

بررسی تأثیر تفکیک مکانی مدل رقومی ارتفاع (DEM) بر تحلیل خاک-زمین نما (مطالعه موردی حوضه رکعت ایذه، استان خوزستان)

جواد خنیفر^۱، عطاله خادم الرسول^{۲*}، هادی عامری خواه^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۲۴)

چکیده

از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در تحلیل خاک-زمین نما، تفکیک مکانی مدل رقومی ارتفاع (DEM) است. در این مطالعه، تأثیر تفکیک مکانی بر پارامترهای زمینی و مدل‌سازی ویژگی‌های خاک بررسی شد. برای انجام این پژوهش، شش پارامتر زمینی (ارتفاع، گرادیان شیب، جهت شیب، انحناء حداقل، منطقه‌ی بالادست و شاخص انتقال رسوب) از پنج تفکیک مکانی متفاوت (۱۰، ۳۰ (مبنا)، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ متر) استخراج شدند و برای مدل‌سازی ویژگی‌های خاک (بافت خاک، پتاسیم، فسفر، pH، EC و عمق خاک) مورد استفاده قرار گرفتند. بررسی معنی‌داری اختلاف بین میانگین‌های هر کدام از پارامترهای زمینی در بین تفکیک‌های مکانی مختلف، با استفاده از آزمون کروسکال-والیس صورت پذیرفت. مدل‌سازی به روش رگرسیون خطی چندگانه و انتخاب بهترین مدل در هر تفکیک مکانی بر اساس شاخص AICC انجام گردید. نتایج نشان می‌دهند که با درشت‌تر شدن تفکیک مکانی نسبت به DEM مبنا، مقادیر میانگین گرادیان شیب (G)، شاخص انتقال رسوب (STI) و محدوده‌ی مقادیر انحناء حداقل (Cmin) کاهش یافته ولیکن مقادیر میانگین و حداقل منطقه‌ی بالادست (UP) افزایش یافتند. شاخص‌های آماری پارامتر ارتفاع، حساسیت کمی را نسبت به تغییرات تفکیک مکانی نشان دادند. تغییرات میانگین و حداکثر جهت شیب در طول تفکیک‌های مکانی مختلف فاقد روند مشخصی است. میانگین تمامی پارامترهای زمینی به غیر از انحناء حداقل (Cmin) و منطقه‌ی بالادست (UP) در بین هیچ‌کدام از تفکیک‌های مکانی دارای اختلاف معنی‌داری نمی‌باشند. با تغییر در تفکیک مکانی DEM، بهترین ترکیب پارامتری زمینی برای مدل‌سازی ویژگی‌های خاک و مقادیر دو معیار AICC و R^2_{adj} این ترکیبات تغییر می‌کنند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که برای یک منطقه که دارای تنوع بالا در شرایط ژئومورفولوژی است، این امکان وجود ندارد که در آن یک تفکیک مکانی مشخص را برای مدل‌سازی تمامی ویژگی‌های خاک، مناسب دانست.

واژه‌های کلیدی: شاخص انتقال رسوب، ژئومورفومتری، مدل رقومی ارتفاع، معیار اطلاعات آکائیک تصحیح شده (AIC_c)، تفکیک مکانی بهینه

خنیفر ج.، خادم الرسول ع.ا.، عامری خواه ه.، ۱۳۹۹. بررسی تأثیر تفکیک مکانی مدل رقومی ارتفاع (DEM) بر تحلیل خاک-زمین نما (مطالعه موردی حوضه رکعت ایذه، استان خوزستان). تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۸، شماره ۱. صفحه: ۱۲۱-۱۳۵.

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز- ایران
۲- استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز- ایران (مکاتبه کننده و نویسنده مسئول)
۳- مربی گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز- ایران

*پست الکترونیک: Ataalahsoil@gmail.com

مقدمه

یکی از اجزاء مهم در مدیریت پایدار سرزمین^۱، مدل‌سازی فرآیندهای محیطی در مقیاس زمین‌نما به منظور اتخاذ بهترین استراتژی‌های مدیریتی در راستای حفاظت از منابع خاک و آب است. برای مدل‌سازی فرآیندهای محیطی، در اختیار داشتن اطلاعات مکانی خاک‌ها، ضرورت دارد؛ زیرا فقدان اطلاعات مکانی مورد خاک‌ها، عدم قطعیت خروجی مدل‌های محیطی را افزایش می‌دهد (Park et al., 2002ab). فرآیندهای محیطی مرتبط با ژئومورفولوژی، هیدرولوژی و بیولوژی در یک زمین‌نما با توپوگرافی آن ارتباط بسیار نزدیکی دارند (Moore et al., 1991). توپوگرافی بر توزیع مکانی، ویژگی‌های پوشش گیاهی، تجمع و انتقال سطحی و زیر سطحی آب، رسوبات و عناصر غذایی مؤثر است. با توجه به اینکه توپوگرافی به صورت مستقیم و غیرمستقیم، ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک را کنترل می‌کند، لذا در مدیریت پایدار سرزمین از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. از ویژگی‌های مورفومتری دامنه‌ها می‌توان برای شناخت و نقشه‌برداری الگوهای خاک مرتبط با آن‌ها استفاده کرد، به این فن اصطلاحاً تحلیل خاک-زمین‌نما و یا همبستگی محیطی^۲ می‌گویند (Park et al., 2002a). فن‌های مدرن مانند ژئومورفومتری یا تجزیه و تحلیل زمین، این امکان را می‌دهد تا اطلاعات کمی توپوگرافی را جهت محاسبه ویژگی‌های مورفومتری یک سطح زمین تحلیل نمود.

در لایه‌ی رستری مدل رقومی ارتفاع هر پیکسل دارای یک ارزش عددی برای نمایش ارتفاع یک موقعیت است؛ همچنین هر پیکسل دارای ابعاد مشخصی (در جهت‌های افقی X و Y) است که نمایانگر تفکیک مکانی لایه می‌باشد. یک موضوع قابل توجه در تحلیل خاک-زمین‌نما شاخصه‌ی تفکیک مکانی DEM است که به طور خاص به کیفیت منبع داده‌های اولیه ارتفاعی بستگی دارد. در ژئومورفومتری، مقیاس و تفکیک مکانی DEM می‌تواند تأثیرات معنی‌داری بر مقادیر پارامترهای توپوگرافی مانند شیب، جهت شیب، انحناء و شاخص خیسسی توپوگرافی بگذارد. در مقیاس‌های کوچک، پارامترهای زمینی اولیه (مانند گرادیان شیب، جهت

شیب و انحناء) می‌توانند پیش‌بینی‌کننده‌های خوبی برای تغییرات ویژگی‌های خاک باشند. برای تفکیک‌های مکانی بالاتر از ۱۰۰ متر، پارامترهای زمینی محلی با فیزیوگرافی پیچیده، ماهیت خود را از دست می‌دهند، در این شرایط موقعیت زمین‌نما در پیش‌بینی ویژگی‌های خاک نسبت به پارامترهای توپوگرافی از اهمیت بیشتری برخوردار خواهد شد (Bishop & Minasny, 2016). تفکیک مکانی بهینه برای DEM در تحلیل خاک-زمین‌نما به مقیاس فرآیندهای کنترل‌کننده‌ی تشکیل خاک وابسته است و این فرآیندها نیز به زمین‌نما وابسته‌اند (McKenzie & Ryan, 1999). فرآیندهای خاک‌ساز در یک مقیاس مشابه برای زمین‌نماهای مختلف تغییر می‌کنند. بنابراین، مقیاسی که ویژگی‌های خاک را در یک زمین‌نما به بهترین حالت نشان می‌دهد، ممکن است برای مدل‌سازی ویژگی‌های خاک در سایر زمین‌نماها کارایی نداشته باشد (Nath, 2006). در تفکیک مکانی درشت‌تر، ویژگی‌های زمینی دارای رفتاری نامنظم بوده و به سرعت قدرت پیش‌بینی خود را از دست می‌دهند (McKenzie & Ryan, 1999). مدل‌های رقومی ارتفاع با تفکیک ۱۰ تا ۳۰ متر برآوردهای غیراربابی از پارامترهای توپوگرافی فراهم می‌کنند اما خطاهای پیش‌بینی برای تفکیک‌های پایین‌تر از ۵۰ متر افزایش می‌یابد (Chaplot et al., 2000). مدل رقومی ارتفاع با تفکیک مکانی ۱۰ متر برای مدل‌سازی فرآیندهای هیدرولوژی و ژئومورفی در بسیاری از زمین‌نماها قابل استفاده است (Zhang & Montgomery, 1994). آگاهی از تفکیک مکانی DEM مناسب در مطالعات رقومی خاک از اهمیت بالایی برخوردار است و بالاترین تفکیک مکانی، همیشه ایجادکننده بیشترین درجه صحت نیست (Smith et al., 2006). بنابراین با توجه به اهمیت بسیار زیاد تفکیک‌های مکانی DEM و تأثیرات عامل توپوگرافی بر روی تغییرات زمانی و مکانی پارامترهای خاک و در نتیجه ایجاد تغییرات در فرایندهای هیدرولوژی و ژئومورفی و در نتیجه تأثیرگذاری در اتخاذ و بکارگیری رویکردهای مدیریتی در راستای مدیریت پایدار منابع طبیعی، لذا مطالعه‌ی حاضر با هدف بررسی تأثیر انواع تفکیک مکانی DEM

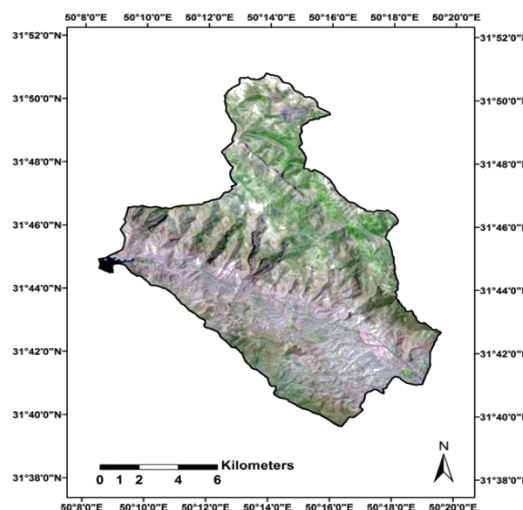
آبریز رکعت ۶۰۷ میلی‌متر و مقادیر حداکثر، متوسط و حداقل درجه‌ی حرارت سالانه در آن به ترتیب ۲۲/۶، ۱۴/۱ و ۵/۶ درجه‌ی سانتی‌گراد است. بر این اساس، رژیم‌های رطوبتی و حرارتی خاک در حوضه‌ی آبریز رکعت به ترتیب زریک (Xeric) و مزیک (Mesic) می‌باشد. از نظر زمین‌شناسی در این منطقه واحدهای سنگ-چینه‌ای متعلق به دوران سوم در قالب سازندهای آسماری-چهرم، گچساران، آجاجاری و بختیاری به همراه رسوبات دوران چهارم (نهشته‌های کواترنری) رخنمون دارند. در این حوضه‌ی مطالعاتی به‌طور کلی چهار تیپ پوشش زمین شامل زراعت، مرتع، جنگل با زیراشکوب مرتع و جنگل با زیراشکوب زراعت دیدم مشاهده می‌گردد.

بر پارامترهای زمینی و تحلیل خاک-زمین‌نما انجام شده است.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه‌ی مطالعاتی

منطقه مطالعاتی در این پژوهش حوضه آبریز رکعت است که دارای مساحتی در حدود ۱۶ هزار هکتار می‌باشد. حوضه‌ی آبریز رکعت در شهرستان ایذه در استان خوزستان با موقعیت جغرافیایی بین طول جغرافیایی ۵۰° ۰۸' تا ۵۰° ۳۱' شرقی و عرض جغرافیایی ۳۱° ۳۹' تا ۳۱° ۵۰' شمالی واقع شده است (شکل ۱). با توجه به آمار هواشناسی ایستگاه‌های ایذه و دهدز مربوط به سال ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۶، مقدار متوسط بارندگی سالانه‌ی حوضه‌ی



شکل ۱- موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه تهیه شده از تصویر ماهواره لندست ۸

Figure 1. The location of the study area on true color composite of Landsat8 image acquired in March 2018

به بررسی دقت ارتفاعی این مدل‌ها پرداخته شد. در نهایت مدل رقومی ارتفاعی SRTM که دارای تفکیک مکانی افقی تقریبی ۳۰ متر می‌باشد، برای تحلیل ژئومورفومتری به عنوان مبنا انتخاب گردید. داده‌های ارتفاعی SRTM از سایت ارت اکسپلور^۲ با فرمت GeoTIFF دریافت و با استفاده از ابزار Project Raster در محیط نرم‌افزار ArcMap10.2 با سیستم تصویر مرکاتور معکوس جهانی (UTM زون ۳۹ سطح‌مبنای مسطحاتی WGS 1984) ذخیره شدند. سپس با استفاده از فن درون‌یابی دوخطی

مدل ارتفاع رقومی (DEM) و پارامترهای ژئومورفومتری

جهت انجام تحلیل ژئومورفومتری، در ابتدا یک ارزیابی بین مدل‌های رقومی ارتفاع در دسترس با هدف بررسی دقت ارتفاعی انجام گرفت تا یک DEM با کیفیت مطلوب انتخاب گردد. در این ارزیابی، مدل‌های ارتفاعی SRTM^۱، ASTER و یک مدل رقومی محلی برای منطقه‌ی مطالعاتی با استفاده از معیار آماری خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و بر اساس مقایسه با نقاط زمین مرجع،

2. EarthExplorer, <https://earthexplorer.usgs.gov>

1. Shuttle Radar Topographic Mission

۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ متر) از DEM اصلی، ایجاد شد (در شکل ۲ نشان داده شده است). سپس برای استخراج مقادیر پارامترها در محل نقاط نمونه برداری شده از ابزار استخراج اطلاعات رستری و Extract Values to Points در نرم افزار ArcGIS 10.2 استفاده گردید. ویژگی های خاک که در این پژوهش به عنوان متغیر پاسخ در تحلیل خاک-زمین نما مورد استفاده قرار گرفتند، شامل بافت خاک (درصد شن، سیلت و رس)، فسفر در دسترس (P)، پتا سیم در دسترس (K) (ppm)، شوری (EC)، دسی زیمنس بر متر، اسیدیته pH و عمق خاک (سانتیمتر) می باشند.

موجود در ابزار نمونه برداری مجدد Resample در نرم افزار ArcMap 10.2 پنج تفکیک مکانی افقی متفاوت (۱۰، ۳۰، ۶۰) پیش از آغاز تحلیل ژئومورفومتری، جهت بهبود کیفیت DEM، فرآیند پیش پردازش آن با هدف حذف ناهنجاری ها انجام گرفت. فرآیند اصلاح و تنظیم دقیق DEM با استفاده از ابزار پر کردن چاله ها (Fill Sinks) موجود در افزونه Arc Hydro در محیط نرم افزار ArcMap 10.2 انجام گردید. همچنین، در این پژوهش، پارامترهای ژئومورفومتری ارتفاع، شیب، جهت شیب، انحنای حداقل، جریان تجمعی و شاخص حمل رسوب (جدول ۱) برای مدل سازی ژئومورفومتری ویژگی های خاک انتخاب شدند. فرآیند محاسبه رستری پارامترهای ژئومورفومتری در نرم افزار SAGA v.2.1.4

جدول ۱- پارامترهای ژئومورفومتری مورد بررسی در این مطالعه (Wilson & Gallant, 2000; Moore et al., 1999)

Table 1. Geomorphometry parameters in this study (Wilson & Gallant, 2000; Moore et al., 1999)

Terrain Attributes*	Symbol (Unit)	Description	Formula**	Significance
Elevation	E (m)	Height above sea level	DEM	Climate, Vegetation patterns
Slope gradient	G (°)	An angle between a tangent and a horizontal plane	$\arctan \sqrt{p^2 + q^2}$	Flow velocity
Slope aspect	A (°)	An angle clockwise from north to a projection of an external normal vector to a horizontal plane	$\arctan \left(\frac{q}{p} \right)$	Flow direction, Solar insulation
Minimal Curvature	C _{min} (m ⁻¹)	A curvature of a principal section with the lowest value of curvature	$\frac{\sqrt{rt} - s}{(1 + p^2 + q^2)}$	Forms of the terrain
Upslope Area	UA, (m ²)	Catchment area above a length of contour	D8 flow Direction method	Runoff volume
Sediment Transport Index	STI	Computed using specific catchment area (SCA) and slope	$\left(\frac{SCA}{22.13} \right)^m \cdot \left(\frac{\sin G}{0.0896} \right)^n$	Erosion and deposition process

* All attributes are defined at a given point on the land surface

** r, t, s, p and q are partial derivatives of the function

$$q = \frac{\partial z}{\partial y}, p = \frac{\partial z}{\partial x}, r = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}, s = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}, t = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}, m = 0.6, n = 1.3$$

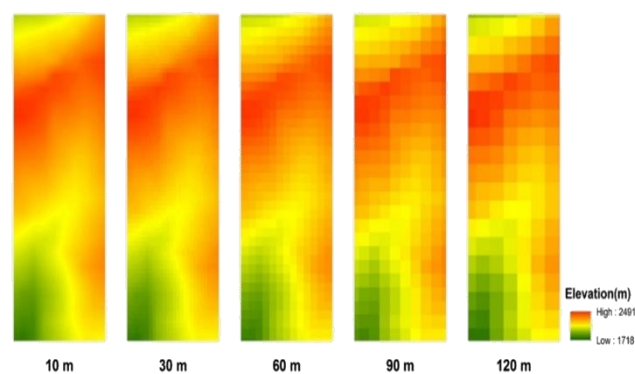
منطقه‌ی مطالعاتی پس از شناسایی واحدهای اراضی و اجزاء آنها با استفاده از مشاهدات اراضی، حفر پروفیل و نمونه برداری از لایه‌های مختلف خاک و استفاده از نتایج تحلیل فیزیکی و شیمیایی نمونه‌ها انجام شد. بر اساس گزارش خاک شناسی، ۱۸ جزء واحد اراضی^۱ (LUC) در منطقه‌ی مطالعاتی شناسایی و تفکیک شده است. برای

ویژگی‌های خاک که در این پژوهش به عنوان متغیر پاسخ در تحلیل خاک-زمین نما مورد استفاده قرار گرفتند، شامل بافت خاک (درصد شن، سیلت و رس)، فسفر در دسترس (P) (ppm)، پتا سیم در دسترس (K) (ppm)، شوری (EC)، دسی زیمنس بر متر، اسیدیته pH و عمق خاک (سانتیمتر) می باشند. تعیین ویژگی‌های خاک در

1. Land unit component

وارانس ANOVA به منظور مقایسه‌ی بین گروه‌ها از اعتمادپذیری کمتری برخوردار می‌باشند، به همین دلیل در این مطالعه جایگزین آن یعنی آزمون کروسکال - والیس مورد استفاده قرار گرفت. در این مطالعه برای مدل‌سازی و ایجاد ارتباط بین خصوصیات خاک و متغیرهای ژئومورفومتری از تحلیل رگرسیون خطی چندگانه‌ی بهترین زیرمجموعه^۲ در نرم‌افزار SYSTAT 13.2 استفاده گردید. در این پژوهش برای انتخاب مدل‌ها (بهترین ترکیب پارامتری) معیار اطلاعات آکائیک (تصحیح‌شده (AIC_C) استفاده شد (Akaike, 1974)؛ (Box, 2016)؛ Sugiura, 1978).

توصیف آماری پارامترهای ژئومورفومتری و نمایش تغییرات آن‌ها در تفکیک‌های مکانی مختلف از نمودارهای جعبه‌ای در نرم‌افزار Statistica 12 استفاده گردید. همچنین، برای بررسی معنی‌داری اختلاف میانگین پارامترهای ژئومورفومتری در بین هر کدام از تفکیک‌های مکانی مختلف DEM، آزمون آماری کروسکال - والیس^۱ موجود در نرم‌افزار SYSTAT 13.2 بکار گرفته شده است. با توجه به اینکه اندازه‌ی نمونه‌ی مطالعاتی کوچک و بررسی نرمالیتت نیز نشان می‌دهد که باقی‌مانده‌های مجموعه‌ی داده‌ها فاقد توزیع نرمال می‌باشند، لذا نتایج به‌دست‌آمده در آزمون تحلیل



شکل ۲- مدل‌های رقومی ارتفاعی بازبازی شده از DEM مبنا به‌وسیله‌ی فن درون‌بازی
Figure 2. Resampled digital elevation models (DEMs) using bilinear technique

ویژگی‌های خاک جدول (۲) نشان می‌دهند. یکی از دلایل این میزان تغییرات را می‌توان به توپوگرافی پیچیده منطقه نسبت داد که در تغییر شرایط ژئومورفی و هیدرولوژی زمین‌نما نقش مهمی را ایفا کرده و از این طریق بر تشکیل و ایجاد تفاوت بین خاک‌ها موثر است. به بیانی دیگر، توپوگرافی به واسطه‌ی تأثیری که بر شرایط زهکشی خاک، جابه‌جایی و انتقال آب و باز توزیع رسوبات در موقعیت‌های مختلف زمین‌نما دارد، منجر به تفاوت فرآیند فرسایش و رسوب‌گذاری در موقعیت‌های مختلف زمین‌نما شده است (Pierson & Mulla, 1990). عمده کلاس‌های بافتی خاک منطقه مطالعاتی لومی رسی و لومی رسی سیلتی می‌باشند.

محا سبه‌ی شش پارامتر توپوگرافی برای هر کدام از پنج تفکیک مکانی DEM انجام و نقشه‌های آن‌ها به فرمت رستر تهیه شد. خلاصه‌ی نتایج تحلیل آماری مقادیر

نتایج و بحث

توصیف آماری ویژگی‌های خاک و پارامترهای زمینی نتایج آمار توصیفی ویژگی‌های خاک در ۱۸ نقطه‌ی مورد بررسی در جدول (۲) ارائه شده است. بر اساس شاخص چولگی به‌دست‌آمده، سه پارامتر پتاسیم، فسفر و EC دارای ضریب چولگی بیش از بازه‌ی ۲- تا ۲ می‌باشند که حاکی از عدم توزیع نرمال این پارامترها می‌باشد. آزمون نرمالیتت کولموگروف-سمیرنوف نیز این مطلب را تأیید می‌کند. در تحلیل خاک-زمین‌نما تا حد امکان حذف داده‌های پرت و انجام تبدیلات برای نرمال‌سازی داده‌ها انجام نمی‌شود. همان‌گونه که جدول (۲) نشان می‌دهد، اسیدیته (pH) دارای کمترین ضریب تغییرات برابر با ۲ درصد است. زیرا pH یک کمیت لگاریتمی است. در مقابل، عمق خاک و پتاسیم با ضریب تغییرات ۵۵ درصد، بیش‌ترین تغییرپذیری را در بین

2. Best subset

1. Kruskal-Wallis

واضحی می‌باشند. میانگین پارامتر ارتفاع با افزایش و کاهش تفکیک مکانی تغییرات چندانی ندارد و تقریباً ثابت باقی مانده است، این مشاهده با دیگر مطالعات نیز تطابق دارد (Wu et al., 2008؛ Han et al., 2018). بیشترین تأثیری که تغییرات تفکیک مکانی بر پارامتر ارتفاع گذاشته است، بر مقادیر حداقل و حداکثر آن می‌باشد.

استخراج شده پارامترهای زمینی در شکل (۳) نشان داده شده است. این نتایج به درک نحوه تغییرات پارامترهای زمینی در تفکیک‌های مکانی مختلف کمک می‌نماید. همچنین نتایج آزمون کروسکال - والیس برای بررسی معنی‌داری اختلاف بین میانگین پارامترهای زمینی در جدول (۳) ارائه شده است. با توجه به شکل (۳)، مقادیر شاخص‌های آماری تمامی پارامترهای زمینی به غیر از ارتفاع در تفکیک‌های مکانی مختلف دارای تفاوت

جدول ۲- آمار توصیفی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 2. Descriptive statistics of physical and chemical properties of soil

Soil properties	Minimum	Maximum	Mean	Median	S.D.	C.V. (%)	Skewness	Kurtosis
Sand (%)	24	54	32.83	32	7.66	23	1.15	2.03
Silt (%)	24	54	41.67	41.50	7.38	18	-0.51	0.65
Clay (%)	8	60	26.50	25	12.25	46	1.04	2.09
Depth (cm)	12	150	89.28	100	49.38	55	-0.12	-1.34
K _{ava} (ppm)	80	650	278.06	240	154.31	55	1.57	2.45
P _{ava} (ppm)	12.53	25.06	16.31	15.66	3.38	20	1.61	2.54
pH	7.58	8.25	7.93	7.94	0.15	2	-0.12	1.34
EC(dS m ⁻¹)	0.28	0.98	0.46	0.39	0.18	39	1.78	3.21

S.D. = Standard deviation, and C.V. = Coefficient of Variation

همراه با تغییر اندازه‌ی تفکیک مکانی، مقدار میانگین پارامتر با یک شیب ملایم کاهش می‌یابد. آزمون کروسکال - والیس تأیید نمود که اختلاف بین میانگین‌های پارامتر شیب در تفکیک‌های مکانی مختلف، معنی‌دار نمی‌باشد (جدول ۳). کاهش میانگین پارامتر شیب همراه با افزایش ابعاد پیکسل DEM در بسیاری از مطالعات مشاهده شده است. (Yuan et al., 2006). کاهش رخ داده در مقادیر شیب استخراج شده از تفکیک مکانی ۱۰ متر می‌تواند مؤید این موضوع باشد که انجام فرآیند بازیابی حتی با هدف افزایش تفکیک مکانی موجب نادیده گرفتن برخی از جزئیات سطح توپوگرافی شود. مقدار حداقل پارامتر شیب در تمامی تفکیک‌های مکانی ثابت مانده است و این در حالی است که مقدار حداکثر پارامتر شیب در تمامی تفکیک‌های مکانی نسبت به تفکیک مکانی مبنا کاهش مشخصی دارد. بیشترین میزان اختلاف بین مقادیر حداکثر برابر است با ۸/۷ درجه و بین تفکیک‌های مکانی ۳۰ و ۱۲۰ متری مشاهده می‌شود. دنگ و همکاران (Deng et al., 2007) نیز کاهش شدید مقدار حداکثر شیب را همراه با کاهش تفکیک مکانی DEM مشاهده نمودند و علت آن را تا

مقدار حداقل و حداکثر پارامتر ارتفاع در بین پنج تفکیک مکانی DEM به ترتیب مربوط به تفکیک‌های مکانی ۶۰ و ۹۰ متری است که نسبت به حداقل و حداکثر DEM مبنا به ترتیب دارای اختلاف ۱۲- و ۲۹+ متری هستند. این اختلاف ارتفاعات می‌تواند به دلیل فرآیند بازیابی و تکنیک مورد استفاده در آن باشد. داده‌های ارتفاعی SRTM در ابتدا در یک تفکیک مکانی تقریبی ۳۰ متر اخذ و سپس در این مطالعه به تفکیک‌های مکانی پایین بازیابی شده‌اند. پتانسیل اطلاعاتی که در هر کدام از پیکسل‌های ۳۰ متری ذخیره شده است، در هنگام بازیابی به پیکسل‌ها با ابعاد بزرگ‌تر کاهش (رقیق-ضعیف‌تر) می‌یابد (Pradhan & Sameen 2017). این روند در تمامی تفکیک‌های مکانی قابل مشاهده است. آزمون کروسکال - والیس نشان داد که الگوی توزیع مکانی پارامتر ارتفاع در بین هیچ کدام از تفکیک‌های مکانی دارای اختلاف معنی‌داری نمی‌باشد (جدول ۳). به عبارت دیگر، پارامتر ارتفاع تحت تأثیر معنی‌دار تغییرات تفکیک مکانی نیست. تأثیر اندازه‌های مختلف تفکیک مکانی DEM بر پارامتر گردایان شیب در شکل (۳-b) نشان داده شده است.

حدودی ناشی از ناهمواری های کوچک مقیاس در توپوگرافی منطقه ای مطالعاتی بیان کردند. تغییرات گرادیان شیب می تواند بسیاری از مدل سازی فرآیندهای ژئومورفی به ویژه فرسایش آبی را تحت تأثیر قرار بدهد.

جدول ۳- معنی داری اختلاف بین میانگین پارامترهای ژئومورفومتری در تفکیک های مکانی مختلف DEM (آزمون Kruskal-Wallis)

Table 3. Difference between mean of Geomorphometry parameters in different spatial resolutions (Kruskal-Wallis test)

Terrain Attributes	Raster resolution (m)				
	10m	30m	60m	90m	120m
E	a	A	A	A	A
G	a	A	A	A	A
A	a	A	A	A	A
C _{min}	a	A	B	B	B
UP	a	B	C	C	C
STI	a	A	A	A	A

* تفاوت بین میانگین های هر پارامتر که فاقد حروف مشترک اند، معنی دار می باشد

مکانی دارای اختلاف معنی داری نمی باشد (جدول ۳). هان و همکاران (Han et al., 2018) یافتند که پارامتر جهت شیب تحت تأثیر تغییرات تفکیک مکانی نمی باشد. در شکل (۳-d) نتایج تحلیل آماری توزیع مکانی پارامتر انحناء حداقل برای هر کدام از تفکیک های مکانی DEM نشان داده شده است. از نظر ژئومورفولوژی، مقادیر مثبت، صفر و منفی انحناء حداقل به ترتیب مطابق با لندفرم های محلی محدب (تپه ها)، مسطح (دشت ها) و مقعر (دره ها) می باشند. با افزایش اندازه ی پیکسل، میانگین مقادیر انحناء حداقل افزایش می یابد. آزمون کروسکال - والیس برای انحناء حداقل تأیید نمود که تفکیک مکانی ۳۰ متر با تفکیک های مکانی ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ متر اختلاف معنی داری دارند (جدول ۳). در هنگامی که پارامتر انحناء حداقل از DEM مبنا محاسبه می شود، می توان یک طیف نسبتاً وسیع از مقادیر مثبت و منفی انحناء را مشاهده کرد که دلالت بر نرخ تغییرات بالا خمشی سطح توپوگرافی در میان مناطق نمونه برداری است. اما با انجام هرگونه تغییر در تفکیک مکانی نسبت به DEM مبنا، نرخ تغییرات خمشی و به دنبال آن محدوده ی مقادیر انحناء حداقل کاهش قابل توجهی می یابد. به این صورت که در تفکیک های مکانی ۹۰ و ۱۲۰ متر، مقادیر انحناء حداقل تمایل به صفر داشته و می توان بیشترین کاهش محدوده ی مقادیر

مقایسه ی مقادیر پارامتر جهت شیب استخراج شده از تفکیک های مکانی مختلف DEM در شکل (۳-c) نشان داده شده است. هیچ روند مشخصی برای تغییرات پارامتر جهت شیب قابل مشاهده نمی باشد. این مشاهده با یافته های یو و همکاران (Wu et al., 2008) مطابقت دارد. مقدار حداقل پارامتر جهت شیب در تمامی تفکیک های مکانی معادل ۱- درجه و مربوط به منطقه ی مسطح منطقه ی مطالعاتی می باشد که با تغییرات تفکیک مکانی ثابت مانده است. کمترین مقدار حداکثر و میانگین پارامتر جهت شیب مربوط به تفکیک های مکانی ۱۲۰ متر می باشد. بیشترین میزان اختلاف بین مقادیر حداکثر و میانگین پارامتر جهت شیب به ترتیب برابر است با ۵۷ و ۲۴ درجه که به بین تفکیک مکانی مبنا و ۱۲۰ متری مشاهده می شود. چانگ و تاسی (Chang & Tsai, 1991) مشاهده نمودند که با کاهش تفکیک مکانی DEM اختلاف مقادیر جهت شیب افزایش و صحت آن نیز کاهش می یابد. آن ها این اختلاف را از نظر آماری به وسیله ی پستی و بلندی نسبی^۱ و انحراف از معیار ارتفاع قابل توضیح دانستند. پستی و بلندی نسبی برای هر پیکسل از اختلاف بین بیشترین و کمترین مقادیر ارتفاع پیکسل های درون یک پنجره تحلیل همسایگی^۲ محاسبه می شود. بر اساس آزمون کروسکال - والیس، میانگین پارامتر جهت شیب در بین هیچ کدام از تفکیک های

3. Bending

1. Relative relief

2. Neighborhood analysis window

اینکه با یکدیگر اختلاف معنی‌داری دارند با سه تفکیک مکانی ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ متر نیز اختلاف معنی‌داری را نشان می‌دهند. البته بین میانگین‌های سه تفکیک مکانی ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ متر اختلاف معنی‌داری مشاهده نمی‌شود (جدول ۳). با افزایش تفکیک مکانی DEM محدوده‌ی مقادیر منطقه‌ی بالادست افزایش می‌یابد. یووان و همکاران (Yuan *et al.*, 2006) در یک حوضه‌ی آبریز با مساحت ۷۰ کیلومتر مربع مشاهده نمودند که مقادیر میانگین پارامتر منطقه‌ی بالادست با کاهش تفکیک مکانی DEM افزایش می‌یابد. تأثیر اندازه‌های مختلف تفکیک مکانی DEM بر مقادیر شاخص انتقال رسوب در شکل (۳-۱) نشان داده شده است. شاخص انتقال رسوب که معادل فاکتور طول شیب (LS) در معادله‌ی جهانی فرسایش خاک (USLE) می‌باشد، تابعی از دو پارامتر گرایان شیب (G) و سطح ویژه‌ی حوضه‌ی آبریز (منطقه‌ی بالادست تقسیم بر اندازه‌ی پیکسل) است. مقدار میانگین و حداکثر شاخص انتقال رسوب با تغییر ابعاد پیکسل از ۱۰ متر به ۳۰ متر افزایش داشته است. اما با افزایش اندازه‌ی پیکسل از ۳۰ متر تا ۱۲۰ متر مقدار میانگین و حداکثر شاخص انتقال رسوب کاهش یافته است. آزمون کرووسکال - والیس تأیید نمود که اختلاف میانگین‌های شاخص انتقال رسوب در بین تفکیک‌های مکانی مختلف، معنی‌دار نمی‌باشد (جدول ۳). این چنین روند تغییراتی برای مقادیر حداکثر دامنه‌ها کمتر پیش‌بینی می‌شود. این امر موجب کم برآورد سرعت و همگرایی جریان آب در منطقه (پیکسل) می‌شود که دو فاکتور مهم و تأثیرگذار بر فرسایش صفحه‌ای و شیاری هستند. شاخص حمل رسوب با توجه به اینکه بیانگر پتانسیل فرسایش‌پذیری سطوح به فرسایش صفحه‌ای و شیاری می‌باشد، در نتیجه در تفکیک مکانی درشت‌تر می‌توان مقدار کمتری از شاخص انتقال رسوب را انتظار داشت. کو و همکاران (Koo *et al.*, 2016) تأثیر تفکیک‌های مکانی مختلف DEM بر شاخص انتقال رسوب را در پنج حوضه‌ی آبریز موردبررسی قرار دادند همچنین، هان و همکاران (Han *et al.*, 2018) در یک دامنه با مساحت ۰/۴۲ هکتار مشاهده نمودند که در طول تغییر تفکیک مکانی DEM

را مشاهده نمود. برآورد کم شدید مقادیر انحناء حداقل در اندازه پیکسل‌های بزرگ می‌تواند ناشی از پدیده‌ی هموارسازی توپوگرافی باشد که در هنگام فرآیند بازیابی DEM رخ داده است و باعث از بین رفتن برخی از جزئیات مربوط به مناطق تفرع و تحذب زمین‌نما شده باشد. در برخی از مطالعات انجام شده مانند تامپسون و همکاران (Thompson *et al.*, 2001)، کیانزل (Kienzle, 2004) و یو و همکاران (Wu *et al.*, 2008) چنین روندی برای انحنای شیب (مانند انحناء پروفیل و انحناء مسطح) با کاهش تفکیک مکانی مشاهده شده است. تامپسون و همکاران (Thompson *et al.*, 2001) علت کاهش محدوده‌ی مقادیر انحنای شیب را هموارسازی توپوگرافی بیان نمودند که از اندازه پیکسل‌های بزرگ‌تر ناشی شده است و باعث فقدان برخی از جزئیات مانند شیب‌های تند و کوتاه می‌شود.

در شکل (۳-۲) تأثیر تفکیک مکانی DEM بر مقادیر پارامتر منطقه‌ی بالادست مربوط به نقاط نمونه‌برداری نشان داده شده است. منطقه‌ی بالادست (یا منطقه‌ی مؤثر بالادست^۱) یکی از مهم‌ترین پارامترهای هیدرو-ژئومورفومتری است که بیانگر مساحت منطقه‌ی بالادست یک طول معین از خط کنتور که در جریان عبوری از آن کنتور مشارکت دارد. در DEM که ساختار رستری دارند، طول منحنی تراز تقریباً برابر با اندازه‌ی یک پیکسل می‌باشد. در این حالت می‌توان با جمع نمودن مساحت تمامی پیکسل‌هایی که جریان آن‌ها در پیکسل مدنظر انباشته می‌شود، مقدار پارامتر منطقه‌ی بالادست را برای آن پیکسل تعیین نمود (Gallant & Wilson, 2000). بر این اساس، کاملاً روشن است که پارامتر منطقه‌ی بالادست وابسته به اندازه‌ی مقیاس مطالعاتی باشد. در شکل (۳-۲) مشاهده می‌شود که همراه با کاهش تفکیک مکانی DEM، مقدار میانگین منطقه‌ی بالادست افزایش می‌یابد. علت این افزایش کاملاً مشخص است، چرا که برآورد منطقه‌ی بالادست بر اساس مساحت پیکسلی می‌باشد که در آن جریان انباشته شده است. با کاهش تفکیک مکانی، مساحت پوششی پیکسل بزرگ‌تر و جریان منطقه‌ی بالادست، بیشتر انباشته می‌شود. بر اساس آزمون کرووسکال - والیس، میانگین پارامتر جریان جمعی دو تفکیک‌های مکانی ۱۰ و ۳۰ متر علاوه بر

1. Upslope contributing area

برازش شده برای پیش‌بینی رس خاک در تفکیک مکانی DEM ۳۰، ۹۰ و ۱۲۰ متر دارای مقادیر بالایی از معیار AIC_C می‌باشد و در هیچ کدام از سطوح معنی‌دار نشده‌اند. اما مدل به دست آمده در تفکیک مکانی ۶۰ متر که دارای ترکیب پارامتری منطقه‌ی بالادست (UP) و انحناء حداقل (C_{min}) می‌باشد، در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار شده است. این مدل تنها توانسته است که ۲۴ درصد از تغییرات رس را توجیه کند. تمامی مدل‌هایی که برای عمق خاک در تفکیک‌های مکانی مختلف DEM به دست آمد، در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار بوده‌اند و توانسته‌اند ۵۸ تا ۸۰ درصد از کل تغییرات را در منطقه پیش‌بینی کنند. بهترین ترکیب پارامتری در تفکیک مکانی ۳۰ متر مشاهده می‌گردد که دارای ارتفاع (D)، جهت شیب (A)، منطقه‌ی بالادست (UP) و شاخص انتقال رسوب (STI) می‌باشد. این مدل ۸۰ درصد از کل تغییرات عمق خاک را در منطقه توجیه نمود. مدل‌های مربوط به تفکیک مکانی ۱۰ و ۱۲۰ متر دارای ترکیب پارامتری مشابه می‌باشند و به ترتیب ۵۸ و ۶۴ درصد از کل تغییرپذیری را تبیین کرده‌اند. در ترکیب پارامتری این دو مدل برای تبیین عمق خاک ارتفاع (D) و جهت شیب (A) وارد شده‌اند. وجود همبستگی آماری و وارد شدن پارامترهای ژئومورفومتری در مدل‌های پیش‌بینی ویژگی‌های خاک می‌تواند مؤید این موضوع باشد که توپوگرافی به واسطه‌ی تأثیر گذاری بر فرآیندهای ژئومورفولوژی و هیدرولوژی منطقه‌ی مطالعه‌ی، بخشی از تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های خاک را در حوضه‌ی آبریز کنترل می‌کند. در جدول (۵) مشاهده می‌گردد که مقدار معیار R²_{adj} ویژگی‌های خاک در برخی از تفکیک‌های مکانی DEM قابل توجه نیست.

از ۰/۲۵ تا ۱۰ متر شاخص‌های آماری میانگین و مقدار حداقل شاخص انتقال رسوب (STI) افزایش می‌یابد.

مدل‌سازی خاک-زمین‌نما

در جدول (۵) بهترین ترکیب پارامتری زمینی در هر تفکیک مکانی DEM برای مدل‌سازی ویژگی‌های خاک ارائه شده است. انتخاب بهترین مدل بر اساس معیار AIC_C انجام گرفت. همواره بهترین مدل دارای کمترین مقدار از معیار AIC_C است و مقدار معیار ضریب تعیین تصحیح شده (R²_{adj}) مربوط به آن بالا می‌باشد. با تغییر در تفکیک مکانی DEM، ترکیب پارامتری و مقادیر دو معیار آماری تغییر می‌کنند. در تمامی ویژگی‌های خاک، برای تغییرات مقادیر دو معیار AIC_C و R²_{adj} در طول تفکیک مکانی مختلف DEM روند مشخصی مشاهده نمی‌شود. برای توزیع اندازه‌ی ذرات خاک (در صد شن، سیلت و رس) بهترین مدل‌های پیش‌بینی در تفکیک مکانی DEM ۱۰ متر برازش شده است. این سه مدل در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار می‌باشند و برای شن، سیلت و رس توانسته‌اند به ترتیب ۵۹، ۵۰ و ۵۸ درصد از کل تغییرپذیری مکانی را در محدوده‌ی مورد مطالعه توجیه نمایند. ترکیب پارامتری این سه مدل مشابه بوده و دارای پارامترهای منطقه‌ی بالادست (UP)، انحناء حداقل (C_{min}) و شاخص انتقال رسوب (STI) هستند. برای شن و سیلت خاک در دیگر تفکیک‌های مکانی DEM، تمامی مدل‌های به دست آمده در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار بوده‌اند و دارای ترکیب پارامتری مشابه ولی با تعداد پارامتر کمتر می‌باشند؛ به گونه‌ای که در تفکیک مکانی DEM در شیب‌تر از ۳۰ متر تنها پارامتر گرادیان شیب (G) وارد ترکیب پارامتری مدل شده است. این مدل‌ها برای شن ۴۳ تا ۵۳ درصد و برای سیلت ۳۳ تا ۴۶ درصد از کل تغییرپذیری را توجیه می‌کنند. مدل‌های رگرسوونی

جدول ۴- ضرایب همبستگی اسپیرمن بین شاخص انتقال رسوب و پارامترهای گرادیان شیب و منطقه بالادست (n=18)

Table 4. Correlation coefficient of Spearman between sediment transportation index (STI) and Upland area(UP) (n=18)

Terrain Attributes	Raster resolution (m)				
	10m	30m	60m	90m	120m
G	0.94**	0.95**	0.90**	0.91**	0.94**
UP	0.58*	0.42	0.34	-0.09	0.20

*Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed)

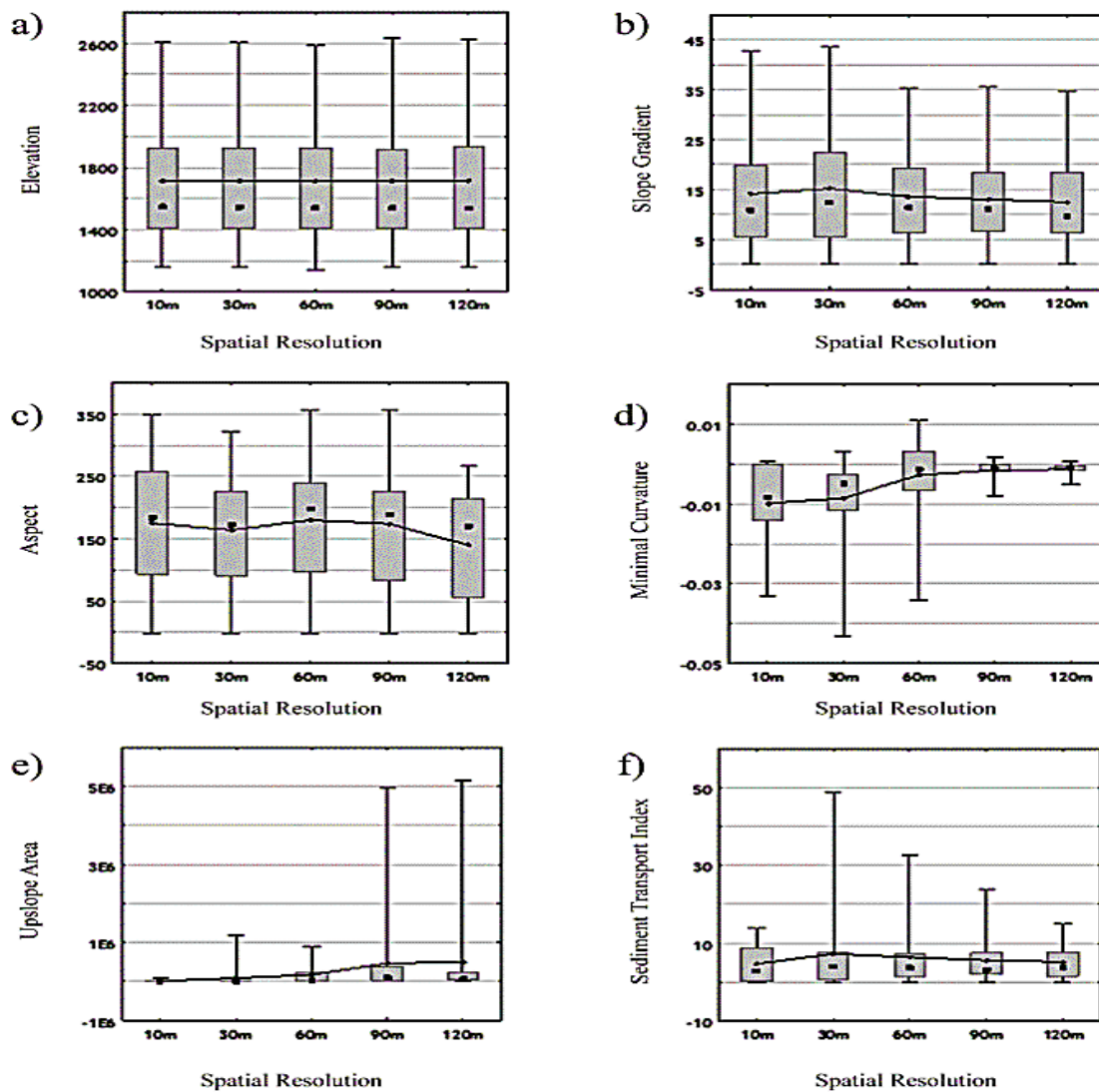
**Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

ثابت می‌کند که تفکیک مکانی ریز همیشه نمی‌تواند بهترین مدل پیش‌بینی را برای ویژگی‌های خاک ایجاد نماید. با توجه به اینکه تهیه DEM با تفکیک مکانی ریز همواره می‌تواند هزینه‌های زیادی را داشته باشد، لذا تعیین محدوده‌ی DEM بهینه اهمیت زیادی دارد. در این پژوهش، انتخاب بهترین ترکیب پارامتری زمینی برای مدل‌سازی ویژگی‌های خاک بر اساس دو معیار AIC و R^2_{adj} نیز انجام گردید. برای تمامی ویژگی‌های خاک در تفکیک‌های مکانی مختلف DEM مشاهده می‌گردد که ترکیب‌های زمینی منتخب بر اساس این دو معیار مشابه به هم بوده‌اند. در این مطالعه برای رفع مشکل ارزیابی از معیار اطلاعات آکائیک تصحیح شده (AIC_C) استفاده گردید. اگرچه تعداد نمونه‌های این مطالعه محدود است اما یکی از جنبه‌های ویژه‌ی این مطالعه محسوب می‌شود زیرا هر نمونه شاهدی از وضعیت خاک یک جز از واحد اراضی کل حوضه‌ی آبریز است.

مسئله‌ی فوق می‌تواند نشان‌دهنده‌ی اهمیت تعیین حجم نمونه بهینه پیش از شروع فرآیند مدل‌سازی خاک-زمین‌نما باشد. اگر حجم نمونه‌برداری از حجم نمونه بهینه فاصله داشته باشد، مدل‌های برازش شده ممکن است فاقد کارایی لازم برای تبیین ویژگی‌های خاک باشند. تامپسون و همکاران (Thompson *et al.*, 2001) در پژوهشی با هدف مدل‌سازی عمق افق A خاک در یک دامنه‌ی کوچک متوجه شدند که تأثیر تفکیک مکانی و منبع DEM بر نتایج مدل‌سازی خاک - زمین‌نما قابل توجه نیست. همانند عوامل مؤثر در تعیین تفکیک مکانی DEM بهینه، اندازه نمونه‌ی بهینه برای یک منطقه‌ی مشخص به مقیاس عارضه‌ی محلی مهم و میزان تنوع در پیچیدگی زمین‌نما ارتباط دارد. ویو و همکاران (Wu *et al.*, 2008) دریافتند که آگاهی از اینکه کدام تفکیک مکانی DEM مناسب‌ترین مدل را در یک زمین‌نمای خاص تولید می‌کند، می‌تواند یک راهنما برای بهبود استراتژی‌های نمونه‌برداری باشد.

این امر می‌تواند ناشی از روابط غیرخطی بین ویژگی‌های بیوفیزیکی و پارامترهای زمینی باشد و یا بنا به دلایلی میزان همبستگی بین پارامترهای زمینی و خاک در این تفکیک‌های مکانی DEM کم و یا اینکه از بین رفته است. البته کم بودن مقدار معیار R^2_{adj} می‌تواند مربوط به این باشد که در این زمین‌نما عامل و یا پارامتر زمینی مؤثر دیگری در توزیع ویژگی‌های خاک وجود دارد که در فرآیند مدل‌سازی به آن توجه نشده است. انتخاب پارامترهای زمینی با توجه به عوامل مؤثر در توزیع ویژگی‌های خاک هدف و همچنین مشاهدات مربوط به مطالعه‌ی پیشین انجام‌شده در این حوضه‌ی آبریز صورت گرفت (Khanifar *et al.*, 2018). جریان آب سطحی به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر در توزیع ذرات متشکله ماتریکس خاک در سطح زمین‌نما می‌باشد. لذا پارامترهای زمینی که معیاری از سرعت و تمرکز یا پخشیدگی جریان آب می‌باشند، برای مدل‌سازی توزیع اندازه‌ی ذرات خاک در نظر گرفته شدند. نتایج ارائه شده در جدول (۵) می‌تواند بیانگر آن باشند که در مناطقی که دارای تنوع در پیچیدگی زمین هستند، این امکان نمی‌باشد که یک تفکیک مکانی DEM را برای مدل‌سازی تمامی ویژگی‌های خاک، بهینه دانست. بر این اساس، نویسندگان این مقاله نمی‌توانند تفکیک و یا تفکیک‌های مکانی خاصی را برای مدل‌سازی در دیگر مناطق توصیه نمایند، چرا که تفکیک مکانی بهینه باید علاوه بر نوع مطالعه و هدف مدل‌سازی با توجه به ژئومورفولوژی منطقه نیز تعیین گردد. سورسرن و سایبرت (Sorensen & Seibert, 2007) نیز بیان می‌دارند که ممکن است تفکیک‌های مکانی متفاوت، برای متغیرهای بیوفیزیکی متفاوت مناسب باشند.

تفکیک مکانی DEM مناسب برای تحلیل خاک-زمین‌نما باید به‌اندازه‌ای باشد که عوارض توپوگرافی مهم را برای هر متغیر خاک نشان بدهد. استفاده از تفکیک ریزتر ممکن است به‌جای بهبود، سبب ضعف همبستگی با پارامترهای توپوگرافی شود (Sorensen & Seibert, 2007). نتایج ارائه شده در جدول (۵) نیز این موضوع را



شکل ۳- آمار توصیفی شش پارامتر زمینی برای پنج تفکیک مکانی DEM، (a) ارتفاع، (b) شیب، (c) جهت شیب، (d) انحناء حداقل، (e) منطقه‌ی بالادست و (f) شاخص انتقال رسوب.

Figure 3. Descriptive statistics of six parameters for 5 resolutions, a) Elevation, b) Slope, c) Aspect, d) Curvature, e) Upslope Area, f) Sediment transport index

هورن و ایزالپچیلی (Horn & Israelachvili, 1981) نسبت به زونبرگن و تور (Zevenbergen & Thorne, 1987) کمی پایین‌تر هستند اما مقادیر RMSE شیب‌های محاسبه شده این دو روش در طول تفکیک‌های مختلف مورد بررسی (۵ تا ۱۰۰ متر) همواره مشابه می‌باشند. برای جهت شیب (A) هیچ تفاوت قابل توجهی بین این دو روش مشاهده نشد (Kienzle, 2004).

اگر چه در این مطالعه مقوله‌ی تأثیر روش‌های مختلف محاسبه‌ی پارامترهای زمینی در تحلیل خاک-زمین‌نما بررسی نشده است، اما سورسن و سایبرت (Sorensen & Seibert, 2007) دریافتند که روش‌های محاسباتی متفاوت می‌تواند برای مدل‌سازی ویژگی‌های هیدرولوژی و شیمیایی یک سایت مطالعاتی مناسب باشد. کیانز (Kienzle, 2004) نیز مشاهده نموده است که صرف‌نظر از تفکیک مکانی DEM که برای محاسبه‌ی شیب استفاده شده است، مقادیر شیب برآورد شده به روش

جدول ۵ - بهترین ترکیب‌های پارامتری (مدل) انتخاب شده برای پیش‌بینی خصوصیات خاک مورد مطالعه در پنج تفکیک مکانی DEM

Table 5. The best combination of selected parameters for prediction of soil properties at 5 DEM resolutions (n=18), *0.05, **0.01

Data Set		Raster resolution (m)				
Soil properties	Model	10m	30m	60m	90m	120m
Sand	Attributes	C _{min} , UP, STI	C _{min} , UP	G	G	G
	R ² _{adj}	0.59**	0.53**	0.43**	0.54**	0.46**
	AIC _C	45.45	49.18	46.42	42.54	45.50
Silt	Attributes	C _{min} , UP, STI	C _{min} , UP	G	G	G
	R ² _{adj}	0.50**	0.41**	0.35**	0.46**	0.33**
	AIC _C	45.24	49.23	48.85	45.72	49.54
Clay	Attributes	C _{min} , UP, STI	C _{min}	C _{min} , UP	G	G
	R ² _{adj}	0.58**	0.07 ^{ns}	0.24*	0.15 ^{ns}	0.14 ^{ns}
	AIC _C	45.81	55.31	53.92	53.71	54.04
K	Attributes	D, G	D, C _{min}	D, A	D	D
	R ² _{adj}	0.37*	0.31*	0.35*	0.20*	0.20*
	AIC _C	47.42	52.23	51.15	52.72	52.70
Depth	Attributes	D, G	D, A, STI, UP	D, C _{min} , STI	D, C _{min} , STI	D, G
	R ² _{adj}	0.58**	0.80**	0.72**	0.76**	0.64**
	AIC _C	43.13	35.78	38.53	35.80	40.41
EC	Attributes	D, C _{min}	D	D, G, C _{min} , STI	D	D, A, C _{min} , STI
	R ² _{adj}	0.39**	0.18*	0.53**	0.17*	0.49*
	AIC _C	49.82	53.14	51.25	53.21	52.62
P	Attributes	G	G, C _{min}	C _{min} , STI	STI	G, C _{min} , STI
	R ² _{adj}	0.13 ^{ns}	0.52**	0.31*	0.06 ^{ns}	0.58**
	AIC _C	54.19	45.49	52.30	55.49	45.73
pH	Attributes	G, D	C _{min} , D	D, STI	D, STI	D, A, C _{min}
	R ² _{adj}	0.33*	0.42**	0.37*	0.40**	0.67**
	AIC _C	51.55	49.19	50.61	49.41	41.33

نتیجه‌گیری کلی

ژئومورفومتری یک ابزار توانمند در تحلیل خاک-زمین‌نما است که امکان استفاده از پارامترهای زمینی را جهت مدل‌سازی ویژگی‌های خاک فراهم می‌سازد. تفکیک مکانی DEM که در ژئومورفومتری برای محاسبه‌ی پارامترهای زمینی استفاده می‌شود، عاملی مهم در نتایج تحلیل خاک-زمین‌نما می‌باشد. با تغییر در تفکیک مکانی، میزان نمایش جزئیات سطح توپوگرافی تغییر می‌کند و همین امر منجر به تغییر در مقادیر پارامترهای زمینی و میزان همبستگی آن‌ها با ویژگی‌های بیوفیزیکی هدف می‌شود. با تغییر در تفکیک مکانی، مقادیر حداقل برخی از پارامترهای زمینی ثابت مانده است، اما مقادیر حداکثر و میانگین تمامی آن‌ها دچار تغییر شده است، به‌گونه‌ای که در بین برخی از تفکیک‌های مکانی تغییرات میانگین معنی‌دار می‌باشد (شکل ۳ و جدول ۳). با

کاهش تفکیک مکانی DEM مقدار میانگین و حداکثر گرادیان شیب و شاخص انتقال رسوب کاهش داشته است. روند تغییرات شاخص انتقال رسوب به طور عمده تحت تأثیر گرادیان شیب می‌باشد. مقدار حداقل و میانگین پارامتر انحناء حداقل با کاهش تفکیک مکانی DEM افزایش دارد. اما محدودده‌ی مقادیر آن کاهش قابل توجهی را نشان می‌دهد. با کاهش تفکیک مکانی مقادیر تمامی شاخص‌های آماری به غیر از میانه پارامتر منطقه‌ی بالادست (UP) افزایش یافته است. برای پارامتر جهت شیب، تغییرات مقدار میانگین و حداکثر دارای روند نامشخصی است. یکی از اهداف این پژوهش بررسی تأثیر تفکیک مکانی DEM بر بهترین ترکیب پارامتری انتخاب شده بوسیله‌ی معیار AIC_C برای مدل‌های پیش‌بینی ویژگی‌های خاک (بافت خاک، پتاسیم و فسفر در دسترس، pH، EC و عمق خاک) جهت انتخاب

خاک ساز می‌گردد. بر این اساس پیشنهاد می‌شود که با توجه به هدف مطالعه، محدوده‌ی تفکیک مکانی DEM بهینه بر اساس ژئومورفولوژی زمین‌نما تعیین گردد. علاوه بر تفکیک مکانی، در این پژوهش مشخص شد که حجم نمونه نیز می‌تواند بر فرآیند مدل‌سازی خاک-زمین‌نما تأثیرگذار باشد.

بهترین تفکیک مکانی DEM است. اما نتایج نشان می‌دهد که این امکان وجود ندارد که یک تفکیک مکانی DEM را برای مدل‌سازی تمامی ویژگی‌های خاک در یک منطقه، مناسب دانست. یک دلیل برای این امر می‌تواند تنوع در شدت پیچیدگی زمین منطقه‌ی مطالعاتی باشد که منجر به تغییرات زیادی در فرایندهای

References

- Akaike H. 1974. A new look at the statistical model identification. *IEEE transactions on automatic control*, 19 (6), 716-723.
- Bishop T. F., and Minasny B. 2016. Digital soil-terrain modeling: the predictive potential and uncertainty. In Grunwald, S. (Eds). *Environmental soil-landscape modeling*, CRC Press. pp. 185-213.
- Box G. E., Jenkins G. M., Reinsel G. C., and Ljung G. M. 2016. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. 5th Ed, John Wiley and Sons. 712p.
- Chaplot V., Walter C., and Curmi P. 2000. Improving soil hydromorphy prediction according to DEM resolution and available pedological data. *Geoderma*, 97(3): 405-422.
- Chang K. T., and Tsai B. W. 1991. The effect of DEM resolution on slope and aspect mapping. *Cartography and Geographic Information Systems*, 18(1), 69-77.
- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., and Böhner, J. 2015: System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4, *Geosci. Model Dev.*, 8, 1991-2007, doi:10.5194/gmd-8-1991-2015.
- Deng Y., Wilson J. P., and Bauer B. O. 2007. DEM resolution dependencies of terrain attributes across a landscape. *International Journal of Geographical Information Science*, 21(2), 187-213.
- Florinsky I. 2016. *Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology*. Second Ed., Academic Press, Amsterdam, pp. 7-68.
- Gallant J. C., and Wilson J. P. 2000. Primary Topographic Attributes. In Wilson, J. P. and Gallant, J. C. (Eds). *Terrain analysis: principles and applications*. John Wileys and Sons, New York, pp. 58-59.
- Han X., Liu J., Mitra S., Li X., Srivastava P., Guzman S. M., and Chen X. 2018. Selection of optimal scales for soil depth prediction on headwater hillslopes: A modeling approach. *Catena*, 163, 257-275.
- Khanifar J., Khademalrasoul A., and Amerikhah H. 2018. Effect of Digital Elevation Model (DEM) Spatial Resolution on Geomorphometric modeling of Soil aggregate stability. The First National Conference on Sustainable Development in Agricultural Sciences and Natural Resource. Tehran, Iran. (In Persian)
- Kienzle S. 2004. The effect of DEM raster resolution on first order, second order and compound terrain derivatives. *Transactions in GIS*, 8(1), 83-111.
- Koo J. Y., Yoon D. S., Lee D. J., Han J. H., Jung Y., Yang J. E., and Lim K. J. 2016. Effect of DEM Resolution in USLE LS Factor. *Journal of Korean Society on Water Environment*, 32(1), 89-97.
- Horn R.G. and Israelachvili, J.N. 1981. Direct measurement of structural forces between two surfaces in a nonpolar liquid. *The Journal of Chemical Physics*, 75(3), 1400-1411.
- McKenzie N. J., and Ryan P. J. 1999. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma*, 89(1): 67-94.
- Moore I. D., Grayson R. B., and Ladson A. R. 1991. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological processes*, 5(1), 3-30.
- Nath D. A. 2006. *Soil landscape modeling in the Northwest Iowa Plains region of O'Brien County, Iowa*, Master of Science, Iowa State University, USA.
- Park S. J., and Vlek P. L. 2002a. Soil-landscape analysis as a tool for sustainable land management. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 36(1), 31-49.
- Park S. J., and Vlek P. L. G. 2002b. Environmental correlation of three-dimensional soil spatial variability: a comparison of three adaptive techniques. *Geoderma*, 109(1-2), 117-140.

- Pierson F. B., and Mulla D. J. 1990. Aggregate stability in the Palouse region of Washington: effect of landscape position. *Soil Science Society of America Journal*, 54(5): 1407-1412.
- Pradhan B., and Sameen M. I. 2017. Effects of the Spatial Resolution of Digital Elevation Models and Their Products on Landslide Susceptibility Mapping. In Pradhan, B. (Ed.). *Laser Scanning Applications in Landslide Assessment*. Springer, pp. 133-150.
- Sørensen R., and Seibert J. 2007. Effects of DEM resolution on the calculation of topographical indices: TWI and its components. *Journal of Hydrology*, 347(1-2), 79-89.
- Sørensen R., Zinko U., and Seibert J. 2006. On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 10(1), 101-112.
- Smith M. P., Zhu A. X., Burt J. E., and Stiles C. 2006. The effects of DEM resolution and neighborhood size on digital soil survey. *Geoderma*, 137(1): 58-69.
- Sugiura N. 1978. Further analysts of the data by akaike's information criterion and the finite corrections: Further analysts of the data by akaike's. *Communications in Statistics-Theory and Methods*, 7(1), 13-26.
- Thompson J. A., Bell J. C., and Butler C. A. 2001. Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling. *Geoderma*, 100(1-2), 67-89.
- Wilson J. P., and Gallant J. C. 2000. Digital terrain analysis. In Wilson, J. P. and Gallant, J. C. (Ed.). *Terrain analysis: principles and applications*. John Wileys and Sons, New York, pp. 1-22.
- Wu W., Fan Y., Wang Z., and Liu H. 2008. Assessing effects of digital elevation model resolutions on soil-landscape correlations in a hilly area. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 126(3-4), 209-216.
- Zhang W., and Montgomery D. R. 1994. Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. *Water resources research*, 30(4), 1019-1028.
- Zhang H. Y., Shi Z. H., Fang N. F., and Guo M. H. 2015. Linking watershed geomorphic characteristics to sediment yield: Evidence from the Loess Plateau of China. *Geomorphology*, 234: 19-27.
- Yuan L., Zhou Q., Li W., Zhang Q., and Jiang W. 2006. DEM-based watershed topographic attributes extraction and analysis. In *EEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing*, Denver CO, pp. 902-904.
- Zevenbergen L. W., and Thorne C. R. 1987. Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12: 47-56.

Effects of Digital Elevation Model (DEM) Spatial Resolution on Soil Landscape Analysis (Case study Raakat watershed of Izeh, Khuzestan Province)

Javad Khanifar¹, Ataallah Khademalrasoul^{2*}, Hadi Amerikhah³

(Received: January 2019 Accepted: May 2019)

The most important factors which are effective for landscape analysis is spatial resolution of digital elevation model (DEM). In this study, the effect of spatial resolution on soil parameters and modeling of soil properties have studied. For this research 6 parameters including (height, slope gradient, slope aspect, minimal curvature, upland area and sediment transportation index) from 5 different spatial resolutions (10, 30 (base), 60, 90 and 120) have originated and for modeling of soil properties (soil texture, K, P, EC, pH and soil depth) have used. The differences between mean of each parameter of spatial resolutions accomplished using Kruskal-Wallis test and multi linear regression, then the best model in each spatial resolution was selected based on AIC_C index. Our results depicted that with coarser DEM, the mean of slope gradient (G), sediment transportation index (STI) and the minimum curvature (C_{min}) were decreased whereas the mean and minimum of upslope area (UP) was enhanced. Statistical indices of height showed the low sensitivity to spatial resolution variations. Changes of mean and maximum slope aspect in different spatial resolutions have no regular trend. Only minimum curvature and upland area have significant difference relating to different spatial resolutions. With changes of DEM spatial resolution, the best combination of parameters for modeling of soil properties and AIC_C and R²_{adj} will be change. Finally, our results illustrated that for an area with high variability of geomorphic conditions, there is no capability to use only one specific resolution for all soil properties.

Keywords: Sediment transportation index (STI), Geomorphometry, DEM, AIC_C, optimized spatial resolution

Khanifar J., Khademalrasoul A. A, Amerikhah H. 2020. Effects of digital elevation model (DEM) spatial resolution on soil landscape analysis (Case study Raakat watershed of Izeh, Khuzestan Province). *Applied Soil Research*. 8(1):121-135.

1. Former MSc Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

2. Assistant Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

3. Scientific member, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

*Corresponding Author Email: Ataallahsoil@gmail.com