

Spatial Modeling of the Effect of Topography Parameters on Climatic Variables and Vegetation Index in Mountainous Watersheds: A case study of Northeast of Eqlid County

Marzieh Mokarram¹ , Saeed Neghaban²  , Momammad Hasan Mahoutchi³ 

1. Department of Geography, Faculty of Economics, Management and Social Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran.

Email: mokarram@shirazu.ac.ir

2. (Corresponding Author) Department of Geography, Faculty of Economics, Management and Social Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran.

Email: sneghaban@shirazu.ac.ir

3. Department of Geography, Faculty of Economics, Management and Social Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran.

Email: mh.mahoutchi@saadi.shiraz.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article History:

Received:
25 February 2026

Revised:
30 April 2026

Accepted:
3 June 2026

Available online:
19 July 2026

Keywords:

Watershed,
Climatic parameters,
Topographic Position
Index,
Landform,
Vegetation Index.

ABSTRACT

This study aims to investigate the relationship among climatic variables (temperature, precipitation, and evaporation), the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), and morphometric parameters (elevation, slope, and landform) within the watershed located in the northeastern part of Eqlid County. To produce zonation maps of climatic variables, data spanning a 10-year period (2011–2021) were obtained from six synoptic stations in the region. Morphometric parameters, including elevation, slope, and landform, were extracted using a Digital Elevation Model (DEM) derived from ASTER imagery (2022). Landforms in the area were classified using the Topographic Position Index (TPI). Additionally, Landsat 8 satellite imagery (2022) was utilized to determine the relationship between climatic parameters and the NDVI. The results indicated that with increasing elevation, evaporation and temperature decrease (negatively correlated with elevation), and the landform class shifts toward higher-elevation forms, such as peaks and ridges, corresponding to higher TPI classes. Furthermore, increased elevation and slope were associated with reduced evaporation. Regarding precipitation, the findings revealed that higher elevation and higher landform classes correspond to increased precipitation amounts. Overall, the results of this study demonstrate a systematic and significant relationship between climatic parameters and morphometric characteristics in the northeastern Eqlid watershed. Elevation, as the primary controlling factor, influences the distribution of temperature, precipitation, and evaporation; these climatic variables, in turn, affect landform type, erosion intensity, and vegetation patterns.

Cite this article: Mokarram, M., Neghaban, S., & Mahoutchi, M.H. (2026). Spatial Modeling of the Effect of Topography Parameters on Climatic Variables and Vegetation Index in Mountainous Watersheds: A case study of Northeast of Eqlid County. *Physical Geography Research Quarterly*, 58 (2), 59-78.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2026.415572.1007937>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

Extended Abstract

Introduction

The sustainable management of mountainous watersheds is one of the fundamental challenges in Iran's semi-arid regions. This management requires a deep and integrated understanding of the interactions among topographic landforms, the spatial distribution of climatic variables, and vegetation cover. However, in numerous mountainous regions of Iran, particularly in watersheds with significant morphological diversity, integrated analysis and spatial modeling of these relationships have received less attention. Mountainous watersheds, due to their considerable elevational differences, typically exhibit significant variations in temperature, precipitation, and evaporation from lowlands to high elevations. This climatic diversity, in turn, affects vegetation distribution, landform types, soil erosion intensity, and ultimately ecosystem stability. This study aims to spatially model the effect of topographic parameters - elevation and slope - on the distribution of climatic variables (temperature, precipitation, and evaporation) and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in the watershed located northeast of Eqlid County. This region, situated on the eastern slopes of the central Zagros Mountains, exhibits considerable elevational diversity (ranging from approximately 2323 to 3842 meters above sea level) as well as notable climatic and vegetation variability, making it an ideal case study for such an investigation. The findings can enhance the fundamental understanding of climate-geomorphology-vegetation interactions and provide a quantitative tool for management zoning of similar watersheds.

Methodology

Climatic data (mean temperature, precipitation, evaporation) for 2011–2021 were collected from six synoptic stations (Abadeh, Eqlid, Kafer, Izadkhvast, Shahreza, Sadeghabad) in and around the region. Following quality control and homogeneity testing, data were imported into GIS. Kriging interpolation, using elevation as an auxiliary variable, generated

continuous climatic zoning maps - chosen for its spatial structure handling and low estimation error. A 30m ASTER DEM (2022) provided topographic parameters. The DEM yielded slope (%) and elevation class (200m intervals) maps. TPI was computed at local (3×3) and regional (45×45) scales to classify landforms; ten types - valleys, plains, slopes, ridges, peaks, etc. - were identified. A Landsat 8 OLI image (2015) was preprocessed - atmospheric correction (FLAASH) and geometric correction (<0.5-pixel error). NDVI was derived from bands 4 (red) and 5 (NIR). Soil erosion was estimated via the EPM (Gavrilović) model. Spatial relationships between topography and climate were analyzed via: (1) extracting climatic values per elevation class and plotting trends; and (2) cross-tabulating climatic classes with elevation, slope, and landform classes in GIS.

Results and Discussion

The findings conclusively demonstrated that elevation, as the most important controlling topographic parameter, determines the spatial distribution of all three climatic variables - temperature, precipitation, and evaporation. With increasing elevation from the northern parts (2323 m) to the southern parts of the watershed (3842 m), mean annual temperature decreased from over 12°C to below 4°C. Annual precipitation exhibited an opposite trend, increasing from less than 250 mm in the northern lowlands to more than 650 mm in the southern high elevations. Evaporation indicated a predictable decline with elevation, exceeding 7,000 mm in the northern lowlands and dropping below 2,000 mm at elevations above 3,500 meters. The relationship between slope and climatic variables was more complex and non-linear. Analyses revealed that with increasing precipitation (corresponding with increasing elevation), slope values initially increased up to precipitation class 5 and then showed a relative reduction in higher classes (very high elevations). This pattern indicated the presence of relatively flat summit surfaces at very high elevations. Regarding landforms, results showed that

with reducing temperature and evaporation (i.e., moving toward higher elevations), landforms shifted from valleys and plains in the north (lower landform classes) toward peaks and ridges in the south (landform class 10). NDVI exhibited a parabolic relationship with temperature: maximum NDVI (0.49) was recorded at mid-elevations and relatively moderate temperatures (temperature classes 3 and 4). In contrast, in the coldest areas - elevations above 3800 meters with temperatures below 4°C) - vegetation cover declined due to physiological limitations caused by cold, frost stress, and thin soils (NDVI approximately 0.10). Regarding erosion, the results demonstrated that decreasing evaporation and temperature classes and with increasing precipitation classes, erosion intensity shifted from high and moderate classes to low classes. The northern lowlands - marked by high evaporation, low rainfall, sparse vegetation, and steep slopes - were identified as erosion hotspots.

Conclusions

This study conclusively demonstrated the existence of a strong and significant systemic relationship between topographic parameters (elevation and slope) and climatic variables (temperature, precipitation, and evaporation) in the northeast Eqlid watershed. Elevation, as the primary controlling factor, determines the distribution of temperature, precipitation, and evaporation; these climatic variables in turn affect landform type, erosion intensity, and vegetation patterns. The non-linear

relationship between slope and precipitation and the parabolic relationship between temperature and NDVI indicate the complexity of environmental interactions in mountainous watersheds and demonstrate that increased precipitation alone is not sufficient for vegetation development; temperature acts as a limiting factor at very high elevations. Topographic parameters from DEMs enable acceptable estimation of climatic variables in similar watersheds, making topography-based spatial modeling a valuable tool where meteorological stations are sparse. Northern lowlands were erosion-critical, needing conservation priority. Findings support watershed management zoning, conservation prioritization, and sustainable development planning in Iran's mountainous areas.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

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

مدل سازی فضایی اثر پارامترهای توپوگرافی بر متغیرهای اقلیمی و شاخص پوشش گیاهی در حوضه‌های کوهستانی؛ مطالعه موردی: شمال شرقی شهرستان اقلید

مرضیه مکرم^۱، سعید نگهبان^۲، محمدحسن ماهوتچی^۳

۱- گروه جغرافیا، دانشکده اقتصاد، مدیریت و علوم اجتماعی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران. رایانامه: mokarram@shiraz.ac.ir

۲- نویسنده مسئول، گروه جغرافیا، دانشکده اقتصاد، مدیریت و علوم اجتماعی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران. رایانامه: sneghabhan@shiraz.ac.ir

۳- گروه جغرافیا، دانشکده اقتصاد، مدیریت و علوم اجتماعی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران. رایانامه: mh.mahoutchi@saadi.shiraz.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۱۲/۰۶

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۵/۰۲/۱۰

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۵/۰۳/۱۳

تاریخ چاپ:

۱۴۰۵/۰۴/۲۸

واژگان کلیدی:

حوضه آبخیز،

پارامترهای اقلیمی،

شاخص موقعیت

توپوگرافی،

لندفرم،

شاخص پوشش

گیاهی.

این مطالعه با هدف بررسی ارتباط بین متغیرهای اقلیمی (دما، بارش و تبخیر)، شاخص پوشش گیاهی NDVI و پارامترهای مورفومتری (ارتفاع، شیب و لندفرم) در حوضه آبخیز واقع در شمال شرقی شهرستان اقلید انجام شد. به منظور تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی متغیرهای اقلیمی، از داده‌های یک دوره ۱۰ ساله (۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰) شش ایستگاه سینوپتیک منطقه استفاده گردید. برای استخراج پارامترهای مورفومتری شامل ارتفاع، شیب و لندفرم، مدل رقومی ارتفاع (DEM) حاصل از سنجنده استر (سال ۲۰۲۲) به کار گرفته شد. لندفرم‌های منطقه با استفاده از شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) طبقه‌بندی گردیدند. همچنین به منظور تعیین ارتباط بین پارامترهای اقلیمی و شاخص پوشش گیاهی NDVI، از تصاویر ماهواره لندست ۸، سال ۲۰۲۲ استفاده شد. نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع، میزان تبخیر و دما کاهش (همبسته با افزایش ارتفاع) دارد، کلاس لندفرم به سمت فرم‌های مرتفع‌تر از جمله قله‌ها و خط‌الرأس‌ها (کلاس‌های بالاتر لندفرم) تغییر می‌یابد. همچنین با افزایش میزان ارتفاع و شیب، با کاهش تبخیر روبرو هستیم. در ارتباط با بارندگی، یافته‌ها نشان داد که با افزایش میزان ارتفاع، کلاس لندفرم و مقدار بارندگی افزایش می‌یابد. به طور کلی، نتایج این مطالعه حاکی از وجود یک ارتباط سیستمی و معنادار بین پارامترهای اقلیمی و ویژگی‌های مورفومتری در حوضه آبخیز شمال شرقی اقلید است. ارتفاع به عنوان عامل کنترل‌کننده اصلی، توزیع دما، بارش و تبخیر را تحت تأثیر قرار داده و این متغیرهای اقلیمی به نوبه خود بر نوع لندفرم، شدت فرسایش و الگوی پوشش گیاهی اثر می‌گذارند.

استناد: مکرم، مرضیه؛ نگهبان، سعید و ماهوتچی، محمدحسن. (۱۴۰۵). مدل سازی فضایی اثر پارامترهای توپوگرافی بر متغیرهای اقلیمی و شاخص پوشش گیاهی در حوضه‌های کوهستانی؛ مطالعه موردی: شمال شرقی شهرستان اقلید. *مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۸ (۲)، ۷۸-۵۹.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2026.415572.1007937>

مقدمه

مدیریت پایدار حوضه‌های آبخیز و شناسایی پتانسیل‌های طبیعی و انسانی آن‌ها، مستلزم شناخت جامع و یکپارچه از مجموعه‌ای از فاکتورهای محیطی وابسته به هم است. این فاکتورها شامل پارامترهای اقلیمی (همچون دما، بارش و تبخیر)، فرسایش‌پذیری خاک، ویژگی‌های توپوگرافیک (شیب، ارتفاع و جهت دامنه)، انواع لندفرم‌ها و شاخص‌های پوشش گیاهی نظیر NDVI می‌باشند. اندازه‌گیری و تحلیل فضایی این متغیرها، امکان تدوین برنامه‌های مدیریتی تفکیک‌شده و متناسب با هر واحد محیطی را فراهم می‌آورد (مهندسین مشاور آسماری، ۱۳۸۸). در این میان، تعیین میزان فرسایش‌پذیری حوضه‌های آبخیز به‌عنوان یکی از بحرانی‌ترین مؤلفه‌ها در برنامه‌ریزی‌های حفاظت آب‌و‌خاک، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است، چراکه فرسایش خاک نه‌تنها حاصلخیزی اراضی را کاهش می‌دهد، بلکه بر کیفیت منابع آبی، رسوب‌گذاری مخازن و پایداری اکوسیستم‌های پایین‌دست نیز اثر می‌گذارد. از سوی دیگر، پوشش گیاهی به‌عنوان عاملی کلیدی در تعدیل فرسایش و تنظیم چرخه هیدرولوژیک، و لندفرم‌ها به‌عنوان بستر فیزیکی حاکم بر توزیع رطوبت و رسوب، دو مؤلفه اساسی در شناخت رفتار سیستم‌های آبخیز محسوب می‌شوند که تحلیل هم‌زمان آن‌ها ضرورتی انکارناپذیر دارد. با وجود پژوهش‌های متعدد انجام‌شده در زمینه فرسایش، پوشش گیاهی و لندفرم‌ها، هنوز در بسیاری از حوضه‌های آبخیز کوهستانی ایران، به‌ویژه مناطقی با تنوع اقلیمی و مورفولوژیک پیچیده مانند شمال شرقی شهرستان اقلید، یکپارچگی لازم میان تحلیل پارامترهای اقلیمی (دما، بارش و تبخیر) و پارامترهای مورفومتری (ارتفاع، شیب و لندفرم) با شاخص پوشش گیاهی NDVI برقرار نشده است. به‌عبارت دیگر، کمتر مطالعه‌ای به‌طور سیستماتیک نشان داده است که چگونه تغییرات مکانی ارتفاع و شیب بر توزیع دما و بارش اثر می‌گذارد و این تغییرات اقلیمی به‌نوبه خود چگونه بر الگوی لندفرم‌ها و پوشش گیاهی در مقیاس حوضه آبخیز منعکس می‌شود. از سوی دیگر، بیشتر پژوهش‌های پیشین به برآورد فرسایش و رسوب با مدل‌هایی نظیر EPM و WEPP پرداخته‌اند، اما ارتباط متقابل بین کلاس‌های اقلیمی (تبخیر، بارش و دما) با پارامترهای مورفومتری و NDVI به‌صورت کمی و جدول‌بندی شده در قالب یک مطالعه منسجم کمتر موردتوجه قرار گرفته است. بنابراین، مسئله اصلی این پژوهش را می‌توان در پرسش زیر خلاصه کرد: چه رابطه سیستمی میان پارامترهای اقلیمی (دما، بارش و تبخیر) با ویژگی‌های مورفومتری (ارتفاع، شیب و لندفرم) و شاخص پوشش گیاهی NDVI در حوضه آبخیز مورد مطالعه واقع در شمال شرقی اقلید وجود دارد؟ برای پاسخ به این پرسش، ابتدا مروری بر پیشینه پژوهش ضروری است. در زمینه برآورد فرسایش خاک و تولید رسوب، روش‌های تجربی متعددی در سطح جهانی و ملی توسعه‌یافته‌اند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به مدل‌های PSIAC، MPSIAC و EPM اشاره کرد. این روش‌ها به دلیل در نظر گرفتن هم‌زمان عوامل متعدد مؤثر بر فرسایش (نظیر اقلیم، توپوگرافی، خاک، پوشش گیاهی و کاربری اراضی) از دقت و قابلیت اعتماد نسبتاً بالایی در شرایط مختلف محیطی برخوردار هستند (احمدیان، ۱۳۸۰؛ صادق زاده و یاراحمدی، ۱۳۹۷؛ راستگو و همکاران، ۱۳۸۵؛ قورقی و همکاران، ۱۴۰۴؛ عابدینی و همکاران، ۱۴۰۱؛ رضانی و همکاران، ۱۳۹۶؛ مقیمی و نگهبان، ۱۳۹۱؛ برزو و همکاران، ۱۳۸۷). در ایران نیز پژوهش‌های گسترده‌ای با بهره‌گیری از این مدل‌ها و همچنین مدل‌های فرآیندی پیشرفته‌تر مانند WEPP انجام‌شده است. برای نمونه، احمدی و همکاران (۱۳۷۶) میزان فرسایش و رسوب حوضه آبخیز باراریه نیشابور را با سه رویکرد متفاوت در چارچوب مدل WEPP (دامنه، حوضه آبخیز و مسیرهای جریان) برآورد کردند و مقدار رسوب سالانه را معادل ۱۱/۲ تن در هکتار گزارش نمودند که بیانگر شدت فرسایش نسبتاً بالایی است. در مطالعه دیگری، عابدینی و شیرنگ (۱۳۹۳) با کاربرد مدل EPM در حوضه آبخیز مشکین‌چای اردبیل، منطقه را در زمره طبقه فرسایش خیلی شدید معرفی نمودند.

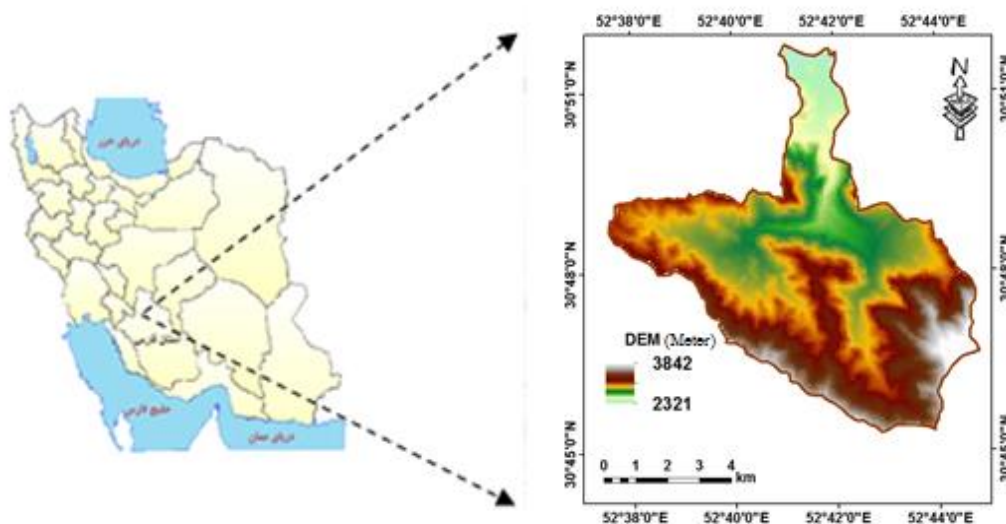
همچنین طولابی (۱۳۹۲) با تلفیق دو مدل EPM و WEPP در محیط GIS، فرسایش و رسوب حوضه سولاچای اردبیل را ارزیابی کرد و نتیجه گرفت که هر دو مدل قابلیت استفاده برای برآورد رسوب را دارند، اما انتخاب مدل مناسب باید بر اساس نوع داده‌های موجود و اهداف مطالعه صورت گیرد. در سطح بین‌المللی، میلوسکی (۲۰۰۸) با تلفیق تصاویر ماهواره‌ای و مدل EPM در محیط GIS، خطر فرسایش در حوضه آبخیز برجالنیکا در جمهوری مقدونیه را پهنه‌بندی کردند و به این نتیجه رسیدند که سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) به‌عنوان یک ابزار توانمند در پردازش لایه‌های اطلاعاتی و انجام تحلیل‌های مکانی، دقت و سرعت تخمین فرسایش و رسوب را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد (Milevski, 2008). باقرزاده و منصوری دانشور (۲۰۱۱) نیز با مقایسه مدل‌های PSIAC و EPM در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، برتری نسبی مدل EPM را در شرایط کمبود داده‌های میدانی گزارش کردند. در حوزه پوشش گیاهی، شاخص تفاوت نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) به دلیل سادگی محاسبه، حساسیت بالا به تغییرات زیست‌توده و همبستگی معنادار با پارامترهایی نظیر درصد پوشش، سلامت گیاه و شاخص سطح برگ، به‌عنوان رایج‌ترین شاخص در مطالعات هیدرو اقلیم و مدیریت حوضه‌ها شناخته می‌شود (پردلی و همکاران، ۱۳۹۶). ثنایی‌نژاد و همکاران (۱۳۸۷) با تأکید بر لزوم یافتن روشی سریع، کم‌هزینه و با دقت قابل قبول برای شناسایی و طبقه‌بندی پوشش گیاهی، از تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های گیاهی متعدد بهره گرفتند. پتورلی و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از NDVI به بررسی اثرات مستقیم شرایط اقلیمی بر زیست‌توده و الگوهای فنولوژیکی پوشش گیاهی پرداخت (Pettorelli et al, 2005). بروس و همکاران (۱۹۹۵) در کشور نیجر، مقدار زیست‌توده گیاهان علفی مراتع را با استفاده از NDVI برآورد کرده و بر مبنای میزان علوفه تخمین زده شده، وضعیت مراتع را طبقه‌بندی نمودند که نشان‌دهنده قابلیت بالای این شاخص در برآورد تولید اولیه در اکوسیستم‌های خشک است (Brouce et al, 1995). در ایران، میرآخورلو و حسینی (۱۳۸۵) در حوضه آبخیز دماوند با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای نشان دادند که عواملی نظیر شیب، ارتفاع، جهت دامنه و شاخص NDVI تأثیر معناداری بر میزان تولید علوفه مراتع دارند. در زمینه لندفرم‌ها، یکی از روش‌های کارآمد و کمی برای طبقه‌بندی خودکار، استفاده از شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) است. ونتورا و ایروین (۲۰۰۰) برای نخستین بار از این شاخص به‌منظور جداسازی خودکار لندفرم‌ها بهره گرفتند. TPI با مقایسه ارتفاع هر سلول با میانگین ارتفاع سلول‌های همسایه در یک شعاع مشخص، امکان تشخیص عوارضی همچون قله‌ها، خط‌الرأس‌ها، دامنه‌ها، دره‌ها و کف دره‌ها را فراهم می‌کند (Ventura & Irvin, 2000). ویز (۲۰۰۱) نشان داد که طبقه‌بندی خودکار لندفرم‌ها با استفاده از TPI نسبت به روش‌های سنتی (همچون تفسیر چشمی و برش‌های توپوگرافی) بسیار آسان‌تر، سریع‌تر و با قابلیت تکثیرپذیری بالاتری است. از آنجاکه لندفرم‌ها رابطه نزدیکی با توزیع رطوبت خاک، انباشت رسوبات و استقرار پوشش گیاهی دارند، تحلیل آن‌ها در کنار پارامترهای اقلیمی می‌تواند درک سیستمی از حوضه آبخیز را به‌طور قابل توجهی ارتقاء بخشد (Weiss, 2001). پژوهش‌های معاصر نیز بر اهمیت تلفیق داده‌های سنجش‌ازدور و مدل‌سازی عددی تأکید دارند. به‌عنوان نمونه، مک دونالد و همکاران (۲۰۲۵) در پژوهشی به بررسی شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)، تغییرات عملکرد درون-مزرعه‌ای را در یک سامانه تولید غلات دیم در کلرادو آمریکا پرداختند و چنین نتیجه گرفتند که شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) و افزایش درصد شن، تأثیر منفی شدیدی بر عملکرد داشته است، درحالی‌که میزان نیتروژن مصرفی و کربن کل خاک تأثیرات مثبت شدیدی بر عملکرد در مدل‌های گندم و ارزن نشان دادند. نکته قابل توجه این است که تأثیر TPI تقریباً به‌اندازه تأثیر نیتروژن بود و از سایر پیش‌بینی کننده‌های رایج‌تر توپوگرافی مانند شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، ارتفاع و شیب، عملکرد بهتری داشت (Macdonald, 2025). شیونگ و وانگ (۲۰۲۲) در پژوهشی به بررسی روابط مکانی بین شاخص تفاوت نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) و عوامل توپوگرافی در

مقیاس‌های چندگانه در یک حوضه آبریز رود مین جیانگ، چین پرداختند و چنین نتیجه گرفتند که ارتفاع، شیب و جهت شیب، اثرات مقیاس متفاوتی بر NDVI در مؤلفه‌های مختلف موجب دارند. در مؤلفه‌های هموار، همبستگی مکانی NDVI با ارتفاع، شیب و شاخص جنوب‌گرایی (SFI) ناشی از جهت شیب، با افزایش مقیاس تفکیک افزایش یافت، درحالی‌که عوامل توپوگرافی درجات متفاوتی از تأثیر بر NDVI داشتند. مشخص شد که ارتفاع مهم‌ترین عامل توپوگرافی تعیین‌کننده توزیع مکانی NDVI در هر دو طرف دره است و شاخص SFI بالاترین تأثیر را بر NDVI در ارتفاعات بالای ۲۵۰۰ متر نشان داد (Xiong & Wang, 2022). یانگ و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی به ارائه روشی برای تصحیح اثر سایه توپوگرافی بر شاخص NDVI در زمین‌های ناهموار پرداختند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که تفاوت NDVI بین دامنه‌های سایه‌گیر و آفتاب‌گیر پس از تصحیح به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافت. افزون بر این، روش NTSEC مقادیر پرت (outlier) تولید نکرد و NDVI برای انواع مختلف پوشش زمین، پایداری بین طبقاتی خود را حفظ کرد (Yang et al, 2022). در زمینه روش‌های نوین طبقه‌بندی لندفرم، پژوهش‌های اخیر بر بهینه‌سازی شاخص TPI با رویکردهای مبتنی بر داده تأکید دارند؛ به‌عنوان نمونه، مطالعه به روز شده بر روی TPI دو-مقیاس با بهره‌گیری از مدل‌های یادگیری ماشین مانند جنگل تصادفی و XGBoost، دقت بالایی (۸۷ درصد) در طبقه‌بندی لندفرم‌های پیچیده ارائه داده و نقش غالب TPI را در تشخیص فرم‌های کوهستانی و دره‌ای نشان داده است (Garrido et al, 2026). با این‌حال، مرور دقیق پیشینه نشان می‌دهد که اگرچه پژوهش‌های متعددی به برآورد فرسایش و رسوب با مدل‌های تجربی یا به تحلیل جداگانه شاخص NDVI و لندفرم‌ها پرداخته‌اند، اما هیچ‌یک از آن‌ها به بررسی هم‌زمان و کمی روابط متقابل بین سه مؤلفه اقلیم (دما، بارش، تبخیر)، مورفومتری (ارتفاع، شیب، لندفرم مبتنی بر TPI) و پوشش گیاهی (NDVI) در قالب یک سیستم یکپارچه در حوضه‌های آبخیز کوهستانی با تنوع مورفولوژیک پیچیده (مانند شمال شرقی اقلید) نپرداخته‌اند. همچنین، در پژوهش‌های پیشین، ارتباط میان کلاس‌های اقلیمی با کلاس‌های لندفرم، ارتفاع، شیب و فرسایش به‌صورت جدول‌بندی شده و با رویکرد تحلیل همبستگی فضایی ارائه نشده است. به بیان دقیق‌تر، خلأ پژوهشی در نبود یک مطالعه سیستماتیک است که نشان دهد چگونه تغییرات مکانی ارتفاع و شیب بر توزیع دما و بارش حاکم است و این تغییرات اقلیمی به‌نوبه خود بر نوع لندفرم، شدت فرسایش و شاخص پوشش گیاهی چگونه اثر می‌گذارند و آیا می‌توان یک ماتریس ارتباطی کمی میان کلاس‌های اقلیمی، مورفومتری و پوشش گیاهی تدوین کرد که به‌عنوان ابزاری برای پهنه‌بندی مدیریتی عمل کند. برای پر کردن این خلأ، پژوهش حاضر با سه سطح نوآوری طراحی شده است: نخست، به‌کارگیری رویکرد یکپارچه و سیستمی برای تحلیل هم‌زمان ارتباطات سه‌گانه اقلیم-ژئومورفولوژی-پوشش گیاهی به‌جای بررسی جزیره‌ای هر مؤلفه؛ دوم، تلفیق شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) به‌عنوان روشی خودکار و کمی برای طبقه‌بندی لندفرم‌ها با پهنه‌بندی اقلیمی و شاخص NDVI در یک بستر GIS و سپس استخراج جداول تحلیلی متقاطع برای کشف روابط فضایی بین کلاس‌های این متغیرها - رویکردی که در پژوهش‌های پیشین در منطقه مورد مطالعه سابقه نداشته است؛ و سوم، تدوین یک ماتریس ارتباطی کمی که می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای پهنه‌بندی مدیریتی (نظیر اولویت‌بندی عملیات آبخیزداری، تعیین مناطق حساس به فرسایش و مکان‌یابی اقدامات حفاظتی) در حوضه‌های آبخیز مشابه با شرایط اقلیمی و مورفولوژیک مشابه به کار رود. بر این اساس، هدف اصلی این پژوهش، بررسی روابط سیستمی و مکانی میان پارامترهای اقلیمی (دما، بارش و تبخیر)، پارامترهای مورفومتری (ارتفاع، شیب و لندفرم‌های حاصل از TPI) و شاخص پوشش گیاهی NDVI در حوضه آبخیز واقع در شمال شرقی شهرستان اقلید است. برای دستیابی به این هدف، پس از تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی اقلیمی، نقشه‌های مورفومتری (DEM)، شیب و TPI و نقشه NDVI، ارتباط بین کلاس‌های اقلیمی با کلاس‌های لندفرم، ارتفاع، شیب و فرسایش در قالب جداول

تحلیلی متقاطع مورد ارزیابی قرار می گیرد تا درک بنیادین از تعاملات اقلیم-ژئومورفولوژی-پوشش گیاهی افزایش یافته و ابزاری کمی برای پهنه بندی مدیریتی حوضه های آبخیز مشابه فراهم آید.

محدوده مورد مطالعه

حوضه آبخیز مورد مطالعه در شمال شرقی شهرستان اقلید واقع شده است. محدوده مورد مطالعه از شمال غربی به تنگ جونزکو ارتفاعات جونوک و تخت گل حیدری و نباتی و از شمال غربی به گردنه سفید راه و دره چاه زوک و ارتفاعات تیر و از شرق به ارتفاعات بن کولولو و جنوب به ارتفاعات سفید و از غرب به ارتفاعات قل تاوه و بیدسون و دره بیدسون محدود می شود. این محدوده شیت های IV 6551 و III NE 6551 نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه برداری کشور را شامل می شود. مساحت منطقه مورد مطالعه ۵۹/۰۵ کیلومتر مربع می باشد و بین طول های جغرافیایی ۵۲ درجه و ۳۷ دقیقه شرقی تا ۵۲ درجه و ۴۴ شرقی و عرض های جغرافیایی ۳۰ درجه و ۴۵ دقیقه شمالی تا ۳۰ درجه و ۵۱ دقیقه شمالی قرار گرفته است (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

روش پژوهش

پژوهش حاضر با بهره گیری از رویکردی چند مدلی شامل مدل تجربی EPM (گاوریلوویچ)، شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) و شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) در بستر سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) به بررسی روابط سیستماتیک میان پارامترهای اقلیمی، مورفومتری و پوشش گیاهی در حوضه آبخیز شمال شرقی اقلید پرداخته است. مدل EPM به دلیل سادگی و کارایی در مناطق خشک و نیمه خشک، برای محاسبه ضریب شدت فرسایش (Z) بر اساس عوامل سنگ شناسی، کاربری اراضی، پوشش گیاهی و توپوگرافی به کار گرفته شده و نقشه پهنه بندی فرسایش در پنج طبقه تهیه گردیده است. شاخص TPI نیز با مقایسه ارتفاع هر سلول با میانگین ارتفاع سلول های همسایه در مدل رقومی ارتفاع، لندفرم های منطقه را در ۱۰ کلاس ژئومورفولوژیک (از دره های باریک تا قله های مرتفع) طبقه بندی نموده است. به منظور ارزیابی کمی پوشش گیاهی، شاخص NDVI از تصاویر ماهواره لندست ۸، سال ۲۰۲۲ با استفاده از باندهای قرمز (باند ۴) و مادون قرمز نزدیک (باند ۵) محاسبه گردید که مقادیر آن بین ۱- تا ۱+ بوده و نشان دهنده میزان

زیست‌توده و سلامت پوشش گیاهی است. در گام نهایی، تمامی لایه‌های رستری شامل نقشه‌های اقلیمی (دما، بارش، تبخیر)، مورفومتری (ارتفاع، شیب، لندفرم) و NDVI با دقت مکانی یکسان (۳۰ متر) هم مرجع شده و مقادیر متناظر برای هر پیکسل استخراج گردید. سپس با در نظر گرفتن کلاس‌های اقلیمی به‌عنوان متغیر مستقل، محدوده تغییرات (حداقل و حداکثر) متغیرهای NDVI، ارتفاع، شیب و طبقه فرسایش برای هر کلاس تعیین شد. این روش‌شناسی یکپارچه، امکان کشف ارتباطات فضایی و کمی بین سه مؤلفه اقلیم، ژئومورفولوژی و پوشش گیاهی را فراهم آورده و خروجی آن به‌صورت جداول تحلیلی متقاطع ارائه خواهد شد. نتایج این تحلیل می‌تواند ابزاری کارآمد برای پهنه‌بندی مدیریتی، اولویت‌بندی عملیات آبخیزداری و شناسایی کانون‌های حساس به فرسایش در حوضه‌های آبخیز مشابه فراهم آورد. در این پژوهش، از چندین مدل جهت بررسی اهداف و رسیدن به نتایج استفاده شده است که در ادامه به بررسی هر یک از آن‌ها پرداخته می‌شود.

به‌منظور ارزیابی شدت فرسایش خاک در حوضه آبخیز مورد مطالعه، از مدل تجربی EPM (Erosion Potential Model) که با نام روش گاوریلوویچ نیز شناخته می‌شود، استفاده گردید. این مدل پس از چهار دهه تحقیق در کشور یوگسلاوی سابق توسعه‌یافته و برای نخستین بار توسط گاوریلوویچ در کنفرانس بین‌المللی رژیم رودخانه (سال ۱۹۸۸) ارائه شده است (احمدیان، ۱۳۸۰). مدل EPM با وجود سادگی نسبی، به دلیل در نظر گرفتن هم‌زمان عوامل مؤثر بر فرسایش شامل حساسیت سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، وضعیت پوشش گیاهی و توپوگرافی، در بسیاری از حوضه‌های آبخیز جهان به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مورد استفاده قرار گرفته است (رابطه ۱).

در این مدل، ضریب شدت فرسایش (Z) به‌عنوان شاخص اصلی، از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$Z = Y.Xa.(Ψ + I^{0.5}) \quad (\text{رابطه ۱})$$

که Z ضریب حساسیت خاک به فرسایش، Xa ضریب استفاده از زمین، Ψ ضریب فرسایش و I شیب متوسط برحسب درصد می‌باشد.

بعد از محاسبه ضریب فرسایش طبق جدول زیر میزان فرسایش‌پذیری خاک تعیین می‌شود (جدول ۱):

جدول ۱. ضریب شدت فرسایش

طبقه‌بندی فرسایش	شدت فرسایش	مقادیر حد	مقادیر متوسط Z
V	خیلی شدید	$Z > 1$	۱/۲۵
IV	شدید	$1 > Z > 0.71$	۰/۸۵
III	متوسط	$0.7 > Z > 0.41$	۰/۵۵
II	کم	$0.4 > Z > 0.2$	۰/۳
I	خیلی کم	$0.19 > Z$	۰/۱

منبع: (احمدیان، ۱۳۸۰)

به‌منظور تهیه نقشه لندفرم‌های و بررسی پارامترهای مورفومتری حوضه آبخیز منطقه مورد مطالعه از شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI^۱) استفاده شد. برای جداسازی لندفرم‌های منطقه از شاخص موقعیت توپوگرافی استفاده شد. TPI طبق معادله زیر مقایسه ارتفاع هر سلول در یک مدل رقومی ارتفاع با میانگین ارتفاع سلول‌ها همسایه می‌باشد. در نهایت ارتفاع میانگین از مقدار ارتفاع در مرکز کم می‌شود (جدول ۲) (ویز در ۲۰۰۱).

1. Topography Position Index

$$TPI_i = Z_0 - \sum_{n=1}^n Z_n / n \quad (\text{رابطه ۲})$$

که Z_0 ارتفاع نقطه مدل تحت ارزیابی، Z_n ارتفاع از شبکه و n تعداد کل نقاط اطراف در نظر گرفته شده در ارزیابی می باشد.

شاخص موقعیت توپوگرافی، ارتفاع هر پیکسل در مدل رقومی ارتفاع را با پیکسل مشخص اطراف آن پیکسل مقایسه می کند. مقادیر مثبت TPI نشان دهنده مناطقی است که بالاتر از نقاط اطراف قرار گرفته (تپه ها) و مقادیر منفی TPI نشان دهنده مناطقی است که پایین تر از اطرافشان هستند (دره ها). مقادیر صفر و نزدیک صفر نیز نشان دهنده مناطق مسطح (جایی که شیب نزدیک صفر است) یا مناطقی با شیب ثابت هستند. بر اساس مقادیر TPI یک طبقه بندی برای لندفرم صورت گرفته است که به صورت جدول زیر می باشد:

جدول ۲. طبقه بندی انواع لندفرم ها بر اساس شاخص موقعیت توپوگرافی (ویز در ۲۰۰۱)

نوع لندفرم	مقدار TPI
۱ دره های باریک، آبراهه ها	$TPI \leq -1$
۲ زهکش های شیب میانی، دره های کم عمق	$-1 < TPI < 1$
۳ زهکش های مناطق مرتفع	$TPI \geq 1$
۴ دره های U شکل	$TPI \leq -1$
۵ دشت	$-1 < TPI < 1, \text{Slope} \leq 5^\circ$
۶ شیب های باز	$-1 < TPI < 1, \text{Slope} > 5^\circ$
۷ شیب های بالایی، مساه	$TPI \geq 1$
۸ یال های موضعی، تپه های موجود در دره	$TPI \leq -1$
۹ یال های شیب میانی، تپه های کوچک موجود در دشت	$-1 < TPI < 1$
۱۰ قله کوه، یال های مرتفع	$TPI \geq 1$

به منظور ارزیابی کمی پوشش گیاهی و ارتباط آن با پارامترهای اقلیمی و مورفومتری، از شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) استفاده گردید. این شاخص به دلیل حساسیت بالا به تغییرات زیست توده، سادگی محاسبه و همبستگی معنادار با پارامترهایی نظیر درصد پوشش گیاهی، شاخص سطح برگ و سلامت پوشش گیاهی، یکی از پرکاربردترین شاخص های طیفی در مطالعات هیدرولوژی، اقلیم شناسی و مدیریت حوضه های آبخیز به شمار می رود (رحمانی^۱ و همکاران، ۲۰۱۱). به منظور محاسبه شاخص های پوشش گیاهی NDVI از باندهای ۴ و ۵ ماهواره لندست ۸، در سال ۲۰۲۰ استفاده شد. تاریخ تصویربرداری به گونه ای انتخاب گردید که با اوج فصل رشد پوشش گیاهی در منطقه مطالعه (ماه های فصل بهار) هم زمان باشد تا حداکثر کنتراست طیفی بین پوشش گیاهی و سایر عوارض حاصل شود. تصاویر با معیار پوشش ابری کمتر از ۱۰ درصد و حداقل نویز رادیومتریکی انتخاب و پس از اعمال تصحیحات اتمسفری، آماده سازی شدند.

در نهایت به منظور بررسی ویژگی های مورفومتری حوضه آبخیز با ویژگی های پوشش گیاهی از شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) استفاده شد. با توجه به رابطه بین باند طیفی مادون قرمز و باند قرمز طبق رابطه ۳ می توان این شاخص را محاسبه نمود. مقادیر این شاخص بین -۱ تا +۱ می باشد که هر چه میزان پوشش گیاهی در منطقه بیشتر باشد میزان این شاخص بیشتر بوده و به سمت عدد +۱ می باشد (Rahmani et al., 2011).

$$NDVI = Pnir - Pred / Pnir + Pred \quad (\text{رابطه ۳})$$

^۲. Rahmani et al

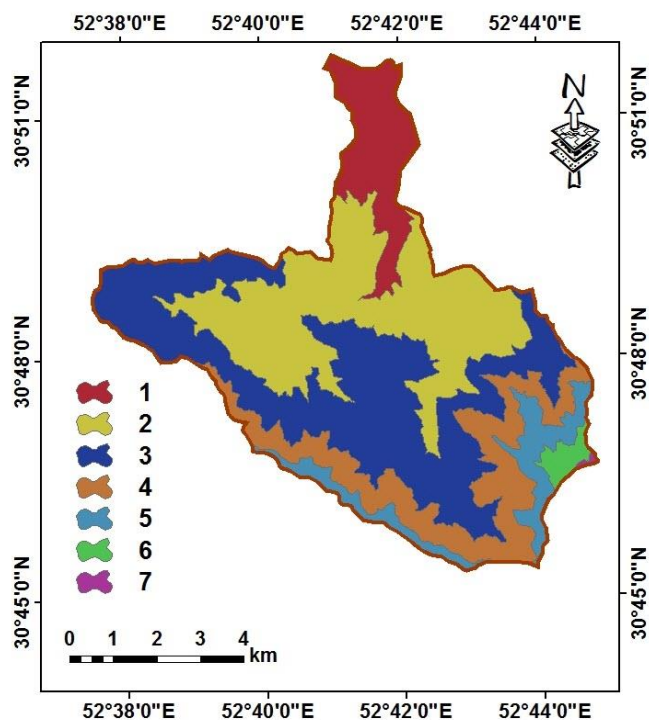
در نهایت به منظور تعیین ارتباط سیستماتیک بین پارامترهای اقلیمی (تبخیر، بارندگی و دما) با ویژگی‌های مورفومتری (ارتفاع، شیب، لندفرم) و شاخص NDVI، ابتدا نقشه‌های هر یک از این متغیرها در محیط GIS به صورت لایه‌های رستری با دقت مکانی یکسان (۳۰ متر) هم مرجع گردیدند. سپس مقادیر متناظر برای هر پیکسل استخراج شد. در گام بعدی، کلاس‌های اقلیمی به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شدند و برای هر کلاس، محدوده تغییرات (حداقل و حداکثر) متغیرهای NDVI، ارتفاع، شیب و فرسایش (طبقه فرسایش) تعیین گردید.

یافته‌ها

با توجه به اینکه هدف از این مطالعه بررسی پارامترهای اقلیمی و ارتباط آن با ویژگی‌های مورفومتری حوضه آبخیز می‌باشد، ابتدا نقشه پهنه‌بندی هر یک از پارامترهای اقلیمی تهیه شد (بر اساس آمار اقلیمی ایستگاه‌های سازمان هواشناسی کشور). تبخیر یکی از کمیت‌های هواشناسی می‌باشد که به پارامترهایی از قبیل درجه حرارت، رطوبت هوا، سرعت باد، و ... وابسته است. با توجه به اطلاعات موجود در ایستگاه‌های سینوپتیک (آباده، اقلید، کافت، ایزدخواست، شهرضا و صادق‌آباد) و همچنین تصاویر ماهواره‌ای و ویژگی‌های طبیعی منطقه با استفاده از مدل SEBS میزان تبخیر منطقه محاسبه شد و خطوط هم‌تراز تبخیر منطقه مورد مطالعه در محیط GIS تهیه شد. با توجه به شکل ۲ و جدول ۳ مشخص می‌شود که بیشترین میزان تبخیر در منطقه مورد مطالعه در بخش‌های شمالی منطقه می‌باشد. به طوری که هر چه میزان ارتفاعات در منطقه بیشتر می‌شود میزان تبخیر در منطقه مورد مطالعه کاهش می‌یابد.

جدول ۳. میزان تبخیر و کلاس‌های تبخیر منطقه مورد مطالعه

تبخیر و تعرق (میلی‌متر در روز)	مساحت برحسب کیلومتر مربع	کلاس
۰-۲۰۰۰	۵/۶۹	۷
۲۰۰۰-۳۰۰۰	۱۷/۸۲	۶
۳۰۰۰-۴۰۰۰	۲۱/۵۱	۵
۴۰۰۰-۵۰۰۰	۹/۰۲	۴
۵۰۰۰-۶۰۰۰	۴/۰۷	۳
۶۰۰۰-۷۰۰۰	۰/۸۳	۲
۷۰۰۰-۸۰۰۰	۰/۰۷۸	۱



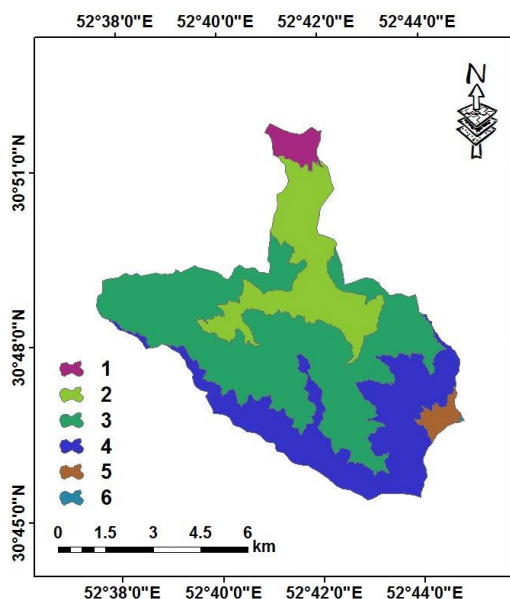
شکل ۲. تبخیر و تعرق منطقه مورد مطالعه بر اساس کلاس های تبخیر

روشی که برای محاسبه بارندگی در حوضه آبخیز مورد مطالعه اعمال شد استفاده از ترسیم خطوط هم باران بود. با توجه به تغییرات بارندگی در حوضه آبخیز با توجه به تغییرات توپوگرافی، نقشه بارندگی منطقه مورد مطالعه تهیه شد. نتایج نشان داد که ۶ کلاس بارندگی در منطقه مورد مطالعه وجود دارد که هر چه به سمت بخش های جنوبی حوضه پیش می رویم میزان بارندگی افزایش می یابد (جدول ۴ و شکل ۳).

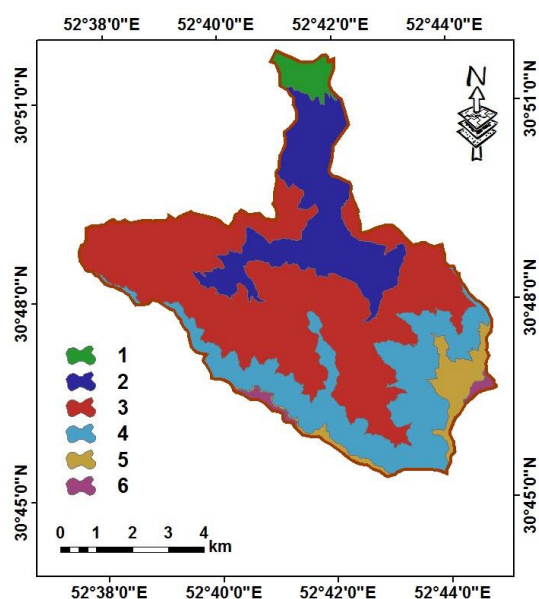
جدول ۴. میزان بارندگی و کلاس های بارندگی منطقه مورد مطالعه

بارندگی	مساحت بر حسب کیلومتر مربع	کلاس
۰-۲۵۰	۱/۵۰	۱
۲۵۰-۳۵۰	۱۱/۲۶	۲
۳۵۰-۴۵۰	۲۹/۵۸	۳
۴۵۰-۵۵۰	۱۳/۰۲	۴
۵۵۰-۶۵۰	۲/۸۵	۵
۶۵۰-۷۵۰	۰/۶۴	۶

منبع داده های اقلیمی: سازمان هواشناسی کشور



شکل ۴. میزان دمای متوسط منطقه مورد مطالعه



شکل ۳. بارندگی منطقه مورد مطالعه

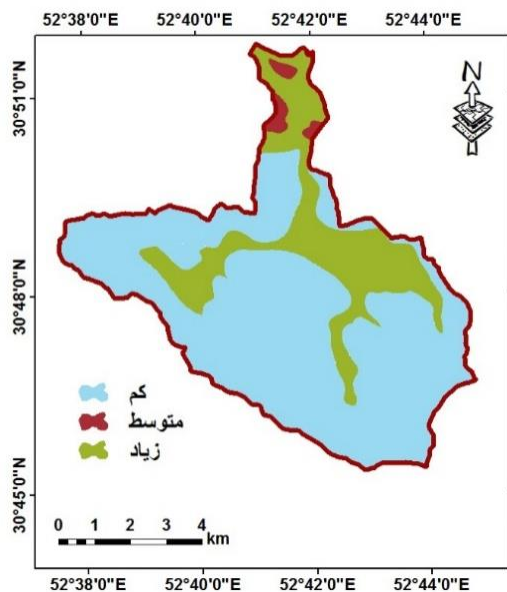
به منظور محاسبه دما در سطح حوضه آبخیز از اطلاعات ایستگاه‌های سینوپتیک (آباد، اقلید، کافت، ایزدخواست، شهرضا و صادق‌آباد) استفاده شد. در محیط GIS با در نظر گرفتن خطوط هم‌دما، نقشه دمای متوسط حوضه آبخیز تهیه شد (شکل ۴). با توجه به شکل ۴ مشخص می‌شود که دما در ۶ کلاس از مقادیر کمتر از ۴ درجه سانتی‌گراد تا ۱۲ درجه سانتی‌گراد طبقه‌بندی می‌شوند. در نهایت مشخص شد که با افزایش ارتفاع میزان دما در منطقه مورد مطالعه کاهش می‌یابد (جدول ۵).

جدول ۵. میزان دما و کلاس‌های دما منطقه مورد مطالعه

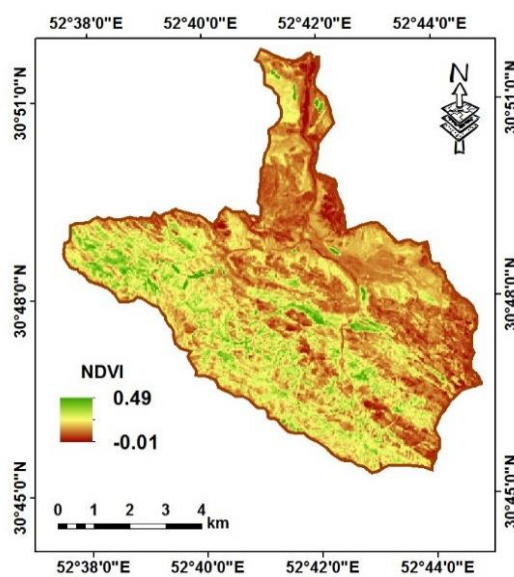
کلاس	مساحت برحسب کیلومتر مربع	دمای متوسط ماهانه
۶	۱/۵۰	۴ <
۵	۱۱/۲۶	۴-۵
۴	۲۹/۵۸	۵-۷
۳	۱۵/۵۱	۷-۹
۲	۰/۹۹	۹-۱۱
۱	۰/۰۲۵	۱۱-۱۲

منبع داده‌های اقلیمی: سازمان هواشناسی کشور

با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و استفاده از فرمول ۱ شاخص پوشش گیاهی NDVI منطقه مورد مطالعه تعیین شد که در شکل ۵ نشان داده شده است. مقادیر NDVI بین -0.1 تا $+0.49$ می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است مناطقی از شمال غرب و جنوب غرب منطقه مورد مطالعه دارای شاخص پوشش گیاهی NDVI زیاد می‌باشد که نشان‌دهنده وجود پوشش گیاهی زیاد در این مناطق می‌باشد. درحالی‌که بخش‌هایی زیادی از منطقه که در شمال شرق و جنوب شرق منطقه واقع شده‌اند دارای شاخص NDVI پایین می‌باشد که عدم پوشش گیاهی و یا پوشش گیاهی کم را نشان می‌دهد.

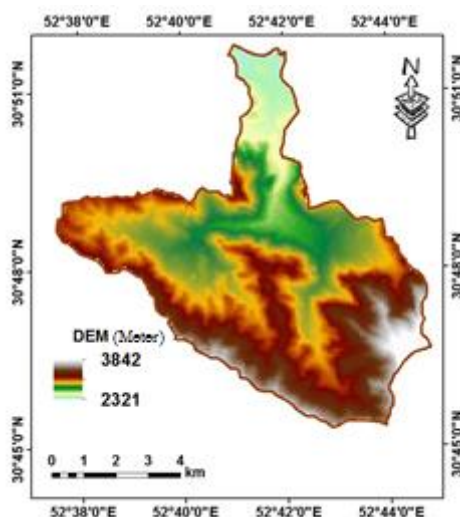
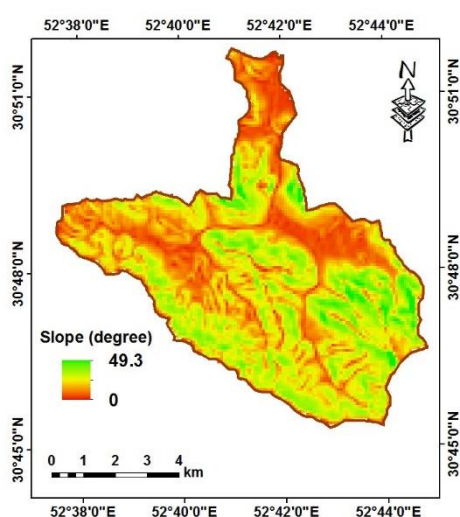


شکل ۶. نقشه حساسیت به فرسایش منطقه مورد مطالعه



شکل ۵. میزان شاخص NDVI منطقه مورد مطالعه

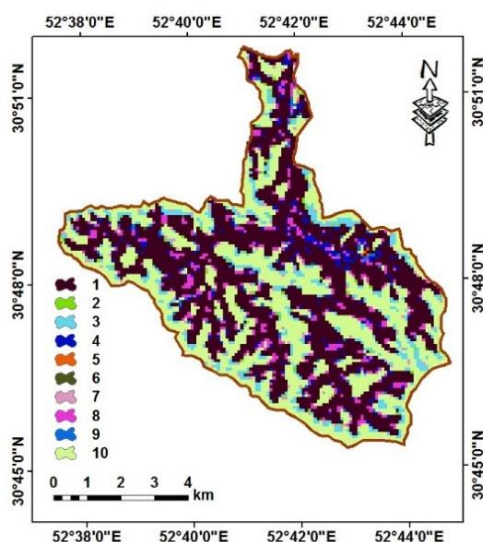
کلاس‌های فرسایش منطقه مورد مطالعه در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل زیر مشخص می‌شود که سه کلاس با شدت‌های فرسایش‌پذیری کم، متوسط و زیاد در حوضه آبخیز مورد مطالعه وجود دارد. به‌طوری‌که بخش‌های شمالی منطقه مورد مطالعه حساسیت‌پذیری بیشتری نسبت به بخش‌های جنوبی منطقه مورد مطالعه دارند. به‌منظور ارتباط بین پارامترهای اقلیمی با ارتفاع و شیب حوضه آبخیز مورد مطالعه، در محیط GIS با استفاده از داده‌های ماهواره استر (۲۰۲۰) نقشه ارتفاع (DEM) و نقشه شیب منطقه مورد مطالعه تهیه شد. با توجه به شکل ۷ مشخص می‌شود که بیشترین ارتفاعات در بخش‌های جنوبی منطقه مورد مطالعه می‌باشد. همچنین شکل ۷ نشان می‌دهد که بخش‌های جنوبی منطقه حوضه دارای شیب بیشتری نسبت به بخش‌های شمالی می‌باشند.



شکل ۷. نقشه مدل رقمی ارتفاع (DEM) و شیب منطقه مورد مطالعه

همچنین به‌منظور بررسی لندفرم‌ها و ارتباط آن با پارامترهای اقلیمی منطقه مورد مطالعه، از شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) به‌منظور تعیین لندفرم‌های منطقه مورد مطالعه استفاده شد. نتایج نشان داد که مقادیر TPI منطقه مورد مطالعه بین

۷۶- تا ۱۲۱ برای مقیاس 3×3 و ۲۰۹- تا ۲۴۳ برای مقیاس 45×45 است. در واقع مناطق مرتفع مانند یال و تپه‌ها، کدهای نزدیک صفر نشان‌دهنده مناطق مسطح یا مناطقی با تغییرات شیب کم و کد منفی نشان‌دهنده مناطق پست مثل دره‌ها و آبراهه‌ها می‌باشد. هر کدام از لندفرم‌های طبقه‌بندی شده بخشی از منطقه را در برمی‌گیرند. نقشه لندفرم منطقه مورد مطالعه در شکل ۸ نشان داده شده است.

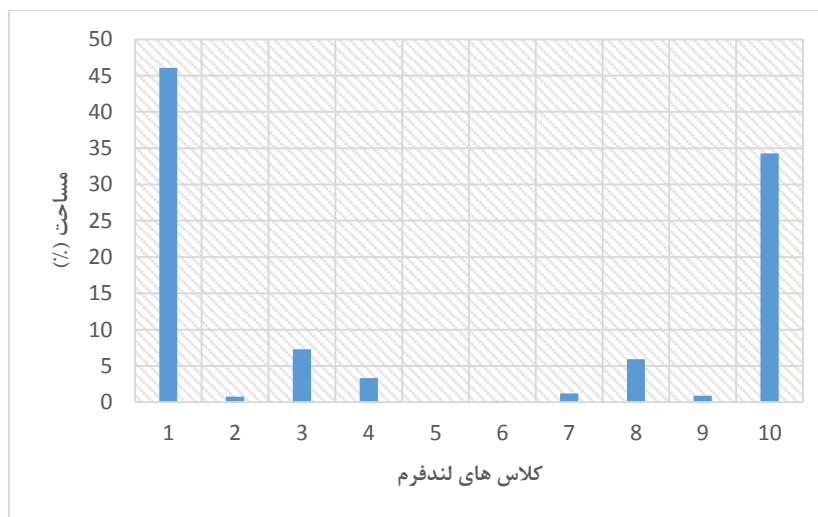


شکل ۸. نقشه لندفرم‌های منطقه مورد مطالعه

در منطقه مورد مطالعه ۱۰ نوع لندفرم شناسایی شد که مساحت هر یک از آن‌ها در جدول ۶ و شکل ۹ آمده است.

جدول ۶. مساحت هر یک از لندفرم‌ها در منطقه مورد مطالعه

کلاس لندفرم (بر اساس مدل TPI)	مساحت برحسب کیلومتر مربع	مساحت برحسب درصد
۱	۲۷,۲۱	۴۶,۰۷
۲	۰,۴۶	۰,۷۸
۳	۴,۳۰	۷,۲۷
۴	۱,۹۵	۳,۳۱
۵	۰,۰۴	۰,۰۶
۶	۰,۰۸	۰,۱۴
۷	۰,۷۲	۱,۲۱
۸	۳,۵۰	۵,۹۳
۹	۰,۵۴	۰,۹۲
۱۰	۲۰,۲۶	۳۴,۳۰
کل	۵۹,۰۵	۱۰۰,۰۰



شکل ۹. درصد لندفرم های منطقه مورد مطالعه

ارتباط بین کلاس های تبخیر و شاخص NDVI، لندفرم، DEM، شیب و فرسایش منطقه مورد مطالعه در جدول ۸ آمده است. همان طور که در جدول ۷ نشان داده شده است، با افزایش کلاس های تبخیر (کاهش میزان تبخیر) کلاس های لندفرم افزایش می یابد به طوری که در تبخیرهای کمتر کلاس های ۱۰ (قله و خط الرأس ها) دیده می شود. همچنین با کاهش تبخیر میزان ارتفاع افزایش می یابد. درحالی که با کاهش تبخیر میزان شیب تا کلاس ۵ تبخیر کاهش و بعد از آن افزایش می یابد. همچنین با کاهش کلاس های تبخیر، میزان فرسایش به سمت کلاس های کمتر پیش می رود.

جدول ۷. مقادیر شاخص تبخیر، شاخص NDVI، لندفرم، DEM، شیب و فرسایش

کلاس تبخیر	NDVI		لندفرم		DEM		شیب		فرسایش	
	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر
۱	-۰/۰۱۵	۰/۳۸	۵	۱	۲۳۲۳	۲۶۱۴	۰	۳۱	H	M
۲	۰/۰۱۸	۰/۴۹	۵	۱	۲۵۴۹	۳۱۰۴	۰/۷	۴۸/۸	H	L
۳	۰/۰۳۴	۰/۳۶	۶	۱	۲۷۷۴	۳۱۲۳	۰/۹۳	۴۶	H	L
۴	۰/۰۳۰	۰/۲۳	۶	۱۰	۲۹۵۴	۳۳۵۲	۰/۵۱	۴۶	L	L
۵	۰/۰۳۶	۰/۲۶	۲، ۴، ۶ و ۹	۱۰	۳۲۲۴	۳۵۶۷	۱/۸۷	۴۹/۳۲	L	L
۶	۰/۰۳۶	۰/۲۶	۲	۱۰	۳۴۷۵	۳۷۷۹	۵/۷۹	۴۹/۲۲	L	L
۷	۰/۰۳۸	۰/۱۱	۱۰	۱۰	۳۷۶۳	۳۸۴۲	۸/۵۳	۲۸/۲۶	L	L

ارتباط بین کلاس های بارندگی و شاخص NDVI، لندفرم، DEM، شیب و فرسایش منطقه مورد مطالعه در جدول ۸ آمده است. همان طور که در این جدول نشان داده شده است، با افزایش کلاس های بارندگی (افزایش میزان بارندگی) کلاس های لندفرم افزایش می یابد به طوری که در بارندگی های زیاد کلاس های ۱۰ (قله و خط الرأس ها) دیده می شود. همچنین با افزایش بارندگی میزان ارتفاع افزایش می یابد. درحالی که با افزایش بارندگی میزان شیب تا کلاس ۵ بارندگی افزایش و بعد از کاهش می یابد. همچنین با افزایش کلاس های بارندگی، میزان فرسایش به سمت کلاس های کمتر پیش می رود.

جدول ۸. مقادیر شاخص بارندگی، شاخص NDVI، لندفرم، DEM، شیب و فرسایش

کلاس بارندگی	NDVI		لندفرم		DEM		شیب		فرسایش	
	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر
۱	۰/۰۱۵	۰/۳۸	۵	۱	۲۳۲۳	۲۴۳۰	۰/۳۴	۲۰/۶۹	H	M
۲	-۰/۰۱۱	۰/۴۸	۵ و ۶	۱	۲۳۸۷	۲۷۵۶	۰	۴۰/۳۲	H	L
۳	۰/۰۱۸	۰/۴۹	۵	۱	۲۶۱۱	۳۱۰۴	۰/۷	۴۸/۸۷	H	L
۴	۰/۰۳۰	۰/۲۶	۶	۱۰	۲۹۳۲	۳۳۹۲	۰/۵۱	۴۶/۶۷	H	L
۵	۰/۰۳۶	۰/۲۶	۶ و ۹	۱۰	۳۳۰۱	۳۶۸۴	۱/۸۷	۴۹/۳۲	L	L
۶	۰/۰۳۶	۰/۱۶	۲	۱۰	۳۳۴۳	۳۸۴۲	۲/۶۷	۳۳/۷۵	L	L

با توجه به اینکه میزان دما در منطقه مورد مطالعه از مقادیر کمتر از ۴ درجه سانتی‌گراد تا حداکثر ۱۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد، ارتباط بین این پارامتر اقلیمی با شاخص NDVI، لندفرم، DEM، شیب و فرسایش منطقه مورد مطالعه تعیین شد که در جدول ۱۰ آمده است. همان‌طور که در جدول ۹ نشان داده شده است، با افزایش کلاس‌های دما (کاهش میزان دما) کلاس‌های لندفرم افزایش می‌یابد به‌طوری‌که در دماهای کمتر کلاس‌های ۱۰ (قله و خط‌الرأس‌ها) دیده می‌شود. همچنین با کاهش دما میزان ارتفاع افزایش می‌یابد. درحالی‌که با کاهش دما میزان شیب تا کلاس ۵ دما کاهش و بعد از افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش کلاس‌های دما، میزان فرسایش به سمت کلاس‌های کمتر پیش می‌رود.

جدول ۹. مقادیر دما، شاخص NDVI، لندفرم، DEM، شیب و فرسایش

کلاس دما	NDVI		لندفرم		DEM		شیب		فرسایش	
	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر
۱	-۰/۰۱۵	۰/۳۸	۳	۱	۲۳۲۳	۲۴۳۰	۰/۳۴	۲۰/۶۹	H	M
۲	-۰/۰۱۱	۰/۴۸	۵ و ۶	۱	۲۳۸۷	۲۷۸۵	۰	۴۰/۳۲	H	L
۳	۰/۰۱۸	۰/۴۹	۵	۱	۲۶۱۱	۳۱۰۴	۰/۷۰	۴۸/۸۷	H	L
۴	۰/۰۳۰	۰/۲۶	۶	۱۰	۲۹۳۲	۳۵۴۶	۰/۵۱	۴۷/۸۹	H	L
۵	۰/۰۳۶	۰/۲۶	۲	۱۰	۳۴۵۸	۳۸۰۰	۵/۷۹	۴۹/۳۲	L	L
۶	۰/۰۳۸	۰/۱۰	۱۰	۱۰	۳۸۳۹	۳۸۴۲	۱۱/۸۰	۱۹/۲۸	L	L

بحث

مطالعه حاضر با هدف بررسی ارتباط بین پارامترهای اقلیمی (تبخیر، بارندگی و دما) با ویژگی‌های مورفومتری (ارتفاع، شیب، لندفرم) و شاخص پوشش گیاهی NDVI در حوضه آبخیز شمال شرقی شهرستان اقلید انجام شد. در این راستا، ابتدا نقشه‌های پهنه‌بندی هر یک از پارامترهای اقلیمی و سپس نقشه‌های توپوگرافی و پوشش گیاهی در محیط GIS تهیه گردید. یافته‌ها حاکی از آن است که توزیع فضایی متغیرهای اقلیمی در منطقه مورد مطالعه الگوی مشخصی را پیروی می‌کند. به‌گونه‌ای که بیشترین میزان تبخیر در بخش‌های شمالی و کم ارتفاع منطقه به ثبت رسیده است، درحالی‌که بارندگی و شاخص پوشش گیاهی NDVI روند معکوسی را نشان داده و در بخش‌های جنوبی که ارتفاعات بیشتری دارند، افزایش می‌یابند. این الگو با رابطه معکوس دما و ارتفاع نیز همسو است، به‌طوری‌که نواحی مرتفع جنوبی دارای میانگین دمای کمتری (کمتر از ۴ درجه سانتی‌گراد) نسبت به نواحی شمالی هستند. تجزیه و تحلیل ارتباط بین کلاس‌های تبخیر و شاخص‌های مورفومتری و پوشش گیاهی (جدول ۸) نشانگر آن است که با کاهش میزان تبخیر (حرکت از کلاس ۱ به ۷) به تدریج بر ارتفاع منطقه افزوده می‌شود و لندفرم‌ها از دره‌ها و دشت‌ها (کلاس‌های پایین‌تر) به سمت قله‌ها و خط‌الرأس‌ها (کلاس ۱۰) تغییر می‌یابند. همچنین در شرایط تبخیر کمتر، شدت فرسایش از کلاس زیاد به

کم کاهش پیدا می کند که مؤید نقش پوشش گیاهی متراکم تر در نواحی مرتفع و پرباران در کنترل فرسایش است. نکته جالب توجه آنکه رابطه بین تبخیر و شیب یک روند غیرخطی را نشان می دهد؛ به گونه ای که شیب تا کلاس های میانی تبخیر (کلاس ۵) کاهش یافته و سپس افزایش می یابد. این پدیده می تواند ناشی از تغییر در الگوی لندفرم ها باشد، زیرا در ارتفاعات بسیار بالا (کلاس های ۶ و ۷ تبخیر) به دلیل قرار گرفتن در مناطق قله ای، شیب مجدداً افزایش می یابد.

بررسی ارتباط بارندگی با سایر پارامترها (جدول ۹) نیز مؤید الگویی مشابه است. با افزایش کلاس های بارندگی (و در نتیجه افزایش میزان بارش)، ارتفاع و شاخص NDVI روند صعودی دارند و لندفرم ها به سمت عوارض مرتفع تر مانند قله ها سوق می یابند. همچنین در کلاس های بالاتر بارندگی، فرسایش عمدتاً در کلاس کم قرار می گیرد که نشان دهنده نقش حفاظتی پوشش گیاهی غنی تر در این مناطق است. با این حال، رابطه بین بارندگی و شیب مجدداً یک الگوی غیریکنواخت را نشان می دهد، به طوری که شیب تا کلاس ۵ بارندگی افزایش و سپس در کلاس ۶ کاهش مختصری می یابد. این یافته را می توان به این صورت تفسیر کرد که در ارتفاعات بسیار بالا (نمایانگر کلاس ۶ بارندگی) ممکن است فرم های قله ای با سطوح نسبتاً هموارتری نسبت به دامنه های پرشیب زیر قله ای (کلاس ۵ بارندگی) وجود داشته باشند. الگوی حاکم بر ارتباط دما با پارامترهای مورفومتری و پوشش گیاهی (جدول ۱۰) نیز به وضوح مؤید رابطه معکوس دما با ارتفاع است. با کاهش دما (حرکت از کلاس ۱ به ۶)، ارتفاع به طور چشمگیری افزایش می یابد و لندفرم ها به کلاس ۱۰ (قله و خط الرأس) تغییر می کنند. همچنین در کلاس های دمایی پایین تر (سردتر)، شاخص NDVI حداکثر کمتری (۰,۱۰) نسبت به کلاس های میانی (مثلاً کلاس ۳ با حداکثر ۰,۴۹) دارد که ممکن است به دلیل محدودیت های فیزیولوژیک برای رشد گیاهان در ارتفاعات بسیار بالا (مانند سرمای شدید، وزش باد و خاک های نازک) باشد. بنابراین برخلاف انتظار اولیه، رابطه بین دما و NDVI یک رابطه خطی ساده نیست، بلکه به شکل یک رابطه سهمی یا بهینه ای است که در آن حداکثر پوشش گیاهی در دماهای میانی (کلاس های ۳ و ۴) مشاهده می شود.

در مجموع، یافته های این مطالعه به وضوح نشان می دهند که پارامترهای اقلیمی و مورفومتری در حوضه آبخیز مورد مطالعه به شدت بر یکدیگر تأثیر متقابل دارند. ارتفاع به عنوان یک عامل کنترل کننده اصلی، دما و بارش را تعدیل کرده و این تغییرات اقلیمی به نوبه خود بر توزیع پوشش گیاهی، الگوی لندفرم ها و شدت فرسایش اثر می گذارند. به ویژه، نتایج مؤید آن است که مناطق مرتفع جنوبی (با بارش بیشتر، دمای کمتر و تبخیر کمتر) میزبان پوشش گیاهی قابل قبول تر و فرسایش کمتری هستند، در حالی که مناطق شمالی و کم ارتفاع با تبخیر زیاد و بارش کم، حساسیت بیشتری به فرسایش نشان می دهند. همچنین وجود روابط غیرخطی بین شیب با بارندگی و تبخیر، و نیز رابطه سهمی بین NDVI و دما، نشان دهنده پیچیدگی تعاملات محیطی در منطقه است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که پارامترهای مورفومتری نظیر ارتفاع و شیب نه تنها تحت تأثیر فرآیندهای زمین شناسی و ژئومورفولوژیک هستند، بلکه به عنوان متغیرهای مستقل قوی می توانند در تخمین توزیع فضایی پارامترهای اقلیمی و شاخص پوشش گیاهی در حوضه های آبخیز مشابه مورد استفاده قرار گیرند. با این حال، محدودیت هایی نظیر تعداد محدود ایستگاه های هواشناسی و وابستگی نتایج به مقیاس مکانی تحلیل (اندازه سلول و ابعاد پنجره محاسباتی TPI) می توانند در تعمیم پذیری نتایج مؤثر باشند. لذا پیشنهاد می شود در پژوهش های آتی با به کارگیری روش های میانایی پیشرفته تر و نیز استفاده از داده های ماهواره ای با قدرت تفکیک زمانی و مکانی بالاتر، روابط علی بین پارامترهای مورفومتری و اقلیمی با دقت بیشتری مدل سازی شوند.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، ارتباط میان پارامترهای کلیدی اقلیمی شامل تبخیر، بارندگی و دما با ویژگی‌های مورفومتری (ارتفاع، شیب و لندفرم) و شاخص پوشش گیاهی NDVI در حوضه آبخیز واقع در شمال شرقی شهرستان اقلید مورد بررسی قرار گرفت. رویکرد اصلی مبتنی بر تولید لایه‌های اطلاعاتی در محیط GIS و تحلیل همبستگی فضایی بین این لایه‌ها بود. یافته‌های این مطالعه به‌طور قاطع نشان داد که ساختار توپوگرافیک حوضه آبخیز، به‌ویژه عامل ارتفاع، نقش کنترل‌کننده اولیه بر توزیع فضایی متغیرهای اقلیمی و بیوفیزیکی ایفا می‌کند. به‌طوری‌که با افزایش ارتفاع از بخش‌های شمالی به سمت جنوبی حوضه، کاهش معناداری در دما و تبخیر و افزایش قابل‌توجهی در میزان بارندگی مشاهده گردید. این الگو که در نقشه‌های هم‌دما، هم تبخیر و هم‌باران به‌وضوح ترسیم‌شده است، اساس هیدرو اقلیمی حوضه را شکل می‌دهد.

به‌طور مشخص، تحلیل جداول ارتباط (جداول ۸ تا ۱۰) نشان داد که بین کلاس‌های اقلیمی و لندفرم‌ها یک گرادیان مکانی سیستماتیک وجود دارد. در بخش‌های کم ارتفاع شمالی که با کلاس‌های تبخیر بالا و بارندگی پایین (کلاس‌های ۱ و ۲ تبخیر و بارندگی) مشخص می‌شوند، لندفرم‌ها عمدتاً از نوع دره‌ها و دشت‌ها (کلاس‌های پایین لندفرم) هستند. در مقابل، با حرکت به‌سوی بخش‌های مرتفع جنوبی و کاهش تبخیر و دما و افزایش بارندگی (کلاس‌های ۶ و ۷ تبخیر، کلاس‌های ۵ و ۶ بارندگی و کلاس‌های ۵ و ۶ دما)، لندفرم‌ها به‌طور غالب به کلاس ۱۰ (قله‌ها و خط‌الرأس‌ها) تغییر می‌یابند. این یافته بیانگر آن است که فرآیندهای تکنیکی و فرسایشی در بلندمدت، لندفرم‌های مرتفع را در مناطقی قرار داده‌اند که به دلیل دریافت رطوبت بیشتر و دمای خنک‌تر، شرایط مساعدتری برای تکامل پوشش گیاهی و کاهش تبخیر فراهم کرده‌اند.

نکته حائز اهمیت دیگر، رابطه غیرخطی مشاهده‌شده بین شیب با پارامترهای اقلیمی و همچنین رابطه سهمی بین دما و شاخص NDVI است. برخلاف انتظار اولیه مبنی برافزایش خطی شیب با ارتفاع، یافته‌ها نشان داد که میزان شیب تا کلاس‌های میانی اقلیمی (به‌عنوان مثال، کلاس ۵ تبخیر و بارندگی) روند کاهشی یا افزایشی ملایمی دارد و سپس در کلاس‌های انتهایی (مرتفع‌ترین مناطق) مجدداً افزایش می‌یابد. این الگوی رفتاری را می‌توان به حضور سطوح نسبتاً هموار قله‌ها در ارتفاعات بسیار بالا در مقایسه با دامنه‌های پرشیب زیر قله‌ای نسبت داد. همچنین، حداکثر شاخص NDVI در کلاس‌های دمایی میانی (کلاس‌های ۳ و ۴ دما) ثبت شد و در سردترین کلاس (کلاس ۶) با وجود بارندگی بیشتر، به دلیل محدودیت‌های فیزیولوژیک ناشی از سرمای شدید، کاهش یافت. این یافته به‌خوبی نشان می‌دهد که صرفاً افزایش بارندگی برای توسعه پوشش گیاهی کافی نیست، بلکه دما به‌عنوان یک عامل محدودکننده در ارتفاعات بسیار بالا ظاهر می‌شود.

از نظر مدیریت فرسایش خاک، نتایج پژوهش حاضر از اهمیت کاربردی بالایی برخوردار است. نقشه حساسیت به فرسایش (شکل ۶) و داده‌های جداول ۸ تا ۱۰ به‌وضوح نشان می‌دهند که با کاهش کلاس‌های تبخیر و دما و افزایش کلاس‌های بارندگی (یعنی حرکت به سمت ارتفاعات)، شدت فرسایش از کلاس زیاد و متوسط به کلاس کم تغییر می‌یابد. این رابطه معکوس بین فرسایش و پایداری اقلیمی-توپوگرافیک، نقش حفاظتی پوشش گیاهی نسبتاً متراکم‌تر در دامنه‌های مرتفع و پرباران جنوبی را تأیید می‌کند. در مقابل، بخش‌های شمالی و کم ارتفاع حوضه که با تبخیر بالا، بارندگی ناچیز، پوشش گیاهی ضعیف NDVI) پایین (و شیب‌های نسبتاً زیاد همراه هستند، به‌عنوان مناطق بحرانی از نظر فرسایش خاک شناسایی می‌شوند.

در رابطه با مقایسه پژوهش حاضر با پژوهش های مشابه، بررسی ها نشان داد که اگرچه پژوهش های متعددی به برآورد فرسایش و رسوب با مدل های تجربی یا به تحلیل جداگانه شاخص NDVI و لندفرم ها پرداخته اند، اما هیچ یک از آن ها به بررسی هم زمان و کمی روابط متقابل بین سه مؤلفه اقلیم (دما، بارش، تبخیر)، مورفومتری (ارتفاع، شیب، لندفرم مبتنی بر TPI) و پوشش گیاهی (NDVI) در قالب یک سیستم یکپارچه در حوضه های آبخیز کوهستانی با تنوع مورفولوژیک پیچیده (مانند شمال شرقی اقلید) نپرداخته اند. همچنین، در پژوهش های پیشین، ارتباط میان کلاس های اقلیمی با کلاس های لندفرم، ارتفاع، شیب و فرسایش به صورت جدول بندی شده و با رویکرد تحلیل همبستگی فضایی ارائه نشده است. به بیان دقیق تر، خلأ پژوهشی در نبود یک مطالعه سیستماتیک است که نشان دهد چگونه تغییرات مکانی ارتفاع و شیب بر توزیع دما و بارش حاکم است و این تغییرات اقلیمی به نوبه خود بر نوع لندفرم، شدت فرسایش و شاخص پوشش گیاهی چگونه اثر می گذارند.

در جمع بندی نهایی، می توان اذعان داشت که یک ارتباط سیستمی و قوی بین پارامترهای اقلیمی و ویژگی های مورفومتری در حوضه آبخیز مورد مطالعه وجود دارد. به گونه ای که تغییرات ارتفاع، به عنوان مهم ترین متغیر مستقل توپوگرافیک، توزیع فضایی دما، بارش و تبخیر را کنترل کرده و این متغیرهای اقلیمی به نوبه خود بر پوشش گیاهی، نوع لندفرم و شدت فرسایش اثر می گذارند. این یافته نشان دهنده قابلیت بالای پارامترهای مورفومتری در تخمین الگوی مکانی پارامترهای اقلیمی در حوضه های آبخیز مشابه، به ویژه در مناطق کوهستانی با تنوع ارتفاعی چشمگیر است. با این وجود، انجام پژوهش های تکمیلی با استفاده از روش های میانابیی پیشرفته تر (مانند کوکریجینگ با در نظر گرفتن ارتفاع به عنوان متغیر کمکی)، داده های ماهواره ای با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالاتر و در نظر گرفتن متغیرهای مؤثر دیگر مانند جهت شیب (جهت جغرافیایی دامنه) می تواند به درک دقیق تری از روابط علی و معلولی و ارائه مدل های پیش بینی دقیق تر برای مدیریت پایدار منابع آب و خاک در این حوضه ها منجر شود.

حامی مالی

بر اساس اظهار نویسندگان، این مقاله حامی مالی نداشته است.

سهام نویسندگان در پژوهش

نویسندگان به طور مساوی در کلیه مراحل طراحی و انجام پژوهش، گردآوری داده ها، تجزیه و تحلیل آماری داده ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش نویس مقاله، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی سازی مقاله مشارکت داشتند.

تضاد منافع

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

تقدیر و تشکر

از تمامی کسانی که در انجام پژوهش حاضر یاری رسان بوده اند، به ویژه کسانی که کار ارزیابی کیفیت مقاله را عهده دار بوده اند، تشکر و قدردانی می نمایم.

منابع

احمدیان، سید حسن. (۱۳۸۰). بررسی و تحقیق در مورد وضعیت رسوب زایی حوضه سرخ آباد سوادکوه به منظور اولویت گذاری زیر حوضه ها با استفاده از آمار رسوب و مدل MPSIAC. هفتمین کنگره علوم خاک / ایران. تهران.

- صادق‌زاده ریحان و یاراحمدی، جمشید. (۱۳۹۷). ارزیابی مدل WEPP در برآورد میزان فرسایش و رسوب در اراضی ماری منطقه خواجه. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی* ۲(۱)، ۹۷-۱۱۲. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22519424.1392.2.1.7.6>
- راستگو، سعید؛ قهرمان، بیژن؛ ثنایی نژاد، سیدحسین؛ داوری، کامران و خدائشاس، سعیدرضا. (۱۳۸۵). برآورد فرسایش و رسوب حوضه آخیز تنگ کنشت با مدل‌های تجربی MPSIAC و EMP به کمک GIS. *علوم آب‌و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)*، ۱۰(۱)، ۹۱-۱۰۴. <https://doi.org/10.1001.1.24763594.1385.10.1.7.2>
- مقیم، ابراهیم و نگهبان، سعید. (۱۳۹۱). بررسی فرسایش در حوضه آخیز رودخانه شورفدای (استان فارس) با استفاده از مدل آنتروپی. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۴۴(۳)، ۱-۱۶. <https://doi.org/10.22059/jphgr.10.22059/jphgr.2012.29211>
- برزو، آرش؛ ممیزی، محمدرضا و نیک‌اندیش، عباسعلی. (۱۳۸۷). مقایسه سه روش EPM, MPSIAC, PSIAC در برآورد میزان فرسایش و رسوب در حوضه چهل چشمه استان فارس. *کشاورزی پویا*، ۵(۱)، ۲۹-۱۹.
- ثنایی نژاد، سید حسین؛ آستارایی، علیرضا؛ میرحسینی، پریسا و کشاورزی، عاطفه. (۱۳۸۷). استفاده از تصاویر ماهواره‌ای برای مطالعات پوشش گیاهی (مقایسه شاخص‌های مختلف گیاهی - مطالعه موردی منطقه نیشابور). *مجموعه مقالات پنجمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون*.
- هادی قورقی، جبار؛ درختی، سعید؛ عبداللهی، زهرا؛ غلامی، لایلا و خالدی درویشان، عبدالواحد. (۱۴۰۴). ارزیابی مقایسه‌ای برآوردهای فرسایش خاک و تولید رسوب در حوزه آخیز دولت‌آباد با استفاده از مدل‌های EPM, MPSIAC و IntErO. *مهندسی اکوسیستم بیابان*، ۱۴(۴)، ۲۵-۴۰. <https://doi.org/10.22052/deej.2025.256485.1099>
- رمضانی، بهمن؛ ابراهیمی، هدی و حق‌پرست مژده‌ی، لایلا. (۱۳۹۶). نقش پارامترهای محیط طبیعی در میزان فرسایش و تولید رسوب به دو روش MPSIAC و EPM مطالعه موردی: حوضه آخیز سد برنجستانک. *مهندسی جغرافیایی سرزمین*، ۱(۲)، ۵۹-۴۹.
- پردل، فاطمه؛ ابراهیمی، عطالله و عزیزی، زهرا. (۱۳۹۶). ارزیابی شاخص‌های گیاهی برآورد پوشش و تولید گیاهی مراتع مناطق خشک در دوره‌های رویشی مختلف. *خشک بوم*، ۷(۲)، ۷۱-۵۷. <https://doi.org/10.29252/aridbiom.7.2.57>
- میرآخورلو، خسرو و حسینی، سید زین‌العابدین. (۱۳۸۵). تخمین مقدار علوفه مراتع با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای (مطالعه موردی حوزه آخیز دماوند). *فصلنامه تحقیقات مرتع و بیابان ایران*، ۱۳(۲)، ۱۲۷-۱۳۸.
- عابدینی، موسی و شیرنگ، شنو. (۱۳۹۳). بررسی میزان فرسایش خاک و رسوب‌دهی در حوضه آخیز مشکین چای به روش EPM. *جغرافیا و توسعه*، ۱۱(پیاپی ۳۰)، ۸۷-۱۰۰. [doi: 10.22111/gdij.2014.1554](https://doi.org/10.22111/gdij.2014.1554)
- عابدینی، موسی؛ جوادی علی‌بابالو، سجاد؛ مصطفی‌زاده، رئوف و پاسبان، امیر حسام. (۱۴۰۱). اولویت‌بندی زیر حوزه‌های آخیز کوزه‌توپراقی بر اساس فرسایش خاک و تولید رسوب با استفاده از پسیاک اصلاح‌شده (MPSIAC) در محیط GIS. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۱۳(۴۹)، ۱۸-۳۹. <https://doi.org/10.22034/jargs.2023.373965>

References

- Abedini, M., Shabrang, S., & Esmali, A. (2013). The evaluation of soil erosion and sediment Meshkinchay watershed to EPM method. *Geography and Development Quarterly*, 11(30), 87-100. <https://doi.org/10.22111/gdij.2014.1554> [in Persian]
- Abedini, M., Javadi, Alibabalo, S., Mostafazadeh, R. and Pasban, A. (2022). Prioritization of Kozetopraghi sub-watersheds based on estimated soil erosion and sediment yield using modified PSIAC model and GIS. *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 13(49), 39-18. <https://doi.org/10.22034/jargs.2023.373965> [in Persian]
- S. Rastgoo, B. Ghahraman, H. Sanei Nejad, K. Davary, S. R. Khodashenas. (2013). Estimation of Erosion and Sedimentation of Tang-e-Kenesht Basin with Empirical Models of MPSIAC and EPM Using GIS. *jwss* 2006; 10 (1):91-105. <https://doi.org/10.1001.1.24763594.1385.10.1.7.2> [in Persian]

- Ahmadian, H. (2001). *Investigation and research on the sediment yield status of the Sorkh Abad watershed in Savad Kooch for prioritizing sub-basins using sediment data and the MPSIAC model*. Paper presentation at the 7th Congress of Soil Science of Iran. [in Persian]
- Bagherzadeh, A., & Mansouri Daneshvar, M. R. (2011). Sediment yield assessment by EPM and PSIAC models using GIS data in semi-arid region. *Frontiers of Earth Science*, 5(2), 207-216. <https://doi.org/10.1007/s11707-011-0168-z>
- Barzou, A., Mamizi, M. R., & Nikandish, A. (2008). Comparison of three methods EPM, MPSIAC, and PSIAC in estimating erosion and sediment yield in the Chehel Cheshmeh basin of Fars Province. *Iranian Journal of Agricultural Science*, 15(1).. [in Persian]
- Brouce, K. W., Issa, D., Rex, D. P., John, A. H., Bradley, C. R., & Morris Southward, G. (1995). Satellite-based herbaceous biomass estimates in the pastoral zone of Niger. *Journal of Range Management*, 48(2), 159-164.
- Garrido-Leiva, J., Durán-Gárate, L., & Pérez-Martínez, W. (2026). Topographic Modulation of Vegetation Vigor and Moisture Condition in Mediterranean Ravine Ecosystems of Central Chile. *Forests*, 17(2), 201. <https://doi.org/10.3390/f17060706>
- Hadi Ghorghi, J., Derakhti, S., Abdullahi, Z., Gholami, L. and Khaledi Darvishan, A. (2025). Comparative Evaluation of Soil Erosion and Sediment Yield Estimation in the Dowlatabad Watershed Using the EPM, MPSIAC, and IntErO Models. *Desert Ecosystem Engineering*, 14(48), 25-40. <https://doi: 10.22052/deej.2025.256485.1099>[in Persian]
- Macdonald, J. A., Barnard, D. M., Mankin, K. R., Miner, G. L., Erskine, R. H., Poss, D. J., ... & Mikha, M. M. (2025). Topographic position index predicts within-field yield variation in a dryland cereal production system. *Agronomy*, 15(6), 1304. <https://doi.org/10.3390/agronomy15061304>
- Milevski, I. (2008). *Estimation of soil erosion risk in the upper part of Bregalnica watershed – Republic of Macedonia, based on digital elevation model and satellite imagery* [Paper presentation]. 5th International Conference on Geographic Information Systems (ICGIS), Istanbul, Turkey.8p.
- Mirakhorlou, K., & Hosseini, S. Z. (2006). Estimation of rangeland forage yield using satellite data (Case study: Damavand watershed). *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 13(2), 127-138. [in Persian]
- Moghim, E. and Negahban, S. (2012). Basin Erosion Study of Fadami Salt River (Fars Province) by Using Entropy Model. *Physical Geography Research*, 44(3), 1-16. <https://doi: 10.22059/jphgr.2012.29211>[in Persian]
- Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J. M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9). <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>
- Pordel, F., Ebrahimi, A. and Azizi, Z. (2017). Evaluating of the most suitable vegetation indices of estimating of canopy cover and above-ground phytomass in arid rangelands during different growth periods. *Journal of Arid Biome*, 7(2), 57-71. <https://doi: 10.29252/aridbiom.7.2.57> [in Persian]
- Ramezani, Bahman; Ebrahimi, Hoda and Haqqarast Mojrdeh, Leila. (2017). The role of natural environment parameters in erosion rate and sediment production by two methods MPSIAC and EPM (Case study: Berenjestanak Dam watershed), *Geographical Engineering of the Land*, 1(2), 49-59. [in Persian]
- Sanaei Nejad, H., Astaraei, A., Mirhosseini, P., Keshavarzi, A., & Ghaemi, M. (2008). *Use of satellite images for vegetation cover studies (Comparison of various vegetation indices – Case study: Neyshabur region)*. Proceedings of the 5th National Congress on Agricultural Machinery Engineering and Mechanization. [in Persian]
- Sadeqzadeh, Reyhan and Yarahmadi, Jamshid. (2018). Evaluation of WEPP model in estimating erosion and sedimentation rate in marly lands of Khajeh region. *Quantitative Geomorphological Research* 2(1), 97-112. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22519424.1392.2.1.7.6> [in Persian]
- Ventura, S. J., & Irvin, B. J. (2000). Automated landform classification methods for soil-landscape studies. *Terrain analysis: principles and applications*, 267-294.

- Weiss, A. (2001). Topographic position and landforms analysis. In *Poster presentation, ESRI user conference, San Diego, CA* (Vol. 200, p. 2001).
- Xiong, Y., & Wang, H. (2022). Spatial relationships between NDVI and topographic factors at multiple scales in a watershed of the Minjiang River, China. *Ecological Informatics*, 69, 101617. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101617>
- Yang, X., Zuo, X., Xie, W., Li, Y., Guo, S., & Zhang, H. (2022). A correction method of NDVI topographic shadow effect for rugged terrain. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15, 8456-8472. [https://doi: 10.1109/JSTARS.2022.3193419](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2022.3193419)