

Original Article



Determination of Optimum Geo-Morphometric Parameters to Digital Soil Map (Case Study: Tehran Province, Iran)

Mahdi Sadeghi Pour Marvi*

Affiliation

Tehran Agricultural and
Natural Resources
Research and Education
Center, Varamin, Iran

ABSTRACT

Introduction: Today, geo-morphometric parameters named as environmental co-variables are used to digital soil maps, so that using these data, the results of soil tests are generalized to similar areas. For this object, finding the suitable environmental variables is of special importance. Since understanding changes in land surface processes requires comprehensive identification of the environmental variables present in it (Bishop et al., 2012), and these changes are mainly due to changes in morphology, structure, composition, passage of time, and human activities (Bishop et al., 2003), and considering the importance of selecting appropriate environmental variables to increase the accuracy in preparing a digital map using a geographic information system, this research seeks to identify and introduce these appropriate environmental variables based on data analysis and reliable statistical tests, so that digital maps with the desired accuracy can be prepared in the geographical area of Tehran province.

Materials and Methods: In addition, other researchers' use of the results of this study and the environmental variables introduced in it will result in the use of the same initial variables in the preparation of different digital maps, and as a result, there will be a better possibility of comparison between different digital maps. The importance of this study is that the study of these factors is important and significant, and research results in this field have not been published before in Tehran province, so they can be used by other researchers to prepare digital maps in future studies. The objective of this study was to determine the appropriate environmental data that can be used to a digital soil map of Tehran province. Data were processed and 49 environmental data were statistically analyzed included Digital Elevation Model, Analytical Hillshading, Landforms, Texture, Flow Accumulation, Protection Index, Clusters, Cross-Sectional Curvature, Longitudinal Curvature, LS Factor, Vertical Distance to Channel Network, Topographic Wetness Index, Channel Network Base Level, Valley Depth, Catchment Slope, Slope, Relative Slope Position, Drainage Basins, Closed Depression, Slope Aspect, Convergence Index, Channel Length, Multi-resolution Valley Bottom Flatness Index, Multi-resolution index of ridge top flatness, Modified Catchment Area, Output, Variance, Sunset, Sunrise, Day Length, Bands Sensor, Salinity Index, Gypsum Index, Brightness Index, Carbonate Index, Clay Index, Normalized Difference Vegetation Index. These environmental covariates were statistically analyzed and the values with the highest R^2 , CV and the lowest RMSE were evaluated as favorable environmental data. Based on these results, bands 2, 3, 4 and 8 were introduced as the best bands of Landsat 8 satellite images to evaluate environmental covariates. The selection of environmental data is of special importance in the preparation of digital maps by co-kriging method, on this basis, in this study, the identification of suitable environmental data for the preparation of digital soil maps in Tehran province was targeted.

Results and Discussion: Based on the results of the present study, out of 49 environmental data reviewed, based on statistical analysis, 14 favorable environmental data were selected. Thus, it is concluded that in preparing a digital soil map, to ensure the accuracy of generalization of laboratory measurement results of soil samples to similar areas, DEM, Slope, CNBL, VDCN, Landforms, Texture, Valley Depth can be used, Convergence Index, MRVBF, MRRTF, TWI, Drainage Basins, Channel and Brightness Index were used as desirable auxiliary data in soil studies in the geographical area of Tehran province. This study showed consistency with previous studies in this field regarding correlation coefficients (Zeinali et al., 2016) and (Darstani Farahani et al., 2016).

Conclusion: In another study, bands 1 to 5 and 7 of the TM sensor were found to be suitable for preparing soil salinity maps, which was consistent with the results of this study (Zeinali et al., 2016). The results of these study use to future soil research.

Keywords: Environmental Covariates, Digital Map, Soil, SAGA, GIS, Tehran.

Citation:

Sadeghi Pour Marvi, M.,
Determination of Optimum
Geo-Morphometric
Parameters to Digital Soil
Map (Case Study: Tehran
Province, Iran), *Iran J Remote
Sens GIS*. 17(2):171-190.

* Corresponding Author: msadeghipour@ut.ac.ir
DOI: <https://doi.org/10.48308/gisj.2025.230044.1138>

Received: 2023.01.02
Accepted: 2025.04.13



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.



شناسایی پارامترهای ژئومورفومتری مناسب برای تهیه نقشه رقومی خاک (مطالعه موردی: استان تهران)

مهدی صادقی پور مروی^۱

سمت

مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان تهران، ورامین، ایران

چکیده

سابقه و اهداف: امروزه، برای تهیه نقشه‌های رقومی خاک، از پارامترهای ژئومورفومتری موسوم به متغیرهای محیطی استفاده می‌شود و با استفاده از این داده‌ها، نتایج آزمون خاک به مناطق مشابه تعمیم می‌یابد. بدین منظور، یافتن متغیرهای محیطی مطلوب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از آنجاکه درک تغییرات در فرایندهای سطح زمین مستلزم شناسایی همه‌جانبه متغیرهای محیطی آن است (Bishop et al., 2012)، این تغییرات اغلب از تغییر در مورفولوژی، ساختار، ترکیب، گذشت زمان و فعالیت‌های انسان ناشی می‌شود (Bishop et al., 2003) و با توجه به اهمیت انتخاب متغیرهای محیطی مناسب برای افزایش دقت در تهیه نقشه‌ای رقومی با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی، این پژوهش به دنبال شناسایی و معرفی این متغیرهای محیطی مناسب براساس تحلیل داده‌ها و بر مبنای آزمون‌های آماری متغیر است تا، بر این اساس، نقشه‌های رقومی با دقت مطلوب، در محدوده جغرافیایی استان تهران تهیه شود. علاوه بر این استفاده محققان دیگر از نتایج این پژوهش و متغیرهای محیطی معرفی شده در آن موجب به کارگیری متغیرهای اولیه یکسان در تهیه نقشه‌های رقومی متفاوت می‌شود و در نتیجه، امکان مقایسه بهتری میان نقشه‌های رقومی متفاوت وجود خواهد داشت. اهمیت این پژوهش در مهم بودن بررسی این عوامل است و نتایج پژوهشی در این زمینه قبلاً در استان تهران انتشار نیافته است؛ از این رو برای تهیه نقشه رقومی در مطالعات آتی می‌توان از آنها بهره برد.

مواد و روش‌ها: هدف این پژوهش تعیین متغیرهای محیطی مناسبی است که بتوان از آنها برای مدل‌سازی برای تهیه نقشه رقومی خاک در استان تهران استفاده کرد. در پژوهش حاضر، باندهای تصاویر ماهواره‌ای سنجنده OLI/TIRS و نقشه رقومی ارتفاع استان تهران با استفاده از نرم‌افزارهای جی. آی. اس. مورد پردازش اولیه قرار گرفت. ۴۹ داده محیطی، شامل مدل رقومی ارتفاع یا DEM، شاخص آنالیز تپه، شاخص شکل زمین، شاخص بافت خاک، شاخص تجمع جریان، شاخص حفاظت، Clusters، مقطع عمودی انحناء، شاخص انحنای طولی، شاخص فاکتور LS، شاخص فاصله عمودی تا شبکه کانال، شاخص خیزی توپوگرافیک، شاخص سطح پایه شبکه کانال، شاخص عمق دره، شاخص شیب حوضه آبخیز، شاخص شیب، شاخص وضعیت شیب نسبی، شاخص حوضه‌های زهکش، Closed Depression، شاخص جهت شیب، شاخص همگرایی، شاخص طول کانال، Multi-resolution Valley Bottom Flatness Index، Multi-resolution index of ridge top flatness، Output، Modified Catchment Area، شاخص واریانس، شاخص زمان طلوع و غروب خورشید، شاخص طول روز، شاخص حسگر باندها، شاخص شوری خاک، شاخص گچ خاک، شاخص درخشندگی، شاخص کربنات خاک، شاخص رس خاک و شاخص نرمال‌شده پوشش گیاهی، تحلیل آماری شدند و مقادیر دارای بیشترین R^2 ، CV و کمترین RMSE به‌منزله عوارض زمین مطلوب ارزیابی شد.

نتایج و بحث: براساس نتایج این پژوهش، باندهای ۲، ۳، ۴ و ۸ بهترین باندهای تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸، برای ارزیابی متغیرهای محیطی بودند. همچنین نقشه رقومی ارتفاع، شیب، فاصله عمودی تا شبکه کانال، سطح پایه شبکه کانال، لندفرم، بافت، طول دره، شاخص انحناء، شاخص تسطیح کف دره، شاخص تسطیح بالای پشته، شاخص خیزی توپوگرافیک، حوضه‌های زهکش، طول کانال و شاخص درخشندگی با عنوان چهارده داده محیطی مناسب برای استفاده در مدل‌سازی به‌منظور تهیه نقشه رقومی خاک معرفی شدند. این پژوهش، در زمینه ضرایب همبستگی، با پژوهش‌های قبلی در این باره هم‌خوانی دارد.

نتیجه‌گیری: در تحقیقی دیگر، باندهای ۱ تا ۵ و ۷ سنجنده TM برای تهیه نقشه شوری خاک مناسب تشخیص داده شدند که با نتایج این پژوهش هم‌خوانی دارد (Zeinali et al., 2016). نتایج این پژوهش برای تحقیقات آتی در زمینه خاک کاربرد دارد.

واژه‌های کلیدی: متغیرهای محیطی، نقشه رقومی، خاک، SAGA، GIS، تهران.

استناد:

صادقی پور مروی، م. شناسایی پارامترهای ژئومورفومتری مناسب برای تهیه نقشه رقومی خاک (مطالعه موردی: استان تهران)، نشریه سنجش از دور و GIS ایران، سال ۱۷، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴: ۱۷۱-۱۹۰.



۱- مقدمه

امروزه از پارامترهای ژئومورفومتری، موسوم به متغیرهای محیطی، برای تهیه نقشه رقومی خاک استفاده می‌شود. عوارض زمین مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای باید ابتدا ارزیابی آماری شوند تا بتوان از آنها در مدل‌سازی و شبیه‌سازی پدیده‌هایی مانند سیل، ریزگرد، و نیز در شناسایی خاک‌های شور و قلیا، تهیه نقشه رقومی حاصل‌خیزی خاک و مناطق نیازمند عملیات آب‌خیزداری استفاده کرد (Adhikari et al., 2013). این متغیرهای محیطی در تعیین الگوی نمونه‌برداری محیطی (آب، خاک، گیاه، زمین، ...)، در روش مشروط فرامکعب لاتین^۱، نیز کاربرد گسترده‌ای دارد (Malone et al., 2019). سهولت استخراج متغیرهای محیطی با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای و دقت بالا و امکان تکرارپذیری مراحل استخراج این داده‌ها نیز از دیگر دلایل کاربرد فراوان آنها در پژوهش‌های علوم محیطی بوده است (Godinho Silva et al., 2015). بدین ترتیب، انتخاب متغیرهای محیطی مناسب مرحله‌ای مهم و تأثیرگذار

در صحت و دقت نقشه‌های رقومی محسوب می‌شود و هر خطایی در این مرحله به کاهش شاخص‌های ارزیابی آماری نقشه منجر خواهد شد (Gao et al., 2016). باید در نظر داشت متغیرهایی محیطی که بیشترین همبستگی را با عوامل تشکیل‌دهنده خاک دارند، موجب افزایش دقت در تهیه نقشه رقومی خاک خواهند شد (Weber et al., 2020; Nussbaum et al., 2018). بر این مبنا، در پژوهشی برای ارزیابی شوری خاک، از عوامل گوناگونی همچون شاخص نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI)^۲، رس، شوری، گچ و کربنات استفاده شد (Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2014). در پژوهشی دیگر، برای ارزیابی ویژگی‌های شیمیایی خاک مانند pH و ظرفیت تبادل کاتیونی و ماده آلی، از عواملی همچون شیب، TPI، curvature^۳، شاخص خیزی توپوگرافیک (TWI)^۴، MRVBF^۵ استفاده شد (Nussbaum et al., 2018). جدول ۱ برخی متغیرهای محیطی مناسب برای رسم نقشه رقومی در منابع گوناگون را نشان می‌دهد.

جدول ۱. برخی متغیرهای محیطی مورد استفاده در منابع

منبع	متغیرهای محیطی مناسب برای رسم نقشه رقومی
Taghizadeh-Mehrjardi et al. (2014)	NDVI، رس، شوری، گچ و کربنات
Taghizadeh-Mehrjardi et al. (2014)	Topographic Wetness Index, Normalized Difference Vegetation Index, Clay Index, Carbonate Index, Gypsum Index, Salinity Index Brightness Index
Nussbaum et al. (2018)	slope, curvature, TPI, TWI, MRVBF
Szatmári et al. (2015)	Slop, Slop length, aspect, LS ^۶ Factor, Topographic Wetness Index, Vertical Distance to Channel Network
Dharumarajan et al. (2022)	precipitation, maximum temperature, and minimum temperature
	distance to the sea, distance to water bodies, soil type, geology, land use, rainfall, altitude, and slope
Zeinali et al. (2016) & Darestani Farahani et al. (2016)	باندهای تصاویر ماهواره TM و مادیس

1. Conditioned Latin Hypercube Sampling
2. Normalized Difference Vegetation
3. Topographic Position Index
4. Topographic Wetness Index
5. Multi-Resolution Valley Bottom Flatness
6. Length of Slope

شاخص شیب^{۱۴}، شاخص وضعیت شیب نسبی^{۱۵}، شاخص حوضه‌های زهکش^{۱۶}، Closed Depression، شاخص جهت شیب^{۱۷}، شاخص همگرایی^{۱۸}، شاخص طول کانال^{۱۹}، Multi-resolution Valley Bottom Flatness Index، Multi-resolution index of ridge، Flatness Index، Modified Catchment Area، top flatness، شاخص خروجی^{۲۰}، شاخص واریانس^{۲۱}، شاخص زمان طلوع و غروب خورشید^{۲۲}، شاخص طول روز^{۲۳}، شاخص حسگر باندها^{۲۴}، شاخص شوری خاک^{۲۵}، شاخص گچ خاک^{۲۶}، شاخص درخشندگی^{۲۷}، شاخص کربنات خاک^{۲۸}، شاخص رس خاک^{۲۹} و شاخص نرمال‌شده پوشش گیاهی (که در جدول ۳ مطرح شده‌اند)، با استفاده از نرم‌افزار SAGA جی. آی. اس. استخراج شدند. سپس این متغیرها با استفاده از نرم‌افزار SAS ارزیابی آماری شدند و پارامترهای ضریب همبستگی و RMSE و R2 در مدل‌ها محاسبه شد. متغیرهایی با حداکثر واریانس ویژگی‌ها انتخاب شد. چهار مرحله اجرای این پژوهش، شامل آماده‌سازی، پردازش، محاسبه و آنالیز متغیرهای محیطی، در ادامه بیان می‌شود.

درک تغییرات در فرایندهای سطح زمین مستلزم شناسایی همه‌جانبه متغیرهای محیطی آن است (Bishop et al., 2012). همچنین این تغییرات اغلب از تغییر در مورفولوژی، ساختار، ترکیب، گذشت زمان و فعالیت‌های انسان ناشی می‌شود (Bishop et al., 2003) و انتخاب متغیرهای محیطی مناسب برای افزایش دقت در تهیه نقشه‌ای رقومی، با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی، اهمیت بسیاری دارد؛ از این رو این پژوهش در پی شناسایی و معرفی این متغیرهای محیطی مناسب براساس تحلیل داده‌ها و بر مبنای آزمون‌های آماری متغیر است تا، بر این مبنای نقشه‌های رقومی با دقت مطلوب در محدوده جغرافیایی استان تهران تهیه شود. علاوه بر این، در صورت استفاده محققان دیگر از نتایج این پژوهش و متغیرهای محیطی معرفی شده در آن، متغیرهای اولیه یکسانی در تهیه نقشه‌های رقومی گوناگون به کار می‌رود و در نتیجه، امکان مقایسه بهتری میان این گونه نقشه‌ها پدید خواهد آمد. اهمیت این پژوهش در مهم بودن بررسی این عوامل است و اینکه پیش‌تر در استان تهران، در این زمینه، نتایج پژوهشی انتشار نیافته و بنابراین، برای تهیه نقشه رقومی در مطالعات آتی، می‌توان از آنها بهره برد.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، متغیرهای محیطی قابل استخراج از تصاویر ماهواره‌ای و سیستم اطلاعات جغرافیایی، در محدوده جغرافیایی استان تهران، مورد پردازش اولیه قرار گرفت و براساس آنها مدل‌سازی انجام شد. ابتدا متغیرها، شامل مدل رقومی ارتفاع (DEM)^۱، شاخص آنالیز تپه^۲، شکل زمین^۳، بافت خاک^۴، شاخص تجمع جریان^۵، شاخص حفاظت خاک^۶، Clusters، مقطع عمودی انحنای^۷، شاخص انحنای طولی^۸، شاخص فاکتور LS^۹، شاخص فاصله عمودی تا شبکه کانال^{۱۰}، شاخص خیزی توپوگرافیک، شاخص سطح پایه شبکه کانال^{۱۱}، شاخص عمق دره^{۱۲}، شاخص شیب حوضه آبخیز^{۱۳}،

- | | |
|--|-----------------------------|
| 1. Digital Elevation Model | 2. Analytical Hillshading |
| 3. Landforms | 4. Texture |
| 5. Flow Accumulation | 6. Protection Index |
| 7. Cross-Sectional Curvature | |
| 8. Longitudinal Curvature | |
| 9. LS Factor | |
| 10. Vertical Distance to Channel Network | |
| 11. Channel Network Base Level | |
| 12. Valley Depth | 13. Catchment Slope |
| 14. Slope | 15. Relative Slope Position |
| 16. Drainage Basins | 17. Slope Aspect |
| 18. Convergence Index | 19. Channel Length |
| 20. Output | 21. Variance |
| 22. Sunset & Sunrise | 23. Day Length |
| 24. Bands Sensor | 25. Salinity Index |
| 26. Gypsum Index | 27. Brightness Index |
| 28. Carbonate Index | 29. Clay Index |

مرحله اول: استخراج متغیرها

موقعیت محل مورد نظر، در این پژوهش، محدوده جغرافیایی استان تهران است؛ شکل ۱ موقعیت جغرافیایی استان تهران در ایران را نشان می‌دهد. مکان مورد نظر در بخش‌های شمالی رشته‌کوه‌های البرز و با آب‌وهوایی معتدل قرار دارد و در بخش‌های جنوبی آن نیز که به کویر نزدیک است، اقلیم گرم‌وخشک حکم‌فرماست. شیب منطقه به‌طور کلی در جهت شرق به غرب است. براساس توپوگرافی آن، ارتفاعات

اغلب در شمال و شرق دیده می‌شود و دشت‌های مسطح بیشتر در جنوب قرار گرفته است. یازده باند تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ (سال ۲۰۲۲)، متعلق به سنجنده OLI_TIRS و همچنین مدل رقومی ارتفاع استان تهران در سیستم Universal Transfer Mercator (UTM)، با قدرت تفکیک ۵۰ متر، تعداد پیکسل ۵۴۵۶۱۵۱ و طول موج‌های متفاوت، از وب‌سایت زمین‌شناسی امریکا (www.usgs.gov) دانلود شد. مشخصات این باندها در جدول ۲ آمده است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در ایران

جدول ۲. مشخصات باندهای تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ سنجنده OLI_TIRS

قدرت تفکیک			قدرت تفکیک		
طول موج (μm)	شماره باند	(بارزسازی)	طول موج (μm)	شماره باند	(بارزسازی)
۲/۳۰۰-۲/۱۰۰	۷	۳۰ m	۰/۴۵۳-۰/۴۳۳	۱	۳۰ m
۰/۶۸۰-۰/۵۰۰	۸	۱۵ m	۰/۵۱۵-۰/۴۵۰	۲	۳۰ m
۱/۳۹۰-۱/۳۶۰	۹	۳۰ m	۰/۶۰۰-۰/۵۲۵	۳	۳۰ m
۱۱/۲-۱۰/۶	۱۰	۱۰۰ m	۰/۶۸۰-۰/۶۳۰	۴	۳۰ m
۱۲/۵-۱۱/۵	۱۱	۱۰۰ m	۰/۸۸۵-۰/۸۴۵	۵	۳۰ m
			۱/۶۶۰-۱/۵۶۰	۶	۳۰ m

مرحله دوم: آماده سازی متغیرها

فرایند آماده سازی متغیرهای مورد استفاده در این پژوهش (جدول ۳) در محیط سامانه جغرافیایی SAGA^۱ (Conrad et al., 2015) انجام شد. ابتدا، با استفاده از دستور Fill Sink، مقادیر متغیرهای نامتعارف اصلاح شد و سپس متغیرهای نامتعارف، از طریق دستور Simple Filter، فیلتر شد. در مرحله نهایی نیز، با دستور نمونه گیری مجدد^۲، اندازه پیکسل ها اصلاح شد و به ۵۰ متر رسید.

مرحله سوم: محاسبه سایر داده ها

در این مرحله، با استفاده از مدل رقومی ارتفاع و یازده باند سنجنده OLI_TIRS که در مرحله قبل آماده شده بود، ۴۹ متغیر با استفاده از نرم افزار SAGA GIS استخراج شد. این داده ها شامل X، Y (طول و عرض جغرافیایی برحسب سیستم تصویر UTM)، ارتفاع، و یازده باند سنجنده OLI_TIRS می شد که در جدول ۳، مشخصات این داده ها آمده است.

جدول ۳. متغیرهای مورد استفاده

منبع / تعریف عامل	پارامترهای سطحی اراضی	متغیرهای محیطی
X = longitude, Y = latitude in UTM system, zone 39S	Grid data (X, Y)	عوارض زمین نشانگرها
مدل رقومی ارتفاع: ارتفاع بالای سطح دریای آزاد (متر) (Tajik et al., 2012; Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2014)	DEM	
زاویه میان سطح شیب و اشعه نور تابیده شده در محل (برحسب رادیان)	Analytical Hillshading	
شکل زمین (Zawawi et al., 2014)	Landforms	
بافت (Bock et al., 2007)	Texture	
(Amirian-Chakan et al., 2019)	Flow Accumulation	
(Kaneda & Chiba, 2019)	Protection Index	
(Köthe & Boc, 2006)	Clusters	
(Blaga, 2012)	Cross-Sectional Curvature	
زاویه میان سطح شیب و aspect direction (Guo, 2018)	Longitudinal Curvature	
عامل طول شیب در معادله جهانی فرسایش خاک (Szatmári et al., 2015)	LS Factor	
فاصله عمودی تا شبکه کانال	Vertical Distance to Channel Network VDCN	
شاخص خیزی توپوگرافیک: معیاری برای تجمع رطوبت (Tajik et al., 2012; Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2014)	Topographic Wetness Index, TWI	
اختلاف ارتفاع شبکه کانال (Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2014)	Channel Network Base Level	
طول دره: شاخص نسبت پهنای دره به عمق دره (Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2014; et al., 2014;	Valley Depth, VD	

1. System for Automated Geoscientific Analyses 2.2.7

2. Resampling

ادامه جدول ۳

متغیرهای محیطی	پارامترهای سطحی اراضی	منبع / تعریف عامل
	Catchment Slope, CS	متوسط میزان گرادیان بالای مسیر جریان (Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2014; Amirian-Chakan et al., 2019)
	Slope	زاویه بین سطح تماس و سطح افقی در یک نقطه از سطح زمین (Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2014; Guo, 2018)
	Relative Slope Position, RSP	(Bock et al., 2007)
	Drainage Basins, DB	(Parmar, 2019)
	Closed Depression, CD	حوضه‌های زهکش
	Slope Aspect, SA	جهت: بیشترین سرعت تغییر در ارتفاع در هر سلول مدل رقومی ارتفاع (Tajik et al., 2012; Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2014; Guo, 2018)
	Convergence Index, CI	شاخص انحنا: شکل کلی دامنه کوه در تمامی جهات (مقعر، مستطیل یا محدب) (Tajik et al., 2012)
	Channel Length	طول کانال (Parmar, 2019)
	Multi-resolution Valley Bottom Flatness Index, MRVBF	شاخص تسطیح کف دره: معیاری برای مسطح بودن اراضی (Gallant & Dowling, 2003)
	Multi-resolution index of ridge top flatness, MRRTF	شاخص تسطیح بالای پشته: شاخص توپوگرافیک برای شناسایی مناطق مسطح (Amirian-Chakan et al., 2019)
	Modified Catchment Area, MCA	شاخصی برای جریان تجمعی و پارامترهای مرتبط (Amirian-Chakan et al., 2019)
	Output	
	Variance	(Bock et al., 2007)
	Sunset	(Jochem et al., 2010)
	Sunrise	(Brenning et al., 2018)
	Day Length, DL	طول روز طی یک فصل (ساعت) (Forkuo & Nketia, 2011)
Remote Sensing Data	Bands Sensor OLI_TIRS	www.usgs.gov
	Salinity Index, SI	$[(B3-B4)/(B2+B4)]$ (Metternicht & Zinck, 2003)
	Gypsum Index, GI	$[(B5-B4)/(B5+B4)]$ (Nield et al., 2007)
	Brightness Index, BI	$[(B3)^2+(B4)^2]^{0.5}$ (Metternicht & Zinck, 2003)
	Carbonate Index, CarI	$B3/B2$ (Boettinger et al., 2008)
	Clay Index, ClayI	$B5/B7$ (Boettinger et al., 2008)
	Normalized Difference Vegetation Index, NDVI	$[(B4-B3)/(B4+B3)]$
		شاخصی برای بیان تفاوت میان باندهای فروسرخ (Boettinger et al., 2008)

* برای نرمال شدن متغیرهای شاخص شوری و گچ خاک، فرمول محاسبه آنها به ترتیب، به این صورت اصلاح شده است:

$$\frac{[(B3-B4)/(B2+B4)]^{0.5}}{[(B5-B4)/(B5+B4)]+(0.5810)}$$

مرحله چهارم: تحلیل متغیرها

با استفاده از نرم افزارهای SAS و JMP، آنالیز شاخص‌های آماری باندهای تصاویر ماهواره لندست-۸ ارزیابی شد. ارزیابی سنجنده OLI_TIRS نیز براساس عوامل ضریب همبستگی و هیستوگرام توزیع فراوانی انجام شد. برای انتخاب داده‌های نرمال، توزیع فراوانی آنها بررسی شد. از میان داده‌های نرمال، آنهایی که بیشترین مقادیر CV و R^2 و کمترین مقادیر RMSE را داشتند به منزله پارامتر مناسب انتخاب شدند (Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2014).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{ave})(P_i - P_{ave})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{ave})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - P_{ave})^2}} \right]^2 \quad \text{رابطه (۱)}$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ارزیابی باندهای سنجنده OLI_TIRS

باندهای تصاویر ماهواره‌ای، با استفاده از نرم افزار JMP ارزیابی آماری شدند.

الف) ضریب همبستگی و RMSE میان باندهای تصاویر ماهواره‌ای

جدول ۴ ضرایب همبستگی و RMSE میان باندهای تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ را نشان می‌دهد.

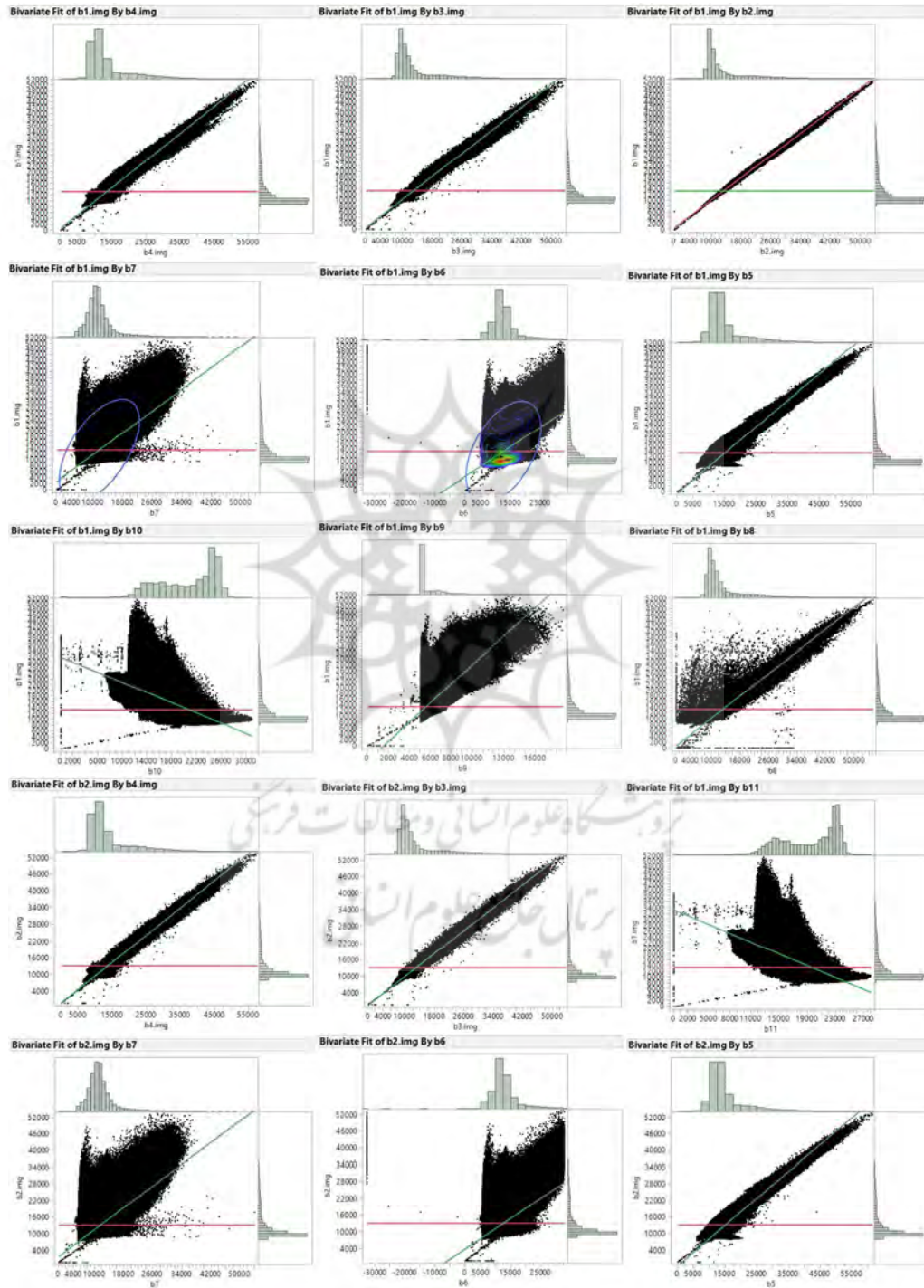
براساس جدول ۴، همبستگی (۱ و ۲)، (۱ و ۳)، (۱ و ۴) و (۱ و ۸)، (۲ و ۳)، (۲ و ۴)، (۲ و ۸)، (۳ و ۴)، (۳ و ۸) و (۴ و ۸) و (۱۰ و ۱۱) بیشترین R^2 و کمترین RMSE را داشتند.

جدول ۴. ضرایب همبستگی و RMSE میان باندهای تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸

شماره باند تصاویر ماهواره‌ای		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11
B1	R^2	۱	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۲	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۹۷	۰/۴۰	۰/۴۹	۰/۴۸
	RMSE		۲۱۲	۶۴۰	۹۷۴	۱۵۸۶	۵۰۱۷	۴۶۹۲	۸۹۵	۴۴۳۶	۴۰۶۸	۴۱۲۰
B2	R^2		۱	۰/۹۹	۰/۹۷	۰/۹۳	۰/۳۴	۰/۳۴	۰/۹۸	۰/۳۸	۰/۴۷	۰/۴۶
	RMSE			۵۱۰	۸۴۷	۱۵۳۱	۵۱۹۴	۴۸۴۴	۷۷۷	۴۶۷۰	۴۳۲۱	۴۳۷۲
B3	R^2			۱	۰/۹۹	۰/۹۵	۰/۲۷	۰/۳۷	۰/۹۸	۰/۳۷	۰/۴۳	۰/۴۲
	RMSE				۴۰۳	۱۲۵	۴۹۱۲	۴۵۳۶	۶۲۰	۴۵۵۷	۴۳۲۹	۴۳۷۳
B4	R^2				۱	۰/۹۶	۰/۲۹	۰/۴۱	۰/۹۸	۰/۳۵	۰/۴۰	۰/۳۹
	RMSE					۱۱۴۲	۵۰۹۴	۴۶۶۰	۶۷۰	۴۸۶۵	۴۶۹۵	۴۷۳۶
B5	R^2					۱	۰/۳۵	۰/۴۷	۰/۹۵	۰/۳۷	۰/۳۵	۰/۳۴
	RMSE						۷۴۶۰	۴۲۹۴	۱۳۱۸	۴۷۰۶	۴۷۷۲	۴۸۰۴
B6	R^2						۱	۰/۷۸	۰/۳۷	۰/۲۳	۰/۰۴	۰/۰۴
	RMSE							۱۸۷۵	۳۴۸۵	۳۵۷۸	۴۰۰۵	۴۰۰۶
B7	R^2							۱	۰/۳۸	۰/۳۲	۰/۰۶	۰/۰۶
	RMSE								۲۸۰۴	۲۹۲۴	۳۴۴۰	۳۴۴۱
B8	R^2								۱	۰/۳۶	۰/۴۲	۰/۴۱
	RMSE									۸۸۵	۳۴۹۶	۳۰۱۱
B9	R^2									۱	۰/۵۱	۰/۵۰
	RMSE										۷۷۲	۷۷۷
B10	R^2										۱	۰/۹۹
	RMSE											۲۹۷
B11	R^2											۱
	RMSE											

ب) هیستوگرام توزیع فراوانی

شکل ۲ توزیع فراوانی داده‌ها، منتج از باندهای تصاویر ماهواره‌ای را نشان می‌دهد.

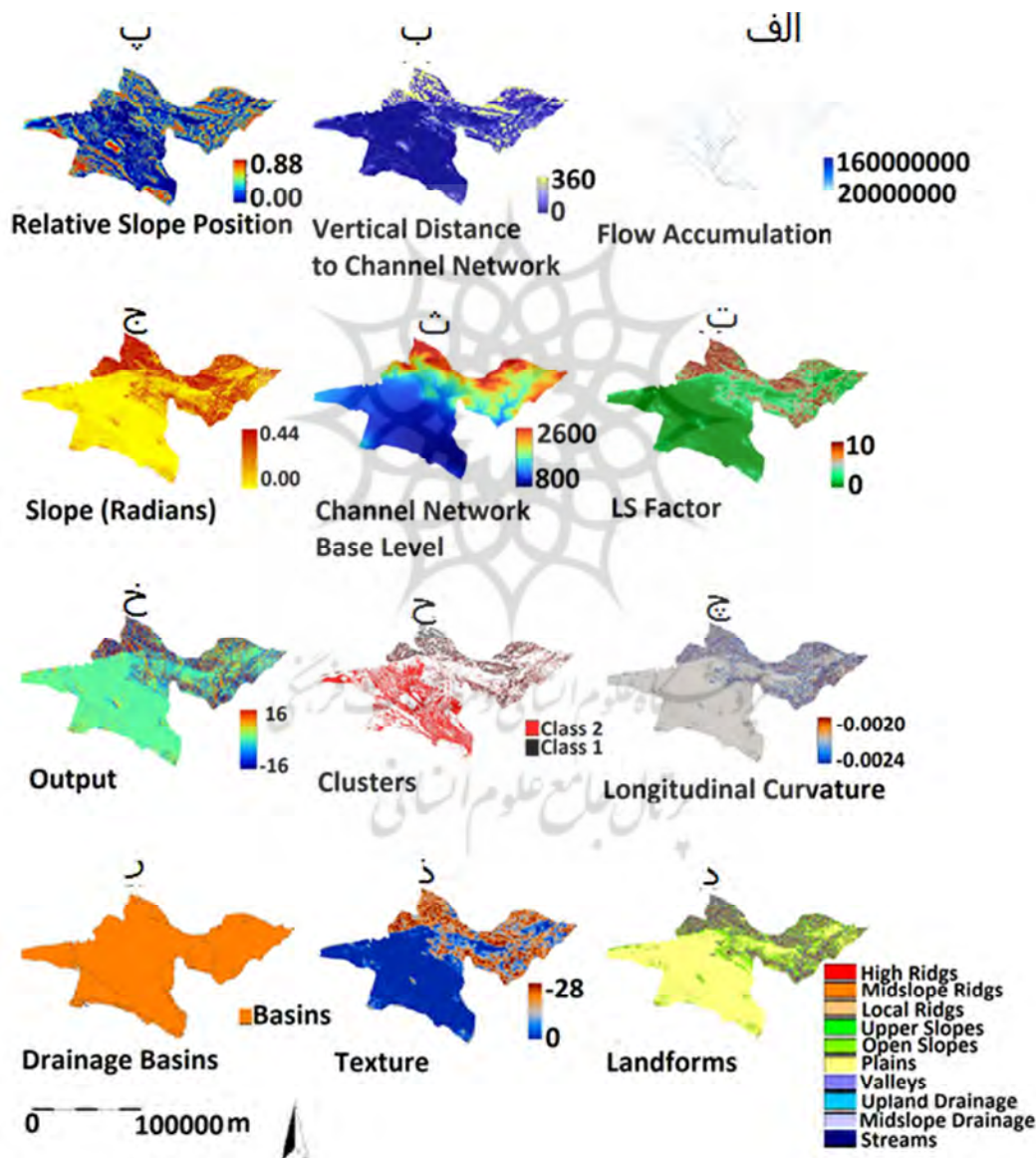


شکل ۲. توزیع فراوانی درجات روشنایی باندها، منتج از باندهای تصاویر ماهواره‌ای

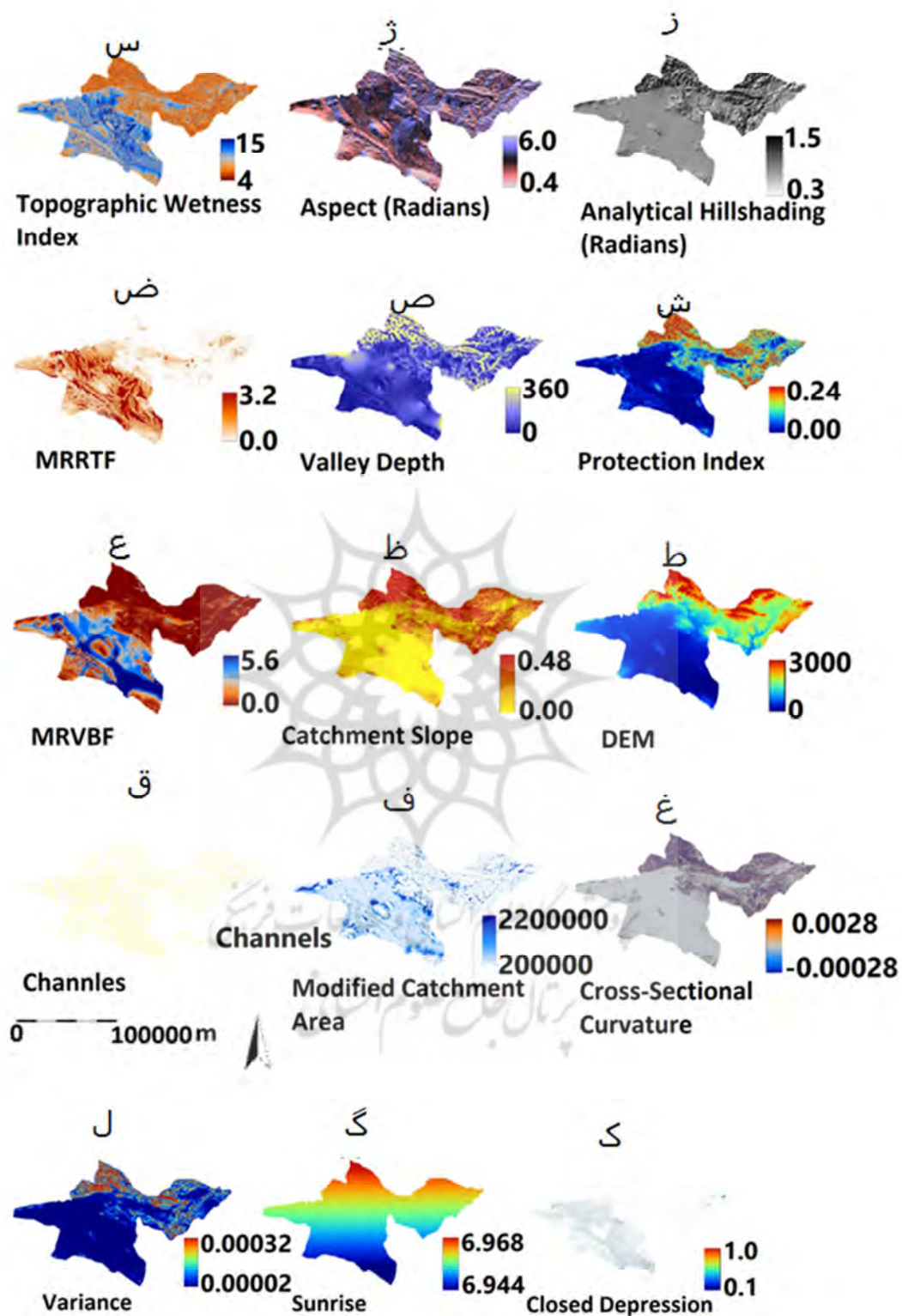
۲-۳- ارزیابی متغیرهای محیطی

برای ارزیابی متغیرها، از ارزیابی هیستوگرام توزیع فراوانی و همچنین تحلیل آماری متغیرها استفاده شد که، در ادامه، توضیح داده می‌شود. شکل ۳ نقشه متغیرهای محیطی استان تهران را دربردارد که با استفاده از نرم افزار SAGA GIS ترسیم شده است.

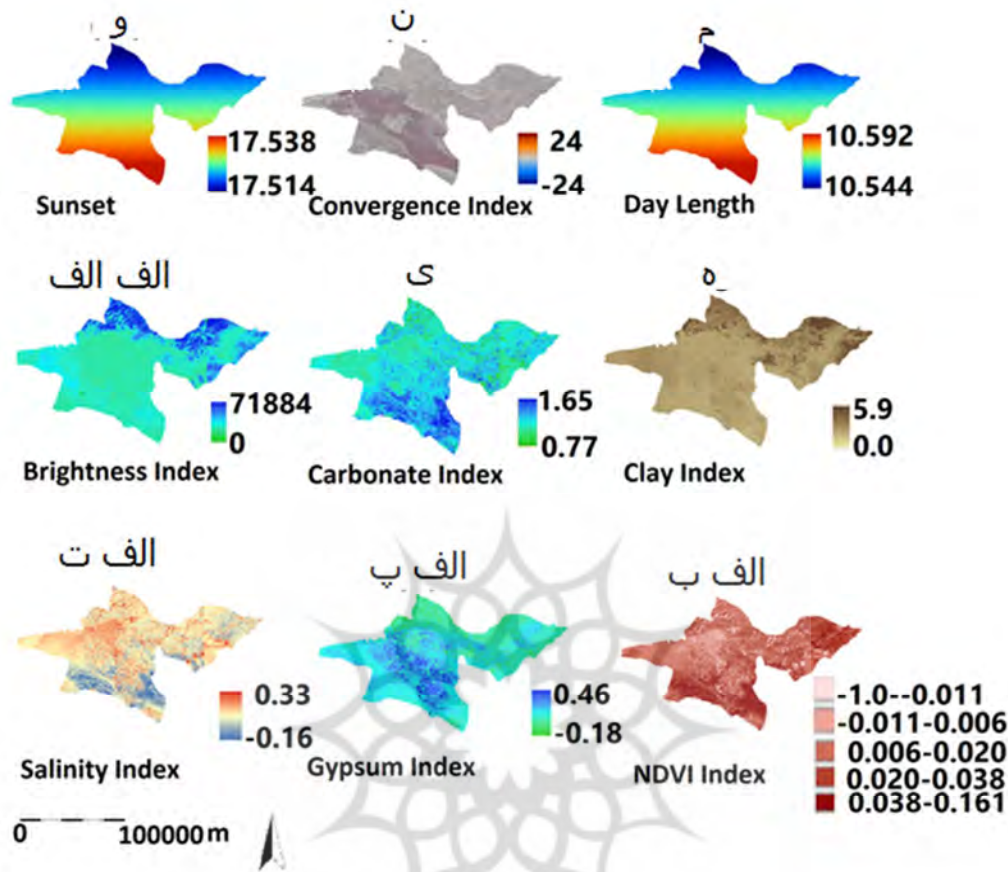
با توجه به اینکه الگوی توزیع فراوانی متغیرها هرچه بیشتر به یکدیگر شباهت داشته باشند، الگوی مناسب‌تری خواهند بود (Taghizadeh- Mehrjardi et al., 2014)، براساس هیستوگرام توزیع فراوانی متغیرهای نشان داده شده در شکل ۲، باندهای ۲، ۳، ۴، ۸ و ۱۱ به منزله بهترین باندهای تصاویر ماهواره‌ای برای ارزیابی متغیرهای محیطی انتخاب شدند.



شکل ۳. نقشه متغیرهای مورد استفاده در این پژوهش



ادامه شکل ۳



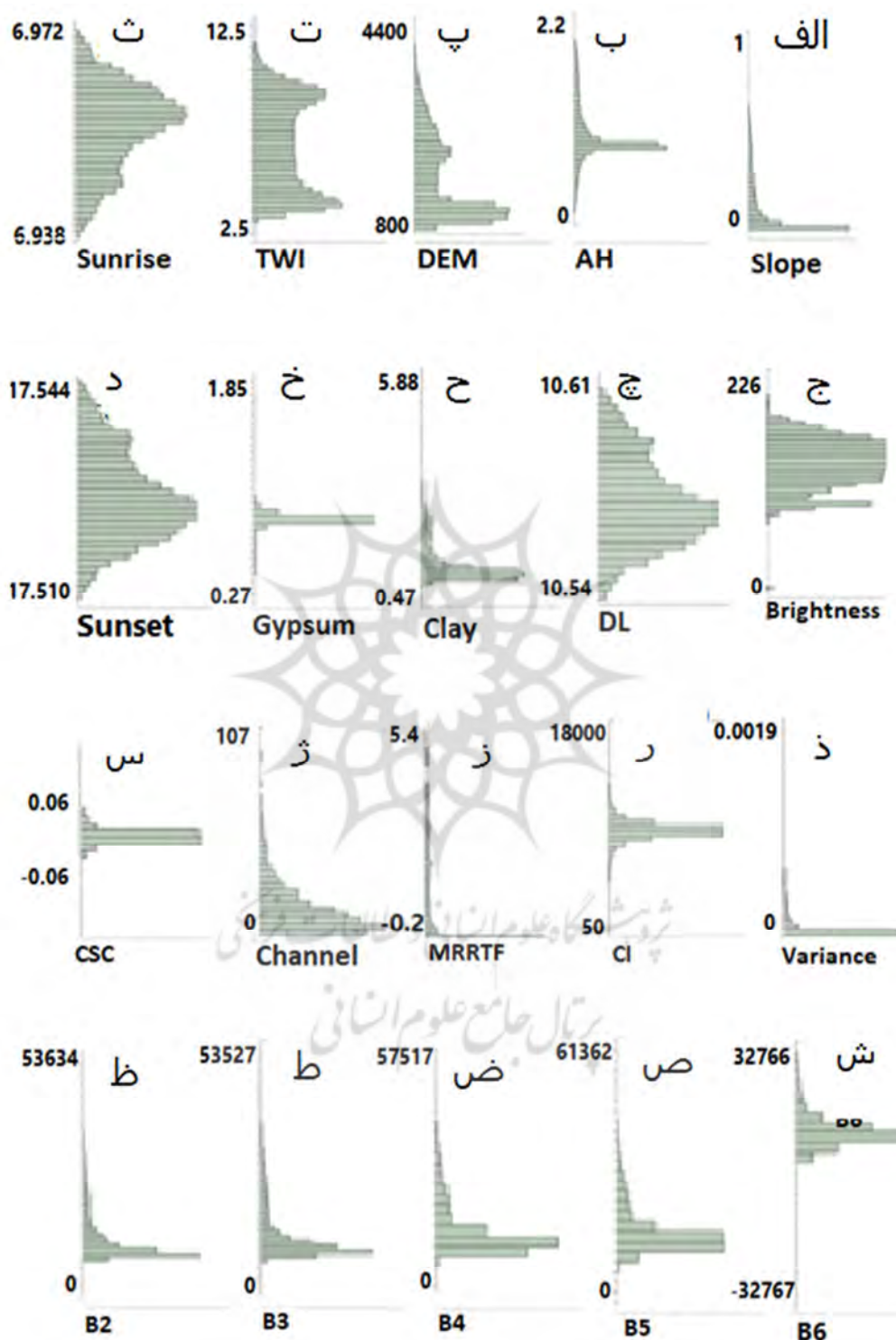
ادامه شکل ۳

۳-۳- توزیع فراوانی متغیرها

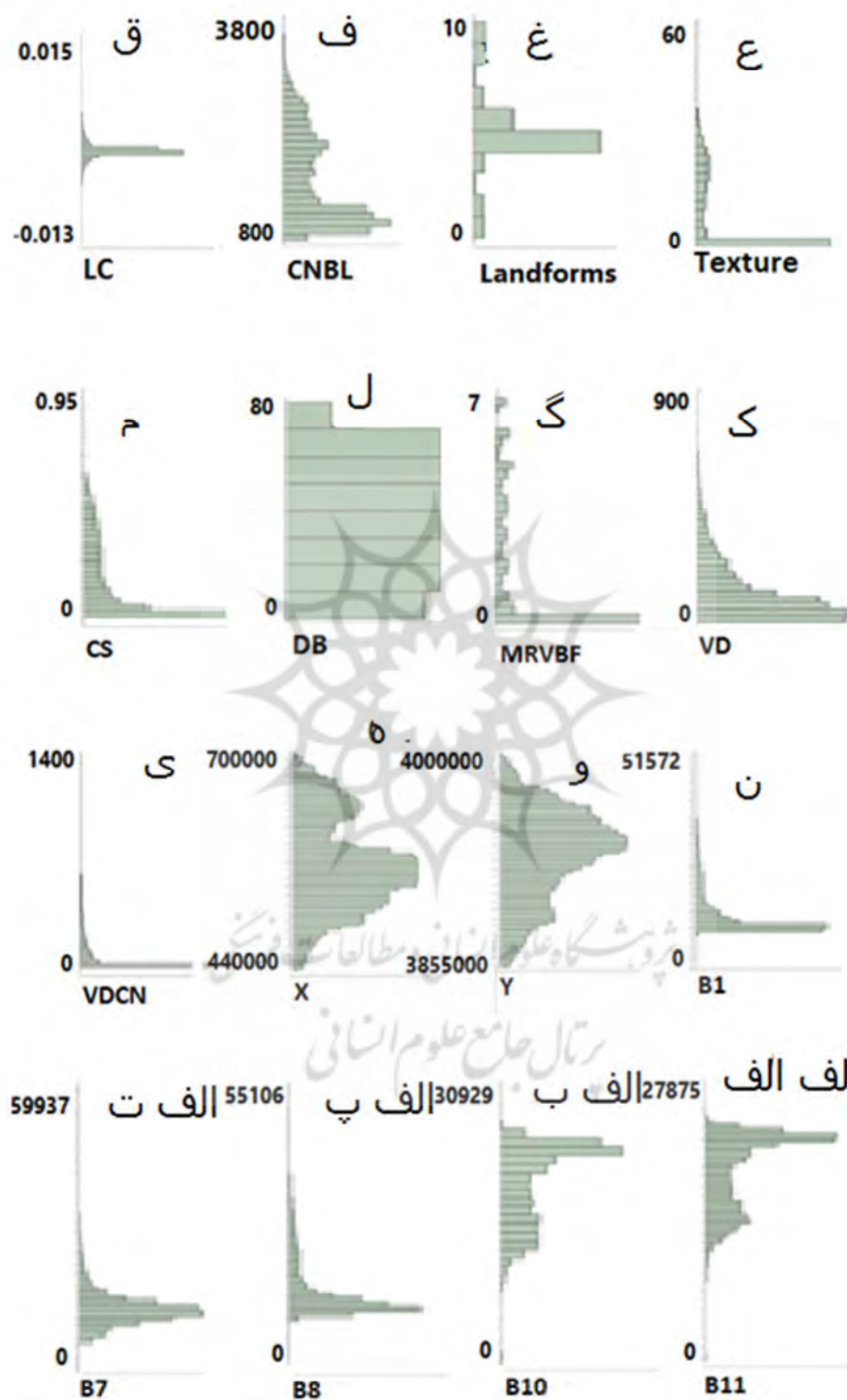
نمودار هیستوگرام توزیع فراوانی متغیرها نرمال بودن داده‌ها را به صورت بصری مشخص می‌کند. بر این مبنا، شکل ۴ نمودارهای هیستوگرام توزیع فراوانی ۳۶ داده نرمال و غیرنرمال را شامل می‌شود.

براساس شکل ۴، پارامترهای مدل رقومی ارتفاع، شاخص آنالیز تپه، شیب، شاخص انحنای طولی، شاخص سطح پایه شبکه کانال، شاخص فاصله عمودی تا شبکه کانال، مقطع عمودی انحناء، شاخص عمق دره، شاخص شیب حوضه آبخیز، MRRTF، MRVBF،

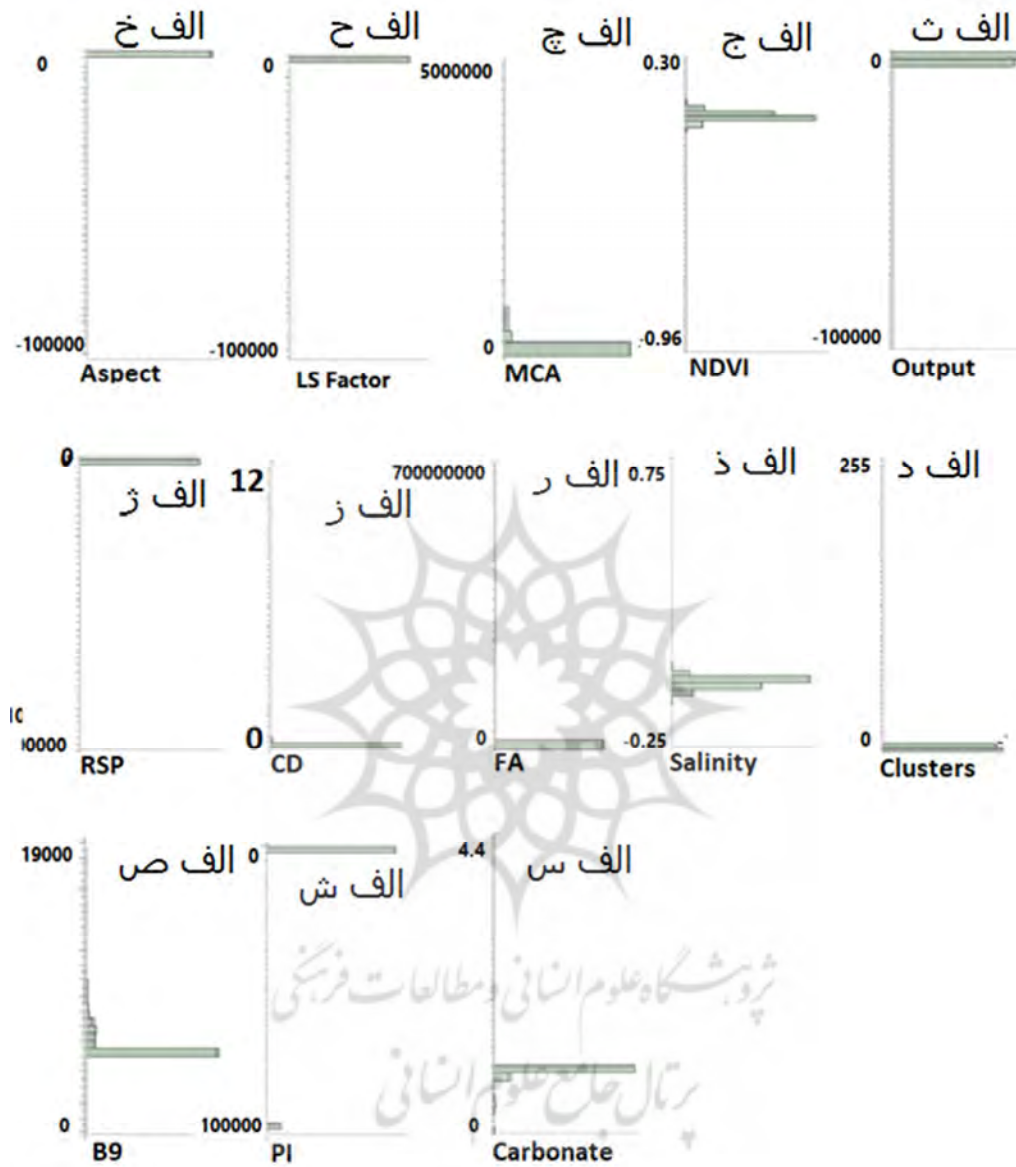
شاخص همگرایی، شاخص شکل زمین، شاخص بافت، شاخص حوضه‌های زهکش، شاخص خیسی توپوگرافیک، شاخص طول کانال، شاخص طلوع خورشید، طول روز، B1، B2، B3، B4، B5، B6، B7، B8، B10، B11، شاخص انحراف معیار، شاخص درخشندگی، شاخص غروب خورشید، شاخص رس خاک و شاخص گچ خاک داده با توزیع نرمال بودند که از آنها برای تعیین الگوی نمونه‌برداری خاک در استان تهران استفاده شده است. در این پژوهش، مطابق شکل ۴، از ۴۹ داده بررسی شده فقط ۳۶ داده نرمال بود.



شکل ۴. توزیع آماری متغیرها



ادامه شکل ۴



ادامه شکل ۴

تحلیل آماری متغیرها

جدول ۶، به ترتیب، آنالیز آماری متغیرهای محیطی غیرنرمال در این پژوهش را نشان می دهد.

جدول ۵، به ترتیب، آنالیز آماری متغیرهای محیطی نرمال در این پژوهش را نشان می دهد.

جدول ۵. آنالیز آماری متغیرهای نرمال

داده‌های مورد بررسی	میان	میانگین	انحراف معیار	حداقل	حداکثر	واریانس	ضریب تغییرات	تعداد پیکسل
مدل رقومی ارتفاع	۱۳۷۳/۷۰	۱۶۲۸/۳۱	۷۲۷/۱۳	۷۶۷/۲۲	۴۳۳۴/۴۹	۵۲۸۷۱۸	۴۴/۳۳	۵۴۵۶۱۵۱
X	۵۶۰۶۳۶	۵۶۶۲۴۹	۵۳۱۵۲	۴۴۱۵۳۶	۶۹۵۰۳۶	۲۸۲۵۱۶۸۸۷۱	۹/۳۸	۵۴۵۶۱۵۱
Y	۳۹۳۸۵۶۸	۳۹۳۴۶۴۸	۲۷۴۷۶۳۷	۳۸۵۸۳۱۸	۳۹۹۹۰۱۸	۷۵۴۹۵۰۸۹۵	۰/۶۹	۵۴۵۶۱۵۱
B1	۱۰۷۸۹	۱۳۵۰۷	۵۷۴۲/۰۶	۰	۵۱۵۷۲	۳۲۹۷۱۲۶	۴۲/۵۱	۵۴۵۶۱۵۱
B2	۱۰۵۷۹	۱۳۲۷۴	۵۹۷۲/۰۱	۰	۵۳۶۳۴	۳۵۶۶۴۹۸۲	۴۴/۹۸	۵۴۵۶۱۵۱
B3	۱۰۶۷۶	۱۲۹۶۹	۵۷۵۷/۶۵	۰	۵۳۵۲۷	۳۳۱۵۰۶۰۶	۴۴/۳۹	۵۴۵۶۱۵۱
B4	۱۱۴۱۱	۱۳۶۱۲	۶۰۶۹/۹۶	۰	۵۷۵۱۷	۳۶۸۴۴۴۲۸	۴۴/۵۹	۵۴۵۶۱۵۱
B5	۱۳۲۳۲	۱۵۰۷۴	۵۹۴۴/۷۶	۰	۶۱۳۶۲	۳۵۳۴۰۲۵۴	۳۹/۴۳	۵۴۵۶۱۵۱
B6	۱۲۰۳۴	۱۲۶۱۸	۴۰۹۰/۷۸	-۳۲۷۶۷	۳۲۷۶۶	۱۶۷۳۴۵۱۹	۳۲/۴۱	۵۴۵۶۱۵۱
B7	۱۱۰۰۷	۱۱۵۴۷	۵۳۶۶/۷۹	۰	۵۹۹۳۷	۱۲۷۲۲۰۰۷	۳۰/۸۸	۵۴۵۶۱۵۱
B8	۱۰۸۸۸	۱۳۱۳۸	۵۸۷۳/۴۱	۰	۵۵۱۰۶	۳۴۴۹۷۰۵۵	۴۴/۷۰	۵۴۵۶۱۵۱
B10	۲۲۱۹۱	۲۰۶۲۹	۴۶۰۱/۲۸	۰	۳۰۹۲۹	۲۱۱۷۱۷۹۴	۲۲/۳۰	۵۴۵۶۱۵۱
B11	۲۰۸۰۸	۱۹۴۳۸	۳۹۲۵/۴۵	۰	۲۷۸۷۵	۱۵۴۰۹۲۱۷	۲۰/۱۹	۵۴۵۶۱۵۱
شاخص آنالیز تپه	۰/۸۱۴۵	۰/۹۱۷۷	۰/۳۳۵۹	۰/۰۰۰۹	۲/۱۹۳۷	۰/۱۱۲۸	۶۰/۳۶	۵۴۵۶۱۵۱
شیب	۰/۰۵۴۹	۰/۱۳۹۰	۰/۱۶۷۰	۰	۱/۰۰۰۷	۰/۰۲۷۹	۱۲۰/۱۳	۵۴۵۶۱۵۱
شاخص انحنای طولی	-۰/۰۰۰۰	-۵/۳۴۱۰	۰/۰۰۱۱	-۰/۰۱۲۰	۰/۰۱۴۷	۰/۰۰۰۰	-۲۲۱۳	۵۴۵۶۱۵۱
CNBL	۱۳۳۲/۳۱	۱۵۴۴/۴۷	۶۲۷/۵۰	۷۶۷/۲۲	۳۸۰۶/۲۱	۳۹۳۸۰۶	۴۰/۶۳	۵۴۵۶۱۵۱
VDCN	۸۵/۱۴	۸۳/۸۴	۱۴۶/۱۲	۰	۱۳۶۴/۲۵	۲۱۳۵۲	۱۷۴/۲۷	۵۴۵۶۱۵۱
شکل زمین	۴	۴/۳۱	۱/۸۳	۰	۹	۳/۳۴	۴۲/۴۵	۵۴۵۶۱۵۱
بافت خاک	۱/۲۹	۸/۳۹	۱۰/۴۶	۰	۵۹/۹۸	۱۰۹/۵۶	۱۲۴/۷۲	۵۴۵۶۱۵۱
CSC	۰/۰۰۰۰	۵/۹۲	۰/۰۰۱۴	-۰/۰۱۵۰	۰/۰۱۶۳	۰/۰۰۰۰	۲۴۷۰/۱۷	۵۴۵۶۱۵۱
عمق دره	۸۶/۴۵	۱۲۶/۳۶	۱۲۳/۱۷	۰	۸۸۱/۴۱	۱۵۱۷۰	۹۷/۴۷	۵۴۵۶۱۵۱
شاخص شیب	۰/۱۰۰۱	۰/۱۶۷۴	۰/۱۶۶۰	۰	۰/۹۵۲۳	۰/۰۲۷	۹۹/۱۴	۵۴۵۶۱۵۱
حوضه آبخیز	۰/۱۸۲۹	-۰/۰۰۰۳	۱۱/۱۱	-۹۹/۱۰	۹۷/۶۸	۱۲۳/۴۳		۵۴۵۶۱۵۱
شاخص همگرایی	۰/۶۷۳۹	۱/۷۸۱۹	۲/۰۹۸۶	۰	۶/۹۸۷۷	۴/۴۰	۱۱۷/۷۷	۵۴۵۶۱۵۱
MRVBF	۰/۱۳۹۳	۰/۸۶۲۴	۱/۲۴	۰	۵/۲۷۸۸	۱/۵۴	۱۴۳/۹۳	۵۴۵۶۱۵۱
MRRTF	۶/۷۲	۶/۷۵	۲/۲۰	۲/۳۷	۱۲/۶۴	۴/۸۶	۳۲/۶۴	۵۴۵۶۱۵۱
TWI	۳۶/۵	۳۶/۵	۲۰/۹۲	۱	۷۲	۴۳۸	۵۷/۳۳	۷۲
شاخص حوضه‌های زهکش	۱۶۹۸/۵۲	۲۳۳۰/۹۱	۲۲۴۲/۴۷	۵۰	۱۷۹۰۰/۹۶	۵۰/۲۸	۹۶/۲۰	۳۱۲۵
شاخص طول کانال	۰/۰۰۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۰۶	۰/۰۰۰۱	۰	۰/۰۰۱	۱/۷×۱۰ ^{-۸}	۲۰۵/۷۶	۵۴۵۶۱۵۱
واریانس	۶/۹۵	۶/۹۹	۰/۰۰۶	۶/۹۳	۶/۹۷	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۹	۵۴۵۶۱۵۱
طلوع	۱۷/۵۲	۱۷/۵۲	۰/۰۰۶	۱۷/۵۱	۱۷/۵۴	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۳	۵۴۵۶۱۵۱
غروب	۱۰/۵۶	۱۰/۵۶	۰/۰۱۳۰	۱۰/۵۳	۱۰/۶۰	۰/۰۰۱	۰/۱۲	۵۴۵۶۱۵۱
طول روز	۰/۸۸۰۵	۰/۸۷۵۲	۰/۰۶۶۰	۰/۲۷۰۵	۱/۸۵۱۵	۰/۰۰۴۳	۷/۵۵	۵۴۴۶۹۷۸
شاخص گچ	۱/۲۰۵۵	۱/۳۶۴۰	۰/۴۴۶۱	۰/۴۷۰۰	۵/۸۸۰۳	۰/۴۳۷۹	۳۸/۹۰	۲۵۵۶۳۱۰
شاخص رس	۱۳۸/۲۵	۱۳۵/۸۰	۲۵/۵۷۳۱	۰	۲۲۶/۳۹	۶۵۳/۹۸	۱۸/۸۳	۵۴۴۶۰۳۲
شاخص درخشندگی								

CNBL, Channel Network Base Level ; CSC, Cross-Sectional Curvature; TWI, Topographic Wetness Index; VDCN, Vertical Distance to Channel Network.,

جدول ۶. آنالیز آماری متغیرهای غیرنرمال

داده کمکی	میان	میانگین	انحراف معیار	حداقل	حداکثر	واریانس	ضریب تغییرات	تعداد پیکسل
B9	۵۰۵۹	۵۵۹۶	۱۱۰۶	۰	۱۸۶۰۸	۱۲۲۴۳۱۷	۱۹/۷۷	۵۴۵۶۱۵۱
Aspect	۳/۰۲	-۴/۹۲	۸۸۷/۷۳	۰/۰۱۵	۶/۲۸	۷۸۸۰۷۲		۵۴۵۶۱۵۱
شاخص تجمع جریان	۳۰۳۷۳	۳۷۸۳۹۰۹	۸۱۶۰۱۳۹۱	۲۵۰۰	۷۱۵۱۲۳۷۱۲۰	6×10^{15}	۲۱۵۶/۵۳	۵۴۵۶۱۵۱
LS Factor	۰/۸۰	-۶/۵۱	۹۶۰/۱۳	۰/۰۰۰	۵۵/۷۳	۹۲/۱۸	-۱۴۷۳۱	۵۴۵۶۱۵۱
RSP	۰/۲۲	-۱۷/۱۶	۱۳۲۲/۸۷	۰	۱	۱۷۴۴۹۹۸۸	-۷۷۰۴/۷۴	۵۴۵۶۱۵۱
Clusters	۴/۰۰	۴/۰۶	۵/۴۱	۰	۲۵۵	۲۹/۳۰۷۳	۱۳۳/۱۰	۵۴۵۶۱۵۱
Closed Depressions	۰/۰۰	۰/۰۱۵	۰/۰۱	۰	۱۲/۵۷	۰/۰۰۰۲		۵۴۵۶۱۵۱
Output	۰/۰۴	-۷۸/۷۴	۲۸۰۳	-۳۱/۰۰۸	۷۴/۹۱	۷۸۵۶۸۰۹	-۵۳۶۰/۳۸	۵۴۵۶۱۵۱
شاخص حفاظت	۰/۰۲	-۱۰۷۸۳۲۵	۳۱۰۱۶۸۱۴	۰/۰۰۶	۰/۵۳	9×10^{14}	-۲۸۷/۶۳	۵۴۵۶۱۵۱
MCA	۲۴۵۵۳۶	۷۴۹۸۰۸	۱۷۹۲۴۸۵	۲۵۰۰	۵۸۵۶۵۸۳۲			۵۴۵۶۱۵۱
شاخص کرنات	۰/۹۳۲۷	۰/۹۲۶۳	۰/۱۹۹۱	۰	۴/۲۸۳۳	۰/۰۳۹۶	۲۱/۵۰	۵۴۴۲۰۴۸
NDVI	۰/۰۲۱۳	۰/۰۳۱۱	۰/۱۱۳۱	-۱	۱	۰/۰۱۲۷	۳۶۲/۸۳	۵۴۴۲۰۶۰
شاخص شوری	۰/۱۱۰۸	۰/۲۱۳۸	۰/۲۵۷۱	۰	۱/۲۷	۰/۶۶۶۴	۱۲۰/۲۴	۵۳۳۷۲۰

۴- نتیجه گیری

این پژوهش، در زمینه ضرایب همبستگی، با پژوهش‌های قبلی در این زمینه (Darestani Farahani et al., 2016; Zeinali et al., 2016) همخوانی دارد. در تحقیقی دیگر، باندهای ۱ تا ۵ و ۷ سنجنده TM برای تهیه نقشه شوری خاک مناسب تشخیص داده شد که با نتایج این پژوهش دارای همخوانی است (Zeinali et al., 2016). طبق نتایج تحقیقات قبلی، ویژگی‌های خاک اغلب توزیع نرمال ندارند و از طرفی، در طراحی الگوی نمونه برداری خاک باید تغییرات مکانی این ویژگی‌ها در نظر گرفته شود (Fu et al., 2013)؛ به همین دلیل، یافتن متغیرهای محیطی با توزیع نرمال (مشابه نتایج این پژوهش) به تعمیم نتایج آزمون خاک و تهیه نقشه رقومی خاک کمک شایانی خواهد کرد. گرچه در مطالعات نقشه برداری رقومی خاک، معمولاً کمتر از سی داده محیطی بررسی می‌شود (Adhikari et al., 2013; Brungard et al., 2015; Lacoste et al., 2016; Li et al., 2011; Liess et al., 2012; Maynard & Levi, 2017; Mulder et al., 2016; Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2016; Vaysse & Lagacherie, 2015; Were et al., 2015) براساس

جدول ۵ نتیجه گرفته می‌شود که باندهای ۲، ۳، ۴ و ۸ سنجنده OLI_TIRS بهترین باندهای تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ برای ارزیابی متغیرهای محیطی اند زیرا بیشترین واریانس را دارند. از میان متغیرهای محیطی نرمال نیز، آنهایی که بیشترین انحراف معیار و ضریب تغییرات را دارند به منزله متغیرهای مطلوب برای تهیه نقشه رقومی خاک استان تهران معرفی شدند. بر این مبنا، بیشترین انحراف معیار یا ضریب تغییرات (به ترتیب، اعداد بالای ۱ و ۱۰۰) به پارامترهای مدل رقومی ارتفاع، شیب، CNBL، VDCN، شکل زمین، بافت خاک، عمق دره، شاخص همگرایی، MRVBF، MRRTF، TWI، شاخص حوضه‌های زهکش، شاخص کانال و شاخص درخشندگی تعلق داشت و به این ترتیب، این پارامترها متغیرهای مناسبی بودند. این نتایج با تحقیقات قبلی در این زمینه (Adhikari et al., 2013; Fu et al., 2013; Gallant & Dowling, 2003; Mulder et al., 2016; Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2014) مطابقت دارد. با توجه به اینکه در تهیه نقشه رقومی به روش کوکریجینگ، انتخاب متغیرهای محیطی اهمیت

- Blaça, L., 2012, **Aspects Regarding the Significance of the Curvature Types and Values in the Studies of Geomorphometry Assisted by GIS**, Anal. Univ. Oradea Ser. Geogr, 2012, PP. 327-337.
- Bock, M., Boehner, J., Conrad, O., Koethe, R. & Ringeler, A., 2007, **Methods for Creating Functional Soil Databases and Applying Digital Soil Mapping with SAGA GIS**, In: T. Hengl, P. Panagos, A. Jones, G. Toth, [Eds.]: Status and Prospect of Soil Information in South-Eastern Europe: Soil Databases, Projects and Applications, EUR 22646 EN Scientific and Technical Research Series, Office for Official Publications of the European Communities, Luxemburg, PP. 149-162, http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/eusoils_docs/esb_rr/EUR22646EN.pdf.
- Boettinger, J.L., Ramsey, R.D., Bodily, J.M., Cole, N.J., Kienast-Brown, S., Nield, S.J., Saunders, A.M. & Stum, A.K., 2008, **Landsat Spectral Data for Digital Soil Mapping**, In: A.E. Hartemink, A.B. McBratney, M.L. Mendonca-Santos (Eds.), **Digital Soil Mapping with Limited Data**, Springer Science, Australia, PP. 193-203.
- Brenning, A., Bangs, D., Becker, M., Schratz, P. & Polakowski, F., 2018, **Package 'RSAGA'**, The Comprehensive R Archive Network, <https://CRAN.R-project.org/package=RSAGA>.
- Brungard, C.W., Boettinger, J.L., Duniway, M.C., Wills, S.A. & Edwards Jr., T.C., 2015, **Machine Learning for Predicting Soil Classes in Three Semi-Arid Landscapes**, *Geoderma*, 239-240, PP. 68-83, doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.09.019.
- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V. & Boehner, J., 2015, **System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4**, *Geosci. Model Dev.*, 8, PP. 1991-2007, doi:10.5194/gmd-8-1991-2015.
- Darestani Farahani, M., Akhondzadeh Henzaei, M. & Ahmadi Givi, F., 2016, **Using a Neural Network Algorithm to Prepare a Water Surface Salinity Map from MODIS Satellite Images**, *Journal of Geographic Information Science*, 25(99), PP. 18-5.
- Dharumarajan, S., Lalitha, M., Niranjana, K.V. & Hegde, R., 2022, **Evaluation of Digital Soil Mapping Approach for Predicting Soil Fertility Parameters—A Case Study from Karnataka Plateau, India**, *Arabian Journal of Geosciences*, 15(5), P. 386.
- ویژه‌ای دارد، شناسایی متغیرهای محیطی مناسب برای تهیه نقشه رقومی خاک در استان تهران، در این پژوهش، هدف‌گذاری شده بود. طبق نتایج پژوهش حاضر، از میان ۴۹ داده محیطی بررسی شده، براساس آنالیز آماری، چهارده متغیر محیطی مطلوب انتخاب شدند. بدین ترتیب این نتیجه به دست می‌آید که در تهیه نقشه رقومی خاک، برای حصول اطمینان از صحت تعمیم نتایج اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی نمونه‌های خاک به مناطق مشابه، می‌توان از متغیرهای محیطی مدل رقومی ارتفاع، شیب، CNBL، VDCN، شکل زمین، بافت خاک، عمق دره، شاخص همگرایی، TWI، MRRTF، MRVBF، شاخص حوضه‌های زهکش، شاخص کانال و شاخص درخشندگی استفاده کرد؛ این موارد داده‌های کمکی مطلوب در مطالعات خاک‌شناسی، در محدوده جغرافیایی استان تهران، محسوب می‌شوند. همچنین باندهای ۲، ۳، ۴ و ۸ بهترین باندهای تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ سنجنده OLI_TIRS برای ارزیابی متغیرهای محیطی‌اند.

۵- منابع

- Adhikari, K., Kheir, R., Greve, M., Bøcher, P., Malone, B., Minasny, B., McBratney, A. & Greve, M., 2013, **High-Resolution 3-D Mapping of Soil Texture in Denmark**, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 77, PP. 860-876, doi.org/10.2136/sssaj2012.0275.
- Amirian-Chakan, A., Minasny, B., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Akbarifazli, R., Darvishpasand, Z. & Khordehbin, S., 2019, **Some Practical Aspects of Predicting Texture Data in Digital Soil Mapping**, *Soil and Tillage Research*, 194, P. 104289.
- Bishop, M.P., Shroder Jr., J.F. & Colby, J.D., 2003, **Remote Sensing and Geomorphometry for Studying Relief Production in High Mountains**, *Geomorphology*, 55(1-4), PP. 345-361.
- Bishop, M.P., James, L.A., Shroder Jr., J.F. & Walsh, S.J., 2012, **Geospatial Technologies and Digital Geomorphological Mapping: Concepts, Issues and Research**, *Geomorphology*, 137(1), PP. 5-26.

- Forkuo, E.K. & Nketia, A.K., 2011, **Digital Soil Mapping in GIS Environment for CropLand Suitability Analysis**, International journal of Geomatics and Geosciences, 2(1), PP. 133-146.
- Fu, W., Zhao, K., Tunney, H. & Zhang, C., 2013, **Using GIS and Geostatistics to Optimize Soil Phosphorus and Magnesium Sampling in Temperate Grassland**, Soil Science, 178(5), PP. 240-247, doi:10.1097/ss.0b013e31829d463b.
- Gallant, J.C. & Dowling, T.I., 2003, **A Multi Resolution Index of Valley Bottom Flatness for Mapping Depositional Areas**, Water Resources Research, 39, PP. 1347-1360.
- Gao, B., Pan, Y., Chen, Z., Wu, F., Ren, X. & Hu, M., 2016, **A Spatial Conditioned Latin Hypercube Sampling Method for Mapping Using Ancillary Data**, Transactions in GIS, 20(5), PP. 735-754.
- Godinho Silva, S.H., Owens, P.R., Silva, B.M., César de Oliveira, G., Duarte de Menezes, M., Pinto, L.C. & Curi, N., 2015, **Evaluation of Conditioned Latin Hypercube Sampling as a Support for Soil Mapping and Spatial Variability of Soil Properties**, Soil Science Society of America Journal, 79(2), PP. 603-611.
- Guo, L., 2018, **Exploring the Sensitivity of Soil Sample Numbers in Digital Soil Mapping and then Choosing a Suitable Soil Sampling Plan**, Journal of Remote Sensing & GIS, 07, DOI:10.4172/2469-4134-c2-014.
- Jochem, A., Wichmann, V. & Hofle, B., 2010, **Large Area Point Cloud Based Solar Radiation Modeling**, Hamburger Beiträge zur Physischen Geographie und Landschaftsökologie, 21, P. 20.
- Kaneda, H. & Chiba, T., 2019, **Stereopaired Morphometric Protection Index Red Relief Image Maps (Stereo MPI-RRIMs): Effective Visualization of High-Resolution Digital Elevation Models for Interpreting and Mapping Small Tectonic Geomorphic Features**, Bulletin of the Seismological Society of America, 109(1), PP. 99-109.
- Köthe, R. & Bock, M., 2006, **Development and Use in Practice of SAGA Modules for High Quality Analysis of Geodata**, Free And Open Gis-Saga-Gis, 115, PP. 85-96.
- Lacoste, M., Mulder, V., de Forges, A.R., Martin, M. & Arrouays, D., 2016, **Evaluating Large-Extent Spatial Modeling Approaches: A Case Study for Soil Depth for France**, Geoderma Regional, 7, PP. 137-152, doi.org/10.1016/j.geodrs.2016.02.006.
- Li, J., Heap, A.D., Potter, A. & Daniell, J.J., 2011, **Application of Machine Learning Methods to Spatial Interpolation of Environmental Variables**, Environ. Modell. Softw., 26, PP. 1647-1659, doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.07.004.
- Liess, M., Glaser, B. & Huwe, B., 2012, **Uncertainty in the Spatial Prediction of Soil Texture. Comparison of Regression Tree and Random Forest Models**, Geoderma, 170, PP. 70-79, doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.10.010.
- Malone, B.P., Minansy, B. & Brungard, C., 2019, **Some Methods to Improve the Utility of Conditioned Latin Hypercube Sampling**, PeerJ, 7, P. e6451.
- Maynard, J.J. & Levi, M.R., 2017, **Hyper-Temporal Remote Sensing for Digital Soil Mapping: Characterizing Soil-Vegetation Response to Climatic Variability**, Geoderma, 285, PP. 94-109, doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.09.024.
- Metternicht, G.I. & Zinck, J.A., 2003, **Remote Sensing of Soil Salinity: Potentials and Constraints**, Remote Sensing of Environment, 85, PP. 1-20.
- Mulder, V., Lacoste, M., de Forges, A.R. & Arrouays, D., 2016, **Global Soil Map France: High-Resolution Spatial Modelling the Soils of France up to Two Meter Depth**, Sci. Total Environ., 573, PP. 1352-1369, doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.066.
- Ngu, N.H., Trung, N.H., Shinjo, H., Chotpantararat, S. & Thanh, N.N., 2025, **Improving Spatial Prediction of Soil Organic Matter in Central Vietnam Using Bayesian-Enhanced Machine Learning and Environmental Covariates**, Archives of Agronomy and Soil Science, 71(1), PP. 1-17.
- Nield, S.J., Boettger, J.L. & Ramsey, R.D., 2007, **Digital Mapping Gypsic and Nitric Soil Areas Using Landsat ETM Data**, Soil Science Society of America Journal, 71, PP. 245-252.
- Nussbaum, M., Spiess, K., Baltensweiler, A., Grob, U., Keller, A., Greiner, L. & Papritz, A.J., 2018, **Evaluation of Digital Soil Mapping Approaches with Large Sets of Environmental Covariates**, Soil, 4(1), PP. 1-22.
- Parmar, S., 2019, **Morphometry Analysis Using SAGA GIS: A Case Study of Watershed-63 of Narmada River, Gujarat, India**, Journal of Engineering Research and Application, (2).

- Somarathna, P., Malone, B. & Minasny, B., 2016, **Mapping Soil Organic Carbon Content over New South Wales, Australia Using Local Regression Kriging**, *Geoderma Regional*, 7, PP. 38-48, doi.org/10.1016/j.geodrs.2015.12.002.
- Szatmári, G., Barta, K. & Pásztor, L., 2015, **An Application of a Spatial Simulated Annealing Sampling Optimization Algorithm to Support Digital Soil Mapping**, *Hungarian Geographical Bulletin*, 64(1), PP. 35-48.
- Taghizadeh-Mehrjardi, R., 2015, **Determining Spatial Sampling Pattern Using Different Methods (Case Study: Taft County)**, *Agricultural Engineering (Agricultural Scientific Journal)*, 38(2), PP. 19-36.
- Taghizadeh-Mehrjardi, R., Minasny, B., Sarmadian, F. & Malone, B.P., 2014, **Digital Mapping of Soil Salinity in Ardakan Region, Central Iran**, *Geoderma*, 213, PP. 15-28.
- Taghizadeh-Mehrjardi, R., Nabiollahi, K. & Kerry, R., 2016, **Digital Mapping of Soil Organic Carbon at Multiple Depths Using Different Data Mining Techniques in Baneh Region, Iran**, *Geoderma*, 266, PP. 98-110, doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.12.003.
- Vaysse, K. & Lagacherie, P., 2015, **Evaluating Digital Soil Mapping Approaches for Mapping GlobalSoilMap Soil Properties from Legacy Data in Languedoc-Roussillon (France)**, *Geoderma Regional*, 4, PP. 20-30, doi.org/10.1016/j.geodrs.2014.11.003.
- Weber, D., Rüetschi, M., Small, D. & Ginzler, C., 2020, **Grossflächige Klassifikation von Gebüsch Wald mit Fernerkundungsdaten**, *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 171(2), PP. 51-59.
- Were, K., Bui, D.T., Dick, Ø.B. & Singh, B.R., 2015, **A Comparative Assessment of Support Vector Regression, Artificial Neural Networks, and Random Forests for Predicting and Mapping Soil Organic Carbon Stocks Across an Afrotropical Landscape**, *Ecol. Indic.*, 52, PP. 394-403, doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.12.028.
- Zawawi, A.A., Shiba, M. & Jemali, N.J.N., 2014, **Landform Classification for Site Evaluation and Forest Planning: Integration between Scientific Approach and Traditional Concept**, *Sains Malaysiana*, 43(3), PP. 349-358.
- Zeinali, M., Jafarzadeh, A.A., Shahbazi, F. & Ostan, Sh., 2016, **Evaluation of Surface Soil Salinity Using Pixel-Based Method Based on TM Sensor Data (Case Study: Lands East of Khoy County- West Azerbaijan Province)**, *Journal of Geographic Information Sepehr*, 25(99), PP. 127-139.