کاربرد مدل مقدماتی جبری برای تشکیل خاک

صدیقه علائی‌بخش (نویسنده مسئول) ۱* و مهرداد اسفندیاری ۲

۱*- استادیار، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، واحد قائم‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، مازندران، ایران،

S_alaeibakhsh@yahoo.com

۲- دانشیار، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران،

doddesfandiari@gmail.com

تاریخ دریافت: تیر ۱۳۹۶ تاریخ پذیرش: شهریور ۱۳۹۶

Application of Algebraic Model for Soil Formation

Sedigheh Alaeibakhsh (Corresponding author)[1*] and Mehrdad Esfandiari[2]

1- Assistant Professor, Department of Agronomy, Agriculture college, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Mazandaran, Iran, S_alaeibakhsh@yahoo.com*

2- Associate Professor, Department of Soil Science, Agriculture and Natural resources college, Science and Research branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, doddesfandiari@gmail.com

Received: July 2017 Accepted: August 2017

چکیده

در این مطالعه، یک مدل مقدماتی جبری برای تشکیل خاک و پیدایش چشم‌انداز در منطقه قزوین مورد بررسی قرار گرفت. این مدل به بررسی تشکیل خاک در یک چشم‌انداز، مطابق با یک مدل رقومی ارتفاعی و در مقیاس کاتنا می‌پردازد. کاربرد این مدل، کمی کردن پدوژنز توسط برخی نمودارها می‌باشد. مدل مذکور بر اساس تعادل جرم بوده و بیان‌کننده تغییرات در ضخامت خاک در طول زمان می‌باشد. این تغییرات در ضخامت خاک به برخی فرآیندها شامل هوازدگی فیزیکی سنگ بستر، از بین رفتن مواد خاک به دلیل هوازدگی شیمیایی و انتقال خاک به واسطه فرسایش، بستگی دارد. آهنگ هوازدگی فیزیکی یا کاهش سطح سنگ بستر، به طور نمایی با افزایش ضخامت خاک کاهش می‌یابد. این مدل، همبستگی کامل با اطلاعات صحرایی موجود را نشان می‌دهد. در مدل مذکور، همبستگی بین هوادیدگی سنگ بستر، ضخامت خاک و فرسایش سطح آن، جهت پیش‌بینی پیدایش خاک و پستی و بلندی زمین، به صورت مدل دینامیکی کمی غیرخطی ارائه شده است. پارامترهای مدل شامل نسبت هوازدگی و ضریب پخش مواد، به عنوان تابع کاهش نمایی ضخامت خاک در نظر گرفته شدند که نشان دهنده هوازدگی جبری می‌باشد. مدل به لحاظ عددی با استفاده از فرآیند تفاضل محدود حل شده برای یک مثل عددی بکار برده شد. شبیه‌سازی با مجموعه‌ای از تپه‌ها و دره‌ها برای چشم‌انداز منطقه قزوین انجام شد. نتایج حاصل نشان داد که شدت تشکیل خاک در ابتدا بسیار زیاد بوده و تا رسیدن به مرحله ثبات کاهش می‌یابد. این مورد به واسطه مشاهده یک تغییر ثابت در ضخامت خاک مشخص شد. مدل همچنین ویژگی‌های یک سیستم دینامیک غیر خطی را نشان داد. به نظر می‌رسد غیر خطی بودن ضخامت و انحنای خاک و رویدادهای تصادفی اولیه، سبب بی‌ثباتی در سیستم می‌گردد. نتایج حاصل، پیشرفت امیدبخشی را در نمونه‌سازی کمی پدوژنز نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: پدوژنز، تشکیل خاک، چشم انداز، مدل جبری، هوازدگی.

فصلنامه زیست شناسی سلولی و مولکولی گیاهی

سال ۱۳۹۶، دوره ۱۲، شماره ۲، صص ۲۹-۲۱

Abstract

In this research, a primary and basic soil production model was utilized. This model has considered soil formation in a landscape conditioned by a digital elevation model. The model demonstrated the application in quantifying pedogenesis. The model stated the changes in soil thickness with respect to time duration; it depends on physical weathering rate of rock, the loss due to chemical weathering and transport of the soil through erosion. The rate of physical weathering or lowering of the bedrock surface is represented by an exponential decline with soil thickness. The movement of materials in the landscape was characterized by diffusive transport, leaching and dissolution. Dissolvation, authigenesis and hydration of soil were considered as losses by chemical weathering. The model was solved numerically using finite difference approach and applied to a digital elevation model. The obtained results showed that the soil thickness is highly related to the profile curvature. The effect of climate, rock type and land management were presented by different combinations of weathering rate and erosive diffusivity. The model also exhibits the characteristics of a nonlinear dynamic system. Simulation of soil development in Qazvin plain for different time scales was illustrated. Finally, results showed promising progress in evaluation of quantitative pedogenesis.

Keywords: Digital Elevation Model, Exponential Decline, Landscape, Pedogenesis, Quantitative Analysis, Soil Production.

فصلنامه زیست شناسی سلولی و مولکولی گیاهی

سال ۱۳۹۶، دوره ۱۲، شماره ۲، صص ۲۹-۲۱

مقدمه و کلیات

خاک، منبعی غیر تجدیدشونده در مدت طول عمر انسان می‌باشد، به همین جهت باید از آن حفاظت شود. شیوه استفاده از زمین، فعالیت‌های کشاورزی و تغییرات اقلیمی در مقیاس جهانی در تکامل خاک تأثیر دارند. ارزیابی فرایند تشکیل خاک، به عنوان پاسخی به افزایش مشکلات زیست محیطی، یکی از مهم‌ترین مسائل در علم خاک شناسی می‌باشد (Mehraban Rad *et al*., 2012). چنانچه بخواهیم فعالیت‌های تاثیرگذار بر تکامل خاک (از جمله فعالیت‌های کشاورزی) را با حفاظت خاک توأم نمائیم، بایستی تأثیر این فعالیت‌ها و تغییرات زیست محیطی را بر تکامل خاک بررسی نموده و در صورت امکان بوسیله مدل‌سازی، تشکیل و تکامل خاک را پیش‌بینی کنیم (Minasny and McBratney, 2006). مدل سازی کمی فرایندها به ما این امکان را می‌دهد تا اثرات درازمدت فعالیت‌های بشر و تغییرات اقلیم را بر خاک و چشم انداز زمین ارزیابی نمائیم. به علاوه، با استفاده از مدل سازی، درک بهتری از روابط خاک و چشم انداز زمین به دست می‌آید. در دهه‌های اخیر، استفاده از تکنیک‌های کمی تجربی برای تخمین ویژگی‌های خاک، رو به گسترش می‌باشد (McBratney *et al*., 2003; Malone *et al*., 2017). دلیل این امر امکان تخمین این مدل‌ها در دامنه‌ای وسیع از مشکلات زیست محیطی و مدیریتی اراضی می‌باشد. اما با این حال، مدل سازی تشکیل خاک بسیار مشکل است، زیرا خاک یک ماده بسیار پیچیده با اثرات متقابل بین آب، مواد غیر آلی و مواد آلی می‌باشد. برای حل این مشکل، Minasny و McBratney(۲۰۰۱)، راه حل دیگری ارائه دادند که در برگیرنده مدل مقدماتی جبری (مکانیستیک) است، که موقتاً جایگزین مدل‌های دیگر شده و آن‌ها تشکیل فضایی خاک را در مقیاس کاتنا برآورد می‌کنند. تاریخچه تشکیل خاک، پدیده‌ای قابل مشاهده نمی‌باشد و وجود آن فقط می‌تواند راهنمای رویداد حقیقی عوارض پدولوژیک باشد (Minasny and McBratney, 2016). خاک شناسان با استفاده از این اثرات، تاریخچه تشکیل خاک را مدل‌سازی می‌نمایند. بنابراین، مدل سازی تشکیل خاک طی زمان می‌تواند امکان بررسی کمی این تاریخچه را فراهم نماید. با توجه به مسائل ذکر شده، هدف از این پژوهش بررسی ارتباط بین پدوژنز و چشم انداز زمین و چگونگی روند تغییرات خاک در طول زمان در منطقه قزوین، و همچنین ارائه یک مدل جبری مقدماتی برای تولید خاک در مقیاس کاتنا در یک چشم انداز مشروط توسط یک مدل دیجیتال ارتفاعی در دو بعد و شرح کاربرد مدل در کمی کردن پدوژز می‌باشد.

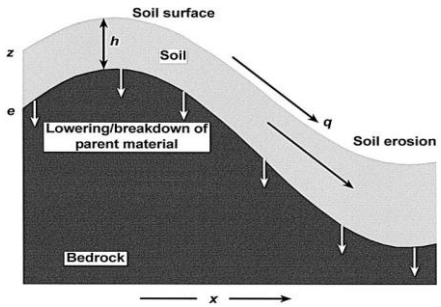
فرآیند پژوهش

مدل تشکیل خاک در چشم انداز، بر اساس مطالعات Minasny و McBratney (۱۹۹۹، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۶) در نظر گرفته شد. این مدل بر اساس تعادل جرم است و تغییرات در ضخامت خاک در طول زمان به برخی فرآیندها شامل هوازدگی فیزیکی سنگ بستر، از بین رفتن مواد خاک به دلیل هوازدگی شیمیایی، و انتقال خاک به واسطه فرسایش، بستگی دارد (Minasny and McBratney, 1999). این تغییرات در فرم ساده ریاضی به شرح زیر می‌باشد:

جریان خروجی – جریان ورودی + هوازدگی = تغییر در ضخامت خاک

مدل ارائه شده، چشم انداز منطقه قزوین را با ارتفاع سطح خاک z، ضخامت خاک h و حدفاصل سنگ و

خاک e، در طول محور مختصات X و Y در نظر می‌گیرد (شکل ۱).



شکل ۱: مدل ساده شده تشکیل خاک در یک چشم انداز [z: ارتفاع از سطح، h: ضخامت خاک، e: حدفاصل بین خاک و سنگ بستر، در راستای محور افقی x] (Minasny and McBratney, 1999)

Fig 1: Simplified model of soil formation in a landscape

تشکیل خاک بستگی به آهنگ در هم شکستگی یا هوازدگی مواد اولیه لایه زیرین تحت فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی دارد. تغییرات در بالا آمدگی خاک شامل تغییرات در ضخامت خاک، هوازدگی سنگ بستر و هوازدگی خاک نسبت به دوره زمانی می‌باشد. پارامترهای مؤثر در بالا آمدگی خاک به صورت معادله ۱ تعریف می‌شوند:

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\rho r}{\rho s}\times\frac{\partial e}{\partial t}=-\nabla q \quad \text{(معادله ۱)}$$

h: ضخامت خاک، $\frac{\partial e}{\partial t}$: آهنگ هوازدگی سنگ بستر، $\nabla=(\frac{\partial}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y})$: اپراتور Del، یک بردار مشتق جزئی از انتقال مواد خاک، q : چگالی شار، ρs: چگالی خاک و ρr: چگالی سنگ. Heimsath و همکاران (۲۰۰۱)، پیشنهاد کردند که آهنگ هوازدگی فیزیکی سنگ بستر، به طور نمایی با افزایش ضخامت خاک کاهش می یابد (معادله ۲):

$$\partial e/\partial t=-p_0\exp(-kh) \quad \text{(معادله ۲)}$$

که p_0 پتانسیل (یا مقدار ماکزیمم) آهنگ هوازدگی سنگ بستر (بر حسب متر در سال) و k، یک ثابت تجربی است. کاهش آهنگ هوازدگی با افزایش ضخامت خاک متناسب است با کاهش نمایی دامنه دما با افزایش عمق زیر سطح خاک و همچنین کاهش نمایی در مقدار میانگین نفوذ آب برای خاک‌های دارای زهکشی آزاد. تابع قابلیت انتشار و شیب انحنا در معادله ۳ بیان شده است (Minasny and McBratney, 1999):

$$\frac{\partial h}{\partial t}=-\frac{\rho r}{\rho s}\frac{\partial e}{\partial t}+D\frac{z\partial^2}{\partial x^2} \quad \text{(معادله ۳)}$$

معادله ۳ نشان می‌دهد که تولید سنگ‌پوشه (برای h بزرگ‌تر که معرف پوشش ضخیم‌تر است)، به آهنگ هوازدگی (برای کاهش جنبه هوازدگی سنگ بستر e) و مواد حذف شده، بستگی دارد. بخش آخر عبارت مدل بالا، تابع قابلیت انتشار (D) و مشتق دوم است که شیب منحنی $\partial^2 z/\partial x^2$ را نشان می‌دهد. Ahnert (۱۹۷۷)، مدل ضخامت بحرانی را به صورت تابع به شکل یکی از دو معادله زیر تشریح می‌کند:

$$h\leq h_c\frac{\partial e}{\partial t}=p_0(1+k_1h/h_c-h^2/h^2_c) \quad \text{(معادله ۴) برای}$$

یا

$$h>h_c\frac{\partial e}{\partial t}=p_0k_1\exp(h_c-h) \quad \text{(معادله ۵) برای}$$

که پارامترهای این معادلات عبارتند از:

h_c: ضخامت بحرانی، k_1: ثابت هوازدگی که بزرگی نسبی هوازدگی را تعیین می‌کند زمانی که بزرگ‌تر از h_c باشد در مقایسه با سنگ. به عنوان جایگزین، h_c تا به پیوسته‌ای را بیان می‌کند که فرآیند هوازدگی را تشریح می‌کند:

$$\frac{\partial e}{\partial t}=(p_0[\exp(-k_1h)-\exp(-k_2h]+p_a) \quad \text{(معادله ۶)}$$

که k_1 ثابت نرخ هوازدگیست زمانی که $h\leq h_c$، و k_2 آهنگ هوازدگیست زمانی که $h_c=h$ و p_a آهنگ هوازدگی در شرایط پایدار است با شرط $k_1<k_2$. ضخامت بحرانی زمانی که هوازدگی بهینه شده است و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$hc=\frac{\ln(\frac{k_2}{k_1})}{k2-k1} \quad \text{(معادله ۷)}$$

منطقه مورد مطالعه به مساحت تقریبی ۸۵۰۰۰ هکتار، در محدوده طول جغرافیایی ۴۹° و ۱۰′ تا ۵۰° و ۳۹′ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵° و ۲۰′ تا ۳۶° و ۳۰′ شمالی بود، که شامل دشت مرکزی قزوین و

ارتفاعات شمالی و جنوبی آن می‌باشد. حداقل ارتفاع منطقه مورد بررسی ۱۲۹۰ متر در دشت‌ها و حداکثر آن ۱۴۷۵ متر در کوه‌ها، بود. بررسی میدانی و موقعیت جغرافیایی ۱۰۰۰ نقطه نمونه با استفاده از GPS ثبت شد. سپس، از ادغام نقشه‌های خاک، زمین شناسی و توپوگرافی، ۵۰ واحد توپوگرافی در منطقه مورد مطالعه شناسایی شد. نقشه‌های توپوگرافی با استفاده از AutoCAD Civil 3D، نسخه ۲۰۱۰ و Arcview GIS software رقومی شدند.

در اینجا، ضخامت اولیه خاک با پوشش نازک یکنواخت خاک حدود ۱۰ سانتی‌متر فرض شد، چرا که اطلاعاتی در مورد شرایط خاک اولیه در دسترس نبود. بنابراین، ضخامت اولیه که منطبق بر تابع خطی شیب یا انحراف (منحنی) بود، نقطه شروع خوبی بود. در این بین، رابطه‌ای بین توپوگرافی و ضخامت خاک وجود دارد که باید حتماً مدنظر قرار می‌گرفت. بنابراین، با شروع از ضخامت خاک یکنواخت، ضعف فرض خود را به حداقل رساندیم. پارامترهای مدل مورد استفاده در محاسبه و اجرای این شبیه سازی، در جدول ۱ به طور خلاصه بیان شده‌اند.

جدول ۱: پارامترهای مورد استفاده در مدل به کار رفته در مطالعه

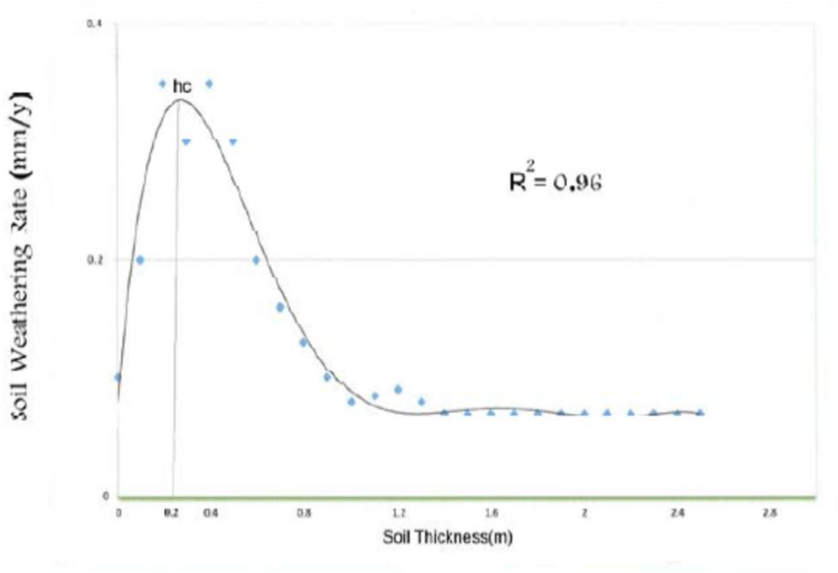
Table 1: Parameters used in the model used in the study

پارامتر	مقدار
D (مترمربع در سال)	۰/۰۰۰۳
p_0 (میلی متر در سال)	۰/۲۵
p_a (میلی متر در سال)	۰/۰۵
k_1 (در میلی متر)	۴
k_2 (در میلی متر)	۶
ρr (کیلوگرم در مترمکعب)	۲۶۰۰
ρs (کیلوگرم در مترمکعب)	۱۳۰۰

فرض شد که چگالی سنگ و خاک و قابلیت انتشار (D) از دیدگاه زمان و فضا ثابت هستند. مقادیر این پارامترها بر پایه بررسی میدانی منطقه مورد مطالعه و نتایج تجربی یافته‌های آزمایشگاهی نمونه‌های جمع آوری شده می‌باشد. همچنین از مقالات دیگر در دسترس به دست آمده است و برای بدست آوردن مقادیر واقعی روی مدل آزمایش شده است. فرض شد که شبیه سازی یک سیستم بسته می‌باشد و مواد نمی‌توانند به خارج از سیستم منتقل شوند. این مسئله تعادل جرم را تضمین می‌کند. همچنین فرض شد که شبیه سازی در منطقه‌ای انجام شده است که مواد اولیه، اقلیم و تأثیر ارگانیسم‌های یکنواختی دارد. مهم‌ترین فاکتورهای متغیر، توپوگرافی و زمان بودند.

نتایج و بحث

به نظر می‌رسد که خاک در دره‌ها نسبت به امتداد دره‌ها ضخیم‌تر است که به دلیل فرض انتقال پخش یکنواخت در امتداد منطقه می‌باشد. ضخامت خاک قویاً با انحنا همبستگی دارد. تأثیر اقلیم نوع سنگ و مدیریت زمین از طریق ترکیبات متفاوت آهنگ هوازدگی و پخش فرسایشی تشریح شده است. این مدل همچنین مشخصه‌های یک سیستم دینامیکی غیر خطی را نشان می‌دهد (شکل ۲). این مدل با استفاده از معادله ۶ با p_0=۰/۲۵ mmy^{-1}، k_2=۶m و mmy^{-1} p_a =۰/۰۵ با ضخامت بحرانی h_c در ۲۰cm به دست آمده است.

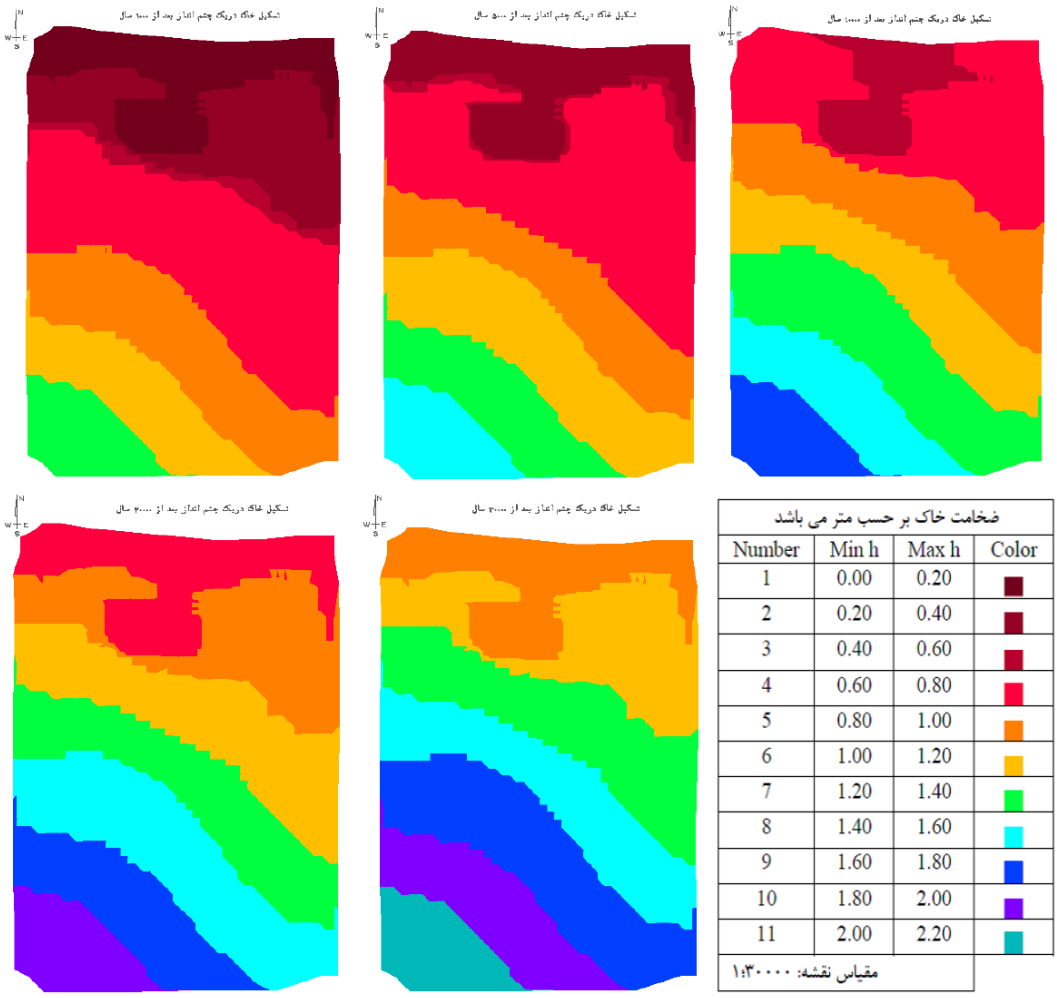


شکل ۲: مدل تابع هوازدگی خاک در چشم انداز قزوین

Fig 2: Model of weathering function in the Qazvin landscape

شکل ۳، تکامل تدریجی ضخامت خاک در منطقه بعد از ۱۰۰۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۲۰۰۰۰، ۳۰۰۰۰ سال شبیه سازی نشان می‌دهد. با شروع از ضخامت خاک یکنواخت اولیه، چشم انداز مورد نظر به مناطقی با تغییرات زیاد در ضخامت خاک تکامل یافته است. مدل همچنین برای شبیه سازی ۳۰۰۰۰ ساله، با استفاده از پارامترهای لیست شده در جدول ۱ مورد آزمون قرار گرفت. برای اطمینان از تعادل جرم، شبیه سازی با فرضِ سیستمِ بسته انجام شد.

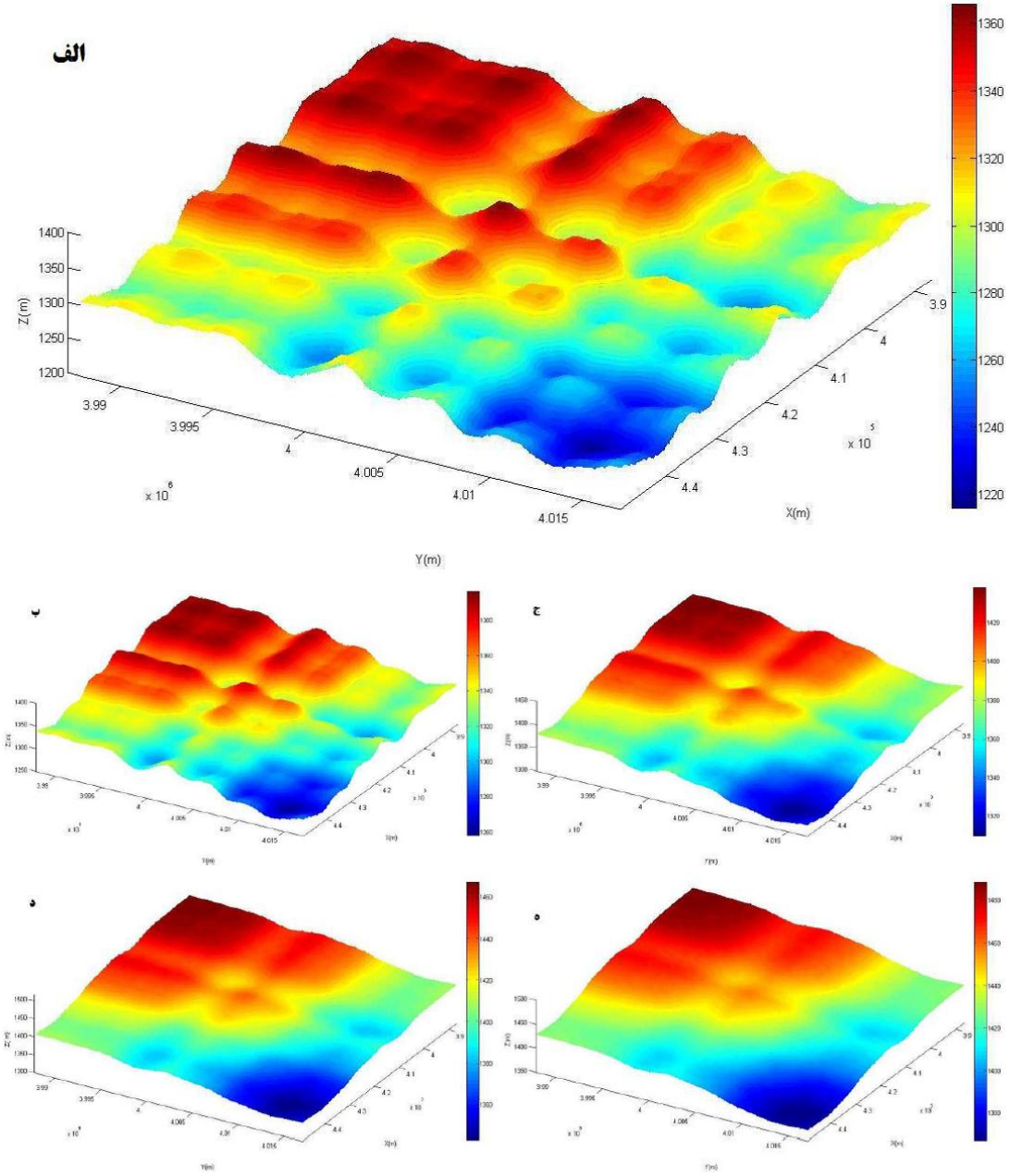
شکل ۳(قسمت بالا، سمت چپ) تشکیل خاک را بعد از شبیه سازی ۱۰۰۰ ساله نشان می‌دهد. این نقشه مقدار h را در نقاط مختلف چشم انداز نشان می‌دهد. هر رنگ نشان دهنده ضخامت مشخصی از خاک (h) می‌باشد. مقدار h از ۲۰ سانتی‌متر در کوه‌ها تا ۱۴۰ سانتی‌متر در دشت‌ها متغیر است. شکل ۳(قسمت بالا، وسط) تشکیل خاک را بعد از شبیه سازی ۵۰۰۰ ساله نشان می‌دهد. بتدریج و با گذشت زمان، مقدار ضخامت خاک (h) در نقاط مختلف چشم انداز افزایش می‌یابد. شکل ۳ (قسمت بالا، سمت راست) تشکیل خاک را بعد از شبیه سازی ۱۰۰۰۰ ساله نشان می‌دهد. در دشت‌ها تغییرات ضخامت خاک به دلیل تجمع بیشتر خاک در نقاط گود (دشت‌ها) بیشتر است، و تغییرات ضخامت خاک در مناطق مرتفع به دلیل فرسایش بیشتر، کم‌تر می‌باشد. شکل ۳(قسمت پایین، سمت چپ) تشکیل خاک را بعد از شبیه سازی ۲۰۰۰۰ ساله و شکل ۳(قسمت پایین، وسط) تشکیل خاک را بعد از شبیه سازی ۳۰۰۰۰ ساله نشان می‌دهد. در ارتفاعات تغییرات ضخامت خاک با شدت کم‌تری صورت می‌گیرد. تجمع خاک در دره‌ها و فرسایش خاک روی برآمدگی‌ها صورت می‌گیرد. بدین ترتیب پستی و بلندی سطح خاک با گذشت زمان میل به کاهش دارد. این مورد با تجمع بیشتر خاک در دره‌ها نسبت به کوه‌ها مشخص می‌شود.



شکل ۳: ضخامت خاک در یک چشم انداز بعد از شبیه سازی ۱۰۰۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۲۰۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ ساله

Fig 3: Thickness of soil in a perspective after 1000, 5000, 10000, 20000 and 30000 years simulation

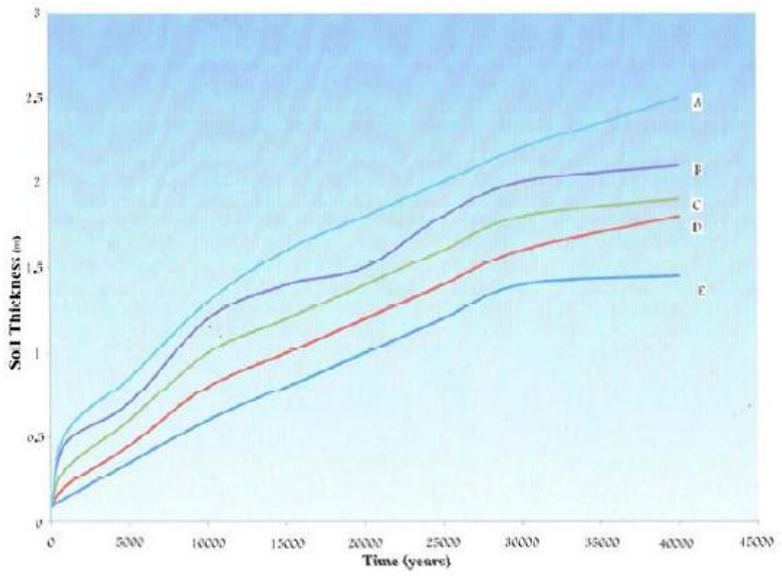
مقدار میانگین ضخامت خاک برای تمام منطقه، افزایش آرام در ضخامت خاک در مرحله ابتدایی را نشان می‌دهد به این دلیل که مدل هوازدگی نیاز به ضخامت بحرانی حدود ۲۰ سانتی متر دارد. بعد از ۲۰ هزار سال، آهنگ تشکیل خاک به طور نسبی شروع به کاهش می‌کند. شبیه سازی بر این فرض استوار است که در منطقه مواد اولیه، اقلیم و تأثیر ارگانیسم‌ها به طور یکنواخت وجود دارد. مهم‌ترین فاکتورهای بیان شده توپوگرافی و زمان هستند. توپوگرافی باعث توزیع مجدد خاک در این منطقه می‌شود. شکل ۴، نشان دهنده ارتفاع خاک بعد از شبیه سازی های ۱۰۰۰(الف)، ۵۰۰۰(ب)، ۱۰۰۰۰(ج)، ۲۰۰۰۰(د) و ۳۰۰۰۰ ساله (ه)، می‌باشد.



شکل ۴: ارتفاع خاک بعد از شبیه سازی ۱۰۰۰(الف)، ۵۰۰۰(ب)، ۱۰۰۰۰(ج)، ۲۰۰۰۰(د) و ۳۰۰۰۰ ساله (ه)

Fig 4: The soil after simulating 1000 (a), 5,000 (b), 10,000 (c), 20,000 (d) and 30,000 years old (e)

شکل ۵ ضخامت خاک نسبت به زمان را برای ۵ نقطه انتخاب شده در امتداد خطوط برش عرضی نشان می‌دهد. خاک در نقاط A و B با گذشت زمان نسبتاً ضخیم باقی می‌ماند، چرا که آن‌ها در نواحی نسبتاً مسطح مقعر قرار گرفته‌اند، در حالی که در نقاط D و E که دارای شیب‌های زیاد هستند، خاک نسبتاً نازک می‌باشد.



شکل ۵: ضخامت خاک با گذشت زمان در ۵ نقطه در نظر گرفته شده از چشم انداز قزوین

Fig 5: Thickness of soil at time of 5 points Considered from the perspective of Qazvin

عمده مطالعات انجام شده در زمینه مدل‌های جبری تشکیل خاک در چشم انداز توسط افرادی همچون Minasny و McBratney، صورت گرفته است (Minasny and McBratney, 1999; 2001; Salvador Blanes *et al*., 2007; Minasny *et al*., 2008; Minasny and McBratney, 2016).

با توجه به مدل تابع هوازدگی (شکل ۲)، مشخص می‌شود که هوازدگی سنگ بستر در ضخامت میانگین خاک سریع‌تر و تحت شرایط سنگ بستر در معرض هوازدگی یا خاک با پوشش ضخیم، کندتر است، که دلیل این امر آن است که هوازدگی نیاز به حضور آب دارد و زیر خاک کم ضخامت یا سنگ بستر در معرض هوازدگی، آب نمی‌تواند نفوذ کند و از این رو، باعث کاهش شانس هوازدگی شیمیایی سنگ‌های بستر می‌شود (Follain *et al*., 2006). نتایج به دست آمده از مطالعه حاضر نشان می‌دهد که فاکتورهای محیطی مانند اقلیم و ژئوگرافی تأثیر محسوسی بر تولید خاک در منطقه مورد مطالعه دارند (Minasny and McBratney, 2016; Malone *et al*., 2017). نتایج همچنین نشان می‌دهد که تجمع خاک در دره‌ها و فرسایش خاک روی پشته‌ها اتفاق می افتد. خاک‌ها از شیب بالایی به شیب پایین از طریق فرآیندهای فرسایشی جابه جا شده و دره‌ها را پر می‌کنند (Brevik *et al*., 2016). به دلیل تغییر شدت هوازدگی در ضخامت‌های متفاوت روند تغییر ضخامت خاک در سال‌های مختلف متغیر می‌باشد. با افزایش ضخامت خاک در ضخامت بحرانی (h_c)، شدت هوازدگی خاک حداکثر است و در $h>hc$ با افزایش ضخامت خاک شدت هوازدگی کاهش می‌یابد تا به حالت پایدار برسد (Minasny and McBratney, 2016). بدین ترتیب با گذشت زمان بعد از ۲۰۰۰۰ سال، شدت تغییرات ضخامت خاک کاهش می‌یابد (شکل ۳). در این مطالعه، مدل مکانیکی اولیه برای تشکیل خاک در منطقه قزوین ارائه و امکان پذیری سیستم مکانیکی غیرخطی مورد بررسی قرار گرفت، و کاربرد و نتایج مدل پیشنهاد شده تشریح شد. فرض شد که ضریب قابلیت انتشار ماده (D) از نقطه نظر زمان و مکان همواره ثابت و مستقل از شیب و انحنا است. با این حال، با توجه به نتایج به دست آمده، یک رابطه غیرخطی بین انحنا و عمق خاک مشاهده شد و وابستگی D به گرادیان به

طور آشکاری تحت تأثیر انحنا قرار داشت. انتشار غیرخطی به دست آمده و یک رابطه غیر خطی بین شار و گرادیان مشاهده شد. همچنان که خاک توسعه می‌یابد، گرادیان و انحنا نیز تغییر می‌کند و در نتیجه D(که فرض شده بود ثابت است) می‌تواند تغییر کند.

نتیجه‌گیری کلی

علی رغم فرضیات و محدودیت‌ها، نتایج در عبارات مدل سازی کمی تولید خاک امیدوار کننده است. کاربرد مدل می‌تواند شامل پیش بینی تأثیر مدیریت زمین بر توسعه خاک و پیشنهاداتی در مورد فعالیت‌های مدیریتی در منطقه باشد. با این حال، برای مقایسه و اعتبارسنجی مدل در منطقه، کارهای میدانی و آزمایشگاهی بیشتری برای جمع آوری داده‌ها برای تخمین پارامترهای دقیق مدل، مورد نیاز است. برای مطالعات بعدی، به منظور مد نظر قرار دادن فرآیندهای اصلی تولید خاک و در نظر گرفتن سیستم خاک و غیرخطی، مدل باید توسعه و بهبود پیدا کند.

منابع

Ahnert, F. 1977. Some comments on the quantitative formulation of geomorphological processes in a theoretical model. Earth surface processes, 2(23): 191-201.

Brevik, E.C., Calzolari, C., Miller, B.A., Pereira, P., Kabala, C., Baumgarten, A., Jordán, A. 2016. Soil mapping, classification, and pedologic modeling: History and future directions. Geoderma, 264, Part B: 256-274.

Follain, S., Minasny, B., McBratney, A.B., Walter, C. 2006. Simulation of soil thickness evolution in a complex agricultural landscape at fine spatial and temporal scales. Geoderma, 133(1-2): 71-86.

Heimsath, A.M., Chappell, J., Dietrich, W.E., Nishiizumi, K., Finkel, R.C. 2001. Late Quaternary erosion in southeastern Australia: a field example using cosmogenic nuclides. Quaternary International, 83: 169-185.

Malone, B.P., Styc, Q., Minasny, B., McBratney, A.B. 2017. Digital soil mapping of soil carbon at the farm scale: A spatial downscaling approach in consideration of measured and uncertain data. Geoderma, 290: 91–99.

McBratney, A., Mendonca Santos, M.L., Minasny, B. 2003. On digital soil mapping. Geoderma, 117(1-2): 3-52.

Mehraban Rad, N., Esfandiari, M., Pirestani, M.R., Yasori, E.M. 2012. Simulation of mechanistic model for soil development in Masuleh, west of Alborz, Iran. World Applied Sciences Journal, 18 (4): 479-485.

Minasny, B., McBratney, A.B. 1999. A rudimentary mechanistic model for soil production and landscape development. Geoderma, 90(1): 3-21.

Minasny, B., McBratney, A.B. 2001. A rudimentary mechanistic model for soil formation and landscape development: II. A two-dimensional model incorporating chemical weathering. Geoderma, 103(1): 161-179.

Minasny, B., McBratney, A.B. 2006. Mechanistic soil-landscape modelling as an approach to developing pedogenetic classifications. Geoderma, 133(1-2): 138-149.

Minasny, B., McBratney, A.B. 2016. Digital soil mapping: A brief history and some lessons. Geoderma, 264, Part B: 301-311.

Minasny, B., McBratney, A.B. Salvador Blanes, S. 2008. Quantitative models for pedogenesis. A review. Geoderma, 144(1): 140-157.

Salvador Blanes, S., Minasny, B., McBratney, A. 2007. Modelling longâ term in situ soil profile evolution: application to the genesis of soil profiles containing stone layers. European Journal of Soil Sci., 58(6): 1535-1548.