برآورد خصوصیات افق سطحی خاک با استفاده از مدل رقومی پستی و بلندی زمین (مطالعه موردی: بخشی از حوزه آبخیز مهر سبزوار استان خراسان)

شمس الله ایوبی[۱] و محسن حسین علیزاده[۲]

چکیده

روش‌های مرسوم مطالعات خاک‌شناسی در حوزه‌های آبخیز ایران، نیازمند هزینه، کارشناس و زمان زیاد است. صعب العبور بودن برخی مناطق حوزه و مشکلات نمونه برداری نیز به مشکلات مذکور اضافه می‌شود. به واسطه محدودیت‌های مزبور در اغلب حوزه‌های آبخیز کشور، اطلاعات مکانی و پیوسته دقیقی از خصوصیات خاک به منظور برآورد فرسایش خاک توسط مدل‌های مختلف نظیر: (Rusle، Morgan، Eurosem، PSIAC) و هم‌چنین دیگر فعالیت‌های مدیریتی و برنامه‌ریزی موجود نیست. بنابراین به روش‌های نوینی نیاز است که با حداقل نمونه برداری کم و به کمک پارامترهای سطح زمین (که محاسبه آنها به مراتب ارزان‌تر است) بتوان خصوصیات خاک را به طور نسبتاً دقیقی برآورد کرد. این پژوهش در بخشی از حوزه آبخیز مهر سبزوار مشتمل بر سه واحد سنگ شناسی غالب حوزه، شامل واحدهای PLc، Ku و E2sc به منظور ایجاد مدل‌های رگرسیون خاک- چشم انداز، صورت گرفته است. خصوصیات مورد مطالعه خاک سطحی، شامل درصد شن، رس، مواد آلی، سنگریزه، رطوبت وزنی خاک در حالت FC و مقدار وزن مخصوص ظاهری بوده است. در واحدهای مختلف در جمع ۳۱٦ نقطه مطالعاتی انتخاب شد و خصوصیات سطحی خاک آنها مورد مطالعه قرار گرفت. سپس مدل رقومی ارتفاع منطقه در پیکسل‌هایی به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰ متر تهیه و از روی آن ویژگی‌های پستی و بلندی محاسبه شد. در نهایت مدل‌های رگرسیون چند متغیره بین این ویژگی‌ها و خصوصیات خاک، برقرار و سپس به وسیلهٔ نقاط اضافی، نمونه برداری شده (۷۸ نقطه از ۳۱٦ نقطه)، مدل‌های به دست آمده اعتبار سنجی شدند. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که خصوصیات پستی و بلندی مهم که با خصوصیات خاک ارتباط بیشتری داشته و در مدل رگرسیونی نیز وارد شده، به طور عمده شامل شیب و جهت آن، ارتفاع، شاخص رطوبتی و شاخص قدرت جریان، شاخص حمل رسوب و انحنای زمین بوده است. این نتایج مؤید این مطلب است که خصوصیات خاک در منطقه تحت الشعاع فرایندهای هیدرولوژیکی، مؤثر از توپوگرافی می‌باشد. نتایج اعتبار سنجی مدل‌ها نیز از ناریب بودن و درجه تخمین مناسب برازش مدل‌ها حکایت می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که مدل‌های به دست آمده در مقیاس حوزه و فواصل ۱۰۰ متری، قادرند در واحدهای مختلف سنگ شناسی از حداقل ۲٦ تا حداکثر ۷۲ درصد از کل تغییرات خصوصیات مختلف سطحی خاک را پیش‌بینی کند.

واژه‌های کلیدی: خصوصیات پستی و بلندی، خصوصیات سطحی خاک، مدل خاک- چشم انداز

۱. استادیار خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۲. دانشجوی سابق کارشناسی ارشد مرتع و آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.2.7.4]

مقدمه

شناخت خصوصیات سطحی خاک در حوزهٔ آبخیز در ارتباط با مسائل مدیریتی، مخصوصاً در ارتباط با پتانسیل فرسایش پذیری خاک و یا محاسبهٔ فرسایش و رسوب، توسط مدل‌های مختلف تجربی یا ریاضی از اهمیت بالایی برخوردار است. از این خصوصیات سطحی می‌توان به توزیع اندازه ذرات، شامل شن، سیلت، رس، مقدار ماده آلی به عنوان فاکتورهای اساسی در محاسبه ضریب فرسایش پذیری (K) و هم‌چنین به پارامترهای حد ظرفیت مزرعه، وزن مخصوص ظاهری و درصد سنگریزه اشاره کرد که به عنوان پارامترهای ورودی برخی مدل‌های فرسایش و رسوب، مانند مدل مورگان و مورگان- فینی (MMF) و یا مدل (EUROSEM) در محاسبهٔ میزان رواناب و رسوب مورد استفاده قرار می‌گیرد. هر چه صحت اطلاعات و داده‌های مزبور بیشتر و از اعتبار بالاتری برخوردار باشد؛ به تبع آن مراحل تصمیم‌گیری و مدیریت در سطح حوزه‌های آبخیز با درجه اعتماد بالاتری صورت خواهد گرفت.

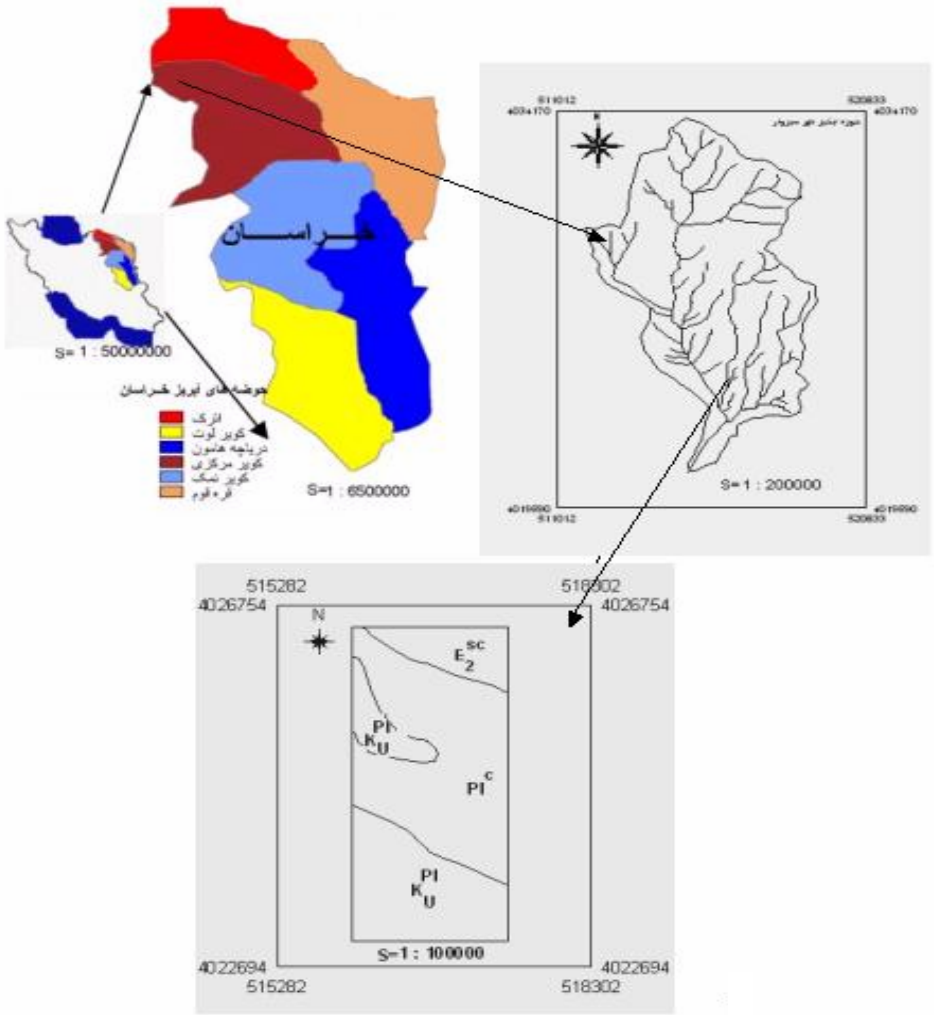
نقشه‌های خاک و منابع اراضی در مدیریت منابع طبیعی و پیش‌بینی رفتار خاک‌ها در مقابل فرسایش در کشور ما به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. ولی متأسفانه در عمل به منظور استفاده از این نقشه‌ها در حوزه‌های آبخیز کشور مشکلاتی وجود دارد، زیرا نقشه‌های خاک به روش‌های استاندارد بین‌المللی (۱۱) در حوزه‌های آبخیز کشور که از مهم‌ترین عرصه‌های تولید رسوب و فرسایش است تهیه نمی‌شود و تنها نقشه‌های منابع اراضی (غالباً در مقیاس نیمه تفصیلی و اجمالی) با نقاط مشاهداتی کم تهیه می‌شود. در این نقشه‌ها به طور طبیعی تغییرپذیری مکانی خاک در نظر گرفته نمی‌شود (۵). گاهی اوقات نقطه‌ای با کیلومترها فاصله از پروفیل شاهد یک واحد اراضی یا جزء واحد اراضی، همان خصوصیت پروفیل شاهد را به خود اختصاص می‌دهد. در نقشه‌برداری مرسوم، پراکنش جغرافیایی خاک به صورت واحدهای نقشه‌ای نمایش داده می‌شود، با فرض این که خصوصیات داخل این واحد از یک‌نواختی و همگونی برخوردار باشد (۱). در دهه‌های اخیر در راستای بررسی الگوی خصوصیات خاک توسط پژوهشگران مختلف از جمله وبستر (۱٤) سینوسکی و اورسوالد (۱۰) و وهی (۱۳) تلاش‌هایی به عمل آمده است. این مطالعات به طور عمده در تشخیص الگوهای پراکنش خصوصیات خاک عمل کرده و به بررسی ارتباط الگوهای پراکندگی و فرایندهای کنترل کننده خصوصیات خاک نپرداخته است. تحقیقات مختلف نشان داده است که برخی خصوصیات خاک، مانند ضخامت افق A و B، مقدار لکه‌های رنگی (Mottling) در خاک، pH، بافت خاک، مقدار ماده آلی و برخی پارامترهای دیگر با موقعیت خاک روی چشم‌انداز (Landscape) هم‌بستگی دارد (٤).

هزینه‌های زیاد جمع‌آوری نمونه‌های خاک، غیر قابل دسترس بودن برخی نقاط حوزه‌های آبخیز و هزینه‌های سنگین تجزیه نمونه‌های خاک، ارائه روش‌هایی را به منظور برآورد غیر مستقیم خصوصیات خاک طلب می‌کند. نمونه‌ای از این روش‌های غیر مستقیم در مقیاس حوزه آبخیز، استفاده از فاکتورهای توپوگرافی و مدل رقومی ارتفاع (DEM) (Digital Elevation Model) است (٦ و ۷). استفاده از این مدل‌ها، یک روش آسان، سریع، ارزان و قابل اعتماد برای پیش‌بینی خصوصیات خاک است. بین این پارامترها و خصوصیات هیدرولوژیکی، ارتباط تنگاتنگی وجود دارد. ارتباط بین خصوصیات توپوگرافی نظیر ارتفاع، شیب، جهت شیب، انحنای افقی، انحنای عمودی با خصوصیات هیدرولوژیکی و فرایندهای فرسایش و رسوب روشن شده است (۷ و ۱۲). مور و همکاران در سال ۱۹۹۳ م. طی مطالعه‌ای در کلرادو، مدل آماری خاک - چشم انداز را بر اساس تعیین ارتباط بین برخی خصوصیات سطحی خاک نظیر ضخامت افق A، میزان فسفر، مواد آلی و pH افق سطحی با ویژگی‌های پستی و بلندی به دست آوردند (۵). مطالعات مشابهی نیز توسط گسلر و همکاران (۲) چنین ارتباطاتی را تأیید کرده است.

هدف از این پژوهش ایجاد مدل آماری در بخشی از حوزهٔ آبخیز مهر سبزوار استان خراسان است که بر اساس آن با

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.2.7.4]



شکل ۱. موقعیت جغرافیائی منطقهٔ مورد مطالعه و پراکنش جغرافیایی واحدهای سنگ‌شناسی در منطقهٔ انتخابی

استفاده از خصوصیات و پارامترهای سطح زمین بتوان برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک را برآورد نمود.

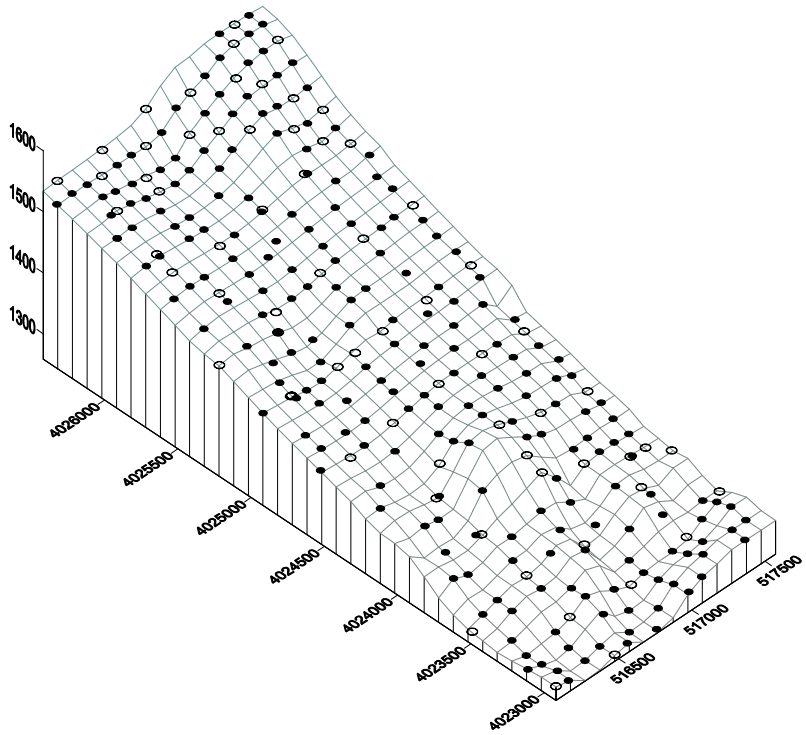
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه با مساحت ۵۷۶ هکتار، بخشی از حوزه آبخیز مهر سبزوار در ۵۱ کیلومتری غرب شهرستان سبزوار در عرض جغرافیایی ″۱۰′۱۰ °۵۷ تا″۱۱′۴۸ °۵۷ و طول جغرافیایی ″۲۲′۳۶ °۳۶ تا ″۲۳′۱۸ °۳۶ واقع شده است (شکل ۱). دمای متوسط منطقه، ۱۲ درجه سانتی‌گراد و متوسط بارندگی سالانه ۲۶۰ میلی‌متر است. منطقه مورد مطالعه از نظر زمین شناسی همگون نیست و از مواد مادری مختلفی تشکیل شده است که مهم‌ترین واحدهای سنگ شناسی آن، واحدهای ″کنگلومرا″ با ″مارن″ در بخش پایینی پلیوسن (Plc)، سنگ آهک کرتاسه (Ku) و ترکیبی از مارن، ماسه سنگ و کنگلومرای ائوسن (E2sc) می‌باشد (شکل ۱).

از آنجا که یکی از فاکتورهای مؤثر در فرایند خاک‌سازی و خصوصیات خاک، مواد مادری است، واحدهای مورد نظر به عنوان واحدهای کاری انتخاب و مدل رگرسیونی به طور جداگانه برای آنها برآورد شده است. بدین منظور در واحدهای مزبور به ترتیب ۱۲۵، ۱۱۳ و ۷۸ نقطه برداشت در طرح

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.2.7.4]



شکل ۲. پراکنش نقاط مطالعاتی در منطقه مورد مطالعه (نقاط توپر : برای ایجاد مدل، نقاط توخالی: تست مدل)

شبکه‌ای و فواصل منظم ۱۰۰ متر انتخاب شد. نحوهٔ پراکنش نقاط نمونه برداری (شامل نقاط مدل‌سازی شده و نقاط اعتبار سنجی) در منطقه مورد مطالعه در شکل ۲ نمایش داده شده است. نقاط مورد مطالعه توسط GPS در سطح حوزه آبخیز شناسایی شد. در هرنقطه از افق سطحی از عمق ۱۰-۰ سانتی‌متری اقدام به نمونه‌برداری گردید. هم‌چنین از هر نقطه، نمونه دست نخورده برای اندازه‌گیری حد ظرفیت مزرعه و وزن مخصوص ظاهری خاک جمع آوری شد. در مرحله آزمایشگاهی توزیع اندازه ذرات به روش هیدرومتری (۳)، مقدار ماده آلی به روش سوزاندن تر (۹)، وزن مخصوص ظاهری به روش کلوخه و پارافین، حد ظرفیت خاک مزرعه(FC) (Field Capacity) با استفاده از صفحه فشار و درصد سنگریزه به وسیله حجم سنجی در هر نمونه محاسبه شد.

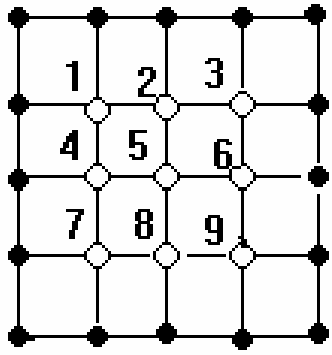
مدل رقومی ارتفاع (DEM) منطقه با میان یابی (Interpolation) خطوط میزان نقشه توپوگرافی رقومی در پیکسل‌هایی به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰ متر تهیه شد. ویژگی‌های اولیه و ثانویه توپوگرافی با استفاده از محاسبات روی مدل رقومی ارتفاع (DEM) به شرح ذیل تعیین گردید. ویژگی‌های اولیه شامل درجه شیب، جهت شیب (زاویه نسبت به شمال و در جهت عقربه‌های ساعت)، سطح ویژه آبخیز (Specific Catchment Area) (m^2m^{-1})، انحنای قائم (Profile curvature) (m^{-1}) و انحنای افقی (Plan curvature) (m^{-1}) می‌باشد (۷). ویژگی‌های ثانویه، شامل شاخص رطوبتی (Wetness index)، شاخص قدرت جریان (Stream power index) و شاخص حمل رسوب (Sediment transport index)، می‌باشند. این ویژگی‌های ثانوی، نشانگر فرایندهای انتقال آب و رسوبات، به صورت سطحی و زیر سطحی در طول یک چشم انداز می‌باشد.

محاسبه شاخص‌های توپوگرافی

شاخص‌های اولیه (شیب، جهت شیب، ارتفاع و ..) به طور مستقیم از مدل رقومی ارتفاع محاسبه می‌شود و ویژگی‌های

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.2.7.4]



شکل ۳. ساختار شبکه DEM، با یک آرایه ۳×۳ متحرک، متمرکز روی نقطه ۵

ثانویه یا مرکب از ترکیب ویژگی‌ها یا شاخص‌های اولیه حاصل می‌شود و می‌تواند به عنوان شاخصی از فرایندهای ویژه، مانند انتقال آب و رسوب مورد استفاده قرار گیرد (۵ و ۷). مبنای محاسبه شاخص‌های فوق رستری کردن یک شبکه سلولی ۳×۳ بر روی تصویر است (شکل ۳).

اگر در شکل ۳، فاصلهٔ بین نقاط متوالی λ باشد و X و Y و Z مشخصات بردار طول و عرض و ارتفاع باشد، مشتقات لازم برای محاسبه شاخص‌های توپوگرافی به شرح ذیل است (۷).

$f_{yy}=\partial^2 Z/\partial y^2$ $\quad f_{xy}=\partial^2 Z/\partial x\partial y$ $\quad F_{xx}=\partial^2 Z/\partial x^2$

$f_y=\partial Z/\partial y$ $\quad f_{yy}=\partial^2 Z/\partial y^2$

$P=f^2_x+f^2_y$ $\quad q=p+1$

به عنوان مثال برای نقطه شماره ۵ در شکل ۳ مشتقات جزئی فوق به شکل زیر محاسبه می‌شود (۷):

$f_x=(Z6-Z4)/2\lambda$ $\quad f_y=(Z2-Z6)/2\lambda$

$f_{yy}=(Z2+Z6-2Z5)/\lambda 2$ $\quad f_{xx}=(Z4+Z6-2Z5)/\lambda 2$

$f_{xy}=(-Z+Z3+Z7-Z9)/4\lambda 2$

ماکزیمم شیب برحسب درجه (β)، جهت شیب (Φ)، انحنای افقی (ω)، انحنای قائم (φ) عبارت‌اند از:

$\Phi= (f_{xy}+f^2_x+2f_{xy}f_xf_y+f_yf^2y)q^{(3/2)}$

$\varphi=180-\arctan(f_y/f_x)+90(d_x/|f_x|)$ $\quad \beta=\arctan(p1/2)$

$\omega =(f_{xy}f^2_x-2f_{xy}f_xf_y+f_yf^2_y)/p^{(3/2)}$

شاخص رطوبتی: عبارت است از شاخصی از توزیع مکانی رطوبت خاک در طول چشم انداز زمین که به وسیله معادله ذیل، قابل محاسبه است. (مقدار A_s در این معادله سطح ویژه حوزه آبخیز (m^2/m) و β درجه شیب می‌باشد) (۷).

$W=Ln(A_s/\tan\beta)$

شاخص قدرت جریان (Ω) نمایشی از قدرت فرسایندگی جریان‌های سطحی است (۷)

$\Omega =A_s\tan\beta$

شاخص حمل رسوب (Γ): نمایانگر فرایندهای فرسایش و رسوب بوده و به طور عمده تاثیر شیب بر فرسایش را نشان می‌دهد (۶). طبق نظر مور و ویلسون (۶) این شاخص با فاکتور شیب- طول شیب یعنی فاکتور LS در مدل جهانی برآورد فرسایش خاک(USLE) (Universal Soil Loss Equation) می‌باشد.

$\Gamma= (A_s/22.13)^m(\sin\beta/0.0896)^n$

در این معادله As و β همان پارامترهای قبلی و m=0.6 و n=1.3 پارامترهای ثابت‌اند (۷).

ایجاد مدل آماری و اعتبار سنجی آن

بعد از محاسبه شاخص‌های اولیه و ثانویه پستی و بلندی در نقاط مورد مطالعه، بین این پارامترها و خصوصیات خاک سطحی، ماتریس هم‌بستگی پیرسون در هر واحد سنگ شناسی برقرار شد. سپس آنالیز رگرسیون چند متغیره خطی بین خصوصیات خاک و شاخص‌های پستی و بلندی برای هر واحد به روش رگرسیون گام به گام (Stepwise regression) صورت گرفت. آنالیزهای آماری مختلف توسط نرم افزار SPSS انجام شد. از تعداد نمونه‌های کل هر واحد سنگ شناسی، تعدادی نمونه وارد مدل نشده و به منظور اعتبار سنجی مدل‌ها نگه‌داری شده است. بنابراین جهت اعتبار سنجی مدل‌ها در واحد E2sc، ۲۰ نقطه، در واحد Plc، ۳۰ نقطه وبرای واحد Ku، ۲۸ نقطه برای این منظور استفاده شد. توزیع این نقاط در جوار نقاط اصلی در شکل ۲ ارائه شده است. بدین منظور با استفاده از مشخصات پستی و بلندی که از مدل رقومی ارتفاع استخراج شده و با کمک مدل‌های رگرسیونی ایجاد شده، خصوصیات خاک در نقاط مورد نظر برازش گردید و سپس معیارهای

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.2.7.4]

انحراف از میانگین (ME) (Mean Error) و خطای محاسبات (RMSE) (Root Mean Square Error)، به شکل زیر محاسبه شده‌اند (۱۰).

$$ME= \Sigma[Z^*(si)-Z(si)]/n$$
$$RMSE= \{\Sigma[Z^*(si)-Z(si)]^2/n\}^{1/2}$$

شاخص ME نشانگر درجه اریب بودن تخمین است که باید حتی المقدور نزدیک صفر باشد و RMSE نمایانگر درجه دقت تخمین است که برای یک تخمین نااریب باید تا حد امکان حداقل باشد. به منظور پرهیز از توضیحات مکرر برای علائم مخفف، این علائم به شرح زیر عبارت‌اند از :

ME: انحراف از میانگین، RMSE: جذر میانگین مجذور انحرافات، Plc: واحد سنگ شناسی پلیوسن، E2sc: واحد سنگ شناسی ائوسن، Ku: واحد سنگ شناسی کرتاسه، Gravel: سنگریزه، Clay: رس، Sand:شن، O.M: مواد آلی، FC: رطوبت وزنی در حد مزرعه، pb: وزن مخصوص ظاهری خاک، Elev: ارتفاع، Plac: انحنای افقی، Proc: انحنای قائم، Asp: جهت شیب، Slp : شیب، : شاخص رطوبتی، Strm : شاخص قدرت جریان، Sedtind: شاخص حمل رسوب، MIN : مینیمم، MAX: ماکزیمم، MEAN: میانگین، C. V: ضریب تغییرات،SKEW : ضریب چولگی، KURT: ضریب کشیدگی و N: تعداد نمونه‌هاست.

بحث و نتایج

اقلیم، مواد مادری، توپوگرافی و موجودات زنده مهم‌ترین عوامل مؤثر در تشکیل خاک محسوب می‌شود. با توجه به این که خصوصیات اقلیمی در مقیاس بزرگ تغییر می‌کند، بنابراین به صورت ناحیه‌ای و به شرط یک‌نواخت بودن مواد مادری و پوشش گیاهی بر اساس خصوصیات توپوگرافی می‌توان تغیرات خاک را پیگیری کرد (۵).توضیح منطقی این ارتباط آن است که فرایندهای هیدرولوژیکی، حرکت آب سطحی و زیر سطحی و حرکت ذرات خاک و عناصر شیمیایی در چنین شرایطی به وسیلهٔ خصوصیات توپوگرافی منطقه، کنترل می‌شود. بنابراین چنین فاکتورهایی خصوصیات مختلف فیزیکی و شیمیایی خاک را نیز تحت تأثیر خود دارد. به همین دلیل واحدهای سنگ شناسی منطقه مورد مطالعه به عنوان واحدهای کاری مختلف برای ایجاد مدل مورد استفاده قرار گرفته است.

آمار توصیفی خصوصیات مطالعه شده افق سطحی خاک شامل: درصد رس، شن، مواد آلی، سنگریزه، درصد رطوبت وزنی در حد ظرفیت مزرعه و وزن مخصوص ظاهری خاک در جدول ۱ برای واحدهای مختلف سنگ شناسی مورد مطالعه قرار گرفته است. از آنجا که با داشتن درصدهای رس و شن می‌توان مقدار سیلت را برآورد کرد بنابراین به واسطه پرهیز از ورود متغیرهای موازی به مدل؛ مقدار سیلت در معادلات لحاظ نشده است. همان طور که نتایج توصیفی نشان می‌دهد، خصوصیات مزبور تغییر پذیری چندانی نداشته و بیشترین تغییر پذیری مربوط به مواد آلی است. به نظر می‌رسد علت این باشد که این پارامتر از خصوصیات دینامیک خاک بوده و به حاصلخیزی خاک، پوشش گیاهی موضعی و حضور آب وابسته است. به همین لحاظ تغییر پذیری زیادی از خود نشان داده است. با این وجود میزان متوسط آن در واحد آهکی Ku نسبت به دو واحد دیگر بیشتر است. این افزایش را می‌توان به مقدار رس بیشتر و خاک سنگین‌تر آن نسبت داد، به طوری که این شرایط از اکسیداسیون مواد آلی جلوگیری کرده و نیز امکان رشد پوشش گیاهی را بهتر فراهم می‌کند. ولی در مجموع به علت خشک بودن اقلیم منطقه، میزان مواد آلی در منطقه پائین است. همان طور که اشاره شد خاک در واحد Ku نسبت به دو واحد دیگر سنگین‌تر است و میزان رس و شن (جدول ۱) این مسأله را تأیید می‌کند. میانگین درصد سنگریزه نیز بنا بر طبیعت سنگ‌های آهکی نسبت به کنگلومرائی و ماسه سنگ، در واحد Ku کمی کمتر است.مقدار Fc و pb نیز تا حدودی بسته به میزان سنگریزه، بافت خاک و مقدار مواد آلی در واحد Ku از سایر واحدها متفاوت است.

در مرحله محاسبه خصوصیات پستی و بلندی اولیه و ثانویه بر مبنای معادلات قید شده در بخش مواد و روش‌ها، مقادیر آنها در پیکسل‌هایی به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰ متر محاسبه شده است. به

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.2.7.4]

جدول ۱. آمار توصیفی از خصوصیات مورد بررسی افق سطحی خاک در واحدهای مختلف سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه

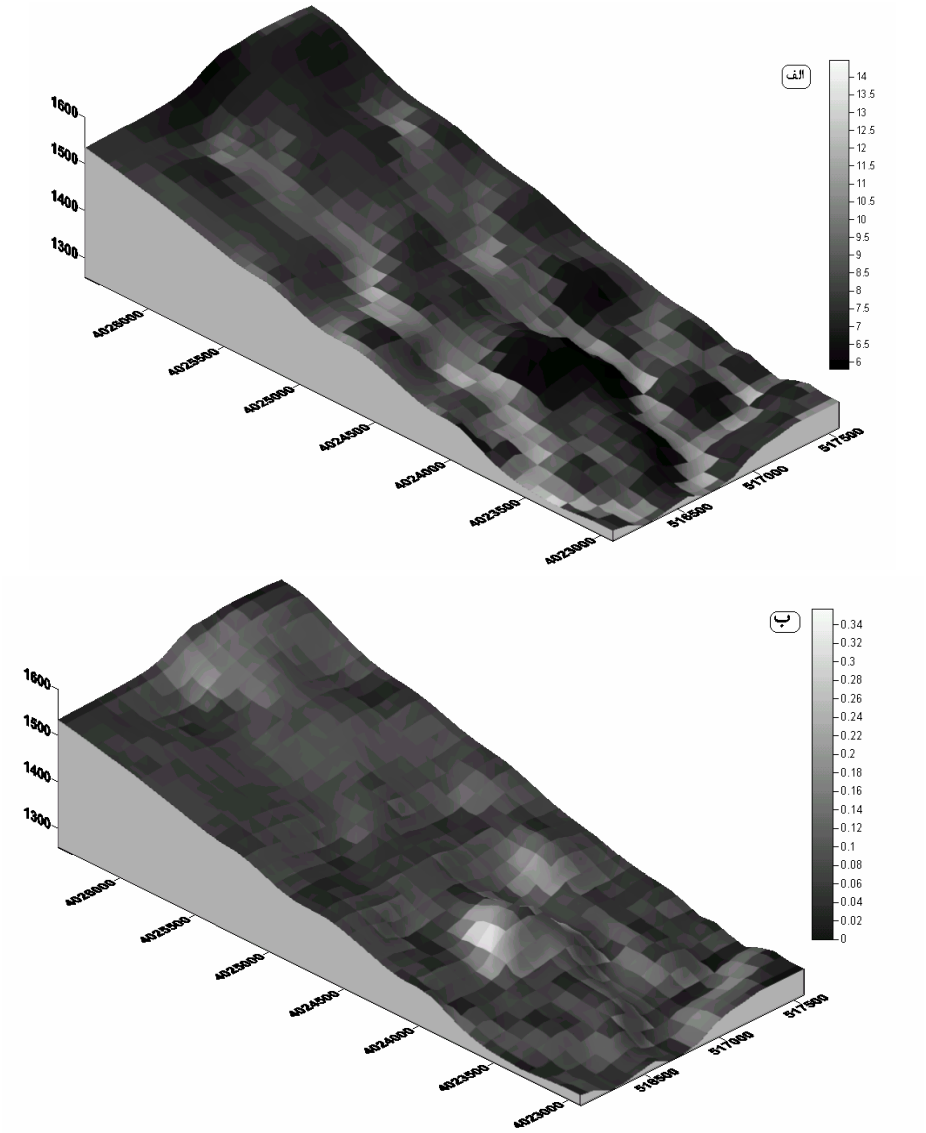
واحد سنگ شناسی		ویژگی	واحد	min	max	mean	C. V (٪)	skew	kurt	No Obs.
ائوسن)	E2Sc (مارن، ماسه سنگ و کنگلومرای	سنگریزه	٪	۲۰/۱۲	۳۱/۳۰	۲۳/۷۶	۱۱/۳۹	۱/۰۳	۰/۱۳	۷۸
		رس	٪	۸/۵۰	۱۰/۷۸	۹/۸۰	۴/۴۸	۰/۲۴	−۰/۰۹	۷۸
		شن	٪	۴۷/۲۸	۴۸/۴۷	۴۸/۸۵	۱/۵۰	۰/۲۹	−۰/۱۹	۷۸
		مواد آلی	٪	۰/۲۰	۰/۴۵	۰/۱۵	۵۹/۱۶	۱/۰۱	۲/۹۰	۷۸
		حد ظرفیت مزرعه	٪	۱۶/۵۰	۲۲/۳۴	۱۸/۴۵	۶/۵۵	۱/۲۰	۲/۲۰	۷۸
		وزن مخصوص ظاهری	gr/cm^3	۱/۳۰	۱/۵۲	۱/۴۱	۱۱/۰۰	۰/۲۳	−۰/۲۰	۷۸
پلیوسن)	Plc (کنگلومرا با مارن در بخش پایینی	سنگریزه	٪	۱۹/۳۰	۳۴/۱۰	۲۴/۵۴	۱۳/۴	۰/۳۷	−۰/۶۸	۱۲۵
		رس	٪	۷/۲۳	۱۱/۵۱	۹/۴۵	۹/۱۰	−۰/۲۷	−۰/۱۴	۱۲۵
		شن	٪	۴۶/۲۴	۴۸/۴۶	۴۷/۴۴	۶/۸۰	−۰/۱۲	−۰/۷۷	۱۲۵
		مواد آلی	٪	۰/۰۱	۰/۲۹	۰/۱۱	۴۶/۰۰	۰/۶۲	۰/۴۴	۱۲۵
		حد ظرفیت مزرعه	٪	۱۱/۴۳	۲۳/۲۶	۱۸/۵۳	۱۷/۳۰	−۰/۲۴	−./۹۳	۱۲۵
		وزن مخصوص ظاهری	gr/cm^3	۱/۳۰	۱/۵۶	۱/۴۵	۹/۵۰	۰/۴۶	−۰/۱۵	۱۲۵
	Ku (سنگ آهک کرتاسه)	سنگریزه	٪	۱۹/۵۹	۲۸/۲۸	۱۸/۲۷	۱۳/۶۰	۱/۰۸	۲/۷۰	۱۱۳
		رس	٪	۱۱/۲۵	۱۶/۵۰	۱۴/۱۴	۱۸/۲۵	−۰/۰۳	−۰/۴۵	۱۱۳
		شن	٪	۳۸/۲۶	۴۲/۶۹	۴۷/۹۳	۲۵/۴۰	۰/۴۱	−۰/۵۳	۱۱۳
		مواد آلی	٪	۰/۰۲	۰/۶۷	۰/۲۵	۵۴/۲۰	۰/۳۲	−۰/۲۹	۱۱۳
		حد ظرفیت مزرعه	٪	۱۹/۵۹	۳۱/۲۸	۲۲/۲۷	۱۱/۰۰	۱/۰۸	۲/۷۰	۱۱۳
		وزن مخصوص ظاهری	gr/cm^3	۱/۵۰	۱/۳۰	۱/۴۵	۸/۵۰	۰/۵۷	−۰/۷۶	۱۱۳

عنوان نمونه پارامترهای شیب (بر حسب تانژانت زاویه شیب) و شاخص رطوبتی برای کل منطقه مورد مطالعه در شکل ٤ نمایش داده شده است. همان طور که از شکل برمی‌آید، توزیع شیب در منطقه در طیف وسیعی قرار دارد. و مقدار شاخص رطوبتی در منطقه بین ٦-١٤ متغیر است. به طوری که گسلر و همکاران (۲۰۰۰) عنوان کرده‌اند، شاخص رطوبتی با ترکیب سطح ویژه حوزه و درجه شیب، شاخصی از موقعیت مکانی یک نقطه در طول یک کاتنا (Catena) می‌باشد. مقادیر کم آن در مناطق بالایی شیب و مقادیر زیاد در نقاط پست و آبراهه‌ها دیده می‌شود. شکل ٤- الف این مسأله را تأیید می‌کند.

ضرایب هم‌بستگی بین خصوصیات انتخاب شده خاک با خصوصیات پستی و بلندی اولیه و ثانویه برای واحدهای

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.2.7.4]



شکل ٤. پراکنش جغرافیایی مقادیر محاسبه شده شاخص رطوبتی (الف) و شیب (ب)
(مقادیر روی مقیاس راهنما تانژانت زاویه شیب است و مقادیر بیشتر مناطق پر شیب را نشان می‌دهد)

مختلف سنگ شناسی در جداول ۲، ۳ و ۴ ارائه شده است. از مهم‌ترین خصوصیات آنالیز سطح زمین که با خصوصیات خاک ارتباط معنی داری نشان می‌دهد، می‌توان به ارتفاع، شیب، شاخص رطوبتی، شاخص قدرت جریان و در مواردی جهت شیب و درجه انحنای قائم زمین اشاره کرد که در واحدهای مورد مطالعه، در درجات مختلفی با خصوصیات خاک، هم‌بستگی معنی داری دارند.

وجود هم‌بستگی آماری بین ویژگی‌های مذکور و خصوصیات خاک، مؤید این مطلب است که حرکت آب و فرایندهای فرسایش و رسوب و هیدرولوژیکی در سطح حوزه، خصوصیات خاک را کنترل کرده است. مور و همکاران (۵) نیز ضمن نشان دادن ارتباط آماری بین خصوصیات خاک و پارامترهای شیب، شاخص رطوبتی و ظرفیت حمل رسوب به چنین اعتقادی دست یافتند.

در مدل‌های ایجاد شده در سطح احتمال ۱ درصد، تعداد محدودی (غالباً یک یا دو) پارامتر در مدل وارد شد. ولی در

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.2.7.4]

جدول ۲. ضرایب هم‌بستگی (r) بین خصوصیات خاک و ویژگی‌های توپوگرافی در واحد سنگ‌شناسی E2S

	Elev	Plac	Proc	Asp	Slp	Wetn	Strm	Sedtind
Clay	−۰/۳۲**	۰/۱۳	−۰/۲۲*	−۰/۰۵	−۰/۲۱	۰/۰۴	−۰/٤**	−۰/۳۱**
Sand	۰/۵۴**	۰/۰۶	۰/۱۷	−۰/۲۹*	۰/۰۶	−/۰۷	−۰/۰۶	۰/۰۵
Gravel	۰/۳۹**	۰/۱۶	۰/۲۹*	۰/۱۷	۰/۱۷	−۰/۱۹	−۰/۴۲**	۰/۲۸*
O.M	−۰/۲۴*	−۰/۰۴	۰/۱۷	−۰/۱۹	−۰/۲۶*	۰/۰۲	−۰/۳۸**	−۰/۳۵**
F.C	−۰/۲۷*	−۰/۲۱	−۰/۰۵	−۰/۲۱	−۰/۲۷*	۰/۰۹	−۰/۲۷*	−۰/۲۹**
ρb	۰/٤۵**	−۰/۱۲	۰/۳۹**	۰/۱۱	۰/۱٦	۰/٦۳**	−۰/۳۵**	۰/۰۱

* : معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ ** : معنی‌دار در سطح ۰/۰۱

جدول ۳. ضرایب هم‌بستگی (r) بین خصوصیات خاک و ویژگی‌های توپوگرافی در واحد سنگ‌شناسی Plc

	Elev	Plac	Proc	Asp	Slp	Wetn	Strm	Sedtind
Clay	−۰/۷۹**	۰/۲۷**	۰/۰۲	۰/۱۳	−۰/۰۷	۰/۲۱*	۰/۲۷**	−۰/۲٤**
Sand	۰/۳٤**	۰/۱٤	−۰/۰۹	−۰/۰۵	۰/۲۱*	−۰/۰۵	−۰/۰۹	۰/۲۲*
Gravel	۰/۳۸**	۰/۱٤	−۰/۰۹	۰/۱٤	۰/۲۱*	−۰/۲٦**	−۰/۰۲	۰/۰٦
O.M	−۰/۳۲**	۰/۲*	−۰/۰۷	۰/۰۹	−۰/۲۲*	۰/۲۱*	−۰/۲*	−۰/۰۳
F.C	−۰/۳٦**	−۰/۱۲	۰/۱	۰/۰۹	−۰/۲٦**	۰/۱۲	۰/۰۸	−۰/۲۳*
ρb	۰/٤۹**	−۰/۰۵	−۰/۱۳	−۰/۱۳	۰/۰۲	−۰/۲*	−۰/۰۲	۰/۱

* : معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ ** : معنی‌دار در سطح ۰/۰۱

جدول ٤. ضرایب هم‌بستگی (r) بین خصوصیات خاک و ویژگی‌های توپوگرافی در واحد سنگ‌شناسی Ku

	Elev	Plac	Proc	Asp	Slp	Wetn	Strm	Sedtind
Clay	−./۵۲**	۰/۰۹	−۰/۰٦	−۰/٤**	−۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۷**	۰/۰۸
Sand	۰/٦٤**	۰/۰۳	−۰/۲۵**	۰/۱۷	۰/۰۳	−۰/٤٤**	۰/۳٦**	۰/۰۰۷
Gravel	۰/٦٦**	−۰/۰۵	−۰/۰٦	−۰/۰۸	۰/۲۱*	−۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۱٤
O.M	−۰/۳۳**	−۰/۱۵	۰/۰۲	۰/۱۹*	−۰/۲۵**	۰/۰٦	−۰/۲۲*	−۰/۰۷
F.C	−۰/۷۲**	۰/۰٤	۰/۰٤	−۰/۲٦**	−۰/۳۹**	۰/۲۲*	−۰/٤۳**	−۰/۲٤*
ρb	۰/۷**	−۰/۰۳	−۰/۲۵*	−۰/۰۳	۰/۰۵	−۰/۲۷**	۰/۲۹**	۰/۲۵*

* : معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ ** : معنی‌دار در سطح ۰/۰۱

سطح احتمال ۵ درصد، تعداد بیشتری پارامتر وارد مدل شده که با تعیین شاخص‌های اعتبار سنجی مشخص گردید. حالت دوم به واسطه استفاده از پارامترهای کمکی بیشتر، برازش معتبرتری از خصوصیات خاک ارائه می‌کند. به همین لحاظ در تمامی مدل‌ها، سطح احتمال ۵ درصد در رگرسیون گام به گام برای ورود متغیرها به مدل استفاده شد. از آنجا که اوده و همکاران

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.2.7.4]

جدول ۵. مدل‌های رگرسیون چند متغیره خطی (معنی‌دار در سطح ۵ درصد)، برای برآورد خصوصیات سطحی خاک بر اساس ویژگی‌های پستی و بلندی در واحد سنگ‌شناسی E2sc

مدل رگرسیون خاک – چشم انداز	R^2	شاخص اعتبار سنجی (n=۲۰)	
		ME	RMSE
Clay(%)=9.984 – 0.00874× Strm -0.025 Elev - 0.0021 ×Sedtind - 802.398× Proc	۰/۳۶	۰/۰۵۳	۰/۳۹
Sand(%)= 58.218+0.00622× Elev – 2.12 Asp	۰/۵۲	۰/۰۳۴	۰/۱۷
Gravel(%)= -99.018 - 0.0019 Strm + 0.0805 Elev + 390 × Proc	۰/۵۵	۰/۰۵	۱/۲
O.M(%)= 50.98 -0.00188 × Strm - 0.0039 × Sedtind - 0.14× Slp − 0.021× Elev	۰/۳۵	–۰/۰۲	۰/۰۹
FC (%)= 270.28 - 15.195× Sedtind - 0.02175× Elev - 0.0143× Strm	۰/۵۹	۰/۱۵	۰/۴
ρb= 1. 343 +0.0163× Wetn +0.00156× Elev + 13.53× Proc - 0 .00514× Strm	۰/٦۳	–۰/۰۰۲	۰/۰۱۲

جدول ٦. مدل‌های رگرسیون چند متغیره خطی (معنی‌دار در سطح ۵ درصد)، برای برآورد خصوصیات سطحی خاک بر اساس ویژگی‌های پستی و بلندی در واحد سنگ‌شناسی Plc

مدل رگرسیون خاک – چشم انداز	R^2	شاخص اعتبار سنجی (n=۲۸)	
		ME	RMSE
Clay (%) = -13.551 -0.0146 ×Elev + 0.269 × Wetn - 0.04733× Sedtind +409.652 ×Plac + 0.00121 × Strm	۰/۷۲	۰/۰۵	۱/۵
Sand(%) = 43.172 + 0.002911 × Elev	۰/۳۲	۰/۱٤	۱/٤
Gravel(%) = -33.8 + 0.0343 × Elev – 1.193 × Wetn	۰/۳٤	۰/۲٤	۲/۱
O. M (%) = -0.966 – 0.000835 × Elev + 0.697 ×Slp	۰/۲۹	۰/۰۱	۰/۰۲۵
F C (%) = 56.37 – 0.00278 × Elev - 31.99× Slp – 0.187 × Sedtind	۰/۳۱	۰/۱۲	۰/۱
ρb = 0.0023 + 0.0302 × Elev + 0.01055 ×Wetn	۰/٤۲	۰/۰۹	۰/۱۵

جدول ۷. مدل‌های رگرسیون چند متغیره خطی (معنی‌دار در سطح ۵ درصد)، برای برآورد خصوصیات سطحی خاک بر اساس ویژگی‌های پستی و بلندی در واحد سنگ‌شناسی Ku

مدل رگرسیون خاک – چشم انداز	R^2	شاخص اعتبار سنجی (n=۳۰)	
		ME	RMSE
Clay(%)= 215.597- 0.0104× Elev -0.0075× Strm -0.125 Asp	۰/٦۱	–۰/۰۲	۰/۱۲
Sand (%)= 63.318 +.0126 × Elev- 0.129× Wetn + 0.024 × Strm- 25.64 × Proc	۰/۵۹	–۰/۱۱	۲/۵
Gravel(%) = -15.59+ 0.0286× Elev +120.2 Slp	۰/۵۲	۰/۰۳۸	۱/۵
O.M(%)= 1.495 -0.000462 Elev -11.58 × Slp – 0.00156× Strm + 0.00735 × Asp	۰/۲۸	۰/۰۲	۰/۰۰۷
F C(%)= 455.67 - 0.0554 × Elev -0.015× Strm -12.14 × Slp - 0.111 × Asp	۰/۵۹	۰/۰۸	۰/۱۹
ρb= 7.465 + 0.00449 × Elev + 0.021 Strm -0.01045× Wetn - 43.26 × Proc	۰/٦۱	۰/۰۱۸	۰/۰۵

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.2.7.4]

(۱۹۹۵) عنوان کرده‌اند، در استفاده از مدل‌ها وجود هم‌بستگی بین خصوصیات خاک و پارامترهای ارتفاعی انتخاب شده، اهمیت فراوان دارد (۸)، در این پژوهش نیز طبق نتایج ماتریس هم‌بستگی(جداول ۲ تا ۴)، خصوصیات پستی و بلندی معنی‌دار برای هر پارامتر خاک انتخاب و در مدل‌سازی از آنها استفاده شده است. بهترین ترکیب آماری ویژگی‌های مزبور با هر یک از خصوصیات خاک در واحدهای مختلف سنگ شناسی در جداول ۵، ۶ و ۷ ارائه شده است.

نکته قابل توجه این که در پارامترهای مختلف بسته به درجه هم‌بستگی پارامتر، تعداد متفاوتی از پارامترها برای برآورد خصوصیت، وارد مدل شده‌اند. ضرائب تشخیص نشان می‌دهد که این مدل‌ها در واحد سنگ‌شناسی E2sc، ۳۶- ۵۹ درصد، واحد Ku، ۲۶-۶۱ درصد و در واحد Plc نیز ۲۹-۷۲ درصد از کل تغییرات پارامترهای مختلف را توجیه کرده‌اند. به نظر می‌رسد این مقدار توجیه واریانس توسط چنین مدل‌هایی نسبت به سایر روش‌های مطالعه، قابل قبول باشد. هر چند می‌توان برای ایجاد مدلی معتبرتر که تغییرات بیشتری از خصوصیات خاک در سطح حوزه را پیش‌بینی کند، از فواصل کمتر نمونه برداری و ابعاد کوچکتر پیکسل‌های DEM استفاده کرد. این امر مستلزم پژوهش‌های گسترده‌تر آتی است. در این ارتباط مور و همکاران (۵) تأیید کرده‌اند که در سطح مزرعه، پیکسل‌های ۵ متری جهت نمونه برداری خاک، مدل‌های رگرسیون قابل اعتمادی ایجاد می‌نماید.

نتایج اعتبار سنجی سایر مدل‌ها نیز در جداول ۵ تا ۷ آمده که نشان می‌دهد مقادیر ME مدل‌ها عموماً خیلی نزدیک به صفر بوده و این امر مؤید این مطلب است که برازش، توسط مدل‌های ایجاد شده نااریب بوده است. مقادیر MSE پائین مدل‌ها نیز نشاندهنده دقت مناسب و قابل قبول برآوردها می‌باشد. هر چند در منطقه مورد نظر، این پژوهش توانسته واحدهای مختلف سنگ شناسی را به عنوان یک فاکتور خاک‌سازی کنترل نماید ولی در منطقه یاد شده از نظر خصوصیات مختلف سطح زمین، همچون انحنای زمین، جهت شیب و برخی پارامترهای مرکب پستی و بلندی از تنوع کمی برخوردار است. این مشکل ممکن است اعتبار مدل را در سایر نقاط حوزه با شرایط پستی و بلندی متفاوت، تحت الشعاع قرار دهد. بنابراین برای ایجاد مدلی فراشمول، لزوم انتخاب مناطقی با تنوع زیاد از خصوصیات پستی و بلندی همراه با ابعاد شبکه‌بندی کوچک‌تر احساس می‌شود. نتایج کلی پژوهش نشان می‌دهد که در سطح حوزهٔ آبخیز که مشکلات خاص نمونه برداری، صعب العبور بودن برخی مناطق و هم‌چنین نبود اطلاعات دقیق و پیوسته از خصوصیات خاک، وجود دارد؛ برای انجام پروژهای دقیق اجرائی و عملیاتی که نیازمند اطلاعات دقیق خاک است، شاید بتوان از روش معرفی شده در این پژوهش استفاده کرد. هم‌چنین مدل‌های به دست آمده در چنین پژوهش‌هایی را در شرایط مشابه حوزه از نظر پوشش گیاهی و مواد مادری برای پیش بینی خصوصیات خاک (بدون نمونه برداری از خاک) با دقت مناسب می‌توان به کار گرفت. ولی استفاده از چنین مدل‌هایی در مناطقی با تنوع مواد مادری و پوشش گیاهی در هاله‌ای از ابهام قرار دارد و به مطالعات بیشتر و دقیق‌تری نیاز دارد. ممکن است تلفیق مدل‌های مزبور با اطلاعات حاصل از تصاویر ماهواره‌ای و سایر لایه‌های اطلاعاتی به نتایج رضایت بخش‌تری منجر گردد.

منابع مورد استفاده

1. Buol, S. W., R. J. Southard, R. C. Graham and P. A. Mc Daniel. 2003. Soil genesis and classification. Iowa state univ. press., USA.
2. Gessler, P. E., O.A. Chadwick, F. Chamran, L. Althouse and K. Holmes. 2000. Modeling soil–Landscape and ecosystem properties using terrain attributes. Soil Sci. Soc. Am. J. 64: 2046-2056.
3. Klute, A. 1986. Methods of Soil Analysis. Part 1, Physical and Mineralogical Methods. 2nd ed., Soil Sci. Soc. Am.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.2.7.4]

Inc., 1188 p.
4. Kreznor, W. R., K. R. Olson, W. L. Banwait and D. L. Johnson. 1989. Soil landscape and erosion relationships in a northwest Illinois watershed. Soil Sci. Soc. Am. J. 53: 1763-1771.
5. Moore I. D., P. E. Gessler and G. A. Nielson. 1993. Soil attribute prediction using terrain analysis. Soil Sci. Soc. Am. J. 57:443-452.
6. Moore, I. D and J. P. Wilson. 1992. Length- slope factors in the revised universal soil loss equation. J. Soil Water Conserv. 47: 423- 429.
7. Moore, I. D., R. B. Grayson and A. R. Landson. 1991. Digital terrain modeling. A review of hydrological, geomorphological, and applications. Hydrol. Proc. 5: 3-30
8. Odeh, I. O. A, A. B. MC Bratney and D. J. Chiteleborough.1995. Further results on prediction of soil properties from terrain attributes : heteropic cokriging and regression kriging. 67: 215-226.
9. Page, A. L., R. H. Miller and Keeney. 1992. Methods of Soil Analysis. Part II, Chemical and Mineralogical Properties. 2nd ed., SSSA pub., Madison. 1159pp.
10. Sinowski, W. and K. Auerswald. 1999. Using relief parameters in a discriminate analysis to stratify geological areas with different spatial variability of soil properties. Geoderma 89: 113-128.
11. Soil Survey Staff. 1993. Soil survey manual. USDA-Soil Conservation Service. Agric. Hand book No. 18, U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.
12. Tarboton, D. 2003. Terrain analysis using digital elevation models in hydrology. 23rd ESRI international users Conference, California.
13. Veihe, A. 2002. The spatial variability of erodibilty and its relation to soil types: A study from northern Ghana.Geoderma10:101-120.
14. Webster, R. 1985. Quantitative Spatial Analysis of Soil in the Field. Adv. Soil Sci. Vol. 3, Springer - Verlag pub., New York.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.2.7.4]