



19<sup>th</sup> Iranian Soil Science Congress  
2-4 December, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران  
۱۱ تا ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



## تحلیل هزینه-فایده فناوری پهپاد در مقیاس‌های مختلف نقشه‌برداری خاک

صدیقه ملکی<sup>۱\*</sup>، عباس گلی جیرنده<sup>۲</sup>

۱- استادیار بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز\* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مقاله

(s.maleki@saadi.shirazu.ac.ir)

۲- مدیر عامل شرکت مهندسی مشاور نوآوران علوم مکانی، تهران، ایران

### چکیده

مطالعات خاک برای کشاورزی پایدار، حفاظت محیط زیست و برنامه‌ریزی کاربری اراضی حیاتی است. ادغام پهپادها (UAVs) در علوم خاک، روش‌های جمع‌آوری داده، نقشه‌برداری و تحلیل را متحول کرده است. این فناوری، داده‌های توپوگرافی با وضوح بالا، تصاویر چندطیفی و مدل‌های سه‌بعدی زمین را ارائه می‌دهد که امکان نقشه‌برداری رقومی دقیق خاک حتی با داده‌های تاریخی محدود را فراهم می‌کند. این پژوهش، تأثیر پهپادها را بر کاهش هزینه و افزایش دقت مطالعات خاک در پنج منطقه خشک و نیمه‌خشک ایران بررسی می‌کند. نتایج نشان می‌دهد پهپادها کارایی نمونه‌برداری را افزایش داده، زمان عملیات میدانی را تا ۴۰٪ کاهش داده و با استفاده از مدل‌هایی مانند جنگل تصادفی (RF)، دقت پیش‌بینی را ۱۷٪-۲۵٪ در مناطق پیچیده بهبود بخشیده‌اند. اگرچه سرمایه‌گذاری اولیه در سخت‌افزار، نرم‌افزار و آموزش ممکن است صرفه‌جویی کوتاه‌مدت را کاهش دهد، اما مزایای بلندمدت شامل کاهش نیروی کار، دقت بالاتر داده‌ها و پایش مقیاس‌پذیر، توجیه‌پذیر بودن آن را نشان می‌دهد. توسعه‌های آتی باید بر طراحی فرآیندهای مقرون‌به‌صرفه و ادغام با سیستم‌های پایش محیطی متمرکز شوند تا نقش پهپادها در مدیریت پایدار زمین به حداکثر برسد.

**واژگان کلیدی:** نقشه‌برداری رقومی خاک، مدیریت پایدار زمین، تعداد نمونه خاک محدود

### مقدمه

مطالعات خاک برای کشاورزی پایدار و حفاظت از محیط زیست و برنامه‌ریزی کاربری اراضی بنیادی هستند (Bouma et al., 2019). بررسی‌های سنتی خاک بسیار پرکار هستند و به عملیات میدانی گسترده، تحلیل آزمایشگاهی و فرآیندهای نقشه‌برداری دستی نیاز دارند که هم زمان‌بر و هم پرهزینه هستند (McBratney et al, 2003). تهیه نقشه‌های خاک در کشوری مانند ایران با مساحت حدود ۱۸/۵ میلیون هکتار اراضی قابل کشت در دهه جاری زمان‌گیر خواهد بود. نقشه‌های خاک ابزارهایی ضروری در کشاورزی مدرن هستند که بینش‌های حیاتی در مورد تغییرپذیری مکانی خاک ارائه می‌دهند و راهنمای تصمیم‌گیری‌های آگاهانه در مدیریت اراضی هستند. علاوه بر این، نقشه‌های خاک با شناسایی مناطق مستعد فرسایش و مناطق تخریب‌یافته، از سلامت بلندمدت خاک حمایت کرده و راهبردهای حفاظتی را تسهیل می‌کنند که با دستور کار سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO, 1976) برای مدیریت پایدار خاک همسو هستند. با تشدید فشارهای کشاورزی، نقشه‌های خاک برای متعادل‌سازی تولید با مدیریت بوم‌شناختی حیاتی باقی می‌مانند و بر ضرورت آن‌ها در چارچوب‌های امنیت غذایی جهانی تأکید می‌ورزند (Bouma et al., 2019). با ترسیم انواع خاک، بافت، سطوح عناصر غذایی و ویژگی‌های هیدرولوژیکی، این نقشه‌ها به کشاورزان امکان بهینه‌سازی تخصیص منابع، مانند کاربرد هدمند کود و آبیاری را



19<sup>th</sup> Iranian Soil Science Congress  
2-4 December, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران  
۱۱ تا ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

## مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



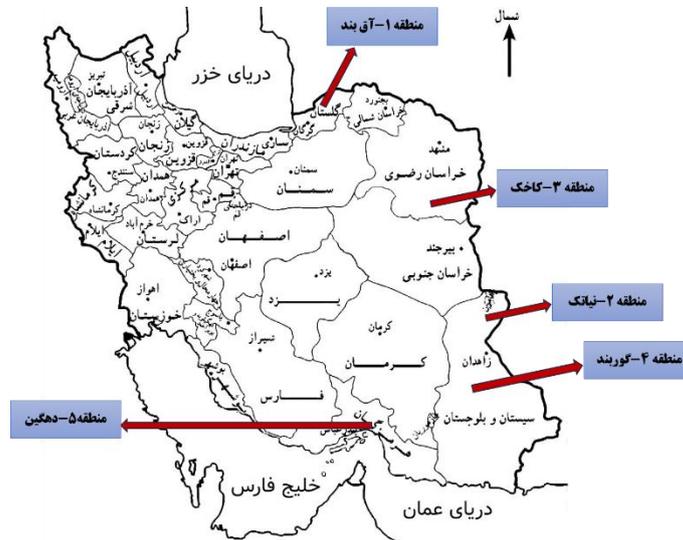
می‌دهند و در نتیجه عملکرد محصول را افزایش داده و در عین حال اثرات زیست‌محیطی مانند رواناب مواد مغذی را به حداقل می‌رسانند (McBratney et al., 2003). علاوه بر این، کشاورزی دقیق که توسط داده‌های خاک با وضوح بالا پشتیبانی می‌شود، با تطبیق روش‌ها با نیازهای خاص خاک، هزینه‌های نهاده را کاهش داده و پایداری را افزایش می‌دهد. در دو دهه گذشته، از نقشه‌برداری رقومی خاک (DSM) برای تهیه نقشه‌های ویژگی‌ها یا رده‌های خاک در نقاط مختلف جهان استفاده شده است (Khaledian and Miller, 2020). روش‌های DSM مانند مدل SCORPAN کارآمد هستند و می‌توانند برای غلبه بر برخی محدودیت‌های روش‌های مرسوم نقشه‌برداری خاک از طریق ارزیابی روابط متقابل بین پیش‌بین‌کننده‌های محیطی و ویژگی‌های خاک به کار روند (McBratney et al., 2003; Zeraatpisheh et al., 2019; Lamichhane et al., 2019; Khaledian and Miller, 2020; Maleki et al., 2020; Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2021). می‌توان گفت هزینه‌ها زمانی کاهش یافته که تعداد نمونه‌های خاک کاهش می‌یابد، و در واقع، استفاده از تعداد زیادی نمونه برای افزایش دقت و صحت روش‌های یادگیری ماشین، هزینه‌ها را افزایش می‌دهد. بنابراین، استفاده از روش‌هایی با داده‌های خاک محدود یا تکیه بر افزایش دقت متغیرهای کمکی در مدل SCORPAN منجر به افزایش سطح مطالعات و کاهش هزینه‌ها خواهد شد (Maleki et al., 2020; 2024a).

ظهور فناوری وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین (پهپادها) تغییری پارادایمی به وجود آورده و جمع‌آوری داده‌های سریع و با وضوح بالا را برای DSM ارائه می‌دهد (Maleki et al., 2020). پهپادهای مجهز به سنسورهای RGB، چندطیفی و LiDAR می‌توانند ویژگی‌های دقیق عوارض زمین، شاخص‌های پوشش گیاهی و الگوهای فرسایش را ثبت کرده و مدلسازی پیش‌بینی را تسهیل کنند (Kariminejad et al., 2022 a,b). با وجود این مزایا، پیامدهای مالی به کارگیری پهپادها همچنان مورد بحث است. در حالی که پهپادها نیاز به نمونه‌برداری گسترده خاک را کاهش می‌دهند، اما به سرمایه‌گذاری قابل توجهی در ساخت‌افزار، نرم‌افزار و آموزش اپراتور نیاز دارند (Toscano et al., 2024). این مقاله بررسی می‌کند که آیا پهپادها در نهایت هزینه‌های مطالعات خاک را کاهش می‌دهند یا چالش‌های مالی جدیدی ایجاد می‌کنند. مطالعات موردی از مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، جایی که از پهپادها برای DSM استفاده شده است، بینش‌های حیاتی در مورد مبادلات هزینه-فایده ارائه می‌دهند.

### مواد و روش‌ها

#### منطقه مطالعاتی

برای بررسی وضعیت و مقایسه پهپاد و تأثیرات آن بر مطالعات میدانی خاک، چندین منطقه در کشور که پیش‌تر نقشه‌برداری رقومی خاک (DSM) در آنها با استفاده از داده‌های پهپاد تهیه شده بود، انتخاب شدند (شکل ۱). پنج منطقه انتخابی دارای رژیم رطوبتی زیریک خشک (کاخک، آق بند) یا اریدیک (نیاتک، گوربند، دهگین) و حرارتی خاک ترمیک یا هایپرترمیک بودند. اگرچه منطقه کاخک در استان خراسان رضوی دارای رژیم حرارتی مزیک می‌باشد.



شکل ۱- نمایی از مناطق مطالعاتی در استان‌های مختلف در ایران

### تهیه تصاویر هوایی پهپاد

تصاویر هوایی به‌دست آمده از پهپادها و متغیرهای محیطی این مطالعه از یک پهپاد چندپروانه Phantom 4 Pro V2 مجهز به دوربین DJI FC6310 با وضوح  $5472 \times 3648$  پیکسل و فاصله کانونی  $8/8$  میلی‌متر استفاده کرد. پارامترهای پرواز شامل همپوشانی طولی و جانبی  $80-70$  درصد بود و تصاویر در مقیاس  $1:500$  ثبت شدند. تصاویر هوایی اخذ شده با استفاده از نرم‌افزارهای فتوگرامتری مختلف پردازش شدند تا خروجی‌های ضروری شامل مدل‌های سه‌بعدی، ارتفاع و از همه مهم‌تر، مدل رقومی ارتفاع (DEM) تولید شوند. مطالعات موجود، اثربخشی محصولات ژئوماتیک مشتق شده از پهپاد را در نقشه‌برداری رقومی خاک و تحلیل فرسایش، همان‌گونه که در مطالعات اخیر نشان داده شده است، تأیید می‌کنند (Maleki et al., 2020, 2024a, b; Kariminejad et al., 2023; Wang et al., 2024)

### نمونه‌برداری خاک

روش نمونه‌برداری خاک در تمامی سایت‌ها بر اساس روش نمونه‌برداری مکعب لاتین مشروط (cLHS) (Minasny and McBratney, 2007) بود. روش cLHS که امروزه به صورت یک بسته نرم‌افزاری در محیط R ارائه می‌شود، یک روش نمونه‌برداری طبقه‌بندی شده است که به طور گسترده در مطالعات نقشه‌برداری رقومی خاک (DSM) و مطالعات محیطی برای بهینه‌سازی انتخاب محل‌های نمونه‌برداری مورد استفاده قرار می‌گیرد. برخلاف روش‌های سنتی نمونه‌برداری تصادفی یا مبتنی بر شبکه، cLHS تضمین می‌کند که نمونه‌های انتخاب شده، کل تغییرپذیری متغیرهای محیطی (مانند ویژگی‌های توپوگرافی، شاخص‌های پوشش گیاهی یا خصوصیات خاک) را در سرتاسر منطقه مورد مطالعه پوشش می‌دهند.

cLHS یک ابزار قدرتمند برای بهینه‌سازی راهبردهای نمونه‌برداری خاک به‌ویژه در شرایطی که منابع محدود هستند، محسوب می‌شود (Zeraatpisheh et al., 2019; Maleki et al., 2020, 2024a). این روش با بهره‌گیری از متغیرهای محیطی، اطمینان حاصل می‌کند که در صورت استفاده از متغیرهای محیطی با دقت بالا بتوان نمونه‌های دقیق را انتخاب کرد.

### نقشه‌برداری رقومی ویژگی‌ها/ارده‌های خاک با استفاده از جنگل تصادفی

الگوریتم جنگل تصادفی (RF) که توسط Breiman (2001) توسعه یافت، یک روش یادگیری گروهی است که از طریق چندین درخت تصمیم عمل می‌کند. این رویکرد از نمونه‌برداری bootstrap (Lamichhane et al., 2019) استفاده می‌کند که در آن



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

### مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

#### Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



زیرمجموعه‌های تصادفی از داده‌های آموزشی برای ساخت درختان جداگانه انتخاب می‌شوند. دو ابرپارامتر حیاتی عملکرد مدل را کنترل می‌کنند: ntree (تعداد درختان در مجموعه را کنترل می‌کند، و mtry (تعداد متغیرهای پیش‌بینی‌کننده ارزیابی شده در هر انشعاب گره را تعیین می‌نماید (Breiman, 2001). مدل منحنی‌های پاسخی تولید می‌کند که اهمیت متغیرها را کمی می‌سازند و امکان شناسایی عوامل پیش‌بینی‌کننده کلیدی را فراهم می‌آورند. معمولاً پیش‌بینی‌کننده‌هایی که کمتر از ۱۵٪ به دقت کلی مدل کمک می‌کنند، به منظور افزایش کارایی محاسباتی، حذف می‌شوند (Zhi et al., 2017). دقت مدل با استفاده از دو پارامتر کلیدی ارزیابی شد: صحت کلی طبقه‌بندی و ضریب کاپا. آماره کاپا.

#### نتایج و بحث

پنج منطقه مورد بررسی در این مقاله در مناطق خشک و نیمه‌خشک واقع شده‌اند. به طور کلی، تمامی طبقه‌بندی‌های خاک بر اساس سیستم رده‌بندی (Soil Survey Staff, 2022) در رده‌های Aridisols و Entisols قرار می‌گیرند. شایان ذکر است که در جدول ۱، مطالعات خاک برای مقیاس تفصیلی و با فرض ۴۰ خاکرخ و ۸۰ نمونه خاک سطحی در هر ۱۰۰۰ هکتار به ترتیب برای تهیه نقشه رده‌ها و ویژگی‌های خاک در نظر گرفته شده‌اند. البته در نقشه‌برداری رقومی خاک (DSM)، برخلاف دیدگاه سنتی، برای افزایش دقت به حجم زیادی از داده‌های آزمون نیاز است.

در منطقه ۱ (جدول ۱)، مدل‌های رقومی ارتفاع (DEM) مشتق شده از پهپاد، دقت طبقه‌بندی خاک را در مقایسه با روش‌های سنتی ۱۷٪ بهبود بخشیدند (Maleki et al., 2020)، اما مستلزم سرمایه‌گذاری اولیه‌ای بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ میلیون ریال بودند. در این منطقه مطالعاتی، مجموعه داده‌های آموزشی یکسانی برای مدل‌های DEM با دو وضوح پیکسل ۰/۳ متر و ۵ متر (به کار گرفته شد تا امکان مقایسه مستقیم تأثیر وضوح مکانی بر عملکرد مدل فراهم گردد. تجزیه و تحلیل نشان داد که متغیرهای محیطی مشتق شده از داده‌های با وضوح ۰/۳ متر به طور مداوم در تمام سطوح تاکسونومیک زیرگروه، عملکرد بهتری نسبت به داده‌های با وضوح ۵ متر داشتند. علاوه بر این، جایگزینی مشتقات DEM استخراج شده از تصاویر پهپاد در چارچوب مدل، به طور قابل توجهی دقت پیش‌بینی‌های نقشه خاک را افزایش داد و صحت کلی و شاخص کاپا را به ترتیب تقریباً ۱۷٪ و ۲۰٪ در تمام سطوح تاکسونومیک ارزیابی شده بهبود بخشید.

در این منطقه، عوارض شیبدار و ناهموار، چالش‌های قابل توجهی برای نمونه‌برداری میدانی ایجاد می‌کند که اغلب به طولانی‌تر شدن زمان‌بندی مطالعات میدانی می‌انجامد. با این حال، ادغام تصاویر پهپاد در گردش کار می‌تواند با کاهش تعداد خاکرخ‌های نیازمند حفاری، افزایش دقت ترسیم مرزهای واحدهای نقشه با تکیه بر دانش متخصص خاک‌شناس، و در نهایت کاهش هزینه‌های مرتبط با علوم خاک به سطحی عملی و پایدار، فرآیندها را بهینه سازد.

جدول ۱- نتایج شاخص کاپا، صحت کلی و هزینه پروژه‌ها

منطقه مطالعاتی	پارامتر مطالعاتی	تعداد نمونه	دقت مکانی متغیرهای مستخرج از DEM (متر)	صحت کلی (درصد)	شاخص کاپا (درصد)	هزینه تصویربرداری در هکتار (ریال)	هزینه مطالعات عرصه و آزمایشگاه در هکتار (ریال)
۱	نقشه زیر گروه خاک	۲۵	۰/۳	۸۳	۷۵	۷,۹۵۱,۷۳۱	۱۵,۵۳۲,۰۵۸
۲	نقشه فامیل خاک	۲۰	۰/۵	۹۰	۸۲	۲,۸۹۲,۶۴۶	۱۵,۵۳۲,۰۵۸
۳	بافت خاک	۲۱	۰/۵	۵۰	۳۶	۸,۲۷۹,۲۵۰	۳,۷۵۰,۰۰۰



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



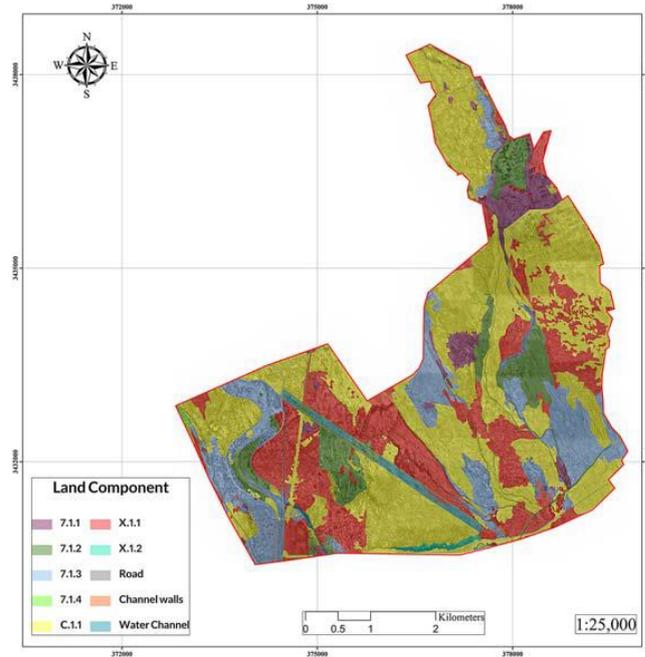
۳,۷۵۰,۰۰۰	۹,۷۸۸,۰۶۴	۴۲	۷۵	۰/۵	۳۱	بافت خاک	۴
۳,۷۵۰,۰۰۰	۴,۸۷۱,۳۹۴	۳۵	۴۶	۰/۵	۵۸	بافت خاک	۵

\* با توجه به این که دوره مطالعه‌های از سال ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۲ در بر می‌گیرد، هزینه‌های ارائه شده در جدول ۱ بر اساس تعرفه‌ها و ارقام اقتصادی سال ۱۴۰۴ و آنالیزهای آزمایشگاهی و میدانی خاک به روز شده است.

منطقه ۲ (نیاتک در استان سیستان و بلوچستان) با مساحت ۲۵۰۰ هکتار در مقیاس نیمه‌تفصیلی مطالعه شد و نقشه‌های فامیل خاک با دقت بالا (دقت کلی = ۹۰ و شاخص کاپا = ۸۲) با استفاده از بیست خاکرخ تهیه گردید، در حالی که مطالعات خاک در مقیاس تفصیلی و نیمه‌تفصیلی به ترتیب به ۱۰۲ و ۵۱ خاکرخ نیاز دارند. در این منطقه، انواع اراضی منطقه مطالعاتی به دشت‌های سیلابی، اراضی متفرقه (تپه‌های ماسه‌ای) و مناطق پیچیده تقسیم‌بندی شدند (Maleki et al., 2024b) دلیل این امر، ایجاد یک نقشه فیزیوگرافی با دقت بالا با استفاده از یک تصویر ارتوفتو سه‌بعدی پهپاد در مقیاس ۱:۵۰۰ بود. اعتبارسنجی میدانی، توافق قوی بین نقشه تفسیری اولیه و عوارض واقعی زمین را تأیید کرد.

به طور کلی، یک مزیت کلیدی داده‌های مشتق شده از پهپاد مانند ارتوفتوها و DEMها (در این دو منطقه، توانایی آن‌ها در تقسیم‌بندی کارآمد منطقه مطالعاتی به واحدهای فیزیوگرافی متمایز است. دقت نقشه به وضوح در شکل ۲ نشان داده شده است که همچنین نمایش مفصلی از واحدهای فیزیوگرافی را برجسته می‌سازد. این رویکرد به خاک‌شناسان اجازه می‌دهد تا بر روی یک خاکرخ نماینده منفرد در هر واحد تمرکز کنند که به طور قابل توجهی نیاز به نمونه‌برداری میدانی گسترده را کاهش می‌دهد. با هدف‌گیری تنها این سایت‌های نماینده، محققان می‌توانند زمان و هزینه‌های کار میدانی را به حداقل رسانده و در عین حال دقت را حفظ نمایند. در نتیجه، منابع بیشتری را می‌توان به تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی و مطالعات میدانی اختصاص داد که فرآیند کلی تحقیق را بهینه می‌سازد. هزینه کارهای علوم خاک تا ۵۰٪ کاهش یافته و از سوی دیگر سرعت اجرای پروژه نیز افزایش پیدا کرده است. بر اساس موفقیت ایجاد نقشه‌برداری رقومی خاک دقیق در مطالعات موردی، کاربرد محصولات مشتق شده از پهپاد شایسته مطالعات بیشتر بوده و باید به صورت گسترده‌تری مورد بررسی قرار گیرد.

نتایج مناطق ۳، ۴ و ۵ اثربخشی پارامترهای توپوگرافی مبتنی بر مدل رقومی ارتفاع (DEM) را در توسعه طبقه‌بندی‌های بافت خاک با وضوح بالا نشان می‌دهد. قابل توجه است که نقشه بافت حاصل برای حوضه آبخیز گوربند که تنها با استفاده از سی و یک نمونه خاک (جدول ۱) تولید شده است، سازگاری استثنایی با الگوهای سطحی قابل مشاهده در تصاویر هوایی با دقت بالا نشان می‌دهد. دقت کلی و ضریب کاپای نقشه بافت خاک تولید شده (جدول ۱) با داده‌های محدود خاک رضایت‌بخش است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که پارامترهای توپوگرافی مشتق شده از مدل‌های ارتفاعی مبتنی بر پهپاد، نیاز به بررسی بیشتر در کاربردهای نقشه‌برداری رقومی خاک (DSM) دارند. نتایج حاضر، تحقیقات قبلی Maleki و همکاران (۲۰۲۰) را تأیید می‌کند که اثربخشی مدل‌های جنگل تصادفی (RF) و داده‌های مشتق شده از پهپاد را برای پیش‌بینی توزیع طبقات خاک با استفاده از داده‌های محدود خاک در خاک‌های با ماده مادری لس در شمال ایران نشان دادند.



شکل ۲- نقشه اجزای اراضی منطقه نیاتک، استان سیستان و بلوچستان (اطلاعات دقیق تر و بیشتر در Maleki et al., 2024b)  
7= Floodplains, X= Miscellaneous lands, C= Complex land type includes both sand dunes and floodplains

در حالی که پهناده‌ها برای مزارع کوچک مقیاس هزینه‌های بالا دارند، پروژه‌های بزرگ کشاورزی و دولتی از صرفه‌های مقیاس بهره‌مند می‌شوند. از سوی دیگر، یک پرواز پهپاد چندپروانه می‌تواند ۶۰۰ هکتار را در یک روز پوشش دهد، در مقایسه با هفته‌ها بررسی دستی. مجموعه داده‌های مشتق شده از پهپاد قابلیت استفاده مجدد برای مطالعات متعدد را دارند که هزینه‌های اولیه را سرشکن می‌کند. با به حداقل رساندن تعداد نمونه‌های خاک و تجزیه و تحلیل روندهای تغییرات مکانی، می‌توان حفر خاکرها را هدفمند در مناطق با تغییرپذیری بالا انجام داد. این رویکرد تلفیقی که نقشه‌برداری رقومی خاک، روش‌های میدانی سنتی و فناوری‌های پیشرفته را ترکیب می‌کند، دقت ترسیم واحدهای خاکی را افزایش داده و در عین حال هزینه‌های عملیاتی را کاهش می‌دهد.

### نتیجه‌گیری

این مطالعه به وضوح نشان می‌دهد که ادغام فناوری پهپادها در نقشه‌برداری رقومی خاک (DSM) یک تحول پارادایمی در علوم خاک ایجاد کرده است. یافته‌های حاصل از پنج منطقه مطالعاتی در ایران اثربخشی این فناوری را در بهبود دقت نقشه‌های خاک، کاهش هزینه‌ها و افزایش کارایی مطالعات میدانی تأیید می‌کند. با وجود چالش‌های اولیه، مزایای بلندمدت فناوری پهپاد شامل دقت بالاتر، کاهش هزینه‌های عملیاتی، و قابلیت استفاده مجدد از داده‌ها موجب می‌شود که این فناوری به یک ابزار ضروری در مطالعات خاک در مقیاس بزرگ تبدیل شود. این مطالعه پتانسیل قابل توجه پهپادها را برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار در مدیریت زمین و امنیت غذایی نشان می‌دهد. پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده بر توسعه پروتکل‌های مقرون‌به‌صرفه و ادغام هرچه بیشتر این فناوری با سیستم‌های پایش محیطی متمرکز شوند.

### فهرست منابع



19<sup>th</sup> Iranian Soil Science Congress  
2-4 December, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران  
۱۱ تا ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



- Bouma, J., Montanarella, L., Evanylo, G. (2019). The challenge for the soil science community to contribute to the implementation of the UN Sustainable Development Goals. *Soil Use Manag*, 35 (4), 538-546.
- Breiman, L., 2001. Random forests. *Mach. Learn*, 45 (1), 5-32.
- FAO, 1976. A framework for land evaluation. *FAO Soils Bull.* 32, Rome, 71 pp.
- Kariminejad, N., Shariati, M., Hosseinalizadeh, M., Pourghasemi, H.R., Maleki, S. (2022a). Investigating geometrical characteristics of collapsed pipes and the changing role of driving factors. *J. Environ. Manag*, 312, 114910.
- Kariminejad, N., Pourghasemi, H.R., Maleki, S., Hosseinalizadeh, M. (2022b). Digital soil mapping and modeling in Loess-derived soils of Iranian Loess Plateau. *Geocarto Int*, 37 (26), 11633-11651.
- Kariminejad, N., Sepehr, A., Poesen, J., Hassanli, A. (2023). Combining UAV remote sensing and pedological analyses to better understand soil piping erosion. *Geoderma*, 429, 116267.
- Khaledian, Y., Miller, B.A. (2020). Selecting appropriate machine learning methods for digital soil mapping. *Appl. Math. Model*, 81, 401-418.
- Lamichhane, S., Kumar, L., Wilson, B. (2019). Digital soil mapping algorithms and covariates for soil organic carbon mapping and their implications: a review. *Geoderma*, 352, 395-413.
- Maleki, S., Khormali, F., Mohammadi, J., Bogaert, P., Bodaghabadi, M.B. (2020). Effect of the accuracy of topographic data on improving digital soil mapping predictions with limited soil data: an application to the Iranian loess plateau. *Catena*, 195, 104810.
- Maleki, S., Kornejady, A. (2024a). Predictive pedometric mapping of soil texture in small catchments: Application of the integrated computer-assisted digital maps, machine learning, and limited soil data. In: *Remote Sensing of Soil and Land Surface Processes*. Elsevier Inc., pp. 319-330.
- Maleki, S., Kornejady, A., Haghani Shirazi, M. (2024b). Unraveling the changes in soil properties revealed by UAV derivative data in an arid floodplain: Lessons learned and things to fathom. In: *Remote Sensing of Soil and Land Surface Processes*. Elsevier Inc., pp. 137-154.
- McBratney, A.B., Santos, M.M., Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117 (1-2), 3-52.
- Minasny, B., McBratney, A.B., 2006. A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. *Comput. Geosci.* 32 (9), 1378-1388.
- Soil Survey Staff, 2022. *Keys to Soil Taxonomy*, 12th ed. U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, p. 372.
- Taghizadeh-Mehriardi, R., Schmidt, K., Toomanian, N., Heung, B., Behrens, T., Mosavi, A., Band, S.S., Amirian-Chakan, A., Fathabadi, A., Scholten, T. (2021). Improving the spatial prediction of soil salinity in arid regions using wavelet transformation and support vector regression models. *Geoderma*, 383, 114793.
- Toscano, F., Fiorentino, C., Capece, N., Erra, U., Travascia, D., Scopa, A., Drosos, M., D'Antonio, P. (2024). Unmanned Aerial Vehicle for Precision Agriculture: A Review. *IEEE Access*.
- Wang, H., et al. (2024). Effect of slope shape on soil erosion and deposition patterns based on SIM-UAV. *Geoderma*, 451, 117076.
- Zeraatpisheh, M., Ayoubi, S., Jafari, A., Tajik, S., Finke, P. (2019). Digital mapping of soil properties using multiple machine learning in a semi-arid region, central Iran. *Geoderma*, 338, 445-452.
- Zhi, J., Zhang, G., Yang, F., Yang, R., Liu, F., Song, X., Zhao, Y., Li, D. (2017). Predicting mattic epipedons in the northeastern Qinghai-Tibetan plateau using random forest. *Geoderma Reg*, 10, 1-10.

### Cost-benefit analysis of drone technology at different scales of soil mapping

S. Maleki<sup>1\*</sup>, A. Goli Jirandeh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Soil Sciences, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran,

\*Corresponding Author: s.maleki@saadi.shirazu.ac.ir

<sup>2</sup>Spatial Science Innovators Consulting Engineering Company, Tehran, Iran

### Abstract



19<sup>th</sup> Iranian Soil Science Congress  
2-4 December, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران  
۱۱ تا ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



Soil studies are critical for sustainable agriculture, environmental conservation, and land-use planning. The integration of unmanned aerial vehicles (UAVs) into soil science has revolutionized data collection, mapping, and analysis methods. This technology provides high-resolution topographic data, multispectral imagery, and three-dimensional terrain models, enabling precise digital soil mapping even with limited historical data. This research investigates the impact of UAVs on reducing costs and enhancing the accuracy of soil studies across five arid and semi-arid regions in Iran. Results demonstrate that UAVs increase sampling efficiency, reduce fieldwork time by up to 40%, and improve prediction accuracy by 17–25% in complex terrains using machine learning models such as random forest (RF). Although initial investments in hardware, software, and training may diminish short-term savings, the long-term benefits including reduced labor costs, higher data accuracy, and scalable monitoring justify its adoption. Future developments should focus on cost-effective workflows and integration with environmental monitoring systems to maximize the role of UAVs in sustainable land management.

**Keywords:** Digital soil mapping, sustainable land management, limited soil data