

Research Paper



Modeling soil erosion to assess suitable slope length in hazard-prone areas: A case study of Nibong Tebal, Malasia



Mohamad Almasi nia¹, Hasan Alizadeh², Shahryar Mamzaie³

- 1- . Assistant Professor Department of Geography, Payame Noor University, PO BOX 19395-3697 Tehran, Iran.
almasi@pnu.ac.ir
- 2- Associate Profssor Department of Geology, Payame Noor University, PO BOX 19395-3697 Tehran, Iran.
h_alizadehs@pnu.ac.ir
- 3- Expert of rural affairs office and provincial councils of Isfahan ,mz.shahryar@yahoo.com

Keywords

Soil erosion; RUSLE; DEM resolution; LS factor; Geostatistics; GIS; Nibong Tebal, Malaysia.

Receive: 2025/11/22

Accepted: 2026/02/22

Published: 2026/06/22

ABSTRACT

Introduction

Soil erosion is a major environmental hazard in regions characterized by complex topography and intense rainfall, posing serious threats to land sustainability, agricultural productivity, and hydrological systems. Among empirical erosion models, the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) is widely used due to its reliability and compatibility with GIS-based spatial analysis. A critical parameter in RUSLE is the topographic factor (LS), which is highly sensitive to the spatial resolution of the Digital Elevation Model (DEM). Inappropriate selection of DEM cell size can introduce substantial uncertainty into erosion estimates. This study aims to determine the optimal DEM resolution for accurate LS factor estimation in hazard-prone areas by integrating geostatistical techniques with GIS modeling. DEMs with spatial resolutions of 30, 50, 100, and 300 m were generated from topographic contour data and evaluated using semivariogram analysis and kriging interpolation. Geostatistical parameters including nugget, sill, range, and prediction error (RMSE) were systematically compared. The results indicate that a 50 m DEM provides the most balanced performance by preserving essential topographic variability while minimizing spatial noise and prediction error. The findings emphasize that DEM resolution should be selected based on statistical and spatial dependency analysis rather than arbitrary criteria. The proposed framework enhances the reliability of soil erosion assessment and provides valuable guidance for watershed management and hazard mitigation in erosion-prone landscapes.

* Corresponding Author: Mohamad Almasi nia, E-mail: almasi@pnu.ac.ir

How to cite this article: Almasi nia, M., Alizadeh, H., & Mamzaie, S. (2026). Modeling soil erosion to assess suitable slope length in hazard-prone areas. *Hydrogeomorphology*, 13(47): 140–162.

DOI: [10.22034/hyd.2026.70342.1825](https://doi.org/10.22034/hyd.2026.70342.1825)



Copyright: © by the authors

Publisher: University of Tabriz

Soil erosion is a dominant geomorphological process that poses significant threats to agricultural productivity, hydrological systems, and sustainable land management. In regions characterized by complex topography and intense rainfall, erosion processes are accelerated, leading to land degradation and increased sediment yield. Accurate estimation of soil erosion is therefore essential for effective watershed management and hazard mitigation. The Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) has been extensively employed for predicting long-term average soil loss, integrating climatic, soil, topographic, and land cover factors. Among these, the topographic factor (LS) plays a crucial role as it represents the combined influence of slope length and steepness on erosion intensity. The accuracy of LS estimation is strongly dependent on the quality and spatial resolution of DEMs. Despite its importance, DEM resolution is often selected arbitrarily, potentially leading to substantial uncertainties. This study addresses this gap by applying geostatistical methods to systematically evaluate the effect of DEM cell size on LS estimation in hazard-prone areas.

Methodology

The methodological framework of this study integrates GIS-based modeling with geostatistical analysis to determine the optimal DEM resolution for LS calculation. Topographic data were derived from contour maps with a 20 m interval and converted into DEMs with spatial resolutions of 30, 50, 100, and 300 m. Slope and flow accumulation layers were extracted from each DEM to compute the LS factor using the RUSLE formulation. To evaluate spatial dependency and prediction accuracy, experimental semivariograms were developed for each DEM resolution, and key geostatistical parameters including nugget, sill, and range were analyzed. Ordinary kriging interpolation was applied to assess spatial prediction performance, and accuracy was evaluated using statistical indicators such as Root Mean Square Error (RMSE). This systematic approach ensures that DEM resolution selection is based on quantitative spatial analysis rather than subjective judgment.

Results and Discussion

The results reveal a clear relationship between DEM resolution and LS factor estimation accuracy. Fine-resolution DEMs (30 m) captured detailed topographic variations but exhibited higher noise levels and increased prediction error. Conversely, coarse-resolution DEMs (100 and 300 m) reduced spatial variability and smoothed critical terrain features, leading to underestimation of erosion potential. The 50 m DEM demonstrated the strongest spatial dependency, characterized by an optimal nugget-to-sill ratio and the lowest RMSE values. These findings indicate that medium-resolution DEMs provide a balanced representation of terrain complexity while maintaining statistical robustness. The results are consistent with previous studies emphasizing the importance of matching DEM resolution with the scale and quality of source elevation data. Accordingly, geostatistical evaluation proves to be an effective tool for enhancing the reliability of LS factor estimation in erosion modeling.

Conclusions

This study demonstrates that DEM spatial resolution is a decisive factor in accurate soil erosion modeling under the RUSLE framework. By integrating geostatistical techniques with GIS analysis, the research identifies a 50 m DEM as the optimal resolution for LS factor calculation in hazard-prone areas. This resolution provides the best compromise between preserving topographic detail and minimizing spatial noise and prediction error. The findings underscore the necessity of statistically informed DEM selection rather than arbitrary resolution choices. The proposed methodological framework can be applied to other regions and datasets to improve soil erosion assessment and support sustainable land and watershed management strategies.

مقاله پژوهشی



مدل سازی فرسایش خاک برای ارزیابی طول شیب مناسب در مناطق مستعد خطر: نیبونگ تبال، مالزی



محمد الماسی نیا^۱، حسن علیزاده^۲، شهریار ممزایی^۳

۱- استادیار، گروه جغرافیا و برنامه ریزی شهری، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران. almasi@pnu.ac.ir

۲- دانشیار، گروه زمین شناسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران. h_alizadehs@pnu.ac.ir

۳- کارشناس دفتر امور روستایی و شوراهای استانداری اصفهان، اصفهان، ایران. mz.shahryar@yahoo.com

چکیده

فرسایش خاک یکی از مهم ترین چالش های زیست محیطی به شمار می رود که به طور مستقیم بر پایداری سرزمین و فعالیت های انسانی، به ویژه در مناطق مستعد خطر، تاثیر می گذارد. در میان مدل های تجربی مختلف، معادله جهانی اصلاح شده فرسایش خاک (RUSLE) به عنوان یکی از معتبرترین ابزارها برای برآورد میانگین بلند مدت کمی میزان فرسایش به کار می رود. با این حال، دقت خروجی های این مدل به کیفیت و تفکیک مکانی مدل رقومی ارتفاع (DEM)، به ویژه در محاسبه عامل طول و شیب و دامنه (LS)، وابستگی زیادی دارد. این تحقیق با بهره گیری از رویکردهای زمین آماری و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، مناسب ترین اندازه سلول DEM برای برآورد عامل LS در مدل سازی فرسایش خاک تعیین شد. چهار DEM با اندازه های ۳۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ متر تولید و با استفاده از تحلیل نیم واریوگرام^۱ و کریجینگ، وابستگی مکانی و دقت پیش بینی مورد ارزیابی قرار گرفت. تا تاثیر اندازه سلول بر تنوع پذیری داده ها و دقت پیش بینی عامل LS بررسی شود.

نتایج نشان داد که با افزایش اندازه سلول تا ۵۰ متر، اثر ناگت کاهش یافته و وابستگی فضایی داده ها افزایش می یابد، در حالی که با افزایش بیشتر اندازه سلول، میزان تنوع مکانی و دقت مدل کاهش می یابد. بر اساس مقایسه پارامترهای زمین آماری شامل ناگت^۲، آستانه^۳ و خطای DEM، RMS با اندازه سلول ۵۰ متر مناسب ترین تفکیک مکانی برای محاسبه عامل LS در منطقه مورد مطالعه تشخیص داده شد. یافته های این پژوهش می تواند به عنوان مبنایی برای انتخاب بهینه تفکیک مکانی DEM در مطالعات فرسایش خاک و تحلیل های هیدروژنومورفیکی مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه ها

فرسایش خاک، مدل RUSLE، مدل رقومی ارتفاع (DEM)، عامل توپوگرافی GIS، نیبونگ تبال مالزی.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

*نویسنده مسئول نویسنده مسئول: محمد الماسی نیا ارجاع به این مقاله: الماسی نیا، محمد؛ علیزاده، حسن؛ ممزایی، شهریار (۱۴۰۴). مدل سازی فرسایش خاک برای ارزیابی طول شیب مناسب در مناطق مستعد خطر. هیدروژنومورفولوژی، ۱۳ (۴۷): 162-140.

رایانامه: almasi@pnu.ac.ir

شناسه دیجیتال مقاله: 10.22034/hyd.2026.70342.1825



Copyright: ©2025 by the authors

Publisher: University of Tabriz

¹ Semivarigram

² Nugget

³ Sill

فرسایش خاک یکی از مهمترین فزایندهای تخریب سرزمین در حوزه های آبخیز است که تاثیر مستقیمی بر تولید رسوب، کاهش حاصلخیزی خاک و عملکرد سامانه های هیدرولوژیکی دارد. برآورد دقیق میزان فرسایش خاک، نقش کلیدی در مدیریت منابع آب و خاک و برنامه ریزی های زیست محیطی ایفا می کند. در این میان، مدل اصلاح شده جهانی فرسایش خاک (RUSLE) به عنوان یکی از پرکاربردترین مدل های تجربی، به طور گسترده در مطالعات هیدرولوژی و فرسایش مورد استفاده قرار گرفته است. عامل توپوگرافی (LS) یکی از موثرترین پارامترهای مدل RUSLE است که بیانگر تاثیر طول و شیب دامنه بر شدت فرسایش خاک می باشد. محاسبه این عامل در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی وابستگی زیادی به کیفیت و تفکیک پذیری مدل رقومی ارتفاع (DEM) دارد. در سال های اخیر، استفاده از DEM با اندازه سلول های مختلف در مطالعات فرسایش افزایش یافته است، با این حال انتخاب اندازه سلول اغلب بدون انجام تحلیل های آماری و فضایی کافی صورت می گیرد. انتخاب نادرست اندازه سلول DEM می تواند منجر به کاهش دقت در محاسبه عامل LS و در نتیجه برآورد نادرست فرسایش خاک شود، به ویژه در مناطق با ناهمواریهای پیچیده. پژوهش های اخیر نشان داده اند که تفکیک مکانی DEM تاثیر قابل توجهی بر ساختار وابستگی فضایی متغیرهای توپوگرافی دارد، اما هنوز اجماع روشی در خصوص انتخاب اندازه سلول بهینه بر اساس تحلیل زمین آماری وجود ندارد (کایت^۱ و همکاران ۲۰۱۶:۳۱).

فرسایش خاک یکی از خطرات مهم زیست محیطی و چالش های تخریب زمین است که در سراسر جهان تجربه شده است. حدود ۸۰ درصد از زمین های کشاورزی جهان از فرسایش متوسط تا شدید رنج می برند (موسی، ۲۰۱۷: ۲۰). فرسایش خاک به طور گسترده ای به عنوان حذف سریع خاک سطحی از سطح زمین از طریق آب، باد یا خاک تعریف می شود (فائو^۲، ۲۰۱۶: ۲۰). (جیم ریتز، ۲۰۱۵: ۲۰) در تحقیقات خود تأکید کرد که قطرات باران مستقیماً روی خاک سطحی می ریزند. برخورد قطرات باران باعث متصل شدن مواد به هم شده و باعث جدا شدن قطعات کوچک می شود. رواناب مواد جدا شده خاک را با خود می برد و در جای دیگری ذخیره می کند. فائو برآورد می کند که ۱۱.۶ درصد از آفریقا در شمال استوا و ۱۷.۱ درصد از خاور نزدیک به فرسایش آب، به عنوان ۹۰ میلیون هکتار (از مجموع ۲۹۷ میلیون) در هند و مالزی است. همانطور که مطالعات قبلی نشان می دهد، بالاترین میزان تلفات خاک به علت فرسایش در سه قاره آفریقا، آمریکای جنوبی و آسیا (جنوب شرقی آسیا در مالزی) به ویژه در منطقه مورد مطالعه، به طور متوسط حدود ۱۲.۱ تن به ۱۶.۲ تن برای همه آنها است (فائو، ۲۰۱۶). (گلایگی^۳، ۲۰۱۶: ۲۰). (کایت^۱ و همکاران، ۲۰۱۸: ۶۳) نشان دادند که تمام موارد فرسایش خاک در کلرادو، کانزاس، نبراسکا، داکوتای شمالی و تگزاس باعث کاهش ظرفیت های حوضه شده و برای تنظیم رواناب در مناطق استفاده از زمین های بومی به افزایش فرسایش بادی تبدیل شده است.

علاوه بر آن، فرسایش خاک یک موضوع جهانشمول است که می تواند بر جنبه های سیاسی، اجتماعی و اقتصادی کشورهای تاثیر به سزایی داشته باشد. از اینرو، عماد علی و مریم بیاتی (۱۴۰۴:۶۷)، مریم بیاتی و بهروز ساری (۱۴۰۳:۱۲۲)، موسی عابدینی و امیرحسام پاسبان (۱۴۰۲:۴۰)، عقیل مددی و همکاران (۱۴۰۳:۳۶) و فریبا کرمی و همکاران (۱۴۰۲:۱۱) در تحقیقات خود تجزیه و تحلیل و پهنه بندی یا میزان فرسایش خاک را به ترتیب در منطقه جنوب غربی پاکستان، جنوب شرق دریاچه ارومیه (شهرستان های بناب و ملکان)، حوضه آبریز خیاوچای مشکین شهر، حوضه آبریز گیوی چای و حوضه آبریز زنوزچای مرند مورد مطالعه قرار دادند. آنها تأکید نمودند که کمبود اطلاعات به

۱-Kayet et all

- Fao^۲

۳ - Gelagay

۴ - Ternner et al

روز، گاه موجب کاهش اعتبار سنجی مدل می شود بنابراین بازدید میدانی باید مورد تاکید قرار گیرد و امکان استفاده از سایر شاخص های موثر و قابلیت های GIS و RS را جهت تخمین کمی مقادیر فرسایش خاک را تایید می نمایند. محققین دیگری هم با بکارگیری داده ها و ابزارهای سنجش از دور این پدیده ها را مورد بررسی قرار داده اند (آرامی و همکاران، 1400:13، علوی و همکاران، ۳۷: ۱۴۰۴، سرباجی و همکاران، ۱۲: ۱۴۰۳ و عمر و همکاران، ۱۵: ۱۴۰۳) با بکارگیری اطلاعات سنجنده های مختلف کانونها را شناسایی و آنها را رهگیری کرده اند. فرآیند بیست سال گذشته نشان می دهد که با استفاده از ابزارهای GIS که با هم منتشر می شوند، توجیه الگوریتم اعمال شده برای افزایش طول شیب را نشان می دهد (کایت و همکاران: ۴۹: 2016؛ تانگ^۱ و همکاران: ۷۴: 201). ادغام سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش از دور (RS) می تواند مناطق فرسایش خاک را تشخیص دهد که در آنها برخی از خطرات احتمالی فرسایش گسترده خاک و میزان تخمین زده شده از دست دادن خاک در نقاط مختلف وجود دارد. مدل های متعددی از قابلیت ها و ابزارهای مختلف پیش بینی توسعه داده شده است. ظهور ابزارهای تکنولوژیکی مانند RS و GIS سودمندی مدل های فرسایش خاک را به میزان قابل توجهی افزایش داده است. پیوند GIS و RS با مدل های فرسایش خاک تجربی و مبتنی بر فرایند، قابلیت پیش بینی آنها را بهبود بخشیده است. ابزارهای RS و GIS همچنین امکان افزایش داده های مدل شده از قطعات کوچک (به عنوان مثال RUSLE) برای مناطق بزرگ را فراهم می کنند (بلانکو^۲ و همکاران، ۲۰۱۵). روش جدید اهداف را برای ارزیابی آماری مناسب ترین اندازه سلول برای ورودی عامل LS و مطالعه اثرات استفاده از اندازه مناسب سلول در محاسبه کل تلفات خاک فرسایش پیشنهاد می کند.

در شبه جزیره مالزی فرسایش آب به دلیل میانگین بارندگی سالانه زیاد، چگالی و فراوانی طوفان مهمترین عامل است. همچنین مهمترین اثر، زمانی مشاهده می شود که پوشش گیاهی مختل یا حذف شود. حذف پوشش گیاهی منجر به افزایش سرعت و حجم رواناب سطحی می شود. بنابراین، افزایش سرعت و حجم رواناب سطحی (به ویژه در مناطق تپه ای) باعث می شود که فرسایش خاک مورد توجه قرار گیرد. مالزی نسبت به اکثر کشورهای توسعه یافته در معرض طوفان شدید باران و مکرر قرار دارد و بنابراین برای مقابله با این مشکل نیاز به اقدامات کنترلی شدیدتر، ساختاری یا غیر ساختاری دارد (لیلا اوشکوسرایه و دیگران، ۹۷: ۲۰۰۹). بر این اساس، هدف اصلی پژوهش حاضر تعیین اندازه سلول مناسب DEM برای محاسبه عامل LS در مدل RUSLE با استفاده از روش های زمین آمار و کریجینگ می باشد. در این مطالعه، با مقایسه ساختار نیم واریوگرام DEM های با تفکیک مکانی متفاوت، تلاش شده است تا اندازه سلولی انتخاب شود که بیشترین وابستگی فضایی و کمترین خطای برآورد را در محاسبه عامل LS فراهم آورد. نوآوری اصلی پژوهش حاضر در بکارگیری سیستماتیک روش های زمین آمار، به ویژه تحلیل نیم واریوگرام و کریجینگ، برای تعیین اندازه سلول بهینه DEM در محاسبه عامل LS مدل RUSLE است. برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً به مقایسه کیفی یا تجربی اندازه سلول ها بسنده کرده اند، این پژوهش معیارهای کمی نظیر ناگت، سیل و خطای RMS را به عنوان مبنای انتخاب تفکیک مکانی مناسب ارائه می دهد که می تواند به بهبود دقت برآورد فرسایش خاک در مناطق با شرایط توپوگرافی مشابه منجر شود.

منطقه مورد مطالعه

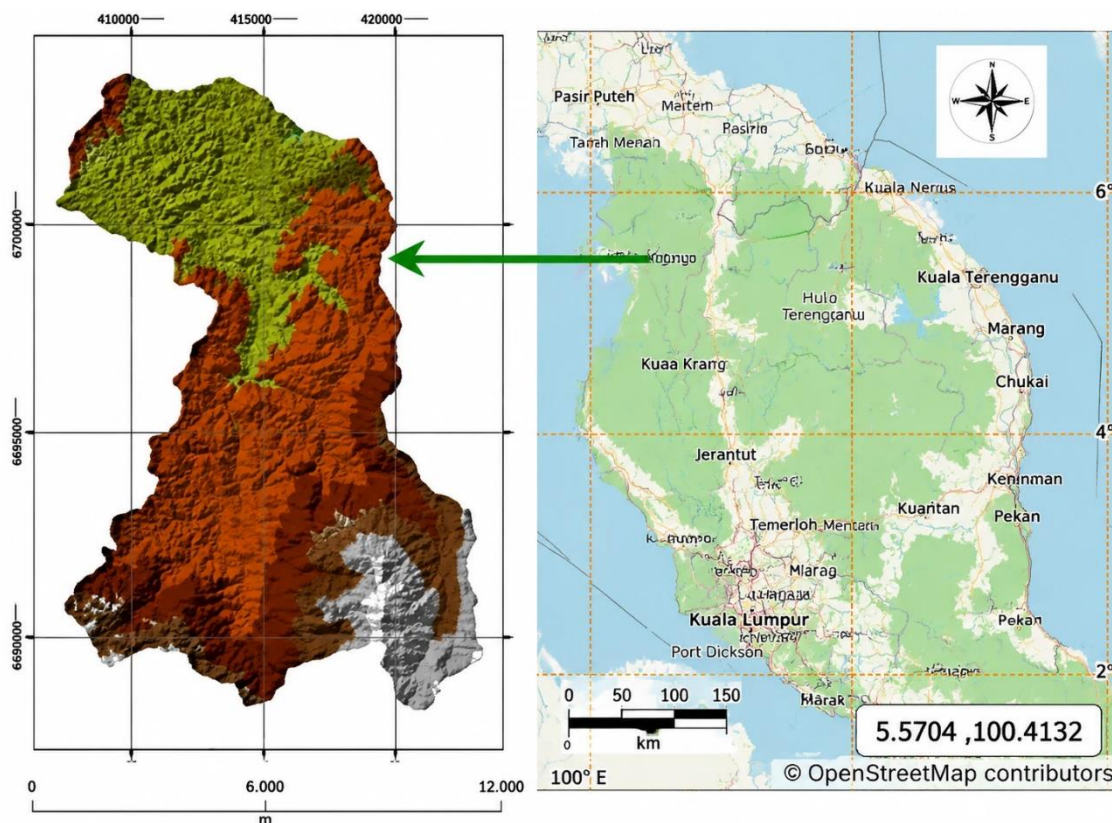
منطقه مورد مطالعه نیبونگ تبال، جورج تون که منطقه شمال غربی شبه جزیره مالزی در آن بین عرض جغرافیایی ۵ درجه ۵۷/۰۴' شمالی و عرض جغرافیایی ۱۰۰ درجه ۴۱۳۲' E واقع شده است که در شکل (۱) نشان داده شده است. آب و هوا در این منطقه تحت تأثیر هر دو بارندگی های موسمی شمال شرقی و جنوب غربی و بارندگی سالانه در دشت پاییناً تقریباً ۱۳۰۰ میلی متر، اما بیشتر در

¹ Tung et al

² Belanko et al

مناطق تپه ای و کوهستانی است. حداکثر بارندگی طی سپتامبر تا ژانویه رخ می دهد و دما معمولاً ۲۷ درجه سانتی گراد، باد شمال غربی ۵۰ کیلومتر در ساعت، رطوبت ۸۷ درصد است (اداره هواشناسی مالزی، ۲۰۲۱). وسعت این منطقه تقریباً ۱۱۰ کیلومتر مربع است که حدود ۹۰ درصد از مساحت آن را پوشش های طبیعی تشکیل می دهند.

مجموعه ای از داده های مکانی و توصیفی که مورد استفاده قرار گرفت عبارتند از: عامل فرساینده گی بارش (R) بر اساس داده های بارندگی ثبت شده. عامل فرسایش پذیری خاک (K) که از نقشه های خاک و داده های نمونه برداری خاک از وزارت کشاورزی مالزی تهیه شده است. عامل توپوگرافی (LS) از مدل رقومی ارتفاع استخراج شده از نقشه های توپوگرافی با فاصله منحنی میزان ۲۰ متر به دست آمد. به منظور بررسی تفکیک مکانی، مدل های رقومی ارتفاع با اندازه سلول های ۳۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ متر تولید و در محاسبه عامل LS مورد استفاده قرار گرفتند. عامل پوشش و مدیریت اراضی (C) بر اساس تصاویر سنجنش از دور و نقشه های کاربری اراضی منطقه محاسبه شد. در حالی که عامل عملیات حفاظتی (P) با استفاده از اطلاعات حاصل از تصاویر ماهواره ای و داده های بازدید های میدانی تعیین گردید (اداره هواشناسی مالزی، ۲۰۲۳). تمامی لایه های اطلاعاتی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی آماده سازی و پردازش شده و به صورت رستری با تفکیک مکانی یکسان برای اجرای مدل RUSLE مورد استفاده قرار گرفتند.



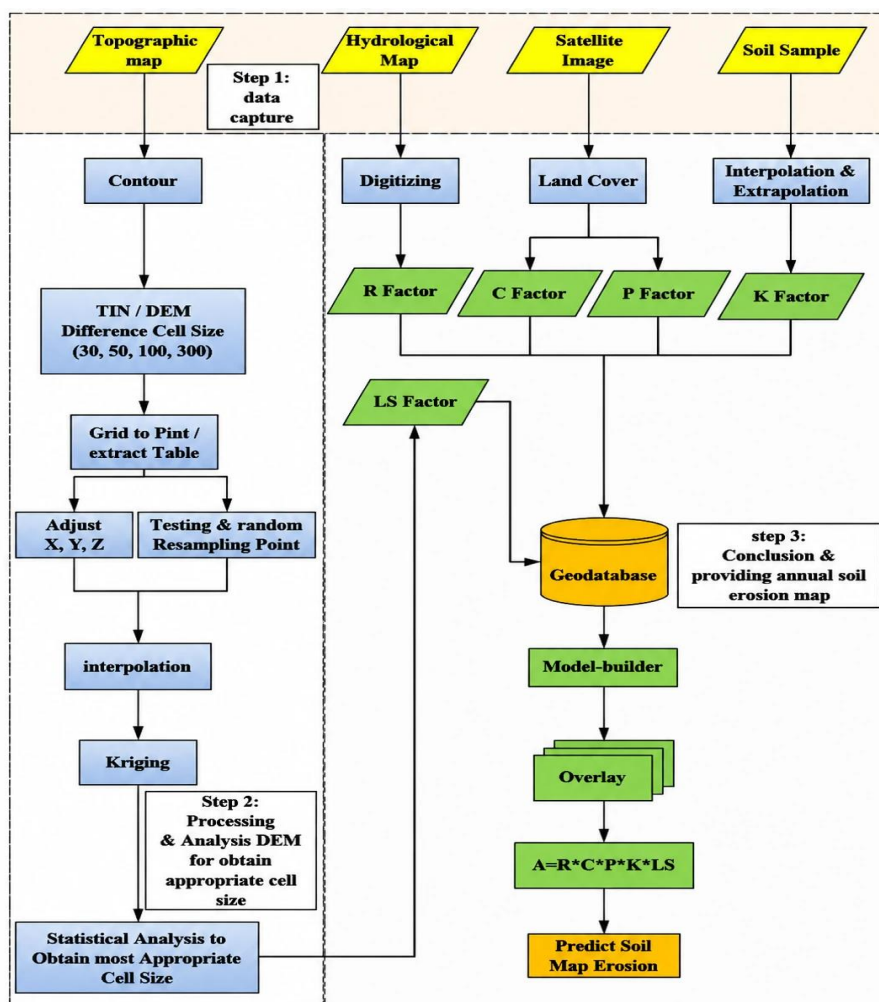
شکل (۱): موقعیت منطقه مورد مطالعه (منبع 2026 DGmap.ir/UTM)
 Fig (1): Location of the studied area (source 2026 DGmap.ir/UTM)

روش تحقیق

در این پژوهش، به منظور تعیین اندازه سلول مناسب مدل رقومی ارتفاع (DEM) در محاسبه عامل طول و شیب دامنه (LS) مدل RUSLE، از ترکیب روش های زمین آمار و سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده شد. چارچوب کلی تحقیق شامل چهار مرحله اصلی: آماده سازی داده ها، تولید DEM با تفکیک مکانی مختلف، تحلیل زمین آماری و ارزیابی دقت نتایج می باشد. در مرحله نخست، نقشه های توپوگرافی منطقه مورد مطالعه با فاصله منحنی میزان ۲۰ متر رقومی سازی و مدل مثلث نامنظم (TIN) تبدیل شدند. سپس با استفاده از روش درون یابی، چهار DEM با اندازه سلول های ۳۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ متر تولید گردید. این اندازه

سلول ها به منظور بررسی تاثیر تفکیک مکانی بر ساختار وابستگی فضایی و دقت محاسبه عامل LS انتخاب شدند. در مرحله دوم، عامل LS بر اساس روابط فیزیکی مبتنی بر DEM و مطابق با توسعه ارائه شده توسط مور و ویلسون^۱ (۱۹۹۲) محاسبه گردید. محاسبه شیب و طول دامنه از DEM های با تفکیک مکانی مختلف انجام شد تا تغییرات عامل LS در مقیاس های متفاوت بررسی شود. در مرحله سوم، به منظور تحلیل وابستگی فضایی داده های ارتفاع و عامل LS، از روش های زمین آماری استفاده شد. در این راستا، نیم واریوگرام های تجربی برای هر یک از DEM ها محاسبه و مدل کروی به عنوان مدل تابع انتخاب گردید. پارامترهای زمین آماری شامل ناگت، آستانه و برد^۲ از نیم واریوگرام ها استخراج شدند. روش کریجینگ جهانی برای برآورد مقادیر معتبر در نقاط فاقد داده و ارزیابی و ساختار فضایی به کار گرفته شد (وبستر و الیور، ۲۰۰۱).

در محله نهایی، به منظور ارزیابی عملکرد DEM ها با اندازه سلول های مختلف، از شاخص های آماری شامل میانگین خطا (ME) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد (ونگ^۳ و همکاران، ۲۰۰۱). مقایسه این شاخص ها همراه با پارامترهای نیم واریوگرام مبنای انتخاب اندازه سلول بهینه DEM برای محاسبه عامل LS قرار گرفت. این روش به ترتیب سیستماتیک تنظیم شده تا اهداف و مقاصد این پژوهش محقق شود، (شکل ۲).



شکل (۲): چارچوب تحقیق
Fig (2): Research framework

¹ Moore & Wilson

² Range

³ Wang

تعیین طول شیب و ضریب شیب LS

عوامل تأثیر عمق شیب (S) و طول شیب (L) بر فرسایش را محاسبه می کنند. عمق شیب و ضریب طول شیب از طریق نقشه توپوگرافی دیجیتالی منطقه مورد مطالعه کالیبره شده است.

$$E = 9.28p - 8838.1 \quad (1)$$

جایی که: P = متوسط بارندگی سالانه بر حسب میلی متر

R از رابطه معادله ۲ محاسبه می شود:

$$R = EI30/1000 \quad (2)$$

جایی که: EI30 = جمع سالانه انرژی بارندگی در شدت ۳۰ دقیقه (پیشنهادی ۷۵ میلی متر در ساعت). داده های تولید شده از معادله فوق برای تجزیه و تحلیل توزیع فضایی فرسایش بارندگی در اطراف منطقه مورد مطالعه به پایگاه داده ArcGIS وارد شد. جدول (۱) داده های طبقه بندی شده را به چهار گروه شامل ۱۳۸۵، ۱۳۱۴، ۱۲۴۵ و ۱۱۷۵ نشان می دهد. بر اساس خطوط تراز با فاصله ۲۰ متری TIN و لایه مرزی ایجاد شد.

جدول (۱): میانگین بارندگی در منطقه مورد مطالعه

Table (1): average rainfall in the study area

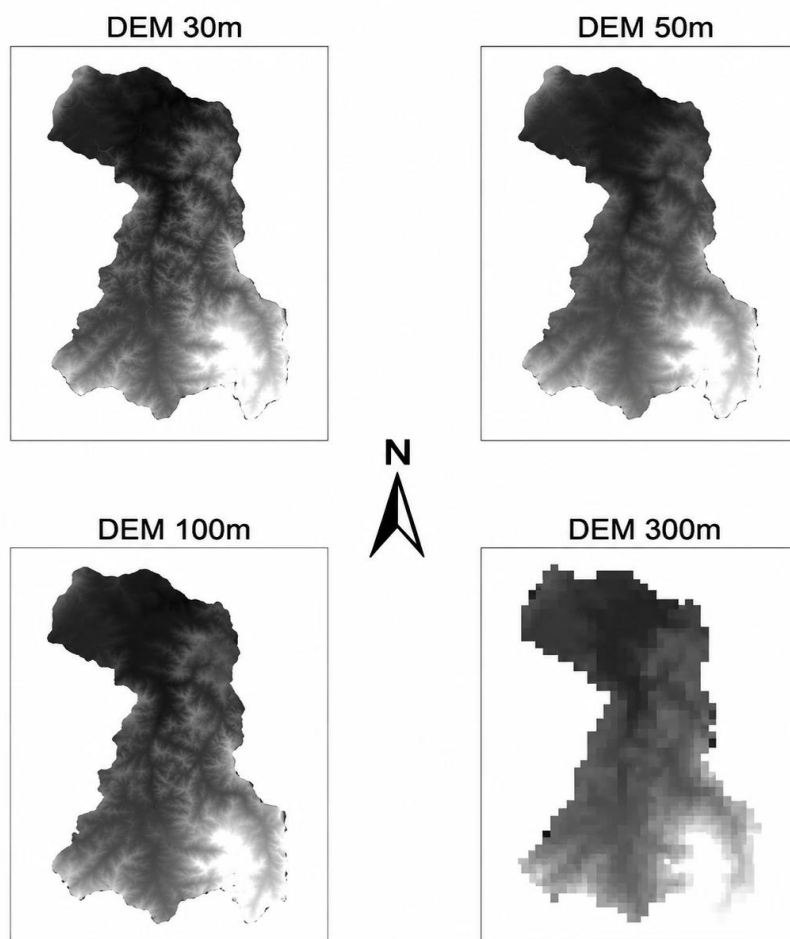
FID	Shape	ID	GRIDCODE	ALUE	COUNT	LABLE	AVGRAIN
0	Polygon	1	4	4	668924	1349-1420	1385
1	Polygon	2	3	3	735428	1279-1349	1314
2	Polygon	3	2	2	1092996	1210-1279	1245
3	Polygon	3	2	2	1092996	1210-1280	1245
4	Polygon	4	1	1	1405308	1140-1210	1175

انتخاب اندازه سلول های مدل رقومی ارتفاع بر اساس دقت داده های ارتفاعی پایه و اصول نظری تحلیل مکانی انجام شد. در این پژوهش، داده های ارتفاعی از نقشه های توپوگرافی با فاصله منحنی میزان ۲۰ متر استخراج گردید: از این رو، انتخاب اندازه سلول های کوچکتر یا برابر با فاصله خطوط تراز (مانند ۱۰ یا ۲۰ متر) به دلیل عدم افزایش اطلاعات واقعی و احتمال تقویت خطای مکانی، به صورت نظری توجیه پذیر نبود. بر اساس اصول نمونه برداری فضایی، تفکیک مکانی DEM باید بزرگتر از فاصله داده های ارتفاعی منبع انتخاب شود تا از بازتولید مصنوعی جزئیات جلوگیری گردد.

در این راستا، اندازه سلول ۳۰ متر به عنوان نزدیک ترین تفکیک مکانی بالاتر از فاصله خطوط تراز و نمایانگر حد بالای دقت داده های پایه انتخاب شد. اندازه سلول ۵۰ متر به منظور بررسی تعادل میان حفظ تنوع مکانی و کاهش خطای درون سلولی در نظر گرفته شد. در حالی که اندازه های ۱۰۰ و ۳۰۰ متر به عنوان تفکیک های بزرگ تر برای تحلیل اثر تفکیک مکانی و کاهش وابستگی فضایی مورد استفاده قرار گرفتند. این بازه از اندازه سلول ها امکان ارزیابی سیستماتیک تأثیر تفکیک مکانی بر ساختار نیم واریوگرام و دقت محاسبه عامل LS را فراهم می کند (دانسون و آتکینسون، ۲۰۰۱). فاصله خطوط تراز ۲۰ متر است، بنابراین وضوح کوچک تر از این مقدار در

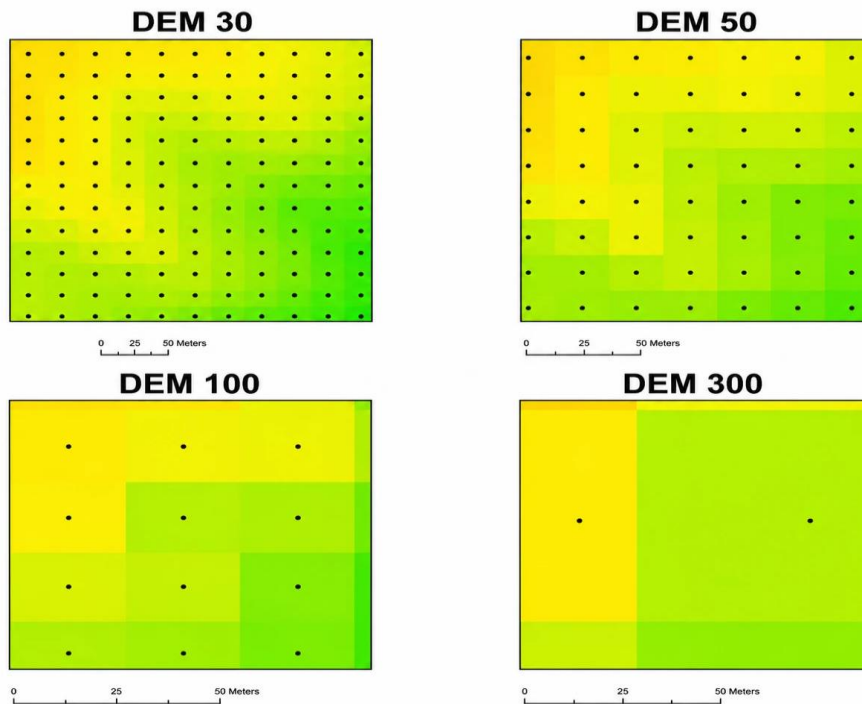
1 - Danson & Atkinson

DEM در نظر گرفته نشدند تا از ایجاد خطای مکانی و بازتولید جزئیات مصنوعی جلوگیری شود. شکل (۳)، DEM ساخته شده از لایه اصلی خطوط تراز با اندازه های مختلف را نشان می دهد.



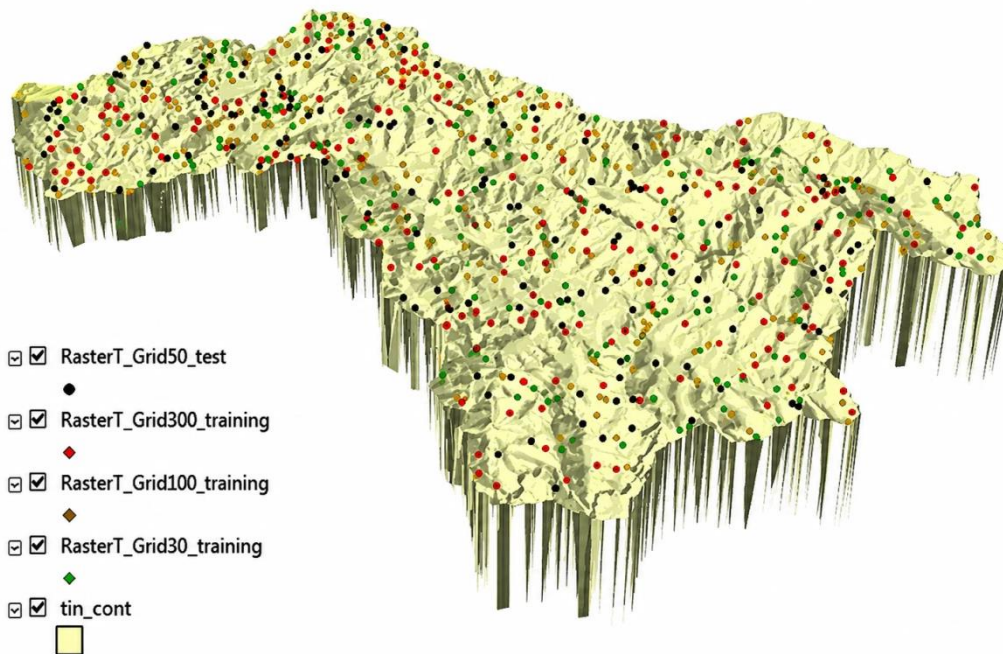
شکل (۳): DEM ساخته شده از لایه اصلی خطوط کانتور با اندازه های مختلف
 Fig (3): DEM made from the main layer of contour lines with different sizes

استخراج نقاط نمونه از طریق این جداول در روش های زمین آماری بسیار مهم است. این نقاط نمونه می توانند به طور منظم یا تصادفی با یکدیگر فاصله داشته باشند. هر چه نقاط ورودی و توزیع آنها بیشتر باشد، نتایج قابل اعتمادتر خواهد بود. البته تعداد نقاط به دلیل فراوانی نباید از ۳۰۰ نقطه بیشتر باشد. زیرا ابزار تحلیلگر زمین آماری قادر به محاسبه این حجم از اطلاعات نیست. شکل (۴) توزیع نقاط را برای هر DEM بر اساس اندازه سلول های مختلف نشان می دهد.



شکل (۴): توزیع نقاط به چهار اندازه سلول مختلف
 Fig (4): Distribution of points in four different cell sizes

یافتن تمام داده های موردنظر در میان تعداد زیادی از نقاط دشوار است. پراکندگی نقاط در منطقه مورد مطالعه در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل (۵): نقاط نمونه توزیع شده در منطقه مورد مطالعه
 Fig (5): sample points distributed in the study area

در این تحقیق، ضریب فرسایش پذیری خاک از داده های به دست آمده از تجزیه و تحلیل اندازه دانه، ساختار، نفوذ پذیری و محتوای مواد آلی توسط معادله (۳) محاسبه شده است:

$$K = [2.1 \times 10^4(12 - O.M\%)(N1 \times N2)^{1.14} + 3.25(S - 2) + 2.5(P - 3)]/100 \quad (3)$$

طبقه بندی خاک منطقه مورد مطالعه به دو نوع خاک با ویژگی های مختلف خاک تقسیم می شود. جدول (۲) جزئیات انواع خاک را نشان می دهد.

جدول (۲): مقادیر K برای بافت مختلف خاک
Table (2): K values for different soil textures

Type soil	Permeability (%)	Silt (%)	Sand (%)	Fine sand (%)	Permeability/Silt+ sand (%)	Organic materials (%)	K values (%)
Rengam	19.80	5.80	27.80	46.6	0.59	2.80	0.26
Serdang	18.00	4.30	41.3	36.4	0.39	5.24	0.18

در معادله RUSLE، پوشش گیاهی یک عامل اساسی برای حفاظت از خاک است که باعث از بین رفتن انرژی قطرات باران قبل از رسیدن به سطح خاک می شود. ارزش شاخص ضریب مدیریت محصول با استفاده از ویژگی های پوشش گیاهی به دست آمده از تصاویر ماهواره ای برآورد شد.

تعیین ضریب پوشش زمین C

در معادله RUSLE، پوشش زمین برای محاسبه بسیار مهم است، همچنین فرسایش خاک که به پوشش گیاهی، شیب و فاکتور طول شیب وابسته است.

جدول (۳): طبقه بندی عوامل C
Table (3): Classification of C factors

Landuse type	C value
Water Bodies	0.000
Dense Forest	0.001
Forest	0.002
Orchard	0.1
Open Space	0.3

جدول (۳) بیش از ۹۰ درصد مناطق مورد مطالعه را نشان می دهد که از جنگل پوشانده شده است. مدل انتخاب شده بر پیش بینی مقادیر ناشناخته تأثیر می گذارد. کریجینگ از نیمه وایوگرام برای اندازه گیری جزء همبستگی فضایی که توسط معادله (۴) محاسبه می شود استفاده می کند:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} [Z(x_i) - Z(x_j)]^2 \quad (4)$$

جایی که: γ = مقدار نیم متغیر تجربی

$Z(x_i)$ و $Z(x_i + h)$ = مقادیر متغیر Z به ترتیب در x_i و $x_i + h$ و $x_i + h$ = موقعیت در دو بعد.

کریجینگ یک روش زمین آماری پیشرفته است که سطح تخمینی را از مجموعه نقاط پراکنده با مقادیر Z تولید می کند. بر خلاف سایر روشهای درون یابی که توسط تحلیلگر فضایی ArcGIS پشتیبانی می شود، کریجینگ شامل بررسی تعاملی رفتار فضایی پدیده ای است که با مقادیر Z نشان داده می شود قبل از انتخاب بهترین روش برآورد برای تولید سطح خروجی است. اگر نقاط داده به طور معمول توزیع نشده باشند، می توانند با استفاده از گزینه های مختلف تبدیل به (نزدیک) حالت عادی شوند. دو روش به شرح زیر وجود دارد: تبدیل Box-Cox توسط معادله ۵ نشان داده شده است:

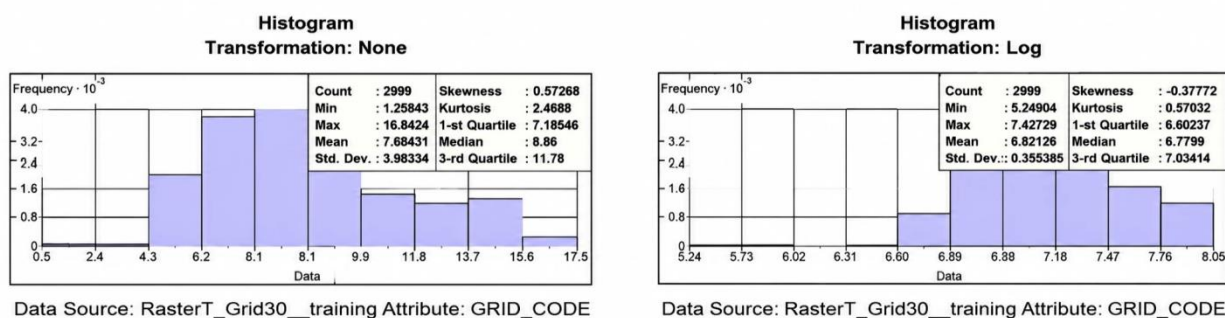
$$Y(s) = (Z(s)\lambda - 1)/\lambda \quad \text{برای } \lambda \neq 0 \quad (5)$$

تبدیل log در واقع یک مورد خاص از تبدیل Box-Cox است وقتی $\lambda = 0$ ؛ این تحول با معادله ۶ شرح داده شده است:

$$Y(s) = \ln(Z(s)) \quad \text{برای } Z(s) > 0 \quad (6)$$

جایی که ln لگاریتم طبیعی است.

در شکل (۶)، داده ها دارای انحراف مثبت را نشان می دهد. بنابراین داده هایی که دارای انحراف مثبت نمی باشند باید با استفاده از گزینه log به توزیع نرمال تبدیل شوند.



شکل (۶): داده ها دارای انحراف مثبت

Fig (6): The data has a positive deviation

تحلیلگر زمین آمار می تواند انواع مختلفی از لایه های نقشه از جمله نقشه های احتمال، نقشه های کمی، نقشه های پیش بینی و نقشه های خطای استاندارد پیش بینی را ارائه دهد. روش مورد استفاده در این تحقیق احتمال جهانی با استفاده از مدل کروی است زیرا می توان برای پیش بینی جایی که مقادیر از یک آستانه بحرانی فراتر می روند استفاده کرد. معادله کروی محاسبه در معادله (۷) نشان داده شده است:

$$g(h) = \begin{cases} c_0 \cdot \left(1.5 \left(\frac{h}{a} \right) - 0.5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right) & \text{if } h \leq a \\ c & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

پس از مناسب سازی با مدل، RMS (خطای میانگین ریشه مربع) معیاری برای انتخاب مدل های بهینه برای برآورد انحراف و دقت مورد استفاده است. معادله (۸) به شرح زیر نشان داده شده است:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_{i,act} - Z_{i,est})^2} = \frac{RMS}{s} \quad (8)$$

جایی که: n = تعداد امتیاز، $Z_{i,act}$ = مقدار شناخته شده نقطه Z_i ، $Z_{i,est}$ = ارزش تخمینی نقطه Z_i ، خطای استاندارد

RMSE نشان دهنده درجه ای از دقت است که حداقل برای انحراف تخمین زده می شود. آمار RMS برای همه روشهای دقیق محلی در دسترس است. اما RMS استاندارد فقط برای کریجینگ در دسترس است زیرا واریانس برای محاسبه مورد نیاز است. تفسیر آمار به شرح زیر است: یک روش درون یابی بهتر باید RMS کوچکتر و RMS استاندارد را به ۱ نزدیک کند.

با استفاده از روش کریجینگ برای تهیه اطلاعات مربوط به آنها و استفاده از تکنیک های آماری می توان به مناسب ترین مدل ارتفاع دیجیتال دست یافت.

$$LS = (1 / 22.13) n (0.065 + 0.045 s + 0.0065 s^2) \quad (9)$$

جایی که، l طول شیب (m) و s شیب گرادیان بر درصد است. $n = 0.5$ برای شیب $< 5\%$ ، 0.4 برای شیب 3.5 تا 4.5% ، 0.3 برای شیب l تا $3/5$ و 0.2 برای شیب کمتر از 1 . Eq 3.11 توسط McCool و همکاران ارائه شده است. (۱۹۸۹).

$$LS = (1 / 22)^m (10.8 \text{ Sin}b + 0.03) \quad \text{برای شیب } > 9.0\% \quad (10)$$

$$LS = (1 / 22)^m (16.8 \text{ Sin}b + 0.05) \quad \text{برای شیب } \leq 9.0\%$$

$$F = (\text{Sin}b / 0.0896) / (3\text{Sin}b0.8 + 0.56) \quad \text{و} \quad m = F / (1 + F)$$

معادله (۱۱) توسط McCool و دیگران به دست آمده است (۱۹۸۷).

$$LS = (1 / 22.13) 0.5 (0.172 s - 0.55) \quad (11)$$

جایی که: l = طول شیب بر متر، و s = عمق شیب بر درصد

معادله (۱۲) توسط Elwell (1978، SLEMSA) به دست آمده است.

$$LS(X) = (\int 1 (0.76 + 0.53 s + 0.0765 s^2) / 25.65 \quad (12)$$

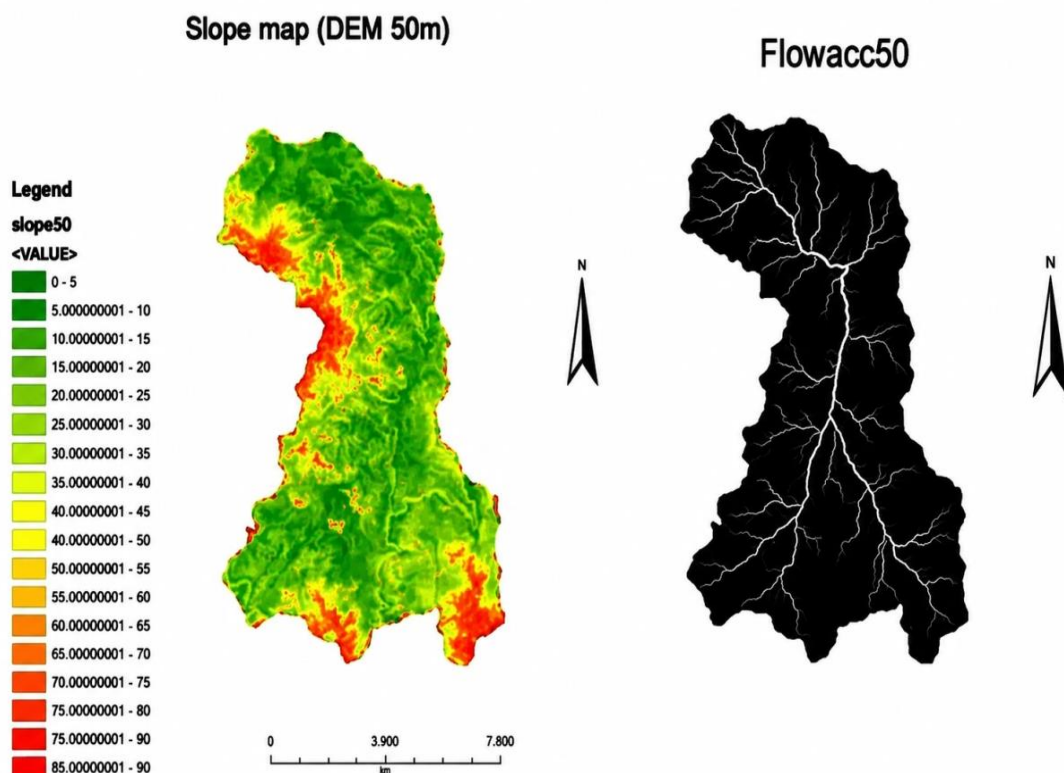
معادله (۱۳) مورد استفاده در این مطالعه توسط مور و ویلسون (۱۹۹۲) ارائه شد.

$$LS = [A / 22.13]^m [\text{Sin} \beta / 0.0896]^n \quad (13)$$

جایی که: A = شیب بالا به مساحت مشارکت بر عرض کانتور آن ناحیه کمک می کند

n و m = اعداد ثابت به ترتیب برابر با $1/3$ و $1/6$ است. β = شیب سطح زمین بر حسب درجه.

به عبارت دیگر، A مساحت مشارکت بالا در شیب در واحد عرض سلول است که آب از آن به داخل سلول شبکه ای معین جریان می یابد. بنابراین، عامل LS ضرایب طول شیب، یعنی A ، و شیب، یعنی $\text{Sin}\beta$ را محاسبه می کند. برای برآورد $\text{Sin}\beta$ ، لایه شیب باید با استفاده از DM 50m ایجاد شود. شکل (۷) لایه طول شیب به عنوان شاخص "A" شیب را کمتر از ۵ درجه تا بیشتر از ۹۹ درجه نشان می دهد.



شکل (۷): طول شیب به عنوان شاخص "A" و شیب ایجاد شده از DEM، ۵۰ در ۵۰ متر

Figure (7): Slope length as index "A" and slope created from DEM, 50 x 50 meters.

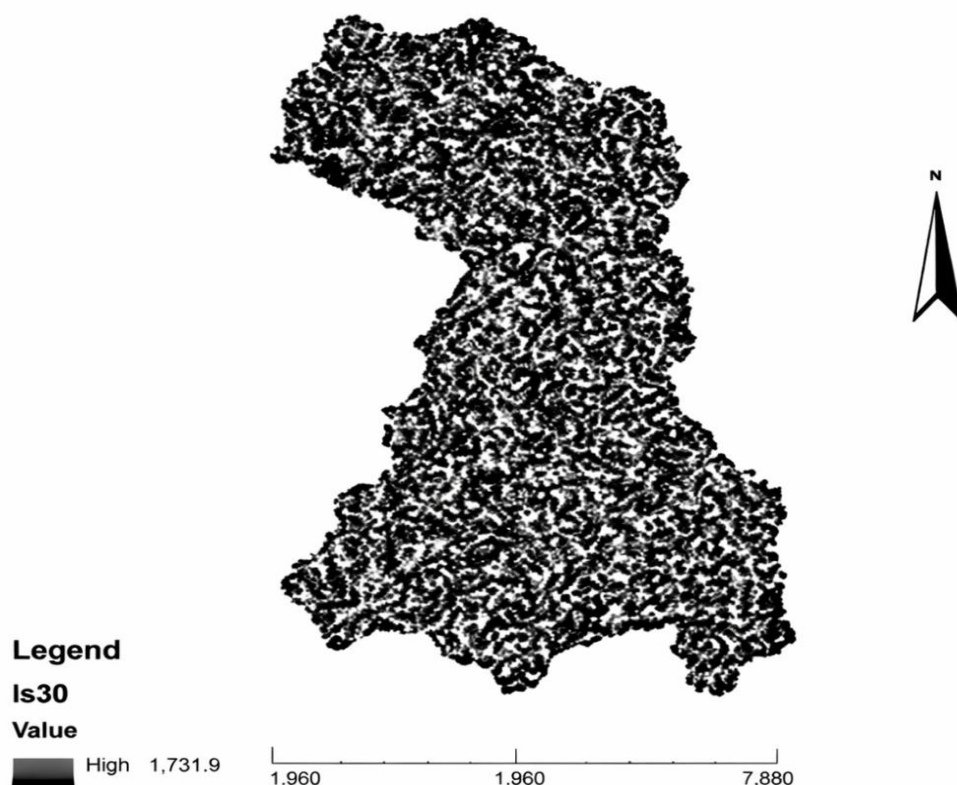
برای محاسبه یک شاخص بر اساس دستورالعمل، مقادیر تجمیع جریان باید به عنوان طول شیب محاسبه شود.

از معادله (۱۴) برای محاسبه جریان کامل آب در هر یک از سلولها به عنوان طول شیب استفاده می شود. طول شیب در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

$$\text{pow}([\text{flowacc50}] * 50 \text{ size} / 22.13, 0.4) * \text{pow}(\text{Sin}([\text{slope50}] / 0.0896, 1.3) \quad (14)$$

در معادله (۱۴)، عامل LS می تواند با اندازه سلول های مختلف با استفاده از معادله ایجاد شود و می تواند به عنوان عاملی در ضریب توپوگرافی مورد استفاده قرار گیرد. شکل (۸) ضریب LS ارائه شده از DEM 50 در ۵۰ متر را نشان می دهد.

LS map (DEM 50m)



شکل (۸): LS از ۵۰ متر DEM در ۵۰ متر ارائه شده است

Figure (8): LS of 50 m DEM presented at 50 m

آخرین مرحله مناسب بودن مدل، ترکیب خروجی های طبقه بندی مجدد است، به عنوان مثال: LS، C، K، R و P برای دستیابی به اهدافی که در مناسب بودن مدل اهمیت بیشتری دارند، درصد بالاتری از (وزن) را می دهد.

نتایج و تجزیه و تحلیل

مشهور ترین مدل، روش زمین آماری پیشرفته (کریجینگ) است که سطح تخمینی را از مجموعه ای پراکنده از نقاط با مقادیر Z تولید می کند. با توجه به این واقعیت که کریجینگ جهانی فرض می کند که تغییرات فضایی در مقادیر Z علاوه بر همبستگی فضایی بین نقاط نمونه دارای تغییر جهت یا روند است، در این مطالعه، از درون یابی جهانی کریجینگ با مرتبه دوم (quadratic surface) استفاده می شود. مدل سازی نیمه واریوگرام ها نقش کلیدی در توصیف فضایی و پیش بینی فضایی دارد. هدف اصلی استفاده از کریجینگ پیش بینی مقادیر ویژگی در مکان های نامعلوم است. نیمه واریوگرام تجربی اطلاعات مربوط به خود همبستگی فضایی مجموعه داده ها را آماده می کند. محیط تجزیه و تحلیل داده های فضایی اکتشافی (ESDA) درک بیشتر درباره پدیده ها را ممکن می سازد تا بتوان تصمیمات بهتری در مورد مسائل مربوط به داده ها گرفت. به طور تصادفی، ۲۰۰ نقطه برای همه اندازه های DEM انتخاب شده است. توزیع داده ها تقریباً متقارن است و نزدیک به توزیع عادی است. در دنباله سمت راست تعداد نسبتاً کمی از نمونه ها با غلظت های ارتفاعی بالا نشان می دهد. توزیع ویژگی ارتفاع توسط یک هیستوگرام با استفاده از محدوده مقادیر طبقه بندی شده در ۱۰ کلاس نشان داده می شود و همچنین داده ها بی حالت و نسبتاً متقارن هستند. کوتاه بودن (Kurtosis) و انحراف دو عامل مهم در جدول ۴ است که هر دو ضریب توزیع و تقارن نقاط نمونه را نشان می دهد که به شرح زیر است: ضریب انحراف برای توزیع متقارن برابر ۰ است. اگر

نامتقارن نسبت به داده های بزرگتر باشد، در این حالت ضریب مثبت است و اگر ضریب به ضرایب کوچکتر باشد منفی است. انحراف و کورتوز برای داده های DEM با ۳۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ در جدول (۴) نشان داده شده است.

توزیع نمونه های دیگر DEM های تولید شده دارای تقارن نسبتاً خوبی هستند.

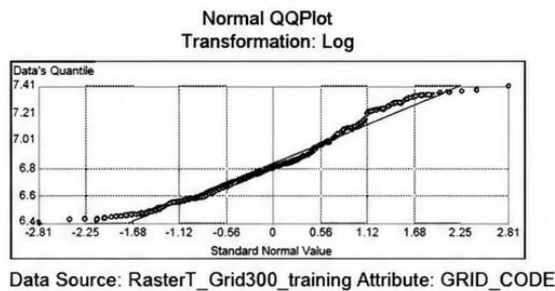
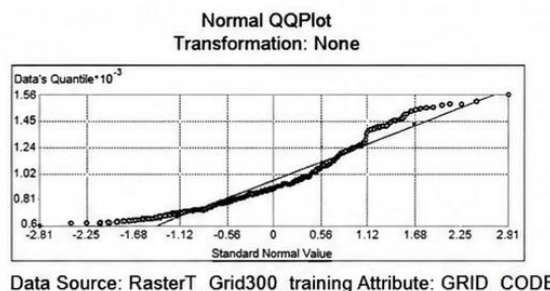
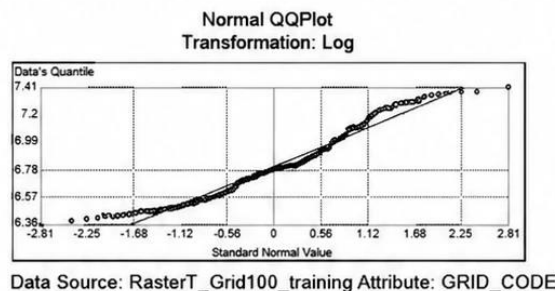
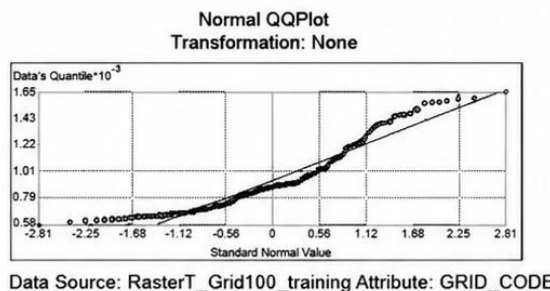
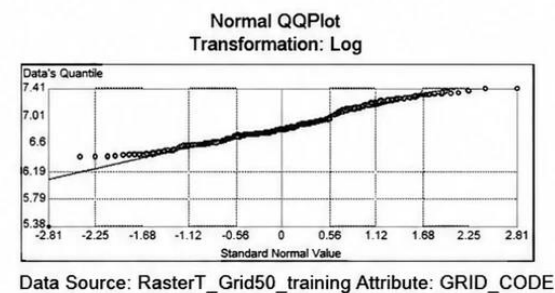
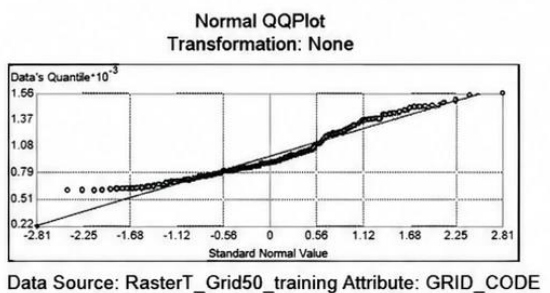
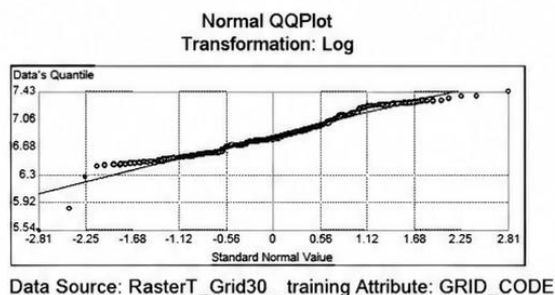
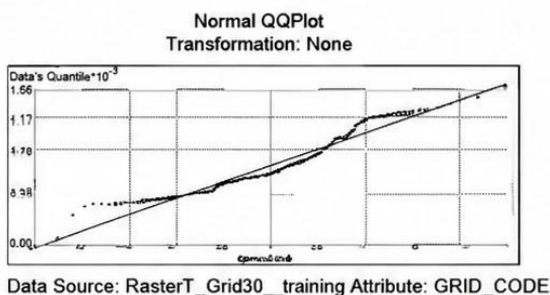
جدول (۴): نمونه نقاط توزیع DEM ها بعد و قبل از تبدیل با استفاده از روش \log

Table (4): sample distribution points of DEMs after and before conversion using the log method

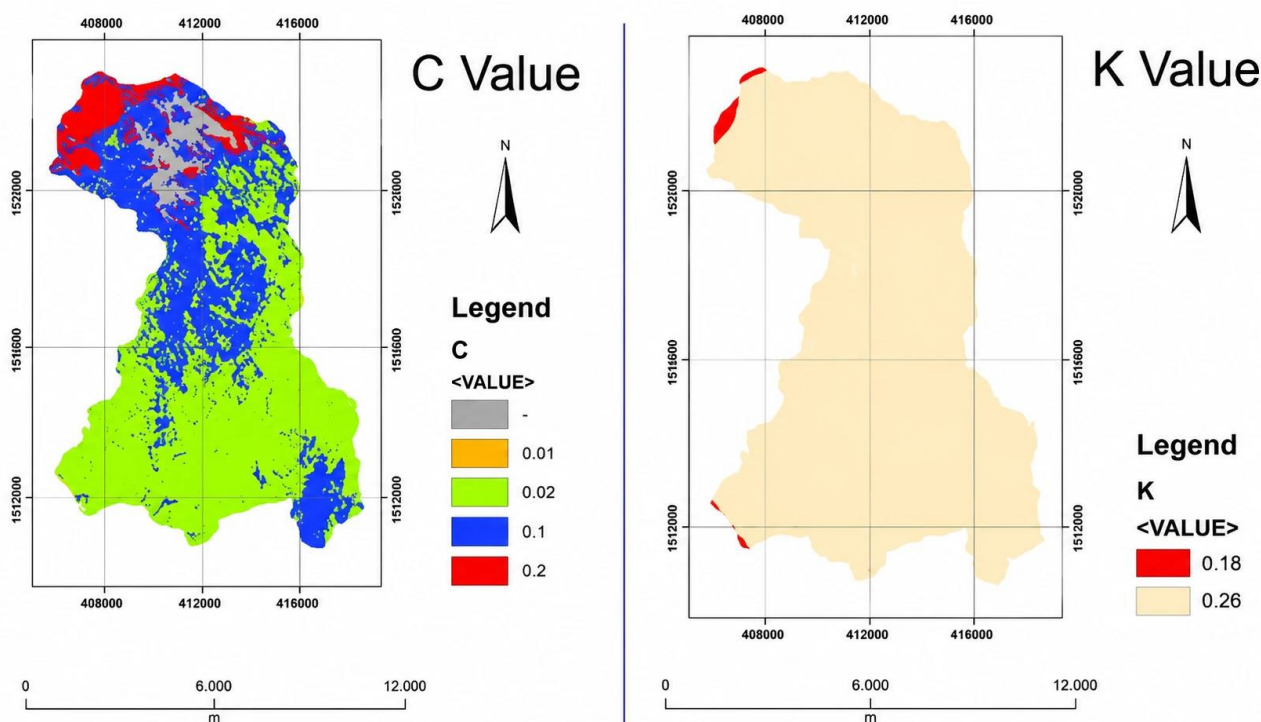
Cell Size (m)	Before transform				After transformation			
	Skewness	Kurtosis	mead	median	Skewness	Kurtosis	mead	median
DEM30	0.57288	2.668	954.51	880	-0.32772	4.3762	6.8212	6.7799
DEM50	0.59573	2.6684	971.55	896.55	-0.401	5.4134	6.8411	6.7986
DEM100 ^{فا}	0.92768	2.0128	935.35	882.07	0.48715	2.363	6.8056	6.7823
DEM300	0.84979	2.837	902.97	902.97	0.42361	2.2999	6.8399	6.8057

تجزیه و تحلیل نمودار چندکی (Quantile - Quantile Plot (QQ plot) Analysis)

نمودار QQ نموداری است که توزیع نقاط را با توزیع نرمال استاندارد مقایسه می کند و همچنین معیارهای دیگری را برای نرمال بودن داده ها آماده می کند. هر چه نقاط به هم نزدیکتر باشند، به این معنی است که داده های نمونه به توزیع نرمال نزدیکتر می شوند. از نمودار QQ معمولی زیر، قابل مشاهده است که نمودار بسیار نزدیک به یک خط مستقیم است. اگر مقادیر داده ها به طور معمول توزیع نشده باشند، ممکن است قبل از استفاده از برخی تکنیک های درونیایی کریجینگ، داده ها را تغییر دهند. شکل (۹) نمودار QQ را بدون توزیع داده های تبدیل و با تبدیل نشان می دهد.



شکل (۹): نمودار QQ نرمال قبل و بعد از تبدیل داده ها
Figure (9): Normal QQ chart before and after data transformation

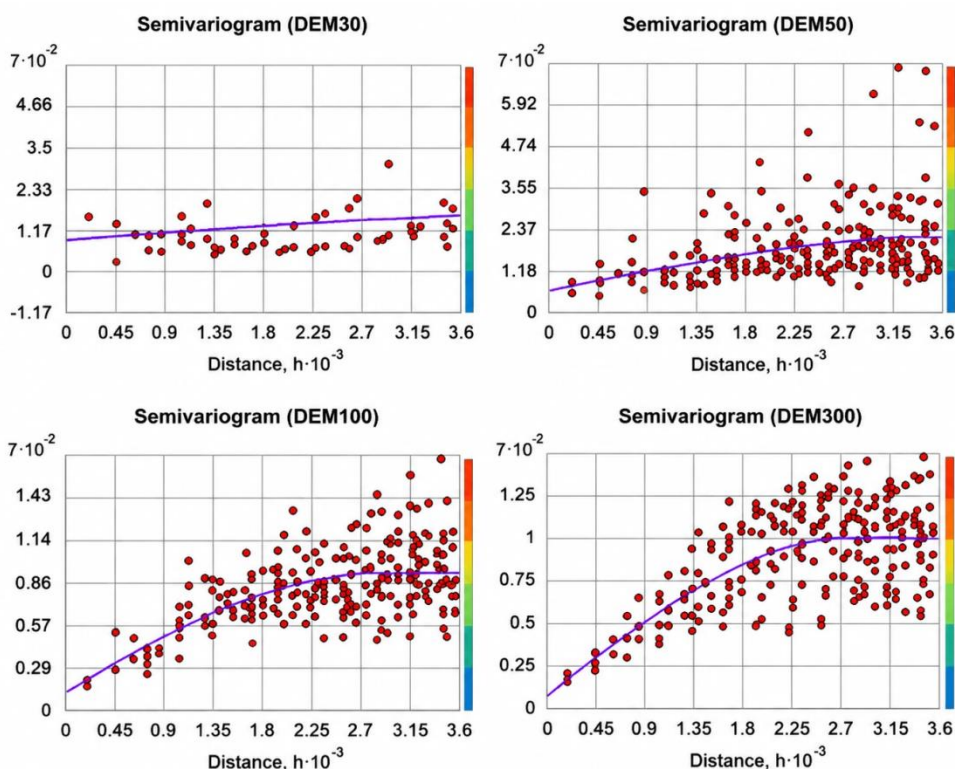


شکل (۱۰): نقشه مقدار k و مقدار C
 Fig (10): Map of k value and C value

شکل (۱۰) سمت راست، مناطق با رنگ قرمز مقادیر k را در دو گروه مانند گرانیته ۰/۱۸ (کمترین مقدار) و گل ولای ۰/۲۶ (بیشترین مقدار) نشان می دهد. و سمت چپ، با مقادیر ذکر شده که در جدول شماره (۳) هم می توان شبکه را با فاکتور C در منطقه مورد مطالعه ایجاد کرد.

پیاده سازی مدل

به منظور ارائه یک مدل کارآمد و بهینه، نیاز به بررسی داده های آماری دقیق به دست آمده می باشد. تحلیلگر زمین آمار؛ برخی از پارامترهای پیش فرض را برای مدل هایی مانند ناگ (Nugget)، آستانه جزئی (partial sill)، تاخیر (lag) و غیره محاسبه می کند. اندازه تاخیر می تواند فاصله متوسط بین نمونه های DEM همسایه باشد که بدست می آید. بهترین اندازه تاخیر در این مطالعه ۳۰۰ متر تعیین شده است. مطابق شکل (۱۱)، محور X فاصله بین جفت نقاط نمونه را نشان می دهد. محور Y نیز مقادیر مختلف جفت نقاط را نشان می دهد. منحنی یا خط آبی مدل semivariogram را نشان می دهد. این نمودارها نشان می دهند که اگر نقاط به هم نزدیکتر باشند، مقادیر مشابهی دارند.



شکل (۱۱): نیمه واریوگرام با تابع ریاضی کروی (DEM 30 متر، 50 متر، 100 متر و 300 متر)

(Fig (11): Semi-variogram with spherical mathematical function (DEMs 30 meters, 50 meters, 100 meters and 300 meters)

کاهش واریانس در Nugget به دلیل کاهش داده ها، کاهش اختلال و تغییرات فضایی درون سلول را نشان می دهد. یکی دیگر از ویژگی های مهم، نسبت Nugget به $Sill [C_0 / C_0 + C]$ است که نشان دهنده مقدار واریانس فضایی است. این نسبت برای DEM 30M، 0.512693 است و ارزش آن برای DEM 50M به ۰.۹۶۵۸۵۲ افزایش می یابد. هنگامی که مقدار سلولهای DEM، مقادیر nugget را افزایش می دهد، کاهش می یابد. به عنوان نتایج، میزان سلولی DEM 50 متر منجر به حداکثر nugget و واریانس فضایی می شود. بنابراین، این تحقیق نشان می دهد که DEM 50M مناسب ترین نقشه توپوگرافی با فاصله ۲۰ متر است که حداکثر اطلاعات را برای محاسبه عامل LS فراهم می کند. لازم به ذکر است که داده های پایه ارتفاعی این پژوهش از نقشه های توپوگرافی با فاصله خطوط تراز ۲۰ متر استخراج شده اند. بنابراین، نتایج محاسبه عامل LS و پارامترهای زمین آماری ممکن است به ویژگی های این منبع داده وابسته باشد. قابلیت تعمیم مستقیم این نتایج به DEM های حاصل از ماهواره هایی مانند SRTM و ASTER / ALOS، که تفکیک مکانی و دقت متفاوتی دارند، روشن نبوده و نیازمند بررسی های تکمیلی می باشد.

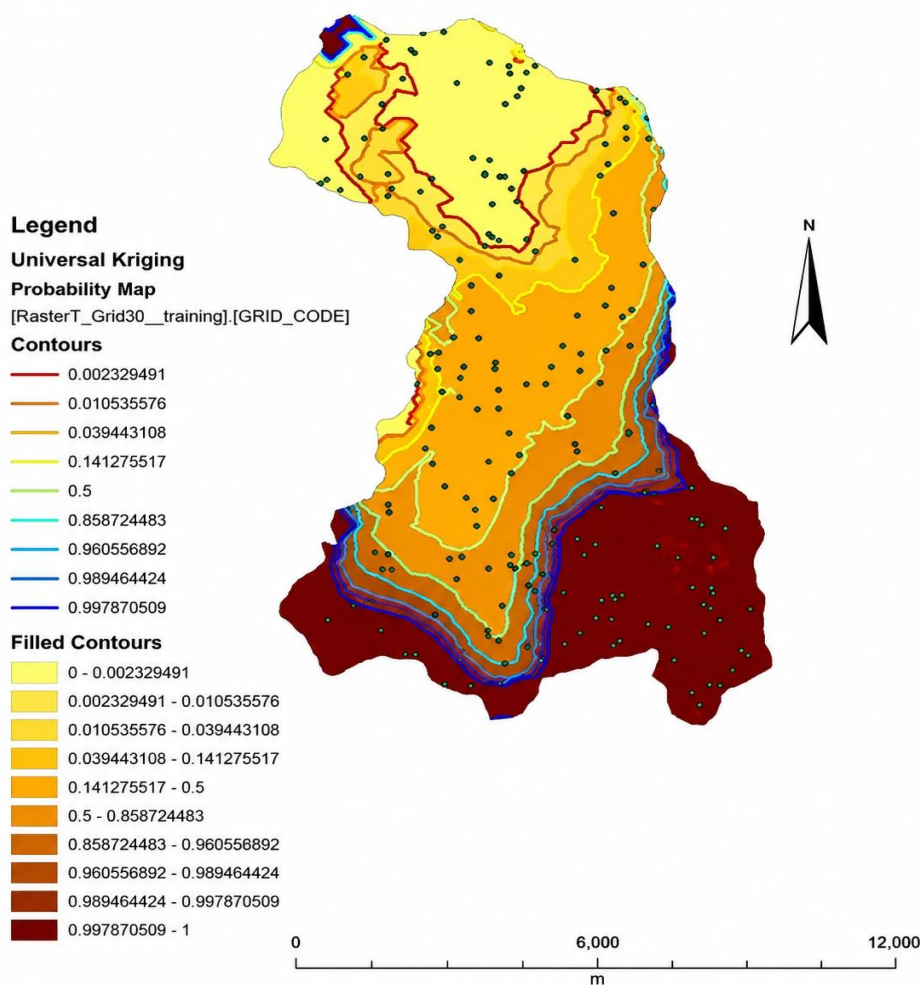
جدول (۵): داده های بدست آمده از Semivariogram

Table (5): Data obtained from Semivariogram

Grid sell size(m)	Model	Nugget C_0	Partial Sill C_1	Sill $C = C_0 + C_1$	ME	RMS	C_1/C
DEM30	Spherical	0.0075609	0.0079548	0.0155157	0.02952	0.2708	0.512693
DEM50	Spherical	0.0053492	0.01513	0.1566492	0.03321	0.2435	0.965852
DEM100	Spherical	0.0009848	0.0082398	0.0092246	-0.00075	0.2671	0.893240
DEM300	Spherical	0.0005208	0.0096265	0.0101473	-0.00306	0.1594	0.948675

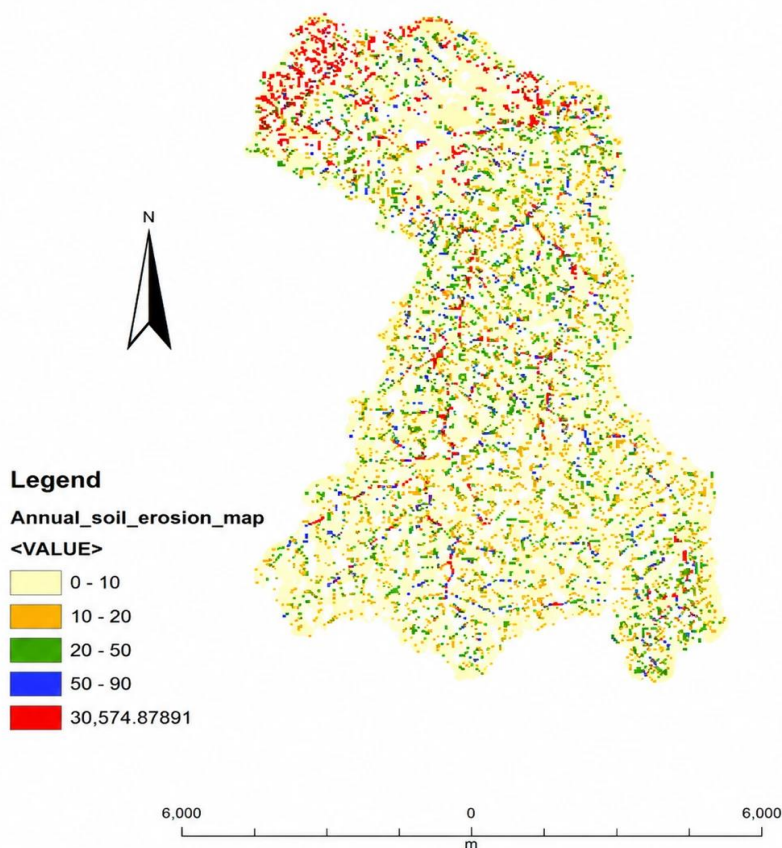
همانطور که در نقشه دیده می شود، توزیع حداکثر مقادیر DEM در جنوب شرقی ارتفاع بیشتری نسبت به شمال و شمال غربی دارد. شکل (۱۲) مناطقی را که تحت تاثیر فرسایش و نقشه های فرسایش خاک سالانه قرار گرفته اند را نشان می دهد. شایان ذکر است که نقاط قرمز رنگ در شکل توانایی بالقوه بیشتری برای فرسایش خاک دارند.

Universal Kriging 30m Map



شکل (۱۲): نقشه Kriging جهانی با DEM 30M
 Fig (12): Global Kriging map with DEM 30M

Annual Soil Erosion Map



شکل (۱۳): نقشه فرسایش خاک سالانه

Figure (13): Annual Soil Erosion Map

نتایج نشان داد که اندازه سلول ۵۰ متر بهینه ترین تفکیک مکانی برای محاسبه عامل LS است، چرا که بیشترین وابستگی فضایی و کمترین خطای پیش بینی را ارائه می دهد. مقایسه این نتایج با DEM های با اندازه سلول های ۳۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ متر نشان می دهد که اندازه سلول های کوچکتر (۳۰ متر) علی رغم حفظ جزئیات مکانی، با خطا بیشتر همراه هستند و DEM های بزرگتر (۱۰۰ و ۳۰۰ متر) اطلاعات مکانی را هموار می کنند و تنوع فضایی را کاهش می دهند. علاوه بر این، نتایج حاصل از این مطالعه با یافته های دانسون (۱۹۹۸)، ونگ و همکاران (۲۰۱۰) و انیما و همکاران (۲۰۲۳)^۱ همخوانی دارد، که نشان می دهد انتخاب اندازه سلول بهینه می تواند وابستگی فضایی و دقت محاسبات عامل LS را بهبود ببخشد.

با این حال، لازم به ذکر است که داده های پایه از نقشه های توپوگرافی با فاصله خطوط تراز ۲۰ متر استخراج شده اند و قابلیت تعمیم مستقیم نتایج به DEM های ماهواره ای مانند SRTM و ASTER/ALOS نیازمند بررسی های بیشتر است. بنابراین، تکنیک های استفاده شده در این پژوهش منجر به تعیین اندازه سلول بهینه برای DEM های حاصل از نقشه توپوگرافی با فاصله خطوط تراز ۲۰ متر می شوند و تعمیم آن به سایر منابع داده باید با احتیاط صورت گیرد.

¹ Anima et all

نتیجه گیری

این پژوهش به تعیین اندازه سلول بهینه مدل رقومی ارتفاع (DEM) برای محاسبه عامل طول و شیب دامنه (LS) در مدل RUSLE پرداخت. نتایج نشان داد DEM با اندازه سلول ۵۰ متر بهترین تعادل بین حفظ جزئیات مکانی، وابستگی فضایی و دقت پیش بینی ارائه می دهد. اندازه سلول های کوچک تر (۳۰ متر) با خطای بیشتر همراه بودند و DEM های بزرگتر (۱۰۰ و ۳۰۰ متر) موجب کاهش تنوع مکانی و هموار شدن سطح ارتفاع شدند. با توجه به اینکه داده های پایه ارتفاعی از نقشه های توپوگرافی با فاصله خطوط تراز ۲۰ متر استخراج شده اند، نتایج مستقیم قابل تعمیم به DEM های حاصل از منابع ماهواره ای با تفکیک مکانی متفاوت، مانند SRTM و ASTR/ALOS نیست و نیازمند بررسی های تکمیلی می باشد. با این حال، چاقوب روش شناسی ارائه شده، شامل تحلیل نیم واریوگرام و شاخص های دقت (ME و RMSE) می تواند به عنوان روش قابل استفاده برای ارزیابی اندازه سلول بهینه در سایر مناطق و با داده های DEM متفاوت مورد بهره برداری قرار گیرد.

بنابراین، یافته های این پژوهش پیامدهای کاربردی در مطالعات فرسایش خاک و هیدرولوژی در مناطق با شرایط توپوگرافی مشابه دارد و می تواند به بهبود دقت برآورد عامل LS و برنامه ریزی منابع آب و خاک کمک نماید. یافته های این پژوهش می تواند در برنامه ریزی مدیریت فرسایش خاک، بهبود دقت برآورد عامل LS و طراحی مطالعات هیدرولوژیکی در مناطق با شرایط توپوگرافی مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

References

- Alavi, H., Solaimani, K., Shokrian, F. (2024). Esmail Mokhtarpour Investigation of Trend Changes of Hydroclimatic Parameters in Miankaleh Wetland, Mazandaran, *Hydrogeomorphology*, 10(37):98-119.
- Abedini, M.; Pasban, A.H. (2023). Analysis and Zoning of Soil Erosion Rate and its Relationship with Hydrogeomorphic Indicators and Vegetation, Case Study: Khiavchai watershed, MeshkinShahr. *Hydrogeomorphology*, 11(38): 40-59.
- Ammar, A.K., Alaa, m., Fadhil, K., Alzahrani, H., & Hamad, S. (2023). Predicting Soil Erosion Rate at Transboundary Sub-Watersheds in Ali Al-Gharbi, Southern Iraq, Using RUSLE-Based GIS Model, *Sustainability*, 15,1776.
- Anima S, Tirkey P, Nathawat S (2023)_Use of satellite data, GIS and RUSLE for estimation of average annual soil loss in Daltonganj watershed of Jharkhand (India). *Journal of Remote Sensing Technology* 1:1.
- Arami, A., Karimi Sangchini, A., Dinarund, M. (۲۰۲۱). Tracking severe dust storms in the southwest of Iran using the HYSPLIT model, application of geographic information system and remote sensing in planning, 13 (47):13 -28.
- Bayati, Maryam, Sari, Behroz (2024). Identifying the centers at risk of wind erosion around Lake Urmia, Case study: Bonab and Malekan cities. *Hydrogeomorphology*, 11 (39): 122-143.
- Blanco, H., Lal, R. (2008). Principles of soil conservation and management: Heidelberg, Germany.: Springer
- Chang, K. T., (2020). Introduction to Geographic Information Systems. (5th edition). New York, USA. McGraw- Hill
- Environment; A Case Study of Koga Watershed, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Hydrol Current Res* 7:239. doi:10.4172/2157-7587.1000239.
- FAO. (2016). Status of the World's Soil Resources.
- Gelagay, H.S. (2016). RUSLE and SDR Model Based Sediment Yield Assessment in a GIS and Remote Sensing.
- Jim Ritter, P. Eng. (2015). Replaces OMAFRA Factsheet, Soil Erosion – Causes and Effects, Order No. 87-040.

- Imad Ali, Maryam Byatikhatibi (2025). Soil erosion risk mapping with RUSLE model using GIS and remote sensing techniques; A case study of Quetta Sub-basin (Pakistan) A case study of Quetta Sub-basin (Pakistan), 11(41): 67- 86.
- Karami, Fariba; Mokhtari, Davoud; Farnoosh Ahmadi. (2023). The role of landforms and lithology in the rate of soil erosion in Zonuzchay catchment. *Hydrogeomorphology*, 10(37): 1 – 24.
- Kayet, N., & Chakrabarty (2016). A. Hyper spectral Image processing for Forest types Mapping and forest health monitoring: A case study in the buffer zones of iron mining belts of Saranda forest, Jharkhand, India. 6(1): 31-42.
- Kayet, N., et al. (2018). Evaluation of soil loss estimation using the RUSLE model and SCS-CN method in hill slope mining areas. *International Soil and Water Conservation Research*, <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.11.002>.
- Leila Ooshaksaraie, Noor Ezlin Ahmad Basri, Azuraliza Abu Bakar and Khairul Nizam Abdul Maulud, 2009, An Expert System Prototype for Minimizing Soil Erosion on Construction Site in Malaysia, *European Journal of Scientific Research*, ISSN 1450-216X Vol.33 No.3 (2009), pp.454-460.
- Madadi, Aghil; Asghari Saraskanrood, Sayyid; Hajatpour Ghaleeroodkhani, Hossein. (2024). Investigating land use changes with an emphasis on forest cover and its effects on soil erosion using object-oriented classification and the MARCOS multi-criteria technique. Case study: Ghaleeroodkhan Fuman watershed. *Hydrogeomorphology*, 11(39): 141 – 164.
- Merritt, W.S., Letcher, R.A., & Jakeman, A.J. (2003). A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling & Software*, 18(8), 761–799.
- Moore, I. D. & Wilson, J. P. 1992 Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: simplified method or estimation. *Journal Soil Water Conservation*. 45, 423-428.
- Moses, AN. (2017). GIS-RUSLE Interphase Modelling of Soil Erosion Hazard and Estimation of Sediment Yield for River Nzoia Basin in Kenya. *J Remote Sensing & GIS* 6: 205. doi: 10.4172/2469-4134.1000205.
- Piroozi, E; Madadi, M. (2023). Zoning of soil erosion potential using the MABAC method Case study: Givi Chay watershed. *Hydrogeomorphology*, 10(36): 73–93.
- Sahoo, S., Dhar, A., Kayet, N., & Kar, A., (2016). Detecting water stress scenario by land use/land cover changes in an agricultural command area. *Spatial Information Research*, 1-11.
- Serbaji, M., Bouaziz, M., & Weslati, O. (2023). Soil Water Erosion Modeling in Tunisia Using RUSLE and GIS Integrated Approaches and Geospatial Data, *Land*, 12(548), 13-22.
- Tung G. P., et al. (2018). INTEGRATED UNIVERSAL SOIL LOSS EQUATION (USLE) AND GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM (GIS) FOR SOIL EROSION ESTIMATION IN A SAP BASIN; CENTRAL VIETNAM. *International Soil and Water Conservation Research*.
- Turner, B.L., et al. (2018). Scientific case studies in land-use driven soil erosion in the central United States: Why soil potential and risk concepts should be included in the principles of soil health. *International Soil and Water Conservation Research*, <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.12.004i>. 6(1): 63-78.
- Wang, G., G. Z. Gartner, P. Parysow, and A. B. Anderson. 2000; Spatial prediction and uncertainty analysis of topographical factors for the Revised Universal Soil Loss Equation. *Journal of Soil and Water Conservation*. 55: 373-382.
- Wang, G., G. Z. Gartner, P. Parysow, and A. B. Anderson. 2010; Spatial prediction and uncertainty assessment of topographic factor for the Revised Universal Soil Loss Equation using digital elevation models. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 56: 65-80.
- Webster, R. & Oliver, M. A. 2021. *Geostatistics for environmental science*. John Wiley and Sons, LTD. Toronto, Canada, 271 p.
- [Www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/12-053.htm](http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/12-053.htm) Jan 4, 2016.