



انجمن علوم خاک ایران

نشریه علمی



موسسه تحقیقات خاک و آب

پژوهش‌های خاک

[http:// www.srjournal.areeo.ir](http://www.srjournal.areeo.ir)

ISSN: 2228 -7124

الف / جلد ۳۵ / شماره ۴ / سال ۱۴۰۰

صفحه

فهرست

عنوان

۳۳۹..... بررسی تأثیر عوامل خاکی بر رشد برنج در استان های گیلان، مازندران و خوزستان
سیدعلیرضا سیدجلالی، ابوالفضل آزادی، میرناصر نویدی، مهناز اسکندری، علی چراتی آرایبی،
شهرام محمود سلطانی، علی زین الدینی میمند و بهاره دلسوز خاکی

۳۵۳..... بررسی اثر کمپوست بر خصوصیات رشدی و غلظت عناصر غذایی در خیار کارلا
(*Momordica charantia* L.) تحت تنش رطوبتی..... وحید محصلی و فرزاد فریود

۳۶۷..... اثر کود اوره با پوشش پلیمری و اوره معمولی بر کارایی نیتروژن و عملکرد و اجزای عملکرد برنج
صابر حیدری، مجید نیکنژاد، سید محمد علوی سینی و مرتضی اشراقی نژاد

۳۸۱..... برآورد ضریب شکل تابع هدایت هیدرولیکی مدل ون گنوختن - معلم با استفاده از ویژگی های
زود یافت خاک..... مجتبی شیاوسی ارانی، بیژن قهرمان، حجت امامی و کامران داوری

۳۹۷..... کاربرد مدل های یادگیری ماشین در برآورد مکانی فسفر و پتاسیم خاک در بخشی از
راضی دشت آبیک..... سید روح اله موسوی، فریدون سرمیدیان، محمود امید و پاتریک بوگارت

۴۱۳..... ارزیابی سامانه استنتاج فازی - عصبی و توابع انتقالی رگرسیونی در برآورد هدایت آبی اشباع خاک
یاسر حسینی

۴۲۹..... بررسی دمای خاک با استفاده از آزمون ناپارامتری من - کندال اصلاح شده در مناطق انتخابی
استان خوزستان..... حسین زادمهر و احمد فرخیان فیروزی

وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

انجمن علوم خاک ایران

مؤسسه تحقیقات خاک و آب

نشریه علمی
پژوهش‌های خاک

جلد 35 شماره (4)

1400

صاحب امتیاز: مؤسسه تحقیقات خاک و آب

تأییدیه درجه علمی

به استناد نامه شماره 3/11/3760 مورخ 1389/3/16 اعتبار علمی پژوهشی نشریه پژوهش‌های خاک

تمدید شده است

مدیر مسؤول: دکتر هادی اسدی رحمانی
سر دبیر: دکتر حمید سیادت

اعضاء هیأت تحریریه (به ترتیب حروف الفبا):

دکتر محمد بای بوردی	مدرس دانشگاه
دکتر حسین بشارتی	استاد مؤسسه تحقیقات خاک و آب
دکتر محمدرضا بلالی	استادیار مؤسسه تحقیقات خاک و آب
دکتر حسن توفیقی	دانشیار دانشگاه تهران
دکتر غلامحسین حق نیا	استاد دانشگاه فردوسی مشهد
دکتر کاظم خاوازی	استاد مؤسسه تحقیقات خاک و آب
دکتر محمدحسن روزیطلب	دانشیار پژوهش سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی
دکتر امیر فتوت	استاد دانشگاه فردوسی مشهد
دکتر منوچهر گرجی	استاد دانشگاه تهران
دکتر عزیز مؤمنی	دانشیار مؤسسه تحقیقات خاک و آب
دکتر محمدرضا نیشابوری	استاد دانشگاه تبریز

ویراستار انگلیسی: دکتر حمید سیادت
تایپ و صفحه آرایی: کبری علی نژاد
تعداد انتشار در سال: چهار شماره

پایگاه الکترونیکی نشریه پژوهش‌های خاک: www.srjournal.areeo.ir
پایگاه الکترونیکی مؤسسه تحقیقات خاک و آب: www.swri.ir
پایگاه الکترونیکی انجمن علوم خاک ایران: www.soiliran.org
آدرس الکترونیکی دفتر مجله: majalehsoil@yahoo.com
این نشریه در پایگاه‌های علمی زیر نمایه می‌شود: www.isc.gov.ir
پایگاه استنادی علوم جهان اسلام (ISC): www.sid.ir
و همچنین در پایگاه (ISC) از ضریب تأثیر (IF) برخوردار می‌باشد
پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی: www.civilica
پایگاه سیولیکا

آدرس: کرج - میدان استانداری، جاده مشکین دشت، بعد از رزکان نو، بلوار امام خمینی، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، کد پستی: 3177993545
تلفن و نمابر: (026) 36208796
آدرس پایگاه الکترونیکی مجله: www.srjournal.areeo.ir

عنوان	فهرست	صفحه
بررسی تأثیر عوامل خاکی بر رشد برنج در استان های گیلان، مازندران و خوزستان.....	339	سیدعلیرضا سیدجلالی، ابوالفضل آزادی، میرناصر نویدی، مهناز اسکندری، علی چراتی آرای، شهرام محمود سلطانی، علی زین الدینی میمند و بهاره دلسوز خاکی
بررسی اثر کمپوست بر خصوصیات رشدی و غلظت عناصر غذایی در خیار کارلا (<i>Momordica charantia</i> L.) تحت تنش رطوبتی.....	353	وحید محصلی و فرزاد فربود
اثر کود اوره با پوشش پلیمری و اوره معمولی بر کارایی نیتروژن و عملکرد و اجزای عملکرد برنج.....	367	صابر حیدری، مجید نیکنژاد، سید محمد علوی سینی و مرتضی اشراقی نژاد
برآورد ضریب شکل تابع هدایت هیدرولیکی مدل ون گنوختن - معلم با استفاده از ویژگی های زود یافت خاک.....	381	مجتبی شیاپی ارانی، بیژن قهرمان، حجت امامی و کامران داوری
کاربرد مدل های یادگیری ماشین در برآورد مکانی فسفر و پتاسیم خاک در بخشی از راضی دشت آبیک.....	397	سید روح اله موسوی، فریدون سرمدیان، محمود امید و پاتریک بوگارت
ارزیابی سامانه استنتاج فازی - عصبی و توابع انتقالی رگرسیونی در برآورد هدایت آبی اشباع خاک.....	413	یاسر حسینی
بررسی دمای خاک با استفاده از آزمون ناپارامتری من - کندال اصلاح شده در مناطق انتخابی استان خوزستان.....	429	حسین زادمهر و احمد فرخیان فیروزی

راهنمای تهیه مقاله برای انتشار در نشریه علمی پژوهش‌های خاک

نشریه علمی پژوهش‌های خاک به منظور افزایش آگاهی محققان و پژوهشگران علوم خاک و آب، ایجاد زمینه ارتقای سطح دانش و پژوهش، شناخت و معرفی اندیشه‌ها، نوآوری‌ها و خلاقیت‌های علمی - پژوهشی در سطح ملی و بین‌المللی، ایجاد ارتباط بین مراکز آموزشی، علمی - پژوهشی و انتقال و تبادل نتایج یافته‌ها، نتایج حاصل از فعالیتهای تحقیقاتی پژوهشگران در زمینه مسائل مربوط به شناسایی، حفاظت و بهره‌برداری پایدار از منابع خاک و آب در کشاورزی را منتشر می نماید.

الف) اصول کلی

- 1- این نشریه صرفاً مقالات پژوهشی (Original Articles) منتج از پژوهش‌های نویسنده و یا نویسندگان در زمینه علوم خاک و آب را منتشر می نماید.
 - 2- مقاله باید به زبان فارسی روان و پیراسته از غلط‌های نگارشی و نوشتاری باشد. از آوردن واژه‌های بیگانه که معادل شناخته شده فارسی دارند جداً خودداری گردد.
 - 3- مسئولیت صحت و سقم مطالب، نظرات و عقاید مندرج در مقالات به عهده نویسندگان مقاله می‌باشد. حقوق معنوی مقالات برای نویسندگان محفوظ می‌باشد.
 - 4- مقاله نباید در هیچ یک از نشریات کشور به چاپ رسیده یا همزمان برای مجلات دیگر ارسال شده باشد این مسئله باید با تأیید کتبی نویسنده مسئول باشد.
- مقالاتی که مبنی بر آزمایش‌هایی است که بیش از 3 سال از خاتمه اجرای آن گذشته است از شانس کمتری برای پذیرش برخوردار خواهد بود و نویسندگان باید علت تأخیر در نوشتن مقاله را توجیه کنند

ب) نحوه تهیه و ارسال مقاله

نحوه نگارش مقاله

- 1- مقاله حداکثر در 15 صفحه A4 با فاصله خطوط 1/5 و حاشیه‌های 3 سانتی‌متر از هر طرف و به صورت تک ستونی در نرم افزار Word 2007 تایپ شود.
- 2- نوع قلم فارسی و انگلیسی و اندازه آنها مطابق جدول (1) استفاده شود.
- 3- پیش از نقطه (.) و کاما (,) گذاشتن فاصله لازم نیست، لیکن پس از آنها، یک فاصله لازم است.
- 4- اصول نگارش زبان فارسی به طور کامل رعایت شده و از به کار بردن اصطلاحات انگلیسی که معادل فارسی آنها در فرهنگستان زبان فارسی تعریف شده‌اند، حتی الامکان پرهیز گردد.

جدول 1- نوع قلم و اندازه		
موقعیت استفاده	نام قلم	اندازه قلم
عنوان مقاله	Nazanin پر رنگ	14
متن مقاله	Nazanin	12
عناوین بخش‌های مقاله	Nazanin پر رنگ	12
نام مؤلفان	Nazanin پر رنگ	12
کلمه چکیده و کلمات کلیدی	Nazanin پر رنگ	12
عناوین جداول و اشکال	Nazanin پر رنگ	11
متن جداول و شکل‌ها و منابع	Nazanin	11
متن انگلیسی	Times New Roman	یک واحد کمتر از اندازه فارسی در هر موقعیت

نویسنده(گان) موظف هستند حداکثر 15 روز پس از دریافت نظرات داوران اصلاحات لازم و یا پاسخ را ارسال نمایند. ضمناً ارسال چکیده لاتین مقاله به همراه مقاله الزامی است. ارسال نامه درخواست چاپ مقاله در نشریه پژوهش‌های خاک به همراه فرم تعهد نامه الزامی است. کلیه مقالات پس از دریافت اعلام وصول گردیده و جهت ارزیابی برای داوران مجله ارسال خواهد شد و پس از اتخاذ رأی داوران و تأیید هیئت تحریریه، مقاله در نوبت چاپ قرار خواهد گرفت

شناسنامه مقاله

مقالات باید شامل عنوان، چکیده فارسی و انگلیسی (حداکثر تا 300 کلمه)، واژه‌های کلیدی (Keywords)، مقدمه، مواد و روش‌ها، نتایج، بحث و نتیجه‌گیری، تشکر و قدردانی (در صورت نیاز) و فهرست منابع باشد.

برگ شناسه

عنوان مقاله، نام، نام خانوادگی، موقعیت شغلی نگارنده(گان)، نام دانشگاه یا مؤسسه پژوهشی که نگارنده(گان) در آن اشتغال دارند، نشانی کامل نگارنده(گان) و نام و مشخصات نگارنده مسئول مکاتبات (به هر دو زبان فارسی و انگلیسی) و پست الکترونیکی همه نویسندگان در صفحه چکیده ها تایپ و در قسمت فایل‌های با نام نویسنده (گان) بارگذاری نمایید و در قسمت بدون نامه نویسنده(گان) مقاله بدون نام بارگذاری گردد.

* نگارنده مسئول باید فرم تعهدنامه را که با امضای کلیه نگارندگان و الزامی می باشد در قسمت فایل- های پیشنهاد بارگذاری نماید.

عنوان مقاله

عنوان مقاله باید روان، گویا، مختصر و مفید بوده و در برگیرنده محتوای تحقیق انجام شده باشد. عنوان مقاله نباید بیش از 20 کلمه باشد. در زیر عنوان نام و نام خانوادگی نویسندگان، مرتبه علمی و یا تحصیلات و وابستگی سازمانی، تاریخ، آدرس کامل پستی، شماره تلفن همراه و پست الکترونیک نویسندگان مقاله درج گردد.

دقت شود کلمه‌های تشکیل دهنده عنوان با کلمه‌های کلیدی متفاوت باشد.

چکیده: چکیده بایستی شامل حداکثر 300 کلمه بوده و بیانگر زمینه و هدف، تحقیق روش بررسی، یافته‌ها، نتیجه‌گیری و ترجیحاً در یک پارگراف باشد. چکیده انگلیسی باید ترجمه کامل چکیده فارسی باشد

واژه های کلیدی:

واژه های کلیدی بایستی 3-6 کلمه باشد. واژه های کلیدی چکیده انگلیسی نیز بایستی ترجمه دقیق واژه های چکیده فارسی باشد.

در انتخاب واژه‌های کلیدی از تکرار واژه‌هایی که در عنوان مقاله آمده است خودداری فرمایید

مقدمه

باید دربرگیرنده اهمیت پژوهش انجام شده بوده و به بیان مسئله با مروری بر مطالعات و مشاهدات مرتبط با تحقیق که در گذشته انجام شده پرداخته و به منابع معتبری که در انتهای مقاله ذکر شده، استناد شده باشد و در ادامه وجه تمایز نسبت به مطالعات قبلی و لزوم و وجوب آن و در انتها هدف اصلی پژوهش

نگاشته شود. مقالاتی که تکراری بوده و در گذشته به کرات در داخل و خارج از ایران در مورد آن مطالعاتی انجام شده، در صورتی که وجه تمایز قانع کننده‌ای نداشته باشد چاپ نخواهد شد.

مواد و روش‌ها

در این قسمت باید شرح مواد و روش‌های مورد استفاده در تحقیق، جامعه آماری، روش‌های نمونه‌گیری، اندازه‌گیری‌های آزمایشی و نحوه تجزیه و تحلیل آماری آورده شود. در صورتی که از روش‌های متداول قبلی منتشر شده استفاده شده باشد، از شرح آنها خودداری و فقط به ارائه اصول و ذکر مأخذ اکتفا شود.

نتایج

در این بخش نتایج بدست آمده از تحقیق به صورت نوشتار همراه شکل و جدول و بدون بحث بیان گردد. از بکار بردن عنوان‌هایی مانند نمودار، عکس و نقشه خودداری و کلیه آنها با عنوان " شکل " درج شوند. نتایج ارائه شده در جداول یا شکل‌ها نباید به صورت دیگری مانند منحنی و یا متن نوشتاری در مقاله تکرار گردد. هر جدول از شماره، عنوان، سرستون‌ها و متن جدول تشکیل می‌شود. یک جدول باید با خطی افقی از شماره و عنوان جدول متمایز شود. همچنین سر جدول با یک خط افقی از متن جدول جدا و در زیر متن جدول نیز یک خط افقی رسم شود. عنوان جدول در بالای آن جدول درج و پس از کلمه جدول و شماره آن، خط تیره و سپس عنوان ذکر شود. در متن جدول تا جایی که ممکن است نباید از خطوط افقی و عمودی استفاده کرد. هر ستون جدول باید دارای عنوان و واحد مربوط به کمیت آن ستون باشد. اگر همه ارقام جدول دارای یک واحد مشترک باشند، آن واحد در عنوان اصلی جدول ذکر شود. توضیحات اضافی عنوان و متن جدول به صورت زیرنویس ارائه شوند.

در نمودارها از نشانه‌های Δ $\square$ $\bullet$ $\blacktriangle$ به صورت توپر و توخالی استفاده شود. برای درج عنوان هر شکل، پس از کلمه شکل و شماره آن، نقطه و سپس عنوان ذکر شود. فایل Excel مربوط به نمودارها ارسال شود. اختصارات موجود در شکل‌ها و جداول باید در زیرنویس توضیح داده شوند. تمام اعداد متن و توضیحات جداول و شکل‌ها باید به زبان فارسی ارائه گردد. از ارسال نمودارهای رنگی جداً اجتناب نموده و از رنگ‌های سفید، سیاه و هاشورهای کاملاً متفاوت استفاده شود. اندازه فونت توضیحات محورهای نمودارها و اعداد به اندازه کافی بزرگ باشد تا در صورت کوچک کردن نیز خوانا باشد. جداول و نمودارها حتی المقدور در متن مقاله جاسازی شوند.

بحث

یافته‌های جدید و مهم باید با یافته‌های موجود در منابع مقایسه شود و دلایل قبول و رد آنها مورد بحث قرار گیرد. از تکرار یافته‌ها خودداری شود. مروری بر مقالات گذشته در این بخش گنجانده شود. محدودیت‌های مطالعه باید مورد توجه قرار گیرد. راهکارهای جدید و فرضیه‌های جدید پیشنهاد گردد. یافته‌های جدید و یافته‌های پیش بینی شده مقایسه شود. در پایان باید موارد کاربردهای عملی و تئوری نتایج حاصل از تحقیق و نتیجه کلی پژوهش بیان گردد.

تشکر و قدردانی

در این بخش نویسنده (گان) می‌توانند از اشخاص، سازمان‌ها و افراد ذیربطی که در اجرای تحقیق همکاری داشته‌اند، تشکر و قدر دانی نمایند. این قسمت باید کوتاه و در حدود 50 کلمه باشد.

فهرست منابع

شیوه ارجاع در تمام متن مقاله بایستی به صورتی باشد که منبع مورد ارجاع در پایان جمله در داخل پرانتز به فارسی برای منابع انگلیسی و فارسی ارائه شود. برای منابع دارای دو نویسنده، نام هر دو نویسنده و منابعی که بیش از دو نویسنده دارند، نخست نام نفر اول و سپس " همکاران " و تاریخ بیان شود. مثال:

..... نتایج مشابهی توسط برخی پژوهشگران نیز گزارش شده است (کریمی و احمدی ، 1389)

..... نتایج مشابهی توسط سایر محققان گزارش شده است (آلوی و همکاران، 2010)

فهرست منابع مورد استفاده در پایان متن به صورت پیوسته و به ترتیب منابع فارسی و انگلیسی ارائه شوند. منابع مورد استفاده به ترتیب حروف الفبای نام خانوادگی نگارنده، (یا اولین نگارنده برای منابعی که بیش از یک نگارنده دارند) زیر هم آورده شوند، چنانچه از یک نگارنده چندین منبع ذکر شود، ترتیب درج آن‌ها بر حسب سال انتشار، از جدید به قدیم است، اگر از نگارنده‌ای چندین منبع همسال وجود داشته باشد، با گذاشتن حروف a، b و c پس از سال انتشار منابع از یکدیگر متمایز شوند. چنانچه مقالات منفرد و مشترک از یک نگارنده ارائه شود، نخست مقالات منفرد و سپس مقاله‌های مشترک به ترتیب حروف الفبای نام نگارندگان بعدی مرتب شوند.

برای یک مقاله به ترتیب نام خانوادگی نگارنده، حرف اول اسم کوچک نگارنده، تاریخ انتشار، عنوان مقاله عنوان کامل مجله، شماره جلد، و اولین و آخرین صفحه مقاله ارائه شود. برای یک کتاب به ترتیب نام خانوادگی و سپس حرف اول نام کوچک نگارنده، تاریخ انتشار، عنوان کامل کتاب، شماره جلد، نام ناشر، محل انتشار و تعداد کل صفحات ارائه شود. در مورد مقاله یا کتاب‌هایی که بیش از یک نویسنده دارند به ترتیب نام خانوادگی و حرف اول نام اولین نویسنده و سپس اول نام نویسندگان بعدی و پس از آن نام خانوادگی آن‌ها ذکر شود.

در مورد مرجعی که نویسنده آن مشخص نیست به جای نام نگارنده از "Anonymous" برای منابع انگلیسی و (بی نام) برای منابع فارسی استفاده شود.

چنانچه منبع ترجمه شده باشد، در فهرست منابع باید نخست نام نویسنده (گان) کتاب اصلی، عنوان مشخصات آن (به زبان انگلیسی) و سپس نام مترجم (مترجمان) ذکر شود.

مثال‌های برای تنظیم منابع

مقاله از مجله

Brennan, E.W., and W.L. Lindsay. 1998. Reduction and oxidation effect on the solubility and transformation of iron oxides. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62:930-937.

مقاله از کارگاه آموزشی یا علمی

Hanbury, A. 2002. The taming of the hue, saturation and brightness colour Space, 7th Computer Vision Winter Workshop, February 2002, Bad Aussee, Austria.

مطلب از کتاب

Lindsay, W.L. 1979. *Chemical equilibrium in soils*. John Wiley & Sons, New York.

مطلب نقل شده یک نویسنده در یک مجموعه مقالات

Logsdon, S.D., and D.A. Laird. 2003. Ranges of bound water properties associated with a smectite clay. p. 101-108. In *Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substance*. Proc. of Conf., Rotorua, New Zealand. 23-26 Mar. 2003. Industrial Research, Auckland, New Zealand.

ذکر مطلب از نویسنده ای در یک کتاب که نام ویراستاران روی جلد آن است

Olsen, S.R., and L.E. Sommers. 1982. Phosphorus. p. 403-427. In A.L. Page et al. (ed.) *Methods of soil analysis*. Part 2. 2nd ed. Agron. Monogr. No. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.

ذکر مطلب از اینترنت

Soil Survey Staff. 2004. NRCS soils [Online]. Available at <http://soils.usda.gov> [verified 23 Mar. 2005]. USDA-NRCS, Washington, DC.

منابع مورد استفاده در متن بدین صورت نگاشته شوند:

بای بوردی و همکاران (1382) گزارش کردند...

اسمیت (2002) گزارش کرد ...

اسمیت و جونز (2002) گزارش کردند...

اسمیت و همکاران (2002) گزارش کردند...

- در صورت عدم رعایت دقیق مطالب فوق‌الذکر، مقاله پذیرفته نمی‌شود و پیش از بررسی به اطلاع نویسنده مسئول می‌رسد. بدیهی است چنانچه مقاله ارسالی با شرایط ذکر شده تهیه و عودت داده شود مجدداً از زمان برگشت که تاریخ واقعی مقاله منظور می‌شود مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

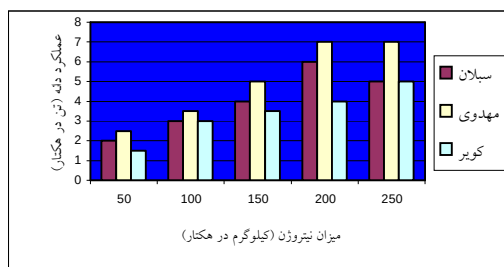
جدول نامناسب

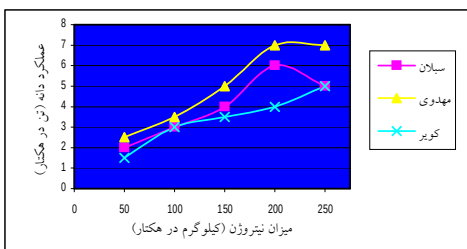
بافت	Mge xch	Kavail .	Pava il	OC (%)	TNV (%)	EC (dS. m- 1)	pH	عمق (cm)
	(Mg.kg-1)							
لومی رسی	300	290	3/6	0/62	28	7/6	8/2	0-30
لومی رسی	305	295	0/6	0/50	30	7/2	8/2	30-60
لومی شنی	286	332	0/5	0/21	33	9/5	7/8	60-90

جدول مناسب

بافت	Mg _{ex}	K _{av}	P _{av}	OC (%)	TNV (%)	EC (dS.m ⁻¹)	pH	عمق (cm)
	(mg.kg ⁻¹)							
لومی رسی	300	290	3/6	0/62	28	7/6	8/3	0-30
لومی رسی	305	295	1/60	0/50	30	7/2	8/2	30-60
لومی شنی	286	232	1/50	0/21	33	9/5	7/8	60-90

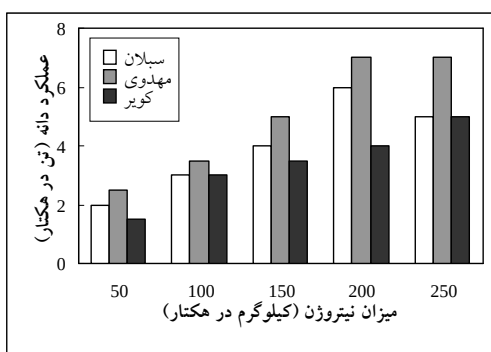
نامناسب



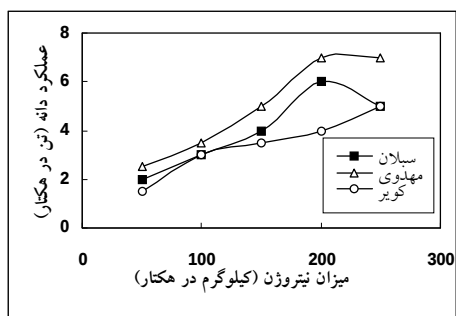


مناسب

نامناسب



مناسب



نشریه پژوهش‌های خاک

فرم تعهد نامه

نشریه پژوهش‌های خاک

اینجانب نویسنده مسئول مقاله زیر:

- سال‌های اجراء آزمایش ذکر شود

موارد زیر را به آگاهی می‌رسانم:

1. کلیه تهیه کنندگان مقاله از ارسال آن به دفتر مجله شما آگاهند
2. مقاله قبلاً در هیچ مجله داخلی و خارجی منتشر نشده است
3. مقاله تا زمان پایان بررسی در آن مجله به مجله دیگری ارسال نخواهد شد.
4. هیچگونه تغییری در تعداد نویسندگان یا ترتیب ذکر اسامی انجام نخواهد شد.

نام خانوادگی نویسنده اول: امضاء نویسنده اول مقاله

نام خانوادگی نویسنده دوم: امضاء نویسنده دوم مقاله

نام خانوادگی نویسنده سوم: امضاء نویسنده سوم مقاله

نام خانوادگی نویسنده چهارم: امضاء نویسنده چهارم مقاله

داوران مقالات واصله به دفتر نشریه پژوهش‌های خاک سه ماه چهارم سال 1400

دکتر ابوالفضل آزادی	1 مقاله	دکتر حیدرعلی کشکولی	1 مقاله
دکتر رامین ایرانی پور	1 مقاله	دکتر احمد گلچین	1 مقاله
دکتر محمد بای بوردی	1 مقاله	دکتر عزیز مومنی	1 مقاله
دکتر علی چراتی	2 مقاله	دکتر محمد حسین مهدیان	3 مقاله
دکتر محمد حاج عباسی	1 مقاله	دکتر عزیز مجیدی	1 مقاله
دکتر یعقوب حسینی	3 مقاله	دکتر فرهاد مشیری	1 مقاله
دکتر هوشنگ خسروی	1 مقاله	دکتر علی مومن پور	1 مقاله
دکتر معصومه دلبری	1 مقاله	دکتر بابک متشرع زاده	1 مقاله
دکتر میثم رضایی	1 مقاله	دکتر محمد حسین محمدی	1 مقاله
دکتر محمدرضا رمضانپور	1 مقاله	دکتر میلاد نوری	1 مقاله
مهندس رقیه رضوی	1 مقاله	دکتر محمدرضا نیشابوری	2 مقاله
دکتر طاهره رئیسی	1 مقاله	دکتر میلاد نوری	1 مقاله
دکتر لیلا رضا خانی	1 مقاله	دکتر نفیسه یغمائیان	1 مقاله
دکتر فریدون سرمدیان	1 مقاله		
دکتر حسین صفاری	1 مقاله		
دکتر امیر فتوت	1 مقاله		
دکتر مراد علی قنبرپوری	1 مقاله		

بررسی تأثیر عوامل خاکی بر رشد برنج در استان‌های گیلان، مازندران و خوزستان

سیدعلیرضا سیدجلالی¹، ابوالفضل آزادی، میرناصر نویدی، مهناز اسکندری، علی چراتی آرای،

شهرام محمود سلطانی، علی زین‌الدینی میمند و بهاره دلسوز خاکی

استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران؛ ajalali@areeo.ac.ir

استادیار پژوهش، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران؛

a.azadi@areeo.ac.ir

استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران؛ nnavidi@swri.ir

استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران؛

mahnazskandari@yahoo.com

استادیار پژوهش، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران؛

acherati@yahoo.com

استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات برنج، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران؛ shmsoltani@gmail.com

استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران؛ ali_zeinadin@yahoo.com

محقق، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران؛ b_delsouz@yahoo.com

دریافت: 1400/7/21 و 1400/9/29

چکیده

تأمین مقدار مورد نیاز برنج در کشور به‌عنوان یک محصول راهبردی، دارای اهمیت بسیاری است. هدف از انجام این پژوهش، بررسی تأثیر ویژگی‌های خاک بر عملکرد برنج و درجه‌بندی آن‌ها برای ارائه جدول نیازهای رویشی این گیاه در مطالعات ارزیابی تناسب اراضی بود. بدین منظور، 99 مزرعه برنج در استان‌های مازندران، گیلان و خوزستان، انتخاب شد. یک خاک‌رخ در هر مزرعه، مطالعه و پرسش‌نامه کاربری اراضی تکمیل گردید. پس از انجام تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی لازم، رگرسیون چندمتغیره به روش هم‌زمان میان عملکرد و ویژگی‌های مختلف خاک، بررسی شد. سپس به منظور تهیه جدول نیازهای رویشی برنج، روابط رگرسیون ساده بین ویژگی‌های مؤثر خاک و عملکرد، بررسی و برای کلاس‌های مختلف تناسب اراضی، درجه‌بندی شد. راستی آزمایی جدول پیشنهادی با استفاده از داده‌های 18 مزرعه برنج (حدود 18% از داده‌ها) انجام شد. نتایج نشان داد که دامنه تغییرات عملکرد، آهک، شن، رس و سیلت در مزارع انتخابی زیاد است. لیکن درصد سدیم قابل تبادل و مقدار شوری خاک، در دامنه‌ی پراکنش محدودتری قرار داشتند. در رگرسیون چند متغیره نیز به ترتیب متغیرهای شوری، درصد سدیم قابل تبادل، آهک، واکنش خاک، درصد رس و شن در رابطه کارایی داشتند. ضریب تبیین رابطه پیشنهادی، حدود 0/38 بدست آمد. همچنین مقدار ضریب تبیین بین عملکرد و شاخص خاک برای داده‌های راستی‌آزمایی، حدود 0/71 بود که نشان‌دهنده قابل اعتماد بودن جدول پیشنهاد شده در این پژوهش است.

واژه‌های کلیدی: تناسب اراضی، عملکرد برنج، شاخص خاک

¹ نویسنده مسئول، آدرس: کرج، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، بخش تحقیقات ارزیابی اراضی

مقدمه

گیاه برنج (*Oryza Sativa* L.) در بسیاری از نقاط جهان به‌ویژه در آسیا، آمریکای لاتین و آفریقا رشد می‌کند و برای بیش از 50 درصد از مردم جهان به‌ویژه در مناطق برنج‌خیز، به عنوان غذای اصلی استفاده می‌شود (لو و همکاران 2012). تقریباً 90 درصد برنج در آسیا کشت و مصرف می‌شود که از این میان چین و هند بیشترین مقدار تولید را به خود اختصاص داده‌اند (FAOSTAT, 2019). این محصول پس از گندم پرمصرف‌ترین محصول زراعی کشور محسوب شده و از تولیدات راهبردی بخش کشاورزی به‌شمار می‌رود (باغستانی و همکاران، 1399). در حال حاضر گیلان و مازندران مهم‌ترین مناطق کشت برنج در ایران هستند که 80 الی 82 درصد از تولید برنج در داخل کشور را به عهده دارند. افزایش تولید برنج اهمیت بسیار بالایی در اقتصاد ایران نیز دارد (ناصرزاده و همکاران، 1399). بنابراین باید در سطح کشور، اراضی با پتانسیل تولید مناسب برای کشت برنج مشخص و اولویت‌بندی شوند.

این مهم با انجام مطالعات ارزیابی تناسب اراضی و بررسی ویژگی‌ها و کیفیت خاک و اقلیم میسر می‌شود. در مطالعات طبقه‌بندی تناسب اراضی، از چارچوب فائو استفاده می‌شود که در آن، تناسب اراضی با رده مناسب (S) یا نامناسب (N) مشخص می‌شوند. تفکیک این دو رده براساس سود حاصل از استفاده پایدار از اراضی است. به این مفهوم که در اراضی مناسب برای یک نوع بهره‌برداری، همه هزینه‌های استفاده از آن بدون اثر مخرب بر محیط، توجیه شده و سود نیز عاید می‌شود. رده مناسب شامل سه کلاس S₁، S₂ و S₃ و رده نامناسب شامل دو کلاس N₁ و N₂ است (سایس و همکاران، 1991).

لازمه انجام مطالعات ارزیابی تناسب اراضی به روش فائو (1976)، تهیه جدول نیازهای رویشی (خاک، زمین‌نما و اقلیم) در سطح ملی است. به عنوان نمونه، سایس و همکاران در سال 1991، جداول نیازهای رویشی

را برای دامنه وسیعی از گیاهان که در مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری کشت می‌شوند، به صورت کلی و ناحیه‌ای ارائه نمودند. بنابراین چندان قابل تعمیم به سایر مناطق نیست. در ایران نیز در راستای تصحیح یا تهیه جداول نیازهای رویشی گیاهان باغبانی و زراعی مهم، تاکنون پژوهش‌های متعددی انجام شده است. در راستای تصحیح جداول مذکور و بومی‌سازی آن‌ها، گیوی (1376)، دستورالعمل ارزیابی کیفی تناسب اراضی برای نباتات زراعی و باغی ایران را تحت عنوان نشریه فنی 1015 موسسه تحقیقات خاک و آب تهیه کرد. در این نشریه، نیازهای رویشی برخی گیاهان مهم کشور از نظر شرایط اقلیم و خصوصیات خاک و اراضی، به روز رسانی شده است. بیشتر تغییرات جداول، برپایه مرور تحقیقات گذشته و گردآوری کتابخانه‌ای بوده است.

سیدجلالی و همکاران (2007a) نیز به تصحیح درجه‌بندی آهک در جدول نیازهای رویشی گندم پرداختند. در این پژوهش، 92 نمونه خاک از استان‌های خوزستان، اصفهان و فارس تهیه و رگرسیون خطی بین آهک و عملکرد گندم، برقرار شد. پس از استخراج بهترین رابطه رگرسیونی میان این دو متغیر، درجه‌بندی کلاس‌های تناسب انجام گردید. پژوهش مشابه دیگری توسط سیدجلالی و همکاران (2007b) به‌منظور بررسی اثر گچ بر عملکرد گندم، انجام شده است. در این پژوهش، 61 مزرعه در استان‌های فارس، اصفهان و کرمان، انتخاب و مقدار عملکرد گندم در این مزارع، با مقدار درصد گچ مقایسه شد. نتایج این پژوهش نیز نشان داد که مقدار گچ بین صفر تا پنج درصد، اراضی را در کلاس S₁، گچ 15-5 درصد در کلاس S₂، بین 15-35 درصد در کلاس S₃ و بیش از 35 درصد، اراضی را در کلاس N قرار می‌دهد. به منظور تعیین الگوی کشت در ایران، مطالعات تناسب اراضی برای بسیاری از گیاهان زراعی و باغبانی کشور انجام شد (نوییدی، 1398). برای این منظور به جداول نیازهای رویشی محصولات زراعی و باغی مهم

کشور نیاز بود. این جداول بر پایه منابع موجود، تحقیقات انجام شده در داخل و خارج از کشور و تطبیق آن‌ها با واقعیت زمینی توسط زین‌الدینی و همکاران (1398) و سیدجلالی و همکاران (1398) تهیه شد. همچنین، پژوهش‌های متعددی در راستای کاستن از خلأ موجود در زمینه جداول نیازهای رویشی برای کشت برخی محصولات زراعی و باغی از نظر ویژگی‌های خاک و زمین‌نما، انجام شد. به عنوان نمونه سیدجلالی و همکاران (1400) پژوهشی برای تهیه جدول نیازهای رویشی پنبه از نظر خاک و زمین‌نما، انجام دادند. بدین منظور، از 123 مزرعه پنبه در استان‌های قم، خراسان رضوی، گلستان و فارس، نمونه‌های خاک جمع‌آوری و مورد آزمایش قرار گرفت. مقدار عملکرد پنبه در هر نمونه با ویژگی‌های مؤثر خاک به کمک روابط رگرسیون ساده بررسی و برای کلاس‌های مختلف تناسب اراضی، درجه‌بندی شد. نتایج راستی‌آزمایی جدول پیشنهادی نشان داد که ضریب تبیین شاخص خاک و مقدار عملکرد، 0/78 است که نشان‌دهنده قابل اعتماد بودن جدول پیشنهادی است. پژوهش‌های مشابهی برای تهیه جداول نیازهای رویشی برای نیشکر (سیدجلالی و همکاران، 1398)، خرما (زین‌الدینی و همکاران، 1399)، پسته (زین‌الدینی و همکاران، 1399)، پرتقال (زین‌الدینی و همکاران، 1400)، زعفران (زین‌الدینی و همکاران، 1400) و انجیر (زین‌الدینی و همکاران، 1400) از نظر ویژگی‌های خاک و زمین‌نما، انجام شده است.

شوری خاک نیز یکی از محدودیت‌های عمده در تولید برنج است که در سراسر جهان به ویژه در مناطق ساحلی، کشت این گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. شور شدن خاک به دلیل طغیان جزر و مدی همراه با افزایش سطح دریا تهدیدی جدی برای تولید برنج در مناطق ساحلی کشت برنج است (مانتری و همکاران، 2012؛ هوک و همکاران، 2015؛ شریواستاوا و همکاران، 2015). شوری خاک در هدایت الکتریکی چهار دسی‌زیمنس بر متر می‌تواند عملکرد برنج را تا 15/5 درصد کاهش دهد

(داسگوپتا و همکاران، 2014) و با رسیدن شوری به 7/4 دسی‌زیمنس بر متر، مقدار افت عملکرد به 50% افزایش می‌یابد (گراتان و همکاران، 2002). همچنین باید یادآوری کرد که شوری آستانه کاهش عملکرد برای برخی از رقم‌های برنج که در مناطق شمالی کشور کشت می‌شوند، بسیار کمتر از این مقدار است (محمود سلطانی و همکاران، 1400).

هدف از انجام این پژوهش، تهیه جدول نیازهای رویشی کشت برنج از نظر ویژگی‌های خاک و زمین‌نما، به عنوان یکی از محصولات راهبردی در مناطق مهم تحت کشت این محصول در ایران بود. این جدول که در مطالعات ارزیابی تناسب اراضی کاربرد دارد می‌تواند راهنمایی کارگشا برای تعیین دقیق‌تر تناسب اراضی شالیزاری کشور باشد.

مواد و روش‌ها

نحوه انتخاب مزارع و نمونه‌برداری

به منظور دستیابی به هدف پژوهش، تلاش شد که از بین شالیزارهایی که از داده‌های خاک، اقلیم و عملکرد آن‌ها جمع‌آوری شده بود، شالیزارهای دارای مدیریت زراعی تقریباً مشابه و در سطح متوسط برای بررسی نهایی انتخاب شود. مزارع انتخابی از نظر عملکرد بسیار متنوع و طیف وسیعی از خاک‌ها را شامل می‌شدند. روش آبیاری در مزارع، یکسان و به صورت غرقابی بود. با در نظر گرفتن کلیه این شرایط، تعداد 99 مزرعه برنج در استان‌های گیلان، مازندران و خوزستان، انتخاب شدند. شکل‌های 1 و 2 نقاط مطالعاتی در استان گیلان، شکل 3 در استان مازندران و شکل 4، استان خوزستان را نشان می‌دهد. نقاط مطالعاتی به نحوی انتخاب شدند که اثر سایر عوامل مانند مدیریت و دسترسی به آب مناسب، تا حد ممکن برای تمام مزارع، تقریباً مشابه باشد. همچنین اقلیم مناطق انتخابی برای کشت برنج، فاقد محدودیت بود. بدین ترتیب می‌توان اثر ویژگی‌های خاک را بر عملکرد برنج، تجزیه و تحلیل آماری و پس از آن، درجه‌بندی نمود. خاک‌رخ‌های انتخابی براساس راهنمای

تشریح و نمونه برداری خاک سرویس حفاظت خاک آمریکا (وزارت کشاورزی ایالات متحده آمریکا، 2012) تشریح و از هر افق نمونه برداری خاک انجام و به آزمایشگاه منتقل گردید. نمونه های خاک برداشت شده بر پایه روش های استاندارد، تجزیه شدند. بافت خاک به روش هیدرومتر، واکنش خاک در گل اشباع با pH متر، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع توسط EC متر، کربن آلی به روش اکسایش تر، آهک (CCE) به روش خنثی سازی با اسید کلریدریک و تیترا با سود، گچ به روش استون، سدیم قابل تبادل به روش استات آمونیم یک نرمال در pH=7، ظرفیت تبادل کاتیونی با روش باور، اندازه گیری شدند (پانسو و گائیرو، 2006).

برای هر مزرعه، پرسشنامه مخصوص کاربری اراضی تهیه شد. در این پرسشنامه، اطلاعاتی همچون موقعیت جغرافیایی، مقدار عملکرد، دور آبیاری، هزینه های متغیر و ثابت در یک سال زراعی (شخم اول و دوم، عملیات گلخراشی، کوددهی، سم پاشی، آبیاری، برداشت محصول، هزینه کارگری و سایر اطلاعات لازم) ثبت شدند. روند تکمیل اطلاعات در این پژوهش در سه سال متوالی از 1396 الی 1398، انجام شد. اطلاعات مختلفی همچون مقدار عملکرد شلتوک برای هر مزرعه مطالعاتی، بر پایه متوسط مقدار گزارش شده طی سال های اشاره شده در بالا که توسط محققان مربوطه در مؤسسات و مراکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان های مورد مطالعه گزارش شده، جمع آوری گردید. آمار و اطلاعات جمع آوری شده برای هر مزرعه با داده های ثبت شده در سازمان جهاد کشاورزی استان مربوطه نیز راستی آزمایی شد.

درجه بندی خصوصیات اراضی و تهیه جدول نیاز رویی

در راستای مطالعه اثرات ویژگی های مختلف خاک بر عملکرد شلتوک برنج و بررسی اثر آنها بر یکدیگر، از تجزیه و تحلیل آماری و روابط رگرسیونی خطی چندمتغیره و ساده استفاده شد. نخست میانگین برخی متغیرها مانند شوری، درصد رس، شن، سیلت، گچ و آهک در هر نمونه خاک، با استفاده از ضرایب وزنی و

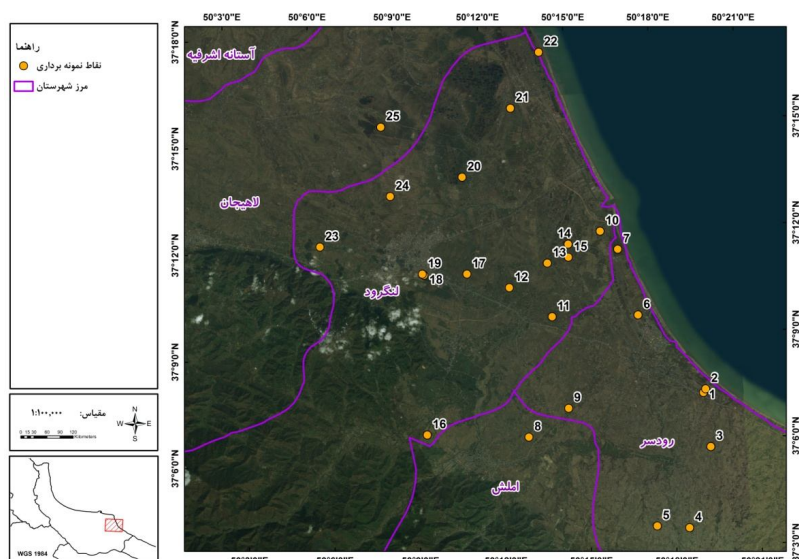
شاخص تصحیح عمق به روش سایش و همکاران (1991) تعیین گردید تا مقدار عددی هر صفت برای کل خاک رخ به دست آید. سپس، پایگاه داده ها برای هر خاک-رخ که شامل ویژگی های فیزیکی و شیمیایی (مقدار کربن آلی، شوری، واکنش خاک، رس، شن، سیلت، آهک، درصد سنگریزه حجمی، فسفر و پتاسیم قابل جذب و درصد سدیم قابل تبادل) به عنوان متغیرهای مستقل و عملکرد به عنوان متغیر وابسته باشند، تشکیل شد. به منظور پردازش داده های خاک، شاخص های آماری ویژگی های خاک بررسی شدند. سپس، آزمون نرمال بودن توزیع داده ها (آزمون کولموگروف اسمیرنوف) انجام شد. برای مشخص شدن مقدار و نوع ارتباط عملکرد شلتوک با ویژگی های خاک، از ضریب همبستگی و رگرسیون چندمتغیره استفاده شد. تجزیه و تحلیل ها با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه 24 انجام گرفت.

به منظور درجه بندی ویژگی های خاک برای تهیه جدول نیازهای رویی برنج، از روابط رگرسیونی ساده میان هر متغیر و عملکرد شلتوک استفاده شد. مناسب ترین روابط با توجه به بالاترین ضریب همبستگی، انتخاب گردید. مبنای درجه بندی ویژگی های خاک، راهنمای ارزیابی اراضی برای نباتات خاص فائو (1976) و روش پیشنهادی سایش و همکاران (1991) بود. بنابراین، مرز کلاس های مختلف تناسب اراضی در جدول پیشنهادی، مطابق با جداول سایش و همکاران (1991) تعیین شد. پس از مشخص شدن ویژگی های مهم و مؤثر اراضی بر عملکرد شلتوک برنج، بهترین معادله رگرسیونی ساده بین عملکرد شلتوک و هر یک از ویژگی های خاک به صورت مجزا بدست آمد. بر روی محور عملکرد شلتوک، نقاط 80، 40 و 20 درصد حداکثر عملکرد شلتوک مشخص و به منحنی متصل شد. از محل تلاقی نقاط عمود شده به منحنی به محور پارامتر مورد نظر (محور x) (مانند شوری خاک، ESP و ...)، مقادیر آستانه کلاس های تناسب مشخص شد. محل تلاقی خط از منحنی به محور ویژگی از عملکرد شلتوک 80 درصد (معادل درجه بندی 85 به

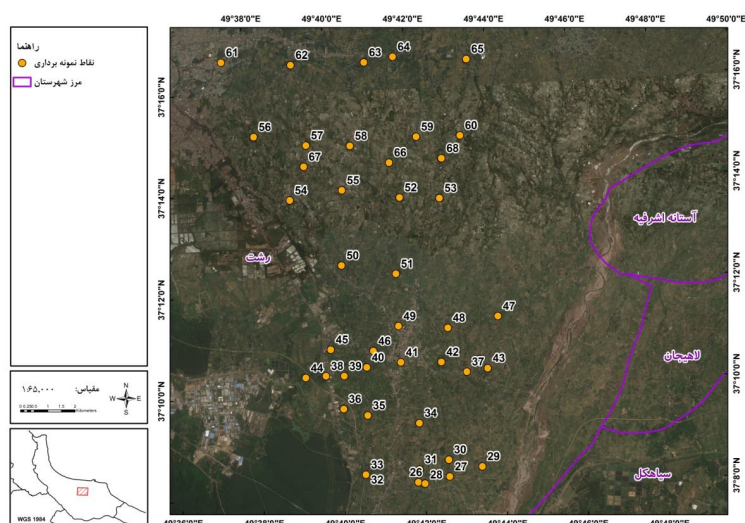
منابع معتبر، بررسی‌های میدانی، مطالعات صحرایی و بررسی دقیق کارت‌های تشریح خاک‌رخ، انجام شد (سیدجلالی و همکاران، 1398). دلیل این امر، کم بودن دامنه تغییرات آن ویژگی‌ها و تغییرپذیری آن‌ها در خاک‌های مورد مطالعه بود. بدین ترتیب، جدول نیازهای رویشی خاک و زمین نما برای برنج در مناطق مورد مطالعه استخراج شد که می‌تواند در محاسبات ارزیابی تناسب اراضی برای کشت این محصول مورد استفاده قرار گیرد.

روش پارامتریک) نشان‌دهنده مقدار پارامتر مربوط به مرز S_1 و S_2 ، از عملکرد شلتوک 40 درصد (معادل درجه‌بندی 60) نشان‌دهنده مرز S_2 و S_3 و از عملکرد شلتوک 20 درصد (عملکرد سر به سر) (معادل درجه‌بندی 40) نشان‌دهنده مرز S_3 و N بود.

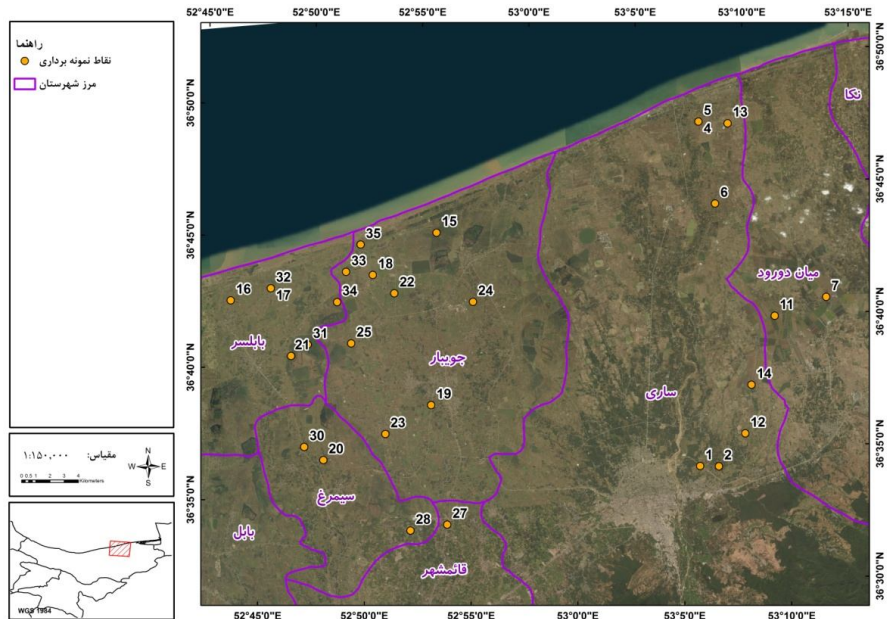
برای تعیین حدود مربوط به مرز کلاس‌ها در مورد ویژگی‌هایی از اراضی که با بررسی آماری امکان درجه‌بندی آن‌ها وجود نداشت، همچنین در مورد پارامترهایی مانند سیل‌گیر بودن اراضی و عمق خاک، درجه‌بندی براساس مقادیر بهینه آن‌ها برای برنج بر پایه



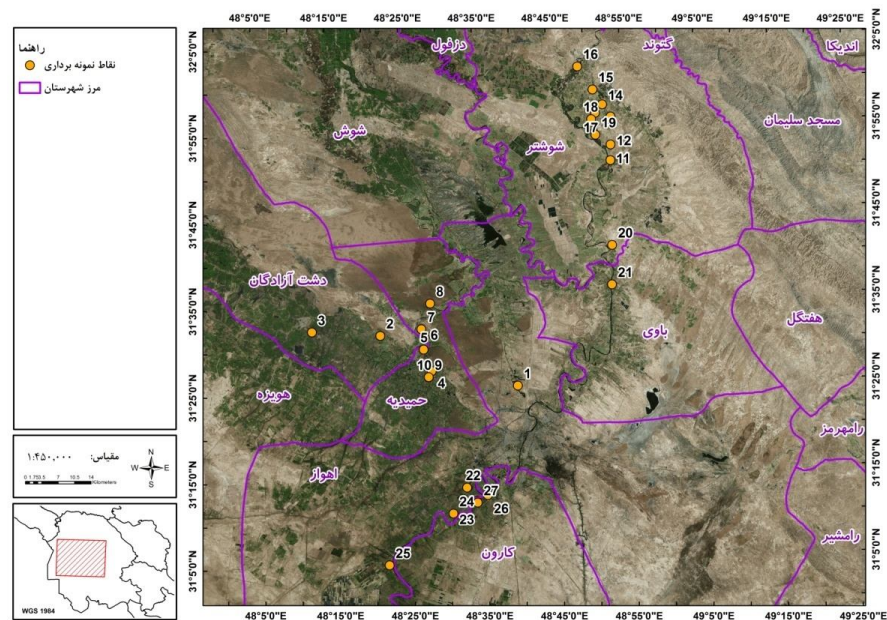
شکل 1- موقعیت نقاط نمونه‌برداری در استان گیلان (شرق گیلان)



شکل 2- موقعیت نقاط نمونه‌برداری در استان گیلان (گیلان مرکزی)



شکل 3- موقعیت نقاط نمونه برداری در استان مازندران



شکل 4- موقعیت نقاط نمونه برداری در استان خوزستان

استفاده قرار گرفت. استخراج و طبقه بندی تناسب اراضی برای صحت سنجی، به روش پارامتریک ریشه دوم انجام شد (سایس و همکاران، 1991). عملکردهای واقعی با شاخص خاک، مقایسه و رابطه رگرسیون ساده میان آنها بررسی و تجزیه و تحلیل شد.

راستی آزمایی جدول پیشنهاد شده برای کشت برنج، به کمک داده های موجود از 18 خاکرخ جدید انجام شد که در تهیه جدول به کار گرفته نشده بودند. به عبارت دیگر، حدود 82 درصد از داده های اولیه برای تهیه جدول و 18 درصد برای صحت سنجی جدول پیشنهادی مورد

نتایج و بحث

آمار توصیفی

نتایج آمار توصیفی (میانگین‌های محاسبه شده) ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در شالیزارهای انتخابی برنج کشور در جدول 1 ارائه شده است. همانطور که این جدول نشان می‌دهد، دامنه تغییرات برای متغیرهای عملکرد، آهک، واکنش خاک، کربن آلی و اجزای تشکیل‌دهنده بافت خاک، بسیار زیاد بوده که نشانگر تنوع زیاد خاک‌های مورد مطالعه است. مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین آهک در نمونه خاک‌ها به ترتیب 0، 62/91 و 25/35 درصد می‌باشند. نگاهی به داده‌های هر استان به تفکیک نشان داد که میانگین آهک در سه استان خوزستان، مازندران و گیلان به ترتیب برابر با حدود 48، 18 و 5 درصد بود. در مزارع نمونه‌برداری شده در این پژوهش، گچ در خاک‌های مشاهده و گزارش نشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد شوری خاک از 0/34 تا 11/52 دسی‌زیمنس بر متر متغیر است. مقدار میانگین این خصوصیت در اراضی مورد بررسی 1/95 دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد. دامنه تغییرات این ویژگی نسبت به سایر خصوصیات اراضی چندان چشمگیر نبوده و به مقدار 11/18 بدست آمد. مقدار میانگین شوری در مزارع نمونه از استان خوزستان، حداقل به اندازه دو دسی‌زیمنس بر متر از مزارع استان‌های گیلان و مازندران بیشتر بود. مقدار میانگین، حداقل و حداکثر مقدار درصد سدیم قابل تبادل در خاک‌های مطالعه شده، به ترتیب 1/4، 0 و 20/40 درصد بود. مقدار میانگین درصد سدیم قابل تبادل در استان خوزستان برابر با 4 درصد و در دو استان دیگر معادل با صفر بود.

بررسی نتایج نشان می‌دهد که میانگین درصد شن در مزارع انتخابی برنج حدود 28 درصد و حداقل و حداکثر آن 0/82 و 84 درصد می‌باشد. نکته قابل توجه این است که بافت غالب مزارع برنج در استان خوزستان، متوسط و بافت‌های سنگین‌تر بیشتر در مناطقی از استان گیلان و مازندران قرار داشت. مقدار رس در نمونه‌های بررسی

شده متغیر بوده و از 4/8 تا 62/6 درصد تغییر می‌کند. بیشترین مقدار متوسط رس در خاک‌های اراضی شالیزاری استان گیلان مشاهده شد.

واکنش خاک در اراضی بررسی شده از 4/7 تا 8/3 متغیر و میانگین آن، 7/4 گزارش شده است. حداقل و حداکثر مقدار واکنش خاک به ترتیب در استان‌های گیلان و مازندران مشاهده شد. شاخص‌های آماری برای بررسی انحراف داده‌ها از توزیع نرمال یعنی چولگی و کشیدگی نیز در جدول 1 نشان داده شده است. بیشترین مقدار چولگی و کشیدگی مربوط به کربن آلی، شوری، درصد سدیم قابل تبادل و عمق خاک بود. به دلیل مقادیر بالای ماده آلی در برخی نقاط استان‌های گیلان و مازندران و مقدار بالای شوری در برخی مناطق استان خوزستان، افزایش چولگی و کشیدگی در این متغیرها کاملاً طبیعی است. توجه به این مسأله نیز ضروری است که به رغم وضعیت چولگی و کشیدگی متغیرها که در جدول 1 نشان داده شده، توزیع این متغیرها در طبیعت نرمال بوده و ممانعتی برای استفاده از آمار پارامتری وجود ندارد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود به دلیل جمع‌آوری داده‌ها از مناطق مختلف با عملکردهای کاملاً متفاوت، دامنه تغییرات و واریانس در متغیر عملکرد شلتوک برنج، زیاد است. از طرفی ضریب تغییرات در جدول 1 نشان می‌دهد بیشترین ضریب تغییرات که نشان‌دهنده پراکندگی داده‌های متغیر است به ترتیب مربوط به درصد سدیم قابل تبادل، کربن آلی، شوری خاک و آهک و کمترین به ترتیب مربوط به واکنش خاک، عمق خاک، عملکرد شلتوک، درصد سیلت، درصد رس و درصد شن است. برپایه حدود پیشنهادی ویلندینگ و درس (1983)، ویژگی‌ها با ضریب تغییرات کمتر از 15٪، تغییرپذیری کمی دارند. ضریب تغییرات بین 15 تا 35 درصد، نشان‌دهنده تغییرپذیری متوسط و بیش از 35 درصد، نشان‌دهنده تغییرپذیری زیاد متغیر مورد بررسی است (شکوری

کتیگری و همکاران، 1398). همانطور که مشخص است تغییرات زیادی برخوردار هستند. بیشتر ویژگی‌های مورد بررسی در این پژوهش، از

جدول 1- آماره‌های توصیفی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه خاک‌های جمع‌آوری شده از مزارع همراه با عملکرد برنج

شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	عمق (cm)	ESP	شوری (دسی زیمنس بر متر)	کربن آلی (%)	واکنش خاک	آهک (%)	عملکرد شلتوک (kg.ha ⁻¹)	
28/10	39/15	32/74	143/40	1/42	1/95	1/79	7/39	25/35	4633	میانگین
24/10	39/65	32/75	150/00	0/000	1/40	1/24	7/59	19/19	4500	میانه
16/87	10/08	13/59	15/06	4/048	1/83	2/63	0/62	18/66	740	انحراف معیار
284/61	101/64	184/80	226/77	16/38	3/37	6/90	0/39	348/30	547100	واریانس
1/11	-0/004	-0/08	-2/38	3/20	2/75	4/99	-2/08	0/42	-0/24	چولگی
1/16	1/40	-0/61	8/84	10/12	9/96	27/37	5/61	-1/17	-0/47	کشیدگی
83/55	58/03	57/77	105/00	20/40	11/18	17/31	3/57	62/91	3100	دامنه
0/82	10/80	4/83	65/00	0/00	0/34	0/11	4/73	0/00	2900	حداقل
84/37	68/82	62/60	170/00	20/40	11/52	17/42	8/30	62/91	6000	حداکثر
										درصد ضریب
60/03	25/75	41/52	10/50	284/07	94/28	146/53	8/41	73/61	16	تغییرات

رگرسیون

به متغیر وابسته را تعیین نمایند. با توجه به این که value کمتر از 0/01 است، بنابراین با اطمینان 99 درصد می‌توان گفت که رابطه 1 در این سطح معنی‌دار است و تجزیه واریانس و ایجاد معادله با دقت قابل قبول انجام شده است. جدول 3، تجزیه واریانس رابطه رگرسیون خطی چندمتغیره بین عملکرد شلتوک و متغیرهای مستقل را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه مقدار F بدست آمده (7/4) در سطح احتمال یک درصد از مقدار ارزش P F جدول (معادل با 2/79)، بیشتر است بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با اطمینان 99 درصد بین متغیرهای مستقل یعنی ویژگی‌های خاک و عملکرد شلتوک برنج، رابطه معناداری وجود دارد

نتایج ورود متغیرهای شوری، درصد سدیم تبدیلی، واکنش خاک، مقدار رس، شن و آهک، به‌عنوان متغیر مستقل و عملکرد شلتوک به‌عنوان متغیر وابسته در رگرسیون خطی چندمتغیره به روش توأم (همزمان)¹ در رابطه 1 ارائه شده است. متغیرهای وارد شده در مدل به - دلیل اینکه بیشترین همبستگی با عملکرد شلتوک را نشان دادند، بیشترین کارایی را داشتند.

(1)

$$Y = -7.98EC - 52.66ESP - 3.82CCE - 30.05pH + 27.63clay + 0.85 sand + 4113.93 \quad R^2 = 0.38$$

ضریب همبستگی پیرسون بین متغیرهای مستقل خاکی و عملکرد شلتوک برنج در مزارع نمونه، در جدول 2 ارائه شده است. معادله مذکور دارای ضریب تبیین (R^2) حدود 0/38 (ضریب تبیین تعدیل یافته برابر با 0/32) می‌باشد. مفهوم آن این است که متغیرهای وارد شده به مدل توانسته‌اند حدود 38 درصد از واریانس تغییرات مربوط

¹ Enter

جدول 2- نتایج همبستگی پیرسون بین متغیرهای مستقل خاکی و عملکرد شلتوک برنج*

شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	ESP (%)	شوری (dS/m)	کربن آلی (%)	واکنش خاک	آهک (%)	عملکرد شلتوک (kg.ha ⁻¹)
1								عملکرد شلتوک (kg.ha ⁻¹)
							1	-0/271*
						1	-0/025	-0/005
					1	-0/383**	-0/384**	0/144
				1	-0/117	-0/210	0/356**	-0/298**
								شوری (dS/m)
			1	0/882**	-0/159	-0/143	0/339**	-0/327**
								ESP (%)
		1	0/015	0/008	0/205	-0/057	-0/142	0/503**
								رس (%)
	1	-0/007	-0/042	-0/066	0/049	-0/084	0/072	-0/006
								سیلت (%)
1	-0/592**	-0/802**	0/013	0/033	-0/195	0/096	0/072	-0/401**
								شن (%)

* همبستگی در سطح 0/05 معنادار است.

** همبستگی در سطح 0/01 معنادار است.

جدول 3- تجزیه واریانس رابطه رگرسیون خطی چندمتغیره بین عملکرد شلتوک برنج و ویژگی‌های خاک*

مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	Sig.
رگرسیون	16357967/70	6	2726327/95	7/36	*0/00
باقیمانده‌ها	27412032/30	74	370432/87		
جمع	43770000/00	80			

* اطلاعات ارائه شده مربوط به رابطه 1 است.

عملکرد شلتوک برنج، تحت تأثیر شوری خاک است و مابقی تغییرات مربوط به سایر عوامل می‌باشد. بهترین رابطه پیشنهادی برای مقدار عملکرد شلتوک و درصد سدیم قابل تبادل خاک، به صورت تابع نمایی با ضریب تبیین حدود 0/56 بدست آمد. بنابراین با اطمینان 99 درصد، 56 درصد از تغییرات عملکرد شلتوک برنج می‌تواند تحت تأثیر مقدار درصد سدیم قابل تبادل خاک باشد. همچنین، ضعیف‌ترین رابطه، میان مقدار عملکرد شلتوک و درصد کربن آلی خاک، به صورت تابع درجه سوم بدست آمد که مقدار ضریب تبیین آن برابر 0/15 بود.

همانطور که ذکر شد روابط رگرسیونی تک متغیره برای همه ویژگی‌های مورد بررسی با عملکرد شلتوک و کاربرد تمام معادلات ممکن (خطی، لگاریتمی، نمایی، درجه دوم، توانی و سایر معادلات)، استخراج شد. بهترین روابط با بیشترین مقدار ضریب تبیین برای هر یک از پارامترها، در جدول 4 ارائه شده است. به عنوان مثال رابطه پیشنهادی برای مقدار عملکرد شلتوک برنج و مقدار شوری خاک، به صورت تابع درجه سوم بدست آمد که مقدار ضریب تبیین آن برابر 0/49 است. بنابراین می‌توان با اطمینان 99 درصد بیان کرد که 49 درصد از تغییرات

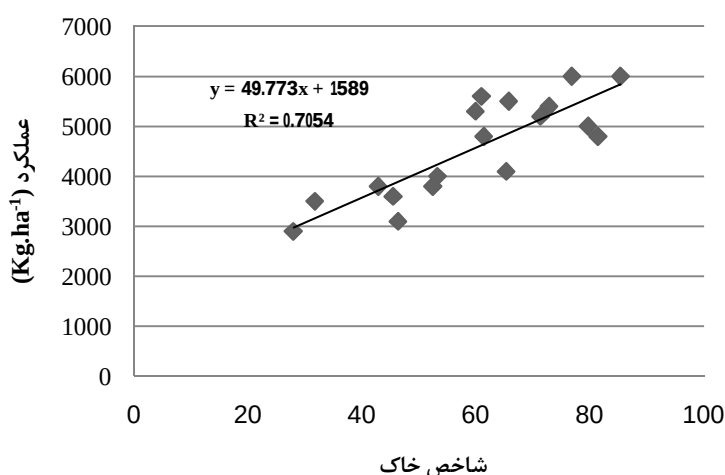
جدول 5- نیازهای خاکی و زمین نما برای کشت برنج در شرایط غرقابی*

کلاس، درجه محدودیت و مقیاس درجه بندی							خصوصیات اراضی
N2	N1	S3	S2	S1			
4		3	2	1	0		
0	25	40	60	85	95	100	
							توپوگرافی (t)
4<		4-2	2-1	1>			شیب (%)
							خیسی خاک (w)
			F4	F1-F2-F3	F0		سیل گیری
-	-	very poor	poor and drainable good	moderate	Imperf		زهکشی
							خصوصیات فیزیکی خاک (s)
S, cS		SL, LfS, LS, LcS, fS	SiL, SC, L, SCL	C<60s, C<60v, SiCs, Co, SiCL, CL, Si	Cm, SiCm, C>60v, C>60s		بافت خاک/ساختمان خاک *
35<		35-15	15-3	3<			ذرات درشت خاک (درصد حجمی)
10>		10-20	20-50	50-90	90<		عمق خاک (cm)
70<		70-60	60-40	40-20	20-0		آهک (%)
							اولیه
15<		15-10	10-3	3-2	2-0		گچ (%)
							خصوصیات حاصلخیزی خاک (f)
	4/5>	4/5-5/0	5/0-5/5	5/5-6/0	6/0-7/0		واکنش خاک
8/5<		8/5-8/3	8/3-8/0	8/0-7/5	7/5-7/0		(گل اشباع)
			0/3>	0/6-0/3	0/6<		کربن آلی خاک (%)**
							شور و سدیمی بودن (n)
12<	12-8	8-6	6-4	4-2	2-0		شوری (dS.m ⁻¹)
	40<	40-30	30-20	20-10	10-0		ESP (%)

* Cm: رس با ساختمان فشرده؛ SiCm: رس سیلتی با ساختمان فشرده؛ C+60v: رس خیلی ریز، ساختمان ورتی سولها؛

C+60s: رس خیلی ریز، ساختمان مکعبی؛ C-60v: رس، ساختمان ورتی سولها و C-60s: رس، ساختمان مکعبی

**درجه بندی کربن آلی برای مواد آهکی



شکل 5- رابطه میان شاخص خاک و مقدار عملکرد شلتوک در 18 نمونه خاک برای راستی‌آزمایی جدول نیازهای خاک پیشنهادی برای گیاه برنج غرقابی

نتیجه‌گیری

و اصلاح وضعیت تولید منجر شود. نتایج این تحقیق نشان داد که یکی از عوامل اصلی و مؤثر خاکی در انتخاب مزارع، بافت خاک است. همچنین شوری و کمبود مقدار ماده آلی و پایین بودن وضعیت حاصلخیزی خاک- های اکثر مزارع مورد بررسی در جنوب کشور (خوزستان)، سبب افت عملکرد شلتوک شده است. بنابراین ارائه راهکار مناسب توسط متخصصین تغذیه گیاه می‌تواند در بهبود عملکرد شلتوک، راهگشا باشد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از حمایت‌های مؤسسه تحقیقات خاک و آب برای به انجام رسیدن پروژه تحقیقاتی "تعیین نیازهای رویشی برای برنج در استان‌های خوزستان، گیلان و مازندران" با شماره مصوب 94008-9452-10-10-014 که از تاریخ 1395/01/01 تا 1399/12/01 انجام گردیده است و داده‌های این مقاله از آن استخراج شده، قدردانی می‌نمایند.

جدول نیازهای رویشی خاک و زمین‌نما برای کشت برنج که در این پژوهش پیشنهاد شده است، یکی از ارکان ضروری در انجام مطالعات ارزیابی تناسب اراضی می‌باشد. این جدول می‌تواند در تعیین تناسب اراضی مناطق مختلف برای توسعه کشت برنج و یا آگاهی از تناسب اراضی فعلی تحت کشت، مورد استفاده قرار گیرد. انجام ارزیابی تناسب اراضی پیش از توصیه برای کاشت این گیاه مهم، به جلوگیری از هدر رفت منابع تولید کمک می‌کند. با توجه به اینکه جدول پیشنهادی بر مبنای مشخصه‌های اراضی در مناطق تحت کشت برنج کشور تهیه و صحت‌سنجی شده است، بنابراین دقت لازم برای انجام مطالعات تناسب اراضی و تهیه نقشه‌های مربوطه را دارد. این نقشه‌ها به شناخت عوامل محدودکننده تولید در مزارع برنج کشور کمک نموده و به این ترتیب می‌توانند منجر به اصلاح و مدیریت مناسب آنها شوند. به عنوان مثال می‌تواند به شناخت اراضی نامناسب برای کشت برنج

فهرست منابع:

1. باغستانی، ع.ا، رحیمی، ر. و ح. شرافتمند. 1399. برآورد تابع تقاضای برنج (کاربرد مدل رگرسیون آستانه‌ای). فصلنامه علمی-پژوهشی تحقیقات اقتصاد کشاورزی، 12(45): 91-101.
2. زین‌الدینی، ع.، تومانیان، ن.، نویدی، م.ن.، فرج‌نیا، ا. و ع.ر.، سیدجلالی. 1398. نیازهای رویشی گیاهان مهم باغبانی کشور. موسسه تحقیقات خاک و آب، کرج، ایران.
3. زین‌الدینی، ع.، سیدجلالی، ع.ر.، نویدی، م.ن.، اسکندری، م.، سیدمحمدی، ج.، دیالمی، ح.، مقیمی، ا.، پوزش شیرازی، م. (1399). تدوین جدول نیازهای رویشی خاک و زمین نما برای خرما به منظور استفاده در ارزیابی تناسب اراضی، پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، 27(5): 89-107.
4. زین‌الدینی، ع.، نویدی، م.ن.، اسدی کنگرشاهی، ع.، اسکندری، م.، سیدجلالی، س.ع.، سلمان پور، آ.، سیدمحمدی، ج.، قاسمی، م.، غفاری نژاد، س.ع.، زارعیان، غ. 1400. تأثیر ویژگی‌های خاک بر عملکرد و تهیه جدول نیازهای رویشی پرتقال در مناطق انتخابی کشور ایران. آب و خاک، 35(3): 395-407.
5. زین‌الدینی، ع.، نویدی، م.ن.، سیدمحمدی، ج.، جعفری، م.، سلمان پور، آ.، اسکندری، م.، مقیمی، ا.، فاتحی، ش. 1400. بررسی تأثیر ویژگی‌های زمین بر عملکرد و درجه‌بندی نیازهای رویشی انجیر در مناطق مهم زیرکشت. علوم و فنون باغبانی ایران (پذیرش).
6. زین‌الدینی، ع.، نویدی، م.ن.، اسکندری، م.، سیدمحمدی، ج.، تومانیان، ن.، حسینی‌فرد، س.ج.، فرج‌نیا، ا.، قاسم‌زاده گنجه‌ای، م. 1399. تعیین نیازهای رویشی خاک و زمین‌نما برای پسته به منظور استفاده در ارزیابی تناسب اراضی. علوم و فناوری پسته، 5(9): 88-70.
7. زین‌الدینی، ع.، نویدی، م.ن.، اسکندری، م.، سیدجلالی، س.ع.، سیدمحمدی، ج.، مقیمی، ا.، قاسم‌زاده گنجه‌ای، م.، مقری فریز، ع.ر.، پهلوان‌راد، م.ر. 1400. بررسی تناسب اراضی و تدوین جدول نیازهای رویشی خاک و زمین‌نما برای زعفران. زراعت و فن‌آوری زعفران (پذیرش). DOI:10.22048/JAST.2021.286314.1426
8. سیدجلالی، س.ع.، زارعیان، ع.، زین‌الدینی میمند، ع.، سعادت‌مند، غ.، و ج.، بنی‌نعمه. 1386a. تعیین تناسب اراضی و تخمین پتانسیل تولید گندم در خاک‌های آهکی استان‌های خوزستان، فارس، اصفهان و کرمان، نشریه فنی شماره 1341، موسسه تحقیقات خاک و آب.
9. سیدجلالی، س.ع.، زارعیان، ع.، زین‌الدینی، ع.، و غ.، سعادت‌مند. 1386b. تعیین تناسب اراضی و تخمین پتانسیل تولید گندم در خاک‌های گچی استان‌های خوزستان، فارس، اصفهان و کرمان، نشریه فنی شماره 1345، موسسه تحقیقات خاک و آب.
10. سیدجلالی، ع.ر.، اسکندری، م.، روشنی، ق.ع.، نویدی، م.ن.، زارعیان، غ.ر.، زین‌الدینی، ع.، و م.، قاسم‌زاده گنجه‌ای. 1400. تعیین نیازهای رویشی خاک و زمین‌نما برای پنبه به منظور استفاده در ارزیابی تناسب سرزمین. پژوهش‌های پنبه ایران، 9(1): 69-88.
11. سیدجلالی، ع.ر.، دهقان، ر.، آزادی، ا.، زین‌الدینی میمند، ع.، نویدی، م.ن.، و ز.، محمد اسماعیل. 1399. بررسی تأثیر عوامل خاکی بر رشد نیشکر در اراضی تحت کشت نیشکر در استان‌های خوزستان و مازندران. فصلنامه پژوهش‌های خاک، 34(3): 343-357.
12. سیدجلالی، ع.ر.، زین‌الدینی، ع.، نویدی، م.ن.، و ز.، محمد اسماعیل. 1398. نیازهای رویشی گیاهان زراعی. موسسه تحقیقات خاک و آب، کرج، ایران.

13. شکوری کتیگری، م.، محمود سلطانی، ش.، کربلایی آقا ملکی، م.ت. و ف. کشتکار. 1398. ارزیابی رابطه عملکرد با شاخصی از کیفیت خاک در اراضی شالیزاری. پژوهش‌های خاک، 33(2): 197-212.
14. گیوی، ج. 1376. ارزیابی کیفی تناسب اراضی برای نباتات زراعی و باغی. نشریه شماره 1015. مؤسسه تحقیقات خاک و آب. تهران. 100ص.
15. محمود سلطانی، ش.، کاووسی، م.، شکری واحد، ح.، رضوی‌پور، ت.، بابازاده، ش.، شکوری کتیگری، م. و م. محمدیان. 1400. ارزیابی حاصلخیزی خاک و توصیه‌های کودی برنج. مؤسسه تحقیقات برنج کشور. (در دست انتشار). 160 صفحه.
16. ناصرزاده، م.، علیجانی، ب. و م.، پایداری. 1399. تأثیر تغییر اقلیم بر وضعیت عملکرد برنج در شهرستان رشت. علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، 24(2): 41-54.
17. نویدی، م.ن. 1398. طراحی و تهیه نرم افزار ارزیابی تناسب اراضی برای گیاهان زراعی و باغی کشور. مؤسسه تحقیقات خاک و آب.
18. Dasgupta, S., Hossain, M.M. Huq, M. and D. Wheeler. 2014. Climate change, soil salinity, and the economics of high-yield rice production in coastal Bangladesh. The World Bank.
19. FAO. 1976. A Framework for Land Evaluation. FAO Soils Bulletin No. 32. Rome.
20. FAOSTAT. 2019. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>.
21. Grattan, S.R., Zeng, L. Shannon, M.C. and S.R. Roberts. 2002. Rice is more sensitive to salinity than previously thought. California Agric., 56:189-195.
22. Hamoud, Y.A., Guo, X., Wang, Z., Chen, S., and G. Rasoul. 2018. Effects of irrigation water regime, soil clay content and their combination on growth, yield, and water use efficiency of rice grown in South China. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 11(4): 144-155.
23. Hoque, M.M., Jun, Z., and W., Guoying. 2015. Evaluation of salinity tolerance in maize (*Zea mays* L.) genotypes at seedling stage J. Bio. Sci. Biotechnol, 4(1): 39-49.
24. Kikuta, M., Yamamoto, Y., Pasolon, Y. B., Rembon, F. S., Miyazaki, A., and D. Makiyara. 2016. How growth and yield of upland rice vary with topographic conditions: a case of Slash-and-burn rice farming in South Konawe Regency, southeast Sulawesi Province, Indonesia. Tropical Agriculture and Development, 60(3): 162-171.
25. Lou, W.P., Wu, L.H., Chen, H.Y., and Z.W., Ji. 2012. Assessment of rice yield loss due to torrential rain: A case study of Yuhang Country, Zhejiang Province, China. Natural Hazards, 60: 311-320.
26. Mantri, N., Patade, V., Penna, S., Ford, R., and E., Pang. 2012. Abiotic stress responses in plants: Present and future. In: Ahmad P, Prasad M.N.V. Abiotic Stress Responses in Plants: Metabolism, Productivity and Sustainability. New York: Springer: 1-19.
27. Pansu, M. and J., Gautheyrou. 2006. Handbook of Soil Analysis, Mineralogical, Organic and Inorganic Methods. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 993pp.
28. Shrivastava, P., and R. Kumar. 2015. Soil salinity: a serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. Saudi J. Boil. Sci, 22(2): 123-131.
29. Sys, C., Vanrast, E. and J., Debavey. 1991. Land evaluation, Parts I and II, general administration for development cooperation agricultural. Brussels, Belgium.
30. USDA. 2012. Field Book for Describing and Sampling Soils. Version 3, Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.

بررسی اثر کمپوست بر خصوصیات رشدی و غلظت عناصر غذایی پر مصرف در خیار کارلا (*Momordica charantia* L.) تحت تنش رطوبتی

وحید محصلی¹ و فرزاد فربود

استادیار آموزشی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران؛

v.mohasseli@areeo.ac.ir

مربی آموزشی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران؛

ffarbood43@gmail.com

دریافت: 1400/7/28 و پذیرش: 1400/9/29

چکیده

پژوهش حاضر به منظور ارزیابی اثر کمپوست در بستر کشت بر مؤلفه‌های رشد و جذب برخی از عناصر غذایی توسط گیاه دارویی خیار کارلا (*Momordica charantia* L.) در تنش رطوبتی انجام شد. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه در سال 1399 اجرا گردید. تیمارها شامل پنج سطح صفر، 15٪، 30٪، 45٪ و 60٪ وزنی کمپوست و سه سطح رطوبتی به صورت آبیاری به میزان 80 (شاهد)، 60 و 40 درصد ظرفیت مزرعه در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که اعمال سطوح رطوبتی 60٪ و 40٪ ظرفیت مزرعه در مقایسه با سطح رطوبتی 80 درصد ظرفیت مزرعه (شاهد) سبب کاهش 35/8٪ و 60/8٪ در وزن خشک اندام هوایی، 30/4٪ و 56/3٪ در ارتفاع گیاه، 15/9٪ و 42/3٪ در وزن میوه، 18/1٪ و 27/2٪ در تعداد میوه، 29/4٪ و 46/7٪ در طول میوه، 13٪ و 30/7٪ در غلظت نیتروژن، 21/7٪ و 52/1٪ در غلظت فسفر و 28/2٪ و 36/7٪ در غلظت پتاسیم گیاه گردید. همچنین نتایج بدست آمده نشان داد کاربرد سطوح مختلف کمپوست به عنوان محیط کشت گیاه کارلا تأثیر معنی‌داری در سطح 1٪ بر شاخص‌های رشد خیار کارلا دارد بطوری که حداکثر وزن خشک اندام هوایی (94 گرم در گلدان)، ارتفاع گیاه (351/3 سانتی‌متر)، وزن میوه (23/5 گرم در گلدان)، تعداد میوه (16/4)، طول میوه (13/4 سانتی‌متر) و غلظت نیتروژن (2٪)، فسفر (0/2٪) و پتاسیم (2/2٪) در شرایط محیط کشت با 45٪ کمپوست مشاهده گردید. بر اساس نتایج بدست آمده در شرایط تنش رطوبتی 60٪ و 40٪ ظرفیت مزرعه، محیط کشت حاوی 45٪ وزنی کمپوست سبب پایین آمدن اثرات منفی تنش‌های رطوبتی بر گیاه کارلا می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: تنش خشکی، کود آلی، گیاه دارویی

¹ نویسنده مسئول، آدرس: شیراز، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

مقدمه

در سال‌های اخیر روند رو به افزایش تخریب منابع آب، خاک و محیط زیست در اثر کاربرد بی‌رویه مواد شیمیایی در کشاورزی موجب ترغیب پژوهشگران به کشاورزی ارگانیک شده است (آویس و همکاران، 2008). در این راستا، استفاده از مواد آلی همانند کمپوست ضایعات کشاورزی و شهری به‌منظور کاهش مصرف کودهای شیمیایی گامی بلند در راستای کشاورزی پایدار تلقی می‌شود. مطالعات نشان داده است که کمپوست شامل مقادیر قابل توجهی از عناصر غذایی پرمصرف و کم‌مصرف بوده که از طریق سازوکارهای مختلف مانند تشکیل کلات، فراهمی عناصر غذایی را افزایش می‌دهند (نجفی و همکاران، 2013). اورسترازو و همکاران (2001) نشان دادند که می‌توان از کمپوست ضایعات مختلف، به‌عنوان یک بستر کشت سازگار با محیط زیست استفاده نمود. مواد آلی با بهبود شرایط ریزوسفر ریشه مانند ساختار، رطوبت و تهویه و همچنین با تأثیر بر افزایش جمعیت میکروارگانیسم‌ها، بر میزان قابلیت دسترسی عناصر غذایی بستر کشت اثر گذاشته و از این طریق موجب رشد بهتر ریشه و بدنبال آن تحریک رشد گیاه می‌گردد (شاهین و همکاران، 2007).

در آزمایشی که به منظور ارزیابی کاربرد کمپوست ضایعات شهری به‌عنوان بستر کشت گیاه صورت پذیرفت، مشاهده گردید که بیشترین وزن خشک ساقه در این نوع بستر کشت بدست آمد (گایاسینگ و همکاران، 2010). پژوهش‌ها نشان می‌دهند که کاربرد مواد آلی سبب افزایش رشد و جذب عناصر غذایی در گیاهان می‌گردد، هر چند اثر کمپوست بر رشد گیاه بستگی به منابع تهیه کمپوست، حالت فیزیکی، فرآیند تولید و درجه معدنی شدن دارد (بالداس و همکاران، 2011). تحقیقات نشان داده که کاربرد کمپوست موجب افزایش ارتفاع، تعداد برگ و گل در گیاه کروساندررا گردید که دلیل آن بالا بودن ظرفیت تبادل کاتیونی کمپوست است (گاجالاکشمی و عباسی، 2002). نتایج آزمایش حیدری و همکاران

(1398) نشان داد که تیمار بسترهای کشت تأثیر معنی‌داری بر صفات رشدی و عملکردی گیاه کارلا داشت بطوری که بیشترین ارتفاع بوته، وزن تر بوته، وزن تر ریشه، وزن خشک ریشه و تعداد میوه در بوته و عملکرد در تیمار پرلیت + ورمی کولایت و ورمی کولایت + کوکوپیت مشاهده گردید. یان و مورفی (2008) نتیجه گرفتند که بستر کشت کمپوست تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی درصد و مدت زمان سبز شدن گیاهچه دارد که دلیل آن را افزایش تخلخل محیط کشت نسبت به خاک عنوان نمودند. مطالعات لخدر و همکاران (2008) نشان داد که کاربرد کمپوست بدلیل تأثیر بر محتوای کلروفیل و پروتئین گیاه سبب تعدیل اثرات زیان‌آور تنش در گیاهان می‌گردد. کاربرد مواد آلی سبب افزایش قابلیت دسترسی عناصر غذایی جهت گیاه گردیده در نتیجه سبب بالا بردن کارایی فیزیولوژیکی و رشد گیاه و در نهایت افزایش مقاومت نسبت به شرایط تنش را بدنبال خواهد داشت (سالاکو و همکاران، 2009).

با توجه به اینکه کشور ایران دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک می‌باشد لذا کمبود آب از مشکلات اساسی کشاورزی بوده و از این رو وقوع تنش خشکی در طول دوره رشد گیاه امری اجتناب ناپذیر است. عکس‌العمل گیاهان و حتی ارقام مختلف یک گیاه نسبت به تنش خشکی متفاوت است (ویرا و همکاران، 1992). تنش‌های محیطی به طور کلی حدود 71 درصد از عملکرد گیاهان را کاهش می‌دهند که در این میان افت عملکرد اثر دمای بالا 15 درصد، دمای پایین 40 درصد، تنش خشکی 17 درصد و تنش شوری 20 درصد برآورد شده است (اشرف و هریس، 2005). گزارش‌های متعددی بیانگر کاهش رشد، عملکرد و حتی مرگ بخشی از گیاه یا تمام گیاه در نتیجه شرایط نامساعد و قرار گرفتن در شرایط تنش می‌باشد (کان‌ساکو و همکاران، 2002). خسارت ناشی از تنش‌های خشکی، شوری و دما به

رشد و جذب برخی از عناصر غذایی توسط گیاه دارویی
خیار کارلا تحت تنش آبی طراحی و اجراء شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه‌ای واقع در شهرستان فیروزآباد استان فارس با طول جغرافیایی 52 درجه و 26 دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی 28 درجه و 49 دقیقه شمالی و 1303 متر ارتفاع از سطح دریا اجراء گردید. تیمارها شامل پنج سطح صفر، 15، 30، 45 و 60 درصد وزنی کمپوست و سه سطح رطوبتی به‌صورت آبیاری به میزان 80 درصد (شاهد)، 60 درصد (تنش آبی متوسط) و 40 درصد (تنش آبی شدید) ظرفیت مزرعه در نظر گرفته شد. گیاه مورد بررسی رقم محلی خیار کارلا می‌باشد که بذور آن از شرکت پاکان بذر اصفهان تهیه شد. سپس بذور به مدت 12 ساعت داخل پارچه مرطوب قرار داده شده و بعد به سینی-های کشت حاوی بستر کوکوپیت منتقل گردید و در مرحله 4 برگی به گلدان‌های اصلی انتقال داده شد. خاک مورد نیاز از عمق 0-30 سانتیمتری زمین زراعی جنب گلخانه جمع آوری شده و بعد از هوا خشک شدن و عبور از الک دو میلی‌متر برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن با استفاده از روش‌های معمول استاندارد مورد تجزیه فیزیکی و شیمیایی قرار گرفت (جدول 1).

گیاهان زراعی در سطح جهان در مقایسه با سایر تنش‌ها بیشتر مورد توجه است (کان‌ساک و همکاران، 2002).

خیار تلخ یا کارلا (*Momordica charantia* L.) از خانواده کدوئیان، یکساله و تک پایه است که طول هر ساقه خزنده آن سالیانه تا 5 متر رشد می‌کند (رامان و لو، 1996). اسامی آن شامل کدوی تلخ، گلابی بلسان، خربزه تلخ و خیار آفریقایی می‌باشد (کریسان و همکاران، 2008). میوه نارس آن شبیه کدوی صحرایی پر از زگیل و دارای طعم تلخ می‌باشد که در زمان رسیدن به رنگ زرد و طعم شیرین تغییر می‌یابد. حضور ترکیب-های فنلی در تمام اندام‌های گیاه کارلا عامل اصلی ظرفیت آنتی‌اکسیدانی آن است (فیدریانی و همکاران، 2015). بخش دارویی این گیاه شامل میوه و برگ‌ها بوده که در درمان دیابت، رفع مسمومیت‌ها، ضد یبوست، تب، سرماخوردگی و تهیه نوعی چای استفاده می‌شود (حیدری و مباسری مقدم، 2012).

امروزه استفاده از منابع غیر آلاینده و سازگار با محیط زیست، برای تأمین بستر رشد گیاهان و روش‌های جایگزین بسترهای کشت از کاربرد و اهمیت زیادی برخوردارند. لذا با توجه به مقادیر زیاد کمپوست زباله شهری، پژوهش حاضر در راستای کشاورزی پایدار و ارزیابی اثر کمپوست به‌عنوان بستر کشت بر مؤلفه‌های

جدول 1- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش

ویژگی‌ها	شن	سیلت	رس	بافت	الکتریکی	پ-هاش	کربن آلی	فسفر	پتاسیم	آهن	روی	مس	منگنز
	(درصد)	(درصد)		خاک	(dS m^{-1})		(درصد)				(میلی گرم در کیلوگرم)		
مقدار	16/7	62/1	21/2	لومی سیلتی	1/6	7/8	0/53	6/8	273/4	5/6	1/2	0/98	0/43

همکاران، 1982)، آهن، روی، مس و منگنز (لیندسی و نورول، 1978) در عصاره‌های حاصل اندازه گیری شدند. برای اندازه گیری پ‌هاش و شوری کمپوست از نسبت 5:1 کود به آب استفاده شد. درصد کربن آلی با استفاده از

برای اندازه گیری میزان عناصر در کمپوست، مقدار 1 گرم از آن توزین شده سپس به وسیله حرارت دهی در کوره خاکسترگیری و پس از طی مراحل مختلف عصاره آن تهیه گردید (راج‌کوچ و همکاران، 2012). عناصر فسفر (اولسن و همکاران، 1954)، پتاسیم (نادسن و

روش اکسیداسیون تر (واکلی و بلاک، 1934) تعیین گردید (جدول 2).

جدول 2- برخی ویژگی‌های شیمیایی کمپوست مورد استفاده

هدایت الکتریکی	په‌اش	کربن آلی	فسفر	پتاسیم	آهن	روی	مس	منگنز
ویژگی‌ها		(درصد)	(درصد)	(درصد)		(میلی گرم در کیلوگرم)		
(dS m^{-1})	7/6	23/1	0/25	0/14	742/6	571/8	148/3	261/5
مقدار	5/4							

در ابتدا با توجه به تیمارهای کمپوست، خاک و کمپوست را به میزان مناسب وزن شده و پس از مخلوط نمودن آنها به داخل گلدان‌های پنج کیلوگرمی پلاستیکی منتقل شد. سپس سه عدد بوته چهار برگه به این گلدان‌ها منتقل شده و پس از دو هفته تعداد گیاهان به یک بوته در هر گلدان کاهش یافت. سطوح تنش رطوبتی (حداکثر سطح رطوبتی خاک) در طول فصل رشد با توزین روزانه گلدان‌ها و جبران کمبود آب خاک در زمان آبیاری با افزودن مقدار آب لازم به آنها اعمال شد. در طول فصل رشد در دو مرحله قبل و بعد از گل انگیزی با کود 20-20 محلول پاشی گیاهان صورت پذیرفت. حدود سه ماه پس از کشت گیاه و در اواخر فصل رشد ابتدا ارتفاع گیاه، تعداد میوه، طول و وزن میوه اندازه گیری و سپس گیاهان از محل طوقه برداشت شده و پس از توزین و شستشو با آب مقطر، نمونه‌های گیاهی در دمای 65 درجه سلسیوس به مدت 48 ساعت در آون قرار داده شد. نمونه‌های خشک شده توزین و جهت تجزیه‌های شیمیایی به آزمایشگاه منتقل و عناصر غذایی شامل نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن، روی، مس و منگنز اندازه‌گیری گردید. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم افزار SPSS صورت پذیرفت. برای محاسبه میانگین‌ها از آزمون دانکن استفاده شد و محاسبه احتمال معنی‌دار بودن تفاوت‌ها در سطح 5 درصد انجام شد.

نتایج و بحث

وزن خشک اندام هوایی

با توجه به جدول تجزیه واریانس (جدول 3) اثر تیمار سطوح رطوبتی و کمپوست بر اندام هوایی گیاه و میوه در

سطح یک درصد معنی‌دار است. اثرات متقابل سطوح رطوبتی و کمپوست بر وزن، تعداد و طول میوه به ترتیب در سطح پنج و یک درصد معنی‌دار شد. بررسی نتایج این مطالعه نشان داد که سطوح رطوبتی بر وزن خشک اندام هوایی خیار کارلا تأثیر معنی‌داری در سطح یک درصد داشت به طوری که در سطوح رطوبتی 60 و 40 درصد ظرفیت مزرعه در مقایسه با شاهد (80 درصد ظرفیت مزرعه) به ترتیب به میزان 28/61 و 49/05 درصد کاهش نشان داد (جدول 4). حداقل (24/90 درصد) و حداکثر (60/83 درصد) کاهش در وزن خشک اندام هوایی گیاه در اثر تنش رطوبتی به ترتیب مربوط به سطوح 45 درصد کمپوست در شرایط تنش آبی متوسط (60 درصد ظرفیت مزرعه) و عدم کاربرد کمپوست در شرایط تنش آبی شدید (40 درصد ظرفیت مزرعه) بدست آمد. تحقیقات نشان داده است که کاهش ماده خشک در شرایط تنش آبی می‌تواند به دلیل فشار آماس سلولی ناشی از کاهش سطح برگ گیاه و همچنین کاهش میزان فتوسنتز به دلیل محدودیت‌های بیوشیمیایی ناشی از کمبود آب از قبیل کاهش رنگدانه‌های فتوسنتزی به ویژه کلروفیل‌ها باشد (لولار و کورنیک، 2002).

همچنین گزارش شده است که تنش آبی سبب کاهش سطح برگ و در نتیجه پایین آمدن جذب نور توسط پوشش گیاهی و بدنبال آن کاهش ماده خشک در گیاه گلرنگ گردیده است (رادریگس و همکاران، 2010). تنش آب از طریق تأثیر بر طویل شدن و حجیم شدن سلول‌ها (رشد) و کاهش مواد فتوسنتزی ساخته شده در

گیاه، تولید بیوماس را کاهش می‌دهد (آریافر و سیروس- مهر، 1396)

جدول 3- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر سطوح رطوبتی خاک و کمپوست بر مولفه‌های رشدی خیار کارلا

منابع تغییر	درجه آزادی	وزن خشک اندام هوایی	ارتفاع گیاه	وزن میوه	تعداد میوه	طول میوه
سطوح رطوبتی	2	10018/37**	127735/26**	285/42**	50/56**	182/71**
سطوح کمپوست	4	2176/75**	24068/65**	104/29**	140/70**	39/89**
سطوح رطوبتی × سطوح کمپوست	8	3/91ns	56/61ns	4/31*	8/00**	4/42**
خطا	30	4/85	70/27	1/62	1/53	0/74

ns، * و ** به ترتیب نشان دهنده عدم معنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال 5 و 1 درصد

شرایط رشد و در نتیجه افزایش عملکرد باشد. همچنین افزایش عملکرد در اثر کاربرد ماده آلی در خاک می‌تواند به دلیل اثرات مستقیم (عناصر غذایی موجود در زیست توده) و غیرمستقیم (بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک) آن باشد (ماجور و همکاران، 2010). علاوه بر این، مصرف کمپوست می‌تواند به عنوان ماده تحریک کننده رشد از طریق تولید هورمون‌های گیاهی باعث بهبود مستقیم رشد شود و از طریق غیرمستقیم نیز با فراهمی عناصر غذایی پرمصرف نظیر نیتروژن و تولید عوامل کنترل بیولوژیک علاوه بر افزایش خصوصیات رشد، افزایش مقاومت نسبت به عوامل بیماری‌زای خاکری را به همراه داشته باشد (گلیک، 2003). مطالعات احمدپور و همکاران (1397) نشان داد که در شرایط تنش خشکی، افزودن کمپوست به خاک در سطح 35 درصد وزنی منجر به افزایش معنی‌دار تمام شاخص‌های مورد بررسی گردید، لذا آنها بیان داشتند که با کاربرد کمپوست می‌توان اثرات منفی تنش خشکی در گیاه را کاهش داد. همچنین آزمایشات گرمی‌نیا و همکاران (1398) نشان داد که کمپوست بدلیل داشتن قابلیت نگهداشت آب، توانایی کاهش اثرات تنش شوری و به تبع آن تنش خشکی را دارد.

با افزایش سطوح مصرفی کمپوست، وزن خشک اندام هوایی گیاه کارلا بطور معنی‌داری افزایش نشان داد (جدول 4). به‌طوری که بیشترین وزن خشک اندام هوایی گیاه (121/45 گرم در گلدان) مربوط به سطح چهارم کمپوست (45 درصد وزنی) در شرایط عدم تنش آبی بدست آمد که در واقع معادل 52/38 درصد افزایش در وزن خشک اندام هوایی نسبت به شاهد می‌باشد. کمترین وزن ماده خشک اندام هوایی (31/22 گرم در گلدان) مربوط به سطح اول کمپوست (بدون مصرف کمپوست) در شرایط رطوبتی 40 درصد ظرفیت مزرعه است. حمایل و همکاران (2015) مشاهده کردند که کاربرد کمپوست سبب افزایش معنی‌داری در وزن خشک اندام‌های هوایی (13/41 درصد) و ارتفاع (13/25 درصد) گیاه خیار کارلا نسبت به تیمار شاهد شد. بر همین اساس آریافر و سیروس-مهر (1396) نیز نتیجه گرفتند که بیشترین عملکرد بیولوژیک (1427/14 کیلوگرم در هکتار) با کاربرد کمپوست به میزان 30 تن در هکتار و کمترین آن (1050/60 کیلوگرم در هکتار) مربوط به تیمار شاهد بود که معادل 35/84 درصد افزایش می‌باشد. افزایش وزن خشک اندام هوایی در اثر کاربرد کمپوست می‌تواند به دلیل افزایش دسترسی عناصر غذایی در خاک و بهبود

جدول 4- اثر سطوح رطوبتی خاک و کمپوست بر وزن خشک و ارتفاع اندام هوایی خیار کارلا

سطوح مختلف کمپوست (درصد وزنی)								سطوح رطوبتی
میانگین	60	45	30	15	صفر		(درصد)	
وزن خشک اندام هوایی (گرم در گلدان)								
104/90 A	106/44 b	121/45 a	116/99 a	99/92 b	79/70 cd		80	
74/89 B	76/85 d	91/21 c	85/48 c	69/79 e	51/11 fg		60	
53/45 C	56/04 f	69/31 e	62/32 f	48/36 g	31/22 h		40	
	79/78 B	93/99 A	88/27 A	72/69 C	54/01 D		میانگین	
ارتفاع گیاه (cm)								
398/49 A	416/53 b	447/00 a	430/07 b	391/70 c	307/17 ef		80	
299/48 B	319/13 e	347/13 d	325/33 e	292/27 f	213/57 i		60	
214/10 C	236/13 h	260/00 g	233/40 h	206/90 i	134/07 j		40	
	323/93 B	351/38 A	329/60 B	296/96 C	218/27 D		میانگین	

برای هر یک از پاسخ‌های گیاهی، میانگین‌هایی که در هر ردیف و یا در هر ستون در یک حرف بزرگ و یا میانگین‌هایی که در متن جدول در یک حرف کوچک مشترک هستند، طبق آزمون دانکن در سطح پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

ارتفاع گیاه

سطح تنش رطوبتی (40 درصد ظرفیت مزرعه) که معادل 70/01 درصد اختلاف می‌باشد بدست آمد.

بر اساس نتایج حاصل از انجام این پژوهش بیشترین میانگین ارتفاع گیاه 351/38 سانتی‌متر مربوط به محیط کشت دارای 45 درصد وزنی کمپوست بدست آمد که در واقع معادل 60/98 درصد افزایش در ارتفاع گیاه نسبت به شاهد می‌باشد (جدول 4). کمترین میانگین ارتفاع گیاه (218/27 سانتی‌متر) مربوط به سطح اول کمپوست (عدم مصرف) می‌باشد. بطور کلی محیط کشت دارای 15، 30، 45 و 60 درصد کمپوست به ترتیب سبب 36/05، 51/01، 60/98 و 48/41 درصد افزایش در ارتفاع گیاه نسبت به شاهد گردید. تحقیقات تسان و همکاران (2018) نشان داد که کاربرد کمپوست سبب افزایش ارتفاع گیاه در خیار کارلا به میزان 93/5 درصد نسبت به شاهد (بدون مصرف کمپوست) گردید. بر اساس پژوهش‌های انجام شده کمپوست بدلیل تأمین مقداری از عناصر غذایی مورد نیاز گیاه مانند نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن، روی، مس و منگنز می‌تواند در رشد گیاه موثر واقع شود. همچنین کمپوست به دلیل دارا بودن عناصر غذایی، قدرت نگهداری آب و وزن حجمی پایین یکی از مواد مهم در تهیه بستر کشت گیاهان می‌باشد (ماجور و همکاران،

اعمال سطوح رطوبتی 60 و 40 درصد ظرفیت مزرعه، ارتفاع گیاه را در مقایسه با سطح رطوبتی 80 درصد ظرفیت مزرعه (شاهد) به‌طور معنی‌داری به ترتیب به میزان 24/85 و 46/27 درصد کاهش داد (جدول 4). این کاهش ارتفاع گیاه در اثر تنش رطوبتی می‌تواند به دلیل کاهش جذب عناصر غذایی مورد نیاز گیاه از خاک و همچنین کاهش جذب دی‌اکسیدکربن به دلیل بسته شدن روزنه‌ها در شرایط خشکی و در نتیجه کاهش میزان فتوسنتز و کربوهیدرات‌های تولید شده طی فرآیند فتوسنتز باشد. به‌طور عمده از اثرات اولیه تنش خشکی اختلال در جذب آب و مواد معدنی، هدایت روزنه‌ای و تولیدات فتوسنتز و کاهش رشد گیاه است (کوسوران، 2012). علاوه بر این گیاهان در تنش خشکی قادر به حفظ خود در برابر دیگر تنش‌های زیستی یا غیر زیستی نیستند در نتیجه بهره‌وری گیاه بیشتر محدود می‌شود (رامگودا و ستیل‌کومار، 2015).

نتایج نشان داد که بیشترین ارتفاع گیاه در سطوح مختلف رطوبتی (447/00 سانتی‌متر) مربوط به سطح چهارم مصرفی کمپوست (45 درصد) در شرایط بدون تنش رطوبتی و کمترین آن (134/07 سانتی‌متر) مربوط به سطح اول کمپوست (عدم مصرف) در شرایط بالاترین

2010). کرمی‌نیا و همکاران (1398) نیز بیان کردند که با توجه به اینکه کمپوست غنی از عناصر غذایی مورد نیاز گیاه می‌باشد و همچنین توانایی بهبود ساختار خاک از قبیل تهویه و افزایش ظرفیت نگهداشت آب و برطرف کردن نیازهای گیاه را دارد لذا می‌تواند در شرایط تنش سبب افزایش وزن تر و ارتفاع گیاه جعفری نسبت به تیمار شاهد گردد.

وزن، تعداد و طول میوه

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که اعمال تنش رطوبتی سبب کاهش در وزن، تعداد و طول میوه گیاه کارلا گردید (جدول 5). بطور میانگین وزن میوه در سطوح 60 و 40 درصد ظرفیت مزرعه نسبت به شاهد (80 درصد مزرعه) به ترتیب 20/49 و 36/31 درصد کاهش نشان داد. حداکثر کاهش در وزن میوه (42/39 درصد) در اثر تنش رطوبتی مربوط به تیمار تنش شدید رطوبتی (40 درصد ظرفیت مزرعه) در شرایط عدم مصرف کمپوست و حداقل آن (15/65 درصد) مربوط به تیمار تنش متوسط رطوبتی (60 درصد) در محیط کشت حاوی 30 درصد کمپوست مشاهده گردید. همچنین تعداد و طول میوه نیز در اثر تنش رطوبتی کاهش یافت بطوری که سطوح رطوبتی 60 و 40 درصد ظرفیت مزرعه نسبت به شاهد به ترتیب سبب 12/84 و 28/31 درصد کاهش در تعداد میوه در بوته گردید که البته این میزان کاهش در مورد طول میوه به ترتیب 22/17 و 49/68 درصد بدست آمد.

کاربرد سطوح مختلف کمپوست به عنوان محیط کشت گیاه کارلا تأثیر معنی‌داری بر وزن و تعداد میوه در بوته داشت بطوری که حداکثر وزن (29/97 گرم) و تعداد (20/67) میوه در محیط کشت با 45 درصد کمپوست در شرایط عدم تنش رطوبتی (80 درصد ظرفیت مزرعه) و حداقل آنها به ترتیب 10/60 گرم و 5/33 در تیمار تنش شدید رطوبتی در شرایط عدم مصرف کمپوست بدست آمد (جدول 5). طول میوه نیز مانند فاکتورهای ذکر شده با

افزایش میزان کاربرد کمپوست به عنوان محیط کشت سیر صعودی از خود نشان داد. در شاخص طول میوه مشاهده شد که بیشترین طول میوه (18/37 سانتی‌متر) مربوط به محیط رشد دارای 45 درصد کمپوست در شرایط بدون تنش رطوبتی و کمترین آن (5/43 سانتی‌متر) مربوط به محیط رشد بدون کمپوست در سطح رطوبتی 40 درصد ظرفیت مزرعه بدست آمد. بطور کلی مشاهده گردید که با بالا رفتن میزان مصرف کمپوست به عنوان محیط کشت گیاه کارلا، فاکتورهای گیاهی ذکر شده افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد این امر به دلیل بهبود شرایط فیزیکی محیط رشد ریشه گیاه و بالا رفتن غلظت عناصر غذایی مورد نیاز گیاه بوده است. هرچند که حداکثر میزان فاکتورهای گیاهی فوق در محیط کشت حاوی 45 درصد کمپوست حاصل شد و در سطح بالاتر (60 درصد) میزان این فاکتورها سیر نزولی نشان دادند که دلیل آن را می‌توان شوری حاصل از میزان بالای کمپوست ذکر نمود. بر اساس پژوهش‌های انجام شده حداکثر میزان وزن (گرم) و تعداد میوه در خیار کارلا به ترتیب 25/95 و 18/3 در محیط کشت حاوی کمپوست مشاهده شد که دلیل آن را به حضور عناصر غذایی پرمصرف و کم‌مصرف در کمپوست نسبت دادند (تسان و همکاران، 2018).

غلظت عناصر غذایی در گیاه

با توجه به جدول تجزیه واریانس (جدول 6) اثر تیمار سطوح رطوبتی و کمپوست بر غلظت عناصر غذایی پرمصرف و کم مصرف در سطح یک درصد معنی‌دار بدست آمد. اثرات متقابل سطوح رطوبتی و کمپوست بر غلظت عناصر غذایی به استثناء عنصر روی در سطوح پنج و یک درصد معنی‌دار شد. همانطور که در جدول هفت مشاهده می‌گردد اعمال سطوح رطوبتی 60 و 40 درصد ظرفیت مزرعه، میانگین غلظت نیتروژن در برگ گیاه را نسبت به شاهد به ترتیب به میزان 8/10 و 28/09 درصد کاهش داد.

جدول 5- اثر سطوح رطوبتی خاک و کمپوست بر وزن، طول و قطر میوه خیار کارلا

میانگین	سطوح مختلف کمپوست (درصد وزنی)							سطوح رطوبتی (درصد)
	60	45	30	15	صفر			
وزن میوه (گرم)								
23/96 A	25/93 b	29/97 a	24/03 b	21/47 c	18/40 cd			80
19/05 B	19/53 c	22/37 bc	20/27 c	17/60 cd	15/47 d			60
15/26 C	18/10 cd	18/33 cd	16/33 d	12/93 e	10/60 e			40
	21/19 AB	23/56 A	20/21 B	17/33 C	14/82 D			میانگین
تعداد میوه (عدد در گلدان)								
12/93 A	14/00 bc	20/67 a	13/33 c	9/33 d	7/33 de			80
11/27 B	14/33 bc	16/00 b	12/33 c	7/67 de	6/00 de			60
9/27 B	9/33 d	12/67 c	10/67 cd	8/33 d	5/33 e			40
	12/56 B	16/44 A	12/11 B	8/44 C	6/22 C			میانگین
طول میوه (cm)								
14/03 A	13/90 b	18/37 a	14/93 b	12/73 bc	10/20 c			80
10/92 B	11/00 c	14/10 b	11/40 c	10/90 c	7/20 d			60
7/06 C	6/43 de	7/97 d	7/60 d	7/87 d	5/43 e			40
	10/44 B	13/48 A	11/31 AB	10/50 B	7/61 C			میانگین

برای هر یک از پاسخ‌های گیاهی، میانگین‌هایی که در هر ردیف و یا در هر ستون در یک حرف بزرگ و یا میانگین‌هایی که در متن جدول در یک حرف کوچک مشترک هستند، طبق آزمون دانکن در سطح پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

هر چند کاهش غلظت نیتروژن در اثر تنش رطوبتی در محیط‌های کشت بدون کمپوست در سطوح 60 و 40 درصد ظرفیت مزرعه به ترتیب 13/02 و 30/73 درصد بدست آمد اما غلظت نیتروژن گیاه در محیط کشت حاوی 45 درصد کمپوست در سطوح رطوبتی فوق به ترتیب 4/22 و 12/21 درصد کاهش را نشان داد که بیانگر نقش کمپوست در تعدیل نمودن اثر منفی تنش رطوبتی در کاهش غلظت این عنصر در گیاه می‌باشد.

جدول 6- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر سطوح رطوبتی خاک و کمپوست بر غلظت عناصر غذایی در خیار کارلا

منابع تغییر	درجه آزادی	غلظت نیتروژن	غلظت فسفر	غلظت پتاسیم	غلظت آهن	غلظت روی	غلظت مس	غلظت منگنز
سطوح رطوبتی	2	1/36**	0/085**	5/67**	764/96**	485/52**	212/21**	144/73**
سطوح کمپوست	4	0/18**	0/004**	0/15*	219/50**	157/50**	106/16**	60/24**
سطوح رطوبتی × کمپوست	8	0/09**	0/001*	0/33**	43/74*	4/98ns	6/48*	6/56**
خطا	30	0/03	0	0/05	16/12	5/09	2/89	1/89

ns، * و ** به ترتیب نشان دهنده عدم معنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال 5 و 1 درصد

15/24 درصد مشاهده شد (جدول 7). علت این امر را می‌توان به افزایش قابل توجه میزان ماده آلی موجود در کمپوست نسبت داد (جدول 1). این موضوع در خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه‌خشک که با کمبود مواد آلی و نیتروژن مواجه هستند از اهمیت بسیاری برخوردار است. نیتروژن گلوگاه رشد گیاه بوده و نقش بسیار مهمی در

نتایج اثر کاربرد کمپوست بر غلظت نیتروژن گیاه نشان داد که با افزایش مصرف کمپوست مقدار نیتروژن گیاه نیز افزایش می‌یابد بطوری که در سطوح 15، 30، 45 و 60 درصد کمپوست میزان افزایش میانگین غلظت نیتروژن گیاه نسبت به شاهد به ترتیب 8/54، 16/46، 22/56 و

رشد رویشی و افزایش تولید ایفاء می‌نماید. بنابراین، مصرف کمپوست می‌تواند یکی از منابع تأمین کننده نیتروژن بوده و سبب کاهش مصرف کودهای نیتروژنه گردد. حداکثر (2/27 درصد) و حداقل (1/23 درصد) غلظت نیتروژن در برگ گیاه به ترتیب مربوط به محیط کشت حاوی 15 درصد کمپوست در شرایط بدون تنش رطوبتی و همان محیط کشت در شرایط تنش رطوبتی شدید (40 درصد ظرفیت مزرعه) بدست آمد. کودهای آلی و به‌ویژه کمپوست در مقایسه با کودهای شیمیایی شامل مقادیر بالایی از ماده آلی بوده و می‌توانند منبع غنی از عناصر غذایی به‌ویژه نیتروژن و فسفر باشند که بتدریج آنها را در اختیار گیاه قرار می‌دهند (اگبال و همکاران، 2004).

اعمال تنش رطوبتی بر روی غلظت فسفر و پتاسیم گیاه نیز تأثیر معنی‌داری از نوع منفی برجای گذاشت بطوری که در سطح رطوبتی 60 درصد ظرفیت مزرعه، غلظت فسفر و پتاسیم در برگ گیاه نسبت به سطح آبیاری تا 80 درصد ظرفیت مزرعه به ترتیب 28/57 و 25/56 درصد و در سطح 40 درصد ظرفیت مزرعه نسبت به شاهد به ترتیب به میزان 53/57 و 46/24 درصد کاهش نشان داد (جدول 7).

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که مصرف 15، 30، 45 و 60 درصد وزنی کمپوست در مقایسه با سطح صفر کمپوست به ترتیب سبب افزایش غلظت فسفر به میزان 11/76، 23/53، 35/29 و 17/65 درصد و پتاسیم به میزان 5/91، 8/06، 18/28 و 12/37 درصد در اندام هوایی گیاه کارلا گردید. افزایش فسفر و پتاسیم قابل استفاده گیاه در خاک در اثر افزودن کمپوست را می‌توان دلیل اصلی این امر ذکر نمود (مدینا و همکاران، 2012). بیشترین غلظت فسفر (0/31 درصد) و پتاسیم (3/13 درصد) در گیاه به ترتیب در سطوح مصرفی 45 و 15

درصد کمپوست در شرایط عدم تنش رطوبتی حاصل گردید. کمترین غلظت فسفر (0/11 درصد) در تیمار بدون مصرف کمپوست و محیط کشت حاوی 60 درصد کمپوست در شرایط تنش شدید رطوبتی و پتاسیم (0/87 درصد) در محیط کشت حاوی 15 درصد کمپوست و در شرایط رطوبتی 40 درصد ظرفیت مزرعه مشاهده شد. مطالعات حمایل و همکاران (2015) نشان داد که کاربرد کمپوست سبب افزایش معنی‌داری در غلظت نیتروژن (13/42 درصد)، فسفر (21 درصد) و پتاسیم (28/36 درصد) گیاه خیار کارلا نسبت به تیمار شاهد گردید.

از نظر عناصر غذایی کم مصرف نیز بالاترین غلظت آهن در سطوح مختلف تنش آبی مربوط به سطح رطوبتی 80 درصد ظرفیت مزرعه مشاهده گردید (جدول 8). اعمال تنش رطوبتی سبب کاهش غلظت آهن گیاه در سطح دوم و سوم به ترتیب به میزان 9/77 و 20/85 درصد گردید. از طرف دیگر کاربرد کمپوست سبب افزایش غلظت آهن گیاه گردید بطوری که محیط‌های کشت دارای 15، 30، 45 و 60 درصد کمپوست سبب بالا رفتن غلظت آهن گیاه نسبت به شاهد به ترتیب به میزان 13/73، 18/45، 24/93 و 16/88 درصد شد.

حداکثر غلظت آهن (77/40 میلی‌گرم در کیلوگرم) مربوط به محیط کشت دارای 45 درصد کمپوست در شرایط عدم تنش رطوبتی و حداقل آن (48/73 میلی‌گرم در کیلوگرم) مربوط به محیط کشت بدون کمپوست در شرایط تنش شدید رطوبتی (40 درصد ظرفیت مزرعه) می‌باشد که بیانگر 37/04 درصد افزایش است. پژوهش‌های دیگر نیز حکایت از افزایش غلظت عناصر غذایی آهن، روی، مس و منگنز در برگ خیار کارلا در اثر مصرف کمپوست دارد (حمایل و همکاران، 2015؛ شری و همکاران، 2018).

جدول 7- اثر سطوح رطوبتی خاک و کمپوست بر غلظت برخی از عناصر غذایی پرمصرف در خیار کارلا

سطوح مختلف کمپوست (درصد وزنی)										سطوح رطوبتی		
میانگین		60		45		30		15		صفر	(درصد)	
غلظت نیتروژن (درصد)												
2/10	A	1/93	b	2/13	ab	2/23	a	2/27	a	1/92	b	80
1/93	A	2/16	ab	2/04	ab	1/93	b	1/83	bc	1/67	c	60
1/51	B	1/57	c	1/87	b	1/57	c	1/23	d	1/33	cd	40
		1/89	AB	2/01	A	1/91	AB	1/78	AB	1/64	B	میانگین
غلظت فسفر (درصد)												
0/28	A	0/30	a	0/31	a	0/30	a	0/26	b	0/23	c	80
0/20	B	0/20	d	0/23	c	0/19	d	0/19	d	0/18	d	60
0/13	C	0/11	f	0/15	e	0/14	e	0/13	ef	0/11	f	40
		0/20	AB	0/23	A	0/21	AB	0/19	B	0/17	C	میانگین
غلظت پتاسیم (درصد)												
2/66	A	2/50	c	2/77	b	2/53	c	3/13	a	2/37	cd	80
1/98	B	2/30	d	2/20	d	1/80	ef	1/90	e	1/70	f	60
1/43	C	1/47	g	1/63	fg	1/70	f	0/87	h	1/50	g	40
		2/09	A	2/20	A	2/01	AB	1/97	BC	1/86	C	میانگین

برای هر یک از پاسخ‌های گیاهی، میانگین‌هایی که در هر ردیف و یا در هر ستون در یک حرف بزرگ و یا میانگین‌هایی که در متن جدول در یک حرف کوچک مشترک هستند، طبق آزمون دانکن در سطح پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

معنی‌داری افزایش دهد بطوری که حداکثر میانگین غلظت روی (35/36 میلی‌گرم در کیلوگرم) مربوط به محیط کشت دارای 45 درصد کمپوست و حداقل آن (26/41) میلی‌گرم در کیلوگرم) مربوط به محیط کشت بدون کمپوست بدست آمد که 33/89 درصد افزایش را نشان می‌دهد (جدول 8). افزایش غلظت عنصر روی در گیاه در اثر کاربرد کمپوست بدلیل افزایش فراهمی این عنصر در اثر تجزیه کودهای آلی و کاهش pH خاک و از طرفی دیگر تشکیل کلات روی توسط ترکیب‌های آلی اضافه شده می‌باشد. مواد آلی کوتاه زنجیر نیز از طریق پیوند با روی، تحرک و حل‌پذیری روی در خاک و فراهمی آن را برای گیاه افزایش می‌دهند (مارشور، 1995).

همچنین اعمال تنش رطوبتی نیز بر روی غلظت مس و منگنز گیاه تأثیر منفی برجای گذاشت بطوری که در سطح رطوبتی 60 درصد ظرفیت مزرعه، غلظت مس و منگنز در برگ گیاه نسبت به شاهد به‌ترتیب 18/18 و 10/80 درصد و در سطح تنش شدید رطوبتی نسبت به عدم تنش آبی به‌ترتیب 33/47 و 19/46 درصد کاهش را

با مصرف کودهای آلی در خاک و افزایش سطح مصرف آن، از یکطرف pH خاک کاهش یافته و از سوی دیگر مقدار ترکیب‌های کلات کننده آهن و دیگر عناصر غذایی کم‌مصرف افزایش یافته و موجب افزایش زیست فراهمی این عناصر و جذب آنها بوسیله گیاه شده و در نتیجه رشد گیاه افزایش می‌یابد (نجفی و همکاران، 2013). در واقع افزودن مواد آلی به خاک می‌تواند به بهبود قابلیت جذب عناصر کم‌مصرف در خاک منجر شود که دلیل این امر را می‌توان افزایش کربن آلی خاک به دنبال کاربرد مواد آلی دانست که سبب جذب بیشتر عناصر کم‌مصرف در گیاهان می‌شود. هرچند کربن آلی یکی از مهم‌ترین منابع برای عناصر غذایی بوده و نقش اساسی در حفظ حاصلخیزی خاک و تولید محصول بر عهده دارد (پان و همکاران، 2009). مقایسه میانگین‌های غلظت روی در اندام هوایی گیاه نیز نشان داد که علی‌رغم کاهش غلظت این عنصر در اثر تنش رطوبتی اما مصرف کمپوست توانسته است میزان این عنصر را در اندام هوایی گیاه نسبت به شاهد، به صورت

کمپوست در شرایط عدم تنش رطوبتی حاصل گردید. کمترین غلظت مس (8/37 میلی گرم در کیلوگرم) و منگنز (21/97 میلی گرم در کیلوگرم) در محیط کشت بدون کمپوست در شرایط تنش شدید رطوبتی بدست آمد.

نشان داد (جدول 8). سطوح مصرفی کمپوست نسبت به شاهد سبب افزایش غلظت مس و منگنز در اندام هوایی گیاه کارلا گردید. بیشترین غلظت مس (26/17 میلی گرم در کیلوگرم) و منگنز (35/60 میلی گرم در کیلوگرم) در گیاه به ترتیب در سطوح مصرفی 60 و 30 درصد

جدول 8- اثر سطوح رطوبتی خاک و کمپوست بر غلظت برخی از عناصر غذایی کم مصرف در خیار کارلا

میانگین	سطوح مختلف کمپوست (درصد وزنی)						سطوح رطوبتی (درصد)	
	60	45	30	15	صفر			
غلظت آهن (میلی گرم در کیلوگرم)								
68/45 A	71/67 b	77/40 a	73/87 ab	62/33 c	57/00 d			80
61/76 B	60/73 c	65/10 c	62/67 c	65/40 c	54/90 d			60
54/18 C	55/33 d	58/17 d	53/73 d	54/93 d	48/73 e			40
	62/58 AB	66/89 A	63/42 AB	60/89 B	53/54 C			میانگین
غلظت روی (میلی گرم در کیلوگرم)								
36/66 A	41/53 a	42/47 a	36/57 b	31/73 c	31/00 c			80
31/43 B	34/00 bc	35/37 bc	31/63 c	28/43 d	27/70 d			60
25/29 C	30/37 cd	28/23 d	24/70 e	22/63 f	20/53 f			40
	35/30 A	35/36 A	30/97 B	27/60 BC	26/41 C			میانگین
غلظت مس (میلی گرم در کیلوگرم)								
22/44 A	26/17 a	25/30 a	21/97 b	20/07 b	18/70 bc			80
18/36 B	21/73 b	19/27 bc	19/07 bc	17/50 c	14/23 cd			60
14/93 C	17/90 c	20/30 b	15/47 c	12/60 d	8/37 e			40
	21/93 A	21/62 A	18/83 AB	16/72 B	13/77 C			میانگین
غلظت منگنز (میلی گرم در کیلوگرم)								
31/86 A	34/80 a	32/97 ab	35/60 a	29/53 bc	26/40 c			80
28/42 B	29/27 bc	30/83 b	28/27 bc	28/60 b	25/13 c			60
25/66 C	27/03 c	27/83 c	26/47 c	25/00 c	21/97 d			40
	30/37 A	30/54 A	30/11 A	27/71 AB	24/50 B			میانگین

برای هر یک از پاسخ‌های گیاهی، میانگین‌هایی که در هر ردیف و یا در هر ستون در یک حرف بزرگ و یا میانگین‌هایی که در متن جدول در یک حرف کوچک مشترک هستند، طبق آزمون دانکن در سطح پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

نتیجه‌گیری

رشد و عملکرد شد که دلایل احتمالی این امر را می‌توان به افزایش قابلیت هدایت الکتریکی و بر هم خوردن نسبت عناصر غذایی در خاک نسبت داد. بر اساس نتایج بدست آمده بهترین سطح مصرفی کمپوست در کشت گلخانه‌ای برای گیاه کارلا تحت تنش رطوبتی، محیط کشت حاوی 45 درصد وزنی کمپوست می‌باشد. به دلیل اثرات کمپوست بر ویژگی‌های خاک، در شرایط تنش کمبود آب، استفاده از کمپوست می‌تواند منجر به کاهش اثرات تنش گردد. بطور کلی می‌توان گفت که کمپوست

نتایج این پژوهش بیانگر آن است که اعمال تنش رطوبتی بر وزن خشک اندام هوایی، ارتفاع گیاه، وزن، تعداد و طول میوه و همچنین غلظت نیتروژن، فسفر، پتاسیم و عناصر کم مصرف در گیاه کارلا تأثیر منفی بر جای گذاشت. از طرفی دیگر کاربرد سطوح مختلف کمپوست به عنوان محیط کشت گیاه تأثیر معنی‌داری در افزایش شاخص‌های فوق در شرایط تنش رطوبتی و عدم تنش رطوبتی داشت. هر چند سطوح بالای مصرفی کمپوست (60 درصد وزنی) سبب کاهش شاخص‌های

نقش مؤثری در رشد و نمو گیاه داشته و سبب پایین آمدن اثرات منفی تنش‌های رطوبتی بر گیاهان می‌گردد. از اثرات مهم کمپوست تأمین مواد غذایی مورد نیاز گیاه و همچنین حفظ رطوبت خاک می‌باشد. کمپوست به گیاه کمک می‌کند تا گیاه رطوبت بیشتری را در دوران خشکی حفظ نماید. تأثیر کمپوست بر رشد گیاه سبب کم شدن نیاز به استفاده از کودهای شیمیایی و تولید محصول سالم و ارگانیک می‌گردد. در کل مصرف بهینه از این گونه منبع-های آلی در بخش کشاورزی یکی از بهترین روش‌ها برای بازیافت این مواد به‌شمار آمده و گام مؤثری برای کشاورزی پایدار خواهد بود.

فهرست منابع

1. احمدپور، ر.، آرمند، ن.، حسین‌زاده، س. ر. و ریگی، گ. 1397. تأثیر کود کمپوست بر برخی پارامترهای فتوسنتزی در سه مرحله رشد گیاه عدس (*Lens culinaris Medik.*) تحت تنش خشکی. مجله پژوهش‌های گیاهی. جلد 31، شماره 4، 767-780.
2. آریافر، س. و سیروس‌مهر، ع. ر. 1396. اثر کمپوست زباله شهری بر عملکرد، درصد اسانس و برخی ویژگی‌های فیزیولوژیکی سیاه دانه تحت تنش خشکی. مجله به‌زراعی کشاورزی، دوره 19، شماره 1، 31-42.
3. حیدری، م.، اسماعیل‌پور، ب.، ترابی گیگلو، م.، شیخعلی‌پور، م.، دهدار، ب. و عدلی‌پور، م. 1398. بررسی تأثیر انواع بسترهای کشت (پرلیت، ورمی کولایت، خاک اره، کوکوپیت) بر روی رشد رویشی، عملکرد گیاه دارویی کارلا (*Momordica charantia L.*). دومین کنفرانس بین‌المللی و ششمین کنفرانس ملی کشاورزی ارگانیک و مرسوم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
4. کریمی‌نیا، ف.، رنگ‌زن، ن.، نادیان، ح. و لطفی جلال آبادی، ا. 1398. اثر کمپوست مصرف شده قارچ و بیوپچار آن بر عملکرد گیاه جعفری تحت تنش شوری. تحقیقات آب و خاک ایران، دوره 50، شماره 6، 1465-1453.
5. Ashraf, M., and Harris, P. J. C. 2005. Abiotic Stresses: Plant Resistance through Breeding and Molecular Approaches. Haworth Press, New York, USA.
6. Avis, T.J., Grave, V., Antoun, H., and Tweddell, R.J., 2008. Multifaceted beneficial effects of rhizosphere microorganisms on plant health and productivity. Soil Bio. Biochem. 40: 1733-1740.
7. Crisan, S., Campeanu, G., and Halmagean, L. 2008. Study of *Momordica charantia L.* species grown on the specific conditions of Romania's western part. J. Veg. Grow. 11(3): 425-428.
8. Eghball, B., Ginting, D., and Gilley, JE. 2004. Residual effects of manure and compost applications on corn production and soil properties. Agro. J. 96: 442-447.
9. Fidrianny, I., Ramadhani, S., and Komar, R. 2015. In vitro Antioxidant capacities of three organs of bitter gourd (*Momordica charantia L.*) Form west Java-Indonesia using DPPH and FRAP assays. Inter. J. Pharma. Phyto. Res. 7(5): 1034-1041.
10. Gajalakshmi, S., and Abbasi, S.A. 2002. Effect of the application of water hyacinth compost and vermicompost on the growth and flowering of *Crossandra undulaefolia* and on several vegetables. Biotech. 85: 197-199.
11. Glick, B.R. 2003. Plant growth promoting bacteria. PP. 436-454. In: Glick, B.R. and J.J. Pasternak (Eds.), Molecular Biology- Principles and Applications of Recombinant DNA, ASM Press, Washington, DC.

12. Hamaiel, A.F., Elboraie, E.L.A., and Elbiy, H.A. 2015. Effect of organic fertilization on growth, yield and quality om *Momordica charantia* under Damietta conditions. J. Plant Produc. Mansoura Univ. 6 (9): 1553-1570.
13. Heidari, M., and Mobaseri Moghadam, M. 2012. Effect of rate and time of nitrogen application on fruit yield and accumulation of nutrient elements in *Momordicacharantia*. J. Saudi Soc. Agri. Sci. 11(2): 129-133.
14. Kanesaki, Y., Suzuki, I., Allakhverdiev, S. I., Mikami, K., and Murata, N. 2002. Salt stress and hyperosmotic stress regulate the expression of different sets of genes in *Synechocystis* sp. PCC 6803. Biochem. Biophys. Res. Com. 290: 339-348.
15. Knudsen, D., Peterson, G. A., and Part, P. F. 1982. Lithium, sodium and potassium, pp. 225-246. In A. L. Page *et al.* (ed.) Methods of soil analysis. Part II, 2nd ed., Monograph No. 9, Am. Soc. Agron., Madision, Wisconsin.
16. Kusvuran, S. 2012. Effects of drought and salt stresses on growth, stomatal conductance, leaf water and osmotic potentials of melon genotypes (*Cucumis melo* L.). Afri. J. Agri. Res. 7(5): 775-781.
17. Lakhdar, A., Hafsi, C., Rabhi, M., Debez, A., Montemurro, F., Abdelly, C., Jedidi, N., and Ouerghi, Z. 2008. Application of municipal solid waste compost reduces the negative effects of saline water in *Hordeum maritimum* L. Bioresou. Tech. 99: 7160-7167.
18. Lawlor, D. W., and Cornic, G. 2002. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plant. Plant Cell & Environ. 25: 249-279.
19. Lindsay, W. L., and Norvell, W. A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. Soil Sci. Soc. Am. J. 42: 421-428.
20. Major, J., Lehmann, J., Rondon, M., and Goodale, C. 2010. Fate of soil□applied black carbon: downward migration, leaching and soil respiration. Glob. Change. Bio. 16: 1366-1379.
21. Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press. New York.
22. Medina, E., Paredets, C., Bustamante, M.A., Moral, R., and Moreno-Caselles, J. 2012. Relationships between soil physico-chemical and biological properties in a soil amended with spent mushroom substrate. Geoder. (173-174): 152-161.
23. Najafi, N., Mardomi, S., and Oustan, S. 2013. The effect of waterlogging sewage sludge and manure on selected macronutrients and sodium uptake by sunflower plant in a loamy sand soil. J. Water and Soil 26(3): 619-636. (In Persian with English abstract).
24. 2Olsen, S. R. C., Cole, V., Watanabe, F. S., and Dean, L. A. 1954. Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium bicarbonate. USDA Cir. 939, U.S. Government, Printing Office, Washington, DC.
25. Pan, G., Smith, P., and Pan, W. 2009. The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China. Agri. Eco. Environ. 129(1-3): 344-348.
26. Rajkovich, S., Enders, A., Hanley, K., Hyland, C., Zimmerman, A. R., and Lehmann, J. 2012. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. Bio. Ferti. Soils. 48(3): 271-284.
27. Raman, A., and Lau, C. 1996. Antidiabetic Properties and Phytochemistry *Momordica charantia* (Cucurbitaceae), Review. Phytomed. 2: 349-362.
28. Ramegowda, V., and Senthil-Kumar, M. 2015. The interactive effects of simultaneous biotic and abiotic stresses on plants: Mechanistic understanding from drought and pathogen combination. J. Plant Physio. 176: 47- 54.
29. Rodrigues, J.G., Edvardo, P.M.J., Forner, B., and Angeles, F. 2010. Citrus rootstock response to water stress. Sci. Horti. 126: 95-102.

30. Sallaku, G., Babaj, I., Kaciu, S., and Balliu, A. 2009. The influence of vermicompost on plant growth characteristics of cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings under saline conditions. *J. Food Agric. Environ.* 7: 869-872.
31. Shaheen, A., Fatma, M., Rizk, A., and Singer, S.M. 2007. Growing onion plants without chemical fertilization. *Res. J. Agri. Bio. Sci.* 3(2): 95-104.
32. Shree, S., Regar, C.L., Ahmad, F., Singh, V.K., Kumari, R., and Kumari, A. 2018. Effect of organic and inorganic fertilizers on growth, yield and quality attributes of Hybrid bitter gourd (*Momordica charantia* L.). *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.* 7(4): 2256-2266.
33. Tsan, F.Y., Ngilah1, E.I., Gundadon1, H., Choo, C.Y., and Ahmad Nazarudin, M.R. 2018. Mango compost extract for enhancing growth and yield of *Momordica charantia*. *Sci. Lette.* 12: 1-15.
34. Urrestarazu, M., Salas, M.C., Padilla, M.I., Moreno, J., Elorrieta, M.A., and Arrasco, A. 2001. Evaluation of different compost from horticulture crop residues and their uses in greenhouse soilless cropping. *Act. Horticul.* 549: 147-152.
35. Vieira, R., TeKrony, D., and Egli, D. 1992. Effect of drought and defoliation stress in the field on soybean seed germination and vigor. *Crop Sci. Soc. Am.* 32: 471-475.
36. Walkely, A., and Black, I. A. 1934. An examination of method for determination of soil organic matter and proposed modification of chronic acid method. *Soil Sci.* 37: 29-38.
37. Yan, P.Y., and Murphy, R.J. 2008. Biodegraded cocopeat as a horticultural substrate. *Act. Horticul.* 517: 275-278.
38. Yoldas, F., Ceylan, S., Mordogan, N., and Esetlili, B.C. 2011. Effect of organic and inorganic fertilizers on yield and mineral content of onion (*Allium cepa* L.). *African J. Biotech.* 10(55): 11488-11492.

اثر کود اوره با پوشش پلیمری و اوره معمولی بر کارایی نیتروژن و عملکرد و اجزای عملکرد برنج

صابر حیدری¹، مجید نیکنژاد، سید محمد علوی سینی و مرتضی اشراقی نژاد

استادیار پژوهشی بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی جنوب: s.heydari@areeo.ac.ir
استان کرمان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، جیرفت، ایران، کارشناس ارشد گروه تکنولوژی زراعی مرکز ترویج و توسعه تکنولوژی
هراز، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، آمل، ایران؛ organic.farming.iran@gmail.com
استادیار پژوهشی بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی جنوب استان کرمان، سازمان تحقیقات، آموزش
و ترویج کشاورزی، جیرفت، ایران؛ m.alavis@areeo.ac.ir
استادیار پژوهشی بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی جنوب استان کرمان، سازمان تحقیقات، آموزش
و ترویج کشاورزی، جیرفت، ایران؛ m.eshraghi@areeo.ac.ir

دریافت: 1400/6/15 و پذیرش: 1400/9/29

چکیده

نیتروژن یکی از مهم‌ترین مواد مغذی در تولید محصول است اما کارایی آن در کود اوره خصوصاً در شالیزارها پایین است. بازدهی نیتروژن می‌تواند با کاهش انحلال اوره در خاک افزایش یابد. بنابراین پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر کود پلیمری اوره بر رشد و عملکرد برنج رقم طارم هاشمی انجام شد. به این منظور آزمایشی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در دو مکان اجرا شد. تیمارهای آزمایشی شامل T₀: شاهد، T₁: اوره معمولی (در دو تقسیط)، T₂: اوره پلیمری، T₃: اوره معمولی (30%) + پلیمری (70%) (استفاده بعد از نشاء) و T₄: اوره معمولی (30%) + پوشش دار (70%) اوره پلیمری در زمان نشاء و اوره معمولی در زمان خوشه‌دهی) بود. نتایج نشان داد که اثر مکان تنها بر صفات تعداد پنجه و تعداد خوشه معنی‌دار بود و سایر صفات تحت تأثیر این عامل قرار نگرفتند. ولی صفات تعداد پنجه، تعداد خوشه، ارتفاع گیاه، تعداد دانه، عملکرد زیست توده، عملکرد دانه، شاخص برداشت و کارایی بازیافت نیتروژن به طور معنی‌داری تحت تأثیر نوع کود اوره و روش مصرف آن قرار گرفتند. نتایج مقایسه میانگین نشان داد که حداکثر تعداد پنجه و خوشه در تیمار T₃ در دو مکان به ترتیب دارای میانگین 24/5 و 20/33 بود که نسبت به تیمار شاهد به ترتیب 52% و 47/5% افزایش نشان داد. میانگین عملکرد دانه در تیمار T₃ در دو مکان، نسبت به تیمارهای شاهد، T₁، T₂ و T₄ به ترتیب 43/1%، 17%، 18/1% و 18/1% بیشتر بود. برای رقم طارم هاشمی و در هر دو مکان مصرف اوره پوشش پلیمری به صورت مخلوط با اوره معمولی، در افزایش بازیافت نیتروژن و کاهش تلفات آن مؤثر بود اما اثربخشی این تیمار کودی در مزرعه با بافت شنی لوم بیشتر بود و می‌تواند مناسب‌ترین روش مصرف کود در این خاک‌ها باشد.

واژه‌های کلیدی: خاک شالیزاری، رقم طارم هاشمی، عملکرد دانه برنج، کارایی بازیافت نیتروژن

¹ نویسنده مسئول، آدرس: جیرفت، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی جنوب کرمان، بخش تحقیقات خاک و آب

مقدمه

اوره ($\text{NH}_2\text{-CO-NH}_2$) بیش از 50 درصد کود نیتروژن جهان را تشکیل می‌دهد و اغلب به عنوان تنها منبع نیتروژن توسط اکثر کشاورزان به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. (گیلبرت و همکاران، 2006). کارایی نیتروژن در کود اوره خصوصاً در شالیزارها با توجه به شرایط و روش‌های مصرف، حدود 30 تا 40 درصد و حتی کمتر گزارش شده است؛ این امر علاوه بر زیان اقتصادی، آلودگی زیست محیطی را نیز به دنبال خواهد داشت (چاودوری و خنیف، 2004). محمدیان و همکاران (2019) درصد بازیافت برنج طبق عرف کشاورز در شمال ایران را کمتر و حدود 50 درصد ذکر کردند. بازیافت نیتروژن می‌تواند با کاهش میزان انحلال اوره در خاک افزایش یابد، زیرا در زمانی که انحلال اوره با سرعت کمتر صورت می‌گیرد، کود نیتروژنه کمتری در معرض مکانیزم‌هایی مانند تصعید، نترات زدایی¹ و آبشویی قرار گرفته و جذب نیتروژن در گیاهان زراعی بهبود می‌یابد (کیران و همکاران، 2010).

از جمله روش‌هایی که برای کاهش تلفات نیتروژن و افزایش کارایی آن خصوصاً در مزارع برنج پیشنهاد شده‌اند، تقسیط کود اوره در مراحل مناسب رشد، استفاده از اوره پوشش‌دار و استفاده از مواد بازدارنده مانند اوره‌آز هستند. کودهای نیتروژنه کندرها² به دلیل دارا بودن پوشش‌هایی از جنس موم، پارافین، رزین یا گوگرد، قابلیت انحلال سریع اوره معمولی را ندارند و با مصرف این کودها خصوصاً در مزارع شالیزاری، تلفات ناشی از آبشویی یا تصعید کاهش می‌یابد (روسو، 1996). محبوب-خامی و همکاران (2004) در یک آزمایش گلدانی در برنج نشان دادند که اوره با پوشش گوگردی³ بازده زراعی، بازیافت مصرف کود نیتروژنه و عملکرد دانه را نسبت به اوره معمولی افزایش داد. آزادسازی نیتروژن از SCU بستگی به کیفیت پوشش دارد. نمونه‌های کود اوره

با پوشش معمول گوگرد، درصد شکست بالایی از پوشش گوگردی دارند که در این حالت بلافاصله اوره در تماس با آب قرار می‌گیرد (شویو، 2001). کودهای کنترل‌رها⁴ نیز یک رویکرد استراتژیک برای افزایش بهره‌وری کود از طریق هماهنگ‌سازی دسترسی مواد مغذی با نیاز گیاه و در نتیجه کاهش تلفات آن است (مورگان و همکاران، 2009). اوره پوشش‌داده شده با پلیمر⁵ یکی از انواع کودهای کنترل‌رها است. برخلاف کودهای کندرها، کودهای کنترل‌رها دارای الگوی رهاسازی قابل پیش‌بینی در طول زمان هستند و عموماً از رزین‌ها حرارتی برای تولید این کودها استفاده می‌شود. اگرچه فناوری‌های پوشش‌دهنده این کود در طی سالیان پیشرفت کرده است و الگوی رهاسازی دقیق‌تری یافته است اما همچنان میزان رهاسازی به نوع پوشش، ضخامت و دما و رطوبت محیط بستگی دارد (لیو و همکاران، 2014).

برخی از مطالعات نشان دادند که عملکرد محصول در استفاده از اوره پوشش داده شده با پلیمر، می‌تواند با توجه به نوع محصول، شرایط محیطی و فصل رشد، بالاتر، پایین‌تر و یا بدون تغییر نسبت به اوره معمولی باشد (بلکشاو و همکاران، 2011). وانگ و همکاران (2015) گزارش کردند که اوره با 6 درصد پوشش پلیمری سبب بهبود عملکرد و کارایی نیتروژن نسبت به تیمارهای با اوره معمول و در سه تقسیط شد. انواع مختلفی از کودهای کنترل‌رها در دسترس هستند، ولی با این حال گزارش‌های کمی در مورد کاربرد الاستومرهای پلی اورتان به عنوان مواد پوششی در کود اوره کنترل‌رها گزارش شده است (چاودوری و کندی، 2005). بورتولیتو-سانتوز و همکاران (2018) گزارش کردند که از پلی‌مرهای پلی‌اورتان بر پایه روغن‌های گیاهی (کرچک یا سویا) می‌توان برای سنتز پلیمرهای تجزیه‌پذیر برای کنترل رهاسازی اوره در خاک استفاده کرد. بنابراین استفاده از مواد پوشش‌دهنده ارزان و

¹ Denitrification

² Slow release

³ Sulfur Coated Urea, SCU

⁴ Controlled release fertilizer

⁵ Polymer Coated Urea, PCU

برای لایه پوششی، چندین بار تکرار شد تا نهایتاً یک لایه پوستی یکنواخت و ضخیم پلی اورتان بر روی گرانول اوره ایجاد گردد. ضخامت لایه پوششی در اوره به صورت درصد تعیین شد. به عنوان مثال در کود اوره پوششی با 5 درصد پلیمر، برای هر 100 گرم کود اوره، 5 گرم مواد پلیمری استفاده شد (لی و همکاران، 2012).

ارزیابی رهاسازی نیتروژن از کود پوشش‌دار

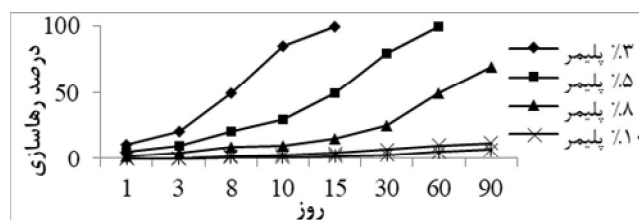
به منظور بررسی سرعت آزادسازی نیتروژن، 10 گرم از اوره پوشش داده شده با پلی اورتان در یک ظرف مهر و موم شده با 500 میلی لیتر آب قرار داده شد و در بازه‌های زمانی متفاوت نیتروژن حل شده در آب اندازه‌گیری شد. (یانگ و همکاران، 2012). درصد رهاسازی اوره از 4 نمونه کودی تهیه شده با مقادیر متفاوت پوشش پلیمری در شکل 1 نشان داده شده است. نمونه 1، 2، 3 و 4 هر کدام به ترتیب دارای درصد پلیمر 3، 5، 8 و 10 درصد بودند. با توجه به شکل 1، با افزایش پوشش پلیمری از 3 به 10 درصد، سرعت رهاسازی اوره کاهش یافت.

دوستدار محیط زیست یا بهبود تکنیک‌های پوشش‌دار کردن کود، که منجر به کاهش مصرف مواد پوششی می‌شود، می‌تواند روش مؤثری برای کاهش هزینه تولید کودهای کنترل رهش باشد. این تحقیق با هدف بررسی اثر کودپلمیری اوره بر رشد و عملکرد برنج انجام شد. برای این منظور، کود پلیمری با پوشش پلی اورتان در درصدها و نسبت‌های متفاوت تهیه شد و با بررسی خصوصیات کودهای پوشش داده شده، بهترین کود برای استفاده در مزرعه انتخاب و تأثیر آن بر عملکرد برنج در رقم طارم هاشمی در دو خاک سبک و سنگین شالیزاری مورد مقایسه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

آماده سازی اوره پوشش پلیمری

واکنش پوشش‌دار کردن گرانول اوره باید در ابزاری با حالت دوار انجام گیرد. در این روش مخلوط-های پلیول گیاهی و ایزوسیانات با استفاده از نازل‌هایی به صورت مه‌پاش بر روی گرانول‌های اوره در داخل استوانه دوار ریخته شدند. این عمل با توجه به ضخامت مورد نیاز



شکل 1- درصد رهاسازی اوره با درصدهای متفاوتی از مواد پلیمری

2 تا 3 ماهه برنج طارم هاشمی و اینکه بالاترین راندمان از مصرف کود نیتروژنی زمانی بدست می‌آید که مصرف آن در آخر پنجه‌زنی (حدود 25 روز بعد از نشاء) تا ظهور خوشه (حدود 50 روز بعد از نشاء) باشد (داوودی و همکاران، 2014) و با توجه به نتایج آزمایشات درصد رهاسازی کود پوشش پلیمری شده با 5 درصد ماده پلیمری که تقریباً بیشترین مقدار رهاسازی در فاصله زمانی مورد نظر را دارد. به منظور بررسی عملکرد

با توجه به شکل 1، درصد رهاسازی کود با زمان رابطه تقریباً نمایی دارد در روزهای اول سرعت پایین رهاسازی و در روزهای بعد افزایش سرعت رهاسازی مشاهده شد. با توجه به ضخامت پوشش گرانول اوره، مدت زمانی برای نفوذ آب در منافذ پلیمر و سپس انحلال کود و خروج آن با فرآیند پخشیدگی لازم است. در گرانول با 5 درصد پوشش در 10 روز ابتدایی، تنها 30 درصد از کود انحلال یافت. با توجه به دوره رشد

محصول از این کود در مزرعه به عنوان تیمار کود پوشش پلیمری استفاده شد.

آزمایش مزرعه‌ای

این تحقیق در سال زراعی 1396-97 در دو مزرعه شالیزاری تحت نظارت مرکز ترویج و توسعه تکنولوژی هراز در روستاهای ملاکلا و سوته از شهرستان

محمودآباد اجرا شد. قبل از انجام آزمایش، بافت خاک مزارع به روش هیدرومتری (گی و بادر، 1986) تعیین شد. برخی خصوصیات خاک مانند درصد شن، رس، اسیدیته، نیتروژن کل، کربن آلی، فسفر و پتاسیم قابل تبادل با روش‌های معمول آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد (اسپارک و همکاران، 1996) (جدول 1).

جدول 1- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

مکان	pH	OC (%)	N (%)	P (mg kg ⁻¹)	K (mg kg ⁻¹)	CEC (cmol kg ⁻¹)	Clay (g kg ⁻¹)	Sand (g kg ⁻¹)	بافت
ملاکلا	7/8	2/1	0/13	15	110	29	70	780	LS
سوته	7/5	2/8	0/22	11	180	47	320	320	CL

مزرعه ملاکلا در کلاس بافتی شنی لوم (بافت سبک) و مزرعه سوته در کلاس بافت لوم رسی (بافت سنگین) قرار داشت. از نظر فسفر در مزرعه ملاکلا در حدود حد بهینه (داوودی و همکاران، 2014) و مزرعه سوته کمتر از حد بهینه و از نظر پتاسیم هر دو مزرعه

کمتر از حد بهینه برای برنج (داوودی و همکاران، 2014) بودند. این پژوهش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با پنج تیمار به شرح جدول 2 با سه تکرار در دو مکان (روستای ملاکلا و سوته) به اجرا در آمد.

جدول 2- خصوصیات تیمارهای مورد استفاده

تیمار	نوع و مقدار کود اوره استفاده شده	زمان کاربرد کود
T ₀	بدون کود اوره	-
T ₁	اوره	70 درصد کود بعد از نشاء و 30 درصد باقیمانده به صورت سرک در زمان تشکیل خوشه-
T ₂	اوره پوشش پلیمری (PCU)	بعد از نشاء
T ₃	اوره 30%+اوره پوشش پلیمری 70% (T ₃)	بعد از نشاء
T ₄	اوره 30%+اوره پوشش پلیمری 70% (T ₄)	کل کود پلیمری در زمان نشاء و اوره معمولی به صورت سرک در زمان تشکیل خوشه

مساحت هر کرت 12 متر مربع (3×4 متر) بود. به منظور اجتناب از اختلاط کودها، برای هر کرت کانال آبیاری و زهکشی به صورت جداگانه طراحی شد. مرزهای هر کرت با پلاستیک نایلونی به عمق 30 سانتی-متر پوشانده شد. نشاهای برنج در مرحله 3 تا 4 برگگی به کرت‌ها منتقل شد. تعداد نشاء در هر کپه 3 عدد و فاصله کشت 25×30 سانتیمتر در نظر گرفته شد. کود فسفره از منبع سوپر فسفات تریپل به مقدار 100 و 150 کیلوگرم در هکتار و پتاسیم از منبع سولفات پتاسیم طی دو مرحله

(نصف به صورت پایه و نصف در مرحله حداکثر پنجه-زنی) به مقدار 250 و 200 کیلوگرم در هکتار به ترتیب در مزارع ملاکلا و سوته مصرف شد. با توجه به دستورالعمل موسسه تحقیقات خاک و آب (داوودی و همکاران، 2014) در مورد مقدار کود اوره توصیه شده با توجه به درصد کربن آلی خاک، در همه کرت‌ها مصرف کود اوره معمولی یا پوشش پلیمری بر اساس مقدار 46 کیلوگرم نیتروژن معادل 100 کیلوگرم اوره در هکتار بود. رقم برنج مورد مطالعه نیز رقم طارم هاشمی بود.

ارتفاع گیاه، تعداد پنجه و خوشه در هر کپه

با توجه به جدول 3، ارتفاع گیاه تحت تأثیر معنی‌دار نوع کود اوره و روش مصرف آن در سطح احتمال 1 درصد قرار گرفت. ارتفاع گیاه در تیمار T3 با مقدار 151/23 اختلاف معنی‌داری با سایر تیمارها داشت و در گروه a قرار گرفت (جدول 5). اختلاف تعداد پنجه و خوشه در هر کپه، در درون تیمارها و بین دو خاک در سطح احتمال 1 درصد معنی‌دار بود. همچنین در برهمکنش بین تیمار و نوع خاک، این شاخص‌ها در سطح احتمال 5 درصد معنی‌دار بودند (جدول 3). محمدی و همکاران (2018) بیان داشتند کودهای کندرها موجب استفاده بهتر عناصر غذایی شده که این ویژگی ارتباط نزدیکی با همزمانی رهاسازی عناصر و مقدار نیاز گیاه دارد و سبب گسترش سطح برگ، افزایش ظرفیت فتوسنتزی گیاه و در نهایت موجب افزایش رشد رویشی گیاه می‌شود. در برهمکنش بین خاک و تیمارهای کودی، تعداد پنجه در خاک‌های شماره 1 و 2 به ترتیب 56 و 47/5 درصد در تیمار T3 نسبت به شاهد افزایش نشان داد (جدول 6).

همچنین حداکثر تعداد خوشه در هر کپه در خاک شماره 1 و 2 به ترتیب 30/3 و 20/3 در تیمار T3 بود که نسبت به تیمار شاهد در دو خاک به ترتیب 67 و 44/3 درصد افزایش نشان می‌دهد. نتایج نشان داد با کاربرد همزمان اوره معمولی و اوره پوشش پلیمری در زمان کشت (تیمار T3) تعداد پنجه و تعداد خوشه در هر کپه در مقایسه با استفاده معمول از کود اوره (تیمار T1) به ترتیب 37/6 و 21/9 درصد افزایش یافت (جدول 5). این رفتار ناشی از افزایش دسترسی به نیتروژن توسط گیاه است که می‌تواند منجر به افزایش تمایز سلولی و تشکیل بافت شود. تحقیقات مشابه دیگری نیز به افزایش تعداد پنجه با افزایش نیتروژن اشاره داشتند (هایلی و همکاران، 2012، وویما و همکاران، 2012، فاجریا و کاروالو، 2014). البته در تحقیق حاضر، کود اوره افزایش نیافت، بلکه دسترسی به نیتروژن با توجه به کاهش سرعت رهاسازی آن از کود اوره افزایش یافت. مورو و همکاران

در طول اجرای آزمایش کنترل علف‌های هرز به صورت دستی و کنترل آفات به صورت شیمیایی و با استفاده از سم دیازینون رقیق شده در دو مرحله انجام گرفت. در پایان فصل، نمونه‌ها به صورت تصادفی با حذف اثرات حاشیه‌ای از هر کرت انتخاب شدند و صفات زیر برای هر تیمار آزمایشی مورد بررسی قرار گرفتند. ارتفاع بوته، طول خوشه، تعداد کل پنجه با شمارش و اندازه‌گیری برحسب 6 کپه در هر کرت به دست آمد. وزن هزار دانه با شمارش 10 نمونه صدتایی و توزین آن‌ها بر اساس رطوبت 14 درصد محاسبه شد. عملکرد دانه (شلتوک) و عملکرد زیست توده با برداشت بوته از پنج مترمربع هر کرت اندازه‌گیری شد. شاخص برداشت از تقسیم وزن خشک دانه به وزن خشک کل اندام رویشی و زایشی محاسبه گردید. بازیافت نیتروژن بر حسب درصد با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد.

$$NR = \left(\frac{D - E}{B} \right) \times 100$$

که در آن NR بازیافت نیتروژن بر حسب درصد، D میزان نیتروژن جذب شده توسط گیاه در تیمار کودی، E میزان نیتروژن جذب شده توسط گیاه در تیمار شاهد (بدون مصرف کود) و B مقدار نیتروژن مصرف شده می‌باشد. تجزیه‌های آماری با استفاده از نرم افزار SAS نسخه 9/4 انجام شد. مقایسات میانگین به روش توکی انجام شد. برای رسم نمودارها از نرم افزار اکسل استفاده شد.

نتایج و بحث

اجرای عملکرد برنج

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارهای مختلف در هر دو مکان مورد مطالعه، بر ارتفاع گیاه، تعداد پنجه، خوشه و تعداد دانه در هر کپه، عملکرد زیست توده و دانه، شاخص برداشت و بازیافت نیتروژن در سطح احتمال 0/01 معنی‌دار بود. برهمکنش تیمار و مکان بر صفات تعداد پنجه و تعداد خوشه در هر کپه و عملکرد دانه در سطح احتمال 0/05 معنی‌دار بود (جدول 3).

(2015) بیان داشتند از آنجا که تعداد پنجه‌های مؤثر عامل تعیین‌کننده مهمی در عملکرد نهایی گیاه است، می‌تواند یک شاخص بسیار مناسب برای بررسی اثرگذاری کود باشد. با استفاده از کود پوشش پلیمری و ترکیب آن با کود اوره معمولی (تیمار T3)، تعداد پنجه‌ها و خوشه‌های بارور به طور قابل توجهی افزایش یافت در حالیکه کاربرد کود پلیمری در زمان کشت و اوره به صورت سرک (تیمار T4) و کاربرد کود پلیمری به تنهایی در زمان کشت (تیمار T2) تفاوت معنی‌داری با کاربرد اوره معمولی به صورت عرف مزرعه (تیمار T1) نداشتند (جدول 5). این نتیجه نشان می‌دهد که کود پلیمری با توجه به الگوی رهاسازی نیتروژن در مراحل اولیه رشد ممکن است نتواند نیتروژن مورد نیاز گیاه را تأمین کند و کاربرد بخشی از نیتروژن به صورت اوره معمولی الزامی می‌باشد. کاربرد اوره معمولی به عنوان تنها کود مصرفی نیز احتمالاً به دلیل بازیافت کمتر و عدم تأمین نیتروژن مورد نیاز گیاه در مراحل پایانی رشد نیز می‌تواند منجر به عملکرد کمتر شود.

عملکرد دانه و عملکرد زیست توده

با توجه به جدول 3 در شاخص عملکرد دانه و زیست توده تفاوت معنی‌داری بین تیمارها در سطح احتمال 1 درصد وجود دارد، البته این شاخص‌ها در بین دو مکان مورد مطالعه اختلاف معنی‌داری نداشتند. همچنین در برهمکنش بین مکان‌ها و تیمارها، تنها شاخص عملکرد دانه در سطح احتمال 5 درصد دارای اختلاف معنی‌داری بود. عملکرد دانه در تیمارها به طور میانگین در دو مزرعه بین 3023 تا 5311 کیلوگرم بر هکتار در نوسان بود (جدول 5). بیشترین میزان عملکرد دانه در تیمار T3 (کود اوره پلیمری و اوره معمولی به صورت مخلوط) به دست آمد. عملکرد دانه در تیمار T3 در دو مزرعه به صورت میانگین 43/1، 17، 18/1 و 18/1 درصد به ترتیب نسبت به تیمارهای شاهد، T1 (اوره معمولی به صورت تقسیط)، T2 (اوره پلیمری به تنهایی) و T4 (اوره پلیمری به صورت پایه و اوره معمولی به صورت تقسیط) بیشتر بود. با توجه به جدول 7، عملکرد دانه در تیمار T3 (کود اوره پلیمری و اوره معمولی به

صورت مخلوط و در زمان کشت) نسبت به تیمار T1 (اوره معمولی به صورت تقسیط و عرف منطقه) در مزرعه ملاکلا 29/7 درصد و در مزرعه سوته 11/5 درصد بیشتر بود. به نظر می‌رسد در خاک‌هایی که دارای بافت سبک هستند (ملاکلا) و امکان آبشویی اوره در آن بالا است؛ مصرف اوره به صورت پوشش داده شده با پلیمر و به صورت مخلوط با اوره، به دلیل کاهش سرعت هیدرولیز اوره و تلفات کمتر آن و در نتیجه استمرار تأمین نیاز نیتروژنه گیاه، می‌تواند نتایج مطلوب‌تری در افزایش عملکرد نسبت به خاک‌های دارای بافت سنگین‌تر (سوته) داشته باشد. موله تی و همکاران (1992) بیان داشتند که مصرف اوره با پوشش گوگردی و یا مصرف اوره معمولی در دو یا سه مرحله در خاک‌های شنی می‌تواند سبب افزایش عملکرد برنج شود. همچنین نتایج همبستگی صفات مورد مطالعه نشان داد که عملکرد دانه به مقدار بالایی تحت تأثیر تعداد پنجه، تعداد خوشه و تعداد دانه در هر کپه بود، چراکه هر یک از این عوامل به ترتیب دارای همبستگی 89، 88 و 99 درصدی با عملکرد دانه بودند (جدول 8). به نظر می‌رسد تحت شرایط پلیمری شدن کود اوره، فراهمی نیتروژن مورد نیاز گیاه برنج در مراحل مختلف رشد افزایش یافته و زمینه مناسبی برای تولید پنجه‌های بارور ایجاد کرده که در نهایت این پنجه‌ها، افزایش عملکرد زیست توده و دانه را به دنبال خواهند داشت. عملکرد بالاتر برنج در تیمار T3 می‌تواند به عرضه مناسب نیتروژن از کود اوره پوشش داده شده با مواد پلیمری در مدت زمان طولانی تر نسبت داده شود (ویاس و همکاران، 1991).

جذب و راندمان بازیافت نیتروژن

راندمان بازیافت نشان می‌دهد که چه مقدار از نیتروژن مصرف شده به وسیله محصول، بازیافت و جذب شده است. تأثیر تیمارها بر جذب و درصد بازیافت نیتروژن در سطح 1 درصد معنی‌دار بود؛ اما برهمکنش بین خاک و تیمار اثر معنی‌داری بر آن نداشت (جدول 3). نتایج نشان داد که عامل تعیین‌کننده در میزان جذب و بازیافت نیتروژن نوع کود بوده و نوع خاک تأثیری در میزان جذب

جدول 3- تجزیه واریانس مرکب اثر تیمارهای کودی در دو خاک مورد مطالعه

میانگین مربعات												
منابع تغییرات	درجه آزادی	تعداد پنجه	تعداد خوشه در هر کپه	ارتفاع گیاه	طول خوشه	تعداد دانه در هر کپه	وزن هزار دانه	عملکرد زیست توده	عملکرد دانه	شاخص برداشت	جذب نیتروژن	باز یافت نیتروژن
مکان	1	128/13**	90/13**	14/15 ^{ns}	0/34 ^{ns}	4320 ^{ns}	0/05 ^{ns}	1574833/41 ^{ns}	89216/53 ^{ns}	0/02 ^{ns}	8/99 ^{ns}	4/03 ^{ns}
تکرار در مکان	4	2/44	1/03	7/36	0/54	19341/27	0/83	592926/41	33746/27	9/23	25/98	5/13
تیمار	4	123/8**	76/12**	39/66**	0/09 ^{ns}	630614/87**	0/21 ^{ns}	23379164/88**	4004609/78**	16/27*	805/74**	3778/12**
تیمار×مکان	4	22/97*	11/88*	11/63 ^{ns}	0/04 ^{ns}	44086/67 ^{ns}	0/02 ^{ns}	566003/17 ^{ns}	215599/28*	6/04 ^{ns}	2/94 ^{ns}	14/12 ^{ns}
خطا	16	2/73	1/33	8/66	0/97	12189/26	0/52	200955/60	46077/93	5/81	5/06	4/93
CV(%)		8/88	6/96	2/01	4/11	6/54	2/60	3/41	5/00	7/15	2/29	4/72

* و ** به ترتیب معنی داری در سطح احتمال 5 و 1 درصد

جدول 4- مقایسه میانگین اثر مکان آزمایش بر اجزای عملکرد برنج

میانگین											
تعداد پنجه	تعداد خوشه در هر کپه	ارتفاع گیاه	طول خوشه	تعداد دانه در هر کپه	وزن هزار دانه	عملکرد زیست توده	عملکرد دانه	شاخص برداشت	جذب نیتروژن	باز یافت نیتروژن	
		cm	cm		gr	Kg/ha	Kg/ha		Kg/ha	%	
16/53b	14/8b	146/08a	22/72a	1730/53a	27/68a	12914/00b	4235/27a	32/57a	97/65a	54/59a	ملاکلا
20/67a	18/27a	147/45a	22/51a	1754/53a	27/76a	13372/20a	4344/33a	32/51a	98/74a	55/55a	سوته

وجود حروف مشابه نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار در سطح احتمال 5 درصد است

جدول 5- مقایسه میانگین اثر تیمارهای کودی بر اجزای عملکرد برنج

میانگین									
تیمار	تعداد پنجه	تعداد خوشه در هر کپه	ارتفاع گیاه	تعداد دانه در هر کپه	عملکرد زیست توده	عملکرد دانه	شاخص برداشت	جذب نیتروژن	بازیافت نیتروژن
			cm		Kg/ha	Kg/ha		Kg/ha	%
T ₀	11/83c	10/67c	144/6b	1237c	9832/10d	3023c	30/86b	77/86c	-
T ₁	17/83b	16/67b	145/82b	1783/33b	13851/40b	4411b	31/99b	102/49b	53/33b
T ₂	19/5b	17/5b	146/13b	1772/67b	13678/50bc	4352/70b	31/80b	102/57b	53/50b
T ₃	24/5a	20/33a	151/23a	2144a	15098/20a	5310/80a	35/19a	107/02a	63/17a
T ₄	19/33b	17/5b	146/07b	1775/67b	13255/40c	4351/50b	32/85ab	101/04b	50/17c

وجود حروف مشابه نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار در سطح احتمال 5 درصد است

جدول 6- مقایسه میانگین اثر متقابل دو خاک و تیمارهای مورد مطالعه در اجزای عملکرد برنج

تیمار	تعداد پنجه		تعداد خوشه در هر کپه		ارتفاع گیاه		طول خوشه		تعداد دانه در هر کپه		وزن هزار دانه	
	ملاکلا	سوته	ملاکلا	سوته	cm	ملاکلا	سوته	ملاکلا	سوته	ملاکلا	gr	سوته
T ₀	11e	12/6de	10d	11/3d	144/8a	144/4a	22/6a	22/5a	1213/7d	1260/3d	27/4a	27/5a
T ₁	15/6c	20b	14/6c	18/6b	144/3a	147/3a	22/6a	22/4a	1716/7c	1850bc	28/1a	27/9a
T ₂	16c	23a	15c	20ab	143/8a	148/4a	22/5a	22/4a	1752/7c	1792/7c	27/6a	27/7a
T ₃	25a	24a	30/3ab	20/3ab	152/4a	150/1a	22/9a	22/3a	2277/3a	2010/6b	27/5a	27/7a
T ₄	15cd	23/6a	14c	21a	145/1ab	147/1a	22/9a	22/7a	1692/3c	1859bc	27/7a	27/8a

جدول 7- مقایسه میانگین اثر متقابل دو خاک و تیمارهای مورد مطالعه در اجزای عملکرد برنج

تیمار	عملکرد زیست توده Kg/ha		عملکرد دانه Kg/ha		شاخص برداشت		جذب نیتروژن Kg/ha		بازیافت نیتروژن %	
	سوته	ملاکلا	سوته	ملاکلا	سوته	ملاکلا	سوته	ملاکلا	سوته	ملاکلا
T ₀	d10115/4	d9548/7	d2883/3	d3162/7	b30/3	b31/4	d77/4	d78/3	-	-
T ₁	ab14514/0	c13188/7	c4310/7	c4511/3	ab32/7	b31/3	c101/3	bc103/5	cd52	c54/7
T ₂	ab13772/7	c13584/3	c4176/7	c4528/7	b30/7	ab32/9	c101/5	103/6 abc	cd52	c55
T ₃	a14920/7	a15275/7	a5592	b5029/7	a36/6	ab33/8	a107/6	ab106/4	a65/3	a61
T ₄	c13538/3	c12972/5	c4213/7	c4489/3	ab32/5	ab33/2	c100/1	c101/9	d49	cd51/3

وجود حروف مشابه نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار در سطح احتمال 5 درصد است

جدول 8- ماتریس ضرایب همبستگی بین صفات مورد مطالعه

تعداد پنجه	تعداد خوشه در هر کپه	ارتفاع گیاه	طول خوشه	تعداد دانه در هر کپه	وزن هزار دانه	عملکرد زیست توده	شاخص برداشت	بازیافت نیتروژن	عملکرد دانه
1									
0/99**	0								
0/86**	0/78**	1							
-0/08	-0/11	0/01	1						
0/88**	0/88**	0/79**	0/14	1					
0/24	0/36	-0/07	-0/19	0/29	1				
0/85**	0/88**	0/68*	-0/03	0/96**	0/45	1			
0/76**	0/68*	0/84**	0/38	0/81**	0/02	0/65*	1		
0/79**	0/83**	0/56	0/06	0/93**	0/53	0/97**	0/61	1	
0/89**	0/88**	0/8**	0/11	0/99**	0/32	0/96**	0/83**	0/93**	1

* و ** به ترتیب معنی داری در سطح احتمال 5 و 1 درصد

حداکثر پنجه زنی و تشکیل مریستم خوشه)، می‌توان کارایی بازیافت نیتروژن را در این مراحل بهبود داد. شکری واحد و همکاران (2018) راندمان بازیافت نیتروژن در 22 مزرعه شالیزاری در استان گیلان را بین 30 تا 51 درصد گزارش کردند. در گزارش آنان راندمان پایین نیتروژن، در مزارع با غلظت نیتروژن و ماده آلی خاک کمتر از حد بحرانی اتفاق افتاد و زمانی تشدید گردید که مقدار نیتروژن در نظر گرفته شده برای تأمین نیاز ریش گیاه کم بود یا روش پایه مصرف کود مناسب نبود.

تجزیه رگرسیونی گام به گام

برای تعیین صفات مؤثر و درک بهتر از روابط بین صفات مستقل و عملکرد، با استفاده از تجزیه رگرسیونی گام به گام، متغیرهای مستقل مؤثر در عملکرد در این مطالعه مشخص شدند. تعداد دانه اولین و تنها صفتی بود که در مدل وارد شد و 98 درصد تغییرات را توجیه کرد (جدول 9). نتیجه نهایی رگرسیون گام به گام معادله خطی زیر بود.

$$Y = -48.53 + 2.49X$$

در رابطه بالا Y عملکرد و X تعداد دانه بودند.

در این آزمایش نتایج تجزیه رگرسیون نشان داد که تنها صفت تعداد دانه اثر مثبت و معنی‌داری بر عملکرد دانه دارد و سایر صفات اثر معنی‌داری در تعیین عملکرد دانه از خود نشان ندادند.

و بازیافت نیتروژن نداشت. بیشترین بازیافت در دو مزرعه مورد مطالعه، در تیمار T_3 (کود اوره پلیمری و اوره معمولی به صورت مخلوط) به دست آمد که به‌طور میانگین، به ترتیب 18/4 و 25/9 درصد نسبت به تیمار T_1 (اوره معمولی به صورت تقسیط) و T_4 (اوره پلیمری به صورت پایه و اوره معمولی به صورت تقسیط) که کمترین بازیافت را نشان دادند، اختلاف داشتند (جدول 5). بازیافت کمتر در تیمار T_1 می‌تواند به دلیل تلفات بیشتر نیتروژن در این روش مصرف باشد. احتمالاً با افزایش تعداد تقسیط می‌توان به بازیافت بالاتر نیتروژن دست یافت. اما بازیافت پایین در تیمار T_2 که با اوره پلیمری به تنهایی و تیمار T_4 که با اوره پلیمری به صورت پایه و اوره معمول به صورت تقسیط تغذیه شدند، احتمالاً به دلیل عدم دسترسی مناسب به نیتروژن در ابتدای دوره رشد برنج به دلیل کاهش انحلال کود بود. از آنجا که احتمالاً در تیمار T_3 ، اوره در مراحل مختلف رشد گیاه برنج در دسترس بوده و امکان جذب بیشتر آن برای گیاه فراهم بوده است، درصد بازیافت آن در گیاه افزایش یافت.

علی عباسی و همکاران (2010) گزارش کردند که کارایی مصرف نیتروژن زمانی که نیتروژن تنها در یک نوبت (مرحله نشاءکاری) مصرف شود، پایین می‌باشد با مصرف نیتروژن به مقدار مناسب و مطابق با نیازمندی گیاه در زمانی که تقاضای نیتروژن گیاه برنج بالا باشد (مراحل

جدول 9- رگرسیون گام به گام برای عملکرد

متغیرهای وارد شده به مدل	
-48/53	Intercept
2/49	تعداد دانه
0/98	R^2

نامگذاری کرد. این عامل نشان می‌دهد با توجه به این پژوهش برای افزایش مستقیم عملکرد، بایستی از این صفات بهره جست. عامل دوم بوسیله اثرات مثبت وزن هزار دانه و بازیافت نیتروژن مشخص می‌گردد. این عامل را می‌توان عامل بازیافت نیتروژن عنوان کرد. این نتیجه

در تجزیه به عامل‌ها دو عامل اول 84/99 درصد تغییرات داده‌ها را توجیه کردند (جدول 8). عامل اول به وسیله اثرات مثبت پنجه، تعداد خوشه، ارتفاع، تعداد دانه، عملکرد زیست توده، شاخص برداشت و عملکرد توضیح داده می‌شود، این عامل را می‌توان عامل صفات عملکردی

مناسب در جهت افزایش کارایی برنامه‌های زراعی کمک کننده باشد. محققین دیگری مانند احمد و همکاران (2012)، سینگ و همکاران (2004) همبستگی ژنتیکی و فنوتیپی معنی‌دار و مثبتی بین عملکرد و اجزای آن با استفاده از روش‌های تجزیه رگرسیونی، گزارش دادند.

نشان می‌دهد که برای افزایش وزن هزار دانه بایستی به صفت بازیافت نیتروژن توجه ویژه‌ای شود. یعنی با بهبود در این دو صفت می‌توان وزن هزار دانه را که یکی از اجزای عملکرد دانه می‌باشد، افزایش داد. بررسی ارتباط بین عملکرد و اجزای آن، می‌تواند برای انتخاب معیارهای

جدول 10- تجزیه عامل‌ها برای صفات مورد مطالعه

عامل مشترک	عامل دوم	عامل اول	
0/927	0/250	0/930	تعداد پنجه
0/909	0/390	0/87	تعداد خوشه در هر کپه
0/934	-0/110	0/960	ارتفاع گیاه
0/951	0/420	0/880	طول خوشه
0/829	0/910	-0/030	تعداد دانه در هر کپه
0/972	0/590	0/790	وزن هزار دانه
0/740	0/010	0/860	عملکرد زیست توده
0/952	0/700	0/680	شاخص برداشت
0/972	0/750	0/640	بازیافت نیتروژن
9/35	1/59	7/76	Variance
84/99	14/42	70/57	Variance (%)

نتیجه‌گیری نهایی

پلیمری بیشترین اثر را در افزایش پنجه مؤثر و تعداد دانه در هر کپه را که بر اساس نتایج تجزیه رگرسیونی 98 درصد از تغییرات عملکرد دانه را کنترل می‌کنند، داشت. تجزیه به عامل‌ها صفات را به دو دسته صفات عملکردی و بازیافت نیتروژن تقسیم نمود که همگی ارتباط مثبتی با عملکرد دارند. از این رو پیشنهاد می‌شود با توجه به ویژگی‌های خاک از جمله بافت خاک، استفاده از اوره پوشش داده شده با مواد پلیمری به صورت مخلوط با اوره معمولی در ارائه برنامه‌های توصیه کودی همواره مد نظر قرار گیرند.

مصرف کود اوره با پوشش پلیمری بعلاوه کود اوره معمولی در نسبت 70 به 30 درصد در ابتدای فصل رشد، سبب افزایش حدوداً 17 درصدی عملکرد برنج طارم هاشمی نسبت به مصرف اوره معمولی به صورت دو تقسیم شد. همچنین مشخص شد که در خاک‌های با بافت سبک استفاده از اوره پوشش پلیمری به صورت مخلوط با اوره معمول، در افزایش بازیافت نیتروژن و کاهش تلفات آن بسیار مؤثر است. همبستگی بالا و کاملاً معنی‌دار بین دو صفت کارایی بازیافت نیتروژن و عملکرد دانه موید این مطلب است. همچنین استفاده از کود

فهرست منابع:

1. Ahmed, H. M. and G. Sarwar. 2012. Genetic variability and interdependence of morphological traits in castorbean (*Ricinus communis* L) mutants. *Songklanakarin Journal of Science & Technology* 34(3).
2. Ali Abbasi, H. R., M. Kavousi, M. Esfehany and B. Rabiei. 2010. Effects of Split Application and Nitrogen Fertilizer Levels on N-use Efficiency in Rice (*Oryza sativa* L. Cv. Khazar). *Iranian Journal of Field Crop Science* 40(4): 1-11.

3. Blackshaw, R., X. Hao, R. Brandt, G. Clayton, K. Harker, J. O'Donovan, E. Johnson and C. Vera. 2011. Canola response to ESN and urea in a four-year no-till cropping system. *Agronomy Journal* 103(1): 92-99.
4. Bortoletto-Santos, R., G. G. F. Guimarães, V. Roncato, D. F. d. Cruz, W. L. Polito and C. Ribeiro. 2019. Biodegradable oil-based polymeric coatings on urea fertilizer: N release kinetic transformations of urea in soil. *Scientia Agricola* 77(1).
5. Choudhury, A. and I. Kennedy. 2005. Nitrogen fertilizer losses from rice soils and control of environmental pollution problems. *Communications in soil science and plant analysis* 36(11-12): 1625-1639.
6. Choudhury, A. and Y. Khanif. 2004. Effects of Nitrogen and Copper Fertilization on Rice Yield and Fertilizer Nitrogen Efficiency: A. Dr. Anwarul Haq 47(1): 50-55.
7. Davoodi, M. H., N. Davatgar, B. Amiri Larijani, F. Moshiri and M. M. Tehrani. 2014. Integrated soil fertility management and rice nutrition guidelines. Soil and Water Research Institute. (In Persian).
8. Fageria, N. and M. Carvalho. 2014. Comparison of conventional and polymer coated urea as nitrogen sources for lowland rice production. *Journal of plant nutrition* 37(8): 1358-1371.
9. Gee, G. W. and J. W. Bauder. 1986. Particle-size analysis 1, Soil Science Society of America, American Society of Agronomy.
10. Glibert, P. M., J. Harrison, C. Heil and S. Seitzinger. 2006. Escalating worldwide use of urea—a global change contributing to coastal eutrophication. *Biogeochemistry* 77(3): 441-463.
11. Haile, D., D. Nigussie and A. Ayana. 2012. Nitrogen use efficiency of bread wheat: Effects of nitrogen rate and time of application. *Journal of soil science and plant nutrition* 12(3): 389-410.
12. Kiran, J., Y. Khanif, H. Amminuddin and A. Anuar. 2010. Effects of controlled release urea on the yield and nitrogen nutrition of flooded rice. *Communications in soil science and plant analysis* 41(7): 811-819.
13. Li, Q., S. Wu, T. Ru, L. Wang, G. Xing and J. Wang. 2012. Synthesis and performance of polyurethane coated urea as slow/controlled release fertilizer. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 27(1): 126-129.
14. Liu, G., L. Zotarelli, Y. Li, D. Dinkins, Q. Wang and M. Ozores-Hampton. 2014. Controlled-release and slow-release fertilizers as nutrient management tools. USA: US Department of Agriculture, UF/IFAS Extension Service, University of Florida, IFAS
15. Mahboob Khomami, A., R. Kasraee, M. Moghaddam and M. Kavousi. 2004. The effect of urea, urea with sulfur coating and their application on grain yield, yield and nitrogen recovery in rice, variety Nemat. *Agricultural Science* 14(4): 107-114. (In Persian with English Abstract).
16. Mohammadi, L., S. Reezi, A. Mohammadkhani and R. Barzegar. 2018. Effect of slow-release fertilizer and humic acid application on New Guinea impatiens (*Impatiens haawkeri* "Divine Scarlet Red") transplant production quality. *Journal of Soil and Plant Interactions* 9(1): 13-23. (In Persian with English Abstract).
17. Mohammadian, M., A. R. Astaraie, A. Lakzian, H. Emami and M. Kavousi. 2019. Effect of nitrogen fertilizer source on grain yield and nitrogen use efficiency in rice (*Oryza sativa* L.) cv. Shiroudi. *Iranian Society of Crops and Plant Breeding Sciences* 21(1): 82-95. (In Persian with English Abstract).
18. Moletti, M., M. Giudici, B. Villa and G. Fiore. 1992. [Best cultural technique for Patna rice. Performance of six varieties cultivated in water and filled in sowing at different nitrogen doses [Lombardy]]. [Italian]. *Informatore Agrario*.

19. Morgan, K. T., K. E. Cushman and S. Sato. 2009. Release mechanisms for slow-and controlled-release fertilizers and strategies for their use in vegetable production. *HortTechnology* 19(1): 10-12.
20. Moro, B. M., I. R. Nuhu, E. Ato and B. Nathaniel. 2015. Effect of nitrogen rates on the growth and yield of three rice (*Oryza sativa* L.) varieties in rain-fed lowland in the forest agro-ecological zone of Ghana. *International Journal of Agricultural Science* 5(7): 878-885.
21. Russo, S. 1996. Rice yield as affected by the split method of N application and nitrification inhibitor DCD. *Cahiers Options Mediterraneennes* 15: 43-53.
22. Shaviv, A. 2001. Advances in controlled-release fertilizers.
23. Shokri Vahed, H., N. Davatgar, M. Kavooosi and S. Babazadeh. 2018. Evaluation of Rice Plant Response to Nitrogen, Phosphorus and Potassium Based on Site-Specific Nutrient Management (SSNM). *Journal Of Agricultural Science and Sustainable Production*. 28(1): 235-248. (In Persian with English Abstract).
24. Singh, S., S. Shukla and H. Yadav. 2004. Genetic studies and their implication to breed desired plant type in opium poppy (*Papaver somniferum* L.). *Genetika* 36(1): 69-81.
25. Sparks, D., A. Page, P. Helmke, R. Loeppert, P. Soltanpour, M. Tabatabai, C. Johnston and M. Sumner. 1996. Methods of soil analysis, Parts 2 and 3. Chemical analysis. Soil Science Society of America, Madison, WI.
26. Vyas, B., N. Godrej and K. Mistry. 1991. Development and evaluation of neem extract as a coating for urea fertilizer. *Fertiliser News* 36(2): 19-21.
27. Wang, S., X. Zhao, G. Xing, Y. Yang, M. Zhang and H. Chen. 2015. Improving grain yield and reducing N loss using polymer-coated urea in southeast China. *Agronomy for sustainable development* 35(3): 1103-1115.
28. Woyema, A., G. Bultosa and A. Taa. 2012. Effect of different nitrogen fertilizer rates on yield and yield related traits for seven durum wheat (*Triticum turgidum* L. var Durum) cultivars grown at Sinana, South Eastern Ethiopia. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development* 12(3): 6079-6094.
29. Yang, Y.-c., M. Zhang, Y. Li, X.-h. Fan and Y.-q. Geng. 2012. Improving the quality of polymer-coated urea with recycled plastic, proper additives, and large tablets. *Journal of agricultural and food chemistry* 60(45): 11229-11237.

برآورد ضریب شکل تابع هدایت هیدرولیکی مدل ون گنوختن - معلم با استفاده از ویژگی‌های زود یافت خاک

مجتبی شیاپی ارانی، بیژن قهرمان¹، حجت امامی و کامران داوری

کاندید دکتری آبیاری و زهکشی گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد؛ m.shiasi@mail.um.ac.ir

استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد؛ bijangh@um.ac.ir

استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد؛ hemami@um.ac.ir

استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد؛ k.davary@um.ac.ir

دریافت: 1400/5/31 و پذیرش: 1400/9/29

چکیده

برای پژوهش در زمینه‌ی جریان غیر اشباع در خاک، داشتن توابعی هیدرولیکی که در پیش‌بینی منحنی مشخصه و هدایت هیدرولیکی خاک دارای عملکرد مطلوبی باشند، برای پژوهش در زمینه‌ی جریان غیر اشباع در خاک ضروری است. در این پژوهش، ابتدا با انتخاب 8 خاک از بافت‌های مختلف بانک UNSODA، به بررسی صحت ضریب شکل بهینه خروجی از رابطه‌ی رطوبت - مکش (n) مدل ون گنوختن - معلم (VGM) در پیش‌بینی مقدار هدایت هیدرولیکی غیر اشباع در رطوبت‌های مختلف بررسی شد. با توجه به نتایج ضعیف حاصل از پیش‌بینی این مدل و نیاز به بررسی ضریب شکل جداگانه‌ای همچون ($\hat{n}$) برای رابطه‌ی هدایت هیدرولیکی - رطوبت ($K-\theta$) مدل VGM، 24 خاک از کلاس‌های بافتی مختلف UNSODA انتخاب و پارامترهای اندازه‌گیری شده‌ی آنها، به منظور یافتن تابع انتقالی مناسب در برآورد $\hat{n}$ به روش تحلیل رگرسیون مورد تحلیل قرار گرفت. رابطه‌ی ایجاد شده، ارتباط ($\hat{n}$) را با دو پارامتر رطوبت اشباع (θ_s) و مقدار ماده آلی خاک با دارا بودن ضریب همبستگی ($r=0.745$) و معنی‌داری آماری ($P\text{-value}=0.0005$) تایید نمود. همچنین، برای صحت‌سنجی تابع انتقالی ایجاد شده، مقدارهای ($K-\theta$) اندازه‌گیری شده برای 8 خاک منتخب بخش صحت‌سنجی با مقادیر محاسباتی K حاصل از ضریب شکل تابع انتقالی ($\hat{n}$) و نرم‌افزار RETC (n) مقایسه شد. مقدار شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات خطای مدل ($RMSE_n$) و ضریب کارآیی نش-ساتکلیف (NSE) نشان داد که استفاده از ضریب شکل تابع انتقالی ایجاد شده در این پژوهش در مقایسه با نرم‌افزار RETC، عملکرد مطلوب‌تری در پیش‌بینی مقادیر هدایت هیدرولیکی غیر اشباع داشت.

واژه‌های کلیدی: توابع انتقالی، جریان غیر اشباع، ضریب شکل، منحنی مشخصه رطوبت خاک

¹ نویسنده مسئول، آدرس: مشهد - دانشگاه فردوسی - دانشکده کشاورزی - گروه مهندسی آب

مقدمه

یکی از اساسی‌ترین مسائل در علوم مختلف مرتبط با خاک، شناسایی وضعیت جریان و رفتار آب در خاک است. بسته به وضعیت ذاتی هر خاک از نظر بافت و ساختمان، حرکت آب در آن متفاوت بوده و این موضوع می‌تواند بر پدیده‌ها و شرایط مختلف همچون کشاورزی، نشت از یک سد خاکی، استخراج از یک معدن و... اثرگذار باشد. عوامل پرشماری در تعیین نحوه‌ی رفتار جریان آب در خاک موثرند. پی بردن به وضعیت حرکت آب در خاک غیر اشباع، به داشتن آگاهی از منحنی مشخصه آب خاک و هدایت هیدرولیکی غیراشباع آن خاک بستگی دارد (تاماری و همکاران، 1993).

برای پیش‌بینی رفتار پدیده‌ای که با خاک مرتبط است، آگاهی از رفتار آب در خاک ضروری می‌باشد. متداول‌ترین روش شبیه‌سازی رفتار جریان آب در خاک غیر اشباع، استفاده از معادله ریچاردز (ریچاردز، 1931) است که در آن، حرکت آب در محیط غیرهمروند خاک، به صورت چند بعدی شبیه‌سازی می‌شود. معادله ریچاردز ترکیبی از معادلات دارسی و پیوستگی است که در حالت جریان یک‌بعدی، به صورت رابطه‌ی 1 نوشته می‌شود:

(1)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right)$$

که در آن، θ درصد رطوبت حجمی خاک، h مکش آب خاک، $K(h)$ هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک به عنوان تابعی از مکش، t زمان و z فاصله از سطح مرجع در عمق خاک می‌باشد.

برای حل این معادله، به جفت داده‌های مقادیر رطوبت حجمی و هدایت هیدرولیکی در دامنه‌ای از مکش‌های کم تا زیاد نیاز است. بر خلاف رطوبت خاک، اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی غیراشباع، علاوه بر نیاز به تجهیزات خاص، کاری سخت و زمان‌بر و برای مقیاس‌های بزرگ غیرعملی است (شپ و ون گنوختن، 2005). از این رو،

پژوهش‌گران همواره به دنبال یافتن و توسعه‌ی راهکارهای جایگزین روش اندازه‌گیری جهت برآورد پارامترهای معادله ریچاردز هستند.

مدل‌های فراوانی برای تخمین ورودی‌های لازم جهت حل معادله ریچاردز (مقادیر رطوبت و هدایت هیدرولیکی غیراشباع در مکش‌های مختلف خاک) توسعه یافته‌اند (بروکس و کوری، 1964؛ ون گنوختن و معلم، 1980؛ کوزوگی، 1996؛ وارا کای و همکاران، 2006؛ سونگ بو و همکاران، 2020). برای تخمین پارامترهای این مدل‌ها، روش‌های مختلفی وجود دارد که یکی از آنها، به کارگیری PTT^1 ها یا توابع انتقالی است. این مفهوم، نخستین بار به منظور بیان وابستگی بین منحنی مشخصه رطوبتی و منحنی هدایت هیدرولیکی با پارامترهای اساسی خاک ارائه گردید (بوما، 1989). این توابع قادر هستند برخی از پارامترهای دیر یافت خاک نظیر رطوبت یا هدایت هیدرولیکی را با استفاده از پارامترهای زود یافت همچون چگالی ظاهری، درصد ذرات معدنی، ماده آلی و... به کمک رابطه‌ی ریاضی مناسب تخمین بزنند.

دو نوع متمایز از توابع انتقالی وجود دارد. توابع انتقالی نقطه‌ای و پارامتریک. توابع انتقالی نقطه‌ای می‌توانند مقدار یک پارامتر را در نقطه پتانسیلی خاصی تخمین بزنند (پوکت و همکاران، 1985؛ کاستلینی و یوونو، 2019؛ حق‌وردی و همکاران، 1389). در حالی که توابع انتقالی پارامتریک، پارامترهای عملکرد را به نحوی تخمین می‌زنند که منعکس‌کننده‌ی وضعیت داده‌های مشاهداتی در طیف وسیعی از مکش‌های مختلف باشد (مک‌کوئن و همکاران، 1981؛ کوزبی و همکاران، 1984؛ وستن و ون گنوختن، 1989؛ وریکن و همکاران، 2010، کاستلینی و یوونو، 2019).

همچنین، برای استخراج و توسعه‌ی توابع انتقالی سه روش کلی وجود دارد. در روش اول، استخراج تابع با تکنیک‌های رگرسیون آماری انجام می‌گیرد و هدف، پیش‌بینی یک یا چند متغیر وابسته با استفاده از یک یا چند

¹ Pedotransfer Functions

که در آنها θ_s رطوبت اشباع خاک (حجمی)، θ_r رطوبت باقیمانده در پروفیل خاک (حجمی)، K_s هدایت آبی اشباع، n و α ضرایب تجربی معادله و l ، بعنوان پارامتر شکل و منعکس کننده اثر اغوجاج و اتصال منافذ بوده و مقدار بهینه آن بر اساس مطالعات انجام شده توسط تعدادی از پژوهش‌گران 0/5 گزارش شده است (معلم، 1976، شپ و همکاران، 1998).

در راستای یافتن روش‌های جایگزین اندازه‌گیری پارامترهای مدل VGM، وریکن و همکاران (1989) و همچنین وستن و همکاران (1999)، روابطی را به روش تحلیل رگرسیون، جهت تخمین پارامترهای θ_s ، θ_r ، n و α ارائه نمودند. همچنین، پژوهشی توسط وستن و همکاران (1999) به روش تحلیل رگرسیون بر روی داده‌های اندازه‌گیری شده زود یافت خاک جهت تخمین پارامترهای این مدل شامل θ_s ، n و α انجام شده است. همچنین، نرم‌افزار ROSETTA می‌تواند در صورت در دسترس بودن یک یا چند ویژگی خاک نظیر بافت، درصد ذرات، چگالی ظاهری، درصد رطوبت در نقاط پتانسیلی خاص و... پارامترهای خاک نظیر K_s ، θ_s ، θ_r ، n و α را به نحوی نسبتاً مناسب تخمین بزند (شپ و همکاران، 2001). با در اختیار داشتن مقادیر برآورد شده‌ی پارامترهای خاک، می‌توان منحنی رطوبتی خاک را بر پایه‌ی مدل‌های ون‌گونختن و بروکس - کوری و تابع هدایت هیدرولیکی غیراشباع را بر اساس مدل‌های بوردین و معلم با استفاده از نرم‌افزار RETC شبیه‌سازی نمود (ون‌گونختن، 1991؛ یاتس و همکاران، 1992). اما هنگامی که فقط داده‌های مشاهداتی مربوط به منحنی مشخصه در اختیار است، در برخی مواقع، RETC ویژگی‌های هیدرولیکی غیراشباع خاک را ضعیف تخمین می‌زند (شپ و همکاران، 2000؛ شپ و همکاران، 2001؛ شپ و ون‌گونختن، 2006؛ واراکوی و همکاران، 2008). با توجه به این ضعف، در پژوهشی که توسط شپ و همکاران (2000) بر روی 235 خاک انجام شد، روشی بر پایه‌ی شبکه‌های عصبی ارائه گردید که در آن، با منظور نمودن K_0 به جای K_s

متغیر مستقل است (وستن و همکاران، 1999؛ میناسنی و همکاران، 1999؛ مردون و همکاران، 2006). روش دوم شامل تکنیک‌های کاوش داده‌ها با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌باشد (شپ و همکاران، 1999؛ نمس و همکاران، 2006؛ بیکر و الیسون، 2008؛ حق‌وردی و همکاران، 1389). اگرچه توابع انتقالی حاصل از روش‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی، عملکرد به نسبت مطلوبی دارند، اما تغییرات اندک در داده‌های آموزشی این مدل‌ها، ممکن است باعث کاهش کارایی مدل شود (کارنی و کانینگهام، 1999). روش سوم توسعه یافته در سال‌های اخیر، به روش شبه پارامتریک عصبی مشهور است (حق‌وردی و همکاران، 2012؛ سینگ و همکاران، 2020). در این روش، توابع انتقالی علاوه بر نشان دادن عملکردی پیوسته از منحنی رطوبتی، نیازی به استفاده از معادلات نگهداشت آب خاک (همانند معادله ون‌گونختن) ندارد.

برکاربردترین مدل در بین مدل‌های ارائه شده برای برآورد پارامترهای مورد نیاز معادله ریچاردز، مدل ون‌گونختن - معلم (که در این مقاله به اختصار مدل VGM نامیده می‌شود) می‌باشد. به دلیل مطالعات فراوان انجام شده بر روی مدل VGM، این مدل به معیاری استاندارد برای محاسبه و مقایسه پارامترهای خاک تبدیل شده است (واراکوی و همکاران، 2008). در مدل VGM، از روابط 2 و 3 به ترتیب برای بیان وابستگی رطوبت به مکش و هدایت هیدرولیکی غیر اشباع به مکش استفاده می‌شود:

(2)

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$K(h) = K_s Se^l \left[1 - (1 - Se^{\frac{1}{m}})^m \right]^2, \quad m = 1 - \frac{1}{n}, \quad n > 1 \quad (4)$$

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

منظور گردید. به دلیل واجد شرایط نبودن تعداد خاک بیشتر (محدود بودن داده‌های اندازه‌گیری شده هدایت هیدرولیکی - رطوبت)، انتخاب تعداد خاک بیشتر میسر نبود. در انتخاب خاک‌ها شرایط ویژه‌ای به شرح زیر منظور شد:

الف - خاک‌ها از سه کلاس بافتی مختلف شن، لوم و رس و به تعداد مساوی از هر کلاس انتخاب شدند.

ب - از هر محل آزمایش، تنها یکی از نمونه‌ها انتخاب شد تا وجود دو یا چند نمونه خاک از یک محل، منعکس‌کننده خواص ویژه‌ای از خاک منطقه‌ی برداشت نمونه در برآورد ضریب شکل نباشد.

پ - خاک منتخب، دارای تعداد و توزیع مناسب جفت داده‌های رطوبت - مکش اندازه‌گیری شده، در محدوده‌ی رطوبت اشباع تا باقی‌مانده (مکش صفر تا 15000 سانتی‌متر) بود، کمترین تعداد مقادیر نقاط متناظر برداشت شده رطوبت - مکش در بین خاک‌های منتخب 8 و بیشترین تعداد برداشت 50 نقطه می‌باشد.

ت - خاک منتخب، دارای تعداد و توزیع مناسب جفت داده‌های هدایت هیدرولیکی - رطوبت در محدوده وسیعی از رطوبت (مکش) بود تا بتوان تابع انتقالی ایجاد شده را نیز بعنوان پیش‌گوی مطلوبی برای طیف وسیعی از مکش‌ها مورد استفاده قرار داد. کمترین تعداد مقادیر نقاط متناظر برداشت شده هدایت هیدرولیکی - رطوبت در بین خاک‌های منتخب 5 و بیشترین تعداد برداشت 50 نقطه می‌باشد.

ث - کلیه خاک‌های منتخب دارای پارامترهای اندازه‌گیری شده درصد رطوبت اشباع، چگالی ظاهری، درصد ذرات معدنی (شن، سیلت و رس) و مقدار ماده آلی به عنوان متغیرهای مستقل (پیش‌گو) جهت بررسی وجود رابطه‌ی رگرسیونی با متغیر وابسته $\hat{n}$ بودند.

ج - اطلاعات تمامی خاک‌ها از شاخه خشک شدن منحنی مشخصه (گذر از خیس به خشکی) برداشت گردید.

($K_0 < K_s$) و بهینه‌سازی هم‌زمان l و K_0 برآوردهای مطلوب‌تری از هدایت هیدرولیکی غیراشباع در مقایسه با مدل کلاسیک VGM ($l=0.5$)، حاصل شد و در مقیاس کلی نمونه‌ها، ($l=-1$) به عنوان مقدار بهینه گزارش گردید. همچنین، جهت بهبود برآورد هدایت هیدرولیکی غیراشباع در مدل VGM ، کونگ و همکاران (2016) تابعی مشابه با تابع $\theta-h$ ارائه کردند که در آن، ضریب شکل مجزایی برای تابع $K-\theta$ به صورت $m_2 = 1 - 1/n_2$ و $n_1 \neq n_2$ بر پایه‌ی برازش داده‌ها بر توابع VGM بدست آمد (n_1 ضریب شکل تابع $\theta-h$ و n_2 و m_2 ضریب شکل تابع $K-\theta$ مدل VGM). همچنین، لو و همکاران (2019)، با برازش داده‌های منحنی مشخصه 27 خاک و معیار قرار دادن شاخص آماری ریشه‌ی میانگین مربعات خطا، تابعی چند جمله‌ای را برای برآورد ضریب شکل تابع هدایت هیدرولیکی (n_2) مدل VGM ارائه نمودند که در آن n_2 تابعی از n_1 و α بود. از آنجا که ارتباط پارامترهای فیزیکی خاک در برآورد ضریب شکلی مجزا برای تابع $K-\theta$ مورد بررسی قرار نگرفته است، در این مطالعه دو هدف توسط پژوهش‌گران دنبال شده است. دنبال می‌شود. هدف اول مقایسه میزان تطابق ضرایب شکل (n) بدست آمده از رابطه‌ی $\theta-h$ و $K-\theta$ مدل VGM بر مبنای داده‌های اندازه‌گیری شده و بررسی امکان استفاده از ضریب شکل حاصل از داده‌های منحنی مشخصه برای بدست آوردن برآوردی مطلوب از هدایت هیدرولیکی غیر اشباع در مکش‌های مختلف است. هدف دوم، توسعه‌ی تابعی جهت برآورد دقیق‌تر ضریب شکل رابطه‌ی هدایت هیدرولیکی - رطوبت ($\hat{n}$) بر پایه روش تحلیل رگرسیون مد نظر می‌باشد.

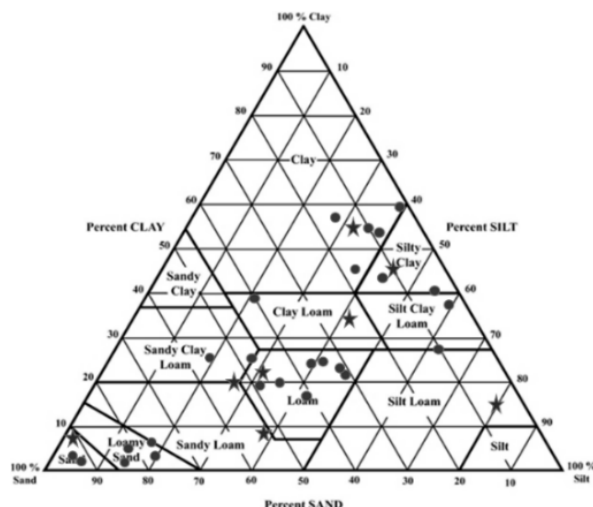
مواد و روش‌ها

جهت انجام این پژوهش از داده‌های بانک خاک $UNSODA^2$ استفاده شد. ابتدا، 32 خاک از کلاس‌های بافتی مختلف انتخاب شدند. از این تعداد، 24 خاک برای بخش توسعه‌ی روش و 8 خاک جهت صحت‌سنجی

¹ UNSaturated SOil hydraulic DATAbase

همچنین، در جدول شماره 1، مشخصات کلی خاک‌های منتخب از بانک خاک ارائه شده است.

شکل شماره 1، توزیع بافت‌های خاک‌های منتخب را بر روی مثلث خاک، بر اساس طبقه‌بندی USDA نشان می‌دهد.



شکل 1- توزیع بافت‌های منتخب بر روی مثلث بافت خاک. نقاط ستاره شکل: 8 خاک مورد استفاده جهت بررسی کارایی ضریب شکل نرم‌افزار RETC؛ نقاط دایره شکل: خاک‌های مورد استفاده در بخش واسنجی

جدول 1- ویژگی‌های کلی خاک‌های انتخابی از بانک خاک UNSODA

شن	سیلت	رس	ماده آلی	متغیر	
				چگالی ظاهری (kg/m ³)	رطوبت اشباع (m ³ /m ³)
40/1	32/7	27/2	2/129	1335	0/467
29/2	14/9	18/4	1/419	195	0/08
1/9	3/5	1/5	0/138	840	0/362
93/0	61/8	58/1	4/9	1640	0/667

(رابطه 2) ثبت گردید. همچنین، مقادیر اندازه‌گیری شده متناظر هدایت هیدرولیکی - رطوبت، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB برای معادله‌ی هدایت هیدرولیکی - رطوبت مدل VGM (رابطه‌ی 3) برازش داده شد و مقدار ضریب شکل بهینه ($\hat{n}$) به عنوان نتیجه‌ی رابطه‌ی هدایت هیدرولیکی - رطوبت استخراج گردید.

توسعه مدل و تحلیل رگرسیون جهت برآورد ($\hat{n}$) مدل رگرسیون خطی به صورت رابطه‌ی 5 تعریف می‌شود:

از بین خاک‌های منتخب، 8 خاک از بافت‌های مختلف (که در شکل شماره 1 با ستاره مشخص شده‌اند) به صورت تصادفی انتخاب شد تا فرض امکان استفاده از ضریب شکل n برای برآورد هدایت هیدرولیکی غیراشباع به عنوان هدف اول مطالعه بررسی شود. سپس، داده‌های اندازه‌گیری شده مربوط به هر خاک شامل θ_s ، θ_r و مقدارهای متناظر رطوبت - مکش دسته‌بندی و به عنوان ورودی به نرم‌افزار RETC وارد و ضریب شکل این مدل (n) به عنوان ضریب شکل رابطه‌ی رطوبت - مکش

(5)

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon_i \quad , \quad i = 1, 2, \dots, k$$

که در آن، Y_i متغیر وابسته، β_0 عرض از مبدا، β_i ضرایب مدل رگرسیون، ε_i خطای مدل رگرسیون و k تعداد متغیرهای مستقل است. برای بررسی آزمون معنی‌دار بودن مدل رگرسیون، فرضیه‌ی $H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$ در برابر حداقل یک $\beta_j \neq 0$ آزمون شده و سپس، مقدار محاسبه شده F^* با مقدار متناظر در جدول توزیع فیشر مقایسه بر اساس سطح اطمینان مورد نظر $(1 - \alpha)\%$ مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

به منظور بررسی نحوه‌ی ارتباط متغیرهای مستقل خاک با ضریب شکل معادله هدایت هیدرولیکی - مکش $(\hat{n})$ ، ویژگی‌های ذکر شده در جدول 1 برای خاک‌های منتخب دسته‌بندی و روش رگرسیون گام به گام در نرم‌افزار *MATLAB* اجرا شد. همچنین، از آنجا که در این پژوهش، نقش (n) نیز در برآورد $(\hat{n})$ مورد بررسی قرار می‌گیرد، مقادیر خروجی این پارامتر نیز به همراه دیگر متغیرهای مستقل خاک وارد شد تا ارتباط احتمالی آن با متغیر وابسته $(\hat{n})$ بررسی شود. پس از آن، دقت اولیه مدل با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون، ضریب تعیین و سایر پارامترهای آماری کنترل گردید.

صحت سنجی مدل

پس از توسعه هر مدل، بایستی میزان صحت نتایج آن مورد ارزیابی قرار گیرد. زمانی یک تابع انتقالی قابل اعتماد است که در هنگام صحت‌سنجی، از داده‌هایی خارج از موارد به کار گرفته شده در توسعه مدل استفاده شود (وستن و همکاران، 2001؛ پاتیل و همکاران، 2010). در این پژوهش، میزان صحت مدل رگرسیونی توسعه یافته بر روی 6 خاک منتخب بررسی شد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که شاخص آماری جذر میانگین مربعات خطا یا $RMSE^1$ یک شاخص موفق در بررسی میزان خطا می‌باشد (جانا و همکاران، 2011؛ پاتیل و همکاران، 2012). هرچه

مقدار این آماره به صفر نزدیکتر باشد، نشان‌دهنده عملکرد مطلوب‌تر مدل در شبیه‌سازی است. $RMSE$ به صورت رابطه‌ی 6 تعریف می‌شود:

(6)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\log_{10}(K_i) - \log_{10}(\hat{K}_i))^2}{m}}$$

که در آن، $\log_{10}(K_i)$ لگاریتم مقدار اندازه‌گیری شده هدایت هیدرولیکی در مکش i ام، $\log_{10}(\hat{K}_i)$ لگاریتم مقدار برآورد شده هدایت هیدرولیکی متناظر با مکش i ام و m ، تعداد مشاهدات می‌باشد.

همچنین، از ضریب بازدهی مدل نش‌ساتکلیف (NSE^2) که از آن در ارزیابی عملکرد مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده می‌شود، برای مقایسه کارایی نرم‌افزار *RETC* و مدل ایجاد شده در این پژوهش استفاده شد. مقدار این شاخص از منهای بی‌نهایت تا یک تغییر می‌کند و هرچه به یک نزدیک‌تر باشد، نشان از عملکرد بهتر مدل دارد (ریتز و همکاران، 2013). در رابطه‌ی 7، معادله‌ی ضریب نش‌ساتکلیف ارائه شده است.

(7)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (\log_{10}(K_i) - \log_{10}(\hat{K}_i))^2}{\sum_{i=1}^m (\log_{10}(K_i) - \log_{10}(\bar{K}))^2}$$

که در آن، $\log_{10}(K_i)$ لگاریتم مقدار اندازه‌گیری شده هدایت هیدرولیکی در مکش i ام، $\log_{10}(\hat{K}_i)$ لگاریتم مقدار برآورد شده هدایت هیدرولیکی متناظر با مکش i ام و $\log_{10}(\bar{K})$ ، لگاریتم متوسط مقدار مشاهدات می‌باشد.

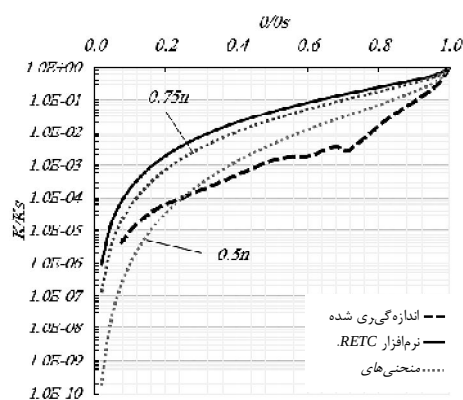
نتایج و بحث

برای بررسی میزان تطابق منحنی هدایت هیدرولیکی - رطوبت در دو وضعیت اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار *RETC*، مقدارهای هدایت هیدرولیکی نسبی در مقابل رطوبت نسبی برای 4 کلاس بافت مختلف در شکل شماره 2 رسم گردید. شکل‌ها نشان می‌دهند که

² Nash-Sutcliffe¹ Root Mean Square Error

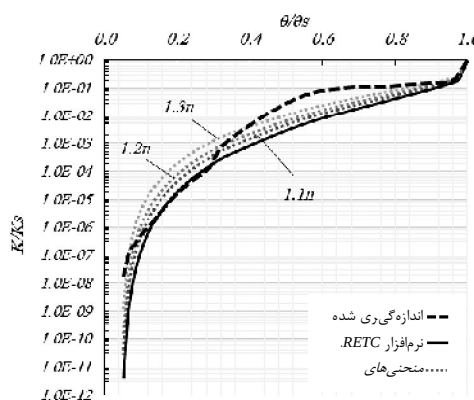
هیدرولیکی - رطوبت، دارای تطابق ظاهری بیشتر و تحذب نسبتاً همسان می‌باشند، با سنگین‌تر شدن بافت خاک، شکل منحنی هدایت هیدرولیکی از تحذب به تقعر تغییر وضعیت می‌دهد (شکل‌های 2 - ج و 2 - د) که دلیل آن، مربوط به ماهیت رفتاری خاک‌های دارای بافت سنگین‌تر برای حفظ رطوبت بیشتر با افزایش مکش می‌باشد.

انتخاب ضریب شکل خروجی از رابطه‌ی رطوبت - مکش برای برآورد منحنی هدایت هیدرولیکی - رطوبت، اختلاف (خطای) نسبتاً زیادی ایجاد نموده است. این اختلاف در بعضی خاک‌ها، به صورت بیش‌برآورد و در برخی دیگر به صورت کم‌برآورد مشهود است. علاوه بر این، بررسی ظاهری این چهار گراف نشان می‌دهد که در خاک‌های دارای بافت سبک‌تر (شکل‌های 2 - الف و 2 - ب)، منحنی‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده هدایت



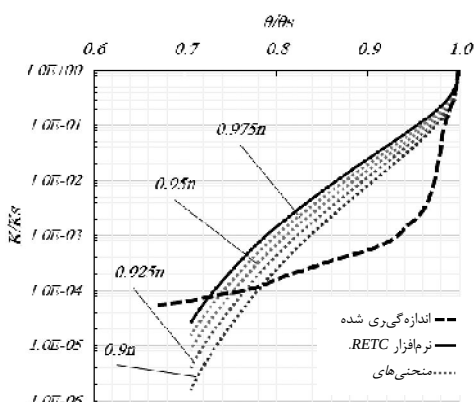
Sandy Loam - 4610

ب - 1



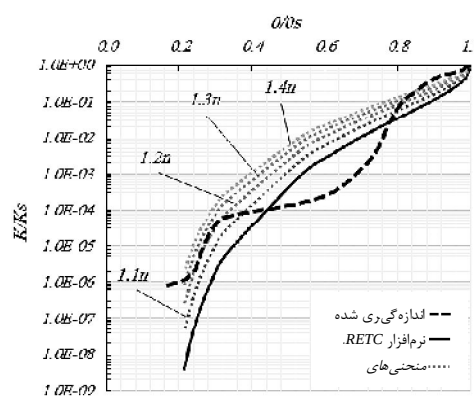
Sand - 4650

الف - 2



Clay - 4681

د - 2



Silt - 4670

ج - 2

شکل 2- نمودار مقادیر هدایت هیدرولیکی نسبی (K/K_s) در مقابل رطوبت نسبی (θ/θ_s) در دو وضعیت اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در مقیاس نیمه‌لگاریتمی برای 4 خاک از کلاس‌های بافتی مختلف. منحنی‌های خاکستری رنگ نقطه‌چین، تغییرات منحنی شبیه‌سازی شده را در جهت کاهش خطا، با افزایش (یا کاهش) مقدار n نشان می‌دهند.

منحنی‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده، به ضریبی اصلاحی همچون β نیاز است تا مقدار خطای بین دو منحنی را کمینه کند ($\hat{n} = \beta n$). برای مثال، در شکل 2 - الف که مربوط به خاک شنی می‌باشد، منحنی هدایت

در شکل 2، استفاده از ضریب شکل خروجی از رابطه‌ی رطوبت - مکش (n) در برآورد منحنی هدایت هیدرولیکی - رطوبت سبب شده تا نرم‌افزار RETC نتواند تخمین مطلوبی از شرایط واقعی ارائه دهد. برای تطابق بیشتر

هیدرولیکی - رطوبت برآورد شده با *RETC*، در بیشتر نقاط، در زیر منحنی مقادیر اندازه‌گیری شده قرار گرفته و نشان می‌دهد که به رغم آن که n رابطه‌ی رطوبت - مکش، حاصل بهترین برازش است، پیش‌بینی مطلوبی از هدایت هیدرولیکی غیر اشباع نداشته و باعث کم‌برآورد این خصوصیت شده است. لذا با اعمال ضریب اصلاحی β و افزایش مقدار n تا حدی معین، تطابق دو منحنی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده بیشتر و خطای برآورد کمتر می‌شود. در شکل 2 - د نیز که مربوط به خاک رسی است، ضریب شکل خروجی از رابطه‌ی رطوبت - مکش دارای بیش‌برآورد است. به طور کلی و با فرض پذیرش رابطه‌ی $\hat{n} = \beta n$ ، در وضعیت بیش‌برآورد n ، مقدار حدودی β بین 0/33 تا 1 و در حالت کم‌برآورد کردن n توسط رابطه رطوبت - مکش، مقدار حدودی β بین 1 تا 3/04 متغیر خواهد بود. این دامنه، با توجه به بازه‌ی به دست آمده برای n که در مطالعات پژوهش‌گران محدوده‌ی 1/05 تا 3/19 اعلام شده ارائه شده است (وروت و همکاران، 2001؛ تولر و همکاران، 2003؛ سیمونک و همکاران، 2006؛ گری و همکاران، 2010). همچنین، بررسی ظاهری چهار گراف رسم شده در شکل 2 نشان می‌دهد که خاک‌های با بافت سبک‌تر، فارغ از وجود خطا در بیش‌برآورد یا کم‌برآورد منحنی هدایت هیدرولیکی - رطوبت، دارای تطابق ظاهری بیشتر و تقعر همسان‌تر با منحنی اندازه‌گیری شده می‌باشند. نتایج برآورد نامطلوب منحنی هدایت هیدرولیکی بر پایه‌ی n در این بخش، نتایج حاصل از پژوهش وارا کاوی و همکاران (2008) را در خصوص عملکرد ضعیف نرم‌افزار *RETC* در برخی موارد تأیید می‌نماید.

به منظور بررسی بیشتر ضریب شکل تعریف شده برای رابطه‌ی هدایت هیدرولیکی - رطوبت ($\hat{n}$) و میزان تطابق آن با (n)، تعداد 8 خاک از کلاس‌های مختلف بافتی از بین خاک‌های برگزیده به صورت تصادفی

انتخاب و ضرایب n و $\hat{n}$ به ترتیب با نرم‌افزار *RETC* و نرم‌افزار *MATLAB* برای آنها محاسبه شد. بر مبنای نتایج حاصل از این محاسبات (جدول 2)، در 75 درصد نمونه خاک‌ها، مقدار متوسط ضریب شکل مربوط به معادله هدایت هیدرولیکی - رطوبت، از ضریب شکل خروجی معادله رطوبت - مکش بزرگتر است که این مورد، از کم‌برآورد کردن ضریب شکل توسط معادله رطوبت - مکش حکایت دارد. متوسط مقدار $\frac{n}{\hat{n}}$ در این 8 خاک حدود 0/82 می‌باشد (حدود 22 درصد کم‌برآورد). علاوه بر این اختلاف، ضریب شکل به دست آمده از رابطه‌ی رطوبت - مکش دارای دامنه‌ی تغییرات محدودتر بوده و مقدار متوسط آن بین اعداد 1 تا 2 نوسان می‌کند. در صورتی که این بازه برای رابطه‌ی هدایت هیدرولیکی - مکش، دارای تفرق بیشتری است. تا این مرحله، نتایج این پژوهش، با نتایج مطالعات وارا کاوی و همکاران (2008) در خصوص ضعف *RETC* در برآورد نامناسب هدایت هیدرولیکی غیر اشباع در شرایط موجود نبودن داده‌های اندازه‌گیری شده همخوانی دارد. در این بخش، نتایج تحلیل رگرسیون گام به گام در خصوص ارتباط متغیرهای مستقل و متغیر وابسته ارائه شده و به تحلیل ارقام حاصل پرداخته می‌شود.

ضرایب مدل رگرسیونی

برای بررسی و تفسیر، ابتدا مدل رگرسیونی بدست آمده به صورت رابطه‌ی 8 و سپس در جدول شماره 3، جزئیات مربوط به آن ارائه می‌گردد:

(8)

$$\hat{n} = 3.227 - 3.803(\theta_s) + 0.117(OM)$$

که در آن، $\hat{n}$ ضریب شکل معادله‌ی هدایت هیدرولیکی - رطوبت، θ_s مقدار رطوبت اشباع بر حسب اعشار و OM مقدار ماده آلی خاک بر حسب درصد می‌باشد.

جدول 2- متوسط ضرایب شکل محاسبه شده از معادلات رطوبت - مکش (نرم افزار RETC) و هدایت هیدرولیکی - رطوبت با استفاده از برازش داده‌های اندازه‌گیری شده برای 8 خاک منتخب

بافت خاک	شماره خاک	تعداد داده‌های رطوبت - مکش	تعداد داده‌های هدایت هیدرولیکی - رطوبت	ضریب شکل خروجی از نرم‌افزار RETC (n)	ضریب شکل خروجی از رابطه هدایت هیدرولیکی - رطوبت (n̄)	نسبت $\frac{n}{\bar{n}}$
شنی	4650	25	25	1/977	3/136	0/630
لومی شنی	1380	10	43	1/342	2/022	0/663
لومی رسی شنی	2552	10	6	1/409	1/266	1/113
لومی سیلتی	3360	11	18	1/291	1/354	0/953
لومی	2530	20	6	1/490	1/673	0/891
لومی رسی	3031	12	12	1/087	2/235	0/486
رسی سیلتی	3120	10	11	1/501	2/177	0/689
رسی	4681	25	25	1/487	1/307	1/138

جدول 3- ضرایب مدل رگرسیون پیشنهادی

متغیرهای مستقل	ضریب معادله	انحراف معیار	ضرایب استاندارد	سیگما
(ثابت معادله)	3/227	0/454		0/000
رطوبت اشباع	-3/803	1/044	-0/844	0/004
ماده آلی	0/117	0/049	0/552	0/036

ستون دوم و سوم (از راست)، ضریب هر یک از متغیرهای مستقل به همراه خطای استاندارد (انحراف معیار مربوط به آن) دیده می‌شود. همچنین، به منظور مشخص کردن درجه اهمیت هر یک از متغیرهای مستقل و نقش آن‌ها در مدل رگرسیونی، ضرایب استاندارد ارائه می‌شوند. هرچه مقدار ضریب استاندارد بزرگ‌تر باشد، نقش موثرتری در پیش‌بینی متغیر وابسته $\bar{n}$ خواهد داشت. بر اساس نتایج ستون ضرایب استاندارد، با توجه به این که مقدار این ضریب برای ماده آلی بزرگتر از مقدار آن برای رطوبت اشباع است، در برآورد ضریب $\bar{n}$ نقش پررنگ‌تری دارد. مقدار سیگما نیز مشخص می‌کند که یک متغیر در یک رابطه چقدر نقش دارد. همچنین، بر پایه‌ی نتایج، با توجه به این که مقدارهای سیگمای به دست آمده برای رطوبت اشباع و مقدار ماده آلی کمتر از 0/05 است، نشان از نقش مؤثر ضرایب در برآورد متغیر وابسته دارد.

بطور کلی، مقدار ماده آلی در بسیاری از توابع انتقالی برآورد کننده ضریب شکل n نقش داشته است (وستن و همکاران، 1999؛ کاستلینی و همکاران، 2019). با توجه به این که نرم‌افزار RETC در شرایط کمبود یا فقدان داده، از مدل ROSETTA بعنوان یک افزونه مبتنی بر روش شبکه‌های عصبی، برای پیش‌بینی پارامترهای مورد نیاز مدل VGM بهره می‌برد، می‌توان با بررسی بیشتر و تکیه بر همبستگی میان مقدار ماده آلی و مقدار ضریب شکل که در نتایج حاصل از این پژوهش و سایر مطالعات (که در بالا به آن اشاره شد) دیده می‌شود، نسبت به به‌روز رسانی و آموزش مجدد مدل اقدام نمود تا برآوردهای مناسب‌تری از پارامترهای خاک و در نتیجه روابط مطلوب‌تری بین پارامترهای هیدرولیکی حاصل گردد.

در ادامه، در جدول شماره 4، خلاصه اطلاعات مدل‌سازی در قالب پارامترهای آماری بیان شده است.

جدول 4- نتایج تحلیل رگرسیون گام به گام و مشخص شدن متغیرهای مستقل برای برآورد متغیر وابسته $\hat{n}$

شماره مدل	ضریب همبستگی پیرسون	ضریب تعیین	انحراف معیار برآورد	آماره <i>Durbin-Watson</i>
1	0/570	0/325	0/27534	
2	0/745	0/555	0/23359	2/05

1- متغیرهای پیشگو: (مقدار ثابت)، رطوبت اشباع

2- متغیرهای پیش گو: (مقدار ثابت)، رطوبت اشباع و مقدار ماده آلی

ناشناخته مانده، شاید بتوان آن را در عواملی دیگر همچون تغییرات ضریب l یا حتی مقدار خطای اندازه‌گیری Ks جستجو کرد.

برای اعتمادپذیری بیشتر مدل، نیاز است که آماره‌های دیگری نیز بررسی شوند. ستون آخر جدول 4 نیز مقدار آماره آزمون دوربین - واتسون که مربوط به خودهمبستگی باقی‌مانده‌ها می‌باشد را نشان می‌دهد. مقدار این آماره بین صفر و 4 بوده و هرچه به 2 نزدیک‌تر باشد، نشان از مستقل بودن باقی‌مانده‌ها دارد (واتسون و همکاران، 1951). مقدار 2/05 حاصل از این آزمون نشان می‌دهد که باقی‌مانده‌ها دارای خودهمبستگی نیستند. بنابراین، نتایج تحلیل‌ها قابل اعتمادتر خواهند بود. جهت بررسی بیشتر مدل، نتایج تحلیل واریانس مدل در جدول شماره 5 ارائه شده است.

بر پایه نتایج جدول شماره 4، دو مدل خروجی پیشنهاد داده شده است. در مقایسه دو مدل، هر مدلی که دارای ضریب همبستگی و ضریب تعیین بیشتر (نزدیک‌تر به یک) و مقدار انحراف معیار برآورد کمتری (نزدیک‌تر به صفر) باشد، ارجح است. به بیان دیگر، مدل رگرسیونی توانسته درصد بیشتری از تغییرات متغیر وابسته را تحت پوشش قرار داده و بیان کند. بنابراین مدل 2 با داشتن ضریب همبستگی ($r=0.745$) و ضریب تعیین ($R^2=0.555$) و انتخاب متغیرهای مستقل رطوبت اشباع و درصد مواد آلی، به عنوان متغیرهای پیش‌گو، پیش‌بینی کننده خوبی برای مقدار متغیر وابسته یا همان $\hat{n}$ بوده است. این بدان معناست که دو پارامتر θs و OM قادر به پیش‌بینی 55/5 درصد از تغییرات $\hat{n}$ بوده‌اند. از آنجا که در حدود 44/5 درصد عوامل موثر در برآورد این ضریب

جدول 5- نتایج آزمون تجزیه واریانس

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	آماره‌ی آزمون F^*	سیگما
رگرسیون	0/749	2	0/374	11/68	0/0005
خطا	0/600	19	0/032		
کل	1/349	21			

بزرگتر باشد، سیگما کوچکتر شده و مدل رگرسیونی مناسب‌تر خواهد بود. نتایج مربوط به F^* و سیگما، عملکرد مناسب مدل را نشان می‌دهد، $[F(2,19)=11.68, p=0.0005]$

این که آیا یک مدل می‌تواند به نحوی مناسب، مقدار متغیر مستقل را پیش‌بینی کند یا خیر، با تجزیه و تحلیل جدول واریانس مشخص می‌شود. آماره‌ی آزمون F^* ، نشانگر سهمی است که مدل رگرسیونی نسبت به باقی‌مانده‌ها در بیان پراکندگی کل دارد. هر چه این مقدار

صحت‌سنجی مدل

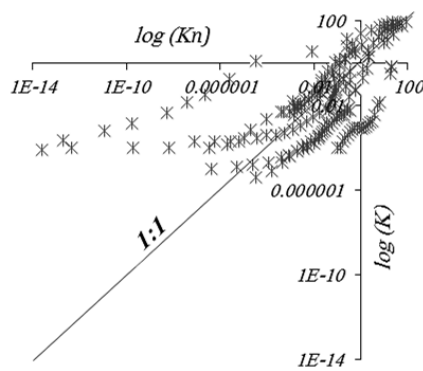
در جدول 6، مقدارهای خروجی ضریب شکل دو مدل به همراه خطای هدایت هیدرولیکی برآورد شده در رطوبت‌های مختلف بر اساس دو ضریب شکل n (خروجی نرم‌افزار RET_C) و $\hat{n}$ (خروجی مدل رگرسیونی) با مقدارهای اندازه‌گیری شده در قالب پارامتر آماری $RMSE$ برای 8 خاک بانک $UNSODA$ ارائه شده است. این مقدارها نشان می‌دهند که عملکرد مدل رگرسیونی در پیش‌بینی مقادیر هدایت هیدرولیکی غیر اشباع، در شش خاک بهتر و در دو خاک کمی ضعیف‌تر از RET_C بوده است. همچنین، مقدار خطا در مواردی که نرم‌افزار RET_C عملکرد بهتری نسبت به مدل رگرسیونی داشته اندک و قابل چشم‌پوشی است. هرچند، به منظور اثبات برتری یک روش بر دیگری، بایستی شاخص‌های کلی مطلوبیت عملکرد همچون $RMSE$ و NSE برای هر یک از روش‌ها محاسبه و مقایسه گردد.

جدول 6- مقایسه خطای هدایت هیدرولیکی برآورد شده توسط دو نرم‌افزار RET_C و مدل رگرسیونی با مقدارهای اندازه‌گیری شده برای خاک‌های منتخب بخش صحت‌سنجی

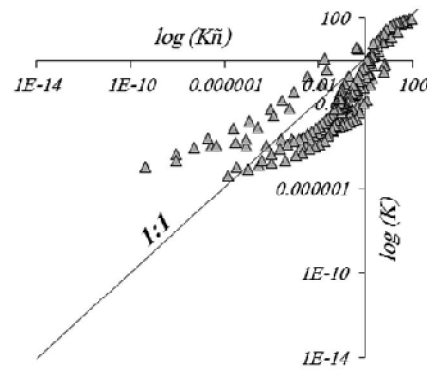
مقدار محاسباتی ضریب شکل بر اساس		RMSE (log(K)) (cm/day)		ردیف	شماره خاک	بافت	نرم افزار RETc (n)	مدل رگرسیونی (n̂)	مقایسه مقادیر واقعی با نرم افزار RETc	مقایسه مقادیر واقعی با مدل رگرسیونی
1	4651	شنی	1/415	2/039	6/4033	2/1780				
2	1380	لوم شنی	1/342	1/857	0/7910	0/7844				
3	4101	لوم	1/321	1/815	2/5308	1/4815				
4	4610	لوم	3/350	1/422	1/4591	0/9879				
5	2682	لوم رسی	1/925	1/395	0/2561	0/8804				
6	4670	سیلت	1/550	1/567	0/9766	0/9284				
7	4121	رس	1/464	1/226	2/7654	1/6959				
8	4681	رس	1/487	1/654	1/0695	1/2903				
					متوسط:	2/0190	1/2784			

مطلوب‌تری را در مقایسه با RET_C ارائه کرده است. در شکل 3 - ب نیز، عملکرد نسبتاً ضعیف RET_C در پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی غیراشباع در مکش‌های زیاد (رطوبت‌های کم)، حداقل در سه خاک از هشت خاک منتخب بخش صحت‌سنجی، مشهود است.

جهت ارزیابی بهتر نتایج بخش صحت‌سنجی، لگاریتم مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده هدایت هیدرولیکی برای 8 خاک منتخب، در مقابل مقدار متناظر به دست آمده از دو ضریب شکل n و $\hat{n}$ در شکل 3 رسم و با خط یک به یک مقایسه گردید. فاصله کمتر مقادیر هدایت هیدرولیکی حاصل از ضریب شکل مدل رگرسیونی با خط یک به یک، بیانگر آن است که این مدل، نتایج



3 - ب

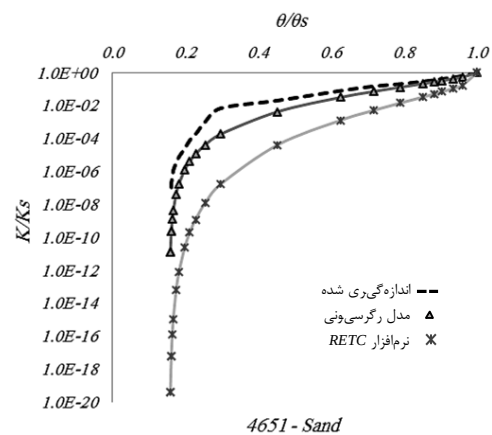
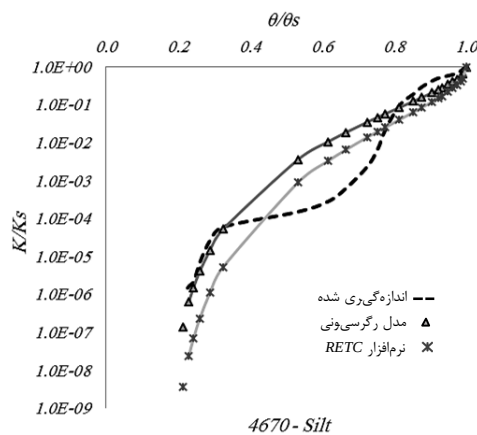


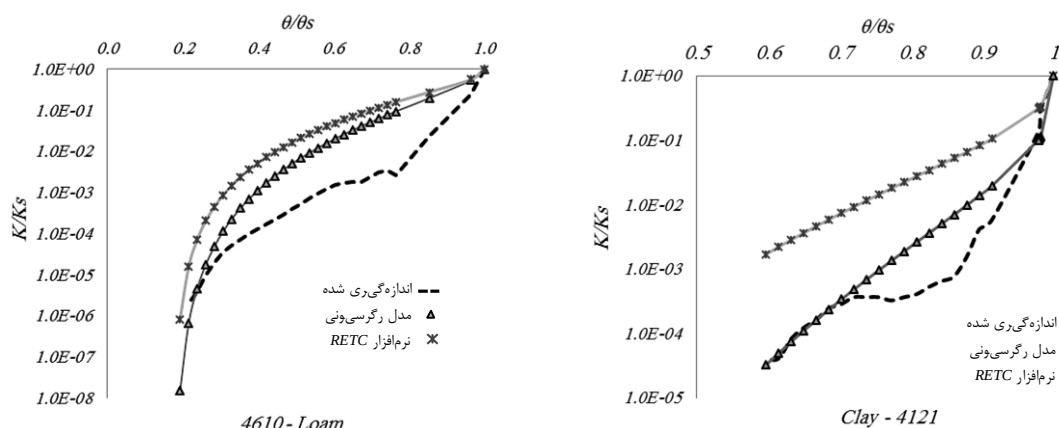
3 - الف

شکل 3- مقایسه لگاریتم مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده هدایت هیدرولیکی برای خاک‌های منتخب بخش صحت‌سنجی؛ شکل 3 - الف: مقایسه لگاریتم مقادیر هدایت هیدرولیکی مدل رگرسیونی $\log(K\hat{n})$ و اندازه‌گیری شده $\log(K)$ ؛ شکل 3 - ب: مقایسه لگاریتم مقادیر هدایت هیدرولیکی $\log(Kn)$ محاسبه شده با RETC و اندازه‌گیری شده $\log(K)$

سنگین‌تر شدن بافت خاک و افزایش نیروی نگه‌داشت آب، منجر به کند شدن تغییرات رطوبت در مقابل هدایت هیدرولیکی شده و شکل کلی منحنی اندازه‌گیری شده از حالت تحدب به تقعر گرایش پیدا کرده و تطابق منحنی را با مدل VGM کمتر می‌کند. این نتیجه، با نتایج حاصل از مطالعه‌ی ژانگ و همکاران (2016) همخوانی دارد.

در شکل 4، منحنی‌های هدایت هیدرولیکی - رطوبت به دست آمده از دو ضریب شکل حاصل از نرم‌افزار RETC و مدل رگرسیونی برای 4 خاک بخش صحت‌سنجی با مقدارهای اندازه‌گیری شده مقایسه شده است. نمودارها نشان می‌دهند که مدل ایجاد شده، در پیش‌بینی تغییرات هدایت هیدرولیکی، عملکرد بهتری را در مقایسه با نرم‌افزار RETC داشته است. همچنین،





شکل 4- مقایسه منحنی هدایت هیدرولیکی نسبی - رطوبت نسبی اندازه‌گیری شده با دو منحنی برآورد شده برای چهار خاک بخش صحت‌سنجی

باشد، عملکرد مدل ضعیف تلقی می‌شود. بر این اساس، مقدار ضریب NSE مدل ایجاد شده حاصل از این پژوهش، در محدوده‌ی قابل قبول قرار می‌گیرد. مقایسه مقدار $RMSE_M$ مربوط به دو روش نیز نشان می‌دهد که عملکرد مدل ایجاد شده، در پیش‌بینی مقادیر هدایت هیدرولیکی در مکش‌های مختلف مطلوب‌تر بوده و نسبت به $RETC$ دارای خطای کمتری بوده است. شاخص‌های آماری مطلوبیت دو روش در جدول شماره 8 ارائه شده است.

جهت ارزیابی کلی مدل ایجاد شده و مقایسه آن با نرم‌افزار $RETC$ ، مقادیر K به ترتیب بر پایه‌ی $\hat{n}$ و n برای 8 خاک بخش صحت‌سنجی محاسبه و مقدار جذر میانگین مربعات خطای مدل ($RMSE_M$) و ضریب کارایی نش‌ساتکلیف (NSE) برای هر دو روش محاسبه گردید. بر اساس معیار ارائه شده توسط موتوویلو و همکاران (1999)، چنانچه مقدار ضریب نش‌ساتکلیف برای یک مدل هیدرولوژیکی بین 0/36 و 0/75 باشد، عملکرد مدل رضایت‌بخش و چنانچه مقدار این شاخص کمتر از 0/36

جدول 8- مقایسه عملکرد کلی مدل ایجاد شده و نرم‌افزار $RETC$ در برآورد هدایت هیدرولیکی

بر اساس شاخص‌های $RMSE_M$ و NSE		
ضریب نش‌ساتکلیف	جذر میانگین مربعات خطا	
0/521	1/340	مدل ایجاد شده
-0/955	2/706	نرم‌افزار $RETC$

نتیجه‌گیری

$\hat{n}$ در 75 درصد از نمونه‌های انتخاب شده دارای کم‌برآورد می‌باشد. در ادامه، یک تابع انتقالی برای برآورد پارامتر ضریب شکل رابطه‌ی هدایت هیدرولیکی - رطوبت مدل VGM با استفاده از ویژگی‌های خاک به روش رگرسیون گام به گام ایجاد و صحت‌سنجی گردید و اعتبار آن در مقایسه با نرم‌افزار $RETC$ مورد بررسی قرار

در این مطالعه، مقادیر ضرایب شکل حاصل از برازش داده‌های اندازه‌گیری شده بر روابط $\theta-h$ و $\theta-K$ مدل VGM (n و $\hat{n}$) انجام و با یکدیگر مقایسه گردید. نتایج نشان داد که استفاده از ضریب شکل n حاصل از رابطه‌ی $\theta-h$ مدل VGM جهت برآورد مقادیر هدایت هیدرولیکی غیراشباع در مکش‌های مختلف در مقایسه با

مقدار ماده آلی زیاد با احتیاط صورت گیرد. تاریخچه و وضعیت فعلی توابع انتقالی، نیاز به توسعه و مطالعات منسجم در این خصوص را نشان می‌دهد. اندازه‌گیری ویژگی‌های مختلف خاک به صورت جفت، ارزش داده‌های اندازه‌گیری شده را افزایش داده و می‌تواند در توسعه توابع انتقالی نقش بیشتری داشته و به درک عملکرد رفتار خاک کمک نماید.

گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از ضریب شکل تابع رگرسیونی حاصل از مطالعه، در مقایسه با وضعیتی که از n بعنوان ضریب شکل معادله $K-\theta$ استفاده شود، برآوردهای مطلوب‌تری از هدایت هیدرولیکی غیراشباع مدل VGM ارائه می‌دهد. همچنین، در در مواردی که تابع رگرسیونی مغلوب $RETC$ شده، اختلاف خطا به نسبت کم بوده است. بایستی توجه داشت که عملکرد تابع رگرسیونی به دست آمده بایستی برای خاک‌های دارای

فهرست منابع:

1. حق وردی، امیر، قهرمان، بیژن، جلیبی، محمد، خشنود یزدی، علی اصغر، عربی، زهرا. 1389. مدل‌سازی منحنی مشخصه رطوبتی برخی خاک‌های ایران با استفاده از توابع انتقالی شبه پارامتریک شبکه عصبی. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب. شماره 1. صفحات 69-82.
2. Baker, L., and Ellison, D. 2008. Optimization of pedotransfer functions using an artificial neural network ensemble method. *Geoderma*. 144: 212-224.
3. Bouma, J. (1989). Using soil survey data for quantitative land evaluation. In B. A. Stewart (Ed.), *Advances in soil science* (Vol. 9, pp. 177-213).
4. Brooks R.H., and Corey A.T. 1964. Hydraulic properties of porous media. *Hydrological Paper no. 3*. Colorado State University, Fort Collins.
5. Carney, J. G. and Cuningham, P. 1999. The NeuralBAG algorithm: Optimizing generalization performance in bagged neural networks. 7th European Symposium on Artificial Neural Network. Bruges (Belgium).
6. Castellini, M., and Iovino, M. 2019. Pedotransfer functions for estimating soil water retention curve of Sicilian soils. *Archives of Agronomy and Soil Science*. V.65:1401-1416.
7. Cosby, B.J., Hornberger, G.M., Clapp, R.B., and Ginn, T.R. 1984. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water Resour. Res.* 20:682-690.
8. Dettmann U., Bechtold M., Frahm E., and Tiemeyer B., 2014. On the applicability of unimodal and bimodal van Genuchten-Mualem based models to peat and other organic soils under evaporation conditions. *J. Hydrol.*, 515: 103-115.
9. Durbin, J. and Watson, G. S. 1951. Testing for Serial Correlation in Least Squares Regression, II. *Biometrika*. 38 (1-2): 159-179.
10. Haghverdi, A.; Cornelis, W. M., Ghahraman, B. 2012. A pseudo-continuous neural network approach for developing water retention pedotransfer functions with limited data. *J. Hydrol.* 442-443, 46-54.
11. Hill, R.L. 1990. Long-term conventional and no-tillage effects on selected soil physical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 161-166.
12. Jana R. B., Mohanty, B. P. 2011. Enhancing PTFs with remotely sensed data for multi-scale soil water retention estimation. *J Hydrol.* 399: 201-211.
13. Kong, J., Shen, C., Luo, Z., Hua, G., & Zhao, H. (2016). Improvement of the hillslope-storage Boussinesq model by considering lateral flow in the unsaturated zone. *Water Resour. Res.* 52(4): 2965-2984.
14. Kosugi, K. 1996. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. *Water Resour. Res.* 32(121): 2697-2703.

15. Luo, Z., Kong, J., Shen, C., Lu, C., Hua, G., Zhao, Z., Zhao, H., Li, L. (2019). Evaluation and application of the modified van Genuchten function for unsaturated porous media, . J. Hydrol. 571 (2): 279–287.
16. McCuen, R.H., Rawls, W. J., and Brakensiek, D. L. 1981. Statistical analysis of the Brooks-Corey and the Green-Ampt parameters across soil textures. Water Resour. Res. 17:1005-1013.
17. Minasny, B., McBratney, A.B., and Bristow, K.L. 1999. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water retention curves. Geoderma. 93: 225-253.
18. Motovilov, Y.G., Gottschalk, L., Engeland, K. dan Rodhe, A. 1999. Validation of a Distributed Hydrological Model Against Spatial Observations. Elsevier Agricultural and Forest Meteorology. 98: 257-277.
19. Mualem, Y. 1976. New model for predicting hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res. 12:513–522.
20. Nemes, A., Rawls, W. J., Pachepsky, Y. A. 2006. Use of the Nonparametric Nearest Neighbor Approach to Estimate Soil Hydraulic Properties. Soil Sci. Soc. Am. J. 70:327–336.
21. Patil, N. G., Rajput, G. S., Nema, R. K., Singh, R. B. 2010. Predicting hydraulic properties of seasonally impounded soils. J Agr Sci Cambridge. 148: 159–170.
22. Patil, N. G., Chaturvedi, A. 2012. Pedotransfer functions based on nearest neighbor and neural networks approach to estimate available water capacity of shrink-swell soils. Indian J AgrSci. 82: 35–38.
23. Puckett, W. E., Dane, J.H. and Hajek, B. F. 1985. Physical and mineralogical data to determine soil hydraulic properties. Soil Sci. Soc. Am. J. 49:831–836.
24. Richards, L. A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous media, Physics, I, 318-333.
25. Ritter, A. and Muñoz-Carpena, R. 2013. Performance evaluation of hydrological models: statistical significance for reducing subjectivity in goodness of fit assessments. J. Hydrol. 480 (1): 33–45.
26. Schaap, M. G., Leij, F. J. 2000. Improved Prediction of Unsaturated Hydraulic Conductivity with the Mualem-van Genuchten Model. Soil Sci. Soc. Am. J. 64:843–851.
27. Schaap, M. G., Leij, F. J., and van Genuchten, M.Th. 2001. Rosetta: A Computer Program for Estimating Soil Hydraulic Parameters with Hierarchical Pedotransfer Functions. J. Hydrol. 251(3-4): 163-176.
28. Schaap, M. G., Leij, F. J., and van Genuchten, M.Th. 1998. Neural network analysis for hierarchical prediction of soil hydraulic properties. Soil Sci. Soc. Am. J. 62:847–855.
29. Schaap, M.G., Leij, F.J., and Van genuchten, M.Th. 1999. A bootstrap neural network approach to predict soil hydraulic parameters, P 1237-1250.
30. Schaap, M.G., Van Genuchten, M.T. 2005. A modified mualem-van genuchten formulation for improved description of the hydraulic conductivity near saturation. Vadose Zone Journal. Vol 5:27-34
31. Simunek, J., Van Genuchten, M. Th., and Sejna, M. 2006. The Hydrus Software Package for Simulating the Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably – Saturated Media. Technical Manual.
32. Singh, A., Haghverdi, A., Öztürk, H. S., Durner, W. 2020. Developing Pseudo Continuous Pedotransfer Functions for International Soils Measured with the Evaporation Method and the HYPROP System: I. The Soil Water Retention Curve. Water Journal. 12:1-17.
33. Tamari, S., Bruckler, L., Halbertsma, J., and Chadoeuf, J. 1993. A simple method for determining soil hydraulic properties in the laboratory. Soil Sci. Soc. Am. J. 57: 642-651.

34. Tuller, M. and Dani, Or. 2003. Hydraulic functions for swelling soils: pore scale considerations. *J Hydrol.* 272: 50-71.
35. Twarakavi, N. K. C., Saito, H., Simunek, J., van Genuchten M.Th. 2008. A New Approach to Estimate Soil Hydraulic Parameters Using Only Soil Water Retention Data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72: 471-479.
36. Van Genuchten M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:892-898.
37. Van Genuchten, M. Th., Lesch, S. M. and Yates, S. R. 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Version 1.0. U.S. Salinity Lab., Riverside, CA.
38. Vereecken, H., Maes, J., Feyen, J., Darius, P. 1989. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density and carbon content. *Soil Sci.* 148: 389-403.
39. Vrugt, J.A., Weerts, A.H. and Bouten, W. 2001. Information content of data for identifying soil hydraulic parameters from outflow experiments. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 19-27.
40. Wösten, J.H.M., and van Genuchten, M. Th. 1988. Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic functions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52:1762-1770.
41. Wösten, J.H.M., Lilly, A., Nemes, A. and Le Bas, C. 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma* 90:169-185.
42. Wösten, J.H.M., Pachepsky Y. A. and Rawls W. J. 2001. Pedotransfer functions: Bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *J Hydrol.* 251: 123-150.
43. Yates, S.R., van Genuchten, M. Th., Warrick, A.W. and Leij, F.J. 1992. Analysis of measured, predicted, and estimated hydraulic conductivity using the RETC computer program. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:347-354.
44. Zhang, Z., Wang, W., Yeh, T. J., Chen, L., Wang, Z., Duan, L., A. K., Gong, C., 2016 . Finite analytic method based on mixed-form Richards' equation for simulating water flow in vadose zone. *J Hydrol.* 537: 146 - 156.

کاربرد مدل‌های یادگیری ماشین در برآورد مکانی فسفر و پتاسیم خاک در بخشی از اراضی دشت آبیک

سید روح اله موسوی¹، فریدون سرمیدیان¹، محمود امید و پاتریک بോഗارت

دانشجوی دکتری گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران؛

r_mousavi@ut.ac.ir

استاد گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران؛

fsarmad@ut.ac.ir

استاد گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران؛

omid@ut.ac.ir

استاد دانشکده محیط زیست و علوم زمین، دانشگاه کاتولیک لوون، لوون، بلژیک؛ patrick.bogaert@uclouvain.be

دریافت: 1400/5/5 و پذیرش: 1400/9/29

چکیده

مدل‌سازی و نقشه‌برداری توزیع مکانی عناصر غذایی گیاه در خاک اهمیت ویژه‌ای در افزایش بهره‌وری بخش کشاورزی و نیل به توسعه پایدار دارد. این پژوهش باهدف تهیه نقشه‌های رقومی دو عنصر مغذی فسفر در دسترس (P_{av}) و پتاسیم قابل‌تبادل (K_{ex}) خاک با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین (MLM) شامل جنگل تصادفی (RF)، کوپیسست (CB)، رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) و k -نزدیک‌ترین همسایگی (k-NN) در دو عمق 0-15 و 15-30 سانتی‌متر در بخشی از اراضی دشت آبیک صورت پذیرفت. در راستای این هدف 278 خاک رخ مطالعاتی در منطقه مورد مطالعه حفر و پس از نمونه‌برداری از افق‌های موردنظر، خاک‌ها برای انجام آزمایش‌های موردنیاز به آزمایشگاه منتقل شد. ارزیابی کارایی MLM بر اساس روش اعتبارسنجی متقابل با 10-گام صورت پذیرفت. نتایج مدل‌سازی حاکی از آن است که مدل RF نسبت به سه مدل دیگر در برآورد مکانی K_{ex} و P_{av} در دو عمق مورد مطالعه دارای بیشترین میزان صحت و حداقل مقدار خطا بود. در عمق 15-0 سانتی‌متر طبق آماره‌های ضریب همبستگی تطابق (CCC) برای P_{av} مقادیر 0/70، 0/54، 0/38 (NRMSE) و 0/35، 0/48، 0/74، 0/84 و 0/80 به ترتیب توسط مدل‌های RF، CB، k-NN، SVR و برای K_{ex} در همین عمق مقادیر CCC برابر 0/72، 0/82، 0/70، 0/47، 0/70، 0/36، 0/34، 0/25 (NRMSE) و 0/45 به ترتیب توسط مدل‌های RF، CB، SVR، k-NN مشاهده گردید. نتایج مشابهی برای لایه 15-30 سانتی‌متر به دست آمد. اهمیت نسبی متغیرهای محیطی مؤید نقش مؤثرتر ویژگی‌های خاک نسبت به سایر متغیرهای محیطی در برآورد K_{ex} و P_{av} بود. با توجه به نقشه‌های پهنه‌بندی دو عنصر مغذی و غالب بودن کاربری زراعی در اراضی مورد مطالعه، بخش‌های عمده‌ای از منطقه بر اساس مقادیر استاندارد P_{av} دارای کمبود بود. بنا بر این، به‌منظور افزایش بهره‌وری و بهبود مدیریت حاصلخیزی خاک استفاده از کودهای فسفات با نظارت کارشناسان خاک توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: فسفر در دسترس، پتاسیم قابل‌تبادل، مدل‌سازی مکانی، نقشه‌برداری رقومی خاک

¹ نویسنده مسئول، آدرس: کرج، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، گروه علوم و مهندسی خاک.

مقدمه

دو عنصر فسفر در دسترس (P_{av}) و پتاسیم قابل تبادل (K_{ex}) به همراه نیتروژن کل (TN) به عنوان عناصر غذایی ماکرو خاک از مهم‌ترین شاخص‌های کیفیت خاک مطرح هستند (گائو و همکاران، 2021). از دیدگاه مکانی نقشه‌های توزیع عناصر غذایی خاک از اهمیت بالایی در مدیریت حاصلخیزی خاک و کنترل آلودگی‌های غیر نقطه‌ای برخوردار است (گائو و همکاران، 2021). در سال‌های اخیر از روش‌های زمین‌آماري¹ به عنوان یک ابزار برآورد کننده مکانی ویژگی‌های خاک به نحو گسترده‌ای استفاده شده است (کینگزلی و همکاران، 2019؛ بوگانوویک و همکاران، 2017). با این وجود، اغلب روش‌های زمین‌آماري به دلیل داشتن رویکرد خطی، به نحوه توزیع داده‌ها حساس و همچنین برای تهیه نیم-تغییرنماهای قابل اعتماد از ویژگی‌های خاک و برآورد آن‌ها به تعداد قابل توجهی از مشاهدات نیاز دارند (الیویر و بستر، 2014).

از دیدگاه مفهومی روش‌های یادگیری ماشین به عنوان بخشی از دانش هوش مصنوعی در عصر فناوری و اطلاعات به طور فزاینده‌ای در زمینه‌های مختلف علمی به ویژه نقشه برداری رقومی خاک² (DSM) توسعه یافته است (هنگل و همکاران، 2018، میناسنی و مک براتنی، 2016). یکی از کاربردهای عمده روش‌های یادگیری ماشین عمدتاً شناسایی و پیش‌بینی الگوهای موجود در چندین مجموعه داده بزرگ حاصل داده‌های ماهواره‌ای یا پارامترهای مشتق شده از مدل رقومی ارتفاع³ (DEM) است. این داده‌ها به عنوان کنترل‌کننده‌ها یا پیش‌بینی کننده‌های محیطی که نماینده فاکتورهای خاکسازي هستند نقش دارند (هنگل و همکاران، 2018؛ پادارین و همکاران، 2020). در همین راستا (مندز و همکاران، 2020) گزارش کرده‌اند که روش‌های یادگیری ماشین⁴ (MLM) برای تهیه

نقشه‌ی ویژگی‌های خاک در اراضی کشاورزی با تعداد نمونه کمتر نسبت به روش‌های زمین‌آماري کارتر هستند. از روش‌های MLM برای برآورد ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و هیدرولیکی خاک، بالأخص مدل‌های RF برای مدل‌سازی مکانی SOC (متین فر و همکاران، 2021؛ هنگل و همکاران، 2021) CB برای اجزا بافت خاک (ما و همکاران، 2017)، SVR در شوری خاک (تقی زاده و همکاران، 2021) و مدل k-NN برای چندین ویژگی‌های خاک سطحی (خالدیان و میلر، 2020) استفاده شده است، همچنین در پژوهش‌های اندکی از روش‌های MLM برای برآورد عناصر مغذی خاک استفاده شده است که در ایران و جهان می‌توان به مدل‌سازی نیتروژن کل خاک توسط (گائو همکاران، 2019؛ پارسایی و همکاران، 2021) اشاره نمود و عمده پژوهش‌های انجام شده معطوف به روش‌های زمین‌آماري یا درون‌یابی بوده‌اند که به تحقیقات (خزائی و همکاران، 1396؛ طاعنی و همکاران، 1399) می‌توان اشاره نمود.

در مطالعه‌ای که باهدف نقشه‌برداری رقومی تعدادی از ویژگی‌های خاک (فسفر در دسترس، پتاسیم قابل تبادل، شوری خاک، واکنش خاک، درصد ماده آلی، کلسیم و منیزیم محلول، آهن، روی، مس و منگنز قابل جذب خاک) در تایلند توسط (سریسامکی و همکاران، 2021) با استفاده از متغیرهای کمکی محیطی و مدل رگرسیون خطی چند متغیره⁵ (MLR) انجام گردید. محققین بیان داشتند که نقشه‌برداری رقومی خاک یک روش بسیار مناسب برای دستیابی به سطوح عناصر غذایی در منطقه مورد مطالعه هستند و متغیرهای کمکی محیطی از قبیل شاخص درخشندگی⁶، درجه اشباع⁷، شاخص تفاضلی نرمال شده آب⁸ و تنش رطوبتی⁹ مهم‌ترین پیش-بینی کننده‌های محیطی می‌باشند. همچنین سالیمانو و همکاران (2021) در بخشی از اراضی کشاورزی روسیه

⁵ Multiple linear regression⁶ Brightness⁷ Saturation degree⁸ Normalized difference water index⁹ Moisture stress¹ Geostatistical approaches² Digital soil mapping³ Digital elevation model⁴ Machine learning methods

طبق نقشه زمین‌شناسی منطقه مواد با منشأ آبرفتی واقع در پادگانه‌های جوان، مارن‌های قرمز با لایه‌های گچ و نمک، کفه‌های رسی و سیلتی مهم‌ترین مواد مادری تشکیل‌دهنده خاک‌های منطقه هست. خاک‌ها در 13 کلاس زیرگروه و 22 کلاس فامیل خاک قرار دارند (موسوی و همکاران، 1398) که در سطح تاکسونومیک زیرگروه، Calcixerepts Typic دارای بیشترین فراوانی در بین واحدهای خاک منطقه می‌باشد (اداره‌ی شناسایی خاک آمریکا، 2014).

عملیات صحرائی و تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی

556 نمونه از مجموع 278 خاک رخ حفرشده در منطقه مورد مطالعه با متوسط فاصله 1500 متر از دو عمق زراعی 0-15 و 30-15 سانتی‌متر بر اساس روش طبقه‌بندی تصادفی برداشت شد که موقعیت مکانی نقاط نمونه‌برداری در شکل (1) ارائه شده است. پس از نمونه‌برداری و انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه، هوا خشک نمودن و عبور آن‌ها از الک دو میلی‌متری غلظت فسفر در دسترس، (P_{av}) و پتاسیم تبادلی خاک (K_{ex}) به همراه سایر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بر اساس روش‌های استاندارد (کارتر و گرگوریچ، 2007) اندازه‌گیری شد. محدوده‌های مناسب برای طبقه‌بندی مقدار فسفر در دسترس و پتاسیم قابل‌تبادل در خاک‌های مورد مطالعه بر اساس مطالعه (خزائی و همکاران، 1396) تنظیم گردیده که به ترتیب به شرح جداول (1) و (2) است.

متغیرهای محیطی کمکی و اهمیت آن‌ها

در این تحقیق، متغیرهای محیطی کمکی شامل مشتقات اولیه و ثانویه مدل رقومی ارتفاع، داده‌های سنجش‌ازدور، پارامترهای اقلیمی، ویژگی‌های خاک، به همراه سه متغیر دسته‌بندی نقشه کلاس‌های خاک، زمین‌شناسی و کاربری اراضی بودند که بر اساس سه رویکرد دانش خاک‌شناس² به همراه دو روش نیمه‌خودکار³-نظارت‌نشده تجزیه مؤلفه‌های اصلی⁴ (PCA) و ضریب ضریب همبستگی پیرسون⁵ (r) صورت پذیرفت (کوهن و جانسون، 2013).

به بررسی تغییرات مکانی برخی از ویژگی‌های زراعی - شیمیایی خاک¹ (درصد کربن آلی، نیتروژن کل خاک، فسفر در دسترس، پتاسیم قابل‌تبادل، کلسیم و منیزیم محلول، واکنش خاک و ضخامت سولوم) با استفاده از مدل‌های SVR و MLR به منظور اعمال سیاست‌های کشاورزی پایدار پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل SVR نسبت به MLR دقت بالاتری را نشان داد و پارامترهای توپوگرافی نقش تعیین‌کننده‌ای در برآورد ویژگی‌های مورد اشاره داشتند. با این حال مطالعات کمتری معطوف به به‌کارگیری روش‌های ML در مدل‌سازی مکانی عناصر مغذی خاک از جمله P_{av} و K_{ex} در مناطق خشک و نیمه‌خشک بوده است؛ بنابراین پژوهش حاضر با اهداف (1) بررسی کارایی چهار مدل غیرخطی و نا پارامتریک یادگیری ماشین RF، CB، SVR و k-NN در مدل‌سازی و برآورد تغییرات مکانی دو عنصر غذایی P_{av} و K_{ex} در اعماق سطحی 0-15 و 30-15 سانتی‌متر و (2) همچنین استفاده از رویکرد نظر کارشناس در کنار دو رویکرد نظارت‌نشده انتخاب متغیر کمکی برای معرفی مهم‌ترین فاکتورهای محیطی پیش‌بینی کننده P_{av} و K_{ex} در بخشی از اراضی دشت آبیک صورت پذیرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه بخشی از اراضی زراعی و مرتعی واقع در حد واسط دو استان قزوین و البرز و در دشت آبیک و بخشی از دشت نظرآباد واقع شده است (شکل 1). این منطقه با مساحت حدود 60000 هکتار با دامنه تغییرات ارتفاعی آن از 1140 متر تا 1750 متر نسبت به سطح دریا متغیر است. چهار کاربری زراعت آبی (52%)، مراتع شور (22%)، اراضی دیم (16%) و مراتع غیر شور (8%) مهم‌ترین کاربری‌های منطقه هستند و مابقی شامل مناطق مسکونی و صنعتی (2%) می‌باشند (شکل 4 ج). این اراضی با سطح مکانیزاسیون متوسط عمدتاً تحت کشت محصولات زراعی گندم پاییزه، جو، یونجه و ذرت هستند. بخش‌های شمالی منطقه عمدتاً دارای کلاس بافت متوسط تا سبک (لوم تا لوم شنی) و بخش‌های جنوبی دارای کلاس بافتی سنگین (رسی تا لوم رسی) هست.

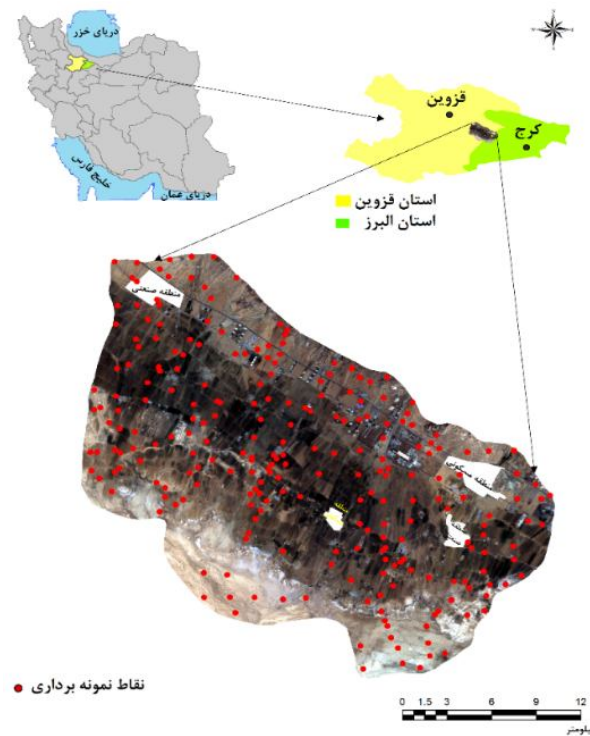
² Pedological knowledge

³ Semi-automated

⁴ Principal component analysis

⁵ Pearson correlation coefficient

¹ Agrochemical soil properties



شکل 1- موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری

جدول 1- حدود بهینه فسفر در دسترس (P_{av}) و پتاسیم قابل تبادل (K_{ex}) در خاک

عنصر مغذی خاک	واحد	کمبود شدید	کمبود خفیف	بهینه	بیش بود
P_{av}	$mg \cdot kg^{-1}$	کمتر از 12	24-12	36-24	بیش از 36
K_{ex}		کمتر از 250	400-250	600-400	بیش از 600

رقومی حاصل از انعکاس طیف در مناطق صنعتی و مسکونی و ایجاد نویز و افزایش خطا در نتایج برآورد ویژگی‌های حاصلخیزی خاک، موقعیت آن‌ها در لایه‌های محیطی مورد استفاده حذف شد. در این پژوهش برای نمایش اهمیت نسبی متغیرهای محیطی کمکی در برآورد فسفر در دسترس و پتاسیم قابل‌تبادل، از تابع درصد افزایش میانگین مربعات خطا³ ($\% \text{ increase in mean square error}$) در مدل RF استفاده شد.

سه متغیر دسته‌بندی¹ شامل نقشه کلاس‌های خاک، زمین‌شناسی (1:100000) و نقشه کاربری اراضی نیز بر اساس رویکرد دانش خاک‌شناس برای ورود به فرآیند مدل‌سازی مکانی انتخاب شد. در مجموع 29 متغیر کمکی خاک - محیطی برای برآورد P_{av} و K_{ex} در منطقه مورد مطالعه تهیه شدند (جدول 2). در نهایت، کلیه لایه‌های محیطی تهیه شده در نرم‌افزار R با استفاده از تابع نزدیک‌ترین همسایه در قدرت تفکیک مکانی 15 متر بازنمونه‌گیری² شد. برای جلوگیری از تأثیر منفی مقادیر

¹ Categorical variable

² Resampling

³ Percent increase in mean square error

جدول 2- متغیرهای کمکی خاک-محیطی مورد استفاده برای مدل سازی مکانی P_{av} و K_{ex}

نام متغیر و نماد	متغیر کمکی محیطی	فاکتور خاکسازي در مدل اسکورپان ¹
Digital elevation model	مدل رقومی ارتفاع	توپوگرافی (r)
Wind effect (WE)	شاخص اثر باد	
Multi-Resolution Index of Valley Bottom Flatness (MrVBF)	شاخص همواری دره با وضوح مکانی بالا	
Diffuse insulation	شدت تابش پخشیده	اقليم (c)
Channel network base level (CNBL)	فاصله تا شبکه آبراهه	
Topographic position index	شاخص موقعیت توپوگرافی	
Catchment area	مساحت حوضه آبخیز	
LS-Factor	طول در درجه شیب	
Relative slope position	موقعیت نسبی شیب	
Topographic wetness index	شاخص خیسى توپوگرافی	
Slope	شیب	ارگانيسم (o)
Aspect	جهت شیب	
Mean annual temperature (MAT)	میانگین دمای سالانه	
Mean annual precipitation	میانگین بارندگی سالانه	
$DVI = NIR - RED$	شاخص تفاضلى پوشش گیاهی	
$NDVI = NIR - RED / NIR + RED$	شاخص تفاضلى پوشش گیاهی نرمال شده	
$RVI = RED - NIR$	شاخص پوشش گیاهی نسبی	
$SAVI = [(NIR - R) / (NIR + R)] * (1 + S)$	شاخص پوشش گیاهی تعدیل یافته خاک	خاک Soil (s)
$Greenness = -0.2848 (B2) - 0.2435(B3) - 0.5436 (B4) + 0.7243 (B5) + 0.0840(B6) - 0.1800 (B7)$	شاخص سبزینگی	
$Brightness = 0.3037 (B2) + 0.2793 (B3) + 0.4743 (B4) + 0.5585 (B4) + 0.5082 (B6) + 0.1863 (B7)$	شاخص روشنایی	
Land use	کاربری اراضی	
BD ($g.cm^{-3}$)	جرم مخصوص ظاهری	
SOC (%)	کربن آلی خاک	
EC ($dS.m^{-1}$)	قابلیت هدایت الکتریک خاک	
CCE (%)	کربنات کلسیم معادل	مواد مادری (p)
Clay (%)	اجزا بافت خاک (رس)	
Soil map	نقشه کلاس‌های خاک	
Geology	نقشه زمین شناسی	
$Clayindex = SWIR1 / SWIR 2$	شاخص رس	

عموماً برابر مقدار 5/0 برای تعدیل اثر خاک پس زمینه S: B2: Blue, B3: Green, B4: RED, B5: NIR, B6: SWIR1, B7: SWIR2.

¹ scorpan

مدل‌سازی مکانی

به منظور مدل‌سازی پراکنش مکانی K_{ex} و P_{av} خاک در دو عمق (0-15 سانتی‌متر و 15-30 سانتی‌متر) کارایی چهار مدل یادگیری ماشین رگرسیون ماشین بردار پشتیبان (SVR)، k-نزدیک‌ترین همسایه (k-NN)، کوپست (CB) و جنگل تصادفی (RF) در بسته تخصصی "caret" و تابع "train" در محیط نرم‌افزار متن‌باز R¹ مورد ارزیابی قرار گرفت. ارزیابی کارایی مدل‌های یادگیری ماشین بر اساس روش اعتبارسنجی متقابل با 10-گام² انجام شد. صحت سنجی بر اساس سه شاخص آماری ضریب تطبیق همبستگی³ (CCC)، میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE) انجام شد.

$$CCC = \frac{2r\partial_a\partial_b}{\partial_a^2 + \partial_b^2 + (a+b)^2} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2} \quad (2)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{a} \quad (3)$$

در آن‌ها: $\partial_a, \partial_b, \bar{a}, \bar{b}$ به ترتیب مقادیر مشاهده‌شده، برآوردشده، میانگین مقادیر مشاهده‌شده، میانگین برآوردشده، واریانس مقادیر مشاهده‌شده، واریانس برآوردشده و تعداد کل نمونه‌ها است.

نتایج

تجزیه و تحلیل آماری

توصیف آماری فسفر در دسترس و پتاسیم قابل‌تبادل در دو عمق 0-15 و 15-30 سانتی‌متر برای همه نقاط مشاهده‌شده (278 عدد) در جدول 3 ارائه شده است. میانگین مقادیر K_{ex} و P_{av} در عمق اول (0-15 سانتی‌متر) به ترتیب برابر 13/20 و 331 میلی‌گرم بر کیلوگرم است. انحراف معیار و ضریب تغییرات این دو

ویژگی به ترتیب برای فسفر 9/68 و 73/30 درصد و برای پتاسیم 192 و 57 درصد محاسبه شده است. در عمق دوم (15-30 سانتی‌متر) میانگین مقادیر K_{ex} و P_{av} 10 و 220 میلی‌گرم بر کیلوگرم بوده و مقادیر دو شاخص آماری انحراف معیار و ضریب تغییرات نیز به ترتیب 7/65، 76/50 درصد، 147 و 66/81 درصد به ترتیب برای K_{ex} و P_{av} در این عمق مشاهده شد. بر اساس طبقه‌بندی ارائه‌شده توسط ویل‌دینگ (1985) دو ویژگی فسفر (57 درصد و 66/81 درصد) و پتاسیم (73/3 درصد و 76/5 درصد) در دو عمق مورد مطالعه دارای تغییرپذیری زیاد⁴ (بیش از 35 درصد) است.

متغیرهای محیطی منتخب

بر اساس ضریب همبستگی پیرسون، در عمق 0-15 سانتی‌متر به‌طور جداگانه چهار ویژگی Clay، CCE و BD همبستگی قوی در سطح یک درصد و SOC در سطح 5 درصد با P_{av} در عمق اول نشان دادند؛ اما K_{ex} با Clay و EC به ترتیب در سطوح معنی‌داری یک و 5 درصد همبستگی داشت. در عمق 15-30 سانتی‌متر نیز P_{av} با دو ویژگی Clay و CCE در سطح یک درصد و BD در سطح یک درصد همبستگی قوی نشان داد و K_{ex} در این عمق با Clay همبستگی قوی و معنی‌دار در سطح یک درصد دارا بود.

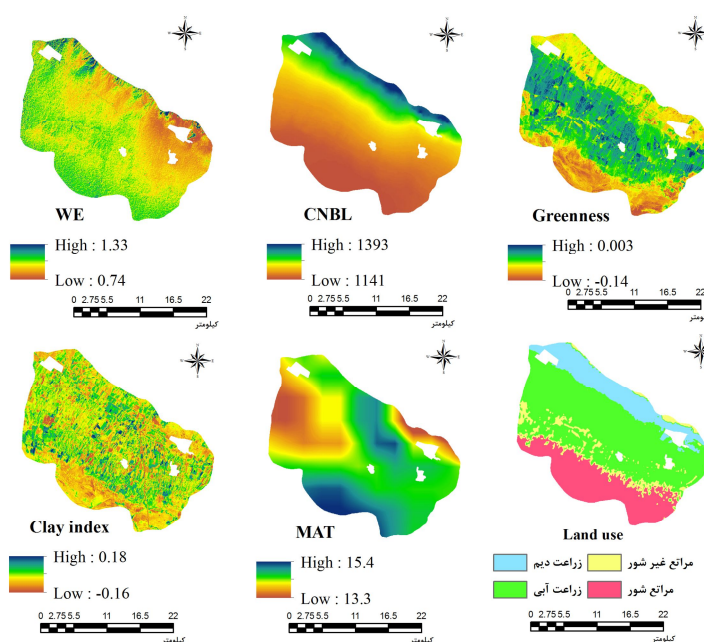
¹ Open source² 10-fold cross validation³ Concordance Correlation Coefficient⁴ High variable

جدول 3- خلاصه برخی آماره‌های P_{av} و پتاسیم K_{ex} در دو عمق 0-15 و 15-30 سانتی‌متر

ویژگی	عمق (cm)	واحد	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات (%)
P_{av}	15-0	(mg.kg ⁻¹)	2/00	70/3	13/2	9/68	73/3
K_{ex}			11/8	950	331	192	57/0
P_{av}	15-30		2/00	70/3	13/2	9/68	73/3
K_{ex}			1/00	45/0	10/0	7/65	76/5

همبستگی با سایر متغیرهای محیطی موردبررسی در این پژوهش بودند. همچنین بر اساس نظر کارشناس نیز سه متغیر دسته‌بندی نقشه خاک، زمین‌شناسی و کاربری اراضی نیز انتخاب و در کنار سایر متغیرهای کمکی به-عنوان برآورد کننده‌های محیطی مورد P_{av} و K_{ex} مورد استفاده قرار گرفت. در مجموع، 13 متغیر کمکی خاک- محیطی از مجموع 29 متغیر اولیه برای برآورد مکانی P_{av} و K_{ex} انتخاب شدند. در شکل 4 تعدادی از متغیرهای محیطی کمکی مورد استفاده برای برآورد مکانی P_{av} و K_{ex} در این پژوهش ارائه شده است.

در ادامه بر اساس مقادیر ارزش ویژه بالاتر از یک در روش PCA، مؤلفه‌های اصلی اول تا پنجم 81 درصد از واریانس موجود در متغیرهای کمکی مستخرج از منابع توپوگرافی، سنجش‌ازدور و اقلیم را توجیه نمودند. نتایج همبستگی متغیرهای محیطی با مؤلفه‌های اصلی بارزش ویژه بالاتر از یک نشان داد که در مؤلفه‌های اول تا پنجم به ترتیب متغیرهای کمکی فاصله تا شبکه آبراهه (35/65 درصد)، شاخص سبزی‌نگی (24/79 درصد)، شاخص اثر باد (7/52 درصد)، میانگین دمای سالیانه (6/62 درصد) و شاخص رس (6/41 درصد) دارای بالاترین مقدار واریانس منفرد و حداقل

شکل 4 - تغییرپذیری شش متغیر محیطی مورد استفاده برای برآورد مکانی P_{av} و K_{ex} در دشت آبیک.

ارزیابی کارایی مدل‌های یادگیری ماشین

اهمیت را نشان دادند. برای K_{ex} در عمق اول EC، Clay، MAT و CNBL مهم‌ترین بودند در حالی که در عمق دوم متغیرهای کمکی $Geology$ ، Land use، Clay و CHNL دارای بیشترین اهمیت بودند که به ترتیب در مجموع، 66 درصد و 60 درصد از تغییرات K_{ex} را در دو عمق مورد-نظر تبیین می‌کنند (شکل 5).

پراکنش مکانی فسفر در دسترس و پتاسیم قابل تبادل خاک

نقشه‌های برآورد P_{av} و K_{ex} در دو عمق 0-15 و 15-30 سانتی‌متر بر اساس مدل RF در شکل 6 ارائه شده است. مقادیر بهینه P_{av} به ترتیب در بازه‌های کمتر از 12 میلی‌گرم بر کیلوگرم (کمبود)، 12 تا 24 میلی‌گرم (کمبود خفیف)، 24 تا 36 میلی‌گرم (بهینه) و بیشتر از 36 میلی‌گرم (بیش‌بود) و برای K_{ex} و مقادیر کمتر از 250 میلی‌گرم (کمبود شدید)، 250 تا 400 میلی‌گرم بر کیلوگرم (کمبود خفیف)، 400 تا 600 میلی‌گرم بر کیلوگرم (بهینه) و بیش از 600 میلی‌گرم بر کیلوگرم (بیش‌بود) طبقه‌بندی گردید (خزائی و همکاران، 1395). جهت تفسیر بهتر، نتایج حاصل از سطوح مناسب مربوط به هریک از محدوده‌های تعریف‌شده برای P_{av} و K_{ex} در دو عمق 0-15 و 15-30 سانتی‌متر در جدول 5 ارائه شده است.

در جدول 4 نتایج اعتبارسنجی برآورد مکانی P_{av} و K_{ex} بر اساس شاخص‌های آماری ارزیابی مدل‌های ML شامل CCC، RMSE و NRMSE در دو عمق 0-15 و 15-30 سانتی‌متر ارائه شده است. بر اساس شاخص‌های آماری، مدل‌های SVR و k-NN نتایج ضعیف‌تر و توافق کمتری را بین مقادیر برآورد و مشاهده‌شده برای تخمین P_{av} و K_{ex} در دو عمق موردنظر ارائه کردند، در حالیکه مدل RF و CB در مقایسه با دو مدل (SVR و k-NN) نتایج دقیق‌تر و با توافق بالاتری را بین مقادیر برآورد و مشاهده شده ارائه نمودند (جدول 4). نتایج اعتبارسنجی بر اساس آماره CCC برای P_{av} در عمق 0-15 سانتی‌متر برابر 0/84، 0/74، 0/35 و 0/48 بود که به ترتیب بر اساس مدل‌های RF، CB، SVR و k-NN حاصل گردید. در عمق 15-30 سانتی‌متر مقادیر CCC به ترتیب 0/60، 0/75، 0/36 و 0/30 بودند که در این عمق مدل‌های RF و k-NN بیشترین و کمترین میزان صحت را نشان دادند. در مورد K_{ex} نیز مقادیر CCC در عمق اول 0/82، 0/72، 0/70 و 0/48 و در عمق دوم 0/80، 0/70، 0/78 و 0/40 به ترتیب بر اساس مدل‌های RF، CB، SVR و k-NN مشاهده گردید.

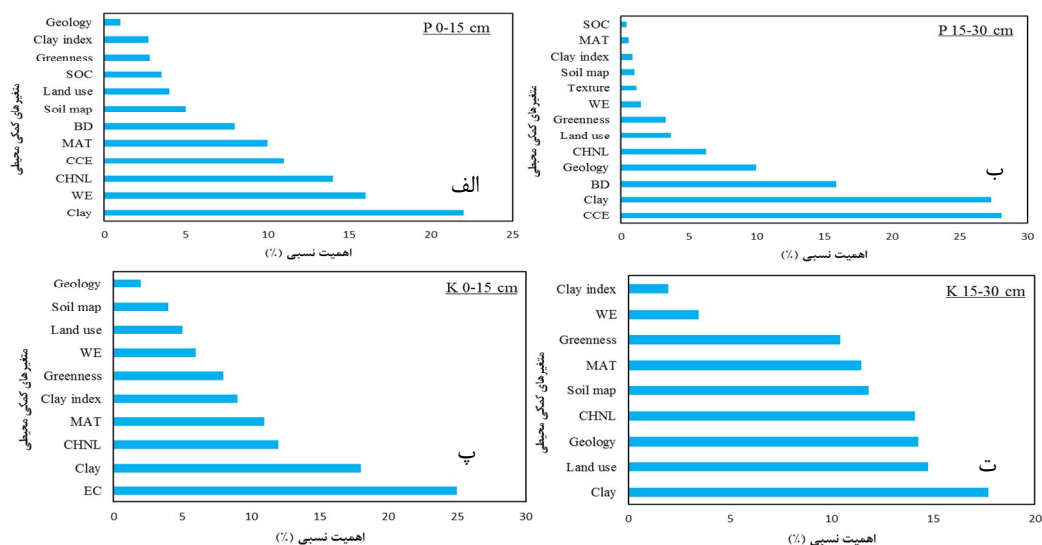
اهمیت نسبی متغیرهای محیطی

مقدار اهمیت نسبی متغیرهای محیطی بر اساس درصد افزایش میانگین خطای مربعات¹ (increase in MSE) در مدل RF تهیه و در شکل (5) ارائه شده است. مقادیر بالای درصد افزایش میانگین خطای مربعات در مدل RF نشان‌دهنده متغیرهای محیطی با اهمیت بیشتر است (ژانگ و همکاران، 2018). متغیرهای محیطی Clay، WE، CHBL و CCE، که در مجموع حدود 65 درصد از تغییرات P_{av} را در عمق 0-15 سانتی‌متر توجیه نمودند و $Geology$ و Clay index، کمترین میزان اهمیت را داشتند. در عمق 15-30 سانتی‌متر، متغیرهای Clay، CCE، BD و $Geology$ دارای بیشترین و SOC و MAT کمترین میزان

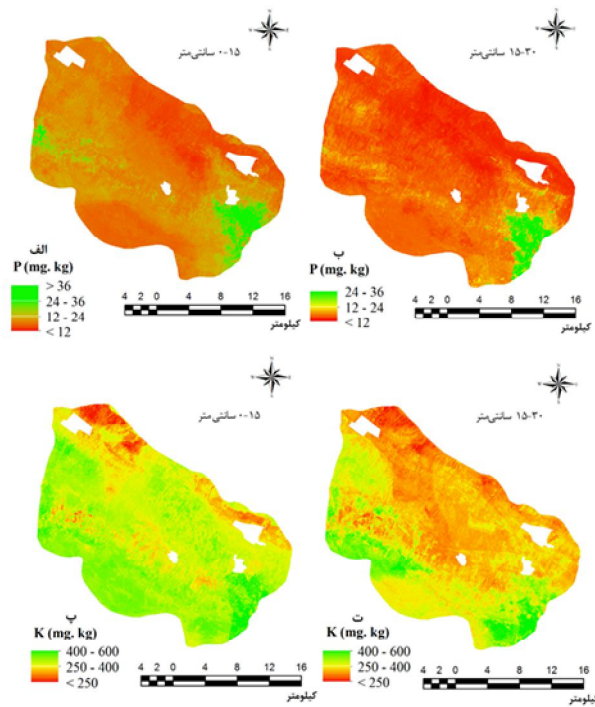
¹ Percent increase in mean square error

جدول 4- نتایج ارزیابی کارایی مدل‌های یادگیری ماشین در برآورد مکانی فسفر در دسترس و پتانسیم قابل تبادل

عمق خاک	ویژگی خاک	شاخص آماری	RF	CB	SVR	k-NN
0-15 سانتی‌متر	P_{av}	RMSE	3/74	5/23	7/76	6/80
		NRMSE	0/38	0/54	0/80	0/70
		CCC	0/84	0/74	0/35	0/48
	K_{ex}	RMSE	86	115	122	152
		NRMSE	0/25	0/34	0/36	0/45
		CCC	0/82	0/72	0/70	0/47
15-30 سانتی‌متر	P_{av}	RMSE	4/20	4/45	6/25	6/50
		NRMSE	0/54	0/58	0/80	0/84
		CCC	0/75	0/60	0/36	0/30
	K_{ex}	RMSE	89	95	92	130
		NRMSE	0/40	0/43	0/41	0/59
		CCC	0/80	0/70	0/78	0/40



شکل 5- اهمیت نسبی متغیرهای محیطی کمکی در پیش‌بینی P_{av} و K_{ex} در دو عمق 0-15 و 15-30 بر اساس روش افزایش درصد میانگین خطای مربعات در مدل RF در دشت آبیک.



شکل 6-پهنه‌بندی مکانی P_{av} و K_{ex} در دو عمق سطحی (0-15 سانتی‌متر) و (15-30 سانتی‌متر) در دشت آبیک

جدول 5- مساحت منطقه مورد مطالعه با توجه به محدوده‌های مناسب تعریف شده برای P_{av} و K_{ex} در دو عمق 0-15 و 15-30 سانتی‌متر

مساحت 15-30 سانتی‌متر		مساحت 0-15 سانتی‌متر		محدوده‌های نقشه	عناصر غذایی خاک
درصد	هکتار	درصد	هکتار		
57	34200	18	10800	12 >	P_{av}
3	18000	60	36000	12-24	
13	7800	10	6000	24-36	
-	-	12	7200	>36	
20	12000	8	4800	<250	k_{ex}
45	27000	12	7200	250-400	
35	21000	80	48000	400-600	
-	-	-	-	>600	

بحث

است، که نتایج بررسی منابع حاکی از آن است که اکثر آن‌ها با استفاده از روش‌های زمین‌آماري و درون‌یابی صورت پذیرفته است؛ اما در پژوهشی که توسط هنگل و

در مطالعات معدودی به مقایسه کارایی الگوریتم‌های یادگیری ماشین (RF, CB, k-NN) در مدل‌سازی و برآورد عناصر مغذی P_{av} و K_{ex} پرداخته‌شده

نگهداشت پتاسیم در سطح کانی‌های رسی ایجاد کند، مرتبط دانست (شکل 5 پ و ت). زارعیان و همکاران (1396) بیشترین مقدار پتاسیم تبدلی را در خاک‌هایی که مقدار قابل توجه رس در افق‌های زیرسطحی خود دارند را گزارش نمودند. در مورد اهمیت فاکتورهای محیطی CHNL و Land use بر روی تغییرات پتاسیم تبدلی (وانگ و همکاران، 2001) بر این باورند که پاسخ و تغییرپذیری عناصر مغذی خاک در یک زمین‌نما وابسته به شکل سرزمین و نوع کاربری اراضی متفاوت است. در مدل‌سازی پتاسیم تبدلی (سولیمان و همکاران، 2021) متغیر محیطی CNBL و پس‌از آن دو متغیر طول در درجه شیب (LS-Factor) و ارتفاع (Elevation) را به‌عنوان مهم‌ترین پارامترهای توپوگرافی در بخشی از خاک‌های روسیه گزارش نمودند. در همین راستا، سایر پژوهشگران نیز بر اهمیت و نقش متغیرهای کمکی محیطی توپوگرافی، اقلیم، کاربری اراضی بر روی تغییرپذیری مکانی و نقشه‌برداری رقومی ویژگی‌های شیمیایی و مغذی خاک تأکید نموده‌اند (گائو و همکاران، 2019؛ وانگ و همکاران، 2018؛ ادھیکاری و همکاران، 2018).

همان‌گونه که در شکل (6 الف) و سپس جدول (5) مشاهده می‌شود بخش‌های اعظمی در قسمت‌های شمالی و جنوبی و همچنین در نواحی مرکزی منطقه که به ترتیب دارای کاربری‌های زراعت دیم، مراتع شور و زراعت آبی می‌باشند در عمق 0-15 سانتی‌متر دارای فسفر در دسترس کمتر از 12 میلی‌گرم بر کیلوگرم و 12 تا 24 میلی‌گرم بر کیلوگرم بود، درحالی‌که صرفاً در بخش‌های شرقی و غربی مقادیر 24-36 و بیش از 36 میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشند که به ترتیب وسعت مناطق مربوط به این محدوده‌ها 18، 60، 10 و 12 درصد از کل مساحت منطقه را شامل می‌شوند (جدول 5). به نظر می‌رسد که میزان این عنصر مغذی و ضروری در خاک‌های این نواحی (شمالی، جنوبی و مرکزی) برای تأمین نیاز گیاهان در کلاس کمبود و کمبود خفیف قرار دارند و نسبت به افزودن کودهای فسفرِ پاسخ‌شده تا متوسط نشان

همکاران (2021) با هدف مدل‌سازی تغییرات مکانی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک (0-20 سانتی‌متر) از جمله P_{av} و K_{ex} در قاره آفریقا انجام شد، نتایج نشان داد که از میان مدل‌های یادگیری ماشین مورد استفاده، در نهایت مدل RF بالاترین میزان دقت را داشت که با نتایج این پژوهش نیز همسو است. در همین راستا، پارسائی و همکاران (2021) در اراضی زراعی منطقه قروه-دهگلان استان کردستان به مدل‌سازی و برآورد مکانی نیتروژن کل در عمق سطحی خاک (0-30 سانتی-متر) با استفاده از سه مدل یادگیری ماشین RF، CB و رگرسیون درختی (DT) پرداختند و گزارش نمودند که مدل RF نسبت به دو مدل دیگر کارایی نسبتاً بهتری است. همچنین، نتایج اهمیت نسبی متغیرهای کمکی در پژوهش ایشان نشان داد که دو پارامتر توپوگرافی موقعیت میانی شیب و ارتفاع استاندارد شده و سپس دو متغیر کمکی سنجش از دوری شاخص تفاضلی پوشش گیاهی نرمال شده و شاخص پوشش گیاهی تعدیل‌یافته خاک بیشترین اثرگذاری را در برآورد مکانی نیتروژن کل خاک در آن منطقه داشتند.

در این پژوهش نیز دو ویژگی محیطی WE و CNBL که از مشتقات مدل رقومی ارتفاع می‌باشند، در عمق 0-15 سانتی‌متر بعد از ویژگی خاک (Clay) نقش مهمی را در برآورد فسفر در دسترس خاک نسبت به سایر فاکتورهای محیطی داشتند. فاکتورهای مربوط به توپوگرافی با تأثیر بر روی شرایط توزیع رطوبت خاک و میزان درجه حرارت و تهویه خاک‌ها در سطح سیمای اراضی¹ بر روی میزان تغییرپذیری عناصر غذایی خاک نقش دارند (وانگ و همکاران، 2018؛ تو و همکاران، 2018). اهمیت زیاد EC و Clay در برآورد مکانی K_{ex} در بخش‌های جنوبی منطقه می‌توان به ترتیب به دلیل بالا بودن مقدار EC و همبستگی مثبت آن با K_{ex} (سولیمان و همکاران، 2021) و در ادامه وجود خاک‌های باکلاس بافت رسی و لوم رسی می‌تواند شرایط ویژه‌ای را برای

¹ Landscape

زراعی در این مناطق پاسخ شدیدی را به افزودن کودهای پتاس نشان خواهند داد. بر اساس جدول 5، نتایج نشان داد که در عمق 30-15 سانتی‌متر به ترتیب 20 درصد، 45 درصد و 35 درصد از مساحت کل منطقه در محدوده‌های کمبود شدید، کمبود خفیف و بهینه قرار دارند. شعبانی و دلاور (1395) گزارش نمودند که در خاک‌های آهکی و با بافت سبک به‌ویژه کلاس‌های بافتی دارای مقادیر توجه شن به دلیل اینکه ذرات آهک و شن فاقد سطوح تبدالی برای جذب کاتیون‌ها از جمله پتاسیم می‌باشند، در نتیجه مقدار کاتیون‌های تبدالی مثل پتاسیم در این خاک‌ها کاهش می‌یابد که این نتایج در مورد مقادیر پتاسیم تبدالی در عمق 30-15 سانتی‌متر در بخش‌های شمالی و شمال شرق منطقه مورد مطالعه در این پژوهش نیز همخوانی دارد.

نتیجه‌گیری

به‌کارگیری ترکیبی از رویکردهای مؤثر انتخاب متغیر در کنار دانش خاک‌شناس منجر به ارتقاء نتایج مدل‌سازی‌های مکانی ویژگی‌های دینامیک خاک می‌شود. همچنین، استفاده از ویژگی‌های خاک به‌عنوان یک متغیر کمکی مهم و اثرگذار در فرآیند مدل‌سازی رقومی باید لحاظ شود. چنانکه در این پژوهش نیز مورد تأیید واقع شد، اهمیت نسبتی ویژگی‌های خاک نسبت به فاکتورهای محیطی (توپوگرافی، پوشش گیاهی، اقلیم) مورد استفاده از درجه بالاتری در برآورد P_{av} و K_{ex} برخوردار بود. علی‌رغم توانایی بالای الگوریتم‌های یادگیری ماشین مورد استفاده، در نهایت مدل RF با ارائه نتایج دقیق‌تر در مقایسه با بقیه روش‌های برآورد مکانی، کارایی بالاتری را در تهیه نقشه‌های پراکنش مکانی P_{av} و K_{ex} نشان داد. در نقشه‌برداری رقومی خاک به دلایلی از قبیل عدم نیاز به تفسیر چشمی عکس‌های هوایی، استفاده از لایه‌های محیطی با قدرت تفکیک مکانی بالا و با قابلیت دسترس بالا و رایگان منجر به کاهش زمان تهیه نقشه‌های خاک می‌شود. علاوه بر این توجه به داشتن قابلیت به‌روزرسانی سریع، تبدیل مقیاس و از همه مهم‌تر ارائه تغییرات پیوسته ویژگی‌های خاک از کارایی بالاتری

خواهند داد. لودویک (1989) خاک‌های دارای 34-18 میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر را خاک‌های با پاسخ محتمل و خاک‌های دارای مقادیر بیش از 34 میلی‌گرم بر کیلوگرم را به‌عنوان خاک‌های بدون پاسخ معرفی نمودند. در شکل (6) پراکنش مکانی فسفر در دسترس در عمق (15-30) مشابه عمق اول در بخش‌های شمالی، جنوبی، غربی و مرکزی منطقه دارای کمبود شدید و خفیف می‌باشند و صرفاً بخش شرقی منطقه در محدوده بهینه مشاهده شد.

وسعت این محدوده‌ها به ترتیب از درجات کمبود شدید تا بهینه برابر 57 درصد، 30 درصد و 13 درصد بود (جدول 5). بر اساس شکل (6) پ و جدول (5)، نقشه پراکنش مکانی پتاسیم تبدالی در عمق 15-0 سانتی‌متر بیانگر این است که تغییرات آن در سه محدوده درجات کمبود شدید (کمتر از 250 میلی‌گرم بر کیلوگرم)، کمبود خفیف (250-400 میلی‌گرم بر کیلوگرم) و بهینه (400-600 میلی‌گرم بر کیلوگرم) قرار دارد، اما در هیچ قسمتی از منطقه بیش‌بود (>600 میلی‌گرم بر کیلوگرم) آن مشاهده نگردید. درصد پراکنش مکانی محدوده‌های استاندارد به ترتیب از درجات کمبود شدید تا بهینه برابر 8 درصد، 12 درصد و 80 درصد بود. به نظر می‌رسد بالا بودن مقدار پتاسیم تبدالی در عمق اول به دلیل مصرف بالای کودهای پتاس توسط کشاورزان و در بخش‌های جنوب و جنوب غرب منطقه در ارتباط با مقادیر بالای رس و وجود خاک‌های باکلاس بافتی رسی، رس سیلتی و لوم رسی است. همچنین، در مطالعات سایر محققین نیز به ارتباط بین اشکال پتاسیم و نوع کانی‌های رسی در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک اشاره شده است (هاشمی و عباس لو، 2016؛ علمداری و همکاران، 1394). در مورد عمق 30-15 سانتی‌متر طبق شکل (6) به‌طور قابل توجهی در بخش‌های شمال شرقی، شمال و به سمت مرکز که عمدتاً دارای کلاس‌های بافتی شنی لومی، لوم شنی تا حتی لوم رسی شنی (در قسمت مرکزی) می‌باشند، خاک‌ها برای تأمین نیاز گیاهان در کلاس کمبود شدید و کمبود خفیف قرار دارند که گیاهان

گیرد. از دیدگاه کاربردی نقشه‌های تهیه‌شده در این مقیاس مکانی (15 متر) با توجه به اینکه قابلیت تبدیل‌شدن به مقیاس مدیریت پذیر و قابل کاربرد در سطح مزرعه نیز دارند، می‌توانند، برای کشاورزان، کارشناسان خاک و آب و مسئولین پهنه‌های زراعی در راستای مدیریت تلفیقی حفظ حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه مفید باشد.

نسبت به نقشه‌های تهیه‌شده به روش معمول برخوردارند که این مزیت‌ها در کاهش هزینه و زمان انجام پروژه‌های تحقیقاتی و مطالعاتی تأثیرگذار است. بنابراین، رویکرد مورد استفاده در این پژوهش برای تهیه نقشه‌های سایر عناصر مغذی خاک در دیگر مناطق کشور با شرایط اقلیمی و توپوگرافی مشابه می‌تواند مورد بررسی و ارزیابی قرار

فهرست منابع:

۱. خزائی، ا.، ع. بستانی و ن. دواتگر. 1396. تغییرات مکانی نیتروژن، فسفر و پتاسیم و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در اراضی شرکت کشت و صنعت شریف‌آباد قزوین. پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب)، 31 (2)، 195-213.
۲. زارعیان، غ. ر.، م. ه. فرپور، م. حجازی و ا. جعفری. 1396. ارتباط شکل‌های مختلف پتاسیم با خصوصیات فیزیکی شیمیایی و کانی‌شناسی رسی خاک‌های دشت قره‌باغ در استان فارس. پژوهش‌های خاک، 31 (2)، 315-327.
۳. طاعتی، ع.، ف. سرمیدان، ح. ر. متقیان و س. ر. موسوی. 1399. پهنه‌بندی برخی ویژگی‌های سطحی و عمقی پروفیل خاک با استفاده از تکنیک زمین‌آمار در بخشی از اراضی دشت قزوین. انسان و محیط‌زیست، 18 (1)، 67-81.
۴. شعبانی، ح. و م. دلاور. 1395. ارزیابی تغییرات مکانی عناصر غذایی پرمصرف در اراضی دانشگاه زنجان. پژوهش‌های کاربردی زراعی (پژوهش و سازندگی)، 29 (110)، 75-82.
۵. موسوی، س. ر.، ف. سرمیدان و ا. رحمانی. 1398. مدل‌سازی و پیش‌بینی مکانی کلاس خاک با استفاده از الگوریتم یادگیری رگرسیون درختی توسعه‌یافته و جنگل‌های تصادفی در بخشی از اراضی دشت قزوین. تحقیقات آب و خاک ایران (علوم کشاورزی ایران)، 50 (10)، 2525-2538.
۶. علمداری، پ. و. کامرانی و م. ح. محمدی. 1394. ارتباط بین اشکال مختلف پتاسیم و کانی‌های رسی در واحدهای فیزیوگرافی متفاوت. آب و خاک، 29 (6)، 1578-1589.
7. Adhikari, K., P.R., Owens, A.J., Ashworth, T.J., Sauer, Z., Libohova, J.L. Richter., & D.M., Miller. 2018. Topographic controls on soil nutrient variations in a silvopasture system. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 1(1):1-15.
8. Bogunovic, I., P., Pereira, & E.C., Brevik. 2017. Spatial distribution of soil chemical properties in an organic farm in Croatia. *Science of the Total Environment*, 584:535-545.
9. Carter, M.R. & E.G., Gregorich. 2007. Soil sampling and methods of analysis. CRC press.
10. Gao, L., M., Huang, W., Zhang, L., Qiao, G., Wang, & X., Zhang. 2021. Comparative Study on Spatial Digital Mapping Methods of Soil Nutrients Based on Different Geospatial Technologies. *Sustainability*, 13(6): p.3270.
11. Gao, X.S., X.I.A.O., Yi, L.J., Deng, Q.Q., LI, C.Q., Wang, L.I., Bing, O.P., Deng, & Z.E.N.G., Min. 2019. Spatial variability of soil total nitrogen, phosphorus and potassium in Renshou County of Sichuan Basin, China. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(2):279-289.
12. Hashemi, S.S, & H., Abbaslou. 2016. Potassium reserves in soils with arid and semi-arid climate in southern Iran: a perspective based on potassium fixation. *Iran Agricultural Research*, 35(2): 88-95.
13. Hengl, T., M., Nussbaum, M.N., Wright, G.B., Heuvelink, & B., Gräler. 2018. Random forest as a generic framework for predictive modeling of spatial and spatio-temporal variables. *Peer Journal*, 6:5518.

14. Hengl, T., M.A., Miller, J., Križan, K.D., Shepherd, A., Sila, M., Kilibarda, O., Antonijević, L., Glušica, A., Dobermann, S.M., Haefele, & S.P., McGrath. 2021. African soil properties and nutrients mapped at 30 m spatial resolution using two-scale ensemble machine learning. *Scientific Reports*, 11(1):1-18.
15. Khaledian, Y. & B.A., Miller. 2020. Selecting appropriate machine learning methods for digital soil mapping. *Applied Mathematical Modelling*, 81, 401-418.
16. Kingsley, J., S.O., Lawani, A.O., Esther, K.M., Ndiye, O.J., Sunday, & V., Penizek. 2019. Predictive Mapping of Soil Properties for Precision Agriculture Using Geographic Information System (GIS) Based Geostatistics Models. *Modern Applied Science*, 13(10): 60-77.
17. Kuhn, M. & K., Johnson. 2013. *Applied predictive modeling*. New York: Springer, Vol. 26:13.
18. Ludwick, A.E., L.C., Bonezkowski, C.A., Bruce, K.B., Campbell, R.M., Millaway, S.E., Petrie, I.L., Phillips, & J.J., Smith. 1998. *Western fertilizer handbook*.
19. Ma, Y., B., Minasny, & C., Wu. 2017. Mapping key soil properties to support agricultural production in Eastern China. *Geoderma Regional*, 10:144-153.
20. Matinfar, H.R., Z., Maghsodi, S.R., Mousavi, & A., Rahmani. 2021. Evaluation and Prediction of Topsoil organic carbon using Machine learning and hybrid models at a Field-scale. *Catena*, 202 ,105258.
21. Mendes, W.D.S., J.A.M., Dematte, D.F.U., Salazar, & M.T.A., Amorim. 2020. Geostatistics or machine learning for mapping soil attributes and agricultural practices. *Revista Ceres*, 67(4):330-336.
22. Minasny, B. & A.B., McBratney. 2016. Digital soil mapping: A brief history and some lessons. *Geoderma*, 264:301-311.
23. Oliver, M. A. & R., Webster. 2014. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. *Catena*, 113: 56-69.
24. Padarian, J., B., Minasny, & A.B., McBratney. 2020. Machine learning and soil sciences: A review aided by machine learning tools. *Soil*, 6(1):35-52.
25. Parsaie, F., A.F., Firouzi, S.R., Mousavi, A., Rahmani, M.H. Sedri, & M., Homaei. 2021. Large-scale digital mapping of topsoil total nitrogen using machine learning models and associated uncertainty map. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(4): 1-15.
26. Staff, S.S., 2014. *Keys to Soil Taxonomy*, 12th Edn Washington. DC: Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture.
27. Suleymanov, A., E., Abakumov, R., Suleymanov, I., Gabbasova, & M., Komissarov. 2021. The Soil Nutrient Digital Mapping for Precision Agriculture Cases in the Trans-Ural Steppe Zone of Russia Using Topographic Attributes. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(4): 243.
28. Srisomkiew, S., M., Kawahigashi, & P., Limtong. 2021. Digital mapping of soil chemical properties with limited data in the Thung Kula Ronghai region, Thailand. *Geoderma*, 389, 114942.
29. Taghizadeh-Mehrjardi, R, K., Schmidt, N., Toomanian, B., Heung, T., Behrens, A.H., Mosavi, S. S., Band, A., Amirian-Chakan, A., Fathabadi, & T., Scholten. 2021. Improving the spatial prediction of soil salinity in arid regions using wavelet transformation and support vector regression models. *Geoderma*, 383:114793.
30. Tu, C., T., He, X., Lu, Y., Luo, & P., Smith. 2018. Extent to which pH and topographic factors control soil organic carbon level in dry farming cropland soils of the mountainous region of Southwest China. *Catena*, 163: 204-209.
31. Wang, J., B., Fu, Y., Qiu, & L., Chen. 2001. Soil nutrients in relation to land use and landscape position in the semi-arid small catchment on the loess plateau in China. *Journal of Arid Environments*, 48(4):537-550.

32. Wang, S., X., Jin, K., Adhikari, W., Li, M., Yu, Z., Bian, & Q., Wang. 2018. Mapping total soil nitrogen from a site in northeastern China. *Catena*, 166:134-146.
33. Wilding, L.P. 1985. Spatial variability: its documentation, accomodation and implication to soil surveys. In *Soil spatial variability*, Las Vegas NV, 166-194.
34. Zhang, B., D.A., MacLean, R.C., Johns. & E.S., Eveleigh. 2018. Effects of hardwood content on balsam fir defoliation during the building phase of a spruce budworm outbreak. *Forests*, 9(9) :530.
35. Zhou, T., Y., Geng, J., Chen, C., Sun, D., Haase, & A., Lausch. 2019. Mapping of Soil Total Nitrogen Content in the Middle Reaches of the Heihe River Basin in China Using Multi-Source Remote Sensing-Derived Variables. *Remote Sensing*. 11(24): 2934.

ارزیابی سامانه استنتاج فازی - عصبی تطبیقی و توابع انتقالی رگرسیونی در برآورد هدایت آبی اشباع خاک

یاسر حسینی¹

دانشیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان- دانشگاه محقق اردبیلی؛ Y_hoseini@uma.ac.ir

دریافت: 1400/5/10 و پذیرش: 1400/9/29

چکیده

اندازه‌گیری ویژگی‌های هیدرولیکی خاک مانند هدایت آبی اشباع خاک که از مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی خاک می‌باشد. در این تحقیق از روش توابع انتقالی و سامانه استنتاج فازی بر پایه شبکه عصبی تطبیقی (ANFIS²) برای برآورد هدایت آبی اشباع خاک از بافت خاک استفاده شده است. ورودی‌های مدل شامل درصد رس، سیلت و شن خاک بود. برای ارزیابی عملکرد مدل از پارامترهای مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، درصد خطای نسبی (ϵ)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد که برای مدل (ANFIS) به ترتیب 0/557 (میلی‌متر بر روز)، 0/627 (درصد)، 0/844 (میلی‌متر بر روز) و 0/997 به دست آمد. همچنین دقت توابع انتقالی، به ترتیب از مدل فرر-جولیا و همکاران (2004)، رزتا، دنی و پوکت (1994)، کاسبای و همکاران (1984)، پوکت و همکاران (1985) و کمپل و شوزاوا (1994) کاهش یافت. از میان روش‌های توابع انتقالی روش فرر-جولیا و همکاران (2004) با ($R^2=0/89$) و خطای (میلی‌متر بر روز $2/1$) (RMSE) از دقت بالاتری برخوردار بود. نتایج نشان داد سامانه استنتاج فازی - عصبی ANFIS نسبت به توابع انتقالی رگرسیونی از دقت بیشتری برخوردار می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: شبکه آبیاری و زهکشی، ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، مدل فرر-جولیا

¹ نویسنده مسئول، آدرس: دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان، گروه مهندسی و فناوری کشاورزی

² Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems

مقدمه

هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در طراحی و امکان پذیر بودن فنی و اقتصادی پروژه های زه کشی نقش بسزائی دارد. اندازه گیری این ویژگی ها به دلیل نیاز به صرف هزینه و زمان زیاد و تغییر پذیری مکانی و زمانی فراوان آنها، اغلب با دشواری هایی همراه است. بنابراین استفاده از روش هایی که بتوانند این ویژگی ها را با استفاده از پارامترهای زود یافت خاک مانند بافت، کربن آلی و چگالی ظاهری با دقت مناسب تخمین بزنند، لازم به نظر می رسد. یکی از این روش ها، روش سامانه استنتاج فازی بر پایه شبکه عصبی تطبیقی (ANFIS) است. در گذشته، از مدل های ریاضی برای پیدا کردن رابطه بین ورودی ها و خروجی های یک فرآیند استفاده می شد. اما این رویکرد منطق کلاسیک نیاز به تعریف دقیقی از معادلات مدل ریاضی توصیف شده برای آن پدیده داشت. امروزه، اثبات شده است که در بسیاری از کاربردها روش منطق فازی (FL)¹ به عنوان یکی از راه حل های تحقق اهداف هوش مصنوعی (AI)² نسبت به چارچوب های ریاضی کلاسیک برتری دارند.

زیرا منطق فازی از نظر مفهومی بسیار ساده و انعطاف پذیر می باشد. در واقع به آسانی می توان یک سامانه فازی را برای حل یک مسئله پیچیده با استفاده از قوانین اگر - آنگاه سازماندهی نمود. شبکه عصبی مصنوعی، دیگر روشی است که با مدل سازی ارتباطات سیناپسی و ساختار نرونی مغز انسان، رویکردی برای پیاده سازی مصنوعی ویژگی های فیزیولوژیک مغز است. هر چند که شبکه های عصبی مصنوعی با مدل واقعی مغز فاصله زیادی دارند، اما توانایی این شبکه ها در کشف روابط غیرخطی میان داده های ورودی و استخراج مدل دینامیک غیرخطی حاکم بر داده ها قابل ملاحظه بوده و در مقایسه با مدل های مرسوم، این مدل ها به ورودی های کمتر و تلاش محاسباتی اندکی نیاز دارند. در بسیاری از تحقیقات انجام

شده برتری مدل شبکه عصبی مصنوعی نسبت به مدل رگرسیونی کلاسیک گزارش شده است (رحیمی و عباسپور، 2011). در واقع هر کدام از سامانه های فازی و شبکه های عصبی مصنوعی، دارای مزایا و نواقص هستند. سامانه فازی قادر به استفاده از زبان بشری می باشد و می تواند از تجربیات بشری و افراد متخصص و خبره استفاده کند در حالی که قادر به یادگیری نمی باشد. به عبارت دیگر با استفاده از داده های مشاهده ای نمی توان سامانه فازی را آموزش داد. اما شبکه های عصبی با استفاده از مجموعه داده ها، قابلیت خودآموزی دارند. در عین حال شبکه های عصبی غیر صریح هستند و قادر به استفاده از زبان بشری نمی باشند (کارتالوپوس، 2000). تحقیقاتی برای استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی برای مدل سازی هدایت آبی اشباع و منحنی مشخصه آب خاک صورت گرفته است و مشخص گردیده که با افزایش تعداد ورودی در شبکه عصبی مصنوعی، دقت برآوردها افزایش می یابد. به طوریکه RMSE برآورد هدایت آبی اشباع توسط شبکه عصبی مصنوعی با سه ورودی (درصد های شن، سیلت و رس) برابر 0/831 (میلی متر بر ساعت) و با چهار ورودی (درصد های شن، سیلت، رس و جرم مخصوص ظاهری) برابر با 0/775 (میلی متر بر ساعت) می باشد (شاپ و لیچ، 1998؛ مارشال، 1958).

در تحقیقی دیگر به منظور برآورد هدایت آبی اشباع، مدل فرش سرپینسکی با معادله هدایت آبی ترکیب گردید، نتایج نشان داد که معادله هدایت آبی اشباع تعدیل شده مارشال برآوردهایی منطقی از هدایت آبی اشباع ماتریس و منافذ درشت خاک می دهد در این تحقیق، ضریب همبستگی بین مقادیر هدایت آبی اشباع برآورد شده و اندازه گیری شده توسط این محققین 0/89 به دست آمد (زالو، 2004). رضایی ارشد و همکاران (1391) از شبکه عصبی نوع پرسپترون چند لایه (MLP) و مدل های رگرسیونی حذف تدریجی متغیرها و گام به گام ورود متغیرها برای بسط این توابع برای تخمین هدایت آبی اشباع

¹ Fuzzy logic

² Artificial Intelligent

هدایت هیدرولیکی و تحلیل عدم قطعیت برآورد با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی چندگانه شامل منطق فازی، شبکه عصبی مصنوعی و نورو فازی استفاده نمود. نتایج این تحقیق نشان داد که نتایج مدل بیزین پراکندگی کمتری نسبت به سایر مدل‌ها داشته و خطای باقیمانده در مدل بیزین نسبت به سایر مدل‌ها کمتر است.

در مطالعه انجام یافته توسط بهمنش و رضایی (2015) به مقایسه و ارزیابی توابع انتقالی رگرسیونی و نروفازی به منظور برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در قسمتی از دشت ارومیه پرداخته شد. نتایج بیانگر برتری مدل نروفازی نسبت به تابع رگرسیونی بوده و همچنین نشان داده شده که مدل نروفازی قادر است در بافت‌های خاک مختلف قدرت برآورد خود را با دقت بالا حفظ نماید. در رابطه با توانایی توابع رگرسیونی، محققینی توانایی سه تابع انتقالی رگرسیونی کمپل و شوزاوا (1994)، وان‌گونختن (1980) و وریکین (1990) را برای تعیین منحنی مشخصه آب خاک و هدایت آبی غیر اشباع خاک‌های شنی نیجر آزمودند. ایشان گزارش کردند تابع انتقالی کمپل و شوزاوا (1994) و وریکین (1990) هدایت آبی را کم برآورد می‌نماید (مانیام و همکاران، 2007). با توجه به قدرت پیش‌بینی فرایندها با استفاده از سامانه‌های استنتاج فازی بر پایه شبکه عصبی تطبیقی (ANFIS) در چند سال اخیر، این نوع سامانه‌ها در علوم مختلف به کار برده می‌شود. این نوع سامانه‌ها با بهره‌گیری از قدرت آموزش شبکه‌های عصبی و مزیت زبانی سامانه‌های فازی توانسته‌اند بسیار قدرتمند عمل نمایند (اکبر زاده و همکاران، 2009). با توجه به مطالب بیان شده، هدف اصلی از این تحقیق توسعه و ارزیابی مدل انفیس برای برآورد هدایت آبی اشباع خاک با استفاده از بافت خاک و مقایسه آن با توابع انتقالی رگرسیونی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه به وسعت 5181 هکتار بخشی از اراضی دشت فتحعلی در فاصله تقریباً 35 کیلومتری جنوب غربی شهرستان پارس آباد و 230 کیلومتری شمال

خاک با استفاده از چگالی ظاهری، تخلخل کل و درصد توزیع اندازه ذرات خاک استفاده نمودند. نتایج نشان داد که شبکه MLP با الگوریتم آموزشی بیزین با ضریب تعیین 0/7 و مجموع مربعات خطای 0/4 نسبت به مدل‌های رگرسیونی کارایی بهتری در تخمین هدایت آبی اشباع خاک دارد. در تحقیقی اصغری و همکاران (1398)، مقایسه‌ی دقت توابع انتقالی (PTFs) رگرسیونی، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و نروفازی را در برآورد هدایت آبی اشباع خاک‌های دریاچه‌ی ارومیه بررسی نمودند. نتایج نشان داد که تابع انتقالی با دو متغیر سیلت و جرم مخصوص ظاهری، بهترین تابع برای برآورد هدایت آبی اشباع خاک در منطقه‌ی مورد مطالعه است. همچنین مقایسه روش‌های مختلف نشان داد، توابع ANN به دلیل داشتن ضریب تعیین 0/65 و مجموع مربعات خطای 0/11 در مقایسه با توابع رگرسیونی و نروفازی، دقت بیشتری در برآورد هدایت آبی اشباع خاک در منطقه‌ی مورد مطالعه دارد.

در تحقیق دیگری حسن زاده و همکاران (1399)، روش میانگین‌گیری مدل بیزین (BMA) توسعه داده شده که شامل ترکیب مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، منطق فازی و نروفازی در تخمین هدایت آبی و ارزیابی عدم قطعیت است را برای تخمین هدایت آبی اشباع آبخوان دشت ارومیه استفاده نمودند، نتایج نشان داد، مدل نروفازی نسبت به شبکه‌های عصبی و منطق فازی از دقت بیشتری در برآورد هدایت آبی اشباع برخوردار است. ندیری و یوسف زاده (2017) از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی، منطق فازی ممدانی¹، و منطق فازی سوگنو² و سیستم‌های استنتاج نروفازی تطبیقی، برای تعیین هدایت آبی دشت بناب استفاده نمودند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که روش نروفازی دارای کمترین ریشه میانگین مربعات خطا بود و از دقت بالاتری برخوردار بود. همچنین در تحقیق حسن زاده و همکاران (1399) از روش میانگین‌گیری مدل بیزین برای برآورد

¹ Mamdani Fuzzy logic

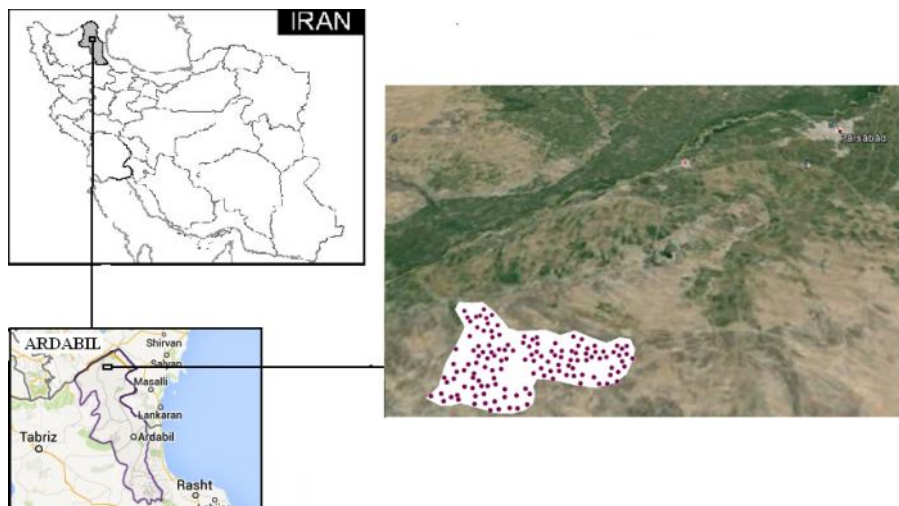
² Sugeno Fuzzy logic

برداری در مثلث بافت خاک USDA نشان داده شده است.

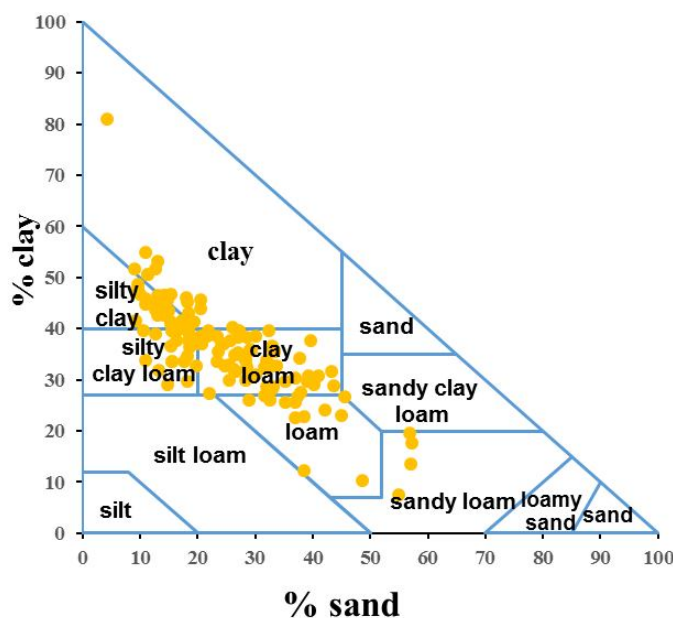
روش کار با دستگاه پرماتر گلف

دو نوع نفوذ سنج تجارتي گلف وجود دارد. نوع اول برای خاک‌های با آبگذری بالا طراحی شده و نوع دوم برای خاک‌های با هدایت هیدرولیکی کم کاربرد دارد. آزمایش‌های گلف به وسیله دستگاه نفوذسنج گلف مدل k2800 انجام گردید. برای انجام آزمایش‌ها چاهک‌هایی به عمق 25 سانتی‌متر و شعاع 5 سانتی‌متر حفر گردید. اندازه‌گیری دبی خروجی از دستگاه در بار آبی 5 و 10 سانتی‌متر اندازه‌گیری گردید. اندازه‌گیری تا زمانی ادامه داشت که افت سطح آب در چهار فاصله زمانی متوالی دو دقیقه‌ای مساوی گردد (رینولدز و الریک، 1985). پس از انجام آزمایش‌ها هدایت هیدرولیکی اشیاع خاک به روش آنالیز دو عمقی گلف با استفاده از روابط زیر محاسبه گردید (رینولدز و همکاران، 1985). اگر دو عمق استغراق H_1 و H_2 در یک چاهک موجود باشد در نتیجه دو شدت جریان Q_1 و Q_2 به دست می‌آید.

غربی شهرستان اردبیل می‌باشد. ارتفاع اراضی 158 تا 254 متر از سطح دریا متغیر است. این منطقه با متوسط بارندگی سالانه 284/6 میلی‌متر و دمای متوسط سالانه 14/7 درجه سانتی‌گراد طبق روش آمبرژه اقلیم نیمه مرطوب معتدل و طبق روش دومارتن اقلیم نیمه خشک دارد. شکل (1) نمای دشت فتحعلی و نقاط نمونه‌برداری شده را نشان می‌دهد. ضرائب آبگذری خاک در منطقه مورد مطالعه جمعاً در 150 ایستگاه به روش پرماتر گلف، اندازه‌گیری شده است، که در این تحقیق از داده‌های 135 ایستگاه استفاده شده است. با بررسی آماری داده‌های فیزیکی خاک، مشخص شد که تغییرات میزان شن خاک بین 4/3 تا 57/3 با میانگین 24/9 درصد متغیر می‌باشد. میزان سیلت خاک بین 14/7 تا 56/3 با میانگین 38/9 درصد می‌باشد و همچنین میزان رس خاک بین 7/8 تا 81 درصد با میانگین 36/2 درصد متغیر است. دامنه تغییرات هدایت آبی 108/7 تا 166/6 میلی‌متر بر روز بامیانگین 131/2 میلی‌متر بر روز می‌باشد. دامنه زیاد تغییرات در پارامترهای فیزیکی خاک می‌تواند به دلیل محدوده وسیع مورد مطالعه باشد. در شکل (2)، بافت خاک نقاط نمونه



شکل 1- شمای دشت فتحعلی



شکل 2- محل قرارگیری نقاط در مثلث بافت خاک USDA

(3)

$$X_{\text{norm}} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

که در آن: X_{norm} : مقادیر نرمال شده، X : مقدار مشاهده شده، $X_{\max}$ و $X_{\min}$: به ترتیب مقادیر ماکسیمم و مینیمم مشاهده شده است.

سامانه‌های استنتاج فازی بر پایه شبکه عصبی تطبیقی

(ANFIS)

اساس ANFIS بر پایه‌ای از مجموعه داده‌های ورودی/خروجی یک سامانه استنتاج فازی (FIS) است. این سامانه بر پایه قوانین ترکیبی از سه قسمت توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی (فازی کردن)، قوانین فازی (پایگاه قواعد)، استنتاج مکانیزم (ترکیب قواعد با ورودی فازی) و مشخصه‌های خروجی و نتایج سامانه (غیر فازی سازی) است. اولین بار (چانگ، 1993) توانست از قدرت زبانی سامانه‌های فازی و آموزش شبکه‌های عصبی استفاده نماید و سامانه‌ای تحت عنوان سامانه‌های فازی بر پایه شبکه عصبی تطبیقی ارائه نماید، که این سامانه‌ها به سامانه‌های انفیس معروف شدند. غالباً سامانه‌های انفیس را با استفاده از یک سامانه فازی تاکاگی-

(1)

$$K_{fs} = G_2 Q_2 - G_1 Q_1$$

که در معادله بالا مقادیر G_1 و G_2 از روابط زیر محاسبه می‌گردند در معادلات C_1 و C_2 مقادیر متناسب با H_1 و H_2 هستند.

(2)

$$G_2 = \frac{H_1 C_2}{\pi [2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + d^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1)]}$$

$$G_1 = G_2 \left(\frac{H_2 C_1}{H_1 C_2} \right)$$

آماده‌سازی داده‌ها

تعداد کل داده‌های بدست آمده 135 عدد بود که از این داده‌ها 120 داده برای مرحله آموزش¹ مدل و 15 داده برای مرحله واریسی² مورد استفاده قرار گرفت. برای افزایش دقت و سرعت عملکرد مدل، داده‌ها در رنج [0-1] طبق رابطه (1) نرمال شدند (ساجی کومار و تانداوسوارا، 1999).

¹. Training

². Checking

(9)

$$\mu_{A_i}(x) = \exp\left[-\left(\frac{x - c_i}{a_i}\right)^2\right]$$

لایه دوم: (گره‌های قاعده) هر گره در این لایه درجه فعالیت یک قانون را محاسبه می‌کند:

(10)

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y), \quad i = 1, 2$$

لایه سوم: خروجی این لایه نرمالیزه شده لایه قبلی است:

(11)

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad i = 1, 2$$

لایه چهارم: (گره‌های نتیجه) در این لایه خروجی هر گره برابر است با

(12)

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (P_i x + q_i y + r_i)$$

لایه پنجم: (گره‌های خروجی) در این لایه هر گره مقدار خروجی نهایی را به صورت زیر محاسبه می‌نماید (تعداد گره‌ها برابر تعداد خروجی هاست):

(13)

$$O_{5,i} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i}$$

آموزش این سامانه‌ها به این مفهوم است که با استفاده از داده‌های آموزشی پارامترهای غیرخطی مربوط به توابع عضویت فازی در لایه اول و پارامترهای خطی لایه چهارم طوری تعیین شوند که به ازای ورودی دلخواه، خروجی مطلوب حاصل شود. روش آموزش هیبرید⁴ یکی از مهم‌ترین روش‌های آموزش سامانه‌های استنتاج فازی بر پایه شبکه عصبی تطبیقی می‌باشد. در این روش جهت آموزش در لایه اول از روش پسا انتشار خطا و در لایه چهارم سامانه از روش تخمین کمترین مربعات استفاده میشود (چانگ و سان، 1997).

سوگنو -کانگ (TSK)¹ به صورت ساختار شبکه‌ای پیش رونده به کار می‌برند. برای سادگی کار فرض می‌کنیم که سامانه فازی ما دو ورودی x و y دارد و خروجی آن z است. حال اگر قوانین به صورت زیر باشند:

(4)

*Rule1: if x is A_1 and y is B_1
then $f_1 = P_1 x + q_1 y + r_1$*

(5)

*Rule2: if x is A_2 and y is B_2
then $f_2 = P_2 x + q_2 y + r_2$*

اگر برای غیرفازی‌سازی (تبدیل خروجی نهایی سامانه به یک عدد کلاسیک) از روش میانگین مراکز استفاده کنیم خروجی به صورت زیر خواهد بود: ساختار معادل ANFIS که از پنج لایه تشکیل شده است به صورت زیر است (شکل 3):

(6)

$$f = \frac{w_1 f_1 + w_2 f_2}{w_1 + w_2} = \bar{w}_1 f_1 + \bar{w}_2 f_2$$

$$\bar{w}_1 = \frac{w_1}{w_1 + w_2}, \quad \bar{w}_2 = \frac{w_2}{w_1 + w_2}$$

لایه اول: (گره‌های ورودی) در این لایه درجه عضویت گره‌های ورودی به بازه‌های مختلف فازی با استفاده از تابع عضویت، مشخص می‌گردد:

(7)

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x), \quad \text{for } i = 1, 2$$

(8)

$$O_{1,i} = \mu_{B_i}(y), \quad \text{for } i = 3, 4$$

تابع عضویت گوسین² $\mu_{A_i}(x)$ به صورت زیر بیان می‌گردد که در آن c_i و a_i مجموعه پارامتر (پارامترهای اولیه³) و x ورودی گره i ام می‌باشد.

¹ Takagi - Sugeno- Kang

² Gaussian membership function

³ premise parameters

⁴ Hybrid Learning

ارزیابی عملکرد مدل

معیارهای مختلفی برای ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی وجود دارد که به‌طور عمده بر اساس اختلاف بین خروجی‌های پیش‌بینی شده و خروجی‌های مطلوب و واقعی استوارند. برای ارزیابی عملکرد مدل از پارامترهای مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، مجذور میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE)، درصد خطای نسبی (ε)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد:

(16)

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Q_i - P_i|$$

(17)

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})(Q_i - \bar{Q}) \right]^2}{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2}$$

(18)

$$nRMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_i - P_i)^2} \times \frac{100}{\bar{Q}_i}$$

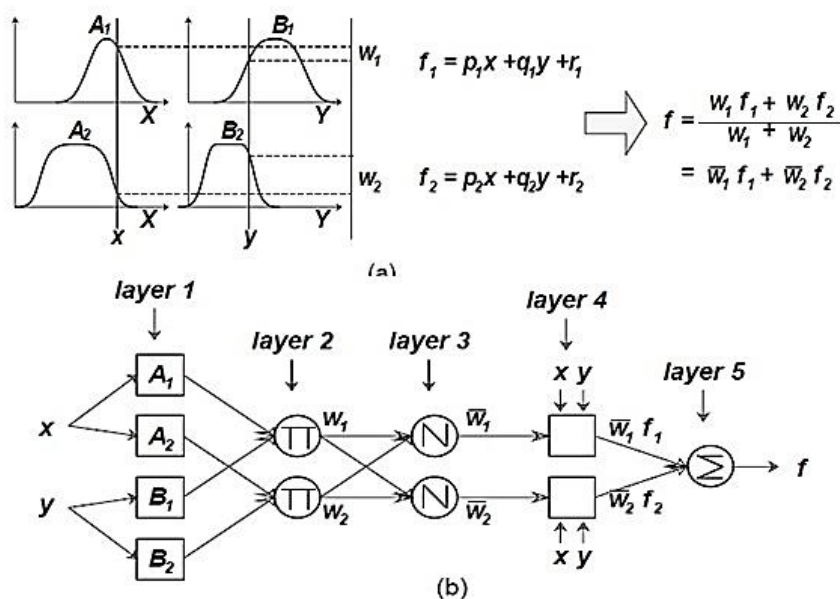
(14)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_i - P_i)^2}$$

(15)

$$\varepsilon = \frac{100\%}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Q_i - P_i}{Q_i} \right|$$

در روابط فوق، N : تعداد نمونه، P_i : مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل، Q_i : مقادیر واقعی، $\bar{P}$: میانگین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل، $\bar{Q}$: میانگین مقادیر واقعی می‌باشد (جاکوویدز، 1997).



شکل 3- (a): مدل فازی مرتبه اول سوگنو، (b): ساختار انفیس (چانگ، 1993)

توابع انتقالی رگرسیونی

در این تحقیق جهت برآورد میزان هدایت آبی اشباع خاک با استفاده از بافت خاک از توابع انتقالی پوکت و همکاران (1985)، دنی و پوکت (1994)، کمپل و شوزاوا (1994)، فرر-جولیا و همکاران (2004)، کاسبای و همکاران (1984) و همچنین نرم افزار رزتا استفاده گردید. در روابط 19 تا 23 هر یک از توابع انتقالی ذکر شده بیان شده است.

پوکت (19)

$$K_s (mm/h) = 156.96 \times \exp(-0.1975 Clay)$$

کاسبای (20)

$$K_s (mm/h) = 303.84 \times \exp(-0.144 Clay)$$

دنی (21)

$$K_s (mm/h) = 54 \times \exp(-0.07 Sand - 0.167 Clay)$$

کمپل (22)

$$K_s (mm/h) = 156.96 \times \exp(-0.1975 Clay)$$

فرر-جولیا (23)

$$K_s (m/s) = 7.055556 \times 10^{-6} \cdot (10^{[-0.6 + 0.0126(Sand) - 0.0064(Clay)]})$$

نتایج و بحث

تخمین هدایت آبی اشباع با استفاده از مدل انفیس

در این تحقیق، مدل انفیس با سه ورودی درصد شن، سیلت و رس و خروجی هدایت آبی اشباع خاک در نرم افزار MATLAB (Version 7.12.0) و در قسمت Fuzzy Logic Toolbox انجام شد. شکل (4) ساختار مدل را نشان می‌دهد. برای توابع عضویت متغیرهای ورودی از تابع عضویت گوسین و متغیرهای زبانی پایین (Low)، متوسط (Medium) و بالا (High) استفاده شد (شکل 5). این مدل شامل 27 قانون است. همچنین این مدل دارای 78 گره، 108 پارامتر خطی (در لایه دوم)، 18 پارامتر غیرخطی (در لایه اول) و در کل شامل 126 پارامتر می‌باشد. برای آموزش سامانه استنتاج فازی از روش هیبرید استفاده شد. شکل (6) رابطه بین مجذور میانگین مربعات خطا و تکرارها را برای مراحل آموزش و واری

نشان می‌دهد. شکل (7) نتایج خروجی مدل فازی انفیس به صورت نمودارهای سه بعدی برحسب پارامترهای ورودی و خروجی می‌باشد که بیانگر تأثیر تغییرات پارامترهای ورودی (شن، سیلت، رس) بر خروجی مدل (K_s) است. برای آموزش شبکه از روش هیبرید استفاده گردید. در این روش ورودی‌های مدل برای تعیین قوانین در لایه اول مورد استفاده قرار می‌گیرند و روش‌های مختلفی برای انتخاب قوانین در اختیار می‌باشد (اقیل و همکاران، 2007؛ ایلماز، 2001). همچنین داده‌ها، جهت استفاده در این سامانه می‌بایست نرمال گردند، زیرا تحقیقات نشان داده‌اند که داده‌هایی که نرمالیزه گردند، در کاربرد در منطق فازی نتایج بهتری را خواهند داشت (لوک و همکاران، 2000). محققین بسیاری روش RMSE و MAE را برای ارزیابی دقت مدل‌های مبتنی بر شبکه عصبی و منطق فازی ارائه داده‌اند. (فینل و همکاران، 2001، گکسکلو، 2002، کاراکس و همکاران، 2006).

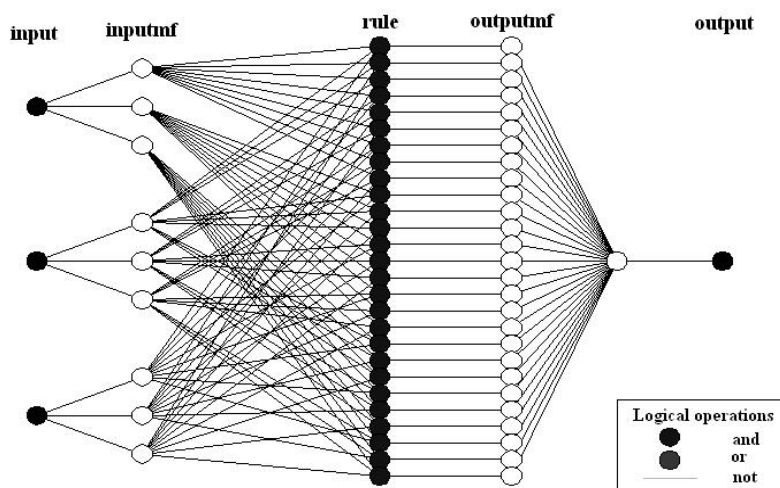
جدول (1) خصوصیات مدل انفیس و ارزیابی آنرا بر اساس پارامترهای آماری مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، درصد خطای نسبی (ϵ)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب تبیین (R^2) ارائه می‌کند. در مدل انفیس پس از آنکه آموزش شبکه کامل شد مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) به مقادیر 0/55 و 0/032 (میلی‌متر بر روز) به ترتیب در مرحله آموزش و واری در دومین تکرار رسید. همان‌طور که در جدول (1) مشخص است، مقدار R^2 در مدل انفیس برابر 0/99 و مقدار RMSE برابر 0/032 (میلی‌متر بر روز) می‌باشد. همچنین nRMSE مدل برابر 0/6 برآورد شده است که بر اساس طبقه بندی جیمسون و همکاران (1991)، از آنجا که مقدار مجذور میانگین مربعات خطای نرمال شده مدل انفیس کمتر از 10 درصد می‌باشد، لذا مدل با درجه "عالی" قادر به پیشبینی مقادیر هدایت آبی بوده است. بر اساس تحقیق ایشان اگر نتایج مقدار مجذور میانگین مربعات خطای نرمال شده مدل بین 10 تا 20 درصد باشد، "خوب" و اگر بین 20 تا 30 درصد باشد "متوسط" و اگر بیش از 30 درصد باشد،

کمتر از مقادیر ضریب تبیین حاصل از این تحقیق می باشد. در مطالعه دیگری نیز مقدار R^2 برابر 0/95 و مقدار RMSE برابر 0/44 میلی متر بر ساعت برآورد شده است که نزدیک به نتایج این تحقیق می باشد (ندرلو و همکاران، 2012). در شکل (8) نمودار پراکندگی نتایج حاصل از مدل انفیس حول خط یک به یک نشان داده شده است که نشان دهنده دقت بالای مدل انفیس در تخمین هدایت آبی اشباع خاک با استفاده از بافت خاک است.

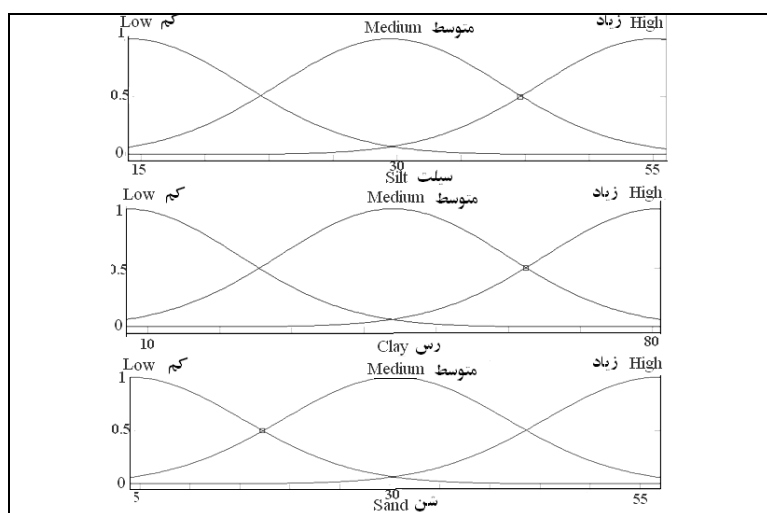
"ضعیف" طبقه بندی می گردد. که حاکی از توانایی مدل انفیس در ایجاد ارتباط بین ورودی و خروجی و نزدیکی آن نسبت به مقادیر اندازه گیری شده است. این مقدار از مطالعات اقیار و همکاران (2007) که مقدار RMSE برابر 0/4 میلی متر بر ساعت و R^2 را برابر 0/6 برآورد نموده اند بسیار دقیق تر می باشد. همچنین در تحقیق اصغری و همکاران (1398) و حسن زاده و همکاران (1399) نیز مقادیر ضریب تبیین را در حدود 0/65 برآورد نمودند که

جدول 1- ارزیابی مدل انفیس بر اساس پارامترهای آماری

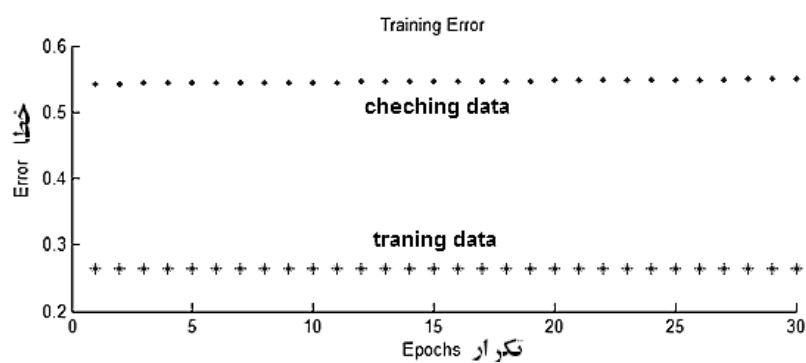
نوع تابع عضویت		تعداد پارمترها	روش خطی سازی	RMSE (mm/d)	nRMSE (%)	ε (%)	MAE (mm/d)	R^2
ورودی	خروجی	ورودی	تکرار	0/032	0.6	0/627	0/18	0/997
گوسی	خطی	3	30					



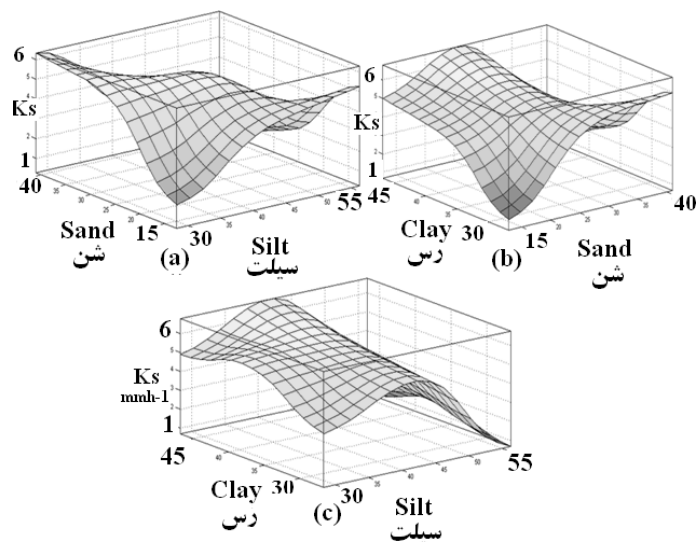
شکل 4- ساختار مدل انفیس برای برای برآورد هدایت آبی اشباع خاک با استفاده از بافت خاک



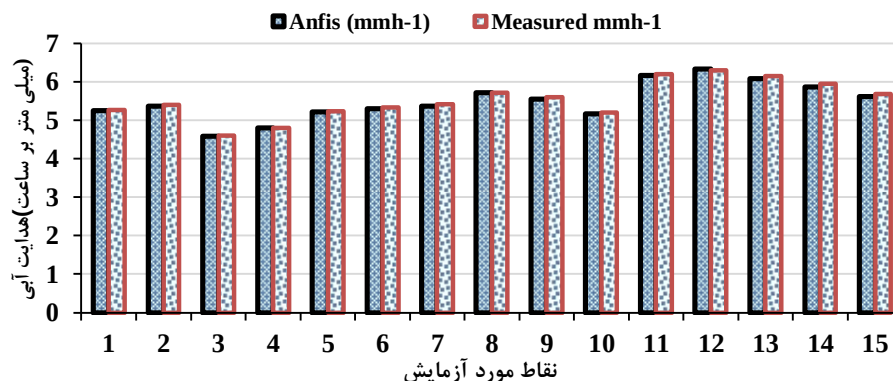
شکل 5- توابع عضویت متغیرهای ورودی: درصد شن، سیلت رس



شکل 6- تعداد اپاک‌ها در مقابل مجذور میانگین مربعات خطا برای آموزش و واری داده‌ها



شکل 7- هدایت آبی اشباع خاک در مقابل: (a): درصد شن و سیلت، (b): درصد شن و رس، (c): درصد رس و سیلت



شکل 8- رابطه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده هدایت آبی با استفاده از مدل انفیس

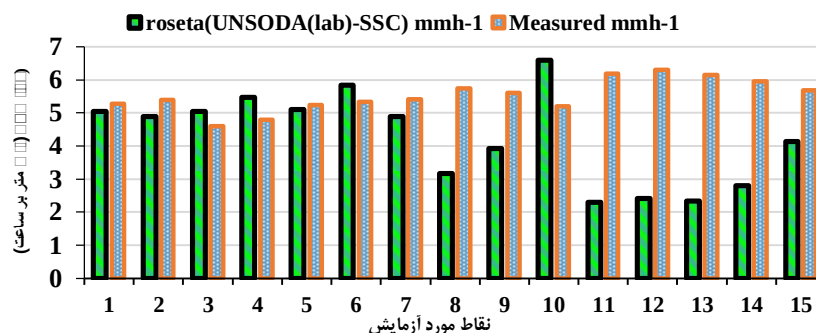
تخمین هدایت آبی اشیاع با استفاده از توابع انتقالی

شکل‌های (9) الی (14) میزان دقت توابع انتقالی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (9) مشخص است در مدل رزتا میزان هدایت آبی برآورد شده کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد که با تحقیق سالازار و همکاران (2008) هم‌خوانی دارد در تحقیق ایشان، جریان زهکشی با استفاده از هدایت آبی اشیاع برآورد شده با توابع انتقالی رزتا (با ماهیت شبکه عصبی مصنوعی) ارزیابی گردید و مشخص گردید، هدایت آبی برآورد شده توسط رزتا، 15 درصد هدایت آبی اندازه‌گیری شده در شرایط آزمایشگاهی می‌باشد. جدول (2) پارامترهای آماری توابع انتقالی را نشان می‌دهد. با توجه به جدول (2) و بررسی پراکندگی نقاط در اطراف خط یک به یک و محک‌های آماری انجام شده می‌توان مشاهده کرد که دقت برآورد توابع انتقالی به ترتیب از مدل انفیس، فر-جولیا و همکاران (2004)، رزتا، دین و پوکت (1994)، کاسبای و همکاران (1984)، پوکت و همکاران (1985) و کمپل و شوزاوا (1994)، کاهش می‌یابد. از میان روش‌های توابع انتقالی روش فر-جولیا و همکاران (2004) از دقت بیش‌تری برخوردار می‌باشد و باید توجه داشت که در این مدل، مبنا میزان درصد شن موجود در خاک است. همان‌طور که در شکل (13) نشان داده شده است، در شرایطی که خاک دارای مقادیر بیش‌تری از نسبت شن است، برآوردهای فر-جولیا و همکاران (2004) به

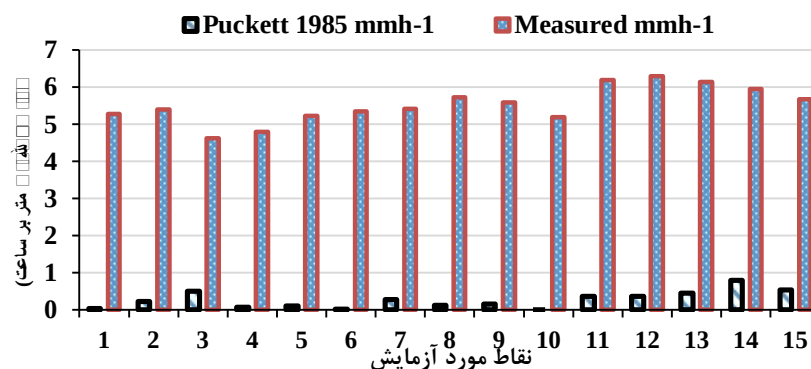
مقادیر واقعی نزدیک‌تر می‌گردد. در نقطه مقابل مدل‌های پوکت و همکاران (1985) و دین و پوکت (1994) که درصد میزان رس را ملاک برآورد هدایت آبی اشیاع قرار داده‌اند میزان هدایت آبی اشیاع را در خاک‌های با بافت درشت‌تر کمتر برآورد می‌نمایند. البته تابع دین و پوکت (1994) به دلیل لحاظ کردن ضریب بیشتر در معادله خود نسبت به تابع دین و پوکت (1994) کمی نتایج را به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک‌تر ساخته است. مدل رزتا نیز توانست برآورد خوبی از مقادیر هدایت آبی اشیاع داشته باشد که علت آن بانک اطلاعاتی کامل موجود در این نرم‌افزار می‌باشد. از آنجا که بانک اطلاعاتی مورد استفاده در این نرم افزار بیشتر دارای بافت متوسط می‌باشد، لذا همان‌طور که در شکل (9) نشان داده شده است، این مدل میزان هدایت آبی اشیاع خاک‌هایی که در محدوده کلی-لوم قرار می‌گیرند را بهتر برآورد می‌نماید. از میان روابطی که درصد شن و رس را هم‌زمان در برآوردها لحاظ می‌نمایند، نتایج در رابطه با مدل کمپل و شوزاوا (1994) و کاسبای و همکاران (1984) نشان‌داد که برخلاف مدل کمپل و شوزاوا (1994) که میزان هدایت آبی را بسیار کمتر از مقادیر واقعی برآورد می‌نماید، روش کاسبای و همکاران (1984) دارای برآوردی بیش‌تر از مقدار واقعی می‌باشد و با بررسی نتایج حاصل از این روش مشخص می‌گردد که نسبت مقادیر برآورد شده به این روش به مقادیر واقعی از رابطه $Y=0.1365X+0.36$ با

(2004) و رزتا، مقدار هدایت آبی اشباع را کمتر از مقادیر واقعی نشان می‌دهند (واگنر و همکاران، 2001) که با نتایج حاصل از این تحقیق همخوانی دارد. همانطور که نتایج جدول (2) نشان می‌دهد، مقادیر به دست آمده برای مجذور میانگین مربعات خطای نرمال شده بر اساس طبقه بندی جیمسون و همکاران (1991)، کلیه مدل‌ها برآوردی بیش از 30 درصد را به دست آورده‌اند که نشان دهنده ضعیف بودن پیش‌بینی مدل‌های توابع انتقالی است.

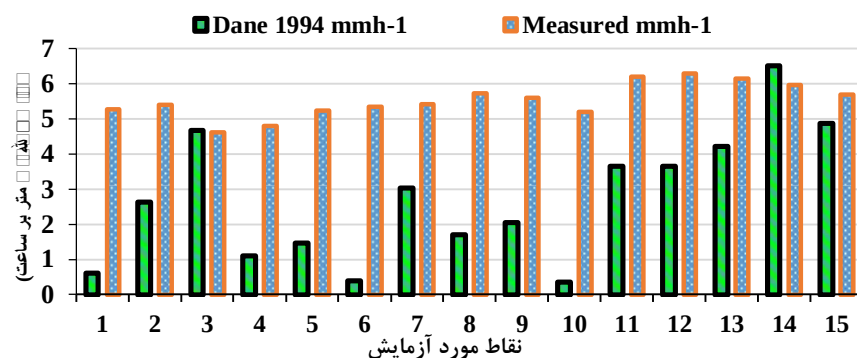
$R^2=0.97$ پیروی می‌نماید که در این رابطه X مقدار اندازه گیری شده هدایت آبی اشباع به روش کاسبای و همکاران (1984) و Y مقدار ضریب اصلاحی مربوط برای تبدیل آن به مقدار اندازه‌گیری شده می‌باشد. همان‌طور که از نتایج مشخص است بیشتر مدل‌ها، میزان هدایت آبی اشباع را کمتر از مقدار واقعی برآورد نموده‌اند و این می‌تواند به دلیل در نظر نگرفتن ساختمان خاک در برآورد توسط مدل‌ها باشد. در تحقیق دیگری نیز نشان داده شده است که تابع کمپل و شوزاوا (1994)، فرر-جولیا و همکاران



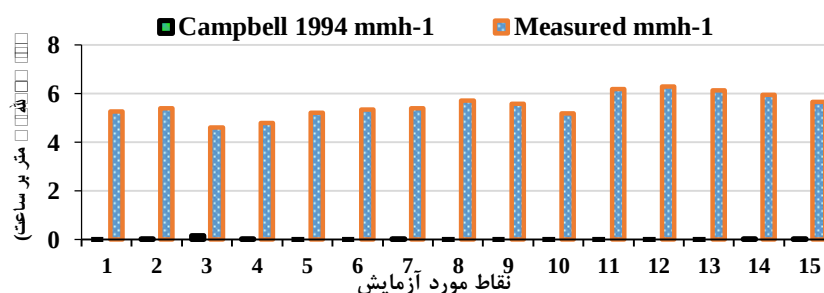
شکل 9- رابطه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده هدایت آبی با استفاده از مدل رزتا



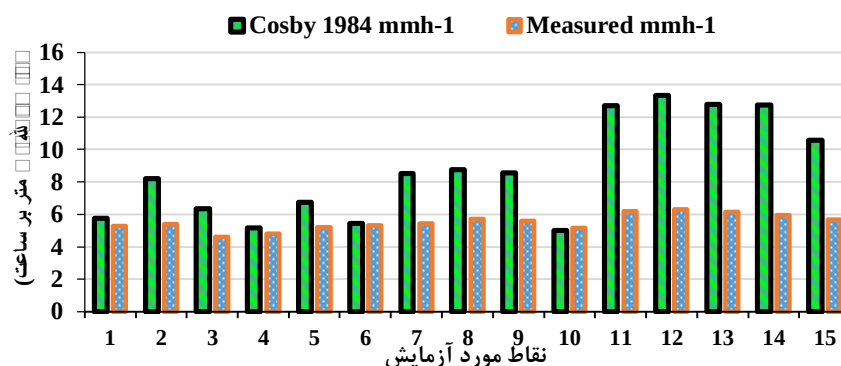
شکل 10- رابطه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده هدایت آبی با استفاده از مدل پوکت



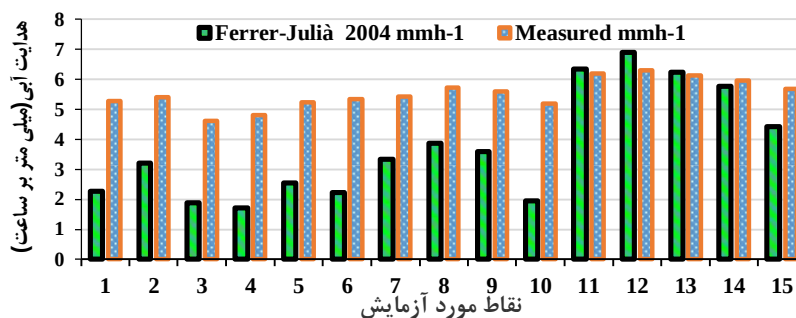
شکل 11- رابطه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده هدایت آبی با استفاده از مدل دین



شکل 12- رابطه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده هدایت آبی با استفاده از مدل کمپل



شکل 13- رابطه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده هدایت آبی با استفاده از مدل کاسبی



شکل 14- رابطه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده هدایت آبی با استفاده از مدل فرر - جولیا

جدول 2- ارزیابی توابع انتقالی بر اساس پارامترهای آماری

تابع انتقالی	RMSE(mm/d)	nRMSE (%)	ϵ (%)	MAE(mm/d)	R ²
Cosby 1984	4/05	73.3	55/4	1/61	0/8
Ferrer-Julià	2/1	38	35/8	1/27	0/89
Campbell 1994	5/5	98	99/3	2/34	0/21
Dane 1994	3/2	57.2	52/6	1/6	0/18
Puckett 1985	5/2	93	95/1	2/28	0/16
Roseta	2/1	37.5	28/2	1/15	0/72

نتیجه گیری

استنتاج فازی - عصبی (ANFIS) به خاطر ساختار ساده و استفاده از قواعدی که بر پایه داده های اندازه گیری شده، نوشته شده و همچنین ایجاد یک رابطه خطی تر بین داده های ورودی و خروجی توانسته برآورد دقیق تری از هدایت آبی اشباع با استفاده از بافت خاک داشته باشد.

تشکر و قدردانی

این مقاله با حمایت معاونت محترم پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی طی قرارداد طرح شماره 22343، تهیه شده است و از ایشان تشکر و قدردانی می گردد.

در این تحقیق از سامانه استنتاج فازی - عصبی (ANFIS) و توابع انتقالی رگرسیونی برای برآورد هدایت آبی اشباع خاک استفاده شد. برای ارزیابی این مدل ها از پارامترهای آماری مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، درصد خطای نسبی (ϵ)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب تبیین (R^2) استفاده گردید. نتایج نشان داد سامانه استنتاج فازی - عصبی (ANFIS) نسبت به توابع انتقالی رگرسیونی از دقت بالاتری برخوردار است. لذا سامانه

فهرست منابع:

1. اصغری، ش.، و حاتم وند، م.، و حسنیورکاشانی، م. (1398). اشتقاق توابع انتقالی برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در شمال غرب دریاچه ارومیه. پژوهش های فرسایش محیطی، 9 (3 (پیاپی 35)، 102-118.
2. حسن زاده، ی.، معظم نیا، م.، صادق فام، س. و ع. ندیری. 1398. تخمین هدایت هیدرولیکی و ارزیابی عدم قطعیت بین مدل ها و داده های ورودی توسط متوسط گیری بیزین از مدل های هوش مصنوعی. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر. 52 (9): 1-13.
3. رضایی ارشد، ر.، صیاد، غ.، مظلوم، م.، شرفا، م. و م. جعفرنژادی. 1391. مقایسه روش های شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیونی برای پیش بینی هدایت آبی اشباع خاکهای استان خوزستان، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، 6 (60): 107-117.
4. Agyare, W. A., Park, S. J. and P. L. G. Vlek. 2007. Artificial neural network estimation of saturated hydraulic conductivity. Vadose Zone Journal, 6(2): 423-431.
5. Akbarzadeh, A., Mehrjardi, R.T., Rouhipour, H., Gorji, M. and H.G. Rahimi. 2009. Estimating of soil erosion covered with rolled erosion control systems using rainfall simulator (neuro-fuzzy and artificial neural network approaches). Journal of Applied Science Research, 5 (5): 505-514.

6. Aqil, M., Kita, I., Yano, A. and S. Nishiyama. 2007. A comparative study of artificial neural networks and neuro-fuzzy in continuous modeling of the daily and hourly behavior of runoff, *Journal of Hydrology*, 337 (1-2): 22–34.
7. Campbell, G.S. and S. Shozawa. 1994. Prediction of hydraulic properties of soils using particle-size distribution and bulk density data. *Proceedings of International Workshop on Indirect Methods*. University of California, 30: 211–223.
8. Cosby, B. J., Hornberger, G. M., Clapp, R. B. and T. R. Ginn. 1984. A statistical exploration of the relationship of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water Resources Research*, 20 (6): 682-690.
9. Gokceoglu, C. 2002. A fuzzy triangular chart to predict the uniaxial compressive strength of the Ankara agglomerates from their petrographic composition. *Engineering Geology*, 66: 39–51.
10. Dane, J.H. and W. Puckett. 1994. Field soil hydraulic properties based on physical and mineralogical information. p. 389-403. In: M.Th. van Genuchten et al. (eds) *Proceedings of the International workshop on indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils*. Univ. of California, Riverside, CA.
11. Elrick, D.E., Reynolds, W.D., Tan, K.A. 1989. Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analyses. *Ground water monitoring*, 9:184-193.
12. Ferrer-Julà, M., Estrela Monreal, T., Sánchez Del Corral Jiménez, A. and E. García Meléndez. 2004. Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using pedotransfer functions and spatial prediction. *Geoderma*, 123: 275-277.
13. Finol, J., Guo, Y.K. and X.D. Jing. 2001. A rule based fuzzy model for the prediction of petro physical rock parameters, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 29: 97–113.
14. Jacovides, C.P. 1997. Reply to comment on Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration models. *Agricultural Water Management*, 3: 95-97.
15. Jang, J. S. R. 1993. ANFIS: Adaptive Network Based Fuzzy Inference System, *IEEE transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 23 (3): 665–683.
16. Jamieson, P.D., Porter, J.R. and D.R. Wilson. 1991. A test of the computer simulation model ARC-WHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Res.* 27: 337–350.
17. Jang, J. S. R. and C. T. Sun. 1997. Neuro-Fuzzy Modeling and Control, *Proceedings of the IEEE*, 83 (3): 378-406.
18. hassanzadeh, y., Moazamnia, M., Sadeghfam, S., Nadiri, A. A. 2020. Hydraulic conductivity and uncertainty analysis of between-models and input data by using Bayesian model averaging of artificial intelligence model. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(9):2171-2190.
19. Karakus, M. and B. Tutmez. 2006. Fuzzy and multiple regression modelling for evaluation of intact rock strength based on point load, Schmidt hammer and sonic velocity, *Rock Mech. Rock Eng.* 39 (1): 45–57.
20. Karatalopoulos, S. V. 2000. *Understanding Neural Networks and Fuzzy Logic- Basic Concepts and Applications*; Prentice Hall, New-Delhi, India.
21. Luk, K. C., Ball, J. E. and A. Sharma. 2000. a study of optimal model lag and spatial inputs to artificial neural network for rainfall forecasting, *Journal of Hydrology*, 227: (1-4): 56–65.
22. Marshal, T. J. 1958. A relationship between permeability and size distribution of pores. *Soil Science*, 9:1-8.
23. Manyam, C., Morgan, C. L., Heilman, J. L., Fatondji, D., Gerard, B. and W.A. Payne. 2007. Modeling hydraulic properties of sandy soils of Niger using pedotransfer functions. *Geoderma*, 141: 407 – 415.

24. Nadiri, A.A., Yousefzadeh, S. 2017. A Comparison of the Performance of Artificial Neural Network, Fuzzy Logic and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems Models in the Estimation of Aquifer Hydraulic Conductivity. A Case Study: Maraghe-Bonab Aquifer, Hydrogeomorphology, 3(10): 21-40.
25. Naderloo, L., Alimardani, R., Omid, M., Sarmadian, F., Javadikia, P., Yaser Torabi, M. and F. Alimardani. 2012. Application of ANFIS to predict crop yield based on different energy inputs. Measurement, 45: 1406-1413.
26. Puckett, W. E., Dane, J. H. and B. F. Hajek. 1985. Physical and mineralogical data to determine Soil hydraulic properties. Soil Science Society of America Journal, 49: 831-836.
27. Rawls, W. J. 2004. Pedotransfer functions for the United States. Developments in Soil Science, 30: 437-447.
28. Reynolds, W.D., Elrick, D.E., Clothier, B.E. 1985. The constant head well permeameter Effect on unsaturated flow. Soil Science. 139(2): 172-18.
29. Reynolds, W.D., Elrick D.E. 1985. In situ measurement of field saturated hydraulic conductivity sorpitivity a parameter using Guelph permeameter. Soil science. 140 (4): 292-302.
30. Rahimi-Ajdadi, F. and Y. Abbaspour-Gilandeh. 2011. Artificial neural network and stepwise multiple range regression methods for prediction of tractor fuel consumption. Measurement, 44 (10): 2104-2111.
31. Sajikumar, N. and B.S. Thandaveswara. 1999. A nonlinear rainfall-runoff model using artificial neural networks, Journal of Hydrology, 216: 32-55.
32. Schaap, M. G. and F. J. Leij. 1998. Using neural networks to predict soil water retention and soil hydraulic conductivity. Soil and Tillage Research, 47: 37-42.
33. Salazar, O., Westrom, I. and A. Joel. 2008. Evaluation of Drain mod using saturated hydraulic conductivity estimated by a pedotransfer function model. Journal of Agricultural Water Management, 95: 1135 – 1143.
34. Wagner, B., Tarnawski, V. R., Hennings, V., Müller, U., Wessolek, G. and R. Plagge. 2001. Evaluation of pedo-transfer functions for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set. Geoderma.102: 275-297.
35. Van Genuchten, M.T. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of soils. Soil Sci. Soc. Amer. J, 44: 892-898.
36. Vereecken, H., Maes, J. and J. Feyen, 1990. Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil property. Soil Science, 149: 1-12.
37. Yilmaz, I. and O. Kaynar, 2011. Multiple regressions, ANN (RBF, MLP) and ANFIS models for prediction of swell potential of clayey soils. Expert Systems with Applications. 38(5): 5958–5966.

بررسی دمای خاک با استفاده از آزمون ناپارامتری من-کندال اصلاح شده در مناطق انتخابی استان خوزستان

حسین زادمهر و احمد فرخیان فیروزی¹

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز: h.zadmher72@gmail.com

دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز: a.farrokhian@scu.ac.ir

دریافت: 1400/5/31 و پذیرش: 1400/9/29

چکیده

افزایش دمای خاک در مقایسه با پارامترهای هواشناسی کمتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. هدف از این مطالعه بررسی روند تغییرات فصلی و سالانه دمای خاک در عمق‌های 5، 10، 20، 30، 50 و 100 سانتی‌متری از سطح خاک در مناطق انتخابی استان خوزستان در یک دوره آماری 25 ساله (1994-2018) بود. بدین منظور، داده‌های ساعتی دمای خاک از 10 ایستگاه سینوپتیک منتخب واقع در استان خوزستان تهیه شد. آزمون ناپارامتری من-کندال اصلاح شده برای بررسی روند تغییرات دمای خاک و روش تخمین گر شیب سن برای تعیین شیب خط روند دما استفاده شد. نتایج بررسی دمای خاک نسبت به عمق نشان داد که در تمامی مناطق، دمای خاک در فصل‌های گرم (بهار و تابستان) با افزایش عمق کاهش یافت اما در فصل‌های سرد (زمستان و پاییز) دمای خاک با افزایش عمق به صورت جزئی افزایش یافته است. نتایج حاصل حاکی است روند دمای سالانه و فصلی خاک در اکثر مناطق افزایش داشته است. همچنین، بیشترین افزایش دمای خاک در زمستان، تابستان و بهار و کمترین افزایش آن در فصل پاییز رخ داده است و دمای سالانه خاک در دوره زمانی مورد بررسی به مقدار 1/28 سانتی گراد افزایش داشته است.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، روند سالانه و فصلی دمای خاک، دمای عمق خاک

¹ نویسنده مسئول، آدرس: اهواز، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده کشاورزی، گروه علوم و مهندسی خاک

مقدمه

امروزه تغییر اقلیم و گرمایش جهانی یکی از واقعیت‌ها و اصلی‌ترین نگرانی‌های جامعه است که حیات بر روی کره زمین را به خطر انداخته است. منظور از گرمایش جهانی افزایش طبیعی یا انسان‌انگیخته² متوسط دمای اتمسفر در نزدیکی سطح زمین است (بختیاری و همکاران، 1400؛ فانگ و همکاران، 2019؛ شی و همکاران 2021). همچنین تغییر اقلیم، معادل تغییرات معنی‌دار آماری متوسط پارامترهای آب‌وهوای یک منطقه طی دوره طولانی مدت (چند دهه و بیشتر) است. دمای سطح یا نزدیک سطح زمین تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند مقدار آفتابی که زمین دریافت و یا منعکس می‌کند قرار دارد. تغییرات آب و هوایی یا به بیان بهتر تغییر اقلیم در اثر این افزایش دما به وجود می‌آید. در گذشته تغییرات اقلیمی هم صورت گرفته است و منحصر به عصر حاضر نیست اما دلیلی که تغییرات اقلیمی در عصر حاضر را نسبت به تغییرات گذشته متفاوت کرده است، ماهیت و سرعت آن است، زیرا این تغییرات سرعت بیشتری به خود گرفته و روند آن به گونه‌ای است که میزان آن قابل پیش‌بینی نیست (نصیری محلاتی، 1395). افزایش دمای خاک یکی از مهم‌ترین نشانه‌های تغییر اقلیم است که کمتر مورد توجه قرار گرفته است (بختیاری و همکاران، 1400؛ گیان و همکاران، 2011؛ شی و همکاران 2021).

دمای خاک و چگونگی تغییرات آن نسبت به زمان (روزانه، ماهانه و سالانه) و مکان (عمق خاک) یک عامل بسیار مهم است که نه تنها تبادل ماده و انرژی را در خاک تحت تأثیر قرار می‌دهد بلکه می‌توان گفت میزان و جهت تمامی فرایندهای فیزیکی خاک به صورت مستقیم و غیرمستقیم وابسته به دما است. علاوه بر آن فرایندهایی مانند تبخیر- تعرق، تهویه خاک، جوانه‌زنی، رشد گیاه، توسعه ریشه‌ها، جذب عناصر غذایی و فعالیت‌های میکروبی درون خاک تابع دمای خاک هستند (یوسفی و

همکاران، 2020). تغییر در دمای خاک مرتبط با گرمایش اقلیمی ممکن است منجر به ذوب شدن سطوح یخ‌زده، تغییر در شرایط و رفتار هیدرولوژیکی سیستم، تغییر میزان پراکنش و رشد گیاهان، افزایش میزان تجزیه کربن آلی خاک و افزایش انتشار CO_2 از خاک به اتمسفر گردد (نلسون و همکاران، 2003). تاکنون بررسی‌ها و مطالعاتی متعدد به منظور برآورد دمای خاک با استفاده از داده‌های هواشناسی صورت گرفته است اما کمتر به بررسی روند تغییرات درجه حرارت آن‌هم در عمق‌های مختلف خاک پرداخته شده است. ژانگ و همکاران (2005) طی پژوهشی در کانادا به این نتیجه رسیدند که میانگین دمای خاک سالانه از میانگین دما هوا سالانه متفاوت است و مقدار آن از 2- تا 7 درجه سانتی‌گراد و به طور متوسط 2/5 درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد و تفاوت زیادی در مقدار دمای خاک در فصل زمستان و بهار مشاهده شد. گارسیا و بولتر (2006) در بررسی‌هایی که در سه ایستگاه در ایرلند انجام دادند، نشان دادند که درجه حرارت خاک در این سه ایستگاه به میزان 0/25 و 0/04 درجه سانتی-گراد در 10 قرن گذشته افزایش یافته است. گیان و همکاران (2011) در کانادا به بررسی روند تغییرات درجه حرارت خاک در ارتباط با تغییر اقلیم پرداختند.

آن‌ها در فصل بهار و تابستان یک روند صعودی معنی‌دار برای درجه حرارت خاک مشاهده کردند. سویلیسیک و وستیک (2015) به بررسی تغییرات فصلی و سالانه درجه حرارت عمق‌های مختلف خاک در کرواسی با استفاده از آزمون من-کندال و آزمون سنس پرداختند، نتایج نشان داد که در نواحی ساحلی و شرقی درجه حرارت لایه سطحی خاک بخصوص در فصل بهار و تابستان افزایش یافته است. مزیدی و فلاح‌زاده (1390) روند دمای عمق‌های مختلف خاک در یک دوره آماری 5 ساله (1380-1384) در ایستگاه سینوپتیک یزد را بررسی کردند و نتایج نشان داد که بیشترین دامنه نوسانات روزانه دما در لایه‌های نزدیک به سطح زمین در ساعت 6/5 صبح

². Man-made

برابر دمای هوا است. نتایج آزمون من کندال روند قابل‌توجهی در دمای خاک در عمق 10 سانتی‌متر در ماه مارس و در عمق‌های 50 و 100 سانتی‌متر برای ماه‌های ژوئن و دسامبر نشان داد.

آگاهی از رژیم حرارتی خاک و نوسانات دمایی آن از خسارات احتمالی به محصولات کشاورزی جلوگیری کرده و موجب افزایش بازدهی آن‌ها می‌گردد (اسدی و همکاران، 1393). همچنین رشد بهینه گیاه بستگی به دمای مطلوب خاک دارد به‌گونه‌ای که دمای خاک زمان کاشت بذر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. لذا آگاهی از روند تغییر دمای خاک و تعیین کمی مقدار آن برای اتخاذ مدیریت صحیح و کاهش اثرات تغییر اقلیم بر بخش کشاورزی ضروری است زیرا به انتخاب ارقام زراعی و شیوه‌های کشت سازگار با اقلیم کمک می‌کند. (همتی و همکاران، 1399). با توجه به اهمیت دمای خاک و نقش و جایگاه آن در رشد گیاه و تولید محصولات کشاورزی و از طرفی پدیده گرمایش جهانی و تأثیر آن بر دمای خاک مطالعه دمای خاک و روند تغییرات آن اهمیت شایانی دارد. با این‌وجود مطالعات اندکی در زمینه روند تغییرات دمای خاک در اعماق مختلف در ایران و به‌ویژه استان خوزستان که یکی از قطب‌های مهم کشاورزی کشور است انجام‌گرفته است؛ بنابراین هدف از انجام این پژوهش بررسی روند تغییرات دمای خاک در عمق‌های 5، 10، 20، 30، 50 و 100 سانتی‌متری از سطح خاک در ایستگاه‌های انتخاب شده استان خوزستان در یک دوره 25 ساله (1994-2018) با استفاده از آزمون نا پارامتری من-کندال اصلاح‌شده بود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان خوزستان با مساحتی حدود 64236 کیلومتر مربع وسیع‌ترین استان در نیمه غربی کشور است. این استان بین 47 درجه و 41 دقیقه تا 50 درجه و 39 دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ و 29 درجه و 58 دقیقه تا 33 درجه و 4 دقیقه عرض شمالی از خط

و در فروردین‌ماه می‌باشد. اسدی و همکاران (1393) در مطالعه‌ای با استفاده از آزمون من-کندال در ایستگاه سینوپتیک گرگان با دوره آماری 18 ساله به بررسی روند تغییرات دمای اعماق مختلف خاک پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که در تمام اعماق خاک روند دمای خاک در شش ماه اول سال صعودی می‌باشد ولی هیچ‌گونه روندی در شش ماه دوم مشاهده نشد. گلشن و همکاران (1394) در پژوهشی به بررسی روند معنی‌دار در دمای هوا و دمای خاک با استفاده از آزمون ناپارامتری من-کندال در عمق‌های 5 و 100 سانتی‌متری خاک در ایستگاه سینوپتیک کرمان پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد دمای خاک در ماه‌های ژانویه و آوریل و آگوست در عمق 5 سانتی‌متری خاک روند کاهشی معنی‌دار داشته است و در ماه مارس و ژوئن در عمق 100 سانتی‌متری خاک دارای روند افزایشی معنی‌دار است. کریمپور و یارمرادی (2015) روند تغییرات دمای اعماق خاک در ایستگاه خرم‌آباد را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که روند تغییرات دمای خاک در لایه‌های سطحی از نوسان خاصی پیروی می‌کند و با افزایش عمق خاک کاهش می‌یابد.

این روند در تمام مؤلفه‌های دمایی قابل‌مشاهده می‌باشد و نوسانات دمای خاک در بخش‌های سطحی با نوسانات انرژی خورشیدی هماهنگ است. حمادی و ذاکری حسینی (1393) روند تغییرات دمای ماهانه و سالانه خاک اهواز در دو عمق 5 و 30 سانتی‌متری را در طی سال‌های 1957 تا 2014 بررسی کردند؛ نتایج این پژوهش نشان داد که شیب افزایش روند دمای خاک در دو عمق 5 و 30 سانتی‌متر به ترتیب 0/038 و 0/030 بوده است. همچنین شیروانی و همکاران (2018) در پژوهشی روند طولانی‌مدت دمای هوا و خاک در عمق‌های مختلف در منطقه نیمه‌خشک ایران را با استفاده از رگرسیون خطی ساده و آزمون من-کندال بررسی کردند و مشاهده کردند که بیشترین روند گرم شدن دمای هوا مربوط به ماه‌های فوریه و اکتبر و کمترین روند دمای هوا مربوط به ماه‌های مارس و دسامبر است و نرخ روند گرم شدن خاک 2 تا 3

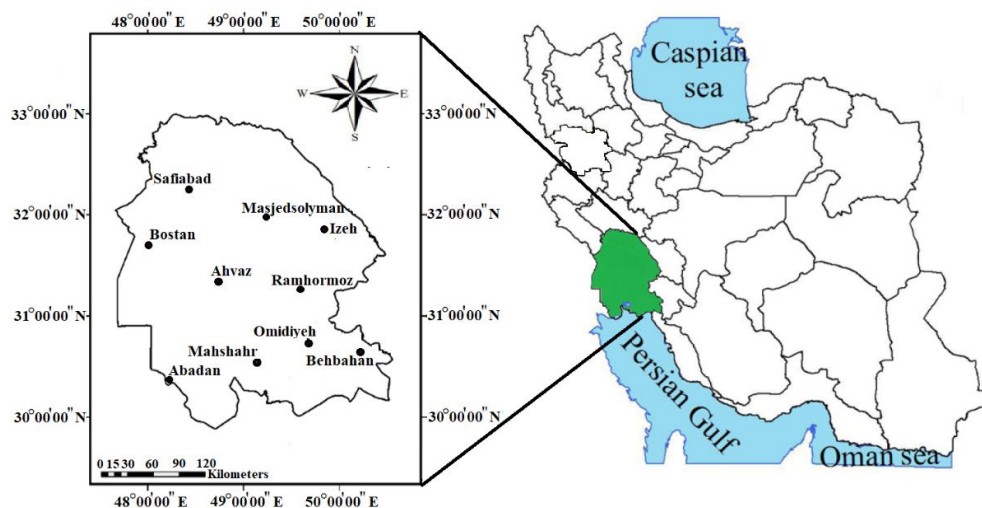
(1994-2018) انتخاب شدند. مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های منتخب مورد مطالعه در شکل 1 نشان داده شده است.

در ایستگاه‌های سینوپتیک کشور دمای خاک معمولاً در عمق‌های 5، 10، 20، 30، 50 و 100 سانتی‌متری در ساعات 6:30، 12:30 و 18:30 به وقت محلی (3، 9، 15 به وقت گرینویچ) اندازه‌گیری می‌شود؛ بنابراین میانگین این سه مقدار در هر عمق مشخص به عنوان میانگین دمای خاک در آن روز حساب می‌شود (سبزی‌پرور و همکاران، 1398؛ ارزاقی و همکاران، 2017). در این پژوهش داده‌های ساعتی دمای خاک در برنامه Excel 2013 به صورت فصلی و سالانه میانگین‌گیری شد. به منظور بررسی روند تغییرات دمای خاک به صورت فصلی و سالانه از ویرایش سوم آزمون نا پارامتری من-کندال اصلاح شده (MKK) در نرم افزار MATLAB نسخه 2018 استفاده شد.

استوا قرار دارد. مطابق با اطلاعات بلند مدت ایستگاه های هواشناسی این استان، متوسط سالیانه دما $25/3$ درجه سانتیگراد، میانگین بارندگی سالیانه $284/3$ میلیمتر و میانگین سالیانه رطوبت نسبی هوا $42/3$ درصد است. بر اساس روش‌های طبقه‌بندی معمول مانند روش‌های طبقه‌بندی کوپن، دومارتن اقلیم‌های موجود در استان خوزستان شامل اقلیم فرا خشک، گرم، اقلیم گرم خشک، اقلیم نیمه‌خشک و اقلیم نیمه مرطوب مدیترانه می‌باشد (بی‌نام، 1397).

داده‌های مورد استفاده

در این مطالعه به منظور بررسی روند تغییرات دمای خاک (عمق‌های 5، 10، 20، 30، 50 و 100 سانتی‌متری) از داده‌های مربوط به تعداد 10 ایستگاه در قسمت‌های مختلف استان خوزستان با طول دوره آماری 25 ساله استفاده شد. ایستگاه‌های آبادان، اهواز، ایزه، امیدیه، بهبهان، بستان، بندر ماهشهر، رامهرمز، مسجدسلیمان و صفی‌آباد با طول دوره آماری 25 ساله



شکل 1- موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه استان خوزستان، ایران

آزمون من-کندال مرسوم (MK)

هواشناسی آزمون من-کندال را برای بررسی و تشخیص روند در سری‌های زمانی توصیه می‌کند (کوندزویچ و

آزمون من-کندال یکی از بهترین روش‌های آشکارسازی و تعیین روند داده‌ها است. سازمان جهانی

آماره آزمون MK استاندارد شده، Z از توزیع نرمال استاندارد با میانگین صفر و واریانس 1 پیروی می‌کند، فرض صفر به شرطی پذیرفته می‌شود که $-Z_{1-\alpha/2} \leq Z \leq Z_{1-\alpha/2}$ قرار گیرد (من، 1945؛ کندل، 1975).

آزمون من-کندال اصلاح شده با حذف کامل اثر خودهمبستگی¹(MKK)

آزمون من-کندال اصلاح شده توسط حامد و راثو (1998) ارائه شد. در این آزمون همه ساختار خودهمبستگی معنی‌دار در سری زمانی بررسی و حذف می‌شود. در این روش واریانس اصلاح شده $V(s)^*$ در محاسبه Z من-کندال مورد استفاده قرار می‌گیرد.

رابطه (6)

$$V(S)^* = V(S) \frac{n}{n^*}$$

رابطه (7)

$$\frac{n}{n^*} = 1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^{n-1} (n-i)(n-i-1)(n-i-2)r_i$$

که در آن، r_i ضریب خودهمبستگی با تأخیر i بوده و $Var(S)$ از رابطه (4) تخمین زده می‌شود. برای محاسبه آماره Z من-کندال اصلاح شده در رابطه (7)، $Var(S)$ با $Var(S)^*$ جایگزین می‌گردد. مقدار آماره Z نرمال در سطح معنی‌داری α مقایسه می‌شود. شایان ذکر است به منظور بررسی روند سری‌ها، در صورتی که مقدار مطلق آماره Z به دست آمده از آزمون ناپارامتری من-کندال بزرگ‌تر مساوی $1/64$ باشد در این صورت روند سری‌ها در سطح 10 درصد، اگر بزرگ‌تر مساوی $1/96$ باشد در سطح 5 درصد و در صورتی که بزرگ‌تر مساوی $2/58$ باشد در سطح 1 درصد معنی‌دار خواهد بود.

رابسون، 2000؛ بهزادی و همکاران، 2020). این روش که فرم کلاسیک آزمون من-کندال است در بسیاری از مطالعات مورد استفاده قرار گرفته است. اگر تعداد سری زمانی در دوره مورد مطالعه n باشد، ابتدا آماره S با رابطه 1 محاسبه می‌شود (من، 1945؛ کندل، 1975):

رابطه (1)

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i)$$

که در آن x_j مقدار داده‌های متوالی، n طول مجموع داده‌ها و $\sin(\theta)$ تابع علامت بوده و به صورت زیر تعیین می‌شود:

رابطه (2)

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & \text{if } x > 0 \\ 0 & \text{if } x = 0 \\ -1 & \text{if } x < 0 \end{cases}$$

کندال (1975) نشان دادند که وقتی $n \geq 8$ باشد آماره S تقریباً به طور نرمال توزیع شده و میانگین و انحراف معیار آن به صورت زیر می‌باشد:

رابطه (3)

$$E(S) = 0$$

رابطه (4)

$$V(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i(t_i-1)(2t_i-5)}{18}$$

که در آن t_i تعداد داده‌های یکسان در دسته i ام می‌باشند. آماره آزمون استاندارد شده Z به صورت زیر محاسبه می‌شود:

رابطه (5)

$$Z = \begin{cases} x = \frac{S-1}{\text{var}(S)} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ x = \frac{S+1}{\text{var}(S)} & \text{if } S < 0 \end{cases}$$

¹ Modified Mann-Kendall test

شیب سن 1

شیب سن یک شاخص بسیار مفید در آزمون من-کندال است که بزرگی روند یکنواخت را نشان می‌دهد مقدار شیب روند با استفاده از شیوه ارائه شده توسط سن (1968) با رابطه زیر برآورد می‌شود:

رابطه (8)

$$\beta = \text{median} \left(\frac{x_j - x_l}{j - l} \right)$$

که در آن، β برآوردگر خط روند و x_l مقدار مشاهده شماره l ام می‌باشد و j یک واحد زمانی بعد از مشاهده l ام می‌باشد مقادیر مثبت β نشان‌دهنده روند افزایشی و مقادیر منفی نشان‌دهنده روند کاهشی می‌باشد.

نتایج و بحث

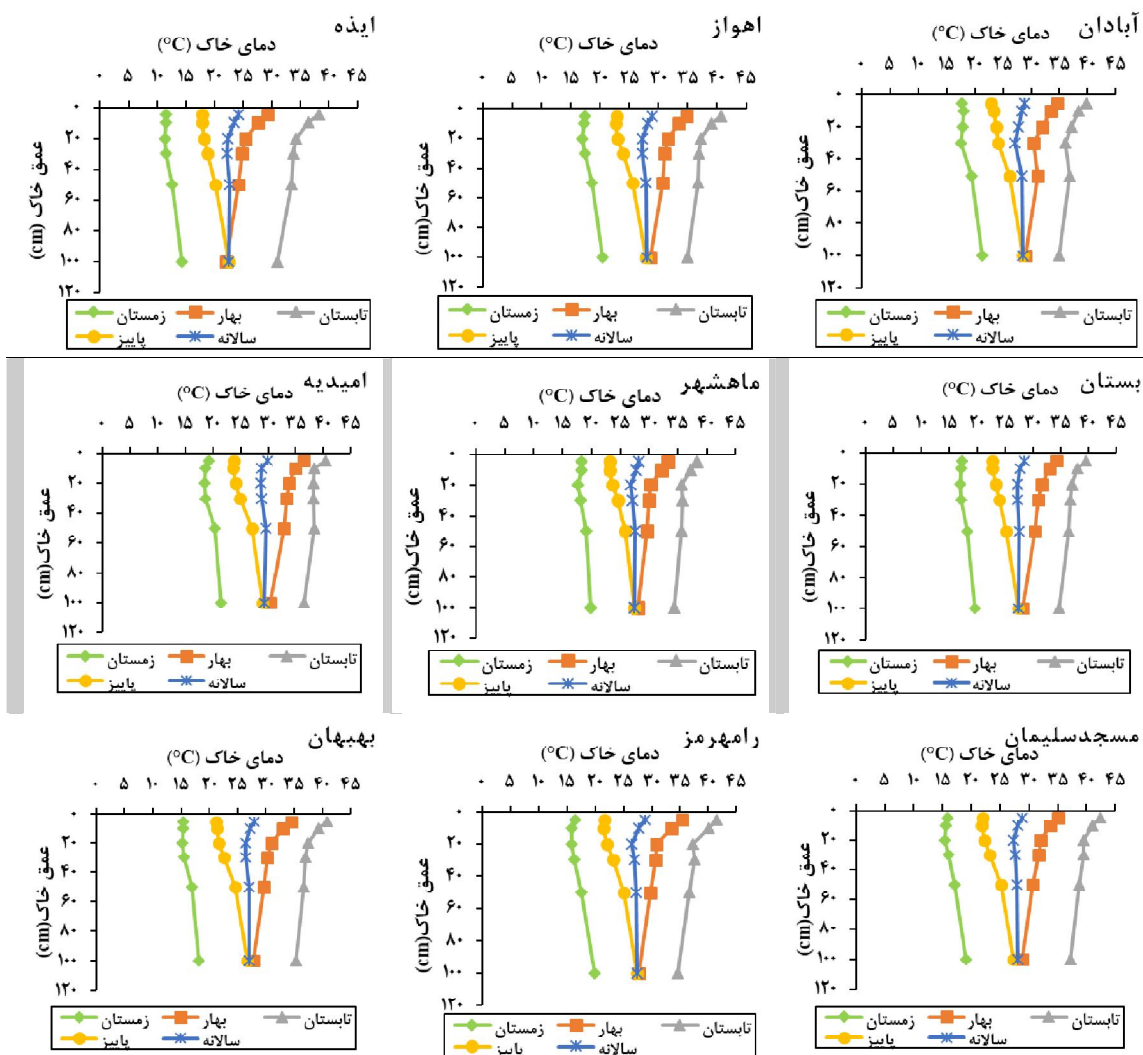
تغییرات سالانه و فصلی دمای خاک با عمق

در شکل 2 نمودار تغییرات سالانه و فصلی دمای خاک نسبت به عمق در برخی مناطق استان خوزستان گزارش شده است. همان‌طوری که ملاحظه می‌گردد در تمامی مناطق دمای خاک به صورت سالانه و همچنین در فصل‌های بهار و تابستان با افزایش عمق کاهش یافته است و شیب کاهش دما در مناطق مختلف متفاوت است. تقریباً در بیشتر مناطق در فصل بهار و تابستان کاهش دما در عمق‌های 5، 10 و 20 سانتی‌متری با شیب بیشتری صورت گرفته است در صورتی که در عمق‌های 30، 50 و 100 سانتی‌متری شیب کاهش دما کمتر است. شیب کاهش دمای خاک به صورت سالانه در عمق‌های 5، 10 و 20 سانتی‌متری نسبت به عمق‌های 30، 50 و 100 سانتی‌متری بیشتر است. در بیشتر مناطق در فصل زمستان دمای خاک از عمق 5 تا 20 سانتی‌متر با شیب بسیار کمی کاهش یافته است اما از عمق 30 تا 100 سانتی‌متری مقدار دمای خاک افزایش یافته است به گونه‌ای که مقدار دمای خاک در عمق 50 تا 100 سانتی‌متری نسبت به عمق 5 سانتی‌متری بیشتر شده است. در فصل پاییز در اکثر مناطق

با افزایش عمق، دمای خاک نسبت به عمق 5 سانتی‌متری افزایش یافته است ولی در اهواز و امیدیه، رامهرمز و مسجد سلیمان دمای خاک در عمق 10 سانتی‌متر نسبت به عمق 5 سانتی‌متری به صورت جزئی کاهش یافته است ولی از این عمق به بعد دمای خاک با شیب ملایمی افزایش یافته است.

دمای خاک متأثر از عوامل متعددی از جمله توپوگرافی، تابش خورشید، دمای هوا، توزیع بارش، میزان رطوبت خاک، نوع و ویژگی گرمایی خاک، همانند ظرفیت گرمایی، ضریب رسانایی گرمایی و گرمای ویژه می‌باشد (نجفی-مود و همکاران، 2008). انتقال گرما در خاک و دمای خاک در اعماق مختلف که ناشی از این انتقال گرما می‌باشد به نوع خاک، میزان رطوبت آن، دمای هوا، ساعات آفتابی و جنس سطح خاک بستگی دارد. در نتیجه میزان دمای اعماق مختلف خاک از جایی به جای دیگر تغییر می‌کند. به طور کلی دمای خاک دارای نوسان روزانه، فصلی و سالانه می‌باشد. دمای خاک در طی فصول گرم از سطح به عمق کاهش می‌یابد و در طی فصول سرد از سطح به سمت عمق افزایش پیدا می‌کند.

¹ Sens Slope Estimator



شکل 2- تغییرات سالانه و فصلی دمای خاک در عمق‌های 5، 10، 20، 30، 50 و 100 سانتی متری

فرخیان فیروزی، 1399؛ نایت و همکاران، 2018).
 بعکس شکل تغییرات دمای خاک با عمق، بیانگر آن
 است در طی فصول سردتر (پاییز و زمستان) مقدار دما
 از سطح به عمق افزایش پیدا می‌کند.

روند تغییرات سالانه دمای خاک

نتایج بررسی روند تغییرات سالانه دمای
 عمق‌های مختلف خاک با استفاده از آزمون من-کندال در
 جدول 1 نشان‌دهنده تفاوت روند آن در مناطق و
 عمق‌های مختلف است. در ادامه این نوشته سطح معنی-
 داری با P نشان داده شده و اندیس آن نشان دهنده عمق
 خاک است. همان طوری که ملاحظه می‌گردد دمای خاک

بطور کلی شکل تغییرات دمای خاک با عمق
 ارائه شده در شکل 2 نشان می‌دهد دمای خاک تقریباً
 به‌صورت نمایی در طی فصول گرم‌تر (بهار و تابستان) از
 سطح به عمق کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش عمق خاک،
 تأثیر پارامترهای هواشناسی مانند تبخیر و سرعت باد بر
 دمای خاک کاهش می‌یابد. در فصول بهار و تابستان با
 افزایش مقدار تبخیر از سطح خاک به دلیل اثر خنک
 کنندگی که تبخیر بر خاک دارد، کاهش دما در لایه سطحی
 خاک را سبب می‌شود. از سوی دیگر با افزایش عمق
 خاک، به دلیل تبادلات کمتر گرما لایه‌های زیرین با
 محیط، مقدار دمای خاک کاهش می‌یابد (زاد مهر و

به صورت سالانه در ایستگاه رامهرمز ($P_{5, 10, 20, 30, 100}$)
 $P_{5, 30, 50, 100\text{cm}} < 0.05$)، ماهشهر ($P_{100\text{cm}} < 0.01$, < 0.05
 $P_{5, 10, 20, 30, 50, 100\text{cm}}$)، صفی آباد ($P_{10\text{cm}} < 0.1$, $P_{20\text{cm}} < 0.01$
 < 0.05)، آبادان ($P_{10, 100\text{cm}} < 0.05$, $P_{5, 20, 50\text{cm}} < 0.1$)،
 بستان ($P_{5, 10, 20, 30, 100\text{cm}} < 0.05$)، بهبهان ($P_{5\text{cm}} < 0.05$,
 $P_{10, 30\text{cm}} < 0.1$)، اهواز ($P_{100\text{cm}} < 0.1$) و امیدیه ($P_{20\text{cm}} < 0.1$)
 در عمق‌های مختلف و در سطوح مختلف معنی‌داری
 روندی مثبت و افزایشی داشته است ولی در تعداد
 معدودی از مناطق مانند ایزده، و مسجدسلیمان در تمامی
 عمق‌های خاک روند تغییرات دما از نظر آماری معنی‌دار
 نبوده است اما شیب سن عمدتاً مثبت است که نشان‌دهنده
 روند مثبت افزایش دمای سالانه در این مناطق نیز می‌باشد.
 به‌طور کلی نتایج بررسی روند تغییرات سالانه لایه سطحی
 (عمق 5 سانتی‌متری) خاک نشان می‌دهد 6 ایستگاه (60
 درصد ایستگاه‌ها) دارای روند افزایشی معنی‌دار دمای
 سالانه و 2 ایستگاه (20 درصد) دارای روند افزایشی بوده
 اما این افزایش معنی‌دار نمی‌باشد و بعکس در 2 ایستگاه
 (20 درصد) روند تغییرات دمای خاک کاهشی بوده اما
 این کاهش معنی‌دار نمی‌باشد. در حالی که تغییرات سالانه
 دما در عمق 100 سانتی‌متری (زیرسطحی) در 6 ایستگاه
 (60 درصد) افزایشی معنی‌دار، در 3 ایستگاه (30 درصد)
 روند افزایشی اما معنی‌دار نبوده و در یک ایستگاه روند
 کاهشی بوده اما معنی‌دار نمی‌باشد (10 درصد). به‌طور
 مشابه با عقیده و همکاران (1396) با استفاده از آزمون
 ناپارامتری من-کندال روند تغییرات دمای اعماق مختلف
 خاک در شمال غرب ایران را بررسی کردند و مشاهده
 کردند که در بیشتر ایستگاه‌ها روند افزایشی معنی‌دار برای
 دمای خاک در اعماق مختلف وجود دارد.

همچنین در پژوهشی دیگر محمدی و فروزان‌فر
 (1395) روند دمای خاک در 10 ایستگاه در ایران با اقلیم-
 های مختلف بررسی کردند، نتایج این پژوهش نشان داد
 که همه ایستگاه‌های مورد مطالعه (به‌جز بندر انزلی) در
 عمق‌های 50 و 100 سانتی‌متری خاک دارای روند صعودی
 بوده‌اند. افزایش دمای خاک یکی از شاخص‌های تغییر

اقلیم است. لذا در این پژوهش میزان افزایش دمای پروفیل
 خاک مناطق مورد مطالعه استان خوزستان در یک دوره
 آماری 25 ساله بررسی شد. برای محاسبه مقدار افزایش یا
 کاهش دما هر منطقه، مقدار شیب سن دمای خاک در طول
 دوره آماری آن ضرب شد. در جدول 2 میزان افزایش
 دمای سالانه لایه‌های 5 تا 100 سانتی‌متری خاک در
 مناطق مختلف استان خوزستان نسبت به دوره آماری 25
 سال گذشته گزارش شده است. همان‌طور که نتایج نشان
 داده است (جدول 2) تقریباً در اکثر مناطق استان
 خوزستان میزان دمای خاک در لایه‌های مختلف
 افزایش یافته است و کاهش مقدار دمای خاک به‌ندرت
 اتفاق افتاده است به‌گونه‌ای که فقط در لایه 5 سانتی‌متری
 خاک اهواز ($-0/1^{\circ}\text{C}$) و ایزده ($-0/2^{\circ}\text{C}$) و در لایه 50 و
 100 سانتی‌متر در ایزده ($-0/12^{\circ}\text{C}$) کاهش داشته است؛
 اما در سایر مناطق استان مقدار دمای خاک افزایش
 پیدا کرده است.

همچنین در تمام مناطق میانگین سالانه دمای
 پروفیل خاک نیز افزایش یافته است که بیشترین افزایش
 دمای خاک مربوط به بستان با مقدار $2/45^{\circ}\text{C}$ و کم‌ترین
 مقدار افزایش دمای خاک در ایزده با مقدار $0/12^{\circ}\text{C}$ بوده
 است. به‌طور کلی میانگین دمای پروفیل خاک در کل استان
 خوزستان به میزان $1/28^{\circ}\text{C}$ افزایش داشته است که
 نشان‌دهنده افزایش دمای خاک در استان خوزستان نسبت
 به دوره‌های آماری گذشته است. بطور کلی لایه‌های
 سطحی خاک در مقایسه با لایه‌های زیرین تغییرات و
 نوسانات بیشتری را نشان می‌دهند زیرا تحت تاثیر
 تغییرات آب و هوایی مانند دمای هوا و بارندگی هستند.
 اما روند افزایشی دمای لایه‌های زیرین خاک نشان‌دهنده
 تغییر اقلیم است (نایت و همکاران، 2018؛ همتی و
 همکاران، 1399). نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که کل
 نیم‌رخ خاک ایستگاه‌های مورد مطالعه افزایش دما را نشان
 می‌دهند که نشان‌دهنده تغییر اقلیم در استان خوزستان
 است. این افزایش دمای خاک می‌تواند اثرات منفی بر
 رشد گیاهان و عملکرد محصولات کشاورزی داشته باشد.

روند تغییرات فصلی دمای خاک

$P_{5, 50, 100\text{cm}} < 0.05, P_{10, 20, 30} < 0.01$ صفی آباد (30, 50, 100cm, <0.01
 $P_{5, 20, 30} < 0.05$ ، بستان ($P_{5, 10, 20, 30} < 0.05$), بهبهان ($P_{5, 10\text{cm}} < 0.1, P_{100\text{cm}} < 0.05$, آبادان (30, 50, 100cm, <0.01
 $P_{5, 10\text{cm}} < 0.1$), و ایذه ($P_{5\text{cm}} < 0.05, P_{10\text{cm}} < 0.1$) دارای روند
 افزایشی معنی‌دار است در حالی‌که در اهواز، امیدیه و
 مسجدسلیمان در تمامی اعماق بدون روند است.

در جدول 3 نتایج فصلی تغییرات دمای خاک
 گزارش شده است همان‌طوری که مشاهده می‌گردد روند
 دمای خاک در مناطق و عمق‌های مختلف خاک استان
 خوزستان متفاوت است و در اکثر مناطق روندی افزایشی
 داشته است. در فصل زمستان دمای خاک در رامهرمز
 $P_{5, 10, 20, 30} < 0.01, P_{10, 30, 50, 100\text{cm}} < 0.01, P_{20, 5\text{cm}} < 0.1$ ماهشهر (5, 10, 20, 30, 50, 100cm, <0.01, P_{20, 5cm} < 0.1)

جدول 1- نتایج آزمون من‌کندال اصلاح شده (مقادیر آماره Z) و شیب سن برای درجه حرارت سالانه عمق‌های
 مختلف خاک ایستگاه‌های انتخابی استان خوزستان

سالانه	5cm	10cm	20cm	30cm	50cm	100cm	شهر
شیب سن	Z	شیب سن	Z	شیب سن	Z	شیب سن	
آبادان	1/95*	0/109	2/02**	0/112	1/72*	0/081	0/065
اهواز	-0/39	-0/004	0/023	0/001	1/51	0/022	0/029
ایذه	-0/39	-0/008	1/09	0/025	0/70	0/018	-0/005
امیدیه	0/72	0/038	0/68	0/021	1/79*	0/036	0/032
بستان	2/25**	0/131	2/02**	0/138	2/42**	0/121	0/051
بهبهان	2/03**	0/036	1/80*	0/046	1/51	0/024	0/027
رامهرمز	2/14**	0/069	2/17**	0/042	2/10**	0/065	0/053
ماهشهر	2/17**	0/072	1/74*	0/083	3/22***	0/083	0/065
صفی آباد	2/13**	0/069	2/09**	0/055	2/27**	0/057	0/061
مسجدسلیمان	0/46	0/020	0/57	0/029	0/91	0/048	0/038

*, **, و *** به ترتیب نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح (P) 10 درصد، 5 درصد، یک درصد.

جدول 2- میزان تغییرات دمای خاک به صورت سالانه در پروفیل خاک ایستگاه‌های انتخابی استان خوزستان

دمای خاک (°C)	5cm	10cm	20cm	30cm	50cm	100cm	میانگین دمای پروفیل خاک
آبادان	2/5	2/75	2	1	-1/25	1/5	1/41
اهواز	-0/1	0/02	0/5	0/12	0/25	0/5	0/21
ایذه	-0/2	0/62	0/45	0/1	-0/12	-0/12	0/12
امیدیه	0/95	0/52	0/9	8	3/5	0/8	2/44
بستان	3/25	3/45	3	2/5	1/2	1/25	2/45
بهبهان	0/9	1/15	0/6	0/98	0/55	0/67	0/8
رامهرمز	1/72	1/05	1/62	1/47	1/05	1/32	1/37
ماهشهر	1/8	2/07	2/07	1/37	1/47	1/62	1/73
صفی آباد	1/72	1/25	1/42	1/47	1/57	1/52	1/49
مسجدسلیمان	0/5	0/72	1/2	0/82	0/65	0/95	0/8
میانگین کل ایستگاه‌ها	1/30	1/36	1/37	1/78	0/89	1/00	1/28

در فصل بهار دمای خاک در بستان در عمق‌های $(P_{5, 20, 30, 50, 100\text{cm}} < 0.05, P_{10\text{cm}} < 0.1)$ صفی آباد $(P_{5\text{cm}} < 0.1, P_{10, 50, 100\text{cm}} < 0.05, P_{5, 20, 30\text{cm}} < 0.1)$ رامهرمز، $(P_{20, 30, 50\text{cm}} < 0.05, P_{100\text{cm}} < 0.01, P_{5\text{cm}} < 0.1)$ ماهشهر، $(P_{20, 30, 50\text{cm}} < 0.01, P_{100\text{cm}} < 0.05, P_{5, 10, 100\text{cm}} < 0.1, P_{50\text{cm}} < 0.05)$ ، امیدیه $(P_{5\text{cm}} < 0.1)$ ، بهبهان $(P_{100\text{cm}} < 0.1)$ و مسجدسلیمان $(P_{20\text{cm}} < 0.05)$ در سطوح مختلف معنی‌داری دارای روند افزایشی است؛ در حالی که در سایر عمق‌های خاک ایستگاه‌ها و همچنین در اهواز و ایذه در تمام عمق‌ها تغییر دما بدون روند است.

در فصل تابستان دمای خاک در بستان در عمق‌های $(P_{5, 10, 20, 30, 50, 100\text{cm}} < 0.05)$ صفی آباد $(P_{5, 50\text{cm}} < 0.01, P_{10, 20, 30\text{cm}} < 0.05, P_{100\text{cm}} < 0.01, P_{10, 20, 50\text{cm}} < 0.05, P_{100\text{cm}} < 0.1, P_{10\text{cm}} < 0.05)$ ، مسجدسلیمان $(P_{20, 50, 100\text{cm}} < 0.1, P_{5, 20, 30\text{cm}} < 0.05, P_{100\text{cm}} < 0.01, P_{20, 100\text{cm}} < 0.1, P_{30\text{cm}} < 0.05)$ ، امیدیه $(P_{100\text{cm}} < 0.1, P_{30\text{cm}} < 0.05, P_{100\text{cm}} < 0.1, P_{5\text{cm}} < 0.1)$ ، بهبهان $(P_{30\text{cm}} < 0.05, P_{100\text{cm}} < 0.1, P_{10\text{cm}} < 0.05, P_{20\text{cm}} < 0.1)$ و ایذه $(P_{10\text{cm}} < 0.05, P_{20\text{cm}} < 0.1)$ در سطوح مختلف معنی‌داری دارای روند افزایشی است؛ اما در سایر عمق‌ها تغییرات دمای خاک بدون روند است.

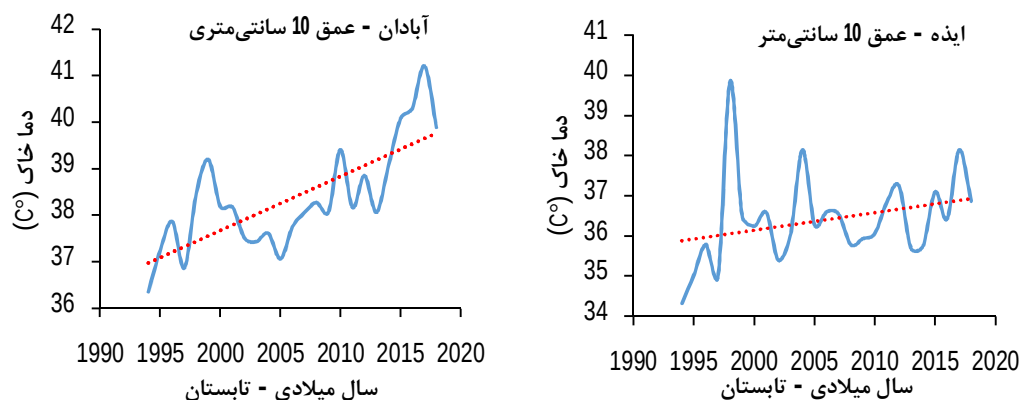
در فصل پاییز دمای خاک در آبادان در عمق‌های $(P_{5, 10\text{cm}} < 0.05, P_{50\text{cm}} < 0.01, P_{10, 20, 100\text{cm}} < 0.01, P_{5\text{cm}} < 0.05)$ ، بستان $(P_{10, 20, 100\text{cm}} < 0.01, P_{5\text{cm}} < 0.05, P_{20\text{cm}} < 0.05, P_{30\text{cm}} < 0.01)$ ، ماهشهر $(P_{10, 20\text{cm}} < 0.1, P_{100\text{cm}} < 0.01, P_{50\text{cm}} < 0.1)$ و در صفی آباد $(P_{10, 20\text{cm}} < 0.1, P_{100\text{cm}} < 0.01, P_{100\text{cm}} < 0.01)$ دارای روند افزایشی در سطوح مختلف معنی‌داری است؛ دمای خاک فقط در اهواز $(P_{30\text{cm}} < 0.1)$ دارای روند کاهشی بوده است و در سایر عمق‌های خاک و مناطق مانند ایذه، امیدیه، بهبهان، رامهرمز و مسجدسلیمان در تمام عمق‌ها بدون روند بوده است. به‌طورکلی نتایج بررسی روند تغییرات فصلی لایه سطحی (عمق 5 سانتی‌متری) خاک نشان می‌دهد که در فصل زمستان 7 ایستگاه (70 درصد) دارای روند معنی‌دار افزایشی و 3 ایستگاه (30 درصد) دارای روند افزایشی

بوده اما این افزایش معنی‌دار نبوده است. درحالی‌که تغییرات دما در عمق 100 سانتی‌متری (زیرسطحی) در 4 ایستگاه (40 درصد) دارای روند افزایشی معنی‌دار بوده، 5 ایستگاه (50 درصد) روند افزایشی اما معنی‌دار نبوده و در 1 ایستگاه (10 درصد) روند کاهشی بوده اما این کاهش معنی‌دار نمی‌باشد. در فصل بهار تغییرات دما لایه سطحی (عمق 5 سانتی‌متری) در 5 ایستگاه (50 درصد) دارای روند افزایشی معنی‌دار، در 3 ایستگاه (30 درصد) روند افزایشی بوده اما معنی‌دار نمی‌باشد. در دو ایستگاه دیگر روند تغییرات دما کاهشی بوده اما معنی‌دار نمی‌باشد. درحالی‌که تغییرات دما در عمق 100 سانتی‌متری (زیرسطحی) در 6 ایستگاه (60 درصد) دارای روند افزایشی معنی‌دار و در 4 ایستگاه (40 درصد) روند افزایشی بوده اما معنی‌دار نمی‌باشد.

در فصل تابستان تغییرات دما لایه سطحی خاک (عمق 5 سانتی‌متری) در 4 ایستگاه (40 درصد) دارای روند افزایشی معنی‌دار، 5 ایستگاه (50 درصد) دارای روند افزایشی غیرمعنی‌دار و یک ایستگاه (10 درصد) دارای روند کاهشی بوده اما این کاهش معنی‌دار نمی‌باشد؛ درحالی‌که تغییرات دمای خاک در عمق 100 سانتی‌متری در 8 ایستگاه (80 درصد) دارای روند افزایشی معنی‌دار، و در 2 ایستگاه (20 درصد) روند افزایشی بوده اما این افزایش از نظر آماری معنی‌دار نمی‌باشد. در فصل پاییز تغییرات دمای لایه سطحی خاک (عمق 5 سانتی‌متری) در 3 ایستگاه (30 درصد)، دارای روند افزایشی معنی‌دار، در 3 ایستگاه (30 درصد) روند افزایشی است اما معنی‌دار نمی‌باشد و در 4 ایستگاه (40 درصد) روند کاهشی بوده اما معنی‌دار نمی‌باشد. در صورتی‌که در همین فصل تغییرات دمای خاک در عمق 100 سانتی‌متری در 3 ایستگاه (30 درصد) دارای روند افزایشی معنی‌دار، در 5 ایستگاه (50 درصد) با این‌که روند تغییر دما افزایشی بوده اما معنی‌دار نمی‌باشد و در 2 ایستگاه دیگر (20 درصد) روند کاهشی بوده اما این کاهش دمای خاک معنی‌دار نمی‌باشد. به‌عنوان نمونه نمودار روند دمای خاک مربوط

فصل تابستان در شکل 3 نشان داده شده است.

به آبادان و ایزه در عمق 10 سانتی متری ($P_{10\text{cm}} < 0.05$) در



شکل 3- روند دمای خاک عمق 10 سانتی متر در فصل تابستان

ارتباط با تغییر اقلیم پرداختند. آن‌ها در فصل بهار و تابستان یک‌روند صعودی معنی‌دار برای درجه حرارت خاک مشاهده کردند. ارزاقی و همکاران (2017) نیز روند تغییرات دمای خاک شمال شرق ایران را در دوره آماری 1996 تا 2016 بررسی کردند و دریافتند روند افزایش دما در ماه‌های گرم سال افزایشی و معنی‌دار بوده و این روند افزایش در لایه‌ی زیرسطحی خاک بیشتر بوده است.

نتیجه‌گیری

نتایج بررسی دمای خاک نسبت به عمق نشان داد که در تمامی مناطق، دمای خاک در فصل‌های گرم (بهار و تابستان) با افزایش عمق کاهش یافته است اما در فصل‌های سرد (زمستان و پاییز) دمای خاک با افزایش عمق به صورت جزئی افزایش یافته است. نتایج حاصل حاکی است روند دمای سالانه و فصلی خاک در اکثر مناطق افزایش داشته است. همچنین، بیشترین افزایش دمای خاک در زمستان، تابستان و بهار و کمترین افزایش آن در فصل پاییز رخ داده است و دمای سالانه خاک در دوره زمانی مورد بررسی به مقدار $1/28^\circ\text{C}$ افزایش داشته است.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از سازمان هواشناسی کشور به سبب در اختیار قرار دادن داده‌های هواشناسی کمال تشکر و قدردانی را دارند.

نتایج حاصل از آزمون‌های من-کندال (جدول 3) و تخمین گر شیب سن (جداول 2 و 4) برای هر 10 ایستگاه منتخب استان خوزستان، حاکی از آن است که روند افزایش دما و شیب سن چه در فصول گرم (بهار و تابستان) و چه فصول سرد (پاییز و زمستان) عمدتاً مثبت بوده است. این در حالی است که اسدی و همکاران (1392) در استان گرگان دریافتند در فصول گرم نرخ افزایش دما بیشتر از فصول سرد بوده است. این پژوهشگران با استفاده از آزمون من-کندال در ایستگاه گرگان با دوره آماری 18 ساله به بررسی روند تغییرات دمای اعماق مختلف خاک پرداخت. نتایج نشان داد که در شش ماه اول سال دمای خاک در تمام اعماق روند صعودی دارد، ولی در شش ماه دوم هیچ‌گونه روندی مشاهده نشده است. آن‌ها نتیجه گرفتند که دما در گرگان در فصول گرم سال در حال گرم شدن است. ووستیک و همکاران (2013) در کرواسی با بررسی روند فصلی دمای خاک نشان داد که بیشترین افزایش و روند معنی‌دار در دمای خاک مربوط به فصل بهار و تابستان است. همچنین مطالعات یشیلرماک (2014) روند درجه حرارت عمق‌های مختلف خاک در ترکیه در مقیاس فصلی بررسی کردند که نتایج آن‌ها نشان داد که درجه حرارت خاک در همه عمق‌های مورد مطالعه و در همه فصول به‌ویژه فصل بهار و تابستان افزایش یافته است. کوئین و همکاران (2011) در کانادا به بررسی روند تغییرات درجه حرارت خاک در

جدول 3- نتایج آزمون من کندال اصلاح شده (مقادیر آماره Z) برای درجه حرارت فصلی عمق‌های مختلف خاک ایستگاه‌های انتخابی استان خوزستان

شهر	فصل	عمق خاک					
		100cm	50cm	30cm	20cm	10cm	5cm
آبادان	زمستان	2/33**	1/52	-0/651	1/58	1/65*	1/65*
	بهار	2/19**	1/74*	-0/592	1/52	1/98**	2/09**
	تابستان	2/16**	1/84*	-0/042	1/80*	2/07**	1/32
اهواز	پاییز	2/58***	2/31**	0/292	2/59***	2/68***	2/35**
	زمستان	1/14	0/210	-0/023	0/817	0/303	0/163
	بهار	1/14	0/676	0/350	0/210	-0/630	-0/864
ایذه	تابستان	1/79*	1/28	1/37	2/12**	0/256	0/490
	پاییز	-0/256	-1/23	-1/84*	-0/163	-1/19	-0/817
	زمستان	-0/163	0/677	0/817	1/28	1/89*	1/98**
امیدیه	بهار	1/004	0/116	0/817	0/724	0/116	-0/770
	تابستان	1/51	1/51	1/51	1/70*	2/03**	-1/33
	پاییز	0/208	-0/022	0/350	0/864	0/770	0/537
بستان	زمستان	0/640	1/002	0/537	1/14	0/397	1/42
	بهار	0/820	1/141	1/61	1/84*	0/537	0/978
	تابستان	1/75*	1/397	2/45**	1/65*	0/662	1/05
بهبهان	پاییز	1/51	1/419	0/724	0/677	0/770	0/350
	زمستان	1/51	0/799	2/05**	2/21**	2/13**	2/177**
	بهار	2/03**	2/32**	2/54**	2/08**	1/81*	2/178**
رامهرمز	تابستان	2/23**	2/15**	2/07**	2/25**	1/99**	1/98**
	پاییز	1/28	0/679	2/95***	2/40**	2/09**	2/54**
	زمستان	1/23	1/19	2/54**	2/26**	2/63***	2/21**
ماهشهر	بهار	1/75*	1/42	1/28	0/630	1/37	0/677
	تابستان	0/210	1/14	2/31**	1/33	1/54	1/77*
	پاییز	0/163	-0/583	0/397	0/677	-0/350	-0/490
صفی‌آباد	زمستان	3/15***	2/91***	3/05***	1/91*	2/68***	1/90*
	بهار	3/29***	2/03**	2/54**	2/31**	1/37	1/69*
	تابستان	3/05***	0/817	2/06**	2/44**	1/41	2/22**
مسجدسلیمان	پاییز	1/61	0/583	0/443	0/397	0/630	-1/05
	زمستان	3/24***	3/106***	2/82***	3/52***	2/96***	3/01***
	بهار	2/33**	2/60**	2/58***	2/85***	1/52	1/67*
مسجدسلیمان	تابستان	2/77***	2/49**	1/70*	2/54**	2/21**	0/957
	پاییز	3/05***	1/37	1/51	1/79*	1/75*	2/03**
	زمستان	2/31**	2/63**	2/59***	3/01***	2/59**	2/03**
مسجدسلیمان	بهار	2/31**	1/97**	1/72*	1/74*	2/03**	1/78*
	تابستان	2/26**	2/38**	2/18**	2/24**	2/10**	1/89*
	پاییز	2/63***	1/89*	1/28	1/56	1/14	1/37
مسجدسلیمان	زمستان	0/910	1/09	1/19	1/28	0/677	0/910
	بهار	1/51	1/56	1/61	2/26**	1/28	1/004
	تابستان	1/94*	1/64*	1/54	1/82*	1/98**	1/30
مسجدسلیمان	پاییز	-0/443	-1/19	-0/341	-0/397	-0/430	-0/474

*, **, و *** به ترتیب نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح 10، 5 و یک درصد.

جدول 4- نتایج آزمون تخمین گر شیب سن برای درجه حرارت فصلی عمق‌های مختلف

خاک ایستگاه‌های انتخابی						فصل	شهر
عمق خاک							
100cm	50cm	30cm	20cm	10cm	5cm		
0/061	0/049	-0/062	0/116	0/144	0/171	زمستان	آبادان
0/059	0/055	-0/074	0/087	0/137	0/134	بهار	
0/074	0/062	-0/005	0/082	0/121	0/064	تابستان	
0/071	0/050	0/021	0/070	0/078	0/081	پاییز	
0/023	0/002	-0/0001	0/020	0/009	0/007	زمستان	اهواز
0/043	0/017	0/006	0/004	-0/016	-0/024	بهار	
0/048	0/024	0/026	0/042	0/004	0/012	تابستان	
-0/002	-0/022	-0/035	-0/003	-0/018	-0/020	پاییز	
-0/006	0/012	0/019	0/035	0/059	0/053	زمستان	ایذه
0/028	0/0079	0/028	0/022	0/006	-0/037	بهار	
0/038	0/033	0/039	0/043	0/060	-0/040	تابستان	
0/009	-0/001	0/005	0/035	0/030	0/013	پاییز	
0/020	0/143	0/016	0/031	0/013	0/044	زمستان	امیدیه
0/029	0/120	0/057	0/057	0/032	0/084	بهار	
0/040	1/159	0/062	0/049	0/049	0/031	تابستان	
0/038	0/147	0/018	0/017	0/027	0/012	پاییز	
0/039	0/032	0/118	0/128	0/133	0/108	زمستان	بستان
0/068	0/078	0/144	0/154	0/177	0/194	بهار	
0/075	0/102	0/141	0/143	0/164	0/178	تابستان	
0/026	0/025	0/097	0/087	0/080	0/071	پاییز	
0/025	0/033	0/063	0/052	0/062	0/059	زمستان	بهبهان
0/033	0/035	0/049	0/027	0/062	0/026	بهار	
0/005	0/022	0/038	0/033	0/078	0/073	تابستان	
0/006	-0/008	0/014	0/016	-0/007	0/013	پاییز	
0/066	0/056	0/073	0/085	0/067	0/085	زمستان	رامهرمز
0/072	0/041	0/069	0/064	0/051	0/122	بهار	
0/034	0/017	0/084	0/093	0/052	0/086	تابستان	
0/039	0/012	0/015	0/018	0/025	0/0341	پاییز	
0/088	0/098	0/081	0/122	0/131	0/139	زمستان	ماهشهر
0/083	0/083	0/063	0/112	0/113	0/075	بهار	
0/054	0/057	0/050	0/079	0/067	0/020	تابستان	
0/056	0/025	0/030	0/043	0/043	0/054	پاییز	
0/048	0/057	0/061	0/071	0/081	0/094	زمستان	صفی آباد
0/074	0/078	0/071	0/045	0/044	0/074	بهار	
0/089	0/095	0/088	0/074	0/066	0/086	تابستان	
0/040	0/029	0/019	0/029	0/022	0/028	پاییز	
0/020	0/029	0/030	0/033	0/015	0/021	زمستان	مسجدسلیمان
0/047	0/050	0/064	0/100	0/037	0/036	بهار	
0/042	0/052	0/077	0/119	0/091	0/048	تابستان	
-0/016	-0/022	-0/011	-0/011	-0/021	-0/024	پاییز	

*, **, و *** به ترتیب نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح 10، 5 و یک درصد.

فهرست منابع:

1. اسدی، ل.، هزارجریبی، ا.، قربانی، خ.، ذاکری نیا، م. و آقا شریعتمداری، ز. 1393. تخمین دمای خاک با استفاده از روش های نوین داده کاوی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، 8 (1): 145-152.
2. باعقیده، م.، انتظاری، ع. و کردی، ا. 1396. بررسی روند تغییر دمای اعماق مختلف خاک در شمال غرب ایران. پانزدهمین کنگره علوم خاک ایران، اصفهان، صص 6-1.
3. بختیاری، س.، میراحمدی، م.، گلستانی کرمانی، س.، بختیاری، ب. 1400. شناسایی روند تغییرات دمای هوا و خاک با استفاده از آزمونهای پارامتری و ناپارامتری در سه ایستگاه همدیدی جنوب شرق کشور. نیوار، 45 (112-113): 16-27.
4. بی نام. 1397. ویژگی های جغرافیایی و اقلیمی استان خوزستان. اداره کل هواشناسی استان خوزستان، هواشناسی گروه تحقیقات هواشناسی کاربردی خوزستان. صص. 16.
5. حمادی، ک.، ذاکری حسینی، فا. 1393. تاثیر تغییر اقلیم بر درجه حرارت پروفیل سطحی خاک در اهواز. نشریه پژوهش های اقلیمی آب، 4(10): 75-84.
6. زادمهر، ح.، فرخیان فیروزی، ا. 1399. برآورد دمای خاک از داده های هواشناسی با استفاده از مدل های یادگیری ماشین سریع، شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چندگانه. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، 51 (4): 895-906.
7. سبزی پرور، ع. ا.، طبری، ح.، آیینی، ع. 1398. برآورد میانگین روزانه دمای خاک در چند نمونه اقلیمی ایران با استفاده از داده های هواشناسی. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک. 14(52): 125-137.
8. کرم پور، م.، یارمرادی، ز. 1394. بررسی روند تغییرات دمای اعماق خاک در ایستگاه خرم آباد. نشریه علوم و مهندسی محیط زیست، 4(7): 13-23.
9. گلشن، س.، رائینی سرجاز، م. و نوروز ولشدی، ر. 1394. بررسی و آشکارسازی اثر گرمایش جهانی بر تغییرات روند دمای خاک و برآورد آن با روش همبستگی رگرسیونی (مطالعه موردی: کرمان). مجله پژوهش های حفاظت آب و خاک، 22(4): 121-138.
10. محمدی، م.، فروزان فرد، م. 1395. بررسی روند درجه حرارت عمق های مختلف خاک در چند نمونه اقلیمی ایران. نشریه پژوهش های اقلیم شناسی، 25 (26): 127-140.
11. مزیدی، ا.، فلاح زاده، ف. 1390. تحلیل سالانه روند دمای خاک در ایستگاه یزد. جغرافیا و توسعه، 24: 29-50.
12. نجفی مود، م. ح.، علیزاده ا.، محمدیان، آ.، موسوی، ج. 1387. بررسی رابطه دمای هوا و دمای اعماق مختلف خاک و برآورد عمق یخبندان (مطالعه موردی استان خراسان رضوی). علوم و صنایع کشاورزی. 22 (2): 456-466.
13. نصیری محلاتی، م. 1395. اگرواکولوژی. تالیف استیون گلیسمن، چاپ اول، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، 460 صص.
14. Araghia, A., M. Mousavi-Baygia, M., Adamowskib, J. 2017. Detecting soil temperature trends in Northeast Iran from 1993 to 2016. Soil & Tillage Research 174: 177–192.
15. Behzadi, F., Wasti, A., Rahat, S. H., Tracy, J. N., Ray, P. A. 2020. Analysis of the climate change signal in Mexico City given disagreeing data sources and scattered projections. Journal of Hydrology: Regional Studies 27: 100625.
16. Fang, X., Luo, S., and Lyu, S. 2019. Observed soil temperature trends associated with climate change in the Tibetan Plateau, 1960–2014. Theoretical and applied climatology, 135(1-2), 169-181.
17. García-Suárez, A. M., and Butler, C. J. 2006. Soil temperatures at Armagh observatory, Northern Ireland, from 1904 to 2002. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society. 26(8), 1075-1089.

18. Hamed, K. H., and Rao, A. R. 1998. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of hydrology*, 204(1-4): 182-196.
19. Kendall, M. G. 1975. Rank correlation measures. Charles Griffin, London, (4th ed). London: Griffin.
20. Knighta, J. H., Minasnya, B., McBratneya, A. B., Koenb, T. B. and Murphyb, B. W. 2018. Soil temperature increase in eastern Australia for the past 50 years. *Geoderma* 313: 241–249.
21. Kundzewicz, Z.W. and Robson, A. (2000) Detecting Trend and Other Changes in Hydrological Data. World Climate Program Data and Monitoring. WMO/TD-No. 1013.
22. Mann, H. B. 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 13(3), 245-259.
23. Nelson, F. E. 2003. (Un) frozen in time. *Science*, 299(5613), 1673-1675.
24. Qian, B., Gregorich, E. G., Gameda, S., Hopkins, D. W., and Wang, X. L. 2011. Observed soil temperature trends associated with climate change in Canada. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D02106): 1-16.
25. Sen, P. K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American statistical association*, 63(324), 1379-1389.
26. Shi, X., Wang, G., Chen, T., Li, S., Lu, J. and Hagan, D.F.T. 2021. Long-term changes in layered soil temperature based on ground measurements in Jiangsu Province, China. *International Journal of Climatology*, 41(5): 2996-3009.
27. Shirvani, A., Moradi-Choghamarani, F., Zand-Parsa, S., and Moosavi, A.A. 2018. Analysis of long-term trends in air and soil temperature in a semi-arid region in Iran. *Environmental earth sciences*, 77(5): 1-11.
28. Svilicic, P., and Vucetic, V. 2015. Spatial and Seasonal Variability of Extreme Soil Temperature in Croatia. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 17: EGU2015-3626-1.
29. Vučetić, V., Jakovčić, P., Filić, S., Derežić, D., and Smolić, A. 2013. Impact of climate change on soil temperature in Croatia. In 2nd International Scientific Conference Soil and Crop Management: Adaptation and Mitigation of Climate Change.
30. Yeşilirmak, E. 2014. Soil temperature trends in B üyük M enderes B asin, T urkey. *Meteorological Applications*, 21(4): 859-866.
31. Yusefi, A., Farrokhan Firouzi, A., Aminzadeh, M. B. 2020. The effects of shallow saline groundwater on evaporation, soil moisture, and temperature distribution in the presence of straw mulch. *Hydrology Research*, 51 (4): 720-738.
32. Zahraei A., Poodineh, M.R., Panjekoubi, P. Hosseini, S.A. 2020. Analysis of soil depth temperature changes in Iran according to classification of atmospheric circulation patterns. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6: 865-877.
33. Zhang, Y., Chen, W., Smith, S. L., Riseborough, D. W., and Cihlar, J. 2005. Soil temperature in Canada during the twentieth century: Complex responses to atmospheric climate change. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110 (D03112): 1-15.

Investigation of Soil Temperature Using the Modified Mann-Kendall Non-Parametric Test in Selected Regions of Khuzestan Province

H. Zadmehr and A. Farrokhian Firouzi¹

MSc student, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz; E-mail: h.zadmher72@gmail.com

Associate Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz; E-mail: a.farrokhian@scu.ac.ir

Received: August, 2021, and Accepted: December, 2021

Abstract

One of the most important signs of climate change is the increase in soil temperature, but compared to other meteorological parameters, it has received less attention by researchers. The objective of this study was to investigate soil temperature trends at 5, 10, 20, 30, 50, and 100 cm depths in selected regions of Khuzestan Province over 25 years (1994-2018). To this end, hourly soil temperature data were collected from 10 selected synoptic stations located in Khuzestan. The modified Mann-Kendall non-parametric test and Sen's slope estimation method were used to determine soil temperature change trend and the slope of temperature gradient, respectively. The results of soil temperature investigation in all regions showed that with increasing soil depth, soil temperature decreased in warm seasons (spring and summer); while in cold seasons (winter and fall) the soil temperature increased slightly. The results also revealed that soil temperature trend increased annually and seasonally in all profile depths in most regions of Khuzestan Province. Furthermore, the highest annual increase in soil temperature was observed in winter, summer, and spring, respectively, and the lowest increase occurred in the fall season. The results also showed that the annual temperature of soil profile increased by 1.28 °C during the study period.

Keywords: Climate change, Annual temperature trend, Seasonal temperature trend, Soil depth temperature

¹ Corresponding author: Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz

Evaluation of Adaptive Neuro Fuzzy Inference System and Regression-Based Peto Transfer Functions for Estimating Saturated Hydraulic Conductivity

Y. Hoseini¹

Assistance Professor, Faculty of Agriculture and Environmental Science, University of Mohaghegh, Ardabili, Iran; E-mail: Y_hoseini@uma.ac.ir

Received: August, 2021, and Accepted: December, 2021

Abstract

Measurement of soil hydraulic properties such as soil saturated hydraulic conductivity is one of the most important physical properties of soil. In this study, adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS) and pedo-transfer functions (PTFs) are used to estimate soil saturated hydraulic conductivity. The model inputs included soil texture, the percent of silt, clay, and sand. To evaluate the performance of the model, parameters of root mean square error (RMSE), percentage of relative error (ϵ), mean absolute error (MAE) and the coefficient of determination (R^2) were used, which for (ANFIS) model were determined as 0.557, 0.627%, 0.844, and 0.997, respectively. Accuracy of PTFs methods decreased from Ferrer-Julià (2004), Roseta (UNSODA(lab)-SSC), Dane (1994), Cosby (1984), Puckett (1985), and Campbell (1994). Among PTFs methods, Ferrer-Julià (2004) had more accuracy with a regression coefficient of ($R^2 = 0.89$) and (RMSE = 2.1). Performance evaluation of the models showed that the ANFIS model compared with PTFs was able to predict soil hydraulic conductivity with more accuracy.

Keywords: Irrigation and Drainage Networks, Soil hydraulic properties, Ferrer-Julià method

¹ Corresponding author: Agricultural engineering & Technology Department, Moghan Faculty of Agriculture and Environmental Science - University of Mohaghegh Ardabili

Application of Machine Learning Models in Spatial Estimation of Soil Phosphorus and Potassium in Some Parts of Abyek Plain

S. R. Mousavi, F. Sarmadian¹ M. Omid, and P. Bogaert

Ph.D. Student, Soil Science and Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran;
E-mail: r_mousavi@ut.ac.ir

Professor, Soil Science and Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran; E-mail: fsarmad@ut.ac.ir

Professor, Agricultural Machinery Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Karaj, Iran;
E-mail: omid@ut.ac.ir

Professor, Earth and Life Institute (ELI), Universite catholique de Louvain (UCL), Louvain-la-Neuve, Belgium; E-mail: patrick.bogaert@uclouvain.be

Received: July, 2021, and Accepted: December, 2021

Abstract

Modeling and mapping of plants nutrient elements in soil has importance in increasing the productivity of agriculture and achieving sustainable development. The aim of this research was to prepare digital maps of two nutrients, namely, available phosphorus (P_{av}) and exchangeable potassium (K_{ex}) using machine learning models (MLM) i.e., random forest (RF), cubist (CB), support vector regression (SVR) and k-nearest neighborhood (k-NN) at two depths of 15-30 and 0-15 cm in a part of Abyek Plain. In this regard, 278 soil profiles were dug, sampled from the desired horizons, and samples were analyzed. MLM performance was implemented by 10-fold cross-valuation. The modeling results demonstrated that the RF model had the highest accuracy and minimum error compared to the other three models in spatial estimation of available P_{av} and K_{ex} at the two studied depths. According to the results, for P_{av} at a depth of 0-15 cm, CCC statistics values of 0.84, 0.74, 0.48 and 0.35 and NRMSE values of 0.38, 0.54, 0.70, and 0.80 belonged to RF, CB, k-NN, and SVR, respectively. For K_{ex} at the same depth, CCC values were 0.82, 0.72, 0.70, 0.47 and NRMSE 0.25, 0.34, 0.36 and 0.45, by RF, CB, SVR, and k-NN models, respectively. Similar results were obtained for 15-30 cm layer. The relative importance of environmental variables showed that soil covariates had a more effective role in the spatial estimation of P_{av} and K_{ex} than other environmental variables. According to the estimated maps of the two elements and the predominance of agricultural land uses, major parts of the area are P_{av} deficient based on standard amounts. Therefore, to increase productivity and improve management of soil fertility, use of phosphate fertilizers is recommended under the supervision of soil experts.

Keywords: Available phosphorus, Exchangeable potassium, Spatial modeling, Digital soil mapping

¹ Corresponding author: Soil Science and Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj.

Estimation of Shape Factor of Soil Hydraulic Conductivity Function of van Genuchten – Mualem Model Using Easily-Available Soil Properties

M. Shiasi Arani, B. Ghahraman¹, H. Emami, and K. Davari

PhD Candidate of Irrigation and Drainage., Dept. of Water Eng., Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad; E-mail: m.shiasi@mail.um.ac.ir

Professor, Dept. of Water Eng., Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad;
E-mail: bijangh@um.ac.ir

Professor, Dept. of Soil Sciences., Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad;
E-mail: hemami@um.ac.ir

Professor, Dept. of Water Eng., Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad;
E-mail: k.davary@um.ac.ir

Received: August, 2021, and Accepted: December, 2021

Abstract

Proper soil hydraulic functions that accurately predict soil water characteristic curve and hydraulic conductivity are essential for studies of unsaturated flow in soils. In this study, 8 soils from different texture classes of UNSODA soil bank were selected and the optimal validity of shape factor (n) of the RETC software (using retention curve function of van Genuchten-Mualem (VGM) model) was investigated for predicting the value of unsaturated hydraulic conductivity at different moisture contents. Since the predicted results of this model were poor, we attempted to investigate a separate shape factor such as $\hat{n}$ for the hydraulic conductivity-moisture ($K-\theta$) function of VGM Model. To this end, 24 soil samples from different texture classes of UNSODA were selected and their measured parameters were analyzed by regression analysis to find a suitable pedotransfer function for estimating $\hat{n}$. The developed function confirmed the relationship of $\hat{n}$ with both saturated moisture (θ_s) and organic matter contents with a correlation coefficient of $r = 0.745$ at significant level of $P = 0.0005$. Also, to validate the developed pedotransfer function, the hydraulic conductivity values corresponding to the measured moistures for the 8 selected soils in the validation section were calculated based on the two shape factors obtained from the pedotransfer function ($\hat{n}$) and the RETC (n) and the results were compared with the measured values. The statistical indices of root mean square error of model ($RMSE_M$) and Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient (NSE) showed that the shape factor of the developed pedotransfer function compared to the RETC, had a better performance in predicting unsaturated hydraulic conductivity values.

Keywords: Pedotransfer functions, Unsaturated flow, Shape factor, Soil water characteristic curve

¹ Corresponding author: Dept. of Water Eng, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University, Mashhad.

Effect of Polymer Coated and Ordinary Urea Fertilizer on Nitrogen Efficiency and Rice Yield and Its Components

S. Heidari¹, M. Niknezhad, S. M. Alavi Siney, and M. Eshraghi-Nejad

Faculty Member of Soil and Water Research Department, South Kerman Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Jiroft, Iran; E-mail: s.heydary@areeo.ac.ir
M.Sc. Crop Science Technology, Haraz Extension and Technology Development Center, AREEO, Amol, Iran; E-mail: organic.farming.iran@gmail.com

Faculty members of Horticulture Crops Research Department, South Kerman Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Jiroft, Iran; E-mail: m.alavis@areeo.ac.ir

Faculty members of Horticulture Crops Research Department, South Kerman Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Jiroft, Iran; E-mail: m.eshraghi@areeo.ac.ir

Received: September, 2021, and Accepted: December, 2021

Abstract

Nitrogen is one of the most important nutrients in crop production, but its efficiency in urea fertilizer is low, especially in paddy fields. Nitrogen yield can be increased by reducing the dissolution of urea in the soil. Therefore, the present study was conducted to investigate the effect of polymer-coated urea fertilizer on growth and yield of rice cv. Tarom Hashemi. The experiment was conducted in a randomized complete block design with three replications in two locations. Experimental treatments included T₀: control, T₁: two splits of ordinary urea (OU), T₂: coated urea (CU), T₃: OU (30%)+CU (70%)(use after transplanting) and T₄: OU (30%)+CU (70%). CU was used at the time of transplanting and OU at heading. The results showed that the location effect was significant only on tiller number and head number/heap. However, the type of urea fertilizer and application method significantly affected tiller number, head number, plant height, grain number, straw yield, grain yield, Harvest Index, and N recovery. Average of the maximum numbers of tillers (24.5) and heads (20.33) in T₃ treatment in the two sites showed, respectively, 52% and 47.5% increase compared to the control treatment. Average grain yields in T₃ treatment in the two fields were 43.1%, 17%, 18.1%, and 18.1% higher than, respectively, the control treatments, T₁, T₂, and T₄. For Tarom Hashemi cultivar, while application of polymer CU mixed with OU was effective in increasing nitrogen recycling and reducing its losses in both places, the effectiveness of this treatment in the field with loamy sand soil was more. Therefore, this can be the most appropriate method of fertilizer application in these soils.

Keywords: Rice grain yield, Nitrogen Recovery Efficiency, Paddy fields soil, cv. Tarom Hashemi

¹ Corresponding author: Soil and Water Research Department, South Kerman Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Jiroft, Iran

Effect of Compost on Growth Characteristics and Macronutrients Concentration in *Momordica Charantia* L. Under Moisture Stress

V. Mohasseli¹ and F. Farbood

Assistant Professor, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Shiraz, Iran; E-mail: v.mohasseli@areeo.ac.ir

Member of Scientific Board, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Shiraz, Iran; E-mail: ffarbood43@gmail.com

Received: October, 2021, and Accepted: December, 2021

Abstract

The present study was performed to evaluate compost effects on growth components and uptake of some macronutrients by *Momordica Charantia* L. under water stress. The greenhouse experiment was conducted in 2021 as factorial in a completely randomized design with three replications. Treatments included five levels of compost (0, 15%, 30%, 45%, and 60% by weight) and three levels of water stress (irrigation at 80% FC (control), 60%FC (moderate water stress) and 40%FC (severe water stress)). The results showed that water application at 60% and 40%FC resulted in reduction of, respectively, 35.8% and 60.8% in shoot dry weight, 30.7% and 56.3% in plant height, 15.9% and 42.3% in fruit weight, 18.1% and 27.2% in number of fruits, 29.4% and 46.7% in fruit length, 13% and 30.7% in N, 21.7% and 52.1% in P, and 28.2% and 36.7% in K concentration compared to the control. The use of different levels of compost as a culture medium for bitter melon had a significant effect on growth characteristics of the plant. Maximum shoot dry weight (93.99 g.pot⁻¹), plant height (351.38 cm), fruit weight (23.56 g.pot⁻¹), number of fruits (16.44), fruit length (13.48 cm), N (2.01%), P (0.2%) and K concentration (2.2%) were observed in culture medium with 45% compost. Thus, the best level of compost application was 45% by weight of compost for Bitter melon. Based on the results, culture medium containing 45% by weight of compost reduces the negative effects of water stress on bitter melon under stress conditions.

Keywords: Water stress, Organic fertilizer, Medicinal plant

¹ Corresponding author: Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Shiraz, Iran.

Effect of Soil Factors on Rice Growth in Guilan, Mazandaran, and Khuzestan Provinces, Iran

S. A. Seyed Jalali¹, A. Azadi, M. N. Navidi, M. Eskandari, A. Cherati A. S. M. Soltani, A. Zeinadini Meymand, and B. Delsooz Khaki

Assistant Professor., Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran; E-mail: ajalali@areeo.ac.ir

Assistant Professor., Soil and Water Research Department, Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Ahwaz, Iran; E-mail: a.azadi@areeo.ac.ir

Assistant Professor., Soil and Water Research Institute, AREEO, Karaj, Iran; E-mail: nnavidi@swri.ir

Assistant Professor., Soil and Water Research Institute, AREEO, Karaj, Iran;

E-mail: mahnazskandari@yahoo.com

Assistant Professor, Soil and Water Research Department, Mazandaran Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Sari, Iran; E-mail: acherati@yahoo.com

Assistant Professor., Rice Research Institute of Iran, AREEO, Rasht, Iran;

E-mail: shmsoltani@gmail.com

Assistant Professor., Soil and Water Research Institute, AREEO, Karaj, Iran;

E-mail: ali_zeinadin@yahoo.com

Researcher, Soil and Water Research Institute, AREEO, Karaj, Iran; E-mail: b_delsooz@yahoo.com

Received: October, 2021, and Accepted: December, 2021

Abstract

Meeting the demand for rice in the country as a strategic product is of special importance. The objective of this study was to investigate the effect of soil properties on rice yield and their rating to prepare a table of soil and landscape requirements of this crop for use in land suitability assessment studies. For this purpose, 99 rice fields in Mazandaran, Guilan, and Khuzestan provinces were selected. In each farm, a soil profile was studied and a land use questionnaire was completed. After the necessary physical and chemical analyses, a simultaneous multivariate regression between yield and different soil properties was investigated. Then, in order to prepare a table of soil and landscape requirements for rice, simple regression relationships between effective soil characteristics and yield were investigated and rated for different land suitability classes. Verification of the proposed table was performed using data from 18 rice fields (about 18% of the whole data). The results showed that the range of yield, lime, sand, clay and silt in selected fields was extensive, but the percentage of exchangeable sodium and soil salinity were in a more limited range. In multivariate regression, the variables of salinity, ESP, lime, soil reaction, percentage of clay and sand, respectively, were efficient. The coefficient of determination of the proposed equation was about 0.38. Also, the value of the coefficient of determination between yield and soil index for verification data was about 0.71, which indicates the reliability of the proposed table in this study.

Keywords: Land suitability, Rice yield, Soil index

¹ Corresponding author: Land Evaluation Research Department, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

Contents

Subject	Page
Effect of Soil Factors on Rice Growth in Guilan, Mazandaran, and Khuzestan Provinces, Iran.....	22
<i>S. A. Seyed Jalali, A. Azadi, M. N. Navidi, M. Eskandari, A. Cherati A. S. M. Soltani, A. Zeinadini Meymand, and B. Delsooz Khaki</i>	
Effect of Compost on Growth Characteristics and Macronutrients Concentration in <i>Momordica Charantia</i> L. Under Moisture Stress.....	23
<i>V. Mohasseli and F. Farbood</i>	
Effect of Polymer Coated and Ordinary Urea Fertilizer on Nitrogen Efficiency and Rice Yield and Its Components	24
<i>S. Heidari, M. Niknezhad, S. M. Alavi Siney, and M. Eshraghi-Nejad</i>	
Estimation of Shape Factor of Soil Hydraulic Conductivity Function of van Genuchten – Mualem Model Using Easily-Available Soil Properties	25
<i>M. Shiasi Arani, B. Ghahraman, H. Emami, and K. Davari</i>	
Application of Machine Learning Models in Spatial Estimation of Soil Phosphorus and Potassium in Some Parts of Abyek Plain.....	26
<i>S. R. Mousavi, F. Sarmadian M. Omid, and P. Bogaert</i>	
Evaluation of Adaptive Neuro Fuzzy Inference System and Regression-Based Pedo Transfer Functions for Estimating Saturated Hydraulic Conductivity	27
<i>Y. Hoseini</i>	
Investigation of Soil Temperature Using the Modified Mann-Kendall Non- Parametric Test in Selected Regions of Khuzestan Province	28
<i>H. Zadmehr and A. Farrokhian Firouzi</i>	

Ministry of Jihad-e-Agriculture
Agricultural Research Education and Extension Organization

Soil and Water Research Institute Soil Science Society of Iran

Research and Scientific Journal
Iranian Journal of Soil Research

Vol. 35, No. 4
2022

Manager-in-Charge: Hadi Asadi Rahmani, PhD
Director General, Soil and Water Research Institute
Editor-in-Chief: Hamid Siadat, PhD
Professor (Research), Soil and Water Research Institute

Editorial Board

Mohammad Bybordi, PhD	University Lecturer
Hossein Besharati, PhD	Professor, Soil and Water Research Institute
Mohammad Reza Balali	Assistant Professor (Research), Soil and Water Research Institute
Amir Fotovat, PhD	Professor, Ferdowsi University, Mashhad
Manochehr Gorji, PhD	Professor, Tehran University
Gholamhosien Haghnia, PhD	Professor, Ferdowsi University, Mashhad
Kazem Khavazi, PhD	Professor, Soil and Water Research Institute
Aziz Momeni, PhD	Associate Professor, Soil and Water Research Institute
Mohammad R. Neyshaboori, PhD	Professor, Tabriz University
Mohammad H. Roozitalab, PhD	Associate Professor Agricultural Research, Education and Extension Organization
Hassan Towfighi, PhD	Associate Professor, Tehran University

English Editor: Hamid Siadat
Type and design: Kobra Alinezhad

Address: P. O. Box: 31785-311, Karaj – IRAN
Tel / Fax: 026-36208796
Soil and Water Institute Website: www.swri.ir
Journal Website: www.srjournal.areeo.ir



Soil and Water Research Institute



Soil Science Society of Iran

Journal of Soil Research

(Soil and Water Sciences)

[http:// www.srjournal.areeo.ir](http://www.srjournal.areeo.ir)

Volume 35 \ No. 4 \ 2022

ISSN: 2228 -7124

Contents

Subject	Page
Effect of Soil Factors on Rice Growth in Guilan, Mazandaran, and Khuzestan Provinces, Iran <i>S. A. Seyed Jalali, A. Azadi, M. N. Navidi, M. Eskandari, A. Cherati A. S. M. Soltani, A. Zeinadini Meymand, and B. Delsooz Khaki</i>	22
Effect of Compost on Growth Characteristics and Macronutrients Concentration in <i>Momordica Charantia</i> L. Under Moisture Stress..... <i>V. Mohasseli and F. Farbood</i>	23
Effect of Polymer Coated and Ordinary Urea Fertilizer on Nitrogen Efficiency and Rice Yield and Its Components <i>S. Heidari, M. Niknezhad, S. M. Alavi Siney, and M. Eshraghi-Nejad</i>	24
Estimation of Shape Factor of Soil Hydraulic Conductivity Function of van Genuchten – Mualem Model Using Easily-Available Soil Properties <i>M. Shiasi Arani, B. Ghahraman, H. Emami, and K. Davari</i>	25
Application of Machine Learning Models in Spatial Estimation of Soil Phosphorus and Potassium in Some Parts of Abyek Plain..... <i>S. R. Mousavi, F. Sarmadian M. Omid, and P. Bogaert</i>	26
Evaluation of Adaptive Neuro Fuzzy Inference System and Regression-Based Pedo Transfer Functions for Estimating Saturated Hydraulic Conductivity <i>Y. Hoseini</i>	27
Investigation of Soil Temperature Using the Modified Mann-Kendall Non- Parametric Test in Selected Regions of Khuzestan Province <i>H. Zadmehr and A. Farrokhian Firouzi</i>	28