

## بررسی تغییرپذیری مکانی پایداری خاکدانه‌ها و عوامل مؤثر در خاکدانه‌ای شدن خاک با استفاده از روش زمین آماری کریجینگ (مطالعه موردی: بخشی از حوزه آبخیز طالقان)

• محسن آرمین

استادیار گروه آبخیزداری دانشگاه یاسوج (نویسنده مسئول)

• محمدحسین مهدیان

استاد سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

• حسن احمدی

استاد دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

• حسن روحی پور

دانشیار مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور

• علی سلاجقه

دانشیار دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران

• وجیهه قربان نیا خیبری

دانشجوی دوره دکتری محیط زیست دانشگاه ملایر

تاریخ دریافت: بهمن ماه ۱۳۹۱ تاریخ پذیرش: فروردین ماه ۱۳۹۳

تلفن تماس نویسنده مسئول: ۰۹۱۷۷۴۲۴۱۴۴

Email: mohsenarmin@ut.ac.ir

### چکیده

الگوی مکانی خصوصیات خاک می‌تواند یک عنصر کلیدی در شکل‌دهی جریان مواد غذایی و آب در اکوسیستم‌ها باشد و شناسایی این الگوها برای تشخیص فرایندهای خاک و سپس انجام عملیات مدیریتی کافی در این مناطق مهم است. یکی از عوامل مؤثر در فرسایش خاک، پایداری خاکدانه‌ها و عوامل مؤثر در تغییر آن است. در صورت تعیین عوامل مؤثر در پایداری خاکدانه‌ها و خاکدانه‌ای شدن خاک و مشخص کردن روش مناسب و نوع شاخصی که بتواند در برگزیده تغییرات مکانی آنها نیز باشد، می‌توان نسبت به رفع محدودیت‌های موجود در این زمینه اقدام کرد. به همین منظور تحقیقی در بخشی از حوزه آبخیز طالقان به وسعت تقریبی ۳۲۰۰ هکتار و عمدتاً دارای سنگ بستر مارتنی مربوط به دوران سوم زمین شامل واحدهای سنگی gy (گلسنگ قرمز و سیلت ژیبسی) و Ngm (گلسنگ قرمز و سیلت) انجام گرفته است. پایداری خاکدانه‌ها و عوامل مؤثر در خاکدانه‌ای شدن خاک به ترتیب با استفاده از روش Le Bissonnais و آزمون همبستگی پیرسون اندازه‌گیری شده است. تغییرات مکانی پایداری خاکدانه‌ها و عوامل مؤثر در آن نیز با استفاده از روش کریجینگ بررسی شده است. در بخش آمار کلاسیک نتایج حاکی از مؤثر بودن خصوصیات فیزیکی-شیمیایی مقدار رس، شن ریز، شن خیلی ریز، درصد رطوبت اشباع، آهک و ماده آلی بر پایداری خاکدانه‌ها در منطقه مورد مطالعه هستند. نتایج زمین آماری نیز دلالت بر ساختار مکانی ضعیف تا متوسط اکثر عوامل مؤثر در خاکدانه‌ای شدن خاک دارد به طوری که تنها خطای اندازه‌گیری ماده آلی بسیار کم است که حاکی از پیوستگی بالای توزیع این متغیر و واریانس تصادفی پایین آن در خاک‌های مورد بررسی است. به این معنی که مقدار ماده آلی در نمونه‌های نزدیک به هم بسیار مشابه و در نمونه‌های دور از هم مقادیر دورتری از هم داشته‌اند. شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها از نوع ناهمسانگرد و شعاع تأثیر کوچک و بزرگ آنها به ترتیب از ۷۴۰ تا ۲۵۰۰ و ۳۲۵۰ تا ۵۹۴۰ متر است.

کلمات کلیدی: پایداری خاکدانه‌ها، تغییرپذیری مکانی، زمین آمار، حوزه آبخیز طالقان.

Watershed Management Research (Pajouhesh & Sazandegi) No 104 pp: 107-122

### Investigation on spatial variability of aggregate stability and the factors affecting soil aggregation using kriging geostatistics method (Case study: A part of Taleghan watershed)

By: *M. Armin*: Assistant Professor of Watershed Management Department, University of Yasuj (*Corresponding Author*; Tel: +989177424144). *M.H. Mahdian*: Professor, Agricultural Research, Education and Extension Organization. *H. Ahmadi*: Professor of Islamic Azad University. Science and Research Branch, *H. Rohipour*: Associate professor of research institute of forests and rangelands. *A. Salajegheh*: Associate professor, University of Tehran. *V. Ghorban nia kheybari*: Ph.D. Student of Environmental Science of Malayer University.

The spatial pattern of soil properties can be a key element in shaping water and nutrient flows in ecosystems and its identification is relevant for understanding soil processes in these areas, and then establishing adequate management practices. One of the factors affecting soil erosion is aggregate stability and its change. If factors affecting aggregate stability and soil aggregation are determined and also appropriate method and spatial variability index is characterized, it can overcome the limitation in this context. To this end, an investigation on the part of Taleghan watershed with area of approximately 3200 hectare and mainly bedrock marl of tertiary including rock units of gy (red mudstone and gypsum silt) and Ngm (red mudstone and silt) was conducted. Aggregate stability and factors affecting soil aggregation was measured using Le Bissonnais method and Pearson correlation test respectively. Spatial variability of aggregate stability and the factors affecting it was studied using kriging method. In classical statistic part, results showed that soil physico-chemical properties including clay, fine sand, very fine sand contents, moisture saturation, Caco<sub>3</sub> and organic matter percentages are effective on aggregate stability in studied area. Geostatistical results also showed that spatial dependence of most of the factors affecting soil aggregation are weak to moderate, so that only measurement error of organic matter is low, which implies high dependency and low random variance of variable distribution in studied soils. This means that organic matter content in samples close together is very similar and is very different from the ones farther. Aggregate stability indices are anisotropic and influence range min and max are from 740 to 2500 and 3250 to 5940 meters respectively.

Keywords: Aggregate stability, Spatial variability, Geostatistics, Taleghanwatershe.

#### مقدمه

ارزیابی مناسب عوامل فرسایش اولین مرحله در انتخاب راهکارهای کاهش و کنترل این پدیده مخرب است (Rejman et al., 1998). یکی از عوامل مؤثر در فرسایش خاک، پایداری خاکدانه‌ها و عوامل مؤثر در تغییر آن است که در صورت تعیین عوامل مؤثر در پایداری خاکدانه‌ها می‌توان نسبت به رفع محدودیت‌های موجود در این زمینه اقدام کرد. پایداری خاکدانه‌ها توانایی اتصالات آن‌ها در مقابل تنش‌های ناشی از فرایندهای پخشیدگی مثل شخم، فرایندهای انقباض و انبساط ذرات خاک و انرژی جنبشی قطرات باران است که تابعی از نیروهای جاذبه و دافعه ناشی از فعل و انفعالات بین مولکولی و الکترواستاتیک بین محلول خاک و ذرات خاک می‌باشد (Rengasamy and Olsson, 1991). الگوی مکانی خصوصیات خاک می‌تواند یک عنصر کلیدی در شکل‌دهی جریان مواد غذایی و آب در اکوسیستم‌ها باشد و شناسایی این الگوها برای تشخیص فرایندهای خاک و سپس انجام عملیات مدیریتی کافی در این مناطق مهم است (Zuo et al., 2008). تغییر پذیری خاک معمولاً مرتبط با فاکتورهای مکانی و زمانی و فاکتورهای سیمای

منظر و مدیریتی است و هر یک از این منابع تغییرات می‌تواند تا اندازه‌ای یاب به طور کامل عامل تغییر پذیری خصوصیات خاک تحت بررسی باشد (Van Es et al., 1999). خصوصیات خاک و توزیع مکانی آنها در مقیاس بزرگ در اغلب گزارش‌های مطالعه خاک موجود است، اما استراتژی‌های مدیریتی طراحی شده برای محل‌های خاص برای انجام کشاورزی دقیق یا اجرای مدل‌های شبیه‌سازی نیازمند اطلاعات خاک در یک مقیاس خیلی کوچک‌تر است که اغلب با نمونه‌برداری دقیق در سرتاسر واحدهای نقشه‌بندی و کاربری اراضی یا عملیات مدیریتی حاصل می‌شود (Gaston et al., 2001). بنابراین تعیین خصوصیات خاک و توزیع مکانی آنها در مقیاس‌های مختلف یا به عبارت دیگر مقیاس‌های بزرگ و کوچک برای اهداف مختلفی نیاز است (Shukla et al., 2007). اما به طور خاص ارزیابی دقیق عوامل اصلی فرسایش و تعیین تغییر پذیری مکانی آنها در یک منطقه باید در انتخاب استراتژی‌های کنترل فرسایش در مناطق بحرانی در نظر گرفته شود (Rejman et al., 1998) که این موضوع با تکنیک‌های زمین آماری امکان‌پذیر است. زمین آمار یک ابزار مفید برای تجزیه و تحلیل ساختار تغییر پذیری مکانی،

استفاده از تکنیک زمین آمار و در قالب یک شبکه  $100 \times 100$  متری مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که پایداری خاکدانه‌ها در خاک‌های ERL به دلیل دارا بودن مقدار ماده آلی و رس بیشتر نسبت به خاک‌های DRL بیشتر است. اما در خاک‌های ERL نسبت به خاک‌های DRL دامنه همه خصوصیات مورد مطالعه وسیع‌تر و تغییرپذیری و ضریب تغییرات کمتر است.

تلاش‌های زیادی برای تشریح وابستگی مکانی خصوصیات خاک انجام گرفته است و نقشه‌های کریجینگ خصوصیات مختلف خاک برای مقیاس‌های از چندین متر تا چندین کیلومتر ارائه شده است (Lin et al., 2005; Sun et al., 2003).

با توجه به محدودیت‌های موجود در تعیین میزان حساسیت خاک به فرسایش آبی یا فرسایش‌پذیری خاک از طریق انجام آزمون‌های میدانی، استفاده از روش‌های آزمایشگاهی آن‌هم روی نمونه‌های کوچک خاک (کمتر از ۱۰۰ گرم) افزون بر ساده‌تر بودن نیازمند هزینه و زمان کمتری است. نتایج بدست آمده از انجام پژوهش‌های مختلف در این زمینه نشانگر این است که از بین روش‌های مختلف آزمایشگاهی مبنی بر استفاده از خصوصیات خاک، انجام آزمون‌های مربوط به ساختمان خاک و پایداری خاکدانه‌ها مؤثرتر بوده و بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین به نظر می‌رسد استفاده از شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها همراه با مشخص کردن روش مناسب و نوع شاخصی که بتواند در برگیرنده تغییرات مکانی آن نیز باشد، می‌تواند راهگشای معضل مورد بحث در کشور باشد.

### مواد و روش‌ها

**منطقه مورد مطالعه:** نتایج حاصل از مطالعات انجام شده در حوزه آبخیز طالقان حاکی از فرسایش پذیری قابل ملاحظه اراضی با سنگ بستر انواع مارن است، از این رو، گستره این تحقیق محدود به بخشی از حوزه آبخیز طالقان به وسعت 3260 هکتار است. این محدوده عمدتاً دارای سنگ بستر مارنی مربوط به دوران سوم زمین شامل زیر واحدهای سنگی gy (گل‌سنگ قرمز و سیلت ژیبسی) و Ngm (گل‌سنگ قرمز و سیلت) و رسوبات آبرفتی شامل Q1 (نهشته پلئستوسن قدیمی) و Q2 (رسوبات آبرفتی و سیلابی عهد حاضر) است. این منطقه در محدوده ۳۶ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۱۳ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۵۱ دقیقه طول شرقی قرار دارد. منطقه فوق از غرب به روستای کولج، از شرق به روستای کرکبود، از جنوب به رودخانه طالقان و از شمال به مرز واحدهای سنگی مارن و گدازه بازی (Ekv) محدود می‌شود.

**تهیه نقشه واحدهای همگن کاری:** به منظور تعیین نقاط نمونه‌برداری خاک ابتدا نقشه واحدهای همگن کاری از تلفیق سه نقشه کلاس‌های شیب زمین، کلاس‌های جهت جغرافیایی و سنگ‌شناسی حاصل شده است. نقشه شیب و جهت جغرافیایی با استفاده از نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ تهیه شدند. در نقشه شیب، کلاسه‌بندی بر اساس فراوانی شیب‌های موجود در منطقه (۰-۱۲، ۱۲-۲۵، ۲۵-۴۰ و  $40 <$ ) صورت گرفته است. بیشترین کلاس شیب مربوط به شیب

میان‌یابی بین مشاهدات نقطه‌ای و تولید نقشه مقادیر میان‌یابی با یک خطای مشخص با استفاده از حداقل تعداد مشاهدات است. استفاده از زمین آمار در علوم خاک از حدود ۳۰ سال پیش شروع شده است به طوری که محققان زیادی زمین آمار را در تعیین تغییرات مکانی خصوصیات فیزیکی- شیمیایی خاک (Greminger et al., 1985; Lin et al., 2005)، خصوصیات هیدرولیکی خاک (Vieria, 1981; Polhmann, 1993)، محلول‌های خاک (Kelleners, 1999), گازهای خاک (Oliver and Khayarat, 2001)، کربن آلی خاک (Zhang et al., 2004)، فرسایش و رسوب خاک (Wang et al., 2002; Irvem et al., 2007) و فرسایش‌پذیری خاک (Rejman et al., 1998; Parysow et al., 2003; Sokouti Oskouie, 2005; Rodriguez et al., 2007) به کار برده‌اند. در زمینه موضوع مورد مطالعه در این تحقیق یعنی تغییرپذیری مکانی پایداری خاکدانه‌ها و عوامل خاکدانه‌ای شدن خاک نیز مطالعاتی در داخل و خارج از ایران انجام گرفته است اما وسعت و دامنه تغییرات خصوصیات مناطق مورد مطالعه و پارامترهای مورد بررسی در تحقیقات انجام گرفته بویژه در ایران به گونه‌ای است که می‌توان ادعا کرد این موضوع هنوز هم تحقیقات زیادی را می‌طلبد. تعدادی از تحقیقات انجام گرفته در این زمینه به قرار زیر است:

Motaghian و Mohammadi (2001) پیش‌بینی مکانی پایداری خاکدانه‌ها و رابطه بین پایداری خاکدانه‌ها و مقدار کربن آلی را با استفاده از تکنیک‌های زمین آمار در مقیاس حوزه آبخیز توسط مورد بررسی قرار دادند. تجزیه و تحلیل زمین آماری نشان داد که الگوی مکانی پارامترهای خاک اندازه‌گیری شده در هر بخش اندازه خاکدانه‌ها هم از نظر مقدار و هم از نظر مکان اختلافاتی با هم دارند. واریانس نسبی اثر قطعه‌ای برای اغلب خصوصیات خاک مرتبط با پایداری خاکدانه کمتر از ۴۵ درصد بود. مقدار شعاع تأثیر تغییرنمای پایداری مرطوب خاکدانه‌ها تقریباً ۳ کیلومتر بود.

تغییرپذیری مکانی پایداری خاکدانه‌ها در ارتباط با مقادیر کربن و نیتروژن در خاک‌های احیاء شده معادن شرق اوهایو توسط Shukla و همکاران (2006) به انجام رسیده است. میان‌یابی با استفاده از کریجینگ، ناهمگنی شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها (پایداری مرطوب خاکدانه‌ها، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها) را در منطقه مورد مطالعه نشان داد.

تغییرپذیری پایداری خاکدانه‌های خاک در مقیاس‌های مختلف در مراتع علف گندمی (گراسلندها) مناطق نیمه خشک ایالت نیومکزیکو آمریکا توسط Bird و همکاران (2007) به انجام رسید. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که پایداری خاکدانه‌های خاک در فضای زیر تاج پوشش گیاهان به طور معنی‌داری بیشتر از فضای بین گیاهان است، به طوری که علت آن اثر قابل ملاحظه مواد آلی بر پایداری خاکدانه‌های خاک بخصوص در لایه یک سانتی‌متر بالای خاک است. در شمال شرق ایالت سائوپائولوی برزیل، De Souza و همکاران (2009) تغییرپذیری مکانی پایداری خاکدانه‌ها و رابطه آن با خصوصیات فیزیکی- شیمیایی را در دو تیپ خاک ERL و DRL با

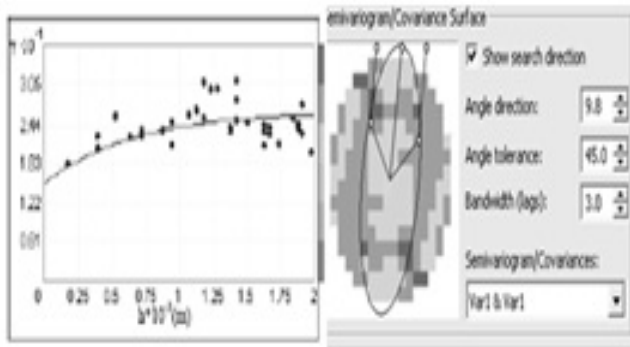
ها می‌توان از لایه یک تا سه سانتی‌متری خاک سطحی نمونه برداشت کرد زیرا این لایه تحت تأثیر باران طبیعی است و نقش تعیین کننده‌ای در فرایندهای فرسایش دارد. به این ترتیب، از ۵۳۱ نقطه مشخص شده، در ۴۳۸ نقطه نمونه‌برداری انجام شد و ۹۳ نقطه به دلیل قرار گرفتن در بستر رودخانه و حریم روستا قابل برداشت نبودند. در مرحله اول، برای کسب اطلاع از طبیعت تغییرپذیرها، از بین ۴۳۸ نمونه برداشت شده، اقدام به انتخاب ۲۳۸ نمونه از آن‌ها به عنوان نمونه‌های مرحله اول بر اساس توزیع و فراوانی مناسب آن‌ها در واحدهای کاری شد (شکل ۱) تا با استفاده از داده‌های حاصل از آن‌ها و تخمین تغییرپذیری و شناخت توزیع مکانی متغیر، به طراحی مرحله بعد اندیشیده شود. این توالی باید تا آن جا ادامه یابد که داده‌های حاصل از یک مرحله معینی از نمونه‌برداری مؤید صحت و یا دقت آن در محدوده از پیش تعیین شده باشد. در شکل (۲) نقشه سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه ارائه شده است.

تهران و رودخانه سیاهرود واقع گردیده است که از شمال به طرح جنگلداری سری ۱ کچا از جنوب به طرح جنگلداری سری ۲ دیزکوه از غرب به طرح جنگلداری سری ۱ و سری ۲ کچا از شرق به روستای سراوان محدود می‌گردد. میانگین بارندگی در این منطقه ۱۳۷۴/۴ میلی‌متر بوده و متوسط دما ۱۵/۹ درجه سانتیگراد است که حداقل مطلق آن در بهمن و حداکثر مطلق آن در تیر ماه است. این منطقه در ارتفاع ۵۰ تا ۲۵۰ متری از سطح دریای آزاد قرار دارد.

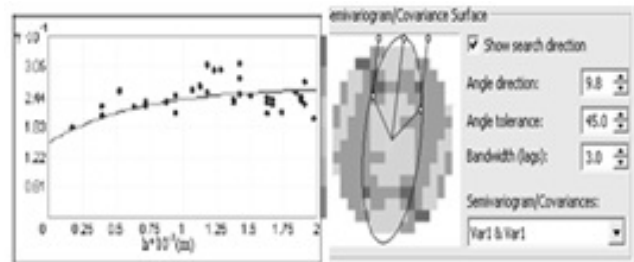
اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی - شیمیایی نمونه‌های خاک: پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه خاکشناسی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، آنها را هوا خشک کرده، کلوخه‌های بزرگ را به آرامی با دست خرد کرده و از الک دو، سه و پنج میلی‌متر عبور داده شدند. خاکدانه‌های بزرگ‌تر از سه میلی‌متر برای آزمایش‌های پایداری خاکدانه‌ها و ذرات کوچک‌تر از دو میلی‌متر برای بررسی خصوصیات فیزیکی - شیمیایی مورد استفاده قرار گرفتند. خصوصیات فیزیکی - شیمیایی نمونه‌های خاک با استفاده از روش‌های معمول اندازه‌گیری شده‌اند. هدایت الکتریکی (EC25) و اسیدیته (pH) خاک در عصاره ۱:۱ خاک اندازه‌گیری شده‌اند.

بیشتر از ۴۰ درصد و کمترین آن مربوط به شیب ۱۲-۲۵ درصد است که به ترتیب ۴۳/۰۹ و ۱۴/۷۲ درصد از کل منطقه را به خود اختصاص داده‌اند. کلاسه‌بندی نقشه جهت جغرافیایی نیز بر اساس جهت‌های جغرافیایی موجود در منطقه مورد مطالعه صورت گرفت. در واقع جهت‌های جغرافیایی فرعی به دلیل مساحت کم لحاظ نشده‌اند. بیشترین کلاس جهت جغرافیایی مربوط به جهت جنوبی و کمترین آن مربوط به جهت شمالی است که به ترتیب ۳۶/۰۲ و ۰/۸۷ درصد از کل منطقه را به خود اختصاص داده‌اند. نقشه سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور استخراج شده است. در این نقشه واحد سنگی Ngm با ۴۰/۴۷ درصد بیشترین مساحت منطقه را اشغال کرده است. بدین ترتیب نقشه‌های سنگ‌شناسی، شیب و جهت جغرافیایی با هم تلفیق شدند که حاصل این تلفیق پس از پالایش و ادغام واحدهای کوچک در واحدهای بزرگ، نقشه‌ای با ۵۰ نوع واحد کاری همگن با مساحت ۹/۸ تا ۳۰۷/۸ هکتار شد. البته قبل از ادغام نقشه‌های پایه به منظور تهیه نقشه واحدهای همگن کاری نهایی، ابتدا از طریق پیمایش‌های صحرایی یک هفته‌ای و نظارت دقیق اقدام به نهایی کردن این لایه‌های اطلاعاتی شد.

طراحی شبکه نمونه برداری: در این تحقیق، با تکیه بر مشاهدات و تغییرات ماکروسکوپی در مقیاس واحدهای همگن کاری، به طراحی شبکه نمونه‌برداری اولیه پرداخته شد. به این صورت که بعد از تهیه نقشه نهایی واحدهای همگن کاری، اقدام به طراحی شبکه نمونه-برداری سیستماتیک در ابعاد ۵۰۰×۵۰۰، ۲۵۰×۲۵۰ و ۱۰۰×۱۰۰ متر شد. در مرحله بعد با در نظر گرفتن ابعاد واحدهای همگن کاری و مقایسه آن‌ها با شبکه‌های نمونه‌برداری مختلف از نظر توزیع و فراوانی مناسب نقاط نمونه برداری در هر واحد همگن کاری، شبکه نمونه‌برداری ۲۵۰×۲۵۰ متر به عنوان شبکه نهایی نمونه‌برداری انتخاب شد. با استفاده از نرم افزار DNR Garmin نقاط نمونه برداری به دستگاه موقعیت‌یاب جهانی منتقل و اقدام به برداشت نمونه‌های خاک از عمق سطحی پنج سانتی‌متر اول خاک در اردیبهشت ماه گردید. بنا بر اظهار (1998, Cerda) برای بررسی پایداری خاکدانه



شکل ۲- نقشه سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری مرحله اول آنالیز



نیم‌تغییرنمای تعدادی از خصوصیات فیزیکی- شیمیایی خاک مؤثر بر پایداری خاکدانه‌ها (اجزاء بافت خاک و عوامل مؤثر در خاکدانه‌سازی نظیر ماده آلی و آهک) شد. لازم به ذکر است که انتخاب خصوصیات فیزیکی- شیمیایی خاک در این مرحله صرفاً بر اساس نتایج تحقیقات گذشته بوده است. سپس با استفاده از جفت‌سازی مدل‌های مختلف و بر اساس مجذور میانگین خطای تخمین بهترین مدل انتخاب شد و در نهایت پارامترهای مربوط به آن شامل اثر قطعه‌ای، سقف (آستانه) و شعاع تأثیر استخراج شد. به منظور تعیین اندازه نمونه مناسب برای اندازه‌گیری شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها، اقدام به طراحی شبکه نمونه‌برداری بر اساس حداقل شعاع تأثیر خصوصیات فیزیکی- شیمیایی مهم و مؤثر در پایداری خاکدانه‌ها شد. بر این اساس از ۲۳۸ نمونه مرحله اول، جمعاً ۸۴ نمونه برای اندازه‌گیری شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها انتخاب شد.

**اندازه‌گیری پایداری خاکدانه‌ها:** از دهه آخر سال ۱۹۳۰ تاکنون چندین روش برای اندازه‌گیری پایداری خاکدانه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. این موضوع از یک طرف نشان‌دهنده گرایش محققان در بررسی این ویژگی خاک و از طرف دیگر نبود یک روش استاندارد رضایت بخش است.

**اندازه‌گیری میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها با استفاده از روش (Le Bissonais, 1996):** دستورالعمل این روش از چندین روش موجود (Yoder, Quoted from Le Bissonais 1936, Henin et al., 1958, Grieve, 1980, Kemper and Rosenau, 1986) اقتباس شده است و اکثر جنبه‌های قابل توجه در روش‌های رایج را در بر می‌گیرد. همچنین این روش در دامنه وسیعی از خاک‌ها و شرایط مختلف محیطی قابل اجرا است. نمونه‌های خاک از الک پنج میلی‌متر رد شده و خاکدانه‌های سه تا پنج میلی‌متر برای آزمایش انتخاب شده است. کمی قبل از اجرای تیمارها، خاکدانه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در حرارت ۴۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شده تا این که مقدار رطوبت و در نتیجه وزن آن‌ها ثابت شود. نمونه‌های آماده شده برای اجرای سه تیمار زیر مورد بررسی قرار گرفتند: (۱) خیس شدن سریع (FW)، (۲) خیس شدن آهسته (SW) و (۳) شکستگی مکانیکی ناشی از تکان دادن خاک بعد از خیس کردن اولیه (WS). برای تیمار خیس شدن سریع، پنج گرم خاکدانه به مدت ۱۰ دقیقه در آب مقطر غوطه‌ور می‌شود. بعد از خارج کردن آب مقطر با پیپت، خاکدانه‌های مقاوم در برابر واریختگی به یک الک ۰/۰۵ میلی‌متری غوطه‌ور شده در اتانول منتقل می‌شوند و برای تفکیک ذرات کوچک‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر از خاکدانه‌های بزرگ‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر، ۲۰ بار الک به آرامی و با دست در داخل اتانول بالا و پایین می‌شود. خاکدانه‌های بزرگ‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر در آن با حرارت ۴۰ درجه سانتی‌گراد خشک می‌شوند سپس توزیع اندازه آنها با الک‌های ۱، ۰/۵، ۰/۲۵، ۰/۱۲۵ و ۰/۰۵ میلی‌متر به صورت خشک اندازه‌گیری می‌شود. در تیمار خیس شدن آهسته، خاکدانه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه روی یک کاغذ صافی در معرض مکش ۰/۳- کیلوپاسکال قرار می‌گیرند. سپس دستورالعمل توزیع اندازه ذرات تشریح شده در بالا برای تیمار خیس شدن سریع اجرا می‌شود.

بافت خاک به روش هیدرومتری و با متلاشی کردن نمونه خاک در ۱۰۰ میلی لیتر هگزامتافسفات سدیم ۴۰ درصد تعیین شد (Gee and Bauder, 1986). برای بررسی توزیع اندازه ذرات شن، سوسپانسیون آب و خاک تهیه شده به منظور اندازه‌گیری بافت خاک از الک‌های ۰/۰۵۳، ۰/۱۲۵ و ۰/۲ میلی‌متر عبور داده شد و سپس محتویات باقی مانده روی هر الک را کاملاً شستشو داده تا تمامی ذرات از هم جدا شدند. بعد از شستشوی کامل، محتویات باقی مانده روی هر الک جمع آوری، خشک و وزن شد. ذرات باقیمانده روی الک ۰/۰۵۳ میلی‌متر (۰/۰۵۳ - ۰/۱۲۵ میلی‌متر) معادل شن خیلی ریز، ذرات روی الک ۰/۱۲۵ (۰/۱۲۵ - ۰/۲ میلی‌متر) معادل شن ریز و ذرات روی الک ۰/۲ میلی‌متر (۰/۲ تا دو میلی‌متر) معادل شن درشت است. مقدار ماده آلی به روش والکی- بلاک تعیین شد (Nelson and Sommers, 1982). آهک به روش کلسیمتری اندازه‌گیری شد. درصد رطوبت اشباع خاک با استفاده از اختلاف بین وزن خشک خاک و وزن مرطوب خاک هنگامی که دارای رطوبت ۱۰۰ درصد (اشباع) است، تعیین شد. اکسید آهن با روش سیترات- بیکرنات- دی تیونیت (Mehra and Jackson, 1960) اندازه‌گیری شد. کاتیون‌های تبدالی با روش استخراج کاتیون‌ها با استفاده از استات آمونیم و در ادامه روش تیتراسیون برای کلسیم و منیزیم و روش شعله‌سنجی برای سدیم و پتاسیم اندازه‌گیری شده است. مقدار آنیون کلر در عصاره محلول خاک اندازه‌گیری شد. بعد از اندازه‌گیری کاتیون‌ها، درصد سدیم قابل تبادل (ESP) و نسبت جذب سدیم (SAR) از طریق فرمول‌های زیر محاسبه شده است.

$$ESP = \frac{Na^+}{Na^+ + K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+}} \times 100 \quad (1)$$

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad (2)$$

که در آن‌ها: غلظت کاتیون‌های Ca، K، Na و Mg به میلی‌اکی والان بر ۱۰۰ گرم خاک است. بر این اساس، در این تحقیق ۱۸ خصوصیت فیزیکی- شیمیایی خاک شامل ماده آلی، هدایت الکتریکی، اسدیته، رس، سیلت، شن کل، شن درشت، شن ریز، شن خیلی ریز، آهک، درصد رطوبت اشباع، سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم، کلر، اکسید آهن، نسبت جذب سدیم و درصد سدیم قابل تبادل اندازه‌گیری شده است.

**تجزیه و تحلیل ساختار مکانی خصوصیات فیزیکی- شیمیایی خاک:** بعد از اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی- شیمیایی ۲۳۸ نمونه خاک و استخراج آماره‌ها، برای دستیابی به نحوه توزیع ساختار مکانی منطقه مورد مطالعه از نظر خصوصیات فیزیکی- شیمیایی مورد بررسی، با استفاده از برنامه الحاقی Geostatistical Analyst نسخه ۹/۳ نرم‌افزار ARC GIS اقدام به بررسی واریوگرافی و ترسیم

جهت‌های مختلف جغرافیایی انجام گرفته است. تابع نیم تغییرنمای تجربی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (4)$$

که در آن:  $(\gamma h)$  نیم‌تغییرنمای در فاصله گام، تعداد جفت‌های جدا شده در فاصله گام و معمولاً هر چه افزایش یابد، تعداد جفت‌ها کم می‌شود، مقدار متغیر اندازه‌گیری شده در نقطه و مقدار متغیر اندازه‌گیری شده در موقعیت مکانی است. مدل‌های تئوری کروی، نمایی و گوسی با تغییرنماهای تجربی جفت می‌شوند. تغییرنماهای تجربی هر خصوصیت خاک با حداقل کردن مجذور میانگین خطای تخمین بین نیم تغییرنمای‌های تجربی و تئوری بدست می‌آید. در واقع برای مدلی که تخمین‌های دقیقی فراهم می‌کند، مجذور میانگین خطای تخمین باید تا حد امکان کم باشند. علاوه بر این در انتخاب مدل تئوری مناسب از این تفسیر کیفی نیز استفاده می‌شود که کدام مدل بهتر بیانگر رفتار کلی تغییرنمای تجربی است. برای محاسبه مجذور میانگین خطای تخمین از فرمول (5) استفاده می‌شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z^*(x_i) - Z(x_i)]^2} \quad (5)$$

برای کنترل اعتبار نیم‌تغییرنمای از آماره‌های میانگین مطلق اشتباهات و میانگین اریبی اشتباهات نیز استفاده شده است (Wakernagel, 2002).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z^*(x_i) - z(x_i)| \quad (6)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [z^*(x_i) - z(x_i)] \quad (7)$$

که در این معادلات مقدار برآورد شده در نقطه، مقدار مشاهده شده در نقطه و تعداد نقاط می‌باشد. پس از انتخاب بهترین مدل، پارامترهای آن شامل اثر قطعه‌ای، شعاع تأثیر و سقف استخراج شد. درجه وابستگی مکانی (ساختار مکانی) خصوصیات فیزیکی - شیمیایی خاک و پایداری خاکدانه‌ها از تقسیم واریانس اثر قطعه‌ای به واریانس کل (حد آستانه) ضربدر ۱۰۰ به دست می‌آید (Cambardella et al., 1994).

$$Dependence\_Ratio = \frac{C_0}{C_0 + C_1} \times 100 \quad (8)$$

اگر این نسبت کمتر از ۲۵ درصد باشد، متغیر دارای ساختار مکانی قوی است، اگر نسبت بین ۲۵ تا ۷۵ درصد باشد، متغیر ساختار مکانی متوسط دارد و اگر این نسبت بیش از ۷۵ درصد باشد، متغیر ساختار مکانی ضعیفی دارد. در معادلات بالا، و به ترتیب بیانگر اثر قطعه‌ای، واریانس ساختاری و شعاع تأثیر وابستگی مکانی است.

در تیمار شکستگی مکانیکی ناشی از تکان دادن خاک بعد از خیس کردن اولیه، به منظور حفظ ساختمان خاک ابتدا خاکدانه‌ها به مدت ۱۰ دقیقه در اتانول غوطه‌ور می‌شوند، سپس به یک ارلن که با ۲۰۰ سانتی‌متر مکعب آب مقطر پر شده انتقال داده می‌شوند. متعاقباً درب ارلن با چوب پنبه بسته شده و در مدت یک دقیقه ۲۰ بار به حالت سر و ته شدن تکان داده می‌شود. سپس دستورالعمل خشک کردن و الک کردن تشریح شده در بالا انجام می‌شود. برای هر نمونه خاک، پایداری خاکدانه‌ها بر حسب میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در هفت طبقه قطری بیان می‌شود.

$$MWD = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{r_{i-1} + r_i}{2} \times m_i \quad (3)$$

$$r_n = r_{n+1} \text{ و } r_0 = r_1$$

که در آن  $r_i$  قطر  $i$  امین الک به میلی‌متر، وزن خاکدانه‌های باقیمانده روی  $i$  امین الک (گرم) تقسیم بر وزن کل نمونه خاک و تعداد الک‌ها است.

پردازش‌های آماری کلاسیک: نخست با استفاده از نسخه ۱۶ نرم‌افزار SPSS و روش‌های آمار کلاسیک پردازش داده‌ها به این صورت انجام گرفت که ابتدا آزمون تشخیص داده‌های پرت برای داده‌های خصوصیات فیزیکی - شیمیایی نمونه‌های خاک و شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها انجام گرفت. در این تحقیق برای تشخیص داده پرت از معیار استفاده شده است که میانگین متغیر و انحراف معیار متغیر است. برای آزمون فرض نرمالیت، آزمون نرمال بودن کولموگروف - اسمیرنوف برای هر یک از خصوصیات فیزیکی - شیمیایی خاک و شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها انجام شد. آماره‌های توصیفی شامل حداکثر، حداقل، میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات برای همه خصوصیات فیزیکی - شیمیایی خاک و شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها محاسبه شده است. از آنجائیکه در این تحقیق قرار بود تغییرپذیری مکانی عوامل مؤثر در خاکدانه‌ای شدن خاک در حوزه آبخیز طالقان بررسی شود و نتایج تحقیقات گذشته نشان داد که محل و نوع خاک نقش مهمی در تعیین این عوامل دارد، همبستگی بین شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها و خصوصیات فیزیکی - شیمیایی خاک با استفاده از همبستگی پیرسون بررسی شد تا اینکه تغییرپذیری مکانی خصوصیات از خاک بررسی شود که در این منطقه بر پایداری خاکدانه‌ها مؤثرند. لازم به ذکر است که وضعیت هم‌خطی بین متغیرهای مستقل مورد بررسی قرار نگرفت چون هدف از انجام آزمون همبستگی صرفاً تشخیص آن دسته از خصوصیات فیزیکی - شیمیایی خاک بود که در منطقه طالقان بر پایداری خاکدانه‌ها مؤثر بودند.

تعیین تغییرات مکانی خصوصیات خاک با استفاده از روش کریجینگ ابتدا هر متغیر از نظر نرمالیت بررسی شد، سپس با استفاده از توابع تبدیل Log و Box-Cox اقدام به نرمال کردن متغیرهای غیرنرمال شد. وجود امکان روند بوسیله ترسیم داده‌های مکانی و با استفاده از دانش و شناخت قبلی از منطقه بررسی شد. تجزیه و تحلیل ناهمسانگردی با استفاده از تغییرنماهای سطحی و ترسیم تغییرنمای

بودن یا نبودن داده‌های پرت بر اساس نظرات کارشناسی، مشاهدات صحرائی و اطلاعات نقشه‌های پایه صورت گرفته است. با شناسایی داده‌های پرت متغیرهای فیزیکی و بررسی آن‌ها از نظر انطباق با نقشه واحد سنگ‌شناسی مشخص شد که غیر عادی بودن این گروه از داده‌ها توجیه‌پذیر است. توزیع مقادیر داده‌ها برای متغیرهای رس و ماده آلی نرمال و برای متغیرهای شن‌ریز، شن خیلی ریز، رطوبت اشباع و آهک غیر نرمال است.

**ب) بررسی معنی‌داری اختلاف بین متغیرهای فیزیکو-شیمیایی در واحدهای سنگ‌شناسی:** نتایج تجزیه واریانس یک طرفه نشان می‌دهد که واحد سنگ‌شناسی تأثیری در مقدار ماده آلی و رطوبت اشباع ندارد اما بین مقدار رس، شن‌ریز، شن خیلی ریز و آهک در واحدهای سنگ‌شناسی مختلف در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌دار وجود دارد. در مورد خصوصیات فیزیکو-شیمیایی که واحد سنگ‌شناسی تأثیر معنی‌داری در مقدار آن‌ها داشته است، نتایج آزمون تجزیه واریانس، حاکی از اختلاف بین حداقل یکی از واحدهای سنگ‌شناسی مورد بررسی با دیگر واحدهای سنگ‌شناسی است. بر اساس نتایج آزمون همگنی واریانس‌های لیون، برای مقایسه میانگین‌ها و گروه‌بندی واحدهای سنگ‌شناسی از لحاظ مقادیر چنین خصوصیتی از آزمون دانکن استفاده شد. نتایج حاصل از گروه‌بندی این متغیرها بر اساس آزمون میانگین دانکن در جدول (۱) ارائه شده است.

**ج) استخراج آماره‌های خصوصیات فیزیکو-شیمیایی:** نتایج آماره‌های متغیرهای فیزیکو-شیمیایی که اختلاف معنی‌داری در واحدهای سنگ‌شناسی مختلف نداشتند، در جدول (۲) نشان داده شده است. استخراج آماره‌های خصوصیتی که مقدار آن‌ها در واحدهای سنگ‌شناسی مختلف اختلاف معنی‌داری با هم داشته است، بر اساس گروه‌بندی ارائه شده در جدول (۱) صورت گرفته است که نتایج آن در جدول (۳) آمده است.

چنانچه در جدول (۳) مشاهده می‌شود، میانگین شن ریز در واحد سنگ‌شناسی Q21 اختلاف زیادی با سایر واحدهای سنگ‌شناسی دیگر دارد. در بین خصوصیات فیزیکی که واحد سنگ‌شناسی تأثیر معنی‌داری در مقدار آن‌ها داشته است، بیشترین ضریب تغییرات مربوط به متغیر شن ریز در واحدهای سنگ‌شناسی Ngm و gy است. میانگین و ضریب تغییرات آهک در سازند کوتاه‌تر به ترتیب ۱۰/۷۲ و ۷۰ درصد و در سازند مارن به ترتیب ۱۵/۹۹ و ۴۰/۳۳ درصد است.

نقشه‌های هر متغیر از طریق روش‌های مختلف کریجینگ و با استفاده از پارامترهای بهینه شده و مدل‌های تغییرنمای مربوطه ایجاد شده است. لازم به ذکر است که در مورد نوع روش کریجینگ نیز باید گفت، انتخاب روش بر این اساس است که چنانچه متغیر روند نداشته باشد از کریجینگ معمولی، خصوصیات دارای روند از کریجینگ عام و خصوصیات دارای توزیع غیرنرمال از کریجینگ شاخص استفاده می‌شود. در این تحقیق با توجه به اینکه با استفاده از توابع تبدیل مختلف اقدام به نرمال کردن توزیع داده‌های خصوصیات غیرنرمال شد لذا از کریجینگ شاخص استفاده نشد. با توجه به شناختی که از منطقه وجود داشت و همچنین رسیدن نیم‌تغییرنما به سقف ثابت در محدوده مورد مطالعه، هیچ‌گونه روندی در داده‌ها مشاهده نشد، لذا از روش کریجینگ عام نیز استفاده نشد. به این ترتیب برای تمامی متغیرها از روش کریجینگ معمولی استفاده شد. درون‌یابی خصوصیات فیزیکو-شیمیایی و شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها بر اساس نتایج اثر واحد واحد سنگ‌شناسی روی این متغیرها و شاخص‌ها انجام گرفته است به این صورت که برای خصوصیات که واحد سنگ‌شناسی تأثیر معنی‌داری در مقدار آنها نداشته است درون‌یابی بر اساس کل داده‌ها صورت گرفته است و برای خصوصیات که مقدار آنها در واحدهای سنگ‌شناسی مختلف اختلاف معنی‌داری با هم داشته است درون‌یابی بر اساس گروه‌های تفکیک شده در آزمون مقایسه میانگین‌ها انجام گرفته است.

### نتایج

در بخش نتایج، فقط نتایج مربوط به خصوصیتی از خاک ارائه شده که در آزمون همبستگی پیرسون مهم تشخیص داده شدند (عوامل مؤثر در خاکدانه‌ای شدن خاک). بر این اساس در این بخش ابتدا نتایج تحلیل‌های آماری کلاسیک تشخیص داده پرت، آزمون نرمالیت، استخراج آماره‌ها و آزمون تجزیه واریانس مربوط به خصوصیات فیزیکو-شیمیایی شامل درصد رس، شن خیلی ریز، شن ریز، ماده آلی، آهک، رطوبت اشباع و شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها شامل K-Fw، K-Sw، K-Ws و سپس نتایج تغییرات مکانی آنها ارائه می‌شود.

**خصوصیات فیزیکو-شیمیایی خاک**  
**الف) تشخیص داده‌های پرت و بررسی نرمال بودن داده‌ها:** توجیه‌پذیر

جدول ۱- زیرگروه‌های تفکیک شده برای خصوصیات فیزیکو-شیمیایی مختلف بر اساس نتایج آزمون مقایسه

متغیرهای فیزیکو-شیمیایی	زیر گروه سه	زیر گروه دو	زیر گروه یک
رس	-	Ngm، Q1 و gy	Q1 و Q21
شن ریز	Q21	Q1 و gy	Ngm و gy
شن خیلی ریز	Q1 و Q21	Q1 و gy	Ngm و gy
آهک	-	Ngm و gy	Q1 و Q21

جدول ۲ - آماره‌های خصوصیات فیزیکی - شیمیایی که واحد سنگ‌شناسی تأثیر معنی‌داری در مقدار آنها نداشته است میانگین دانکن

خصوصیات فیزیکی- شیمیایی	آماره		
	ضرب تغییرات	انحراف معیار	میانگین
رطوبت اشباع	۱۷/۷	۷/۸۳	۴۴/۱
ماده آلی	۶۴/۷	۰/۹	۱/۳۹

جدول ۳- آماره‌های خصوصیات فیزیکی- شیمیایی که واحد سنگ‌شناسی تأثیر معنی‌داری در مقدار آنها داشته است

خصوصیات فیزیکی- شیمیایی	زیرگروه‌ها	آماره		
		حداکثر	حداقل	میانگین
رس	۱	۷۵/۲۸	۱۶	۳۵/۱۸
	۲	۸۰	۱۴/۵۶	۴۰/۹۲
شن ریز	۱	۱۱/۷	۰/۰۶	۱/۷۸
	۲	۱۱/۷	۰/۰۸	۲/۳۵
	۳	۱۲/۲	۰/۵۸	۶/۹۲
شن خیلی ریز	۱	۱۶/۴۴	۰/۲۶	۳/۸۹
	۲	۱۴/۲۴	۰/۲۴	۴/۸۳
	۳	۱۴/۲۴	۰/۲۴	۵/۹۷
آهک	۱	۲۲/۳	۰/۴	۱۰/۷۲
	۲	۲۷/۵	۰/۴	۱۵/۹۹

مختلف شکستگی خاکدانه‌ها اثر معنی‌داری روی پایداری خاکدانه‌ها در سطح احتمال پنج درصد دارند. اثر واحد سنگ‌شناسی و اثر متقابل واحد سنگ-شناسی و مکانیسم‌های مختلف شکستگی خاکدانه‌ها روی میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها معنی‌دار نیست.

در جدول (۴)، آماره‌های پایداری خاکدانه‌ها با مکانیسم‌های مختلف شکستگی خاکدانه‌ها ارائه شده است. در این جدول واحد شاخص‌های  $FW$ ،  $SW$  و  $WS$  میلی‌متر و ضریب تغییرات نیز به درصد بیان شده است.

برای همه نمونه‌های خاک، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در هر سه تیمار مورد بررسی روند یکسانی را نشان داد. به این ترتیب که مقدار آن در تیمار  $WS > FW > SW$  و به ترتیب دارای میانگین  $1/4$ ،  $1/04$  و  $0/56$  میلی‌متر بودند. دامنه مقادیر  $WS$  و  $FW$ ،  $SW$  به ترتیب از  $0/17$  تا  $1/17$ ،  $0/51$  تا  $1/97$  و  $0/3$  تا  $1/85$  میلی‌متر بود.

همبستگی بین خصوصیات فیزیکی - شیمیایی خاک و شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها: چنانچه در بخش مواد و روش‌ها بیان شد، شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها برای ۸۴ نمونه خاک اندازه‌گیری شد.

بنابراین، با توجه به نتایج جداول (۲) و (۳) می‌توان گفت که دامنه تغییرات خصوصیات فیزیکی- شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه به اندازه‌ای هست که درجه و ماهیت پایداری ساختمانی خاک‌های مورد بررسی را نشان دهد.

شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها: همان‌طور که در بخش مواد و روش‌ها آمده است، در این تحقیق شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در سه تیمار خیس شدن سریع خاکدانه‌ها، خیس شدن آهسته خاکدانه‌ها و شکستگی مکانیکی ناشی از تکان دادن خاک بعد از خیس کردن اولیه اندازه‌گیری شده است. برای تشخیص داده‌های پرت مقادیر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در تیمارهای مختلف نیز از معیار ارائه شده در بخش مواد و روش‌ها استفاده شد. بر اساس این معیار، مقادیر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در هیچیک از تیمارهای مورد بررسی پرت نیست. توزیع‌های مقادیر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در تیمار  $WS$  و  $SW$  نرمال ولی در تیمار  $FW$  غیر نرمال است. نتایج تجزیه واریانس دو طرفه مربوط به اثر مکانیسم‌های مختلف شکستگی خاکدانه‌ها (تیمارها) و واحد سنگ‌شناسی روی مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها نشان می‌دهد که مکانیسم‌های



جدول ۴- شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها

شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها	آماره			
	ضریب تغییرات	انحراف معیار	میانگین	حداقل
MWD-Fw	۰/۵۶	۱/۱۷	۰/۱۷	۰/۲۵
MWD-Sw	۱/۴	۱/۹۷	۰/۵۱	۰/۳۸
MWD-Ws	۱/۰۴	۱/۸۵	۰/۳	۰/۳۶

و توان دوم استفاده شد ولی توزیع هیچ‌کدام از آن‌ها نرمال نشد. از آن‌جایی که شرط اصلی در ایجاد روابط همبستگی نرمال بودن توزیع متغیر وابسته است، نرمال نبودن توزیع خصوصیات مستقل مشکلی در روابط ایجاد نمی‌کند. با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون، همبستگی بین خصوصیات مستقل و وابسته بررسی شد که نتایج آن در جدول (۵) ارائه شده است. چنانچه در جدول (۵) مشاهده می‌شود از بین ۱۸ متغیر فیزیکی-شیمیایی مورد بررسی خاک، تنها خصوصیات درصد رس، شن ریز، شن خیلی ریز، رطوبت اشباع، ماده آلی و آهک در منطقه طالقان بر پایداری خاکدانه‌ها مؤثر بودند و چنانچه در مقدمه بخش نتایج نیز گفته شد.

در این تحقیق فقط اطلاعات آمار کلاسیک و نتایج تغییرپذیری مکانی این خصوصیات از خاک ارائه شده است. همبستگی منفی بین شاخص‌های MWD-Fw، MWD-Sw و MWD-Ws با مقدار رس وجود دارد، این یافته با نتایج (Mohammad zadeh, 2011) همخوانی دارد. برای وجود این روابط منفی می‌توان دو علت را بیان کرد.

بنابراین در قسمت همبستگی نیز از اطلاعات این ۸۴ نمونه خاک استفاده شد. واحد سنگ‌شناسی تأثیر معنی‌داری روی خصوصیات فیزیکی - شیمیایی این بخش از نمونه‌های خاک نداشت. لذا، بر اساس این یافته، تصمیم بر آن شد تا همبستگی بر اساس کل نمونه‌های خاک ارائه شود.

یکی از پیش شرط‌های انجام آزمون همبستگی بحث نرمالیت توزیع داده‌های مستقل و وابسته است که نتایج توزیع داده‌های شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها (متغیر مستقل) از نظر نرمال بودن قبلاً ارائه شده است. اما در مورد خصوصیات فیزیکی-شیمیایی (خصوصیات مستقل)، توزیع داده‌های این بخش از نمونه‌های خاک شامل ماده آلی، رس، شن، شن درشت، مجموع کلسیم و منیزیم، اکسید آهن، پتاسیم و رطوبت اشباع نرمال ولی خصوصیات هدایت الکتریکی، آهک، سیلت، شن ریز، شن خیلی ریز، کلر، سدیم، نسبت جذب سدیم و درصد سدیم قابل تبادل غیر نرمال است. برای نرمال کردن توزیع خصوصیات وابسته غیرنرمال از توابع مختلف مثل لگاریتم، جذر

جدول (۵) - ضریب همبستگی پیرسون بین خصوصیات فیزیکی - شیمیایی و شاخص‌های پایداری

شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها	خصوصیات فیزیکی - شیمیایی	ضریب همبستگی پیرسون	سطح معنی‌داری
MWD-Fw	آهک	-۰/۲۳	پنج درصد
	رس	-۰/۲۷	پنج درصد
	شن ریز	۰/۴۸	یک درصد
	شن خیلی ریز	۰/۴	یک درصد
	رطوبت اشباع	-۰/۳۳	یک درصد
MWD-Sw	ماده آلی	۰/۳۱	یک درصد
	آهک	-۰/۳۳	یک درصد
	رس	-۰/۲۹	یک درصد
	شن ریز	۰/۴۵	یک درصد
	شن خیلی ریز	۰/۴۶	یک درصد
MWD-Ws	رطوبت اشباع	-۰/۲۳	پنج درصد
	ماده آلی	۰/۲۶	پنج درصد
	رس	-۰/۳۴	یک درصد
	شن ریز	۰/۴	یک درصد
	شن خیلی ریز	۰/۴۳	یک درصد
	رطوبت اشباع	-۰/۳۲	یک درصد

شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها شامل MWD-Fw، MWD-Sw و MWD-Ws ارائه شده است. قبل از ترسیم واریوگرام در روش کریجینگ باید نحوه توزیع داده‌ها (نرمال بودن یا نبودن تابع توزیع) مشخص شود. در برنامه الحاقی Geostatistical Analysis برای بررسی نحوه توزیع داده‌ها از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف در نرم‌افزار SPSS استفاده شد. نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف بر غیر نرمال بودن بعضی از متغیرها به عنوان مثال رطوبت اشباع دلالت داشت که با بررسی سطح معنی‌داری این متغیر مشخص شد که نرمال بودن این متغیر در شرایط مرزی قرار دارد، در این تحقیق چنین خصوصیتی را نرمال فرض کرده و از تبدیل آن‌ها صرف‌نظر شد، زیرا با وجود تبدیل‌های مختلف، آماره‌های آن‌ها به سمت نرمال سوق پیدا نمی‌کرد. در جدول (۶) شرایط توزیع داده‌های خصوصیات مؤثر بر پایداری خاکدانه‌ها که واحد سنگ‌شناسی تأثیر معنی‌داری در مقدار آنها نداشته است، از نظر نرمال بودن نشان داده شده است. در جدول (۷) نیز شرایط توزیع خصوصیات مؤثر بر پایداری خاکدانه‌ها که مقدار آنها در واحدهای سنگ‌شناسی مختلف تفاوت معنی‌داری داشته است، از نظر نرمال بودن نشان داده شده است. منظور از گروه‌های مشخص شده در جدول (۷) همان زیرگروه‌های تفکیک شده بر اساس آزمون مقایسه میانگین دانکن در جدول (۱) است.

اول این‌که شاید در این منطقه کانی‌های رسی غالب از نوع انبساط‌پذیر هستند و بنابراین نقش خاکدانه‌سازی ندارند که اثبات این موضوع مستلزم آزمایش‌های مینرالوژی و استفاده از شاخص‌های مرتبط جهت تعیین نوع رس است. دلیل دیگر وجود همبستگی منفی بین مقدار رس و پایداری خاکدانه‌ها را باید در اثر متقابل رس و سایر ویژگی‌های خاک جستجو کرد. در خاک‌های مورد مطالعه رابطه معنی‌دار مستقیمی بین مقدار رس و کاتیون سدیم وجود دارد. بنابراین، در این منطقه کاتیون سدیم باعث پراکنده شدن رس و ناپایداری خاکدانه‌ها می‌شود. در تحقیقی (Idow, 2003) و (Dimoyiannia et al., 1998) همبستگی معنی‌داری بین پایداری خاکدانه‌ها و درصد رس پیدا نکردند. (Dimoyiannia et al., 1998) در مطالعه دیگری همبستگی منفی بین رس و پایداری خاکدانه‌ها پیدا کردند. (Norhayati & Verlo, 1984) گزارش می‌کنند که برای شکل‌گیری خاکدانه‌های پایدار، همراه با رس مقدار مشخصی شن خیلی ریز و سیلت نیز نیاز است.

پهنه‌بندی خصوصیات فیزیکی-شیمیایی خاک و شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها با استفاده از روش کریجینگ: در این بخش از تحقیق، درون‌یابی خصوصیات فیزیکی-شیمیایی مؤثر بر پایداری خاکدانه‌ها شامل رس، شن ریز، شن خیلی ریز، رطوبت اشباع، ماده آلی و آهک و

جدول ۶ - توزیع خصوصیات مؤثر بر پایداری خاکدانه‌ها و مقدار آماره‌ها قبل و بعد از تبدیل کردن داده‌ها

خصوصیات	Z	Sig.	توزیع داده‌ها	تابع تبدیل	آماره‌ها قبل از تبدیل			آماره‌ها بعد از تبدیل		
					میانگین	میانه	چولگی	میانگین	میانه	چولگی
رطوبت اشباع	۱/۵۸۷	۰/۰۱۳	غیر نرمال	بدون تبدیل	۴۴/۱۳	۴۴/۹۴	-۰/۷۲	-	-	-
ماده آلی	۰/۳۲۸	۰/۹۵۰	نرمال	-	۱/۳۹	۱/۳۴	۰/۸۴	-	-	-

جدول ۷ - توزیع خصوصیات مؤثر بر پایداری خاکدانه‌ها و مقدار آماره‌ها قبل و بعد از تبدیل کردن داده‌ها

متغیرها	گروه‌ها	Z	Sig.	توزیع داده‌ها	تابع تبدیل	آماره‌ها قبل از تبدیل			آماره‌ها بعد از تبدیل		
						میانگین	میانه	چولگی	میانگین	میانه	چولگی
رس	۱	۱/۰۵۰	۰/۲۲۰	نرمال	-	۳۵/۱۸	۳۱/۵	۰/۷۲	-	-	-
	۲	۱/۰۱۲	۰/۲۵۷	نرمال	-	۴۰/۹۲	۴۰	۰/۴۷	-	-	-
شن ریز	۱	۲/۶۸۹	۰/۰۰۰	غیر نرمال	Log	۱/۷۸	۰/۹۲	۲/۰۷	-۰/۰۳	-۰/۰۸	-۰/۰۸
	۲	۱/۷۴۷	۰/۰۰۴	غیر نرمال	Log	۲/۳۵	۱/۵۴	۱/۳۹	۰/۲۳	۰/۴۳	-۰/۴۷
شن خیلی ریز	۳	۰/۶۲۶	۰/۸۲۸	نرمال	-	۴	۴/۷	-۰/۲۷	-	-	-
	۱	۱/۷۳۲	۰/۰۰۵	غیر نرمال	Log	۳/۸۹	۳/۰۲	۱/۲۸	۰/۹۸	۱/۱	-۰/۳۷
آهک	۲	۱/۰۷۰	۰/۲۰۳	نرمال	-	۴/۸۳	۴/۰۹	۰/۶۹	-	-	-
	۳	۰/۵۵۷	۰/۹۱۵	نرمال	-	۵/۹۷	۶/۱۶	۰/۱۴	-	-	-
آهک	۱	۱/۱۱۳	۰/۱۶۸	نرمال	-	۱۰/۷۲	۱۱/۷۵	-۰/۰۲	-	-	-
	۲	۱/۸۸۷	۰/۰۰۲	غیر نرمال	Box-Cox Parameter=0.9	۱۵/۹۹	۱۸/۱	-۰/۸۴	۱۲/۲۲	۱۳/۹۴	-۰/۹۳

است. پارامترهای نیم‌تغییرنمای شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها در جدول (۱۰) ارائه شده است. در شکل‌های (۳) و (۴) نیم‌تغییرنما و نیم‌تغییرنمای سطحی متغیر آهک در راستای شعاع تأثیر بزرگ و کوچک نشان داده شده است.

در جدول (۸)، پارامترهای نیم‌تغییرنمای خصوصیات فیزیکی-شیمیایی که مقدار آن‌ها در واحدهای سنگ‌شناسی مختلف تغییر معنی‌داری نداشته است، نشان داده شده است. در جدول (۹) پارامترهای نیم‌تغییرنمای خصوصیات فیزیکی-شیمیایی که واحد سنگ‌شناسی تأثیر معنی‌داری در مقدار آنها داشته است، ارائه شده

جدول ۸- پارامترهای نیم‌تغییرنمای خصوصیات فیزیکی - شیمیایی مقایسه میانگین دانکن

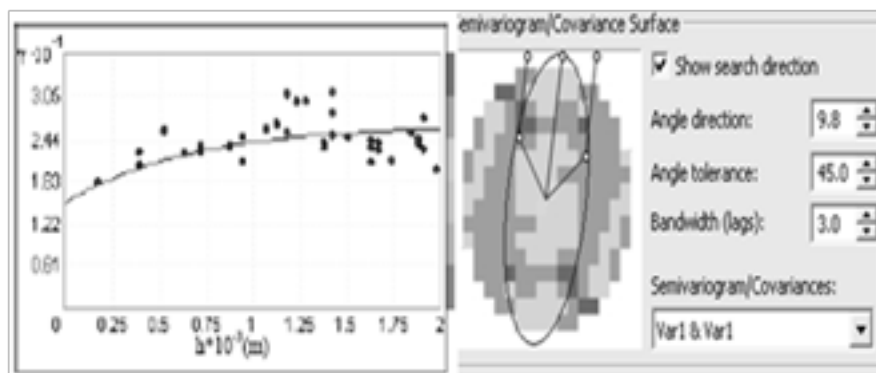
متغیرها	مدل	$C_0$	$C_0 + C_1$	$a_{min}$	$a_{max}$	RMSE	MAE	MBE	ساختار مکانی (درصد)
رطوبت اشباع	نمایی	۳۰/۷۵	۵۶/۱	۱۱۵۳/۹۱	۱۷۴۱/۰۵	۷/۲۶	۵	۰/۰۲۷	۵۴/۸۱
ماده آلی	نمایی	۰/۱۶	۰/۷۴	۸۲۸/۳۸	۱۷۴۱/۰۵	۰/۸۱	۰/۶۵	-۰/۰۲	۲۱/۶۲

جدول (۹)- پارامترهای نیم‌تغییرنمای خصوصیات فیزیکی - شیمیایی

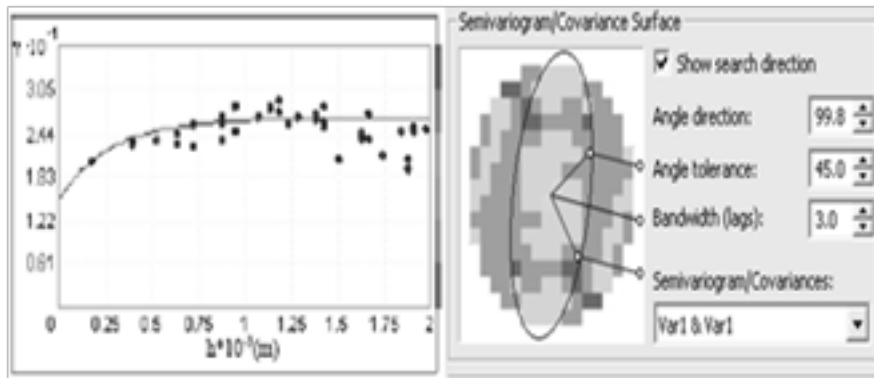
متغیرها	گروه‌ها	مدل	$C_0$	$C_0 + C_1$	$a_{min}$	$a_{max}$	RMSE	MAE	MBE	ساختار مکانی (درصد)
رس	۱	کروی	۱۱۴/۷	۲۰۷/۸۴	۱۸۷۷/۰۶	۲۲۱۵/۰۱	۱۲/۹	۱۱/۰۹	-۰/۰۲	۵۵/۱۸
	۲	کروی	۱۳۳/۲۹	۱۹۱/۱۶	۱۰۸۰/۶۸	۱۷۴۱/۰۵	۱۳/۰۳	۱۱	-۰/۰۰۵	۶۹/۷۲
شن ریز	۱	نمایی	۰/۵۳	۱/۲۸	۹۷۴/۵۲	۱۲۹۷/۸۷	۲/۰۴	۱/۴	۰/۰۰۷	۴۱/۴
	۲	نمایی	۰/۵۱	۱/۵۶	۸۹۷/۳۹	۱۷۴۱/۰۵	۲/۴۱	۱/۷۹	۰/۴۶	۳۲/۶۹
	۳	کروی	۰/۰۱	۶/۰۱	۹۷۴/۳۸	۱۷۴۱/۰۵	۲/۱۲	۱/۷۳	۰/۲	۰/۱۶
شن خیلی ریز	۱	نمایی	۰/۴۲	۰/۷۹	۱۶۱۸/۱۵	۱۷۴۱/۰۵	۳	۲/۲	۰/۱۱	۵۳/۱۶
	۲	کروی	۶/۵۵	۱۰/۹	۳۳۳/۳۰	۱۷۴۱/۰۵	۳/۲۹	۲/۴۹	-۰/۰۵	۶۰/۰۹
	۳	نمایی	۵/۹۵	۱۰/۲۵	۶۵۱/۸۶	۱۷۴۱/۰۵	۲/۹۴	۲/۲	-۰/۰۵	۵۸/۰۴
آهک	۱	کروی	۲۷/۲۱	۵۰/۰۹	۹۸۷/۰۴	۱۹۷۶/۴۲	۶/۳۲	۵	۰/۰۹	۷۴/۲۸
		نمایی	۱۴/۹۵	۲۶/۳۸	۸۳۵/۱۴	۱۹۷۶/۴۲	۶/۳	۴/۹۸	۰/۰۴	۵۶/۶۷

جدول (۱۰)- پارامترهای نیم‌تغییرنمای شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها

متغیرها	مدل	$C_0$	$C_0 + C_1$	$a_{min}$	$a_{max}$	RMSE	MAE	MBE	ساختار مکانی (درصد)
MWD-Fw	گوسی	۰/۰۵۸	۰/۰۶۹	۲۵۱۲/۱۶	۵۹۳۹/۱۳	۰/۲۵	۰/۲	-۰/۰۰۵۱	۸۴/۰۵
MWD-Sw	نمایی	۰/۰۷۹	۰/۱۳۸	۷۳۹	۳۲۴۵/۱۹	۰/۳۶	۰/۳	-۰/۰۰۵	۵۷/۲۴
MWD-Ws	کروی	۰/۰۹۳	۰/۱۳۸	۲۰۳۱/۸۲	۳۵۴۴/۰۱	۰/۳۴	۰/۲۷	۰/۰۰۱۵	۶۷/۳۹



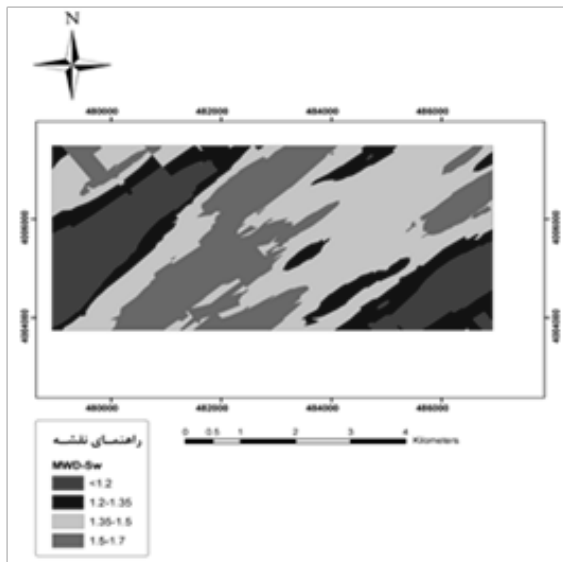
شکل ۳- نیم‌تغییرنما و نیم‌تغییرنمای سطحی متغیر آهک در راستای شعاع تأثیر بزرگ در واحدهای سنگی Ngm و gy



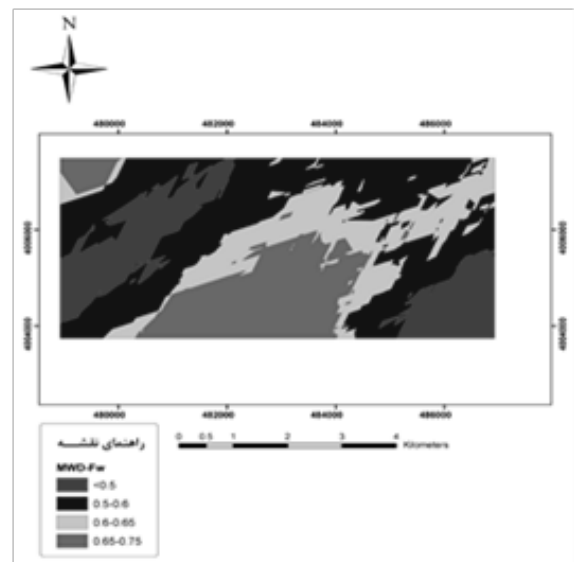
شکل ۴- نیم تغییر نما و نیم تغییرنمای سطحی متغیر آهک در راستای شعاع تأثیر کوچک در واحدهای سنگی Ngm و gy

ساختار مکانی متغیرها قابل استفاده هستند. از ارائه نیم تغییر نما و نیم تغییرنمای سطحی سایر متغیرها و نقشه پهنه بندی عوامل مؤثر در خاکدانه ای شدن خاک صرف نظر شده است.

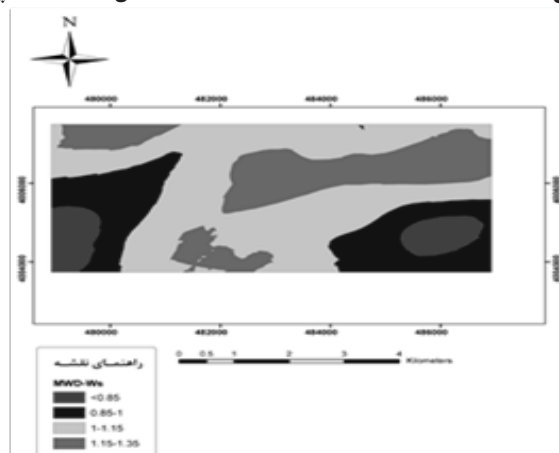
نقشه های پهنه بندی شاخص های پایداری خاکدانه ها در شکل های (۵) تا (۷) نشان داده شده است. این نقشه ها با توجه به معیارهای ارزیابی ارائه شده در جدول (۱۰) از نظر دقت روش کریجینگ و



شکل (۶) - نقشه پهنه بندی شاخص MWD-Sw



شکل (۵) - نقشه پهنه بندی شاخص MWD-Fw



شکل (۷) - نقشه پهنه بندی شاخص MWD-WS

### بحث و نتیجه‌گیری

چنانچه در جداول (۸)، (۹) و (۱۰) مشاهده می‌شود، روش درون‌یابی کریجینگ بر ساختار مکانی ضعیف بعضی از متغیرها دلالت داشت. بنابراین گمان می‌رفت که شاید یکی از دلایل آن، روش طبقه‌بندی نقاط نمونه‌برداری برای درون‌یابی باشد که چنانچه قبلاً نیز بیان شد، در واقع طبقه‌بندی نقاط نمونه‌برداری بر اساس معنی‌داری اثر واحد سنگ‌شناسی در مقدار متغیر مورد بررسی بود. لذا، برای اطمینان از دقت نتایج، برای طبقه‌بندی نقاط سناریوی دیگری نیز در نظر گرفته شد و درون‌یابی بر اساس این سناریو نیز انجام شد. این سناریو به این صورت بود که سعی شد، طبقه‌بندی نقاط برای هر واحد سنگ‌شناسی انجام شود و درون‌یابی بر اساس محدوده هر واحد سنگ‌شناسی انجام شود. در این رابطه، ملاحظه شد که طبقه‌بندی داده‌ها بر اساس این سناریو هیچ تأثیری در دقت نتایج ندارد. خطای اندازه‌گیری (نسبت اثر قطعه‌ای به سقف) وجود ساختار مکانی قوی برای ماده آلی و ساختار متوسط برای رطوبت اشباع را نشان داد. خطای اندازه‌گیری ماده آلی بسیار کم است که حاکی از پیوستگی بالای توزیع این متغیر و واریانس تصادفی پایین آن در خاک‌های مورد بررسی است. به این معنی که مقدار ماده آلی در نمونه‌های نزدیک به هم بسیار مشابه و در نمونه‌های دور از هم مقادیر دورتری از هم داشته‌اند. نیم-تغییرنمای رطوبت اشباع و ماده آلی در جهات مختلف مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به این که نیم-تغییرنمای سطحی این متغیرها در جهات مختلف مشابه نیست، وجود ناهمسانگردی در منطقه تأیید می‌شود. شعاع تأثیر بزرگ و کوچک خصوصیات رطوبت اشباع و ماده آلی به ترتیب ۱۱۵۳، ۱۷۴۱، ۱۷۴۱ و ۸۲۸ متر است. شعاع تأثیر رطوبت اشباع نسبت به ماده آلی نسبتاً بزرگتر است و دلالت بر ساختار مکانی قوی‌تر دارد. در نتیجه محدوده مجازی را که می‌توان از داده‌های موجود در آن برای تخمین مقدار متغیر رطوبت اشباع در نقطه مجهول استفاده کرد را افزایش می‌دهد. نسبت شعاع تأثیر بزرگ به شعاع تأثیر کوچک برای خصوصیات رطوبت اشباع و ماده آلی به ترتیب ۱/۵ و ۲/۱ است. بر این اساس، میزان ناهمسانگردی برای متغیر ماده آلی نسبت به رطوبت اشباع بیشتر است. مقادیر MAE و MBE به ترتیب مقدار دقت و انحراف را نشان می‌دهند و در حالت ایده‌آل باید مساوی صفر باشند. در واقع MAE معرف دقت روش و مقدار متوسط خطاست که هر چه به صفر نزدیکتر باشد، بهتر است و MBE نشانگر میانگین انحراف معیار مقدار برآوردی از مقدار مشاهده است، به عبارت دیگر مقدار بیش برآوردی یا کم برآوردی را نشان می‌دهد (Alexandrand, Bullock, 1999). در عمل هیچگاه مقدار این دو آماره صفر نخواهد شد (GallichandandMarcotte, 1992). بنابراین در جداول (۸)، (۹) و (۱۰) مقادیر منفی و مثبت MBE به ترتیب نشان دهنده کم برآوردی و بیش برآوردی روش کریجینگ در پهنه‌بندی خصوصیات مورد بررسی است. اگر مقدار معیارهای میانگین مطلق خطا، میانگین اربیبی خطا و مجذور میانگین خطای تخمین نسبت به میانگین آن متغیر کمتر باشد، نشان دهنده دقت روش کریجینگ در پهنه‌بندی آن متغیر در منطقه است. به عنوان مثال با مقایسه

معیارهای ارزیابی پهنه‌بندی از جدول (۱۷) و میانگین متغیرها از جدول (۶)، مشاهده می‌شود روش کریجینگ، مقدار رطوبت اشباع را با دقت بیشتری در مقایسه با مقدار ماده آلی پهنه‌بندی کرده است. اگر چه ماده آلی در منطقه مورد مطالعه ساختار مکانی قوی دارد ولی نسبت میانگین مطلق خطا به میانگین آن متغیر نشان دهنده دقت کم روش کریجینگ در پهنه‌بندی این متغیر در منطقه است به عبارت دیگر میانگین مطلق خطا تقریباً ۵۰ درصد میانگین آن متغیر است. با توجه به نتایج جدول (۹) متغیر آهک دارای ساختار مکانی قوی‌تری در سازند مارن نسبت به سازند کواتر است. علاوه بر این با مقایسه معیارهای ارزیابی و میانگین متغیر آهک در سازند مارن و کواتر می‌توان گفت که روش کریجینگ متغیر آهک را دقت بیشتری در سازند مارن پهنه‌بندی کرده است. در واحدهای سنگی Ngm و gy (گروه یک خصوصیات شن ریز و شن خیلی ریز و گروه دو متغیر آهک) مدل مناسب برازش شده به خصوصیات شن ریز، شن خیلی ریز و آهک مدل نمایی بود. در این واحدهای سنگ‌شناسی، وابستگی مکانی این سه متغیر متوسط بود. بر اساس نسبت شعاع تأثیر بزرگ به شعاع تأثیر کوچک، میزان ناهمسانگردی خصوصیات شن ریز و شن خیلی ریز بسیار کم ولی میزان ناهمسانگردی آهک نسبتاً زیاد است. مقادیر کمتر میانگین مطلق خطا، میانگین اربیبی خطا و مجذور میانگین خطای تخمین در مقایسه با میانگین برای آهک نشان دهنده دقت روش کریجینگ در پهنه‌بندی این متغیر در منطقه نسبت به خصوصیات شن خیلی ریز و شن ریز است. در واحدهای سنگی Q1 و Q2I (گروه یک خصوصیات رس و آهک و گروه سه متغیر شن خیلی ریز) مدل مناسب برازش شده به خصوصیات رس و آهک مدل کروی و برای متغیر شن خیلی ریز مدل نمایی بود. در این واحدهای سنگ‌شناسی، وابستگی مکانی این سه متغیر متوسط بود. میزان ناهمسانگردی متغیر رس نسبت به دو متغیر دیگر بسیار کم بود. چنانچه در جدول (۹) مشاهده می‌شود، مقدار شعاع تأثیر بزرگ و کوچک متغیر رس در واحدهای سنگی Q1 و Q2I تفاوت چندانی با هم ندارد، به عبارت دیگر دامنه تغییرات متغیر رس در سازند کواتر در جهات مختلف تقریباً یکسان است و می‌توان از شبکه مربعی برای نمونه‌برداری خاک استفاده کرد. چنانچه در جدول (۹) نشان داده شده است، ساختار مکانی قوی برای شن ریز در واحد سنگی Q2I قابل مشاهده است. ساختار مکانی قوی شن ریز حاکی از پیوستگی بالای توزیع این متغیر و واریانس تصادفی پایین آن در خاک‌های مورد بررسی است. چنانچه در جدول (۱۰) نشان داده شده است، ساختار مکانی برای شاخص پایداری MWD-Fw ضعیف ولی برای شاخص‌های MWD-Sw و MWD-Ws متوسط است. از بین شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها، بیشترین ناهمسانگردی مربوط به شاخص MWD-Sw است که نسبت به دو شاخص دیگر ساختار مکانی آن قوی‌تر است. شعاع تأثیر برای این شاخص پایداری ۳۲۵۰ متر است. لازم به ذکر است که نقشه‌های پهنه‌بندی ارائه شده در شکل‌های (۵) تا (۷) با توجه به معیارهای ارزیابی ارائه شده در جداول (۸)، (۹) و (۱۰) از نظر دقت روش کریجینگ و ساختار مکانی متغیرها قابل استفاده هستند. در تحقیق حاضر تغییرات مکانی شش



and scrubland in southern Bolivia. *Soil and Tillage Research*, Vol, 57, pp:166–159.

7. De Souza, Z.M. Junior, J. Pereira, T. and Sanchez Sanz, C.M. 2009. Spatial variability of aggregate stability in latosols under sugarcane. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Vol, 33, No, 2.
8. Dimoyiannis, D., Valmis, S., Danalatos, N.G., 2006. Interrill erosion on cultivated Greek soils: modelling sediment delivery. *Earth Surface Processes and Landforms* 949–940, 31.
9. Gallichand, J. and Marcotte, D. 1992. Mapping clay content for surface drainage in the Nile Delta. *Geoderma*, Vol, 179-165, 58.
10. Gaston, L.A. Locke, M.A. Zablutowicz, R.M. and Reddy, K.N. 2001. Spatial variability of soil properties and weed populations in the Mississippi Delta. *Soil Science Society American Journal*, Vol, 65, pp:459–449.
11. Gee, G.W. and Bauder, J.W. 1986. Particle-size analysis, In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis*, part I. Physical and Mineralogical Methods, 2nd edition. Agronomy 9, American Society of Agronomy, Madison, WI, pp: 411–383.
12. Greminger, P. J. Sud, Y. K. and Nielsen, D. R. 1985. Spatial Variability of Field measured
13. Grieve, I.C., 1980. The magnitude and significance of soil structural stability declines under cereal cropping. *Catena*, Vol 7, pp: 85-79.
14. Henin, S. Monnier, G. and Combeau, A. 1958. *Method de l'étude de la stabilité structurale des soils*. *Annales Agronomiques*, Vol, 9, pp:92-73.
15. Hudson, N. 1995. *Soil Conservation*. Iowa State Univ. Press, Ames, IA.
16. Idowu, O.J., 2003. Relationships between aggregate stability and selected soil properties in humid tropical environment. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 708–695, 34.
17. Irvem, A. Topaloglu, F. and Uygur, V. 2007. Estimating spatial Distribution of Soil Loss over Seyhan River Basin in Turkey. *Journal of Hydrology*, Vol, 336, No, 2-1, pp: 37-30.
18. Kemper, W.D. and Rosenau, R.C. 1986. Aggregate stability and size distribution. In: *Method of Soil Analysis*, part 1, Agronomy Monographs 9 (ed. A. Klute). American Society of Agronomy,

متغیر فیزیکی- شیمیایی البته بدون احتساب متغیرها در واحدهای سنگ‌شناسی مختلف و سه شاخص پایداری خاکدانه‌ها بررسی شده است. نتایج به جزء در مواردی بر ساختار مکانی ضعیف تا متوسط متغیرها و شاخص‌ها دلالت داشت. نمی‌توان ادعا کرد که این نتایج کاملاً دقیق و خالی اشکال است، بویژه با توجه به اینکه بعد از ترسیم شبکه‌های نمونه برداری منظم و برداشت نمونه‌های خاک، از دانش کارشناسی و موضوع واحدهای همگن کاری برای انتخاب نمونه‌های خاک اولیه از بین کل نمونه خاک‌های شبکه منظم، استفاده شده است. بنابراین شاید یکی از دلایل ساختار مکانی متوسط و ضعیف متغیرها و شاخص‌ها مربوط روش نمونه برداری باشد. لذا به منظور بهبود تحقیق‌های آینده پیشنهاد می‌شود که از روش‌های دیگر نمونه برداری استفاده شده و نتایج آنها با نتایج این تحقیق مقایسه شود. موضوع دیگری را که می‌توان مطرح کرد این است که به نظر می‌رسد برداشت نمونه از دو نقطه نمونه برداری متوالی در اعماق مختلف خاک حتی با اختلاف جزئی، نتایج تحلیل‌های زمین آماری را تحت تأثیر قرار دهد، بنابراین پیشنهاد می‌شود در صورت امکان نمونه‌ها در شرایط کاملاً یکسان از نظر عمق و ابعاد پروفیل برداشت شوند. سعی شود هنگام نمونه برداری از نقطه‌ای نمونه برداشت شود که آن نقطه معرف محدوده اطراف خود باشد. علاوه بر این در صورت امکان از یک نقطه، چندین نمونه خاک از اطراف آن نقطه برداشت شود سپس نمونه‌ها کاملاً با هم مخلوط شوند و یک نمونه معرف از این مخلوط همگن انتخاب شود

#### منابع مورد استفاده:

1. Agassi, M. 1996. *Soil Erosion, Conservation, and Rehabilitation*. Marcel Dekker, New York.
2. Alexandra, K. and Bullock, G. 1999. A comparative study of interpolation methods for mapping soil properties. *Agronomy Journal*, Vol, 91, pp: 400-393.
3. Bird, S.B. Herrick, J.E. Wander, M.M. and Murray, L. 2007. Multi-scale variability in soil aggregate stability: Implications for understanding and predicting semi-arid grassland degradation. *Geoderma*, Vol, 140, pp:118-106.
4. Cambardella, C.A. Moorman, T.B. Parkin, T.B. Karlen, D.L. Turco, R. F. and Konopka, A. E. 1994. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Science Society American Journal*, Vol, 58, pp:1511-1501.
5. Cerdá, A. 1998. Soil aggregate stability under different Mediterranean vegetation types. *Catena*, Vol 32, pp:86–73.
6. Cerdá, A. 2000. Aggregate stability against water forces under different climates on agriculture land

29. Pagiola, S. 1990. Preliminary estimates on the economics of soilconservation in Kenya. Policy analysis for rural development. Ministry of Agriculture, Nairobi, Kenya. Report No. 1.
30. Parysow, P. Wang, G. Gertner, G. and Anderson, A.B. 2003. Spatial Uncertainty Analysis for Mapping Soil Erodibility Based on Joint Sequential Simulation. *Catena*, Vol, 53, No,1, pp: 78-65.
31. Polhmann, H. 1993. Geostatistical Modeling of Environmental Data. *Catena*, Vol, 20, pp: 198-191.
32. Rejman, J. Turski, R. and Paluszek, J. 1998. Spatial and temporal variations in erodibility of loess soil. *Soil and Tillage Research*, Vol, 46, pp:68-61.
33. Rengasamy, P. and Olsson, K.A. 1991. Sodicity and soil structure. *Australian Journal Soil Research*, Vol, 29, pp:952-935.
34. Rodríguez, R. P. Marques, M.J. and Bienes, R. 2007. Spatial Variability of the Soil Erodibility Parameters and Their Relation with the Soil Map at Subgroup Level. *Science and Environment*, Vol, 378, No,2-1, pp:173-166.
35. Shukla, M. K. Lal, R. and VanLeeuwen, D. 2007. Spatial variability of aggregate-associated carbon and nitrogen contents in the reclaimed minesoils of eastern Ohio. *Soil Science Society of American Journal*, Vol, 71, pp: 1757-1748.
36. Shukla, M.K. Lal, R. and VanLeeuwen, D. 2006. Spatial variability of aggregate-associated carbon and nitrogen contents in reclaimed mine soils of eastern Ohio. *Soil Science Society of America Journal*, Vol, 71, pp:1757-1748.
37. Soil-water Characteristics. *Soil Science Society of America Journal*, Vol, 49, pp: 1082-1075.
38. Sokouti Oskouie, R. 2005. Evaluation of Structure of Spatial Variation of the Soil Erodibility in the Orumieh Region. *Proceedings of the 9th Iranian Soil Congress*. Tehran, Iran. PP. 487-482 (In Persian).
39. Statistical Package for the Social Sciences Inc., 2008. SPSS Advanced Statistics 16.0.2 SPSS Inc., Chicago.
40. Sun, B. Zhou, S. and Zhao, Q. 2003. Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of Mdison, WI.
19. Le Bissonnais, Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, Vol, 47, pp:437-425.
20. Lin, H. Wheeler, D. Bell, J. and Wilding, L. 2005. Assessment of soil spatial variability at multiple scales. *Ecological Modelling*, Vol, 182, pp: 290-271.
21. Mehra, O. P. and Jackson, M. L. 1960. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-CBDRate system buffered with sodium bicarbonate. *Clay Mineralogy*, Vol, 7, pp:327-317.
22. Mohammadi, J. and Motaghian, M. H. 2011. Spatial Prediction of Soil Aggregate Stability and Aggregate-Associated Organic Carbon Content at the Catchment Scale Using Geostatistical Techniques. *Pedosphere*, Vol, 21, No,3, pp:399-389
23. Mohammad Zadeh, Z., 2011. Cementing factors and aggregate stability indices as an estimate of the coefficient of inter-rill erodibility. *Soil Science M.Sc Thesis*, University of Tabriz.
24. Morgan, R.P.C. 1995. *Soil Erosion and Conservation*. Longman, Essex, England.
25. Nelson, D.W. and Sommers, L.E. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter, In: Page, L.A., Miller, R.H., Kenney, D.R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Methods*, 2nd edition. American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 579-539.
26. Norhayati, M., Verloo, M., 1984. Characterization of organic matter in four soils of peninsular Malaysia. I. Extraction, fractionation and purification of humic substances. *Journal of Rubber Research Institute of Malaysia* 39-30, 32.
27. Oldeman, L. Hakkeling, R. and Sombroek, W. 1990. World map of the status of soil degradation, an explanatory note. International soil reference and information center, Wageningen, The Netherlands and the United Nations Environmental Program, Nairobi, Kenya.
28. Oliver, M. A. and Khayarat, A. L. 2001. A Geostatistical Investigation of the Spatial Variation of Radon in Soil. *Computer and Geosciences*, Vol, 27, pp: 957-939.

44. Wakernagel, H. 2002. Multivariate geostatistics. Springer press, 387pp.  
45. Yoder, R.E. 1936. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *Journal of American Society Agronomy*, Vol, 28, pp:351-337.  
46. Zhang, K. Li, S. Peng, W. and Yu, B. 2004. Erodibility of Agricultural Soils and Loess Plateau of China. *Soil Tillage Research*, Vol,76, pp:-157 165.  
47. Zuo, X. Zhao, H. Zhao, X. Zhang, T. Guo, Y. Wang, S. and Drake, S. 2008. Spatial pattern and heterogeneity of soil properties in sand dunes under grazing and restoration in Horqin Sandy Land, Northern China. *Soil Tillage Research*, Vol, 99, pp: 212–202.

subtropical China. *Geoderma*, Vol, pp: 99–115:85.  
41. Van Es, H. M. Ogden, C. B. Hill, R. L. Schindelbeck, R. R. and Tsegaye, T. 1999. Integrated assessment of space, time, and management-related variability of soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal*, Vol, 63, pp: 1608–1599.  
42. Van Meirvenne, M., 1991. Characterization of soil spatial variation using geostatistics. Ph.D. Theses. University of Gent. Belgium, Academic Press. 168pp.  
43. Viera, S. R. Nielsen, D. R. and Biggar, J.W. 1981. Spatial Variability of Field-Measured Infiltration Rate. *Soil Science Society of America Journal*, Vol, 45, pp:1048-1040.

