



دوره ۳۵، شماره ۳، شماره‌ی پایانی ۱۳۶، پاییز ۱۴۰۱، صفحه‌های ۸۰-۶۰
شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2021.356597.1441

مقاله‌ی پژوهشی



پژوهش‌های آبخیزداری

روش‌های نوین در پژوهش‌های خاک‌شناسی آبخیزهای زوجی با روی کرد به‌روزرسانی شرح خدمات در آبخیزهای زوجی دهگین هرمزگان

صدیقه ملکی

پژوهشگر پسادکتر، گروه علوم خاک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

خدیدجه خرمن‌دار

دانشجوی دکتری، گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

محسن حسینی‌زاده

دانشیار گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

عباس گلی‌جیرنده

کارشناس، شرکت مهندسی مشاور نوآوران علوم مکانی، تهران، ایران

آیدینگ کرنازادی

کارشناس، شرکت مهندسی مشاور نوآوران علوم مکانی، تهران، ایران

حمیدرضا پورقاسمی

(نویسنده‌ی مسئول)* استاد بخش مهندسی منابع طبیعی و محیط زیست دانشکده‌ی کشاورزی دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

*ایانامه‌ی نویسنده‌ی مسئول: hr.pourghasemi@shirazu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲۰ آبان ۱۴۰۰ تاریخ پذیرش: ۱۹ آذر ۱۴۰۰

چکیده

یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی در جهان فرسایش خاک است که دشواری‌های پرشمار اقتصادی و نبود توسعه‌ی پایدار را به دنبال دارد. هدف از این پژوهش به‌کاربردن روش‌های نوین در پژوهش‌های خاک‌شناسی با روی کرد به‌روزرسانی شرح خدمات در زیرحوزه‌های زوجی دهگین بود. برای انتخاب جاهای نمونه‌برداری از خاک و خاک‌رخ‌ها روش ابر مکعب لاتین مشروط، با اطلاعات محیطی کمکی (مدل رقومی بلندی) برگرفته از نقشه‌برداری هوایی با پهپاد فانتوم ۴ پرو و مولتی‌روتور به‌کار برده شد. نتیجه نشان داد که ۲ نوع اصلی زمین شامل تپه و فلات و پادگانه‌های بالایی در این جا هست. تکامل خاک‌رخ در منطقه بیش‌تر در تاثیر از پستی‌بلندی است، و خاک‌های واحد تپه ارتباطی مستقیم با جنس مواد مادری و شیب دارد. پایداری خاک‌دانه در مرتع‌های درخت‌دار و منطقه‌های با بافت لومی‌سیلتی بیش‌تر بود، زیرا متغیرهای کمکی از ویژگی‌های مهم و تاثیرگذار در نقشه‌ی پایداری خاک‌دانه است. برای مرحله‌ی ارزیابی نقشه‌اندازه‌های RMSE و R^2 به‌ترتیب ۰/۳۲ و ۰/۲۶ بود. ظرفیت تبادل کاتیونی و نیتروژن خاک در هر دو زیرحوزه‌ی شاهد و نمونه کم بود، و بیشینه‌ی اندازه‌های کربن آلی خاک در زیرحوزه‌ی نمونه بیش‌تر از زیرحوزه‌ی شاهد بود. کاربرد روش‌های نوین مانند کاربرد پهپاد در تصویربرداری و روش‌های دقیق نمونه‌برداری با متغیرهای محیطی در نقشه‌برداری رقومی خاک به کاهش تعداد نمونه‌ی خاک و افزایش دقت نقشه‌های خروجی منجر می‌شود و نتیجه‌ی دقیق‌تری از برآورد اندازه‌ی فرسایش می‌دهد، که در مقایسه با روش‌های پیشین در زمان و هزینه صرفه‌جویی می‌شود. بنابراین کاربرد این روش‌ها در حوزه‌های هم‌سان با شرایط طبیعی و اقلیمی منطقه‌ی پژوهش توصیه می‌شود.

واژگان کلیدی: ابر مکعب لاتین، پهپاد، خاک‌رخ، فتوگرامتری، فرسایش خاک

مقدمه

هر موقعیت مشاهده‌ی خاک، مجموعه‌ی بی از متغیرهای محیطی هست که هم‌بستگی زیادی با ویژگی‌ها یا رده‌های خاک دارد. یافتن این ارتباط و پیش‌بینی ویژگی‌های خاک در جاهای دیگر منجر به تهیه‌ی نقشه‌ی رقوم‌ی خاک می‌شود (عباس‌زاده افشار و همکاران ۲۰۱۸، ملکی و همکاران ۲۰۲۰ الف). برای پیش‌بینی کردن ویژگی‌های خاک یا رده‌ی خاک، مدل‌های گوناگونی در جاهای گوناگون دنیا به کار برده شده است، مانند تصمیم‌گیری درختی^۱، تابع‌های انتقالی^۲، زمین‌آمار، مدل‌های آماری تجربی، رده‌بندی فازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی (مک براتنی و همکاران ۲۰۰۳). یکی دیگر از این مدل‌ها جنگل تصادفی است که شامل رشد دادن مجموعه‌ی از درختان در الگوریتم درخت تصمیم بریمن و کاتلر (۲۰۰۴) است. نتیجه‌ی ارزیابی وانگ و همکاران (۲۰۱۸) در تهیه‌ی نقشه‌ی پیش‌بینی نیتروژن شاهدی بر کارایی بسیار الگوریتم RF با متغیرهای محیطی بود. پیش‌بینی نقشه‌ی کربن آلی خاک با الگوریتم RF در فلات لسی استان گلستان (ملکی و همکاران ۲۰۲۱) در ۲۰-۴۰ و ۲۰-۴۰ سانتی‌متر نشان داد که RF روشی اعتماد‌کردنی با دقت مناسب است که با تعداد نمونه‌ی کم، تخمینی پذیرفتنی می‌دهد. نتیجه‌های سری‌نیواس و همکاران (۲۰۱۶) در هندوستان ضریب تبیین ۰/۸۲ و ۰/۸۶ به ترتیب در تخمین کربن آلی و غیرآلی خاک با الگوریتم RF نشان داد. با همه‌ی این‌ها، هنوز در برخی جاهای دنیا به علت نبودن داده‌های خاک در دسترس، روش‌های نقشه‌برداری رقوم‌ی به‌خوبی به‌کاربردنی نیست (استوروگل و همکاران ۲۰۰۹؛ ملکی و همکاران ۲۰۲۰). پژوهش‌های اندکی مانند ژو و همکاران (۲۰۰۸)، ملکی و همکاران (۲۰۲۰)، زراعت‌پیشه و همکاران (۲۰۱۷)، و استوروگل (۲۰۰۹) اثر تعداد نمونه‌ی کم را بر تهیه‌ی نقشه‌ی خاک بررسی کردند. درحالی که برای کشوری مانند ایران که هم‌اکنون نگرانی درباره‌ی اندوخته‌های آب و خاک برای تامین ماده‌ی غذایی راه‌های مدیریت خاک را تغییر داده است، نیاز به اطلاعات و نقشه‌های خاک بیش از پیش احساس می‌شود. بنابراین، کاربرد بهینه‌ی نقشه‌برداری رقوم‌ی، به‌کارگیری متغیرهای کمکی دقیق‌تر، و کاربرد دانش افراد خبره در شناسایی خاک باید افزون بر تسهیل در پژوهش‌های خاک و انتخاب واحدهای نقشه‌ی یکنواخت، منجر به برداشتن تعداد نمونه‌ی کم‌تر و کاهش هزینه‌های نمونه‌برداری و آزمایشگاهی برای پیش‌برد نقشه‌برداری در منطقه‌هایی شود که داده‌ی آن در دست نیست. داده‌های پستی‌بلندی سطح زمین با توان تفکیک

فرسایش خاک یکی از مهم‌ترین آسیب‌های محیط‌زیستی در زمین‌های کشاورزی و طبیعت جهان است که دشواری‌های اقتصادی را در پی دارد و توسعه‌ی پایدار را با سختی روبه‌رو می‌کند (پورشادمان و همکاران ۲۰۱۶). فرسایش طبیعی که در دوره‌های بسیار طولانی روی می‌دهد منجر به تشکیل خاک می‌شود (سکوئی اسکوتی و عرب‌خدری ۲۰۱۸). در این نوع فرسایش خاک‌سازی بیش‌تر از فرسایش خاک است و در نتیجه ضخامت خاک‌رخ افزایش می‌یابد. فرسایش تشدید شده فرسایشی گفته می‌شود که انسان با بهره‌برداری نادرست از زمین بر پایداری تولید خاک تاثیر می‌گذارد. در نوع تشدید شده فرسایش از خاک‌سازی بیش‌تر است و از ضخامت خاک کاسته می‌شود. نتیجه‌ی سکوتی اسکوتی و عرب‌خدری (۲۰۱۸) در ۱۷ عرصه‌ی گوناگون از کشور نشان داد که میانگین فرسایش در کشور ۱/۳۱ و بیشینه‌ی آن ۳۳/۹۶ تن در هکتار در سال است. نتیجه‌ی اندازه‌ی هدررفت خاک در کاربری‌های گوناگون نشان می‌دهد که کم‌ترین هدررفت خاک در زمین‌های جنگلی است و به ترتیب مرتع، دیم‌زار، و زمین آهک‌رسی در مرتب‌های بعدی است. بنابراین کاربرد درست و مناسب از اندوخته‌های آبخیز و تدوین راه‌بردها و برنامه‌ریزی برای مدیریت آب و خاک در آبخیز، بی داشتن اطلاعات لازم، ناممکن است. بر این پایه، طرح حوزه‌های آبخیز معرف و زوجی در سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری در سال ۱۳۷۷ در ۱۲ استان کشور، از جمله استان هرمزگان (آبخیز دهگین) پایه‌ریزی شد. با اهمیت زیادی که ویژگی‌های خاک برای شبیه‌سازی‌های زیست‌محیطی در مقیاس‌های نیازداشته دارد، با کمبود داده مواجه‌ایم، و در بیش‌تر نقشه‌های خاک کم‌تر به تغییر مکانی میان رده‌ها و تغییر تدریجی آن توجه شده است (ادهیکاری و همکاران ۲۰۱۳). این دشواری در کشورهایی با اطلاعات و داده‌های کم، که تلاش برای داده‌های بیش‌تر با محدودیت‌های مالی روبه‌رو است، کاملاً مشهود است. بنابراین برای به‌تصویر کشیدن تغییر مکانی خاک‌ها با هزینه‌ی کم‌تر و در دوره‌ی کوتاه‌تر به گونه‌ی که نقشه‌هایی پذیرفتنی از خاک داده شود، روش‌های تخمین مکانی خاک با تاکید بر منبع داده‌های دسترس پیدا شده است که نقشه‌برداری رقوم‌ی خاک نامیده می‌شود (مک براتنی و همکاران ۲۰۰۳). پایه‌ی نقشه‌برداری رقوم‌ی خاک معادله‌ی اسکورپن است. در این معادله ویژگی‌ها یا رده‌های خاک با مجموعه‌ی بی از متغیرهای محیطی (متغیرهای کمکی) ارتباط داده می‌شود. در

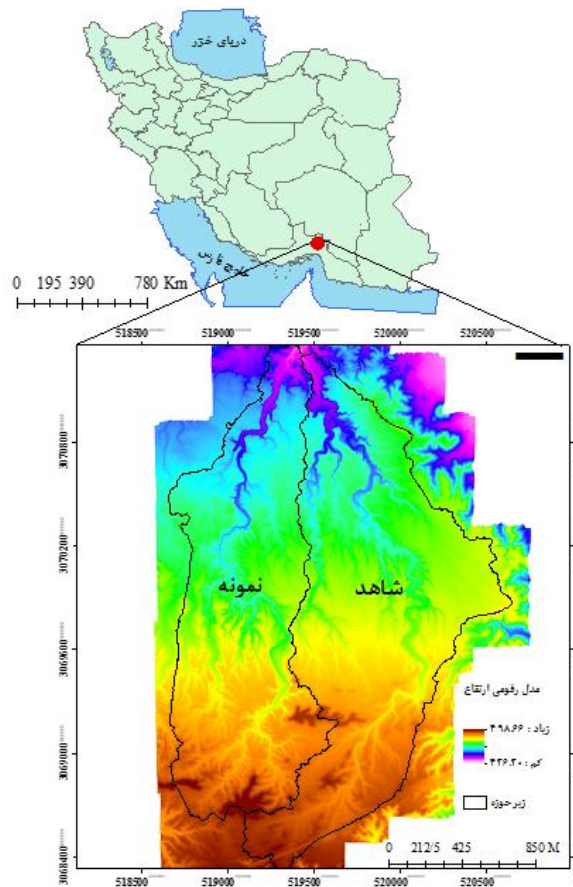
1- Decision tree
2- Pedotransfer

پیشین در این زمینه متفاوت است، و نوآوری مناسبی در پژوهش‌های خاک‌شناسی دارد. روش نمونه‌برداری ابر مکعب لاتین مشروطاً^۴ برای اولین بار در پژوهش‌های حوزه‌های زوجی در کشور در زمینه‌ی نمونه‌برداری خاک در این پژوهش به کار گرفته شد. بنابراین، با این روش می‌توان با کاربرد درست از داده‌های دقیق محیطی، و تعداد کم نمونه‌ی خاک، با دقت زیاد می‌توان برای برنامه‌ریزی و کاربرد درست از اندوخته‌های آبخیز، تدوین راه‌بردها، و برنامه‌ریزی برای مدیریت آب و خاک بهره برد. از آن‌جا که یکی از چالش‌های مهم مدیریتی در حوزه‌های آبخیز کشور کم‌بود پژوهش‌ها و بررسی‌های ترویجی مناسب است، با این پژوهش‌ها می‌توان با به‌روزرسانی شرح خدمات، و تهیه‌ی برنامه‌ی منسجم برای انتخاب ویژگی‌های موثر، به‌سوی توسعه‌دادن ایستگاه‌های تحقیقاتی و زوجی گام برداشت.

مواد و روش‌ها

آبخیز زوجی دهگین با مساحت ۳۶۸/۹۴ هکتار در استان هرمزگان، و شهرستان رودان است (شکل ۱). بیش‌ترین و

مکانی زیاد با تصویرهای پرنده‌های هدایت‌پذیر از دور (پهپاد) بسیار کمک‌کننده است (ملکی و همکاران ۲۰۲۰ الف و ۲۰۲۰ ب؛ کریمی‌نژاد و همکاران ۲۰۲۰؛ موریرا فورلان و همکاران ۲۰۲۱)، و می‌توان برای تعیین‌کردن کمی توزیع مکانی ویژگی‌های خاک و کاربرد مشتق‌های مدل رقومی بلندی^۳ پهپاد و ویژگی‌های مؤثر آبخیز در تهیه‌ی نقشه‌های گوناگون متغیرهای ورودی مدل‌های فرسایش به‌درستی به‌کار برد. در این پژوهش ویژگی میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها که در پژوهش‌های فرسایش خاک کم‌تر به آن توجه شده است، متغیر هدف برای تهیه‌ی نقشه‌ی خاک گرفته شد و برای تحلیل‌کردن وضعیت فرسایش خاک، و ارتباط آن با خاک‌سازی بررسی شد، زیرا نخستین پی‌آمد برخورد قطره‌های باران بر سطح خاک، تخریب خاک‌دانه‌ها، و جدا شدن ذره‌های خاک از یکدیگر است (لوچ و فولی ۱۹۹۴). از این رو، به‌دلیل اهمیت این ویژگی، برای اولین بار در پژوهش‌های حوزه‌های زوجی نقشه‌ی پایداری خاک‌دانه با روش نقشه‌برداری رقومی خاک با تعداد کم نمونه‌ی خاک، با متغیرهای محیطی به‌دست‌آمده از پهپاد تهیه شد، که از این نظر با پژوهش‌های



شکل ۱- موقعیت منطقه‌ی پژوهشی در استان هرمزگان، ایران.

- 3 - Digital Elevation Model (DEM)
4 - Conditioned Lain Hypercube Sampling(cLHS)

نور ورودی (اپرچر) برپایه‌ی وضعیت آفتاب به‌اندازه‌ی مناسب برپایه‌ی شرایط دریاچه به‌اندازه‌ی مناسب برپایه‌ی عدد فاصله‌ی کانونی خود دوربین (F/5)، و شرایط آفتابی هرمزگان میان ۵/۵-۶ تنظیم شد.

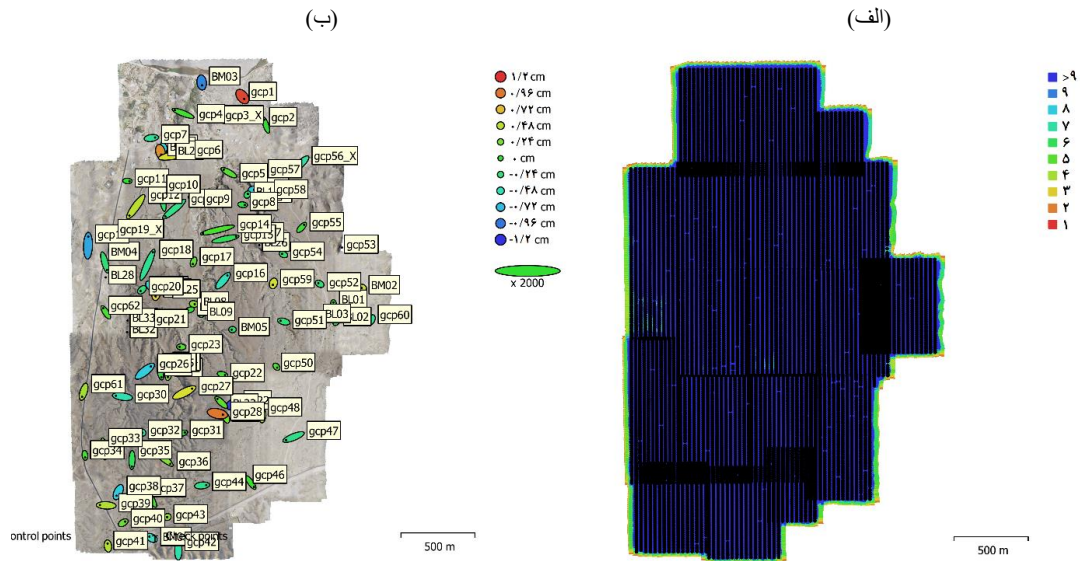
از آن‌جا که پرندیه‌ی که دوربین را می‌برد در حرکت است، اما نگریده (سوژه) ثابت است، نمی‌توان سرعت‌های کم دریاچه را به‌کار برد، بنابراین سرعت‌های زیاد به‌کار برده شد (در حدود ۱/۸۰۰ و ۱/۱۰۰۰ و ۱/۱۲۰۰ S)، که در کسری از ثانیه باز و بسته می‌شود، و در اصطلاح نگریده خشک می‌شود تا هیچ کشیدگی در تصویرها نباشد. اندازه‌ی حساسیت برپایه‌ی دوربین پرندیه ۱۰۰ در نظر گرفته شد.

پهپاد فانتوم ۴ پرو مولتی‌روتور با شیوه‌ی هدایت و مدیریت خودکار، و دوربین FC6310 با اندازه‌های ۳۶۴۸×۵۴۷۲، اندازه‌ی نقطه‌ی تصویر ۱۲۲۸×۲۱۴۰/۰ میلی‌متر، و فاصله‌ی کانونی ۸/۸ میلی‌متر به‌کار برده شد. برای پردازش تصویرهای پهپاد نرم افزارهای Agisoft PhotoScan، Pix4dmap- per، Context Capture و UAS Master به‌کار برده شد. موقعیت مرکز تصویرها و پوشش آن‌ها در کنش‌های پهپاد در شکل ۲، الف داده شده است. پس از کنش‌های تصویربرداری با پهپاد و پردازش تصویرها، برداشت‌های گوناگونی ممکن است. برای تهیه‌ی نقشه و ترسیم‌ها مانند ترسیم آب‌راه‌ها، همه‌ی خطاهای موجود در تصویرها از جمله خطای ناشی از جابه‌جایی اختلاف بلندی و کج‌شدگی برطرف شد تا تصویرهای راست‌عکس (ارتوفوتو) دوبعدی به‌دست آید. نقطه‌های مدیریت و خطای محاسبه برای هر نقطه در کنش‌های پهپاد و محاسبه‌های تولید بلندی و تصویر راست‌عکس در شکل ۲، ب داده شده است. این ارزیابی اندازه‌ی اعتمادپذیری و دقت دست‌یافته‌های تولیدشده را برپایه‌ی دستورکار تهیه‌ی نقشه‌های رقومی ۱:۲۰۰۰ به‌روش نقشه‌برداری هوایی، ویرایش ۳ اسفند ۱۳۹۰ سازمان نقشه‌برداری کشور (سازمان برنامه و بودجه ۱۴۰۰) نشان می‌دهد. برپایه‌ی دستورکار تهیه‌ی نقشه‌ی ۱:۵۰۰ رقومی، دقت همواری ۹۰٪ رخسارهای مشخص تبدیل شده نباید بیش از ۱۵ سانتی‌متر با جای واقعی خود اختلاف داشته باشد، و بیش‌ترین خطای نقطه‌های بررسی در این پژوهش ۱/۲ سانتی‌متر بود، که نشان‌دهنده‌ی دقت بسیار کار است (شکل ۲، ب).

کم‌ترین بلندی حوزه ۴۹۹ و ۴۲۶ متر است. اقلیم محدوده بر پایه‌ی روش آمبرژه و دومارتن به‌ترتیب بیابانی گرم شدید و خشک بیابانی گرم است. متوسط بارندگی سالانه‌ی حوزه ۱۸۶/۱ میلی‌متر و متوسط تبخیر و تعرق سالانه‌ی آن به‌روش بلانی کریدل اصلاح‌شده ۱۸۳۷/۳ میلی‌متر برآورد شد (گزارش خاک‌شناسی حوزه‌ی زوجی دهگین ۲۰۱۲). میانگین دمای سالانه ۲۵/۸ °C است. بر پایه‌ی آمار و اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی بیرون از منطقه، به‌کاربردن ویژگی‌های اقلیمی (میانگین بارندگی و دمای ماهانه)، نقشه‌ی سازگان‌های (رژیم‌های) رطوبتی و دمایی خاک‌های ایران، و بررسی دقیق نتیجه‌ی گزارش‌های پیشین خاک در منطقه‌ی دهگین، سازگان رطوبتی خاک‌ها اریدیک، و سازگان دمایی آن‌ها فزون‌گرمایی (هایپرمیک) شناسایی شد.

از دید زمین‌شناسی، حوزه‌ی پژوهش بخشی از پهنه‌ی سندیج-سیرجان است؛ از دید گوناگونی چینه‌شناسی کاملاً یک‌نواخت است، و به‌یک‌نواختی از جوش‌سنگ‌های پلی‌تیکتیک و ماسه‌سنگ ساخته شده است. جوش‌سنگ منطقه با سیمان‌شدگی ضعیف است. در لایه‌ی زیرین جوش‌سنگ لای (سیلت) و آهک‌رس افقی است (گزارش خاک‌شناسی حوزه‌ی زوجی دهگین ۲۰۱۲).

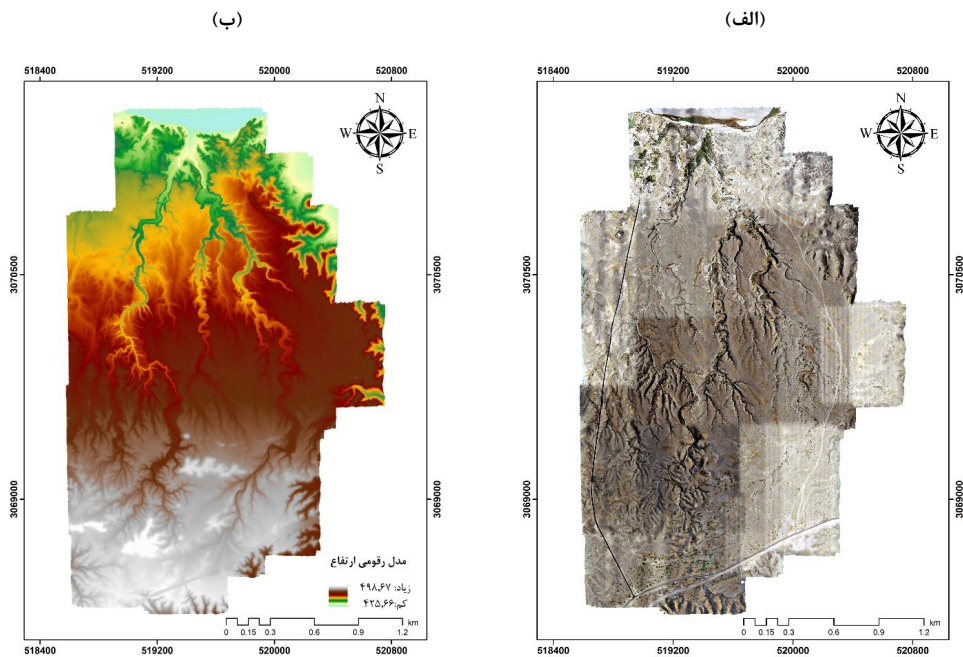
پس از بررسی دقیق وسعت منطقه، نوع منطقه، تعداد و موقعیت ایستگاه‌های دائمی، و دستگاه‌های لازم برای پرواز در منطقه مشخص شد. بر پایه‌ی وضعیت پستی‌بلندی آبخیز دهگین، نیاز به تولید ابرنقطه با تراکم و دقت زیاد بود. پوشش طولی و عرضی برای عکس‌های پهپاد ۸۰ و ۷۰٪ در نظر گرفته شد. پیش از پرواز نقطه‌های بررسی زمینی به تعداد مناسب، در جاهای مناسب، و در سراسر منطقه به‌گونه‌ی مشخص شد که افزون بر داشتن اندازه‌ها و شکل مناسب تا پایان مدت پرواز بی‌تغییر بماند. برای خواندن مختصه‌های مرکز جاهای برگزیده GPS RTK به‌کار برده شد. پیش از کنش‌های پرواز ویژگی‌های عکس‌برداری شامل سرعت دریاچه (شاتر)، اندازه‌ی حساسیت حس‌گر به‌نور (ایزو)، تنظیم فاصله‌ی کانونی و دریاچه‌ی نور (دیافراگم) به‌درستی تنظیم شد (عدد دریاچه‌ی نور بر پایه‌ی نوع دوربین و پرندیه میان ۴ تا ۸ تنظیم شد)، تا تصویرهایی با کیفیت و روشنایی مناسب به‌دست آید، و در مرحله‌های پردازش نیز کیفیت دست‌یافته‌ها خوب باشد.

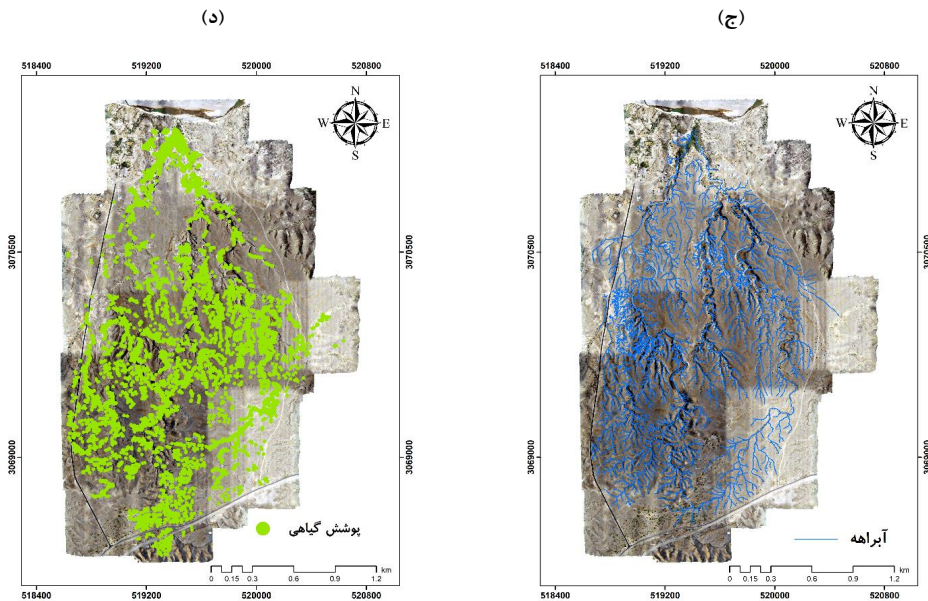


شکل ۲- موقعیت مرکزهای تصویر و پوشش تصویرها (الف)، و نقطه‌های بررسی و خطای محاسبه‌ی آن‌ها (ب) در محدوده‌ی تصویربرداری پهباد.

نقشه‌ی خاک و متغیرهای محیطی با توان تفکیک زیاد به کار برده شده است (ملکی و همکاران ۲۰۲۰)، اما کاربردهای تازه از روش‌های سامانه‌ی عکس برداری بی‌سرنشین راه‌حلی برای تولید عکس‌های هوایی با دقت زیاد در بازه‌ی مکانی و زمانی است.

ابر نقطه، تبدیل و ترسیم رخسارها، نقشه‌ی راست‌عکس، مدل سه‌بعدی عرصه، مدل رقومی بلندی سطح زمین (DSM) و مدل رقومی بلندی ناهمواری زمین (DTM) از جمله دست‌یافته‌های فراگیر نقشه‌برداری با عکس هوایی (فتوگرامتری) پهباد بود، که برای حوزه‌ی دهگین هرمزگان تهیه شد (شکل ۳). این روش کم‌تر در پژوهش‌های تهیه‌ی





شکل ۳- دست‌یافته‌های نقشه‌برداری با عکس هوایی پهپاد در حوزه‌ی زوجی دهگین استان هرمزگان، الف: راست‌عکس (ارتوفوتو)، ب: مدل رقومی بلندی، ج: ترسیم سه‌بعدی آبراه‌ها، و د: پوشش گیاهی با عینک‌های دریچه‌دار (شاتر).

در پژوهش‌های شناسایی خاک، به‌دلیل گستردگی زیاد، زیادبودن هزینه‌های اجرا، و مدیریت‌ناپذیر بودن تغییرها و عامل‌های تغییردهنده، نمونه‌برداری باید هم‌آهنگ با تغییرها طراحی شود. برای انتخاب جاهای نمونه‌برداری از خاک و خاک‌رخ‌ها روش cLHS (میناسنی و مک‌برانتی ۲۰۰۶) با نرم‌افزار R (آر دولپ کر تیم ۲۰۱۷) به‌کار برده‌شد. کاربرد تصمیم‌می‌گرفت که تعداد نمونه‌ی مشخصی به‌کار برود، بنابراین داده‌های متغیرهای محیطی را به‌همان تعداد خوشه‌های خواسته‌شده تقسیم می‌کرد، و نمونه‌ی تصادفی از داده‌های ورودی متغیرهای محیطی هر خوشه انتخاب می‌کرد. این روش در جاهایی که نمونه‌ی پیشینی از خاک نیست (تنها اطلاعات کمی هست) پیشنهاد شده است. این روش طرح تصادفی رده‌بندی‌شده‌ی است که باعث نمونه‌برداری موثری با توزیع چند متغیر می‌شود. متغیرها ممکن است بازتاب‌های ثبت‌شده‌ی سنجنده یا اطلاعات به‌دست آمده از مدل رقومی بلندی مانند شیب، جهت، سطح‌های زمین‌ریخت، پوشش گیاهی یا مانند این‌ها باشد. با این مولفه‌ها تلاش می‌شود که ضمن نگه‌داشتن حالت تصادفی بودن نمونه‌برداری‌ها برای تأمین کردن خواسته‌ی تحلیل‌های آماری، نمونه برداری به‌شیوه‌ی انجام شود که بیش‌ترین نمونه‌برداری در بیش‌ترین گوناگونی تغییرهای بررسی‌شده (بر پایه‌ی گوناگونی نقشه‌های ورودی) انجام شود. به‌طور کلی cLHS شامل نمونه‌برداری n اندازه از توزیع تشریح‌شده‌ی هر متغیر است. توزیع تجمعی هر

متغیر به n فاصله با احتمال مساوی تقسیم می‌شود، و اندازه‌ی از هر فاصله تصادفی انتخاب می‌شود. سپس n اندازه‌ی به‌دست آمده برای هر متغیر با متغیرهای دیگر جفت می‌شود. این روش، پوشش کاملی از هر متغیر ایجاد می‌کند. متغیرهای کمکی به دسته‌های یکنواخت رده‌بندی می‌شود (میناسنی و مک‌برانتی ۲۰۰۶).

میناسنی و مک‌برانتی (۲۰۰۶) روش cLHS را با روش نمونه‌برداری تصادفی ساده و نمونه‌برداری تصادفی رده‌بندی‌شده مقایسه، و مشاهده کردند که روش cLHS بیش‌تر توزیع واقعی متغیرهای محیطی را با دقت نشان می‌دهد، در حالی که در روش‌های نمونه‌برداری تصادفی ساده و تصادفی رده‌بندی‌شده، حتی هنگامی که از کل فضای سطح نمونه گرفته باشند، احتمال توزیع نامناسب نمونه‌ها در میان دامنه‌ی همه‌ی متغیرهای محیطی هست. از سوی دیگر، روش‌های نمونه‌برداری تصادفی ممکن است به اندازه‌ی زیادی نمونه نیاز داشته باشد، که با هزینه‌های زیاد نقشه‌برداری نشدن و وقت‌گیر است. پهلوان‌راد و همکاران (۲۰۱۶) نشان دادند که اگر نمونه نماینده زمین‌نما نباشد، انجام‌دادن میان‌یابی برای محل‌های نمونه‌برداری نادرست است، و به روشی نیاز است که همه‌ی اجزای متغیرهای محیطی را پوشش دهد. پژوهش‌های پیشین خاک در ایران با روش نمونه‌برداری cLHS نشان‌دهنده‌ی دقت بسیار این الگوریتم است (حسینی‌زاده و همکاران ۲۰۱۷؛ پهلوان‌راد و همکاران ۲۰۱۴؛ زراعت‌پیشه و

پژوهش‌های شناسایی خاک، به‌دلیل گستردگی زیاد، زیادبودن هزینه‌های اجرا، و مدیریت‌ناپذیر بودن تغییرها و عامل‌های تغییردهنده، نمونه‌برداری باید هم‌آهنگ با تغییرها طراحی شود. برای انتخاب جاهای نمونه‌برداری از خاک و خاک‌رخ‌ها روش cLHS (میناسنی و مک‌برانتی ۲۰۰۶) با نرم‌افزار R (آر دولپ کر تیم ۲۰۱۷) به‌کار برده‌شد. کاربرد تصمیم‌می‌گرفت که تعداد نمونه‌ی مشخصی به‌کار برود، بنابراین داده‌های متغیرهای محیطی را به‌همان تعداد خوشه‌های خواسته‌شده تقسیم می‌کرد، و نمونه‌ی تصادفی از داده‌های ورودی متغیرهای محیطی هر خوشه انتخاب می‌کرد. این روش در جاهایی که نمونه‌ی پیشینی از خاک نیست (تنها اطلاعات کمی هست) پیشنهاد شده است. این روش طرح تصادفی رده‌بندی‌شده‌ی است که باعث نمونه‌برداری موثری با توزیع چند متغیر می‌شود. متغیرها ممکن است بازتاب‌های ثبت‌شده‌ی سنجنده یا اطلاعات به‌دست آمده از مدل رقومی بلندی مانند شیب، جهت، سطح‌های زمین‌ریخت، پوشش گیاهی یا مانند این‌ها باشد. با این مولفه‌ها تلاش می‌شود که ضمن نگه‌داشتن حالت تصادفی بودن نمونه‌برداری‌ها برای تأمین کردن خواسته‌ی تحلیل‌های آماری، نمونه برداری به‌شیوه‌ی انجام شود که بیش‌ترین نمونه‌برداری در بیش‌ترین گوناگونی تغییرهای بررسی‌شده (بر پایه‌ی گوناگونی نقشه‌های ورودی) انجام شود. به‌طور کلی cLHS شامل نمونه‌برداری n اندازه از توزیع تشریح‌شده‌ی هر متغیر است. توزیع تجمعی هر

بردن دقت کار و بالابردن سطح انتخاب کارشناس خبره‌ی خاک‌شناسی، نخست ۷۰ جا برپایه‌ی روش cLHS انتخاب شد، اما بعد از بازدید عرصه‌های نزدیک به جاده، یا جاهای هم‌سان که نماینده‌ی یک نوع واحد تغییر کاربری، بلندی یا ... بود حذف شد، و سرانجام ۵۵ نمونه از منطقه برداشته شد. این شیوه‌ی نمونه‌برداری در حوزه‌های زوجی برای نخستین بار در کشور به کار برده شد.

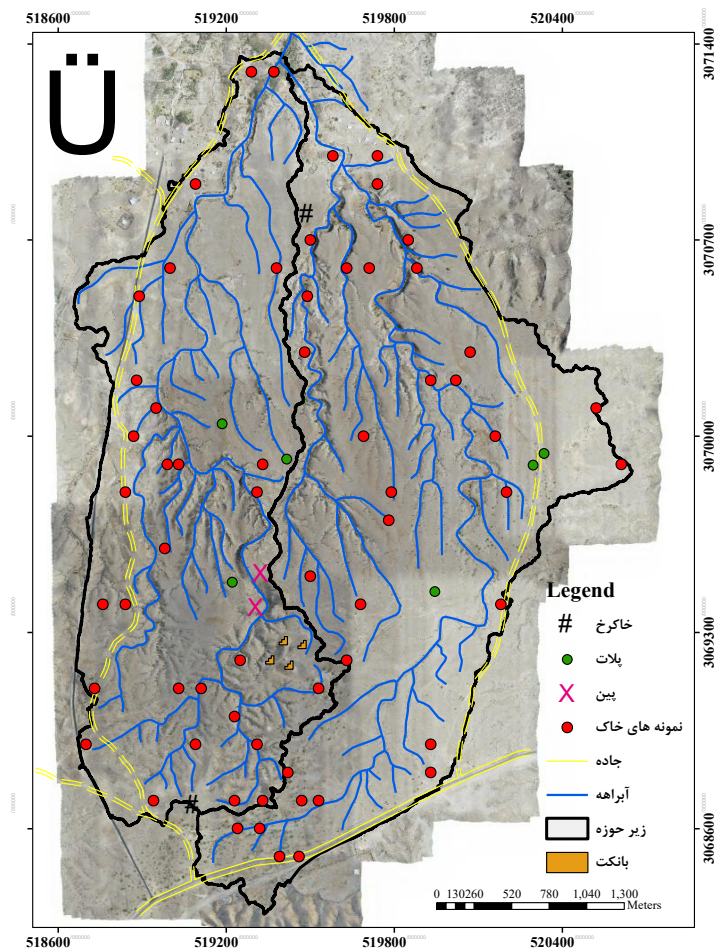
همکاران ۲۰۱۷، ۲۰۱۹؛ ملکی و همکاران ۲۰۲۰؛ فتحی‌زاده و همکاران ۲۰۲۰). اندازه‌های متغیرهای کمکی (جدول ۱) با نرم‌افزار R و به‌کارگیری بسته‌ی پیوست cLHS (رودیر و همکاران ۲۰۲۰) در حوزه‌ی زوجی شاهد و نمونه‌ی دهگین منجر به تعیین ۷۰ جای نمونه‌برداری خاک شد. پس از بازدید در عرصه ۵۵ جا برای نمونه‌برداری تعیین شد (شکل ۴). از آن‌جا که یکی از هدف‌های پژوهش انتخاب داده‌ی بهینه و کم بود، برای بالا

جدول ۱- داده‌های محیطی به‌کاررفته در تعیین نقطه‌های نمونه‌برداری در حوزه زوجی دهگین.

عامل خاک‌سازی	ویژگی	تعریف	نام لایه ورودی به مدل	منبع
پستی‌بلندی	بلندی	بلندی از تراز دریا	DEM	(مور و همکاران ۱۹۹۳؛ گالات و دولینگ ۲۰۰۳)
	شیب	تغییرات بلندی در راستای تراز افق	Slope	
	موقعیت شیب نسبی	شاخص شناسایی دره و یال‌ها که نشان‌دهنده‌ی بلندی نسبی دیگر منطقه‌ها از این دره و یال‌ها است.	Relative Slope Position	
	جهت شیب	بیش‌ترین سرعت تغییر در بلندی در هر یاخته از DEM	Aspect	
	سایه	نمایش سطح سایه	Hillshade	
	انحنای قائم	انحنا در صفحه عمودی خط جریان است، بیان‌گر اندازه‌ی افزایش و کاهش سرعت جریان	Profile Curvature	
	انحنای افقی	انحنا در صفحه افقی یک خط کران‌نما.	Plan Curvature	
	انحنای مماسی	نشان‌دهنده‌ی انحراف جریان مواد و بیان‌گر اندازه‌ی هم‌گرایی و واگرایی جریان	Convergence Index	
	شاخص حمل مواد معلق	خمیدگی در سطح شیب‌دار عمود بر جریان، بیان‌گر اندازه‌ی هم‌گرایی و واگرایی جریان	LS- Factor	
	شاخص خیزی پستی‌بلندی	نمایان‌گر فرآیندهای فرسایش و موادمعلق در زمین‌نما و اثر پستی‌بلندی بر فرسایش	Topographic Wetness Index (TWI)	
شاخص جریان تجمعی	توزیع مکانی منطقه‌ی اشباع و اندازه‌ی آب خاک در زمین‌نما	Flow Accumulation		
فاصله از شبکه‌ی آبراه	شاخص ناهمواری سطح زمین	توزیع مکانی شکل پستی‌بلندی در زمین‌نما	Terrain Ruggedness Index (TRI)	(بوهرنر و آنتنیک ۲۰۰۹)
	اثر باد	نمایشی از منطقه‌های تاثیر‌گرفته از باد غالب	Wind Effect	
شبکه‌ی آبراه	فاصله از شبکه‌ی آبراه	نمایان‌گر فاصله از رود (شبکه‌ی آبراه و زه‌کشی)	Channel Network Distance	(کنراد و همکاران ۲۰۱۵)
	وضعیت شبکه‌ی آبراه و زه‌کشی		Channel Network	
شاخص تعادل مواد	نمایان‌گر فرآیندهای فرسایش و موادمعلق (اندازه‌ی ورود و خروج) در زمین‌نما	استخراج خط‌راس‌ها، دامنه‌ها، منطقه‌های دشتی، دره‌ها، آبراه و رودخانه برپایه‌ی برش‌های عرضی و آستانه‌ی تعریف‌شده	Mass Balance Index	(الا یا ۲۰۰۴)
شاخص موقعیت پستی‌بلندی	شاخص موقعیت پستی‌بلندی		Topographic Position Index (TPI)	(ویس ۲۰۰۱)
شاخص همواری دره با درجه‌ی تفکیک زیاد	شاخص همواری بالا	شناسایی پایین‌ترین سطح دره از تپه‌ها	Multi-resolution Valley Bottom Flatness Index (MRVBF)	(گالات و دولینگ ۲۰۰۳)
	آمدگی با درجه‌ی تفکیک زیاد	شناسایی منطقه‌های پایدار کوهستانی	resolution of Ridge -Multi Top Flatness Index (MRRFT)	
	موقعیت دید (آشکاری)	نمایان‌گر منطقه‌های دیده‌شدنی از خط دید	Position Openness	

جدول ۱- داده‌های محیطی به‌کاررفته در تعیین نقطه‌های نمونه‌برداری در حوزه زوجی دهگین.

عامل خاک‌سازی	ویژگی	تعریف	نام لایه ورودی به مدل	منبع
	ژرفای دره	فاصله‌ی عمودی تا تراز پایه شبکه آب‌راه	Valley Depth	(بوهرنر و آنتنیک ۲۰۰۹)
خاک، مواد مادری و پستی‌بلندی	زمین‌ریخت‌شناسی	واحدهای شکل زمین	Geomorph	(ویس ۲۰۰۱)
خاک، پوشش گیاهی و پستی‌بلندی	منحنی روان‌آب	پیش‌بینی روان‌آب مستقیم یا اندازه‌ی نفوذ به‌دست‌آمده از بارش افزوده	Curve Number (CN)	سازمان حفاظت منابع طبیعی (USDA)
موجود زنده	پوشش گیاهی	نمایش وضعیت پوشش گیاهی منطقه	Vegetation	



شکل ۴- موزاییک تصویری هوایی تهیه‌شده با پهپاد به‌همراه پراکنش جاهای نمونه‌برداری خاک سطحی و خاک‌رخ‌ها در حوزه‌ی زوجی دهگین، استان هرمزگان.

منحنی روان‌آب، و پوشش گیاهی با مقیاس ۱:۵۰۰ است. ویژگی‌های پستی‌بلندی به شاخص‌های اولیه و ثانویه (مرکب) تقسیم شد.

شاخص‌های اولیه که شامل بلندی، درجه‌ی شیب، جهت شیب، میانگین انحنای سطح زمین، انحنای مسطح و انحنای نیم‌رخ است، مستقیمانه از DEM تهیه‌شده از پهپاد محاسبه شد، و شاخص‌های ثانویه شامل شاخص رطوبت، شاخص توان آب‌راه، و شاخص انتقال موادمعلق از ترکیب شاخص‌های اولیه به‌دست آمد (ملکی و همکاران ۲۰۱۴). شاخص‌های ثانویه‌ی پستی‌بلندی، فرآیندهای آب‌شناسی مرتبط با پستی-بلندی (ویژگی‌های آب‌شناسی) را توصیف می‌کند (اقبال و همکاران ۲۰۰۵). اطلاعات محیطی کمکی از نقشه‌ی مدل رقمی بلندی با نرم‌افزارهای آرک جی‌آی‌اس ۱۰،۲ و ساگا ۲،۲ به‌دست آورده شد (الایا ۲۰۰۴). دی‌ای‌ام منطقه با یاخته‌هایی به اندازه‌ی ۱×۱ متر با پهپاد تهیه شد.

برای ارزیابی کیفیت خاک‌ها ویژگی‌های فیزیکی آن‌ها بررسی شد. برخی از شاخص‌های فیزیکی خاک با گذشت زمان تقریباً ثابت است، اما در برابر، بسیاری از آن‌ها پویا است (برگر و کلتینگ ۱۹۹۱). بنابراین، نمونه‌های گوناگون خاک به آزمایشگاه برده شد، و برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌ها اندازه گرفته شد.

بافت خاک به روش آب‌شناسی (جی و بودر ۱۹۸۶)، پی‌اچ نمونه‌های خاک در گل اشباع با پی‌اچ‌متر (پیچ و همکاران ۱۹۸۲)، هدایت الکتریکی عصاره‌ی اشباع با هدایت سنج الکتریکی (توماس ۱۹۹۶)، کربنات کلسیم معادل خاک به‌روش تیتراسیون برگشتی با اسید کلریدریک ۱ نرمال (پیچ و همکاران ۱۹۸۲)، کربن آلی خاک به‌روش اکسایش تر (نلسون و سومر ۱۹۸۲)، ظرفیت تبادل کاتیونی با استات آمونیوم (pH=۷) (چاپمن ۱۹۶۵)، میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها به‌روش الک مرطوب (کمپر و روزنیو ۱۹۸۶)، اندازه‌ی سدیم محلول، کلسیم و منیزیم محلول به‌روش تیتر کردن با EDTA (توکر و کورتز ۱۹۶۱)، و نسبت جذب سدیم (واسو و همکاران ۲۰۱۶) اندازه گرفته شد.

الگوریتم جنگل تصادفی دقیق و از دید محاسبه‌کردن نیز سریع است (بریمن ۲۰۰۱). به جای رشد دادن یک درخت، تعداد بسیاری درخت، صدها یا هزارها، مستقلانه رشد داده می‌شود. تقریباً یک‌سوم داده‌های اصلی در ایجاد هر درخت به‌کاربرده نمی‌شود (نمونه‌های بیرون از سبذ). الگوریتم جنگل تصادفی اهمیت متغیرها را به دو روش میانگین کاهش دقت و میانگین کاهش ضریب جینی نشان می‌دهد (مایلز و همکاران ۲۰۰۴). در روش میانگین کاهش دقت، که کاربرد آن بیش‌ترین است،

برای شناخت و دست‌یابی به بعضی از ویژگی‌های خاک مانند رنگ، ساختمان، پوشش رسی، تجمع کربنات‌ها، واکنش به اسید، نمک‌های محلول، گچ، سنگ‌ریزه در خاک سطحی و زیرین، پایداری، لکه‌های رنگی، حفره‌ها، گسترش ریشه، تجمع مواد آلی، افق‌های خاک، ضخامت آن‌ها، شیوه‌ی جا گرفتن افق‌ها، و ژرفای خاک که بخشی از ریخت‌شناسی خاک‌ها است، خاک‌رخ تشریح شد. علاوه بر ویژگی‌های ظاهری درونی خاک‌رخ، عامل‌های محیطی و ظاهری بیرونی خاک‌ها که بر تشکیل، توان بهره‌برداری، استعداد، و محدودیت آن‌ها تأثیر می‌گذارد نیز بررسی شد. خاک‌ها برای شناسایی ویژگی‌های مهم رده‌بندی شد. رده‌بندی این امکان را فراهم می‌آورد که اطلاعات در مورد خاک‌ها سازماندهی شود، ارتباط درونی آن‌ها دیده شود، و اصولی در نظر گرفته‌شود که به فهمیدن و شناختن رفتار آن‌ها، و واکنش آن‌ها به بهره‌برداری درست کمک کند. رده‌بندی خاک‌ها به روش‌های گوناگونی انجام می‌شود، ولی به‌طور کلی با دو دیدگاه است کاربرد و ویژگی‌های ذاتی است. رده‌بندی برپایه‌ی کاربرد خاک‌ها بیشتر بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، و ویژگی‌های سرزمین تأکید دارد. معمولاً هر کشور روش ویژه‌ی دارد، ولی این روش‌ها معمولاً در چارچوب فائو است. رده‌بندی برپایه‌ی ویژگی‌های ذاتی خاک‌ها بیشتر بر فرآیندهای خاک‌ساز تأکید دارد. دو روشی که بیشتر به‌کار برده می‌شود روش رده‌بندی خاک و روش جامع جهانی است، که در این پژوهش نیز به‌کاررفت. در روش رده‌بندی خاک شش رده یا تراز رده‌بندی رده، زیررده، گروه بزرگ، زیرگروه، خانواده و مجموعه است.

در روش جامع جهانی دو رده یا تراز رده‌بندی هست: گروه‌های مرجع خاک و توصیف‌کننده‌ها^۵.

با بازدید عرصه و انتخاب بهترین جاهای شاهد برای توصیف اجزای واحد زمین، دو خاک‌رخ تا ژرفای ۱۰۰ سانتی‌متر کنده شد. خاک‌رخ‌های کنده‌شده برپایه‌ی روش رده‌بندی خاک آمریکا (۲۰۱۴) و رده‌بندی جهانی (۲۰۱۴) به‌روزرسانی (۲۰۱۵) تشریح و رده‌بندی شد. نمونه‌برداری‌ها از افق‌های توارثی انجام شد. همه‌ی خاک‌رخ‌های کنده‌شده تا تراز خانواده‌ی خاک رده بندی شد. برای هر جا اطلاعاتی از محل خاک‌رخ در زمین‌نما شامل نوع واحد زمین‌ریخت و نوع مواد مادری یادداشت‌برداری شد. اطلاعاتی مانند جهت، شیب، نوع و اندازه‌ی فرسایش و اندازه‌ی سنگ‌ریزه‌های سطحی تخمین زده و یادداشت‌برداری شد.

داده‌های محیطی که بیان‌گر عامل‌های خاک‌سازی است در تعیین جاهای نمونه‌برداری در این حوزه‌ی زوجی به‌کار برده شد. این داده‌ها شامل ویژگی‌های استخراج‌شده‌ی DEM، نقشه‌ی

آمد. برای بررسی و ارزیابی کردن الگوریتم RF از معیار خطای ریشه‌ی میانگین مربع‌های خطای تخمین^۸ و ضریب تبیین (R^2) بهره گرفته شد.

نتایج و بحث

برپایه‌ی بررسی‌های ستادی و میدانی، تفسیر راست‌عکس تهیه‌شده با پهپاد، و نقشه‌ی پایه در حوزه‌ی زوجی دهگین، ۲ نوع اصلی زمین تپه و فلات و پادگانه‌های بالایی بود (جدول ۲، شکل ۵). اطلاعات افق‌بندی، تجزیه‌ی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، و رده‌بندی خاک‌ها تا سطح خانواده‌ی خاک در جدول ۲ داده شده است. خاک‌رخ‌های مشاهده‌شده در واحد زمین نمای تپه در زیر گروه Typic Torriorthens بود (گزارش‌های خاک‌شناسی حوزه‌ی زوجی دهگین ۱۳۹۱). به‌طور کلی تکامل خاک‌رخ در این منطقه بیش‌تر در تاثیر پستی‌بلندی، به ویژه شیب و شدت فرسایش منطقه است. در برخی از منطقه‌ها تراکم پوشش گیاهی مانع فرسایش و تولید موادمعلق بیش‌تر است.

افزون بر این، ضخامت نسبتاً کم افق سطحی (A) نشان دهنده‌ی فرسایش خاک در این جاها است، که ناشی از پوشش گیاهی ضعیف و تراکم کم آبراه است. هم‌سو با این نتیجه‌ها تکا و همکاران (۲۰۱۵)، لوزاناگاریا و همکاران (۲۰۱۶) و ملکی و همکاران (۲۰۲۰) الف و ب) نیز وجود تراکم آبراه و رطوبت بیش‌تر در جهت‌های شمالی را عامل اصلی حفظ پوشش گیاهی، وجود خاک‌های با کیفیت، و تکامل بیش‌تر دانستند. خاک‌های واحد زمین تپه در حوزه‌ی زوجی دهگین اغلب ارتباط مستقیمی با جنس مواد مادری و شیب دارد، و شیب زمین کلی، معمولاً میان ۸ تا ۲۵٪ و در برخی منطقه‌ها ۴۰٪ در جهت‌های گوناگون است. بلندی این زمین‌ها ۵۰۰-۴۸۰ متر از تراز دریا، و شیب عمومی آن کم‌تر از ۲۵٪ است.

اندازه‌های درست متغیرها با اندازه‌هایی که تصادفی برای هر درخت تولید شد جای‌گزین، و اثر این تغییر بر رده‌بندی اندازه‌گیری می‌شود. اگر این جای‌گزینی اثری بر خطای اندازه‌گیری نداشته باشد اهمیت آن متغیر کم است، و اگر اندازه‌ی خطای اندازه‌گیری افزایش یابد، آن متغیر مهم است (بريمن و کاتلر ۲۰۰۴). میانگین کاهش ضریب جینی اهمیت متغیرها را با جابه‌جا کردن اندازه‌های متغیرهای محیطی در نمونه‌های OOB انجام می‌دهد، و متغیرهای محیطی همراه با افزایش نسبی در OOB با اهمیت است. برای متغیر با همگنی زیاد میانگین کاهش ضریب جینی هم زیاد است (بريمن ۲۰۰۱).

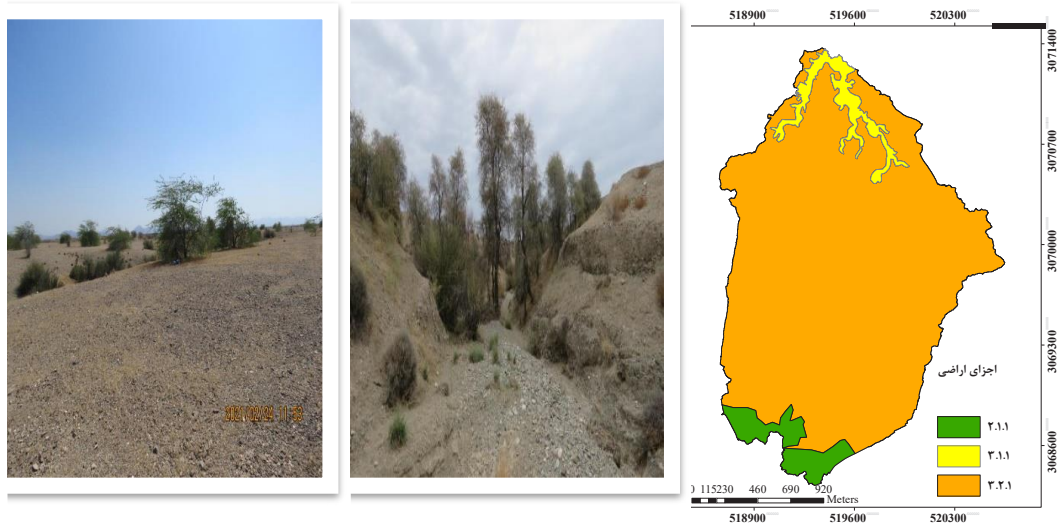
کاربر باید دو ویژگی تعداد درخت در جنگل (ntree) و تعداد ویژگی کمکی در هر زیرمجموعه‌ی تصادفی^۹ را به‌روش سعی وخطا با درنظر گرفتن کاهش در اندازه‌ی خطای OOB مشخص کند. برای تعیین اندازه‌های mtry اندازه‌های ۱ تا بیشینه‌ی تعداد متغیرهای کمکی (ملکی و همکاران ۲۰۲۰ الف) و اندازه‌های ntree از ۱۰۰ تا ۱۰۰۰۰ با افزایش ۱۰۰ در هر تکرار تعیین شد (ژی و همکاران ۲۰۱۷). روش جنگل تصادفی با بسته‌ی پیوست RandomForest در نرم‌افزار R (آر دولپ کر تیم ۲۰۱۷) برای تهیه‌ی نقشه‌ی پایداری، خاک‌دانه متغیر پیوسته و کلیدی در فرسایش خاک گرفته‌شد. اگرچه الگوریتم خود اعتبارسنجی می‌کند، روش اعتبارسنجی دوجانبه‌ی ۱۰ مرتبه‌ی (هنگل و همکاران ۲۰۱۵) برای اعتبارسنجی کارکرد الگوریتم RF به‌کار برده‌شد. در این روش همه‌ی مشاهده‌ها به ۱۰ مجموعه داده‌ی مساوی تقسیم شد، و مدل‌ها با ۹ مجموعه از داده‌ها آموزش داده، و با مجموعه‌ی به‌کار برده‌نشده اعتبارسنجی شد، و همه‌ی ۱۰ مجموعه‌ی داده یک بار در جایگاه داده‌ی اعتبارسنجی و آموزشی به‌کار برده‌شد.

هر تکرار یک مرتبه^۷ است. خطای نهایی مدل از میانگین خطاهای به‌دست‌آمده از اجرای n بار اجراکردن مدل به‌دست

6 - Mtry
7 - Fold
8 - Root Mean Squared Error (RMSE)

جدول ۲- ویژگی‌های هر یک از بخش‌های زمین و مساحت آن‌ها.

نوع زمین	یگان زمین	شرح	بخش‌های شرح زمین	مساحت (ha)	درصد	محدودیت اصلی
۲	۲،۱	تپه‌ها	۲،۱،۱	۱۷/۴۸	۴/۷۵	شیب زیاد در برخی منطقه‌ها، زه‌کشی شدید
۳	۳،۱	فلات‌ها و پادگانه‌های بالایی همراه با پوشش گیاهی درختی و رسوب‌های آب‌رفتی در دره‌ها	۳،۱،۱	۱۴/۱۰	۳/۸۲	شبکه‌ی آبراه متراکم، خندق‌های پیش‌رونده
۳،۲	۳،۲	فلات‌ها و پادگانه‌های بالایی همراه با پوشش درختی پراکنده و مرتع	۳،۲،۱	۳۳۷/۲۶	۹۱/۴۳	شبکه‌ی آبراه متراکم، خندق‌های پیش‌رونده



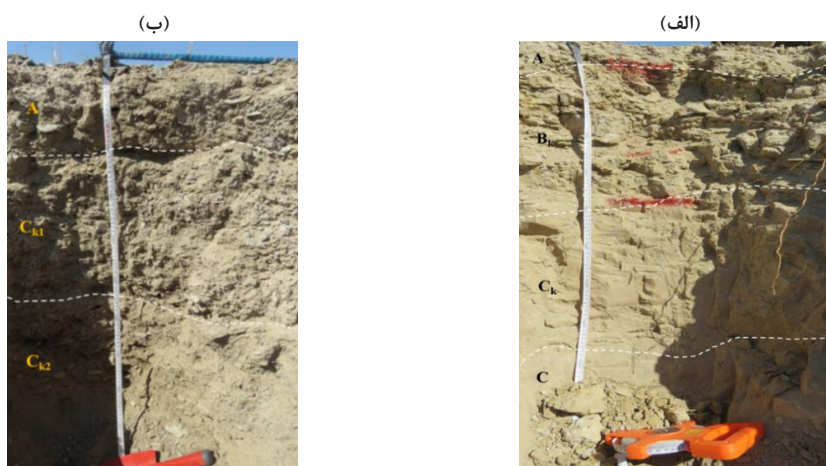
شکل ۵- الف. نقشه‌ی بخش‌های زمین در زیرحوزه‌های شاهد و نمونه‌ی دهگین تهیه‌شده با بازدید میدانی و تصویر راست-عکس پهپاد، ب. نمایی از واحد اجزای زمین ۳،۱،۱ با گونه‌ی کهور ایرانی (*Prosopis cineraria*) در آن، ج. نمایی از واحد بخش‌های زمین ۳،۲،۱ در زیرحوزه‌ی شاهد.

جدول ۳- نتیجه‌ی تجزیه‌ی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی افق‌های گوناگون خاک‌های شاهد.

شماره‌ی خاک‌رخ (بخش‌های زمین)	افق	ضخامت (cm)	سنگ‌ریزه	شن	سیلت	رس	بافت	واکنش خاک	شوری (dSm ⁻¹)	کربن آلی (%)	کربنات کلسیم معادل (%)	نسبت جذب تبادل کاتیونی (cmolk ⁻¹)	ظرفیت
۱ (۲،۱،۱)	A	۰-۱۵	۱۰	۶۴	۳۴	۲	لومی-سیلتی	۷/۵	۰/۸	۰/۴۶	۳۴/۵	-	-
	C ₁	۱۵-۴۰	۱۵	۷۸	۱۸	۴	شنی-لومی	۷/۶	۲/۵	۰/۵۲	۱۹/۵	۸/۹	-
	C ₂	-۱۲۰ ۴۰	۱۰	۸۶	۱۲	۲	شنی-لومی	۷/۷	۴/۶	۰/۵۸	۱۵/۰	۱۲/۶	-
رده‌بندی آمریکایی Sandy, Mixed, Hyperthermic, Typic Torriorthents رده‌بندی WRB Calcaric Regosols (Aridic)													
۲ (۳،۲،۱)	A	۰-۱۸	۱۵	۵۶	۴۰	۴	لومی-شنی	۸/۱	۰/۴	۰/۴۰	۱۸/۰	-	-
	B _k	۱۸-۵۰	۱۰	۶۰	۳۸	۲	لومی-شنی	۸/۲	۱/۳	۰/۴۸	۲۹/۰	-	-
	C ₁	۵۰-۹۰	۲۰	۶۸	۳۰	۲	لومی-شنی	۷/۹	۱/۷	۰/۴۸	۱۹/۵	-	-
	C ₂	-۱۵۰ ۹۰	۳۰	۶۴	۳۴	۲	لومی-سیلتی	۸/۰	۲/۱	۰/۵۴	۲۶/۲۵	۱۱/۵	-
رده‌بندی آمریکایی Coarse-loamy, Mixed, Hyperthermic, Typic Haplocalcids رده‌بندی WRB Haplic Calcisols (Aridic)													
۳ (۳،۲،۱)	A	۰-۵	-	۸۵	۱۴	۱	شنی-لومی	۷/۳	۲/۶	۰/۰۴	۲۵/۸۷	-	۸/۶
	B _k	۵-۳۰	-	۳۵	۶۰	۵	لومی-سیلتی	۷/۲	۵/۰	۰/۰۸	۲۵/۱۲	-	۶/۵
	C _k	۳۰-۴۵	-	۳۱	۶۱	۸	لومی-سیلتی	۷/۳	۴/۷	۰/۲۳	۱۹/۶۲	-	۶/۵
	C	-۱۰۰ ۴۵	-	۲۱	۷۷	۲	لومی-سیلتی	۷/۳	۵/۷	۰/۳۵	۱۸/۸۷	-	۵/۲
رده‌بندی آمریکایی Coarse-loamy, Mixed, Hyperthermic, Typic Haplocalcids رده‌بندی WRB Haplic Calcisols (Aridic)													
۴ (۳،۲،۱)	A	۰-۱۷	-	۵۵	۲۸	۱۷	لومی-شنی	۷/۳	۰/۴	۰/۵۸	۱۵/۱۲	-	۱۰/۲
	C _{k1}	۱۷-۵۳	-	۷۹	۱۷	۴	شنی-لومی	۷/۲	۲/۵	۰/۱۶	۲۱/۸۷	-	۶/۵
	C _{k2}	-۱۰۰ ۵۳	-	۷۷	۱۸	۵	شنی-لومی	۷/۲	۲/۶	۰/۱۶	۲۱/۷۵	-	۶/۵
رده‌بندی آمریکایی Sandy, Mixed, Calcareous, Hyperthermic, Typic Torripsamments رده‌بندی WRB Calcaric Arenosols (Aridic)													

شده است. این نوع زمین‌ها علاوه بر پستی‌بلندی تا اندازه‌ی شیب کلی و جانبی دارد، که معمولاً کم‌تر از ۰.۵٪ و به‌ندرت کمی بیش‌تر است. اختلاف سطح زمین‌ها در بخش‌های گوناگون کم‌تر از ۵۰ متر است. در برابر واحد ۳،۲،۱ این واحد بیش‌ترین مساحت از سطح حوزه‌ی مورد مطالعه با وسعت ۳۳۷/۲۶ هکتار، برابر با ۹۱/۴۳٪ از کل محدوده بود. بر پایه‌ی گستردگی این واحد، دو خاک‌رخ جدید برای شناسایی دقیق وضعیت منطقه در این واحد حفر، و تشریح شد (شکل ۶).

وضعیت تکامل خاک در واحد ۳،۱،۱ هم‌سان واحد تپه بود، و ضخامت افق سطحی (A) به‌دلیل شدت فرسایش‌های خندقی در این منطقه و تراکم زیاد آب‌راه بسیار کم‌تر (۵-۰ سانتی‌متر) بود. مساحت آن در حوزه ۳۵۱/۳۶ هکتار، معادل ۹۵/۲۵٪ از کل محدوده بود. نوع فلات‌ها و پادگانه‌های بالایی معمولاً در میانه‌ی کوه‌ها، تپه‌ها، یا پایین‌دست آن‌ها، و شامل دشت‌های مرتفع و باقی مانده‌ی سطح‌های قدیمی است که به‌علت فرسایش، تا اندازه‌ی پستی‌بلندی و ناهمواری در آن‌ها ایجاد



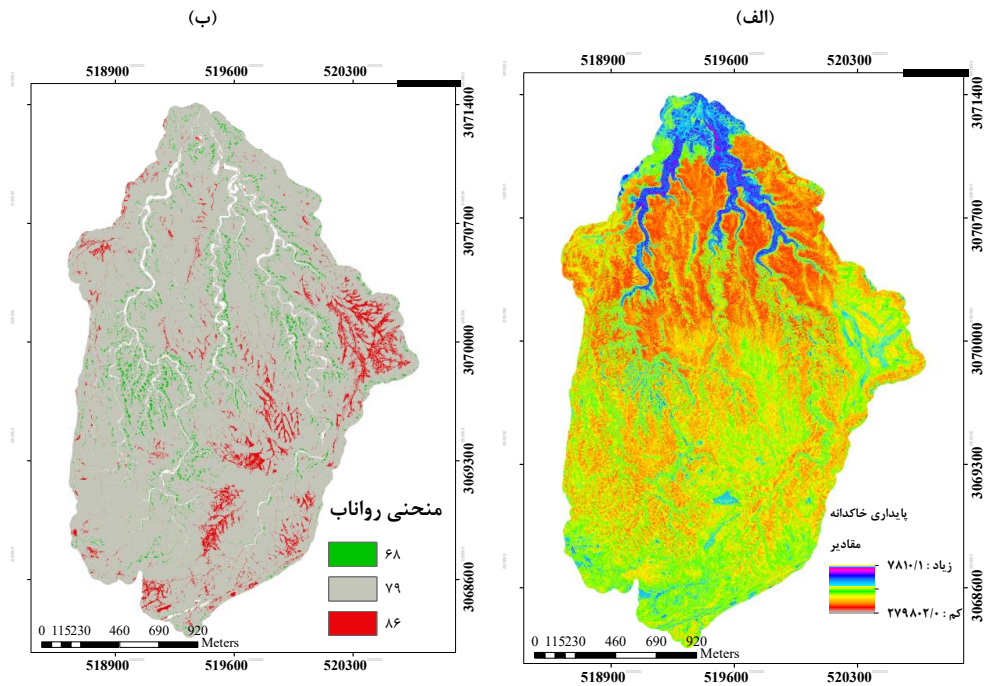
شکل ۶- نمایی از دو خاک‌رخ شاهد. الف، شماره‌ی ۳ و ب، شماره‌ی ۴ همراه با افق‌های خاک در بخش‌های واحد زمین‌های ۳،۱،۱.

ذره‌ها بر پایداری خاک‌دانه‌ها دریافتند که در زیرگروه Aquic Inceptisols اختلاف میان پایداری خاک‌دانه‌ی نمونه‌ی شاهد و خاکی که ماده‌ی آلی آن منتقل شده‌است معنی‌دار است. مهم‌ترین شاخص‌های مؤثر در تخریب خاک در برابر باران پایداری خاک‌دانه‌ها است (بارتیس و روس ۲۰۰۲) که بیان‌گر توانایی آن در نگه‌داشتن اندازه‌ی اولیه در برابر نیروهای بیرونی است (تاپ و همکاران ۱۹۹۷). به عبارت دیگر، اندازه‌ی مقاومت خاک‌دانه‌ها به رطوبت اولیه، اندازه‌ی ماده‌ی آلی خاک، و بافت آن بستگی دارد (اکبری و واعظی ۲۰۱۵). نتیجه‌ی بررسی اهمیت متغیرهای کمکی نیز نشان می‌دهد که این متغیرها نشان‌دهنده‌ی فرسایش و اثرهای فرساینده‌ی محیط است. بنابراین پایداری خاک‌دانه باید همچون شاخصی نشان‌دهنده‌ی فرساینده‌ی پژوهش‌های حوزه‌های زوجی باشد. انحنای مماسی، اثر باد، جریان تجمع، عدد منحنی روان‌آب، شاخص حمل مواد معلق، موقعیت پستی‌بلندی، و جهت شیب ویژگی‌های مهم و تاثیرگذار در تهیه‌ی نقشه‌ی پایداری خاک‌دانه است (شکل ۸). اندازه‌های RMSE و

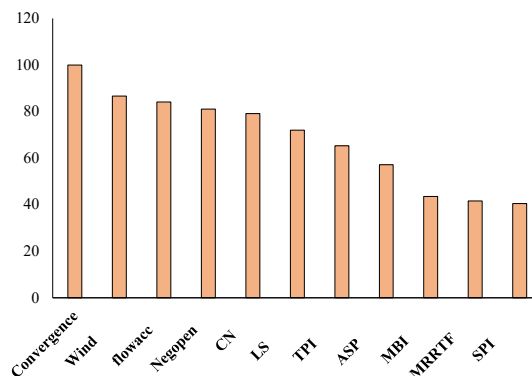
نقشه‌ی MWD نشان داد که در منطقه‌هایی با مرتع درخت‌دار و منطقه‌هایی با طبقه لومی سیلتی میزان پایداری خاک‌دانه بیش‌تر است (شکل ۷). از آن‌جا که رس عامل مهمی در پیوستن ذره‌های اولیه‌ی خاک به هم و تشکیل دادن خاک دانه‌ها است، اندازه‌های رس بیش‌تر در این طبقه بافت خاک از منطقه‌های با بافت خاک‌های شنی، شنی لومی و لومی شنی ممکن است خاک‌دانه‌های کوچک، به هم پیوسته و ریز را تشکیل دهد، و در پی آن فرسایش پذیری را کاهش دهد. نتیجه‌ی بررسی ویژگی‌های خاک اندازه‌گرفته نیز نشان داد که در نقطه‌های با اندازه‌ی کم‌تر کربن آلی و رس، پایداری خاک دانه کم‌تر، و عدد روان‌آب بیش‌تر است. ژنگانگ و همکاران (۲۰۲۰) در بررسی اهمیت نیروهای میان‌ذره‌ی خاک و ماده‌ی آلی برای پایداری خاک‌دانه‌ها در خاک منطقه‌های معتدل و نیمه‌گرمسیر دریافتند که در خاک‌های ورتی‌سول و اولتی‌سول کربن آلی خاک در نمونه‌های شاهد بیش از نمونه‌هایی است که ماده‌ی آلی خاک آن انتقال یافته است. ژنگانگ و همکاران (۲۰۱۷) در بررسی اثرهای مواد آلی خاک و نیروهای متقابل

همکاران ۲۰۱۴، پهلوان‌راد و همکاران ۲۰۱۸، لیانگ و همکاران ۲۰۱۹، زراعت‌پیشه و همکاران ۲۰۱۹، خالدیان و میلر ۲۰۲۰، ملکی و همکاران (۲۰۲۱) که در همه‌ی آن‌ها تعداد کم نمونه به دلیل گستردگی منطقه‌ی پژوهش (برای کاستن از هزینه‌های پژوهش‌های خاک) و تغییر پستی‌بلندی از عامل‌های مهم تاثیرگذار است.

R^2 به ترتیب ۰/۳۲ و ۰/۲۶ برای مرحله‌ی ارزیابی نقشه است. اندازه‌ی کم ضریب تبیین به دست آمده ناشی از تغییرپذیری زیاد ویژگی پایداری خاک‌دانه در منطقه، تغییر اندازه‌ی ذره‌های خاک، و تغییر پستی‌بلندی است. از دیگر سو، در بیش‌تر پژوهش‌های نقشه‌برداری، برای ویژگی‌های خاک اندازه‌های R^2 کم‌تر از ۰/۵ گزارش شده است (تقی‌زاده مهرجردی و



شکل ۷- نقشه‌ی پیش‌بینی پایداری خاک‌دانه (الف)، و منحنی روان‌آب (ب) در زیرحوزه‌ی شاهد و نمونه در دهگین، هرمزگان



شکل ۸- اهمیت متغیرها در روش RF برای نقشه‌ی پایداری خاک‌دانه. (ویژگی‌های با اهمیت <math> < 15\% </math> در این شکل نمایش داده شد.)

است. اگر اندازه‌ی کلوخه‌های خاک افزایش یابد، اندازه‌ی جداشدگی ذره‌های خاک افزایش، و مقاومت کششی میان خاک‌دانه‌ها کاهش می‌یابد، و در نتیجه اندازه‌ی هدررفت

از طرفی، رابطه‌ی تنگاتنگی میان پایداری خاک‌دانه و فرسایش‌پذیری خاک هست. پایداری با شاخص‌های گوناگون بررسی می‌شود، که میانگین وزنی قطر خاک‌دانه یکی از آن‌ها

زیرحوزه‌ی نمونه نسبت به زیرحوزه‌ی شاهد باشد. نقش پوشش گیاهی بومی منطقه در اندازه‌های کربن آلی خاک در مقیاس منطقه‌یی عمده و پایه‌یی است. در مقیاس زمین‌نما، نقش فرسایش و مواد معلق در تغییرپذیری کربن آلی خاک پایه‌یی است (مینازنی و همکاران ۲۰۱۳). یانگ و همکاران (۲۰۰۰) نشان دادند که عامل‌های اقلیمی بیش‌ترین تغییرپذیری کربن آلی خاک را در ژرفای ۱ متری از سطح خاک توجیه می‌کند، و از طرف دیگر اگر کربن آلی خاک در ۲۰ سانتی‌متر سطحی خاک در نظر باشد پوشش گیاهی پیش‌بینی‌کننده‌یی قوی است. تأثیر ویژگی‌های اقلیمی هنگامی زیاد می‌شود که به تغییر و پراکندگی کربن آلی خاک در مقیاس منطقه‌یی و جهانی توجه شود. بنابراین اهمیت کاربردی فعلی در منطقه‌ی پژوهش بیشینه است، یعنی نگه‌داشتن پوشش مرتعی موجود و غنی‌سازی آن منجر به افزایش کربن آلی و نیتروژن خاک در سال‌های پی‌درپی خواهد شد. میانگین زیاد کربنات کلسیم معادل در هر دو زیرحوزه‌ی شاهد و نمونه نشان‌دهنده‌ی آهکی‌بودن خاک‌های منطقه، و ذاتی‌بودن آهک در مواد مادری حوزه‌ی زوجی دهگین است. نتیجه‌ی نمونه‌های خاک سطحی با نتیجه‌ی تشریح خاک‌رخ‌های منطقه که در زیر گروه Typic Haplocalcids است، هم‌آهنگی دارد.

پاشمان در خاک‌دانه‌های بزرگ بیش‌تر از خاک‌دانه‌های کوچک است (ابوحمد و همکاران ۲۰۰۵). در بسیاری پژوهش‌ها به نقش موثر پایداری خاک‌دانه در کاهش فرسایش‌پذیری خاک و اهمیت آن در کاستن از فرسایش‌پذیری خاک نشان داده شده‌است (از جمله در بلاید و حبیب ۲۰۱۵). البته پایداری خاک‌دانه‌ها در تأثیر از اندازه‌ی آن است، و حساسیت آن‌ها با اندازه‌های گوناگون در برابر فرسایش خاک متفاوت است، چون کارمایه‌ی نیازداشته برای متلاشی‌کردن خاک‌دانه‌ها با افزایش یافتن اندازه‌ی خاک‌دانه‌های پایدار افزایش می‌یابد. ازین رو، فرسایش‌پذیری خاک‌دانه‌های بزرگ و پایدار کم‌تر از خاک‌دانه‌های سست و کوچک است (باری و همکاران ۲۰۱۰). جدول ۴ نشان می‌دهد که اندازه‌های ظرفیت تبادل کاتیونی در هر دو زیرحوزه‌ی شاهد و نمونه کم است، که ناشی از اندازه‌های شن فراوان و رس کم در خاک‌های منطقه است. از دیگر سو، اندازه‌های نیتروژن کل خاک در منطقه بسیار اندک است، که نشان‌دهنده‌ی وضعیت اقلیمی خشک منطقه و پوشش گیاهی فقیر است. بنابراین خاک‌های منطقه از دید عنصرهای غذایی فقیر است. بیشینه‌ی اندازه‌های کربن آلی خاک در زیرحوزه‌ی نمونه بیش‌تر از شاهد بود، که ممکن است نشان‌دهنده‌ی پوشش گیاهی بیش‌تر و فرسایش سطحی کم‌تر

جدول ۴- آمار توصیفی ویژگی‌های خاک اندازه‌گیری شده در حوزه‌ی پژوهشی.

زیرحوزه	ویژگی‌های آماری	پایداری خاک‌دانه (mm)	ظرفیت تبادل کاتیونی (cmolkg ⁻¹)	کربنات کلسیم معادل	شن	سیلت رس (%)	کربن آلی	نیتروژن کل
شاهد	کمینه	۰/۱۳	۶/۸۰	۱۳/۵۰	۳۳/۰۰	۱۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۰
	میانگین	۰/۵۳	۱۰/۷۲	۱۹/۵۷	۶۴/۰۴	۲۹/۴۱	۰/۳۳	۰/۰۳
	بیشینه	۱/۳۱	۱۴/۲۰	۲۵/۲۵	۸۷/۰۰	۶۳/۰۰	۰/۹۷	۰/۰۸
نمونه	کمینه	۰/۱۰	۶/۶۰	۱۳/۶۲	۳۹/۰۰	۴/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۰
	میانگین	۰/۴۴	۹/۴۰	۲۰/۷۵	۷۳/۷۲	۲۰/۹۶	۰/۲۶	۰/۰۲
	بیشینه	۱/۴۶	۱۳/۲۰	۲۵/۸۷	۹۵/۰۰	۵۱/۰۰	۱/۰۱	۰/۰۹
کل	کمینه	۰/۱۰	۶/۶۰	۱۳/۵۰	۳۳/۰۰	۴/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۰
	میانگین	۰/۴۸	۱۰/۰۸	۲۰/۲۲	۶۸/۷۰	۲۵/۴۱	۰/۲۹	۰/۰۳
	بیشینه	۱/۴۶	۱۴/۲۰	۲۵/۸۷	۹۵/۰۰	۶۳/۰۰	۱/۰۱	۰/۰۹

فرسایش کمک می‌کند.

محدودیت عمده کم‌بود ماده‌ی غذایی ناشی از پوشش گیاهی ضعیف، درصد بسیار شن، و فرسایش خاک در واحدهای زمین ۳،۱،۱ و ۳،۲،۱ بود. در تصویر راست‌عکس مواد معلق به‌دست‌آمده از فرسایش آبی به‌ویژه در زیرحوزه‌ی شاهد دیده می‌شود. بهترین دوره‌ی بهره‌برداری از مرتع در این واحدهای بخش‌های زمین دوره‌یی است که گیاهان در بیشینه‌ی رشد و نمو باشند، و بهترین زمان بهره‌برداری آن است که تعدادی از گیاهان دست‌کم ۵۰٪ بذر داده‌باشند، تا زادآوری و زندگی گیاهان مرتعی از کار نیافتد. در زیرحوزه‌های شاهد و نمونه‌ی

نتیجه‌گیری

بر پایه‌ی ویژگی‌های اندازه‌گرفته‌ی خاک، اطلاعات خاک‌رخ‌ها، بازدیدهای عرصه‌یی، نبود برون‌زدهای سنگی عمده در منطقه (که به همین دلیل نقشه‌ی برون‌زد سنگی تهیه نشد) محدودیت‌هایی در کاربرد درست و بهینه از زمین دیده شد. بودن سنگ‌ریزه درون خاک‌دانه‌ها حساسیت آن‌ها را به تخریب بر اثر قطره‌های آب افزایش می‌دهد، و منجر به تخریب بیش‌تر خاک‌ها بر اثر باران می‌شود. بررسی دقیق حجمی سنگ و سنگ‌ریزه در عرصه به پایش دقیق وضعیت پایداری خاک‌دانه‌ها، مقاومت ساختمان خاک، و ارتباط آن با اندازه‌ی

بومی برای جلوگیری از پیش‌روی فرسایش توصیه می‌شود. برای به‌روزرسانی شرح خدمات باید پذیرفت که پژوهش‌های خاک‌شناسی در آبخیز زوجی پیش از این در سطح اجمالی انجام شده بود، اما به‌دلیل اهمیت حفاظت خاک، این پژوهش‌ها باید بسته به هدف و تهیه‌ی مدل‌های فرسایشی در سطح نیمه تفصیلی و تفصیلی انجام شود. در هر واحد از اجزای زمین باید برای بررسی ژرفای خاک و برآوردکردن نوع لایه‌بندی آن، خاک‌رخ‌کنده شود. برای تهیه‌ی نقشه‌ی ویژگی‌های خاکی از جمله بافت که یکی از ویژگی‌های مهم ورودی در مدل‌های فرسایشی است، تهیه‌ی منحنی روان‌آب، و تعیین گروه‌های آب‌شناسی، باید تعداد کافی نمونه از سطح حوزه برداشته شود. نتیجه‌ی نمونه‌برداری مکعب لاتین نشان داد که جاهای نمونه‌برداری حتی اگر بر پایه‌ی گوناگونی پوشش گیاهی بوده باشد هم پراکنش خوبی در عرصه داشت. برای بهبود نتیجه‌ی مدل‌های فرسایشی بهتر است پوشش گیاهی و خاک در جاهای یکسان برآورد شود. این دو در پژوهش‌های پیشین یکسان نبود، اما با این شیوه‌ی نمونه‌برداری و به‌کارگیری همه‌ی متغیرهای محیطی مهم، این کار ممکن شد، و توصیه می‌شود در پژوهش‌های آینده نیز به‌کار برده شود. بنابراین باید پذیرفت که کاربرد روش‌های نوین همچون کاربرد پهپادها در تصویربرداری، کاربرد روش‌های دقیق نمونه‌برداری با متغیرهای محیطی دقیق، و نقشه‌برداری رقومی خاک ممکن است منجر به کاهش تعداد نمونه‌ی خاک، افزایش دقت نقشه‌های خروجی، و دقیق‌تر شدن نتیجه‌ی برآورد اندازه‌ی فرسایش شود، که در مقایسه با روش‌های پیشین زمان و هزینه را کاهش داد.

سپاس‌گزاری

انجام این پژوهش بی‌حمایت‌ها و درایت جناب آقایان دکتر هوشنگ جزی (مدیر کل محترم دفتر آبخیزداری و حفاظت خاک سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور)، جناب مهندس محمد شرافتی (معاون محترم دفتر آبخیزداری و حفاظت خاک سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور)، جناب آقای مهندس سید محمدنور موسوی (مدیر محترم اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان هرمزگان)، جناب دکتر هادی علیزاده (رئیس هیات مدیره شرکت مهندسی مشاور نوآوران علوم مکانی)، جناب آقای مهندس امیر علیزاده (مدیر گروه کنش‌های زمینی پهپاد در شرکت مهندسی مشاور نوآوران علوم مکانی) و مهندس مهدی کریمی (مدیر تیم فتوگرامتری پهپاد در شرکت مهندسی مشاور نوآوران علوم مکانی) ممکن نبود. بدین وسیله از زحمات‌های بی‌شعبه این بزرگواران تقدیر و تشکر می‌شود.

دهگین به‌علت بودن مرتع‌ها در دامنه‌ی بلندی، تفاوت دوره‌ی بهره‌برداری زیاد نیست، و نوع‌های مرتعی این زیرحوزه از دیدگاه داشتن گونه‌های اصلی، و فصل رویش آن‌ها (از آغاز تا میانه‌ی اسفند) آماده‌ی بهره‌برداری است. این دوره ممکن است تا میانه‌ی اردیبهشت نیز به‌درازا بکشد. بررسی نقشه‌های گوناگون و ویژگی‌های خاک نشان می‌دهد که از دیدگاه شدت فرسایش سطحی و موادمعلق ناشی از آن، وضعیت زیرحوزه‌ی شاهد نامناسب‌تر است.

بسیاری از کنش‌های توصیه‌شده در این زیرحوزه‌ها پیش از این برپایه‌ی محدودیت‌ها اجرا شده بود، اما به‌دلیل شرایط کنونی تلاش برای ادامه‌ی آن کنش‌ها ضروری است. محدودیت‌های مربوط به بافت خاک به‌خصوص در زیرحوزه‌ی شاهد به‌دلیل زیاد بودن شن از دیدگاه اصلاحی به‌صرفه نیست. برای آن باید شیوه‌های برخورد با این محدودیت‌ها را بررسی کرد، برای نمونه می‌توان ماده‌ی آلی را افزایش داد، روش‌های درست توزیع آب را برگزید، و به‌طور کلی با ساختن پادگانه‌ی مناسب الگوی کشت مناسبی پیاده کرد. به‌دلیل این‌که بسیاری از بخش‌های محدودی پژوهشی شیب‌دار است، در نظر گرفتن خطرهای ناشی از فرسایش خاک در کل زیرحوزه اهمیت بسیاری دارد. بنابراین پیشنهاد می‌شود نقشه‌های ضریب فرسایش‌پذیری و رده‌بندی فرسایش برای محدوده‌ی پژوهش‌های تهیه و به‌برنامه‌ریزان داده‌شود. این کار با اطلاعات کاملی که از خاک منطقه و وضعیت پوشش گیاهی، و ویژگی‌های ریخت‌سنجی در دست است به‌خوبی امکان‌پذیر است. برای افزایش کارایی الگوریتم جنگل تصادفی بهتر است داده‌های ورودی دیگر نیز به‌کار برده‌شود، برای نمونه از دیگر نقشه‌های رقومی مانند زمین‌ریخت‌شناسی، زمین‌شناسی و شاخص‌های به‌دست‌آمده از تصویرهای ماهواره‌ی بهره‌برده‌شود. پیشنهاد می‌شود در آینده پژوهش هم‌سانی برای برآوردکردن پایداری خاک‌دانه، نقشه‌ی بافت خاک، یا ویژگی‌های دیگری از خاک که ورودی‌های مهم مدل‌های فرسایشی است در منطقه‌ی با گستردگی و گوناگونی بیش‌تر خاک انجام شود. اگر نقشه‌ی پایداری خاک‌دانه‌ی منطقه در سال‌های آینده تهیه شود، امکان بررسی تغییر آن بر اثر پدیده‌های گوناگون مانند فرسایش بادی و آبی امکان‌پذیر می‌شود. با تعیین‌شدن روند تغییر پایداری خاک‌دانه با پایش تصویرهای پهپاد، و ویژگی‌های به‌دست‌آمده از DEM آن برپایه‌ی چهارچوب نقشه‌برداری رقومی خاک با تعداد داده‌های محدود خاک در طول زمان، حتی برای پایش حرکت شن‌های روان، یا از دست‌رفتن ذره‌های لای (سیلت) در منطقه‌های خشک و بیابانی کاربرد خواهد داشت. به‌طور کلی به‌دلیل فقیربودن مرتع‌های منطقه، کشت گونه‌های

- Abbaszadeh Afshar F, Ayoubi SH, Jafari A. 2018. The extrapolation of soil great groups using multinomial logistic regression at regional scale in arid regions of Iran. *Geoderma*, 315: 36–48.
- Abu-Hamdeh NH, Abo-Qudais SA, Othman AM. 2005. Effect of soil aggregate size on infiltration and erosion characteristics. *European Journal of Soil Science*, 57 (5): 609–616
- Adhikari K, Kheir RB, Greve MB, Bocher PK, Malone BP, Minasny B, McBratney AB, Greve MH. 2013. High-resolution 3-D mapping of soil texture in Denmark. *Soil Science Society of America Journal*, 77(3): 860–876.
- Akbari S, Vaezi AR. 2015. Investigating aggregates stability against raindrops impact in some soils of a semi- arid region, north west of zanjn. *Water and soil science (Agricultural science)*, 25(2): 65–77. (In Persian).
- Bare A, Kainz M, Veihe A. 2010. The spatial variability of erodibility and its relation to soil type, a study from northern Ghana. *Geoderma*, 106(1–2): 101–120.
- Barthes B, Roose E. 2002. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion: validation at several levels. *Catena*, 47(2): 133–149.
- Belaid H, Habaieb H. 2015. Soil aggregate stability in a Tunisian semi-arid environment with reference to fractal analysis. *J. Soil Sci. Environ. Manage*, 6(2): 16–23.
- Boehner J, Antonic O. 2009. Land-surface parameters specific to topo-climatology. In: Hengl, T. and Reuter, H. (Eds.) Elsevier. *«Geomorphometry– Concepts, Software, Applications»*. *Developments in Soil Science*, pp. 195–226.
- Breiman L, Cutler A. 2004. Random Forests homepage. Retrieved April 23 rd.
- Breiman L. 2001. Random forests. *Mach. Learn*, 45(1): 5–32.
- Burger IA, Kelting DL, 1999. Using soil quality indicators to assess forest stand management.. *Forest Ecology and Management*, 122: 155–156.
- Chapman HD. 1965. Cation exchange capacity. In Black C.A.. Editors. *Methods of Soil Analysis*. American Society of Agronomy. Madison. pp. 891–901.
- Conrad O, Bechtel B, Bock M, Dietrich H, Fischer E, Gerlitz L, Wehberg J, Wichmann V, Böhner J. 2015. System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development*, 8(7): 1991–2007.
- Fathizad H, Ardakani MA, Sodaiezhadeh H, Kerry R, Taghizadeh-Mehrjardi R. 2020. Investigation of the spatial and temporal variation of soil salinity using random forests in the central desert of Iran. *Geoderma*, 365:114233.
- Gallant JC, Dowling TI. 2003. A multi resolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas. *Water Resour. Water Resources Research*, 39(12): 1347–1360.
- Gee GW, Bauder JW. 1986. Particle size analysis. In: Klute, A. (Eds.), *Methods of soil analysis*. American Society of Agronomy Madison, WI. Part 1, pp. 383–411.
- Hengl T. 2006. Finding the right pixel size. *Comput. Geosci*, 32 (9): 1283–1298.
- Hosseinalizade M, Ahmadi H, Feiznia S, Rivaz F. 2017. Latin hypercube sampling in natural resources using. *Journal of Conservation and Utilization of Natural Resources*, 6 (1):1–14.(In Persian).
- Iqbal J, Read JJ, Thomasson AJ, Jenkins JN. 2005. Relationships between Soil-Landscape and Dryland Cotton Lint Yield. *Soil Science Society of America*, 69(3): 1–11.
- Kariminejad N, Hosseinalizade M, Pourghasemi HR. 2020. A Review of Spatial Monitoring of Piping Collapse Using Unmanned Aerial Vehicle in Loess-Derived Soils in the Golestan Province. *Watershed Management Research*,

- 33(3):53–69.(In Persian).
- Kemper WD, Rosenau RC. 1986. Aggregate stability and size distribution. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part I: Physical Analysis*. SSSA. Madison, WI, pp. 425–442.
- Khaledian Y, Miller BA. 2020. Selecting appropriate machine learning methods for digital soil mapping. *Applied Mathematical Modelling*, 81(1–2):401–418.
- Liang Z, Chen S, Yang Y, Zhou Y, Shi Zh. 2019. High-resolution three-dimensional mapping of soil organic carbon in China: Effects of Soil-Grids products on national modeling. *Science of the Total Environment*, 685(2): 480–489.
- Loch RJ, Foley JL. 1994. Measurement of aggregate breakdown under rain: comparison with tests of water stability and relationships with field measurements of infiltrations. *Australian Journal of Soil Research*, 32(4): 701–720.
- Lozano-García B, Parras-Alcántara L, Brevik EC. 2016. Impact of topographic aspect and vegetation (native and reforested areas) on soil organic carbon and nitrogen budgets in Mediterranean natural areas. *Science of the Total Environment*, 544(4): 963–970.
- Maleki S, Khormali F, Chen S, Pourghasemi HR, Hosseinalizade M. 2021. Digital soil mapping of organic carbon at two depths in loess hilly region of Northern Iran. In: Pourghasemi HR. Editors. *Computers in Earth and Environmental Sciences*, Elsevier (EDS.). pp. 467–475.
- Maleki S, Khormali F, Mohammadi J, Bogaert P, Bagheri Bodaghabadi M. 2020a. 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): 1–13.
- Maleki S, Khormali F, Kariminejad N, Hosseinalizade M. 2020b. Modeling of the spatial point pattern of hillside and stream using unmanned aerial vehicle in a part of loess plateau, Golestan Province. *Journal of Water and Soil Conservation*, 27(1): 91–107.(In Persian).
- Maleki S, Khormali F, Karimi AR. 2014. Introducing different flow direction algorithms to map topographic wetness index and soil organic carbon in a loess hillslope of Toshan area, Golestan Province, Iran. *J. of Water and Soil Conservation*, 21(1): 145–162.
- McBratney AB, Mendonc Santos ML, Minasny B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(1–2): 3–52.
- Minasny B, McBratney AB. 2006. A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. *Computers & Geosciences*, 32(9): 1378–1388.
- Minasny B, McBratney AB. 2007. Latin hypercube sampling as a tool for digital soil mapping. In: Lagacherie P, McBratney AB, Voltz M. (Eds.), *Digital Soil apping: An introductory perspective*. Elsevier, Amsterdam, pp. 153–165.
- Moore ID, Gessler P, Nielsen G, Peterson G. 1993. Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 57(2): 443–452.
- Moreira Furlan L, AugustoMoreira C, Guilhermede Alencar P, Rosolen V. 2021. Environmental monitoring and hydrological simulations of a natural wetland based on high-resolution unmanned aerial vehicle data (Paulista Peripheral Depression, Brazil). *Environmental Challenges*, 4(100146):1–8.
- Myles AJ, Feudale RN, Liu Y, Woody NA, Brown SD. 2004. An introduction to decision tree modeling. *Journal of Chemometrics*, 18(6): 275–285.
- Nelson DW, Sommers LE. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Page AL, Miller RH, Keeney DR. Editors. *Methods of soil analysis. Part 2. 2nd ed. Agron. Monogr. 9*. Madison, WI. pp. 539–577.
- Olaya VF. 2004. A gentle introduction to Saga GIS. The SAGA User Group e.V, Göttingen, Germany, 208 p.

- Page AL, Miller RH, Keeney DR. 1982. Methods of soil analysis. Part 2. In: Chemical and Microbiological Properties No. 9, 2nd edn. ASA, SSSA, CSSA, Madison, Wisconsin, USA, pp. 595–623.
- Pahlavan-Rad MR, Dahmardeh K, Brungard C. 2018. Predicting soil organic carbon concentrations in a low relief landscape, eastern Iran. *Geoderma Regional*, 15(e00195): 1–7.
- Pahlavan Rad MR, Toomanian N, Khormali F, Brungard CW, Komaki CB, Bogaert P. 2014. Updating soil survey maps using random forest and conditioned Latin hypercube sampling in the loess derived soils of northern Iran. *Geoderma*, 232–234:97–106.
- Pahlavan Rad MR, Toomanian N, Khormali F. 2016. Introduce digital soil mapping. *Land Management Journal*, 4 (2): 97–114. (In Persian).
- Poorshademan A, Taghizadeh-Mehrjardi R, Tazeh M, Nabiollahy K. 2019. The prediction of spatial variability of soil erodibility index using digital mapping technique in Kanisef Region, Baneh. *Soil Applied Research*, 6(2):15–26. (In Persian).
- RDCT-R Development Core Team .2017. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Available at <https://www.R-project.org/>
- Roudier P, Brugnard C, Beaudette D, Louis B. 2020. Conditioned latin hypercube sampling. R Package \ Available at <https://github.com/pierreroudier/clhs/>
- Soil Survey Staff. 2014. Keys to soil taxonomy (12th ED), U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, pp. 1–372.
- Sokouti Oskoui R, Arabkhedri M. 2018. Developing a Suitable Method for Determining Soil Loss Tolerance in Iran. *Journal of land Management (Soil and Water Science)*, 6(1):1–19. (In Persian).
- Sreenivas K, Dadhwal VK, Kumar S, Harsha GS, Mitran T, Sujatha G, Janaki Rama Suresh G, Fyzee MA, Ravisankar T. 2016. Digital mapping of soil organic and inorganic carbon status in India. *Geoderma*, 269(1): 160–173.
- Stoorvogel JJ, Kempen B, Heuvelink GBM, Bruin S. 2009. Implementation and evaluation of existing knowledge for digital soil mapping in Senegal. *Geoderma*, 149(1): 161–170.
- Taghizadeh-Mehrjardi R, Minasny B, Sarmadian F, Malone B. 2014. Digital mapping of soil salinity in Ardakan region, Central Iran. *Geoderma*, 213:15–28.
- Teka K, Nyssen J, Teha N, Haile M, Deckers J. 2015. Soil, land use and landform relationship in the Precambrian lowlands of northern Ethiopia. *Catena*, 131: 84–91.
- Thomas GW. 1996. Soil pH and Soil Acidity. In: Sparks D.L. Editors. *Methods of Soil Analysis. Part 3 Chemical Methods*, Soil Science Society of America. pp. 475–490.
- Topp GC, Reynolds WD, Cook FJ, Kirkby JM, Carter MR. 1997. Physical attributes of soil quality. In: Gregorich EG and Carter MR (eds.). *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health*, Elsevier Science Amsterdam, Netherlands. pp. 21–58.
- Tucker BB, Kurtz LT. 1961. Calcium and magnesium determinations by EDTA titrations. *Soil Science Society of America Journal*, 25 (1): 27–29.
- Vasu D, Kumar Singh S, Kumar Ray S, Duraisami VP, Tiwary P, Chandran P, Nimkar AM, Anantwar SHG. 2016. Soil quality index (SQI) as a tool to evaluate crop productivity in semiarid Deccan plateau, India. *Geoderma*, 282:70–79.
- Wang SH, Jin X, Adhikari K, Li W, Yu M, Bian ZH, Wang Q. 2018. Mapping total soil nitro-

- gen from a site in northeastern China. *Catena*, 166(13): 134–146.
- Weiss AD. 2001. Topographic position and landforms analysis, in Proceedings of the ESRI User Conference, 9-13 July, San Diego, CA, USA. pp. 4345–4360.
- WRB- World Reference Base for Soil Resources . 2014. Update 2015. Food and Agriculture Organization of the United Nations, pp. 1–204.
- Young F, Hammer R. 2000. Defining geographic soil bodies by landscape position, soil taxonomy, and cluster analysis. *Soil Science Society of America*, 64(12): 989–998.
- Zeraatpisheh M, Ayoubi SH, Jafari A, 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(15): 186–204.
- 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(15): 445–452.
- Zhenghong Y, Zheng Y, Zhang J, Zhang C, Ma D, Chen L, Caid T. 2020. Importance of soil interparticle forces and organic matter for aggregate stability in a temperate soil and a subtropical soil. *Geoderma*, 362(15):114088.
- Zhenghong Y, Zhang J, Zhang C, Xin X, Li H. 2017. The coupling effects of soil organic matter and particle interaction forces on soil aggregate stability. *Soil and Tillage Research*, 174(1): 251–260.
- 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 Regional*, 10(1): 1–10.
- Zhu AX, Yang L, Li B, Qin CH, English E, Burt JE, Zhou CH. 2008. Purposive Sampling for Digital Soil Mapping for Areas with Limited Data. In: *Digital Soil Mapping with Limited Data*, Part 12. Springer Science, pp. 223–245.



Watershed Management Research

VOL. 35, No.3, Ser. No: 136, Autumn 2022, pp. 60 -80
DOI: 10.22092/WMRJ.2021.356597.1441

Research Paper



New Methods in Soil Science Studies in Paired Watersheds with an Approach to Updating Service Description in Paired Watersheds of Dehgin, Hormozgan Province

Sedigheh Maleki

Postdoc researcher, Dept. of Soil Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Khadjeh Khermandar

Ph.D. Student, Dept. of Arid Zone Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Mohsen Hosseinalizadeh

Associate Professor, Dept. of Arid Zone Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Abbas Goli Jirandeh

Spatial Sciences Innovators Consulting Engineering Company, Tehran, Iran

Aiding Kornejadi

Spatial Sciences Innovators Consulting Engineering Company, Tehran, Iran

Hamid Reza Pourghasemi

(Corresponding Author)* Professor, Department of Natural Resources and Environmental Engineering, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran

Corresponding Author's Email: hr.pourghasemi@shirazu.ac.ir

Received: 11 November 2021

Accepted: 10 December 2021

Abstract

One of the most critical environmental problems globally is soil erosion, which leads to several problems in the field of economy and sustainable development. This study aims to use new methods in soil science studies of the paired sub-catchments to update service descriptions in Dehgin, Hormozgan Province. For this purpose, to select sampling sites of pedons and soil samples, the conditional Latin Hypercube sampling (cLHS) method was used using environmental covariates (digital elevation model), which derive from unmanned aerial vehicles (UAV), phantom4 pro, and multicopter. The results showed two main land types in the study area, including hills, plateaus, and high terraces. Soil development in the region is mainly influenced by elevation, and the soils of the hill lands are directly related to the type of parent material and slope percentage. In the areas containing wooded pasture and areas with silt loam texture class, the aggregate stability values are higher, which are auxiliary covariates essential and influential parameters in the aggregate stability map. The RMSE and R² values are 0.32 and 0.26, respectively, for the evaluation map criteria. The values of cation exchange capacity (CEC) and nitrogen in both control and sample sub-catchments are small and the maximum amounts of soil organic carbon in the sample sub-catchment are higher than in the control sub-catchment. The use of new methods including UAV, accurate sampling methods using high-resolution environmental covariates, and digital soil mapping can reduce the number of soil samples, increase the accuracy of output maps, and provide more accurate erosion estimation results, which has reduced time and cost compared to the old methods.

■ **Keywords:** Latin hypercube sampling, pedons, photogrammetry, soil erosion, unmanned aerial vehicles ■