



تهیه نقشه رقومی ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم خاک‌های زراعی بخش جنوبی دشت سیستان

فاطمه کیخایی، معصومه دلبری*، ناصر دواتگر، فرزاد حسن پور، محمد جمشیدی و پیمان افراسیاب

دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب دانشگاه زابل و عضو هیأت علمی

موسسه تحقیقات خاک و آب. سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، کرج. ایران. keykhaei80@gmail.com

دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. masoomeh.delbari@uoz.ac.ir

دانشیار موسسه تحقیقات خاک و آب. سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، کرج. ایران n_davatgar@yahoo.com

دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران hassanpourir@uoz.ac.ir

استادیار موسسه تحقیقات خاک و آب. سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، کرج. ایران mohammadjamshidi@yahoo.com

دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران peyman.afrafiab@uoz.ac.ir

«مقاله پژوهشی»

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۳ و پذیرش: ۱۴۰۲/۶/۲۸

چکیده

این پژوهش باهدف بررسی توزیع مکانی ویژگی‌های خاک شامل ظرفیت زراعی (FC)، نقطه پژمردگی دائم (PWP) و کل آب قابل دسترس (TAW) با استفاده از روش کریجینگ معمولی (OK) و مدل جنگل تصادفی (RF) در بخش جنوبی دشت سیستان با مساحت حدود ۱۴۷ هزار هکتار انجام شد. مقادیر FC، PWP و TAW و اجزای بافت خاک برای ۲۰۰ نمونه خاک جمع‌آوری شده از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری اندازه‌گیری شد. ارزیابی عملکرد دو روش OK و RF بر اساس شاخص درصد ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE) نشان داد که عملکرد روش OK با ۵٪ خطای کمتر در پیش‌بینی FC، ۳٪ خطای کمتر در پیش‌بینی PWP و ۳٪ خطای کمتر در پیش‌بینی TAW، اندکی بهتر از روش جنگل تصادفی است. مقایسه میانگین انحراف (Bias) هر دو روش نشان داد که مدل OK دو ویژگی FC و PWP را کمتر و مقدار TAW را بیشتر برآورد نموده است، اما روش RF هر سه ویژگی را بیش برآورد کرده است. نقشه‌های پراکنش مکانی FC، PWP و TAW تولید شده با مدل OK نشان داد که بیشترین مقدار FC (۲۳٪) و TAW (۱۴٪) در غرب و شمال شرق منطقه بود که دارای بافت سنگین‌تر و ارتفاع کمتری از سطح دریا هستند. در مناطق جنوبی و جنوب شرقی منطقه که دارای بافت خاک سبک‌تری هستند، مقدار آب قابل دسترس نسبت به مناطق غربی و شمال شرقی کمتر به دست آمد. در مدل RF، مهم‌ترین متغیر مستخرج از تصاویر ماهواره-ای، مدل رقومی ارتفاع بود و هر سه ویژگی در مناطقی که DEM کمتر بود، مقادیر بیشتری داشتند. به نظر می‌رسد مسطح بودن منطقه و ناکافی بودن متغیرهای کمکی موجب دقت پایین‌تر روش مدل جنگل تصادفی شده است. واژه‌های کلیدی: آب قابل دسترس خاک، متغیرهای محیطی، کریجینگ معمولی، مدل جنگل تصادفی

*- آدرس ایمیل نویسنده مسئول: masoomeh.delbari@uoz.ac.ir

مقدمه

انتظار می‌رود جمعیت رو به رشد جهان تا سال ۲۰۵۰ به ۹ میلیارد نفر برسد و نیاز به تولید مواد غذایی بیشتر، افزایش یابد؛ بنابراین، توسعه کشاورزی به‌ویژه کشاورزی آبی نقش اساسی در تأمین این تقاضا دارد (داتا و همکاران، ۲۰۱۷). با وجود آنکه کشور ایران در اقلیم خشک قرار دارد، حدود ۵۱ درصد از اراضی زراعی آن آبی و بقیه دیم‌زار است. این در حالی است که اراضی آبی ۹۱ درصد محصولات کشاورزی را تولید می‌کند (احمدی و همکاران، ۱۴۰۰) که نیازمند مصرف مقدار زیادی آب برای حفظ حداکثر عملکرد محصول است.

با شیوه‌های کارآمد مدیریت آبیاری، تولیدکنندگان می‌توانند مصرف آب را مدیریت کرده، عملکرد محصولات را به حداکثر رسانده و منافع اقتصادی را بهبود بخشند (داتا و همکاران، ۲۰۱۷). یکی از روش‌ها برای برنامه‌ریزی دقیق آبیاری، آگاهی از میزان آب قابل‌دسترس خاک (TAW) است. تفاوت محتوای آب در رطوبت مزرعه (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP) را آب قابل‌دسترس می‌نامند (داتا و همکاران، ۲۰۱۷). آب قابل‌دسترس خاک به‌رغم آنکه بخش بسیار اندکی از آب موجود روی کره زمین را شامل می‌شود، تأثیر زیادی در گردش آب، انرژی و رشد گیاهان در طبیعت دارد. همچنین، از داده‌های TAW، FC و PWP به‌عنوان متغیرهای ورودی در بسیاری از مدل‌های کشاورزی و زیست‌محیطی نظیر مدل‌های CENTURY (پارتون و همکاران، ۱۹۸۷)، STICS (برسیون و همکاران، ۱۹۹۸) و SWAT (آرنولد و وفورر، ۲۰۰۵، آرنولد و ویلیام، ۱۹۸۷) استفاده می‌شود.

اندازه‌گیری مستقیم ویژگی‌های فیزیکی خاک از جمله TAW در مقیاس ناحیه‌ای زمان‌بر بوده و به نیروی انسانی و منابع مالی زیادی احتیاج دارد (بابائیان، ۲۰۱۹). از سویی پایگاه‌های داده‌های ملی به‌ندرت دارای داده TAW زمین مرجع شده کافی برای طراحی و برنامه‌ریزی آبیاری و زهکشی در مقیاس ناحیه‌ای هستند. از این‌رو نیاز است به

کمک روش‌های مناسب اندازه‌گیری‌های محدود موجود را به سطح گسترده‌ای از مناطق تعمیم داده و اطلاعات موردنیاز را به‌صورت بانک داده و نقشه در اختیار مدیران و کاربران قرار داد.

روش‌های مرسوم کلاسیک و زمین‌آمار برای تهیه نقشه ویژگی‌های خاک نیازمند اندازه‌گیری‌های میدانی است، لذا تهیه نقشه توزیع مکانی برای مقیاس‌های بزرگ مانند دشت و یا حوضه با این روش‌ها با مشکلات فراوان مواجه خواهد شد. نقشه‌برداری رقومی خاک (DSM) روشی مدرن برای پهنه‌بندی ویژگی‌های خاک است که در آن از ابزارهایی مانند زمین‌آمار، ماشین‌های یادگیری و توابع انتقالی استفاده می‌شود (تریبل و همکاران، ۲۰۱۱). در این روش، یک مدل برآورد کننده با برقراری ارتباط بین متغیر هدف و متغیرهای کمکی (محیطی) مانند پوشش گیاهی، عوارض زمینی و دیگر ویژگی‌های خاک، مقادیر متغیر هدف را در کل منطقه مورد مطالعه برآورد می‌کند (میشرا و همکاران، ۲۰۱۰).

بخشی از متغیرهای محیطی شامل باند طیفی، شاخص‌های پوشش گیاهی و تصاویر دریافتی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای بوده، در حالی که بخش دیگر به‌طور عمده شامل شاخص‌های توپوگرافی حاصل از مدل رقومی ارتفاع است (میشرا و همکاران، ۲۰۱۰). با این حال، صحت و دقت مدل برآورد کننده تا حدود زیادی به داده‌های حاصل از مطالعات صحرائی و متغیرهای کمکی وابسته است.

در سال‌های اخیر، الگوریتم‌های یادگیری ماشین از قبیل جنگل تصادفی (RF)، برای توسعه روابط بین ویژگی‌های خاک و متغیرهای محیطی استفاده شده است (آیتکنهد و کول، ۲۰۱۶). مدل رگرسیون جنگل تصادفی یک روش یادگیری ماشین است که توانایی بالایی برای تعیین روابط غیرخطی بین خاک و زمین‌نما دارد (هنگل و همکاران، ۲۰۱۵؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۷؛ تقی زاده

پشتیبان و جنگل تصادفی با استفاده از رویکرد نقشه‌برداری رقومی خاک برای برآورد اجزا بافت خاک در بخشی از اراضی استان خوزستان انجام شد. نتایج نشان داد که مدل جنگل تصادفی از دقت بالاتری نسبت به مدل ماشین بردار پشتیبان برخوردار است.

پژوهشی با هدف تهیه نقشه رقومی بافت خاک اراضی کشاورزی دشت آبرفتی سیستان با استفاده از مدل‌های RK^8 ، $RKNNRK^5$ ، RF ، COK^7 و $NNRK^6$ انجام شد و روش $RKNNRK$ در تلفیق با داده‌های سنجش از دور بر دقت برآورد نقشه‌های رقومی اجزاء بافت خاک افزود (شهریاری و همکاران، ۲۰۱۹). تغییرات مکانی نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در اراضی دشت سیستان با استفاده از زمین‌آمار و درختان تصمیم‌گیری تصادفی توسط پهلوان راد (۱۳۹۸) در سطح ۲۲۷۰۰۰ هکتار انجام شد. روش درختان تصمیم‌گیری تصادفی نسبت به زمین‌آمار توزیع مکانی این دو ویژگی را بهتر نشان داد.

در سال‌های اخیر به دلیل کاهش بارندگی و بروز خشک‌سالی و نیز کاهش آورد رودخانه مرزی هیرمند، برنامه‌ریزی مناسب آبیاری در راستای افزایش بهره‌وری آب و توسعه پایدار کشاورزی برای مدیران، سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان استانی و کشوری اهمیت زیادی پیدا کرده است. در این راستا، طرح انتقال آب به ۴۶۰۰۰ هکتار اراضی دشت سیستان با هدف اصلی حفظ فعالیت‌های کشاورزی، کاهش اثرات خشک‌سالی در منطقه، صرفه‌جویی در مصرف آب و افزایش بهره‌وری آب اجرا شده است. آگاهی از ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک برای حفظ آب، خاک و جلوگیری از نفوذ عمقی و رواناب در آبیاری مزارع بسیار اهمیت دارد. بررسی منابع نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های زمین‌آمار و جنگل تصادفی در پهنه‌بندی ویژگی‌های خاک رایج هستند. بنابراین پژوهش حاضر با هدف تعیین کارایی نقشه‌برداری رقومی خاک برای برآورد ظرفیت

مهرجردی و همکاران، ۲۰۱۴؛ ویسمیر و همکاران، ۲۰۱۱؛ اوتی و همکاران، ۲۰۱۷).

نتایج فاضلی و همکاران (۱۳۸۹) نشان داد که می‌توان از روش کریجینگ به دلیل درونیابی دقیق‌تر FC و PWP در مقایسه با روش‌های میانگین عام و فاصله معکوس برای تهیه نقشه‌های این دو ویژگی استفاده کرد. کیانو و همکاران (۲۰۱۹) مقادیر FC و PWP را با استفاده از روش‌های $SMLR^1$ و ANN^2 و به کمک توابع انتقالی در منطقه لس پلاتیو^۳ در کشور چین برآورد کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که هر دو روش مقادیر مشابه‌ای را برآورد می‌کند. مهم‌ترین متغیر در برآورد FC ، مقدار شن بود درحالی‌که در برآورد مقادیر PWP مقدار رس و جرم مخصوص ظاهری نقش مؤثرتری نسبت به متغیرهای دیگر داشتند.

زاو و همکاران (۲۰۱۹) ویژگی‌های هیدرولیکی سه‌بعدی خاک را با استفاده از دو رویکرد توابع انتقالی (PTF) و جنگل تصادفی در حوضه بالاتون^۴ در مجارستان پردازش و سپس با استفاده از کریجینگ پهنه‌بندی کردند. روش پهنه‌بندی بر مبنای توابع انتقالی به‌طور قابل‌توجهی عملکرد بهتری نسبت به روش ترکیبی جنگل تصادفی - کریجینگ (RFK) برای محتوای آب اشباع در اعماق ۶۰-۳۰ و ۹۰-۶۰ سانتی‌متری خاک داشت. در روش مبتنی بر PTF میزان عدم قطعیت موجود در پهنه‌بندی خصوصیات هیدرولیکی خاک مقدار کمتری داشت.

نوبدی و همکاران (۲۰۲۲) مقادیر FC و PWP را با ماشین‌های یادگیری شامل مدل‌های ANN ، $ANFIS$ ، SVM ، $SVM-FFA$ و $SVM-PSA$ در شمال غربی ایران برآورد نمودند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که دو مدل $SVM-PSA$ و $SVM-FFA$ عملکرد بهتری نسبت به بقیه مدل‌ها در برآورد این دو خصوصیت خاک دارد.

مطالعه‌ای توسط صحرایی و همکاران (۱۴۰۱) باهدف ارزیابی و مقایسه کارایی مدل‌های ماشین بردار

⁵ - Regression kriging-neural network residual kriging

⁶ - Neural network residual kriging

⁷ - Cokriging

⁸ - Regression kriging

¹ - Stepwise multiple linear regression

² - Artificial neural network

³ - Loess Plateau

⁴ - Balaton

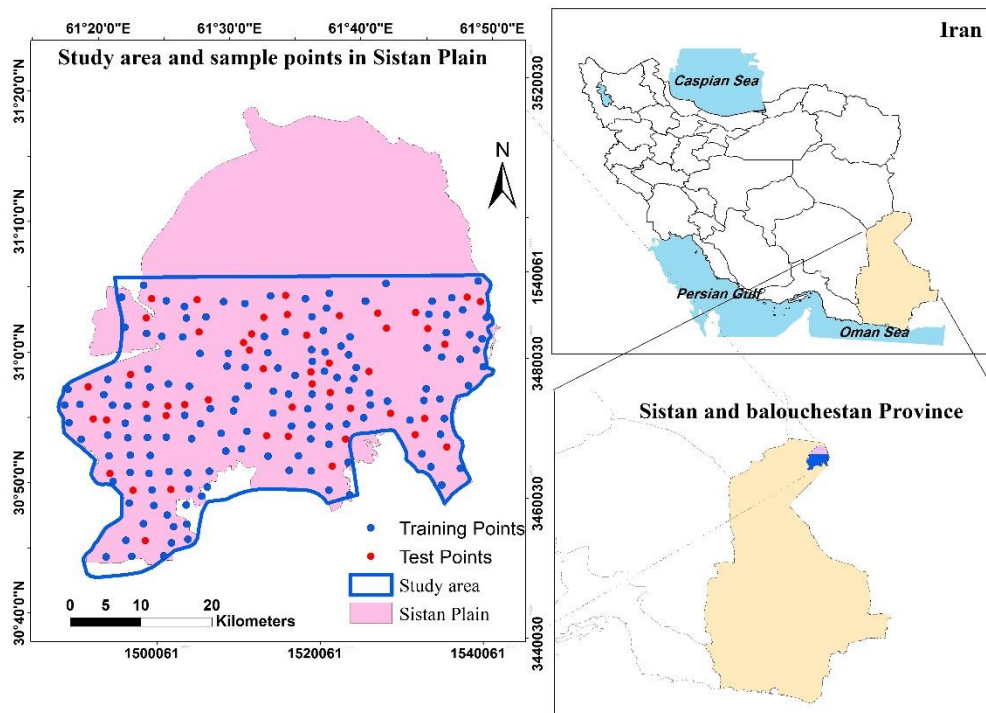
و تبخیر ۴۵۰۰ میلی‌متر است. محصولات غالب منطقه شامل گندم، جو، سورگوم، هندوانه، خربزه و انگور است. خاک‌های دشت سیستان تکامل زیادی ندارد و شامل ۵۲ درصد رده ایتی‌سول و ۴۸ درصد رده اریدی‌سول است (پهلوان راد، ۱۳۹۸). میانگین ارتفاع دشت ۴۹۷ متر از سطح دریا و دارای شیب عمومی کمتر از یک درصد است. منبع تأمین آب دشت، رودخانه هیرمند است که از کوه‌های هندوکش در افغانستان سرچشمه می‌گیرد و رسوبات دشت سیستان متأثر از این رودخانه است (پهلوان راد، ۱۳۹۸).

زراعی، نقطه پژمردگی دائم و میزان آب قابل‌دسترس خاک اراضی دشت سیستان با روش‌های زمین‌آمار و جنگل تصادفی که تاکنون بررسی نشده است انجام شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در منطقه‌ای به وسعت ۱۴۶/۸ هزار هکتار در جنوب دشت سیستان واقع در شمال استان سیستان و بلوچستان انجام شد (شکل ۱). اقلیم منطقه بر اساس طبقه‌بندی کوپن گرم و خشک با میانگین سالانه درجه حرارت ۲۱/۷ درجه سانتی‌گراد، بارندگی ۵۵ میلی‌متر



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری خاک در دشت سیستان

گذشته بوده که رسوبات با دانه‌بندی بسیار ریز همراه با رس زیاد را به جا گذاشته است (آقا نباتی، ۱۳۸۵). با توجه به اینکه اراضی دشت آبرفتی سیستان مسطح بوده و از لحاظ ژئومورفولوژی متأثر از رسوبات انشعابات رودخانه هیرمند است، انتظار می‌رود ویژگی‌های خاک دارای تغییرات مکانی زیادی باشد. لذا داشتن آگاهی از توزیع مکانی خصوصیات خاک از جمله بافت خاک در این دشت آبرفتی ضروری است.

مطالعات زمین‌شناسی دشت سیستان نشان می‌دهد که واحدهای سنگی کرتاسه، قدیمی‌ترین واحدهای منطقه هستند که به دو صورت واحدهای افیولیتی کرتاسه و واحدهای عمدتاً رسوبی همراه با مواد آذرین کرتاسه وجود دارند. رودخانه هیرمند نقش مهمی در تشکیل رسوبات دانه ریز میان‌دشتی، پایان‌دشتی و حتی دریاچه‌ای در دشت سیستان دارد. رسوبات آبرفتی دشت در نتیجه رسوب‌گذاری دریاچه بسیار وسیع مربوط به دوران‌های

مدل بر اساس ماهیت شاخص‌ها، در دسترس بودن داده‌ها، همگنی تغییرات متغیر، همبستگی ورودی‌ها با خروجی مدل انتخاب شد. برای پهنه‌بندی متغیرها از کریجینگ معمولی در نرم‌افزار ArcGis استفاده شد. همچنین، در مدل جنگل تصادفی، با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل تعداد درخت (ntree) بهینه که برای هر یک از متغیرهای FC، PWP و TAW به ترتیب ۳۰، ۵۰۰ و ۳۵۰ بود، تعیین شد. تعداد متغیرهای محیطی قابل استفاده برای رشد هر درخت (mtry) بر اساس حداقل مقدار خطا (RMSE) در محیط نرم‌افزار R نسخه 3.5.3 در بسته "Caret" تعیین شد. برای مدل‌سازی خصوصیات FC، TAW و PWP تعداد داده ۱۹۵ داده مشاهده‌شده خاک به مدل وارد شد که ۷۵ درصد داده‌ها (۱۴۷ داده) به‌عنوان داده آموزش و ۲۵ درصد (۴۹ داده) به‌عنوان داده اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شد.

متغیرهای محیطی

متغیرهای محیطی استفاده‌شده در این بررسی شامل شاخص‌های توپوگرافی مستخرج از مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر (ماهواره ALOS PALSAR) و شاخص‌های بیوفیزیکی تصاویر ماهواره لندست ۸ مربوط به ۱۳ مهر ۱۳۹۹ (4 اکتبر ۲۰۲۰) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر بود (جدول ۱). متغیرهای موردنیاز با استفاده از نرم‌افزارهای SAGA GIS و ERDAS IMAGINE 2015 استخراج شد. با استفاده از شاخص تأثیر نسبی، سهم هر متغیر در برآورد مشخص و پارامترهای مهم برای مدل‌سازی و برآورد FC، PWP و TAW انتخاب شد. این مرحله با استفاده از نرم‌افزار R صورت گرفت.

نمونه‌برداری خاک و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی

پس از تعیین مرز جغرافیایی منطقه دشت سیستان و در نیمه جنوبی آن، ۲۰۰ واحد مدیریتی هم‌آب برای نمونه‌برداری خاک انتخاب شد. موقعیت محدوده مطالعاتی و نقاط نمونه‌برداری شده خاک در شکل ۱ نشان داده شده است. واحدهای هم‌آب، واحدهایی ۲۰ هکتاری است که در هریک از آن‌ها، کشاورزان برای بهره‌برداری و مدیریت مناسب آبیاری تجمع شده‌اند. از هر محل نمونه‌برداری، نمونه‌های دست نخورده (استوانه دو سر باز با قطر داخلی ۴/۹۵ و ارتفاع ۵/۱۰ سانتیمتر) و دست‌خورده خاک از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر برداشت شد. پس از هوا خشک کردن نمونه‌ها در آزمایشگاه و عبور از الک ۲ میلی‌متری، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی شامل اجزای بافت خاک به روش هیدرومتری و کربن آلی به روش Walkly-Black اصلاح شده اندازه‌گیری شد (علی‌احیایی و بهبهانی، ۱۳۷۲). اندازه‌گیری مقدار رطوبت جرمی در ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم با استفاده از دستگاه صفحات فشاری به ترتیب با اعمال مکش ۰/۳۳ و ۱۵ بار انجام شد.

تغییرات مکانی

برای بررسی پراکنش مکانی داده‌های FC، PWP و TAW ابتدا فرضیه‌های پیش‌پردازش، همبستگی خطی و رگرسیون داده‌ها، از جمله تشخیص داده‌های پرت^۱ و آزمون نرمال کردن داده‌ها برای همه متغیرها اعمال شد (بری و همکاران، ۱۹۹۸). آزمون نرمال بودن داده‌ها با روش‌های کولموگراف-اسمیرنوف، بررسی چولگی و کشیدگی داده‌ها و تحلیل نمودارهای چندک-چندک (q-q) در نرم‌افزار SPSS انجام شد. در این پژوهش برآورد متغیرهای FC، PWP و TAW بر اساس دو الگوریتم کریجینگ معمولی به‌عنوان یک مدل زمین‌آماري و جنگل تصادفی به‌عنوان یک مدل یادگیری ماشین انجام شد. ورودی هر

^۱ . Outlier data

جدول ۱- متغیرهای محیطی (کمکی) مستخرج از مدل رقمی ارتفاع و تصاویر ماهواره‌ای

شرح	نام متغیر	نماد	منبع
مستخرج از مدل رقمی ارتفاع	مدل رقمی ارتفاع	DEM	Wilson and Gallant (2000)
	سطح پایه شبکه کانال‌ها	Channel Network Base Level (cnbl)	Wilson and Gallant (2000)
	تفاضل ارتفاع‌های اصلی سطح پایه شبکه کانال	Valley Depth (vd)	Skentos (1987)
	شاخص همواری دره با درجه تفکیک بالا	MRVBF	Taghizadeh-Mehrjardi (2014)
	عمق تقریبی شار سطح پایه حوضه	Vertical Distance to Channel Network (vdcn)	Betz et al. (2016)
	موقعیت شیب نسبی	Relative slope position (rsp)	Boehner and Selige (2006)
	$(R-NIR)/(R+NIR)$	NDSI ¹	Allbed and Kumar (2013)
	$\sqrt{(B \times R)}$	SI ²	Allbed and Kumar (2013)
مستخرج از ماهواره لندست ۸	$(NIR-R)/(NIR+R)$	NDVI ³	Rouse et al. (1974)
	NIR/R	RVI ⁴	Rouse et al. (1974)
	$(s(NIR-s \times R-a))/(a \times NIR+R-a \times s+X \times (1+s2))$	TSAVI ⁵	Baret and Guyot (1991)
	$(B2 \times 0.3029) + (B3 \times 0.2786) + (B4 \times 0.4733) + (B5 \times 0.5599) + (B6 \times 0.5080) + (B7 \times 0.1872)$	Tbright ⁶	Baig et al. (2014)
	4-Ratio Vegetation Index		
	5- Transformed Soil-Adjusted Vegetation Index		

1-Normalized Difference Salinity Index

2-Salinity Index

3-Normalized Difference Vegetation Index

4-Ratio Vegetation Index

5- Transformed Soil-Adjusted Vegetation Index

6- Soil Brightness

اعتبارسنجی مدل

و بهترین حالت عملکرد زمانی است که مقدار آن‌ها به صفر نزدیک باشد (ادب، ۱۳۹۶). با توجه به اینکه مقدار RMSE متناسب با واحد اندازه‌گیری ویژگی هدف است. شاخص nRMSE زیر ۱۰ درصد نشان‌دهنده قوی بودن مدل، ۲۰-۱۰ درصد مناسب بودن مدل، ۳۰-۲۰ درصد متوسط بودن مدل و بیش از ۳۰ درصد نشانه ضعیف بودن مدل است (ویلجان و همکاران، ۲۰۱۸). برای بررسی بیش برآوردی و یا کم برآوردی از معیاره Bias استفاده شده. مقادیر مثبت Bias نشانه بیش برآوردی و مقادیر منفی آن نشانه کم برآوردی مدل است (موریاسی و همکاران، ۲۰۰۷).

صحت هر یک از مدل‌ها بر پایه ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE) و میانگین انحراف (Bias) (در محیط نرم افزار R نسخه 3.5.3 در بسته "Caret" ارزیابی شد (هونکپتین و همکاران، ۲۰۱۸):

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2\right)} \quad (1)$$

$$\%NRMSE = RMSE / O_{ave} * 100 \quad (2)$$

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (3)$$

که در آن‌ها: P_i مقدار برآورد شده، O_i مقدار اندازه‌گیری شده، O_{ave} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده، P_{ave} میانگین مقادیر برآورد شده و n تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده است.

مقادیر آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده همواره مثبت بوده

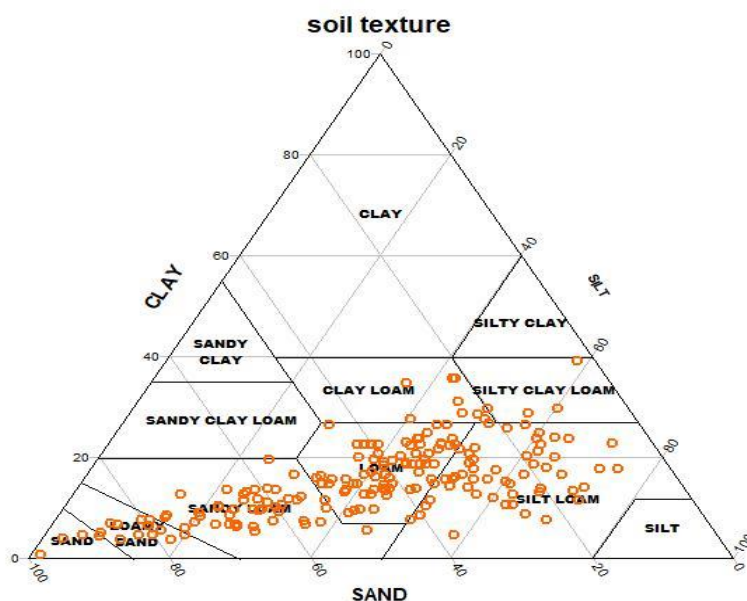
یافته‌ها و بحث

آمار توصیفی ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه

توزیع بافت خاک نمونه‌های مورد مطالعه بر اساس مثلث بافت خاک USDA نشان داد که خاک منطقه در کلاس‌های بافت لومی (Loam)، لومی‌شنی (Sandy Loam)، لومی (Loamy Sand) و لومی سیلتی (Silt Loam) است.

ذخیره عناصر غذایی و تبادل کاتیون‌های عناصر غذایی ضعیف هستند، قدرت نگهداری آب و ظرفیت زراعی ضعیفی دارند.

Loam قرار دارد (شکل ۲) که به نسبت متوسط تا سبک هستند که دلیل آن می‌تواند رسوبی بودن دشت سیستان است. خاک‌های دارای بافت سبک، افزون بر آنکه از نظر



شکل ۲- توزیع کلاس بافت خاک نمونه‌های مورد مطالعه بر اساس مثلث USDA

به ترتیب دارای تغییرات کم، متوسط و زیاد هستند. با توجه به جدول ۲، هر سه ویژگی FC، PWP و TAW دارای تغییرات و غیریکنواختی زیادی هستند. اجزای بافت خاک و مواد آلی نیز غیریکنواختی زیادی دارند.

خلاصه آمار توصیفی ویژگی‌های مطالعه شده خاک در این پژوهش در جدول ۲ آمده است. بر پایه گروه‌بندی ویلدینگ و درس (۱۹۸۳)، متغیرهایی با ضریب تغییرات (CV) کمتر از ۱۵ درصد، بین ۱۵ تا ۳۵ درصد و بزرگ‌تر از ۳۵ درصد

جدول ۲- خلاصه آمار توصیفی داده‌های ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی دائم و آب قابل دسترس (درصد وزنی)

نوع داده‌ها	ویژگی	تعداد داده‌ها	کمترین	بیشترین	میانگین	انحراف معیار	واریانس	چولگی	کشیدگی	ضریب تغییرات (%)
آموزش (Train)	FC	۱۴۶	۲/۷۷	۳۱/۴	۱۶/۵	۶/۲	۳۹	-۰/۰۷	-۰/۵۷	۳۷
	PWP	۱۴۶	۱/۴۸	۱۴/۸	۹/۴۷	۳/۹	۱۴/۸	۰/۱۴	-۰/۳۵	۴۱
	TAW		۰/۹۹	۱۷/۴	۷/۰۵	۳/۰۵	۹/۳	۰/۴۷	۰/۳۱	۴۳
آزمایش (Test)	FC	۴۹	۴/۴	۲۸/۸	۱۸/۲۸	۶	۳۵/۷	-۰/۴۴	-۰/۷۲	۳۲
	PWP	۴۹	۲/۷۷	۲۱/۱۸	۱۰/۸۶	۴/۱۲	۱۷/۰۵	-۰/۲۲	-۰/۱۰	۳۸
	TAW		۱/۶۴	۱۳/۳	۷/۴۲	۲/۶	۶/۷۸	-۰/۰۴	-۰/۴۵	۳۵

نتایج روش کریجینگ معمولی

مشخصات مدل مناسب نیم‌تغییرنمای برازش شده به نیم‌تغییرنمای تجربی FC، PWP و TAW در جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج حاصل از مقایسه آماره‌های مجموع مربعات خطا (RSS) و ضرب تبیین (R²) نشان می‌دهد که مدل نمایی با اثر قطعه‌ای ۲۷ و دامنه تأثیر ۱۸۳۰۰ متر برازش بهتری را بر نیم‌تغییرنمای محاسبه

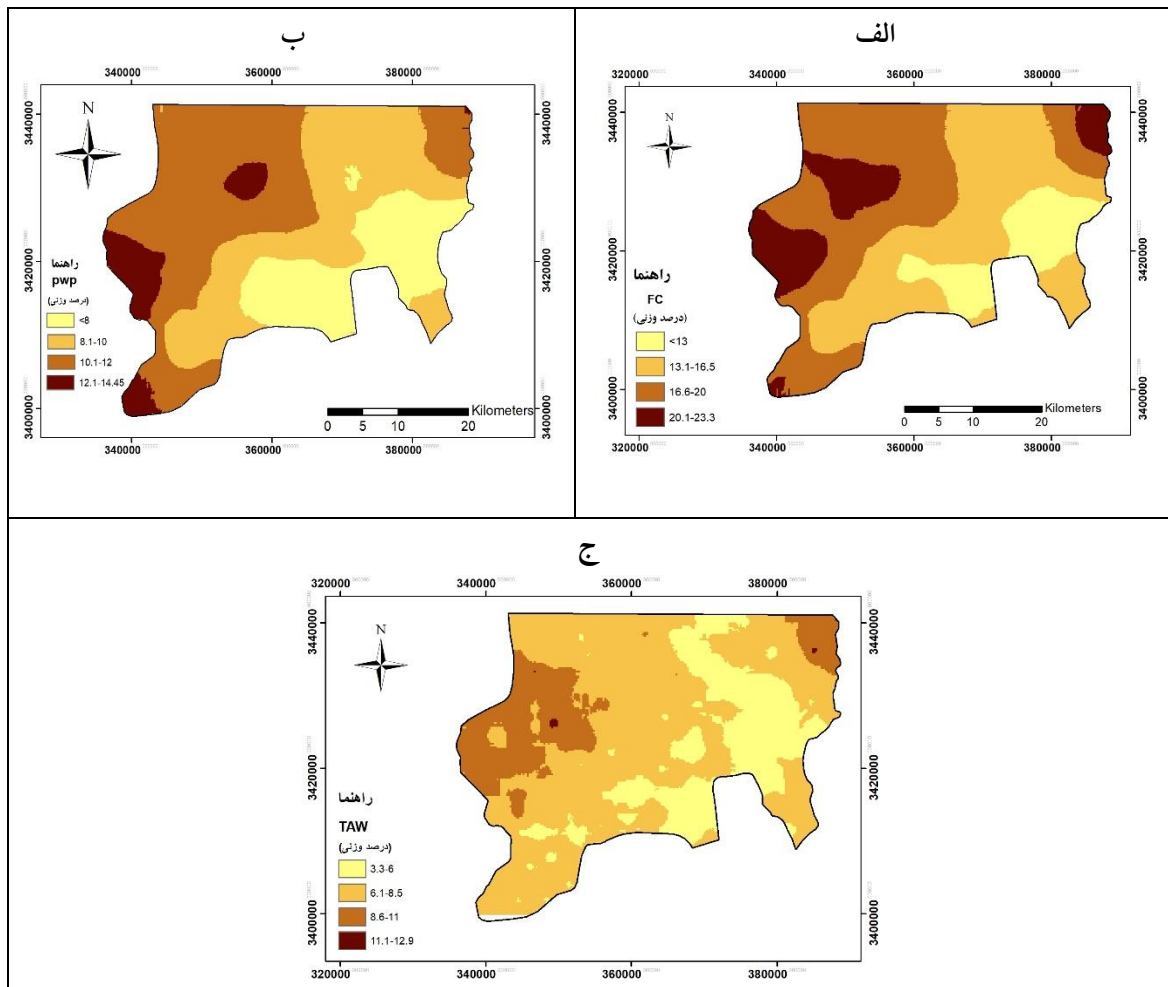
با استفاده از هیستوگرام داده‌ها داده‌های ویژگی‌های مورد مطالعه، ۷ داده پرت شناسایی شد که بر اساس نظر کارشناس آشنا به فیزیک خاک منطقه، ۵ داده پرت حذف شد. با توجه به مقادیر کم چولگی و کشیدگی ویژگی‌های ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی دائم و آب قابل دسترس (جدول ۲) از توزیع فراوانی نرمال پیروی می‌کنند (دیجورویس و همکاران، ۲۰۰۰). آزمون کولموگروف-اسمیرونوف نیز این جمع بندی را تأیید کرد.

شکل ۳ نقشه پراکنش مکانی مکانی FC، PWP و TAW را در دشت سیستان که به روش کریجینگ معمولی تهیه شده را نشان می‌دهد. پهنه‌بندی پراکنش مکانی درصد سیلت، رس و شن با استفاده از روش کریجینگ معمولی نیز در شکل ۴ (الف، ب و ج) نشان داده شده است. بر اساس شکل ۳ بیشترین مقدار رطوبت ظرفیت زراعی و آب قابل دسترس در غرب و شمال شرق منطقه مشاهده می‌شود که طبق نقشه مدل رقومی ارتفاع (شکل ۵-د) دارای ارتفاع کمتری از سطح دریا نسبت به سایر قسمت‌های منطقه مطالعاتی است. از سویی، این مناطق دارای بافت خاک سنگین‌تری هستند (شکل ۴-الف، ب و ج). در مناطق جنوب و جنوب شرقی منطقه که دارای بافت خاک سبک‌تری است، مقدار آب قابل دسترس نسبت به مناطق غربی و شمال شرقی کمتر است. با افزایش میزان شن به علت افزایش منافذ درشت خاک، میزان آب ثقلی افزایش و ظرفیت زراعی کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۵ بیشترین مقدار سیلت و رس در شمال شرق و غرب منطقه مشاهده می‌شود.

شده FC دارد. دامنه تأثیر ۱۸۳۰۰ متر نشان‌دهنده این است که همبستگی مکانی FC می‌تواند تا حدود این فاصله توسعه یابد. لذا مناسب‌ترین فاصله نمونه‌برداری خاک برای تعیین مقدار FC، فواصل کمتر از این مقدار است. این در حالی است که برخی محققین فاصله معادل ۷۰ درصد دامنه تأثیر یعنی کمتر از ۱۲۸۰۰ متر را به‌عنوان فاصله بهینه نمونه‌برداری پیشنهاد داده‌اند (محمدی، ۲۰۰۶). کمباردلا و همکاران (۱۹۹۴) نشان دادند برای پی بردن به قدرت ساختار (همبستگی) مکانی هر متغیر می‌توان از نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه نیم‌تغییرنا استفاده نمود. درصد همبستگی مکانی کمتر از ۲۵ درصد، ۲۵ تا ۷۵ درصد و بیشتر از ۷۵ درصد به ترتیب بیانگر ساختار مکانی قوی، متوسط و ضعیف است. همبستگی مکانی آب قابل دسترس، ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم متوسط بودند (جدول ۳). با توجه به آنکه مدل‌های نیم‌تغییرنا دارای آستانه بودند، از مؤلفه‌های این مدل‌ها (جدول ۳) برای درون‌یابی به روش کریجینگ معمولی استفاده شد.

جدول ۳- مؤلفه‌های مدل‌های نیم‌تغییر نمای ویژگی‌های مورد مطالعه

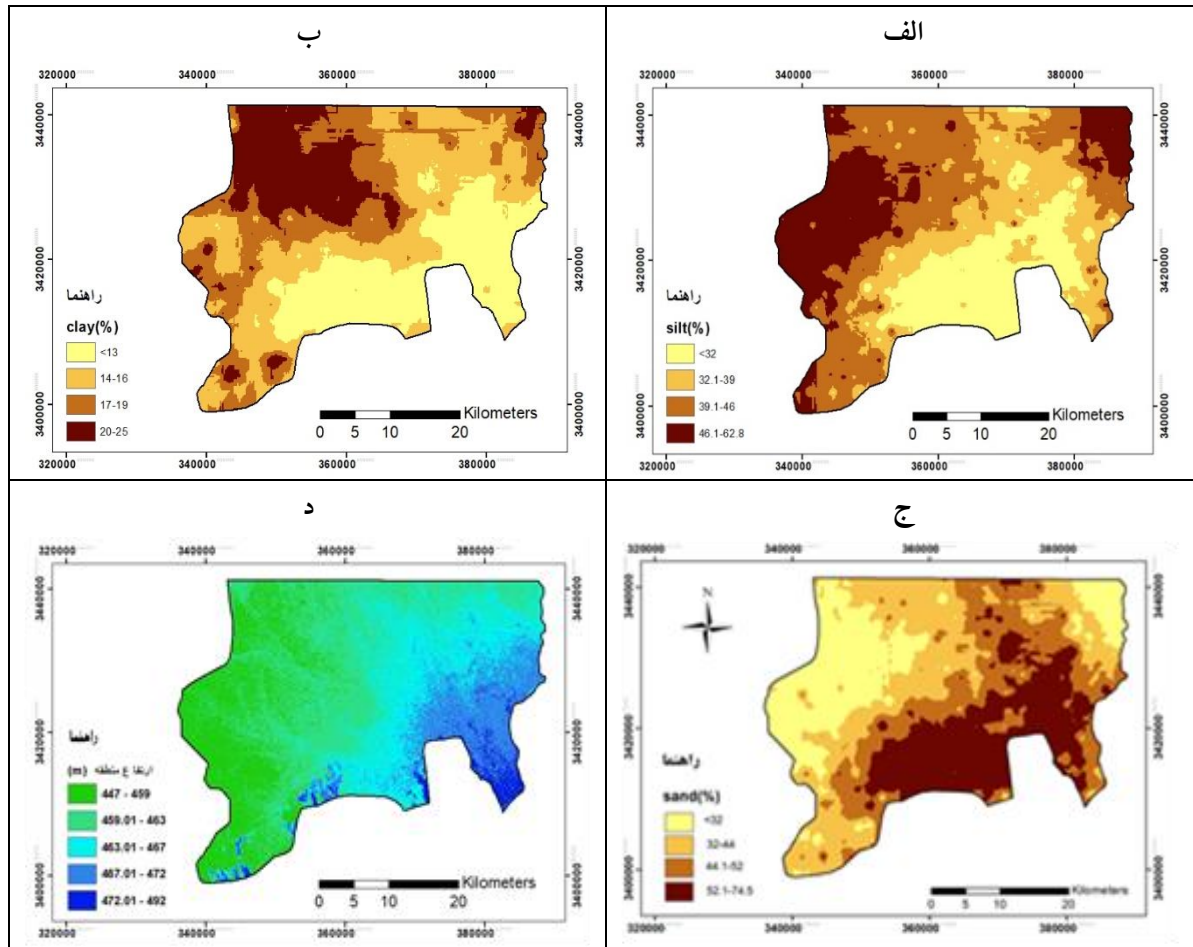
ویژگی	واحد	مدل	دامنه تأثیر (متر)	اثر قطعه‌ای	حد آستانه وابستگی مکانی	درصد	R ²	RSS
FC	درصد	نمایی	۱۸۳۰۰	۲۷	۳۹/۱	۷۰	۰/۹۶۸	۳/۲۷
PWP	وزنی	کروی	۱۵۰۰۰	۱۱	۱۴/۷۲	۷۵	۰/۹۵۲	۰/۳۵۶
TAW		نمایی	۱۶۳۰۰	۴/۷۲	۹/۴۴	۵۰	۰/۸۵۱	۲/۱۴



شکل ۳- نقشه پراکنش مکانی FC (الف)، PWP (ب) و TAW (ج) تهیه شده با روش کریجینگ معمولی

جنوب شرقی مشاهده می‌شود. این نتایج با یافته‌های پهلوان راد (۱۳۹۸) که نشان داد بیشترین نفوذپذیری مربوط به جنوب شرقی دشت بوده که مقدار شن بیشتری دارند و کمترین مقادیر نفوذپذیری هم مربوط به قسمت‌های شمالی دشت بود که نزدیک تالاب هامون بوده و مقدار رس بیشتری دارند، همخوانی دارد.

بیشترین مقدار رطوبت در نقطه پژمردگی دائم در غرب و جنوب غرب منطقه و کمترین مقدار آن در بخش‌های جنوب شرقی منطقه که کمترین مقدار رس را دارد، مشاهده می‌شود. همچنین، بر اساس نقشه رقومی ارتفاع، مناطق جنوب شرقی دارای ارتفاع بیشتر و بافت درشت‌تر است. بر اساس نقشه درصد شن نیز بیشترین مقدار شن در مناطق



شکل ۴- نقشه پراکنش مکانی درصد سیلت (الف)، درصد رس (ب) و درصد شن (ج) تهیه شده با روش کریجینگ معمولی و مدل رقومی ارتفاع منطقه مورد مطالعه (د)

ارتفاع‌های اصلی سطح پایه شبکه کانال (Vdcn)، عمق تقریبی شار سطح پایه حوضه (Vd)، شاخص شوری (SI) و شاخص درخشندگی خاک با استفاده از روش تسلدکپ (tbright) دارای همبستگی مثبت یا منفی با ویژگی‌های FC، PWP و TAW بود. این همبستگی‌ها هرچند قوی نبودند، اما در سطح یک درصد معنی دار بود. لذا از این متغیرهای کمکی در مدل جنگل تصادفی استفاده شد.

نتایج مدل‌سازی بر مبنای الگوریتم جنگل تصادفی ضرایب همبستگی خطی پیرسون بین ویژگی‌های FC، PWP و TAW و متغیرهای کمکی استخراج شده از تصاویر ماهواره لندست ۸ (جدول ۴) نشان داد که متغیرهای محیطی مدل رقومی ارتفاع (DEM)، شاخص همواری دره با درجه تفکیک بالا (MRVBF)، سطح پایه شبکه کانال‌ها (Cnbl)، موقعیت شیب نسبی (Rsp)، تفاضل

جدول ۴- مقادیر ضرایب همبستگی خطی بین ویژگی‌های FC، PWP و TAW و متغیرهای کمکی استخراج‌شده از تصاویر ماهواره
لندست ۸

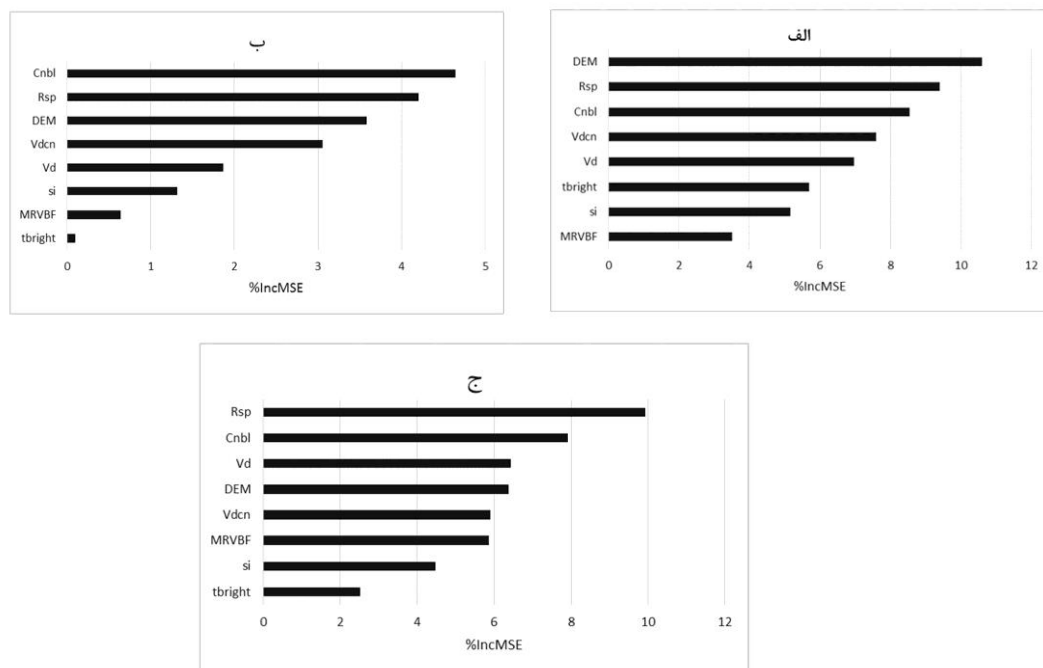
TAW	PWP	FC	Environmental variables ^a
-.۲۷۵**	-.۳۷۴**	-.۳۶۳**	DEM
.۱۸۶**	.۲۶۰**	.۲۵۰**	MRVBF
-.۲۳۹**	-.۳۳۲**	-.۳۲۰**	Channel Network Base level(Cnbl)
-.۲۲۷**	-.۲۷۳**	-.۲۷۷**	Relative slope position(Rsp)
.۲۲۹**	.۳۳۲**	.۳۱۵**	Valley depth(Vd)
-.۱۶۲**	-.۱۹۱**	-.۱۹۵**	Vertical Distance to Channel Network(Vdcn)
.۱۰۸ ^{ns}	.۰۷۲ ^{ns}	.۰۹۶ ^{ns}	NDSI
-.۱۰۸ ^{ns}	-.۰۷۲ ^{ns}	-.۰۹۶ ^{ns}	NDVI
.۱۱۰ ^{ns}	.۰۷۷ ^{ns}	.۰۰۱ ^{ns}	RVI
.۱۷۹**	.۱۵۶**	.۱۸۲**	SI
-.۱۰۸ ^{ns}	-.۰۷۲ ^{ns}	-.۰۹۶ ^{ns}	TSAVI
.۱۸۲**	.۱۶۱**	.۱۹۵**	Tbright

** دارای همبستگی معنی‌دار در سطح یک درصد -^{ns} بدون همبستگی معنی‌دار

^a Digital Elevation Model (DEM), Module Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness (MRVBF), Normalized-Difference Snow Index (NDSI), Normalized-Difference Vegetation Index (NDVI), Radar Vegetation Index (RVI), Salinity Index (SI), Transformed Soil Adjusted Vegetation Index (TSAVI)

و عمق تقریبی شار سطح پایه حوضه (شکل ۵، ج). سطح پایه شبکه کانال‌ها دارای همبستگی خطی معنی‌دار با سه ویژگی PWP، TAW و FC بود. مدل رقومی ارتفاع، منبع استخراج عوارض مختلف پستی و بلندی و تحلیل‌های رقومی عوارض زمین است. کانال‌ها یکی از اجزای ژئومورفومتری خروجی مدل رقومی ارتفاعی است. در کانال‌ها باید به این نکته توجه داشت که جهت جریان آب در سلول‌ها بر اساس ارتفاع آن‌ها صورت می‌گیرد. به عبارت دیگر جهت جریان از سلول با ارتفاع بیشتر به سمت سلول با ارتفاع کمتر است (تازه و همکاران، ۱۳۹۴). در مناطقی که میزان FC، TAW و PWP بیشتر است، مدل رقومی ارتفاع مقادیر کمتری داشته و تأکیدی بر این نکته است که وضعیت توپوگرافی اثر مهمی بر این خصوصیات دارد.

یافته‌های الگوریتم جنگل تصادفی نشان داد که مهم‌ترین متغیرهای محیطی مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای، برای برآورد توزیع مکانی دو ویژگی ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم، مدل رقومی ارتفاع، سطح پایه شبکه کانال‌ها و موقعیت شیب نسبی است (شکل ۶، الف و ب). اهمیت تعیین شیب و درجه آن به این دلیل است که در شیب‌های آفتاب‌گیر، تبخیر بیشتر بوده و بنابراین ذخیره آب خاک کم شده و پوشش گیاهی کمتر است (رفاهی، ۱۳۸۸). البته در دشت‌های سیلابی سیستان به دلیل رسوب ذرات درشت در شیب‌های بالاتر و تشکیل بافت‌های سبک‌تر نقش تعیین‌کننده دارد. همچنین، متغیرهای محیطی که در برآورد توزیع مکانی مقدار آب قابل‌دسترس نقش مهمی داشتند، عبارت‌اند از سطح پایه شبکه کانال‌ها، موقعیت شیب نسبی



شکل ۵- ترتیب متغیرهای محیطی برتر الگوریتم جنگل تصادفی برای تخمین ظرفیت زراعی (الف)، نقطه پژمردگی دائم (ب) و آب قابل دسترس (ج)

تصادفی مقادیر این ویژگی‌های را بیشتر برآورد کرده‌اند. دقت کمتر روش جنگل تصادفی در تخمین ویژگی‌های خاک می‌تواند به دلیل مسطح بودن اراضی منطقه باشد که باعث شده متغیرهای محیطی استخراج شده از تصاویر ماهواره و مدل رقمی ارتفاع نتوانند به خوبی تغییرات مکانی ویژگی‌های PWP، FC و TAW خاک را نشان دهند. از سوی دیگر، بر اساس پراکنش جغرافیایی اجزای بافت خاک سطحی، به نظر می‌رسد نقشه‌های خروجی از مدل کریجینگ انطباق بهتری با شرایط خاک‌های منطقه با توجه به پراکنش خصوصیات بافت خاک به‌عنوان یک پارامتر مؤثر در ظرفیت نگهداشت آب خاک دارد.

مقایسه عملکرد روش‌های کریجینگ معمولی و جنگل تصادفی در برآورد PWP، FC و TAW در جدول ۵ نشان داده شده است. بر اساس شاخص درصد nRMSE ارائه شده در جدول ۵، روش کریجینگ عملکرد قابل قبولی برای تخمین FC دارد، در حالی که عملکرد هر دو مدل برای تخمین PWP و TAW، در محدوده قابل قبول نیست؛ بنابراین با توجه به تأثیر PWP در محاسبه مقادیر TAW، در صورتی که بتوان روش مناسبی برای تخمین PWP ارائه داد، قطعاً مقادیر تخمینی TAW نیز از دقت کافی برخوردار خواهند شد. از سویی، بر اساس شاخص انحراف، مدل کریجینگ مقادیر ویژگی‌های مورد نظر را کمتر و مدل جنگل

جدول ۵- مقایسه شاخص‌های ارزیابی عملکرد دو روش کریجینگ و جنگل تصادفی برای تخمین FC، PWP و TAW

تفاوت دقت دو روش (%)	کریجینگ معمولی		جنگل تصادفی		ویژگی
	nRMSE	Bias	%nRMSE	Bias	
۵	-۰/۸۹	۲۸	۱/۴۱	۳۳	FC
۳	-۰/۶۱	۳۷	۱/۳۷	۴۰	PWP
۳	۰/۶۵	۳۴	۰/۰۸۸	۳۷	TAW

جنگل تصادفی و زمین‌آمار برای تولید نقشه‌های رطوبت ظرفیت زراعی (FC)، نقطه پژمردگی دائم (PWP) و رطوبت در دسترس (TAW) در بخشی از اراضی کشاورزی دشت سیستان استفاده شد. بر اساس نتایج، FC،

نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر از نقشه‌برداری رقمی خاک برای تولید نقشه کلاس‌ها یا خصوصیات خاک استفاده می‌شود. در این بررسی، از مدل‌های مبتنی بر الگوریتم

بیشترین مقادیر FC، PWP و TAW در خاک‌های مناطق غربی و شمال غربی دشت سیستان که دارای بیشترین درصد رس هستند، مشاهده شد. با توجه به اینکه مدیریت صحیح آبیاری مستلزم آگاهی از مقدار آب قابل دسترس خاک است، لذا با تعیین عوامل مؤثر بر آب قابل دسترس (FC و PWP) و شناسایی الگوی تغییرات مکانی این پارامترها می‌توان در هزینه‌های مطالعات آبیاری صرفه‌جویی نموده و در برنامه‌های مدیریت آبیاری از این اطلاعات جهت کاهش آب مصرفی و جلوگیری از نفوذ عمقی و رواناب مزارع بهره جست.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه زابل با کد پژوهانه UOZ-GR-6621 انجام شد که بدین وسیله از آن تشکر و قدردانی می‌شود.

PWP و TAW دارای همبستگی مکانی متوسط و تغییرات همگن بودند که می‌توان از این ویژگی برای تهیه نقشه پهنه-بندی شده خصوصیات در سطح منطقه مورد مطالعه استفاده نمود. مقایسه روش‌های کریجینگ معمولی و جنگل تصادفی برای برآورد FC، PWP و TAW در اراضی دشت سیستان نشان داد که روش کریجینگ معمولی با توجه به راحتی و سرعت اجرای بیشتر و حصول مقادیر کمتر nRMSE، از عملکرد بهتری نسبت به جنگل تصادفی برخوردار است. پیشنهاد می‌شود به منظور بررسی امکان افزایش دقت روش کریجینگ، از روش‌های ترکیبی مانند کریجینگ با ژنتیک، نروفاری و بی‌زین تجربی در مطالعات آینده استفاده شود. برتری کریجینگ در این تحقیق می‌تواند به دلیل شیب خیلی کم اراضی منطقه باشد که منجر شده متغیرهای محیطی نتوانند با مقادیر اندازه‌گیری شده خصوصیات مورد بررسی ارتباط مناسبی برقرار کنند. افزایش تعداد نمونه‌های اندازه‌گیری شده و نیز استفاده از متغیرهای کمکی با دقت بالاتر (نظیر نقشه رقوم ارتفاع) در تحقیقات بعدی می‌تواند موجب دقت بیشتر نقشه‌های تولیدی شود.

فهرست منابع

۱. آق‌نابتی، س. ع. ۱۳۸۵. زمین شناسی و توان معدنی استان سیستان و بلوچستان. نشریه رشد آموزش علوم زمین، شماره ۴۵، ص ۱۱-۴.
۲. احمدی، ک.، عبادزاده، ح. ر.، حاتمی، ف.، محمدنیا افروزی، ش.، اسفندیاری، ا و طاقانی، ر. ع. ۱۴۰۰. آمارنامه کشاورزی سال ۱۳۹۹. مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات وزارت جهاد کشاورزی. ۹۲ ص.
۳. ادب، ح. ۱۳۹۶. برآورد رطوبت لحظه‌ای سطح خاک در فصل سرد با استفاده از داده‌های سنجش از دور نوری و حرارتی در شرایط بدون نمناکی. نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی). ۲۱ (۲): ص ۱۷۵-۱۹۱.
۴. پهلوان راد، م. ر. ۱۳۹۸. بررسی تغییرات مکانی نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در اراضی دشت سیستان با استفاده از زمین آمار و درختان تصمیم‌گیری تصادفی. گزارش نهایی موسسه خاک و آب. ۵۸ ص.
۵. تازه، م.، اسدی، م. و کلانتری، س. ۱۳۹۴. ارزیابی قابلیت شاخص های ژئومورفومتری در استخراج نقشه شبکه آبراهه (مطالعه موردی، حوزه سه قلعه- همبوسرایان)، نشریه علمی پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، سال چهارم. شماره ۱، ص ۱۴۴-۱۳۴.
۶. رفاهی، ح. ق. ۱۳۸۸. فرسایش آبی و کنترل آن. انتشارات دانشگاه تهران. تهران. ۶۳۳ ص.

۷. صحرايي، ن.، لندی، ا و حجتی، س. ۱۴۰۱. نقشه‌برداری رقومی اجزا بافت خاک در بخشی از اراضی دشت خوزستان با استفاده از برخی مدل‌های یادگیری ماشین. مجله تحقیقات خاک و آب ایران (دانشگاه تهران شماره ۱۰. ص ۲۲۷۶-۲۲۶۱.
۸. فاضلی سنگانی، م.، شرفا، م. و سرمیدیان، ف. ۱۳۸۹. درونیابی و پهنه‌بندی میزان رطوبت حد ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی دائم. مجله آبیاری و زهکشی ایران. دوره چهارم. شماره ۲. ص ۲۶۲-۲۵۱.
۹. علی‌احیایی، م. و بهبهانی زاده، ع.ا. ۱۳۷۲. نشریه فنی. شماره ۸۹۲. ۱۲۹ ص.
۱۰. محمدی، ج. ۱۳۸۵. پدومتری: آمار مکانی (۲جلد). انتشارات پلک. ۴۵۶ ص.
11. Aitkenhead, M. J., and M. C. Coull. 2016. Mapping soil carbon stocks across Scotland using a neural network model. *Geoderma*. 262: 187-198.
12. Allbed, A. and L. Kumar. 2013. Soil salinity mapping and monitoring in arid and semi-arid regions using remote sensing technology: a review. *Advances in Remote Sensing*. 2(4) : 373-385, DOI: 10.4236/ars.2013.24040
13. Arnold, J. G. and J.R.Williams. 1987. Validation of SWRRB: simulator for water resources in rural basins. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 113(2): 243-256.
14. Arnold, J.G. and N. Fohrer. 2005. SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. *Hydrological Processes*. 19(3): 563-572.
15. Babaeian, E., M. Sadeghi, S.B. Jones, C. Montzka, H.Vereecken and M. Tuller. 2019. Ground, proximal, and satellite remote sensing of soil moisture. *Rev. Geophys*. 57: 530-616.
16. Baig, M.H.A., L. Zhang, T. Shuai and Q. Tong. 2014. Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance. *Remote Sensing Letters*. 5(5): 423-431.
17. Baret, F. and G. Guyot. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*. 35(2-3): 161-173.
18. Berry, W.D. 1993. Understanding regression assumptions. quantitative applications in the social sciences. Sage Publications. 92:104P.
19. Betz, F., J. Rauschenberger, M. Lauermann, and B. Cyffka. 2016. Using GIS and remote sensing for assessing riparian ecosystems along the Naryn River Kyrgyzstan. *International Journal of Geoinformatics*. 12 (4): 25-30.
20. Brisson, N., B. Mary, D. Ripoche, M.H. Jeuffroy, F. Ruget, and B. Nicoulaud .1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomy Journal*. 18(5-6): 311-346.
21. Böhner, J. and T. Selige. 2006. Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalisation. *Göttinger Geographische Abhandlungen*. 115:13-28.
22. Cambardella, C.A., A.T. Moorman, J.M. Novak, T.B. Parkin, D.L. Karlen, R.F. Turco, and A.E. Konopka. 1994. Field-scale heterogeneity of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*. 58: 1501-1511.
23. Datta, S., S. Taghvaeian, and J. Stivers. 2017. Understanding soil water content and thresholds for irrigation management. *Oklahoma Cooperative Extension Fact Sheets*. BAE-1537. <http://osufacts.okstate.edu>
24. Djurovic, Z., B. Kovacevic and V. Barroso. 2000. QQ-plot based probability density function estimation. In *Proceedings of the Tenth IEEE Workshop on Statistical Signal and Array Processing* . 243-247.
25. Hengl, T., B.M. Heuvelink, B. Kempen, J.G.B. Leenaars, M. G. Walsh, K.D. Shepherd, A. Sila, R.A. MacMillan, J. M. Jesus, L. Tamene and J.E. Tondoh. 2015. Mapping soil properties of Africa at 250 m resolution: random forests significantly improve current predictions. *PLOS ONE*. 10 (6): doi: 10.1371/journal.pone.0125814.

26. Hounkpatin, O.K., F.O. de Hipt, A. Y. Bossa, G. Welp, and W. Amelung. 2018. Soil organic carbon stocks and their determining factors in the Dano catchment (Southwest Burkina Faso). *Catena*. 166: 298-309.
27. Mishra, U., R. Lal, D. Liu and M.Van Meirvenne. 2010. Predicting the spatial variation of the soil organic carbon pool at a regional scale. *Soil Science Society of America Journal*. 74(3): 906-914.
28. Navidi, M.N., J. Seyedmohammadi, and S.A. Seyed Jalali. 2022. Predicting soil water content using support vector machines improved by meta-heuristic algorithms and remotely sensed data. *Geomechanics and Geoengineering*. 17(3): 712-726.
29. Moriasi, D.N., J.G. Arnold, M.W. Van Liew, R. L., Bingner, R.D. Harmel, and T. L. Veith. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 50(3): 885-900.
30. Ottoy, S., B. De Vos, A. Sindayihebura, M. Hermy, and J. Van Orshoven. 2017. Assessing soil organic carbon stocks under current and potential forest cover using digital soil mapping and spatial generalisation. *Ecological Indicators*. 77: 139-150.
31. Parton, W.J., D.S. Schimel, C.V. Cole and D.S. Ojima. 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains Grasslands. *Soil Science Society of America Journal*. 51(5): 1173-1179.
32. Qiao, J., Y. Zhu., X. Jia, L. Huang and M.A. Shao. 2019. Pedotransfer functions for estimating the field capacity and permanent wilting point in the critical zone of the Loess Plateau, China. *Journal of Soils and Sediments*, 19: 140-147.
33. Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell, D.W. Deering, and J.C. Harlan. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation (No. E75-10354).
34. Shahriari, M., M. Delbari, P. Afrasiab, and M.R. Pahlavan-Rad. 2019. Predicting regional spatial distribution of soil texture in floodplains using remote sensing data: A case of southeastern Iran. *Catena*. 182:104-149.
35. Skentos, A. 2018. Topographic position index based landform analysis of Messaria (Ikaria Island, Greece). *Acta Geobalcanica*. 4(1):7-15
36. Szabo, B., G. Szatmari, K. Takacs, A. Laborczi, A. Mako, K. Rajkai and I. Pasztor. 2019. Mapping soil hydraulic properties using random-forest-based pedotransfer functions and geostatistics. *Hydrology and Earth System Sciences*. 23: 2615-2635.
37. Taghizadeh-Mehrjardi, R., B. Minasny, F. Sarmadian, and B.P. Malone. 2014. Digital mapping of soil salinity in Ardakan region, central Iran. *Geoderma*. 213: 15-28.
38. Terribile, F., A. Coppola, G. Langella, M. Martina and A. Basile. 2011. Potential and limitations of using soil mapping information to understand landscape hydrology. *Hydrology and Earth System Sciences*. 15: 3895-3933.
39. Viljanen, N., E. Honkavaara, R. Näsi., T. Hakala, O. Niemeläinen, and J. Kaivosoja. 2018. A novel machine learning method for estimating biomass of Grass Swards using a photogrammetric canopy height model, images and vegetation indices captured by a drone. *Agriculture*. 8: 1-28.
40. Wilson, J.P. and J.C. Gallant. 2000. Digital terrain analysis. Principles and applications. 6(12): 1-27.
41. Wiesmeier, M., F. Barthold, B. Blank, and I. Kögel-Knabner. 2011. Digital mapping of soil organic matter stocks using Random Forest modeling in a semi-arid steppe ecosystem. *Plant and Soil*. 340(1-2): 7-24.
42. Wilding, L. and L.R. Drees. 1983. Spatial variability and pedology. In *Developments in Soil Science*. Elsevier. 11: 83-116
43. Zhang, H., P. Wu, A. Yin, X. Yang, M. Zhang and C. Gao. 2017. Prediction of soil organic carbon in an intensively managed reclamation zone of eastern China: A comparison of multiple linear regressions and the random forest model. *Science of the Total Environment*. 592: 704-713.

Generating a Digital Map of Field Capacity and Permanent Wilting Point of Agricultural Soils in the Southern Part of Sistan Plain

F. Keykhaei, M. Delbari*, N. Davatgar, F. Hassanpour, M. Jamshidi, and P.Afrasiab

PhD Student in Department of Water Engineering, University of Zabol and member of the faculty Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran
keykhaei80@gmail.com

Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran **masoomeh.delbari@uoz.ac.ir**

Associate Professor, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran **n_davatgar@yahoo.com**

Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran **hassanpourir@uoz.ac.ir**

Assistant Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran

mohammadjamshidi@yahoo.com

Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran **peyman.afraziab@uoz.ac.ir**

Received: March 14, 2023 and Accepted: September 19, 2023

Abstract

This study aimed to estimate the spatial distribution of soil properties including field capacity (FC), permanent wilting point (PWP) and total available water (TAW) using ordinary kriging (OK) and random forest (RF) in agricultural lands of the southern Sistan Plain, covering an area of approximately 147000 hectares. FC, PWP, and TAW and soil texture components were measured for a total of 200 surface soil samples (0-30 cm). Performance evaluation of the two methods based on the percentage of normalized root mean square error (nRMSE) revealed that the conventional OK with 5% less error in estimating FC, 3% less error in estimating PWP, and 5% less error in estimating TAW performed slightly better than RF. Comparing Bias values showed that OK underestimates both FC and PWP and overestimates TAW, while RF overestimates all three parameters. Spatial distribution maps of FC, PWP, and TAW produced by OK model showed that the highest amount of FC (23%) and TAW (14.4%) were in the west and northeast of the region, which had heavier texture and lower altitude from the sea level. In the southern and southeastern regions, which have lighter soil texture, the amount of available water was less compared to the western and northeastern regions. In the RF model, the most important variable extracted from satellite images was Digital Elevation Model (DEM), and all three features had higher values in areas where DEM was lower. It seems that the flatness of the study area and the inadequacy of auxiliary variables caused the lower accuracy of the RF method.

Keywords: Total available water, Environmental variables, Ordinary Kriging, Random Forest Model

* Corresponding author's email: masoomeh.delbari@uoz.ac.ir