

## معرفی روش‌های مختلف نمونه‌برداری در مطالعات نقشه‌برداری رقومی خاک

لیلا لطف‌الهی<sup>۱</sup>، محمد امیر دلاور<sup>۲\*</sup>، محمد جمشیدی<sup>۳</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۸/۱۴)

### چکیده

برای جهان پر از دگرگونی، چالش‌های بی‌شماری در نقشه‌برداری رقومی خاک وجود دارد. یکی از این چالش‌ها، روش نمونه‌برداری است که نقش مهمی در فراهم آوردن اطلاعات مناسب برای نقشه‌برداری رقومی خاک و افزایش کارایی آن ایفا می‌کند. روش نمونه‌برداری کارآمد، با در نظر گرفتن تعداد نمونه، تغییرات مکانی و هزینه، راهی برای شناسایی مجموعه‌ای از مکان‌های پراکنده نمونه‌برداری در یک فضای جغرافیایی است که پوشش مکانی مناسبی از ویژگی‌ها را همراه داشته باشد. پوشش مکانی مناسب ویژگی‌ها برآورد دقیق پارامترهای رگرسیونی را پشتیبانی و موجب می‌شود تا میان‌یابی مکانی مؤثری واقع شود. در ارزیابی خاک، شمار نمونه‌های جمع‌آوری‌شده، بیشتر با محدودیت‌های زمان و هزینه روبرو است. همچنین، کمبود جاده‌های دسترسی، پوشش گیاهی انبوه و زمین‌های ناهموار، در بازدید از مناطق خود باعث محدودیت‌های بیشتری می‌شوند. این کمبودها، انگیزه به‌کارگیری روش‌های نمونه‌برداری نیرومندتری را ایجاد می‌کند تا بتوان تغییرات مکانی خاک و ویژگی‌های آن را برای کاهش شمار نمونه، زمان و هزینه مورد نیاز، به‌خوبی فراهم کند. به‌گونه‌ای که، کیفیت پایانی نقشه‌ها پشتیبانی شود. این مقاله برخی از مهم‌ترین روش‌های مختلف نمونه‌برداری‌های آماری و هندسی که الگوی نمونه‌برداری هندسی در یک فضای جغرافیایی را بهینه‌سازی می‌کند، بررسی و نقاط قوت و ضعف این روش‌ها را با توجه به پوشش مکانی، سادگی، دقت و کارایی بیان می‌کند. نتایج نشان داد که از نظر دقت و کارایی، نمونه‌برداری تصادفی طبقه‌بندی‌شده بالاترین دقت و صحت را داشته و به‌طور گسترده استفاده شده است. نمونه‌برداری پوشش مکانی، از نظر پوشش مکانی بهترین روش است. نمونه‌برداری تصادفی ساده، نمونه‌برداری شبکه‌ای و نمونه‌برداری پوشش مکانی، از نظر سادگی در مراحل طراحی و پیاده‌سازی، ساده‌ترین روش‌های نمونه‌برداری هستند. در میان روش‌های نمونه‌برداری مطالعه شده، روش نمونه‌برداری مکعب لاتین مشروط، رایج‌ترین روش استفاده و بسیار توصیه شده است و نمونه‌برداری تصادفی طبقه‌بندی‌شده و نمونه‌برداری پوشش مکانی، به‌عنوان کارآمدترین روش‌هایی هستند که الگوی نمونه‌برداری را در فضای جغرافیایی بهینه‌سازی می‌کنند.

**واژه‌های کلیدی:** نمونه‌برداری کلاسیک، نمونه‌برداری آماری، نمونه‌برداری هندسی

لطف‌الهی ل، دلاور م. ا. جمشیدی م. ۱۳۹۹. معرفی روش‌های مختلف نمونه‌برداری در مطالعات نقشه‌برداری رقومی خاک. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۸، شماره ۳. صفحه: ۲۰۲-۲۱۹.

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان  
 ۲- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان (مکاتبه کننده)  
 ۳- استادیار موسسه تحقیقات خاک و آب کرج  
 \*پست الکترونیک: [amir-delavar@znu.ac.ir](mailto:amir-delavar@znu.ac.ir)

## مقدمه

ارزیابی خاک، آمیزه‌های از نمونه‌برداری مزرعه‌ای، تجزیه‌های آزمایشگاهی، پردازش داده‌ها و نقشه‌برداری است که هدف آن، طبقه‌بندی انواع ویژگی‌های خاک در یک منطقه مشخص و تولید نقشه‌های خاک به‌عنوان محصول پایانی است (McBratney *et al.*, 2000). نقشه‌های خاک تولید شده در ارزیابی‌های سنتی خاک، توسط توصیف کیفی مرزهای خاک و بر پایه درک عوامل تشکیل دهنده خاک هستند (Jenny, 1941) و به شدت تحت تأثیر نظر فردی کارشناسان و تجربه عملی ارزیابان (Clifford *et al.*, 2014) قرار دارند. بنابراین، اطلاعات منتقل شده توسط نقشه‌های سنتی خاک، معمولاً کیفی و تا اندازه‌ای ذهنی<sup>۱</sup> و برای ارائه یک پیش‌بینی کیفی خوب، ناموفق هستند. افزون بر این، با پیشرفت فن‌آوری‌های سامانه‌های موقعیت‌یابی جهانی<sup>۲</sup>، فن‌های سنجش‌از‌دور، تجزیه‌های مکانی و پیشرفت‌های محاسباتی در سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی<sup>۳</sup>، نقشه‌برداری رقومی خاک تبدیل به یک رویکرد قوی شده است و برای پیش‌بینی پیوسته و کمی ویژگی‌های خاک، با اطمینانی بیشتر از نقشه‌برداری‌های سنتی خاک به کار گرفته می‌شود (McBratney *et al.*, 2003). مفهوم کلیدی آن‌سوی نقشه‌برداری رقومی خاک<sup>۴</sup>، یک رابطه ریاضی و آماری (مدل پیش‌بینی‌شده) میان ویژگی‌های اندک و تراکم بالای اندازه‌گیری‌های خاکی با متغیرهای محیطی دست‌یافتنی، مانند مدل رقومی ارتفاع<sup>۵</sup>، خصوصیات طیفی<sup>۶</sup>، القای الکترومغناطیسی<sup>۷</sup> و دیگر صفات خاک است (Taghizadeh-Mehrjardi *et al.*, 2014; Pahlavan-Rad & Akbarimoghaddam., 2018; Nabiollahi *et al.*, 2018; Jafari *et al.*, 2014). یک‌بندجدایی‌ناپذیر در فرآیند نقشه‌برداری رقومی، روش نمونه‌برداری است که برنامه کاری برای جمع‌آوری نمونه‌های نماینده پوشش دهنده منطقه مورد بررسی را فراهم و ورودی درخور اعتمادی برای ساختن مدل پیش‌بینی با متغیرهای محیطی ایجاد می‌کند (Kidd *et al.*, 2015). روش نمونه‌برداری از آنجایی که نتایج آزمایش‌های بعدی و واکاوی داده‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد، فرآیند بسیار مهمی است (De Zorzi *et al.*, 2008). در برخی موارد، خطای برآمده از عدم به‌کارگیری یک روش نمونه‌برداری مطلوب، می‌تواند بسیار بیشتر از خطای مرتبط با آماده‌سازی نمونه‌ها یا واکاوی داده‌ها باشد (Markert, 2007). اندازه نمونه نیز یک عنصر کلیدی در فرآیند نمونه‌برداری است که باید از پیش گزینش شده باشد (Biswas & Zhang., 2018). در بیشتر موارد، اندازه نمونه با بودجه موجود برای کار مزرعه و تجزیه‌های آزمایشگاهی گزینش می‌شود. از سوی دیگر، اگر دقت کار برای ما مهم باشد، تعداد نمونه‌های از پیش تعیین شده باید بتواند متغیرهای مکانی را به خوبی پوشش دهد که در این صورت معمولاً به تعداد نمونه‌های بیشتری نیاز است. تعادل میان هزینه و دقت قابل قبول، تعداد نمونه دلخواه را تعیین می‌کند (Brungard & Boettinger, 2010). در تحقیقی اثر تعداد نمونه را بر پارامترهای واریوگرام<sup>۸</sup> مقایسه و نتیجه‌گیری کردند که ۵۰ نمونه برای آماده‌سازی یک نقشه میان‌یابی درخور اعتماد برای هر ۲۴ هکتار زمین کشاورزی کافی است. به عبارتی، در حدود دو نمونه در هر هکتار زمین برای انعکاس مطلوب تغییرات ویژگی‌های خاک کفایت می‌کند (Vašát *et al.*, 2012). انتخاب محل دقیق نقاط نمونه‌برداری نیز یکی دیگر از اجزایی است که توسط روش‌های نمونه‌برداری گوناگون مدنظر قرار دارد. از این رو، روش نمونه‌برداری روش سریعی برای گزینش داده‌های درست از مکان‌های نمونه‌برداری است (Brus & De Gruijter., 1997). انگیزه بنیادین روش نمونه‌برداری در نقشه‌برداری رقومی ارائه ورودی‌های درخور اعتماد برای پیش‌بینی مدل‌ها است. بیشتر روش‌های نمونه‌برداری در نقشه‌برداری رقومی برای ارائه پوشش مکانی مناسب از منطقه یا پوشش مناسب از تغییرات ویژگی‌های خاکی مورد نظر طراحی شده‌اند (Minasny & McBratney, 2006). یک روش نمونه‌برداری می‌تواند در فضای جغرافیایی<sup>۹</sup> فضای مشخصه<sup>۱۰</sup> یا در هر دو فضا بهینه شود (Hengl *et al.*, 2001).

1. Subjective  
2. Global Positioning System, GPS  
3. Geographic Information Systems, GIS  
4. Digital Soil Mapping, DSM  
5. Digital Elevation Model, DEM  
6. Spectra characteristics  
7. Electromagnetic induction

8 Variogram  
9 Geographical space  
10. Feature space

کتب، ارتباط چکیده مقالات با موضوع) بیش از ۱۵۰ مقاله در راستای نقشه‌برداری رقومی خاک که در بازه زمانی ۱۹۹۷ تا ۲۰۲۰ منتشر شده بودند بررسی و ۶۷ مورد که معیار راه‌یابی به مطالعه حاضر را داشتند، نهایی و به‌طور کامل مطالعه شدند. معیارهای ورود به مطالعه حاضر دربرگیرنده پر استناد و معتبر بودن مقاله، به‌کارگیری روش‌های نوین، روش‌های کنونی و فراگیر نمونه‌برداری و نقشه‌برداری رقومی خاک بود. روش‌های نمونه‌برداری کلاسیک بر پایه استنتاج آماری دقیق در نقاطی که به‌طور برابر در یک فضای جغرافیایی پخش می‌شوند، گزینش شده‌اند.

#### نمونه‌برداری تصادفی ساده<sup>۱</sup>

در این روش، هر واحد نمونه‌برداری به‌صورت تصادفی و مستقل انتخاب می‌شود. همه واحدهای نمونه‌برداری پتانسیل کم و بیش یکسانی دارند و بدین گونه اجازه برآورد بی‌طرفانه از میانگین و واریانس را می‌دهند (Webster & Lark, 2012). این روش نمونه‌برداری بیشتر برای مزارع یکنواخت بکار گرفته می‌شود و به آسانی قابل انجام است (Fitzgerald, 2010; Zhang & Zhang, 2012). به‌طور کلی، روش نمونه‌برداری تصادفی یک روش کم‌کارآمد است و کاربرد آن در مناطق با اطلاعات محیطی (اقلیم، پستی و بلندی، مواد مادری و ...) یا آزمایشگاهی قابل دسترس به‌منظور کاهش اندازه نمونه با مشکلات فراوانی رو به رو است. افزون بر این، نقاط نمونه‌برداری در این روش به شکل خوشه‌ای ساده است و پوشش مکانی خوبی را پشتیبانی نمی‌کند (Fitzgerald, 2010). از این‌رو، پژوهش‌های محدودی از این راهکار برای نقشه‌برداری رقومی استفاده نموده‌اند. در پژوهشی، روش نمونه‌برداری تصادفی ساده برای نقشه‌برداری مقادیر رس خاک در بخش زیرین و مقدار کربن آلی در بخش بالایی خاک به‌کاررفته است (Evans & Hartemink, 2014; Adhikari & Hartemink, 2015). طرح کلی این روش نمونه‌برداری در شکل ۱ نشان داده شده است.

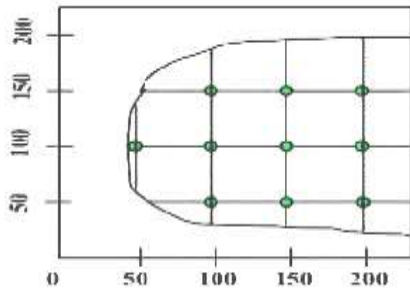
2003). استدلال برخی پژوهش‌ها این‌گونه است که برای کالیبراسیون، نیازی به پوشش مکانی خوب در مقایسه با پوشش مناسبی از متغیرهای محیطی نیست. روش نمونه‌برداری بهینه باید به‌طور هم‌زمان تغییرات ویژگی‌های خاک در هر دو فضای مشخصه و جغرافیایی را نشان دهد (Minasny & McBratney, 2006). در یک بررسی روش طبقه‌بندی با دامنه برابر، پیشنهاد شد که در آن دامنه، متغیر پیش‌بینی به خوشه‌هایی با عرض یکسان بخش می‌شوند و سپس نمونه‌ها به‌طور تصادفی در هر خوشه بر پایه وزن‌دهی داده شده گزینش می‌شوند (Hengl et al., 2003). پراکندگی خوب در فضای مشخصه، اطمینانی از برآورد دقیق ضرایب رگرسیون را فراهم می‌کند، درحالی‌که میان‌یابی درخور اعتماد از داده‌های نمونه به پراکندگی خوب در فضای جغرافیایی بستگی دارد (Brus & Heuvelink, 2007). برآورد مکانی متغیرهای محیطی، زمانی که مکان‌های نمونه‌برداری به‌طور یکسان در فضای جغرافیایی گسترش یافته است، دقت بیشتری دارد. بنابراین، گزینش روش نمونه‌برداری برای نقشه‌برداری رقومی با انگیزه بررسی برتری و معایب آن، اصلی بنیادین است و برای انتخاب روش نمونه‌برداری مناسب برای رسیدن به هدف مورد پژوهش، بایستی جانب احتیاط را رعایت کرد (Walvoort et al., 2010). ارزیابی جامع روش‌های نمونه‌برداری رایج و قابل اجرا در نقشه‌برداری رقومی، تصمیم‌گیری آگاهانه برای محققان، مشاوران و نقشه‌برداران را فراهم می‌کند. بنابراین، انگیزه بنیادین این مقاله شرح مفصلی از منطق، برتری‌ها و معایب چندین روش نمونه‌برداری رایج است که به‌طور گسترده‌ای در نقشه‌برداری رقومی خاک به‌کار گرفته می‌شوند.

#### بررسی پیشینه تحقیقات

برای شناسایی مطالعات منتشرشده مرتبط، واژه‌ها و عبارات کلیدی مدنظر در موتورهای جویسگر Google Scholar، Google و پایگاه‌های علمی الکترونیک Science Direct، Springer link، Taylor & Francis، ResearchGate، Magiran، SID Irandoc، CIVILICA در بازه زمانی اردیبهشت تا خرداد ۱۳۹۹ جستجو شد. سپس با بازبینی اجمالی (بررسی سرفصل

1 Simple Random Sampling, SRS

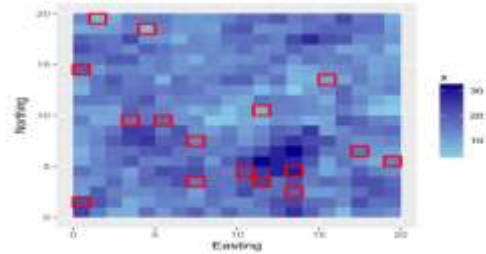
است (Taghizadeh Mehrjerdi, 2015). در مطالعه‌ای به‌منظور بررسی چگونگی عناصر غذایی برای کشت توتون و تنباکو، از روش نمونه‌برداری شبکه‌ای و نمونه‌برداری تصادفی ساده استفاده شده و مشخص شده است که روش نمونه‌برداری شبکه‌ای، با دقت بیشتری خواص خاک را برای کشت تنباکو پیش‌بینی می‌کند (Houlong *et al.*, 2016). طرح کلی این روش نمونه‌برداری در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- روش نمونه‌برداری شبکه‌ای منظم (Singh, 2011).  
Figure 2. Regular network sampling method (Singh, 2011).

#### نمونه‌برداری خوشه‌ای<sup>۲</sup>

نمونه‌برداری خوشه‌ای هزینه‌ها، زمان و تعداد نقاط نمونه‌برداری را بدون داشتن دقت کافی، کاهش می‌دهد. در نمونه‌برداری خوشه‌ای، چندین واحد نمونه‌برداری دربرگیرنده خوشه‌هایی هستند که به‌طور تصادفی گزینش می‌شوند. هنگامی که یک خوشه گزینش می‌شود، همه نقاط نمونه‌برداری درون خوشه را نیز در برمی‌گیرد (Brus *et al.*, 2011). با این وجود، نمونه‌برداری خوشه‌ای نمی‌تواند نقاط نمونه‌برداری را به‌طور یکسان در یک منطقه توزیع کند. این روش بیشتر برای مناطق ناهموار با محدودیت دسترسی به نقاط نمونه‌برداری انجام می‌شود. در تحقیقی برای نقشه‌برداری رقومی کربن آلی در دو منطقه مشابه، یکی با دسترسی ضعیف و دیگری قابل‌دسترس، از این روش استفاده شده و نتایج نشان داده است که مقادیر شاخص ریشه میانگین مربعات خطای پیش‌بینی شده در مناطق با دسترسی کم و قابل‌دسترس به ترتیب ۰/۶۷ و ۰/۷۲ بود که گویای آن است که این روش می‌تواند برای پیش‌بینی کربن آلی خاک در مناطق با دسترسی کم به اندازه مناطق غیر قابل دسترس موفقیت‌آمیز باشد.



شکل ۱- روش نمونه‌برداری تصادفی ساده (نمونه‌ها در نقشه متغیرها رسم شده‌اند) (Brus, 2019).

Figure 1. Simple random sampling method (samples were plotted on a map of variables) (Brus, 2019).

#### نمونه‌برداری شبکه‌ای منظم<sup>۱</sup>

یک روش نمونه‌برداری ساده و محبوب برای نقشه‌برداری رقومی خاک، نمونه‌برداری شبکه‌ای منظم است. در این روش، برخلاف روش نمونه‌برداری تصادفی ساده، نیازی به قرار دادن تصادفی شبکه روی منطقه نیست. بلکه شبکه می‌تواند به گونه‌ای طراحی شود که بهترین پوشش از منطقه مورد بررسی فراهم شود (Brus, 2019). این روش نمونه‌برداری، پوشش خوبی از فضای جغرافیایی را فراهم می‌کند و مناطق مورد بررسی را به شبکه‌های منظم تقسیم‌بندی می‌کند. سپس گره‌های شبکه‌ها به‌عنوان نقاط نمونه‌برداری گزینش می‌شوند. در این روش، شبکه منظم مربعی و مستطیل شکل بیشتر مورد توجه است (Poggio *et al.*, 2013)، اگرچه شبکه‌های مثلثی متساوی‌الاضلاع نیز به کار گرفته شده‌اند (Brus, 2019; Michot *et al.*, 2013; Malone *et al.*, 2011). شبکه‌های مثلثی متساوی‌الاضلاع، بیشترین کارایی را از نظر پوشش در فضای جغرافیایی، فضای مشخصه، دقت و سادگی دارند. زیرا بازه میان مرکز شبکه و نقطه نمونه‌برداری در یک مثلث کمترین اندازه است (Webster & Lark, 2012). این راهکار برای شناسایی اجمالی مزرعه‌ای که پیش‌تر نمونه‌برداری نشده است، یک روش نمونه‌برداری کاربردی است (Brus, 2007). به‌هرحال، روش نمونه‌برداری شبکه‌ای با برخی محدودیت‌های آماری و کاربردی همراه است (Brus *et al.*, 2006). در تحقیقی استفاده از آنالیز واریوگرام برای تعیین فواصل شبکه پیشنهاد شد و در تحقیقی دیگر از حداقل کردن واریانس کریجینگ برای مشخص کردن محل نمونه‌ها استفاده شده

2 Cluster Sampling, CS

3 Root Mean Squared Error of Prediction, RMSEP

1. Grid Sampling, GS

به نمونه برداری آشیانه‌ای موسوم است (Thomas *et al.*, 2012). طرح کلی این روش نمونه برداری در شکل ۴ نشان داده شده است.

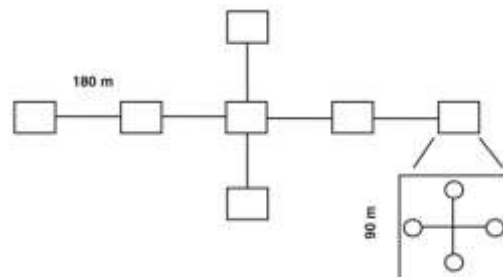


شکل ۴- روش نمونه برداری ترانسکت (Ließ *et al.*, 2012)  
Figure 4. Transect sampling method (Ließ *et al.*, 2012)

#### نمونه برداری آشیانه‌ای<sup>۳</sup>

روش نمونه برداری آشیانه‌ای برای برآورد اجزای وارپانس در دو یا چند مقیاس مکانی استفاده می‌شود و به‌عنوان یک روش نمونه برداری سلسله مراتبی، قادر به جداسازی تغییرات سطوح مختلف یک طرح است (Brus, 2019). جداسازی تغییرات به روش هندسی انجام می‌شود. به عنوان مثال، فواصل دو، هشت، ۳۲، ۱۲۸ و ۵۱۲ متر منظور می‌شوند. نمونه برداری آشیانه‌ای شامل سه مرحله است: در مرحله اول، چندین ایستگاه اصلی به‌گونه‌ای انتخاب می‌شوند که منطقه را به خوبی پوشش دهند. به عنوان مثال، با به‌کارگیری روش نمونه برداری پوشش مکانی. در مرحله دوم، از هر یک از ایستگاه‌های اصلی به‌عنوان نقطه شروع استفاده می‌شود تا یک نقطه را با فاصله‌ای مساوی با بزرگ‌ترین فاصله تفکیکی انتخاب شده (برای مثال ۵۱۲ متر)، در یک مسیر تصادفی از ایستگاه اصلی انتخاب کنند. در مرحله سوم، هر نقطه انتخاب شده در مراحل قبلی به‌عنوان نقطه شروع استفاده می‌شود. برای انتخاب یک نقطه در فاصله‌ای معادل با دومین فاصله بزرگ جدا شده و به همین ترتیب، همه نقاط انتخاب شده در مراحل قبلی شامل نمونه برداری آشیانه‌ای می‌شود (Brus, 2019). نمونه برداری آشیانه‌ای در بیشتر موارد به‌تنهایی استفاده نمی‌شود و به‌عنوان یک روش کمکی برای ثبت تغییرات در گستره بازه‌های مختلف به دیگر روش‌های نمونه برداری اضافه می‌شود. طرح کلی این روش نمونه برداری در شکل ۵ نشان داده شده است.

بنابراین، روش نمونه برداری خوشه‌ای برای مناطقی که مشکلات دسترسی مشابه دارند، به‌ویژه در پژوهش‌های پایه‌ای و برای طراحی روش نمونه برداری در ارزیابی‌های دو مرحله‌ای<sup>۱</sup> پیشنهاد می‌شود (Cambule *et al.*, 2013). طرح کلی این روش نمونه برداری در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- روش نمونه برداری خوشه‌ای که جزئیات منطقه پشتیبانی برای نمونه برداری در هر ایستگاه نشان داده شده است (Cambule *et al.*, 2013)

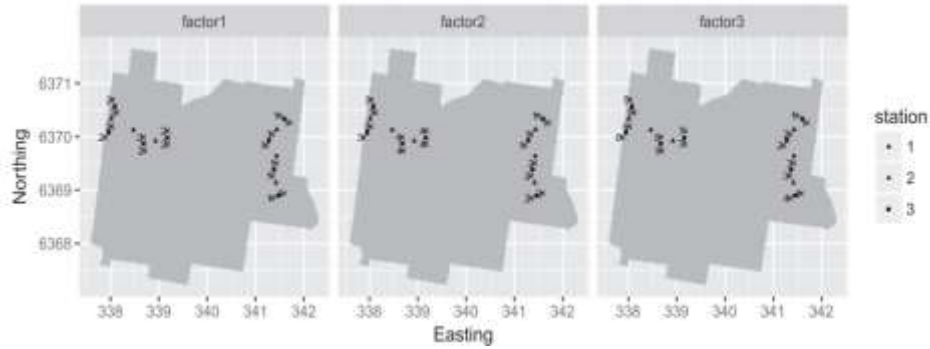
Figure 3. Cluster sampling method shows the details of the support area for sampling at each station (Cambule *et al.*, 2013)

#### نمونه برداری ترانسکت<sup>۲</sup>

در نمونه برداری ترانسکت، نقاط نمونه برداری بیشتر در یک ردیف مرتب شده‌اند و می‌تواند به‌عنوان یک خوشه در نظر گرفته شود (Biswas & Zhang, 2018). در مناطق ناهموار و کوهستانی، نمونه برداری در راستای یک ترانسکت مقبولیت بیشتری در مقایسه با نمونه برداری تصادفی دارد. زیرا تعداد نقاط نمونه برداری را به حداکثر می‌رساند و کارایی آن را از نظر پوشش مکانی و دقت افزایش می‌دهد (Thomas *et al.*, 2012). این روش نمونه برداری برای نقشه برداری کربن آلی در شمال و شمال شرقی چین (Zhou *et al.*, 2016)، برای نقشه برداری بافت خاک در مناطق کوهستانی (Ließ *et al.*, 2012) و به‌عنوان روش نمونه برداری کمکی برای مطالعه ویژگی‌های پستی و بلندی (Samyn *et al.*, 2012; Qin *et al.*, 2012) استفاده شده است. معمولاً فواصل نمونه برداری برابر استفاده شده در نمونه برداری ترانسکت را می‌توان برای اتخاذ فواصل نمونه برداری متغیر (فواصل توخالی) مانند صفر، سه، ۳۰، ۱۵۰، ۵۰۰ و ۱۵۰۰ متر تغییر داد و برای تطبیق تغییرات در محدوده‌های مختلف، فاصله را اصلاح نمود که این حالت

3 Nested Sampling, NS

1 Two-stage surveys  
2 Transect Sampling, TS



شکل ۵- روش نمونه‌برداری آشیانه‌ای (Brus, 2019).  
Figure 5. Nest sampling method (Brus, 2019).

نظر نمی‌گیرد (Brus, 2019). طرح کلی این روش نمونه‌برداری در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶- روش نمونه‌برداری پوشش مکانی (Brus, 2019).  
Figure 6. Spatial coverage sampling method (Brus, 2019).

### نمونه‌برداری تصادفی طبقه‌بندی شده<sup>۳</sup>

در نمونه‌برداری تصادفی طبقه‌بندی شده، یک منطقه به‌طور یکنواخت و یا غیریکنواخت و بر پایه اطلاعات محیطی قابل دسترس، به چندین طبقه بخش می‌شود. سپس، چندین نمونه به‌صورت تصادفی درون هر طبقه گزینش خواهد شد (Biswas & Zhang, 2018). اندازه نمونه در هر طبقه بسته به مساحت طبقات مشخص می‌شود. نمونه‌برداری تصادفی طبقه‌بندی شده این امکان را فراهم می‌کند تا صفات همانند با کمینه تغییرپذیری در هر یک از طبقات قرار گیرند، ولی برای طبقات مختلف ویژگی‌ها متفاوت است. متغیرهای محیطی مختلف برای طبقه‌بندی استفاده می‌شوند. مانند: مدل رقومی ارتفاع (Jafari et al., 2012)، کاربری اراضی (Vasques et al., 2010)، مواد مادری یا ترکیب سنگ‌شناسی (Sun et al., 2012)، کلاس‌های خاک

### نمونه‌برداری پوشش مکانی<sup>۱</sup>

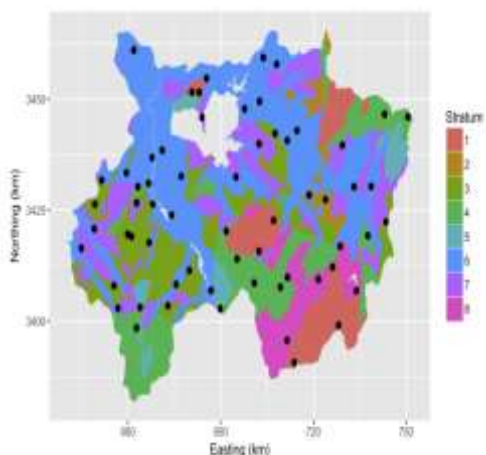
در مناطق به شکل نامنظم، پراکندگی جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری در سراسر منطقه مورد بررسی با نمونه‌برداری شبکه‌ای منظم قابل اجرا است، اما می‌تواند در کمترین مقدار بهینه خود باشد. چرا که در برخی مناطق فاصله تا نزدیک‌ترین نقطه نمونه‌برداری کم و بیش زیاد است. در این حالت، محدودیت نمونه‌برداری شبکه‌ای منظم کاهش می‌یابد. بدین صورت که جهت نقاط شبکه‌ای منظم به نواحی بدون نقطه نمونه‌برداری سوق داده می‌شوند تا الگوی مکانی نامنظم شود که در نتیجه، روش نمونه‌برداری پوشش مکانی حاصل می‌شود (Brus, 2019). هدف اصلی این راهکار، به دست آوردن پوشش مکانی مناسب با به حداقل رساندن کوتاه‌ترین بازه میانگین مربعات با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی k-means است (Walvoort et al., 2010). در این روش، مانند روش نمونه‌برداری طبقه‌بندی شده، معیار هندسی از نظر فاصله بین گره‌های شبکه تفکیک شده تعریف می‌شود و نقاط نمونه‌برداری به حداقل می‌رسد. در این روش، از مختصات مکانی مراکز سلول‌های شبکه تفکیک شده به‌عنوان متغیر در خوشه‌بندی k-means سلول‌های شبکه استفاده می‌شود (Brus, 2019) و مرکز خوشه‌ها به‌عنوان نقاط نمونه‌برداری انتخاب خواهند شد (Brus et al., 2006; Brus., 2019). این روش به‌طور گسترده در نقشه‌برداری رقومی کاربرد ندارد و تنها در تهیه کلاس‌های نقشه خاک در مقیاس ملی قابل استفاده است (Kempen et al., 2015). این روش نمونه‌برداری، داده‌های به دست آمده از نمونه‌برداری‌های پیشین را در

1 Spatial Coverage Sampling, SCS

2 Mean Squared Shortest Distance, MSSD

3 Stratified Random Sampling, StRS

تصادفی ساده و نمونه‌برداری شبکه‌ای نمی‌توانند پوشش مکانی خوبی را در فضای مشخصه در مقایسه با نمونه‌برداری مکعب لاتین فراهم آورند. طرح کلی روش نمونه‌برداری تصادفی طبقه‌بندی شده در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷- روش نمونه‌برداری تصادفی طبقه‌بندی شده ( Brus, 2019).

Figure 7. Classified random sampling method (Brus, 2019).

#### نمونه‌برداری زمین آماری<sup>۴</sup>

نمونه‌برداری زمین آماری الگوی نمونه‌برداری در فضای جغرافیایی را با به حداقل رساندن میانگین واریانس کریجینگ<sup>۵</sup> یا حداکثر واریانس کریجینگ<sup>۶</sup> بهینه می‌کند. همبستگی مکانی و مقیاس تغییرات ویژگی‌های خاک می‌تواند توسط واریوگرام تعیین شود که بیشتر برای بهینه‌سازی روش‌های نمونه‌برداری می‌توان از آن بهره برد. به‌کارگیری مدل مناسب و اطلاع از ساختار مکانی متغیرها، دو پیش‌نیاز برای نمونه‌برداری زمین آماری است. با این حال، واریوگرام باقی‌مانده و مدل پیش‌بینی شده معمولاً برای یک منطقه ناشناخته در دسترس نیست. تاکنون گزارشی از به‌کارگیری این روش در نقشه‌برداری رقومی موجود نیست، گرچه این روش می‌تواند برای بهبود الگوهای نمونه‌برداری برای نواحی که پیش از این بررسی شده‌اند، سودمند باشد (Kerry & Oliver, 2004). طرح کلی این روش نمونه‌برداری در شکل ۸ نشان داده شده است.

(Sun *et al.*, 2014)، کلاس زهکشی (Karunaratne, *et al.*, 2012)، هدایت الکتریکی ظاهری (Koszinski *et al.*, 2012) و تابش دریافتی از خورشید (Brown *et al.*, 2012). افزون بر این، مربع‌های برابر نیز می‌توانند برای طبقه‌بندی به کار گرفته شوند. همچنین، این روش، روش نمونه‌برداری تصادفی نظام‌مند نیز نامیده می‌شود (Kerry *et al.*, 2012). در یک بررسی منطقه مورد مطالعه بر پایه مواد مادری و کلاس زهکشی طبقه‌بندی شد و با استفاده از نمونه‌برداری پوشش مکانی، نقاط نمونه‌برداری درون هر طبقه گزینش شد (Sun *et al.*, 2012). نمونه‌برداری تصادفی طبقه‌بندی شده یک روش نمونه‌برداری کارآمد است که از خوشه‌بندی نقاط نمونه‌برداری پرهیز می‌کند. این روش برای دستیابی به دقت لازم، نیاز به نمونه‌های کمتری دارد و بیشترین سطح پوششی درون حوزه و متغیرهای محیطی را فراهم می‌کند.

پژوهش‌های پیشین کارآیی این روش نمونه‌برداری را با پرداختن به توانایی آن در تولید دوباره متغیرهای بنیادین یا میانگین ریشه مربعات خطا<sup>۱</sup> میان ویژگی‌های پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده خاک مقایسه کرده‌اند. در تحقیقی، توزیع کربن خاک توسط نمونه‌برداری تصادفی طبقه‌بندی شده بهتر از نمونه‌برداری تصادفی ساده قلمداد گردیده است (Wheeler *et al.*, 2012). در یک بررسی، نمونه‌برداری شبکه‌ای، نمونه‌برداری تصادفی ساده، نمونه‌برداری تصادفی طبقه‌بندی شده، نمونه‌برداری مکعب لاتین مشروط و سایر روش‌های نمونه‌برداری بر پایه خودهمبستگی مکانی<sup>۲</sup> مقایسه شده‌اند.

نتایج نشان داده است که پایین‌ترین دقت به نمونه‌برداری تصادفی ساده و به دنبال آن نمونه‌برداری شبکه‌ای مربوط بود و بهترین نتیجه از نمونه‌برداری به روش مکعب لاتین مشروط و حتی بهتر از نمونه‌برداری تصادفی طبقه‌بندی شده حاصل گردیده است (Falk *et al.*, 2011). یافته‌های پژوهش ورشام و همکاران (Worsham *et al.*, 2012) بیان‌گر کارآیی نامناسب نمونه‌برداری تصادفی طبقه‌بندی شده در مقایسه با نمونه‌برداری مکعب لاتین مشروط بود. مولدر و همکاران (Mulder *et al.*, 2013) نشان دادند که نمونه‌برداری

4 Geostatistical sampling

5. Average kriging variance, AKV

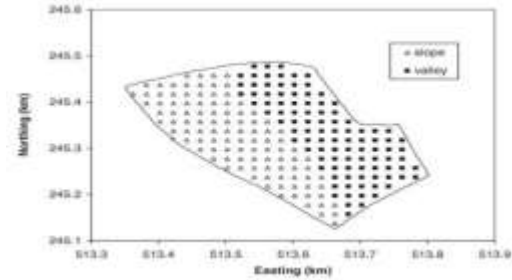
6. Maximum kriging variance, MaxKV

1 Systematic Random Sampling, SyRS

2 Root Mean Squared Error, RMSE

3 Spatial autocorrelation

Minasny & McBratney, 2006) نمونه‌برداری مکعب لاتین مشروطاً را با نمونه‌برداری تصادفی ساده و نمونه‌برداری تصادفی طبقه‌بندی شده مقایسه کردند و برتری نمونه‌برداری مکعب لاتین مشروط بر دیگر روش‌های نمونه‌برداری را نشان دادند. به همین ترتیب، ورشام و همکاران (Worsham *et al.*, 2012)، نمونه‌برداری مکعب لاتین مشروط را با نمونه‌برداری تصادفی ساده و نمونه‌برداری تصادفی طبقه‌بندی شده مقایسه کردند و پوشش مناسبی در فضای مشخصه و فضای جغرافیایی از محتوای کربن آلی خاک را در روش نمونه‌برداری مکعب لاتین مشروط مشاهده کردند (Worsham *et al.*, 2012). تقی‌زاده مهرجردی و همکاران (Taghizadeh Mehrjardi *et al.*, 2015) سه روش نمونه‌برداری مکعب لاتین، فازی k-means و تصادفی را مقایسه نمودند و دریافتند که روش مکعب لاتین به خوبی قادر به تعیین توزیع محل‌های نمونه‌برداری در منطقه مورد مطالعه می‌باشد، به‌طوریکه فراوانی محل‌های منتخب بسیار به فراوانی کل متغیرهای کمکی شبیه بود. مولدر و همکاران (Mulder *et al.*, 2013) به سنجش کارایی نمونه‌برداری مکعب لاتین مشروط و نمونه‌برداری مکعب لاتین با اعمال محدودیت‌هایی در مقایسه با نمونه‌برداری تصادفی ساده و نمونه‌برداری تصادفی سامانمند پرداختند و نشان دادند که نمونه‌برداری مکعب لاتین مشروط به علت پوشش مکانی مناسب از ویژگی‌های مورد نظر خاک، برتر از دیگر روش‌های نمونه‌برداری بود. رامیرز لوپز و همکاران (Ramirez-Lopez *et al.*, 2014) برتری نمونه‌برداری مکعب لاتین مشروط به نمونه‌برداری کنارد-استون و فازی c-means را نشان دادند. در تحقیقی دو مدل SRS و cLHS بررسی شد و نتایج نشان داد که از نظر دقت نقشه، دو مدل با هم معادل‌اند و مدل cLHS در ترکیب با کریجینگ یا جنگل تصادفی برای نقشه‌برداری دقیق‌ترین پیش‌بینی را ارائه می‌دهد (Wadoux & Brus, 2019). نتایج یک بررسی مرتبط گویای آن بود که نمونه‌برداری مکعب لاتین می‌تواند تنوع بیشتری را در فضای نمونه نسبت به نمونه‌برداری تصادفی ساده ثبت



شکل ۸- روش نمونه‌برداری زمین‌آماری و واحدهای زمین منظر برای هر نقطه (Kerry & Oliver, 2004).

Figure 8. Geostatistical Sampling method and landscape units for each point (Kerry & Oliver, 2004).

### نمونه‌برداری مکعب لاتین<sup>۱</sup>

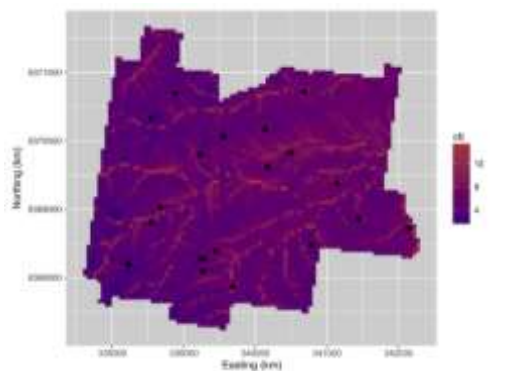
از این روش نمونه‌برداری برای پیش‌بینی ویژگی‌های خاک و راهنمای نقشه‌برداری رقومی از متغیرهای محیطی کمکی که با ویژگی‌های مورد نظر خاک رابطه خطی دارند، می‌توان استفاده نمود (Minasny & McBratney, 2006). نمونه‌برداری مکعب لاتین، قوی‌ترین رابطه میان متغیرهای محیطی و ویژگی مورد بررسی را پدید می‌آورد و دقت و اطمینان بیشتری نیز در نقشه‌برداری رقومی و پیش‌بینی مدل دارد (Brus *et al.*, 2006). با این حال، پوشش مکانی خوب ممکن است تضمین‌کننده پوشش مناسبی از متغیرهای محیطی نباشد (Lillesand & Kiefer, 1994). بنابراین، بیشترین توجه به نمونه‌برداری در فضای مشخصه متمرکز شده است که توزیع مکانی واقعی یا محدوده متغیرهای محیطی را توصیف می‌کند. نمونه‌برداری مکعب لاتین یک روش نمونه‌برداری تصادفی با بیشترین مقدار طبقه‌بندی است که پوشش کاملی از توزیع متغیرها را پشتیبانی می‌کند (Minasny & McBratney, 2006) و در اصل برای گزینش کارساز مجموعه‌ای از مقادیر متغیرهای ورودی مدل‌های رایانه‌ای گسترش داده شده است (Biswas & Zhang, 2018). برای انجام نمونه‌برداری مکعب لاتین، کوواریانس‌های مختلفی بکار برده شده است. ولی پستی و بلندی، به دلیل داشتن اطلاعات توپوگرافی، بیشتر به کار گرفته می‌شود. تا همین اواخر، مکعب لاتین یا مکعب لاتین مشروط به‌طور گسترده‌ای در نقشه‌برداری رقومی استفاده می‌شد و ثابت شده است که در توصیف ویژگی‌های خاک کارآمد است (Zeraatpisheh *et al.*, 2017).

2 Conditional Latin Hypercube Sampling, cLHS

1 Latin Hypercube Sampling, LHS



جاده‌ها و نقاط نمونه‌برداری لحاظ گردد. بر این اساس، کلیفورد و همکاران (Clifford *et al.*, 2014) نمونه‌برداری مکعب لاتین انعطاف‌پذیر را با اضافه کردن دو معیار بهینه‌سازی برای گسترش مکانی و سهولت دسترسی به الگوریتم اصلی ایجاد کردند. هدف این طراحی، پوشش مکانی مساوی از ویژگی‌ها و فضای جغرافیایی، تمرکز بر روی نقاط راحت‌تر و ارائه نقاط جایگزین است. نتایج نشان داد که مکعب لاتین مشروط در تعادل پراکندگی در فضای جغرافیایی و فضای مشخصه به خوبی عمل کرده و می‌تواند جفت نقاط با فاصله‌های کم تولید کند و مجموعه نمونه‌های جمع‌آوری شده توسط مکعب لاتین مشروط، خطای نقشه‌برداری کوچک‌تری را ایجاد می‌کند (Gao *et al.*, 2016). مکعب لاتین مشروط، قوی‌ترین الگوریتم نمونه‌برداری را ارائه می‌دهد و تحت تأثیر اندازه نمونه قرار نمی‌گیرد (Ng *et al.*, 2018). طرح کلی این روش نمونه‌برداری در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹- روش نمونه‌برداری مکعب لاتین (Brus, 2019).  
Figure 9. Conditional Latin Hypercube Sampling (Brus, 2019).

#### نمونه‌برداری فازی<sup>۵</sup> k-means

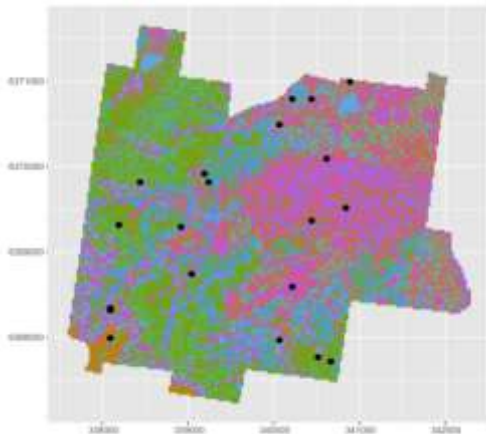
در نمونه‌برداری شبکه‌ای منظم و پوشش مکانی، انتخاب نقاط نمونه‌برداری کاملاً بر اساس مختصات مکانی است (Brus, 2019). در شرایطی که از داده‌های کمی در نمونه‌برداری خاک استفاده نشود، از ارتباط میان داده‌های کمی با ویژگی‌های خاک اطمینانی وجود ندارد. از این رو، بهترین روش مطالعه می‌تواند پراکندگی نقاط در فضای جغرافیایی باشد. منطقه مورد بررسی با الگوریتم خوشه‌بندی k-means به زیرمجموعه‌های فشرده جغرافیایی تقسیم می‌شود (Brus *et al.*, 2006).

کند (Xu *et al.*, 2005). با این حال، برخی از مقالات نیز به نقاط ضعف نمونه‌برداری مکعب لاتین اشاره دارند. فالک و همکاران (Falk *et al.*, 2011) چنین اظهار داشتند که نمونه‌برداری مکعب لاتین مشروط، دقت کمتری در به دست آوردن سطوح بالایی از پارامترها در مقایسه با نمونه‌برداری مکانی طبقه‌بندی شده دارد. نمونه‌برداری مکعب لاتین یک روش نمونه‌برداری تصادفی در فضای مشخصه است و برای کالیبراسیون، نیازی به گزینش تصادفی نقاط نمونه‌برداری نیست. با این حال، بیشتر معیارهای بهینه‌سازی برای برآورده کردن اهداف ویژه در فرآیند نقشه‌برداری و غلبه بر معایب گوناگون، رو به پیشرفت است. به‌طور کلی، چون نمونه‌برداری مکعب لاتین پوشش کاملی از متغیرهای محیطی را دارد و توانایی افزودن معیارهای بهینه‌سازی بیشتری برای دستیابی به هدفی ویژه را دارا است، کاربرد گسترده‌ای در نمونه‌برداری دارد. اگرچه ثابت شده که روش نمونه‌برداری مکعب لاتین در گزینش مکان‌های نمونه‌برداری بسیار کارآمد است، ولی کاربرد آن در مناطقی با پوشش گیاهی انبوه و فاقد جاده‌های مناسب، مشکل است (De Gruijter *et al.*, 2010). در این زمینه رودیر و همکاران (Roudier *et al.*, 2012)، یک روش جایگزین برای نمونه‌برداری در مناطقی که در دسترسی به آن با مشکل هزینه روبرو است، پیشنهاد دادند. این سامانه عوامل هزینه را که بازدارنده نمونه‌برداری مستقیم در برخی از نقاط، مانند فاصله از جاده‌ها، شیب، پوشش گیاهی، جریان آب و غیره می‌شود را در نظر می‌گیرد. علاوه بر این، رودیر و همکاران (Roudier *et al.*, 2012) هزینه دسترسی به نقاط نمونه‌برداری را از ویژگی‌های پوشش اراضی کم کرده و لایه جدیدی را به روش نمونه‌برداری مکعب لاتین مشروط اضافه کردند تا راهکاری را که در اجرا آسان‌تر است، به دست آوردند. با این حال، دقت در نمونه‌برداری به دلیل نمونه‌برداری کم در شیب‌ها و مناطق پربارش کاهش یافته است. علاوه بر این، آن‌ها دو راه‌حل برای بهبود این روش ارائه دادند: (۱) به‌دقت، وزن آیین متغیرهای محیطی و لایه در دسترس دسترس‌آمتعادل شود، (۲) محاسبه لایه در دسترس به‌روش ترتیبی نقطه به نقطه، به جای ارزیابی فاصله بین

4 Flexible LHS, FLHS  
5 Fuzzy K-Means Sampling, FKMS

1 Feature space  
2 Weight  
3 Access layer

(2000) به‌طور موفقیت‌آمیزی از فازی k-means برای طبقه‌بندی زمین منظر بر اساس مدل رقومی ارتفاع استفاده کردند. تریانتافیلیس و همکاران (Triantafylis et al., 2016) از فازی k-means برای مقادیر کل سه عنصر رادیواکتیو اورانیوم، تالیوم و پتاسیم استفاده کردند و ۱۱ کلاس فازی تولید کردند. رامیرز-لوپز و همکاران (Ramirez-Lopez et al., 2014) فازی k-means را با نمونه‌برداری مکعب لاتین مشروط و کنارد-استون مقایسه کردند و گزارش دادند که فازی k-means و نمونه‌برداری مکعب لاتین مشروط می‌توانند انعکاس بهتری از توزیع طیفی مادون‌قرمز نزدیک و مرئی<sup>۴</sup> را نسبت به کنارد-استون نشان دهند. کاید و همکاران (Kidd et al., 2015) مسائل مربوط به دسترسی در دنیای واقعی از قبیل دسترسی فیزیکی، برداشت، زیرساخت، دام، سنگ، زمین، امنیت زیستی و مسائل مربوط به حفاظت را بررسی کردند و خواستار روش‌های انعطاف‌پذیرتر و سازگارتری برای پیاده‌سازی و افزایش بهره‌وری عملیاتی بدون آسیب رساندن به دقت نمونه‌برداری شدند. آن‌ها روش دستی را که مکان‌های غیرقابل دسترسی به راحتی قابل دسترس باشند، پیشنهاد دادند که به‌طور تصادفی در میان خوشه‌های یکسان انتخاب شده و با روش طبقه‌بندی فازی k-means مشخص گردیده است، درحالی‌که بر روش نمونه‌برداری اصلی استوار است. طرح کلی این روش نمونه‌برداری در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰- طرح کلی روش نمونه‌برداری فازی k-means  
(Brus, 2019).

Figure 10. Fuzzy K-Means Sampling (Brus, 2019).

الگوریتم خوشه‌بندی فازی k-means یک روش طبقه‌بندی است که هدف آن ایجاد خوشه‌هایی است که در آن اشیاء ویژگی‌های مشابه را به اشتراک می‌گذارند، ولی اشیاء در خوشه‌های مختلف متفاوت از هم هستند (Brus, 2019). این خوشه‌ها توسط اصل حداقل مربعات<sup>۱</sup> بهینه‌سازی شده‌اند. با این حال، با توجه به همپوشانی صفات از اشیاء در خوشه‌های مختلف و مرزهای میان خوشه‌ها، می‌توان الگوریتمی را با درجه فازی گسترش داد و خوشه‌های پیوسته بیشتری ایجاد کرد (مجموعه‌های فازی) که در آن اشیاء دارای مقادیر متفاوتی بین صفر و یک هستند (Biswas & Zhang, 2018). این روش برای مجموعه داده‌های بزرگ عملکرد خوبی دارد (Ng et al., 2018). به‌منظور پوشش دادن گوشه‌ها، اصلاحیه‌ای با اضافه کردن یک کلاس اضافی<sup>۲</sup> پیشنهاد شد که از دلایل اصلی طراحی نمونه‌برداری فازی k-means است. نمونه‌برداری فازی k-means همچنین به‌صورت نمونه‌برداری فازی c-mean<sup>۳</sup> نیز نشان داده می‌شود که برای انتخاب نقاط نمونه‌برداری با استفاده از طبقه‌بندی فازی و معیارهای عضویت پیشنهاد شده است (De Gruijter et al., 2010). مراحل این روش به این شرح است: (۱) اطلاعات محیطی از یک فضای پایه به عنوان اشیاء به دست می‌آید، (۲) آنالیز خوشه‌ای k-means برای ایجاد زیرمجموعه‌های فازی انجام می‌شود، (۳) اشیاء با بزرگ‌ترین مقدار عضویت در زیرمجموعه‌ها به‌عنوان نقاط نمونه انتخاب شده و (۴) جستجوی موقعیت جغرافیایی برای به دست آوردن الگوی نمونه‌برداری انجام می‌شود. نمونه‌برداری فازی k-means می‌تواند کارایی پیش‌بینی فازی k-means را بهبود ببخشد. موقعیت‌های جغرافیایی همچنین می‌توانند به‌عنوان اشیاء برای انجام الگوریتم خوشه‌بندی فازی k-means استفاده شوند که یک روش برای بهینه‌سازی الگوی نمونه‌برداری در فضای جغرافیایی است (Brus et al., 2006). K-means فازی برای تهیه نقشه‌های طبقه‌بندی خاک استفاده می‌شود. چپرور گیاهی را با استفاده از ابزار k-fuzzy برای کشاورزی دقیق انجام دادند و بورو و همکاران (Burrough et al., )

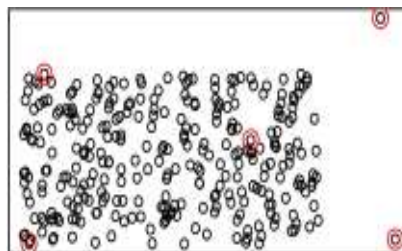
1 Least square criterion  
2 Extragrade  
3 Fuzzy C-Means Sampling, FCMS

4 Visible-Near-Infrared Spectroscopy

نمونه‌برداری کنار-استون<sup>۱</sup>

به یک درخت اشاره دارد که در هر گره دارای چهار شاخه است و یک فن تجزیه سلسله مراتبی است که شامل تقسیم پیاپی یک تصویر به چهار ربع با اندازه مساوی است. بر اساس این اصل، منطقه مورد نظر به چهار رده یا لایه تقسیم می‌شود و هر طبقه دارای تغییرات کم و بیش برابری هست. روند تقسیم به صورت پیاپی تکرار می‌شود تا زمانی که تغییر در درون طبقه به یک سطح مشخص کاهش یابد و محتوای هر ربع، یکدست و واریانس هر طبقه کم و بیش معادل شود. در پایان، یک نقطه مشاهده در داخل هر طبقه قرار می‌گیرد. این روش در مناطق نسبتاً یکنواخت به ندرت و با شدت بیشتر در مناطقی که تغییرات زیاد است، بکار می‌رود. بیشتر مکان نمونه‌برداری در فضای مشخصه قرار دارد که در فضای جغرافیایی نیز گسترده شده است. به‌طور گسترده‌ای برای داده‌های مکانی استفاده می‌شود و برای تقسیم تصویر بر اساس چهار طبقه ارائه شده تا از شرایط پیچیده محیطی استفاده کنند. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، الگوریتم مناطقی را با بالاترین تغییر در ارتفاع می‌یابد و آن‌ها را به طبقاتی تقسیم می‌کند. شکل زیر لایه محاسبه شده توسط الگوریتم را بر اساس ارتفاع نشان می‌دهد. مناطقی که دارای بالاترین ارتفاع هستند، بیشترین تغییر را دارند. الگوریتم قادر به شناسایی مناطق شیب‌دار است و در ارتفاعات تغییر قابل توجهی ایجاد می‌کند و آن‌ها را به لایه‌های کوچک‌تر تقسیم می‌کند. این الگوریتم مزایای مختلفی دارد، از جمله اینکه اطلاعات مهم متغیر کمکی یا محیطی را در نظر می‌گیرد. این روش می‌تواند به اندازه‌ای گسترش یابد تا بیش از یک متغیر کمکی را در نظر بگیرد. این الگوریتم ناپارامتریک<sup>۴</sup> است و فقط به یک پارامتر، یعنی تعداد تکرارها نیاز دارد. بنابراین، هیچ پارامتری برای مزارع و متغیرهای مختلف لازم نیست تنظیم شود (Minasny *et al.*, 2007). در تحقیقی از روش‌های مربع لاتین، تصادفی، شبکه منظم، فازی  $k$ -means و چاردرخت جهت تعیین نقاط نمونه‌برداری استفاده شد و روش نمونه‌برداری چاردرخت به‌عنوان بهترین روش معرفی شد و بیان شد روش نمونه‌برداری چاردرخت طوری محل نقاط را از جامعه انتخاب کرده است که توزیع نمونه‌برداری در هیستوگرام یکنواخت

نمونه‌برداری کنار-استون که در ابتدا الگوریتم نقشه‌برداری یکنواخت نامیده می‌شد، یک روش ترتیبی است که نقاط نمونه‌برداری را به صورت یکنواخت در فضای مشخصه توزیع می‌کند (Ramirez-Lopez *et al.*, 2014). روش کنار-استون، به این شرح است که هنگام انتخاب  $n$  نمونه از مجموعه  $N$  نمونه‌ای، الگوریتم از پیدا کردن دو نمونه که در دورترین فاصله از یکدیگر قرار دارند، شروع می‌شود و دو نمونه از داده‌ها را برای انتظار برای کالیبراسیون داده‌ها به دست آید، تکرار می‌شود (Ng *et al.*, 2018). بر اساس تحقیقات نگ و همکاران (Ng *et al.*, 2018)، روش نمونه‌برداری کنار-استون در داده‌های کوچک‌تر و داده‌های بزرگ عملکرد بهتری نسبت به روش‌های نمونه‌برداری مکعب لاتین مشروط و خوشه‌بندی  $k$ -means داشت. از آنجا که این الگوریتم در داده‌های کوچک‌تر و داده‌های بزرگ‌تر عملکرد بهتری دارد، می‌تواند از برخی خصوصیات خاک اعتبارسنجی خوبی داشته باشد و ممکن است در سایر خصوصیات خاک اعتبارسنجی ضعیفی داشته باشد (Ng *et al.*, 2018). طرح کلی این روش نمونه‌برداری در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱- طرح کلی روش نمونه‌برداری کنار-استون (Brus, 2019).

Figure 11. Kennard-Stone Sampling (Brus, 2019).

نمونه‌برداری واریانس چاردرخت<sup>۲</sup>

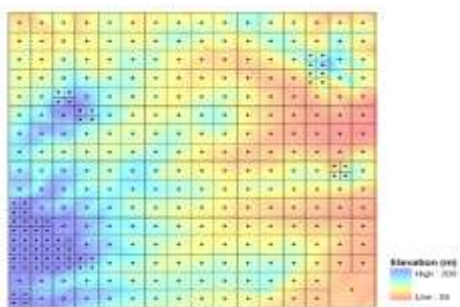
مکبرتنی و همکاران (McBratney, 2013) نمونه‌برداری واریانس چاردرخت را معرفی کردند (Minasny *et al.*, 2007). الگوریتم واریانس چاردرخت برای نمونه‌برداری در یک منطقه با اطلاعات کمکی یا ثانویه پیشنهاد شده که کوواریانس<sup>۳</sup> متغیر کمکی ثابت نیست. این الگوریتم بر پایه روش تجزیه چاردرخت است. اصطلاح چاردرخت

1 Kennard-Stone Sampling, KSS

1. Variance Quadtree algorithm, VQT

3 Covariance

4 Non-parametric



شکل ۱۲- طرح کلی روش نمونه‌برداری واریانس چاردرخت (Minasny *et al.*, 2007).

Figure 12. Variance Quadtree algorithm (Minasny *et al.*, 2007).

جدول ۱- مقایسه روش‌های نمونه‌برداری متفاوت در فضای جغرافیایی بهینه برای کالیبراسیون نقشه‌های رقومی خاک.

Table 1. Comparison of different sampling designs in order to optimize geographic space for calibrating digital soil map.

Samplig design	Sampling locations independently selected	Application condition	Spatial coverage	Accuray	Simplicity	Efficiency
Regular grid	No	Homogeneous field	+++	++	+++	+++
Spatial Coverage	No	No	+++	++	+++	+++
Stratified random	No	Environmental information	+++	+++	++	+++
Fuzzy k-means clustering	No	No	+	++	++	+
cLHS	No	No	+++	+++	+++	+++
Simple random	Yes	Homogeneous field	+	+	+++	+
Grid	No	Homogeneous field	+++	++	+++	+++
Cluster	No	Access issues	+	+	+	++
Nested	No	Multiscale variation	+	++	++	++
Fuzzy C-Means	No	No	+	++	++	+
Kennard-Stone	No	No	++	+	++	+
Variance Quadtree algorithm	No	No	+++	+++	+++	+++
Transect	No	Generally along toposequence	+	++	++	++

+, ++ و +++ حمایت از روش‌های متفاوت نمونه‌برداری با افزایش تعداد نشانه.

+, ++, and +++ indicate the support from different sampling designs with increase in the number of signs

جدول ۲- بسته مورد استفاده در طرح نمونه‌برداری

Table 2. Package used in sampling design

Sampling design	Function	Package
Regular grid sampling	spsample	sp
Spatial Coverage Sampling	Spatial Coverage Plus Sample.R and Spatial In fill Sample.R	spsosa
Stratified random	Spsample and strata	Sp and sampling
Fuzzy k-means	FKM	Fclust
	fanny	cluster
	runFuzme	Fuzme
	fkme	fuzme
cLHS	optimCLHS	Spsann
	getCriterion.cLHS	Clhs
	getCriterion.cLHS and Functions4SSA.R	cLHS.R
Kennard-Stone	ken.sto	soil.spec
Random Simple	SI_PointPairs.R	SDaA
Grid	gs_mode, gs_rasterize, gs_zonal_raster, and gs_sample—though	GridSample
Cluster	Svytotal and svymean	Mstage and survey
Nested	Nested Sampling_v1.R and Nested Sampling_v2.R	Nested Sampling
Fuzzy C-Means	Factoextra, cluster and fclust	ppclust
Variance Quadtree algorithm	knnLookup	SearchTrees

## نتیجه‌گیری کلی

کاربردی‌ترین روش نمونه‌برداری مورد استفاده هستند. از نظر پوشش مکانی، بهترین روش نمونه‌برداری پوشش مکانی است، به دنبال آن نمونه‌برداری شبکه‌ای و نمونه‌برداری تصادفی طبقه‌بندی‌شده نیز می‌توانند پوشش مکانی خوبی داشته باشند. درحالی‌که نمونه‌برداری خوشه‌ای، نمونه‌برداری ترانسکت و نمونه‌برداری آشیانه‌ای، نمی‌توانند پوشش مکانی خوبی را تأمین کنند. به‌عنوان یک روش طبقه‌بندی فضای مشخصه، فازی k-means نیز به‌طور گسترده‌ای برای انتخاب نقاط نمونه‌برداری و برای پوشش همه کلاس‌های متغیرهای محیطی استفاده می‌شود. از نظر دقت و کارایی، نمونه‌برداری تصادفی طبقه‌بندی‌شده بالاترین دقت و صحت دارد و به‌طور گسترده در مطالعات قبلی استفاده شده است، درحالی‌که نمونه‌برداری تصادفی ساده پایین‌ترین دقت را دارد. انتخاب نمونه‌برداری تصادفی ساده یک فرآیند تصادفی است و ممکن است کاربرد آن به علت عدم اطمینان، محدود شود. با توجه به‌سادگی در مراحل طراحی و پیاده‌سازی، نمونه‌برداری تصادفی ساده، نمونه‌برداری شبکه‌ای و نمونه‌برداری پوشش مکانی ساده‌ترین روش‌های نمونه‌برداری هستند که نیاز به تلاش کمتری دارند، درحالی‌که نمونه‌برداری تصادفی طبقه‌بندی‌شده، نمونه‌برداری ترانسکت و نمونه‌برداری آشیانه‌ای پیچیده‌تر هستند و اطلاعات محیطی و تغییرات مکانی را جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل می‌کنند. نمونه‌برداری خوشه‌ای پیچیده‌ترین روش است. در میان روش‌های نمونه‌برداری مطالعه شده، روش نمونه‌برداری مکعب لاتین مشروط و شکل بهینه‌سازی شده آن، رایج‌ترین روش استفاده شده و بسیار توصیه شده است و نمونه‌برداری تصادفی طبقه‌بندی‌شده و نمونه‌برداری پوشش مکانی به‌عنوان کارآمدترین روش‌هایی که الگوی نمونه‌برداری را در فضای جغرافیایی بهینه‌سازی می‌کنند، معرفی شده‌اند. ثابت شده است که ترکیبی از روش مکعب لاتین و نمونه‌برداری تصادفی ساده، بهترین گزینه است.

درحالی‌که روش نمونه‌برداری از پیش تعریف شده می‌تواند یک‌راه آسان و کارآمد برای انجام کارهای میدانی را فراهم کند، این امر دور از چالش نبوده است. در بسیاری از موارد، زمانی که یک روش نمونه‌برداری از پیش تعیین شده در شرایط دنیای واقعی اعمال می‌شود، ممکن است به علت مشکلات دسترسی و یا چالش‌های عملیاتی غیراجرایی باشد. شکی نیست که روش‌های نمونه‌برداری می‌توانند به‌طور هم‌زمان تغییرات فضای جغرافیایی، فضای مشخصه و ویژگی‌های خاکی موردنظر را مورد بررسی قرار دهند. در مورد شرایط استفاده، نمونه‌برداری تصادفی ساده و نمونه‌برداری شبکه‌ای در مزارع کم و بیش یکنواخت و همگن و به‌طور گسترده در بررسی‌های شناسایی اجمالی مورد استفاده قرار گیرد و زمانی که اطلاعات محیطی برای یک مزرعه در دسترس نیست، این دو روش به‌راحتی انجام می‌شود و هنوز هم به‌طور معمول استفاده می‌شوند. نمونه‌برداری شبکه‌ای و نمونه‌برداری پوشش مکانی از آنجا که یک الگوی کامل را در فضای جغرافیایی بهینه‌سازی می‌کنند، زمانی که اطلاعات محیطی در دسترس نیست می‌تواند بکار گرفته می‌شوند. برای نمونه‌برداری تصادفی طبقه‌بندی شده، اطلاعات محیطی قابل دسترس از مزارع موردنیاز است. نمونه‌برداری خوشه‌ای، نمونه‌برداری ترانسکت و نمونه‌برداری آشیانه‌ای، با اهدافی ویژه و در شرایط ویژه‌ای می‌توانند بکار گرفته شوند. در صورتی‌که محدودیت دسترسی به نقاط نمونه‌برداری وجود داشته باشد، نمونه‌برداری خوشه‌ای اتخاذ می‌شود. نمونه‌برداری ترانسکت در راستای یک ردیف پستی و بلندی گزینش می‌شود و می‌توان در مناطق کوهستانی و در طول ردیف پستی و بلندی استفاده شود. نمونه‌برداری آشیانه‌ای برای ثبت تغییرات چند مقیاسی بکار برده می‌شود و به‌عنوان یک روش مکمل برای درک تغییرات چند متغیری عمل می‌کند. زمانی که مسئله دسترسی مورد نظر است، نمونه‌برداری خوشه‌ای و روش نمونه‌برداری مکعب لاتین مشروط، با در نظر گرفتن هزینه،

## References

- Adhikari K., and Hartemink A.E. 2015. Digital mapping of topsoil carbon content and changes in the Driftless Area of Wisconsin, USA. *Soil Science Society of America Journal*, 79(1), 155-164.

- Biswas A., and Zhang Y. 2018. Sampling designs for validating digital soil maps: a review. *Pedosphere*, 28(1), 1-15.
- Brown R.A., McDaniel P., and Gessler, P.E. 2012. Terrain attribute modeling of volcanic ash distributions in northern Idaho. *Soil Science Society of America Journal*, 76(1), 179-187.
- Brungard C.W., and Boettinger J.L. 2010. Conditioned latin hypercube sampling: optimal sample size for digital soil mapping of arid rangelands in Utah, USA. In digital soil mapping. *Springer*, Dordrecht. pp. 67-75.
- Brus D.J., and De Gruijter J.J. 1997. Random sampling or geostatistical modelling? Choosing between design-based and model-based sampling strategies for soil (with discussion). *Geoderma*, 80(1-2), 1-44.
- Brus D.J., De Gruijter J.J., and Van Groenigen, J.W. 2006. Designing spatial coverage samples using the k-means clustering algorithm. *Developments in Soil Science*, 31, 183-192.
- Brus D.J., and Heuvelink, G.B. 2007. Optimization of sample patterns for universal kriging of environmental variables. *Geoderma*, 138(1-2), 86-95.
- Brus D.J., and Noij, I.G. A. M. 2008. Designing sampling schemes for effect monitoring of nutrient leaching from agricultural soils. *European journal of soil science*, 59(2), 292-303.
- Brus D.J., Kempen B., and Heuvelink G.B. M. 2011. Sampling for validation of digital soil maps. *European Journal of Soil Science*, 62(3), 394-407.
- Brus D.J. 2019. Sampling for digital soil mapping: A tutorial supported by R scripts. *Geoderma*, 338, 464-480.
- Burrough P.A., van Gaans P.F., and MacMillan, R.A. 2000. High-resolution landform classification using fuzzy k-means. *Fuzzy sets and systems*, 113(1), 37-52.
- Cambule A.H., Rossiter D.G., and Stoorvogel J.J. 2013. A methodology for digital soil mapping in poorly-accessible areas. *Geoderma*, 192, 341-353.
- Chapron M. 2011. Classification of soil and vegetation by fuzzy k-means classification and particle swarm optimization. In: Proceedings of the International Conference on Swarm Intelligence. *International Conference on Swarm Intelligence Cergy*. pp. 1-7.
- Clifford D., Payne J.E., Pringle M.J., Searle R., and Butler N. 2014. Pragmatic soil survey design using flexible Latin hypercube sampling. *Computers and Geosciences*, 67, 62-68.
- De Gruijter J.J., McBratney A.B., and Taylor J. 2010. Sampling for high-resolution soil mapping. In Proximal soil sensing. *Springer*, Dordrecht. pp. 3-14.
- De Zorzi P., Barbizzi S., Belli M., Fajgelj A., Jacimovic R., Jeran Z., and van der Perk M. 2008. A soil sampling reference site: The challenge in defining reference material for sampling. *Applied Radiation and Isotopes*, 66(11), 1588-1591.
- Evans D.M., and Hartemink A.E. 2014. Digital soil mapping of a red clay subsoil covered by loess. *Geoderma*, 230, 296-304.
- Falk M.G., Denham R.J., and Mengersen K.L. 2011. Spatially stratified sampling using auxiliary information for geostatistical mapping. *Environmental and Ecological Statistics*, 18(1), 93-108.
- Fitzgerald, G. J. 2010. Response surface sampling of remotely sensed imagery for precision agriculture. In Proximal Soil Sensing. *Springer*, Dordrecht. pp. 121-129.
- Gao B., Pan Y., Chen Z., Wu F., Ren X., and Hu, M. 2016. A spatial conditioned Latin hypercube sampling method for mapping using ancillary data. *Transactions in GIS*, 20(5), 735-754.
- Hengl T., Rossiter D.G., and Stein A. 2003. Soil sampling strategies for spatial prediction by correlation with auxiliary maps. *Soil Research*, 41(8), 1403-1422.
- Houlong J., Daibin W., Chen X., Shuduan L., Hongfeng W., Chao Y., and Lina G. 2016. Comparison of kriging interpolation precision between grid sampling scheme and

- simple random sampling scheme for precision agriculture. *Eurasian Journal of Soil Science*, 5(1), 62-73.
- Jafari A., Finke P. A., Vande Wauw J., Ayoubi S., and Khademi H. 2012. Spatial prediction of USDA great soil groups in the arid Zarand region, Iran: comparing logistic regression approaches to predict diagnostic horizons and soil types. *European Journal of Soil Science*, 63(2), 284-298.
- Jafari. A., Khademi. H., Finke. P., Wauw. J.V.D., Ayoubi. S. 2014. Spatial prediction of soil great groups by boosted regression trees using a limited point dataset in an arid region, southeastern Iran. *Geoderma*. 232–234, 148–163.
- Jenny H. 1941. *Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology*. Dover Publications Inc., New York.
- Karunaratne S.B., Bishop T.F.A., Baldock J.A., and Odeh I.O.A. 2014. Catchment scale mapping of measureable soil organic carbon fractions. *Geoderma*, 219, 14-23.
- Kempen B., Brus D.J., and de Vries F. 2015. Operationalizing digital soil mapping for nationwide updating of the 1: 50,000 soil map of the Netherlands. *Geoderma*, 241, 313-329.
- Kerry R., and Oliver M.A. 2004. Average variograms to guide soilsampling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 5: 307–325.
- Kerry R., Goovaerts P., Rawlins B.G., and Marchant B.P. 2012. Disaggregation of legacy soil data using area to point kriging for mapping soil organic carbon at the regional scale. *Geoderma*, 170, 347-358.
- Kidd D., Malone B., McBratney A., Minasny B., and Webb M. 2015. Operational sampling challenges to digital soil mapping in Tasmania, Australia. *Geoderma Regional*, 4, 1-10.
- Koszinski S., Miller B.A., Hierold W., Haelbich H., and Sommer M. 2015. Spatial modeling of organic carbon in degraded peatland soils of northeast Germany. *Soil Science Society of America Journal*, 79(5), 1496-1508.
- Ließ M., Glaser B., and Huwe B. 2012. Uncertainty in the spatial prediction of soil texture: comparison of regression tree and Random Forest models. *Geoderma*, 170, 70-79.
- Malone B.P., McBratney A.B., and Minasny B. 2011. Empirical estimates of uncertainty for mapping continuous depth functions of soil attributes. *Geoderma*, 160(3-4), 614-626.
- Markert B. 2007. Quality assurance of plant sampling and storage. In: Quevauviller P (Ed.) *Quality Assurance in Environmental Monitoring: Sampling and Sample Preatreatment*.
- McBratney A.B., Odeh I.O., Bishop T.F., Dunbar M.S., and Shatar T.M. 2000. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. *Geoderma*, 97(3-4), 293-327.
- McBratney A.B., Santos M.M., and Minasny B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(1-2), 3-52.
- Michot D., Walter C., Adam I., and Guéro Y. 2013. Digital assessment of soil-salinity dynamics after a major flood in the Niger River valley. *Geoderma*, 207, 193-204.
- Minasny B., and McBratney A.B. 2006. A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. *Computers and geosciences*, 32(9), 1378-1388.
- Minasny B., and McBratney A.B. 2006. Latin hypercube sampling as a tool for digital soil mapping. *Developments in soil science*, 31, 153-606.
- Mulder V.L., de Bruin S., and Schaepman M.E. 2013. Representing major soil variability at regional scale by constrained Latin Hypercube Sampling of remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 301-310.
- Nabiollahi K., Golmohammadi. F., Taghizadeh-Mehrjardi. R., Kerry, R. 2018. Assessing the effects of slope gradient and land use change on soil quality degradation through digital mapping of soil quality indices and soil loss rate. *Geoderma*. 318, 482–494.

- Ng W., Minasny B., Malone B., and Filippi, P. 2018. In search of an optimum sampling algorithm for prediction of soil properties from infrared spectra. *PeerJ*, 6, e5722.
- Pahlavan-Rad M.R., Akbarimoghaddam. A. 2018. Spatial variability of soil texture fractions and pH in a flood plain (case study from eastern Iran). *Catena*. 160, 275–281.
- Poggio L., Gimona A., and Brewer M.J. 2013. Regional scale mapping of soil properties and their uncertainty with a large number of satellite-derived covariates. *Geoderma*, 209, 1-14.
- Qin C.Z., Zhu A.X., Qiu W.L., Lu Y.J., Li B.L., and Pei T. 2012. Mapping soil organic matter in small low-relief catchments using fuzzy slope position information. *Geoderma*, 171, 64-74.
- Ramirez-Lopez L., Schmidt K., Behrens T., Van Wesemael B., Demattê J. A., and Scholten, T. 2014. Sampling optimal calibration sets in soil infrared spectroscopy. *Geoderma*, 226, 140-150.
- Roudier P., Beaudette D.E., and Hewitt A. 2012. A conditioned Latin hypercube sampling algorithm incorporating operational constraints. *Digital soil assessments and beyond*, 227-231.
- Samyn K., Cerdan O., Grandjean G., Cochery R., Bernardie S., and Bitri A. 2012. Assessment of vulnerability to erosion: digital mapping of a loess cover thickness and stiffness using spectral analysis of seismic surface-waves. *Geoderma*, 173, 162-172.
- Singh N. 2011. Radioisotopes: Applications in Physical Sciences. BoD–Books on Demand. 496p.
- Sun X.L., Wu S.C., Wang H. L., Zhao Y.G., Zhao Y., Zhang G.L., and Wong M.H. 2012. Uncertainty analysis for the evaluation of agricultural soil quality based on digital soil maps. *Soil Science Society of America Journal*, 76(4), 1379-1389.
- Taghizadeh-Mehrjardi R., Minasny B., Sarmadian F., and Malone B.P. 2014. Digital mapping of soil salinity in Ardakan region, central Iran. *Geoderma*, 213, 15-28.
- Taghizadeh Mehrjardi R. 2015. Determining the pattern of spatial sampling using different methods (Case study: Taft city). *Agricultural Engineering* (Scientific Journal of Agriculture). 38 (2): 19-36. (In Persian)
- Taghizadeh Mehrjardi R., Sarmadian. F., Tazeh. M., Omid. Mahmood., Toomanian. N., Rousta. MJ. And Rahimian. MH. 2015. Comparison of different sampling methods for digital soil mapping in Ardakan region. *Watershed Engineering and Management*. 6 (4), 353-363. (In Persian)
- Taghizadeh-Mehrjardi. M., Nabiollahi. K., Minasny. B., Triantafilis. J. 2015. Comparing data mining classifiers to predict spatial distribution of USDA-family soil groups in Baneh region, Iran. *Geoderma*. 253–254, 67–77.
- Taghizadeh-Mehrjardi. R., Nabiollahi. K., Rasoli. L., Kerry. R., Scholten. T. 2020. Land Suitability Assessment and Agricultural Production Sustainability Using Machine Learning Models. *Agronomy*. 10, (573)1–20.
- Thomas M., Odgers N., Ringrose-Voase A., Grealish G., Glover M., and Dowling T. 2012. Soil survey design for management-scale digital soil mapping in a mountainous southern Philippine catchment. *Digital soil assessments and beyond*. London, CRC Press/Balkema, 233-238.
- Triantafilis J., Earl N.Y., and Gibbs I.D. 2016. Digital soil-class mapping across the Edgeroi district using numerical clustering and gamma-ray spectrometry data. *Computing Ethics: A Multicultural Approach*, 187.
- Vašát R., Borůvka L., and Jakšík O. 2012. Number of sampling points influences the parameters of soil properties spatial distribution and kriged maps. *In Digital Soil Assessments and Beyond*. CRC Press London. pp. 251-256



- Vasques G.M., Grunwald S., Comerford N.B., and Sickman J.O. 2010. Regional modelling of soil carbon at multiple depths within a subtropical watershed. *Geoderma*, 156(3-4), 326-336.
- Wadoux A.M.C. and Brus. D.J. 2020. How to compare sampling designs for mapping? *European Journal of Soil Science*, 1-12.
- Walvoort D.J., Brus D.J., and De Gruijter J.J. 2010. An R package for spatial coverage sampling and random sampling from compact geographical strata by k-means. *Computers and Geosciences*, 36(10), 1261-1267.
- Webster R., and Lark M. 2012. Field sampling for environmental science and management. *Routledge*.
- Wheeler I., McBratney A.B., Minasny B., and De Gruijter J.J. 2012. Digital soil mapping to inform design-based sampling strategies for estimating total organic carbon stocks at the farm scale. In *Digital Soil Assessments and Beyond—Proceedings of the Fifth Global Workshop on Digital Soil Mapping, Sydney Australia*. pp. 257-262.
- Worsham L., Markewitz D., Nibbelink N.P., and West L.T. 2012. A comparison of three field sampling methods to estimate soil carbon content. *Forest Science*, 58(5), 513-522.
- Xu C., He H.S., Hu Y., Chang Y., Li X., and Bu R. 2005. Latin hypercube sampling and geostatistical modeling of spatial uncertainty in a spatially explicit forest landscape model simulation. *Ecological Modelling*, 185(2-4), 255-269.
- Zeraatpisheh M., Ayoubi. Sh., Jafari. A. and Finke. P. 2017. Comparing the efficiency of digital and conventional soil mapping to predict soil types in a semi-arid region in Iran. *Geomorphology*, 285, 186–204.
- Zhang J., and Zhang C. 2012. Sampling and sampling strategies for environmental analysis. *International journal of environmental analytical chemistry*, 92(4), 466-478.
- Zhou Y., Biswas A., Ma Z., Lu Y., Chen Q., and Shi Z. 2016. Revealing the scale-specific controls of soil organic matter at large scale in Northeast and North China Plain. *Geoderma*, 271, 71-79.

## Introduction of Different Sampling Methods in Digital Soil Mapping Studies

Leila Lotfollahi<sup>1</sup>, Mohammad Amir Delavar<sup>2\*</sup>, Mohammad Jamshidi<sup>3</sup>

(Received: August 2020 Accepted: November 2020)

### Abstract

There are innumerable challenges for digital soil mapping in the world full of change. One of these challenges is the sampling method which plays an important role in providing appropriate information for digital soil mapping and increasing its efficiency. Sampling method efficiency, with considering the number of samples, space changes, and cost, is a way to identify a set of scattered sampling locations in geographical space that have good location coverage of features. A good space coverage of features ensures accurate estimation of regression parameters and it makes effective spatial interpolation. In soil evaluation, the number of samples collected is limited by time and cost. Also, lack of roads, dense vegetation, and rugged terrain are caused more restrictions when visiting the area. These deficiencies lead to the use of stronger sampling methods. Methods that can provide a good description of space changes of soil and its features to reduce the number of samples, time, and cost are needed. So that it supports the final quality of the maps. Here are checked several methods of statistical sampling and geometric that optimize the geometric sampling pattern in geographical space. The strengths and weaknesses these methods considering spatial coverage, simplicity, accuracy, and efficiency briefly expressed. The results showed in terms of accuracy and efficiency; classified random sampling has the highest accuracy and has been widely used. In terms of spatial coverage; spatial coverage sampling is the best method. Due to the simplicity in the design and implementation stages; Simple random sampling, network sampling, and spatial sampling are the simplest sampling methods. Among the sampling methods studied, the Latin conditional sampling method is the most common method. It is widely used and recommended, and stratified random sampling and spatial sampling are the most efficient methods that optimize the sampling pattern in geographical space.

**Keywords:** Classical Sampling, Geometric Sampling, Statistical Sampling

Lotfollahi L., Delavar M.A and Jamshidi M. 2020. Introduction of different sampling methods in digital soil mapping studies. *Applied Soil Research*, 8(3): 202-219.

1. PhD Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan

2. Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan

3. Assistant Professor, Soil and Water Research Institute

\* Corresponding Author Email: [amir-delavar@znu.ac.ir](mailto:amir-delavar@znu.ac.ir).