

پیش بینی رقومی مکانی عملکرد گندم دیم (مطالعه موردی: حوضه آبخیز بدر، شهرستان قروه، استان کردستان)

مسلم زرینی بهادر^۱، جواد گیوی^۲ و روح الله تقی زاده مهرجردی^۳

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

۳- استادیار رشته علوم خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه اردکان، اردکان، ایران

چکیده	تاریخچه مقاله
<p>گندم یکی از غلات کلیدی است که منبع تغذیه برای میلیون ها نفر از مردم جهان را فراهم می کند. با توجه به جمعیت رو به افزایش کشور و نیاز روز افزون به این محصول استراتژیک، در تحقیق حاضر، عوامل مؤثر بر عملکرد گندم دیم به ترتیب اهمیت و کارایی روش های مختلف برآورد تغییرات مکانی این عملکرد مورد بررسی قرار گرفت و نقشه تغییرات مکانی آن ترسیم شد. تعداد ۱۲۵ عملکرد اندازه گیری شده در حوضه آبخیز بدر شهرستان قروه در استان کردستان، با استفاده از مدل های شبکه عصبی مصنوعی، تحلیل درخت تصمیم، آنالیز تشخیصی و مدل میانگین گیری نزدیک ترین همسایه K به داده های کمکی (مستخرج از مدل رقومی ارتفاع، تصویر ماهواره لندست و نقشه ژئومورفولوژی) ارتباط داده شد. سپس با استفاده از معادله به دست آمده، برای نقاط فاقد مشاهده، میزان عملکرد برای آن نقاط برآورد و نقشه تغییرات مکانی عملکرد پیش بینی شده ترسیم گردید. الگوریتم ReliefAttributeEval در نرم افزار وکا، به ترتیب کاهش اهمیت، ژئومورفولوژی، موقعیت نسبی شیب، انحنای طولی، شاخص همواری قله برآمدگی با درجه تفکیک بالا، شیب، شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده و شاخص گیاهی تعدیل کننده اثر خاک را به عنوان مهم ترین عوامل مؤثر در تولید، شناسایی کرد. نتایج بررسی ها نشان داد که مدل میانگین گیری نزدیک ترین همسایه K که یک روش جدید در برآورد مکانی عملکرد می باشد، با بالاترین ضریب تبیین (۰/۹۹۸) و کم ترین میانگین ریشه مربعات خطا (۳۱/۴۰۸)، بهتر از سایر مدل های به کار رفته در این پژوهش، مقادیر عملکرد گندم دیم را پیش بینی نمود.</p>	<p>دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۲۴ پذیرش نهایی: ۱۳۹۷/۰۱/۲۱</p> <p>کلمات کلیدی: نقشه برداری رقومی، پیش بینی مکانی عملکرد، مدل میانگین گیری KNN، گندم دیم</p> <p>* عهده دار مکاتبات Email: javgivi@gmail.com</p>

روش‌های رگرسیون و سنجش از دور وجود دارد (۱، ۶، ۱۰ و ۲۷). مدل‌های برآورد محصول، غالباً در اکولوژی، زراعت و علوم محیطی برای شبیه‌سازی محصول و متغیرهای محیطی استفاده می‌شوند. در سال‌های گذشته، مدل‌های شبیه‌سازی تولید محصول به‌طور گسترده‌ای به عنوان یک ابزار مهم برای بررسی رشد ارقام مختلف گیاه در شرایط مختلف اقلیمی مورد استفاده قرار گرفته است (۲۴)؛ به عنوان مثال، چن^۱ و همکاران (۵) از یک مدل رگرسیون خطی برای پیش‌بینی عملکرد گندم زمستانه در استان شاندونگ استفاده کردند. شهبازی^۲ و همکاران (۱۸) از خصوصیات خاک و ویژگی‌های پستی و بلندی (اولیه و ثانویه) برای برآورد عملکرد گندم دیم در منطقه سیلاب استان خراسان بهره گرفته و بیان داشتند که رابطه رگرسیونی خطی تنها ۱۳ درصد تغییرات عملکرد کل را توجیه می‌کند. آنها دلیل پایین بودن ضریب تبیین را وجود رابطه‌های غیرخطی و پیچیده، بین عملکرد و پارامترهای کمکی دانستند. این محققان استفاده از مدل‌های پیچیده‌تر را برای بالا بردن دقت، پیشنهاد نمودند. در سال‌های اخیر محققان در علوم مختلف، از انواع روش‌های داده‌کاوی برای مدل‌سازی و یافتن رابطه‌های پیچیده استفاده کرده‌اند. توکر^۳ و همکاران (۲۵) برای اولین بار از داده‌های ماهواره‌ای برای پیش‌بینی عملکرد گندم استفاده نمودند. رمبولد^۴ و همکاران (۱۶) نیز کارایی بالای تصاویر ماهواره‌ای را در تخمین پتانسیل عملکرد محصولات زراعی تأیید نمودند. ایشان ارتباط معنی‌داری را بین شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده و عملکرد محصولات گزارش کردند. این شاخص بهترین شاخص تصاویر ماهواره‌ای برای ارزیابی کیفیت و کمیت محصولات معرفی شده است (۱).

مقدمه

گندم (*Triticum aestivum L. em. Thell*) یکی از غلات کلیدی است که در نقاط مختلف جهان کشت می‌شود و در حقیقت در بین غلات دیگر، بیش‌ترین سازگاری را به شرایط متفاوت اقلیمی دارا می‌باشد. این محصول کالری اولیه و منبع تغذیه برای میلیون‌ها نفر از مردم جهان را فراهم می‌کند. در سال ۲۰۱۶، میزان تولید جهانی گندم به‌طور تقریبی به ۷۵۳ میلیون تن در هکتار رسید، که باعث شد تا گندم بعد از ذرت، بیش‌ترین تولید را به خود اختصاص دهد (۴). مطالعات اخیر نشان می‌دهد که جمعیت جهان در اواسط این قرن به ۹ میلیارد نفر خواهد رسید (۵) و تقاضای جهانی برای مواد غذایی حداقل تا ۱۱ سال دیگر رو به افزایش است. افزایش تقاضا برای مواد غذایی در سراسر جهان و منابع محدود در دسترس برای تولید، لزوم استفاده از ابزارهای جدید برای برآورد تولید محصول را می‌طلبد (۱۵).

میانگین عملکرد واقعی محصولات زراعی بطور سالیانه برای مناطق مختلف کشور ایران توسط وزارت جهاد کشاورزی گزارش می‌شود؛ ولی کشاورزان و برنامه‌ریزان، هیچ‌گونه اطلاعاتی در باره محدودیت‌هایی که باعث پایین بودن عملکرد در واحد سطح اراضی می‌شوند، در اختیار ندارند؛ بنابراین باید با انجام مطالعات کاربردی در این زمینه، به محدودیت‌های عوامل خاکی و اقلیمی که سبب کاهش عملکرد در واحد سطح می‌شوند پی برد و راهکارهایی برای برطرف کردن این محدودیت‌ها ارائه نمود. یکی از این راهکارها، مطالعه‌ی دقیق و پیش‌بینی مکانی عملکرد در نقاط با ویژگی‌های متفاوت خاک و اقلیم است.

مدل‌های پیش‌بینی عملکرد محصول می‌توانند عملکرد محصول را با توجه به محدودیت‌های اقلیم، زمین‌نما، خاک و مدیریت برآورد کنند. برای این پیش‌بینی قبل از برداشت، طیف وسیعی از روش‌ها، مانند برآوردهای چشمی، مدل‌های شبیه‌سازی محصول،

1- Chen *et al.*

2- Shabbazi *et al.*

3- Tucker *et al.*

4- Rembold *et al.*

خاک زریک^۱ و رژیم حرارتی آن مزیک^۲ است. با توجه به این که بارندگی در تولید گندم دیم از عوامل اصلی به شمار می‌رود، از میانگین بارندگی و اطلاعات هواشناسی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ استفاده گردید.

خاک‌های منطقه مورد مطالعه بر اساس روش طبقه‌بندی خاک آمریکایی (۱۹)، در سه رده انتی سولز، اینسپتی سولز و مالی سولز؛ سه زیررده، چهار گروه بزرگ، یازده زیرگروه و سی و دو فامیل قرار گرفت.

تعیین نقاط مشاهده‌ای به روش هایپرکیوب، مطالعه و نمونه برداری خاک و اندازه‌گیری عملکرد

بر اساس تکنیک نمونه‌برداری هایپرکیوب لاتین^۳ (۱۰)، محل ۱۲۵ خاک‌رخ در منطقه مطالعاتی انتخاب شد (شکل ۱). تکنیک یاد شده، یک روش نمونه‌برداری مونتوکارلوی محدود شده و یک طرح تصادفی طبقه‌بندی شده است که به کمک توزیع چند متغیره، نمونه‌برداری قابل قبولی را باعث می‌شود. یک شبکه مربعی، حاوی نقاط نمونه برداری، یک شبکه لاتین است؛ اگر و تنها اگر فقط یک واحد نمونه‌برداری در هر ردیف و هر ستون وجود داشته باشد. یک هایپرکیوب لاتین، تعمیم این مفهوم به تعداد اختیاری از ابعاد است؛ به طوری که هر واحد نمونه‌برداری فقط در یک صفحه آن قرار گرفته باشد. هایپرکیوب لاتین شامل نمونه‌برداری n مقدار از توزیع تشریح شده هر متغیر است. توزیع تجمعی هر متغیر به n فاصله با احتمال مساوی تقسیم می‌شود و یک مقدار از هر فاصله به-طور تصادفی انتخاب می‌گردد. سپس n مقدار به‌دست آمده برای هر متغیر با متغیرهای دیگر جفت می‌گردد. این روش یک پوشش کاملی از هر متغیر را ایجاد می‌کند.

میانگین‌گیری نزدیک‌ترین همسایه K با موفقیت در بسیاری از برنامه‌های کاربردی، مانند طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده است (۱۳).

با توجه به اقلیم خشک و نیمه خشک ایران، کمبود عملکرد در واحد سطح و جمعیت رو به افزایش، کشور نیاز به تحقیقات جدید و دستیابی به راهکارهایی برای افزایش عملکرد محصول در واحد سطح دارد. برای نیل بدین مقصود، اولین گام، بررسی تغییرات مکانی این عملکرد است. اهداف تحقیق حاضر، بررسی عوامل مؤثر بر عملکرد گندم دیم، به ترتیب اهمیت، مطالعه کارایی روش‌های مختلف برآورد تغییرات مکانی این عملکرد و اقدام به پهنه‌بندی رقومی عملکرد پیش‌بینی شده این گیاه در حوضه آبخیز بدر شهرستان قروه استان کردستان بوده است.

مواد و روش‌ها

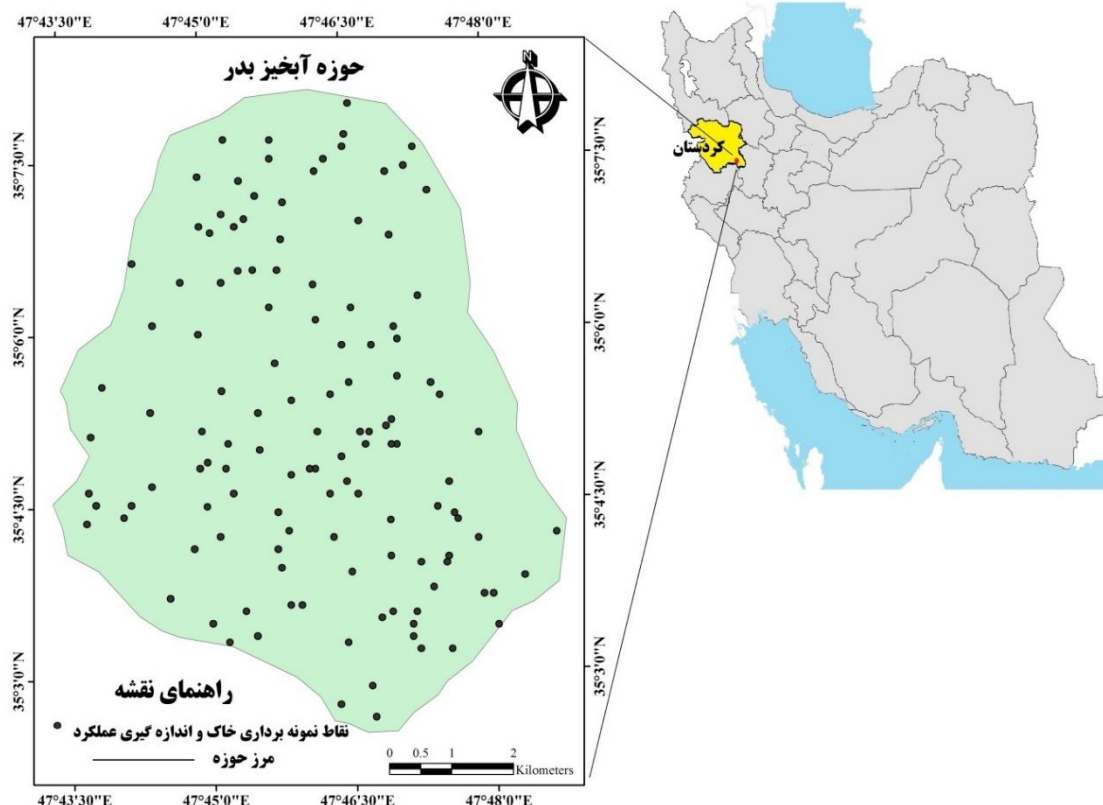
تشریح محدوده مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه، حوضه آبخیز بدر شهرستان قروه استان کردستان در غرب ایران، با مساحت ۶۷۰۰ هکتار بین مختصات جغرافیائی ۴۷/۷۲ و ۴۷/۸۲ درجه طول شرقی و ۳۵/۰۳ و ۳۵/۱۳ درجه عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). این حوضه از غرب، جنوب و شرق توسط کوه احاطه شده است. سنگ‌های تشکیل دهنده این کوه‌ها عبارتند از: آهک، دولومیت، مرمر، گنایس، آمفیولیت، میکا شیست، فیلیت، اسلیت، کوآرتزیت، دیوریت و گابرو. کوه و اراضی پای کوهی دو زمین نمای موجود در منطقه هستند. اراضی پای کوهی از تپه، مخروط افکنه و دشت سر تشکیل شده‌اند. مطابق با آمار طولانی مدت هواشناسی، متوسط درجه حرارت سالیانه هوا ۱۲/۱ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارندگی سالیانه ۳۴۶ میلی‌متر است. الگوی بارش، مدیترانه‌ای بوده و بخش اعظم بارندگی در فصول سرد سال اتفاق می‌افتد. بر اساس اقلیم نمای آمبرژه، اقلیم این ناحیه نیمه خشک و سرد می‌باشد. در منطقه مورد مطالعه، رژیم رطوبتی

1- Xeric

2- Mesic

3- Latin hypercube sampling



شکل (۱) موقعیت‌های مکانی محل تشریح و نمونه‌برداری از خاک‌رخ و اندازه‌گیری عملکرد گندم دیم، تعیین شده به روش هایپر کیوب

Figure(1) Locations of the soil profile description and sampling and rainfed wheat yield measurement, determined by hypercube method

به روش استات سدیم (۲۰)، درصد رس، سیلت و شن به روش هیدرومتری (۷) و درصد حجمی سنگ و سنگریزه نمونه‌های خاک اندازه‌گیری شد.

داده‌های کمکی و فرآیند انتخاب مهم‌ترین آن‌ها

در این تحقیق، علاوه بر به‌کاربردن داده‌های ژئومورفولوژی، انواع متغیرهای کمکی، از جمله مشتقات اولیه و ثانویه مدل رقمی ارتفاع^۱، تهیه شده از سازمان نقشه‌برداری با دقت مکانی ۳۰ متر، مشتمل بر ارتفاع، شیب، جهت شیب، انحنای شیب، انحنای سطحی شیب، انحنای طولی، موقعیت نسبی شیب، شاخص خیسی، شاخص همواری دره با درجه تفکیک بالا، شاخص همواری قله برآمدگی با درجه تفکیک

خاک‌رخ‌ها تشریح شدند و نمونه‌برداری خاک از افق‌های آنها صورت گرفت. چون میزان عملکرد محصول برای تعیین صحت و دقت روش‌های بکار رفته در ارزیابی کیفی و کمی تناسب اراضی مورد نیاز است (۲۲)، اندازه‌گیری عملکرد گندم دیم برای منطقه مطالعاتی داخل مربعی^۱ به ابعاد ۱ متر در ۱ متر، در هر یک از چهارطرف هر خاک‌رخ انجام گرفت.

مطالعات آزمایشگاهی

pH در گل اشباع (۲۱)، هدایت الکتریکی در عصاره‌ی دو به یک آب مقطر به خاک (۱۷)، ماده‌ی آلی به روش اکسیداسیون تر (۱۲)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی (۹)، ظرفیت تبادل کاتیونی

2- Digital Elevation Model

1- Quadrangle

تبدیل و برای انجام گرفتن فرایند مدل‌سازی در نرم افزار JMP وارد شدند.

مدل‌های پیش‌بینی عملکرد گندم دیم

شبکه عصبی مصنوعی، تحلیل درخت تصمیم، آنالیز تشخیصی و مدل میانگین‌گیری نزدیک‌ترین همسایه K، مدل‌هایی هستند که در این تحقیق برای پیش‌بینی عملکرد گندم دیم در منطقه، مورد استفاده قرار گرفتند.

۱- مدل شبکه عصبی مصنوعی^۱

شبکه عصبی مصنوعی به کار گرفته شده، پرسپترون چندلایه با یک لایه مخفی بود. این شبکه دارای تابع فعال‌سازی سیگموئید در لایه مخفی و تابع فعال‌سازی خطی در لایه خروجی بوده و تعداد نورون‌های آن از ۱ تا ۱۰ متغیر بود. بهترین تعداد نورون و بهترین ساختار شبکه به صورت سعی و خطا تعیین شد.

۲- مدل تحلیل درخت تصمیم^۲

مدل درختی طبقه‌بندی و رگرسیون، یک روش ناپارامتری الگوریتمی است که قادر است متغیرهای کمی یا متغیرهای طبقه‌بندی شده را بر اساس مجموعه‌ای از متغیرهای پیش‌بینی کننده کمی و کیفی برآورد کند. در این روش، مجموعه‌ای از شرط‌های منطقی به صورت یک الگوریتم با ساختار درختی برای طبقه‌بندی یا پیش‌بینی کمی یک متغیر به کار می‌رود. ایجاد درخت تصمیم دو مرحله دارد: مرحله اول، مرحله ایجاد و رشد درخت است. این مرحله شامل پیوند^۳ و انشعاب^۴ می‌باشد. مرحله دوم، مرحله توقف و هرس^۵ است. هدف این مرحله به حداقل رساندن خطای پیش‌بینی است (۲۱).

بالا، عمق دره، سطح حوضه اصلاح شده، سطح پایه شبکه آبراهه، شیب، جهت شیب و ارتفاع حوضه با استفاده از نرم افزار SAGA و الگوریتم‌های متفاوت استخراج گردید. هم‌چنین از داده‌های باندهای ۱ تا ۶ ماهواره لندست ۸ سال ۲۰۱۳، پس از اصلاحات لازم (هندسی و رادیومتری)، شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده و شاخص گیاهی تعدیل کننده اثر خاک، محاسبه شد (جدول ۱). در اغلب موارد، بسیاری از ویژگی‌ها (لایه‌های اطلاعاتی)، نامربوط و زاید هستند و کارایی الگوریتم یادگیری را کاهش می‌دهند و در بعضی موارد دقت و سرعت مدل‌سازی را پایین می‌آورند؛ بنابراین؛ انتخاب لایه‌های اطلاعاتی مؤثر در فرآیند پیش‌بینی، حائز اهمیت است. در این پژوهش، از روش "انتخاب ویژگی به ترتیب اهمیت" استفاده شد. به این معنی که تمام اطلاعات کمکی از نرم افزار ساگا استخراج شد؛ سپس با ورود این اطلاعات به نرم افزار وکا، با استفاده از الگوریتم ReliefAttributeEval، اطلاعات کمکی مهم و مؤثر در پیش‌بینی تولید به ترتیب اهمیت، انتخاب گردید و در مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. این الگوریتم، ارزش یک زیرمجموعه از ویژگی‌ها، با در نظر گرفتن توانایی پیش‌بینی فردی هر یک از آن‌ها و هم‌چنین میزان فراوانی بین آن‌ها را ارزیابی می‌کند. در این الگوریتم، زیرمجموعه یاد شده که با ویژگی‌های مورد پیش‌بینی همبستگی بالایی دارند و همبستگی درونی آن‌ها کم است، ترجیح داده می‌شوند (۸).

آماده‌سازی داده‌ها برای مدل‌سازی

برای پهنه‌بندی عملکرد گندم دیم در منطقه، داده‌های ژئومورفولوژی، خاک و دیگر داده‌های کمکی به منزله متغیر مستقل در نظر گرفته شد. هم‌چنین همه لایه‌های اطلاعاتی به فرمت رستری با اندازه سلولی ۳۰ متری تهیه گردید. این اطلاعات، متغیرهای مستقل در مدل اسکورپن شناخته می‌شوند. همه اطلاعات، یعنی داده‌های خاک و متغیرهای محیطی، به فرمت نهایی txt

1- Artificial Neural Network (ANN)
2- Decision Tree Analysis (DTA)
3- Merging
4- Splitting
5- Pruning

جدول (۱) داده‌های کمکی مورد استفاده برای پیش‌بینی عملکرد گندم دیم
Table (1) Auxillary data, used in rainfed wheat yield prediction

تعریف Description		
ارتفاع از سطح دریای آزاد Elevation above sea level	ارتفاع Elevation	
ارتفاع سطح پایه شبکه آبراهه Channel network base level elevation.	سطح پایه شبکه آبراهه Channel network base level	
تجمعات جریان آب و پارامترهای مورد نظر Water flow gatherings and related parameters	مساحت حوضه‌های آبخیز اصلاح شده Modified catchment area	
شاخص نسبت پهنای دره به عمق دره Valley width to valley depth index	عمق دره Valley depth	
میزان همواری کف دره The flatness of the valley floor	شاخص همواری دره با درجه تفکیک بالا Multi-resolution valley bottom flatness index (MRVBF)	
میزان همواری نوک قله The flatness of the ridge top	شاخص همواری قله برآمدگی با درجه تفکیک بالا Multi-resolution ridge top flatness index (MRRTF)	
معیاری از تجمع رطوبت An index of moisture accumulation	شاخص خیسگی Wetness index	مشتقات اولیه و ثانویه پستی و بلندی، مستخرج از مدل رقمی ارتفاع
زاویه بین سطح تماس و سطح افقی در یک نقطه درسته زمین The angle between the contact and the horizontal surfaces at a real point of the earth	شیب Slope	Primary and secondary derivatives of the digital elevation model
بیش‌ترین سرعت تغییر در ارتفاع در هر سلول از مدل ارتفاعی The highest rate of change in altitude in each cell from the altitude model	جهت Aspect	
شیب بالایی یا میانی یا پایینی Upper, middle or lower slope	موقعیت نسبی شیب Relative slope position	
میزان گرادیان مسیر حرکت Gradient of the movement path	شیب حوضه Catchment slope	
جهت شیب مسیر حرکت Slope aspect of the movement path	جهت شیب حوضه Catchment aspect	
میزان ارتفاع مسیر حرکت height of the movement path	ارتفاع حوضه Catchment height	
انحنا در صفحه عمودی خط جریان Curve on the vertical plane of the flow line	انحنای شیب Slope curvature	
اندازه همگرایی و واگرایی جریان Degree of convergence and divergence of the current.	انحنای سطحی شیب Slope surface curvature	
مقدار انحنا در جهت شیب اصلی دامنه Curvature in the direction of the overall slope	انحنای طولی Longitudinal curvature	

ادامه جدول (۱)

Table (1) continued

$(NIR^* - RED^{**}) / (NIR + RED)$	شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI)	عرض‌های بانندی مختلف، برگرفته از تصاویر ماهواره‌ای
$[(NIR - RED) / (NIR + RED + L^{***})] \times [1+L]$	شاخص گیاهی تعدیل کننده اثر خاک (SAVI)	Different bandwidths taken from satellite images
	Normalized differential vegetation index	
	Soil-adjusted vegetation index	

*اندازه گیری طیفی بازتابی که در منطقه مادون قرمز به دست آمده است

*Spectral Reflectance measurement acquired in the near-infrared region

**اندازه گیری طیفی بازتابی که در منطقه قرمز به دست آمده است

**Spectral Reflectance measurement acquired in the red region

***عامل تنظیم انتقال اشعه های قرمز و مادون قرمز از قسمت تاج گیاه

***Canopy background adjustment factor

خلاصه آماری داده‌ها

جدول (۲) آمار توصیفی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های منطقه مورد مطالعه در این تحقیق را نشان می‌دهد. ویژگی‌های خاک که ضریب تغییرات آن‌ها بیش از ۳۵، بین ۱۵ و ۳۵ و کم‌تر از ۱۵ است، به ترتیب دارای تغییرات زیاد، متوسط و کم می‌باشند (۲۶). بر این اساس، آهک، کربن آلی و سنگریزه، به ترتیب با ضریب تغییرات ۱۷۴/۴، ۶۲/۴ و ۶۱/۳ درصد، از تغییرات زیاد و شوری، ظرفیت تبادل کاتیونی، رس، سیلت و شن، به ترتیب با ضریب تغییرات ۲۵/۴، ۱۶/۹، ۳۰/۴، ۲۳/۵ و ۲۰/۳ درصد، دارای تغییرات متوسط و pH، با ضریب تغییرات ۳/۶ درصد، کم‌ترین میزان تغییرات را در خاک دارد. عملکرد اندازه‌گیری شده نیز، تغییرات زیادی را در خاک‌های منطقه نشان داد (جدول ۲). درجه تناسب ویژگی‌های خاک تأثیرگذار بر عملکرد، در محاسبه شاخص زمین به کار می‌رود. این شاخص، تعیین کننده کلاس تناسب زمین برای یک کاربری خاص است. الگوریتم ReliefAttributeEval در نرم افزار وکا، به ترتیب کاهش اهمیت، ژئومورفولوژی، موقعیت نسبی شیب، انحنای طولی، شاخص همواری قله برآمدگی با درجه تفکیک بالا، شیب، شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده و شاخص گیاهی تعدیل کننده اثر خاک را به عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر در تولید، شناسایی کرد. این عوامل، ویژگی‌های خاک یاد شده را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

۳- مدل آنالیز تشخیصی^۱

این مدل، عضویت را در یک گروه یا دسته بر اساس مقادیر مشاهده‌شده متغیر پیوسته پیش‌بینی می‌کند؛ به عبارت دیگر، به طور ویژه، آنالیز تشخیصی، متغیر (اسمی یا عددی) X را بر مبنای پاسخ‌های متغیر پیوسته Y تخمین می‌زند (۲).

۴- مدل میانگین‌گیری نزدیک‌ترین همسایه

^۲ K

میانگین‌گیری نزدیک‌ترین همسایه K، ارزش پاسخ برای یک مشاهده داده شده را با استفاده از پاسخ‌های مشاهداتی در همسایه‌های محلی پیش‌بینی می‌کند. می‌توان از این مدل با یک پاسخ قطعی برای طبقه‌بندی و یک پاسخ پیوسته برای پیش‌بینی استفاده کرد (۱۳). این روش، یک روش ناپارامتری است که براساس فاصله تا مشاهده‌های همسایه، پایه‌گذاری شده است. به این دلیل، میانگین‌گیری نزدیک‌ترین همسایه K قادر به طبقه‌بندی مشاهده‌ها با استفاده از مرزهای ارزش پیش‌بینی نامنظم است. با این حال، الگوریتم، حساس به پیش‌بینی‌کننده‌های بی‌ربط است؛ بنابراین انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌ها، قبل از اجرای مدل می‌تواند مفید باشد.

نتایج و بحث:

1- Discriminant Analysis (DA)

2- K Nearest Neighbors averaging (KNN)

مدل نسبت به دیگر مدل‌ها در پیش‌بینی مقدار عملکرد گندم دیم می‌باشد. هم‌چنین همبستگی کاملاً معناداری (ضریب تعیین = ۰/۹۸۷۲) بین مقادیر اندازه‌گیری شده گندم دیم و مقادیر عملکرد این محصول که توسط مدل میانگین‌گیری نزدیک‌ترین همسایه K برآورد گردیده است، به‌دست آمد (شکل ۲). این نتایج با نتایج تحقیقات سایر پژوهشگران مطابقت دارد (۱۴).

مقدار عملکرد گندم دیم توسط مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، تحلیل درخت تصمیم (DTA)، آنالیز تشخیصی (DA) و میانگین‌گیری نزدیک‌ترین همسایه K (KNN)، پیش‌بینی گردید. کم‌ترین ریشه دوم متوسط توان دوم خطا (۳۱/۴) و ریشه دوم متوسط توان دوم خطای نرمال شده (۰/۰۳۳) و بیش‌ترین ضریب همبستگی (۰/۹۹۹۳) و ضریب تعیین (۰/۹۹۸۶) برای مدل میانگین‌گیری نزدیک‌ترین همسایه K به‌دست آمد (جدول ۳). این امر بیانگر دقت بالاتر این

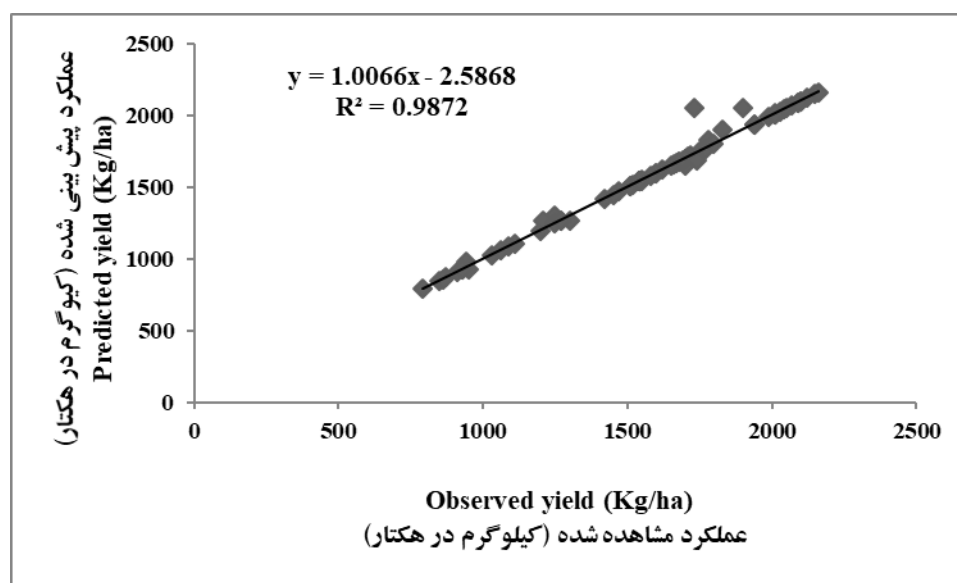
جدول (۲) آمار توصیفی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و عملکرد اندازه‌گیری شده در حوضه آبخیز بدر شهرستان قروه استان کردستان

Table (2) Descriptive statistic of soil physical and chemical properties and the measured yield in the Badr watershed, Qorveh, Kurdistan province

ضریب تغییرات Variability coefficient	انحراف معیار Standard deviation	میانگین Mean	حداکثر Maximum	حداقل Minimum	واحد Unit	ویژگی‌های خاک و عملکرد اندازه‌گیری شده Soil characteristics and measured yield
3.58	0.273	7.53	8	6.85	-	اسیدیته
25.41	0.046	0.181	0.384	0.114	-	pH
62.37	0.373	0.598	2.301	0.046	دسی سیمنس بر متر dSm ⁻¹	هدایت الکتریکی Electrical conductivity
174.36	17.018	9.76	65	0	درصد %	کربن آلی Organic carbon
16.94	2.418	14.27	26.5	8.9	سنتی مول بر کیلوگرم Cmol(+)/kg ⁻¹	کربنات کلسیم معادل Calcium carbonate equivalent
30.37	6.837	22.51	42.99	9	درصد %	ظرفیت تبادل کاتیونی Cation exchange capacity
23.51	6.848	29.13	48.58	15.94	درصد %	رس Clay
20.26	9.798	48.35	70	27.17	درصد %	سیلت Silt
61.29	10.45	17.05	48	1.59	درصد حجمی Volume %	شن Sand
87.65	832.16	949.44	2160	0	کیلوگرم در هکتار Kgha ⁻¹	سنگریزه Gravel عملکرد اندازه‌گیری شده Measured yield

جدول (۳) معیارهای خطا، ضرایب همبستگی و تبیین برای پیش‌بینی عملکرد با مدل‌های مختلف
Table (3) Error criteria, Concordance and determination Coefficients for yield prediction with different models

مدل Model	ریشه دوم متوسط توان دوم خطا Root mean squared error (RMSE)	ریشه دوم متوسط توان دوم خطای نرمال شده Normalized root-mean-squared error (NRMSE)	ضریب همبستگی Concordance coefficient (R^c)	ضریب تبیین Determination coefficient (R^2)	متوسط خطا Mean error (ME)
ANN	160.95	0.1695	0.9778	0.9587	8.4486
DTA	266.71	0.2809	0.9454	0.8964	0
DA	418.39	0.4406	0.9088	0.8328	0
KNN	31.408	0.0330	0.9993	0.9986	3.76
Averaging					



شکل (۲) همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده عملکرد گندم دیم، برآورد شده توسط مدل میانگین-گیری نزدیک‌ترین همسایه K

Figure(2) Correlation between measured and predicted values of rainfed wheat yield, estimated by KNN averaging model

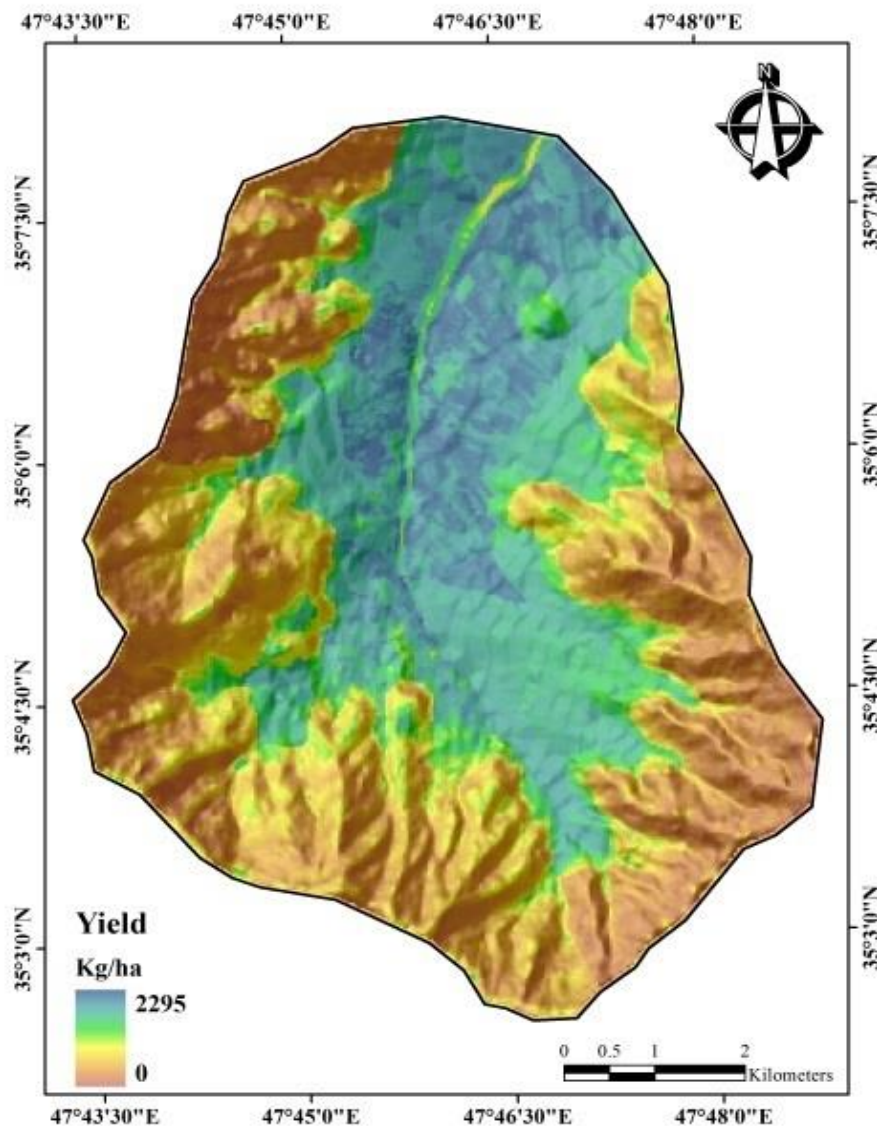
ظرفیت ذخیره آب کاهش و عمدتاً خاک‌های انتی‌سول مشاهده می‌شوند. این خاک‌ها در قسمت‌های شرقی، جنوبی و غربی حوضه آبخیز دیده می‌شوند.

پراکنش مکانی عملکرد گندم دیم پیش‌بینی شده، با استفاده از مدل میانگین‌گیری نزدیک‌ترین همسایه K در شکل ۳ نشان داده شده است. در حوضه آبخیز بدر، به طرف زمین‌نمای کوه، عملکرد به صورت پیوسته کاهش می‌یابد؛ زیرا در این نواحی، شیب افزایش، عمق خاک و

زیرینی بهادر و همکاران: پیش‌بینی رقمی مکانی عملکرد...

محدودیت‌های یاد شده، ماده مادری آهکی نیز مانع افزایش عملکرد می‌گردد. زیرا مقادیر بالای کربنات کلسیم از جذب فسفر، آهن و بعضی دیگر از عناصر کم مصرف جلوگیری می‌کند.

در ارتفاعات کم‌تر و در زمین‌نمای پای کوه (پیدمنت)، خاک‌ها عمیق‌تر می‌شوند و عمدتاً در رده اینسپتی سولز و در درجه بعد در رده مالی سولز قرار می‌گیرند. در این خاک‌ها، مقدار عملکرد گندم افزایش می‌یابد. در ارتفاعات قسمت غربی حوضه آبخیز، علاوه بر



شکل (۳) پراکنش مکانی عملکرد گندم دیم پیش‌بینی شده (کیلوگرم در هکتار) با استفاده از مدل میانگین‌گیری نزدیک‌ترین همسایه K

Figure(3) Spatial distribution of predicted rainfed wheat yield (kg/ha), estimated by KNN averaging model

نتیجه گیری

می‌شود در تحقیقات آتی، از این مدل برای پیش‌بینی عملکرد گندم دیم استفاده شود. ناگفته نماند که اگر برای پیش‌بینی عملکرد گندم دیم، متوسط چندین ساله عملکرد زارعین برای هر پروفیل خاک به کار می‌رفت، نتایج بهتری عاید می‌شد. چنین آماری، نه تنها برای هر پروفیل خاک در هر منطقه وجود ندارد، بلکه حتی برای یک روستا هم در کشور ایران موجود نمی‌باشد. با عنایت به این محدودیت و محدودیت‌های دیگر، عملاً اندازه‌گیری عملکرد برای بیش از دو سال امکان پذیر نیست. در تحقیق حاضر، میانگین عملکرد گندم دیم برای دو سال متوالی به دست آمد.

به ترتیب کاهش اهمیت، ژئومورفولوژی، موقعیت نسبی شیب، انحنای طولی، شاخص همواری قله برآمدگی با درجه تفکیک بالا، شیب، شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده و شاخص گیاهی تعدیل کننده اثر خاک، مهم‌ترین عوامل مؤثر در پیش‌بینی تولید گندم دیم در منطقه مورد مطالعه می‌باشند.

نتایج هم‌چنین نشان داد که مدل میانگین‌گیری نزدیک‌ترین همسایه K بهتر از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، تحلیل درخت تصمیم و آنالیز تشخیصی، مقدار عملکرد را پیش‌بینی نموده است. بنابراین پیشنهاد

منابع

1. Al-Gaadi, K.A., Hassaballa, A.A., Tola, E., Kayad, A.G., Madugundu, R., and Alblewi, B. 2016. Prediction of Potato Crop Yield, Using Precision Agriculture Techniques. PLoS ONE 11(9) : e0162219. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0162219>.
2. Ahmad, S.M., and Amal, M.S. 2014. Classification of Some Iraqi Soils, Using Discriminant Analysis. Journal of Agriculture and Veterinary Science, 7 (1): 31-39.
3. Becker-Reshef, E., Vermote, A., Lindeman, M., and Justice, C. 2010. A generalized regression-based model for forecasting winter wheat yields in Kansas and Ukraine, using MODIS data. Remote Sensing of Environment, 114: 1312–1323.
4. Charles, J., Godfray, J., Beddington, J.R., Crute, I.R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J.F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S.M., and Toulmin, C. 2010. Food security: The challenge of feeding 9 billion people. Science, 327: 812–818.
5. Chen, Z.X., Ren, J.Q., Zhou, Q.B., and Tang, H.J. 2008. Regional yield estimation for winter wheat with MODIS-NDVI data in Shandong, China. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 10: 403-413.
6. Doraiswamy, P.C., Moulin, S., Cook, P.W., and Stern, V. 2003. Crop yield assessment from remote sensing. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 69: 665.-674.
7. Gee, G.H., and Bauder, J.W. 1986. Particle size analysis. In: Klute, A. (ed.), Methods of Soil Analysis. Part 2: Physical and Mineralogical Properties, Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI., USA, pp.: 383-409.

8. Hall, M.A. and Smith, L.A. 1998. Practical feature subset selection for machine learning. In: McDonald, C. (ed.), Computer Science '98. Proceedings of the 21st Australasian Computer Science Conference ACSC'98, Perth, 4-6 February, pp.: 181-191.
9. Loeppert, R.H., and Sparks, D.L. 1996. Carbonate and gypsum. In: Sparks, D.L. (ed.), Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical and Microbiological Properties, Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI., USA, pp.:437-474.
10. Maselli, F. and Rembold, F. 2001. Analysis of GAC NDVI data for crop land identification and yield forecasting in Mediterranean African countries. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 67: 593-602.
11. Minasny, B. and McBratney, A.B. 2006. A conditioned latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. Computer and Geosciences, 32: 1378-1388.
12. Nelson, D.W., and Summers, L.E. 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: Sparks, D.L. (ed.), Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical and Microbiological Properties, Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI., USA, pp.:961-1011.
13. Nemes, A., Rawls, W.J., and Pachepsky, Y.A., 2006. Use of the nonparametric nearest neighbor approach to estimate soil hydraulic properties. Soil Science Society of America Journal, 70: 327–336.
14. Norouzi, M., Ayoubi, S., Jalalian A. and Khademi, H. 2010. Predicting rainfed wheat quality and quantity by artificial neural network, using terrain and soil characteristics. Acta Agriculturae Scandinavica Section B–Soil and Plant Science, 60: 341-352.
15. Padilla, F.L., Maas, M., Gonz, S.J., Lez-Dugo, M.P., Mansilla, F., Rajan, N., Gavil, P., and Donguez, J. 2012. Monitoring regional wheat yield in southern Spain, using the GRAMI model and satellite imagery. Field Crops Research, 130: 145–154.
16. Rembold, F., Atzberger, C., Savin, I. and Rojas, O. 2013. Using Low Resolution Satellite Imagery for Yield Prediction and Yield Anomaly Detection. Remote Sensing, 5: 1704-1733.
17. Rhoades, J.D. 1996. Salinity, electrical conductivity and total dissolved solids. In: Sparks, D.L. (ed.), Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical and Microbiological Properties, Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI., USA, pp.:417-437.
18. Shahbazi, F., Jafarzadeh, A.A., Sarmadian, F., Neyshaboury, M.R., Oustan, Sh., Anaya- Romero, M. and Dela Rosa, D. 2009. Suitability of Wheat, Maize, Sugarbeet and Potato, Using MicroLEIS DSS Software in Ahar Area, North-West of Iran. American-Eurasian Journal of Agriculture and Environment Science, 5: 45-52.

19. Soil Survey Staff, 2014. Keys to Soil Taxonomy. 12th Edition, United States Department of Agriculture and Natural Resources Conservation Service, 360p.
20. Sumner, M.E., and Miller, W.P. 1996. Cations exchange capacity and exchange coefficients. In: Sparks, D.L. (ed.), Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical and Microbiological Properties, Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI., USA, pp.:1201-1230.
21. Scull, P. Franklin, J. and Chadwick, O.A. 2005. The application of classification tree analysis to soil type prediction in a desert landscape. *Ecological Modelling*, 181:1-15.
22. Tang, H., Van Ranst, E., and Groenemans, R. 1997. Application of fuzzy set theory to land suitability assessment. *Trends in Soil Science*, 2: 191-203.
23. Thomas, G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. In: Sparks, D.L. (ed.), Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical and Microbiological Properties, Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI., USA, pp.: 475-490.
24. Toscano, P., Ranieri, R., Matese, A., Vaccari, F.P., Gioli, B.A., Zaldeaia, M., Silvestri, C., Ronchi, P., La-Cava, J.R., Porter, A., and Miglietta, F. 2012. Durum wheat modeling: The Delphi system, 11 years of observations in Italy. *European Journal of Agronomy*, 43: 108–118.
25. Tucker, C.J., Holben, B.N., Elgin, J.H., and McMurtrey, J.E. 1981. Remote sensing of total dry-matter accumulation in winter wheat. *Remote Sensing of Environment*, 11: 171–189.
26. Wilding, L.P. and Dress, L.R. 1983. Spatial variability and pedology. In: Wilding, L.P. (ed.), *Pedogenesis and Soil Taxonomy: Concepts and Interactions*. Vol. I., Elsevier scientific publishing, New York, pp.: 83-113.
27. Wall, L., Larocque, D., and Leger, P.M. 2007. The early explanatory power of NDVI in crop yield modeling. *International Journal of Remote Sensing*, 29: 2211-2225.