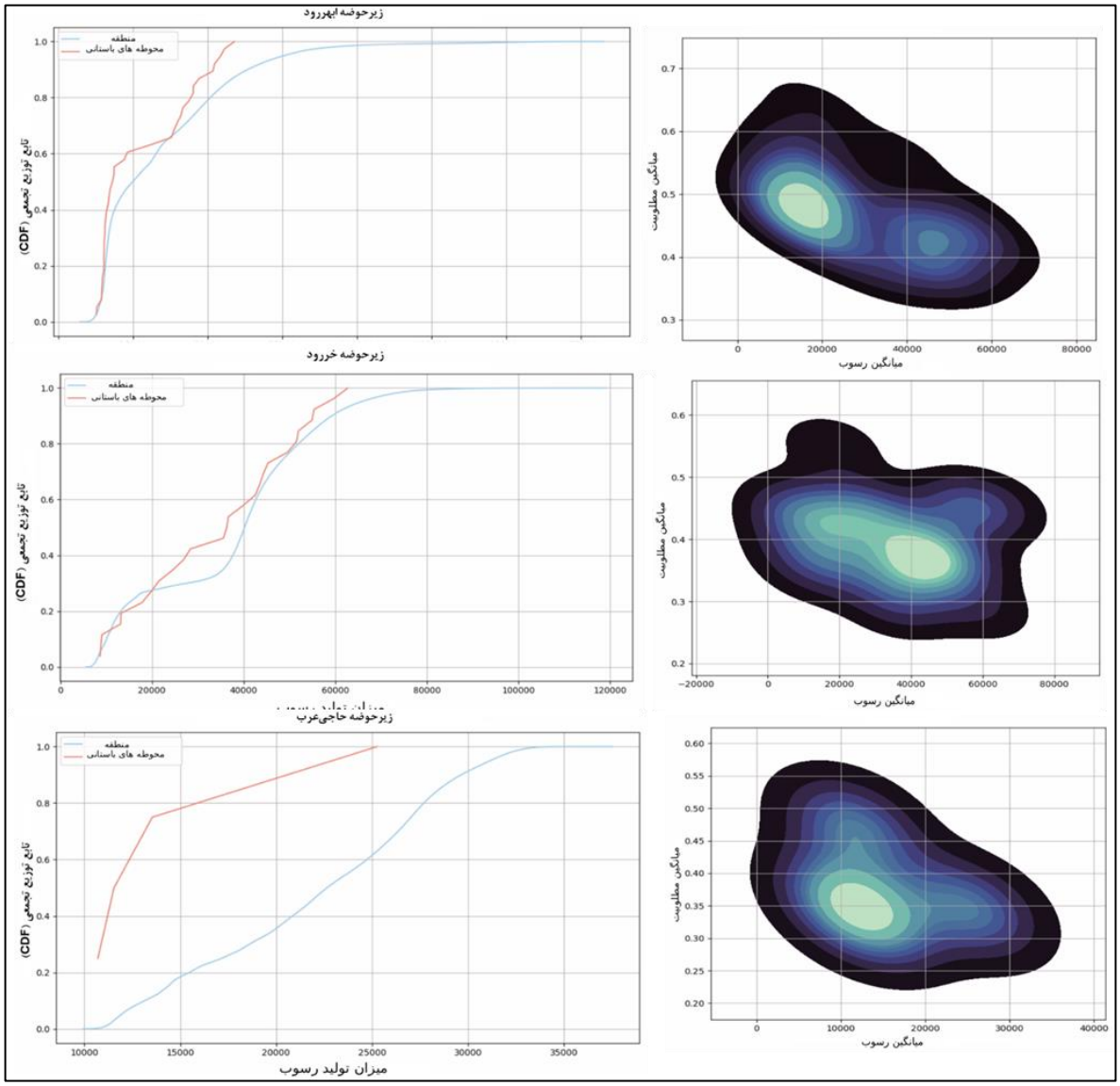
مسلم است در مناطق با رسوب‌گذاری بالا، امکان دفن‌شدگی محوطه‌های باستانی و در نتیجه کاهش کشف‌پذیری آنها وجود دارد؛ امری که می‌تواند منجر به سوگیری در تحلیل‌ها و مدل‌سازی مکان‌های باستانی شود. از این‌رو، تفسیر نتایج مدل باید با در نظر گرفتن این محدودیت روش‌شناختی انجام شود و در صورت امکان با بهره‌گیری از داده‌های زیرسطحی، بررسی‌های ژئوفیزیکی یا روش‌های مکمل کاوش در آینده اعتبارسنجی گردد.

تحلیل تطبیقی رسوب و مطلوبیت مکانی در باستان‌سنجی محوطه‌ها

در ادامه، جهت بررسی ارتباط بین شرایط محیطی و الگوهای استقراری محوطه‌های باستانی متعلق به ادوار نوسنگی و مس‌سنگی هر سه زیرحوضه، از داده‌های رستری و نقطه‌ای مرتبط با شاخص رسوب و مطلوبیت مکانی برای محوطه‌های مذکور استفاده شد. به‌منظور تحلیل تطبیقی، ابتدا مقادیر میانگین رسوب در محوطه‌های شناسایی‌شده با توزیع کلی رسوب در سطح منطقه مقایسه گردید. نمودار توزیع تجمعی (Cumulative Distribution Function -CDF) حاصل از این مقایسه نشان داد که محوطه‌های شناسایی شده در مناطقی قرار گرفته‌اند که از میزان رسوب‌گذاری کمتری برخوردارند. این یافته می‌تواند بازتاب‌دهندهٔ ترجیحات زیست‌محیطی در انتخاب مکان استقرار در گذشته باشد؛ به‌ویژه با توجه به نقش رسوب‌گذاری در کیفیت خاک، دسترسی به منابع، شیب زمین و یا خطرپذیری سیلابی.

در گام بعدی، برای بررسی رابطه‌ی احتمالی بین شاخص مطلوبیت مکانی و مقادیر رسوب در محوطه‌ها، تحلیل همبستگی صورت پذیرفت. هرچند نتایج به‌لحاظ آماری از سطح معناداری عبور نکردند، اما بررسی توصیفی داده‌ها نشان‌دهندهٔ یک روند منفی بین دو متغیر بود؛ به‌گونه‌ای که در بسیاری از موارد، شایستگی مکانی محوطه‌ها در نواحی با رسوب کمتر، مقادیر بالاتری را نمایش می‌داد. این الگوی رفتاری، گرچه نیازمند تحلیل‌های تکمیلی است، اما می‌تواند نشانه‌ای از تأثیر منفی رسوب‌گذاری زیاد بر قابلیت سکونت در گذشته باشد. همچنین، برای نمایش بهتر الگوی توزیعی دو متغیر رسوب و مطلوبیت مکانی، از نمودار چگالی دو بعدی (Kernel Density Estimation -D2 KDE) استفاده شد (شکل ۸). این نمودار نواحی با بیشترین هم‌پوشانی مقادیر را نمایان ساخته و امکان درک بهتری از تعامل نسبی این دو شاخص در فضای مکانی فراهم

نمود. مشاهده نواحی با تراکم بالا در بخش‌هایی با رسوب پایین و مطلوبیت نسبتاً بالا، در راستای مشاهدات پیشین بوده و فرضیهٔ نقش منفی رسوب در وجود محوطه را تقویت می‌کند.



شکل ۸: (چپ) تابع توزیع تجمعیِ (CDF) برآورد میزان تولید رسوب در محدوده محوطه‌های باستانی در مقایسه با کل منطقه، محوطه‌ها بیشتر در نواحی با تولید رسوب کمتر نسبت به کل منطقه متمرکز هستند. (راست) نقشه چگالی دوبعدی (D2 KDE) بین میانگین رسوب تولیدی و مطلوبیت مکانی در موقعیت محوطه‌ها که الگوی هم‌پراکندگی بین این دو متغیر را نمایش می‌دهد.

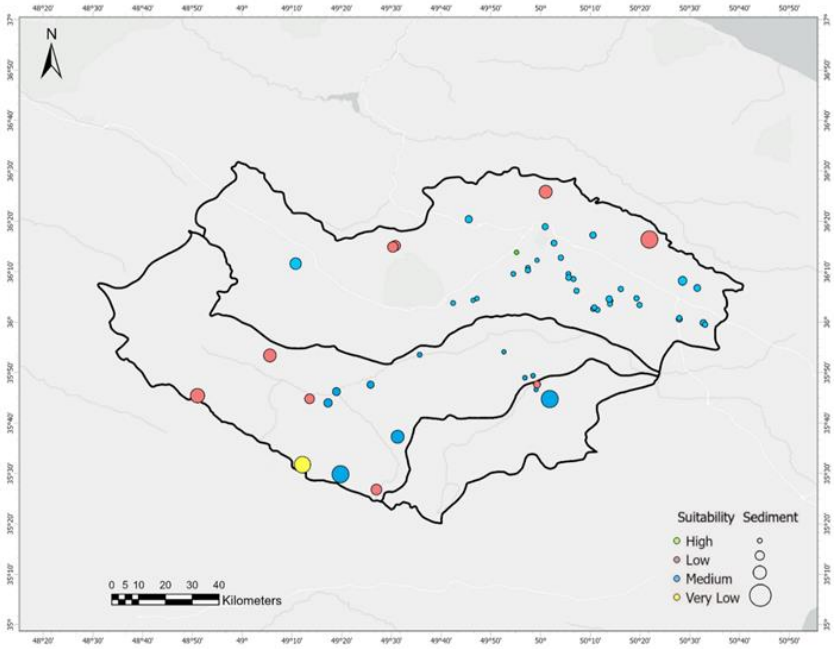
تحلیل سه زیرحوضه ابهررود، خررود و حاجی‌عرب نشان می‌دهد که محوطه‌هایی با مطلوبیت مکانی متوسط تا بالا عمدتاً در مناطقی با تولید رسوب کم تا متوسط قرار گرفته‌اند. این الگو، با وجود محدودیت‌های داده‌ای و نبود کاوش‌های جامع در برخی زیرحوضه‌ها، می‌تواند به‌طور محتاطانه نشانه‌ای از ارتباط نسبی میان شرایط محیطی پایدار و مکان‌های انتخاب شده برای سکونت یا فعالیت‌های انسانی ارائه دهد، بدون آنکه بتوان آن را به عنوان یک تصمیم آگاهانه و قطعی تلقی کرد.

در زیر حوضه ابهررود بیش از ۹۰ درصد محوطه‌ها در کلاس متوسط و بالای مطلوبیت مکانی قرار دارند و تولید رسوب آن‌ها کم تا متوسط برآورد گردیده است. در زیرحوضه خررود پراکندگی محوطه‌ها بیشتر و حدود یک‌سوم آن‌ها در کلاس‌های پایین و خیلی پایین قرار گرفته و در مقابل در مناطقی با تولید رسوب بسیار بالا واقع شده‌اند. با توجه به شرایط جغرافیایی و نظر به اینکه در این زیرحوضه، اکثر محوطه‌ها با بررسی‌های میدانی و مشاهده‌های سطحی شناسایی شده‌اند، همچنین به دلیل کمبود داده‌های جامع و کاوش‌های محدود، تحلیل دقیق شرایط استقرار دشوارتر است. با این حال، محوطه‌هایی که مطلوبیت مکانی متوسط تا بالا دارند عمدتاً در مناطق با رسوب کم مستقر هستند. در زیر حوضه حاجی عرب نیز بیشتر محوطه‌ها در کلاس متوسط تا بالای مطلوبیت مکانی و با تولید رسوب کم تا متوسط واقع شده‌اند (شکل شماره ۹).

به طور کلی، مشاهده هم‌زمان مطلوبیت مکانی متوسط تا بالا و رسوب کم در اکثر محوطه‌ها در سه زیرحوضه نشان می‌دهد که پایداری محیطی و میزان کمتر تولید رسوب احتمالاً نقش نسبتاً مهمی در موقعیت‌یابی محوطه‌ها ایفا کرده است. با این حال، به دلیل محدودیت داده‌ها، پراکندگی محوطه‌ها و کاوش‌های محدود، باید تأکید شود که هیچ نتیجه‌گیری قطعی درباره تصمیم‌گیری جوامع پیشین نمی‌توان ارائه داد. این الگو صرفاً یک نشانه احتمالی از رابطه بین محیط و استقرار انسان در گذشته است و هرگونه تفسیر تاریخی یا فرهنگی باید با احتیاط و همراه با داده‌های مکمل انجام شود.

جدول ٤: فهرست محوطه‌های باستانی شناسایی‌شده در سه زیرحوضه دشت قزوین، تفکیک شده بر اساس دوره زمانی نوسنگی و مس‌سنگی

زیرحوضه	دوره زمانی	محوطه‌ها
ابهررود	مس‌سنگی	قلعه ملک قلات، تپه قدیم‌آباد، زولک‌تپه، آلولک‌خرابه، قلعه‌محله، آجربند، روباه‌تپه، ارشت، میان‌پالان، اسماعیل‌آباد، کمال‌آباد، زفران‌تپه، ظهیرتپه، محمودیان، زیاران۲، خوله‌کوه، چگینی، اتانک، حسن‌آبادکلج، قشلاق۲، دیال‌آباد، نصرت‌آباد، قلات، کهنه‌قره‌قباد، گازرسنگ، بهرامی
	نوسنگی	ابراهیم‌آباد، چگینی، قدیم‌آباد، زیاران۲، زلک تپه، آجربند، روباه‌تپه، شیرتل، خالصه، حسن‌آبادکلج، سلطان‌آباد، قشلاق۱، تولکی‌تپه، رضی‌آباد۱، رضی‌آباد۲، ورتپه
خررود	مس‌سنگی	اوزلیکِ محمدکریم، خزانه، خرابه‌کند، ایودالی، کهنه‌کند ۲، قرمز تپه، قبرستان، شیزر، زاغه
	نوسنگی	بوستان اوغلی، خیرآباد، اوقاردره، حصار۲، قره‌تپه‌جهان آباد، آق‌قیه
حاجی عرب	مس‌سنگی	چهاربنه
	نوسنگی	چهاربنه، مای‌تپه، بلبل‌تپه



شکل ۹ : موقعیت محوطه‌های باستانی در سه زیرحوضه مورد مطالعه. رنگ دایره‌ها نشان‌دهنده مطلوبییت مکانی محوطه‌ها با روش AHP از بسیار کم تا زیاد و اندازه دایره‌ها میزان تولید رسوب بر اساس مدل ANN را نمایش می‌دهد.

در این بخش، دو رویکرد متفاوت برای بررسی ارتباط بین تولید رسوب و احتمال حضور محوطه‌های باستانی به کار گرفته شد. در رویکرد اول، تحلیل بر اساس نمونه‌گیری تصادفی از تمام پیکسل‌های معتبر صورت پذیرفت. این روش امکان بررسی رابطهٔ کلی و پراکنده در سطح کل محدوده مطالعاتی را فراهم کرد و با حجم بالایی از داده‌ها، برآوردهای آماری دقیق‌تری ارائه داد. در نتیجه نیز رابطهٔ منفی معناداری بین میزان تولید رسوب و احتمال حضور محوطه‌ها مشاهده شد؛ به گونه‌ای که نواحی با رسوب‌گذاری پایین‌تر، از احتمال حضور بالاتری برای وجود محوطه‌های استقراری بهره‌مند بودند. رویکرد دوم مبتنی بر استفاده از آمار منطقه‌ای بود که در آن میانگین مقادیر میزان رسوب و احتمال حضور به صورت مجزا برای هر محوطه باستانی محاسبه و تحلیل شد. این روش امکان بررسی رابطه در سطح واحدهای ملموس‌تر (محوطه‌ها) را فراهم کرد. در این بخش، گرچه گرایش منفی بین دو متغیر دیده شد، اما این رابطه از نظر آماری معنادار نبود که می‌تواند ناشی از کاهش حجم نمونه‌ها، پراکندگی داده‌ها و پیچیدگی‌های محیطی خاص هر محوطه باشد. یافته‌های هر دو روش به صورت مکمل به درک بهتر ابعاد مختلف تأثیرات محیطی در انتخاب مکان‌های استقرار جوامع باستانی کمک کردند. به نظر ترکیب تحلیل‌های مکانی و آماری به درک دقیق‌تری از تعامل بین عوامل محیطی و الگوهای استقرار انسانی در گذشته منجر شده و بستری مناسب برای تفسیر رفتار سکونتی در چشم‌اندازهای باستان‌شناختی فراهم می‌سازد. لازم به ذکر است همان‌طور که قبلاً

اشاره شد در مناطق با رسوب‌گذاری شدید، احتمال دفن و پوشیده‌شدن محوطه‌ها وجود دارد که ممکن است در تحلیل‌های سطحی و داده‌های رستری به سادگی قابل تشخیص نبوده و این موضوع می‌تواند بر نتایج تحلیل منطقه‌ای تاثیرگذار باشد.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با بهره‌گیری از شاخص فورنیه، داده‌های مکانی و مجموعه‌ای از مدل‌های یادگیری ماشین شامل رگرسیون خطی چندگانه، جنگل تصادفی و شبکه‌های عصبی مصنوعی، در کنار روش تحلیل فرایند سلسله‌مراتبی و تحلیل مؤلفه‌های اصلی، به واکاوی رابطه میان رسوب‌گذاری و احتمال حضور محوطه‌های باستانی در سه زیرحوضه ابهررود، خررود و حاجی‌عرب در دشت قزوین پرداخت. تلفیق این رویکردها نشان داد که نقشه‌های حاصل از ANN و RF، با دقت بیشتر و RMSEپایین‌تر، توانسته‌اند الگوهای پیچیده رسوب‌گذاری را بازنمایی کنند و نسبت به MLR، انطباق بیشتری با شرایط واقعی محیطی داشته باشند. این موضوع، نقش مدل‌های پیشرفته یادگیری ماشین و الگوریتم‌های هوش مصنوعی را در پایش چشم‌اندازهای باستانی و بازسازی فرایندهای زیست‌محیطی گذشته برجسته می‌سازد.

در ادامه تحلیل‌های مکانی نیز نمایان ساخت که احتمال حضور محوطه‌های باستانی عمدتاً در نواحی با رسوب‌گذاری پایین‌تر و در چشم‌اندازهایی با پایداری زمین‌ریخت‌شناسی بالاتر افزایش می‌یابد. همچنین محوطه‌های موجود نیز عمدتاً در مناطقی با میزان تولید رسوب کمتر واقع شده‌اند. هرچند این همبستگی به معنای انتخاب آگاهانه و علمی جوامع گذشته نیست، اما شاید می‌تواند دلالت بر آن داشته باشد که تجربه زیستی و دانش بومی ساکنان، احتمالاً به‌طور غیرمستقیم آنها را به سوی مکان‌هایی سوق داده که برای سکونتِ پایدار مناسب‌تر بوده است. به بیان دیگر، انتخاب مکان در جوامع پیش‌ازتاریخی نه صرفاً تابع دسترسی به منابع طبیعی، بلکه متأثر از درک حسی و عملی آنان از پویایی‌های محیطی و خطرات زمین‌ریخت‌شناسی بوده است؛ درکی که همانند یک «مدل طبیعی تصمیم‌گیری» عمل کرده و بقای طولانی‌مدت سکونت در این سرزمین را تسهیل نموده است. با این حال، مسئله مخفی بودن محوطه‌ها در زیر رسوبات نیز حائز اهمیت است؛ به بیان دیگر، فرضیه کاهش تعداد محوطه‌ها در بخش‌هایی با میزان تولید رسوب بیشتر و مدفون‌شدن آنها، از حیث اهمیت تحلیلی دست‌کم با فرضیه انتخاب آگاهانه سکونتگاه در مناطق با رسوب‌گذاری کمتر هم‌ارزش است و شایسته آن است که در تفسیر داده‌ها و طراحی مطالعات آینده مورد توجه قرار گیرد.

وزن‌دهی معیارهای زیست‌محیطی و زمین‌ریخت‌شناسی بر اساس PCA، ضمن کاهش سوگیری ذهنی، اعتبار نتایج AHP را تقویت کرد و وجود همبستگی منفی و معنادار میان شاخص رسوب و شایستگی مکانی استقرار، نقش تعیین‌کننده شرایط محیطی در پراکنش محوطه‌ها را آشکار ساخت. این الگو نه تنها بازتابی از تعامل دیرینه انسان و طبیعت در دشت قزوین است، بلکه فرضیه‌ای برای پژوهش‌های آینده در زمینه‌های باستان‌محیط‌شناسی، تاریخ سکونت و مدیریت منظرهای فرهنگی فراهم می‌آورد.

افزون بر این، یافته‌های پژوهش کارکردهای عملی دیگری نیز دارند؛ از جمله شناسایی نواحی بالقوه برای کاوش‌های باستان‌شناسی، طراحی راهبردهای حفاظت هدفمند از میراث فرهنگی و برنامه‌ریزی‌های محیط‌زیستی با تکیه بر شناخت پویایی‌های زمین‌ریخت‌شناسی. در یک چشم‌انداز کلان‌تر، این مطالعه نشان می‌دهد که هم‌افزایی میان تحلیل‌های داده‌محور، مدل‌های هوش مصنوعی، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و سلسله‌مراتبی، می‌تواند ابزاری نیرومند برای بازسازی الگوهای استقراری گذشته و مدیریت هوشمندانه چشم‌اندازهای فرهنگی در آینده باشد؛ ابزاری که پلی میان باستان‌شناسی و علوم محیطی مدرن ایجاد کرده و راه را برای درک عمیق‌تر تعامل انسان و طبیعت در طول تاریخ هموار می‌سازد.

منابع فارسی:

جمهوری اسلامی ایران، ریاست جمهوری، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی. (۱۳۹۱). دستورالعمل تقسیم‌بندی و کدگذاری حوضه‌های آبریز و محدوده‌های مطالعاتی در سطح کشور (نشریه شماره ۳۱۰). وزارت نیرو، امور نظام فنی، دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا.

پارسامنش، ر.، حسنلو، م. ر.، حسینی‌تودشکی، و.، &علمی، ص .(۱۳۹۰) .بررسی کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی منطقه خررود (دشت خدابنده) .در دومین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران .زنجان، ایران.

ذنوبی، م. م.، فاضلی‌نشلی، ح.، و درخشی، ح. (۱۴۰۴). تحلیل کنام‌سازی و الگوی استقرار محوطه‌های باستانی در شمال‌غرب فلات مرکزی (زیرحوضه آبخیز قزوین) طی دوره‌های نوسنگی، مس‌وسنگ انتقالی و مس‌وسنگ، در ارتباط با عوامل طبیعی .مطالعات باستان‌شناسی، ۱۷(۱:۳۶)، ۵–۳۶.

زاهدی، ن.، حصاری، م.، امیری، م.، و درخشی، ح. (۱۴۰۴). الگوی استقراری و ارزیابی عوامل محیطی در شکل‌گیری استقرارهای دوره ساسانی در دشت ورامین، استان تهران .پژوهش‌های باستان‌شناسی ایران، ۱۴(۴۳)، ۹۱–۱۲۴.

صبوری، ن.، طلایی، ح.، و گاراژیان، ا. (۱۳۹۳). مطالعه‌ی زمین‌باستان‌شناسی تپه فریزی در دشت سبزوار .فصلنامه علمی–پژوهشی باستان‌شناسی ایران، ۴(۱)، ۵۵–۷۴.

قاسمی، م.، رضائی، س.، و معتمدی، آ. (۱۴۰۳). تأثیر عملیات آبخیزداری در مدیریت منابع آب و تغذیه آبخوان‌ها: مطالعه موردی حوضه حاجی‌عرب. اولین کنفرانس ملی محیط زیست، آب و انرژی پاک.

خسروی، ش.، خطیب‌شهیدی، ح.، وحدتی‌نسب، ح.، علی‌بگی، س.، و عالی، ا. (۱۳۹۱). روستاهای آغازین و استقرارهای پیشاتاریخی کهن در حوضه آبریز ابهررود، شرق استان زنجان .مطالعات باستان‌شناسی، ۴(۱)، ۱۳۱–۱۵۴ .دانشگاه تهران.

مقصودی, مهران , فاضلی نشلی, حسن , عزیزی, قاسم , گیلمور, گوین و اشمیت, آرمین . (۱۳۹۱). نقش مخروط‌افکنه‌ها در توزیع سکونت‌گاه‌های پیش از تاریخ از دیدگاه زمین‌باستان‌شناسی (مطالعه موردی: مخروط‌افکنه جاجرود و حاجی‌عرب) .پژوهش‌های جغرافیای طبیعی.

مانی، م.، و ابراهیم‌خانی، ن. (۱۳۸۹). ارزیابی فرسایش‌پذیری سازندها از طریق رسوب‌شناسی آبرفت‌های معرف (مطالعه موردی: حوضه حاجی‌عرب در استان قزوین) .جغرافیا، ۸(۲۴)، ۶۹–۸۶.

مقصودی، م.، زمان‌زاده، س.م.، نویدفر، ا.، محمدی، ا.، و یوسفی‌زُشک، ر. (۱۳۹۵). مطالعه شرایط محیطی حاکم بر محوطه‌های باستانی با تأکید بر آنالیز اندازه رسوبات رودخانه‌ای (مطالعه موردی: تپه باستانی میمنت‌آباد و مافین‌آباد) .فصلنامه کواترنری ایران، ۲(۱)، ۴۱–۵۱.

Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development. Journal of the American Water Resources Association, 34(1), 73–89. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x

Baird, G. L., & Bieber, S. L. (2023). Revisiting the conceptualization of multiple linear regression. arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.06464

Biau, G., & Scornet, E. (2016). A Random Forest guided tour. TEST, 25(2), 197–227.

Chen, D., Zheng, J., Zhang, C., & Wang, Y. (2021). Critical shear stress for erosion of sand-mud mixtures and pure mud. Frontiers in Marine Science, 8, 713039. https://doi.org/10.3389/fmars.2021.713039

de Vente, J., Poesen, J., Verstraeten, G., Govers, G., Vanmaercke, M., Van Rompaey, A., & Arabi, M. (2013). Predicting soil erosion and sediment yield at regional scales: Where do we stand? Earth-Science Reviews, 127, 16–29. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.08.014

Esmaeili, M., Taheri, M., & Mohammadi, M. (2022). A multi-temporal satellite-based risk analysis of archaeological sites in Qazvin plain, Iran. Archaeological Prospection, 29(3), 237–251.

Forti, L., Brandolini, F., Oselini, V., Peyronel, L., Pezzotta, A., Vacca, A., … Zerboni, A. (2023). Geomorphological assessment of the preservation of archaeological tell sites. Scientific Reports, 13, 7683. https://doi.org/10.1038/s41598-023-34490-4

Fournier, F. (1960). Climat et érosion: Relations entre l'érosion et les éléments climatiques. La Météorologie, 2, 147–154.

Fritz, S. C., Baker, P. A., Ekdahl, E., Seltzer, G. O., & Steinitz-Kannan, M. (2007). Millennial-scale climate variability during the Holocene in the tropical Andes. Quaternary Science Reviews, 26(3–4), 385–408.

Gillings, M. (2012). Mapping invisibility: GIS approaches to the analysis of hiding and visibility. Geoforum, 43(6), 1114–1123.

Haag, M. B., Schoenbohm, L. M., & McNabb, D. (2025). Rock strength controls erosion in tectonically dead landscapes. Science Advances, 11(1), eadr2610. https://doi.org/10.1126/sciadv.adr2610

Hlalele, B. M. (2024). An assessment and prediction of soil erosion risk using Modified Fournier Index and machine learning algorithm: An external agricultural project risk. Environment & Ecosystem Science, 8(2), 112–116. https://doi.org/10.26480/ees.02.2024.112.116

Hollesen, J. (2022). Climate change and the loss of archaeological sites and landscapes: A global perspective. Antiquity, 96(390), 1382–1395.

Huisman, D. J., et al. (2019). Soil erosion and archaeological sites: A review of impacts and management strategies. Journal of Archaeological Science, 104, 132–143.

Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: A review and recent developments. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 374(2065), 20150202. https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202

Maghsoudi, M., Simpson, I. A., Kourampas, N., & Fazeli Nashli, H. (2013). Archaeological sediments from settlement mounds of the Sagzabad Cluster, central Iran: Human-induced deposition on an arid alluvial plain. Geomorphology, 200, 1–14. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.10.057

Fazeli Nashli, H., Beshkani, A., Marghussian, A., Ilkani, H., Young, R., & Wong, E. H. (2019). The Neolithic to Chalcolithic transition in the Qazvin Plain, Iran: Chronology and subsistence strategies. Archaeologische Mitteilungen aus Iran und Turan, 41, 1–21.

Flanagan, D. C., & Nearing, M. A. (1995). USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile and watershed model documentation. USDA Agricultural Research Service. https://www.ars.usda.gov/ ARSUserFiles/ 60720500/weppdocs/wepp_manual.pdf.

Mahgoub, M., Elalfy, E., Soussa, H., & Abdelmonem, Y. (2024). Relation between the soil erosion cover management factor and vegetation index in semi-arid basins. Environmental Earth Sciences, 83, 337. https://doi.org/10.1007/s12665-024-11593-3

Montgomery, D. R. (2007). Soil erosion and agricultural sustainability. Proceedings of the National Academy of Sciences, 104(33), 13268–13272. https://doi.org/10.1073/pnas.0611508104

Mu, X., Zhang, L., & Shi, P. (2022). Spatial representation of soil erosion and vegetation affected by a fire event: A case study of the Zat Valley. Science of the Total Environment, 836, 155601.

Owens, P. N. (2020). Soil erosion and sediment dynamics in the Anthropocene: A review of human impacts during a period of rapid global environmental change. Journal of Soils and Sediments, 20, 4115–4143. https://doi.org/10.1007/s11368-020-02815-9

Panagiotopoulos, I., Voulgaris, G., & Collins, M. B. (1997). The influence of clay on the threshold of movement of fine sandy beds. Coastal Engineering, 32(1), 19–43. https://doi.org/10.1016/S0378-3839(97)00013-6 -Pant, S., Kumar, A., Ram, M., Klochkov, Y., & Sharma, H. K. (2022). Consistency indices in analytic hierarchy process: A review. Mathematics, 10(8), 1206. https://doi.org/10.3390/math10081206

Perera, C., Smith, J., Wu, W., Perkey, D., & Priestas, A. (2020). Erosion rate of sand and mud mixtures. International Journal of Sediment Research, 35(6), 563–575.

Potts, D. T., Fazeli, H., Wong, K., & Potts, D. (2005). The Qazvin Plain revisited: A reappraisal of the chronology of northwestern Central Plateau, Iran, in the 6th to the 4th millennium BC. Iranian Studies, 38(3), 305–327.

Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) (USDA Agriculture Handbook No. 703). U.S. Government Printing Office.

Shahiri Tabarestani, E., Afzalimehr, H., & Sui, J. (2022). Assessment of annual erosion and sediment yield using empirical methods and validating with field measurements—A case study. Water, 14(10), 1602. https://doi.org/10.3390/w14101602

Shi, C., Liang, Y., Qin, W., Ding, L., Cao, W., Zhang, M., & Zhang, Q. (2025). Review of sediment connectivity: Conceptual connotations, characterization indicators, and their relationships with soil erosion and sediment yield. Earth-Science Reviews, 105091. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2025.105091

Schmidt, A., Quigley, M., Fattahi, M., Azizi, G., Maghsoudi, M., & Fazeli, H. (2011). Holocene settlement shifts and paleoenvironments on the Central Iranian Plateau: Investigating linked systems. The Holocene, 21(4), 583–595. https://doi.org/10.1177/0959683610385961

Vogelsang, R., & Wendt, K. P. (2018). Reconstructing prehistoric settlement models and land use patterns on Mt. Damota/SW Ethiopia. Quaternary International, 485, 140–149. https://doi.org/10.1016 /j.quaint.2017.06.061

Wang Nang, Y., Onodera, S., Wang, Y., Shimizu, T., & Saito, Y. (2023). Slope gradient effects on sediment yield of different land cover types. Water, 16(10), 1419. https://doi.org/10.3390/w16101419

Westley, K., Smith, J. A., & Brown, L. M. (2023). Coastal erosion impacts on archaeological sites along the Sirte coastline, eastern Libya. PLOS ONE, 18(4), e0283703. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0283703

Wheatley, D., & Gillings, M. (2002). Spatial technology and archaeology: The archaeological applications of GIS. CRC Press.

Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning (USDA Agriculture Handbook No. 537). U.S. Government Printing Office.

Williams, M. (2022). When the land sings: Reconstructing prehistoric environments using evidence from Quaternary geology and geomorphology, with examples drawn from fluvial environments in the Nile and Son Valleys. Quaternary, 5(3), 32. https://doi.org/10.3390/quat5030032