



Improving Flow Estimation Accuracy Through the Integration of Hydrological Methods and Remote Sensing Data: Emphasizing the Role of Soil Texture and Land Use in Ungauged Sites Located Hydrometric Data

Hafez Mirzapour¹, Ali Haghizadeh² , Mahdi Soleimani Motlagh³

1. PhD. student of Watershed Management Engineering Faculty of Natural Resources Lorestan University, Khorram Abad, Lorestan, Iran. E-mail: mirzapour.lu@yahoo.com
2. Corresponding author, Associate Professor, Department of Range and Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran. E-mail: alihaghi20@gmail.com
3. Assistant Professor, Department of Range and Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran. E-mail: soleimani.m@lu.ac.ir

Article Info

ABSTRACT

Article type:

Research Article

Article history:

Received 31 July 2024

Received in revised form 30

August 2024

Accepted 12 September 2024

Available online 22 September 2024

Keywords:

Lorestan,
Google Earth Engine,
Soil Texture,
SRCI,
Brightness Index,
sentinel

Objective: Effective water resource management in areas with limited hydrometric data requires the application of innovative and integrated methods to examine hydrological dynamics more accurately. This study investigates and analyzes how flow was estimated in the sub-basins of the Dez in Lorestan Province.

Method: Initially, Sentinel-1 and 2 satellite data were used, along with SRCI and BI indices, to extract maps of soil textures, land use, and curve number (CN). Subsequently, Relying on rainfall and discharge data from 1992 to 2023 and statistical analysis, the return period of rainfall and flow for the studied sub-basins was calculated utilizing EasyFit software. The flow for each sub-basin was estimated using the SCS method and multivariate regression.

Results: The results indicated that multivariate regression, evaluated using the Durbin-Watson statistic (1.74), the coefficient of determination (0.768), the mean squared error (17.88), and the Nash-Sutcliffe efficiency (0.758) for a 2-year return period, was the most suitable method for estimating flow at ungauged stations within the sub-basins of the Dez River.

Conclusions: Overall, this research presents effective approaches for water resource management and the optimization of hydrological in Lorestan Province, To optimize cost and time efficiency, the use of multivariate regression for flow estimation in ungauged hydrometric sub-basins is recommended.

Cite this article: Mirzapour, H., Haghizadeh, A., & Soleimani Motlagh, M. (2024). Improving Flow Estimation Accuracy Through the Integration of Hydrological Methods and Remote Sensing Data: Emphasizing the Role of Soil Texture and Land Use in Ungauged Sites Located Hydrometric Data. *ECOHYDROLOGY*, 11 (3), 337-354. <http://doi.org/10.22059/IJE.2024.383293.1842>



© Hafez Mirzapour, Ali Haghizadeh, Mahdi Soleimani Motlagh. Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/IJE.2024.383293.1842>

Introduction

Climate change and population growth have heightened the need for accurate and effective planning in water resource management. Estimating surface runoff in ungauged basins is critical for managing water resources, particularly in remote and underdeveloped regions. In these areas, the absence of accessible measured data can impede informed decision-making concerning water management strategies. Remote sensing, as an effective tool, has the potential to bridge these information gaps and facilitate surface runoff estimation across various scales. This technology provides precise imagery and data regarding environmental conditions, enabling comprehensive analysis and modeling of runoff, thereby assisting decision-makers in achieving improved outcomes in water resource management. The primary objective of this research is to enhance the accuracy of discharge estimates by integrating hydrological methods with remote sensing data, with a particular focus on the roles of soil texture and land use in ungauged basins.

Method

The study area encompasses the watershed sub-basins of the Dez River in Lorestan Province, Iran. In this research, we initially relied on Sentinel-1 and Sentinel-2 satellite data, utilizing the SRCI and BI indices to extract soil texture maps, land use classifications, and Curve Number (CN) maps. Subsequently, precipitation and discharge data from the years 1992 to 2023 were statistically analyzed to compute the return periods of precipitation and discharge for the investigated sub-basins, employing EasyFit software. Following this analysis, the discharge for each sub-basin was estimated using the SCS method in conjunction with multivariable regression analysis.

Results

Soil texture was obtained using the Soil Quality Index (SQI) and Bulk Density (BD) indices, as well as bands 11 and 12 of Sentinel-2, along with soil moisture data from Sentinel-1, all processed within the Google Earth Engine platform. Subsequently, the percentages of clay and sand were summed to derive the percentage of silt by subtracting from 100%. Soil classification was conducted in the Google Earth Engine according to the standards of the United States Department of Agriculture (USDA).

Utilizing the methodology that integrates Sentinel-1 and Sentinel-2 satellite imagery within the Google Earth Engine, the land use map was validated against ground reference points, achieving a Kappa coefficient of 0.80 and an overall accuracy of 0.82. The Curve Number (CN) map was generated based on the interaction between the land use map and hydrological soil groups.

Additionally, relying on 30 years of precipitation data and statistical analysis, the return periods for precipitation and discharge in the studied sub-basins were calculated using EasyFit software. The discharge for each sub-basin was estimated using the Soil Conservation Service (SCS) method and multivariable regression analysis. The results indicated that the multivariable regression method, characterized by a Durbin-Watson statistic of 1.74, a coefficient of determination (R^2) of 0.768, a mean square error of 17.88, and a Nash-Sutcliffe efficiency coefficient of 0.758, identified the 2-year return period as the most suitable for estimating discharge at unmeasured stations within the Dez sub-basins in Lorestan Province.

Conclusions

The findings of this study demonstrate that the application of remote sensing data and hydrological methodologies serves as an effective approach for estimating surface runoff in sub-basins lacking hydrometric data. The integration of soil texture information and land use characteristics, coupled with a comprehensive analysis of precipitation patterns, significantly enhances the capacity for estimating discharge. These results underscore the substantial potential of remote sensing in improving the accuracy of runoff predictions and facilitating the efficient management of water resources in less developed regions.



بهبود دقت برآورد دبی با تلفیق روش‌های هیدرولوژیکی و داده‌های سنجش از دور با تأکید بر نقش بافت خاک و کاربری اراضی در حوضه‌های فاقد آمار هیدرومتری

حافظ میرزاپور^۱ | علی حقی‌زاده^۲ | مهدی سلیمانی مطلق^۳

۱. دانشجوی دکتری مدیریت حوزه‌های آبخیز، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران. رایانامه: mirzapour.lu@yahoo.com
 ۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران. رایانامه: mirzapour.lu@yahoo.com
 ۳. استادیار گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران. رایانامه: soleimani.m@lu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	متن چکیده
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۰	هدف: مدیریت مؤثر منابع آب در مناطق با داده‌های هیدرومتری محدود، نیازمند استفاده از روش‌های نوین و ترکیبی است که به بررسی دقیق‌تر دینامیک‌های هیدرولوژیکی بپردازند. این پژوهش به بررسی و تحلیل برآورد دبی زیرحوضه‌های دز در استان لرستان می‌پردازد.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۰۹	روش تحقیق: ابتدا با اتکا به داده‌های ماهواره‌ای سنتینل ۱ و ۲ و بهره‌گیری از شاخص‌های SRCI و BI نقشه بافت‌های خاک، کاربری اراضی و نقشه شماره منحنی (CN) استخراج شد. در ادامه، با تکیه بر داده‌های بارش و دبی از سال ۱۳۷۱ تا ۱۴۰۲ و تحلیل آماری، دوره بازگشت بارش و دبی زیرحوضه‌های مورد مطالعه با بهره‌گیری از نرم‌افزار ایزی فیت محاسبه شد. دبی هر زیرحوضه با استفاده از روش SCS و رگرسیون چندمتغیره تخمین زده شد.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۲	یافته‌ها: نتایج نشان داد رگرسیون چندمتغیره باتوجه به مقادیر آمارة دوربین واتسون (۱/۷۴) آماره‌های ضریب تعیین ۰/۷۶۸ میانگین مربعات خطا ۱۷/۸۸ و نش ساتکلیف ۰/۷۵۸ در دوره بازگشت ۲ ساله مناسب‌ترین دوره بازگشت برای تخمین دبی ایستگاه‌های فاقد آمار در زیرحوضه‌های دز در استان لرستان است.
کلیدواژه‌ها: لرستان، گوگل ارث انجین، بافت خاک، SRCI، شاخص روشنایی BI، سنتینل.	نتیجه‌گیری: به‌طور کلی، این پژوهش شیوه‌های کارآمدی را برای مدیریت منابع آبی و بهینه‌سازی هیدرولوژیکی در استان لرستان ارائه می‌دهد و توصیه می‌شود برای صرفه‌جویی در هزینه و زمان، از رگرسیون چندمتغیره برای تخمین دبی در زیرحوضه‌های آبخیز فاقد آمار بهره‌برداری گردد.

استناد: میرزاپور، حافظ؛ حقی‌زاده، علی؛ و سلیمانی مطلق، مهدی (۱۴۰۳). بهبود دقت برآورد دبی با تلفیق روش‌های هیدرولوژیکی و داده‌های سنجش از دور با تأکید بر نقش بافت خاک و کاربری اراضی در حوضه‌های فاقد آمار هیدرومتری. *اکوهیدرولوژی*، ۱۱(۳)، ۳۳۷-۳۵۴.

<http://doi.org/10.22059/IJE.2024.383293.1842>



مقدمه

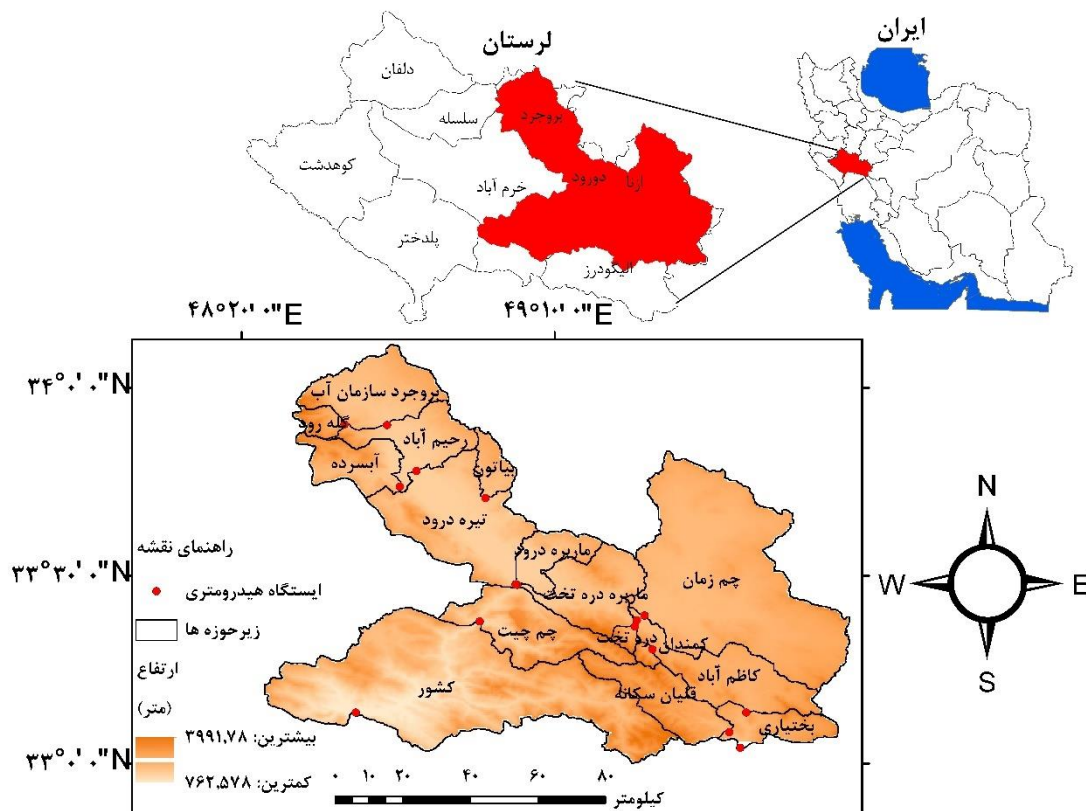
باتوجه به وقوع سیلاب‌های شدید، خسارات مالی و گاهی جانی درخور توجهی در حوزه‌های آبخیز ایران مشاهده می‌شود. یکی از داده‌های اساسی و تأثیرگذار در طراحی فعالیت‌های مدیریت منابع آب، حفاظت از خاک، کنترل سیلاب، سامان‌دهی رودخانه‌ها و طراحی سیستم‌های مدیریت سیلاب، برآورد دبی جریان سیلاب در دوره بازگشت‌های مختلف است. افزایش دقت در این برآورد می‌تواند نقش بارزی در کاهش خسارات اقتصادی و حفظ سلامت زیرساخت‌های آبی ایفا کند. در حوزه‌های آبخیز کوچک، به‌کارگیری روش‌های برآورد سیلاب به‌دلیل کمبود ایستگاه‌های آب‌سنجی و گاهی کم بودن طول دوره‌های آماری، ضروری است (خدمتی، منشوری و حیدری‌زاده، ۱۳۸۹). محاسبه رواناب سطحی در زیرحوضه‌های فاقد آمار برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آبی، به‌ویژه در مناطق دورافتاده و کمتر توسعه‌یافته اهمیت فراوانی دارد. در این زیرحوضه‌ها، عدم دسترسی به داده‌های اندازه‌گیری شده می‌تواند مانع از اتخاذ تصمیمات درست در زمینه مدیریت منابع آبی شود (وروسمارتی، مک اینتایر و گیسنر، ۲۰۱۰). فرمول‌های تجربی و نیمه‌تجربی متعددی رابطه بین حجم بارندگی و رواناب را توصیف می‌کنند. در میان فن‌های مختلف ارزیابی رواناب، روش شماره منحنی حفاظت خاک (SCS) USDA، به‌طور گسترده‌ای مورد تأیید قرار می‌گیرد. این روش یک چارچوب مفهومی ساده، قابل اعتماد و سازگار برای تجزیه و تحلیل دینامیک بارش-رواناب است (کن، چناوار و مالاپاناوار، ۲۰۲۴). انتخاب روش مناسب بسته به شرایط محیطی، داده‌های موجود و نیازهای پژوهشی متفاوت است (برندت، چای و جگن، ۲۰۱۹). تحلیل‌های منطقه‌ای سیلاب و تعیین روابط رگرسیونی میان دبی جریان سیلاب و ویژگی‌های کمی (مورفومتری) هر حوضه براساس داده‌های محلی، یکی از روش‌های ساده و قابل اطمینان برای برآورد دبی جریان سیلابی محسوب می‌شود (خدمتی، منشوری و حیدری‌زاده، ۱۳۸۹). رگرسیون چندمتغیره به‌عنوان یک ابزار تحلیلی مؤثر در مدل‌سازی روابط پیچیده بین چند متغیر ورودی و خروجی، به‌بهبود دقت تخمین کمک می‌کند. با تعیین مشخصه‌های مؤثر و ایجاد یک مدل رگرسیونی، می‌توان دبی زیرحوضه‌های فاقد آمار را به‌طور قابل قبولی تخمین زد (یزدی فیض‌آبادی، بهرام‌پور و رشیدیان، ۲۰۱۸). توسن و بیرانوند در پژوهشی نقش تحلیل سیلاب در دوره بازگشت‌های مختلف برای حوضه‌های کوچک فاقد ایستگاه نشان دادند که استفاده از روش SCS برای برآورد دبی سیلاب حوضه، به‌دلیل دقت بالا و قابلیت تعمیم‌پذیری به شرایط مختلف هیدرولوژیکی، یک ابزار مؤثر و قدرتمند نسبت به روش‌های تجربی فولر، کریگر و دیکن محسوب می‌شود (توسن و بیرانوند، ۱۴۰۲). سپهوند و همکاران در پژوهشی نقش CN مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ در مقایسه با لندست ۸ در مدل‌سازی بارش رواناب حوزه آبخیز تیره در استان لرستان را بررسی کردند. نتایج حاکی از افزایش چشمگیر دقت مدل‌سازی با نش ساتکلیف ۰/۵۶ به ۰/۷۴ در مرحله واسنجی و از ۰/۳۹ به ۰/۶۸ در مرحله صحت‌سنجی بود (سپهوند، سلیمانی مطلق و زینی‌وند، ۱۴۰۲). همچنین هاگراس به‌منظور مدل‌سازی رواناب در حوضه دره طیبه در کشور مصر (هاگراس، ۲۰۲۳)، بگل و همکاران برای تخمین منابع بالقوه رواناب (بگل، کوتهاری و تربیاتی، ۲۰۲۳)، ویناسا و همکاران به‌عنوان تخمین رواناب برای حوضه‌های فاقد آمار (ویناسا، راکش و لوکانات، ۲۰۲۴)، عزیز و همکاران با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور برای تخمین رواناب در حوضه‌های فاقد آمار (عزیز، اسلام و کدر، ۲۰۲۳)، راج و همکاران در راستای مدل‌سازی بارش رواناب با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی (راج، کومار و آشواریا، ۲۰۱۴)، قره‌خانی و همکاران با هدف تعیین محدوده خطر سیلاب در حوزه آبریز اهر چای (قره‌خانی، آقامحمدی و وحیدنیا، ۱۴۰۱) و نورمحمدی و همکاران (نورمحمدی، حقی‌زاده و طهماسبی‌پور، ۱۳۹۵) از روش SCS برای برآورد ارتفاع رواناب و دبی پیک بهره‌گرفتند. زما و همکاران به ارزیابی چگونگی معادلات جنگل تصادفی، رگرسیون چندمتغیره و رگرسیون مربعات جزئی در رواناب سطحی و فرسایش خاک پرداختند. نتایج نشان داد رگرسیون چندمتغیره با ارزیابی آماره نش ساتکلیف با مقدار ۰/۶۹ برای رواناب و ۰/۸ برای فرسایش خاک مناسب‌تر از دیگر معادلات تشخیص داده شد (زما، پرهیزکار و پلازا آلوارز، ۲۰۲۴). همچنین عبد و همکاران به‌منظور شبیه‌سازی رواناب سطحی، جریان پایه و جریان کل در حوضه‌های کوچک فاقد آمار (عبد، کدهیم و الموسوی، ۲۰۲۳)، کیم و همکاران با هدف شبیه‌سازی رسوبات معلق در رواناب در رودخانه کلرادو در ایالات متحده (کیم، کیم و گرین، ۲۰۲۲)، نصیری و همکاران در راستای بررسی اثرات شدت بارندگی، پوشش گیاهی، بافت خاک، شیب حوضه و رطوبت پیشین خاک بر تولید رواناب سطحی و فرایندهای رسوب در یک

حوزه آبریز مبتنی بر آزمایشگاه تحت شرایط بارش شبیه‌سازی شده، از رگرسیون چندمتغیره استفاده کردند (نصیری، سعید و انصاری، ۲۰۲۳). باتوجه به اهمیت تخمین دبی و محدودیت‌های موجود در دسترسی به داده‌های هیدرولوژیکی در بسیاری از زیرحوضه‌ها، این پژوهش بر آن است تا به بررسی و تحلیل زیرحوضه‌های آبخیز، حوضه دز در استان لرستان بپردازد. این منطقه با کاربری‌های متنوع و ویژگی‌های اقلیمی خاص خود، بستر مناسبی برای استفاده از روش‌های SCS و رگرسیون چندمتغیره ارائه می‌دهد. این پژوهش تلاش دارد تا ضمن به‌کارگیری این روش‌ها، به‌منظور فراهم کردن دسترسی به نقشه بافت خاک در مناطق مختلف و با توجه به اهمیت آن به‌عنوان یکی از پارامترهای مؤثر بر رواناب سطحی، با ترکیب باندهای ماهواره سنتینل ۱ و ۲، بدون نیاز به نمونه‌برداری آزمایشگاهی، نقشه بافت خاک استخراج خواهد شد تا امکان اجرای روش‌های مختلف بهینه‌سازی شود. همچنین سعی می‌کند به درک بهتر پدیده‌های هیدرولوژیکی و مدیریت بهینه منابع آب در استان لرستان کمک کند.

مواد و روش‌ها

۱. منطقه مورد مطالعه

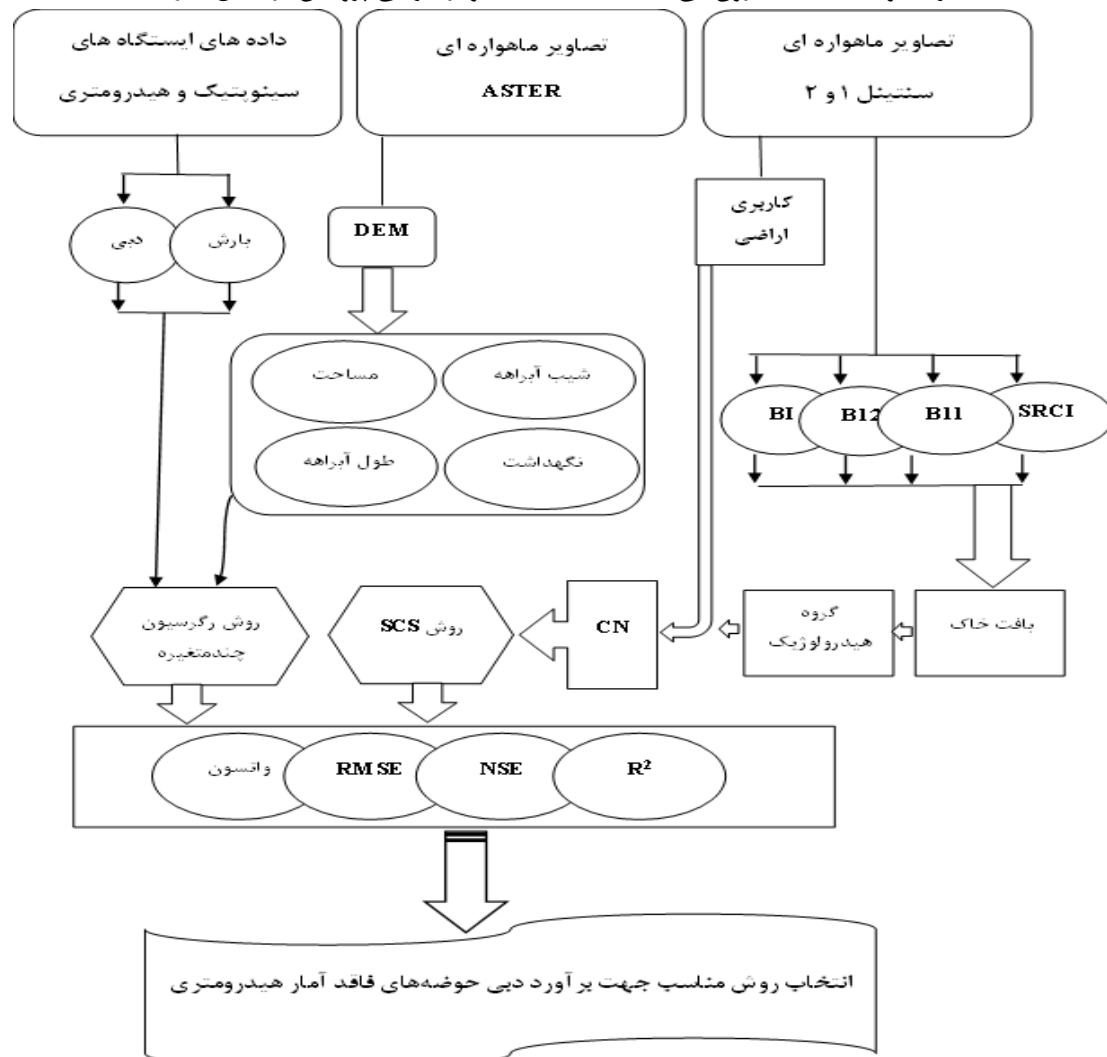
زیرحوضه‌های دز در استان لرستان با مساحتی حدود ۹۱۰۴ کیلومتر مربع بیش از ۳۲ درصد از مساحت استان لرستان را در بر گرفته است. این محدوده به‌دلیل وجود مناطق کوهستانی و کمبود زیرساخت‌های لازم برای کنترل و مدیریت منابع آبی، در معرض بروز سیلاب‌های ناگهانی قرار دارد. باتوجه به بررسی آمار و اطلاعات دریافتی از ایستگاه‌های هیدرومتری و باران‌سنجی شرکت آب منطقه‌ای و بررسی بارش ایستگاه‌های سینوپتیک هواشناسی استان لرستان در سال‌های گذشته، بروز سیلاب‌های ناگهانی در این منطقه بارها مشاهده شده و باعث خسارات جدی به تأسیسات و منازل مسکونی، منابع طبیعی و زیرساخت‌های اقتصادی گردیده است. شکل ۱ منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در استان لرستان و ایران

۲. روش پژوهش

ابتدا با استفاده از تلفیق تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۱ و ۲ و به کمک بازبینی میدانی، نقشه کاربری اراضی و نقشه بافت خاک استخراج گردید و با استفاده از بافت خاک، گروه هیدرولوژیک خاک تهیه شد. با توجه به اینکه هر کاربری با گروه هیدرولوژیک خاک خاص آن دارای CN مشخص است، CN این واحدها استخراج شد. در ادامه، با توجه به در دسترس بودن آمار ایستگاه‌های باران‌سنجی و هیدرومتری منطقه مورد مطالعه، بارش‌ها و دبی‌های حداکثر هر ایستگاه در ابعاد حداکثر سالانه استخراج شد و ایستگاه‌هایی که آمار ناقص داشتند، با دوره آماری ۳۰ ساله (۱۳۷۱-۱۴۰۲) با استفاده از روش رگرسیون بین ایستگاه‌های مجاور بازسازی شدند. سپس دبی با دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله با استفاده از توزیع‌های آماری مناسب تهیه شد. با محاسبه پتانسیل نگهداشت بارش و حداکثر بارش، ارتفاع رواناب با استفاده از روش SCS به دست آمد. سپس با روش کریپچ حداکثر دبی محاسبه گردید. برای به دست آوردن رابطه رگرسیون چندمتغیره، از پارامترهای مستقل طول آبراهه، شیب آبراهه، مساحت، CN، بارش حداکثر و نگهداشت بارش و پارامتر وابسته دبی بهره‌گیری شد. به منظور انجام این پژوهش، از سامانه گوگل ارث انجین برای تهیه نقشه‌های کاربری اراضی و بافت خاک استفاده شد. افزون بر این، نرم‌افزار EasyFit Professional v5.6 برای برآزش توزیع‌های آماری و تهیه دوره بازگشت‌های مختلف بارش و دبی به کار رفت. همچنین از نرم‌افزارهای Rstudio v2024.09.0+375 برای رگرسیون چندمتغیره و ArcGIS Pro v3.1.5 برای تولید نقشه‌های درون‌یابی استفاده شده است. نمودار جریان‌ی پژوهش در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲. نمودار جریان‌ی پژوهش

۲-۱. گوگل ارث انجین (GEE^۱)

علم زمین‌شناسی به دلیل تغییرات محیط‌زیستی و ظهور فناوری‌های رصد زمین به سرعت در حال تحول است. در این راستا، به ابزارهای نوینی برای نظارت، اندازه‌گیری، تجزیه و تحلیل، ارزیابی و مدل‌سازی داده‌های زمین‌شناسی نیاز داریم. گوگل ارث انجین در سال ۲۰۱۰ به‌عنوان یک پلتفرم رایانش ابری با قابلیت‌های محاسباتی برجسته معرفی شد (امانی، قربانیان و احمدی، ۲۰۲۰). استفاده از این پلتفرم در کاربردهای متنوع، به‌خصوص در جامعه سنجنش از دور، به سرعت گسترش یافته است. گوگل ارث انجین امکانات محاسبات ابری را فراهم می‌کند (تمیمی‌نیا، صالحی و مهدیان پری، ۲۰۲۰). در مقایسه با پلتفرم‌های دیگر، گوگل ارث انجین از انواع گسترده‌تری از داده‌های مکانی، از جمله داده‌های سنجنش از دور (ماهواره‌های سنتینل، لندست و...) پشتیبانی می‌کند و خدمات رایگانی را برای همه کاربران ارائه می‌نماید. این مسئله به‌ویژه در کشورهای کمتر توسعه‌یافته حائز اهمیت است. در حال حاضر، گوگل ارث انجین محبوب‌ترین پلتفرم رایانش ابری در علم زمین‌شناسی است و به‌طور گسترده‌ای برای پردازش داده‌های مربوط به حوضه‌های مختلف مرتبط با تغییرات محیطی، از جمله کشاورزی، مورد استفاده قرار می‌گیرد (تلوگانتالا، تنکابایل و اولیفنت، ۲۰۱۸). گوگل ارث انجین همچنین الگوریتم‌های پیشرفته‌ای برای تجزیه و تحلیل داده‌های بزرگ جغرافیایی و یک محیط برنامه‌نویسی تعاملی را در اختیار کاربران قرار می‌دهد. این پلتفرم میزبان مجموعه‌های زمانی طولانی از سوابق رصد زمین است و به‌عنوان یک ابزار حیاتی در پایش و تحلیل‌های محیطی ایفای نقش می‌کند (ژائو، یو و لی، ۲۰۲۰).

۲-۲. کاربری اراضی

در پژوهش حاضر، برای تهیه نقشه کاربری اراضی در زیرحوضه‌های دز در استان لرستان، از تصاویر ماهواره سنتینل ۲ و تصاویر راداری از ماهواره سنتینل ۱ در سال ۲۰۲۲ استفاده شده است. ماهواره سنتینل ۲ که توسط آژانس هواپیمایی اروپا برای دیده‌بانی از زمین به منظور بررسی‌های پوشش زمین و عوارض موجود در آن مانند جنگل‌ها و خدماتی همچون بلایای طبیعی به فضا پرتاب شده، شامل ۱۳ باند طیفی در دامنه‌های مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز میانی با توان تفکیک مکانی ۱۰، ۲۰ و ۶۰ متر است (<https://gisgeography.com/sentinel-2-bands-combinations/>). از سوی دیگر، سنتینل ۱ به‌عنوان یک ماهواره راداری عمل می‌کند و با استفاده از باند C و دو قطبش عمودی-عمودی^۲ و عمودی-افقی^۳ به دقت مکانی بین ۵ تا ۲۰ متر از سطح زمین تصاویر را برداشت می‌کند. با وجود همتایان دوقلوی سنتینل، دوره بازبینی مجدد این ماهواره‌ها در ناحیه استوا به ۵ روز کاهش یافته است. در این تحقیق، تصاویر چندفصلی بدون ابر با بازتاب پایین جو از سنجنده سنتینل ۲ و همچنین تصاویر GRD سنتینل ۱ در سیستم گوگل ارث انجین مورد استفاده قرار گرفت. بسیاری از پژوهشگران به استفاده از قطبش عمودی-افقی برای پایش پوشش‌های اراضی اشاره کرده‌اند (راستی، مهدوی فرد و شیخ قادری، ۱۴۰۱؛ محرمی، عطارچی و گلوگوین، ۲۰۲۴؛ مولیسا، ساعت چی و دالانگول، ۲۰۲۴؛ ایسفلدر، بویمک و گسندر، ۲۰۲۴). بنابراین در این تحقیق از بازپراکنش قطبش VH بهره‌برداری شد.

۲-۳. گروه‌های هیدرولوژیکی خاک

بافت رسی جذب مشخصی از SWIR دارد که مربوط به باندهای ۱۱ و ۱۲ ماهواره سنتینل ۲ است.

۲-۳-۱. شاخص نسبت ساده خاک رسی (SRCI^۴)

ترکیب، اندازه ذرات، درجه استحکام و آرایش سنگ‌دانه‌های رسی با خواص فیزیکی و شیمیایی اصلی خاک مرتبط است. کاتولینیت، ایلیت و مونتوریلونیت رایج‌ترین کانی‌های خاک رسی هستند. این فرایندهای تشکیل کانی‌های رسی تا حد زیادی به مواد سنگ مادر، شرایط اقلیمی خاص و شرایط مکان بستگی دارد (یوتونگ، مونچاروئن و ویجارنسون، ۱۹۹۷). ارزش آن‌ها در رفتار تورمی، حاصلخیزی خاک، جذب فلزات سنگین و... شناخته می‌شود. هر سه نوع کانی رسی در نوارهای جذب تشخیصی ناشی از ارتعاشات گروه‌های هیدروکسیل و مولکول‌های ساختاری آب در ناحیه طول موج SWIR متمایزند (کاربویکی، وولدایی و وان در میر، ۲۰۰۴).

1. Google Earth Engine
2. Vertical Vertical (VV)
3. Vertical Horizontal (VH)
4. Simple ratio Clay Index

بافت خاک عامل بسیار تعیین کننده‌ای در میزان رطوبت خاک است. رطوبت خاک، موجب کاهش بازتاب در بخش مرئی و مادون قرمز می‌شود؛ بنابراین خاک رس که مقدار زیادی رطوبت را جذب می‌کند، انعکاس کمتری در طول موج‌های مرئی، مادون قرمز نزدیک و میانی دارد؛ زیرا آن‌ها را به شدت جذب می‌کند و همبستگی بالایی با تابش امواج الکترومغناطیس دارد؛ ولی ذرات سیلت که مخلوطی از ذرات معدنی خاک هستند، همبستگی کمتری با بازتابش طیف الکترومغناطیس دارند (استنبرگ، روسل و مووازن، ۲۰۱۰).

SRCI به‌عنوان نسبت بازتاب دو باند SWIR، یعنی B11 (SWIR 1) و B12 (SWIR 2) که از تصاویر سنتینل ۲ مشتق شده است، تعریف می‌شود (رابطه ۱) (ساینز، ۱۹۹۹؛ دانودورو و زوخورفاتی، ۲۰۱۵)

$$SRCI = \frac{SWIR1}{SWIR2} \quad \text{(رابطه ۱)}$$

۲-۳-۲. شاخص روشنایی^۱ (BI)

شاخص روشنایی اطلاعات باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک را که به ترتیب با باندهای B4 و B9 در مورد داده‌های سنتینل ۲ نشان داده شده‌اند، ترکیب می‌کند. این شاخص نشان‌دهنده تغییرات در سطح متوسط بازتاب است (خان، راستوسکویو و ساتو، ۲۰۰۵). خاک‌های خشک با محتوای رس کم به شدت بازتاب‌دهنده هستند؛ درحالی‌که خاک‌های تیره دارای مقادیر رادیومترایی پایین در هر دو باند هستند که این فرایند به دلیل وجود رس زیاد است (اسفاو، سوریاپهاگوان و آرگاو، ۲۰۱۸؛ کالوز، آبدنگو و کالت، ۱۹۸۸). شاخص روشنایی به صورت رابطه ۲ بیان می‌شود:

$$BI = \sqrt{R^2 + NIR^2} \quad \text{(رابطه ۲)}$$

که در آن R و NIR به ترتیب باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک هستند.

در ادامه با استفاده از پروداکتهای سنتینل ۱ رطوبت خاک زیرحوضه‌های دز در استان لرستان استخراج شد؛ سپس برای طبقه‌بندی بافت خاک باندهای اصلی (باند ۱۱ و باند ۱۲ سنتینل ۲)، شاخص‌های BI و SRCI (سنتینل ۲) و رطوبت خاک (سنتینل ۱) با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی انجام شد. بدین ترتیب بافت خاک رس و بافت خاک شن تعیین شد. تجزیه و تحلیل حساسیت رطوبت خاک به خاک رس و شن و ماسه تابعی از اجزای تشکیل‌دهنده خاک رس، سیلت و ماسه است و می‌تواند به شدت تحت تأثیر قرار گیرد. رطوبت خاک به شدت تحت تأثیر بافت قرار می‌گیرد. خاک/خاک‌های شنی دارای بافت متخلخلی هستند که به‌عنوان یک فیلتر عمل می‌کند و به آب اجازه نفوذ می‌دهد؛ بنابراین بافت خاک رسی کندتر از خاک شنی خشک می‌شود و می‌تواند چندین روز مرطوب بماند. روش به‌کاررفته برای این تحلیل شامل پایش تغییرات دینامیکی در خاک است. مشخصات رطوبت (مستقیماً با رویدادهای بارندگی مرتبط است)، بر مشاهده رابطه بین میانگین سطح رطوبت خاک و بافت آن (خاک رس و ماسه) متکی است (بوسیچ، زریبی و پلتیر، ۲۰۱۹). در ادامه با استفاده از درصد بافت‌های رس، شن و سیلت منطقه مورد مطالعه، نقشه گروه‌های هیدرولوژیک خاک استخراج شد.

۲-۴. بارش

برای تهیه نقشه بارش، بارش‌های حداکثر هر سال با دوره آماری مشترک ۳۰ ساله (۱۳۷۱-۱۴۰۲) برای ۱۶ ایستگاه باران‌سنجی استخراج شد و ایستگاه‌های دارای آمار ناقص با استفاده از رگرسیون بین ایستگاه‌های مجاور بازسازی شدند؛ سپس توزیع‌های آماری مختلف برای تمام ایستگاه‌ها برآزش داده شد و بارش با دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله به دست آمد.

۲-۵. شماره منحنی (CN)

برای تهیه نقشه CN به نقشه گروه‌های هیدرولوژیک خاک و نقشه پوشش کاربری اراضی حوزه آبخیز نیاز داریم. در این پژوهش با تلفیق و برنامه‌نویسی نقشه گروه‌های هیدرولوژیک خاک و نقشه کاربری اراضی در سامانه گوگل ارث انجین، نقشه CN استخراج شد. رواناب حاصل از بارندگی را می‌توان برحسب ارتفاع یا حجم توصیف کرد و آن را به روش‌های مختلف نیز برآورد نمود. از جمله

روش‌های معمول در هیدرولوژی، روش سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) است که برای حوزه‌های آبخیزی که در آن‌ها داده‌های اندازه‌گیری دبی و رواناب موجود نیست به کار می‌رود. در این روش، ارتفاع رواناب حاصل از بارندگی از رابطه ۳ محاسبه می‌شود (علیزاده، ۱۴۰۳: ۹۴۱).

$$R = \frac{(p - 0.2S)^2}{(p + 0.8S)} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن، R ارتفاع رواناب (میلی‌متر)، P بارش (میلی‌متر) و S عامل مربوط به نگهداشت آب در سطح زمین که مقدار آن برابر است با:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{رابطه ۴}$$

در رابطه ۴، S برحسب میلی‌متر است و شماره منحنی (CN) نیز از روی خصوصیات خاک و نوع بهره‌برداری از زمین تعیین می‌شود.

برای محاسبه دبی اوج ابتدا زمان تمرکز از روش کریچ (Kirpich) و زمان رسیدن به اوج محاسبه شد و جاگذاری در رابطه دبی اوج قرار گرفت که روابط مربوط به ترتیب در رابطه ۵، ۶ و ۷ ارائه شده‌اند:

$$T_c = 0.0195 \times L^{0.77} \times S^{-0.385} \quad \text{رابطه ۵}$$

$$T_p = 0.6T_c + \sqrt{T_c} \quad \text{رابطه ۶}$$

$$Q_p = \frac{0.208q \times A}{T_p} \quad \text{رابطه ۷}$$

که در آن‌ها، T_c زمان تمرکز، L طول آبراهه (متر)، S شیب آبراهه، A مساحت (کیلومترمربع)، T_p زمان تا اوج، q ارتفاع رواناب و Q_p دبی اوج هستند [۱].

۲-۶. رگرسیون چندمتغیره

روش دیگر تخمین دبی برای حوزه‌های آبخیز فاقد آمار، استفاده از رگرسیون چندمتغیره بین متغیر وابسته با متغیرهای مستقل است. در این روش فرض بر آن است که می‌توان رابطه بین متغیر وابسته (دبی اوج) را با متغیرهای مستقل (شیب آبراهه، طول آبراهه، مساحت، نگهداشت بارش، بارش و شماره منحنی (CN) زیرحوضه‌ها) برقرار نمود (ستایش و نمازی، ۱۳۹۴). برای حصول اطمینان از استقلال خطاها (تفاوت بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط روش‌های) از آزمون دوربین واتسون استفاده شد. آماره این آزمون در دامنه ۰ تا ۴+ قرار می‌گیرد. چنانچه این آماره در بازه ۱/۵ تا ۲/۵ قرار گیرد، فرض H_0 (عدم همبستگی بین خطاها) پذیرفته شده و می‌توان از رگرسیون استفاده نمود. در صورت رد فرض فوق، همبستگی بین خطاها وجود دارد و نمی‌توان روش مذکور را به کار برد (فق ابراهیم، رسول و عبدالله، ۲۰۲۳).

۲-۷. معیارهای ارزیابی عملکرد روش‌ها

برای کنترل نبود خودهمبستگی بین جملات خطا، از آماره دوربین-واتسون^۱ (DW) (رابطه ۱۱) استفاده شده است. این آماره برای بررسی وجود خودهمبستگی بین باقی‌مانده‌ها در تحلیل رگرسیون استفاده می‌گردد (سالاس، ۱۹۹۳؛ روتلج و باروس، ۲۰۰۲). بعد از کنترل خودهمبستگی بین جملات خطا از ضریب تعیین^۲ (R^2)، میانگین مربعات خطا^۳ (RMSE) و ضریب نش ساتکلیف^۴ (NSE) برای ارزیابی عملکرد روش‌ها استفاده شد. هرچه R^2 و NSE به عدد یک نزدیک شود، عملکرد روش بهتر ارزیابی می‌گردد. همچنین مقادیر آماره RMSE به سمت صفر میل می‌کند (محمدزاده و مسعودزادگان، ۱۳۹۴).

روابط مربوط به ضریب تعیین، ضریب نش ساتکلیف و میانگین مربعات خطا به ترتیب در روابط ۸ تا ۱۰ ارائه شده است.

1. Durbin-Watson
2. R-squared correlation
3. Root Mean Square Error
4. Nash Sutcliffe model

$$R^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})\right)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{رابطه ۸}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad \text{رابطه ۹}$$

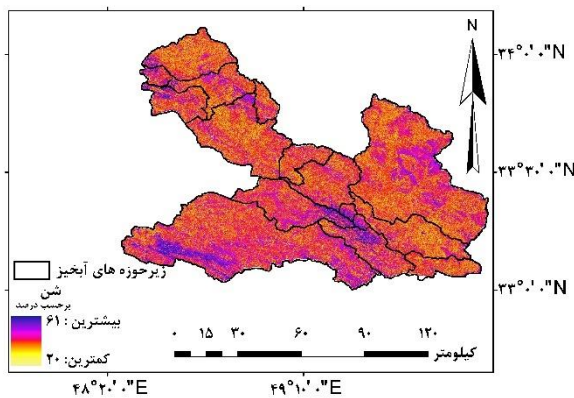
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$DW = \frac{\sum_{i=2}^n (\delta x_i - \delta x_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n (\delta x_i \delta x_i)} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

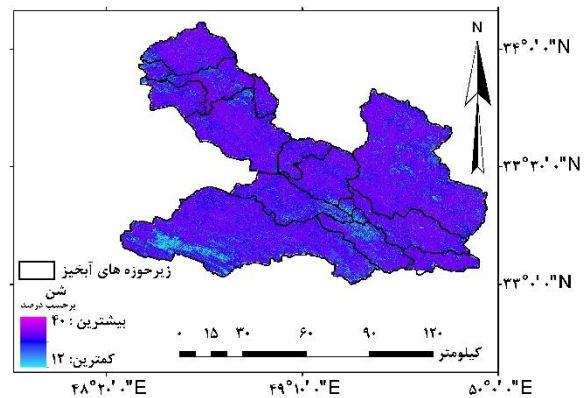
در روابط فوق، P_i مقدار محاسباتی، O_i مقدار مشاهده‌ای، \bar{P} مقدار میانگین محاسباتی، \bar{O} مقدار میانگین مشاهده‌ای، n تعداد داده‌ها و δx_i و δx_{i-1} باقی‌مانده در نقاط متوالی است.

نتایج و بحث

برای تهیه بافت خاک مطابق با پژوهش بوسبیج^۱ و همکاران (بوسبیج، زربی و پلتیر، ۲۰۱۹) با استفاده از شاخص‌های SRCI و BI و باندهای ۱۱ و ۱۲ سنتینل ۲ همچنین رطوبت خاک (سنتینل ۱)، درصد رس (شکل ۳-الف) و درصد شن (شکل ۳-ب) در سامانه گوگل ارث انجین استخراج شد. سپس با جمع درصد رس و درصد شن و کسر از عدد ۱۰۰ درصد سیلت (شکل ۳-پ) استخراج شد. آنگاه در سامانه گوگل ارث انجین طبق استانداردهای وزارت کشاورزی ایالات متحده (USDA)^۲ طبقه‌بندی خاک صورت گرفت (شکل ۳-ت).

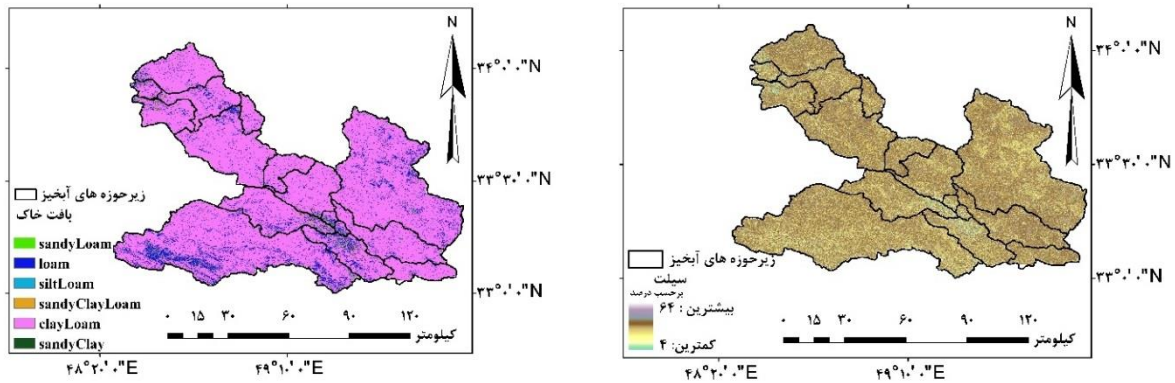


ب



الف

1. Bousbih
2. United States Department of Agriculture

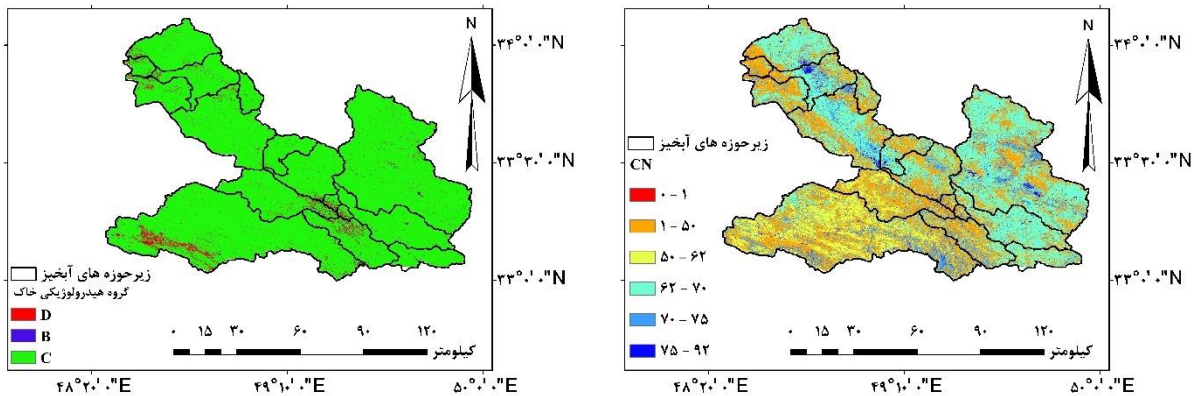


ت

پ

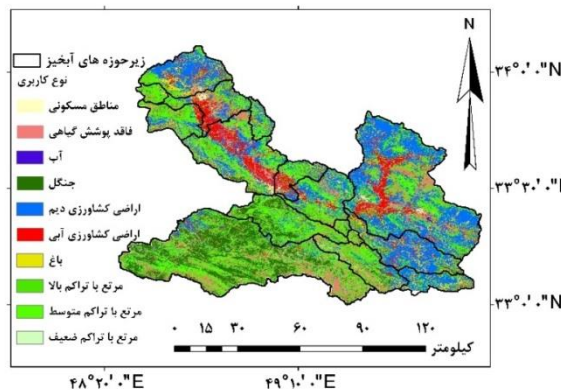
شکل ۳. منطقه مورد مطالعه: الف) نقشه درصد بافت خاک رس؛ ب) نقشه درصد بافت خاک شن؛ پ) نقشه درصد بافت خاک سیلت؛ ت) نقشه طبقه‌بندی خاک

باتوجه به روش کار با تلفیق تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۱ و ۲ در سامانه گوگل ارث انجین، نقشه کاربری اراضی با نقاط زمینی اعتبارسنجی شد و با ضریب کاپ ۰/۸۰ و صحت کلی ۰/۸۲ طبقه‌بندی و آشکارسازی گردید. نتایج این طبقه‌بندی با نتایج محرمی^۱ و همکاران (محرمی، عطارچی و گلوگوبین، ۲۰۲۴) همچنین فق‌ابراهیم^۲ و همکاران (فق‌ابراهیم، رسول و عبدالله، ۲۰۲۳) در افزایش دقت نقشه کاربری اراضی مشابهت دارد؛ که در شکل (۴-ب) ارائه شده است. همچنین نقشه‌های شماره منحنی (CN) (شکل ۴-الف) و گروه‌های هیدرولوژیک خاک (شکل ۴-ب) ارائه شده‌اند.



ب

الف



پ

شکل ۴. منطقه مورد مطالعه: الف) نقشه شماره منحنی (CN)؛ ب) نقشه گروه‌های هیدرولوژیک خاک؛ پ) نقشه کاربری اراضی

مشخصات بازسازی ایستگاه‌های هیدرومتری در جدول ۱ ارائه شده است. بیشترین سال‌های بازسازی مربوط به ایستگاه هیدرومتری سازمان آب بروجرد و ایستگاه هیدرومتری بختیاری است. باتوجه به تاریخ تأسیس این ایستگاه‌ها به ترتیب در سال ۱۳۸۲ و ۱۳۸۱ اقدام به بازسازی داده‌های ایستگاه‌های مذکور گردید. مقادیر معیارهای ارزیابی در جدول ۱ نشان می‌دهد بیشترین همبستگی بین ایستگاه ماربره درود و ایستگاه تیره درود است. می‌توان بیان داشت علت این امر همجواری این دو ایستگاه با یکدیگر است. نکته قابل توجه در جدول ۱، بیشترین تعداد همبستگی با ایستگاه هیدرومتری تیره درود است؛ به طوری که همبستگی بالایی با ماربره درود، بیاتون، آبرده تنگ محمد حاجی و سرخاب کشور دارد.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌هایی که آمار آن‌ها بازسازی شده است

متغیر Y	معیار ارزیابی	مقادیر	متغیر X	تعداد بازسازی
	پیرسون*	۰/۶۷۲		
سازمان آب بروجرد	R ²	۰/۴۵۱۲	آب سرده تنگ محمد حاجی	۱۰
	فرمول	$Y = 0.368 + 0.5644X$		
	پیرسون	۰/۸۸		
کاظم‌آباد	R ²	۰/۷۷۴۲	چم چیت	۳
	فرمول	$Y = 0.8762 + 0.12561X$		
	پیرسون	۰/۷۳۹		
بختیاری	R ²	۰/۵۳۱۲	کاظم‌آباد	۹
	فرمول	$Y = 1.664 + 3.269X$		
	پیرسون	۰/۷۱۸		
قلیان سکنه	R ²	۰/۵۱۵۸	بختیاری	۴
	فرمول	$Y = 0.316 + 0.6625X$		
	پیرسون	۰/۸۶۸		
سرخاب کشور	R ²	۰/۷۵۲۶	تیره درود	۱
	فرمول	$Y = 0.363 + 0.4005X$		
	پیرسون	۰/۸۰۳		
آب سرده تنگ محمد حاجی	R ²	۰/۶۴۴۶	تیره درود	۱
	فرمول	$Y = 1.0044 + 0.08686X$		
	پیرسون	۰/۸۱۸		
بیاتون	R ²	۰/۶۶۹۱	تیره درود	۷
	فرمول	$Y = 0.0528 + 0.02805X$		
	پیرسون	۰/۸۸۹		
ماربره درود	R ²	۰/۷۹۰۲	تیره درود	۵
	فرمول	$Y = 2.298 + 0.3155X$		

* ضریب همبستگی پیرسون، Y متغیر وابسته و X متغیر مستقل

در جدول ۲، دبی با دوره بازگشت‌های مختلف با بهترین توزیع آماری برای هر ایستگاه ارائه شده است. نکته قابل توجه در جدول ۲ این است که توزیع مشخصی برای تمام ایستگاه‌ها وجود ندارد. به عبارت دیگر، هر ایستگاه هیدرومتری ممکن است توزیع مختص به خود برای برآورد دبی با دوره بازگشت‌های مختلف را داشته باشد؛ به طوری که در بین ۱۶ ایستگاه هیدرومتری ۹ توزیع مختلف به‌عنوان توزیع مناسب تشخیص داده شده است.

جدول ۲. دبی با دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله با انتخاب بهترین توزیع آماری هر ایستگاه

ایستگاه هیدرومتری	بهترین توزیع آماری	T2	T5	T10	T25	T50	T100	T200
کاظم‌آباد	Lognormal (3P)	۱۵/۵۸۷	۵۱/۵۵۹	۱۰۳/۷۵	۲۲۹/۰۸	۳۸۲/۶۸	۶۰۸/۸۳	۹۳۲/۵۸
بختیاری	Lognormal (3P)	۷۹/۴۶۷	۱۸۳/۰۵	۲۹۳/۷۳	۴۹۴/۰۵	۶۹۵/۱۵	۹۴۷/۵۴	۱۲۶۰
بروجرد	Dagum	۱۵/۵۲۳	۲۷/۵۲۲	۳۸/۴۸۵	۵۷/۷۳۸	۷۷/۵۶۸	۱۰۳/۷۶	۱۳۸/۵
قلیان سکانه	Wakeby	۵۰/۸۱۳	۹۴/۸۴۹	۱۲۶/۸۵	۱۷۶/۹۳	۲۳۰/۴۳	۳۱۰/۷	۴۳۷/۷۲
سرخاب کشور	Dagum	۱۲۵/۷۱	۲۳۸/۷۷	۳۴۶/۴۱	۵۴۲/۶	۷۵۱/۸	۱۰۳۶/۵	۱۴۲۵/۶
آب سرده تنگ محمد حاجی	Pearson 5	۲۳/۴۷	۵۱/۷۰۱	۸۴/۷۴۶	۱۵۴/۸	۲۳۹/۲۷	۳۶۶/۲۹	۵۵۷/۳۵
کمدان	Burr	۷/۷۲۵۸	۱۵/۹۷۹	۲۶/۱۵۸	۴۹/۷۱۹	۸۰/۶	۱۳۰/۶۲	۲۱۱/۶۵
دره تخت	Pearson 5 (3P)	۶/۶۰۵۹	۱۲/۴۳۲	۱۸/۰۷۲	۲۸/۰۳۹	۳۸/۱۸۶	۵۱/۳۶۶	۶۸/۵۱۱
آب سبزه چم چیت	Burr	۵۸/۹۶۸	۱۱۹/۰۴	۱۹۸/۳۳	۳۸۸/۶۶	۶۴۶/۴۶	۱۰۷۵/۳	۱۷۸۸/۴
بیاتون	Fatigue Life (3P)	۳/۱۸۷۷	۹/۵۲۲۹	۱۵/۸۱	۲۵/۰۹۶	۳۲/۵۵۵	۴۰/۲۵۶	۴۸/۱۳
ماربره دره تخت	Johnson SB	۳۴/۱۳۳	۱۳/۵۶	۱۸۱/۱۶	۲۴۶/۴۷	۲۷۵/۸۴	۲۹۳/۵۳	۳۰۴/۱
ازنا چم زمان	Lognormal	۱۲/۵۶۹	۵۰/۴۴۴	۱۰۴/۳	۲۲۶/۳	۳۷۳/۲۶	۵۸۵/۴۴	۸۸۳/۸۶
ماربره درود	Wakeby	۴۲/۸۵۹	۱۰۷/۸۱	۱۶۹/۵۷	۲۶۷/۸	۳۵۶/۴۲	۴۵۹/۴۶	۵۷۹/۲۴
تیره درود	Inv. Gaussian (3P)	۱۱۱/۳۳	۲۴۸/۲۶	۳۶۹/۶۴	۵۵۰/۱۶	۶۹۹/۳۶	۸۵۷/۵	۱۰۲۳/۱
گله رود ونایی	Wakeby	۹/۸۳۱۶	۱۵/۶۳۲	۱۸/۶۹۳	۲۱/۵۳۳	۲۳/۰۳۱	۲۴/۱۳۲	۲۴/۹۴۲
رحیم‌آباد	Burr	۳۵/۴۷۳	۷۳/۰۸۷	۱۲۴/۶۹	۲۵۲/۴۸	۴۳۰/۵۱	۷۳۴/۰۷	۱۲۵۱/۷

T* دوره بازگشت

برای تهیه نقشه بارش، دوره بازگشت‌های مختلف بارش جهت پهنه‌بندی بارش در حوضه مورد مطالعه برازش داده شد که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. بهترین مدل‌های کریجینگ برای درون‌یابی بارش با دوره بازگشت‌های مختلف در زیرحوضه‌های دز استان لرستان

دوره بازگشت	سال ۲	سال ۵	سال ۱۰	سال ۲۵	سال ۵۰	سال ۱۰۰	سال ۲۰۰
بهترین مدل‌ها	Ordinary-Gaussian	Universal-stable	Simple-stable	Ordinary-Gaussian	Universal-K-Bessel	Ordinary-stable	Universal-J-Bessel

در ادامه، طول آبراهه و سپس شیب متوسط آبراهه با استفاده از نقشه ارتفاعی مستخرج از ماهواره ASTER از سایت USGS برای هر زیرحوضه آبخیز به دست آمد که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. طول بلندترین آبراهه برحسب کیلومتر، شیب آبراهه برحسب درصد در زیرحوضه‌های دز در استان لرستان

زیرحوضه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	
طول آبراهه	۲۰/۶	۱۹/۱	۶۱	۷۹/۷	۲۳/۴	۶۲	۳۷/۳	۴۱/۶	۳۷/۳	۴۷	۳۰/۳	۱۰/۴	۸/۱	۴/۳	۴/۶	۱۰/۳
شیب آبراهه	۱/۸	۱۵/۱	۱۴/۶	۱۸/۱	۱۹/۲	۱۹/۹	۱۶/۴	۱۶/۷	۲۰/۷	۲۳/۴	۳۱/۸	۳۳/۹	۳۳/۷	۳۲/۹	۱۹	۱۴/۳

در جدول ۵ مقدار ضریب تعیین، ضریب نش ساتکلیف و میانگین مربعات خطا برای ارزیابی هر دو روش رگرسیون چندمتغیره و SCS در دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال برازش داده شده و همراه مقدار آماره دوربین واتسون آورده شده است. در جدول ۵ مشاهده می‌شود در این پژوهش، روش رگرسیون چندمتغیره عملکرد مناسب‌تری نسبت به روش SCS دارد. برآورد دبی با روش SCS بیش از مقدار واقعی بود؛ این نتیجه با نتایج مطالعات تالی خشک و همکاران (تالی خشک، محسنی

ساروی و وطن خواه، ۱۳۹۴) مطابقت دارد. دلیل این امر را می توان در نظر نگرفتن تبخیر و تعرق واقعی و رطوبت واقعی خاک دانست (تالی خشک، محسنی ساروی و وطن خواه، ۱۳۹۴). همچنین نتایج ضعیف روش SCS در برآورد رواناب، مخالف با نتایج حسینی (حسینی، ۱۳۹۹)، اسفندیاری و همکاران (اسفندیاری داراباد، پورگنجی و مصطفی زاده، ۱۴۰۱) و سلیمانی و همکاران (سلیمانی، شاکریان و ابدالی، ۱۴۰۰) بود. ضمن اینکه نتایج رگرسیون چندمتغیره در دقت بالای شبیه سازی رواناب در حوضه های فاقد آمار با نتایج زما و همکاران (زما، پرهیزکار و پلازا آلوارز، ۲۰۲۴) و حقی زاده و همکاران (حقی زاده، محمدی و نوری، ۱۳۹۴) مطابقت دارد. نتایج روش رگرسیون چندمتغیره نشان می دهد دوره بازگشت ۲ ساله بهترین عملکرد را ثبت کرده است. در رابطه ۱۲، رابطه رگرسیون مربوط به دوره بازگشت ۲ ساله برای استفاده در ایستگاه های فاقد آمار ارائه شده است.

$$D_2 = -0.051A + 10.77CN + 0.487P + 1.17S + 0.002L + (-1.129SL) + (-850.791) \quad (\text{رابطه } 12)$$

که در آن، D_2 دبی با دوره بازگشت ۲ ساله، A مساحت، CN شماره منحنی، P بارش، S نگهداشت، L طول آبراهه و SL شیب آبراهه هستند.

باتوجه به آماره دورین واتسون (محدوده قابل قبول ۱/۵ تا ۲/۵) دوره بازگشت های ۵، ۱۰ و ۲۵ مورد تأیید برای اجرای رگرسیون چندمتغیره بین داده های ورودی و خروجی هستند. ضمن اینکه مقادیر ضریب تعیین، RMSE و نش ساتکلیف در رگرسیون چندمتغیره بیانگر همین تحلیل هستند.

جدول ۵. مقایسه روش های رگرسیون چندمتغیره و SCS با دوره بازگشت های مختلف

T200	T100	T50	T25	T10	T5	T2	روش	
۲/۷۲	۲/۶۷۸	۲/۵۶۵	۲/۳۸۳	۲/۱۳۶	۱/۹۹۴	۱/۷۴	رگرسیون	دورین واتسون
۱/۸۹۶	۱/۸۹۸	۱/۸۴۶	۱/۶۹۱	۱/۴۳۳	۱/۳۳۵	۱/۴۱۸	SCS	
۰/۴۱۸	۰/۵۱۷	۰/۶۰۹	۰/۶۷۹	۰/۷۳۵	۰/۷۵۸	۰/۷۶۸	رگرسیون	ضریب تعیین
۰/۱۴۲	۰/۱۷۹	۰/۱۹۸	۰/۱۹۴	۰/۲۱۲	۰/۲۵	۰/۳۶۳	SCS	
۴۱۰/۱۲۷	۲۴۸/۶۹۹	۱۵۴/۶۹۹	۱۰۰/۷۸۹	۵۷/۶۴	۳۸/۰۳۵	۱۷/۸۸۲	رگرسیون	RMSE
۸۲۰/۱۶۶	۲۸۷/۴۴۶	۱۹۰/۲۱۵	۱۲۹/۹۱۲	۱۱۶/۳۳۷	۶۳/۲۶۱	۶۳/۰۶	SCS	
۰/۴۱۶	۰/۵۱۶	۰/۶۰۸	۰/۶۷۱	۰/۷۳۳	۰/۷۴۲	۰/۷۵۸	رگرسیون	نش ساتکلیف
-۱/۳۳۴	۰/۳۵۳	۰/۴۰۸	۰/۴۵۴	-۰/۰۸۷	۰/۲۸۷	-۲/۰۰۵	SCS	

*T دوره بازگشت

نتیجه گیری

در این پژوهش، برای بهبود دقت برآورد دبی با دوره بازگشت های مختلف از تصاویر ماهواره ای سنتینل ۱ و ۲ و ماهواره ASTER برای بالا بردن دقت نقشه های ورودی، به ویژه کاربری اراضی و بافت خاک استفاده شده است. نقشه درصد رس و درصد شن با تلفیق تصاویر ماهواره ای سنتینل ۱ و ۲ با استفاده از شاخص های BI، SRCI، و باندهای ۱۱ و ۱۲ و رطوبت خاک با طبقه بندی جنگل تصادفی استخراج گردید. باتوجه به درصد های موجود هر بافت خاک، درصد سیلت نیز محاسبه شد. در ادامه باتوجه به بافت خاک، نقشه گروه های هیدرولوژیکی خاک تهیه شدند. همچنین نقشه کاربری اراضی با تصاویر سنتینل ۱ و ۲ و تطبیق با نقاط برداشت زمینی و ضریب کاپای ۰/۸۰ و صحت کلی ۰/۸۲ آشکار سازی شد؛ سپس با برآورد بهترین مدل کریجینگ در نرم افزار ArcGIS Pro درون یابی صورت پذیرفت. در ادامه با استفاده از نقشه CN، مقدار نگهداشت بارش برای هر زیرحوضه محاسبه شد و ارتفاع رواناب با استفاده از روش SCS برآورد گردید؛ سپس برای تخمین حجم آبدی هر زیرحوضه از ارتفاع رواناب حاصل از روش SCS، طول آبراهه، شیب متوسط آبراهه، زمان تمرکز، زمان رسیدن به اوج و مساحت استفاده شد. سپس با استفاده از روش رگرسیون چندمتغیره از پارامترهای شیب متوسط آبراهه، طول آبراهه، نقشه CN، بارش، نگهداشت بارش و مساحت هر زیرحوضه، دبی هر زیرحوضه آبخیز تخمین زده شد. در نهایت با استفاده از آماره های ارزیابی روش های SCS و رگرسیون چندمتغیره مورد ارزیابی قرار گرفتند که نتایج حاکی از آن بود رگرسیون چندمتغیره باتوجه به مقادیر آماره دورین واتسون (۱/۷۴) که نشان از عدم خودهمبستگی دوره بازگشت ۲ ساله

دارد، می‌توان رگرسیون چندمتغیره را استفاده کرد. همچنین آماره‌های ضریب تعیین $0/768$ میانگین مربعات خطا $17/88$ ، نش ساتکلیف $0/758$ نشان داد که دوره بازگشت ۲ ساله مناسب‌ترین دوره بازگشت برای تخمین دبی ایستگاه‌های فاقد آمار در زیرحوضه‌های دز در استان لرستان است. باتوجه به اهمیت منابع آب در تأمین نیازهای مختلف جوامع انسانی، نتایج این پژوهش می‌تواند در تدوین برنامه‌های مدیریت جامع منابع آب و سازگاری با تغییرات اقلیمی در مناطق کوهستانی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین می‌توان به بررسی تأثیر این تغییرات بر وقوع حوادث طبیعی مانند سیل و خشکسالی پرداخت و راهکارهای کاهش اثرات مخرب آن‌ها را ارائه کرد. پیشنهاد می‌شود برای تخمین دبی در زیرحوضه‌های فاقد آمار حوضه دز در استان لرستان از رگرسیون چندمتغیره و مدل‌های هوش مصنوعی استفاده گردد.

References

- Abed, M. S., Kadhim, F. J., Almusawi, J. K., Imran, H., Bernardo, L. F. A., & Henedy, S. N. (2023). Utilizing multivariate adaptive regression splines (MARS) for precise estimation of soil compaction parameters. *Applied Sciences*, 13(21), 11634.
- Alizadeh A. (2024). *Principles of applied hydrology*. Publications of Imam Reza University; 941 p. (in Persian)
- Amani, M., Ghorbanian, A., Ahmadi, S. A., Kakooei, M., Moghimi, A., Mirmazloumi, S. M., ... & Brisco, B. (2020). Google earth engine cloud computing platform for remote sensing big data applications: A comprehensive review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 5326-5350.
- Asfaw, E., Suryabagavan, K. V., & Argaw, M. (2018). Soil salinity modeling and mapping using remote sensing and GIS: The case of Wonji sugar cane irrigation farm, Ethiopia. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17(3), 250-258.
- Aziz, M. T., Islam, M. R., Kader, Z., Imran, H. M., Miah, M., Islam, M. R., & Salehin, M. (2023). Runoff assessment in the Padma River Basin, Bangladesh: a GIS and RS platform in the SCS-CN approach. *Journal of Sedimentary Environments*, 8(2), 247-260.
- Baghel, S., Kothari, M., Tripathi, M. P., Das, S., Kumar, A., & Kuriqi, A. (2023). Water conservation appraisal using surface runoff estimated by an integrated SCS-CN and MCDA-AHP technique. *Journal of Earth System Science*, 132(3), 127.
- Berndt, C., Chi, W. C., Jegen, M., Lebas, E., Crutchley, G., Muff, S., & Feseker, T. (2019). Tectonic controls on gas hydrate distribution off SW Taiwan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(2), 1164-1184.
- Bousbih, S., Zribi, M., Pelletier, C., Gorrab, A., Lili-Chabaane, Z., Baghdadi, N., Ben Aissa, N., & Mougnot, B. (2019). Soil texture estimation using radar and optical data from Sentinel-1 and Sentinel-2. *Remote Sensing*, 11(13), 1520.
- Caloz, R., Abednego, B., & Collet, C. (1988, April). The normalisation of a soil brightness index for the study of changes in soil conditions. In *Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing* (Vol. 287, p. 363).
- Danoedoro, P., & Zukhrufiyati, A. (2015, May). Integrating spectral indices and geostatistics based on Landsat-8 imagery for surface clay content mapping in Gunung Kidul area, Yogyakarta, Indonesia. In *Proceeding of the 36th Asian Conference on Remote Sensing, Yogyakarta*. <https://www.researchgate.net/publication/302580476>.
- Eisfelder, C., Boemke, B., Gessner, U., Sogno, P., Alemu, G., Hailu, R., Mesmer, C., & Huth, J. (2024). Cropland and Crop Type Classification with Sentinel-1 and Sentinel-2 Time Series Using Google Earth Engine for Agricultural Monitoring in Ethiopia. *Remote Sensing*, 16(5), 866.
- Esfandyari Darabad, F., Pourganji, Z., Mostafazadeh, R., & Aghaie, M. (2022). Comparison of Effective Rainfall Conversion Methods to Surface Runoff in Flood Hydrographic Simulation of Nanekaran Watershed, Ardabil Province. *Hydrogeomorphology*, 9(32), 86-63. (in Persian)
- Faqe Ibrahim, G. R., Rasul, A., & Abdullah, H. (2023). Improving crop classification accuracy with integrated Sentinel-1 and Sentinel-2 data: a case study of barley and wheat. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, 7(2), 22.
- Gharakhani, M., Aghamohammadi, H., & Vahidnia, M.H. (2022). Flood hazard zonation using spatial hydrologic analysis in GIS and interpretation of satellite images: A case study on Aharchay catchment. *J. Sus. Dev. & Env*, 3(2):67-86. (in Persian)
- GIS Geography. Sentinel-2 Bands Combinations. Available from: <https://gisgeography.com/sentinel-2-bands-combinations/>

- Haghighizadeh, A., Mohammadi, M., & Noori, F. (2015). Simulation of rainfall-runoff process using artificial neural network, adaptive neuro-fuzzy system, and multivariate regression (Case study: Khoramabad watershed). *Ecohydrology*, 2(2):233-243. (in Persian)
- Hagras, A. (2023). Runoff modeling using SCS-CN and GIS approach in the Tayiba Valley Basin, Abu Zenima area, South-west Sinai, Egypt. *Modeling Earth Systems and Environment*, 9(4), 3883-3895.
- Hoseini, Y. (2020). Comparison of uniform and SCS unit hydrograph methods to estimate maximum flood discharge of Amughin Basin. *Hydrogeomorphology*, 6(21), 87-107. (in Persian)
- Kariuki, P. C., Woldai, T., & Van Der Meer, F. (2004). Effectiveness of spectroscopy in identification of swelling indicator clay minerals. *International Journal of Remote Sensing*, 25(2), 455-469.
- Khan, N. M., Rastokuev, V. V., Sato, Y., & Shiozawa, S. (2005). Assessment of hydrosaline land degradation by using a simple approach of remote sensing indicators. *Agricultural Water Management*, 77(1-3), 96-109.
- Khedmati, H., Manshouri, M. O. H. A. M. M. A. D., Heydarizadeh, M. A. J. I. D., & Sedghi, H. O. S. S. E. I. N. (2010). Zonation and estimation of flood discharge in ungauged sites located in south-east basins of Iran using a combination of flood index and multi-variable regression methods (Sistan and Baluchistan, Kerman, Yazd and Hormozgan provinces). *Water and Soil*, 24(3). (in Persian)
- Kim, S., Kim, S., Green, C. H., & Jeong, J. (2022). Multivariate polynomial regression modeling of total dissolved-solids in rangeland stormwater runoff in the Colorado River Basin. *Environmental Modelling & Software*, 157, 105523.
- KN, J. H., Channavar, V. R., Malappanavar, N., Radder, V. S., Chandrakar, T., & Basavaraj, D. B. (2024). Spatial Analysis of Surface Runoff Using SCS-CN Technique Integrated with GIS and Remote Sensing. *International Journal of Environment and Climate Change*, 14(5), 441-454.
- Mohammadzadeh, A., & Massoudzadegan, S. (2017). Forecasting Daily Volatility and Value at Risk with High Frequency Data. *Development and Transformation Management Quarterly*, 8(27):63-74. (in Persian)
- Moharrami, M., Attarchi, S., Gloaguen, R., & Alavipanah, S. K. (2024). Integration of Sentinel-1 and Sentinel-2 Data for Ground Truth Sample Migration for Multi-Temporal Land Cover Mapping. *Remote Sensing*, 16(9), 1566.
- Mullissa, A., Saatchi, S., Dalagnol, R., Erickson, T., Provost, N., Osborn, F., ... & Melling, D. (2024). LUCA: A Sentinel-1 SAR-Based Global Forest Land Use Change Alert. *Remote Sensing*, 16(12), 2151.
- Nasiry, M. K., Said, S., & Ansari, S. A. (2023). Analysis of surface runoff and sediment yield under simulated rainfall. *Modeling Earth Systems and Environment*, 9(1), 157-173.
- Noor Mohammadi, P., Haghighizadeh, A., Tahmasbi Poor, N., & Zeinivand, H. (2016). Identifying locations with potential for rainwater harvesting in the Sarab Seyed Ali watershed using two methods: NRCS-CN and GIS-based decision support system (DSS). *Ecohydrology*, 3(2):279-291. (in Persian)
- Raj, R., Kumar, R., Aishwarya, M., Aswini, M., & Cheraku, S. (2024). An artificial neural network and SCS-CN-based model for runoff estimation: a case study of the Peddavagu watershed. *Water Practice & Technology*, 19(7), 2734-2743.
- Rasti, S., Mahdaviardnh, M., Shaykh Ghaderi, H., Nasiri, A., & Taktaz, N. Z. (2022). Improving Classification accuracy by combining multi-season images of Sentinel 1 and 2 in order to prepare a land use map in the cloud space of Google Earth Engine (Case study: Guilan province). *Geography and Human Relationships*, 5(3), 357-373. (in Persian)
- Rutledge, D. N., & Barros, A. S. (2002). Durbin-Watson statistic as a morphological estimator of information content. *Analytica Chimica Acta*, 454(2), 277-295.
- Sabins, F. F. (1999). Remote sensing for mineral exploration. *Ore geology reviews*, 14(3-4), 157-183.

- Salas, J. D. (1993). Analysis and modelling of hydrological time series. *Handbook of hydrology*, 19.
- Sepahvand, T., Soleimani-Motlagh, M., Zeinivand, H., & Mirzaei Mosivand, A. (2023). Estimating Flood through the Fractal Theory-Based Precipitation Estimation and the CN Extracted from Sentinel 2 in HEC-HMS Model: A Case Study of Thireh Watershed in Borujerd-Dorud Region. *Desert Ecosystem Engineering*, 12(38), 87-103. (in Persian)
- Setayesh, M. H., & Namazi, N. R. (2015). Investigating the Relationship between Intangible Assets, Profitability and Value of Firms Listed in Tehran Stock Exchange. *Accounting and Auditing Research*, 7(26), 4-27. (in Persian)
- Soleimani, K., Shakarian, F., Abdali, S., & Saberi A. (2021). Prioritization of flood risk potential in the Talaar watershed using GIS. *Ecologyhydrology*, 8(3):749-762. (in Persian)
- Stenberg, B., Rossel, R. A. V., Mouazen, A. M., & Wetterlind, J. (2010). Visible and near infrared spectroscopy in soil science. *Advances in agronomy*, 107, 163-215.
- Tali-Khoshk, S., Mohseni Saravi, M., Vatakhah, M., & Khalighi-Sigarodi, S. (2015). Comparison of Neuro-fuzzy and SCS methods in sub-watersheds prioritization for watershed measures (Case study: Taleghan watershed). *Journal of Range and Watershed Management*, 68(2), 213-225. doi: 10.22059/jrwm.2015.54922. (in Persian)
- Tamiminia, H., Salehi, B., Mahdianpari, M., Quackenbush, L., Adeli, S., & Brisco, B. (2020). Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 164, 152-170.
- Teluguntla, P., Thenkabail, P. S., Oliphant, A., Xiong, J., Gumma, M. K., Congalton, R. G., Yadav, K., & Huete, A. (2018). A 30-m landsat-derived cropland extent product of Australia and China using random forest machine learning algorithm on Google Earth Engine cloud computing platform. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 144, 325-340.
- Tosan, M., & Beyranvand, Z. (2023). The role of flood analysis in different return periods using empirical relationships for small watersheds in the stability of aquifers. *Journal of Auifer and Qanat*, 4(1), 169-180. (in Persian)
- Vinutha, T. Y., Rakesh, C. J., Lokanath, S., & Kumar, A. K. (2024). Surface Runoff Estimation Using SCS-CN Method for Kurumballi Sub-watershed in Shivamogga District, Karnataka, India. *Nature Environment & Pollution Technology*, 23(2).
- Vörösmarty, C. J., McIntyre, P. B., Gessner, M. O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., ... & Davies, P. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467(7315), 555-561.
- Yazdi-Feyzabadi, V., Bahrampour, M., Rashidian, A., Haghdoost, A. A., Akbari Javar, M., & Mehrolohasani, M. H. (2018). Prevalence and intensity of catastrophic health care expenditures in Iran from 2008 to 2015: a study on Iranian household income and expenditure survey. *International journal for equity in health*, 17, 1-13.
- Yoothong, K., Moncharoen, L., Vijarnson, P., & Eswaran, H. (1997). Clay mineralogy of Thai soils. *Applied Clay Science*, 11(5-6), 357-371.
- Zema, D. A., Parhizkar, M., Plaza-Alvarez, P. A., Xu, X., & Lucas-Borja, M. E. (2024). Using random forest and multiple-regression models to predict changes in surface runoff and soil erosion after prescribed fire. *Modeling Earth Systems and Environment*, 10(1), 1215-1228.
- Zhao, Q., Yu, L., Li, X., Peng, D., Zhang, Y., & Gong, P. (2021). Progress and trends in the application of Google Earth and Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 13(18), 3778.