

پیش‌بینی سولوم خاک با استفاده از ویژگی‌های توپوگرافی در بخشی از اراضی تپه ماهوری کوه‌رنگ در زاگرس مرکزی

عبدالمحمد محنت‌کش^{*1} - شمس‌الله ایوبی² - احمد جلالیان³

تاریخ دریافت: 1393/03/21

تاریخ پذیرش: 1393/10/09

چکیده

به طور کلی عمق خاک در مناطق تپه‌ماهوری به دلایل مختلف متغیر است. روش‌های معمول مطالعه خاک برای ارزیابی عمق خاک در مناطق کوهستانی و تپه‌ماهوری، نیازمند صرف زمان و فعالیت زیاد است. این تحقیق به منظور بررسی رابطه بین عمق خاک و ویژگی‌های توپوگرافی در یک منطقه تپه‌ماهوری در غرب ایران انجام شد. برای انجام این تحقیق، 100 نقطه نمونه برداری با استفاده از روش تصادفی طبقه شده، و با در نظر گرفتن تمام موقعیت‌های شیب شامل قله شیب، شانه شیب، شیب پستی، پای شیب و پنجه شیب انتخاب و عمق خاک در این نقاط اندازه‌گیری شد. یازده ویژگی اولیه و ثانویه توپوگرافی از مدل رقومی ارتفاع (DEM) استخراج شد. نتایج حاصل از رگرسیون چند متغیره خطی (MLR) نشان داد که درجه شیب، شاخص خبسی، سطح ویژه حوضه و شاخص انتقال رسوب که در این مدل گنجانده شده بودند، می‌تواند حدود 76 درصد تغییرات عمق خاک در منطقه انتخاب شده را توجیه نماید. این روش پیشنهادی ممکن است برای دیگر مناطق تپه‌ماهوری در مناطق نیمه خشک و در مقیاس بزرگتر قابل استفاده باشد.

واژه‌های کلیدی: عمق خاک، مدل خاک - زمین نما، مدل رگرسیون خطی چند متغیره، موقعیت شیب

مقدمه

کم عمق هستند یا دارای برخی خواص نامطلوب در خاک زیرسطحی همچون افق پتروکلسیک، و یا سنگ بستر است که اثر نامطلوبی بر رشد و عملکرد محصولات دارد (11 و 15).

پستی و بلندی به عنوان یکی از عوامل اصلی تشکیل دهنده خاک، خواص متعددی از خاک را کنترل می‌کند. بسیاری از دانشمندان علوم خاک توپوگرافی را به عنوان یکی از عوامل خاک‌ساز که تأثیر قابل توجهی در توزیع مکانی خصوصیات خاک و به ویژه عمق خاک دارد، معرفی کرده‌اند (3). بنابراین، اطلاعات کمی ویژگی‌های توپوگرافی در شکل‌گیری مدل‌های رقومی زمین⁴ (DTMs) به کار گرفته شده است. پیش‌بینی عمق خاک با استفاده از ویژگی‌های توپوگرافی به طور عمده به: (1) مقیاس مکانی تغییرات توپوگرافی در منطقه، (2) ماهیت فرآیندهای مسئول در ایجاد تنوع مکانی در عمق خاک، و (3) درجه‌ای که روابط زمین - خاک توسط فعالیت‌های انسانی مختل شده‌اند، بستگی دارد (2، 8، 23 و 26).

از آنجایی که پیش‌بینی خواص خاک براساس مدل رقومی زمین، می‌تواند روابط بین خاک و ویژگی‌های توپوگرافی در هر نقطه از زمین‌نما را توصیف نماید (21)، داده‌های کمی توپوگرافی اغلب در مطالعات خاک از جمله مدل‌سازی و پیش‌بینی خواص خاک استفاده

عمق مؤثر خاک به عنوان ضخامت از سطح خاک تا افق غیر قابل نفوذ تعریف شده است. این عامل می‌تواند به عنوان مهم‌ترین شاخص خاک، در اکوسیستم‌هایی که تحت تأثیر بیابان‌زایی و تخریب قرار دارند، در نظر گرفته شود. عمق خاک به عنوان تابعی از عوامل مختلف از جمله شیب، کاربری اراضی، انحناء، مواد مادری، شدت هوازدگی، آب و هوا، پوشش گیاهی، وسعت منطقه بالادست، و جنس سنگ‌ها متفاوت است (8 و 12). عمق خاک در نتیجه فرسایش خاک کاهش پیدا می‌کند و این مسئله به عنوان یک تهدید جدی برای کیفیت و باروری خاک در مناطق تپه‌ماهوری غرب ایران با سرعت بالای هدر روی خاک، مطرح است (1). اغلب خاک‌های تپه‌ها در محل با شیب تند (موقعیت شانه شیب)،

1-استادیار پژوهش، گروه خاک‌شناسی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی چهارمحال و بختیاری

* - نویسنده مسئول: (Email: a_mehnatkesh@yahoo.com)

2-استاد، گروه خاک‌شناسی دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

3-استاد گروه خاک‌شناسی دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد واحد خوراسگان اصفهان

اندازه‌گیری‌ها در 20 تپه نماینده از منطقه مورد مطالعه انجام شد. در منطقه انتخابی، با استفاده از روش تصادفی طبقه‌بندی شده، 100 نقطه در تمام موقعیت‌های شیب شامل قله شیب، شانه شیب، شیب پستی، پای شیب و پنجه شیب در نظر گرفته شد. موقعیت این نقاط نمونه‌برداری توسط GPS (مدل 76CSx) ثبت شد. در این نقاط 100 خاکرخ حفر، نیم‌رخ این خاک‌ها تشریح و ضخامت سولوم و افق A برای هر پروفیل اندازه‌گیری شد (شکل 2). مطالعه این 100 پروفیل خاک در مناطق تپه‌ماهوری کار بسیار پر زحمت و پر هزینه در طی 3 ماه بود.

مدل رقومی زمین (DTM)

با استفاده از نرم‌افزار ایلیوس نسخه 3 داده‌های جمع‌آوری شده برای ایجاد مدل رقومی ارتفاع (DEM) منطقه با پیکسل‌هایی به ابعاد 10×10 متر مورد استفاده قرار گرفت و سپس ویژگی‌های توپوگرافی از این مدل رقومی ارتفاع با استفاده از نرم‌افزارهای ایلیوس و تس 6 (9) استخراج شد. مور و همکاران (13) ویژگی‌های زمین را به دو دسته شامل اولیه و ثانویه (مربک) تقسیم کردند. ویژگی‌های اولیه به طور مستقیم از DEM محاسبه و شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، مساحت حوضه آبریز، منطقه پراکندگی، انحنا سطحی، انحنا عمقی، انحنا مماسی و عوارض ناهموار هستند. ویژگی‌های ثانویه یا مرکب ترکیبی از ویژگی‌های اولیه هستند که معمولاً شاخص‌هایی برای توصیف تنوع مکانی بعضی فرآیندهای خاص در زمین‌ها مانند محتوای آب خاک، پتانسیل فرسایش صفحه‌ای، شاخص قدرت جریان، شاخص خیزی و شاخص انتقال رسوب می‌باشند. محاسبه ویژگی‌های توپوگرافی بر مبنای روش‌های ارائه شده توسط ویلسون و گالانت (24) انجام شد. در جدول 1 معادلات مربوط برای محاسبه بعضی شاخص‌های توپوگرافی مورد نظر ارائه شده است.

تجزیه و تحلیل آماری

آمار توصیفی از داده‌های آزمایشی از جمله میانگین، کمینه، بیشینه، چولگی، کشیدگی یا نقطه اوج⁸ و دامنه⁹ و همچنین ضریب ضریب تغییرات¹⁰ با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS نسخه 16 تعیین گردید.

می‌شود. شیوه‌های اکتساب داده‌های مزرعه‌ای مانند حفر گودال و ترانشه کار بسیار پر زحمت و پر هزینه و مستلزم عملیات میدانی و انجام تجزیه‌های آزمایشگاهی گسترده هستند. این داده‌ها می‌توانند به طور موثر توسط مدل‌های خاک-زمین‌نما با استفاده از متغیرهای کمکی تکمیل شوند و از این طریق باعث صرفه جویی در زمان، نیروی کار و هزینه‌ها گردند. ویژگی‌های پستی و بلندی متعددی همچون شیب و انحناء (22) و ویژگی‌های مرکب پستی و بلندی (19) برای پیش‌بینی عمق خاک به کار گرفته شده است. بسیاری از مطالعات از جمله روش‌های زمین‌آمار از ویژگی‌های زمین به عنوان متغیر کمکی برای برآورد خواص خاک استفاده کرده‌اند (6، 10، 14 و 18).

از طرفی مدل‌های رگرسیون خطی چند گانه به طور گسترده برای پیش‌بینی خواص خاک و عمق خاک در مقیاس حوزه آبخیز استفاده شده است (3). تجزیه و تحلیل مطابقت متعارفی¹ (16)، دانش تخصصی² و منطق فازی³ (25)، تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی⁴ و طبقه‌بندی حداکثر درست‌نمایی⁵ (2) و رگرسیون خطی چند متغیره و طبقه‌بندی حداکثر درست‌نمایی (26) نیز برای پیش‌بینی عمق خاک استفاده شده است.

با توجه به این که برای پیش‌بینی عمق خاک با استفاده از ویژگی‌های توپوگرافی در اراضی تپه‌ماهوری مناطق خشک و نیمه خشک مطالعه‌ای انجام نشده است، این تحقیق با هدف بررسی رابطه بین عمق خاک و ویژگی‌های توپوگرافی و پیش‌بینی عمق خاک با استفاده از مدل آماری رگرسیون چند متغیره در مناطق تپه‌ماهوری غرب ایران انجام شد.

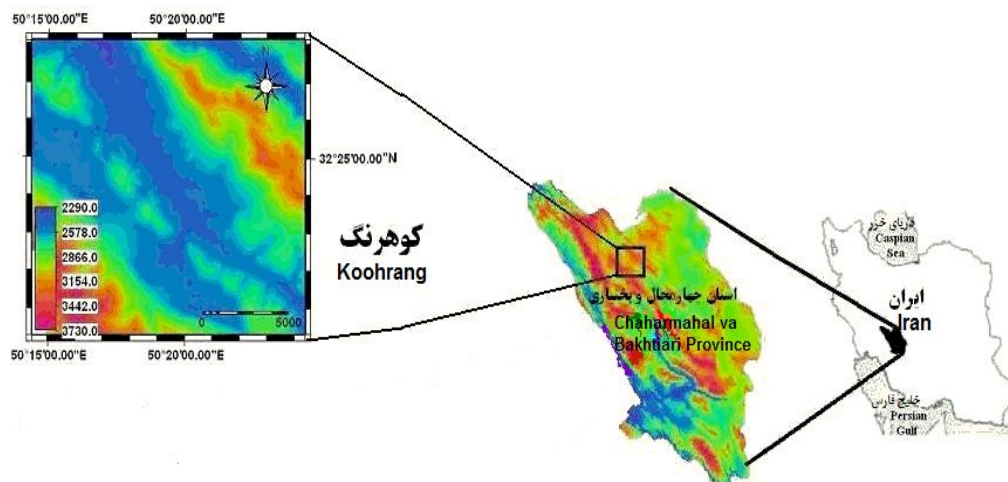
مواد و روش‌ها

توصیف منطقه مورد مطالعه

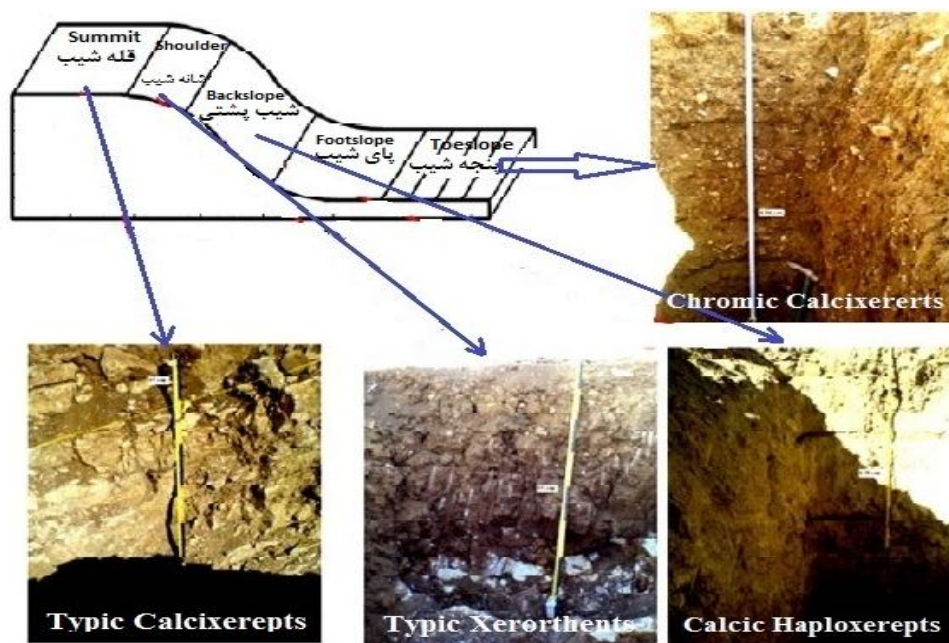
منطقه مورد مطالعه با وسعت حدود 16500 هکتار در منطقه کوهرنگ بین $20^{\circ} 32'$ تا $30^{\circ} 32'$ عرض جغرافیایی شمالی و $14^{\circ} 50'$ تا $24^{\circ} 50'$ طول جغرافیایی شرقی در استان چهارمحال و بختیاری در غرب ایران واقع شده است (شکل 1). ارتفاع متوسط این منطقه حدود 2500 متر است. میانگین درجه حرارت سالانه $9/4$ درجه سانتی‌گراد و مجموع بلند مدت بارش سالانه 1400 میلی‌متر است. رژیم‌های رطوبتی و حرارتی خاک در این منطقه به ترتیب تیپیک زریک و مزیک هستند.

6 -TAS
7 -Skewness
8 -Kurtosis
9 -Range
10 -Coefficient of Variation

1 -Canonial Correspondence Analysis
2 -Expert Knowlagde
3 -Fuzzy Logic
4 -Principal Component Analysis
5 -Maximum Likelihood Classification



شکل 1- موقعیت منطقه مورد مطالعه
Figure 1- Location of study area



شکل 2- عمق خاک اندازه‌گیری شده در موقعیت‌های مختلف شیب
Figure 2- Measured soil depth in different slope positions

در مدل به کار گرفته شد. اطلاعات 100 نقطه نمونه‌برداری به طوری تقسیم شد که از این مجموعه داده‌ها، 70 و 30 درصد داده‌ها به ترتیب برای مدل‌سازی و اعتبارسنجی استفاده شد. به منظور پرهیز از هرگونه اعمال نظر (نا اریبی¹) در برآورد، داده‌ها برای

ضرایب همبستگی برای تعیین روابط بین عمق خاک و ویژگی‌های توپوگرافی و تجزیه واریانس (ANOVA) و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه 16 انجام شد. از نرم افزار آماری SAS برای توسعه مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه استفاده شد. ویژگی‌های توپوگرافی انتخاب شده به عنوان متغیرهای مستقل و عمق خاک به عنوان متغیر وابسته

1 -Unbiasness

زیاد در عمق خاک شده است. کوریاکوز و همکاران (8) گزارش کردند که ضریب تغییرات عمق خاک در کاربری‌های کشت کائوچو، کشت مختلط محصولات و مراتع طبیعی، به ترتیب برابر 45/93 و 46/95 و 80/82 درصد بود.

تجزیه و تحلیل همبستگی

تجزیه و تحلیل همبستگی خطی 12 ویژگی توپوگرافی و یک خصوصیت خاک (عمق)، نشان داد که همبستگی معنی‌داری بین 36 جفت از 77 جفت ویژگی وجود داشت ($P < 0.05$ و $P < 0.01$) (جدول 3).

عمق خاک در منطقه مورد مطالعه همبستگی مثبت بالا و معنی‌داری با سطح ویژه حوضه، انحنا سطحی و شاخص خیزی و همبستگی منفی بالا با شاخص انتقال رسوب، شیب و شاخص قدرت جریان نشان داد. همچنین همبستگی مثبت پایین و معنی‌دار عمق خاک با انحنا مماسی و انحنا عمقی تشخیص داده شد. علاوه بر این، عمق خاک همبستگی منفی پایین و معنی‌دار با ارتفاع داشت. دیگر ویژگی‌های توپوگرافی از جمله جهت شیب، عوارض ناهموار و منطقه پراکندگی در منطقه مورد مطالعه با عمق خاک همبستگی نداشت.

فرآیندهای مدل‌سازی و اعتبارسنجی به صورت تصادفی از نقاط مختلف بر روی زمین‌نما انتخاب شدند.

در آزمون مدل خاک-زمین‌نما، از دو شاخص آماری که از رابطه بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده بدست می‌آید استفاده شد. این دو شاخص که توسط آده و همکاران (17) ارائه شده است، شامل میانگین خطا (ME) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) است.

نتایج و بحث

تجزیه و تحلیل آمار توصیفی

آمار توصیفی از ویژگی‌های توپوگرافی و عمق خاک در جدول 2 ارائه شده است.

عمق خاک در خاک‌رخ‌های مورد بررسی از 30 تا 150 سانتی‌متر با میانگین 108/6 سانتی‌متر متغیر بود. با توجه به ضریب تغییرات بالا (78 درصد) برای عمق خاک در منطقه مورد مطالعه و کاربرد این ضریب در برآورد و توجیه تغییرات عمق خاک، به نظر می‌رسد که تنوع عمق خاک در منطقه مورد مطالعه بستگی به توپوگرافی اراضی و موقعیت شیب دارد که این عوامل باعث تجمع مقادیر متفاوتی از آب در موقعیت‌های مختلف زمین‌نما گردیده است. علاوه بر این، فرآیندهای فرسایش و رسوب خاک منجر به تنوع

جدول 1- شاخص‌های توپوگرافی مورد نظر، معادلات و واحدهای مربوطه

Table 1- Considered topographic attributes, related functions and units

شاخص	معادله مربوطه	واحد
ارتفاع Elevation	ارتفاع از سطح آب‌های آزاد	(متر)
شیب Slope	$Slope(\beta) = \sqrt{H^2 + G^2}$	(درصد)
جهت شیب Aspect	$Aspect = \arctan\left(\frac{H}{G}\right)$	(درجه)
مساحت حوضه آبریز Catchment Area	$CA (A_s) = A/W$ مساحت = A و شاخص عرض جریان = W	(متر مربع)
انحنای سطحی Plan Carvature	$PlanC = -\left(\frac{H^2 \cdot D - 2 \cdot G \cdot H \cdot F + G^2 \cdot E}{(G^2 + H^2)^{1.5}}\right)$	(درجه بر متر)
انحنای عمقی Profile Carvature	$ProfC = -\left(\frac{G^2 D + 2 \cdot G \cdot H \cdot F + H^2 \cdot E}{(G^2 + H^2) \cdot (1 + G^2 + H^2)^{1.5}}\right)$	(درجه بر متر)
شاخص قدرت جریان Stream Power Index	$SPI = A_s \tan \beta$	-
شاخص خیزی Wetness Index	$WI = \ln \left[\frac{A_s}{\tan \beta} \right]$	-
شاخص انتقال رسوب Sediment Transport Index	$STI = \left(\frac{A_s}{22 \cdot 13}\right)^m \left(\frac{\sin \beta}{0.0896}\right)^n$ $\beta = \text{درجه شیب}, m=0.6, n=13$	-

جدول 2- خلاصه نتایج توصیف عمق خاک و ویژگی‌های پستی و بلندی در منطقه مورد مطالعه (n=100)

Table 2- Results of soil depth and topographic attributes description in study area (n=100)

متغیر	واحد	کمینه	بیشینه	میانگین	چولگی	کشیدگی	دامنه
عمق خاک Soil depth	cm	30	150	108.63	0.43	1.78	120
ارتفاع Elevation	m	2337.30	2373.40	2510.44	0.61	1.22	436.10
جهت شیب Aspect	°	1.00	359.89	210.97	-0.43	-0.72	358.89
سطح حوضه Catchment Area	m ²	100.06	69539.54	2531.44	0.89	0.98	69438.58
انحنای مماسی Tangential Carvature	1/m	-1.78	1.22	0.03	-0.68	3.01	3.00
انحنای سطحی Plan Carvature	1/m	-0.04	0.05	-0.58	0.44	2.09	0.09
انحنای عمقی Profile Carvature	1/m	-1.28	1.01	0.013	-0.39	4.70	2.29
عوارض ناهموار Shaded Relief	-	0.22	0.73	0.47	0.47	-1.27	0.51
شاخص انتقال رسوب Sediment Transport Index	-	4.84	44.90	24.87	0.87	2.90	40.06
شیب Slope	%	0.00	21.17	19.58	0.62	0.85	21.17
شاخص خیسبی Wetness Index	-	3.39	12.00	7.69	0.83	1.20	8.61
سطح پراکندگی Dispersal Area	m ²	100.06	41423	1861	1.01	3.33	41322.90

جدول 3- ضرایب همبستگی پیرسون بین عمق خاک و ویژگی‌های توپوگرافی در منطقه مورد مطالعه (n=100)

Table 3- Pairwise correlation coefficients among soil depth and terrain attributes at the study area (n=100)

	عمق خاک	ارتفاع	جهت شیب	سطح حوضه	انحنای مماسی	انحنای سطحی	انحنای عمقی	عوارض ناهموار	شاخص انتقال رسوب	شاخص قدرت جریان	شیب	شاخص خیسبی	سطح پراکندگی
عمق خاک Soil depth	1												
ارتفاع Elevation	-0.32*	1											
جهت شیب Aspect	-0.09	0.04	1										
سطح حوضه Catchment Area	0.65**	0.03	0.04	1									
انحنای مماسی Tangential Carvature	0.32*	0.04	0.03	0.9	1								
انحنای سطحی Plan Carvature	0.66**	-0.01	-0.04	0.19	0.66**	1							
انحنای عمقی Profile Carvature	0.20*	0.03	0.02	0.06	0.07**	0.44**	1						
عوارض ناهموار Shaded Relief	0.12	-0.01	0.60**	-0.06	0.04	0.06	0.11	1					
شاخص انتقال رسوب Sediment Transport Index	-0.73**	0.08	-0.11	0.61**	0.44**	0.29**	0.21*	-0.03	1				
شاخص قدرت جریان Stream Power Index	0.68**	0.11	-0.17	0.56**	0.56**	0.33**	0.23*	-0.05	0.76**	1			
شیب Slope	-0.76**	-0.12	-0.18	-0.07	0.16	0.28**	0.01	-0.04	0.41**	0.33**	1		
شاخص خیسبی Wetness Index	0.71**	0.06	0.11	0.61**	0.42**	**0.23	0.31**	0.01	0.48**	-0.41**	-0.83**	1	
سطح پراکندگی Dispersal Area	0.14	0.04	0.13	-0.07	-0.41**	-0.37**	-0.24**	0.03	-0.15	-0.10	-0.09	0.20*	1

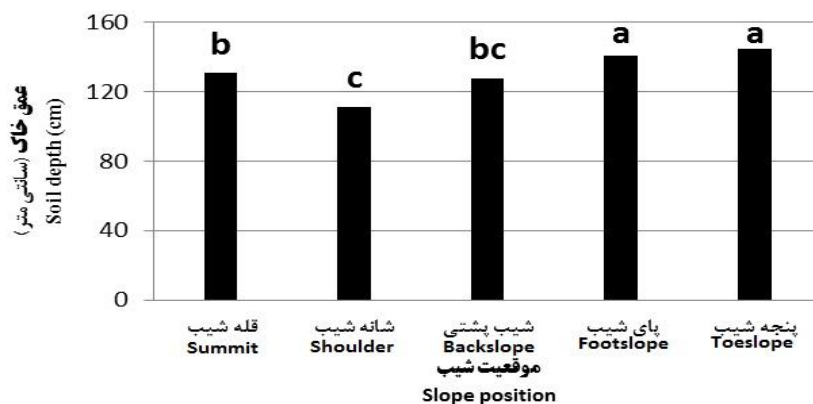
آب و فرآیندهای پیدایش خاک درون تپه هستند. شاخص خیزی نشان دهنده توزیع مکانی جریان آب و در نتیجه فرآیندهای تجمع در یک حوضه بسته است. پستی و بلندی دارای نقش حیاتی در ضخامت سولوم از طریق فرآیندهای طبیعی، به ویژه از طریق تجمع آب در موقعیت‌های مقعر و پایین زمین‌نما دارد (3). عمق سولوم با حرکات پویای رو زمینی و درون خاکی آب که بستگی به ناهمواری‌های زمین دارد، کنترل می‌شود. این مسئله از وابستگی عمق خاک به تفاوت مکانی نقاط در مرطوب شدن با توجه به مورفولوژی سطح زمین ناشی می‌شود (13).

اثر موقعیت شیب بر عمق خاک

نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که در منطقه مورد مطالعه تفاوت قابل توجهی ($P < 0.05$) در عمق خاک‌ها بین موقعیت‌های مختلف شیب انتخاب شده وجود دارد. نتایج مقایسه میانگین عمق خاک در موقعیت‌های شیب در شکل 2 ارائه شده است. بالاترین مقادیر عمق خاک در موقعیت‌های پایین شیب شامل پای و پنجه شیب مشاهده شد. تفاوت قابل توجهی بین دو موقعیت مذکور با موقعیت قله شیب مشاهده شد و به نظر می‌رسد که این موقعیت تا حد زیادی تحت تاثیر فرآیندهای هدر روی خاک قرار گرفته است. پایین‌ترین مقدار عمق خاک در موقعیت شانه شیب با بیشترین میزان فرسایش خاک مشاهده شد. افشار و همکاران (1) با انجام یک مطالعه در منطقه نیمه خشک غرب ایران نشان دادند که بالاترین مقدار هدر روی خاک به میزان حدود 180 تن در هکتار در سال در موقعیت شیب تند تپه مانند شانه شیب مشاهده شد.

بسیاری از این همبستگی‌ها با آنهایی که در دیگر زمین‌نماها به دست آمده بودند، مشابه بود. به موازات افزایش درجه شیب، عمق خاک و عمق افق A تمایل به کاهش دارد (4، 13 و 21). فلورینسکی و همکاران (3) در یک مطالعه به منظور پیش‌بینی عمق سولوم خاک، با استفاده از ویژگی‌های توپوگرافی، نشان دادند که همبستگی منفی معنی‌داری بین عمق سولوم و ارتفاع، درجه شیب، جهت و انحنا وجود دارد. آنها همچنین دریافتند که همبستگی مثبت و معنی‌داری بین ضخامت سولوم و سطح حوضه و شاخص قدرت جریان وجود دارد. تامپسون و همکاران (21) در منطقه پنی رویال نشان دادند که عمق افق A همبستگی مثبت با ارتفاع و رابطه منفی با درجه شیب دارد. تسای و همکاران (22) در زمین‌نمای جنگل تایوان گزارش دادند که ضخامت سولوم همبستگی منفی غیر معنی‌دار ($r = -0.11$) و مثبت غیر معنی‌دار ($r = 0.095$) به ترتیب با ارتفاع و جهت شیب دارد، در حالی که همبستگی منفی بسیار معنی‌دار ($r = -0.24$) با درجه شیب داشت.

نتایج تحقیق حاضر نشان از ضریب همبستگی نسبتاً بالای عمق خاک با دو گروه از ویژگی‌های توپوگرافی داشت. گروه اول شامل ویژگی‌هایی که فرآیندهای فرسایشی خاک را کنترل می‌کنند. شاخص انتقال رسوب، شاخص قدرت جریان و شیب به عنوان شاخص‌های فرآیندهای فرسایشی خاک در تمام مناطق کوهستانی و تپه‌ماهوری دارای همبستگی منفی با عمق خاک هستند. بیشتر بودن مقدار این شاخص‌ها نشانگر فرسایش و هدر روی بیشتر خاک سطحی از نقاط شانه شیب و شیب پستی و کمتر بودن این شاخص‌ها نشان از هدر روی کمتر خاک و یا حتی رسوب در موقعیت‌های پای شیب و پنجه شیب در این موقعیت‌های شیب است. گروه دوم از ویژگی‌های توپوگرافی مانند شاخص خیزی و سطح حوضه عمدتاً بیانگر تجمع



شکل 2- مقایسه میانگین عمق خاک در موقعیت‌های مختلف شیب تپه در منطقه کوهرنگ

Figure 2- Comparison between soil depth averages in different slope positions in Koohrang region

جدول 4- نتایج تجزیه واریانس مدل رگرسیون چند متغیره عمق خاک

مدل	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F	P value
رگرسیون Regression	12	556.144	46.345	2.193	0.001
باقیمانده Residue	81	1711.752	21.133		
کل Total	93	2267.897			

خاک داشتند مانند انحنای سطحی، شاخص قدرت جریان در مدل توسعه یافته، احتمالاً به دلیل هم‌راستایی¹ این متغیرها با متغیرهای موجود در مدل بود. وان والگم و همکاران (23) طی یک مطالعه در جنگل‌های بلژیک، برای پیش‌بینی عمق افق‌های پایینی خاک، روابط معنی‌داری از عمق با برآورد کننده‌های توپوگرافی از جمله درجه شیب، انحنای سطحی و شاخص خیزی به دست آوردند.

تامپسون و همکاران (21) نشان دادند که مدل MLR می‌تواند 44 و 28 درصد از تغییرات عمق افق A را به ترتیب در مزارع شرق و مرکزی منطقه پنی‌رویال کنتاکی که به طور عمده با ارتفاع، درجه شیب، شاخص ظرفیت انتقال² و سطح منطقه بالا دست در ارتباط است، را توضیح دهد. پنیزک و برووکا (18) در جنوب بوهیمیا واقع در جمهوری چک از رگرسیون کریجینگ در مقایسه با سایر روش‌های درون‌یابی، برای پیش‌بینی تنوع مکانی عمق خاک استفاده کرده و گزارش کردند که مدل MLR به دست آمده شامل جهت شیب، ارتفاع و درجه شیب بود. زیادت (26) با استفاده از ویژگی‌های توپوگرافی نشان داد که مدل MLR عمق خاک را با یک تفاوت 50 سانتی‌متری برای 77 درصد از مشاهدات میدانی در حوزه‌های کوچک پیش‌بینی می‌کند. کوریاکوز و همکاران (8) با استفاده از مدل رگرسیون چند متغیره برای پیش‌بینی عمق خاک در هند، نشان دادند که ادغام ویژگی‌های توپوگرافی و برخی از متغیرهای کمکی محیطی مانند نوع استفاده از اراضی، دقت و صحت پیش‌بینی در مقیاس حوضه‌های آبریز را بهبود بخشیده است.

اعتبارسنجی مدل MLR عمق خاک

نتایج اعتبارسنجی با استفاده از اطلاعات 30 نقطه نمونه‌برداری در شکل 3 ارائه شده است. مطابقت خوب ($r=0/88$) بین عمق پیش‌بینی شده و مشاهده شده برای اعتبارسنجی مجموعه داده‌ها در موقعیت‌های مختلف زمین‌نما وجود داشت.

مقادیر میانگین خطا (ME) و ریشه میانگین مربعات خطا

آنها همچنین مقادیر تقریباً مشابهی از میزان رسوب در موقعیت‌های مسطح و انتهای شیب مانند پای شیب گزارش کردند. تسای و همکاران (22) با انجام یک مطالعه در طول یک شیب در تایوان نشان دادند که شیب می‌تواند حرکت آب و مواد را در یک تپه کنترل نموده و منجر به تفاوت‌های مکانی در خصوصیات خاک گردد. خرمانی و عجمی (7) در رسوبات لسی تپه‌ماهوری در شمال ایران نشان دادند که کشت در دامنه‌های شیب‌دار پس از قطع جنگل‌ها، باعث تخریب افق‌های سطحی و در بعضی موارد افق‌های زیرسطحی مانند افق آرجیلیک در طول 50 سال گذشته بوده است. آنها همچنین نشان دادند که تخریب خاک در موقعیت‌های قله شیب، شانه شیب و شیب پستی فرآیند اصلی و رسوب در موقعیت پای شیب فرآیند غالب بود.

تجزیه و تحلیل رگرسیون خطی چند متغیره

نتایج تجزیه واریانس رگرسیون خطی چند متغیره برای عمق خاک با استفاده از ویژگی‌های پستی و بلندی در جدول 4 ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مدل رگرسیون چند متغیره خطی توضیح قابل توجهی از عمق خاک را با استفاده از متغیرهای ورودی بیان می‌کند.

این مدل تجربی (MLR) با استفاده از ویژگی‌های انتخاب شده توپوگرافی توانست 76 درصد از تنوع عمق خاک در منطقه مورد مطالعه را تبیین نماید. ویژگی‌های توپوگرافی که بهترین برآورد کننده‌های تنوع عمق خاک در محل انتخاب شده بودند، عمدتاً ویژگی‌هایی بودند که روابط معنی‌داری با عمق خاک داشتند. ویژگی‌های غالب در مدل MLR شامل شیب (Slope)، شاخص خیزی (WI)، سطح حوضه (CA) و شاخص انتقال رسوب (STI) به صورت معادله 1 بودند:

$$\text{عمق خاک (سانتی متر)} = 122/13 - 0/11\text{Slope} + 0/012\text{WI} + 0/012\text{CA} - 0/23\text{STI} \quad P < 0/001 \quad R^2 = 0/76 \quad (1)$$

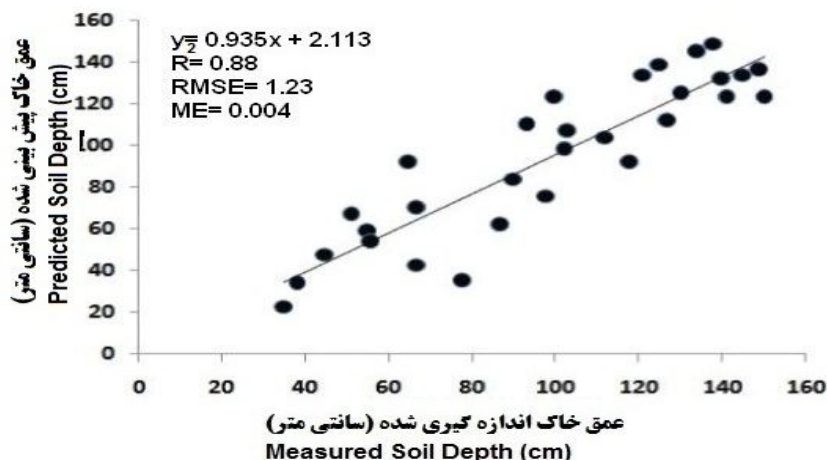
درجه شیب به عنوان مهم‌ترین پیش‌بینی کننده و بعد از آن شاخص خیزی، سطح حوضه و شاخص انتقال رسوب به عنوان ویژگی‌های مهم توپوگرافی در پیش‌بینی عمق خاک شناخته شدند. عدم وجود برخی از ویژگی‌هایی که همبستگی معنی‌داری با عمق

1 -Collinearity

2 -Transport Capacity Index

RMSE و (0/004) (1/23) تمایل به پایین‌ترین مقدار دارند و دقت قابل قبول پیش‌بینی کننده را در منطقه مورد مطالعه تایید می‌کنند.

(RMSE) شاخص‌های مبین پیش‌بینی خوب تنوع عمق خاک در تپه- های مورد مطالعه است. همان‌طور که انتظار می‌رود، مقادیر ME



شکل 3- مقادیر مشاهده شده عمق خاک در برابر مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل رگرسیون چند متغیره
Figure 3- Observed soil depth against predicted soil depth by multiple regression model

منطقه تپه‌ماهوری مورد مطالعه را تبیین نماید.

شیب، شاخص خیزی، سطح حوضه آبریز و شاخص انتقال رسوب به عنوان متغیرهای مهم برای توضیح تنوع عمق خاک تعیین گردید. به‌طور کلی، به نظر می‌رسد این ویژگی‌های توپوگرافی که به‌طور مستقیم یا غیر مستقیم تحت تاثیر فرآیندهای خاک‌سازی و فرسایشی قرار دارند، عمق خاک در مناطق تپه‌ماهوری را کنترل می‌نمایند. بدیهی است به منظور ارزیابی دقت و صحت کلی مدل توسعه یافته در این تحقیق، این مدل باید در دیگر مناطق تپه‌ماهوری مشابه با شرایط زیست محیطی غرب ایران به کار گرفته شود. علاوه بر این، لازم است به منظور شناسایی DEM مطلوب، DEM‌های با تفکیک‌پذیری افقی مختلف برای دستیابی به مدل‌های دقیق‌تر خاک-زمین‌نما آزمون گردند.

نتیجه گیری کلی

روش مدل‌سازی خاک-زمین‌نما چارچوبی برای ارزیابی تنوع خاک در میان عوامل تشکیل دهنده خاک‌های مشابه را فراهم می‌کند. در این تحقیق تلاش شد مدل ساده و تفسیری برای پیش‌بینی عمق خاک در منطقه تپه‌ماهوری زاگرس مرکزی ایران توسعه یابد. در توسعه این مدل از ویژگی‌های مشتق شده از DEM که به راحتی در دسترس بوده و اطلاعات مقرون به صرفه فراهم می‌کنند، استفاده شد. یکی از مزایای کاربرد روش پیش‌بینی در این تحقیق، پیش‌بینی عمق خاک است که این پارامتر برای ابزار مدل‌سازی‌های مدرن زیست محیطی و فعالیت‌های مدیریتی مهم است. مدل‌سازی MLR بین عمق خاک اندازه‌گیری شده و ویژگی‌های توپوگرافی نشان داد که این مدل می‌تواند 76 درصد از تنوع کل عمق خاک در

منابع

- 1- Afshar F.A, Ayoubi S., and Jalalian A. 2010. Soil redistribution rate and its relationship with soil organic carbon and total nitrogen using ^{137}Cs technique in a cultivated complex hillslope in western Iran. *Journal of Environmental Radioactivity*, 101:606-614.
- 2- Boer M., Del Barrio G., and Puigdefabregas J. 1996. Mapping of soil depth in dry Mediterranean area using terrain attributes derived from a digital elevation model. *Geoderma*, 72:99-118.
- 3- Florinsky I.V., Eilers R.G., and Manning G.R. 2002. Prediction of soil properties by digital terrain modeling. *Environmental Modeling and Software*, 17:295-311.
- 4- Gessler P.E., Chadwick O.A., and Charman F. 2000. Modeling soil-landscape and ecosystem properties using terrain attributes. *Soil Science Society of America Journal*, 64:2046-2056.
- 5- Guisan A., Edwards T.C., and Hastie T. 2002. Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene. *Ecological Modelling*, 157:89-100.
- 6- Kalivas D.P., Triantakoustantis D.P., and Kollias V.J. 2002. Spatial prediction of two soil properties using

- topographic information. *Global Nest Journal*, 4:41-49.
- 7- Khormali F., and Ajami M. 2011. Pedogenetic investigation of soil degradation on a deforested loess hillslope of Golestan Province, Northern Iran. *Geoderma*, 274- 283.
 - 8- Kuriakose S.L., Devkota S., and Rossiter D.G. 2009. Prediction of soil depth using environmental variables in an anthropogenic landscape, a case study in the Western Ghats of Kerala, India. *Catena*, 79:27-38.
 - 9- Lindsay, J. 2005. *TAS Software*. Manchester, UK.
 - 10-McBratney A.B., Mendonca Santos M.L., and Minasny B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma*, 117:3-52.
 - 11-Meyer M.D., North M.P., and Gray A.N. 2007. Influence of soil thickness on stand characteristics in a Sierra Nevada mixed-conifer forest. *Plant and Soil*, 294:113-123.
 - 12-Minasny B., and McBratney A.B. 1999. A rudimentary mechanistic model for soil production and landscape development. *Geoderma*, 90:3-21.
 - 13-Moore I.D., and Hutchinson M.F. 1991. Spatial extension of hydrologic process modeling. *Proc. Int. Hydrology and Water Resources Symposium. Institution of Engineers-Australia*, 91/22, pp. 803-808.
 - 14-Mueller T.G., and Pierce F.J. 2003. Soil carbon maps: Enhancing spatial estimates with simple terrain attributes at multiple scales. *Soil Science Society of America Journal*, 67:258-267.
 - 15-Norouzi M., Ayoubi S., Jalalian A., Khademi H., and Dehghani A. A. 2009. Predicting rainfed wheat quality by artificial neural network using terrain and soil characteristics. *Acta Agriculturae Scandinavia, Section B- Soil and Plant Science*, 60:341-352.
 - 16-Odeh I.O.A., Chittleborough D.J., and McBratney A.B. 1991. Elucidation of soil-landform interrelationships by canonical ordination analysis. *Geoderma*, 49:1-32.
 - 17-Odeh I.O.A., McBratney A.B., and Chittleborough D.J. 1994. Spatial prediction of soil properties from landform attributes derived from a digital elevation model. *Geoderma*, 63:197-214.
 - 18-Penizek V., and Boruka L. 2006. Soil depth prediction supported by primary terrain attributes: a comparison of methods. *Plant Soil Environment*, 52:424- 430.
 - 19-Saulnier G.M., Beven K., and Obled C. 1997. Including spatially variable effective soil depths in TOPMODEL. *Journal of Hydrology*, 202:158-172.
 - 20-Thompson J.A., Bell J.C., and Butler C.A. 1997. Quantitative soil- land-scape modeling for estimating the areal extent of hydromorphic soils. *Soil Science Society of America Journal*, 61:971-980.
 - 21-Thompson J.A., Pena-Yewtukhiw E.M., and Grove J.H. 2006. Soil-landscape modeling across a physiographic region: Topographic patterns and model transportability. *Geoderma*, 133: 57-70.
 - 22-Tsui C.C., Chen Z.S., Duh C.T. 2004. Prediction of soil depth using a soil-landscape regression model: a case study on forest soils in southern Taiwan. *National Science Council of the Republic of China, Part B: Life Sciences*, 25:34-39.
 - 23-Vanwallegem T., Poesen J., McBratney A. 2010. Spatial variability of soil horizon depth in natural loess-derived soils. *Geoderma*, 157:37-45.
 - 24-Wilson J.P., and Gallant J.C. 2000. *Secondary Topographic Attributes. Terrain Analysis: Principles and Applications*. J. P. Wilson, Gallant, J. C. New York, John Wiley and Sons, 87-131.
 - 25-Zhu A.X., Hudson B., and Burt J. 2001. Soil mapping using GIS, expert knowledge, and fuzzy logic. *Soil Science Society of America Journal*, 65:1463-1472.
 - 26-Ziadat F.M. 2005. Analyzing digital terrain attributes to predict soil attributes for a relatively large area. *Soil Science Society of America Journal*, 69:1590-1598.



Prediction of Soil Solum Depth Using Topographic Attributes in Some Hilly Land of Koohrang in Central Zagros

A. Mehnatkesh^{1*}- S. Ayoubi²- A. Jalalian³

Received: 11-06-2014

Accepted: 09-12-2014

Introduction: Soil depth is defined as the depth from the surface to more-or-less consolidated material and can be considered as the most crucial soil indicator, affecting desertification and degradation in disturbed ecosystems. Soil depth varies as a function of many different factors, including slope, land use, curvature, parent material, weathering rate, climate, vegetation cover, upslope contributing area, and lithology. Topography, one of the major soil forming factors, controls various soil properties. Thus, quantitative information on the topographic attributes has been applied in the form of digital terrain models (DTMs). The prediction of soil depth by topographic attributes depends mainly on: i) the spatial scale of topographic variation in the area, ii) the nature of the processes that are responsible for spatial variation in soil depth, and iii) the degree to which terrain-soil relationships have been disturbed by human activities. This study was conducted to explore the relationships of soil depth with topographic attributes in a hilly region of western Iran.

Materials and Methods: The study area is located at Koohrang district between 32°20' to 32°30' N latitudes and 50°14' to 50°24' E longitudes, in Charmahal and Bakhtiari province, western Iran. The field sites with an area of 30,000 ha are located on the hillslopes at about 20% transversal slope. The soils at the site are classified as Typic Calcixerpts, Typic Xerorthents and Calcic Haploxerpts for the representative excavated profiles in summit, shoulder and backslope, respectively. The soils located at footslope and toeslope were classified as Chromic Calcixererts. Measurements were made in twenty representative hillslopes of the studied area. At the selected site, one hundred points were selected using randomly stratified methodology, considering all geomorphic surfaces including summit, shoulder, backslope, footslope and toeslope during sampling. Overall, 100 profiles were dug and described; and the solum thickness was measured for each profile. DEM data were created by using a 1:2,5000 topographic map. Topographical indices were generated from the DEM using TAS software. Terrain attributes in two categories, primary and secondary (compound) attributes; primary attributes are included elevation, slope, aspect, catchment area, dispersal area, plan curvature, profile curvature, tangential curvature, shaded relief. Secondary or compound attributes such as soil water content or the potential for sheet erosion, stream power index, wetness index, and sediment transport index. Correlation coefficients to define relationships between soil depth and terrain attributes, and analysis of variance by Duncan test were done using the SPSS software. The statistical software SPSS was used for developing multiple linear regression models. Terrain attributes were selected as the independent variables and soil depth was employed as dependent variable in the model. Thirty sampling sites were used to validate the developed soil-landscape model. In testing soil-landscape model, we calculated two indices from the observed and predicted values included mean error (ME) and root mean square error (RMSE).

Results and Discussion: The soil depth in the studied profiles varied from 30 cm to 150 cm with an average of 108.6 cm. Relatively high variability (CV = 76%) was obtained for soil depth in the study area. The linear correlation analysis of the 12 topographic attributes and one soil property (soil depth), showed that there was a significant correlation among 36 of the 77 attribute pairs. Soil depth showed high positive significant correlations with catchment area, plan curvature, and wetness index, and showed high negative correlation with sediment transport index, sediment power index and slope. Low positive significant correlations of soil depth were identified with tangential curvature, and profile curvature. Moreover, soil depth was negatively correlated with elevation. The rest of the topographic attributes including aspect, shaded relief, and dispersal area were not significantly correlated with soil depth. Many of these relationships are similar to those found in other landscapes. The results of analysis of variance showed that there are significant differences for soil depth among the selected slope positions in the studied area. The highest values of soil depth were observed in the downslope positions including footslope and toeslope. The lowest soil depth was observed in shoulder position with the

1- Research Assistant Professor of Soil Science Department, Chaharmahal-o-Bakhtiari Agricultural and Natural Resources Research and Education Center

(*- Corresponding Author Email: a_mehnatkesh@yahoo.com)

2- Professor of Soil Science Department, College of Agriculture, Isfahan University of Technology

3- Professor of Soil Science Department, College of Agriculture, Islamic Azad University, Khorasan Branch

highest rate of soil erosion.

Conclusions: It seems that the high variability for soil depth depends on topography of the field, and the landscape position, causing differential accumulation of water at different positions on the landscape; and moreover the soil erosion and deposition processes, resulting in high variability in the soil depth. We found relatively high correlation coefficients of soil depth with two groups of topographic attributes (erosional processes and water accumulation). Empirical model (MLR) using selected terrain attributes explains 76% of the variation of soil depth in the studied area. The terrain attributes that best predicted soil depth variability in the selected site were mainly the attributes that had significant relationships with soil depth. The dominant attributes in the MLR model included slope, wetness index, catchment area and sediment transport index.

Keywords: Multiple linear regression model, Slope position, Soil depth, Soil-landscape model