



انجمن علوم خاک ایران

نشریه علمی



موسسه تحقیقات خاک و آب

# پژوهش‌های خاک

(علوم خاک و آب)

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

ISSN: 2228 -7124

الف / جلد ۳۸ / شماره ۱ سال ۱۴۰۳

صفحه

فهرست

عنوان

تحلیل تغییرات مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع و عوامل مؤثر بر آن در لایه‌های مختلف نیمرخ خاک شالیزارها.....۲۴

ناصر دوات‌گر، محمدرضا نیشابوری، علیرضا سپاس‌خواه و لیلا رضائی

مدیریت یکپارچه خاک و آب در مقیاس مزرعه در زیر حوضه هنام

(قسمت دوم: بسته‌های مدیریتی واحدهای همگن خاک و آب).....۴۲

محمدرضا بلالی، سینا ملاح، کامران افتخاری، حامد رضایی، کامبیز بازرگان، وینای نانجیا، فرهاد مشیری، مهدی پناهی، مراد سپهوند، عبدالله موم‌وندی، مرادعلی قنبرپوری، صمد عبدی، معصومه متین کیا، مهناز سپهوند و مراد عزیزالهی

بررسی فعالیت آنزیم‌های دهیدروژناز و لیپاز در خاک لوم‌شنی آلوده به نفتای سبک در تیمارهای مختلف زیست‌پالایی.....۵۹

زکیه عافیت، مریم نوروزپور، محمدرضا ساریخانی و ناصر علی‌اصغرزاد

بررسی عوامل مؤثر بر مورفولوژی آبکندهای جنوب غرب نظرآباد به کمک پهپاد.....۷۶

رضا بیات، افسانه عالی نژادیان بیدآبادی، مجید صوفی، عباس ملکی و امید علی اکبرپور

کارایی سه مدل RF، kNN و SVM و مدل به دست آمده از ترکیب آنها به روش GR برای مدل‌سازی بافت خاک.....۹۷

فرشته میرزایی، علیرضا امیریان چکان، روح‌الله تقی‌زاده مهرجردی و حمیدرضا متین‌فر

امکان اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک‌های ریزبافت شور به روش انعکاس‌سنج تأخیر زمانی.....۱۱۱

داود نیک‌نژاد

وزارت جهاد کشاورزی  
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

انجمن علوم خاک ایران

مؤسسه تحقیقات خاک و آب

نشریه  
پژوهش‌های خاک

جلد ۳۸ شماره (۱)

۱۴۰۳

صاحب امتیاز: مؤسسه تحقیقات خاک و آب

تأییدیه درجه علمی

به استناد نامه شماره ۳/۱۱/۳۷۶۰ مورخ ۱۳۸۹/۳/۱۶ اعتبار علمی پژوهشی نشریه پژوهش‌های خاک  
تمدید شده است

استاد و رئیس مؤسسه تحقیقات خاک و آب  
استاد پژوهش مؤسسه تحقیقات خاک و آب

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

اعضاء هیأت تحریریه (به ترتیب حروف الفبا):

مدرس دانشگاه  
استاد مؤسسه تحقیقات خاک و آب  
استادیار مؤسسه تحقیقات خاک و آب  
دانشیار مؤسسه تحقیقات خاک و آب  
دانشیار دانشگاه تهران  
استاد دانشگاه فردوسی مشهد  
استاد مؤسسه تحقیقات خاک و آب  
دانشیار پژوهش سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی  
استاد دانشگاه فردوسی مشهد  
استاد دانشگاه تهران  
دانشیار مؤسسه تحقیقات خاک و آب  
استاد دانشگاه تبریز

دکتر محمد بای بوردی  
دکتر حسین بشارتی  
دکتر محمدرضا بلالی  
دکتر کامبیز بازرگان  
دکتر حسن توفیقی  
دکتر غلامحسین حق نیا  
دکتر کاظم خاوازی  
دکتر محمدحسن روزیطلب  
دکتر امیر فتوت  
دکتر منوچهر گرجی  
دکتر عزیز مؤمنی  
دکتر محمدرضا نیشابوری

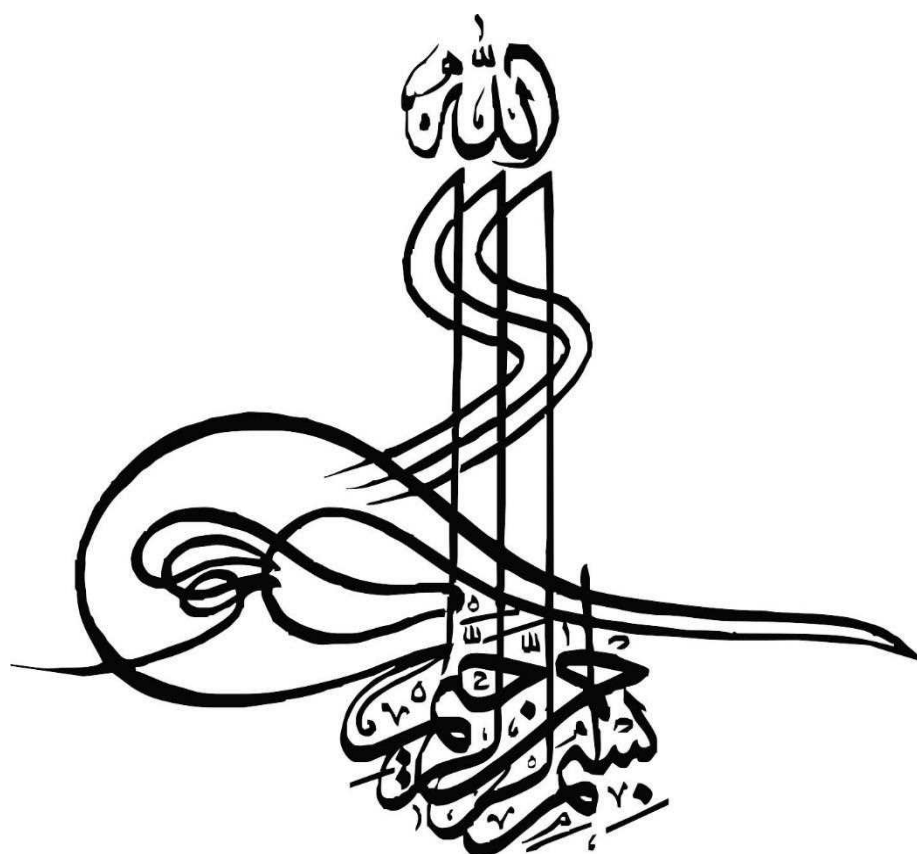
دکتر حمید سیادت  
مهندس کیانا خامه‌چی  
چهار شماره

ویراستار انگلیسی:  
تایپ و صفحه آرایی:  
تعداد انتشار در سال:

این نشریه در پایگاه‌های علمی زیر نمایه می‌شود:  
www.isc.gov.ir پایگاه استنادی علوم جهان اسلام (ISC):  
و همچنین در پایگاه (ISC) از ضریب تأثیر (IF) برخوردار می‌باشد  
www.sid.ir پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی:  
www.civilica.com پایگاه سیولیکا

www.srjournal.areeo.ir : پایگاه الکترونیکی نشریه پژوهش‌های خاک  
www.swri.ir پایگاه الکترونیکی مؤسسه تحقیقات خاک و آب:  
www.soiliran.org پایگاه الکترونیکی انجمن علوم خاک ایران:  
majalehsoil@yahoo.com آدرس الکترونیکی دفتر مجله:

آدرس: کرج - میدان استاندارد، جاده مشکین دشت، بعد از رزکان نو، بلوار امام خمینی، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، کد پستی: ۳۱۷۷۹۹۳۵۴۵  
تلفن و نمابر: ۳۶۲۰۸۷۹۶ (۰۲۶) آدرس پایگاه الکترونیکی مجله: www.srjournal.areeo.ir



- تحلیل تغییرات مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع و عوامل مؤثر بر آن در لایه‌های مختلف نیمرخ خاک شالیزارها..... ۲۴
- ناصر دوات‌گر، محمدرضا نیشابوری، علیرضا سپاس‌خواه و لیلا رضائی
- مدیریت یکپارچه خاک و آب در مقیاس مزرعه در زیر حوضه هنام
- (قسمت دوم: بسته‌های مدیریتی واحدهای همگن خاک و آب)..... ۴۲
- محمدرضا بلالی، سینا ملاح، کامران افتخاری، حامد رضایی، کامبیز بازرگان، وینای نانجیا، فرهاد مشیری، مهدی پناهی، مراد سپهوند، عبدالله موموندی، مرادعلی قنبرپوری، صمد عبدی، معصومه متین کیا، مهناز سپهوند و مراد عزیزالهی
- بررسی فعالیت آنزیم‌های دهیدروژناز و لیپاز در خاک لوم‌شنی آلوده به نفتای سبک در تیمارهای مختلف زیست‌پالایی..... ۵۹
- زکبه عافیت، مریم نوروزپور، محمدرضا ساریخانی و ناصر علی‌اصغرزاد
- بررسی عوامل مؤثر بر مورفولوژی آبکندهای جنوب غرب نظرآباد به کمک پهپاد..... ۷۶
- رضا بیات، افسانه عالی نژادبان بیدآبادی، مجید صوفی، عباس ملکی و امید علی اکبرپور
- کارایی سه مدل RF، kNN و SVM و مدل به دست آمده از ترکیب آنها به روش GR برای مدل‌سازی بافت خاک..... ۹۷
- فرشته میرزایی، علیرضا امیریان چکان، روح‌الله تقی‌زاده مهرجردی و حمیدرضا متین‌فر
- امکان اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک‌های ریزبافت شور به روش انعکاس‌سنج تأخیر زمانی..... ۱۱۱
- داود نیک‌نژاد

## 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

۱- این نشریه صرفاً مقالات پژوهشی (Original Articles) منتج از پژوهش‌های نویسنده و یا نویسندگان در زمینه علوم خاک و آب را منتشر می نماید.

۲- مقاله باید به زبان فارسی روان و پیراسته از غلط‌های نگارشی و نوشتاری باشد. از آوردن واژه های بیگانه که معادل شناخته شده فارسی دارند جداً خودداری گردد.

۳- مسئولیت صحت و سقم مطالب، نظرات و عقاید مندرج در مقالات به عهده نویسندگان مقاله می‌باشد. حقوق معنوی مقالات برای نویسندگان محفوظ می‌باشد.

۴- 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 ۳ 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

۱- مقاله حداکثر در ۱۵ صفحه A4 با فاصله خطوط ۱/۵ و حاشیه‌های ۳ سانتی‌متر از هر طرف و به صورت تک

ستونی در نرم افزار Word 2007 تایپ شود.

۲- نوع قلم فارسی و انگلیسی و اندازه آنها مطابق جدول (۱) استفاده شود.

۳- پیش از نقطه (.) و کاما (،) گذاشتن فاصله لازم نیست، لیکن پس از آنها، یک فاصله لازم است.

۴- اصول نگارش زبان فارسی به طور کامل رعایت شده و از به کاربردن اصطلاحات انگلیسی که معادل فارسی آنها در فرهنگستان زبان فارسی تعریف شده‌اند، حتی الامکان پرهیز گردد.

| جدول ۱- 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                                        |
| اعداد جداول                | Times New Roman | یک واحد کمتر از اندازه فارسی در هر موقعیت |
| متن انگلیسی                | Times New Roman | یک واحد کمتر از اندازه فارسی در هر موقعیت |

نویسنده(گان) موظف هستند حداکثر ۱۵ 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 ۳۰۰ 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 فایل‌های پیشیناز 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 ۲۰ 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 ۳۰۰ 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 ۳-۶ 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  $\Delta$   $\square$   $\bullet$   $\blacktriangle$  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 پیش‌بینی 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 داشته اند، تشکر و قدر دانی نمایند. این قسمت باید کوتاه و در حدود ۵۰ 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، ۱۳۸۹)

..... نتایج مشابهی توسط سایر محققان گزارش شده است (آلوی و همکاران، ۲۰۱۰)

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 نویسنده‌ای 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 (۱۳۸۲) گزارش کردند...

اسمیت (۲۰۰۲) گزارش کرد ...

اسمیت و جونز (۲۰۰۲) گزارش کردند...

اسمیت و همکاران (۲۰۰۲) گزارش کردند...

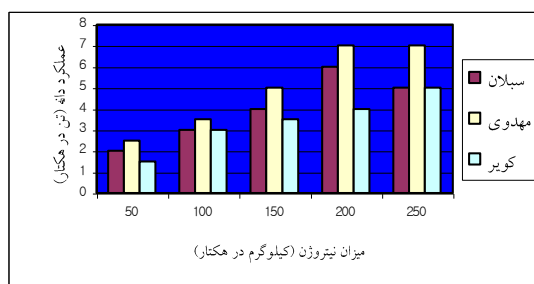
– در صورت عدم رعایت دقیق مطالب فوق‌الذکر، مقاله پذیرفته نمی‌شود و پیش از بررسی به اطلاع نویسنده مسئول می‌رسد. بدیهی است چنانچه مقاله ارسالی با شرایط ذکر شده تهیه و عودت داده شود مجدداً از زمان برگشت که تاریخ واقعی مقاله منظور می‌شود مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

جدول نامناسب

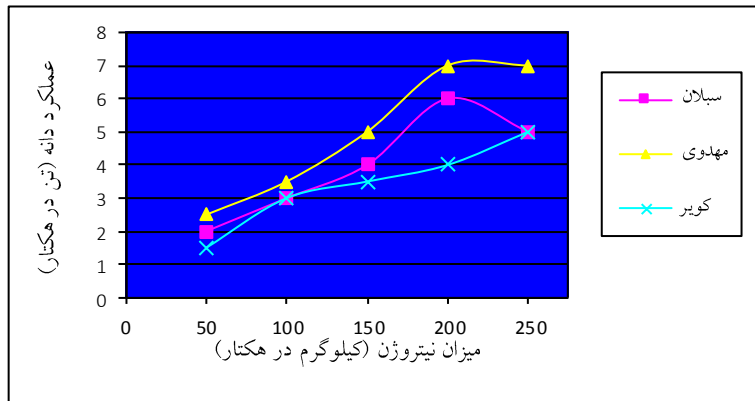
| عمق<br>(cm) | pH  | EC<br>(dS. m-<br>1) | TNV<br>(%) | OC<br>(%) | Pava<br>il | Kavail<br>. | Mge<br>xch | بافت     |
|-------------|-----|---------------------|------------|-----------|------------|-------------|------------|----------|
|             |     |                     |            |           |            |             |            |          |
| ۰-۳۰        | ۸/۲ | ۷/۶                 | ۲۸         | ۰/۶۲      | ۳/۶        | ۲۹۰         | ۳۰۰        | لومی رسی |
| ۳۰-۶۰       | ۸/۲ | ۷/۲                 | ۳۰         | ۰/۵۰      | ۰/۶        | ۲۹۵         | ۳۰۵        | لومی رسی |
| ۶۰-۹۰       | ۷/۸ | ۹/۵                 | ۳۳         | ۰/۲۱      | ۰/۵        | ۳۳۲         | ۲۸۶        | لومی شنی |

جدول مناسب

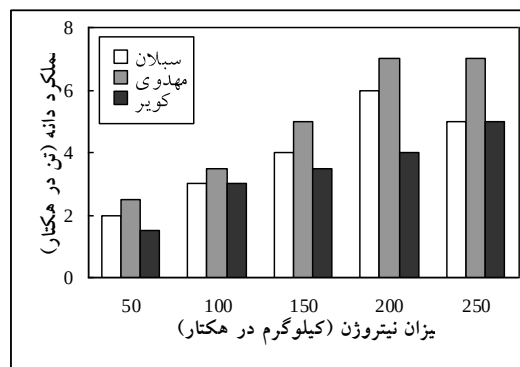
| عمق<br>(cm) | pH  | EC<br>(dS.m <sup>-1</sup> ) | TNV<br>(%) | OC<br>(%) | P <sub>av</sub> | K <sub>av</sub> | Mg <sub>ex</sub>       | بافت     |
|-------------|-----|-----------------------------|------------|-----------|-----------------|-----------------|------------------------|----------|
|             |     |                             |            |           |                 |                 | (mg.kg <sup>-1</sup> ) |          |
| 0-30        | 8/3 | 7/6                         | 28         | 0/60      | 3/6             | 290             | 300                    | لومی رسی |
| 30-60       | 8/2 | 7/2                         | 30         | 0/50      | /60             | 295             | 305                    | لومی رسی |
|             | 7/8 | 9/5                         | 33         | 0/21      | /50             | 232             | 286                    | لومی شنی |



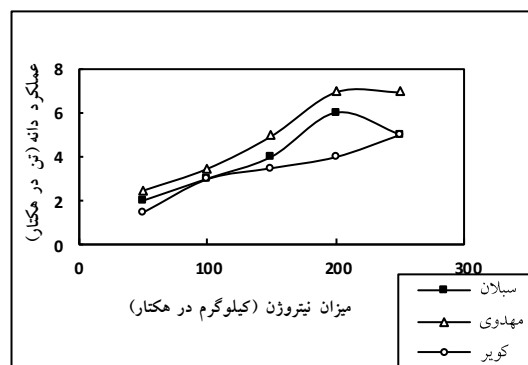
«نامناسب»



### «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:

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

نام نام خانوادگی نویسنده اول: امضاء نویسنده اول مقاله

نام نام خانوادگی نویسنده دوم: امضاء نویسنده دوم مقاله

نام نام خانوادگی نویسنده سوم: امضاء نویسنده سوم مقاله

نام نام خانوادگی نویسنده چهارم: امضاء نویسنده چهارم مقاله

| تعداد داوری | اسامی داوران          |
|-------------|-----------------------|
| ۱           | دکتر هادی اسدی رحمانی |
| ۴           | دکتر حسین اسدی        |
| ۶           | دکتر حسین بشارتی      |
| ۲           | دکتر مجید دانش        |
| ۱           | دکتر حسن روحی پور     |
| ۱           | دکتر فرهاد رجالی      |
| ۱           | دکتر حسینعلی علیخانی  |
| ۲           | دکتر حیدرعلی کشکولی   |
| ۴           | دکتر محمدرضا مصدقی    |
| ۱           | دکتر علی اکبر نوروزی  |
| ۱           | دکتر علیرضا واعظی     |
| ۱           | دکتر یوسف هاشمی نژاد  |
| ۱           | دکتر محمدرضا یزدانی   |



# تحلیل تغییرات مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع و عوامل مؤثر بر آن در لایه‌های مختلف نیمرخ خاک شالیزارها

ناصر دوات‌گر\*، محمدرضا نیشابوری، علیرضا سپاس‌خواه و لیلا رضائی

دانشیار، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران، [n\\_davatgar@yahoo.com](mailto:n_davatgar@yahoo.com)

استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، [neyshmr@hotmail.com](mailto:neyshmr@hotmail.com)

استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، [sepas@shirazu.ac.ir](mailto:sepas@shirazu.ac.ir)

کارشناس آزمایشگاه فیزیک خاک، موسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران، [l.rezaee77@gmail.com](mailto:l.rezaee77@gmail.com)

« مقاله پژوهشی »

دریافت: ۱۴۰۲/۹/۱ و پذیرش: ۱۴۰۳/۵/۹

## چکیده

تحلیل و آگاهی از تغییرات مکانی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک برای موازنه آب-خاک و مدیریت آبیاری شالیزارها مهم است. هدف این پژوهش تعیین تغییرات مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع ( $K_s$ ) و عوامل مؤثر بر آن (بافت خاک، کربن آلی و رطوبت اشباع خاک) در شالیزارها بود. با الگوی نمونه‌برداری شبکه ردیفی تصادفی، از ۱۲۰ نیمرخ در زمین‌های آبیاری غرقابی نمونه‌برداری شد. در هر نیمرخ، از لایه‌های گلخراپ رویی، کفه‌شخم فشرده، و خاک غیراشباع زیر این کفه نمونه‌برداری شد. در این نمونه‌ها، ویژگی‌های بافت، کربن آلی، چگالی ظاهری، رطوبت اشباع و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (به روش بار افتان) اندازه‌گیری شد. بیشترین غیریکنواختی با ضریب تغییرات (CV) بالا، چولگی مثبت و توزیع لوگ‌نرمال در داده‌های  $K_s$  مشاهده شد که نشان‌دهنده جریان ترجیحی ناشی از وجود منافذ زیستی و ترک‌های تنش‌های خشکی پیشین است. نتایج تجزیه زمین‌آمار نشان داد که متغیر  $K_s$  در لایه‌های گلخراپ و خاک غیراشباع زیر کفه شخم از مدل‌های دارای سقف کروی و نمایی با ساختار مکانی به ترتیب متوسط تا ضعیف، و در کفه شخم فشرده از مدل خطی با شیب کم پیروی نمود. ضریب تغییرات  $K_s$  در کفه شخم ۲۹۹٪ بود که از لایه‌های بالایی ۱۲۱٪ و پایینی ۲۸۴٪ بیشتر بود. نزدیک بودن رفتار  $K_s$  به متغیرهای تصادفی در این افق عمدتاً ناشی از وقوع پیشامدهایی مانند وجود منافذ زیستی و کانال‌هایی از ریشه گیاه و حرکت جانوران است که منجر به جریان ترجیحی می‌گردد. باوجود ضعیف تا متوسط بودن ساختار مکانی متغیرها، روش درون‌یابی کریجینگ برای  $K_s$  در مقایسه با وزن دادن عکس فاصله، صحت بیشتری داشت. الگوی توزیع مکانی  $K_s$  در لایه گلخراپ رویی نشان داد که مقادیر زیاد  $K_s$  در این لایه در نقاطی با مقدار رس کم وجود دارد، اما در خاک‌های کفه شخم واقع در نیمه غربی ناحیه مورد مطالعه، باوجود زیاد بودن مقدار رس به علت وجود منافذ زیستی، مقدار  $K_s$  هم زیاد بود. این نتیجه نشان می‌دهد که در شرایط این پژوهش، کفه شخم فشرده نمی‌تواند نقش کلیدی خود را برای کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع و نگهداری آب در خاک اجرا نماید. الگو و اندازه تغییرات مکانی  $K_s$  و عوامل مؤثر بر آن به مدیریت آبیاری ویژه هر مکان وابسته است.

واژه‌های کلیدی: اراضی شالیزاری، کریجینگ، لایه گلخراپ، منافذ زیستی

\*- آدرس ایمیل نویسنده مسئول: [n\\_davatgar@yahoo.com](mailto:n_davatgar@yahoo.com)

## مقدمه

موازنه آب-خاک از مهم‌ترین عوامل در درک چگونگی پاسخ گیاهان به شرایط محدودیت آب است. موازنه آب-خاک بر مبنای ورود یا خروج آب (برحسب میلی‌متر در روز) از عمق ریشه گیاه در خاک استوار است. شبیه‌سازی موازنه آب-خاک برای گیاه در مقیاس ناحیه‌ای نیازمند داده‌های مشخص از توابع هیدرولیکی و ویژگی‌های نیم‌رخ خاک در مکان‌های مختلف است. به علت حساسیت زیاد هدایت هیدرولیکی اشباع به توزیع، پیوستگی و پیچیدگی منافذ، بافت و ساختمان خاک و همچنین عملیات مدیریتی، تغییرات مکانی این متغیر به نسبت زیاد است (سنتنو و همکاران، ۲۰۲۰؛ آزادمرد و همکاران، ۲۰۱۸). از این رو شناخت توزیع مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع در انتخاب شیوه مدیریت و اصلاحات مناسب محلی برای بهبود کارایی مصرف آب و کمینه کردن مصرف آب و آبیاری مواد آگرو شیمی مؤثر است (ویلاگرا مندوزا و هورن، ۲۰۱۸).

هدایت هیدرولیکی اشباع یک مشخصه کلیدی خاک است که نرخ جریان آب در خاک، چگونگی حرکت آب و یا نگهداری آب در خاک را شرح می‌دهد. مقادیر زیاد  $K_s$  منجر به شدت نفوذ سریع آب و زهکشی از خاک و در نتیجه کاهش زمان نگهداری مواد آگرو شیمی در بدنه خاک می‌شود، در حالیکه مقدار کم  $K_s$  سبب افزایش رواناب سطحی و فرسایش می‌شود. اطلاع از هدایت هیدرولیکی اشباع به کشاورزان کمک می‌نماید تا مقدار مناسبی آب آبیاری استفاده کنند (اسویکس و لپیک، ۲۰۲۱). به علت نقش‌های متعددی که  $K_s$  در خاک دارد، اغلب به‌عنوان معیاری از کیفیت فیزیکی خاک در نظر گرفته می‌شود (رینولدز و همکاران، ۲۰۰۰). مطالعات تغییرات مکانی هدایت هیدرولیکی خاک که تاکنون انجام شده بیشتر در مقیاس کوچک (کمتر از ۲۵ متر) (مرتنز و همکاران، ۲۰۰۲؛ دیورر و دویجنزولد، ۲۰۰۰) و یا در مقیاس مزرعه (گیومیر و همکاران، ۲۰۱۴؛ گوپتا و همکاران، ۲۰۰۶) بوده است. اما مطالعات تغییرات مکانی

هدایت هیدرولیکی خاک در مقیاس‌های بزرگ‌تر ناحیه‌ای کمتر انجام شده است، زیرا مشخصه‌سازی مکانی مناسب به علت غیریکنواختی زیاد  $K_s$  به تعداد زیادی نیروی انسانی، زمان اندازه‌گیری طولانی و اندازه‌گیری مستقیم با هزینه زیاد نیاز است (لی و همکاران، ۲۰۰۷؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۲؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۲۰).

یک روش رایج برای محاسبه موازنه آب-خاک در مقیاس ناحیه‌ای، شناسایی نواحی مشابه مکانی بر پایه مشاهدات خواص هیدرولیکی نیم‌رخ خاک و سپس اعمال مدل‌های شبیه‌سازی موازنه آب-خاک به این نواحی همگن است. اما، اگر روابط بین ورودی و خروجی‌های مدل خطی نباشد، تغییرات مکانی خواص خاک در داخل این نواحی می‌تواند منبع اشتباه گردد (به‌چینی و همکاران، ۲۰۰۳).

وضعیت خاک‌ها در اراضی پست شالیاری به نظر می‌رسد که متأثر از مدیریت انسان باشد. در اراضی پست آبیاری شده، کشاورزان تلاش می‌نمایند تا با گلخواب کردن خاک، نیاز آبی گیاه برنج را با ایجاد لایه‌ای با هدایت هیدرولیکی کم کاهش دهند. فرایند گلخوابی همچنین منجر به کنترل علف‌های هرز می‌گردد. لایه گلخواب دارای مقاومت مکانیکی کم است و اجازه سهولت نشاکاری و توسعه مؤثر ریشه گیاه برنج را می‌دهد.

عملیات گلخوابی با استفاده از ماشین‌های کشاورزی مخصوص انجام می‌گیرد و منجر به کاهش حرکت عمودی آب<sup>۱</sup> می‌گردد، زیرا ساختمان و منذهای بزرگ خاک را نابود کرده، مقدار منذهای کوچک را زیاد نموده (مورمان و وان‌بريمن، ۱۹۷۸) و بنابراین هدایت هیدرولیکی خاک را کم می‌کند (تونگ و همکاران، ۱۹۹۴).

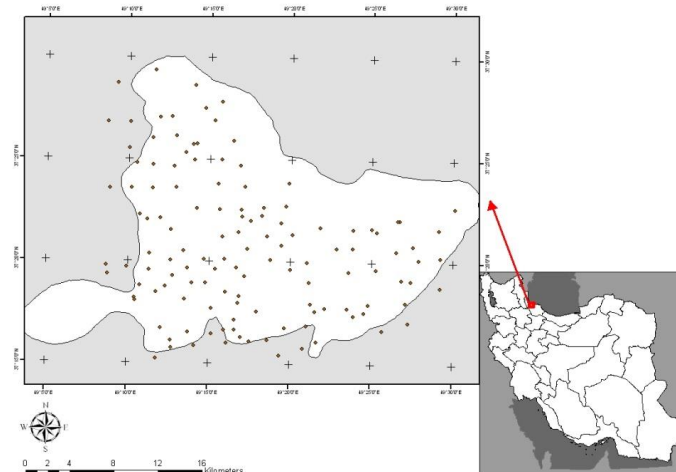
در زیر لایه گلخواب یک ناحیه فشرده در زیر چرخ ماشین‌های کشاورزی تشکیل می‌شود که به آن کفه شخم<sup>۲</sup> گفته می‌شود. افزون بر آن، در این لایه ته‌نشست ذرات





در ابتدا اراضی ناحیه مورد مطالعه با استفاده از الگوی نمونه‌برداری شبکه ردیفی-تصادفی به بلوک‌های مربع با ابعاد نه کیلومتر مربع تقسیم شدند و سپس در هر بلوک که در آن سطح زیر کشت برنج (رقم هاشمی، رایج‌ترین رقم کیفی کشت‌شده در استان گیلان) کم بود، یک نقطه و در هر یک از بلوک‌هایی که سطح زیر کشت این رقم غالب بود و یا سابقه نقصان عملکرد ناشی از تنش خشکی وجود داشت، سه نقطه به صورت تصادفی با ثبت موقعیت جغرافیایی برای بررسی نیم‌رخ خاک انتخاب شدند.

است. موقعیت جغرافیایی ناحیه مطالعه شده در شکل ۱ نشان داده شده است. از نظر زمین‌شناسی، خاک‌های این ناحیه از رسوبات دوران چهارم زمین‌شناسی به صورت-های مختلف تشکیل شده است. واحدهای اصلی فیزیوگرافی در این ناحیه شامل اراضی پست ساحلی، دشت‌های آبرفتی، دشت‌های دامنه‌ای و تا حدودی فلات-ها و پهنه‌های قدیمی است. اقلیم ناحیه مورد نظر با روش آمبرژه مرطوب معتدل و مهم‌ترین خاک‌های غالب در این ناحیه تحت رده‌های Aquept، Ochrept، Udalf و Sament می‌باشند (بردار، ۱۳۵۳).



شکل ۱- نقشه موقعیت جغرافیایی ناحیه مورد مطالعه (شهرستان صومعه سرا) و ۱۲۰ نیم‌رخ مطالعه شده

### اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و صحرایی

نمونه‌های خاک به هم خورده پس از خشک شدن در هوا و عبور از غربال دو میلی‌متری برای تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی آماده شدند. در کلیه نمونه‌ها کربن آلی به روش والکلی بلک (احیایی و بهبهانی‌زاده، ۱۳۷۶)، توزیع اندازه ذرات شامل ذرات شن با استفاده از غربال، سیلت و رس با استفاده از هیدرومتر (گی و اور، ۲۰۰۲)، چگالی ظاهری خاک با استفاده از نمونه به هم خورده و به روش سیلندر (گراسمان و رنیزچ، ۲۰۰۲) و هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار افتان (بولتینک و بوما، ۲۰۰۲) اندازه‌گیری شدند.

پس از حذف نواحی جنگلی، باغ‌ها و محدوده خانه‌های روستایی، ۱۲۰ نیم‌رخ برای نمونه‌برداری انتخاب شدند. محل نیم‌رخ‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. در هر نقطه پس از حفر نیم‌رخی به عمق ۶۰ سانتیمتر از لایه-های گلخراپ رویی، کفه‌شخم و خاک زیرین در زیر لایه فشرده به صورت به هم خورده (به وزن یک کیلوگرم) و به هم نخورده (با استفاده از سیلندرهای به قطر ۷/۲ و ارتفاع ۴/۲ سانتی‌متر) نمونه‌برداری انجام شد.

## تحلیل آماری پارامتریک در مقیاس ناحیه‌ای

تجزیه آماری<sup>۱</sup> داده‌ها در مقیاس ناحیه‌ای نیازمند فرضیه‌های مرتبط با توزیع احتمال<sup>۲</sup> و تغییرپذیری جامعه<sup>۳</sup> است. گشتاورهای آمار توصیفی مانند میانگین، میانه، انحراف معیار، واریانس، تقارن (چولگی)، شکل (کشیدگی) و ضریب تغییرات برای پی بردن به ویژگی‌های آماری جامعه متغیرهای مورد مطالعه، محاسبه شدند. نرمال بودن توزیع فراوانی با استفاده از آزمون‌های معنی‌دار شدن چولگی، کشیدگی و کولموگراف اسمیرنوف ارزیابی شدند (سندکور و کوکران، ۱۹۸۰). برای انجام تجزیه آمار توصیفی از نرم‌افزار SPSS16 استفاده شد.

## تحلیل آماری

در تحلیل زمین‌آمار از نیم‌تغییرنما برای تعیین تغییرات مکانی متغیرهای ناحیه‌ای و کمی نمودن پارامترهای لازم برای درون‌یابی مکانی (مانند کریجینگ) استفاده شد. تغییرنما به داده‌های پرت بسیار حساس و لازم است پیش از مدل‌سازی تغییرنما این داده‌ها حذف شوند. تشخیص داده‌های پرت با شناسایی ارزش‌های بزرگ‌تر یا کوچک‌تر از چهار برابر انحراف معیار از میانگین نمونه‌ها (کاهن و همکاران، ۱۹۹۴) و استفاده از نمودار گسسته انجام شد که در آن جفت داده‌هایی که دارای مقادیر بزرگ نیم واریانس در گام اول هستند و می‌توانند منجر به اثر قطعه‌ای بزرگ گردند، به‌عنوان داده پرت در نظر گرفته شدند.

قبل از شروع تحلیل زمین‌آمار، هر متغیر برای نرمال بودن، وجود روند و غیر همسانگردی ارزیابی شدند. وجود چولگی رایج‌ترین شکل انحراف از نرمال بودن است و ارزیابی نرمال بودن توزیع متغیرها با استفاده از آزمون‌های معنی‌دار شدن چولگی و کولموگراف اسمیرنوف انجام گردید. بهترین تحلیل زمین‌آمار با

استفاده از توزیع فراوانی گوسی انجام می‌شود (روبینسون و مترنیک، ۲۰۰۶). هنگامی که داده‌ها غیر نرمال باشند، تبدیل داده‌ها می‌تواند به نرمال شدن آن‌ها کمک نماید. تبدیل داده‌های غیر نرمال (با چولگی معنی‌دار) با استفاده از لگاریتم داده‌ها انجام شد.

پیش از مدل‌سازی تغییرنما، در صورتی که داده‌ها دارای روند باشند، بعد از تشخیص نوع روند، عملیات حذف روند با استفاده از عملگر برداشت روند در برنامه ARC-GIS10.4 انجام شد. در این برنامه رویه روند<sup>۴</sup> با استفاده از یک مدل افزایشی<sup>۵</sup> از مجموعه داده‌ها حذف شدند. تعیین روند با استفاده از برازش مدل‌های درجه اول<sup>۶</sup> و یا درجه دوم<sup>۷</sup> بر ارزش هر یک از متغیرهای مورد مطالعه (متغیر وابسته) در برابر مختصات جغرافیایی برحسب UTM (متغیر مستقل) انجام شد. مقادیر باقیمانده به ایستابی<sup>۸</sup> نزدیک خواهند بود و برای محاسبه نیم تغییرنما استفاده شدند.

تعداد نمونه‌های لازم برای تشخیص غیر همسانگردی ۳۰۰ است (روبینسون و مترنیک، ۲۰۰۶). در این پژوهش از ۱۲۰ نمونه خاک استفاده شد. بنابراین تشخیص اثرهای جهت جغرافیایی بر تغییرات مکانی متغیرها در مجموعه داده‌های استفاده‌شده، امکان‌پذیر نشد و تغییرات مکانی همسانگرد فرض شدند.

وجود ساختار مکانی در داده‌ها با استفاده از نیم تغییر نمای تجربی ارزیابی شد. تغییر نمای تجربی معیاری از درجه غیر تشابهی<sup>۹</sup> بین نمونه‌های مجاور است و می‌تواند با استفاده از خودهمبستگی<sup>۱۰</sup> در فواصل گوناگون محاسبه گردد. نیم تغییر نمای تجربی،  $\gamma(h)$ ، با استفاده از رابطه زیر به دست آمد (گوورات، ۱۹۹۷):

(۱)

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2$$

- 4 - trend surface  
5 - Additive model  
6 - First-order  
7 - Second-order  
8 - Stationary  
9 - Dissimilarity  
10 - Auto correlation

- 1 - statistical analysis  
2 - probability distribution  
3 - variability of the population

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n W_i \gamma(Z_{(x_i)} - Z_{(x_j)}) + \mu = \gamma(Z_{(x_j)} - Z) \\ \sum_{i=1}^n W_i = 1 \end{cases} \quad j=1,2,\dots,n \quad (2)$$

که در آن  $\mu$  پارامتر لاگرانژ،  $W_i$  وزن اختصاص‌یافته به هر  $Z_{(x_i)}$ ،  $\gamma$  نیم واریانس و  $j$  تعداد نمونه‌های همسایه است.

برای انتخاب بهترین تعداد نمونه در شعاع جستجو به عنوان نزدیک‌ترین همسایه، نتایج حاصل از برآورد برای انتخاب‌های ۵ تا ۲۵ نقطه در شعاع جستجوی کریجینگ با استفاده از آماره‌های ارزیابی، مقایسه شدند (نتایج نشان داده نشدند) و ۲۰ نقطه به عنوان مناسب‌ترین تعداد نقاط همسایه انتخاب گردید.

### وزن دادن عکس فاصله

روش وزن دادن عکس فاصله، IDW، بر اساس این فرضیه است که مقدار متغیر  $Z$  در نقطه نمونه‌برداری نشده  $X_0$ ، متناسب با میانگین وزنی فاصله داده‌ها در محدوده مجاور یا همسایگی آن نقطه است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود (ایساکز و سریواستوا، ۱۹۸۹):

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n W_i Z(x_i) \quad (3)$$

که در آن  $Z^*(x_0)$  مقدار متغیر  $Z$  در موقعیت نمونه‌برداری نشده  $x_0$ ،  $Z(x_i)$  مقدار متغیر  $Z$  در نقطه نمونه‌برداری شده  $x_i$  واقع در اطراف نقطه  $x_0$ ،  $W_i$  وزن اختصاص‌یافته به هر  $Z(x_i)$  و  $n$  تعداد نزدیک‌ترین نقاط نمونه‌برداری شده در همسایگی  $x_0$  است. وزن‌های عکس فاصله،  $W_i$ ، از رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$W_i = \frac{\frac{1}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}} \quad (4)$$

که در آن  $d_i$  فاصله اقلیدسی بین نقاط نمونه‌برداری و تخمین زده‌شده و  $p$  پارامتر نمایی است و مشخص می‌کند که وزن نقاط با افزایش فاصله از نقطه درونیابی با چه سرعتی به صفر میل می‌کند (ایساکز و سریواستوا، ۱۹۸۹). انتخاب پارامتر نما و تعداد نزدیک‌ترین نقاط برای تخمین به‌طور معنی‌داری بر کیفیت

که در آن  $N(h)$  تعداد جفت مشاهدات،  $x_i$  و  $x_i+h$  موقعیت‌های نمونه‌برداری هستند که به فاصله  $h$  از یکدیگر جدا شده‌اند و  $Z(x_i)$  و  $Z(x_i+h)$  مقادیر متغیر اندازه‌گیری شده  $Z$  در موقعیت‌های نمونه‌برداری شده  $x_i$  و  $x_i+h$  هستند. مدل‌های مختلف تغییر نما به نیم واریانس‌های تجربی برازش داده شدند و صحت مدل انتخابی با استفاده از ضریب تعیین،  $R^2$ ، ارزیابی شدند. مدل‌های نیم تغییر نما با سه پارامتر دامنه وابستگی مکانی، واریانس قطعه‌ای و آستانه توصیف می‌شوند. دامنه همبستگی مکانی، فاصله‌ای را مشخص می‌کند که در ماورای آن، دو مشاهده همبستگی مکانی ندارند. واریانس قطعه‌ای<sup>۱</sup> نشان‌دهنده خطای اندازه‌گیری و تغییرات کوچک مقیاس است. برای ایستایی درجه دوم، آستانه نشان‌دهنده واریانس ثابت در مشاهدات است. برازش مدل‌های نیم تغییر نمای کروی، نمایی، خطی و اثر قطعه‌ای با استفاده از نرم‌افزار GS+5.3 انجام شد. بعد از برازش مدل‌ها از مؤلفه‌های مدل‌های تغییر نما برای روش‌های درونیابی استفاده شد.

### کریجینگ معمولی

کریجینگ معمولی<sup>۲</sup>، OK، یکی از چند روش درونیابی زمین‌آمار است که در بازنمایی داده‌های خاک استفاده شده است. در OK میانگین وزنی داده‌ها در نقاط همسایه نقطه نمونه‌برداری نشده با در نظر گرفتن ساختار مکانی توزیع داده‌ها بر پایه تابع همبستگی مکانی نقطه‌ها با استفاده از تحلیل تغییر نما مشخص شدند (گوورات، ۱۹۹۷). در OK، مقدار متغیر در نمونه‌های همسایه  $Z(x_i)$  با استفاده از نیم واریانس<sup>۳</sup> به عنوان تابعی از فاصله به‌گونه‌ای وزن داده می‌شوند که خطای پیش‌بینی توسط کریجینگ معمولی دارای حداقل واریانس تخمین گردد:

1 - Nugget variance  
2 - Ordinary kriging  
3 - Semi-variance

یابی بدون اریب باشد، آنگاه میانگین خطا، ME، می-بایستی برابر با صفر شود، اما ME محاسبه شده محکی ضعیف برای کریجینگ محسوب می‌شود؛ زیرا به عدم صحت در تغییر نما غیر حساس است. ارزش ME همچنین به مقیاس داده‌ها وابسته است؛ به همین علت از میانگین مربعات خطا، MSE استفاده شد. مقادیر کمتر MSE نشان‌دهنده نزدیکی بیشتر شبیه‌سازی‌ها به مشاهدات است. کوبایاشی و سلام (۲۰۰۰) نشان دادند که در ارزیابی مدل‌ها، آماره MSE نسبت به ضریب همبستگی بهتر است.

ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۲</sup>، RMSE، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i^2} \quad (۷)$$

ریشه میانگین مربعات خطا، ترکیبی از مجموع اثرهای اریب و واریانس است، ارزش کوچک‌تر این آماره نشان‌دهنده صحت بیشتر است.

## نتایج و بحث

### آمار توصیفی

گشتاورهای توزیع فراوانی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و متغیرهای مرتبط با آن برای هر سه افق در جدول ۱-الف تا ج نشان داده شدند. بیشترین تغییرات بر پایه ضریب تغییرات، CV، در هر سه افق به هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و پس از آن به مقادیر کربن آلی و شن خاک مربوط است.

میانۀ ضخامت افق رویی (گلخراب) در خاک-های مطالعه شده ۱۶ سانتیمتر بود که نشان‌دهنده این است که تقریباً ۵۰ درصد نمونه‌ها ضخامت این افق کمتر از ۱۵ سانتیمتر بود. دایرمن و اوبرتور (۱۹۹۷) نشان دادند که مناسب‌ترین ضخامت برای افق رویی گلخراب خاک‌های شالیزاری بین ۱۵ تا ۲۰ سانتیمتر است و در ضخامت‌های کمتر از ۱۵ سانتیمتر حجم خاک قابل دسترس برای جذب

تخمین اثر می‌گذارد (کراوچنکو و بالوک، ۱۹۹۹؛ مولر و همکاران، ۲۰۰۱). در این پژوهش برآوردها به روش وزن دادن عکس فاصله با استفاده از مقایسه نزدیک‌ترین نقاط به تعداد ۸ تا ۳۰ و پارامتر نمایی در دامنه ۱ تا ۴ ارزیابی شدند (کراوچنکو و بالوک، ۱۹۹۹) و برآورد با کمترین میانگین خطا، ME، و ریشه میانگین مربعات خطا، RMSE، به عنوان برآورد برتر انتخاب گردید. برای بازنمایی و پهنه‌بندی (تهیه نقشه) متغیرها در روش IDW و OK از نرم‌افزار ARC-GIS10.4 استفاده شد.

## معیارهای ارزیابی روش‌های درونیابی

همه روش‌های ارزیابی تغییرات مکانی دارای خطای معینی ناشی از نمونه‌برداری، تجزیه‌های آزمایشگاهی و آماده‌سازی نقشه هستند. کیفیت نقشه‌های ایجادشده به دو مؤلفه صحت و دقت نقشه بستگی دارد. صحت نقشه نزدیکی برآوردها به مقدار واقعی را اندازه‌گیری می‌کند. اما، دقت نقشه معیاری از قابلیت تغییرات اشتباه در نقشه برآوردها است.

برای مقایسه روش‌های درونیابی و تجزیه و تحلیل خطاها بین داده‌های اندازه‌گیری شده و تخمینی، از روش جک نایف و آماره‌های ارزیابی اعتبار-تقاطع<sup>۱</sup> (مولر و همکاران، ۲۰۰۱؛ کراوچنکو و بالوک، ۱۹۹۹) استفاده شد. این آماره‌ها عبارتند از:

(۵)

$$ME = bias = \frac{1}{n_v} \sum_{i=1}^{n_v} [Z^*(x_i) - Z(x_i)] = \frac{1}{n_v} \sum_{i=1}^{n_v} V_i \quad (۶)$$

$$MSE = bias^2 + precision = \frac{1}{n_v} \sum_{i=1}^{n_v} V_i^2 \quad i=1, \dots, n_v$$

که در آن‌ها ME میانگین خطا یا اریب<sup>۲</sup>، MSE میانگین مربعات خطا و  $V_i$  تفاوت بین مقدار پیش‌بینی شده  $Z^*$  و مقدار مشاهده شده  $Z(x_i)$  در موقعیت  $x_i$  و  $n_v$  تعداد نمونه‌های آزمون شده است. در شرایط ایده آل اگر درون-

1 - Cross-validation

2 - Bias

3 - Root mean squared error

آب و عناصر غذایی توسط ریشه محدود می‌شود. ووپیرز و همکاران (۱۹۹۲) بیان کردند که افق رویی گلخراپ نقش بسیار مهمی در اقتصاد آب و تولید محصول در نظام شالیزاری دارد. متغیرهای درصد رس و رطوبت حجمی اشباع خاک در هر سه افق و سیلت و چگالی ظاهری در افق‌های دوم و سوم دارای توزیع نرمال و بدون چولگی و کشیدگی معنی‌دار بودند. نرمال بودن توزیع فراوانی بیانگر آن است که در جامعه نمونه‌ها، جوامع فرعی مجزا وجود ندارد، واریانس یکنواخت است و داده‌های پرت نیز وجود ندارند (یونگ و همکاران، ۱۹۹۹). این شرایط در بسیاری از ناحیه‌ها غیرمتحمل به نظر می‌رسد، مگر آنکه نمونه-برداری به صورت انتخابی، آگاهانه و از طریق راهبرد مشخص انجام شود و یا آنکه فرایندهای فیزیکی و شیمیایی مؤثر بر رفتار متغیرها مشابه باشند. در این پژوهش نمونه‌برداری به الگوی شبکه ردیفی-تصادفی انجام شد و علاوه بر آن با غرقاب و گلخراپ کردن خاک‌ها در هنگام عملیات خاک‌ورزی شالیزارها ساختمان خاک از بین رفته و با حاکم شدن شرایط احیایی، فرایندهای فیزیکی و شیمیایی مؤثر بر متغیرهای مطالعه شده به گونه نسبی یکنواخت‌تر گردید.

هدایت هیدرولیکی اشباع در هر سه افق دارای چولگی مثبت و توزیع لوگ‌نرمال بود. هدایت هیدرولیکی اشباع وابستگی زیادی به توزیع اندازه منافذ به‌ویژه شکل و پیوستگی منافذ بزرگ دارد (گودوی و همکاران، ۲۰۱۹). چولگی مثبت و توزیع لوگ‌نرمال ناشی از وجود پدیده جریان ترجیحی است. متغیرهای مرتبط با انتقال جرم، مانند هدایت هیدرولیکی اشباع، اغلب دامنه وسیعی از داده‌های با درجه متفاوت از بزرگی مقدار را نشان می‌دهند که در نتیجه وجود منافذ بزرگ در خاک است. این پدیده با ایجاد جریان ترجیحی منجر به توزیع فراوانی غیر نرمال با ایجاد چولگی مثبت می‌گردد (واریک و وان‌اس، ۲۰۰۲). توزیع فراوانی توگ‌نرمال در  $K_s$  اشاره بر آن دارد که عوامل مؤثر در مقیاس بندی  $K_s$  نیز توزیع لوگ‌نرمال داشته باشند (کوزوگی و هاپمن، ۱۹۹۸). متغیر

کربن آلی در هر سه افق دارای توزیع لوگ‌نرمال با چولگی مثبت بود. لاگسدون (۲۰۰۲) و رومانو (۱۹۹۳) نیز نشان دادند که متغیر کربن آلی از توزیع لوگ‌نرمال برخوردار است. تغییرات زیاد در کربن آلی خاک را می‌توان به اثر عوامل زیادی مانند: مواد مادری، بافت خاک، مدیریت، توپوگرافی و وضعیت زهکشی نسبت داد. برهم‌کنش این عوامل می‌تواند منجر به تغییرات زیاد در کربن آلی خاک گردد (مک‌گراس و ژانگ، ۲۰۰۳). از سوی دیگر بر اثر عملیات تسطیح اراضی، خاک‌برداری و خاک‌ریزی که در ۸۲۵۲ هکتار (۳۳ موقعیت) از اراضی شالیزاری این ناحیه انجام شده است، بخشی از خاک‌های زیرسطحی که از کربن آلی کمتری برخوردار بودند، در معرض سطح قرار گرفته و منجر به غیریکنواختی بیشتر می‌گردد. زلک و سی (۲۰۰۵) نشان دادند که علت چولگی مثبت در کربن آلی ناشی از تغییرات مقیاس بزرگ در داده‌ها است.

متغیر شن دارای توزیع فراوانی غیر نرمال با چولگی و کشیدگی مثبت معنی‌دار بود. بیشتر نمونه خاک‌های شالیزاری مورد مطالعه از نظر زمین‌نما<sup>۱</sup> در دشت آبرفتی دامنه‌ای (متشکل از رسوبات آبرفتی) واقع شده که از تکامل زیاد برخوردار و شدت هوادیدگی در آن‌ها به نسبت زیاد است (ترابی گلسفیدی، ۱۳۸۰). این خاک‌ها از رس زیاد و شن کم برخوردار هستند. اما، تعدادی از نمونه‌ها در اراضی شالیزاری نزدیک به تالاب انزلی واقع شده‌اند که از نظر زمین‌نما جزء دشت‌های ساحلی با مقدار شن زیاد محسوب می‌شوند. این پدیده منجر به ظهور تعدادی نمونه با مقدار شن زیاد و ایجاد چولگی مثبت در توزیع فراوانی شد.

جدول ۱- الف) آمار توصیفی متغیرهای مطالعه شده در افق رویی (خاک گلخراپ)

| متغیر                 | واحد                             | حداقل | حداکثر | میانگین | میانه | انحراف معیار | واریانس | چولگی  | کشدگی   | ضریب تغییرات | نوع توزیع |
|-----------------------|----------------------------------|-------|--------|---------|-------|--------------|---------|--------|---------|--------------|-----------|
| ضخامت لایه            | cm                               | ۶     | ۲۹     | ۱۶/۶۵   | ۱۶    | ۳/۳۹         | ۱۱/۴۹   | ۰/۶۸   | ۱/۰۶    | ۲۰/۳۶        | لوگ نرمال |
| کربن آلی              | %                                | ۰/۷   | ۶/۴۸   | ۲/۴۹    | ۲/۲۸  | ۱/۱۴         | ۱/۳۰    | ۱/۱۸ * | ۱/۳۵ *  | ۴۵/۹         | لوگ نرمال |
| شن                    | %                                | ۳     | ۴۸     | ۲۰/۶    | ۱۸    | ۱۰/۸۹        | ۱۱۸/۵۲  | ۱/۷۶ * | ۶/۳۰ *  | ۵۲/۹         | لوگ نرمال |
| سیلت                  | %                                | ۱۴    | ۷۴     | ۴۹/۴۸   | ۴۹    | ۸/۴۰         | ۷۰/۴۸   | ۰/۴۸ * | ۲/۰۵ *  | ۱۷           | -         |
| رس                    | %                                | ۲     | ۵۴     | ۲۹/۹    | ۲۹/۵  | ۹/۸۹         | ۹۷/۸    | ۰/۱ ns | ۰/۳۷ ns | ۳۳           | نرمال     |
| چگالی ظاهری خاک       | g cm <sup>-3</sup>               | ۰/۷۲  | ۱/۵۸   | ۱/۰۷    | ۱/۰۵  | ۰/۱۵         | ۰/۰۲    | ۰/۵۷ * | ۰/۰۵ ns | ۱۴           | لوگ نرمال |
| رطوبت حجمی اشباع      | cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> | ۰/۴۲  | ۰/۶۹   | ۰/۵۷    | ۰/۵۷  | ۰/۰۵         | ۰/۰۰۲   | ns     | ۰/۳۳ ns | ۹            | نرمال     |
| هدایت هیدرولیکی اشباع | cm d <sup>-1</sup>               | ۰/۰۱  | ۱/۴۳   | ۰/۱۹    | ۰/۱   | ۰/۲۳         | ۰/۰۵    | ۳/۰۹ * | ۱۱/۱۵ * | ۱۲۱          | لوگ نرمال |

جدول ۱- ب) آمار توصیفی متغیرهای مطالعه شده در افق دوم (کفه شخم فشرده زیرین لایه گلخراپ)

| متغیر                 | واحد                             | حداقل | حداکثر | میانگین | میانه | انحراف معیار | واریانس | چولگی  | کشدگی   | ضریب تغییرات | نوع توزیع |
|-----------------------|----------------------------------|-------|--------|---------|-------|--------------|---------|--------|---------|--------------|-----------|
| ضخامت لایه            | cm                               | ۸     | ۵۴     | ۲۱/۴۴   | ۱۹    | ۸/۹۵         | ۸۰/۰۸   | ۱/۶۶   | ۲/۷۱    | ۴۱/۷۴        | لوگ نرمال |
| کربن آلی              | %                                | ۰/۳۶  | ۵/۳    | ۱/۶۸    | ۱/۴   | ۱/۰۸         | ۱/۱۷    | ۱/۰۸ * | ۰/۸۴    | ۶۴/۲         | لوگ نرمال |
| شن                    | %                                | ۱     | ۶۴     | ۱۷/۱    | ۱۵    | ۱۰/۹         | ۱۱۹/۹   | ۱/۵۷ * | ۳/۱ *   | ۶۳/۷         | لوگ نرمال |
| سیلت                  | %                                | ۲۲    | ۷۰     | ۴۹/۳    | ۵۰    | ۸/۴          | ۷۰/۴    | ۰/۲۲   | ۰/۳۳    | ۱۷           | نرمال     |
| رس                    | %                                | ۱۲    | ۶۱     | ۳۳/۶    | ۳۳    | ۱۰/۷         | ۱۱۵     | ۰/۳۶   | ۰/۳۴    | ۳۱/۸         | نرمال     |
| چگالی ظاهری خاک       | g cm <sup>-3</sup>               | ۰/۷۳  | ۱/۸    | ۱/۲۹    | ۱/۳۳  | ۰/۲۳         | ۰/۰۵۵   | ۰/۰۹   | ۰/۶۶    | ۱۷/۸         | نرمال     |
| رطوبت حجمی اشباع      | cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> | ۰/۳۱  | ۰/۷۳   | ۰/۵۴    | ۰/۵۴  | ۰/۰۸         | ۰/۰۰۷   | ۰/۰۳   | ۰/۱۶    | ۱۴/۸         | نرمال     |
| هدایت هیدرولیکی اشباع | cm d <sup>-1</sup>               | ۰/۰۱  | ۷۷۵/۴  | ۳۶/۸۹   | ۱/۳۸  | ۱۱۰/۴۴       | ۱۲۱۹/۰۳ | ۴/۸۳ * | ۲۵/۸۴ * | ۲۹۹/۳        | لوگ نرمال |

جدول ۱- ج) آمار توصیفی متغیرهای مطالعه شده در افق سوم (خاک غیراشباع زیرین کفه شخم)

| متغیر                 | واحد                             | حداقل | حداکثر | میانگین | میانه | انحراف معیار | واریانس | چولگی   | کشدگی   | ضریب تغییرات | نوع توزیع |
|-----------------------|----------------------------------|-------|--------|---------|-------|--------------|---------|---------|---------|--------------|-----------|
| ضخامت لایه            | cm                               | ۸     | ۴۰     | ۲۶/۸۵   | ۲۶    | ۶/۳۶         | ۴۰/۳۹   | ۰/۰۶    | ۰/۲۴    | ۲۳/۶۷        | لوگ نرمال |
| کربن آلی              | %                                | ۰/۰۴  | ۳/۶۱   | ۰/۷۵    | ۰/۵۳  | ۰/۶۵         | ۰/۴۲    | ۲/۰۳ *  | ۴/۹۴ *  | ۸۶/۶         | لوگ نرمال |
| شن                    | %                                | ۱     | ۹۳/۶   | ۲۱/۱۴   | ۱۴    | ۱۹/۰۴        | ۳۶۲/۴   | ۱/۹ *   | ۳/۶۰ *  | ۹۰           | لوگ نرمال |
| سیلت                  | %                                | ۲/۰۳  | ۶۷/۷   | ۴۵/۶    | ۴۷    | ۱۲/۰۳        | ۱۴۴/۷   | ۰/۹۹    | ۱/۸۹    | ۲۶/۴         | نرمال     |
| رس                    | %                                | ۰/۴۸  | ۵۸     | ۳۳/۲۳   | ۳۲/۵  | ۱۲/۴۸        | ۱۵۵/۷   | ۰/۱۸    | ۰/۲۹    | ۳۷/۶         | نرمال     |
| چگالی ظاهری خاک       | g cm <sup>-3</sup>               | ۰/۹۵  | ۱/۸۸   | ۱/۴۳    | ۱/۴۵  | ۰/۱۷         | ۰/۰۳    | ۰/۳۲    | ۰/۲۲    | ۱۱/۹         | نرمال     |
| رطوبت حجمی اشباع      | cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> | ۰/۳۴  | ۰/۷۶   | ۰/۴۹    | ۰/۴۹  | ۰/۰۷         | ۰/۰۰۵   | ۰/۳۷۹   | ۰/۲۱    | ۱۴/۳         | نرمال     |
| هدایت هیدرولیکی اشباع | cm d <sup>-1</sup>               | ۰/۰۱  | ۶۳۰/۸۴ | ۴۷/۷۵   | ۴/۵۱  | ۱۱۸/۶۱       | ۱۴۰۶۹/۳ | ۳/۷۱۲ * | ۱۳/۹۵ * | ۲۸۴/۴        | لوگ نرمال |

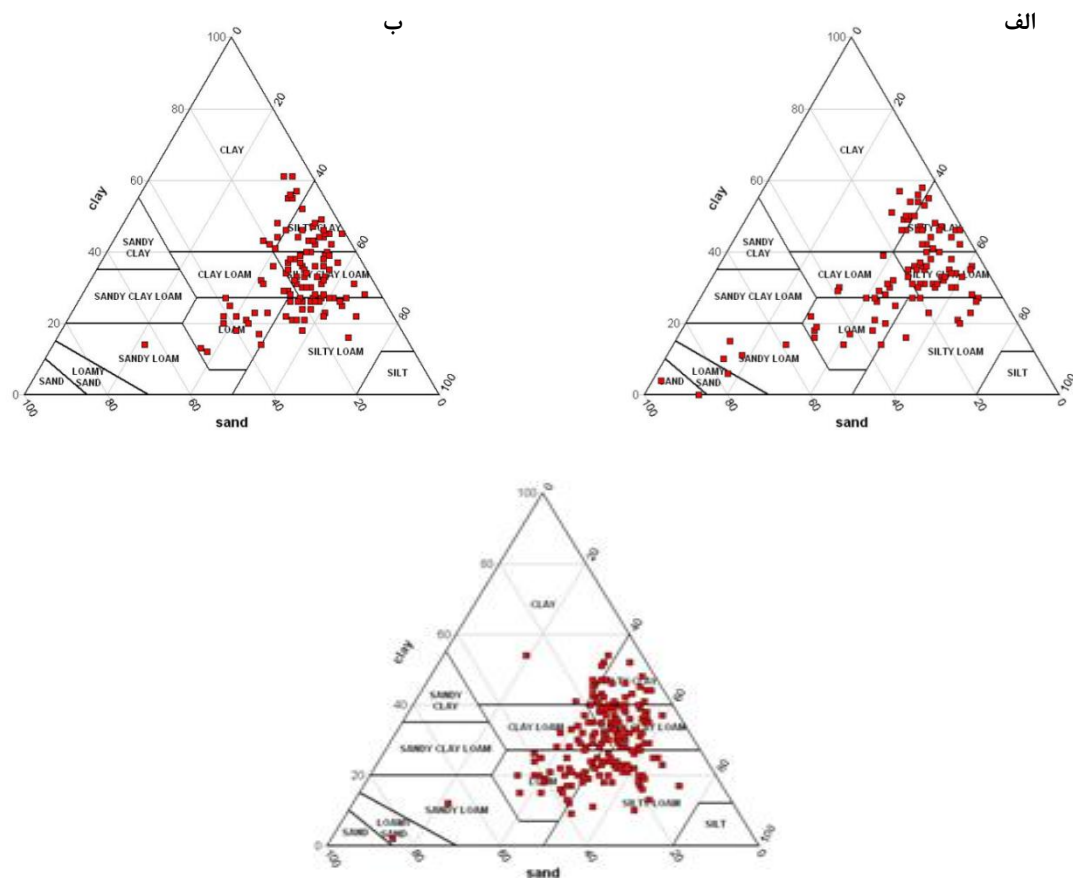
## تحلیل ساختار مکانی

### افق اول (خاک رویی گل‌خراب)

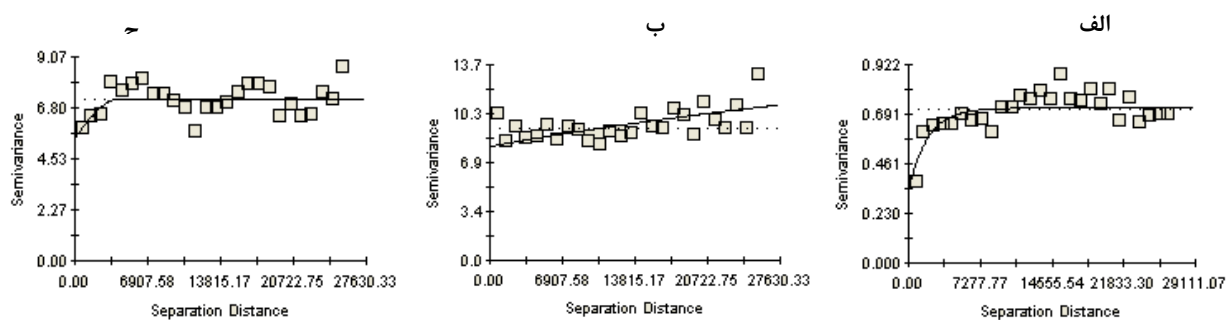
مؤلفه‌های مدل‌های برازش شده بر نیم‌تغییرنمای تجربی متغیرهای مطالعه شده خاک در جدول ۲-الف تا ۲-ج مشخص شده‌اند. متغیرهای مقدار سیلت، رطوبت حجمی اشباع و لگاریتم داده‌های چگالی ظاهری خاک از مدل خطی فاقد آستانه پیروی نمودند. به نظر می‌رسد این مدل بخشی از مدل‌های دارای آستانه مانند کروی یا نمایی باشد. ایده نامحدود بودن واریانس و تغییرپذیری در یک متغیر ناحیه‌ای نامتحمل به نظر می‌رسد. اما، اگر محدوده جغرافیایی ناحیه مورد مطالعه افزایش یابد، تغییرپذیری ویژگی خاک نیز افزایش می‌یابد (محمادی، ۱۳۸۵).

متغیرهای رس، لگاریتم داده‌های شن و کربن آلی از مدل نیم‌تغییرنمای کروی و لگاریتم هدایت هیدرولیکی اشباع از مدل نمایی پیروی نموده و دارای ایستایی مرتبه دوم<sup>۱</sup> هستند. دامنه نیم‌تغییرنمای مطالعه شده نشان داد که هدایت هیدرولیکی اشباع در مقایسه با بقیه متغیرها از وابستگی مکانی کمتری برخوردار است (جدول ۲-الف).

میانگین رس و چگالی ظاهری خاک در کفه شخم فشرده و خاک غیراشباع زیرین کفه شخم بیشتر از لایه رویی گل‌خراب است. این پدیده می‌تواند ناشی از مهاجرت رس از لایه گل‌خراب و فشردگی ناشی از حرکت ماشین‌های کشاورزی باشد (شارما و دداتا، ۱۹۸۵). پراکنش نمونه‌ها در نمودار مثلث بافت خاک آمریکا نشان داد که کلاس‌های بافتی غالب در افق‌های اول و دوم به ترتیب رس سیلتی، لوم رسی سیلتی، لوم سیلتی، لوم رسی و لوم هستند (شکل ۲). تنوع کلاس‌های بافتی در افق سوم نسبت به دو افق بالایی آن بیشتر بود.



شکل ۲- پراکنش توزیع اندازه ذرات خاک‌های شالیزاری مورد مطالعه روی مثلث بافت خاک: الف) افق اول (خاک گلخراپ)، ب) افق دوم (کفه شخم فشرده زیرین لایه گلخراپ)، ج) افق سوم (خاک غیراشباع زیرین کفه شخم)



شکل ۳- نیم تغییرنمای تجربی هدایت هیدرولیکی اشباع و مدل‌های برازش شده بر آن در خاک‌های شالیزاری مورد مطالعه: الف) هدایت هیدرولیکی اشباع- افق اول، ب) هدایت هیدرولیکی اشباع- افق دوم، ج) هدایت هیدرولیکی اشباع- افق سوم



جدول ۲-الف) مؤلفه‌های مدل نیم‌تغییرنما برای متغیرهای مطالعه شده در خاک‌های افق اول (خاک رویی گلخراپ)

| متغیر                           | واحد                             | مدل   | واریانس قطعه‌ای | آستانه | دامنه | واریانس قطعه‌ای<br>واریانس کل | R <sup>2</sup> |
|---------------------------------|----------------------------------|-------|-----------------|--------|-------|-------------------------------|----------------|
| شن (لگاریتم)                    | %                                | کروی  | ۰/۱۸            | ۰/۳۰   | ۱۱۹۶۰ | ۰/۶۰                          | ۰/۴۸           |
| سیلت                            | %                                | خطی   | ۵۰/۳۰           |        |       |                               | ۰/۸۱           |
| رس                              | %                                | کروی  | ۴۱/۷۰           | ۱۳۰/۸  | ۳۴۹۸۰ | ۰/۳۲                          | ۰/۹۴           |
| چگالی ظاهری خاک (لگاریتم)       | g /cm <sup>3</sup>               | خطی   | ۰/۰۲            |        |       |                               | ۰/۷۲           |
| رطوبت حجمی اشباع                | cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> | خطی   | ۰/۰۱            |        |       |                               | ۰/۲۱           |
| هدایت هیدرولیکی اشباع (لگاریتم) | cm /d                            | نمایی | ۰/۳۳            | ۰/۷۲   | ۱۹۰۰  | ۰/۴۶                          | ۰/۶۰           |
| کربن آلی (لگاریتم)              | %                                | کروی  | ۰/۱۶            | ۰/۲۲   | ۳۴۶۰۰ | ۰/۷۳                          | ۰/۵۰           |

جدول ۲-ب) مؤلفه‌های مدل نیم‌تغییرنما برای متغیرهای مطالعه شده در خاک‌های افق دوم (کفه شخم فشرده زیرین لایه گلخراپ)

| متغیر                           | واحد                             | مدل         | واریانس قطعه‌ای | آستانه | دامنه | واریانس قطعه‌ای<br>واریانس کل | R <sup>2</sup> |
|---------------------------------|----------------------------------|-------------|-----------------|--------|-------|-------------------------------|----------------|
| شن (لگاریتم)                    | %                                | خطی         | ۰/۲۸۹           |        |       |                               | ۰/۵۶           |
| سیلت                            | %                                | خطی         | ۴۷/۹۳           |        |       |                               | ۰/۹۵           |
| رس                              | %                                | خطی         | ۶۵/۸۹           |        |       |                               | ۰/۹۲           |
| چگالی ظاهری خاک                 | g /cm <sup>3</sup>               | کروی        | ۰/۰۴            | ۰/۰۶   | ۳۵۰۰  | ۰/۶۶                          | ۰/۲۵           |
| رطوبت حجمی اشباع                | cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> | اثر قطعه‌ای | ۰/۰۷            |        |       |                               | ۰/۰۰۵          |
| هدایت هیدرولیکی اشباع (لگاریتم) | cm /d                            | خطی         | ۸/۴۹            |        |       |                               | ۰/۲۸           |
| کربن آلی (لگاریتم)              | %                                | کروی        | ۰/۳۲            | ۰/۴۳   | ۳۵۰۰  | ۰/۷۴                          | ۰/۲۴           |

جدول ۲-ج) مؤلفه‌های مدل نیم‌تغییرنما برای متغیرهای مطالعه شده در خاک‌های افق سوم (خاک غیراشباع زیرین کفه شخم)

| متغیر                           | واحد                             | مدل         | واریانس قطعه‌ای | آستانه | دامنه | واریانس قطعه‌ای<br>واریانس کل | R <sup>2</sup> |
|---------------------------------|----------------------------------|-------------|-----------------|--------|-------|-------------------------------|----------------|
| شن (لگاریتم)                    | %                                | اثر قطعه‌ای | ۰/۷۰            |        |       |                               | ۰/۲۱           |
| سیلت                            | %                                | نمایی       | ۹۱/۳            | ۱۸۹/۸  | ۱۲۶۶۰ | ۰/۴۸                          | ۰/۶۳           |
| رس                              | %                                | خطی         | ۸۹/۱۶           |        |       |                               | ۰/۹۳           |
| چگالی ظاهری خاک                 | g /cm <sup>3</sup>               | کروی        | ۰/۰۰۹           | ۰/۰۳   | ۳۵۰۰  | ۰/۳                           | ۰/۳۹           |
| رطوبت حجمی اشباع                | cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> | کروی        | ۰/۰۰۲           | ۰/۰۰۵  | ۲۲۲۵۰ | ۰/۴                           | ۰/۴۳           |
| هدایت هیدرولیکی اشباع (لگاریتم) | cm/d                             | کروی        | ۵/۴             | ۷/۲    | ۴۱۰۰  | ۰/۷۵                          | ۰/۲۱           |
| کربن آلی (لگاریتم)              | %                                | اثر قطعه‌ای | ۰/۷۶            |        |       |                               | ۰/۳۷           |

متوسط (۰/۶ تا ۰/۱) و قوی (۰/۱ <) است (کراوچنکو، ۲۰۰۳). ضعیف بودن ساختار مکانی معیاری از تغییرات تصادفی، دامنه کوتاه و غیرقابل توصیف در مقیاس مطالعه است. متغیر کربن آلی از ساختار مکانی ضعیف برخوردار بود. ضعیف بودن ساختار مکانی منعکس‌کننده اثر عوامل بیرونی<sup>۳</sup> و مدیریت خاک مانند کود، آب و خاک‌ورزی بر متغیر موردنظر است (کامباردلا و همکاران، ۱۹۹۴).

سهم تغییرات مقیاس اندازه‌گیری<sup>۱</sup> از کل واریانس<sup>۲</sup> با استفاده از نسبت واریانس قطعه‌ای به کل واریانس، تخمین زده شد. این سهم برای متغیر رس از KS کمتر و برای متغیرهای شن و کربن آلی بیشتر از KS بود. نسبت واریانس قطعه‌ای به آستانه، مشخصه‌ای از قدرت ساختار مکانی متغیرها به تفکیک ضعیف (۰/۶ >)،

1. Measurement scale variability
2. Total variance
3. Extrinsic factors

## افق دوم (کفه شخم فشرده زیرین لایه گلخراپ)

مؤلفه‌های مدل‌های برازش شده بر نیم‌تغییرنمای تجربی متغیرهای مطالعه شده در خاک‌های افق دوم (کفه شخم فشرده زیرین لایه گلخراپ) در (جدول ۲-ب) مشخص شده است.

متغیر رطوبت حجمی اشباع از مدل اثر قطعه‌ای پیروی کرد. این مدل بیانگر فقدان همبستگی مکانی بوده و نشان می‌دهد که متغیر در مقیاس اندازه‌گیری شده تصادفی بوده است. چگالی ظاهری خاک و لگاریتم کربن آلی از مدل کروی پیروی نمودند. دامنه وابستگی مکانی برای کربن آلی در افق دوم کمتر از خاک رویی و واریانس قطعه‌ای آن بیشتر است (جدول‌های ۲-الف و ۲-ب). متغیر لگاریتم شبن که در افق رویی گلخراپ از مدل کروی پیروی می‌نمود، در این افق دارای مدل خطی با شیب کم بود (شکل آن نشان داده نشده است). لگاریتم هدایت هیدرولیکی اشباع در افق دوم برخلاف افق رویی و افق سوم از مدل خطی با شیب کم پیروی نمود که رفتار آن به مدل اثر قطعه‌ای نزدیک است (شکل ۳). ضریب تغییرات  $K_s$  نیز در این افق  $299/3\%$  است که نسبت به دو افق بالایی ( $121\%$ ) و پایینی ( $284/4\%$ ) بیشتر است. مالانت و همکاران (۱۹۹۶) با ارزیابی تغییرات آماری و مکانی ویژگی‌های هیدرولیکی در ۱۸۰ نیم‌رخ‌های خاک با فاصله ۳۱ متر در یک ترانسکت نشان دادند که بیشترین ضریب تغییرات برای هدایت هیدرولیکی اشباع به مقادیر ۵۹۹، ۳۲۲ و ۸۹۷ درصد به ترتیب در عمق‌های ۰/۱، ۰/۵ و ۰/۹ متر مشاهده شد. منافذ بزرگ و حجم کوچک نمونه‌ها از دلایل مهم این تغییرات زیاد دانسته شد.

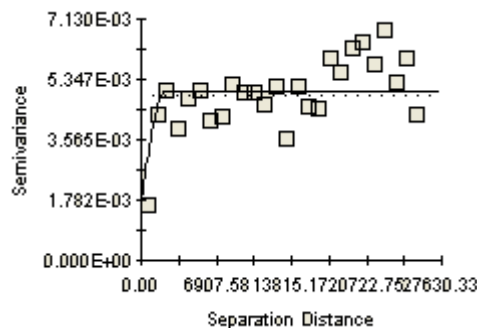
فقدان همبستگی مکانی و نزدیک بودن رفتار  $K_s$  به متغیرهای تصادفی را می‌توان ناشی از توزیع غیریکنواخت در مهاجرت رس از افق بالایی و اثر پیشامدهایی مانند وجود منافذ زیستی و کانال‌هایی از ریشه و حرکت جانوران دانست که منجر به جریان ترجیحی می‌گردند. هنگامی که منافذ بزرگ یا زیستی در

خاک وجود دارند استفاده از استوانه‌های نمونه‌برداری برای اندازه‌گیری  $K_s$  منجر به ایجاد یک شرایط مرزی مصنوعی می‌گردد؛ در نتیجه آب جریان یافته از این نمونه‌ها دارای میانگین و واریانس زیادی خواهند بود (مالانتز و همکاران، ۱۹۹۷). سولیس و همکاران (۲۰۲۰) با تجزیه و تحلیل داده‌های طولانی مدت ۱۴ ساله (۲۰۰۵-۲۰۱۸) در یک حوضه آبخیز کوچک مقیاس (۷/۸۴ کیلومتر مربع) در کشور یونان نشان دادند که هدایت هیدرولیکی اشباع تغییرات مکانی بسیارشدیدی داشت، به طوری که علیرغم کوچک بودن حوضه، با بافت خاک، سنگریزه و واحدهای فیزیوگرافی همبستگی نداشتند. بنابراین استفاده از توابع انتقالی نمی‌تواند یک رویکرد مناسب برای برآورد هیدرولیکی اشباع در این حوضه باشد. نتایج به دست آمده از سه مقیاس آزمایش شده مقیاس کوچک (۱ مترمربع) با  $CV=87\%$ ، مقیاس متوسط (۲۵۰ مترمربع) با  $CV=73.8\%$  و کل حوضه با  $CV=68.2\%$  نشان‌دهنده غیریکنواختی به نسبت مشابه در سه مقیاس بود که ناشی از غالب بودن تغییرات کوچک مقیاس بوده که تأثیر محدودیتی خود را بر دیگر مقیاس‌ها نشان داد. در این شرایط به تعداد زیادی نمونه و همچنین با ابعاد بزرگ‌تر برای آنکه معرف جریان در مقیاس ناحیه‌ای باشند نیاز است؛ اما جمع‌آوری این گونه نمونه‌ها به علت وقت، هزینه و سختی زیاد غیرممکن است (مالانتز و همکاران، ۱۹۹۶). گوپتا و همکاران (۲۰۰۶) نشان دادند که در هر موقعیتی که در خاک منافذ بزرگ وجود داشته باشد، جریان آب در خاک ترکیبی از جریان آب در منافذ بزرگ و پیکره خاک خواهد بود. جریان در منافذ بزرگ (منعکس شده در هدایت هیدرولیکی نزدیک به اشباع) و جریان در پیکره خاک (منعکس شده در هدایت هیدرولیکی کم خاک) با یکدیگر دارای همبستگی منفی هستند. از سوی دیگر حجم گسترده عملیات خاک‌برداری و خاک‌ریزی در طرح‌های تسطیح اراضی (در منطقه مورد مطالعه در ۳۳ مکان عملیات تسطیح اراضی و تجهیز و نوسازی اراضی شالیزاری انجام شده بود) با تشدید ایجاد

غیریکنواختی و ایجاد شرایط موزائیکی می‌تواند بر شدت تغییرات Ks در این لایه مؤثر گردند.

#### افق سوم (خاک غیراشباع زیرین کفه شخم)

مؤلفه‌های مدل‌های برازش شده بر نیم‌تغییرنمای تجربی متغیرهای مطالعه شده در خاک‌های افق سوم (خاک غیراشباع زیرین کفه شخم) در (جدول ۲-ج) مشخص شده است.



شکل ۴- نیم‌تغییرنمای تجربی رطوبت حجمی اشباع در افق سوم و مدل کروی برازش شده بر آن

لگاریتم کربن آلی در این افق برخلاف افق‌های بالایی از مدل اثر قطعه‌ای برخوردار شد که نشان‌دهنده تغییرات تصادفی در این متغیر است. لگاریتم هدایت هیدرولیکی اشباع در این افق از مدل کروی پیروی کرد. اما، دامنه همبستگی مکانی آن (۴۱۰۰ متر) از خاک رویی (۱۹۰۰ متر) بیشتر بود. نیم‌تغییرنمای تجربی Ks در این افق از رفتاری تناوبی برخوردار بود (شکل ۳-ج) که نشان‌دهنده وجود مقیاس آشپانه‌ای<sup>۱</sup> در تغییرات است (زلک و سی، ۲۰۰۵). به نظر می‌رسد علت تغییر رفتار مکانی Ks در سه افق (پیروی از مدل‌های دارای آستانه با دامنه و قدرت متفاوت ساختار مکانی در افق‌های اول و سوم و مدل خطی با شیب کم در افق دوم) نتیجه چند فرایند مستقل مؤثر بر Ks است که هریک در مقیاس

متغیر سیلت در خاک‌های افق سوم برخلاف دو افق بالایی از مدل نیم‌تغییرنمای نمایی پیروی کرد. نیم‌تغییرنمای تجربی رطوبت حجمی اشباع بعد از رسیدن به آستانه دوباره افزایش یافت (شکل ۴). مولر و همکاران (۲۰۰۱) این پیشامد را ناشی از یک انحراف مقیاس بزرگ و / یا وجود مقادیر بزرگ از متغیر بررسی‌شده در جامعه مورد مطالعه می‌دانند.

مکانی و زمانی متفاوت به گونه سلسله‌مراتب آشپانه‌ای<sup>۲</sup> عمل می‌نمایند (سوبی‌راج و همکاران، ۲۰۰۴). فرایندهایی که در یک مقیاس غالب هستند، ممکن است اثر معنی‌دار در دیگر مقیاس‌ها نداشته باشند. در خاک رویی تغییرات مکانی Ks می‌تواند تحت اثر فرایندهای مقیاس بزرگ مانند کربن آلی با دامنه وابستگی مکانی زیاد باشد (جدول ۲-الف). اما به نظر می‌رسد فرایند گل‌خراش کردن خاک و عمق متفاوت آن در هنگام عملیات آماده‌سازی اراضی شالیزاری و اجرای پروژه‌های تجهیز و تسطیح اراضی (که همراه با خاک‌برداری و خاک‌ریزی است) به‌صورت مقیاس موضعی<sup>۳</sup> منجر به تغییرات مکانی با وابستگی مکانی دامنه کوتاه در Ks شده و اثر تغییرات در مقیاس بزرگ را پوشانده باشد. اما به نظر می‌رسد که تغییرات مکانی Ks در لایه‌های دوم و سوم تحت اثر عوامل و فرایندهای مؤثر بر هر دو مقیاس موضعی (مانند

1. Nested scale
2. Nested hierarchy
3. Local scale
- 4- chaotic

مقادیر آماره‌های ارزیابی MSE و RMSE در افق‌های دوم و سوم به‌ویژه برای متغیرهای شن و هدایت هیدرولیکی اشباع بیشتر از افق اول بود. بنابراین روش‌های KG و IDW در برآورد متغیرهای افق‌های دوم و سوم در مقایسه با افق اول به گونه نسبی از عدم قطعیت بیشتری برخوردار بودند. این متغیرها در افق‌های دوم و سوم از توزیع لوگ‌نرمال برخوردار بوده و ضریب تغییرات آن‌ها (به ترتیب ۲۹۹/۳٪ و ۲۸۸/۴٪) زیاد بود.

## توزیع مکانی

### افق اول (خاک رویی گلخراپ)

بازنمایی<sup>۱</sup> هدایت هیدرولیکی اشباع و متغیرهای مرتبط با آن با استفاده از روش درون‌یاب کریجینگ در شکل ۵ نشان داده شده است. بازنمایی مقدار رس در خاک‌های رویی نشان می‌دهد که بیشترین مقدار این متغیر در جنوب غربی ناحیه صومعه‌سرا در شالیزارهای نزدیک به کوهستان و کمترین مقدار آن در شرق و شمال شرقی ناحیه در حوضه آبریز سپیدرود و شالیزارهای نزدیک به تالاب انزلی قرار دارد.

بیشترین مقدار کربن آلی به‌صورت محدوده‌های به نسبت کوچک در مرکز، شمال و جنوب غرب ناحیه قرار دارد. قسمت عمده اراضی شالیزاری این ناحیه از تبدیل جنگل به وجود آمده‌اند که از کربن آلی زیاد در خاک رویی برخوردار بودند. کمترین مقدار کربن آلی در شرق و شمال شرق صومعه‌سرا قرار دارد. به نظر می‌رسد از دلایل کاهش کربن آلی در این ناحیه درشت بودن بافت خاک، وجود زهکش مناسب و فراهم شدن شرایط مناسب برای تهویه است که منجر به اکسایش و تجزیه مواد آلی می‌شود. توزیع جغرافیایی رطوبت حجمی اشباع نشان داد که نیمه شرقی ناحیه مطالعه شده از رطوبت کمتری برخوردار است. در این ناحیه مقدار رس و کربن آلی نیز کم بود.

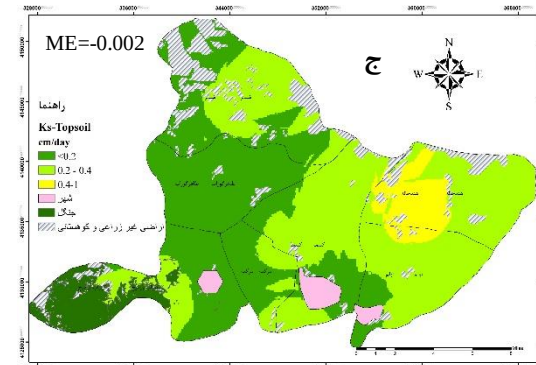
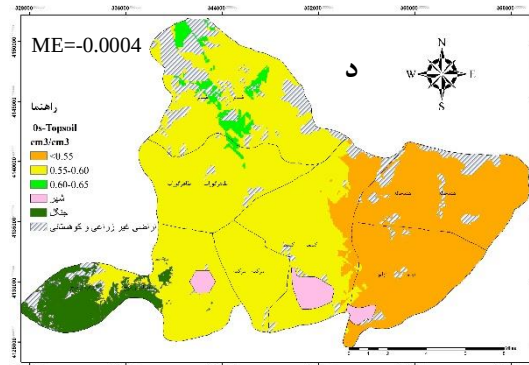
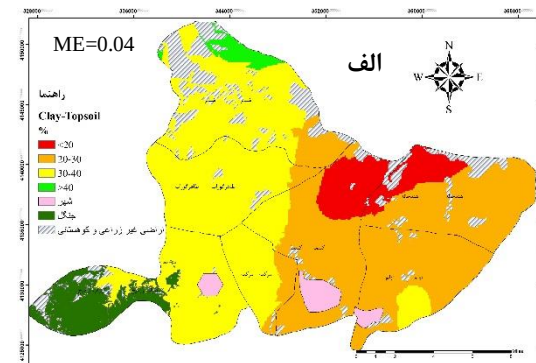
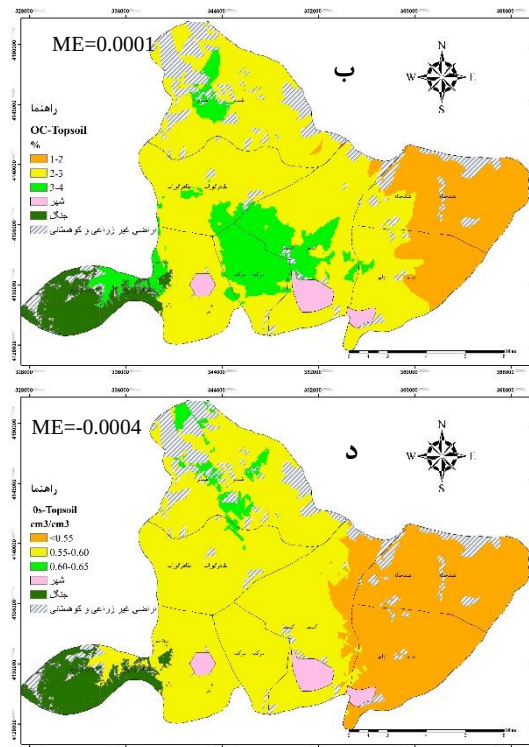
وجود ترک، منافذ و کانال‌های ریشه و جانوران) و مقیاس بزرگ (مانند تغییر در ویژگی‌های فیزیکی و تفاوت‌های مورفولوژیک خاک) قرار گرفته باشند. اسویکس و لایپیک (۲۰۲۱) نشان دادند که در منطقه مورد مطالعه آن‌ها دامنه همبستگی مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع با ویژگی‌های ذاتی و نسبتاً پایدار، بزرگ‌تر (از ۱۵ تا ۸۱ کیلومتر) از دامنه ویژگی‌های متغیر پویا (۰/۳ تا ۰/۹ کیلومتر) است. چنین پیشامدی از فرایندها که ماهیت متفاوت دارند، به‌صورت هم‌زمان در دامنه‌ی متفاوت از مقیاس‌ها عمل می‌کنند (بُرو، ۱۹۸۳)، اغلب منجر به توزیعی متناسب به آشوب<sup>۴</sup> و غیرخطی از متغیرها می‌شوند (فیلیپس، ۱۹۹۳).

### مقایسه روش‌های درون‌یابی وزن دادن عکس فاصله و کریجینگ

برآوردهای روش وزن دادن عکس فاصله، IDW، با برآوردهای حاصل از روش کریجینگ، KG، در هر سه افق خاک با استفاده از آماره‌های ارزیابی ME، MSE و RMSE مقایسه گردیدند. لو و همکاران (۲۰۰۸) نشان دادند که در هنگامی که ساختار مکانی متغیرها قوی نباشد، تعداد داده‌ها محدود باشد و یا مدل‌های تغییر نما به‌خوبی بر داده‌های نیم واریانس تجربی برازش نگرند، IDW قدرت پیش‌بینی بهتری نسبت به KG خواهد داشت. در این مطالعه، متغیرها از ساختار مکانی قوی برخوردار نبودند و برخی از آن‌ها دارای مدل نیم‌تغییرنمای خطی بودند (جدول ۲)، اما در این مطالعه روش KG از صحت بیشتری در مقایسه IDW برای برآورد متغیرها برخوردار بود، تنها برای چگالی ظاهری خاک برتری از آن IDW بود که ناشی از ضعیف بودن ساختار مکانی در این متغیر است (جدول مقایسه برآورد برای هر یک از متغیرها در افق‌های مطالعه شده نشان داده نشدند). تعمیم برتری KG نسبت به IDW در شرایطی که متغیرها از ساختار مکانی ضعیف برخوردارند، به پژوهش بیشتری نیاز دارد.

در شالیزارهای گوراب‌زرمیخ و طاهرگوراب وجود دارد. خاک‌های این ناحیه از رس بیشتری در مقایسه با دیگر نواحی برخوردار بودند.

بیشترین مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع در شالیزارهای ناحیه هندخاله، تلم و کسما با شن زیاد و رس و کربن آلی کم قرار دارد. مقدارهای کم هدایت هیدرولیکی اشباع



شکل ۵- نقشه‌های هم‌مقدار تولیدشده به وسیله کریجینگ برای هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (Ks) و ویژگی‌های مرتبط با آن در افق اول (خاک رویی گلخراب؛ الف) درصد رس، ب) کربن آلی، ج) هدایت هیدرولیکی اشباع، د) رطوبت حجمی اشباع

هیدرولیکی خاک‌های شالیزاری نشان دادند که هر چه ضخامت این کفه بیشتر باشد مقاومت هیدرولیکی نیز بیشتر خواهد بود. از سوی دیگر با توجه به زیاد بودن مقدار رس در نیمه غربی انتظار می‌رفت که هدایت هیدرولیکی اشباع در مقایسه با دیگر نواحی کمتر باشد. اما، مقدار Ks در بسیاری از نقاط نمونه‌برداری نیمه غربی و جنوب زیاد بود. مقدار رس خاک یک مشخصه به نسبت ایستا<sup>۱</sup> است، درحالی‌که ویژگی‌های هیدرولیکی خاک به شدت پویا<sup>۲</sup> هستند. بسیاری از خاک‌های افق دوم در نیمه غربی و جنوب شهرستان (در ۵۷ موقعیت) دارای شکاف، منافذ کرم خاکی یا کانال ریشه بودند (تصاویر نشان داده نشدند). در این شرایط بافت خاک نمی‌تواند به

## افق دوم (کفه شخم فشرده زیرین لایه گلخراب)

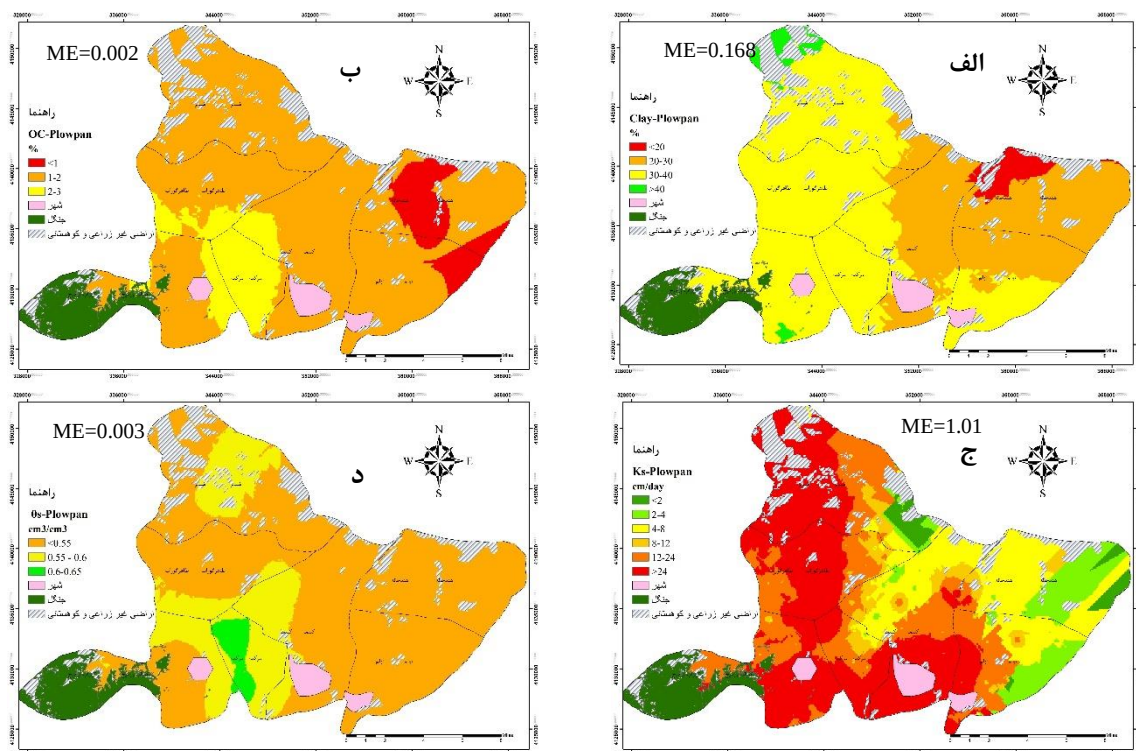
خاک‌های افق دوم در زیر لایه گلخراب به عنوان سخت کفه شخم و بر اثر فشردگی ناشی از حرکت چرخ‌های ماشین‌های کشاورزی و ته‌نشست ذرات رس ایجاد می‌شود و لایه‌ای با نفوذپذیری کم ایجاد می‌کند. بازنمایی متغیرها در خاک‌های این افق در (شکل ۶) نشان داده شده است. مقدار رس در خاک‌های این افق در نیمه غربی و جنوب در مقایسه با نیمه شرقی بیشتر است. کربن آلی در بخش مرکزی در مقایسه با دیگر مکان‌ها بیشتر بود. توزیع جغرافیایی رطوبت حجمی اشباع در خاک‌های این محدوده نیز تقریباً مشابه با کربن آلی بود. میانگین ضخامت کفه شخم فشرده (۲۱/۴ سانتیمتر) نسبت به افق رویی (۱۶/۷ سانتیمتر) بیشتر بود (جدول‌های ۱-الف و ۱-ب). ووپیرز و همکاران (۱۹۹۲) با ارزیابی مقاومت

1. Static  
2. Dynamic  
3. Biopores

تبدیل بزرگ و متوسط ساختمانی به منافذ کوچک بافتی نقش مهمی در نگهداری آب و کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع داشت. در کفه شخم منافذ زیستی ناشی از سابقه کاربری جنگل و ترک‌های ایجادشده از تنش‌های خشکی پیشین سبب شد که هدایت هیدرولیکی اشباع خاک از عامل ذاتی مقدار رس تأثیر نپذیرد.

شکل صحیح  $K_s$  و دیگر ویژگی‌های هیدرولیکی را بیان کند (کمپل، ۱۹۸۵). پژوهش‌ها نشان می‌دهد که در بسیاری از خاک‌های رسی که از منافذ زیستی<sup>۳</sup>، شکاف و ساختمان بلوکی کوچک یا دانه‌ای برخوردار هستند، مقدار  $K_s$  در آن‌ها از خاک‌های با بافت درشت بزرگ‌تر است (بوما، ۱۹۹۱). به نظر می‌رسد در این شرایط خاک‌های افق دوم بسیاری از مزارع این محدوده علیرغم دارا بودن رس بیشتر نمی‌توانند به‌عنوان سخت کفه شخم در نظر گرفته شوند و توانایی نگهداری آب را داشته باشند. از سوی دیگر دواتگر و همکاران (۱۳۸۴) نشان دادند که نوع رس غالب بسیاری از خاک‌های شالیزاری استان گیلان از نوع اسمکتایت (با پتانسیل انبساط - انقباض زیاد) است و در نتیجه پدیده انقباض و انبساط در هنگام تر و خشک شدن منجر به ایجاد ترک و رفتار هیدرولیکی پویا در خاک‌های رسی می‌شود که به‌تنهایی توسط بافت قابل تشخیص نیست (لین و همکاران، ۱۹۹۸).

منطبق با غیریکنواختی شدید ( $CV = ۲۹۹/۳$ ) نقشه توزیع مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع در این افق نیز به‌صورت موزاییکی با تغییرات شدید بود. داسیلوا و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که توزیع مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع را می‌توان به عوامل ذاتی و بیرونی نسبت داد. عوامل ذاتی مرتبط با عوامل خاکساری بوده در حالیکه عوامل بیرونی به عملیات مدیریتی، کاربری اراضی، عملیات خاک‌ورزی و پوشش گیاهی وابسته هستند که ساختار و متغیرهای مرتبط با هدایت هیدرولیکی اشباع را تحت تأثیر قرار می‌دهند. این دانشمندان دریافتند که مقادیر  $K_s$  در خاک رویی نسبت به خاک‌های زیرین متفاوت بود که ناشی از تأثیر عملیات مدیریتی بر رفتار  $K_s$  در خاک رویی بود. اما در خاک زیرین رفتار  $K_s$  در ارتباط با ویژگی‌های فیزیکی این خاک‌ها بود. به نظر می‌رسد این گزاره برای خاک‌های شالیزاری با مدیریت آبیاری غرقابی این مطالعه یا نظام شالیزاری صادق نباشد. در این پژوهش در خاک رویی فرایند گل‌خرابی به‌عنوان یک عامل انسان‌زاد بیرونی با



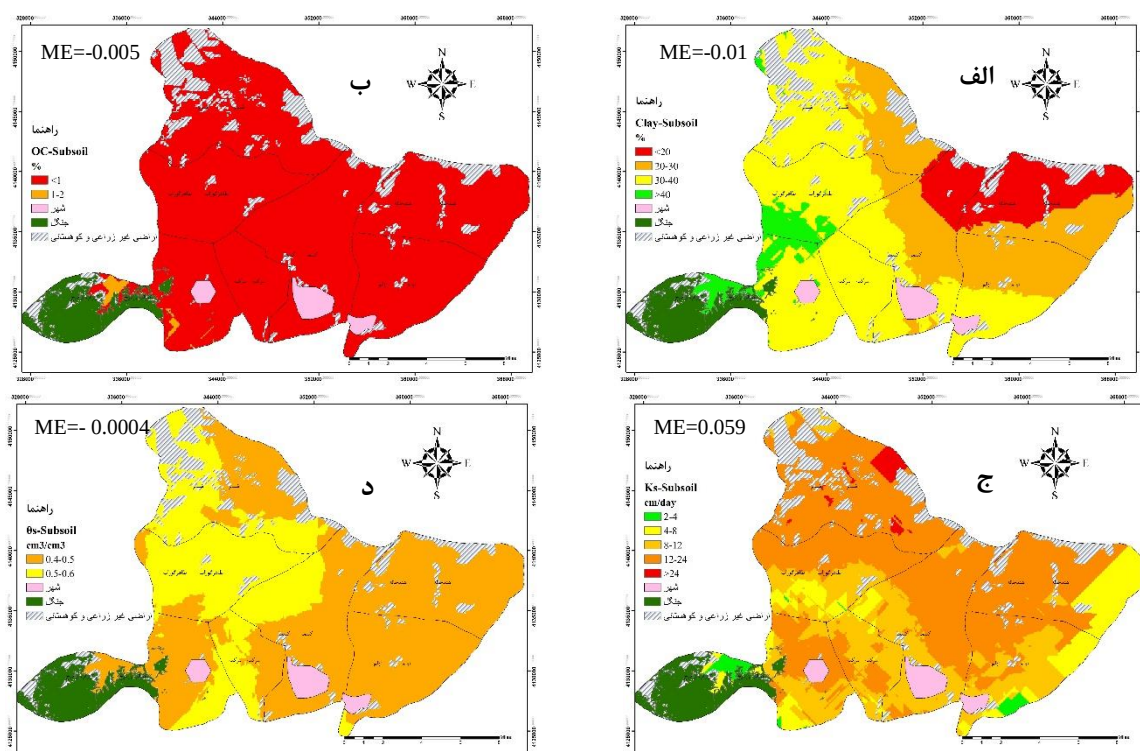
شکل ۶- نقشه‌های هم‌مقدار تولیدشده به وسیله کریجینگ برای هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ( $K_s$ ) و ویژگی‌های مرتبط با آن در افق دوم (کفه شخم فشرده زیرین لایه گلخراش؛ الف) درصد رس، ب) کربن الی، ج) هدایت هیدرولیکی اشباع، د) رطوبت حجمی اشباع

### افق سوم (خاک غیر اشباع زیرین کفه شخم)

بازنمایی متغیرهای افق سوم در (شکل ۷) نشان داده شده‌اند. همانند افق دوم، توزیع جغرافیایی متغیرها نشان داد که در نیمه غربی در مقایسه با نیمه شرقی مقدار رس بیشتر است. اما مقدار کربن آلی یکنواخت و در دامنه کمتر از یک درصد قرار داشت که به نظر طبیعی است. زیرا این لایه که معمولاً در عمق بیش از ۴۵ تا ۶۰ سانتی‌متر و پایین‌تر از سخت لایه شخم قرار داشت، الگوی توزیع جغرافیایی هدایت هیدرولیکی اشباع همچنان موزائیکی و در نیمه غربی و جنوب توزیع مکانی

آن از عامل ذاتی رس پیروی نکرد. زیرا علیرغم بیشتر بودن مقدار رس،  $K_s$  در بسیاری از مزارع این ناحیه نیز بیشتر بود که به نظر می‌رسد، مشابه افق دوم، به علت وجود منافذ زیستی و توسعه ترک‌ها بقایای گیاهی و ریشه درختان جنگلی، احتمال وجود منافذ زیستی بیشتر باشد و با ایجاد جریان ترجیحی، هدایت هیدرولیکی اشباع بیشتر گردد. داسیلوا و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که حتی در مناطق کوچک نیز غیریکنواختی هدایت هیدرولیکی اشباع نسبت به اراضی مجاور و همچنین عمق وجود دارد.





شکل ۷- نقشه‌های هم‌مقدار تولیدشده به‌وسیله کریجینگ برای هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (Ks) و خواص مرتبط با آن در افق سوم (خاک غیراشباع زیرین کفه شخم فشرده؛ الف) درصد رس، ب) کربن الی، ج) هدایت هیدرولیکی اشباع، د) رطوبت حجمی اشباع

## نتیجه‌گیری

را در نگهداری آب در اراضی شالیزاری داشته باشد. اما، میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع در این لایه زیاد بود که نشان‌دهنده وجود منافذ زیستی یا ترک در برخی از خاک‌های به‌ویژه نیمه غربی ناحیه است. در صورت وجود منافذ زیستی مقدار هدایت هیدرولیکی از خاک‌های با بافت درشت بیشتر است. نقشه‌های هم‌مقدار تولیدشده به‌وسیله کریجینگ نشان‌دهنده هم‌خوانی توزیع مکانی مقدارهای کم هدایت هیدرولیکی با مقدار زیاد رس در لایه گل‌خراب رویی است، اما در لایه کفه شخم واقع در نیمه غربی ناحیه مورد مطالعه توزیع مکانی مقدار زیاد هدایت هیدرولیکی به علت وجود منافذ زیستی و ترک در خاک‌های با مقدار رس زیاد هم مشاهده می‌شود. در این شرایط نیاز آبی گیاه برنج بیشتر بوده و به علت تلفات احتمالی آب از کفه شخم لازم است تا فاصله زمانی بین آبیاری‌ها کم گردد. این یافته‌ها نشان‌دهنده نقش کلیدی شناخت توزیع مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع در

تغییرات مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع و ویژگی‌های خاکی مؤثر بر آن در لایه‌های متوالی گل‌خراب رویی، کفه شخم فشرده و خاک غیراشباع زیرین کفه شخم نیم‌رخ اراضی شالیزاری برای ارزیابی موازنه آب-خاک و مدیریت آبیاری در مقیاس ناحیه‌ای ضروری است. تحلیل آمار کلاسیک و زمین آمار نشان داد که هدایت هیدرولیکی اشباع و ویژگی‌های فیزیکی علاوه بر لایه‌های متوالی خاک در مکان‌های مختلف ناحیه مطالعه شده نیز متفاوت‌اند. افزایش مقدار رس و چگالی ظاهری خاک در کفه شخم فشرده و خاک غیراشباع زیرین کفه شخم می‌تواند به علت مهاجرت رس از لایه گل‌خراب و حرکت ماشین‌های کشاورزی باشد. انتظار بر این بود با توجه به زیاد بودن مقدار رس در کفه شخم هدایت هیدرولیکی اشباع خاک بتواند نقش کلیدی خود



انتخاب شیوه مدیریت آبیاری برای بهبود کارایی مصرف آب و کمینه کردن تلفات آب در اراضی شالیزاری است. همچنین این یافته‌ها نشان داد که لازم است از خشک شدن خاک‌های شالیزاری و بروز ترک در فصل کشت گیاه برنج جلوگیری شود. مؤلفه‌هایی از جمله تغییر در تعداد دفعات خاک‌ورزی، عمق شخم، شدت گل‌خراشی و افزودن مواد آلی از منابع مختلف می‌تواند در کاهش هدایت هیدرولیکی کفه شخم فشرده مؤثر واقع شود.

## فهرست منابع

۱. اخیایی، م.، و ع. ا. بهبهانی زاده. ۱۳۷۶. شرح روش‌های تجزیه شیمیایی خاک. مؤسسه تحقیقات خاک و آب. نشریه شماره ۸۲۳.
۲. اصغری، ش.، و م. شهابی. ۱۳۹۸. تغییرات مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع و مقاومت فروری خاک در اراضی متأثر از نمک اطراف دریاچه ارومیه. نشریه آب و خاک. ۳۳ (۱): ۱۰۳-۱۱۶.
۳. ایزانلو، ص.، م. قره محمودلو، ن. جندقی و ح. قربانی واقعی. ۱۴۰۱. ارزیابی تغییرات هدایت هیدرولیکی اشباع در لایه‌های سطحی و زیرسطحی خاک‌های لسی شرق استان گلستان. تحقیقات کاربردی خاک. ۱۰ (۲): ۱۱۹-۱۰۳.
۴. بردبار، م. ۱۳۵۳. ارزیابی منابع و استعداد اراضی استان گیلان. مؤسسه تحقیقات خاک و آب. نشریه شماره ۴۱۴.
۵. ترابی گلسفیدی، ح. ۱۳۸۰. پیدایش، رده بندی و ارزیابی تناسب اراضی خیس برای کشت برنج در شرق استان گیلان. رساله دکتری خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
۶. دلبری، م.، م. خیاط خلقی و م. مهدیان. ۱۳۸۳. ارزیابی روشهای زمین آمار در برآورد هدایت هیدرولیکی خاک در مناطق شیب آب و پشت آب پایین دشت سیستان. نشریه علوم کشاورزی ایران. ۳۵ (۱): ۱-۱۲.
۷. دوات‌گر، ن.، م. کاوسی، م. ح. علی نیا و م. پیکان. ۱۳۸۴. بررسی وضعیت پتانسیم و خواص فیزیکی و شیمیایی خاک در شالیزارهای استان گیلان. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۴۰، ۷۱-۸۹.
۸. سعدی پور، ج.، م. رودپیما، ع. کرمی، ن. دواتگر و م. صلاح الدین. ۱۳۹۵. ارزیابی تغییرات مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با استفاده از آمار مکانی (منطقه مورد مطالعه: دشت لاغر). پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۳ (۶): ۳۷۵-۳۸۲.
۹. محمدی، ج. ۱۳۸۵. پدومتری (آمار مکانی). جلد دوم. انتشارات پلک.
10. Azadmard, B., M.R. Mosaddeghi, S. Ayoubi, S. Chavoshi, and M. Raoof. 2018. Spatial variability of near-saturated soil hydraulic properties in Moghan plain, North-Western Iran. Arab. J. Geosci. 11: 452. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3788-8>
11. Bechini, L., S. Bocci, and T. Maggiore. 2003. Spatial interpolation of soil physical properties for irrigation planning. A simulation study in northern Italy. Eur. J. Agron. 19: 1-14.
12. Booltink, H.W.G., and J. Buma. 2002. Steady flow soil column method. P. 812- 814. In J.H. Dane and G.C. Clake (ed.) Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods. SSSA Book Series, No. 5. Madison, Wisconsin, USA,

13. Bouma, J. 1991. Influence of soil macroporosity on environmental quality. *Adv. Agron.* 46: 1- 37.
14. Burrough, P.A. 1983. Multiscale sources of spatial variability in soil. I. The implication of fractal concepts to nested levels of soil variation. *Soil Sci. J.* 34: 577- 597.
15. Cahn, M.D., J.M. Hummel and B.H. Brouer. 1994. Spatial analysis of soil fertility for site- specific crop management. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 58: 1240- 1248.
16. Cambarella, C.A., T.B. Moorman, J.M. Novak, T.B. Parkin, D.L. Karlen, R.F. Turco and A.E. Konopka. 1994. Field- scale. Variability of soil properties in central Iowa soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1501- 1511.
17. Campbell, G.S. 1985. *Soil physics with Basic- Transport Models for Soil- Plant Systems*. Elsevier, New York.
18. Centeno, L.N., W. Hu, L.C. Timm, D. She, D. da Silva Ferreira, W.S. Barros, S. Beskow and T.L. Caldeira. 2020. Dominant control of macroporosity on saturated soil hydraulic conductivity at multiple scales and locations revealed by wavelet analyses. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 20: 1686–1702. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00239-5>.
19. Da Silva, G.S., J.S. Da Silva, F.A. De Carvalho, R.A. Santana, R.S. Firmo and O.P. Sobrinhom. 2019. Spatial variability of the saturated hydraulic conductivity of soil in cocoa farming in RecôncavoBaiano. *Revista Caatinga* 32(3): 786-794. DOI: 10.1590/1983-21252019v32n323rc
20. De Datta, S.K. 1986. Technology development and spread of direct-seeded flooded rice in Southeast Asia. *Experimental Agriculture*, 22: 417-426.
21. Deurer, M. and W. Duijnisveld. 2000. Spatial analysis of water characteristic functions in a sandy podzol under pine forest. *Water Resour. Res.* 36(10): 2925–2935.
22. Dobermann, A., and T. Oberthur. 1997. Fuzzy mapping of soil fertility- a case study on irrigated rice land in the Phillipines. *Geoderma*, 77: 317. 339.
23. Gee, G.W., and D. Or. 2002. Particle- size analysis. p. 255-294. In J.H., Dane and G.C. Clake (ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*. SSSA Book Series, no. 5. Madison, Wisconsin, USA. pp.
24. Godoy, V.A., L.V. Zuquette and J.J. Gómez-Hernández. 2019. Spatial variability of hydraulic conductivity and solute transport parameters and their spatial correlations to soil properties. *Geoderma*, 339: 59–69.
25. Gooverats, P. 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press, New York.
26. Grossman, R.B., and T.G. Reinsch. 2002. Bulk density and linear extensibility.p. 201-228. In J. H., Dane and G.C. Clake (ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*. SSSA Book Series, No. 5. Madison, Wisconsin, USA.
27. Gumiere, S.J., J.A. Lafond, D.W. Hallema, Y. Périard, J. Caron and J. Gallichand. 2014. Mapping soil hydraulic conductivity and matric potential for water management of cranberry: characterisation and spatial interpolation methods. *Biosyst. Eng.* 128: 29–40.

28. Gupta, N., R.P. Rudra, and G. Parkin. 2006. Analysis of spatial variability of hydraulic conductivity at field scale. *Canadian Biosystems Engineering*, 48: 55-62.
29. Gupta, S.D., B.P. Mohanty and J.M. Kohne. 2006. Soil hydraulic conductivities and their spatial and temporal variation in a vertisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 1827-1881.
30. Iqbal, J., J.A. Thomasson, J.N. Jenkins, P.R. Owens and F.D. Whisler. 2005. Spatial variability analysis of soil physical properties of alluvial soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69(4): 1338-1350.
31. Isaaks, E.H., and R.M. Srivastava. 1989. *Applied Geostatistics*, Oxford University press, New York.
32. Jang, C.S., and C.W. Liu. 2004. Geostatistical analysis and conditional simulation for estimating the spatial variability of hydraulic conductivity in the Choushui river alluvial fan, Taiwan. *Hydrol. Processes*. 18: 1333-1350.
33. Kobayashi, K., and M. U. Salam. 2000. Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components. *Agron. J.* 92: 345-352.
34. Kosugi, K., and W. Hopmans. 1998. Scaling water retention curves for soils with lognormal pores-size distribution. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 1496- 1505.
35. Kravchenko, A., and D.C. Bullouk. 1999. A comparative study of interpolation methods for mapping soil properties. *Agron. J.* 91: 393-400.
36. Kravchenko, A.N. 2003. Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods. *Soil Sci. Am. J.* 67: 1564- 1571.
37. Li, Y., D. Chen, R.E. White, A. Zhu and J. Zhang. 2007. Estimating soil hydraulic properties of Fengqiu County soils in the North China Plain using pedo-transfer functions. *Geoderma*, 138: 261-271.
38. Lin, H.S., K. Mc Innes, L.P. Wilding and C.T. Hallmark. 1998. Macroporosity and initial moisture effects on infiltration rates in vertisols and vertic intergrades. *Soil Sci. J.* 163: 2- 8.
39. Logsdon, S.D. 2002. Determination of preferential flow model parameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1095- 1103.
40. Lu, G.Y., and D.W. Wang. 2008. An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. *Comput. Geosci.* 34: 1044-1055.
41. Mallants, D., B.P. Mohanty, A. Vervoort and J. Feyen. 1997. Spatial analysis of saturated hydraulic conductivity in a soil with macropores. *Soil Technol.* 10: 115-131.
42. Mallants, D., B.P. Mohanty, D. Jacques and J. Feyen. 1996. Spatial variability of hydraulic properties in a multi-layered soil profile. *Soil Sci. J.* 101: 167-181.
43. McGrath, D., and C. Zhang. 2003. Spatial distribution of soil organic carbon concentrations in grassland of Ireland. *Appl. Geochem.* 18: 1624- 1639.
44. Mertens, J., D. Jacques, J. Vanderborght and J. Feyen. 2002. Characterisation of the field saturated hydraulic conductivity on a hillslope: in situ single ring pressure infiltrometer measurements. *J. Hydrol.* 263: 217-229.

45. Moormann, F.R., and N. Van Breeman. 1978. Rice: Soil Water, Land. International Rice Research Institute, Los Banos, Philippines.
46. Mueller, T.G., F.J. Pierce, O. Schabenberger and D.D. Warncke. 2001. Map quality for site- specific fertility management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:1547-1558.
47. Phillips, J.D. 1993. Stability implications of the state factor model of soils as a nonlinear dynamic system. *Geoderma*, 58: 1- 15.
48. Reynolds, W.D., B.T. Bowman, R.R. Brunke, C.F. Drury and C.S. Tan. 2000. Comparison of tension infiltrometer, pressure infiltrometer, and soil core estimates of saturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 478–484.
49. Robinson, T. P., and G. Metternicht. 2006. Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties. *Computers and Electronics in Agriculture*, 50: 97-108.
50. Romano, N. 1993. Use of an inverse method and geostatistics to estimate soil hydraulic conductivity for spatial variability analysis. *Geoderma*, 60: 169- 186.
51. Sendecor, G.W., and W.G. Cochran. 1980. Statistical methods. 7th ed. Iowa State Univ. Press, Ames.
52. Sepaskhah, A.R., S.H. Ahmadi and A.N. Shahbazi. 2005. Geostatistical analysis of sorptivity for a soil under tilled and no-tilled conditions. *Soil Tillage Res.* 83(2): 237-245.
53. Sharma, P.K. and S.K., De Datta. 1985. Effects of puddling on soil physical properties and processes. In: *Soil Physics and Rice*. International Rice Research Institute, Los Bafios, Philippines, pp. 217-2
54. Sobieraj, J.A., H. Elsenbeer and G. Cameron. 2004. Scale dependency in spatial patterns of saturated hydraulic conductivity. *Catena*, 55: 49-77.
55. Soulis, K.X., P.A. Londra and G. Kargas. 2020. Characterizing surface soil layer saturated hydraulic conductivity in a Mediterranean natural watershed. *Hydrol. Sci. J.* 65 (15): 2616-2629. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1831694>© 2020 IAHS
56. Toung, T.P., M.S.C. Wopereis, J.A. Marques and M.J. Kropff. 1994. Mechanisms and control of percolation losses in puddle rice fields. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1794-1803.
57. Usowicz, B., and J. Lipiec. 2021. Spatial variability of saturated hydraulic conductivity and its links with other soil properties at the regional scale. *Scientific Reports.* 11: 8293. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86862-3>
58. Villagra-Mendoza, K., and R. Horn. 2018. Effect of biochar on the unsaturated hydraulic conductivity of two amended soils. *Int. Agrophys.* 32: 373–378.
59. Wang, Y., M.A. Shao and Z. Liu. 2012. Pedotransfer functions for predicting soil hydraulic properties of the Chinese Loess Plateau. *Soil Sci.* 177: 424–432.
60. Warrick, A.W., and H.M. Vanes. 2002. Soil sampling and statistical procedures. p. 1- 195. In J.H., Dane and G. C. Topp (ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*. Soil Sci. Soc. Am. Inc. Madison, Wisconsin, USA.

61. Wopereis, M.C.S., J.H.M. Wosten, J. Bouma and T. Woodhead. 1992. Hydraulic resistance in puddled rice soils: measurement and effects on water movement. *Soil & Tillage Research*. 24: 199-209.
62. Wopereis, M.C.S., M.J. Kropff, J.H.M. Wosten and J. Bouma. 1993. Sampling strategies for measurement of soil hydraulic properties to predict rice yield using simulation models. *Geoderma*, 59: 1- 20.
63. Young, F.G., R.D. Hammer and D. Larsen. 1999. Frequency distribution of soil properties on a loess- mantled Missouri watershed. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 178- 185.
64. Zeleke, T.B., and B.C. Si. 2005. Scaling relationships between saturated hydraulic conductivity and soil physical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 1691-1702.
65. Zhang, X., O. Wendroth, C. Matocha, J. Zhu and J. Reyes. 2020. Assessing field-scale variability of soil hydraulic conductivity at and near saturation. *Catena*, 187: 104335. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104335>

# Investigating Spatial Variability of Saturated Hydraulic Conductivity and the Factors Affecting It in Different Layers of Soil Profile of Paddy Fields

N. Davatgar\*, M. R. Neyshabouri, A. R. Sepaskhah And L. Rezaee

Associated Professor, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj; E-mail: n\_davatgar@yahoo.com

Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Tabriz University, Tabriz; E-mail: neyshmr@hotmail.com

Professor, Department of Irrigation Science, College of Agriculture, Shiraz University; E-mail: sepas@shirazu.ac.ir

Ph.D., Soil Physic Lab, Rice Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rasht; E-mail: l.rezaee77@gmail.com

Received: November 22, 2023 and Accepted: July 30, 2024

## Abstract

Spatial variability of soil hydraulic properties is important for soil-water balance and irrigation management in paddy fields. The objective of this study was to determine the spatial variability of saturated hydraulic conductivity (Ks) and the factors affecting it. Soil samples from 120 profiles were collected using random stratified sampling scheme. Soil samples were taken from top soil, compacted plow pan, and non-saturated subsoil. In these samples, soil texture, organic carbon, bulk density, saturated moisture, and saturated hydraulic conductivity were measured (by the falling head method). The most heterogeneity with a maximum coefficient of variation (CV), positive skewness, and lognormal frequency distribution for Ks indicated preferential flow caused by the presence of biological pores and cracks from previous drought stress. The results of the geostatistical analysis showed that hydraulic conductivity followed spherical and exponent semi-variogram model in puddled top soil and the non-saturated subsoil, respectively. This variable followed linear semi-variogram model with low slope in plow pan. The CV of Ks in plow pan (299%) was 121% and 284% higher than, respectively, the upper and the lower layers. The closeness of the behavior of Ks to random variables in this layer was mainly due to the existence of biological pores and root channels and the movement of animals, which lead to preferential flow. Despite the weak and moderate spatial structure of the variables, the kriging interpolation method was more accurate for Ks compared to inverse distance weighting. The spatial distribution pattern of Ks in puddled top layer was inversely related to clay content. Despite the high clay content in the west half of the study area, the Ks values in this region were high due to the presence of biopores. These results indicate that the compacted plow pan cannot play its key role for reducing hydraulic conductivity and retaining water in the soil. The magnitude and spatial variability of soil hydraulic conductivity and the factors affecting it depend on the site-specific irrigation management.

**Keywords:** Biopores, Kriging, Paddy fields, Puddled layer

\* - Corresponding author's email n\_davatgar@yahoo.com



## مدیریت یکپارچه خاک و آب در مقیاس مزرعه در زیر حوضه هنام

### (قسمت دوم: بسته‌های مدیریتی واحدهای همگن خاک و آب)

محمدرضا بلالی<sup>۱</sup>، سینا ملاح<sup>۱</sup>، کامران افتخاری<sup>۱</sup>، حامد رضایی<sup>۱</sup>، کامبیز بازرگان<sup>۱</sup>، وینای نانجیا<sup>۲</sup>، فرهاد مشیری<sup>۱</sup>، مهدی پناهی<sup>۱</sup>، مراد سپهوند<sup>۳</sup>،

عبدالله موموندی<sup>۴</sup>، مرادعلی قنبرپوری<sup>۳</sup>، صمد عبدی<sup>۳</sup>، معصومه متین کیا<sup>۵</sup>، مهناز سپهوند<sup>۵</sup> و مراد عزیزاللهی<sup>۶</sup>

<sup>۱</sup> محققان و اعضاء هیئت علمی موسسه تحقیقات خاک و آب

<sup>۲</sup> محقق مؤسسه بین‌المللی تحقیقات مناطق خشک (ایکادا)

<sup>۳</sup> عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی لرستان

<sup>۴</sup> دفتر ترویج دانش و فناوری کشاورزی موسسه آموزش و ترویج، تهران، ایران

<sup>۵</sup> مروج پهنه تولیدی مرکز جهاد کشاورزی علی‌آباد

<sup>۶</sup> تسهیلگر جامعه محلی

« مقاله پژوهشی »

دریافت: ۱۴۰۳/۱/۱۹ و پذیرش: ۱۴۰۳/۵/۱۰

## چکیده

در قسمت اول مقاله با تعیین ۵۳ واحد همگن مدیریتی خاک و آب در زیر حوضه هنام، بررسی رفتار فعلی بهره‌برداران و در نهایت تحلیل شکاف عملکرد آن‌ها، زمینه شناخت چند بعدی وضعیت مدیریت خاک و آب اراضی کشاورزی فراهم شد و مشخص گردید که کارایی مصرف آب و کود در منطقه پایین است. براین اساس، بسته‌های مدیریت خاک و آب شامل مدیریت حاصلخیزی خاک، مدیریت آبیاری و جلوگیری از تخریب اراضی، برای هر واحد همگن تهیه شد. چگونگی تهیه و مراحل صحت‌سنجی بسته‌های مدیریتی موضوع این مقاله می‌باشد. برای این منظور، مرکز جهاد کشاورزی علی‌آباد لرستان به عنوان سکوی نوآوری و انتقال دانش و فناوری در نظر گرفته شد. سپس، با همکاری کارشناسان ملی، استانی و مروجان، یک نمایشگاه فناوری شامل مدیریت مصرف بهینه کودهای شیمیایی، آلی و زیستی و روش‌های آبیاری، برگزار شد تا نتایج تحقیقات در مزارع کشاورزان، آزمون شود. این فناوری‌ها با مشارکت محققین، مروجین و بخش اجرا در دو تیمار عرف کشاورز و تیمار تحقیقاتی در تناوب چغندر-گندم در مزارع داوطلبین اعمال شد. نتایج طرح‌های آزمایشی نشان داد که میانگین تولید محصول گندم از ۵ به ۷/۵ تن در هکتار و کارایی مصرف آب به میزان ۱۳٪ افزایش یافت. نتایج بدست آمده در روز مزرعه که مصادف با زمان برداشت گندم بود، برای دیگر کشاورزان به نمایش گذاشته شد. با اثبات کارآمدی نتایج در مزارع کشاورزان، بسته‌های مدیریت خاک و آب منطقه تهیه شد. با وجود برگزاری کارگاه برای بهره‌برداران، نتایج آن به دیگران تعمیم نیافت. بررسی‌ها نشان داد که تعمیم‌پذیری افقی<sup>۱</sup> بسته‌های مدیریت خاک و آب در واحدهای همگن مدیریتی زیرحوضه و افزایش متوسط تولید با رعایت اصول پایداری، به سه شکاف عملکرد، شکاف تحقیق و توسعه و شکاف زنجیره تولید وابسته است. از این رو، شرایط اساسی کاهش شکاف عملکرد در منطقه شامل آگاهی و انگیزه‌مند شدن بهره‌بردار، توانمندی انجام توصیه‌ها و فراهم بودن امکانات است؛ بنابراین، انجام پایلوت‌های یکساله در عمل اثربخش نبوده و بایستی تداوم چندساله داشته باشد. در ادامه، ظرفیت‌سازی کارشناسان مروج آن منطقه و آشنایی آن‌ها با مراحل مختلف تهیه واحدها، توصیه‌ها و دستورالعمل‌ها انجام شد و کلیه اطلاعات در قالب رقومی و چاپی به جهاد کشاورزی علی‌آباد منتقل گردید. انتظار می‌رود با برپایی مزارع نمایشی بلندمدت و تامین کودها و سایر نهاده‌ها با همکاری بخش‌های دولتی و خصوصی، انتقال توصیه‌ها به دیگر بهره‌برداران و تصمیم‌گیران زیرحوضه تسهیل شود.

واژه‌های کلیدی: ظرفیت‌سازی جامعه محلی، اقدامات جمعی، تعمیم‌پذیری، سکوی نوآوری، تحقیق تقاضامحور

\* آدرس ایمیل نویسنده مسئول: [mrbalali68@gmail.com](mailto:mrbalali68@gmail.com)



<sup>۱</sup> - Out-scaling

## مقدمه

در مقیاس جهانی تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی به‌طور هماهنگ فعالیت می‌نمایند تا شکاف عملکرد را با انتقال دانش و نوآوری و تسهیل دستیابی بهره‌برداران به آن‌ها پر نموده و تولید را در سطح کلان افزایش دهند. در این فرایند، عوامل متعددی نقش دارند که پیچیدگی انتقال را افزایش داده و تغییر پارادایمی، برای مشارکت کلیه ذینفعان در مراحل مختلف از ابتدای مسئله یابی، طراحی و اجرا تا نظارت در نظام نوآوری کشاورزی<sup>۲</sup> در دهه‌های گذشته را ضروری ساخته است. علی‌رغم پیشرفت فناوری‌های موجود و در حال تغییر، کشاورزان با شکاف (خلاء) عملکرد زیاد به همراه نبود رویکرد کل‌نگر روبه‌رو هستند که عمدتاً به دلیل علم اکتشافی بدون انتقال<sup>۳</sup> رخ می‌دهد (Wani, ۲۰۲۱). با تأثیر تغییر اقلیم، شکاف عملکرد محصولات کشاورزی می‌تواند بیشتر نیز شود، مگر اینکه فناوری‌های نوآور در دسترس کشاورزان قرار گیرند (Wani و Raju, ۲۰۱۸). نتایج بررسی صد هزار مقاله گروه کنسرسیوم تحقیقات بین‌المللی CERES2030 نشان می‌دهد که بیشتر تحقیقات کشاورزی چهار دهه گذشته فقط محققان را در فرایند تحقیق وارد کرده، بدون اینکه کشاورزان مشارکت فعالی داشته باشند (Stathers و همکاران، ۲۰۲۰). بیش از یک دهه از پیشنهاد تحقیق برای توسعه کشاورزی<sup>۴</sup> به‌عنوان نسخه-ای نوین از نظام‌های نوآور کشاورزی در پاسخ به رکود رشد بهره‌وری کشاورزی، امنیت غذایی و افزایش نرخ فقر به‌ویژه در کشورهای جنوب صحرای آفریقا می‌گذرد، اما هنوز چگونگی و چرایی مسیر استفاده از آن برای دستیابی به تأثیر بلندمدت ناشناخته است (Maru و همکاران، ۲۰۱۶). تحقیق برای توسعه کشاورزی از طریق پیاده‌سازی سکوها نوآوری،

بازیگران متعدد زنجیره ارزش کالا را درگیر می‌کند و به دنبال راه‌حل‌های نوآورانه برای رفع محدودیت‌های فن‌آوری، نهادی<sup>۵</sup> و زیرساختی در سیستم کشاورزی است. به همین دلیل، رویکرد تحقیق برای توسعه به‌عنوان جایگزین رویکردهای رایج انتقال خطی فناوری معرفی شده است (Adekunle and Fatunbi, ۲۰۱۴). همچنین، نظریه‌های مختلفی به‌عنوان راه‌های میان‌بر برای مسیر تأثیر بلندمدت<sup>۶</sup> در دنیا پیشنهاد شده است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان نظریه‌های چشم‌انداز چند سطحی<sup>۷</sup> (Geels, ۲۰۰۵)، نظریه تغییر انطباقی<sup>۸</sup> (Holling و همکاران، ۲۰۰۲) و نظریه تغییر تلفیقی<sup>۸</sup> (Maru و همکاران، ۲۰۱۶) را نام برد.

در ایران نیز از دهه ۵۰ شمسی، نظام تحقیقات کشاورزی در یک فرایند تکاملی در انسجام تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی به‌صورت مجموعه فعالیت‌های هماهنگ حرکت نموده تا شکاف عملکرد را از طریق انتقال دانش و فناوری و تسهیل دستیابی بهره‌برداران به منابع پر نموده و تولید را در سطح وسیع بهبود بخشد (بالالی و قاسمی، ۱۴۰۰). به عبارتی، تحقق تولید پایدار در سطح کلان متشکل از سه شکاف: (الف) عملکردی (واقعی و پتانسیل)، (ب) تحقیق و توسعه‌ای و (ج) زنجیره تولید است. شکاف عملکرد خود به‌تنهایی ناشی از دودسته مسائل فنی و اقتصادی-اجتماعی است (شکل ۱). عملکرد پتانسیل، عملکرد یک رقم گیاهی در شرایط ایده آل شامل تاریخ کاشت بهینه، رقم گیاهی غالب، تراکم، مدیریت تغذیه و کنترل آفات و بیماری‌ها است و عملکرد واقعی عبارت است از عملکردی که در شرایط مزرعه کشاورز در یک منطقه به دست می‌آید. بررسی‌ها نشان داده است، شکاف بین عملکرد پتانسیل و واقعی محصولات کشاورزی در نقاط

<sup>2</sup> Agricultural Innovation System (AIS)

<sup>3</sup> Integrated Agriculture for Development (IAR4D)

<sup>4</sup> Institutional

<sup>5</sup> Impact pathway

<sup>6</sup> Multi-Level Perspective (MLP)

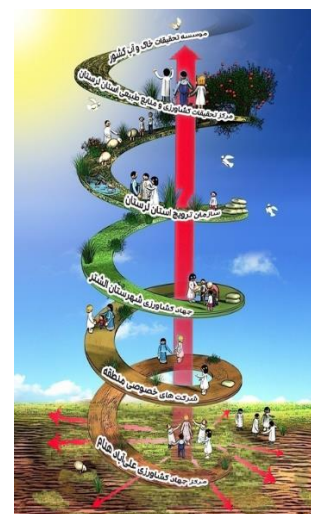
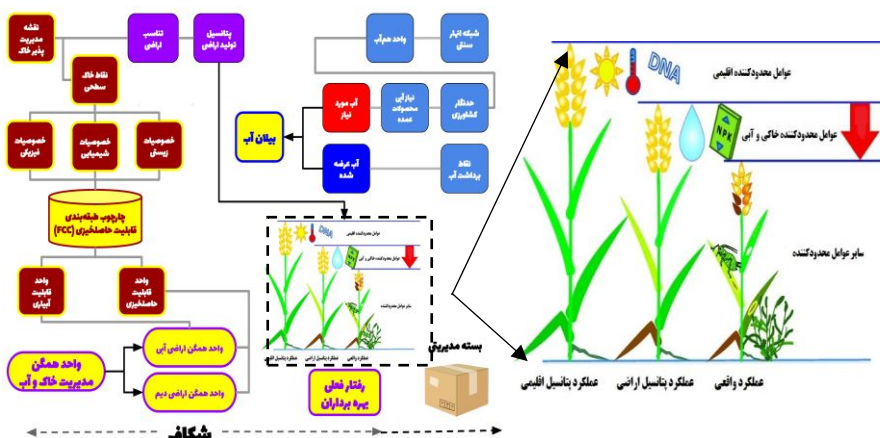
<sup>7</sup> Theory of adaptive change

<sup>8</sup> Integrated theory of change



درصد بوده و کشاورزان توانسته‌اند فقط به ۳۸ درصد از عملکرد پتانسیل گندم آبی دست یابند. نتایج برآورد شکاف عملکرد گندم آبی در استان لرستان نشان می‌دهد که میانگین شکاف عملکرد کل استان برابر با ۴۱۷۷/۵ کیلوگرم در هکتار است. همچنین، در سال‌های موردبررسی، سهم شکاف عملکرد گندم آبی لرستان بیشتر مربوط به مدیریت نیتروژن (۶۸٪)، آب (۲۲٪) و سایر عوامل کاهنده و محدودکننده عملکرد (۱۰٪) بوده است (حیدری و همکاران، ۱۴۰۲).

مختلف جهان از ۲۰ تا ۸۰ درصد متغیر است (جلالی و همکاران، ۱۳۹۶) و به‌ویژه عملکرد محصولات زراعت دیم کشاورزان مناطق نیمه‌خشک، ۲ تا ۴ برابر کمتر از عملکرد قابل‌دستیابی<sup>۹</sup> است (راکستروم و همکاران، ۲۰۰۷). طبق نظر پژوهشگران، دلیل اصلی شکاف عملکرد در اکثر کشورها، نبود شیوه‌های مدیریت پایدار و نیز آب‌وهوا عنوان‌شده است. بررسی‌های زاهد و همکاران (۱۳۹۸) در سطح ملی نشان می‌دهد، با توجه به ارقام گندم آبی موجود و شرایط محیطی حاکم، مقدار شکاف عملکرد گندم آبی کشور در حدود ۶۲



شکل ۱- روش‌شناسی مطالعه (بالا و همکاران، ۱۴۰۲)، شکاف عملکرد پتانسیل و واقعی و عوامل تأثیرگذار آن، و تعمیم طولی و عرضی

تحقق یافتن هستند و گام‌های بعدی تصمیم‌گیری را چگونه تسهیل می‌نمایند. طبق نظر اسدی و شریفی (۱۳۸۵)، الگوهای مختلف ارزشیابی در برنامه‌های ترویجی وجود دارد که مدل منطقی سلسله مراتبی بنت<sup>۱۰</sup> شامل نهاده‌ها<sup>۱۱</sup>، فعالیت‌ها<sup>۱۲</sup>، مشارکت مردمی<sup>۱۳</sup>،

دومین شکاف، شکاف تحقیق و توسعه است که عمدتاً از نبود هم-افزایی بین بازیگران مختلف و کمبودهای انتقال فناوری ناشی می‌شود (Raju و Wani، ۲۰۱۶). به عبارتی، آنچه در فرایند تحقیق به دست می‌آید در مرحله توسعه و گسترش به منطقه وسیع الزامات خاص خود را دارد. ارزشیابی این مسیر شامل یک فرایند نظام‌مند برای جمع‌آوری، تحلیل و تفسیر اطلاعات است که در آن تعیین می‌شود آیا هدف‌های موردنظر تحقق‌یافته‌اند یا به چه میزانی در حال

<sup>9</sup> Achievable yield

<sup>10</sup> Bennett's Hierarchy Logical Model

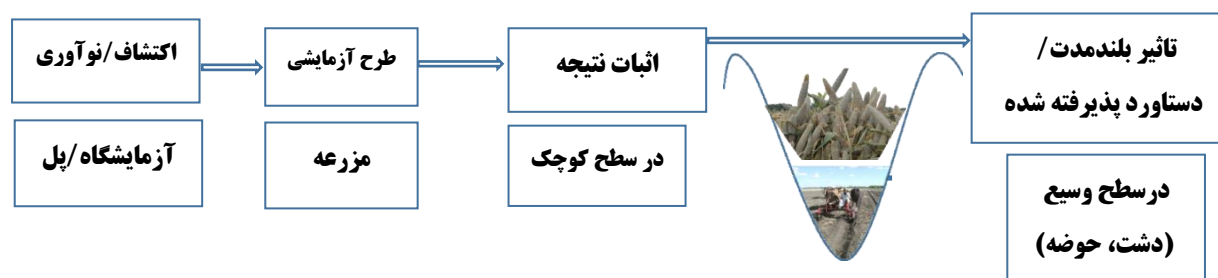
<sup>11</sup> Input

<sup>12</sup> Activities

<sup>13</sup> Participation

تولید را تحت تأثیر قرار دهد. آموخته‌های مستند حاصل از طرح‌های تعمیم‌پذیری بیش از ۱۰ میلیون کشاورز هندی نیز نشان می‌دهد که عبور از «دره مرگ تأثیر بلندمدت»<sup>۱۷</sup> (فرورفتگی شکل ۲) و تضمین امنیت غذایی، تغذیه و درآمد پایدار فقط از طریق پایداری سازگار با آب‌وهوا امکان‌پذیر است (Wani, ۲۰۲۱).

عکس‌العمل‌ها<sup>۱۴</sup>، تغییر در دانش، عقاید، مهارت‌ها و آرزوها<sup>۱۵</sup>، تغییرات عملی<sup>۱۶</sup> و نتایج نهائی/اثرات بلندمدت (نوذر منفرد، ۱۳۹۰)، یکی از مدل‌های شناخته‌شده است. این مدل مشخص می‌کند انتقال‌یافته‌های تحقیقاتی تا چه مقدار توسعه پیدا کرده و آیا در بسط به عموم بهره‌برداران و کل منطقه به تأثیر بلندمدت دست می‌یابد تا بتواند شکاف عملکرد را پر نموده و با افزایش متوسط تولید، کل



شکل ۲- دره مرگ) نمایش تصویری از مسیر تحقیق برای توسعه، از اقدام برای کشف نوآوری تا تأثیر بلندمدت (Wani, ۲۰۱۶)

(ICRISAT, 2017). این در حالی است که تحلیل پایلوت-های آزمایشی در ایران نشان می‌دهد که علی‌رغم نتایج مثبت عینی، طرح‌ها عمدتاً کوتاه‌مدت و یک‌ساله بوده و در نتیجه به تغییر نگرش بهره‌برداران منجر نشده است و بایستی سرلوحه برنامه‌های آتی قرار گیرد (صفاری و همکاران، ۱۳۹۸) تا سبب هدر رفت بیشتر سرمایه‌های مالی و زمانی نگردد.

سومین شکاف در تحقق تولید پایدار، شکاف زنجیره تولید است که از دهه ۹۰ میلادی در دستور کار مدیریت عالی در صنعت تولید و خرده‌فروشی قرار گرفته و اخیراً در صنایع کشاورزی و مواد غذایی<sup>۲۰</sup> کشورهای توسعه‌یافته در نظام کشاورزی و غذا<sup>۲۱</sup> برای تحقق جامع‌نگری

با دقت در (شکل ۲)، مشخص است مسیر تحقیق از اقدام برای کشف نوآوری در آزمایشگاه و پلات‌های آزمایشی تا انجام پایلوت (طرح آزمایشی) در مزارع بهره‌برداران که بیانگر اثربخشی تحقیقات در سطح کوچک است شروع شده، اما برای توسعه و گسترش در سطح وسیع الزامات دیگری را می‌طلبد که به تعمیم عرضی و طولی<sup>۱۸</sup> معروف است تا مجموعه عوامل زنجیره تولید<sup>۱۹</sup> فراهم شده و تغییر در تولید متوسط بهره‌بردار و نهایتاً منطقه را تسهیل نماید. مطالعات دیگر کشورها به‌ویژه در هند اثبات کرده است که پایلوت‌ها در میانه راه تحقیق برای توسعه بوده و بایستی سه تا پنج سال ادامه یابند تا سبب تغییر نگرش بهره‌برداران شوند

<sup>14</sup> Reaction

<sup>15</sup> Knowledge, Attitude, Skills

<sup>16</sup> Practice change/Mid-term Outcomes

<sup>17</sup> Death valley of impact

<sup>18</sup> Out and Up Scaling

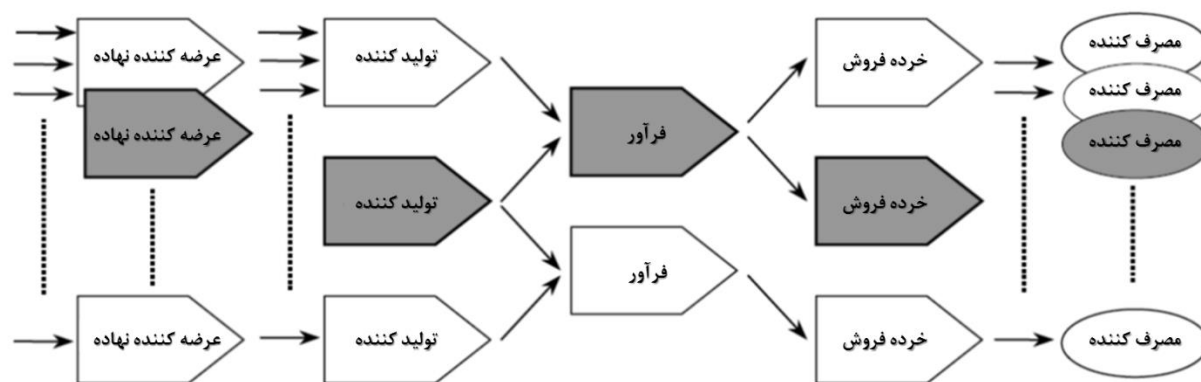
<sup>19</sup> Value chain

<sup>20</sup> Agrifood

<sup>21</sup> Agrifood system

مدیریت و هماهنگی با این تغییرات و جامع‌نگری در نظر گرفته می‌شود؛ زیرا یک حلقه و یک جزء به‌تنهایی قادر به همکاری برای تحقق بازار به‌گونه‌ای که پاسخگو بوده، هزینه‌ها پایین باشد و باکیفیت بالا محصول تولیدی را تحویل دهد، نیست. بر این اساس، در صورت کارا بودن یافته تحقیقاتی و پذیرش توسط بهره‌برداران، با تأمین نهاده لازم برای بهره‌بردار و انتقال تولید به بازار، تداوم چرخه تولید تضمین می‌شود.

در نظر گرفته می‌شود. زنجیره تولید، به‌صورت توالی در فرآیندها (تصمیم‌گیری و اجرا) و جریان‌ها (مواد، اطلاعات و پول) تعریف می‌شود و هدف آن تأمین احتیاجات مصرف-کنندگان نهایی است که در درون و میان مراحل مختلف از تولید تا مصرف‌کننده نهایی قرار گرفته‌اند (Van der Vorst, 2007). در یک نگاه وسیع‌تر، زنجیره تولید شامل توسعه محصولات جدید، بازار، اداره‌کنندگان، توزیع‌کنندگان، سرمایه‌گذاران، امور مالی و مشتریان است (شکل ۳) که برای



شکل ۳- زنجیره تأمین از نهاده تا مصرف‌کننده (van der Vorst و همکاران، ۲۰۰۷)

انتقال فناوری‌ها به منطقه، ب) صحت‌سنجی بسته‌ها در مزارع منتخب و ج) تشریح چالش‌های تعمیم‌پذیری و نیازمندی‌های آینده است.

### مواد و روش

با توجه به تعدد و پیچیدگی عوامل تخریب اراضی و پائین بودن بهره‌وری منابع آب و خاک منطقه، سعی شد تا در قالب چارچوبی کل‌نگر، از ابتدای طراحی تا اجرا و نظارت، فرایند انجام کار به‌صورت مشارکتی انجام شود و ذینفعان مختلف دخالت داده شوند (شکل ۱). از این‌رو، مراحل مختلف پژوهش مشارکتی به‌صورت فعالیت‌های زیر انجام شد.

الف- تشکیل گروه چند رشته‌ای محققین برای ایجاد ادبیات مشترک و فراهم نمودن زمینه‌ی کار بین‌رشته‌ای

نتایج تحقیقات و تجربیات بین‌المللی نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن سه شکاف بیان‌شده، فاصله مراکز دانش تا عرصه‌های تولید کاهش‌یافته و تغییر پایدار متوسط تولید تسهیل خواهد شد. بر اساس آنچه در قسمت اول مقاله تشریح شد (بلالی و همکاران، ۱۴۰۲)، زمینه پژوهش بین‌رشته‌ای از گردآوری چالش‌ها تا شناخت علمی مسائل خاک و آب در قالب گروه چند رشته‌ای فراهم و ۵۳ واحد همگن مدیریت خاک و آب در منطقه تعیین شد. واحدهای همگن مدیریت خاک و آب توانست زبان بین‌رشته‌ای در حوزه علوم و حتی زبان مشترک با بخش‌های اجرایی را فراهم کند. همچنین، توان (پتانسیل) تولید ژنتیکی در منطقه و توان تولید اراضی برای محصولات عمده منطقه محاسبه شد و شکاف عملکرد کشاورزان با آن‌ها تعیین گردید، اما دلایل آن مورد واکاوی قرار نگرفت. در نتیجه، هدف از این مقاله: الف) ارائه توصیه‌های مدیریتی برای واحدهای همگن خاک و آب به‌دست‌آمده از قسمت اول و مراحل

ح- انتقال اطلاعات و بسته‌های مدیریتی خاک و آب به مرکز جهاد کشاورزی منطقه به‌عنوان سکوی نوآوری و آغاز فرایند تعمیم طولی و عرضی بسته‌های مدیریتی

### نتایج و بحث

برای حل چالش‌های چندبعدی خاک و آب در مقیاس مزرعه در زیر حوضه هنام با ۱۴۲ کیلومترمربع وسعت، ۲۳ روستا و بیش از سه هزار بهره‌بردار سعی شد تا از همان ابتدا با مشارکت مدیران، کارشناسان و محققان استان لرستان در گروه تحقیق، انجام بازدیدهای میدانی و مصاحبه با کشاورزان و خبرگان محلی، فرایند گذار به جامع‌نگری و تقاضامحوری پایه‌گذاری شود (شکل ۴).

ب- بررسی تجربیات مطالعات آب و غذا در حوضه کرخه با حضور اعضاء و انجام مطالعات کتابخانه‌ای  
ج- بازدید از منطقه و مشارکت دادن محققین و کارشناسان منطقه‌ای و تسهیلگر محلی در گروه تحقیق  
د- بررسی و جمع‌آوری اولیه مسائل منطقه با حضور اعضاء در سطوح مختلف ملی، منطقه‌ای و محلی  
ه- انجام مطالعات فنی و تکمیل پرسشنامه  
و- برگزاری نمایشگاه فناوری و انجام پایلوت در مزارع داوطلبین  
ز- ارائه بسته‌های مدیریتی خاک و آب<sup>۲۲</sup> برای هر واحد همگن مدیریتی



شکل ۴- مذاکرات با مسئولین استان، شهرستان، بخش خصوصی به همراه بازدیدهای منطقه‌ای

فسفات‌از اسیدی و تنفس میکروبی در زیر حوضه هنام، کمبود فسفر خاک‌ها می‌تواند به این موضوع مرتبط باشد. علی‌رغم توصیه کودهای زیستی آزوسپیریلیوم و ازتوباکتر در منطقه و نتایج مثبت حاصل از مصرف آن در منطقه (میلانی و همکاران، ۱۳۸۹)، این کودها در هیچ‌کدام از مزارع، حتی در زارعت یونجه و شبدر مصرف نمی‌شوند. این در حالی است که کودهای پتاسه و عناصر کم‌مصرف به‌صورت محدود و بیشتر در باغات گردو مصرف می‌شوند (مشیری، ۱۳۹۹)؛ بنابراین، با توجه به ضعف بینه غذایی خاک منطقه، کاربرد کودها بر

نتایج مصاحبه‌ها، پرسشنامه‌ها و بررسی‌های فنی نشان داد، مدیریت حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه دچار مسئله است، زیرا مصرف کود عمدتاً بدون آزمون خاک انجام می‌شود و کمبود کربن آلی در ۷۵ درصد خاک‌های منطقه و کمبود فسفر، منگنز و روی در سطح وسیع قابل‌مشاهده است. نتایج مدل گلاسود در منطقه نیز بیشترین مقدار شاخص پسرفت خاک را به ترتیب برای فسفر قابل‌دسترس، کربن آلی و نیتروژن کل نشان داد (امیدواری، ۱۳۹۵). اسمعیلی‌زاد و همکاران (۱۴۰۲) به این نتیجه رسیدند که با توجه به پایین بودن فعالیت آنزیم

<sup>22</sup> Soil and Water Recommended Packages (SWRP)

به کشاورزان عرضه شد. این توصیه‌ها در مزرعه کشاورزان داوطلب به‌صورت پایلوت با دو تیمار عرف زارع و بهترین تیمار تحقیقاتی مورد آزمون قرار گرفت تا در تدوین بسته‌های مدیریتی به کار گرفته شود.

## برگزاری نمایشگاه فناوری و اجرای پایلوت‌های ترویجی در مزارع داوطلبین

فناوری‌های مختلف با همکاری محققین و مروجین در دو تیمار عرف کشاورز و تیمار تحقیقاتی در تناوب چغندر-گندم مزارع کشاورزان داوطلب اجرا شد. نتایج طرح شامل ارتقاء عملکرد گندم از ۵ به ۷/۵ تن و افزایش کارایی مصرف آب به میزان ۱۳ درصد بود که در قالب نمایشگاه فناوری هنگام برداشت محصول در تیرماه ۱۳۹۳ مصادف با روز مزرعه به سایر کشاورزان منطقه نشان داده شد (شکل ۵). نمایشگاه فناوری حاصل از نتایج تحقیقات شامل مدیریت مصرف بهینه کود، بهبود بهره‌وری آب با استفاده از اصلاح‌کننده میکروبی (قارچ آربوسکولار مایکورایزا و آزوسپیریلیوم به‌عنوان محرک رشد گیاهی) و آبیاری جویچه‌ای یک‌درمیان بود. با معرفی فناوری‌های موجود به کشاورزان، بستر مناسب برای حرکت به‌سوی تعمیم‌پذیری عرضی (به مزارع سایر کشاورزان) بسته‌های مدیریت خاک و آب در سطح حوضه ایجاد شد.



اساس آزمون خاک و مدیریت تلفیقی انواع کودهای شیمیایی، آلی و زیستی به‌شدت توصیه می‌شود. افزون بر این، به دلیل نقش غیرقابل‌انکار کودهای نیتروژن و فسفر در دستیابی به عملکردهای مطلوب در منطقه، تأمین و توزیع به‌موقع و با نسبت متعادل این کودها، می‌بایست موردتوجه قرار گیرد.

نتایج شدت فرسایش خاک در زیر حوضه هنام نشان داد که حدود ۶۰ درصد از اراضی در کلاس فرسایش زیاد و بسیار زیاد قرار دارند و عملیات نادرست کشاورزی مانند کشت نامناسب، رعایت نکردن تناوب زراعی، سوزاندن کاه و کلش، عملیات خاک‌ورزی شدید و کشت در اراضی شیب‌دار از عوامل اصلی ایجاد تخریب اراضی منطقه می‌باشند (امیدواری، ۱۳۹۵). در بخش آب، روش آبیاری مرسوم منطقه در اراضی فاریاب، روش آبیاری سطحی و به‌طور عمده از نوع نواری با شیب زیاد است و طول نوارها در جهت موازی با شیب اصلی زمین قرار دارند (پناهی و همکاران، ۱۴۰۰، الف و ب). داده‌های برآورد شده هیدرومدول آبیاری و شرایط موجود بهره‌برداری نشان داد، ۴۰ درصد اراضی آبی در گروه بیش‌بود و بقیه در گروه کم‌بود آب قرار دارند (غالبی و ملاح، ۱۳۹۸).

ازاین‌رو، با توجه به مدیریت نامناسب خاک و آب در منطقه نمایشگاه فناوری برای کشاورزان برگزار شد و توصیه‌های کودی شامل کودهای شیمیایی، آلی و زیستی و روش آبیاری مناسب که حاصل نتایج تحقیقات پیشین بودند







شکل ۵- نمایشگاه فناوری، اجرای پایلوت در مزرعه کشاورز داوطلب، انجام کار گروهی و برگزاری کارگاه محلی با مشارکت کشاورزان، مروجان و محققان ملی و محلی

مناسب کشاورزان از مصرف کودهای زیستی علت آن به عدم آگاهی مربوط نبوده، بلکه در دسترس نبودن این منبع کودی دلیل اصلی است. این موضوع، اهمیت توجه به زنجیره تولید که حلقه اول آن تأمین نهاده است را برای رسوخ و نهادینه شدن نتایج پژوهش ثابت کرد. بر این اساس، کارگاه آموزشی بین‌المللی با عنوان مدل‌سازی و تعمیم‌پذیری بسته‌های مدیریت خاک و آب» با حضور کلیه اعضای گروه شامل اعضای تحقیقاتی، آموزش، ترویج و اجرا از سطح ملی، استانی و محلی برگزار شد تا علاوه بر بهره‌گیری از تجربیات جهانی، ظرفیت‌سازی نیروی انسانی نیز به موازات انجام شود (شکل ۶).

تصور بر این بود که کشاورزان با دیدن افزایش عملکرد محصول، از سال آینده تیمارها را در مزارع خود انجام دهند، اما در کمال ناباوری در سال زراعی بعد، حتی کشاورزان داوطلب مبادرت به اعمال توصیه‌ها در مزارع آزمایشی خود، نکردند؛ بنابراین، برای گروه پروژه، این سؤال جدی به وجود آمد که چرا علی‌رغم نتایج مثبت طرح آزمایشی و رضایت اعلام‌شده توسط کشاورزان، این توصیه‌ها ادامه و بسط نیافته است؟». دلیل آن به شکاف تحقیق و توسعه و دره مرگ فناوری (شکل ۲) مربوط است که از نبود هم‌افزایی مستمر بین بازیگران مختلف و کمبودهای انتقال فناوری ناشی می‌شود. به عنوان مثال در مصاحبه با کشاورزان داوطلب مشخص شد، علی‌رغم پاسخ



شکل ۶- اعضای گروه پروژه شرکت‌کننده در کارگاه آموزشی مدل‌سازی و تعمیم‌پذیری بسته‌های مدیریت خاک و آب، مهر ۱۳۹۷

بازرگان ۱۴۰۱، پناهی ۱۳۹۹، امیدواری ۱۳۹۸). این بسته‌ها بر اساس معیارهای نه‌گانه و توصیف‌کننده‌ها (جدول ۱ مقاله قسمت اول، بلالی و همکاران، ۱۴۰۲) برای ۵۳ واحد همگن تهیه‌شده است و شامل پیشنهادهای حاصلخیزی خاک، مدیریت آبیاری و جلوگیری از تخریب خاک می‌باشند که کلیات چارچوب آن در جدول ۱ خلاصه‌شده است.

بررسی الزامات تحقیق و توسعه، مسائل ایجادشده در انجام پروژه و بررسی تجربیات مشابه در کشورهای مختلف به‌ویژه در کشور هند نشان داد اولاً بازخورد<sup>۲۳</sup> هر مرحله از انجام پروژه از رویکردهای خطی به مارپیچی<sup>۲۴</sup> در پارادایم پایداری چه میزان در اصلاح و پذیرش بهره‌برداران اثرگذار است. همچنین، مشخص شد انجام این پایلوت‌ها نیازمند الزاماتی است که بایستی تا برانگیخته شدن انگیزه کشاورزان ادامه یابد. مدت‌زمان این فرایند در هند به‌طور متوسط سه تا پنج سال گزارش‌شده است (ICRISAT, 2017). ازاین‌رو، پایلوت‌های کوتاه‌مدت یک‌ساله که در این پروژه و پروژه‌های مشابه در کشور انجام می‌شود، برای پذیرش کشاورزان کافی نیست.

## تدوین بسته مدیریت خاک و آب برای هر واحد همگن

با توجه به نتایج مثبت پایلوت‌ها و شناخت مسائل حاصل از واحدهای همگن، زمینه توصیه در قالب بسته‌های مدیریتی شامل تغذیه گیاه، آبیاری و روش‌های جلوگیری از فرسایش خاک در مزارع و باغات برای هر واحد که در آن کشاورزان مشترک با کشت‌های مختلف مشغول فعالیت هستند، فراهم و بسته‌های مدیریت بر اساس ویژگی‌های هر واحد همگن مدیریت خاک و آب تدوین شد (بازرگان ۱۳۹۹).

<sup>23</sup> Feedback

<sup>24</sup> Spiral

جدول ۱- چارچوب بسته‌های مدیریت خاک و آب

| بسته مدیریت               | تعداد حالات توصیه                                                                           | اهم توصیه‌ها                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه | حالت‌های متعدد بسته به بافت خاک، میزان عناصر غذایی، لایه محدودکننده، نوع محصول زراعی و باغی | استفاده از ماده آلی با توجه به درصد اولیه کربن آلی خاک و درصد رس، مدیریت مصرف کود نیتروژن با توجه به pH و درصد کربنات کلسیم، نحوه جایگذاری کودهای فسفره به‌صورت نواری و یا در زیر بذرها، مدیریت کود پتاسیم برای جلوگیری از تخلیه آن از خاک با توجه به درصد رس، محلول‌پاشی عناصر کم‌مصرف به همراه مصرف خاکی در طول دوره رشد، استفاده از اصلاح‌کننده‌هایی نظیر کودهای آلی و یا ترکیباتی مانند گچ در خاک‌هایی که دارای رس‌های ۲:۱ (رس‌های انبساط پذیر) هستند و استفاده از زیرشکن در واحدهایی که خاک دارای لایه محدودکننده در عمق ۷۵ سانتی‌متری است.   |
| آبیاری                    | ۱۳ حالت بسته به نوع لایه محدودکننده، شیب و نفوذپذیری زمین                                   | روش‌های آبیاری سطحی (نواری-جویچه) و تحت‌فشار (قطره‌ای)، عملیات ترانس و بانکت بندی و جمع-آوری باران، اصلاح نفوذپذیری خاک                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| جلوگیری از تخریب خاک      | ۶ حالت بسته به درجه، سرعت و وسعت پسرقت در کوهستان تا دشت                                    | عملیات پیوسته حفاظت خاک، قرق و اصلاح پوشش گیاهی، احداث چکدم و سایر سدهای خشکه‌چین در اراضی شیب‌دار و در شیارها، غرس و تکثیر درختچه‌های بومی، گیاهان بوته‌ای و درختان خودرو در منطقه، احداث پوشش سنگی در اطراف چاله‌های کاشت نهال در اراضی شیب‌دار، توسعه باغات در اراضی شیب‌دار با رعایت اصول صحیح باغداری، جلوگیری از چرای بیش‌ازحد دام در مراتع، جلوگیری از شخم در جهت شیب، حفاظت و قرق از اراضی در راستای حفظ و تکثیر گیاهان خودرو (موسیر، کنگرو ...)، عملیات خاک‌ورزی حفاظتی و مناسب، استفاده از آبیاری تکمیلی و کم آبیاری، استفاده از کود سبز |

بر اساس چارچوب (جدول ۱)، توصیه‌ها برای تمامی ۵۳ واحد همگن مدیریت خاک و آب در اراضی آبی و دیم، ارائه شد که به‌عنوان نمونه، بسته مدیریت بزرگ‌ترین و پرمسئله‌ترین واحد همگن مدیریت خاک و آب واقع‌شده در اراضی آبی منطقه، در (جدول ۲) آورده شده است.

جدول ۲- بسته توصیه‌شده برای واحد همگن مدیریتی خاک و آب شماره ۳۹ واقع در اراضی آبی

| واحد همگن مدیریتی خاک و آب      | شناخت و توصیف وضعیت واحد همگن مدیریتی                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | بسته مدیریتی خاک و آب                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| C.C.d.v.mzn.p.t--<br>AP1—PII-Hn | علی‌رغم مناسب بودن مقدار کربن آلی در خاک ولی به دلیل دسترسی به منابع آلی و لزوم توجه به کربن آلی خاک و حفظ سطح مناسب کربن خاک و استفاده از کود آلی توصیه می‌شود. میزان رس بیش از ۳۰ درصد نفوذپذیری کم، ظرفیت نگهداری آب بالا، پتانسیل روان آب بالا در اراضی شیب‌دار، دشواری خاک-ورزی ایجاد لایه غیرقابل نفوذ شخم، ظرفیت تبادل کاتیونی خوب، بیرون‌زدگی چغندرقد، بالا رفتن دینتریکاسیون مدیریت خاک‌های سنگین، استفاده از زیرشکن، استفاده از مواد آلی برای بهبود نفوذپذیری آب، تهویه نامناسب و احتمال بروز کمبود عناصر کم‌مصرف به‌ویژه آهن در اوایل فصل رشد گیاه و درختان میوه، عدم سبز بذر به دلیل آبیاری سنگین در ابتدای فصل شرایط ماندابی حاصل از بارندگی، جهت تولید محصول نیاز به آبیاری دارد. نیاز به آبیاری تکمیلی دارد. توجه به بهسازی محیط خاک در هنگام کاشت نهال و احداث باغ. به دلیل دارا بودن ویژگی ورتیک که ناشی از ۳۵ درصد ذرات رس چسبیده و بیش از ۵۰ درصد رس جزو رس‌های ۲:۱ انبساط پذیر است، موجب بروز شکاف شده، انقباض و انبساط شدید لایه سطحی، احتمال آبشویی عناصر غذایی به‌ویژه کودها و عنصر نیتروژن از محل شکاف‌های عمیق را همراه خواهد داشت. به دلیل کربنات کلسیم کل بیش از ۲۵ درصد، احتمال بروز کمبود عناصر کم‌مصرف به‌ویژه آهن و روی و کمبود فسفر وجود دارد (میزان فسفر خاک کمتر از ۱۰ و روی کمتر از ۰/۷ میلی‌گرم در کیلوگرم نشانگر نیاز به مصرف فسفر و روی است). همچنین تثبیت بالای فسفر (افزایش میزان مصرف مدیریت عناصر غذایی کم‌مصرف و مصرف خاکی و محلول‌پاشی) و تصعید بالای نیتروژن در صورت کاربرد سطحی کودهای نیتروژنه، کاربرد نواری و عمقی نیتروژن و فسفر در زراعت و در باغات چال کود توصیه می‌شود. به دلیل احتمال بالای تثبیت پتاسیم در باغات چال کود توصیه می‌شود. قابلیت کاربرد تمامی روش‌های آبیاری و تحت‌فشار برای تمامی گیاهان زراعی و باغات، آبیاری جویچه‌ای به‌منظور مصرف بهینه آب در گیاهان ردیفی توصیه می‌شود. تخریب فرسایش آبی با کاهش عمق خاک سطحی در اثر فعالیت‌های کشاورزی و قطع درختان جنگلی، با درجه پسرقت متوسط، سرعت پسرقت آهسته، وسعت پسرقت کم و با تاریخ بیش از ۲۵۰ سال از شروع فعالیت دیده می‌شود. همچنین عوامل تخریب- پسرقت حاصلخیزی در اثر فعالیت‌های کشاورزی و قطع درختان جنگلی، با درجه پسرقت متوسط، سرعت پسرقت آهسته، وسعت پسرقت کم و با تاریخ بیش از ۲۵۰ سال از شروع فعالیت دیده می‌شود | مصرف ۳۰-۴۰ تن در هکتار کود آلی حداقل ۳ سال یک‌بار؛ حفظ حداکثری بقایای گیاهی با لحاظ جنبه‌های اقتصادی. انجام زیرشکن تا عمق ۵۰ سانتی‌متر حداقل ۳ سال یک‌بار قبل از کشت برای زراعت چغندرقد در خاک خشک. عناصر غذایی محدودکننده تولید به ترتیب ازت، فسفر، روی، آهن است. مصرف کودهای نیتروژنی (اوره) در سه تقسیط و آبیاری بلافاصله بعد از مصرف کود. مصرف کود فسفاتی به مقدار ۲۰۰-۱۵۰ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل یا فسفات آمونیوم در هنگام کاشت به‌صورت پخش سطحی و اختلاط با خاک و یا مصرف ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود به‌صورت نواری. مصرف ۳۰-۴۰ کیلوگرم سولفات روی به همراه دو بار محلول‌پاشی سولفات روی در پنجه‌زنی و ساقه روی گندم و جو. مصرف محلول‌پاشی عناصر کم‌مصرف با غلظت ۵-۳ در هزار در دو مرحله. کشت به‌صورت فارویی و عدم آبیاری سنگین بیش‌ازحد برای جلوگیری و کاهش کمبود عناصر کم‌مصرف به‌ویژه آهن. مصرف ۴ لیتر در هکتار باکتری محرک رشد و قارچ‌های میکوبیژی در کشت گندم و جو به‌صورت اختلاط با بذر. مصرف ۵۰۰ گرم میکوبیژی به ازای هر درخت برای باغات احداث‌شده و مصرف ۱۰۰ گرم به ازای هر درخت برای باغات در حال احداث. مصرف باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن و قارچ‌های میکوبیژی به میزان ۴ لیتر در هکتار در گیاهان لگوم، نخود، شیدر و یونجه و مصرف باکتری‌های محرک رشد به میزان ۴ لیتر در هکتار برای کشت چغندرقد. می‌شود. |

انتقال اطلاعات و بسته‌های مدیریت خاک و آب به مرکز جهاد کشاورزی منطقه و آغاز فرایند تعمیم طولی و عرضی بسته‌های مدیریتی



که به همین منظور مرکز جهاد کشاورزی<sup>۲۵</sup> علی‌آباد لرستان با همکاری مدیریت ترویج و مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان، به‌عنوان سکوی نوآوری انتخاب شد (شکل ۷). درواقع، هدف از ایجاد سکوی نوآوری، کاهش فاصله مراکز دانش و پهنه‌های تولیدی و تغییر پایدار متوسط تولید در منطقه است.

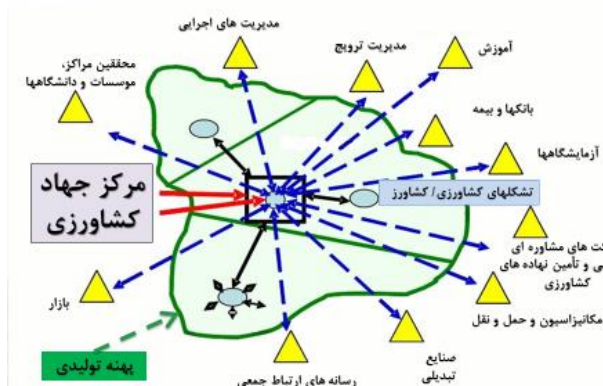


شکل ۷- مرکز جهاد کشاورزی به‌عنوان سکوی نوآوری

تأمین می‌شود، مروجان محلی نیز بایستی از نحوه تهیه اطلاعات و دستورالعمل‌ها به‌خوبی آگاه باشند تا بتوانند ترجمه بسته‌ها به کشاورزان را به‌درستی انجام دهند. سپس، کارگاه آموزشی انتقال و آموزش اطلاعات به مرکز جهاد کشاورزی علی‌آباد در تاریخ ۲۳ مرداد ۱۳۹۷ در محل سکوی نوآوری، توسط مروجین آموزش‌دیده به سایرین انجام شد. در این مرحله، اطلاعات رقومی و نقشه‌های موضوعی نیز به مرکز جهاد کشاورزی علی‌آباد منتقل و بر روی دیوارها نصب شدند. تمامی مراحل انجام‌شده در بالا به‌صورت خلاصه در شکل ۸ آورده شده است.

## انتخاب مرکز جهاد کشاورزی علی‌آباد به‌عنوان سکوی نوآوری

پس از تعیین واحدهای همگن، تحلیل شکاف و توصیف وضعیت هر واحد و ارائه بسته‌های مدیریت تلفیقی خاک و آب تأییدشده، نیاز به به‌روزرسانی، انتشار و تعمیم‌یافته‌ها در منطقه بود



در سکوی نوآوری، ابتدا اطلاعات طرح در کارگاه دو روزه (۱۳ و ۱۴ مرداد ۱۳۹۷) به کارشناسان مروج پهنه مرکز جهاد کشاورزی علی‌آباد در ستاد موسسه تحقیقات خاک و آب به‌صورت نظری و عملی آموزش داده شد؛ زیرا صرف ارسال دستورالعمل برای کارشناسان، در انتقال اطلاعات به بهره‌برداران کفایت نمی‌کند و ایشان از فرایند پیچیده تهیه اطلاعات مختلف و چگونگی ایجاد دستورالعمل‌ها به‌خوبی آگاه نخواهند شد. به عبارتی، همان‌طور که محققین بایستی از نقاط ضعف و قوت منطقه به‌خوبی مطلع باشند و این با حضور مداوم آن‌ها در منطقه

<sup>۲۵</sup> در کشور ۱۴۴۰ مرکز جهاد کشاورزی در سطح دهستان وجود دارد که بطور متوسط مسئولیت ۳ تا ۵ هزار هکتار اراضی کشاورزی تحت عنوان پهنه‌های تولیدی را دارا می‌باشند. همچنین در این مراکز مروجین پهنه در سطوح کارشناسی تا دکتری حضور دارند که با کشاورزان پهنه تولیدی تحت مسئولیت مرتبط می‌باشند.



**شکل ۸- انتقال اطلاعات طرح به مرکز جهاد کشاورزی به‌عنوان سکوی نوآوری برای مدیریت دانش و نفوذ دانش به بهره‌برداران**

به‌این ترتیب با آموزش مروجین پهنه که در ارتباط مستقیم با بهره‌برداران محلی هستند، اولاً زمینه ارائه توصیه به هر کشاورز بر اساس اطلاعات منتقل شده فراهم شد. دوماً طبق شکل ۲، حرکت به‌سوی پذیرش (Outcome) و تأثیر بلندمدت (Impact) و نهایتاً تغییر متوسط تولید منطقه‌ای پایه‌گذاری شد. یادآوری این موضوع در گذار به مدیریت یکپارچه خاک و آب به‌سوی کشاورزی پایدار و تغییر روش خطی به روش مارپیچی حائز اهمیت است. صرف انجام پایلوت‌های ترویجی منجر به نتایج فوق نمی‌گردد که این مسئله در شکل ۲ و ۳ توضیح داده شد. درواقع، تغییر تولید بهره‌برداران و درنهایت تولید منطقه مشروط به فرایند مستمر اجرای بسته‌های مدیریتی، بازخورد گیری و اصلاح آن‌ها با همکاری خود بهره‌برداران و فراهم نمودن الزاماتی نظیر در

دسترس بودن نهاده‌های بذر و کود با مشارکت سایر ذینفعان اعم از دولتی و خصوصی است.

در ادامه پایلوت‌های اولیه که در تهیه بسته‌های مدیریتی کمک نمود، یک‌بار دیگر کارگاهی با مشارکت مروجین پهنه‌ی آموزش دیده و بهره‌برداران برای اجرای بسته‌های مدیریتی تدوین شده برگزار شد تا آزمایش‌ها طراحی شود و برای نحوه اجرای بسته‌ها در سکوی نوآوری مرکز جهاد کشاورزی علی‌آباد هماهنگی گردد. درنهایت، توصیه‌های مدیریتی در مزارع منتخب با مشارکت کشاورزان داوطلب به‌عنوان کانون‌های هر واحد همگن با سه تیمار شامل عرف زارع، توصیه کلی و توصیه تلفیقی، طراحی و اجرای آن آغاز شد (شکل ۹ و ۱۰).



|                               |                                                                                                                                          |                                                                                                                                                  |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| عرف زارع<br>(Farmer Practice) | توصیه عمومی کودی + تسطیح + آبیاری جویچه‌ای <sup>۱</sup><br>General Fertilizer Recommendation + Land )<br>(Leveling and Furrow Irrigation | توصیه مدیریت تلفیقی کود + تسطیح + آبیاری جویچه ای <sup>۲</sup><br>Integrated Fertilizer Recommendation + Land )<br>(leveling + Furrow Irrigation |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

۱. توصیه عمومی کود شامل مصرف بهینه کودهای نیتروژنی، فسفری و عناصر میکرو می‌باشد.

۲. مدیریت تلفیقی شامل مصرف بهینه کودهای نیتروژنی، فسفری، عناصر میکرو + مصرف کودهای آلی و زیستی می‌باشد.

• تسطیح زمین توسط ماشین آلات مناسب با همکاری مدیریت زراعت شهرستان الشتر انجام خواهد شد.

•• کشت ردیفی توسط ماشین آلات ردیف‌کار مناسب با همکاری مدیریت زراعت شهرستان الشتر انجام خواهد شد.

••• تامین کننده کودها شرکت خدمات حمایتی و بخش خصوصی خواهد بود.

شکل ۹-نقشه اجرای طرح مشارکتی مزارع منتخب با همراهی کشاورزان داوطلب

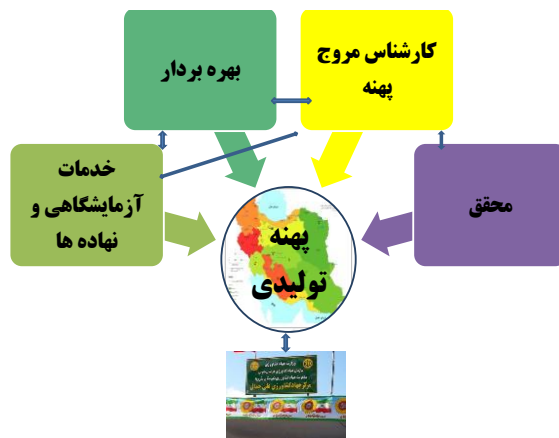


شکل ۱۰- اجرای بسته‌های مدیریتی با همراهی و مشارکت کشاورزان در واحدهای همگن مدیریت خاک و آب

و حفظ پایداری آن فراهم است. لازم به ذکر است به‌منظور توسعه و گسترش بسته‌های مدیریتی نیاز به تدقیق این بسته‌ها توسط سایت‌های الگویی به مدت حداقل سه سال است. این امر مستلزم ایجاد کنسرسیومی از مجموعه‌ی ذینفعان و ذیربطان در منطقه است تا در سطح کل منطقه شاهد اثرات بلندمدت و کاهش فاصله مراکز دانش و عرصه‌های تولید باشیم که این مهم در دست اقدام است (شکل ۱۱).

### تعمیم بسته‌های مدیریت خاک و آب

با تأیید بسته‌های مدیریتی آزمون شده در واحدهای همگن مدیریتی که اکنون در اختیار مرکز جهاد کشاورزی علی‌آباد است، بستر لازم برای تعمیم عرضی نتایج به‌دست‌آمده و مشارکت سایر ذینفعان برای تحقق تعمیم-پذیری طولی و در نتیجه پذیرش و تأثیر کوتاه و بلندمدت<sup>۲۶</sup> نتایج به ۲۳ روستا و ۳۵۰۰ مزرعه حوضه، ارتقاء متوسط تولید



شکل ۱۱- کنسرسیوم ذینفعان و ذیربطان برای تعمیم طولی و عرضی بسته‌های مدیریتی خاک و آب در منطقه

آگاهی و انگیزه‌مند شدن بهره‌بردار، توانمندی انجام توصیه‌ها و فراهم بودن امکانات در منطقه، شروط اساسی کاهش شکاف عملکرد می‌باشند. از طرفی، تحقیقات کاربردی که عمدتاً توسط محققان گروه مشورتی تحقیقات بین‌المللی کشاورزی

یک‌بار دیگر بر استمرار و فرایندی بودن این امر تا حصول نتیجه در کل منطقه و تغییر پارادایم به مدیریت پایدار تأکید می‌شود، زیرا همان‌طور که در مقدمه توضیح داده شد تغییر متوسط تولید با رعایت اصول پایداری ریشه در سه شکاف عملکرد، شکاف تحقیق و توسعه و شکاف زنجیره تولید دارد. به عبارتی،

(CGIAR)<sup>۲۷</sup> انجام می‌شود و شامل کار با کشاورزان خرده‌مالک و خانواده‌های آن‌ها است، سریعاً منجر به ارتقای شغلی و درآمدی آنان نمی‌گردد. نکته مهم دیگر در تداوم این فرایند و حصول نتیجه، برنامه منسجم منطقه‌ای، بودجه‌ها و اولویت‌های تحقیقاتی و دانشگاهی است. به‌طوری‌که Pardey و همکاران (۲۰۱۶)، تغییر اولویت‌های بودجه تحقیقات بین‌المللی کشاورزی را عامل مهمی عنوان کردند، زیرا بیش از نیمی از بودجه تحقیقاتی در جهان از سوی شرکت‌های تجارت کشاورزی پرداخت شده است. این در حالی است که در دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی بزرگ‌تر، کشاورزی خرده مالکی مطلوب نیست؛ زیرا گروه‌های راهبردها و راهبردها پژهشی دانشگاه‌ها از اعضای خود می‌خواهند تا برای کمک‌های مالی بیشتر، پیشنهادیه تحقیقاتی ارائه دهند. ناشران مجلات بین‌المللی نیز تا حدودی مسئول هستند، زیرا ممکن است موضوعات تحقیقات کشاورزی خرده‌مالکی به‌اندازه موضوعات مرتبط با مقیاس جهانی برای انتشار در نظر گرفته نشوند؛ بنابراین، سازمان‌های تحقیقات ملی که منبع اصلی بودجه برای محققان در دانشگاه‌ها هستند باید بیشتر مراقب باشند، زیرا دستیابی به اهداف توسعه پایدار برای تخفیف دادن اثرات گرسنگی جامعه مستلزم تعامل تحقیقاتی بیشتر با خرده‌مالکان و خانواده‌های آن‌ها است (Wani, ۲۰۲۱)؛ بنابراین، فرایند جهانی‌شدن از یک سو و غفلت از موارد بیان‌شده در بالا از سوی دیگر، ممکن است دلیل اصلی عدم کسب موفقیت در انتقال دانش و فناوری به عرصه‌های کشاورزی و تغییر متوسط تولید در کشور باشد.

### جمع‌بندی

در این مقاله، بسته‌های مدیریت خاک و آب برای هر واحد همگن ارائه شد. به‌منظور واسنجی و اعتبارسنجی بسته‌های مدیریتی، انتشار و تعمیم‌یافته‌ها در منطقه، مرکز علی‌آباد لرستان به‌عنوان سکوی نوآوری و انتقال دانش و فناوری انتخاب شد و

توصیه‌های مدیریتی در مزارع منتخب با مشارکت کشاورزان داوطلب و سایر ذی‌نفعان، به مرحله اجرا درآمد که درنهایت منجر به بهبود تولید در پایلوت‌های آزمایشی گردید. همچنین، با برگزاری کارگاه‌های آموزشی، ظرفیت‌سازی کلیه مشارکت‌کنندگان و انتقال اطلاعات به سکوی نوآوری، زمینه توصیه به بهره‌برداران و تصمیم‌سازی برای سیاست‌گذاری فراهم شد. بسته‌های مدیریت خاک و آب تکمیل شده در مقیاس مزرعه توانست تا حدودی شعار مزرعه تا حوضه را تحقق بخشد و زمینه را برای تعمیم عرضی و طولی و تأثیر بلندمدت در منطقه ایجاد کند. با دستیابی به چارچوب مدیریت یکپارچه خاک و آب در مقیاس مزرعه و بسته‌های مدیریتی خاک و آب، اعتبارسنجی مدل در منطقه همچنان ادامه دارد. بر اساس تجربیات هفت‌ساله انجام طرح در مقیاس مزرعه، پروتکل سه‌ساله تحقیق-توسعه‌ای برای انجام آن در سایر مناطق تدوین شده است. پیشنهاد می‌شود این مدل با مشارکت ذینفعان مختلف با محوریت موسسه آموزش و ترویج سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی در چند منطقه کشور و با در نظر گرفتن موارد زیر آزمون شود.

پروتکل تحقیقی، ترویجی و توسعه‌ای برای تحقق رویکرد تحقیق برای توسعه و انسجام ذیربطان مختلف اعم از تحقیق، آموزش، ترویج، اجرا، بهره‌بردار و بخش خصوصی تدوین شود.

استان‌ها، شهرستان‌ها، پهنه‌ها و مراکز جهاد کشاورزی داوطلب برای اجرای مدل به‌دست‌آمده، انتخاب شوند و در اولویت قرار گیرند.

برای تغییر انگیزه بهره‌برداران، اجرای پایلوت‌های یک‌ساله به حداقل سه‌ساله با مشارکت ذینفعان در پهنه‌های تولیدی منتخب تغییر کند. ورود مروجین پهنه به مراکز و مؤسسات تحقیقاتی طی یک برنامه مشخص برای آشنایی بیشتر با فرایند کار تسهیل شود.

<sup>27</sup> Consultative Group on International Agricultural Research (CGIAR)

## فهرست منابع

۱. اسدی، ع و م، شریفی. ۱۳۸۵. درآمدی بر ارزشیابی در ترویج کشاورزی، مبانی مفهومی، دسته‌بندی‌های مفهومی و سویه‌های کاربردی. مجله جهاد شماره ۲۷۳. مهر و آبان ۱۳۸۵
۲. اسمعیلی‌زاد، ا، شکوری، ر، دواتگر، ن و کاری دولت آباد، ح. ۱۴۰۲. ارزیابی نقش ویژگی‌های زیستی در کیفیت خاک زیرحوضه هنام استان لرستان. نشریه علمی زیست‌شناسی خاک، جلد ۱۱، شماره ۲، ص ۱۱۵-۱۳۷
۳. امیدواری، س. ۱۳۹۵. بررسی وضعیت موجود تخریب و تهیه نقشه‌های ریسک تخریب‌پذیری اراضی در واحدهای کاری همگن در زیر حوزه هنام. گزارش نهایی شماره فروست ۵۰۲۵۶، موسسه تحقیقات خاک و آب.
۴. امیدواری، شهرام. ۱۳۹۸. ارائه شیوه‌های مدیریتی مناسب به منظور حفظ کیفیت خاک و جلوگیری از تخریب آن در زیرحوزه هنام. گزارش نهایی شماره فروست ۵۷۰۳۲، موسسه تحقیقات خاک و آب.
۵. بازرگان، کامبیز. ۱۳۹۹. ارائه توصیه‌های مدیریتی به منظور بهبود روش‌های مدیریت حاصلخیزی (فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی) خاک به عنوان جزئی از مدیریت کلان کشاورزی در هر واحد کاری. گزارش نهایی شماره فروست ۵۹۱۷۵، موسسه تحقیقات خاک و آب.
۶. بازرگان، کامبیز. تجزیه و تحلیل و تلفیق لایه‌های اطلاعاتی به منظور ارائه بسته‌های مدیریت بهینه خاک و آب در واحدهای کاری زیر حوزه هنام. ۱۴۰۱. گزارش نهایی شماره فروست ۶۲۸۹۳، موسسه تحقیقات خاک و آب.
۷. بلالی محمد رضا، ثریا قاسمی. ۱۴۰۰. تحقیق برای توسعه: راهبردی برای تقویت اثربخشی تحقیقات، آموزش، ترویج و اجرا. فصلنامه اثربخشی بازتاب تات، ویژه نامه تحقیق برای توسعه. شماره ۱۲ تابستان ۱۴۰۰، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.
۸. بلالی م. ر. ملاح، س.، افتخاری، ک.، رضایی، ح.، بازرگان، ک.، نانجیا، و.، مشیری، ف.، غالبی، س.، نویدی، م. ن.، دلسوز خاکی، ب.، ضیایی جاوید، ع.، پناهی، م.، امداد، م. ر.، دوات‌گر، ن.، امیدواری، ش.، داوودی، م. ح.، اسمعیلی‌زاد، ا.، رجالی، ف.، محمداسماعیل، ز.، سپهوند، م.، قنبرپوری، م. ع.، عبدی، ص.، متین‌کیا، م.، سپهوند، م.، عزیزاللهی، م. ۱۴۰۲. مدیریت یکپارچه خاک و آب در مقیاس مزرعه در زیر حوضه هنام (قسمت اول: تعیین واحدهای همگن مدیریت خاک و آب). پژوهش‌های خاک، 37(3)، 199-227. doi: 10.22092/ijsr.2024.364321.73
۹. پناهی، م.، ملاح، س.، غالبی، س.، امداد، م. ر. ۱۴۰۰ (الف). تعیین برنامه مناسب آبیاری گیاهان عمده زراعی و باغی در شبکه سنتی آبیاری دشت هنام لرستان. مجله پژوهش آب ایران. ۱۵ (۱): ۸۷-۹۵.
۱۰. پناهی، م.، ملاح، س.، و امداد، م. ر. ۱۴۰۰ (ب). بررسی و ارائه توصیه‌های فنی برای انتخاب روش آبیاری متناسب با وضعیت منابع خاک و آب با هدف ارتقاء بهره‌وری آب کشاورزی در منطقه هنام (استان لرستان تعیین برنامه مناسب آبیاری گیاهان عمده زراعی و باغی در شبکه سنتی آبیاری دشت هنام



- لرستان. هفدهمین کنگره علوم خاک ایران و چهارمین همایش ملی مدیریت آب در مزرعه، کرج، ۲۶ تا ۲۸ مهر ۱۴۰۰. <https://civilica.com/doc/1312585>
۱۱. پناهی، م. ۱۳۹۹. ارائه توصیه های مدیریت بهره برداری از آب متناسب با وضعیت منابع خاک و آب و نیاز گیاهان به منظور ارتقاء بهره وری آب در منطقه هنام. گزارش نهایی شماره فروست ۵۸۰۸۰، موسسه تحقیقات خاک و آب.
۱۲. جلالی، ا.ه.، ح. سالمی. ۱۳۹۶. افزایش بهره‌وری آب با کاهش فاصله میانگین عملکرد سیب زمینی در منطقه با عملکرد آن در مزارع کشاورزان پیشرو (مطالعه موردی: منطقه فریدن اصفهان). نشریه علمی ترویجی مدیریت اراضی. جلد ۵. شماره ۱.
۱۳. حیدری، ک.، دانشور، م.، رحیمی مقدم، س.، نصرالهی، ع.ح. ۱۴۰۲. برآورد خلأ عملکرد گندم آبی استان لرستان با استفاده از روش مدل‌سازی. بوم شناسی کشاورزی. doi: 10.22067/agry.2023.81319.1148
۱۴. زاهد، م.، سلطانی، ا.، زینلی، ا.، ترابی، ب.، زند، ا.، عالی‌مقام، س.م. ۱۳۹۸. مدل‌سازی پتانسیل عملکرد و خلأ عملکرد گندم آبی در ایران. مجله تولید گیاهان زراعی: doi: 10.22069/ejcp.2019.15436.2150
۱۵. صفاری، ح.، بلالی، م.ر.، رضاخانی، ل. ۱۳۹۸. تداوم پایلوت های تغذیه بهینه در مزارع کشاورزان ضمانت تغییر پایدار متوسط تولید محصولات کشاورزی. شانزدهمین کنگره علوم خاک ایران. ۵ تا ۷ شهریور ماه ۱۳۹۸. دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
۱۶. غالبی، س و ملاح، س. ۱۳۹۸. بررسی وضعیت موجود تخصیص، مدیریت مصرف و بهره وری آب در واحدهای کاری همگن دشت هنام. گزارش نهایی شماره فروست ۵۶۷۶۶، موسسه تحقیقات خاک و آب.
۱۷. مشیری، ف. ۱۳۹۹. تعیین وضعیت مدیریت حاصلخیزی خاک در واحدهای کاری همگن درزیر حوزه هنام. گزارش نهایی شماره فروست ۵۹۳۰۰، موسسه تحقیقات خاک و آب.
۱۸. ملاح، س.، غالبی، س.، امداد، م.ر.، و پناهی، م. ۱۴۰۰. ارزیابی شاخص هیدرومدول آبیاری بمنظور کاهش تاثیر تنش خشکی و مصرف بهینه آب در گیاهان عمده الگوی کشت اراضی دشت هنام. مجله تحقیقات علوم زراعی در مناطق خشک. ۳(۱): ۱۵-۲۴.
۱۹. مهاجر میلانی، پ. ۱۳۸۹. گزارش نهایی پروژه "رهیافت مشارکتی برای ارزیابی چرخه عناصر غذایی در حوزه آبرز مرک و هنام از حوزه رودخانه کرخه". نشریه شماره ۱۵۳۸. موسسه تحقیقات خاک و آب، کرج، ایران.
۲۰. منفرد، ن. ۱۳۹۰. ارزشیابی در ترویج. نشریه فنی سازمان جهاد کشاورزی بوشهر. مرکز مدارک علمی و کشاورزی سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
21. Adekunle, A., Fatunbi, A., 2014. A new theory of change in African agriculture. Middle-East J. Sci. Res. 21, 1083–1096. <http://dx.doi.org/10.5829/idosi.mejsr.2014.21.07.21564>.

22. Geels, F.W., 2010. Ontologies, socio-technical transitions (to sustainability), and the multi-level perspective. *Res. Policy* 39, 495–510.
23. Hamdallah, G. 2000. Soil fertility management: the need for new concepts in the region. A Paper presented at the Regional Workshop on Soil Fertility Management through Farmer Field Schools in the Near East, 2 - 5 October 2000, Amman, Jordan.
24. Holling, C.S., Gunderson, L.H., Ludwig, D., 2002. In quest of a theory of adaptive change. In: Gunderson, L.H., Holling, C.S. (Eds.), *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*. Island Press, Washington DC, pp. 3–22.
25. ICRICAT.2017. Transforming rural livelihood through mission Bhoochetana.ICRICAT Development Center(IDC), (<https://idc.icrisat.org/idc/wp-content/uploads/2017/11/Bhoochetana-1.pdf>, Last visited 27 March 2024)
26. Lobell, D. B., K. G. Cassman and C. B. Field. 2009. Crop Yield Gaps: their importance, magnitudes and causes. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 34: 179-204.
27. Maru, Y., Sparrow, A., Stirzaker, R., & Davies, J. (2018). Integrated agricultural research for development (IAR4D) from a theory of change perspective. *Agricultural Systems*, 165, 310-320.
28. Pardey PG, Chan-Kang C, Dehmer SP, Beddow JM (2016) Agriculture R & D is on move. *Nature* 537:301–3030. *Nature News*, 2016 – nature.com© 2016 Macmillan Publishers Limited, part of Springer Nature.
29. Rockström J, Hatibu N, Oweis T, Wani Suhas P (2007) Managing water in rainfed agriculture. In: Molden D (ed) *Water for food, water for life: a comprehensive assessment of water management in agriculture*. Earthscan/International Water Management Institute (IWMI), London/ Colombo, pp 315–348.
30. Stathers T, Holcroft D, Kitinoja L et al (2020) A scoping review of interventions for crop postharvest loss reduction in sub-Saharan Africa and South Asia. *Nat Sustain* 3:821–835. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00622-1>
31. Stewart, W. M., D. W. Dibb. A. E. Johnston and T. J. Smith. 2005. The Contribution of Commercial Fertilizer Nutrients to Food Production *Agronomy Journal*. 97: 1-6.
32. Van Ittersum MK and Donatelli M (2003) Cropping system models: science, software and applications. Special issue *Eur. J. Agron.* 18, 187–393.
33. van der Vorst, J. G. A. J., Da Silva, C. A., & Trienekens, J. H. (2007). *Agro-industrial Supply Chain Management: Concepts and Applications*. (Agricultural management, marketing and finance occasional paper; No. 17). FAO. <https://edepot.wur.nl/38631>
34. Wani SP (2016) Evolution of Bhoochetana. In: Raju KV, Wani SP (eds) *Harnessing dividends from drylands: innovative scaling up with soil nutrients*. CAB International, Wallingford, pp 34–58.
35. Wani, S.P. (2021). Death Valley of Impacts in Agriculture: Why and How to Cross It with Scaling-Up Strategy?. In: Wani, S.P., Raju, K., Bhattacharyya, T. (eds) *Scaling-up Solutions for Farmers*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-77935-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77935-1_1)
36. Wani SP, Raju KV (eds) (2018) *Corporate social responsibility: win-win propositions for communities, corporates and agriculture*. CABI, Nosworthy way Oxfordshire, pp 1–246



## بررسی فعالیت آنزیم‌های دهیدروژناز و لیپاز در خاک لوم‌شنی آلوده به نفتای سبک در تیمارهای مختلف زیست‌پالایی

زکبه عافیت، مریم نوروزپور، محمدرضا ساریخانی\* و ناصر علی‌اصغرزاد

دانشجوی سابق کارشناسی ارشد بیولوژی و بیوتکنولوژی خاک، گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، ایران؛

zakieh.afiati1994@gmail.com

دانشجوی سابق کارشناسی ارشد بیولوژی و بیوتکنولوژی خاک، گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، ایران؛

Maryamnorozpoor72@gmail.com

دانشیار بیولوژی و بیوتکنولوژی خاک، گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، ایران؛ rsarikhani@yahoo.com

استاد بیولوژی و بیوتکنولوژی خاک، گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، ایران؛ n-aliasghar@tabrizu.ac.ir

« مقاله پژوهشی »

دریافت: ۱۴۰۲/۴/۵ و پذیرش: ۱۴۰۳/۵/۲۴

### چکیده

سنجش فعالیت‌های آنزیمی، یکی از روش‌های قابل توجه در زیست‌پالایی خاک‌های آلوده به ترکیبات نفتی است. تحریک زیستی، تلقیح زیستی و تلفیق این دو باهم از انواع روش‌های زیست‌پالایی مورد استفاده در این آزمایش است. به این منظور، برای کاهش آلودگی نفتای سبک (۱٪)، در یک خاک لوم‌شنی، از انواع تیمارهای زیست‌پالایی شامل تأمین عناصر P، N، افزودن کود دامی و سورفاکتانت Tween 80، تلقیح زیستی و تیمار تلفیقی در طی ۱۲۰ روز استفاده شد، و در زمان‌های مختلف (۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ روز) فعالیت آنزیم‌های دهیدروژناز (DHA) و لیپاز اندازه‌گیری شد. این آزمایش به صورت طرح فاکتوریل اسپلیت پلات (شامل فاکتور آلودگی، زیست‌پالایی و زمان) با در نظر گرفتن سه تکرار در گلدان‌های سه کیلوگرمی انجام شد. نتایج به دست آمده از آزمایش نشان داد که تیمارهای زیست‌پالایی منجر به کاهش آلاینده‌های نفتی شد، همین‌طور فعالیت دهیدروژناز از ابتدای آزمایش روند کاملاً نزولی داشت، و تغییرات فعالیت لیپاز در خاک آلوده، تا روز ۱۰ افزایش یافت، از روز ۱۰ تا ۱۵ اندکی کم شد و سپس تا روز ۶۰ با نوسانات جزئی پیش رفت و دوباره از روز ۶۰ کاهش یافت. فعالیت دهیدروژناز در تیمار کود گاوی در طول آزمایش از ۳/۳۹ به ۰/۳۵ ( $\mu\text{g TPF g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ) و فعالیت لیپاز در تیمار تلفیقی، از ۵۷ ( $\text{mU g}^{-1}$ ) در روز ۱۰ به ۳۳/۵۶ ( $\text{mU g}^{-1}$ ) در روز ۱۲۰ رسید. به نظر، استفاده از تیمارهای تلفیقی و کود گاوی علاوه بر افزایش جمعیت میکروبی مؤثر در تجزیه ترکیبات نفتی و تأمین شرایط بهینه برای فعالیت آن‌ها، روشی مناسب برای کاهش آلودگی ناشی از نفتای سبک باشد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی نفتی، تحریک زیستی، تلقیح زیستی، زیست‌پالایی، فعالیت آنزیمی

\* -آدرس ایمیل نویسنده مسئول: rsarikhani@yahoo.com

## مقدمه

فعالیت‌های مختلف از جمله اکتشافات نفت، حمل‌ونقل، نشت ناشی از تانکرهای نفتی و یا نشت نفت طی فرآیندهای مختلف بازیافت آن، منجر به انتشار مقدار بسیار زیادی از ضایعات هیدروکربنی به محیط‌زیست شده است که آلودگی‌های بزرگی را ایجاد می‌کند (پنگ و همکاران، ۲۰۰۸). نفتا به طبقه‌ای از سوخت‌های هیدروکربنی با اشتعال‌پذیری بالا گفته می‌شود که در برج تقطیر پالایش نفت خام بین گازهای سبک و نفت سفید قرار می‌گیرد. نفتا شامل هیدروکربن‌های دارای ۵ تا ۱۲ اتم کربن است، که نقطه جوش آن‌ها از ۳۰ تا ۲۰۰ درجه سلسیوس متغیر است. یعنی اگر نفت خام را از ۳۰ تا ۲۰۰ درجه سلسیوس حرارت دهیم و بخش جوشیده را جدا کنیم نفتا به دست خواهد آمد. معمولاً ۱۵ تا ۳۰ درصد نفت خام در این حرارت به جوش می‌آید در نتیجه همین میزان از نفت خام را می‌توان به‌طور مستقیم به نفتا تبدیل کرد. اما نفتا در بازار معمولاً در دو نوع نفتای سبک (هیدروکربن‌های ۵ و ۶ کربنی) و نفتای سنگین (هیدروکربن‌های ۶ تا ۱۲ کربنی) عرضه می‌شود. نفتا به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مواد اولیه مورد استفاده در صنعت پتروشیمی است (بال و همکاران، ۱۹۴۹). به‌طور معمول فناوری‌هایی که برای اصلاح خاک‌ها استفاده می‌شوند شامل موارد زیر هستند: روش‌های فیزیکی، روش‌های شیمیایی، و روش زیستی. در این میان بیشترین توجه به روش زیستی (تهویه زیستی، افزایش زیست‌توده میکروبی و غیره) برای حذف آلاینده‌های آلی در خاک معطوف است (شکوهیان و همکاران، ۲۰۱۶). زیست پالایی به‌عنوان یک روش کارآمد، مقرون‌به‌صرفه و سازگار با محیط‌زیست برای کاهش هیدروکربن‌ها در خاک‌های آلوده به نفت مورد توجه قرار گرفته است (سوگیورا و همکاران، ۱۹۹۷). روش‌های زیست‌پالایی خاک به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: تلقیح‌زیستی و تحریک زیستی، که روش تلقیح زیستی به معرفی ریز جانداران بومی و غیربومی تخریب‌کننده نفت می‌پردازد که پس از

جداسازی و شناسایی گونه‌های کارآمد تجزیه‌کننده نفت امکان تلقیح آن‌ها به خاک آلوده فراهم می‌شود (مادینو و همکاران، ۲۰۱۱). اما در روش تحریک‌زیستی، تشدید فعالیت سوخت‌وساز گونه‌های بومی تجزیه‌کننده نفت با اضافه کردن مواد مغذی و یا اصلاح‌گرهای آلی انجام می‌گیرد، تا حذف ترکیبات نفتی افزایش یابد (وو و همکاران، ۲۰۱۶). با این حال زیست پالایی خاک‌های آلوده به نفت می‌تواند به‌شدت تحت تأثیر ماهیت هیدروکربن‌ها و مدت‌زمان آلودگی قرار بگیرد (لوئر و همکاران، ۲۰۰۱). بدین منظور، در روش‌های مختلف زیست پالایی سعی می‌شود با اتخاذ تدابیری توازنی میان پارامترهای دخیل برقرار نمود و حذف آلودگی‌های نفتی را به میزان بیشتری پیش برد.

با اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های مختلف می‌توان به تشخیص و تعیین کیفیت محیط‌زیست قبل، حین و بعد از فرآیند بازسازی اقدام نمود. از این میان آنزیم دهیدروژناز، نشانگر و مقیاس مناسبی برای فعالیت میکروبی و اندازه‌گیری شدت سوخت‌وساز میکروبی در خاک محسوب می‌شود (نانی‌پیری و همکاران، ۲۰۰۲). دهیدروژناز علاوه بر اینکه به‌عنوان یک شاخص آلودگی محسوب می‌شود، به دلیل عدم توانایی تجمع آن‌ها در محیط خارج سلولی نیز حائز اهمیت است. این آنزیم نشانگر فعالیت‌های اکسیداتیو میکروبی خاک است و به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان یک روش ساده برای بررسی اثر مهارکنندگی آلاینده‌ها بر فعالیت‌های میکروبی در خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۰؛ ماسیاندر و همکاران، ۲۰۱۳).

لیپازها می‌توانند هیدرولیز استرهای مختلف را در محیط واکنش انجام دهند. این آنزیم توسط بسیاری از باکتری‌ها و قارچ‌ها تولید می‌شود (گادورا و همکاران، ۲۰۰۶). تری گلیسرول‌ها سوبسترای اصلی لیپازها هستند. اسیدهای چرب با زنجیره کوتاه، کمی در آب محلول است ولی اسیدهای چرب با زنجیره بلند آلیفاتیک در آب نامحلول هستند. آنزیم لیپاز ظرفیت بالایی در بررسی و

و PH گل اشباع ۷/۵۶. خاک از نظر رده‌بندی خاک FAO جزو Hypocalcic Calsisols و از نظر تاکسونومی خاک آمریکا Typic Haplocalcids است. پس از عبور خاک از الک ۲ میلی‌متری، آلودگی نفتی سبک به میزان ۱ درصد حجمی - وزنی به نمونه خاک‌ها اضافه و تیمارهای مختلف زیست پالایی اجرا گردید. این آزمایش در مقیاس گلدانی (گلدانهای ۳ کیلوگرمی) در شرایط دمای معمولی اتاق (۲۵ °C) و به مدت ۱۲۰ روز، بعد از ایجاد آلودگی و اعمال تیمارهای تحریک زیستی، تلقیح زیستی و تلفیقی انجام شد. در طول آزمایش، هفته‌ای یکبار هوادهی گلدان‌ها انجام و هفته‌ای دو بار رطوبت نمونه خاک بر روی ۷۰-۸۰ درصد ظرفیت نگهداری آب خاک تنظیم گردید. در روزهای ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ روز از هر گلدان نمونه‌برداری به منظور اندازه‌گیری فعالیت دهیدروژناز و لیپاز صورت گرفت.

#### تلقیح زیستی و تحریک زیستی و تیمار تلفیقی

برای انجام تلقیح زیستی از جدایه‌های باکتریایی تجزیه‌کننده نفت (*Arthrobacter* sp. COD2-3)، *Stenotrophomonas nitritireducens* COD5-6 و *Stenotrophomonas asidamainiphila* COD1-1 استفاده شد (افشارنیا و همکاران، ۱۳۹۶). جدایه‌های مورد استفاده در این آزمایش از بانک میکروبی گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه تبریز تهیه شدند. هر سه جدایه ابتدا به‌طور جداگانه در محیط کشت NB به مدت ۲۴ ساعت در انکوباتور در دمای ۲۶ درجه سلسیوس کشت داده شدند و پس از رسیدن به جمعیت مناسب (CFU  $10^8$  mL<sup>-1</sup>) به میزان ۵ درصد (حجمی/وزنی) در تیمارهای موردنظر به خاک‌های مورد آزمایش تلقیح شدند. در تحریک زیستی، بعد از تهیه کود گاوی، کودها به مدت ۴ روز هوا خشک شد و سپس از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد و با نسبت ۵ درصد وزنی مورد استفاده قرار گرفت (افشارنیا و همکاران، ۱۳۹۶). کود مورد استفاده به ترتیب دارای ۲۴/۹۶، ۱/۵۲ و ۰/۵ درصد

پایش زیست‌پالایی هیدروکربن‌ها دارد از محصولات حاصل از تجزیه زیستی هیدروکربن‌های نفتی به‌عنوان سوسترایی برای این آنزیم بشمار می‌روند (ماسیاندر و همکاران، ۲۰۱۳). بیشتر لیپازهای مورد مطالعه که منشأ میکروبی دارند آنزیم‌های برون‌سلولی القایی هستند که در سلول‌های میکروبی سنتز شده و سپس به محیط اطراف منتقل می‌شود (تان و یین، ۲۰۰۳). لیپاز نقش مهمی در تجزیه هیدروکربن‌های نفتی بازی می‌کند. با توجه به‌سادگی و سرعت تحلیل آن، فعالیت لیپاز به‌عنوان یک شاخص عالی برای پایش آلودگی هیدروکربن‌های نفتی خاک مطرح شده است (ریفالدی و همکاران، ۲۰۰۶).

با توجه به وجود آلودگی‌های نفتی در محیط زیست، از جمله آلودگی نفتی سبک و نبود مطالعات زیادی در این زمینه، در تحقیق حاضر به‌منظور کاهش آلودگی نفتی سبک، از روش‌های مختلف زیست‌پالایی از جمله تحریک زیستی (شامل افزودن کود دامی، کود شیمیایی NP، استفاده از سورفکتانت Tween 80)، تلقیح زیستی (به‌کارگیری باکتری‌های جنس *Arthrobacter*، *Stenotrophomonas*) و تیمار تلفیقی (شامل تحریک زیستی و تلقیح زیستی) استفاده شد. هدف از این مطالعه، مقایسه تیمارها با یکدیگر از نظر روند تغییرات فعالیت آنزیمی خاک (لیپاز و دهیدروژناز) در خاک‌آلوده و غیر آلوده و همچنین در شرایط اعمال و عدم اعمال تیمارهای زیست پالایی است.

#### مواد و روش

##### آماده‌سازی خاک و اعمال تیمارهای زیست پالایی

در این آزمایش از یک خاک با بافت لوم‌شنی از ایستگاه تحقیقاتی خلعت‌پوشان دانشگاه تبریز نمونه‌برداری شد. مشخصات این خاک به شرح زیر بود: رطوبت ۱۲/۵۷ درصد (وزنی/حجمی)، شن ۶۹ درصد، سیلت ۱۳ درصد، رس ۱۸ درصد، کربن آلی ۰/۱۷ درصد، پتاسیم قابل جذب (استات آمونیوم ۱ نرمال) (mg/kg) ۱۹۸/۰۷، فسفر قابل جذب اولسون ۳ (mg/kg)، EC (dS/m) ۱/۹

(TPF)<sup>۲</sup> است که از تبدیل سوبسترای TTC حاصل می‌شود (علی‌اصغرزاد، ۱۳۸۵).

#### اندازه‌گیری فعالیت لیپاز

برای تعیین فعالیت لیپاز در خاک، از Tween 20 به‌عنوان سوبسترا استفاده شد. بدین منظور، به یک گرم خاک در یک لوله‌آزمایش ۰/۲ میلی‌لیتر تولوئن، ۰/۶ میلی‌لیتر Tween 20، ۱/۱۵ میلی‌لیتر آب مقطر و ۲ میلی‌لیتر استات سدیم (۰/۲ مولار با pH=۶) اضافه و لوله آزمایش در ۳۰ درجه سلسیوس به مدت ۱۸ ساعت در انکوباتور قرار گرفت. بعد از ۱۸ ساعت ۸ میلی‌لیتر اتانول اضافه شد، ۱۰ ثانیه ورتکس شد و سپس در ۱۱۰۰ g سانتریفیوژ شد. مایع رویی به ارلن مایر منتقل شده و پس از افزودن ۲۰ μl معرف فنل‌رد یک درصد با استفاده از NaOH ۰/۰۲ مولار تیترا شد. تغییر رنگ تیتراسیون از رنگ زرد به صورتی خواهد بود. در نمونه شاهد همه موارد به جزء نمونه خاک و Tween 20 در لوله آزمایش اضافه شد و به مدت ۱۸ ساعت در انکوباتور قرار گرفت و پس از ۱۸ ساعت، نمونه خاک و Tween 20 هم‌زمان ریخته شد و بقیه مراحل طبق روش کار انجام گرفت. اسیدلاریک آزاد شده از روشناور با استفاده از منحنی کالیبراسیون محلول‌های استاندارد با غلظت‌های ۰، ۰/۰۱، ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲ میلی‌مول اسیدلاریک به دست آمد. فعالیت آنزیم خالص از اختلاف بین داده‌های آزمایش با نمونه خاک و نمونه شاهد به دست آمد و به‌صورت mU g<sup>-1</sup> اسید لاریک آزادشده در هر گرم خاک در هر دقیقه نشان داده شد. هر واحد آنزیم (U) بیانگر مقدار ۱ μmol اسید لاریک آزادشده در هر دقیقه در دمای ۳۰ درجه سلسیوس است (ساکای و همکاران، ۲۰۰۲).

کربن، نیتروژن و فسفر بود. در مورد تیمار NP که مربوط به تأمین عناصر نیتروژن و فسفر بود با توجه به نسبت ۱:۵:۲۰ (C:N:P)، به‌منظور تأمین عناصر نیتروژن و فسفر به ترتیب از منابع نترات آمونیوم و فسفات پتاسیم استفاده شد (به‌عنوان نمونه در خاک آلوده با تیمار کود شیمیایی NP به ازای سه کیلوگرم خاک گلدان، ۰/۷۹ گرم کود از منبع فسفات پتاسیم و ۳/۴ گرم کود از منبع نترات پتاسیم استفاده شد). همچنین به‌منظور استفاده از سورفاکتانت Tween 80 در تیمارهای مربوطه از نسبت ۰/۳ درصد حجمی- وزنی استفاده شد (دشتی و همکاران، ۲۰۱۵). در تیمار تلفیقی مخلوطی از مجموعه باکتریایی ۵ درصد حجمی-وزنی (۵ میلی‌لیتر زادمایه باکتریایی در ۱۰۰ گرم خاک)، کود گاوی ۵ درصد وزنی-وزنی، سورفاکتانت Tween 80 با ۰/۳ درصد حجمی-وزنی و کود شیمیایی NP استفاده شد.

#### اندازه‌گیری فعالیت دهیدروژناز

به‌منظور اندازه‌گیری فعالیت دهیدروژناز از سوبسترای TTC<sup>۱</sup> استفاده شد. بدین منظور ۱۰ گرم خاک به دو قسمت ۵ گرمی تقسیم و هرکدام در یک لوله آزمایش ریخته شد (یک لوله شاهد و دیگری نمونه)، در لوله نمونه روی ۵ گرم خاک مقدار یک میلی‌لیتر سوبسترای TTC (۰/۱ گرم در ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر) و ۲/۵ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه، درپوش لوله قرار داده‌شده و هم زده شد. در لوله شاهد بر روی ۵ گرم خاک ۳/۵ میلی‌لیتر آب مقطر ریخته و همانند لوله نمونه عمل شد. لوله‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۳۷ درجه سلسیوس انکوبه شد. به هر لوله ۱۰ میلی‌لیتر متانول افزوده و یک دقیقه ورتکس شد. سپس از کاغذ صافی عبور داده شدند در نتیجه فعالیت دهیدروژناز، سوبسترای مورد استفاده تغییر رنگ یافته و قرمز رنگ یا صورتی تشکیل گردید، سپس مقدار جذب عصاره‌ها در طول موج ۴۸۵ نانومتر قرائت شد. میزان جذب مربوط به تولید تری‌فنیل‌فورمازان

<sup>۲</sup> Triphenyl formazan

<sup>۱</sup> Triphenyl Tetrazolium Chloride

## تجزیه و تحلیل آماری

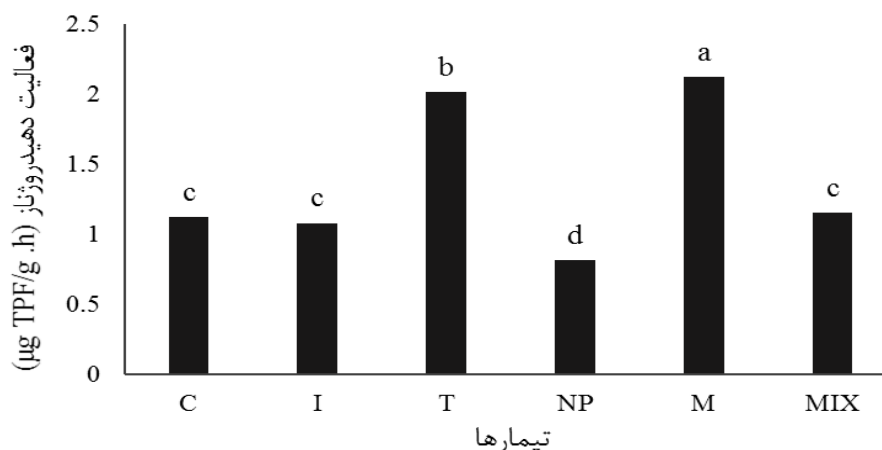
آزمایش به صورت طرح فاکتوریل اسپلیت پلات، بر پایه طرح کاملاً تصادفی به اجرا درآمد، که در آن زمان (۹ زمان مختلف، از روز صفر تا ۱۲۰ روز)، آلاینده (وجود و عدم وجود نفتای سبک) و تیمارهای زیست‌پالایی (شامل تیمار شاهد، تلقیح باکتری، تأمین نیتروژن و فسفر، استفاده از سورفکتانت، افزودن کود دامی و تیمار تلفیقی)، فاکتورهای سه گانه آزمایش بودند. قابل ذکر است که فاکتور زمان به عنوان پلات اصلی و فاکتورهای آلاینده و تیمارهای زیست‌پالایی به عنوان پلات فرعی بودند. مقایسه‌های میانگین در سطح احتمال ۱ درصد با آزمون LSD توسط نرم افزار آماری SPSS-24 انجام گرفت. نمودارها نیز توسط نرم افزار Excel ترسیم شدند.

## نتایج و بحث

## فعالیت دهیدروژناز

طبق نتایج به دست آمده از فعالیت دهیدروژناز (جدول ۱)، بین فاکتور آلودگی (خاک شاهد و خاک آلوده به نفتای سبک)، فاکتور تیمارهای زیست‌پالایی (خاک شاهد بدون تیمار زیست‌پالایی، تلقیح مخلوط باکتریایی، سورفکتانت Tween 80، کودهای شیمیایی NP، کود گاوی و تلفیقی) و فاکتور زمان (۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰،

۴۵، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ روز) در سطح احتمال ۱ درصد ( $P < 0.01$ ) اختلاف معنی‌دار بود. مقایسه میانگین فعالیت دهیدروژناز اندازه‌گیری شده در خاک تحت تأثیر فاکتور تیمارهای زیست‌پالایی در شکل ۱ نشان داده شده است. طبق این شکل بیشترین میزان فعالیت دهیدروژناز به ترتیب مربوط به تیمارهای کود گاوی و سورفکتانت Tween 80 (T) و کمترین مقدار مربوط به تیمار کود شیمیایی NP است. حضور ریزجانداران بومی و وجود عناصر غذایی در کود گاوی و تأمین منبع غذایی برای ریزجانداران و همچنین بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی از جمله عواملی بودند که باعث شده بیشترین فعالیت دهیدروژنازی در این تیمار به دست آید. احتمالاً سورفکتانت توین ۸۰ هم به عنوان منبع کربن مورد استفاده ریز جانداران قرار گرفته و هم با افزایش فراهمی زیستی باعث شده که ریز جانداران به راحتی بتوانند منبع هیدروکربن‌ها را جذب کنند و میزان فعالیت میکروبی و در نتیجه فعالیت دهیدروژنازی افزایش یابد. تیمار تلقیح کنسرسیوم باکتریایی به علت وجود گروه‌های میکروبی زنده و رابطه مستقیم آن با فعالیت دهیدروژناز باعث افزایش فعالیت این آنزیم شده است، اما در مورد تیمار تلفیقی احتمالاً به علت افزودن کود شیمیایی نیتروژن و فسفر از تأثیر زیاد این تیمار در فعالیت دهیدروژناز کاسته است.

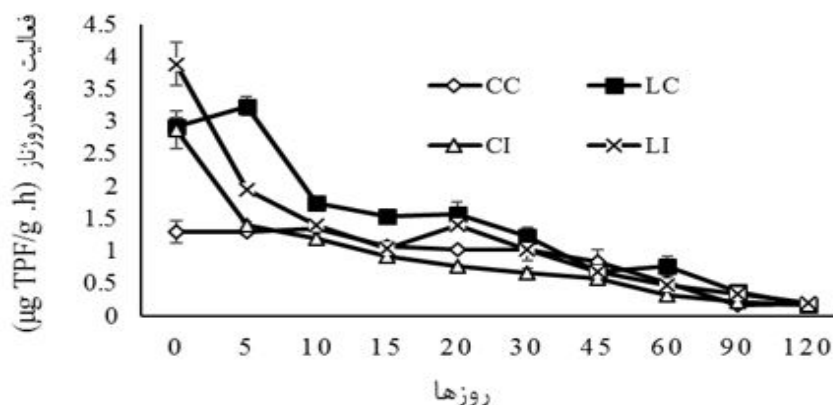


شکل ۱- فعالیت دهیدروژناز اندازه‌گیری شده در خاک تحت تیمارهای مختلف زیست‌پالایی (خاک شاهد (C)، کنسرسیوم باکتریایی (I)، سورفکتانت Tween 80 (T)، کود شیمیایی (NP)، کود گاوی (M) و تیمار تلفیقی (MIX))

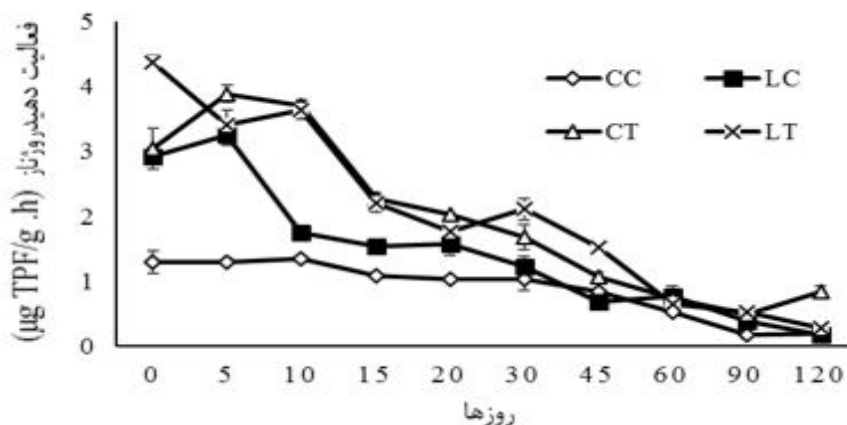
جدول ۱- تجزیه واریانس صفات اندازه‌گیری شده

| میانگین مربعات |                  |            | صفات<br>منابع تغییرات        |
|----------------|------------------|------------|------------------------------|
| آنزیم لیپاز    | آنزیم دهیدروژناز | درجه آزادی |                              |
| ۱۲۶۵/۸۴۱**     | ۲۸/۸۷۵**         | ۹          | فاکتور زمان (A)              |
| ۲/۷۵۹          | ۰/۰۹۳            | ۲۰         | خطا                          |
| ۷۲۰۰/۰۹۰**     | ۱۷/۷۲۹**         | ۵          | فاکتور تیمار زیست‌پالایی (B) |
| ۱۳۰/۷۶۳**      | ۱/۲۶۴**          | ۴۵         | اثر متقابل A×B               |
| ۰/۰۷۴          | ۱/۳۰۰**          | ۱          | فاکتور آلودگی (C)            |
| ۱۸۵/۰۷۵**      | ۰/۸۵۹**          | ۹          | اثر متقابل A×C               |
| ۱۲۸/۳۴۸**      | ۱/۴۳۷**          | ۵          | اثر متقابل B×C               |
| ۱۱۴/۳۰۵**      | ۰/۵۹۴**          | ۴۵         | اثر متقابل A×B×C             |
| ۲/۹۱۳          | ۰/۰۳۵            | ۲۲۰        | خطا                          |
| ۶/۵۲           | ۱۳/۴۳            | ---        | ضریب تغییرات (درصد)          |

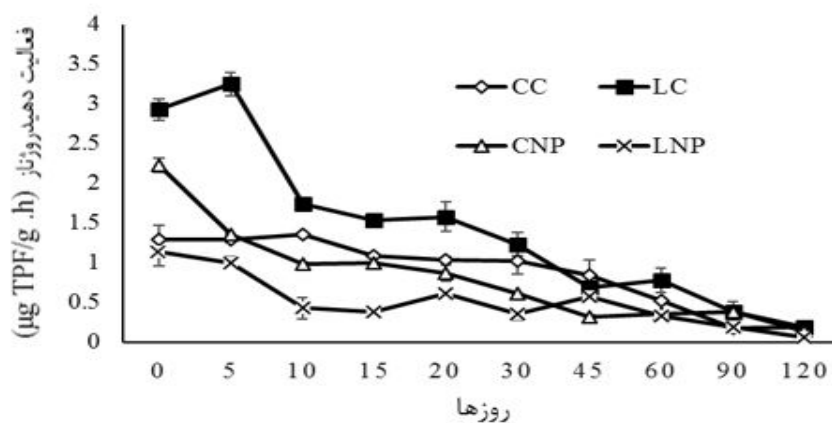
\*\* معنادار بودن در سطح احتمال ۱ درصد ( $P < 0.01$ )



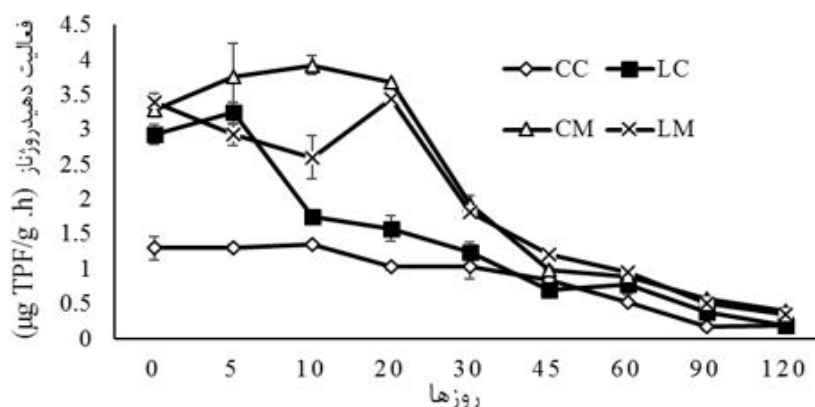
شکل ۲-الف) روند تغییرات زمانی فعالیت آنزیم دهیدروژناز در خاک شاهد بدون تیمار زیست‌پالایی (CC)، خاک شاهد تیمار شده با کنسرسیونم باکتریایی (CI)، خاک آلوده به نفتای سبک بدون کنسرسیونم باکتریایی (LC) و خاک آلوده تلقیح شده با کنسرسیونم باکتریایی (LI)



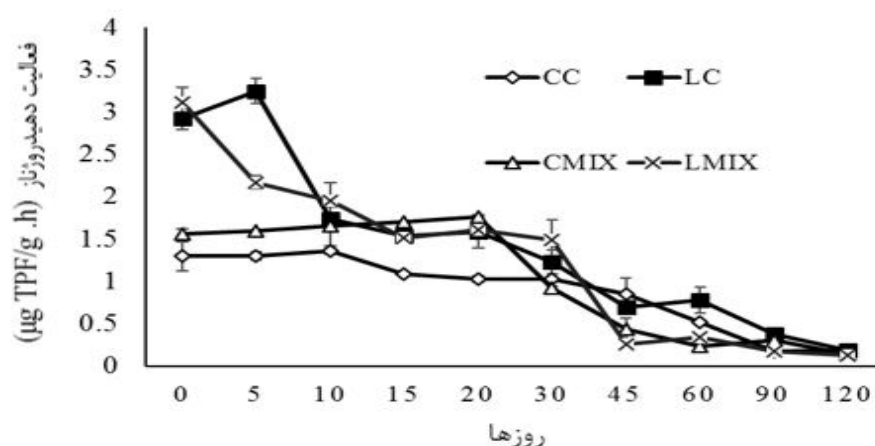
شکل ۲-ب) روند تغییرات زمانی فعالیت آنزیم دهیدروژناز در خاک شاهد بدون تیمار زیست‌پالایی (CC)، خاک شاهد تیمار شده با سورفکتانت Tween 80 (CT)، خاک آلوده به نفتای سبک بدون تیمار Tween 80 (LC) و خاک آلوده تیمار شده با Tween 80 (LT)



شکل ۲-ج) روند تغییرات زمانی فعالیت آنزیم دهیدروژناز در خاک شاهد بدون تیمار زیست‌پالایی (CC)، خاک شاهد تیمار شده با کود شیمیایی NP (CNP)، خاک آلوده به نفتای سبک بدون تیمار کود شیمیایی NP (CNP) و خاک آلوده به نفتای سبک تیمار شده با کود شیمیایی NP (LNP)



شکل ۲-۵) روند تغییرات فعالیت آنزیم دهیدروژناز در خاک شاهد بدون تیمار زیست پالایی (CC)، خاک شاهد تیمار شده با کود گاوی (CM)، خاک آلوده به نفتای سبک بدون تیمار کود گاوی (LC) و خاک آلوده تیمار شده با کود گاوی (LM)



شکل ۲-۵) روند تغییرات زمانی فعالیت آنزیم دهیدروژناز در خاک شاهد بدون تیمار زیست پالایی (CC)، خاک شاهد تحت تیمار تلفیقی (CMIX)، خاک آلوده به نفتای سبک بدون تیمار تلفیقی (LC) و خاک آلوده تیمار تلفیقی (LMIX)

با کنسرسیوم باکتریایی معنی‌دار بود، به نظر می‌رسد جدایه‌های باکتریایی موجود در خاک آلوده و خاک شاهد تلقیح شده با کنسرسیوم باکتریایی هیدروکربن‌های موجود را به عنوان منبع غذایی جذب کرده‌اند. بدین ترتیب میزان فعالیت میکروبی و دهیدروژنازی نیز افزایش یافته اما با گذشت زمان و کاهش منبع آلودگی، ریزجانداران حساس از بین می‌روند و به دنبال آن فعالیت دهیدروژنازی نیز کاهش می‌یابد. نوروزپور و همکاران (۱۴۰۲) در تحقیقی مشابه برای کاهش آلاینده نفتای سنگین نیز به این نتیجه رسیدند که افزودن جمعیت زنده میکروبی خود باعث افزایش فعالیت دهیدروژنازی شده است، زیرا این آنزیم

با توجه به (شکل ۲-الف)، میزان فعالیت دهیدروژناز به ترتیب در نمونه خاک آلوده تحت تیمار تلقیح کنسرسیوم باکتریایی (LI)، خاک شاهد تحت تیمار تلقیح کنسرسیوم باکتریایی (CI)، خاک آلوده بدون تیمار تلقیح کنسرسیوم باکتریایی (LC) بیشتر است و کمترین آن در خاک شاهد بدون تیمار تلقیح کنسرسیوم باکتریایی (CC) به دست آمده است. همچنین در هر چهار نمونه در ابتدا میزان فعالیت زیاد است و با گذشت زمان به تدریج کاهش یافته است. با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، کاهش فعالیت دهیدروژناز در نمونه خاک‌های شاهد تلقیح شده با کنسرسیوم باکتریایی و خاک آلوده تلقیح شده



درون سلولی مرتبط با سلول‌های زنده میکروبی است. این افزایش در خاک شاهد نیز فقط در زمان‌های نخست دیده شده و به نظر محدودیت غذایی باعث افت جمعیت و کاهش فعالیت این آنزیم شده است. اما در خاک آلوده چون جدایه باکتریایی این منبع کربن را مورد استفاده قرار داده، فعالیت میکروبی افزایش می‌یابد به دنبال آن فعالیت دهیدروژنازی نیز فزونی یافته ولی با گذشت زمان به دلیل کاهش غلظت نفتای سنگین و در نتیجه کاهش جمعیت میکروبی، فعالیت دهیدروژناز نیز کاهش یافته است. افشارنیا و همکاران (۱۳۹۸)، طی تحقیقی، برای کاهش هیدروکربن‌های نفتی در خاک آلوده پالایشگاه تبریز از تیمارهای زیست پالایی (تلقیح کنسرسیوم باکتریایی، Tween 80، NPK، کود گاوی) استفاده کردند. همه تیمارهای زیست پالایی در لحظه شروع آزمایش دارای فعالیت آنزیم دهیدروژناز بالایی نسبت به تیمارهای شاهد آلوده نفتی و غیرآلوده نفتی بودند. همچنین در طول آزمایش در تمامی تیمارها اختلاف معنی‌دار فعالیت دهیدروژنازی با نمونه شاهد حفظ شد که نشانگر وجود بالای جمعیت میکروبی در تیمارهای زیست پالایی نسبت به تیمارهای شاهد است. تیمارهای زیست پالایی نیز در لحظه شروع آزمایش دارای فعالیت دهیدروژنازی نسبتاً بالایی بودند اما تمامی تیمارها با گذشت زمان و در انتهای آزمایش، کاهش فعالیت چشمگیری داشتند، احتمالاً طولانی بودن دوره آزمایش و رسیدن میکروب‌ها به فاز مرگ سبب این امر شده است. شن و همکاران (۲۰۱۶) طی تحقیقی فعالیت آنزیم دهیدروژناز را در خاک آلوده به نفت تلقیح شده با کنسرسیوم باکتریایی و خاک آلوده به نفت بدون تلقیح کنسرسیوم باکتریایی و خاک غیرآلوده به نفت در بازه‌های زمانی ۰، ۸، ۱۶، ۲۴، ۳۲ و ۴۰ روز آزمایش کردند و نتیجه گرفتند که در خاک آلوده به نفت تلقیح شده با کنسرسیوم میزان دهیدروژناز با گذشت زمان افزایش چشمگیری نسبت به دو خاک دیگر داشت ولی بعد از گذشت ۳۲ روز این فعالیت رو به کاهش بود. حسن شاهیان و زیدآبادی نژاد (۱۳۹۶) طی بررسی

جمعیت میکروبی و فعالیت آنزیم دهیدروژناز در دو خاک مزرعه‌ای و بیابانی آلوده به نفت در فرایند زیست پالایی عنوان کردند فعالیت این آنزیم در تیمارهای زیست پالایی در خاک مزرعه تا روز ۶۰ روند افزایشی ولی بعد از آن تا ۱۲۰ روز روند کاهشی داشته است و در خاک‌های بیابانی تا روز سی‌ام، الگوی افزایشی و پس از آن تا انتهای آزمایش، کاهش در فعالیت آنزیم دهیدروژناز مشاهده شد. با توجه به شکل ۲-ب، میزان فعالیت آنزیم دهیدروژناز در خاک آلوده تحت تیمار Tween 80 (LT) در ابتدای آزمایش زیاد بود و سپس با گذشت زمان با شیب تند کاهش یافت به طوری که این کاهش در روز آخر آزمایش در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود، البته مقدار فعالیت آنزیم دهیدروژناز در خاک آلوده تحت تیمار Tween 80 (LT) از بقیه نمونه‌ها در این نمودار بیشتر است. به نظر می‌رسد سورفکتانت توپین ۸۰ هم به عنوان منبع کربن مورد استفاده ریزجانداران قرار گرفته و هم با افزایش فراهمی زیستی باعث می‌شود که ریزجانداران به راحتی بتوانند منبع هیدروکربن‌ها را جذب کنند و میزان فعالیت میکروبی و در نتیجه فعالیت دهیدروژنازی در روزهای ابتدائی افزایش یابد. فعالیت آنزیم دهیدروژناز در نمونه خاک‌های آلوده بدون تیمار Tween 80 (LC) و شاهد تحت تیمار Tween 80 (CT) در روز ۵ دچار افزایش کمی شده و سپس با گذشت زمان با شیب ملایم رو به کاهش است. دلیل بیشتر بودن میزان فعالیت آنزیم دهیدروژناز در خاک شاهد تحت تیمار Tween 80 می‌تواند به اثر تحریکی توپین ۸۰ بر رشد ریز جانداران مربوط باشد، که ریز جانداران از توپین ۸۰ به عنوان منبع کربن استفاده کرده‌اند و سپس با کاهش منبع آلودگی و سورفکتانت فعالیت میکروبی و دهیدروژنازی نیز کاهش یافته است.

با توجه به (شکل ۲-ج)، میزان فعالیت آنزیم دهیدروژناز در خاک آلوده تحت تیمار کود شیمیایی NP (LNP)، کمتر از خاک شاهد تحت تیمار کود شیمیایی NP (CNP) است. میزان فعالیت آنزیم

دهیدروژناز در این دو نمونه در روزهای ابتدائی با شیب تند و سپس با گذشت زمان، با شیب ملایم کاهش یافته است اما کاهش فعالیت دهیدروژناز در خاک آلوده تحت تیمار کود شیمیایی NP در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار نبود. به نظر می‌رسد ریز جانداران قادر به استفاده از منبع غذایی نبوده‌اند و جمعیت و فعالیت میکروبی از ابتدا کم بود و سپس با گذشت زمان نیز کاهش بیشتری داشته است. با توجه به اینکه میزان فعالیت آنزیم دهیدروژناز در خاک آلوده بدون تیمار کود شیمیایی NP از بقیه بیشتر است به نظر مقادیر نیتروژن و فسفر استفاده‌شده نه تنها باعث ایجاد انگیزش مثبت برای افزایش فعالیت ریزجانداران نشده بلکه پیامد منفی هم داشته است.

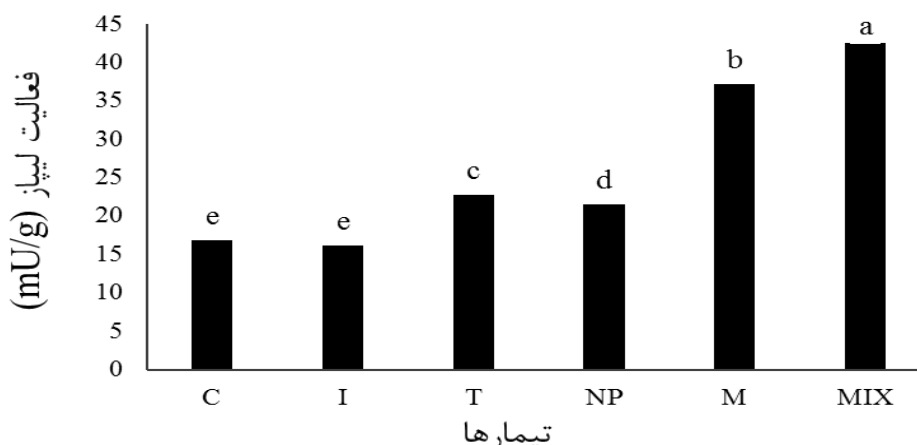
با توجه به (شکل ۲-د)، فعالیت آنزیم دهیدروژناز در خاک شاهد تحت تیمار کود گاوی (CM) و خاک آلوده تحت تیمار کود گاوی (LM) بیشتر از نمونه‌های بدون تیمار کود گاوی است، همچنین میزان فعالیت آنزیم دهیدروژناز در نمونه خاک شاهد تحت تیمار کود گاوی (CM)، از روز صفر تا ۲۰ افزایش معنی‌دار داشت و از روز ۲۰ تا ۴۵ با شیب تند و معنی‌دار کاهش یافته و سپس از روز ۴۵ تا ۱۲۰ با شیب ملایم کاهش یافته است. فعالیت دهیدروژناز در خاک آلوده تحت تیمار کود گاوی نیز تا روز ۱۰ کاهش اندکی داشته و دوباره از روز ۱۰ تا ۲۰ افزایش یافته. کاهش فعالیت دهیدروژناز در این تیمار از روز ۴۵ به بعد زیاد و معنی‌دار بود. حضور میکروفلور بومی موجود در کود دامی و همچنین در نتیجه افزوده شدن مواد آلی به واسطه استفاده از کود دامی و پیامدهایی نظیر بهبود ساختمان خاک، تأمین رطوبت، اکسیژن و عناصر غذایی مورد نیاز جامعه میکروبی خاک، افزایش فعالیت آنزیم دهیدروژناز در روزهای ابتدائی مشاهده می‌شود. اما با گذشت زمان و کاهش منابع هیدروکربنی و منبع غذایی، فعالیت ریز جانداران و در نتیجه فعالیت آنزیم دهیدروژناز نیز کاهش

می‌یابد. به عقیده رز و همکاران (۲۰۰۳) رابطه فعالیت آنزیم دهیدروژناز با مقدار ماده آلی بسیار مرتبط بود. با توجه به (شکل ۲-ه)، فعالیت دهیدروژناز در خاک آلوده تحت تیمار تلفیقی (LMIX)، از روز اول تا ۱۵ با شیب تند کاهش یافته از روز ۱۵ تا ۳۰ تغییر اندکی کرده و دوباره از روز ۳۰ به بعد دوباره کاهش یافته است. فعالیت آنزیم دهیدروژناز در خاک شاهد تحت تیمار تلفیقی (CMIX) از روز صفر تا ۲۰ افزایش یافته و سپس از روز ۲۰ تا ۱۲۰ کاهش یافته و این کاهش فعالیت در روز پایانی معنی‌دار بود. فعالیت آنزیم دهیدروژناز در خاک آلوده تحت تیمار تلفیقی (LMIX) نسبت به خاک شاهد بدون تیمار تلفیقی (CC) و خاک شاهد تحت تیمار تلفیقی (CMIX) بیشتر و معنی‌دار است. به نظر می‌رسد در خاک آلوده تحت تیمار تلفیقی که شامل کنسرسیوم باکتریایی، سورفکتانت توین ۸۰، کود شیمیایی NP و کود گاوی بود جمعیت و فعالیت ریزجانداران افزایش یافته و به دنبال آن نیز فعالیت آنزیم دهیدروژناز هم افزایش نشان داده است. نتایج (وو و همکاران (۲۰۱۷))، نشان داد در تیمار تلفیقی که در آن مواد غذایی (NP) به همراه تلقیح زیستی در خاک آلوده نفتی به غلظت ۶ درصد به مدت ۱۲۶ روز زیست‌پالایی استفاده شد، آنزیم دهیدروژناز از لحظه شروع تا هفته سوم به شدت افزایش یافت و از روز ۲۱ تا ۱۲۶ روز کاهش شدیدی در فعالیت این آنزیم مشاهده گردید. در تیمار شاهد آلوده آنزیم دهیدروژناز کمتر از تیمار زیست‌پالایی بود و تا ۷۰ روز میزان آن ثابت بود و بعد از ۷۰ روز تا ۱۲۶ روز کاهش ملایمی داشت. در مطالعه‌ای که افشارنیا و همکاران (۱۳۹۸) در خاک آلوده به نفت انجام دادند، مشاهده کردند همه تیمارهای زیست‌پالایی در هفته نخست دارای فعالیت دهیدروژناز بالایی اما پس از گذشت چهار ماه، کاهش فعالیت چشمگیری داشتند.

## فعالیت لیپاز

بر اساس جدول تجزیه واریانس (جدول ۱) از نظر فعالیت لیپازی بین فاکتور آلودگی (خاک شاهد و خاک آلوده به نفتای سبک)، فاکتور تیمارهای زیست پالایی (خاک شاهد بدون تیمار زیست‌پالایی، تلقیح کنسرسیوم باکتریایی، سورفکتانت Tween 80، کودهای

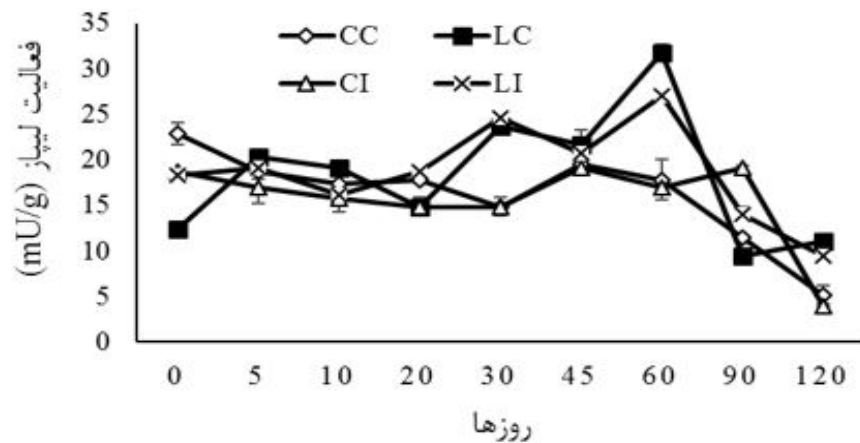
شیمیایی NP، کود گاوی و تیمار تلفیقی) و فاکتور زمان (۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ روز) در سطح احتمال یک درصد ( $P < 0.01$ ) اختلاف معنی‌دار وجود دارد. با توجه به شکل ۳، بیشترین مقدار فعالیت لیپازی به ترتیب مربوط به تیمارهای تلفیقی، کود گاوی، سورفکتانت Tween 80 و تیمار کود شیمیایی NP است.



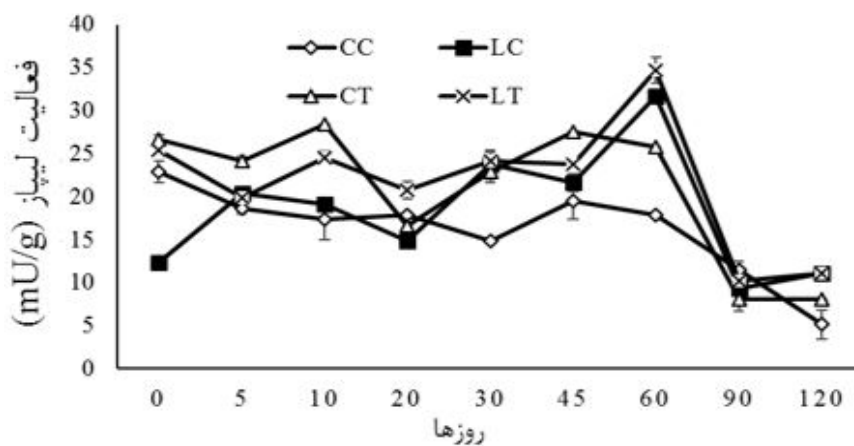
شکل ۳- فعالیت لیپاز اندازه‌گیری شده در خاک تحت تیمارهای مختلف زیست‌پالایی (خاک شاهد (C)، کنسرسیوم باکتریایی (I)، سورفکتانت T (Tween 80)، کود شیمیایی NP (NP)، کود گاوی (M) و تیمار تلفیقی (MIX))

بررسی زیست پالایی هیدروکربن‌ها دارد از محصولات حاصل از تجزیه زیستی هیدروکربن‌های نفتی به‌عنوان سوبسترای برای این آنزیم بشمار می‌روند. فعالیت بالای لیپازی خاک به علت حضور نفت یا روغن یا گریس در خاک تحریک می‌شود و کاهش فعالیت لیپاز در خاک می‌تواند به دلیل مواد سمی حد واسطه مربوط گردد (شن و همکاران، ۲۰۱۶).

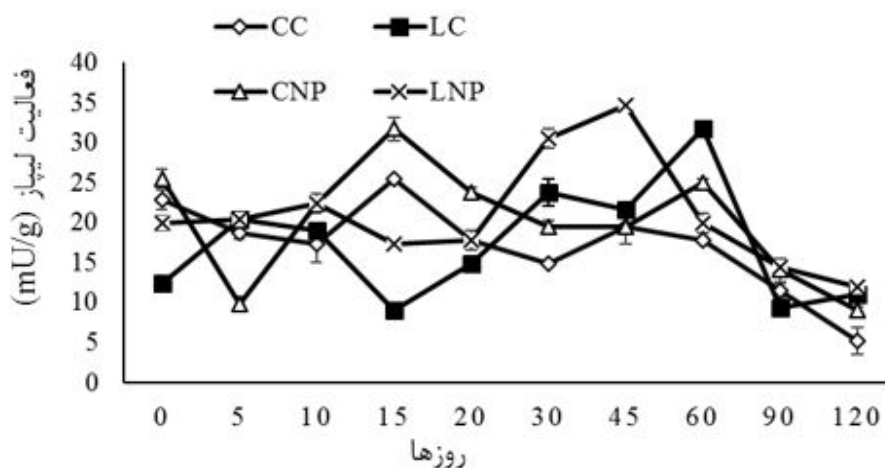
لیپازها جز آنزیم‌های برون سلولی هستند، که می‌تواند هیدرولیز استرهای مختلف را انجام دهد. این آنزیم توسط بسیاری از باکتری‌ها و قارچ‌ها تولید می‌شود (گادورا و همکاران، ۲۰۰۶). تری گلیسریدها سوبسترای اصلی لیپازها هستند. اسیدهای چرب با زنجیره کوتاه کمی در آب محلول است ولی اسیدهای چرب با زنجیره بلند آلفاتیک در آب نامحلول هستند. ماسیاندرو و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند که آنزیم لیپاز پتانسیل قوی در



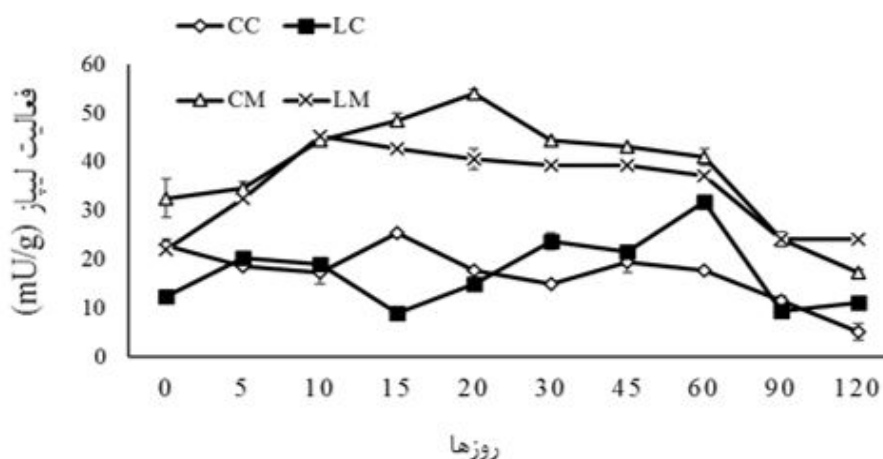
شکل ۴-الف) روند تغییرات زمانی فعالیت آنزیم لیپاز در خاک شاهد بدون تیمار زیست‌پالایی (CC)، خاک شاهد تیمار شده با کنسرسیوم باکتریایی (CI)، خاک آلوده به نفتای سبک بدون کنسرسیوم باکتریایی (LC) و خاک آلوده تلقیح شده با کنسرسیوم باکتریایی (LI)



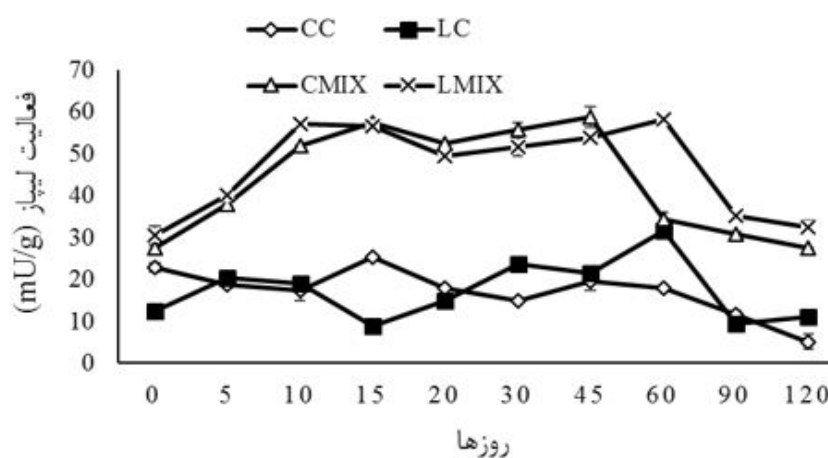
شکل ۴-ب) روند تغییرات زمانی فعالیت آنزیم لیپاز در خاک شاهد بدون تیمار زیست‌پالایی (CC)، خاک شاهد تیمار شده با سورفکتانت Tween 80 (CT)، خاک آلوده به نفتای سبک بدون تیمار Tween 80 (LC) و خاک آلوده تیمار شده با Tween 80 (LT)



شکل ۴-ج) روند تغییرات زمانی فعالیت آنزیم لیپاز در خاک شاهد بدون تیمار زیست‌پالایی (CC)، خاک شاهد تیمار شده با کود شیمیایی NP (CNP)، خاک آلوده به نفتای سبک بدون تیمار کود شیمیایی NP (LC) و خاک آلوده به نفتای سبک تیمار شده با کود شیمیایی NP (LNP)



شکل ۴-د) روند تغییرات فعالیت آنزیم لیپاز در خاک شاهد بدون تیمار زیست‌پالایی (CC)، خاک شاهد تیمار شده با کود گاوی (CM)، خاک آلوده به نفتای سبک بدون تیمار کود گاوی (LC) و خاک آلوده تیمار شده با کود گاوی



شکل ۴-ه) روند تغییرات زمانی فعالیت آنزیم لیپاز در خاک شاهد بدون تیمار زیست‌پالایی (CC)، خاک شاهد تحت تیمار تلفیقی (CMIX)، خاک آلوده به نفتای سبک بدون تیمار تلفیقی (LC) و خاک آلوده با تیمار تلفیقی (LMIX)

افزایش فعالیت لیپاز تا روز ۶۰ این است که احتمالاً ریزجانداران برای سازش با آلاینده به زمان طولانی‌تری نیاز دارند. فعالیت لیپازی خاک شاخص مهمی از ریزجانداران تجزیه‌کننده هیدروکربن‌های آلیفاتیک می‌باشد (افشارنیا و همکاران، ۱۳۹۸). حضور نفت خام تازه در خاک باعث افزایش فعالیت لیپازی و حضور PAH در خاک باعث افزایش فعالیت لاکازی می‌شود. القای ژن آنزیم لیپازی باکتریایی در خاک‌های آلوده به نفت تازه و روغنی در خاک نشان‌دهنده آن است که این آنزیم یک شاخص ارزشمند در تجزیه زیستی نفت در خاک است (پولیاد و همکاران، ۲۰۱۸). سروی مغاللو و همکاران (۱۳۹۰) برای زیست بهسازی خاک‌های آلوده به نفت خام با استفاده از تلقیح زیستی باکتریایی و مایه‌زنی قارچی

فعالیت لیپاز در خاک آلوده تحت تیمار کنسرسیوم باکتریایی (LI) و خاک آلوده بدون کنسرسیوم باکتریایی (LC)، تا روز ۱۵ کاهش یافته و از روز ۱۵ تا ۶۰ با نوسان افزایش یافته است سپس از روز ۶۰ تا ۱۲۰ با شیب تند کاهش یافته است (شکل ۴-الف). با توجه به نتایج، تغییرات فعالیت لیپاز در خاک آلوده تحت تیمار کنسرسیوم باکتریایی و شاهد تحت کنسرسیوم باکتری معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد بود. فعالیت آنزیم لیپاز در خاک آلوده تلقیح شده با کنسرسیوم باکتریایی تا روز ۱۵ نزولی بود و بعد از آن تا روز ۶۰ افزایش غیر معنی‌دار داشت. به نظر می‌رسد با توجه به اینکه لیپاز نقش مستقیم در تجزیه هیدروکربن‌های نفتی دارد با افزایش میزان فعالیت آن هیدروکربن‌های نفتی کاهش می‌یابد، دلیل

مشاهده کردند فعالیت آنزیم لیپاز در سطوح بالای آلودگی با کاهش فعالیت همراه بود و با افزایش تجزیه ترکیبات نفتی و کاهش میزان آن‌ها فعالیت لیپاز افزایش می‌یابد. شن و همکاران (۲۰۱۶) در زیست‌پالایی کوتاه‌مدت خاک‌های آلوده به نفت از طریق تلقیح زیستی کنسرسیوم باکتریایی مشاهده کردند فعالیت این آنزیم تا روز شانزدهم به‌طور سریع افزایش‌یافته و به حداکثر میزان خود یعنی دو برابر می‌رسد و پس از شانزده روز تا چهل روز کاهش آرامی را طی می‌کند بطوریکه باز میزان فعالیت لیپازی در روز چهلیم حدود ۵۰ درصد از لحظه شروع زیست‌پالایی بیشتر بود؛ این در حالی است که فعالیت لیپازی در خاک شاهد آلوده به نفت با روند کندی رو به افزایش بوده و در خاک شاهد غیرآلوده نفتی فعالیت لیپازی بسیار پایین و در طول زمان ثابت بود.

فعالیت لیپاز در خاک آلوده تحت تیمار Tween

80 (LT) نسبت به خاک آلوده بدون تیمار Tween 80 (LC) بیشتر است. میزان فعالیت لیپاز در خاک آلوده تیمار شده با Tween 80 در ابتدا کمی کاهش‌یافته سپس از روز ۵ تا ۶۰ افزایش‌یافته است که نشان‌دهنده تأثیر Tween 80 در افزایش تجزیه ترکیبات نفتی است. از روز ۶۰ تا ۱۲۰ کاهش نشان می‌دهد (تغییرات فعالیت لیپاز در طول زمان حالت زنگوله‌ای دارد). همچنین میزان فعالیت لیپاز در خاک شاهد تیمار شده با Tween 80 (CT)، تا روز ۲۰ همراه با نوسان در سطح احتمال ۱ درصد کاهش معنی‌دار داشت سپس از روز ۲۰ تا ۴۵ افزایش معنی‌دار داشته است، از روز ۴۵ تا ۱۲۰ نیز مجدداً کاهش نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد توئین ۸۰ با افزایش فراهمی زیستی باعث افزایش فعالیت لیپاز و تجزیه هیدروکربن‌های نفتی شده است (شکل ۴-ب). نوروزپور و همکاران (۱۴۰۲) برای کاهش آلودگی هیدروکربن‌های نفتی، بعد از ایجاد ۷ درصد آلودگی نفتای سنگین با استفاده از انواع تیمارهای زیست‌پالایی، بالاترین فعالیت لیپازی را به ترتیب در تیمارهای تلفیقی، کود گاوی و سورفکتانت Tween 80 بیان کردند و همچنین آن‌ها به این نتیجه

رسیدند در تیمارهایی که از توئین ۸۰ استفاده‌شده بود (تیمار تلفیقی و تیمار توئین ۸۰)، به دلیل استفاده از این ترکیب که ماده‌ای با قرابت مولکولی به توئین ۲۰ (سوبسترای مورد استفاده در سنجش فعالیت لیپازی خاک) است، فعالیت لیپازی بیشتری به‌دست‌آمده آمد. به نظر استفاده از توئین ۸۰، به دلیل تحریک تولید این آنزیم سبب افزایش فعالیت آن شده است.

با توجه به (شکل ۴-ج)، میزان فعالیت لیپاز در خاک آلوده تیمار شده با کود شیمیایی NP (LNP)، نسبت به خاک آلوده بدون تیمار کود شیمیایی NP (LC)، بیشتر است. میزان فعالیت آنزیم لیپاز در خاک آلوده تیمار شده با کود شیمیایی NP تا روز ۴۵ افزایش یافت در روز ۴۵ به بیشترین مقدار خود در سطح احتمال ۱ درصد رسیده است یعنی با گذشت زمان و کاهش مقدار هیدروکربن‌ها فعالیت لیپاز نیز افزایش‌یافته است. فعالیت لیپاز در خاک شاهد تحت تیمار NP (CNP) نسبت به خاک شاهد بدون تیمار NP (CC) بیشتر است. همچنین میزان فعالیت لیپاز در خاک شاهد تحت تیمار NP تا روز ۱۵ افزایش معنی‌دار داشت و سپس از روز ۱۵ تا ۱۲۰ با نوسانات اندک کاهش یافت. افشارنیا و همکاران (۱۳۹۸)، برای کاهش هیدروکربن‌های نفتی در خاک آلوده در پالایشگاه تبریز از تیمارهای زیست‌پالایی (تلقیح کنسرسیوم باکتریایی، Tween 80، NPK، کود گاوی، کود مرغی و کمپوست) استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد؛ که فعالیت لیپازی بین همه تیمارهای تلقیح زیستی با گذشت زمان دارای روند افزایشی بوده ولی در تیمارهای تحریک زیستی فقط تیمارهای NPK، توئین ۸۰ و آبدهی روند افزایشی داشتند. همچنین میزان فعالیت لیپاز در همه تیمارهای زیست‌پالایی نسبت به شاهد آلوده و غیر آلوده بالاتر بوده و نیز در همه تیمارها به جز کود مرغی، کود گاوی و شاهد آلوده، روند افزایشی در فعالیت لیپازی باگذشت زمان مشاهده شد این در حالی بود که در تیمارهای کمپوست و هوادهی، روند برعکس مشاهده گردید.

با توجه به (شکل ۴-د)، فعالیت لیپاز در خاک شاهد تحت تیمار کود گاوی (CM) نسبت به خاک شاهد بدون تیمار کود گاوی (CC) بیشتر است. فعالیت لیپاز در خاک آلوده تیمار شده با کود گاوی (LM) نسبت به خاک آلوده بدون تیمار کود گاوی (LC) بیشتر است. فعالیت لیپاز در خاک آلوده تیمار شده با کود گاوی از روز صفر تا ۱۰ افزایش یافته و از روز ۱۰ تا ۱۲۰ با شیب ملایم کاهش داشته است و در روزهای پایانی نسبت به قبل کاهش معنی‌دار بود. همچنین میزان فعالیت لیپاز در خاک شاهد تیمار شده با کود گاوی تا روز ۲۰ افزایش، و از روز ۳۰ تا ۴۵ کاهش معنی‌دار نشان داده است. به نظر میکروفلور بومی موجود در کود گاوی در مقایسه با باکتری‌های مورد استفاده در کنسرسیوم میکروبی (تیمار تلقیح میکروبی) از نظر فعالیت لیپازی شرایط بهتری داشته‌اند، شاید بهینه‌سازی شرایط دیگر نظیر تأمین مواد کربنه موجود در کود گاوی و همچنین بهبود تهویه در افزایش فعالیت لیپازی در این تیمار دخیل بوده است. مارگسین و همکاران (۲۰۰۰) گزارش کردند که در خاک آلوده به نفت در تیمار تحریک زیستی با کاربرد کود، در دو هفته اول فعالیت لیپاز ۷۳ درصد افزایش یافت در حالی‌که در خاک‌های آلوده به PAH فعالیت لیپازی کاهش یافته بود. حضور نفت خام و مواد روغنی تازه فعالیت لیپاز خاک را افزایش می‌دهد در حالیکه حضور PAHها در خاک فعالیت لاکازی خاک را بالا می‌برد به عبارتی دیگر آنزیم لیپاز هیدرولیز زنجیره‌های آلیفاتیک را انجام می‌دهد و آنزیم لاکاز اکسید حلقه‌های آروماتیک و حلقه فنلی را برعهده دارد (پتل و همکاران، ۲۰۱۸).

فعالیت لیپاز در خاک شاهد تحت تیمار تلفیقی (CMIX) بیشتر از خاک شاهد بدون تیمار تلفیقی (CC) بود. فعالیت لیپاز در خاک شاهد تحت تیمار تلفیقی از روز صفر تا ۴۵ افزایش یافته است و از روز ۴۵ تا ۱۲۰ در سطح احتمال یک درصد کاهش معنی‌دار داشت. میزان

فعالیت لیپازی در خاک آلوده تحت تیمار تلفیقی (LMIX) نسبت به خاک شاهد تحت تیمار تلفیقی (CMIX) بیشتر و معنی‌دار است. به طوریکه فعالیت لیپاز در خاک آلوده تحت تیمار تلفیقی تا روز ۶۰ افزایش یافته و بعد از آن روند کاهشی داشت و طبق نتایج این تغییرات معنی‌دار نبودند (شکل ۴-ه). افزایش فعالیت لیپازی تا روز ۶۰ در خاک آلوده تحت تیمار تلفیقی نشان می‌دهد که میزان هیدروکربن‌های نفتی در این بازه رو به کاهش هستند یعنی ترکیبات نفتی بیشتر تجزیه شده‌اند. مطالعات مارگسین و همکاران (۲۰۰۰)، نشان‌دهنده‌ی کاهش فعالیت لیپاز در تمام سطح آلودگی موردبررسی بود به عبارت دیگر یک رابطه معکوس بین فعالیت لیپازی و غلظت آلاینده وجود دارد به نظر افزایش فعالیت این آنزیم در کاهش میزان هیدروکربن‌ها نقش دارد. مارگسین و همکاران (۱۹۹۹)، گزارش کردند فعالیت لیپاز بر خلاف فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و دهیدروژناز است. نتایج مطالعات مارگسین و اسکینر (۱۹۹۹)، نشان داد که فعالیت آنزیم لیپاز از افزایش ترکیبات سنگین، پیچیده و با قابلیت دسترسی پایین کمتر تأثیر می‌پذیرد.

### نتیجه‌گیری کلی

نتایج حاصل از تغییرات فعالیت دهیدروژناز و فعالیت لیپاز در خاک آلوده به نفتای سبک نشان می‌دهند که کارایی تیمارهای مورد استفاده یکسان نیست. اما با توجه به اینکه بیشترین تغییرات فعالیت آنزیم‌های دهیدروژناز و لیپاز در تیمارهای کود گاوی، تیمار تلفیقی و کنسرسیوم باکتریایی مشاهده شد می‌توان گفت این تیمارها علاوه بر افزایش جمعیت فعال مؤثر در تجزیه ترکیبات نفتی و تأمین شرایط بهینه برای فعالیت آن‌ها می‌توانند روش مناسبی برای حذف ترکیبات نفتای سبک باشند.

## فهرست منابع

۱. افشارنیا، م.، م.، ر. ساریخانی، م.، زارعی، و. ع.، لطف الهی. ۱۳۹۶. جداسازی باکتری‌های نفت-خوار از خاک‌های آلوده پالایشگاه و پتروشیمی تبریز و ارزیابی کارایی تجزیه نفتی آن‌ها. پانزدهمین کنگره علوم خاک ایران. اصفهان.
۲. افشارنیا، م.، م.، ر. ساریخانی، و. م.، زارعی. ۱۳۹۸. استفاده از گیاهان آگروپایرون (*Agropyron cristatum* L.) و تال فسکیو (*Festuca arundinacea* L.) در گیاه‌پالائی خاک‌های آلوده نفتی. نشریه دانش کشاورزی و تولید پایدار. ۲۹(۲): ۳۰۰-۲۸۶.
۳. حسن‌شاهیان، م.، و ز. زیدآبادی نژاد. ۱۳۹۶. بررسی اثر آلودگی نفت سفید بر روی جمعیت میکروبی خاک بیابان و خاک مزرعه. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۴(۴): ۲۴۱-۲۲۷.
۴. سروی مغانلو، و.، چ. مصطفی، ح.، معتمدی، ب.، عزیزاده، و ش.، اوستان. ۱۳۹۰. بررسی فروزینگی زیستی ترکیبات نفتی، فعالیت برخی از آنزیم‌ها و عملکرد گیاه شبدرد در خاک آلوده به نفت خام. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۵(۵۶): ۱۱۵-۱۰۳.
۵. علی‌اصغرزاد، ن. ۱۳۸۵. روش‌های آزمایشگاهی در بیولوژی خاک (ترجمه). انتشارات دانشگاه تبریز.
۶. نوروزپور، م.، م.، ر. ساریخانی، و ن.، علی‌اصغرزاد. ۱۴۰۳. پایش تغییرات فعالیت آنزیمی خاک آلوده به نفتای سنگین در تیمارهای مختلف زیست‌پالایی. مجله دانش آب و خاک. ۳۴(۱): ۲۱۷-۲۳۳.
7. Ball, J.S., G. U. Dinneen., J. R. Smith., C. W. Bailey., and R. V. Meter. 1949. Composition of Colorado Shale-Oil Naphtha. Ind. Eng. Chem., 41 (3): 581-587.
8. Dashti, N., N. Ali., M. Eliyas., M. Khanafer., N.A. Sorkhoh., and S.S. Radwan. 2015. Most hydrocarbonoclastic bacteria in the total environment are diazotrophic, which highlights their value in the bioremediation of hydrocarbon contaminants. Microbes and Environments 30: 70-75.
9. Gathora, S.K., S.B. Chadha., H.S. Saini., M.K. Bhat., C.B. Faulds. 2006. Diversity of plant cell wall esterases in thermophilic and thermotolerant fungi. J. Biotechnol. 125: 434-445.
10. Loehr, R.C., S.J. McMillen., and M.T. Webster. 2001. Predictions of biotreatability and actual results: soils with petroleum hydrocarbons. Pract. Period. Hazard. Toxic Radioact. Waste Manage, 5:78-87.
11. Madueño, L., B.M. Coppotelli., H.M. Alvarez., and I.S. Morelli. 2011. Isolation and characterization of indigenous soil bacteria for bioaugmentation of PAH contaminated soil of semiarid Patagonia, Argentina. Int. Biodeterior. Biodegrad, 65 (2): 345-351.
12. Margesin, R., F. Schiner. 1998. Biodegradation of the anionic surfactant sodium dodecyl sulphate at low temperatures. International Biodeterioration and Biodegradation. 41: 139-143.
13. Margesin, R., G. Walder., and F. Schinner., 2000. The impact of hydrocarbon remediation (diesel oil and polycyclic aromatic hydrocarbons) on enzyme activities and microbial properties of soil. Acta Biotechnologica, 20(4):313-333.



14. Margesin, R., A. Zimmerbauer., and F. Schinner., 1999. Soil lipase activity A useful indicator of oil biodegradation. *Biotechnology Techniques*,. 13(12): 859–863.
15. Masciandaro, G., C. Macci., E. Peruzzi., B. Ceccanti., and S. Doni. 2013. Organic matter–microorganism–plant in soil bioremediation: a synergic approach *Rev Environ Sci Biotechnol*, 12:399–419.
16. Nannipieri, P., E. Kandeler., and P. Ruggiero. 2002. Enzyme activities and microbiological and biochemical processes in soil. In: Burns, R.G., Dick, R.P.(Eds.), *Enzymes in the Environment: Activity, Ecology and Applications*. Marcel Dekker, New York, pp. 1–33.
17. Peng, R.H., A.S. Xiong., Y. Xeo., X.Y. Fu., F. Gao., W. Zhao., Y.S. Tian., and Q.H. Yao. 2008. Microbial biodegradation of polyaromatic hydrocarbons: a review. *FEMS Microbiol. Rev*, 32: 927–955.
18. Polyak, Y.M., L.G. Bakina., M.V. Chugunova., N.V. Mayachkina., A.O. Gerasimov., and V.M. Bure. 2018. Effect of remediation strategies on biological activity of oil-contaminated soil - A field study. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 126: 57–68.
19. Riffaldi, R., R. Levi-Minzi., R. Cardelli., S. Palumbo., and A. Saviozzi. 2006. Soil biological activities in monitoring the bioremediation of diesel oil-contaminated soil. *Water, air, and soil pollution*, 170(4): 3-15.
20. Ross, M., M.T. Hernandez., and C. Garcia. 2003. Soil microbial activity after restoration of a semiarid soil by organic amendments. *Soil Biology and Biochemistry*. 35: 463-469.
21. Sakai, Y., M. Hayatsu., and K. Hayano., 2002. Use of tween 20 as a substrate for assay of lipase activity in soils. *Soil Science and Plant Nutrition*, 48(5): 729-734.
22. Shekoohiyan, S., G. Moussavi., and K. Naddafi. 2016. The peroxidase-mediated biodegradation of petroleum hydrocarbons in a H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-induced SBR using in-situ production of peroxidase: biodegradation experiments and bacterial identification. *Journal of Hazardous Materials*, 313: 170–178.
23. Shen, W., N. Zhu., J. Cui., H. Wang., Z. Dang., P. Wu., Y. Luo., and C. Shi. 2016. Ecotoxicity monitoring and bioindicator screening of oil-contaminated soil during bioremediation *Ecotoxicology and Environmental Safety*., 124:120–128.
24. Tan, T., and C. Yin. 2003. The mechanism and kinetic model for glycerolysis by 1, 3 position specific lipase from *Rhizopus arrhizus*. *Biochemistry Engineering Journals* 25: 39–45.
25. Wu, M. A., W. Dick., W. Li., X. Wang., Q. Yang., T. Wang., L. Xu., M. Zhang., and L. Chen. 2016. Bioaugmentation and biostimulation of hydrocarbon degradation and the microbial community in a petroleum-contaminated soil, China, *Biodegradation*, 107: 158–164.
26. Wu, M., X.Ye K. Chen., W. Li., J. Yuan., and X. Jiang., 2017. Bacterial community shift and hydrocarbon transformation during bioremediation of short-term petroleum-contaminated soil. *Environmental pollution*, 223: 657-664.
27. Zhang, N., X. He., Y. Gao., Y. Li., H. Wang., D. Ma., R. Zhang., and S. Yang. 2010. Pedogenic carbonate and soil dehydrogenase activity in response to soil organic matter in *Artemisia ordosica* community. *Pedosphere*, 20:229–235.



## بررسی عوامل مؤثر بر مورفولوژی آبکندهای جنوب غرب نظرآباد به کمک پهپاد

رضا بیات<sup>۱</sup>، افسانه عالی نژادیان بیدآبادی<sup>۲\*</sup>، مجید صوفی<sup>۳</sup>، عباس ملکی<sup>۴</sup> و امید علی اکبرپور<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایران [bayat52@gmail.com](mailto:bayat52@gmail.com)

<sup>۲</sup> دانشجویار گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان، ایران [alinejadian@yahoo.com](mailto:alinejadian@yahoo.com)

<sup>۳</sup> دانشجویار مرکز تحقیقات و آموزش منابع طبیعی و کشاورزی استان فارس، ایران [majidsoufi2@gmail.com](mailto:majidsoufi2@gmail.com)

<sup>۴</sup> دانشجویار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان، ایران [dr.maleki38@yahoo.com](mailto:dr.maleki38@yahoo.com)

<sup>۵</sup> استادیار گروه زراعت و اصلاح نباتات دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان، ایران [omidakbarpour@gmail.com](mailto:omidakbarpour@gmail.com)

« مقاله پژوهشی »

دریافت: ۱۴۰۲/۹/۲۰ و پذیرش: ۱۴۰۳/۵/۱۰

### چکیده

فرسایش آبکنده یکی از شکل‌های مهم و مخرب فرسایش آبی است که هنوز در مورد شکل‌گیری و گسترش آن ابهاماتی وجود دارد. این پژوهش با هدف شناسایی ویژگی‌های خاکی و غیرخاکی مؤثر بر آبکندهای جنوب نظرآباد در سال ۱۳۹۹ انجام شد. پس از بازدیدهای میدانی و به کمک تصویر گوگل ارث، مرز محدوده آبکنده شده ترسیم و تعداد ۳۲ رشته آبکند انتخاب شد. یک نمونه‌ی خاک سطحی در محل دیواره بالاکنده هر آبکند تهیه و آزمایش شد. مشخصات شکل شناختی حوزه آبخیز آبکندها (مساحت، محیط، شیب، ضریب شکل) با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی حاصل از تصاویر پهپاد تعیین شد. ویژگی‌های عمومی سطح خاک آبخیز آبکندها شامل تاج پوشش، خاک لخت و درصد بقایا با استفاده از پلات  $1 \times 1$  متری تعیین و مشخصات شکل شناختی آبکند شامل طول، عرض و عمق آن اندازه‌گیری و حجم آبکند محاسبه شد. شناسایی عوامل مؤثر بر آبکندها با تحلیل مؤلفه‌های اصلی و رگرسیون خطی چند متغیره (روش گام به گام) در محیط MINITAB و روی ۷۰٪ مشاهدات انجام شد. رابطه بین حجم آبکندها به نمایندگی از مورفولوژی آن با ویژگی‌های خاک و مشخصات آبخیز آبکند بررسی و رابطه آن معرفی شد. برای اعتبارسنجی از ۳۰ درصد باقیمانده نمونه‌ها استفاده شد. تحلیل مؤلفه اصلی نشان داد که مشخصات قابلیت هدایت الکتریکی، یون‌های محلول پتاسیم، سدیم، منیزیم و کلر، فرسایش‌پذیری خاک، تاج پوشش گیاهی، درصد خاک لخت و درصد اشباع بر توسعه آبکند تأثیر دارند. بر اساس نتایج تحقیق و به‌خصوص با تکیه بر ضریب کارایی نش-شاتکلیف، مدل معتبری توسعه داده نشد. مدل با ضریب همبستگی ۰/۵۹ و چهار عامل پتاسیم، جرم مخصوص ظاهری، درصد بقایای گیاهی و درصد خاک لخت، توانست ۳۵ درصد تغییرات حجم آبکند را توضیح دهد. تقویت و احیای پوشش گیاهی در منطقه توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آبخیز، بالاکنده آبکند، فرسایش خاک، کارایی مدل، هدررفت خاک

\* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: [alinejadian@yahoo.com](mailto:alinejadian@yahoo.com)

## مقدمه

پژوهش‌های فرسایش خاک از گذشته‌های نسبتاً دور شروع شده، اما تحقیقات فرسایش آبکندی<sup>۱</sup> سابقه طولانی ندارد و هنوز ندانسته‌هایی در رابطه با ایجاد، گسترش و روش‌های مناسب مهار آن وجود دارد. نتایج پژوهش‌ها در رابطه با مؤلفه‌های مؤثر بر ایجاد و توسعه<sup>۲</sup> آبکندها، می‌تواند به مدیریت آبکندها در مناطق فاقد آمار و اطلاعات کمک کند. روابط بین حجم و طول آبکند با دیگر مشخصات آن می‌تواند برای تعیین هدر رفت خاک، مقدار خسارت و برنامه‌ریزی برای مدیریت آن مناسب باشد، اما چنین روابطی خاص منطقه مورد مطالعه است و لازم است برای هر منطقه بومی‌سازی شود (فرانکل و همکاران، ۲۰۱۳).

آبکندها به‌عنوان بدترین شکل تخریب خاک، منبع مهم تولید رسوب و چالش مهم مدیریت زمین در جهان هستند و در جایی رخ می‌دهند که مناطق بدون پوشش، جاده‌ها و مسیرهای عبور گله (به‌عنوان منابع مهم رواناب و مجاری هیدرولوژیکی عامل ایجاد و گسترش آبکند) وجود دارند یا اقدامات ناپایدارکننده اراضی در شرایط خاک‌های مستعد فرسایش و یا دارای زمین‌شناسی حساس یا دامنه‌های با شیب ناپایدار توسط اقدامات انسانی انجام شود (فزل سوفلو و همکاران (۱۳۹۷)؛ کوچی و همکاران (۲۰۲۰)؛ لی و همکاران (۲۰۱۶)؛ کاستلو و گومز، ۲۰۱۶).

شناخت عوامل کنترل توسعه بالاکند<sup>۳</sup> و گسترش جانبی آبکند برای طراحی اقدامات مناسب مهار آبکند بسیار مهم است. پوشش گیاهی، شیب، بارندگی و مساحت آبخیز تولیدکننده رواناب، عدم وجود اقدامات کنترلی، مقدار کم رس خاک و شاخص فرسایش‌پذیری بالا همراه با شیب زمین و زهکشی نامناسب عوامل مؤثر بر توسعه آبکندهای موقتی و پیشرفت سر آبکند (بالاکند) هستند (کومارشیت و همکاران، ۲۰۱۳؛ اهیس و اوמוگبو، ۲۰۱۳؛ اوینگن و

همکاران، ۲۰۱۶). همچنین زگی و همکاران (۲۰۱۶) و برگانس و رایس (۲۰۱۶) تأکید کرده‌اند که عمق بالاکند و منطقه زهکشی بالادست آن (مساحت آبخیز) که نماینده مقدار رواناب سطحی است از عوامل کنترل‌کننده فرسایش آبکندی به‌حساب می‌آیند.

علاوه بر تأثیر بارندگی عواملی مانند عمق رواناب، مدت‌زمان و فراوانی بارش، می‌توانند در توسعه آبکند مؤثر باشند و برای برآورد دقیق تلفات خاک باید موردتوجه قرار گیرند (کریموف، ۲۰۱۶). بررسی ارتباط بین مساحت و محیط آبکند، مبین روند خطی بین این متغیرها است و به تعریف شکل آبکند (آبکندهای باریک و طولانی یا پهن و کوتاه) منتهی شد (بوریان و همکاران، ۲۰۱۵).

اثرات رطوبت و خصوصیات رواناب بر توسعه آبکندها (کریموف و شیشوکوف، ۲۰۱۷)، مساحت آبخیز و کاهش درصد ماده آلی در نتیجه فشار بر مراتع و از دست رفتن پوشش گیاهی، باعث افزایش رواناب و تسریع در گسترش آبکندها می‌شود (صوفی و همکاران، ۱۳۸۹؛ فریدگیگلو و قزاقی، ۱۳۹۷). همچنین از نظر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مثل گج، SAR، EC و کرنات کلسیم معادل (TNV<sup>۴</sup>)، تفاوت معنی‌داری بین ویژگی‌های خاک آبکندهای مختلف در واحدهای اراضی متفاوت وجود دارد (صوفی و همکاران، ۱۳۸۹؛ صفاری و همکاران، ۱۳۹۸؛ محمدابراهیمی و همکاران (۱۳۹۴)؛ راهی و همکاران، ۱۴۰۰).

عوامل توپوگرافیک، هیدرولوژیک، اقلیمی، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، کاربری، فاصله از رودخانه و درصد رس بیشترین اهمیت را در وقوع و گسترش فرسایش آبکندی دارند (امیری و همکاران، ۱۳۹۸؛ عرب‌عامری و همکاران، ۲۰۱۹). یافته‌های شهاب آخازلو و اصغری (۱۳۹۹) هم بر تأثیر عوامل محیطی و ویژگی‌های مختلف خاک بر گسترش آبکندهای دائمی و موقتی تأکید دارد. همچنین شیرانی (۱۴۰۰)، با پهنه‌بندی

<sup>3</sup> Head cut<sup>4</sup> Total Neutralizing Value<sup>1</sup> Gully Erosion<sup>2</sup> Initiation and Development

(۲۰۱۹) نیز با بررسی تأثیر وضوح DEM بر دقت نقشه‌های آبکندی، مدل‌های رقومی ارتفاع با وضوح ۰/۵ تا ۲ متر را برای نقشه‌برداری آبکندها مناسب‌تر دانستند.

بررسی‌های پیشین بیانگر این نکته است که در خصوص مطالعه آبکندها به کمک پهپاد، پژوهش‌های اندکی انجام شده و با توجه به تحولات شکلی آن‌ها به‌منظور تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی اقدامات مناسب برای مدیریت آبکند، نیاز به ابزاری است که بتوان در زمان‌های لازم نقشه و دیگر داده‌های موردنیاز را تهیه نمود و برای تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی اقدامات مناسب برای مدیریت آبکند به کار گرفت. بر این اساس هدف از این پژوهش شناسایی مشخصات مؤثر بر حجم آبکند به‌عنوان نماینده مؤلفه‌های مورفولوژیک آبکندهای منطقه مورد مطالعه بود تا ضمن شناخت ویژگی‌های مؤثر، راهکارهای مناسب به‌منظور کاهش پیشرفت و توسعه این نوع فرسایش در منطقه ارائه شود.

## مواد روش‌ها

### مشخصات منطقه

منطقه تحقیق در جنوب غرب نظرآباد واقع شده است (شکل ۱). بخش عمده منطقه دارای پوشش گیاهی کم و شور دوست است و در فاصله نزدیک به منطقه آبکندی شده، باغ‌های پسته و اراضی زراعی مشاهده می‌شود. سازند زمین‌شناسی نظرآباد، دشت رسی و دما و بارش سالانه به ترتیب ۱۳ سلسیوس و ۱۹۵ میلی‌متر است (پیروان، ۱۳۹۵). نقشه موقعیت و مرز حوزه آبخیز آبکندهای منتخب در شکل ۲ نمایش داده شده است.

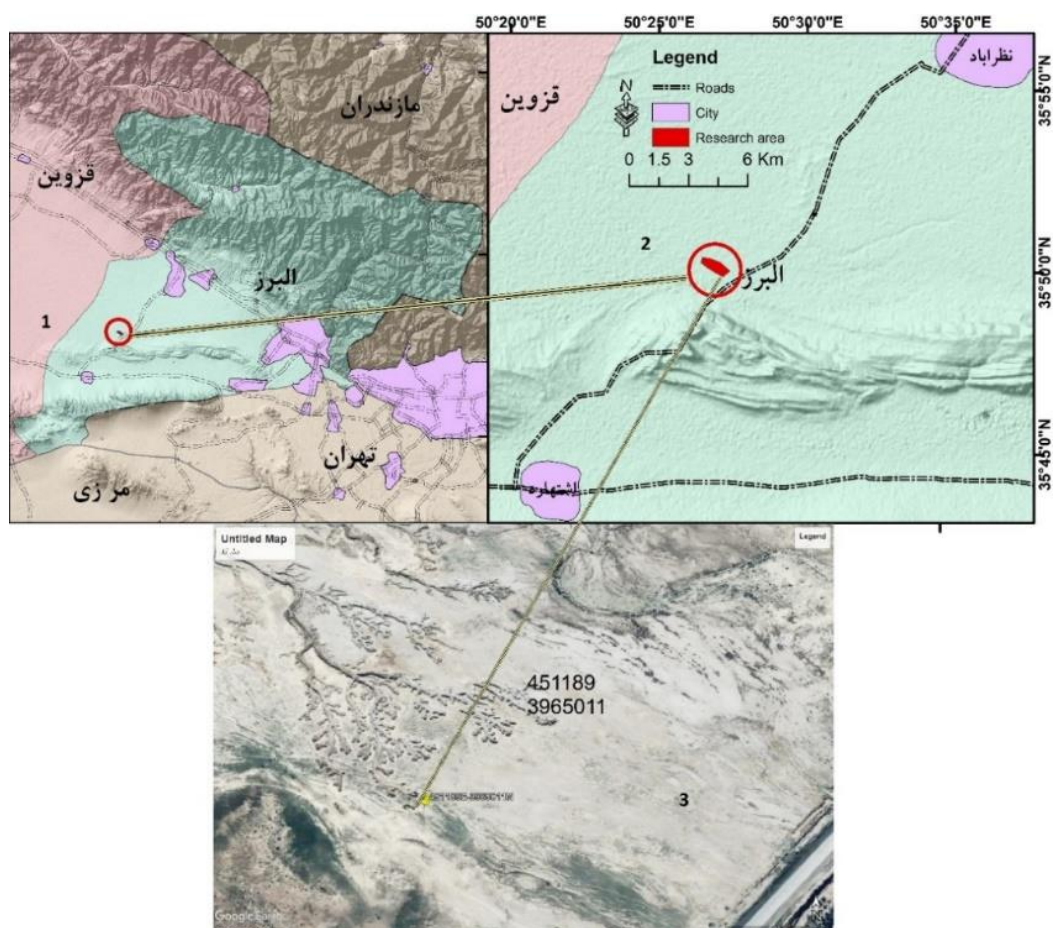
و تهیه نقشه حساسیت فرسایش آبکندی با استفاده از روش‌های آماری و احتمالاتی، نشان داد که در روش رگرسیون چند متغیره، عوامل کاربری اراضی، شیب و فاصله از آبراهه بیش‌ترین اثر را در رخداد آبکند دارند.

بنا بر نظر فرانکل و همکاران (۲۰۱۵) توانایی درک توسعه فرسایش آبکندی با امکانات مورداستفاده در کمی‌سازی مورفولوژی آبکندها ارتباط نزدیکی دارد. از آنجایی که تهیه نقشه آبکندها پیش‌نیاز مهمی برای مطالعه فرسایش آبکندی و تخریب زمین است، روش‌های مبتنی بر فن‌آوری وسایل هوایی بدون سرنشین<sup>۱</sup> (پهپاد) و مدل رقومی ارتفاع<sup>۲</sup> (DEM)، برای تولید خودکار نقشه آبکندها و پایش فرسایش خاک پیشنهاد شده‌اند (سکوئرا و همکاران، ۲۰۱۹). به‌کارگیری فن‌آوری جدید نقشه‌برداری با پهپاد در دهه اخیر، برای اندازه‌گیری برخی شاخص‌های شکل‌شناسی آبکند و تولید DEM مرسوم شده است (لوکا و همکاران، ۲۰۱۱؛ مارزولف و همکاران، ۲۰۱۱؛ اهیوربو و آیودو، ۲۰۱۲؛ ساکسا و مینار، ۲۰۱۲؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۱؛ لیو و همکاران، ۲۰۱۶).

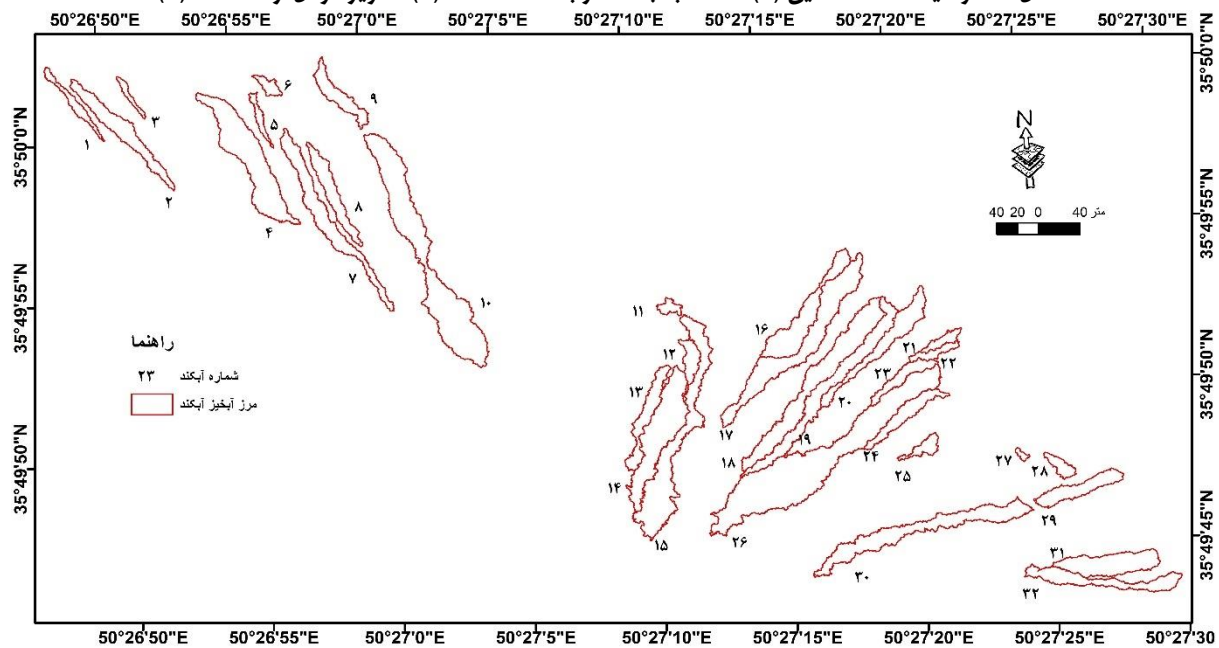
همچنین به دلیل وقت‌گیر و هزینه‌بر بودن مطالعات میدانی و این نکته که تصاویر دوبعدی (حتی عکس‌های هوایی) ممکن است فاقد اطلاعات لازم برای مطالعات شکل‌شناسی باشند؛ بنابراین باید از فن‌آوری‌های پیمایشی سنجش‌ازدور برد کوتاه استفاده کرد تا اطلاعات سه‌بعدی در مورد ویژگی‌های آبکندها به دست آید (راولسون و همکاران، ۲۰۱۳). کریمی نژاد و همکاران (۲۰۱۸) برای پایش مکانی و بررسی آستانه‌ای عوامل تأثیرگذار بر فرسایش تونلی به‌عنوان یکی از مسیرهای ایجاد و توسعه آبکندها در اراضی لسی استان گلستان از تصاویر هوایی پهپاد استفاده کردند. در همین راستا دای و همکاران

<sup>2</sup> Digital Elevation Model

<sup>1</sup> Unmanned Aerial Vehicle (UAV)



شکل ۱- موقعیت منطقه تحقیق (۱)، فاصله با جاده نظرآباد - ماهدشت (۲) تصویر گوگل ارث منطقه (۳)



شکل ۲- نقشه موقعیت و حوزه آبخیز آبکندهای مطالعاتی



## روش تحقیق

پس از بازدیدهای صحرایی، بر اساس تصاویر گوگل ارث<sup>۱</sup> مرز محدوده دارای فرسایش آبکندی ترسیم، رشته آبکند انتخاب و موقعیت آن‌ها با سامانه موقعیت‌یاب جهانی ثبت شد. برای ترسیم مرز حوزه آبخیز هر آبکند، ابتدا تصویربرداری از منطقه توسط پهپاد Dji Phantom 3 Professional انجام و سپس عکس‌های پهپاد با نرم‌افزار Agisoft پردازش شد. یکی از محصولات فرایند پردازشی تصاویر، مدل رقومی ارتفاع (DEM) است و از لایه DEM، نقشه شیب منطقه در محیط ArcMap10.2 تهیه شد. سپس از DEM حاصل به‌عنوان ورودی در سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)<sup>۲</sup> در محیط ArcMap10.2 استفاده و با ابزار جانبی تخصصی، مراحل بستن مرز حوضه‌ها انجام و پلیگون حوزه آبخیز هر آبکند

تهیه شد. بر اساس پلیگون حوزه آبخیز هر آبکند و با استفاده از DEM و نقشه شیب، مساحت، محیط، شیب و ارتفاع حوزه آبخیز هر آبکند توسط نرم‌افزار ArcMap استخراج و مورد استفاده قرار گرفت. یک نمونه‌ی خاک سطحی (۳۰-۰ سانتی‌متر) در محل دیواره بالاکنند هر آبکند بعد از تازه کردن سطح دیواره تهیه (شکل ۳) و به آزمایشگاه خاک پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری ارسال شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل بافت، ماده آلی، pH، SAR، قابلیت هدایت الکتریکی، عصاره، املاح محلول (نظیر سدیم، پتا سیم، کلسیم، منیزیم، بیکربنات، کربنات) (علی‌احیایی و بهبهانی زاده، ۱۳۷۲)، فرسایش‌پذیری خاک به روش K-EPIC (عرب خداری و همکاران ۱۳۹۹) و درصد رطوبت اشباع بر اساس روش‌های استاندارد تعیین شدند.



شکل ۳- نمای تازه شده دیواره بالاکنند برای نمونه‌برداری خاک (الف) و پلات تعیین مشخصات سطح خاک (ب)

ویژگی‌های سطح خاک بالادست آبکندها شامل درصد سنگریزه سطحی، درصد لا شبرگ (بقایا)، درصد خاک لخت و درصد تاج پوشش گیاهی و تعداد گیاه در واحد سطح، با پلات گذاری در سطح آبخیز هر آبکند تعیین شد (شکل ۳). طول آبکند با استفاده از متر نواری از بالاکنند تا انتهای آن در مسیر کف کانال آبکند اندازه‌گیری و بر

اساس تغییرات شکل مقطع به طول‌های با مقطع عرضی مشابه تقسیم و در وسط هر مقطع عرضی، مشخصات آبکند شامل عمق، عرض بالا، عرض پایین اندازه‌گیری شد. با ضرب سطح مقطع در طول، حجم جزئی<sup>۳</sup> و از مجموع حجم‌های جزئی، حجم کل آبکند محاسبه شد (صوفی و عیسایی، ۱۳۸۹). مجموع اطلاعات در بانک

<sup>3</sup> Partial Volume

<sup>1</sup> Google Earth

<sup>2</sup> Geographic Information System

## نتایج و بحث

آبکندهای منطقه یو (U) شکل، پلان عمومی آن‌ها از نوع پنجه‌ای و در یک دشت کم شیب و از آبراهه اصلی منشعب و گسترش یافته‌اند و عموماً محل تمرکز جریان رواناب دشت هستند (شکل ۴). نتایج حاصله با یافته‌های پژوهش صوفی و همکاران (۲۰۲۰) که برای منطقه اعلام کرده‌اند، همخوانی داشت. نتایج مشخصات شکل‌شناسی آبکندهای منطقه نظرآباد، نشان داد که متوسط عمق بالاکند ۳۸ سانتی‌متر، طول متوسط ۲۴ متر و متوسط حجم آبکندها ۳۹ مترمکعب است.

خاک محل توسعه آبکندها در منطقه نظرآباد با مقادیر EC، SAR، و pH ارائه‌شده در جدول ۱، مبین شرایط شوری متوسط (۸۲ دسی زیمنس بر متر) و مقدار اسیدیته بالا (۸/۲۸) است و سدیم و بی‌کربنات (به ترتیب ۱۰۷۰ و ۲ میلی‌اکی والان در لیتر) آن نشان‌دهنده‌ی قلیائیت بالا است. مقدار ماده آلی کم با میانگین ۰/۳۹ درصد از جمله مشخصات بارز منطقه است که این شرایط باعث افزایش فرسایش‌پذیری خاک منطقه می‌شود (مورگان، ۱۹۹۵). متوسط توزیع ذرات رس (۲۳ درصد)، سیلت (۵۵ درصد) و شن (۲۲ درصد)، نمایانگر حساسیت بافت خاک منطقه و شرایط مناسب برای ایجاد و گسترش آبکندها است (اهیسو اوموگبو، ۲۰۱۳؛ صوفی و همکاران، ۲۰۲۰).

متوسط مشخصات حوزه آبخیز آبکندهای موردبررسی شامل محیط، مساحت، شیب و طول به ترتیب ۳۷۳ متر، ۱۶۵۰ مترمربع، ۱۰ درصد و ۱۱۹ متر بود که با ضریب شکل متوسط ۰/۱۴ نشان داد که آبکندهای منطقه تحقیق، حوزه‌های آبخیز کشیده‌ای (آبکندهای باریک و طولانی) دارند (بوریان و همکاران، ۲۰۱۵). مساحت خاک لخت با متوسط ۹۰ درصد، و تاج پوشش متوسط ۱۰ درصد به همراه فقدان سنگ و سنگریزه از مشخصات دیگر سطح

اطلاعات MINITAB ذخیره و پردازش شد. برای بررسی استقلال خطاها از همدیگر از آزمون دوربین-واتسون<sup>۱</sup> (کاظمی و پرهمت، ۱۳۹۷) و عامل تورم واریانس<sup>۲</sup>، که شدت هم خطی چندگانه را در تحلیل رگرسیون ارزیابی می‌کند (حبیب‌پور گتایی و صفری شالی، ۱۳۹۰) استفاده شد. تحلیل مؤلفه‌های اصلی به‌منظور کاهش ابعاد داده‌ها و شناسایی مؤلفه‌هایی از مجموعه داده‌ها که بیشترین تأثیر را بر حجم آبکند داشتند در محیط MINITAB انجام شد.

مدل‌سازی عوامل مؤثر بر آبکندها با استفاده از مدل رگرسیون خطی چند متغیره (روش گام به گام) در محیط MINITAB و روی ۷۰ درصد مشاهدات انجام شد. رابطه بین حجم آبکندها (به‌عنوان متغیر وابسته) با ویژگی‌های خاک و مشخصات حوزه آبخیز آبکند (به‌عنوان متغیرهای مستقل) بررسی و سپس مدل توسعه آبکند (هدر رفت خاک) مناسب معرفی شد. مطالعات صورت گرفته برای ارزیابی کارایی برآورد مدل‌های رگرسیونی، از نسبت ۷۰ درصد داده‌ها برای ایجاد مدل و ۳۰ درصد برای اعتبارسنجی استفاده نموده‌اند (ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۶؛ صفاری و همکاران، ۱۳۹۸؛ امیری و همکاران، ۱۳۹۸). بنابراین در این تحقیق نیز از ۳۰ درصد نمونه‌ها که در ساخت مدل به کار نرفته بودند، برای اعتبار سنجی مدل استفاده شد. آماره‌های درصد، میانگین ریشه مربعات خطا<sup>۳</sup> (RMSE)، ضریب جرم باقیمانده<sup>۴</sup> (CRM)، ضریب کارایی نش-ساتکلیف<sup>۵</sup> (NSE)، ضریب تعیین (تیین)<sup>۶</sup> (CD)، میانگین خطای مطلق<sup>۷</sup> (MAE) و شاخص انحراف نسبی<sup>۸</sup> (d<sub>rel</sub>) (ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۶؛ صفاری و همکاران، ۱۳۹۸؛ امیری و همکاران، ۱۳۹۸) برای مقایسه و تعیین کارایی مدل به کار گرفته و نتایج آن تحلیل شد.

<sup>۵</sup> Nash-Sutcliffe (NSE)

<sup>۶</sup> Coefficient of Determination (CD)

<sup>۷</sup> Mean Absolute Error (MAE)

<sup>۸</sup> Relative Deviations (d<sub>rel</sub>)

<sup>۱</sup> Durbin-Watson

<sup>۲</sup> Variance Inflation Factor (VIF)

<sup>۳</sup> Root Mean Square Error (RMSE)

<sup>۴</sup> Coefficient of Residual Mass (CRM)



اراضی آب‌کندی بود که خود از عوامل مؤثر بر کاهش مقاومت و افزایش هدر رفت خاک است. بنا بر نظر راهی و همکاران (۱۴۰۰) با تغییر مقدار ماده‌ی آلی خاک، تغییر مساحت تولیدکننده رواناب یا سطح زمین (پوشش سطح خاک و شیب)، امکان ایجاد و سپس گسترش آب‌کند فراهم می‌شود.

جدول ۱- متوسط مشخصات خاک نظرآباد

| معرفی مشخصه           | کد مشخصه (واحد)                       | میانگین | بیشینه | کمینه | انحراف معیار |
|-----------------------|---------------------------------------|---------|--------|-------|--------------|
| قابلیت هدایت الکتریکی | EC (dS/m)                             | 82.78   | 175.10 | 3.71  | 47.52        |
| اسیدیته               | pH                                    | 8.26    | 8.99   | 7.48  | 0.408        |
| کربنات                | CO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (meq/l)  | 0.09    | 1.00   | 0.00  | 0.267        |
| بی‌کربنات             | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (meq/l) | 2.04    | 3.50   | 1.00  | 0.591        |
| کلر                   | Cl <sup>-</sup> (meq/l)               | 1181    | 3225   | 12    | 778          |
| کلسیم                 | Ca <sup>++</sup> (meq/l)              | 145.3   | 562.0  | 35.2  | 110.5        |
| منیزیم                | Mg <sup>++</sup> (meq/l)              | 90.2    | 244.0  | 8.4   | 65.5         |
| سدیم                  | Na <sup>+</sup> (meq/l)               | 1070.0  | 3280   | 11    | 818          |
| پتاسیم                | K <sup>+</sup> (meq/l)                | 3.6     | 7.00   | 0.25  | 2.062        |
| کل مواد خثی شونده     | TNV (%)                               | 13.9    | 16.98  | 11.43 | 1.316        |
| کربن آلی              | OC (%)                                | 0.61    | 0.92   | 0.25  | 0.196        |
| درصد اشباع            | SP (%)                                | 45.7    | 57.86  | 32.90 | 6.08         |
| شن                    | Sand (%)                              | 21.7    | 44.00  | 0.00  | 12.27        |
| سیلت                  | Silt (%)                              | 55.2    | 78.00  | 31.00 | 11.06        |
| رس                    | Clay (%)                              | 23.1    | 46.00  | 10.00 | 9.54         |
| جرم مخصوص ظاهری       | Bd (g/cm <sup>3</sup> )               | 1.40    | 1.52   | 1.18  | 0.09         |
| فرسایش پذیری          | K-EPIC                                | 0.378   | 0.46   | 0.283 | 0.039        |

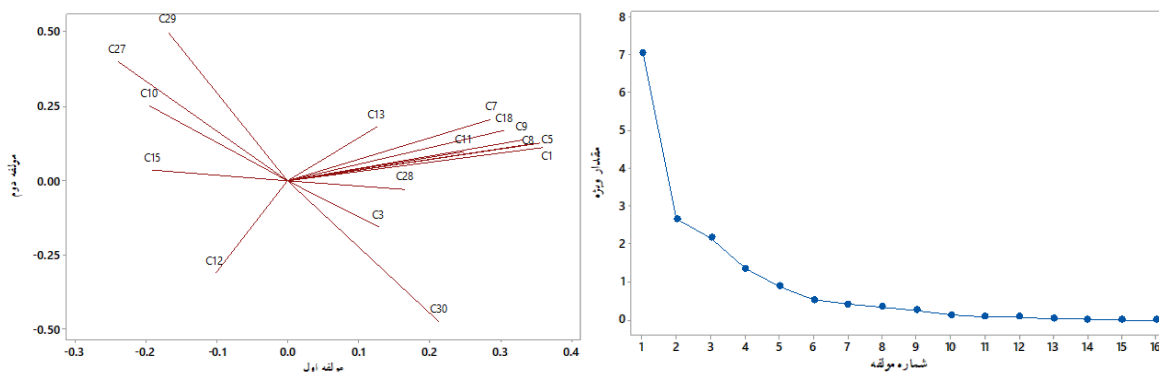


شکل ۴- نمایی از ابعاد آبکند (الف)، تصویر پهپاد از آبکند (ب) و کانال آبکند و فاصله تا جاده نظرآباد به ماهدشت

C7 ( $Mg^{++}$ ) دارای بار عاملی مثبت و مشخصه شماره C27 (تاج پوشش) و C29 (لاشبرگ) بار عاملی منفی بیش‌تری در محور اول دارند. نکته‌ی قابل توجه این است که ویژگی‌های دارای اثر مثبت جزء خصوصیات خاکی هستند که مقاومت خاک و افزایش تأثیرپذیری آن در مقابل نیروهای فرساینده تا حدودی به آن‌ها مرتبط می‌شود که محمدابراهیمی و همکاران (۱۳۹۴) نیز بر این یافته صحه گذاشته‌اند. بار عاملی در محور دوم شامل مشخصه شماره C27 (تاج پوشش) و C29 (درصد لاشبرگ) با اثر مثبت و C30 (درصد خاک لخت) و C12 ( $SP\%$ ) با اثر منفی است. تحقیقات خزایی و همکاران (۱۳۹۱)، محمدابراهیمی (۱۳۹۶)، صوفی و همکاران (۲۰۲۰) و شیرانی (۱۴۰۰) نیز تأکید دارد که مشخصات خاک، پوشش گیاهی، کاربری

نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی ویژگی‌های خاکی و غیرخاکی منطقه نظرآباد نشان داد که چهار مؤلفه اول با ارزش ویژه بیش‌تر از یک، در مجموع ۸۲/۹ درصد از تغییرات داده‌ها را توضیح داده و دو مؤلفه اصلی اول و دوم به ترتیب ۴۴/۲ و ۱۶/۹ درصد تغییرات را در به عهده دارند (شکل ۵). نمودار بارگذاری، برای شناسایی متغیرهای دارای بیش‌ترین تأثیر روی هر مؤلفه (محور) استفاده می‌شود و دامنه تغییرات بارگیری‌ها از ۱ تا -۱ است. متغیرهایی که بار نزدیک به ۱ یا -۱ دارند به شدت بر روی مؤلفه تأثیر می‌گذارند و متغیرهای با بار نزدیک به صفر، تأثیر ضعیفی روی مؤلفه دارند. در شکل ۵، نمودار میله‌ای بارگذاری متغیرهای مؤثر در دسته‌بندی آبکندها در حالت ایجاد نشان می‌دهد که مشخصات C1 ( $EC$ )، C8 ( $Na^+$ )، C5 ( $Cl^-$ ) و C9 ( $K^+$ )، C18 (فرسایش‌پذیری) و

اراضی و جاده‌سازی از عوامل مؤثر بر ایجاد و گسترش آبکند هستند.



شکل ۵- نمودار سنگریزه‌ای ارزش‌های ویژه (راست) و میله‌ای بارگذاری متغیرهای مؤثر بر آبکندها (چپ)  
مقدار آماره دوربین- واتسون در این پژوهش برای آبکندها در فاصله ۱/۵ تا ۲/۵ قرار داشت، بنابراین، فرض صفر برقرار و بین خطاهای برآورد مدل‌ها، همبستگی قابل توجهی مشاهده نشد و اعتبار استفاده از مدل را تأیید کرد. مقدار کم شاخص تورم نیز نشان داد که در مدل‌ها هم خطی وجود نداشت (کاظمی و پرهت، ۱۳۹۷؛ حبیب‌پور گتایی و صفری شالی، ۱۳۹۰).

صفری شالی، ۱۳۹۰). مدل با ضریب همبستگی ۰/۵۹ و چهار عامل مستقل پتاسیم محلول، جرم مخصوص ظاهری، بقایای گیاهی و خاک لخت، ۳۴/۹ درصد تغییرات را پاسخگوست.

خلاصه اطلاعات تجزیه واریانس عوامل تأثیرگذار بر حجم آبکند (جدول ۲) در خصوص رابطه ارائه‌شده برای آبکندها (رابطه ۱) نشان داد که مدل ارائه‌شده در سطح پنج درصد معنی‌دار و با توجه به ضریب دوربین واتسون مناسب، اعتبار لازم را دارد (حبیب‌پور گتایی و

جدول ۲- خلاصه اطلاعات تجزیه واریانس عوامل تأثیرگذار بر حجم آبکند

| منبع تغییر      | درجه آزادی | مجموع مربعات | متوسط مربعات | F     | P     |
|-----------------|------------|--------------|--------------|-------|-------|
| همبستگی         | 4          | 78064        | 19516        | 3.60  | 0.018 |
| پتاسیم          | 1          | 14941        | 14941        | 2.75  | 0.109 |
| جرم مخصوص ظاهری | 1          | 13986        | 13986        | 2.58  | 0.120 |
| بقایای گیاهی    | 1          | 59436        | 59436        | 10.96 | 0.003 |
| خاک لخت         | 1          | 38685        | 38685        | 7.13  | 0.013 |
| خطا             | 27         | 146466       | 5425         |       |       |
| کل              | 31         | 224530       |              |       |       |

بر اساس جدول ضرایب مدل‌ها عامل حجم آبکند به‌عنوان متغیر وابسته و عوامل فوق‌الذکر به‌عنوان متغیر مستقل در رابطه ۱ معرفی شد (جدول ۳). مقدار شاخص آماره آزمون VIF با آستانه ۱۰ نشان داد هیچ‌یک از عوامل، هم خطی ندارند و رابطه به‌دست‌آمده دارای اعتبار و در سطح یک درصد معنی‌دار بود (رابطه ۱).

جدول ۳- ضرایب مدل معرفی شده برای مدل تعیین حجم آبکندها

| مشخصه           | ضریب  | انحراف معیار | T*    | P     | VIF  |
|-----------------|-------|--------------|-------|-------|------|
| ضریب ثابت       | -4586 | 1641         | -2.80 | 0.009 | -    |
| پتاسیم          | -12.1 | 7.33         | -1.66 | 0.109 | 1.31 |
| جرم مخصوص ظاهری | 250   | 155          | 1.61  | 0.120 | 1.19 |
| بقایای گیاهی    | 129.0 | 39.0         | 3.31  | 0.003 | 8.95 |
| خاک لخت         | 45.0  | 16.9         | 2.67  | 0.013 | 9.25 |

T\*: نسبت تفاوت P: سطح احتمال معنی داری VIF: عامل تورم واریانس

(۱)

$C40 = -4586 - 12.1C9 + 250C16 + 129.0C29 + 45.0C30$   
 که در آن C40: حجم آبکند، C9: پتاسیم، C16: جرم مخصوص ظاهری، C29: بقایای گیاهی و C30: درصد خاک لخت است.

همان‌طور که رابطه مدل نشان می‌دهد با افزایش مقدار پتاسیم محلول در خاک، حجم آبکندها کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد با توجه به مقدار بالای سدیم در نمونه‌های خاک منطقه، هر جا با افزایش نسبی پتاسیم همراه بوده، به دلیل شعاع یونی کمتر و متعاقباً کاهش میزان قابلیت پراکنش خاکدانه، از شدت فرسایش و حجم آبکندها کاسته شده بود، هرچند اثبات و تأیید نهایی این موضوع به تحقیق بیشتر در این زمینه نیاز دارد. از طرفی مدل نشان می‌دهد که با افزایش هر دو عامل درصد بقایا و درصد خاک لخت نیز حجم آبکندها افزایش می‌یابد. از آنجایی که این دو عامل رابطه منفی باهم دارند و از طرفی مقدار پوشش باید حداقلی باشد تا تأثیر کاهشی بر فرسایش داشته باشد (به عنوان نمونه کلبعلی و همکاران، ۱۳۹۹ درصد متوسط ۲۵ و برخی منابع حداقل ۳۰ درصد را برای اثرگذاری اعلام کرده‌اند)، به نظر

می‌رسد که به علت پایین بودن بقایا از مقدار آستانه مؤثر بر کاهش فرسایش یا منبع خطای ناشناخته دیگر، نتیجه غیرمنطقی توسط نرم‌افزار محاسبه و اعلام شده است. به منظور بررسی اختلاف میانگین حجم آبکند اندازه‌گیری شده و مقدار محاسباتی حاصل از مدل‌های ارائه شده، برای حدود ۳۰ درصد باقیمانده از مشاهدات، از آماره‌های درصد، RMSE، CRM، NSE، MAE،  $d_{rel}$  و  $R^2$  استفاده شد (جدول ۴). نتایج نشان داد که از نظر شاخص اختلاف نسبی (درصد)، حدود ۷۷ درصد و بر اساس معذور میانگین مربعات خطا و میانگین خطا نیز به ترتیب ۳۸ و ۳۲ مترمکعب یعنی به ترتیب ۱٫۸ و ۱٫۶ برابر میانگین حجم مشاهده‌ای بیش برآوردی شده است. همچنین بر اساس محدوده‌های معرفی شده برای پذیرش کارایی مدل، ناش-ساتکلیف،  $CD$ ،  $d_{rel}$  و RMSE، کارایی پایین مدل را نشان می‌دهد (همائی و همکاران، ۲۰۰۲؛ کراسو و همکاران، ۲۰۰۵) و بر اساس نتایج تحقیق و به خصوص با تکیه ضریب کارایی نش-ساتکلیف، مدل معتبری توسعه داده نشده است، لذا استفاده از میانگین داده‌ها به عنوان پیش‌بینی کننده (مدل) بسیار بهتر از یک مدل ضعیف است.

جدول ۴ - دقت حجم برآوردی مدل در مقایسه با حجم اندازه‌گیری شده آبکندها

| نام شاخص   | متوسط حجم برآوردی مدل (مترمکعب) | متوسط حجم مشاهده‌ای (مترمکعب) | درصد | CD    | NSE   | CRM   | RMSE  | MAE  | $d_{rel}$ |
|------------|---------------------------------|-------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|------|-----------|
| مقدار شاخص | 37                              | 20.9                          | 77   | 0.022 | -9.43 | -0.29 | 38.17 | 32.4 | 0.75      |

CD: ضریب تعیین NSE: کارایی نش- ساتکلیف CRM: ضریب جرم باقیمانده RMSE: میانگین ریشه مربعات خطا MAE: میانگین خطای مطلق  $d_{rel}$ : شاخص انحراف نسبی

نتایج تحلیل با استفاده از روش آنالیز مؤلفه اصلی نشان داد که عوامل مستقل مؤثر بر ایجاد و گسترش آبکندها، در مناطق مختلف، متغیر بود ولی مقدار واریانس داده‌ها در تمامی مناطق به‌طور تقریبی نزدیک به هم و در محدوده ۸۴ تا ۸۹ درصد به دست آمد. این بدان معناست که حدود ۱۱ تا ۱۶ درصد از کل واریانس داده‌ها قابل تبیین نبود، که با بررسی متغیرهای اضافی درزمینه ویژگی‌های مختلف، اعم از ویژگی‌های ذاتی خاک، پوشش منطقه و ویژگی‌های هیدرو اقلیمی قابل افزایش بود.

وزن و درصد تغییرات عامل‌های مختلف خاکی و غیرخاکی، بیانگر اهمیت آن‌ها در ایجاد و گسترش آبکندها است که در این میان برخی ویژگی‌های خاکی (پتاسیم و جرم مخصوص ظاهری) و مؤلفه‌های حوضه (بقایای گیاهی و درصد خاک لخت)، بیشترین تأثیرگذاری را نشان دادند (محمدابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۴؛ صوفی و همکاران، ۲۰۲۰).

در مدل برآوردی، معنی‌داری و همبستگی بالای بین داده‌های مشاهده‌ای و برآوردی به‌دست‌آمده است، اما این شرط برای اعتبار مدل کافی نیست. بنابراین استفاده از آزمون استقلال خطاها، آزمون هم خطی و بررسی نرمال بودن خطاها بررسی شد و نتایج نشان داد که خطاهای برآوردی مدل‌های ارائه‌شده دارای توزیع نرمال و مدل‌های ارائه‌شده دارای اعتبار و قابل استفاده بودند. همچنین خلاصه اجرای آزمون دوربین-واتسون نشان از عدم همبستگی بین خطاها داشت و آماره مربوطه نشانگر قابلیت استفاده و اعتماد به مدل بود.

عواملی مثل شوری، فقر پوشش گیاهی و حساسیت بافت خاک باعث افزایش هدر رفت می‌شود. اثر مشخصات آبخیز آبکند و مورفولوژی آن روی عامل هیدرولوژی و رواناب مؤثر است و بر ایجاد و گسترش آبکند تأثیر دارند. این یافته‌ها با نتایج یثربی و همکاران (۱۳۹۲) در خصوص نقش ماده آلی به دلیل بهبود پایداری ساختمان خاک و متعاقباً افزایش نفوذپذیری، رستمی‌زاد و همکاران (۱۳۹۴) با معرفی نقش درصد آهک (کمک به

کاهش فرسایش‌پذیری خاک) و ضریب کشیدگی (تغییر زمان تمرکز رواناب) و شهاب آرخازلو و همکاران (۱۳۹۵) در رابطه با تأثیر ویژگی‌های خاک سطحی همخوانی داشت. نتیجه بررسی رابطه بین حجم اندازه‌گیری شده آبکند به‌عنوان متغیر وابسته و دیگر مشخصات خاک و سطح آبخیز آبکند به‌عنوان متغیر مستقل نشان داد که در هر منطقه چه عواملی بر آن مؤثر هستند. ضریب همبستگی در رابطه به‌دست‌آمده برای منطقه نظرآباد ۰/۵۸۹۶ بود و چهار عامل مستقل  $C9 (K^+ \text{ meq/l})$ ،  $C16$  (جرم مخصوص ظاهری)،  $C29$  (درصد لاشبرگ) و  $C30$  (درصد خاک لخت) نماینده ۳۴/۷۷ درصد تغییرات بودند. بر اساس این نتیجه، تغییر یک واحد انحراف استاندارد در متغیر جرم مخصوص ظاهری، حجم آبکند را به مقدار ۲۵۰ واحد انحراف استاندارد افزایش می‌دهد که نشان‌دهنده اهمیت این شاخص است که خود تحت تأثیر تراکم دام در مرتع و زمان چرا است. جرم مخصوص با اثر بر ساختمان خاک، نفوذپذیری و همچنین شرایط رشد و توسعه ریشه گیاه، بر مقدار رواناب و نهایتاً هدر رفت خاک تأثیرگذار است و از طرفی تغییرات  $Bd$  به حضور ماده آلی همبستگی دارد که خود تابع مقدار پوشش گیاهی است و بر پایداری خاکدانه‌ها تأثیر می‌گذارد (محمدابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۴؛ شهاب آرخازلو و همکاران، ۱۳۹۵؛ صوفی و همکاران، ۲۰۲۰).

نظر به اثر عامل درصد خاک لخت، می‌توان نتیجه گرفت که این عامل مستقیماً بر سرعت جریان (رواناب) اثرگذار است؛ به‌طوری‌که هر چه در محدوده‌ی مساحتی آبخیز بالای پیشانی آبکندها، خاک لخت بیشتری وجود داشته باشد، رواناب تولیدی فرصت و قدرت بیشتری برای تخریب و هدر رفت خاک و در پی آن رشد آبکندها دارد. حضور عامل ضریب شکل نشان‌دهنده این است که در حوزه‌های کشیده‌تر، حجم آبکندها بیشتر است؛ بنابراین با کشیده‌تر شدن آبخیزها و به دنبال آن گسترش محدوده‌ی مساحتی تحت اشغال آبکند، فقدان پوشش گیاهی و افزایش خاک لخت در این محدوده، فضای بیشتری برای پیشروی و افزایش حجم آن‌ها فراهم می‌شود (بوریان، ۲۰۱۵).

همچنین با توجه به مقدار ماده‌ی آلی خیلی کم و در نظر گرفتن آستانه‌ی ۳/۵ درصدی ماده‌ی آلی جهت تفکیک خاک‌های فرسایش‌پذیر طبق نظر مورگان (۱۹۹۵) و مورگان و منمزیلو (۲۰۰۳)، منطقه مورد مطالعه دارای ماده‌ی آلی لازم برای ایجاد مقاومت در برابر فرسایش آبی نیست و پژوهش‌گران دیگر مانند مکرم و محمودی (۱۳۹۵) نیز تأثیر مقدار ماده آلی را تأیید کردند. محمدابراهیمی (۱۳۹۶)، نیسی و همکاران (۱۳۹۶)، فریدگیلو و قضاوی (۱۳۹۷)، اهیسی و اوموگبو (۲۰۱۳) نیز بر مقدار سیلت، سدیم محلول، ماده آلی و هدایت الکتریکی به عنوان عوامل مؤثر بر آبکند تأکید کردند که در پژوهش حاضر نیز نتیجه‌ای هم‌راستا با آن‌ها به دست آمده آمد.

### نتیجه‌گیری

همان‌طور که نتایج نشان داد فقر پوشش گیاهی و مقادیر بالای سیلت، سدیم و کلر موجود در خاک و در مقابل ماده آلی پایین آن سبب فرسایش‌پذیری بالای خاک شده که با نبود پوشش گیاهی و چرای بی‌رویه، منطقه را دچار فرسایش سطحی و فرسایش آبکندی و در پی آن، هدر رفت خاک نموده است و صوفی و همکاران (۲۰۲۰) نیز بر نتایج مشابهی در منطقه تأکید کرده‌اند. با توجه به نتایج تحقیق مبنی بر پوشش گیاهی ضعیف منطقه و به‌منظور کاهش پیشروی آبکندها، تقویت و احیاء پوشش گیاهی پیشنهاد می‌شود. از سوی دیگر، می‌توان با اقدامات مکانیکی محدود مانند بانکت بندی و یا احداث بندهای

خاکی کوتاه در آبکندها، علاوه بر ایجاد سامانه‌هایی برای استحصال آب باران، سرعت رواناب را کاهش داد و از این راه آب را جمع‌آوری و برای استقرار پوشش گیاهی به‌کارگرفت.

در خصوص کارایی مدل نیز یافته‌ها نشان می‌دهد که بیشتر شاخص‌ها بخصوص ناش ساتکلیف در حد کفایت پذیرش کارایی مدل قرار ندارند و مدل توسعه داده‌شده واجد شرایط پذیرش و کاربرد نیست. هرچند توجه به این نکته ضرورت دارد که در پدیده‌های طبیعی که متغیرهای زیادی روی آن‌ها اثرگذار هستند، رسیدن به چنین نتایجی دور از ذهن نیست چراکه مدل‌های معرفی شده همه عوامل مؤثر را در نظر نمی‌گیرند.

با توجه به مشاهده اثرات چرای گله‌های دام بهره‌برداران بومی در مراتع منطقه و به اهمیت جاده ارتباطی بین نظرآباد و ماهدشت که در اثر پیشرفت آبکندهای منطقه تهدید می‌شود و فاصله آبکندها با جاده به کمتر از ۲۵۰ متر رسیده است (شکل ۴)، ارائه گزارشی از توسعه شدید آبکندها برای مسئولین ذیربط اهمیت دارد تا با اصلاح آبگذرهای موجود و بهبود شرایط نگهداشت آب در بالادست با برخی اقدامات مدیریتی، مکانیکی و بیولوژیک، از سرعت رواناب کاسته و به مهار گسترش آبکندها و کاهش هدر رفت خاک کمک کنند. این تحقیق نشان داد که به‌کارگیری پهپاد برای نقشه‌برداری باعث تسهیل و تسریع در تهیه نقشه محدوده، ترسیم مرز و تعیین مشخصات آبخیز آبکندها و فراهم شدن یک دید کلی از منطقه شد

### فهرست منابع

۱. ابراهیمی، م.، امیر احمدی، ا. و زنگنه اسدی، م. ۱۳۹۶. مقایسه تهیه نقشه حساسیت به فرسایش آبکندی با استفاده از مدل‌های احتمالاتی وزن واقعه و نسبت فراوانی در حوضه آبخیز سنگانه کلات. فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، ۴(۱۲۷)، ۱۰۵-۱۲۷.
۲. امیری، م.، پورقاسمی، ح.، قنبریان، غ. و افضلی، س. ف. ۱۳۹۸. مدلسازی مکانی فرسایش خندقی حوزه آبخیز مهارلو با استفاده از سناریوهای مختلف و الگوریتم وزن واقعه. نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز. ۱۱(۴)، ۱۰۱۶-۱۰۳۲.

۳. پیروان، ح. ۱۳۹۵. بازنگری، تکمیل و انتشار اطلس سیمای حوزه های آبخیز کشور (حوزه دریاچه نمک مرکزی). گزارش نهایی، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری.
۴. حبیب‌پور گتایی، ک. و صفری شالی ر. ۱۳۹۰. راهنمای جامع کاربرد SPSS در تحقیقات پیمایشی: (تحلیل داده‌های کمی). نشر متفکران.
۵. خزایی، م.، شفیعی، ا.، و ملایی، ع. ۱۳۹۱. بررسی تأثیر عوامل مؤثر بر توسعه فرسایش آبکندی در حوضه آبخیز مارون. پژوهش‌های خاک، ۲۶(۲)، ۱۵۳-۱۶۳.
۶. راهی، غ.، کاویان، ع.، سلیمانی، ک. و پورقاسمی، ح. ۱۴۰۰. تعیین نقش کاربری اراضی و خاک بر آستانه توپوگرافی توسعه خندق‌ها در استان بوشهر. مرتع و آبخیزداری، ۷۴(۱)، ۶۹-۸۱.
۷. رستمیزاد، ق.، سلاجقه، ع.، نظری سامانی، ع.ا. و قدوسی، ج. ۱۳۹۴. تعیین عوامل مؤثر بر رشد طولی خندق‌ها و پیش‌بینی گسترش آن (مطالعه موردی: شهرستان دره شهر). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۴(۱)، ۴۶-۵۸.
۸. شهاب آرخازلو، ح.، امامی، ح.، حق‌نیا، غ.، اسمعیلی، ا. و محمودآبادی، م. ۱۳۹۵. تعیین آستانه توپوگرافی و تأثیر ویژگی‌های خاکی بر گسترش آبکندها در سه منطقه از استان اردبیل. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۳(۳)، ۱-۲۴.
۹. شهاب آرخازلو، ح. و اصغری، ش. ۱۳۹۹. برآورد فرسایش خندقی بر پایه معادلات REGEM و اصلاح ضرایب آن در استان اردبیل. تحقیقات کاربردی خاک، ۱۸(۱)، ۱۶۲-۱۷۳.
۱۰. شیرانی، ک. ۱۴۰۰. پهنه‌بندی و ارزیابی نقشه حساسیت فرسایش خندقی با استفاده از روش‌های آماری و احتمالاتی. علوم آب و خاک، ۲۵(۲)، ۱۵۱-۱۷۴.
۱۱. صفاری، ا.، کرم، ا.، شادفر، ص. و احمدی، م. ۱۳۹۸. تأثیر ویژگی‌های خاک بر مورفولوژی و گسترش فرسایش خندقی (مطالعه موردی: حوضه رودخانه مهران لامرد، فارس). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۸(۱)، ۱۳۰-۱۴۶.
۱۲. صوفی، م. و عیسایی، ح. ۱۳۸۹. برآورد حجم فرسایش آبکندی با استفاده از ویژگی‌های مورفومتریک و خاک در آبکندهای استان گلستان. مجله مهندسی و مدیریت آبخیز، ۲(۲)، ۷۳-۸۲.
۱۳. علی‌احیایی، م. و بهبهانی زاده، ع.ا. ۱۳۷۲. شرح روشهای تجزیه شیمیایی خاک. نشریه موسسه تحقیقات خاک و آب، شماره ۸۹۲، ص ۷۷.
۱۴. عرب‌خدری، م.، گرامی، ز.، شادفر، ص.، بیات، ر.، پرویزی، ی. و نبی‌پی لشکریان، س. ۱۳۹۹. مقایسه کارایی چند معادله برآورد شاخص فرسایش‌پذیری مدل USLE در شرایط آزمایشگاهی. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۱(۷): ۱۷۲۵-۱۷۳۶.
۱۵. فریدگیگلو، ب. و قضاوی ر. ۱۳۹۷. بررسی نقش ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک آبکند و عوامل زمین محیطی حوضه بالادست آن بر گسترش فرسایش آبکندی. نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، ۲۲(۳)، ۲۷۳-۲۸۶.
۱۶. قزل‌سوفلو، ع.، مغربی، م. و داروغه، ف. ۱۳۹۷. شناسایی و تعیین میزان گسترش در آبکندهای فعال با استفاده از سنجش از راه دور. نشریه آب و توسعه پایدار، ۵(۱)، ۶۷-۷۲.

۱۷. کاظمی ر. و پرهمت ج. ۱۳۹۷. بررسی تأثیر روشهای خوشه‌بندی سلسله مراتبی در دقت مدل‌سازی ضریب جریان در حوضه کرخه. نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۰(۱)، ۸۱-۹۴.
۱۸. کلبعلی س.، قربانی دشتکی ش.، نادری م.، میرزائی س. ۱۳۹۹. بررسی تأثیر پوشش سنگ‌ریزه سطحی بر میزان رواناب و فرسایش خاک با شبیه‌سازی رواناب. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۱۴ (۴۸): ۵۲-۵۸.
۱۹. محمدابراهیمی، م. ۱۳۹۶. شناسایی علل وقوع فرسایش خندقی با تأکید بر خصوصیات خاک (مطالعه موردی: حوزه آبخیز آق امام). نشریه حفاظت منابع آب و خاک، ۷(۲)، ۱-۱۳.
۲۰. محمدابراهیمی، م.، جوادی، م. و وفاخواه، م. ۱۳۹۴. بررسی ارتباط عوامل مؤثر خاکی و غیرخاکی در ایجاد فرسایش خندقی خطی در حوزه آبخیز آق امام (۲). پژوهش‌های خاک، ۲۹(۴)، ۴۷۸-۴۹۸.
۲۱. مکرم، م. و محمودی، ع. ۱۳۹۵. بررسی ویژگیهای مورفومتری خندقها و ارتباط آن با ویژگیهای خاک. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۳، ۱۳۳-۱۴۵.
۲۲. نیسی، س.، خلیلی مقدم، ب. و ذرتی پور، ا. ۱۳۹۶. مدل‌سازی عوامل مؤثر بر رشد طولی خندقهای مارنی و تعیین سهم تولید رسوب حاصل از آنها (مطالعه موردی: حوزه درب خزینه، خوزستان). مرتع و آبخیزداری، منابع طبیعی ایران، ۷۰(۲)، ۵۴۱-۵۳۱.
۲۳. یثربی، ب.، صوفی، م.، میرنیا، س.خ. و محمدی، ج. ۱۳۹۲. بررسی تأثیر ویژگیهای توپوگرافی و خاک بر گسترش آبکندهای جبهه‌ای در کاربری کشاورزی، مطالعه موردی: استان ایلام. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱(۵)، ۳۱-۹۱.
24. Amiri M., Pourghasemi H.R., Ghanbarian G.A., and Afzali S.F. 2019. Assessment of the importance of gully erosion effective factors using Boruta algorithm and its spatial modeling and mapping using three machine learning algorithms. *Geoderma*, 340: 55-69.
25. Arabameri A., Pradhan B., and Rezaei K. 2019. Gully erosion zonation mapping using integrated geographically weighted regression with certainty factor and random forest models in GIS. *Journal of Environmental Management*, 232: 928-942.
26. Bergonse B., and Reis E. 2016. Controlling factors of the size and location of large gully systems: A regression-based exploration using reconstructed pre-erosion topography. *Catena*, 147: 621-631.
27. Burian R., Vladimirovich Mitusov A., and Poesen J. 2015. Relationships of attributes of gullies with morphometric variables. *Geomorphometry for Geosciences*, Jasiewicz J., Zwoliński Zb., Mitasova H., Hengl T. (eds). Adam Mickiewicz University in Poznań - Institute of Geoecology and Geoinformation, International Society for Geomorphometry, Poznań.
28. Castillo C., and Gomez J.A. 2016. A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches. *Earth Science Reviews*, 160: 300-319.
29. Dai W., Yang X., Nab J., Lib J., Brus D., Xiong L., Tang G., and Huang X. 2019. Effects of DEM resolution on the accuracy of gully maps in loess hilly areas. *Catena*, 177: 114-125.
30. Ehiorobo J.O., and Audu H.A.P. 2012. Monitoring of gully erosion in an urban area using geoinformation technology. *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAS)* 3(2): 270-275.



31. Ehis O.S., and Omougbo U.N. 2013. Evaluating factors responsible for gully development at the university of Benin. *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAS)* 4(5): 707-713.
32. Frankl A., Poesen J., Scholiers N., Jacob M., Haile Mitiku Deckers J., and Nyssen J. 2013. Factors controlling the morphology and volume (V) – length (L) relations of permanent gullies in the Northern Ethiopian Highlands. *Earth Surf Process Landforms*, online early view.
33. Homae M. Feddes R. A. and Direksen CA. 2002. Macroscopic water extraction model for non-uniform transient salinity and water stress. *Soil Science Society of America Journal*, 66: 1764-1772.
34. Kariminejad N., Hosseinalizadeh M., and Pourqasmi H. 2018. Spatial monitoring of piping erosion using UAV aerial images in loess lands of Golestan Province. *Watershed Management research*, Online publication.
35. Karimov V., Sheshukov A., and Barnes P. 2014. Impact of precipitation and runoff on ephemeral gully development in cultivated croplands. *Sediment Dynamics from the Summit to the Sea, Proceedings of a symposium held in New Orleans, Louisiana, USA, (IAHS Publ. 367, 2014)*. Pp. 87-92.
36. Karimov V.R., and Sheshukov A.Y. 2017. Effects of intra-storm soil moisture and runoff characteristics on ephemeral gully development: evidence from a no-till field study. *Water*, 9(10): 742.
37. Koci J., Sidle R.C., Jarihani B., and Cashman M.J. 2020. Linking hydrological connectivity to gully erosion in the catchment of a savanna rangelands tributary which flows to the great barrier reef using structure-from-motion photogrammetry. *Land Degradation and Development*, 31:20
38. Krause P., Boyle D. P., and B'ase F. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model Assessment. *Advances in Geosciences*, 5, 89–97.
39. Kumar Shit P., Sankar Bhunia G., and Maiti R. 2013. assessment of factors affecting ephemeral gully development in badland topography: a case study at Garbheta Badland (Pashchim Medinipur, West Bengal, India). *International Journal of Geosciences*, 4: 461-470.
40. Li Z., Zhang Y., Zhu Q., Yang S., Li H., and Ma H. 2016. A gully erosion assessment model for the Chinese Loess Plateau based on changes in gully length and area. *Catena*, 148(2): 195-203.
41. Liu K., Ding H., Tang G., Na g., Huang J., Xue Z., Yang X., and Li F. 2016. Detection of catchment-scale gully-affected areas using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) on the Chinese Loess Plateau. *ISPRS, International Journal of Geo-Information*, 5(238): 2-21.
42. Lucà F., Conforti M., and Robustelli G. 2011. Comparison of GIS-based gully susceptibility mapping using bivariate and multivariate statistics: Northern Calabria, South Italy. *Geomorphology*, 134: 297–308.
43. Marzolff I., Poesen J., and Ries J.B. 2011. Short to medium-term gully development: Human activity and gully erosion variability in selected Spanish gully catchments. *Landform Analysis*, 17: 111–116.
44. Morgan R.P.C., and Mnomezulu D. 2003. Threshold conditions for initiation of valley-side gullies in middle veld of Swaziland. *Catena*, 50: 401-414.
45. Morgan, R.P.C. 1995. *Soil Erosion and Conservation*. 2<sup>nd</sup> end, Longman Press, 320p.
46. Oyegun CU., Ereka U.N., and Eludoyin OS. 2016. Gully characterization and soil properties in selected communities in Ideato South Lga, Imo State, Nigeria. *Natural Sciences*, 14(2): 78-86.
47. Raveloson A., Székely B., Molnár G., and Rasztovits S. 2013. The possibility of using photogrammetric and remote sensing techniques to model lavaka (gully erosion) development in Madagascar. *Geophysical Research Abstracts*, 15: EGU2013-8005-1.

48. Saksa M., and Minar J. 2012. Assessing the natural hazard of gully erosion through a Geoecological Information System (GeIS): a case study from the Western Carpathians. *Geografie*, 117(2): 152–169.
49. Siqueira Junior P., Silva MLN., Cândido B.M., Avalos F.A.P., Batista P.V.G., Curi N., Lima W., Quinton J.N. 2019. Assessing water erosion processes in degraded area using unmanned aerial vehicle imagery. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 43: e0190051.
50. Soufi M., Bayat R., and Charkhabi A.H. 2020. Gully Erosion in I. R. Iran: Characteristics, Processes, Causes, and Land Use. In: Shit P., Pourghasemi H., Bhunia, G. (eds) *Gully Erosion Studies from India and Surrounding Regions. Advances in Science, Technology & Innovation. Springer, Cham.*  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-23243-6\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-030-23243-6_23)
51. Wang R., Zhang S., Pu L., Yang J., Yang C., Chen J., Guan C., Wang Q., Chen D., Zegeye A.D., Langendoen E.D., Stoof C., Seifu A., Tilahun S.A., Dagnew D.C., Zimale F.A., Guzman. C.D., Yitaferu B., and Steenhuis T.S. 2016. Morphological dynamics of gully systems in the subhumid Ethiopian Highlands: the Debre Mawi watershed. *SOIL*, 2(443–458).

# کارایی سه مدل kNN، RF و SVM و مدل به دست آمده از ترکیب آنها به روش GR برای مدل‌سازی بافت خاک

فرشته میرزایی، علیرضا امیریان چکان\*، روح‌الله تقی‌زاده مهرجردی و حمیدرضا متین‌فر

دانشجوی دکتری گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران: f.mirzaie1374@gmail.com

استادیار گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران: amirian.ar@lu.ac.ir

استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران: rtaghizadeh@ardakan.ac.ir

استاد گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران: matinfar.h@lu.ac.ir

«مقاله پژوهشی»

دریافت: ۱۴۰۲/۹/۱۸ و پذیرش: ۱۴۰۳/۲/۲۲

## چکیده

بافت خاک یکی از مهمترین ویژگی‌هایی است که رفتار فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک را کنترل می‌کند. روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی بافت خاک استفاده می‌شوند. یکی از راهکارهای سود بردن از مزایای این مدل‌ها ترکیب تخمین آنها است. با توجه به این که بافت خاک یک داده مرکب است، وقتی اجزاء آن جداگانه تخمین زده می‌شوند تضمینی برای اینکه جمع سه جزء برابر ۱۰۰ شود وجود ندارد، هرچند می‌توان از تبدیل‌های نسبت لگاریتمی (log-ratio) استفاده کرد. اطلاعات کمی در خصوص کارایی مدل‌های ترکیبی در مدل‌سازی داده‌های تبدیل‌شده و نشده بافت خاک وجود دارد و به نظر می‌رسد بر اساس این رویکرد تا کنون مطالعه‌ای روی بافت خاک انجام نشده است. در این بررسی، تعداد ۲۰۰ نمونه خاک‌های سطحی از منطقه کوه‌دشت برداشت شد. سه مدل جنگل تصادفی (RF)، k نزدیکترین همسایه (kNN) و ماشین‌های بردار پشتیبان (SVM) و مدل حاصل از ترکیب آن‌ها به روش Granger-Ramanathan (GR) برای مدل‌سازی، روش‌های نسبت لگاریتمی جمع‌پذیر (alr)، نسبت لگاریتمی مرکزی (clr) و نسبت لگاریتمی ایزومتریک (ilr) برای تبدیل داده‌ها و داده‌های حاصل از مدل رقومی ارتفاع (DEM) و تصاویر لندست ۸ و سنتینل ۲ به عنوان ورودی مدل‌ها استفاده شد. نتایج نشان داد که متغیرهای استخراج‌شده از DEM اهمیت بیشتری در پیش‌بینی بافت خاک داشت. به‌طور کلی، هر چهار مدل با استفاده از تبدیل alr منجر به تخمین‌های بهتری نسبت به تبدیل‌های clr و ilr و داده‌های تبدیل‌نشده (UT) گردید. مدل ترکیبی (GR) با مقادیر RMSE برابر با ۵/۰۷، ۴/۲۱، ۵/۸۱ و ۶/۰۹ درصد برای رس، مقادیر ۷/۱۱، ۵/۱۵، ۹/۰۴ و ۶/۷۰ درصد برای سیلت و ۷/۶۷، ۱۱/۶۹ و ۸/۷۴ درصد برای شن به ترتیب برای داده‌های UT و تبدیل‌های alr، clr و ilr منجر به بهبود تخمین‌ها نگردید. به‌طور کلی، کارایی مدل SVM با داده‌های تبدیل‌شده به روش نسبت لگاریتمی جمع‌پذیر کمی بیشتر از سایر مدل‌ها بود. نتایج نشان داد که ترکیب چند مدل یادگیری ماشین الزاما باعث بهبود تخمین‌ها نمی‌گردد و می‌توان از یک مدل مناسب برای برآورد بافت خاک استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: تبدیل لگاریتمی، جنگل تصادفی، داده مرکب، مدل‌های ترکیبی

\* آدرس ایمیل نویسنده مسئول: amirian.ar@lu.ac.ir

## مقدمه

بافت خاک یکی از مهم‌ترین خصوصیات فیزیکی خاک است که بیشتر فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی و هیدرولوژیکی خاک را کنترل می‌کند و نقش مهمی در حساسیت خاک به تخریب، انتقال و توزیع آب در خاک، کیفیت خاک و بهره‌وری از آن دارد. بافت خاک توانایی نگهداری آب و عناصر غذایی، نفوذپذیری، زهکشی، تهویه، مقدار کربن آلی، ظرفیت بافری، تخلخل و بسیاری از خواص دیگر خاک را تحت تاثیر قرار می‌دهد (اکپا و همکاران، ۲۰۱۴). همچنین در مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی، اکولوژیکی و زیست-محیطی، بافت خاک معمولاً به عنوان ورودی توابع انتقالی خاک استفاده می‌شود (میناسنی و مک براتنی، ۲۰۱۸؛ ون لوی و همکاران، ۲۰۱۷)؛ بنابراین داشتن داده‌های دقیق و کمی از بافت خاک اهمیت زیادی در مدیریت اراضی زراعی، منابع طبیعی و محیط زیست دارد.

بافت خاک رایج‌ترین داده مرکب<sup>۱</sup> در علوم خاک است. داده مرکب داده‌ای است که دارای چند جزء غیر منفی است که مجموع آنها برابر با واحد است (ایتچیسون، ۱۹۸۶). چون بافت خاک یک داده مرکب است، وقتی اجزاء آن (رس، سیلت و شن) توسط روش‌های یادگیری ماشین به صورت جداگانه تخمین زده می‌شوند تضمینی برای این-که مجموع اجزاء تخمینی برابر با واحد شود وجود ندارد (لارک و بیشاپ، ۲۰۰۷). یک روش رایج برای رفع این مشکل این است که دو جزء تخمین زده شوند و جزء سوم از اختلاف مجموع دو جزء تخمینی از عدد واحد به دست آید. در این صورت بسته به این‌که ابتدا کدام دو جزء تخمین زده می‌شوند، ممکن است برای یک جزء تخمین‌های متفاوتی به دست آید. در نتیجه در مدل‌سازی‌هایی که نیاز

است اجزاء بافت خاک تخمین زده شوند ممکن است نتایج متفاوتی به دست آید. راهکار مناسب دیگر برای تضمین برابر با ۱۰۰ شدن تخمین‌ها استفاده از تبدیل‌های log-ratio معرفی شده توسط ایتچیسون (۱۹۸۶) است. تبدیلات  $\text{clr}^2$  و  $\text{ilr}^3$  از روش‌های رایج تبدیل داده‌های مرکب هستند (ایتچیسون، ۱۹۸۶؛ آگوزکیو و همکاران، ۲۰۰۳؛ فیلزموستر و همکاران، ۲۰۰۹). با وجود این که از این تبدیلات برای مدل‌سازی بافت خاک استفاده شده است (اوده و همکاران، ۲۰۰۳؛ لارک و بیشاپ، ۲۰۰۷؛ لیو و همکاران، ۲۰۱۲؛ اکپا و همکاران، ۲۰۱۴؛ پوگیو و گیمونا، ۲۰۱۷؛ وانگ و شی، ۲۰۱۷)، ولی مقایسه کارایی روش‌های مختلف یادگیری ماشین در مدل‌سازی داده‌های تبدیل شده فقط در مطالعات کمی انجام گرفته است.

روش‌های مبتنی بر فنون نقشه‌برداری رقومی خاک، از رویکردهای مناسب برای کسب داده‌های کمی، مکانی و پیوسته از بافت خاک هستند. گسترش تکنیک‌های نقشه‌برداری رقومی خاک و افزایش علاقه به اشتراک داده‌ها اغلب منجر به در دسترس بودن نقشه‌های متعدد برای یک منطقه و یک ویژگی خاص می‌شود و این نقشه‌ها معمولاً از نظر مقیاس، وسعت، روش مدل‌سازی و دقت متفاوت هستند (رومن دوبارکو و همکاران، ۲۰۱۷؛ چن و همکاران، ۲۰۲۰). هر کدام از مدل‌های استفاده شده در تهیه این نقشه-ها دارای ایرادات و مزایای خاص خود است و یک مدل واحد معمولاً در همه شرایط مناسب نیست. یک رویکرد مناسب برای سود بردن از مزایای مدل‌های مختلف و به-دست آوردن نقشه‌های دقیق‌تر، ترکیب و یا میانگین‌گیری از تخمین‌های آن‌ها است. ایده روش‌های میانگین‌گیری این است که اگر چندین مدل ضعیف را با هم ترکیب کنیم، می‌توانیم یک مدل قوی‌تر ایجاد کنیم (لانترز، ۲۰۱۵)؛ به عبارت دیگر، با میانگین‌گیری از پیش‌بینی‌های مدل‌های

1. Compositional data

2. Additive log-ratio

3. Centred log-ratio<sup>3</sup>4. Isometric log-ratio<sup>4</sup>

معنی‌داری در تخمین اجزاء بافت خاک نسبت به استفاده از هر مدل به صورت جداگانه می‌شود؟ بنابراین هدف این تحقیق به طور مشخص بررسی کارایی سه روش یادگیری ماشین شامل  $k$  نزدیکترین همسایه<sup>۲</sup> (kNN)، جنگل تصادفی<sup>۳</sup> (RF) و ماشین‌های بردار پشتیبان<sup>۴</sup> (SVM) در مدل‌سازی داده‌های تبدیل‌شده و تبدیل‌نشده بافت خاک و مقایسه کارایی این سه مدل با مدل حاصل از ترکیب آن‌ها (مدل GR) می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### مشخصات منطقه

منطقه مورد مطالعه بخشی از دشت داوود رشید در شمال‌غربی شهر کوه‌دشت در استان لرستان به وسعت تقریبی ۲۰۰۰ هکتار می‌باشد که در محدوده طول شرقی ۵۱° ۴۶' تا ۵۰° ۴۷' و عرض شمالی ۹° ۳۳' تا ۵۶' ۳۳' واقع گردیده است (شکل ۱). بر اساس داده‌های ایستگاه هواشناسی کوه‌دشت، میانگین دمای سالانه ۱۶ درجه سانتی‌گراد و میزان بارندگی سالیانه ۴۵۰ میلی‌متر می‌باشد. منطقه دارای اقلیم معتدل با تابستان‌های گرم و زمستان‌های سرد است. به استناد نقشه رژیم‌های رطوبتی و حرارتی خاک‌های ایران (بنایی، ۲۰۰۰)، رژیم‌های رطوبتی و حرارتی خاک‌های منطقه به ترتیب زیریک و ترمیک می‌باشند. ارتفاع متوسط منطقه از سطح دریا حدود ۱۲۲۵ متر است. واحد ژئومورفولوژی منطقه دشت دامنه‌ای و مواد مادری تشکیل دهنده خاک‌های منطقه اغلب آهکی هستند. منطقه از نظر زمین‌شناسی جزء پهنه زاگرس چین‌خورده محسوب می‌شود. پوشش گیاهی بومی منطقه شامل انواع گیاهان مرتعی، زالزالک، بلوط، بادام و کاربری غالب اراضی منطقه شامل کشت دیم گندم و جو و زراعت آبی چغندر، یونجه، ذرت، صیفی‌جات و باغ‌های زردآلو، انجیر و انگور است.

متعدد، می‌توان مدلی ترکیبی ایجاد کرد که در مقایسه با هر کدام از مدل‌ها به صورت جداگانه، عملکرد بهتری داشته باشد (دیکز و وروگت، ۲۰۱۰). روش‌های مختلفی برای این منظور به کار می‌رود که از آن جمله می‌توان به روش‌های میانگین‌گیری با وزن‌های برابر، میانگین‌گیری وزنی بر اساس واریانس، میانگین‌گیری بر اساس مدل بیزی، میانگین‌گیری گرنجر رامناتان<sup>۱</sup> (GR)، میانگین‌گیری بر اساس معیار اطلاعات و میانگین‌گیری مالو اشاره کرد. با وجود این که از این رویکرد برای مدل‌سازی ویژگی‌هایی از جمله شوری خاک (عابدی و همکاران، ۲۰۲۹)، کلاس‌های تاکسونومیک خاک (تقی زاده مهرجردی و همکاران، ۲۰۱۹) و ماده آلی خاک (ملانو و همکاران، ۲۰۱۴؛ چن و همکاران، ۲۰۲۰) استفاده شده است، ولی استفاده از این رویکرد در مدل‌سازی داده‌های خام و تبدیل‌شده (تبدیلات log-ratio) بافت خاک تا کنون گزارش نشده است.

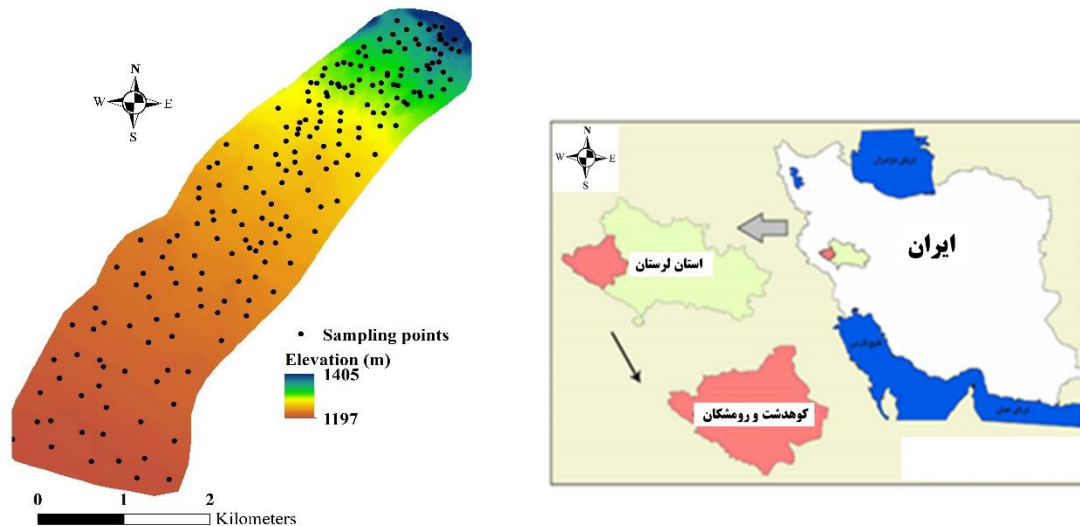
در کشورهایی (مانند ایران) که داده‌های خاک برای ایجاد نقشه‌های قابل اعتماد محدود است، می‌توان از روش میانگین‌گیری از مدل‌ها برای ترکیب نقشه‌های موجود با استفاده از تعداد محدودی از داده‌های واسنجی استفاده کرد (چن و همکاران، ۲۰۲۰). مطالعات محدودی در زمینه کارایی رویکردهای میانگین‌گیری از مدل‌ها برای مدل‌سازی خواص خاک در دنیا و ایران انجام شده است و کارایی این رویکرد در مقایسه با مدل‌های رایج یادگیری ماشین برای مدل‌سازی داده‌های تبدیل‌شده و تبدیل‌نشده بافت خاک تا کنون گزارش نشده است؛ بنابراین در پژوهش حاضر برای نخستین بار کارایی رویکرد ترکیب تخمین‌های مدل‌های یادگیری ماشین مختلف برای برآورد اجزاء بافت خاک با استفاده از داده‌های خام (تبدیل‌نشده) و تبدیل‌شده (تبدیل‌های log-ratio) بر اساس رویکردهای نقشه‌برداری رقومی خاک انجام گرفت. نتایج این پژوهش مشخص می‌کند آیا ترکیب چند مدل که معمولاً باعث پیچیدگی فرایند مدل‌سازی و صرف وقت بیشتری می‌شود باعث بهبود

<sup>3</sup>. Random forest

<sup>4</sup>. Support vector machines

<sup>1</sup>. Granger-Ramanathan averaging

<sup>2</sup>. K-nearest neighbor

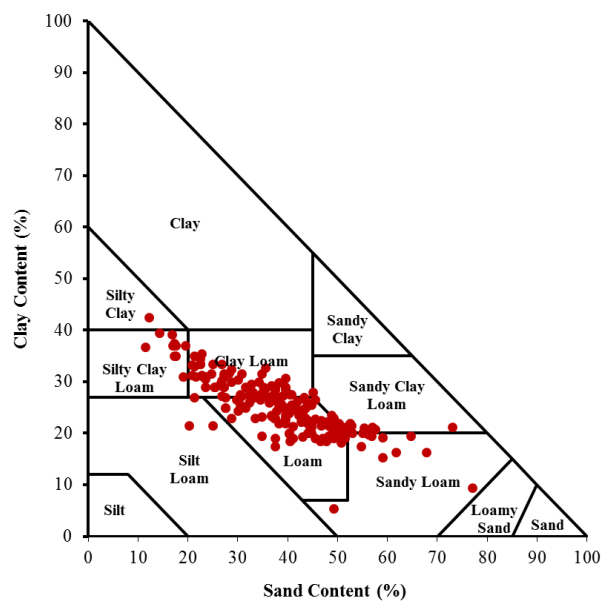


شکل ۱- موقعیت منطقه مورد بررسی و نقاط نمونه‌برداری

و از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند و درصد رس، سیلت و شن آنها به روش هیدرومتر (جی و باوادر، ۱۹۸۶) تعیین شد. در (شکل ۲) توزیع کلاس‌های بافت خاک روی مثلث بافت خاک نشان داده شده است. بیشتر نمونه‌ها دارای کلاس‌های لوم و لومی رسی هستند و تعداد کمتری در کلاس‌های لومی رسی شنی، لومی رسی سیلتی و لومی شنی قرار دارند.

### نمونه‌برداری و تعیین بافت خاک

برداشت نمونه‌های خاک و تعیین بافت خاک در آزمایشگاه در سال ۱۴۰۰ انجام شد. برای انتخاب نقاط نمونه‌برداری، محدوده‌ای انتخاب شد که دارای تنوع مناسبی از نظر بافت بود و تعداد ۲۰۰ نمونه خاک از عمق سطحی (۳۰ سانتی‌متری) به صورت تصادفی برداشت گردید. نمونه‌های خاک پس از خشک شدن در هوای آزاد، کوبیده



شکل ۲- توزیع کلاس‌های بافت نمونه‌های خاک بررسی شده

(۳)

$$x = agl(y) = \left[ \frac{\exp(y_1)}{1 + \sum_{i=1}^{D-1} \exp(y_i)}, \dots, \frac{\exp(y_{D-1})}{1 + \sum_{i=1}^{D-1} \exp(y_i)}, \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{D-1} \exp(y_i)} \right]$$

تبدیل clr داده‌های خام را به مختصات clr به صورت زیر تبدیل می‌کند:

(۴)

$$y = clr(x) = \left[ \ln \frac{x_1}{(\prod_{i=1}^D x_i)^{1/D}}, \ln \frac{x_2}{(\prod_{i=1}^D x_i)^{1/D}}, \dots, \ln \frac{x_D}{(\prod_{i=1}^D x_i)^{1/D}} \right]$$

معکوس تبدیل clr ( $clr^{-1}$ ) با استفاده از رابطه زیر انجام می‌شود:

(۵)

$$x = clr^{-1}(y) = \left[ \frac{\exp(y_1)}{\sum_{i=1}^{D-1} \exp(y_i)}, \frac{\exp(y_2)}{\sum_{i=1}^{D-1} \exp(y_i)}, \dots, \frac{\exp(y_D)}{1 + \sum_{i=1}^{D-1} \exp(y_i)} \right]$$

تبدیل ilr داده‌های خام را به مختصات ilr به صورت زیر تبدیل می‌کند:

(۶)

$$y = ilr(x) = (y_1, y_2, \dots, y_{D-1}) \in \mathbb{R}^{D-1}$$

در این رابطه  $y_i$  به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

(۷)

$$y_i = \frac{1}{\sqrt{i(i+1)}} \ln \left( \frac{\prod_{j=1}^i x_j}{(x_{i+1})^i} \right), (i = 1, 2, \dots, D-1)$$

تبدیل معکوس از مختصات ilr به داده‌های اولیه خاک با استفاده از رابطه زیر انجام می‌شود:

(۸)

$$x = ilr^{-1}(y) = \left[ \left( 1 + \frac{\sum_{i=0}^{D-1} f(i)}{f(0)} \right)^{-1}, \dots, \left( 1 + \frac{\sum_{i=0}^{D-1} f(i)}{f(D-1)} \right)^{-1} \right]$$

در این رابطه  $f(i)$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

(۹)

$$f(i) = \left( \frac{1}{f(i-1)} \exp(\sqrt{i(i+1)}y) \right)^{-1/i}, f(0) = 1$$

## تبدیل داده‌های بافت به روش‌های log-ratio

بردار  $x = [x_1, x_2, \dots, x_D]$  یک داده D جزئی

وقتی یک داده مرکب در نظر گرفته می‌شود که همه اجزاء آن اعداد حقیقی مثبت و در برگیرنده اطلاعات نسبی باشند.

فضای نمونه مناسب برای داده‌های مرکب یک Simplex

(داده خام) به صورت زیر است (ایتچیسون، ۱۹۸۶):

(۱)

$$S^D = \{x = [x_1, x_2, \dots, x_D] \mid x_i > 0, i = 1, 2, \dots, D; \sum_{i=1}^D x_i = \kappa\}$$

در این رابطه  $S^D$  بیانگر بردارهای یک ترکیب D

جزیی و K مقدار ثابتی است که معمولاً برابر با ۱۰۰ یا یک

است. ایتچیسون (۱۹۸۶) برای اطمینان از برابر واحد شدن

مجموع اجزاء تخمینی یک داده مرکب، تبدیل‌های لگاریتمی

نسبتی را پیشنهاد داد. در این تحقیق داده‌های بافت با استفاده

از سه نوع تبدیل رایج شامل clr، alr و ilr تبدیل شدند.

سپس داده‌های تبدیل شده با استفاده از سه مدل یادگیری

ماشین و یک مدل ترکیبی مدل‌سازی شدند. در نهایت برای

به دست آوردن تخمین‌های رس، سیلت و شن، داده‌های

تبدیل شده تخمینی مجدداً به صورت معکوس تبدیل

شدند<sup>۱</sup>. جزئیات روابط مربوط به تبدیل‌های مذکور و

معکوس آن‌ها در امیریان چکان و همکاران (۲۰۱۹) ارائه

شده است. تبدیل‌های alr، clr و ilr و معکوس آن‌ها از

طریق روابط ۲ تا ۹ و با استفاده از بسته نرم‌افزاری

compositions در محیط R انجام شد.

تبدیل alr با استفاده از رابطه زیر، داده‌های خام

را به مختصات alr تبدیل می‌کند:

(۲)

$$y = alr(x) = \left[ \ln \frac{x_1}{x_D}, \ln \frac{x_2}{x_D}, \dots, \ln \frac{x_{D-1}}{x_D} \right]$$

معکوس تبدیل alr (تبدیل داده‌های با مختصات alr به داده

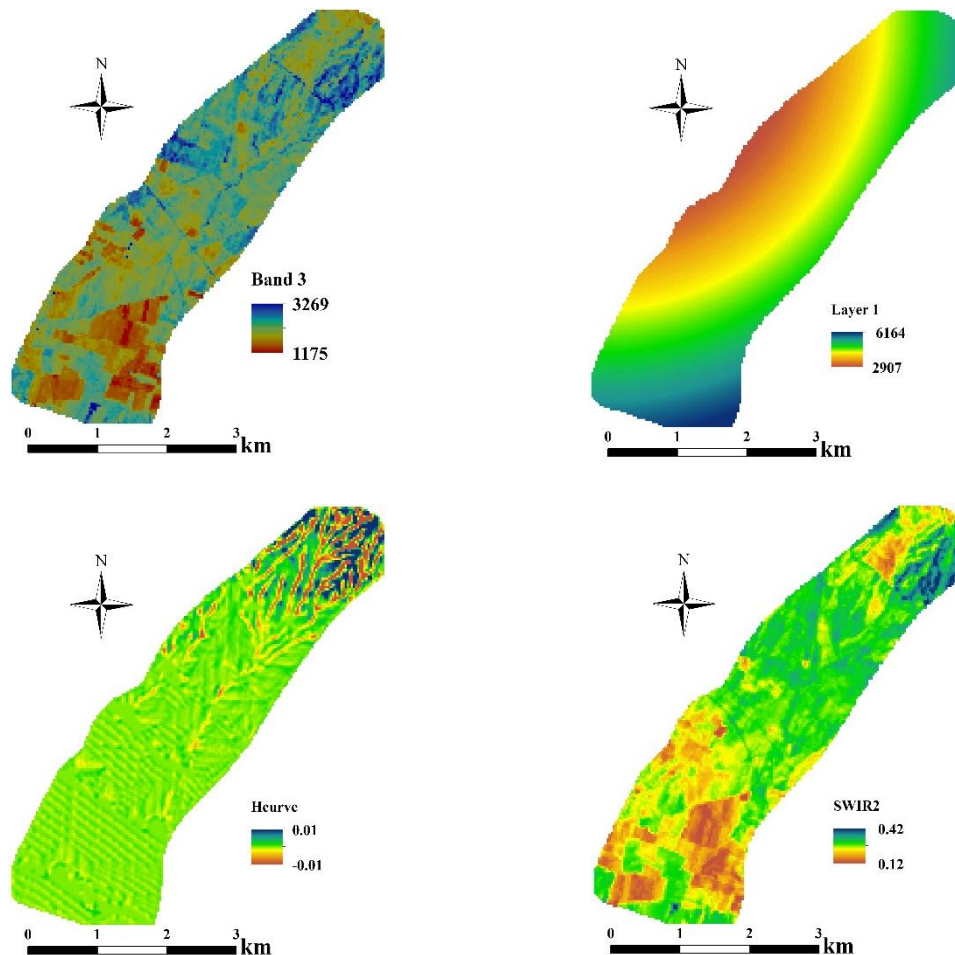
خام اولیه) با استفاده از رابطه زیر انجام می‌شود:

<sup>1</sup>. Back transformation

### استخراج متغیرهای کمکی

در این مطالعه داده‌های کمکی به عنوان نماینده فاکتورهای خاک‌سازی از منابع مختلفی از جمله مدل رقومی ارتفاع (DEM)، تصویر ماهواره لندست ۸ و تصویر Sentinel-2 به دست آمدند (جدول ۱). خصوصیات زمین‌نما در محیط نرم افزار SAGA از DEM استخراج گردید (هنگل و

همکاران، ۲۰۰۳). همچنین باندهای تصاویر لندست ۸ و Sentinel-2 و ترکیب این باندها به صورت شاخص‌هایی از جمله شاخص‌های رس، روشنایی، پوشش گیاهی و کربنات به عنوان متغیر کمکی استفاده گردید. در (شکل ۳) توزیع مکانی چهار متغیر کمکی به عنوان نمونه نشان داده شده است.



شکل ۳- توزیع مکانی چهار تا از متغیرهای کمکی شامل باند ۳ تصویر لندست ۸ (Band 3)، میدان فاصله اقلیدسی (Layer 1)، انحنای افقی (Hcurve) و مادون قرمز موج کوتاه (SWIR2)



جدول ۱- متغیرهای کمکی مهم استفاده شده در مدل‌سازی اجزاء بافت خاک

| منبع متغیر                | نام متغیر                    | علامت اختصاری                                                         | رابطه/ نرم افزار                                       | منبع                              |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| مدل رقومی ارتفاع          | فاصله عمودی تا شبکه کانال    | Chnl_Dist                                                             | SAGA                                                   | کنراد و همکاران (۲۰۱۵)            |
|                           | انحنای افقی                  | Hcurve                                                                | SAGA                                                   | کنراد و همکاران (۲۰۱۵)            |
|                           | میدان فاصله اقلیدسی          | Layer1, ..., Layer5                                                   | ArcGIS                                                 | بهرنس و همکاران (۲۰۱۸)            |
|                           | مساحت سطح                    | Surface-area                                                          | SAGA                                                   | کنراد و همکاران (۲۰۱۵)            |
|                           | شاخص چندتفکیکی همواری کف دره | MRVBF                                                                 | SAGA                                                   | گلانت و داوولینگ (۲۰۰۳)           |
|                           | مساحت حوضه اصلاح شده         | MCA                                                                   | SAGA                                                   | کنراد و همکاران (۲۰۱۵)            |
|                           | گشودگی مثبت                  | PosOpen                                                               | SAGA                                                   | کنراد و همکاران (۲۰۱۵)            |
|                           | عمق دره                      | Valley-Depth                                                          | SAGA                                                   | تقی‌زاده مهرجردی و همکاران (۲۰۱۵) |
| نصاویر لندست ۸ و سنتینل ۲ | باندهای طیفی                 | B2, B3, B4, B5, B7, B8, B11, B12, blue, green, red, NIR, SWIR1, SWIR2 | -                                                      | ولدر و همکاران (۲۰۱۶)             |
|                           | شاخص پوشش گیاهی بهبود یافته  | EVI                                                                   | $(NIR-red)/(NIR + C1 \times red - C2 \times blue + L)$ | وانگ و همکاران (۲۰۲۳)             |
|                           | شاخص کربنات                  | CarbIndex                                                             | red/green                                              | تقی‌زاده مهرجردی و همکاران (۲۰۱۶) |
|                           | شاخص روشنایی                 | BrighIndex                                                            | $((red)^2 + (NIR)^2)^{0.5}$                            | مترینچ و زینک (۲۰۰۳)              |

### مدل‌های مورد استفاده

در این مطالعه برای تخمین درصد‌های رس، سیلت و شن در نقاط نمونه‌برداری نشده، متغیرهای محیطی استخراج شده از منابع مختلف به عنوان ورودی به مدل‌های SVM، RF، kNN و GR وارد شدند.

در رویکرد kNN، برای تخمین یک نمونه جدید در مسائل رگرسیونی، تعداد k نمونه از نزدیکترین همسایه‌ها از فضای تخمین‌گر انتخاب می‌شود و مقدار پیش‌بینی شده نمونه جدید، میانگین مقادیر k همسایه تعیین شده است. فاصله اقلیدسی (رابطه ۱۰) رایج‌ترین معیار تعیین شباهت در الگوریتم kNN است (لانترز، ۲۰۱۵). در این رابطه  $dist(p, q)$  فاصله اقلیدسی بین دو نمونه p و q است که هر کدام دارای n ویژگی است؛  $p_1$  مقدار اولین ویژگی از نمونه p و  $q_1$  مقدار اولین ویژگی از نمونه q است. به عنوان نمونه، برای تخمین درصد رس خاک در یک مکان، از درصد رس تعداد k نمونه مجاور مکان مورد نظر که دارای کمترین فاصله اقلیدسی با آن هستند میانگین گرفته

می‌شود. تعداد نقاط مجاور که در تخمین مقدار رس در نقطه مورد نظر استفاده می‌شوند بستگی به مقدار k دارد؛ مثلاً اگر k برابر با سه باشد، از درصد رس سه نقطه که دارای کمترین فاصله با نقطه مورد نظر هستند میانگین گرفته می‌شود؛ بنابراین ابتدا فاصله اقلیدسی نقطه مورد نظر با نقاط مجاور محاسبه می‌شود، سپس به تعداد k از آنها برای تخمین نهایی انتخاب می‌شود.

(۱۰)

$$dist(p, q) = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + (p_2 - q_2)^2 + \dots + (p_n - q_n)^2}$$

مدل RF یکی از الگوریتم‌های رایج یادگیری ماشین با توانایی و قابلیت بالا هم در مسائل رگرسیونی و هم در مسائل طبقه‌بندی است که توسط بریمن (۲۰۰۱) معرفی گردید. این مدل دارای ساختار درختی است که بر خلاف سایر روش‌های مبتنی بر درخت تصمیم که از یک درخت برای تصمیم‌گیری استفاده می‌کنند، از تعداد زیادی درخت استفاده می‌کند. در این الگوریتم داده‌ها به دو دسته آموزش و آزمون تقسیم می‌شوند. از داده‌های آموزش به

برای تخمین متغیر هدف استفاده می‌کند. برای این منظور، SVR با استفاده از یک تابع غیرخطی  $(\varphi(x))$ ، داده‌های ورودی را به روش حداقل‌سازی به یک فضا با ابعاد بیشتر نگاشت می‌کند (رابطه ۱۱).

(۱۱)

$$f(x) = w^T \cdot \varphi(x) + b$$

در این رابطه  $x$  داده ورودی،  $w^T$  بردار اوزان و  $b$  مقدار بایاس است.

در این تحقیق برای ترکیب تخمین سه مدل kNN، RF و SVM از روش GR استفاده شد. این روش توسط گرانجر و رامانتان (۱۹۸۴) و بر اساس روش حداقل مربعات معمولی<sup>۴</sup> (OLS) ارائه گردید. در این رویکرد یک مدل رگرسیونی چندگانه به داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده توسط مدل‌های مورد استفاده برازش داده می‌شود. در واقع تخمین‌های مدل‌های مختلف به‌عنوان متغیر مستقل برای تخمین متغیر وابسته مورد نظر استفاده قرار می‌گیرند و ضریب رگرسیونی به‌دست آمده برای تخمین هر مدل، بیانگر وزن آن مدل در تخمین نهایی متغیر مورد نظر است. به‌عنوان نمونه و بر اساس روش ارائه شده توسط گرانجر و رامانتان (۱۹۸۴)، برای تخمین درصد رس از رابطه ۱۲ استفاده می‌شود. به این صورت که هر کدام از سه مدل مورد استفاده بر اساس متغیرهای محیطی، مقدار رس را برای یک مکان تخمین می‌زنند. این سه تخمین به‌عنوان متغیر مستقل به مدل رگرسیونی مبتنی بر OLS وارد می‌شوند و مقدار رس به‌عنوان متغیر وابسته در مکان مورد نظر تخمین زده می‌شود.

(۱۲)

$$\text{Clay} = \sum_{i=1}^p (\alpha_i \cdot \text{Clay}_i) + \beta$$

در این رابطه  $\alpha_i$  وزن اختصاص داده شده به مدل  $\text{Clay}_i$ ،  $\beta$  تخمین به‌دست آمده از مدل  $\lambda$ ام برای رس و  $\beta$  مقداری ثابت است (عرض از مبدا).

تعداد درختان تصمیم موجود در جنگل نمونه Bootstrap برداشته می‌شود و برای هر نمونه، یک درخت تصمیم ایجاد می‌شود. ایجاد درخت تصمیم در RF از گره ریشه شروع می‌شود. به این صورت که از متغیرهای (در این تحقیق متغیرهای محیطی) که روی ویژگی مورد نظر (مثل رس، سیلت و شن) تاثیر دارند تعدادی زیرمجموعه به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و موثرترین متغیر از هر مجموعه که در واقع معیاری برای تفکیک گره به شاخه‌ها است در گره ریشه قرار می‌گیرد. در گره‌های بعدی متغیرهایی با اهمیت کمتر از متغیر گره ریشه قرار می‌گیرند. این روند ادامه پیدا می‌کند تا بر اساس هر زیرمجموعه از متغیرها یک درخت تشکیل شود. هر درخت مدل‌سازی را روی داده‌ها انجام می‌دهد و متغیر هدف بر اساس متغیرهای ورودی به هر درخت تخمین زده می‌شود؛ به عبارت دیگر هر درخت بر اساس متغیرهایی که بر اساس آنها تشکیل شده است، متغیر مورد نظر را تخمین می‌زند. در نهایت در صورتی که از الگوریتم RF برای تخمین یک متغیر کمی پیوسته (مثل درصد رس) استفاده شود، میانگین تخمین همه درختان به‌عنوان تخمین نهایی آن متغیر در نظر گرفته می‌شود.

هدف مدل SVM که توسط وپنیک (۱۹۹۵) ارائه گردید ایجاد صفحه‌ای به نام ابرصفحه<sup>۱</sup> است که فضای داده‌ها را طوری تقسیم کند که بخش‌های نسبتاً همگنی در هر طرف صفحه به وجود آید؛ به عبارت دیگر SVM صفحه‌ای را پیدا می‌کند که حداکثر جداسازی ممکن را باعث شود که به آن ابرصفحه با حاشیه حداکثر<sup>۲</sup> (MMH) گفته می‌شود. بردارهای پشتیبان نزدیک‌ترین نقاط از هر کلاس به MMH هستند و با استفاده از آنها امکان تعیین MMH وجود دارد. رگرسیون بردار پشتیبان<sup>۳</sup> (SVR) الگوریتمی است که همانند سایر روش‌های رگرسیونی، الگوی موجود بین متغیر وابسته (در این تحقیق درصد رس، سیلت و شن) و متغیرهای مستقل (مثل متغیرهای محیطی) را بر اساس داده‌های آموزش شناسایی می‌کند و از این الگو

<sup>۳</sup>. Support vector regression

<sup>۴</sup>. Ordinary least square

<sup>۱</sup>. Hyperplane

<sup>۲</sup>. Maximum margin hyperplane (MMH)

(۱۳)

$$AD(z, z^*) = \sqrt{\sum_{k=1}^D \left[ \ln \frac{Z_k}{(\prod_{k=1}^D Z_k)^{1/D}} - \ln \frac{Z_k^*}{(\prod_{k=1}^D Z_k^*)^{1/D}} \right]^2}$$

## نتایج

## خلاصه آماری داده‌ها

خلاصه آماری رس، سیلت و شن در جدول ۲ ارائه شده است. مقدار شن از ۱۱/۵ تا ۷۷ درصد، مقدار رس از ۵/۳۷ تا ۴۵/۵ درصد و مقدار سیلت از ۵/۷۵ تا ۵۸/۲۵ درصد متغیر است. میانگین درصدهای رس، سیلت و شن به ترتیب برابر با ۲۵/۵۷، ۳۶/۴۲ و ۳۹/۹۹ درصد است. مقادیر انحراف معیار و ضریب تغییرات نشان می‌دهد شن دارای بیشترین تغییرپذیری در منطقه است. بر اساس طبقه‌بندی ارائه شده توسط ویلدینگ (۱۹۸۵)، ضریب تغییرات برای شن در حد متوسط است (بین ۱۵ تا ۳۵ درصد). تغییرات بافت خاک در منطقه بیشتر تحت تاثیر شیب، فاصله از ارتفاعات مشرف به منطقه و کاربری اراضی می‌باشد. در دامنه کوه‌های منطقه که شیب هم بیشتر است، جزء غالب شن و با دور شدن از ارتفاعات و کم شدن شیب جزء غالب سیلت و رس است. در مناطق تحت کشاورزی، شخم خوردن خاک و مخلوط شدن خاک زیرین با خاک سطحی می‌تواند عاملی در تفاوت خاک این مناطق با مناطق بدون کشت منطقه باشد.

برای مدل‌سازی به روش‌های kNN، RF و SVM از بسته نرم‌افزاری caret (کوهن، ۲۰۰۸) در محیط R و برای مدل‌سازی به روش GR از بسته نرم‌افزاری GeomComb در محیط R استفاده گردید.

## تجزیه و تحلیل‌های آماری و اعتبارسنجی مدل‌ها

برای بررسی کارایی مدل‌های مختلف در تخمین اجزاء بافت خاک، از رویکرد ارزیابی متقابل<sup>۱</sup> k-fold استفاده شد. در نهایت کارایی مدل‌های مورد استفاده در تخمین اجزاء بافت خاک تبدیل‌شده و تبدیل‌نشده با استفاده از معیارهایی از جمله میانگین خطای مطلق (MAE<sup>۲</sup>)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE<sup>۳</sup>) و فاصله Aitchison (AD) بررسی گردید. فاصله Aitchison معیاری برای نشان دادن دقت تخمین‌ها در مدل‌سازی داده‌های مرکب مثل بافت خاک است. در واقع AD دقت تخمین سه جزء رس، سیلت و شن را به صورت یک شاخص نشان می‌دهد. در رابطه  $Z_{k,4}$  عناصر ترکیب  $Z$  (داده مرکب واقعی) و  $Z_k^*$  عناصر ترکیب  $z^*$  (داده مرکب تخمینی) هستند (ایتچیسون، ۱۹۹۲). محاسبه AD بر اساس (رابطه ۱۳) و در محیط نرم‌افزار Excel انجام گرفت.

جدول ۲- خلاصه آماری درصدهای رس، سیلت و شن

| ویژگی | حداقل (%) | حداکثر (%) | میانگین (%) | انحراف معیار (%) | ضریب تغییرات (%) |
|-------|-----------|------------|-------------|------------------|------------------|
| رس    | ۵/۳۷      | ۴۵/۵       | ۲۵/۵۷       | ۵/۶۱             | ۲۱/۹۳            |
| سیلت  | ۵/۷۵      | ۵۸/۲۵      | ۳۶/۴۲       | ۷/۸۴             | ۲۱/۵۲            |
| شن    | ۱۱/۵      | ۷۷         | ۳۷/۹۹       | ۱۱/۵۴            | ۳۹/۷۵            |

کمکی است. در این مدل‌ها، متغیرهای مهم در تعداد بیشتری از درختان در گره ریشه قرار می‌گیرند و هر چه متغیر در گره‌های پایین‌تر از گره ریشه قرار گیرد از اهمیت

## اهمیت نسبی متغیرهای کمکی

یکی از مزایای استفاده از مدل‌های درختی مثل جنگل تصادفی، مشخص کردن اهمیت نسبی متغیرهای

<sup>۳</sup>. Root mean square error

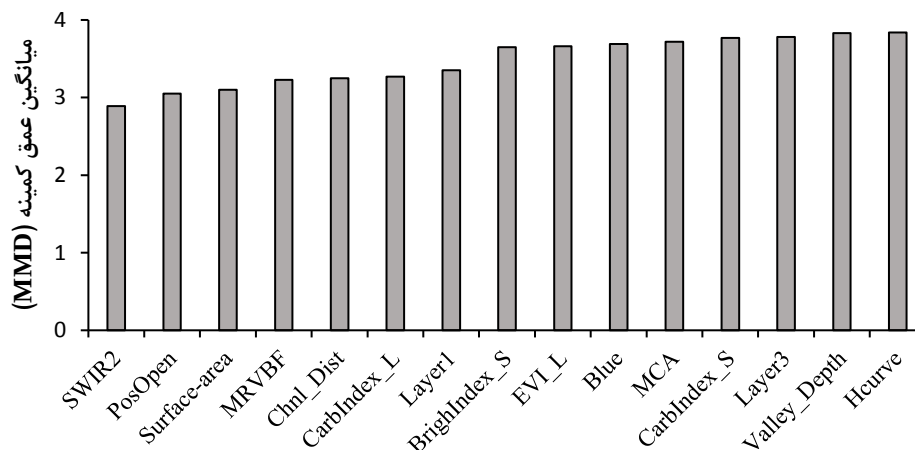
<sup>۱</sup>. K-Fold cross-validation

<sup>۲</sup>. Mean absolute error

کمتری برخوردار است. یکی از روش‌های با کارایی بالا، انتخاب مهم‌ترین متغیرها بر اساس میانگین عمق کمینه<sup>۱</sup> (MMD) آنها است. MMD عبارت است از تعداد گره‌هایی که در امتداد کوتاه‌ترین مسیر از گره ریشه تا نزدیک‌ترین گره برگ قرار دارد. از این معیار در بررسی اهمیت متغیرهای کمکی در تخمین بافت خاک در شمال ایران استفاده شده است (ملاح و همکاران، ۲۰۲۲).

به طور کلی تاثیر پارامترهای استخراج شده از DEM و تصاویر ماهواره‌ای روی اجزاء بافت متفاوت بود و برخی از آنها همبستگی بیشتری با یک جزء بافت و همبستگی کمتری با سایر جزءها داشتند. در (شکل ۴)

اهمیت متغیرهای محیطی مهم در مدل‌سازی بافت خاک بر اساس MMD نشان داده شده است. باند ۷ لندست ۸ (SWIR2) با کمترین عمق (۲/۸۹) دارای بیشترین اهمیت و انحنای افقی (HCurve) با بیشترین عمق (۳/۸۴) دارای کمترین اهمیت است؛ به عبارت دیگر متغیرهایی که دارای MMD کمتری هستند در تعداد بیشتری از درختان موجود در جنگل تصادفی در گره ریشه و یا گره‌های نزدیک ریشه قرار گرفته‌اند و از اهمیت بیشتری برخوردار هستند. به طور کلی، نتایج نشان داد (شکل ۴) متغیرهای به دست آمده از DEM اهمیت بیشتری در مدل‌سازی خاک داشتند (بجز باند ۷ لندست ۸).



متغیرهای کمکی

شکل ۴- اهمیت نسبی مهم‌ترین متغیرهای کمکی مورد استفاده در مدل‌سازی بافت خاک

SWIR: short wave infrared; PosOpen: positive openness; MRVBF: multi-resolution valley bottom flatness; Chnl\_Dist: channel distance; CarbIndex\_L: carbonate index (Landsat 8); BrighIndex\_S: brightness index (Sentinel 2); EVI\_L: enhanced vegetation index (Landsat 8); MCA: modified catchment area; Hcurve: horizontal curvature

نسبت به داده تبدیل‌شده به روش alr برای اجزای رس، سیلت و شن به ترتیب ۱۹/۸۷، ۳۵/۷۶، ۱۹/۸۰ درصد افزایش یافت (جدول ۳). این مقادیر برای تبدیل clr به ترتیب ۲۰/۱۳، ۱۳/۹۷، ۱۷/۲۹ درصد کاهش نشان داد و با تبدیل ilr برای اجزای رس و شن به ترتیب ۲۸/۵۰ و ۲/۴۵ درصد کاهش و برای جز سیلت ۵/۹۷ درصد افزایش نشان داد. به طور کلی و بر اساس معیار RMSE (جدول ۳)، در مقایسه داده تبدیل‌نشده، تبدیل alr باعث بهبود تخمین‌ها

### مدل‌سازی بافت خاک

کارایی مدل‌های RF، SVM، kNN و GR در تخمین داده‌های بافت تبدیل‌شده و تبدیل‌نشده در (جدول ۳) ارائه شده است. کمترین و بیشترین مقادیر RMSE و MAE برای هر چهار مدل در تخمین داده‌های تبدیل‌شده و تبدیل‌نشده به ترتیب مربوط به رس و شن بود. بررسی کارایی مدل RF نشان داد مقدار RMSE داده تبدیل‌نشده

<sup>1</sup>. Mean minimal depth

گردید، در حالی که تبدیل  $clr$  باعث بهبود تخمین‌ها نگردید. تبدیل  $ilr$  باعث بهبود تخمین سیلت گردید ولی برای اجزای رس و شن منجر به دقت بیشتر تخمین‌ها نگردید و نسبت به داده‌های تبدیل‌نشده دقت کاهش یافت. به طور کلی و بر اساس معیار  $MAE$ ، نتایج مدل‌سازی بافت خاک با استفاده از  $RF$  نشان داد کارایی استفاده از داده تبدیل‌نشده نسبت به داده تبدیل‌شده به روش  $alr$  کمتر و نسبت به تبدیل‌های  $ilr$  و  $clr$  بیشتر بود (جدول ۳). این روند کلی برای سایر مدل‌های مورد استفاده هم صادق بود. برای هر دو مجموعه داده تبدیل‌شده و تبدیل‌نشده، بیشترین مقدار  $MAE$  مربوط به شن (۸/۱۳ درصد) و کمترین مقدار مربوط به رس (۳/۱۱ درصد) بود. مقدار  $AD$  برای مدل  $RF$  وقتی از داده‌های تبدیل‌نشده استفاده شد نسبت به زمانی که از داده‌های تبدیل‌شده به روش‌های  $alr$ ،  $clr$  و  $ilr$  استفاده شد به ترتیب ۴/۰۱، ۲۷/۱۴، ۳۶/۴ درصد کاهش یافت (جدول ۳). همچنین مقدار  $AD$  برای هر چهار مدل مورد استفاده با داده‌های تبدیل‌نشده کمتر از داده‌های تبدیل‌شده بود.

نتایج کارایی مدل  $SVM$  در مدل‌سازی بافت خاک در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج نشان داد که مقدار

$RMSE$  داده تبدیل‌نشده نسبت به داده تبدیل‌شده به روش  $alr$  برای اجزای رس، سیلت و شن به ترتیب ۱۹/۵۷، ۵۷/۳۱ و ۱۶/۰۹ درصد افزایش داشت. این مقادیر برای تبدیل  $clr$ ، به ترتیب ۲/۶۲، ۱۵/۲۲ و ۲۲/۱۹ درصد کاهش نشان داد. استفاده از داده تبدیل‌شده به روش  $ilr$  باعث افزایش ۱۲/۸۸ درصدی در مقدار  $RMSE$  در تخمین رس و کاهش ۲۱/۱۱ و ۹/۷۲ درصدی مقدار  $RMSE$  برای جز سیلت و شن گردید. نتایج نشان داد (جدول ۳) تبدیل داده‌ها به سه روش مورد استفاده باعث افزایش  $AD$  گردید. این مقدار افزایش برای سه تبدیل  $alr$ ،  $clr$  و  $ilr$  به ترتیب برابر با ۴/۵۴، ۳۰/۱۹ و ۱۹/۴۸ درصد بود. به طور کلی و بر اساس همه معیارهای خطا، مدل  $SVM$  با استفاده از داده‌های تبدیل‌شده به روش  $alr$  منجر به بهبود تخمین‌ها گردید ولی برای داده‌های تبدیل‌شده به روش  $clr$  کارایی کمتری نشان داد. کارایی مدل  $SVM$  در استفاده از داده رس تبدیل‌شده به روش  $ilr$  کمتر از داده تبدیل‌نشده بود ولی در مدل‌سازی سیلت و شن تبدیل‌شده بیشتر بود.

جدول ۳- کارایی مدل‌های RF، SVM و kNN و مدل ترکیبی GR در مدل‌سازی داده‌های تبدیل‌نشده (UT) و داده‌های تبدیل‌شده به روش‌های alr، clr و ilr

| مدل | نوع داده | RMSE (%) |      |       | MAE (%) |      |      | AD    |
|-----|----------|----------|------|-------|---------|------|------|-------|
|     |          | رس       | سیلت | شن    | رس      | سیلت | شن   |       |
| RF  | UT       | ۴/۸۴     | ۷/۶۳ | ۹/۹۵  | ۴/۰۷    | ۵/۹۵ | ۷/۸۹ | ۰/۲۶۳ |
|     | alr      | ۴/۰۴     | ۵/۶۲ | ۸/۲۰  | ۲/۱۱    | ۴/۵۵ | ۶/۷۰ | ۰/۲۷۴ |
|     | clr      | ۶/۰۶     | ۸/۸۷ | ۱۲/۰۳ | ۴/۲۳    | ۰/۰۶ | ۸/۱۳ | ۰/۳۶۱ |
|     | ilr      | ۶/۷۷     | ۷/۲۰ | ۱۰/۲۰ | ۴/۸۱    | ۵/۵۷ | ۸/۰۶ | ۰/۳۶۴ |
| SVM | UT       | ۵/۰۷     | ۷/۶۳ | ۸/۸۰  | ۴/۲۹    | ۵/۲۸ | ۶/۹۷ | ۰/۲۵۲ |
|     | alr      | ۴/۲۴     | ۴/۸۵ | ۷/۵۸  | ۳/۴۳    | ۳/۷۶ | ۶/۲۹ | ۰/۲۶۴ |
|     | clr      | ۵/۷۲     | ۹/۰۰ | ۱۱/۳۱ | ۴/۰۵    | ۶/۱۰ | ۷/۸۳ | ۰/۳۶۱ |
|     | ilr      | ۵/۸۲     | ۶/۳۰ | ۸/۰۲  | ۴/۱۴    | ۴/۷۹ | ۶/۳۶ | ۰/۳۱۳ |
| kNN | UT       | ۴/۸۶     | ۶/۸۴ | ۹/۵۵  | ۴/۰۸    | ۵/۵۰ | ۷/۴۰ | ۰/۲۵۳ |
|     | alr      | ۳/۹۵     | ۵/۴۶ | ۷/۶۳  | ۳/۱۶    | ۴/۲۰ | ۵/۸۷ | ۰/۲۵۴ |
|     | clr      | ۶/۱۱     | ۹/۴۸ | ۱۲/۲۹ | ۴/۳۵    | ۶/۳۰ | ۸/۰۵ | ۰/۳۷۰ |
|     | ilr      | ۶/۴۴     | ۶/۷۳ | ۹/۶۵  | ۴/۵۴    | ۵/۵۴ | ۷/۷۲ | ۰/۳۵۲ |
| GR  | UT       | ۵/۰۷     | ۷/۱۱ | ۹/۲۰  | ۴/۲۸    | ۵/۳۶ | ۷/۷۳ | ۰/۲۵۶ |
|     | alr      | ۴/۲۱     | ۵/۱۵ | ۷/۶۷  | ۳/۳۲    | ۴/۱۰ | ۶/۲۰ | ۰/۲۶۶ |
|     | clr      | ۵/۸۱     | ۹/۰۴ | ۱۱/۶۹ | ۴/۱۶    | ۶/۰۰ | ۷/۵۷ | ۰/۲۵۳ |
|     | ilr      | ۶/۰۹     | ۶/۷۰ | ۸/۷۴  | ۴/۲۴    | ۵/۲۳ | ۶/۸۵ | ۰/۲۲۵ |

AD: فاصله Aitchison، RMSE: میانگین ریشه مربعات خطا؛ MAE: میانگین خطای مطلق؛ alr، clr و ilr به ترتیب تبدیل‌های additive log-ratio، isometric log-ratio، و centred-log-ratio؛ RF: Random Forest، SVM: Support Vector Machine، و kNN به ترتیب مدل‌های neighbor و Granger-Ramanathan؛ K- nearest: مدل ترکیبی GR؛

به داده‌های تبدیل‌نشده بود (جدول ۳). این نتیجه برای هر سه تبدیل مورد استفاده صادق بود. به طور کلی نتایج مدل‌سازی با kNN نشان داد مدل‌سازی اجزاء بافت خاک با استفاده از داده‌های تبدیل‌شده به روش alr باعث بهبود تخمین‌ها گردید ولی تبدیل clr منجر به نتایج بهتری نسبت به داده‌های تبدیل‌نشده نگردید. کارایی مدل kNN در استفاده از داده تبدیل‌شده سیلت به روش ilr بیشتر از داده تبدیل‌نشده بود ولی برای دو جزء رس و شن نتیجه برعکس بود.

نتایج مدل‌سازی داده‌های تبدیل‌شده و تبدیل‌نشده بافت خاک با استفاده از مدل GR در (جدول ۳) ارائه شده است. در استفاده از داده‌های تبدیل‌شده به روش

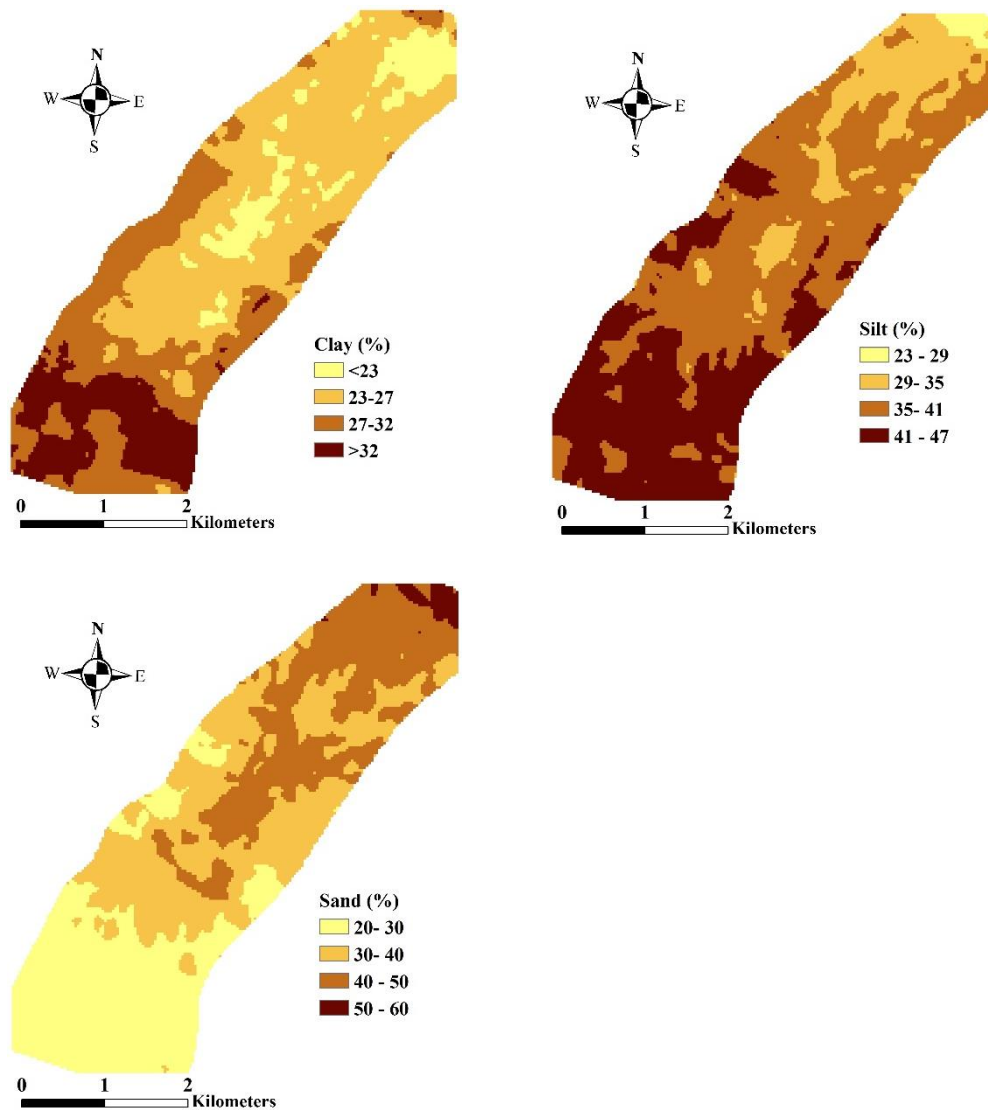
مدل‌سازی داده‌های تبدیل‌شده و تبدیل‌نشده با استفاده از مدل kNN نشان داد تبدیل داده‌های رس، سیلت و شن به روش alr به ترتیب باعث کاهش ۲۳/۰۳، ۲۵/۲۷ و ۲۴/۹۰ درصد در RMSE گردید (جدول ۳). این مقادیر برای تبدیل clr روند افزایشی داشت به طوری که تبدیل داده‌های رس، سیلت و شن به ترتیب باعث افزایش ۲۰/۴۵، ۲۷/۸۴ و ۲۲/۴۵ درصد در مقدار RMSE مدل kNN گردید. نتایج استفاده از داده‌های تبدیل‌شده به روش ilr تا حدودی متفاوت بود، به طوری که با تبدیل داده‌های رس و شن مقدار RMSE به ترتیب ۲۴/۵ و ۱/۲۴ درصد افزایش ولی برای جز سیلت کاهش یافت (۱/۶۳ درصد). مقدار AD به دست آمده از مدل‌سازی با kNN بیانگر بالاتر بودن کارایی این مدل در مدل‌سازی داده‌های تبدیل‌شده نسبت

alr، مقدار RMSE برای هر سه جزء رس، سیلت و شن نسبت

### پهنه‌بندی اجزاء بافت خاک

با توجه به این که اهمیت نسبی متغیرها به روش RF به دست آمد و اختلاف زیادی بین کارایی این مدل با مدل SVM که بیشترین کارایی را داشت وجود نداشت، نقشه توزیع مکانی اجزاء بافت با استفاده از مدل RF به دست آمد (شکل ۵). بیشترین مقادیر رس و سیلت در قسمت‌های جنوبی‌تر منطقه و کمترین مقادیر آن‌ها در قسمت‌های مرکزی و شمال‌شرقی منطقه دیده می‌شود. توزیع مکانی شن در منطقه روندی نسبتاً معکوس با رس و سیلت داشت و بیشترین مقادیر آن در بخش‌های شمال-شرقی منطقه مشاهده گردید. این توزیع مکانی تا حدود زیادی متأثر از ارتفاع و شیب منطقه است. در قسمتهای شمالی و شمال‌شرقی شیب و ارتفاع بیشتر (بیشترین ارتفاع ۱۳۸۲ متر) و به تدریج به سمت جنوب منطقه از مقدار آن کاسته می‌شود (کمترین ارتفاع ۱۱۶۷ متر).

به داده تبدیل‌نشده روند کاهشی نشان داد (به ترتیب ۲۰/۴۲، ۳۸/۰۵ و ۱۹/۹۴ درصد). این روند برای تبدیل clr برعکس بود و باعث افزایش RMSE برای سه جزء رس، سیلت و شن گردید (به ترتیب ۱۲/۷، ۲۱/۳۴ و ۲۱/۳۰ درصد). تبدیل ilr باعث بهبود تخمین‌های دو جزء سیلت و شن گردید (مقدار RMSE به ترتیب ۶/۱۱ و ۵/۲۶ درصد کاهش نشان داد) ولی باعث کاهش کارایی مدل GR در تخمین رس گردید (RMSE به میزان ۱۶/۷۴ درصد افزایش نشان داد). نتایج کلی نشان داد کارایی مدل GR با داده‌های تبدیل‌شده به روش alr بیشتر از داده‌های تبدیل‌نشده بود ولی برای تبدیل clr نتایج برعکس بود. برای تبدیل ilr کارایی مدل GR در مدل‌سازی داده‌های تبدیل‌نشده رس بیشتر ولی برای دو جزء تبدیل‌نشده سیلت و شن کمتر بود.



شکل ۵- توزیع مکانی ذرات رس، سیلت و شن به دست آمده از مدل RF

## بحث

### متغیرهای کمکی

داده‌های سنجش از دور بیشتر بیانگر عوارض سطحی و عامل خاک‌سازی موجودات زنده هستند. هر عارضه‌ای در سطح زمین می‌تواند بازتاب طیفی خاص خود را داشته باشد که این بازتاب توسط سنجنده‌ها ثبت می‌شود. خاک‌های مختلف معمولاً بازتاب‌های طیفی متفاوتی دارند که با خواص آن‌ها در ارتباط هستند. پوشش گیاهی و کاربری اراضی از جمله عوارض سطحی هستند که هر دو روی بافت خاک تاثیرگذار هستند. همچنین رطوبت خاک که تا حد زیادی تابع بافت خاک است از عوامل مهم تاثیرگذار در بازتاب طیفی است. در تحقیق حاضر SWIR2

مهمترین متغیر کمکی در توصیف تغییرات اجزاء بافت خاک بود (شکل ۴). بازتاب‌های طیفی و ترکیب باندها بیانگر عوارض سطح زمین هستند. برخی از این عوارض به طور مستقیم و غیرمستقیم با بافت خاک در ارتباط هستند. طیف‌های مادون قرمز و مادون قرمز نزدیک هم به ترکیبات آلی و هم ترکیبات معدنی خاک حساس هستند و در نتیجه برای مطالعات خواص خاک در کشاورزی و علوم محیطی مفید هستند (ژیومی و جیانشی، ۲۰۱۳). طیف سنجی مری و مادون قرمز نزدیک ساختار و ترکیب مواد و مولکول‌ها را در طول موج ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ را انعکاس می‌دهد؛ بنابراین با توجه به تفاوت ترکیب و ساختار رس، سیلت و شن و عوامل مرتبط با بافت خاک مثل مقدار ماده آلی و درصد رطوبت، می‌توان از این نوع طیف‌سنجی در نشان دادن



توزیع مکانی اجزاء بافت خاک استفاده کرد. ویسر و همکاران (۲۰۰۷) از تکنیک‌های طیف‌سنجی برای تعیین مقدار رس خاک استفاده کردند.

از پنج متغیر کمکی مهم در برآورد اجزاء بافت خاک، چهار متغیر بیانگر توپوگرافی منطقه بود. این در حالی است که از ۱۵ متغیر مهم در مدل‌سازی بافت خاک، کمترین اهمیت مربوط به انحنا افقی یا مماسی (Hcurve) بود که یک پارامتر توپوگرافی است (شکل ۴). این نتایج نشان می‌دهند اهمیت متغیرهای استخراج شده از DEM در برآورد اجزاء بافت خاک می‌تواند بسیار متفاوت باشد. انحنا افقی در واقع نیمرخ شیب در جهت عمود بر شیب کلی یک منطقه است. در واقع این نوع انحنا میزان محدب یا مقعر بودن سطح زمین در امتداد عمود بر شیب کلی را نشان می‌دهد. در مناطقی که شیب کلی وجود دارد ولی شیب جانبی کم است و یا وجود ندارد این انحنا هم کم است و یا وجود ندارد. در نتیجه تغییرات Hcurve در منطقه کم و عامل مهمی در کنترل تغییرات مکانی خواص خاک نیست. در منطقه مورد بررسی شیب ملایم کلی از دامنه ارتفاعات تا مرکز دشت وجود دارد ولی شیب جانبی کم و در برخی جاها وجود ندارد. پارامترهای استخراج شده از DEM نماینده توپوگرافی، یکی از مهم‌ترین فاکتورهای خاک‌سازی هستند (گلانت و اوستین، ۲۰۱۵). این پارامترها با اثر مستقیم و غیرمستقیم روی حرکت آب، توزیع آب و فرایندهای فرسایش و رسوب‌گذاری می‌توانند در بافت خاک موثر باشند. به عنوان نمونه، MRVBF شاخصی از مناطق رسوب‌گذاری است (گلانت و داوولینگ، ۲۰۰۳) و مقادیر بالای آن بیانگر مکان‌های رسوب‌گذاری است که معمولاً ذرات ریزتر تجمع می‌یابند. همچنین بین شیب و مقدار ذرات ریز و درشت به ترتیب رابطه منفی و مثبت وجود دارد (یومالی و همکاران، ۲۰۱۲).

نتایج بررسی انجام شده در دانمارک نشان داد ارتفاع با کنترل حرکت آب و رسوب بیشترین تاثیر را روی توزیع رس، شن ریز و شن درشت و درجه شیب با تاثیر روی سرعت جریان سطحی و زیرسطحی بیشترین تاثیر را

روی توزیع سیلت داشت (گریو و همکاران، ۲۰۱۲). اکپا و همکاران (۲۰۱۴) در مدل‌سازی بافت خاک‌های کشور نیجریه از مدل جنگل تصادفی و متغیرهای کمکی از جمله باندهای طیفی لندست، پارامترهای استخراج شده از DEM، میانگین دما و بارندگی، کاربری اراضی و نوع خاک استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد اهمیت نسبی متغیرهای مورد استفاده بسته به عمق خاک و جزء بافت متفاوت بود ولی همانند تحقیق حاضر، پارامترهای استخراج شده از DEM جزء متغیرهای مهم در مدل‌سازی بافت خاک بودند؛ زیرا این پارامترها هم روی حرکت عمودی و هم حرکت جانبی ذرات و آب تاثیر دارند. چاگاس و همکاران (۲۰۱۶) در مدل‌سازی بافت خاک با استفاده از مدل RF در یک منطقه با پستی و بلندی کم نشان دادند بجز باند یک و نسبت باند پنج به هفت لندست ۵، سایر باندهای طیفی و نسبت‌های آن‌ها همبستگی معنی‌داری با اجزاء بافت خاک داشتند. بر خلاف نتایج تحقیق حاضر، این نتایج بیانگر اهمیت بالای داده‌های طیفی در مدل‌سازی بافت خاک بود. به طور کلی در مناطق نسبتاً مسطح و با پستی و بلندی کم، پارامترهای استخراج شده از DEM اهمیت کمتری در توزیع مکانی خاک‌ها دارند و در این مناطق معمولاً داده‌های سنجش از دور دارای اهمیت بیشتری هستند. در بررسی انجام شده در خاک‌های واقع در دشت سیستان، پهلوان‌راد و اکبری‌مقدم (۲۰۱۸) از مدل جنگل تصادفی و پارامترهای استخراج شده از DEM و تصاویر ماهواره‌ای برای مدل‌سازی بافت خاک استفاده کردند. مطابق با نتایج تحقیق حاضر، نتایج آن‌ها نشان داد برای سه جزء رس، سیلت و شن موثرترین متغیرهای کمکی پارامترهای استخراج شده از DEM بودند. همچنین مهربانی قربانی و همکاران (۲۰۱۹) در مدل‌سازی بافت خاک در منطقه زرنه کرمان به این نتیجه رسیدند که داده‌های طیفی، MRVBF و شاخص خیزی (WI) قابلیت بالایی در تخمین بافت خاک داشتند. در تحقیق انجام شده توسط امیریان چکان و همکاران (۲۰۱۹)، نشان داده شد NDVI، MRVBF، شیب و باند ۳ تصویر لندست ۸ بیشترین اهمیت را در تخمین اجزاء

بافت خاک داشتند. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد به طور کلی اهمیت متغیرهای استخراج شده از تصویر ماهواره‌ای در مدل‌سازی بافت خاک کمتر از متغیرهای استخراج شده از DEM بود که با نتایج تحقیق حاضر هم‌خوانی دارد. در بررسی انجام شده در شمال غرب ترکیه سه مدل یادگیری ماشین شامل درخت تصمیم، RF و SVM برای مدل‌سازی بافت خاک با استفاده از داده‌های به دست آمده از DEM و سنجش از دور استفاده گردید (کایا و همکاران، ۲۰۲۲). نتایج نشان داد مهم‌ترین متغیر پیش‌بینی کننده شاخص خیزی به دست آمده از DEM و پس از آن داده‌های سنجش از دور بود. این نتایج همانند نتایج حاصل تحقیق حاضر، اهمیت بالای پارامترهای استخراج شده از DEM را نشان می‌دهد.

### کارایی مدل‌های مورد استفاده

به طور کلی و بر اساس مقادیر RMSE و MAE، کارایی هر سه مدل RF، SVM و kNN در تخمین داده‌های تبدیل‌نشده از داده‌های تبدیل شده به روش‌های clr و ilr بیشتر و از روش alr کمتر بود؛ در صورتی که کارایی مدل حاصل از ترکیب آن‌ها برای تبدیل‌های alr و ilr بیشتر از داده‌های تبدیل‌نشده بود (جدول ۳). نتایج کلی بیانگر کارایی بالاتر مدل‌های مورد استفاده در مدل‌سازی داده‌های تبدیل‌شده به روش alr بود.

باتوجه به نتایج به دست آمده (جدول ۳) کمترین مقدار RMSE داده‌های تبدیل شده برای سیلت و شن مربوط به مدل SVM بود که نشان‌دهنده کارایی بالای این مدل در تخمین اجزا سیلت و شن بود. در تخمین رس نیز کمترین RMSE برای داده تبدیل‌شده به روش clr و ilr مربوط به مدل SVM بود. به‌طور کلی مدل GR نسبت به سه مدل دیگر منجر به تخمین‌های بهتری از اجزاء بافت خاک نگردید (جدول ۳)؛ بنابراین و بر خلاف انتظار، مدل‌های ترکیبی ممکن است همیشه منجر به نتایج بهتری نشوند. در بررسی انجام شده در جنوب‌غربی چین توسط

ویو و همکاران (۲۰۱۸)، از سه روش یادگیری ماشین شامل SVM، شبکه‌های عصبی مصنوعی و درخت طبقه‌بندی برای مدل‌سازی کلاس‌های بافت خاک استفاده شد. به‌طور کلی نتایج آن‌ها نشان داد مدل SVM نسبت به دو مدل دیگر دارای کارایی بهتری در تخمین اجزاء بافت خاک بود. الگوریتم به کار رفته در SVM با تلفیق جنبه‌هایی از روش‌های رگرسیونی و روش‌های k نزدیکترین همسایه توانایی مدل‌سازی روابط پیچیده را دارد و در نتیجه تشکیل یک مدل یادگیری ماشین قوی را می‌دهد (لانترن، ۲۰۱۵). در نقشه‌برداری رقومی خاک مدل‌سازی خاک بر اساس ارتباط متغیرهای کمکی با ویژگی‌های خاک است. وقتی داده‌های بافت خاک به روش‌های log-ratio تبدیل می‌شوند متغیرهای جدیدی به وجود می‌آیند و مدل‌سازی با استفاده از این متغیرهای جدید انجام می‌شود. همبستگی این متغیرهای جدید با متغیرهای محیطی نسبت به داده‌های اولیه (تبدیل نشده) ممکن است بیشتر یا کمتر باشد. به طور کلی نتایج این پژوهش بیانگر بهبود تخمین‌ها با استفاده از تبدیل alr بود؛ بنابراین دلیل این بهبود را می‌توان ایجاد متغیرهای جدید با استفاده از تبدیل alr دانست که همبستگی بیشتری با متغیرهای کمکی داشتند.

به‌نظر می‌رسد اولین تحقیق انجام شده که در آن از تبدیل‌های log-ratio برای تضمین برابر ۱۰۰ درصد شدن تخمین‌های رس، سیلت و شن استفاده گردید، مربوط به اوده و همکاران (۲۰۰۳) است. آن‌ها از تبدیل alr قبل از مدل‌سازی به روش کریجینگ استفاده کردند و بر اساس مقادیر RMSE و میانگین خطا (ME)، نشان دادند تبدیل داده‌ها باعث بهبود کارایی مدل در تخمین اجزاء بافت خاک گردید که با نتایج تحقیق حاضر هم‌خوانی دارد. در بررسی انجام شده توسط وانگ و شی (۲۰۱۷) از چهار روش تبدیل داده شامل alr، clr، alr و slr<sup>۱</sup> برای مدل‌سازی بافت خاک استفاده گردید. نتایج نشان داد از چهار تبدیل مورد استفاده، روش تبدیل clr منجر به کارایی بالاتری گردید که با نتایج تحقیق حاضر هم‌خوانی ندارد. در تحقیق انجام شده توسط

1. Symmetry log-ratio

استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند هر دو مدل فقط باعث بهبود تخمین‌های رس گردیدند و مدل GR نسبت به مدل Bates-Granger منجر به RMSE کمتر و تخمین بهتر عدم قطعیت شد. در بررسی انجام شده توسط چن و همکاران (۲۰۲۰) پنج روش ترکیب مدل برای مدل‌سازی و تخمین ماده آلی در کشور فرانسه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد هر پنج روش ترکیب مدل‌ها باعث بهبود تخمین ماده آلی خاک گردید که با یافته‌های تحقیق حاضر همخوانی ندارد. عابدی و همکاران (۲۰۲۱) مدل‌سازی شوری خاک در منطقه داراب استان فارس را با استفاده از شش مدل یادگیری ماشین و مدل حاصل از ترکیب آن‌ها انجام دادند. به طور کلی، نتایج آن‌ها نشان داد مدل ترکیبی GR نسبت به شش مدل مورد استفاده باعث کاهش RMSE و افزایش  $R^2$  گردید. این نتایج برخلاف نتایج تحقیق حاضر هستند که نشان داد مدل GR برتری خاصی نسبت به مدل‌های دیگر نداشت. سوائن و همکاران (۲۰۲۱) از سه مدل رگرسیون حداقل مربعات جزیی، RF و SVM برای مدل‌سازی اجزاء بافت خاک با استفاده از داده‌های طیفی سنتینل دو و طیف‌سنجی در آزمایشگاه استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد ترکیب مدل‌ها به روش میانگین‌گیری ساده باعث بهبود زیادی در دقت تخمین‌های هر سه جزء رس، سیلت و شن گردید.

مقایسه نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر با نتایج سایر مطالعات انجام شده نشان می‌دهد کارایی مدل‌های مورد استفاده و روش‌های تبدیل داده در مطالعات مختلف تا حدودی متفاوت بود. این تفاوت‌ها می‌تواند مربوط به تفاوت در نوع داده‌ها، تعداد داده، نوع مدل، مقیاس مطالعه و شرایط منطقه مورد مطالعه باشد؛ بنابراین، با وجود این‌که به طور کلی در تحقیق حاضر مدل SVM تبدیل  $alr$  منجر به نتایج بهتری گردید، ولی نمی‌توان این مدل و این روش تبدیل داده را برای مدل‌سازی بافت خاک در همه مناطق و شرایط پیشنهاد داد؛ به عبارت دیگر برای هر منطقه بهتر است نوع تبدیل و مدل مناسب را پیدا کرد. همچنین، با وجود این‌که در اکثر مطالعات انجام شده

امیریان چکان و همکاران (۲۰۱۹) کارایی مدل RF در مدل‌سازی بافت خاک با استفاده از داده‌های تبدیل شده به سه روش  $alr$ ،  $clr$  و  $ilr$  و داده‌های تبدیل نشده بررسی گردید. بر اساس RMSE، نتایج آن‌ها نشان داد که هر چند مدل RF کارایی نسبتاً مشابهی در تخمین داده‌های تبدیل شده و تبدیل نشده داشت، ولی تخمین‌های به دست آمده از داده‌های تبدیل شده تا حدودی اریب بود. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد هر چند که مقادیر RMSE برای هر سه تبدیل تقریباً مشابه بود، ولی استفاده از داده‌های تبدیل شده به روش  $clr$  منجر به نتایج بهتری گردید که با نتایج تحقیق حاضر همخوانی ندارد. ژانگ و همکاران (۲۰۲۰) از پنج مدل یادگیری ماشین و سه روش تبدیل  $alr$ ،  $clr$  و  $ilr$  برای مدل‌سازی بافت خاک در چین استفاده کردند. نتایج آن‌ها بیانگر کارایی بالاتر مدل RF و استفاده از داده‌های تبدیل شده به روش  $ilr$  بود که از نظر بهترین مدل و بهترین تبدیل با نتایج تحقیق حاضر همخوانی ندارد. وانگ و همکاران (۲۰۲۱) از دو روش تبدیل  $alr$  و  $ilr$  و دو مدل یادگیری ماشین شامل RF و Cubist برای مدل‌سازی بافت خاک استفاده کردند. برخلاف تحقیق حاضر که تبدیل  $alr$  منجر به بهترین تخمین‌ها شد، نتایج بررسی آن‌ها بیانگر کارایی بالای مدل RF و تبدیل  $ilr$  بود.

مطالعات انجام شده در زمینه استفاده از مدل‌های ترکیبی از جمله GR در مدل‌سازی خواص خاک نسبتاً محدود و استفاده از این مدل‌ها در مدل‌سازی داده‌های تبدیل شده و تبدیل نشده بافت خاک گزارش نشده است. ملانو و همکاران (۲۰۱۴) از چهار مدل ترکیبی برای مدل‌سازی pH تا عمق دو متری خاک در کشور استرالیا استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد مدل‌های ترکیبی باعث بهبود تخمین pH خاک در همه عمق‌های مورد بررسی گردید که با نتایج تحقیق حاضر همخوانی ندارد. با توجه به کارایی بالاتر روش GR، آن‌ها این روش را برای مدل‌سازی در مطالعات نقشه‌برداری رقومی خاک پیشنهاد دادند. رومن دوبارکو و همکاران (۲۰۱۷) در مدل‌سازی بافت خاک در کشور فرانسه از دو مدل ترکیبی GR و Bates-Granger

### نتیجه گیری

در این مطالعه کارایی سه مدل kNN، RF و SVM و مدل به دست آمده از ترکیب آنها (مدل GR) برای مدل سازی بافت خاک مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه برای اولین بار از یک مدل ترکیبی برای مدل سازی داده های تبدیل شده (تبدیلات log-ratio) و تبدیل نشده بافت خاک استفاده گردید و نتایج با تخمین های به دست آمده از سه روش رایج یادگیری ماشین مقایسه گردید.

هرچند که کارایی مدل های مختلف برای اجزاء مختلف و تبدیل های مختلف متفاوت بود، ولی به طور کلی کارایی هر سه مدل در مدل سازی داده های تبدیل شده به روش alr بیشتر از کارایی آنها در مدل سازی داده های تبدیل نشده و داده های تبدیل شده به روش clr و ilr بود. همچنین مدل GR در مدل سازی داده های تبدیل شده به روش alr و ilr کارایی بیشتری نسبت به داده های تبدیل نشده نشان داد. مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات انجام شده نشان داد در شرایط و مناطق مختلف و برای اجزاء مختلف بافت خاک، بهترین مدل و بهترین روش تبدیل متفاوت بود و نمی توان یک مدل و یک روش تبدیل را برای مدل سازی بافت خاک در همه شرایط پیشنهاد داد و بهتر است مدل و روش تبدیل مناسب با توجه به شرایط و جزء مورد نظر (رس، سیلت یا شن) تعیین شود.

برخلاف انتظار، ترکیب تخمین سه مدل به روش GR منجر به تخمین های بهتری از اجزاء بافت خاک نگردید. این نتیجه از این نظر اهمیت دارد که برای مدل سازی بافت خاک شاید بتوان به جای ترکیب چند مدل که ممکن است باعث پیچیدگی بیشتر مدل سازی شود و همچنین منجر به صرف زمان بیشتری برای مدل سازی شود، از یک مدل استفاده کرد.

با توجه به این که نتایج متفاوتی برای مدل ها و تبدیل های مختلف به دست آمد، می توان نتیجه گرفت که با افزایش تعداد مدل های مورد استفاده و استفاده از سایر روش های ترکیب تخمین مدل ها، شاید بتوان نتایج بهتری

استفاده از ترکیب مدل ها نسبت به استفاده از مدل ها به صورت جداگانه منجر به بهبود تخمین ها گردید، ولی در مطالعه حاضر استفاده از مدل ترکیبی GR منجر به بهبود قابل توجهی در دقت تخمین ها نگردید. مدل های مختلف معمولاً دارای ساختارها و مکانیسم های متفاوتی هستند (تجربی، آماری، ریاضیاتی، شبیه سازی، ...) و هر کدام ممکن است فرضیاتی برای ساده سازی داشته باشند. همچنین برخی مدل ها متغیر هدف را بیش و برخی کم برآورد می کنند. علاوه بر این، تخمین های مدل های مختلف ممکن است اختلاف زیادی با هم داشته باشند؛ بنابراین، در برخی شرایط ممکن است ترکیب تخمین های مدل هایی مختلف بر اساس رویکر مورد استفاده در مدل GR باعث بهبود کارایی مدل ها نشود.

### توزیع مکانی اجزاء بافت خاک

نقشه های پهنه بندی اجزاء بافت خاک نشان داد توزیع ذرات رس، سیلت و شن در قسمت های مختلف منطقه متفاوت است (شکل ۵). شیب روی میزان و قدرت رواناب و در نتیجه توانایی حمل ذرات توسط آن تاثیر دارد (یومالی و همکاران، ۲۰۱۲). ذرات ریزتر رس و سیلت به دلیل سبک تر بودن راحت تر توسط جریان آب از شیب های بیشتر به سمت شیب های کمتر منتقل می شوند ولی ذرات شن به علت درشت بودن و وزن بیشتر کمتر توسط آب های سطحی منتقل می شوند. در بررسی مطالعات انجام شده روی مدل سازی ویژگی های خاک با استفاده از روش های نقشه برداری رقومی، چن و همکاران (۲۰۲۲) بیان کردند در مقیاس گسترده، بعد از مواد مادری مهم ترین عامل موثر در توزیع مکانی اجزاء بافت خاک ارتفاع بود. اهمیت ارتفاع در توزیع مکانی اجزاء بافت خاک در مطالعات دیگری هم گزارش شده است (گریو و همکاران، ۲۰۱۲؛ ویو و همکاران، ۲۰۱۸).

کسب کرد. با توجه به وسعت نسبتاً کم منطقه مطالعاتی و تحقیقات بیشتری در این زمینه در مناطق وسیع‌تر و با تنوع تغییرات نسبتاً کم عوامل خاک‌سازی، پیشنهاد می‌شود بیشتر فاکتورهای خاک‌سازی انجام شود.

## References

1. Abedi, F., Amirian-Chakan, A., Faraji, M., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Kerry, R., and Razmjoue, D., and Scholten, T. 2021. Salt dome related soil salinity in southern Iran: Prediction and mapping with averaging machine learning models. *Land Degradation and Development*, 32: 1540-1555.
2. Adhikari, K., Minasny, B., Greve, M.B., and Greve, M.H. 2014. Constructing a soil class map of Denmark based on the FAO legend using digital techniques. *Geoderma*, 214: 101-113.
3. Aitchison, J. 1986. *The statistical analysis of compositional data*. London: Chapman and Hall.
4. Aitchison, J. 1992. On criteria for measures of compositional difference. *Mathematical Geology*, 24: 365-379.
5. Akpa, S.I.C., Odeh, I.O.A., and Bishop, T.F.A. 2014. Digital mapping of soil particle-size fractions for Nigeria. *Soil Science Society of America Journal*, 78: 1953-1966.
6. Banaei, M. 2000. *Soil resources and use potentiality map of Iran*, 1: 1000000. Karaj: Soil and Water Research Institute.
7. Behrens, T., Schmidt, K., Viscarra Rossel, R.A., Gries, P., Scholten, T., and MacMillan, R.A. 2018. Spatial modelling with Euclidean distance fields and machine learning. *European Journal of Soil Science*, 69: 757-770.
8. Breiman, L. 2001. Random forests. *Machine Learning*, 45: 5-32.
9. Chagas, C.S., Junior, W.C., Bhering, S.B., and Filho, B.C. 2016. Spatial prediction of soil surface texture in a semiarid region using random forest and multiple linear regressions. *Catena*, 139: 232-240.
10. Chen, S., Arrouays, D., Mulder, V.L., Poggio, L., Minasny, B., Roudier, P., Libohova, Z., Lagacherie, P., Shi, Z., Hannam, J., Meersmans, J., Richer-de-Forges, A.C., and Walter, C. 2022. Digital mapping of GlobalSoilMap soil properties at a broad scale: A review. *Geoderma*, 409, 115567.
11. Chen, S., Mulder, V.L., Heuvelink, G.B.M., Poggio, L., Cabuet, M., Román Dobarco, M., and Arrouays, D. 2020. Model averaging for mapping topsoil organic carbon in France. *Geoderma*, 366, 114237.
12. Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Whichmann, V., and Böhner, J. 2015. System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development*, 8: 1991-2007.
13. Diks, C.G.H., and Vrugt, J.A. 2010. Comparison of point forecast accuracy of model averaging methods in hydrologic applications. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 24: 809-820.
14. Egozcue, J.J., Pawłowsky-Glahn, V., Mateu-Figueras, G., and Barcelo-Vidal, C. 2003. Isometric logratio transformations for compositional data analysis. *Mathematical Geology*, 35: 279-300.
15. Filzmoser, P., Hron, K., and Reimann, C. 2009. Principal component analysis for compositional data with outliers. *Environmetrics*, 20: 621-632.
16. Gallan, J.C., and Austin, J.M. 2015. Derivations of terrain covariates for digital soil mapping in Australia. *Soil Research*, 53: 895-906.
17. Gallant, J.C., and Dowling, T.I. 2003. A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas. *Water Resources Research*, 39: 1347-1359.
18. Gee, G.W., and Bauder, J.W. 1986. Particle size analysis. In A. Klute (ed). *Methods of soil analysis: Part 1*. American Society of Agronomy, Madison.
19. Granger, C.W., and Ramanathan, R. 1984. Improved methods of combining forecasts. *Journal of Forecasting*, 32: 197-204.

20. Greve, M.H., Kheir, R.B., Greve, M.B., and Bøcher, P.K. 2012. Quantifying the environmental parameters to predict soil texture fractions using regression-tree model with GIS and LIDAR data: The case study of Denmark. *Ecological Indicators*, 18: 1-10.
21. Hengl, T., Rossiter D.G., and Stein, A. 2003. Soil sampling strategies for spatial prediction by correlation with auxiliary maps. *Australian Journal of Soil Research*, 418: 1403-1422.
22. Kaya, F., Başayığit, L., Keshavarzi, A., and Francaviglia, R. 2022. Digital mapping for soil texture class prediction in northwestern Türkiye by different machine learning algorithms. *Geoderma Regional*, 31, e00584.
23. Lantz, B. 2015. *Machine learning with R*. Packt Publishing Ltd., Birmingham.
24. Lark, R.M., and Bishop, T.F.A. 2007. Cokriging particle size fractions of the soil. *European Journal of Soil Science*, 583: 763-774.
25. Liu, F., Geng, X., Zhu, A.X., Fraser, W., and Waddell, A. 2012. Soil texture mapping over low relief areas using land surface feedback dynamic patterns extracted from MODIS. *Geoderma*, 171- 172: 44-52.
26. Mallah, S., Delsouz Khaki, B., Davatgar, N., Scholten, T., Amirian-Chakan, A., Emadi, M., Kerry, R., Mosavi, A.H., and Taghizadeh-Mehrjardi, R. 2022. Predicting soil textural classes using random forest models: learning from imbalanced dataset. *Agronomy*, 2613.
27. Malone, B.P., Minasny, B., Odgers, N.P., and McBratney, A.B. 2014. Using model averaging to combine soil property rasters from legacy soil maps and from point data. *Geoderma*, 232: 34-44.
28. Mehrabi-Gohari, E., Matinfar, H.R., Jafari, A., Taghizadeh-Mehrjardi, R., and Triantafilis, J. 2019. The spatial prediction of soil texture fractions in arid regions of Iran. *Soil Systems*, 3: 65.
29. Metternicht, G.I., and Zinck, J.A. 2003. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. *Remote Sensing of Environment*, 85: 1–20.
30. Minasny, B., and McBratney, A.B. 2018. Limited effect of organic matter on soil available water capacity. *European Journal of Soil Science*, 69: 39-47.
31. Odeh, I.O.A., Todd, A.J., and Triantafilis, J. 2003. Spatial prediction of soil particle-size fractions as compositional data. *Soil Science*, 168: 501-515.
32. Pahlavan-Rad, M.R., and Akbarimoghaddam, A. 2018. Spatial variability of soil texture fractions and pH in a flood plain (case study from eastern Iran). *Catena*, 160: 275-281.
33. Poggio, L., and Gimona, A. 2017. 3D mapping of soil texture in Scotland. *Geoderma Regional*, 9: 5-16.
34. Román Dobarco, M., Arrouays, D., Lagacherie, P., Ciampalini, R., and Saby, N.P.A. 2017. Prediction of topsoil texture for Region Centre (France) applying model ensemble methods. *Geoderma*, 298: 67-77.
35. Sun, Y., Wong, A.K.C., and Kamel, M.S. 2009. Classification of imbalanced data: A review. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 23: 687-719.
36. Swain, S.R., Chakraborty, P., Panigrahi, N., Vasava, H.B., Reddy, N.N., Roy, S., Majeed, I., and Das, B. S. 2021. Estimation of soil texture using Sentinel-2 multispectral imaging data: An ensemble modeling approach. *Soil and Tillage Research*, 213: 105134.
37. Taghizadeh-Mehrjardi, R., Minasny, B., Toomanian N., Zeraatpisheh, M., Amirian-Chakan, A., and Triantafilis, J. 2019. Digital mapping of soil classes using ensemble of models in Isfahan region, Iran. *Soil Systems*, 3: 37.
38. Taghizadeh-Mehrjardi, R., Nabiollahi, K., Minasny, B., and Triantafilis, J. 2015. Comparing data mining classifiers to predict spatial distribution of USDA-family soil groups in Baneh region, Iran. *Geoderma*, 253–254: 67–77

39. Taghizadeh-Mehrjardi, R., Toomanian, N., Khavaninzadeh, A.R., Jafari, A., and Triantafyllis, J. 2016. Predicting and mapping of soil particle-size fractions with adaptive neuro-fuzzy inference and ant colony optimization in central Iran. *European Journal of Soil Science*, 67: 707–725.
40. Umali, B.P., Oliver, D.P., Forrester, S., Chittleborough, D.J., Hutson, J.L., Kookana, R.S., and Ostendorf, B. 2012. The effect of terrain and management on the spatial variability of soil properties in an apple orchard. *Catena*, 93: 38-48.
41. Van Looy, K., Bouma, J., Herbst, M., Koestel, J., Minasny, B., Mishra, U., Montzka, C., Nemes, A., Pachepsky, Y.A., Padarian, J. and Schaap, M.G. 2017. Pedotransfer functions in Earth system science: Challenges and perspectives. *Reviews of Geophysics*, 55: 1199-1256.
42. Vapnik, V.N. 1995. *The nature of statistical learning theory*. Springer, New York.
43. Waiser, T.H., Morgan, C.L.S., Brown, D.J., Hallmark, C.T. 2007. In situ characterization of soil clay content with visible near-infrared diffuse reflectance spectroscopy, *Soil Science Society of America Journal*, 71: 389–396.
44. Wang, C., Zhao, L., Fang, H., Wang, L., Xing, Z., Zou, D., Hu, G., Wu, X., Zhao, Y., Sheng, Y., Pang, Q., Du, E., Liu, G., and Yun, H. 2021. Mapping surficial soil particle size fractions in alpine permafrost regions of the Qinghai–Tibet plateau. *Remote Sensing*, 13: 1392.
45. Wang, D., Yang, H., Qian, H., Gao, L., Li, C., Xin, J., Tan, Y., Wang, Y., and Li, Z. 2023. Minimizing vegetation influence on soil salinity mapping with novel bare soil pixels from multi-temporal images. *Geoderma*, 439, 116697
46. Wang, Z., and Shi, W. 2017. Mapping soil particle-size fractions: A comparison of compositional kriging and logratio kriging. *Journal of Hydrology*, 546: 526-541.
47. Wilding, L.P. 1985. Spatial variability: Its documentation, accommodation and implication to soil survey. P. 166–189. In D.R. Nielsen and J. Bouma (ed). *Soil spatial variability*. Pudoc, Wageningen.
48. Wu, W., Li, A.D., He, X.U., Ma, R., Liu, H.B., and Lv, J.K. 2018. A comparison of support vector machines, artificial neural network and classification tree for identifying soil texture classes in southwest China. *Computers and Electronics in Agriculture*, 144: 86-93.
49. Wulder, M.A., White, J.C., Loveland, T.R., Woodcock, C.E., Belward, A.S., Cohen, W.B., Fosnight, E.A., Shaw, J., Masek, J.G., and Roy, D.P. 2016. The global Landsat archive: status, consolidation, and direction. *Remote Sensing of Environment*, 185: 271–283.
50. Xuemei, L., and Jianshe, L. 2013. Measurement of soil properties using visible and short wave-near infrared spectroscopy and multivariate calibration. *Measurement*, 46: 3808–3814.
51. Zhang, M., Shi, W., and Xu, Z. 2020. Systematic comparison of five machine-learning models in classification and interpolation of soil particle size fractions using different transformed data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24: 2505-2526.





## امکان اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک‌های ریزبافت شور به روش انعکاس سنج تأخیر زمانی

داود نیک‌نژاد\*

مربی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تبریز، ایران آدرس ایمیل:

[niknezhad2005@yahoo.com](mailto:niknezhad2005@yahoo.com)

«مقاله پژوهشی»

دریافت: ۱۴۰۲/۶/۱۹ و پذیرش: ۱۴۰۳/۳/۱۳

### چکیده

اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک به روش‌های مختلف صورت می‌گیرد که می‌توان به روش‌هایی مانند روش‌های وزنی و حجمی، اشعه گاما، و انعکاس‌سنجی زمانی اشاره نمود. روش‌های مستقیم زمان‌بر بوده و دست‌خوردگی نمونه خاک را به همراه داشته و برخی روش‌های غیرمستقیم دارای خطرات تشعشع مواد رادیواکتیو است. از بین این روش‌ها، روش<sup>۱</sup> TDR که جزو روش‌های انعکاس‌سنجی زمانی می‌باشد روشی سریع و بی‌خطر است و به همین دلیل مورد توجه قرار گرفته و در خاک‌های با شرایط عادی نتایج قابل قبولی می‌دهد؛ اما، برای خاک‌های شور این روش قادر به اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک نیست. هدف این پژوهش ساخت حسگرهایی بوده که دستگاه TDR با استفاده از آن‌ها قادر به اندازه‌گیری مقدار رطوبت در خاک‌های ریزبافت شور باشد. با ساخت این حسگرها می‌توان رطوبت خاک‌های شور را با دستگاه TDR اندازه‌گیری نمود و در صورت مشاهده خطا می‌توان با ارائه مدل‌های واسنجی مناسب مقدار واقعی رطوبت خاک را به دست آورد. برای این منظور یک خاک ریزبافت از ایستگاه تحقیقات یکمه‌داش تهیه گردیده و با افزودن مقادیر متفاوتی از نمک به آن، نمونه خاک‌هایی با مقادیر رسانایی الکتریکی ۲۰، ۳۵ و ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر با تراکم طبیعی آماده شد. پس از تعیین نوع روکش مناسب برای پوشش‌دار نمودن میله حسگر رطوبتی که ماده پلیمری است، با آزمون و خطا، طول روکش مورد استفاده در میله وسطی حسگر رطوبتی برای خاک مذکور با شوری‌های یادشده در یک رطوبت مشخص تعیین گردید، که برابر طول میله حسگر رطوبتی بود. سپس حسگرهای پوشش‌دار شده برای اندازه‌گیری دیگر رطوبت‌های خاک آزمایش شد و مدل‌های واسنجی مناسب به دست آمد. با وارد کردن مقدار رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده به روش TDR در مدل‌ها می‌توان مقدار رطوبت خاک‌های ریزبافت شور را با دقت خوبی برآورد کرد.

واژه‌های کلیدی: روکش، حسگر رطوبتی، واسنجی، انعکاس‌سنجی

\*-آدرس ایمیل نویسنده مسئول: [niknezhad2005@yahoo.com](mailto:niknezhad2005@yahoo.com)



## مقدمه

رطوبت خاک یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های خاک بوده که نقش مهمی در فرایندهای بیولوژیک مانند جوانه زدن بذر، رشد گیاه و تغذیه گیاه دارد. نفوذ آب در خاک و تبخیر و تعرق، رطوبت خاک را از نظر زمانی و مکانی تغییر می‌دهد. بنابراین پایش پیوسته وضعیت رطوبتی خاک ضروری است. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک وجود دارد که به روش‌های مستقیم و غیرمستقیم تقسیم‌بندی می‌شود. تعیین مقدار رطوبت خاک به روش وزنی که یک روش مستقیم است معیاری است که روش‌های غیرمستقیم معمولاً بر اساس آن واسنجی می‌شود. علت استفاده از برخی روش‌های غیرمستقیم به جای روش وزنی، سریع بودن، کم‌هزینه بودن و دست نخوردگی خاک است (هونداما و همکاران، ۲۰۲۰). به کمک روش‌های غیرمستقیم اندازه‌گیری رطوبت خاک ازجمله روش انعکاس‌سنجی تأخیر زمانی (TDR)، انعکاس‌سنجی تأخیر فرکانسی (FDR<sup>۱</sup>) و مقاومت‌سنجی که رطوبت خاک را بر اساس برخی از شاخص‌های الکتریکی خاک ازجمله ثابت دی‌الکتریک، فرکانس و مقاومت الکتریکی تعیین می‌نمایند، به کمک این روش‌ها می‌توان مقدار رطوبت و شوری خاک را به‌طور خودکار اندازه‌گیری کرده و به دستگاه یا مراکز مور نظر ارسال نمود تا بر اساس موارد ارسالی مدیریت لازم در خصوص زمان آبیاری، تغذیه گیاه و غیره صورت گیرد (پانادی و همکاران، ۲۰۱۸).

روش‌هایی مانند تتاپروب، FDR و TDR که روش‌های نسبتاً جدیدی در اندازه‌گیری رطوبت خاک هستند روش‌های سریع و بی‌خطر بوده و مقدار رطوبت حجمی خاک را بدون دست‌خوردگی خاک بر اساس ویژگی‌های استثنایی آب ازجمله ثابت دی‌الکتریک آن در کوتاه‌ترین زمان ممکن با دقت قابل قبولی تعیین می‌نمایند. روش TDR در خاک‌های عادی و دارای شرایط نرمال بخصوص بافت‌های متوسط نتایج نسبتاً دقیق و قابل قبولی ارائه می‌دهد اما در خاک‌های با شرایط نامتعارف ازجمله

شوری و تراکم زیاد، دماهای زیاد و کم خاک، خیلی ریزبافت و دارای ماده آلی زیاد نتایج به دست آمده با مقدار واقعی متفاوت بوده و با خطا همراه است به همین دلیل معادلات و مدل‌های زیادی در این خصوص توسط پژوهشگران ارائه شده است که این مدل‌ها تابعی از یک یا چند عامل (ازجمله درصد ماده آلی، چگالی ظاهری خاک، دمای خاک و تخلخل) است.

در خاک‌های با شوری زیاد (بیشتر از ۱۵ دسی‌زی‌منس بر متر) بخصوص در خاک‌های ریزبافت، دستگاه TDR با حسگر دفنی معمولی قادر به اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک نبوده، لذا نمی‌توان در این خصوص معادله یا مدل واسنجی مشخصی ارائه نمود (نیک‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۶).

از طرف دیگر خاک‌های شور در استان آذربایجان شرقی بخصوص در حاشیه دریاچه ارومیه و زیر حوزه‌های آن (حوزه آجی‌چای ازجمله دشت مایان) که وسعت زیادی دارد و از پوشش مرتعی برخوردار است با توجه به پس‌روی دریاچه ارومیه روز به روز بر وسعت آن افزوده می‌شود. زمین‌های کشاورزی نیز که دارای شوری شدید خاک در این استان است چندین کیلومتر مربع مساحت دارند، بنابراین به‌منظور مدیریت و برنامه‌ریزی‌های لازم مرتبط با وضعیت رطوبتی خاک، نیاز به اندازه‌گیری و پایش رطوبتی خاک است. به همین دلیل اصلاح حسگر دفنی معمولی و امکان‌پذیر ساختن اندازه‌گیری رطوبت خاک‌های شور به روش TDR امری لازم و ضروری به نظر می‌رسد.

استفاده از روش TDR اولین بار توسط تاپ و همکاران (۱۹۸۰) صورت گرفت. آن‌ها از ضریب دی‌الکتریک برای تعیین غیرمستقیم رطوبت خاک استفاده کردند و برای این منظور از یک معادله تجربی درجه سه برای ارتباط بین ضریب دی‌الکتریک و میزان رطوبت حجمی خاک استفاده نمودند (معادله (۱)).

(۱)

$$\theta_v = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \times k - 5.5 \times 10^{-4} \times k^2 + 4.3 \times 10^{-6} \times k^3$$

دی‌الکتریک خیلی کم (۳/۲) تعیین شده است (اور و راث، ۱۹۹۹). آب پیوندی<sup>۱</sup> مانع از قطبی شدن مولکول‌های آب به‌وسیله جذب الکترواستاتیک زیاد روی بارهای منفی در سطح ذرات می‌شود (شانگ، ۱۹۹۴) که این عامل باعث برگشت سریعتر موج و کوتاه‌تر شدن زمان عبور امواج یا زمان تأخیر می‌شود. بنابراین وجود آب پیوندی منجر به تخمین کمتر مقدار رطوبت خاک می‌شود. در خاک‌های شنی و لومی سطح ویژه و نیروهای پیوند دهنده خیلی کم می‌باشند ولی در خاک‌های رسی با سطح ویژه زیاد، جذب شدن مولکول‌های آب بیشتر و قوی‌تر شده و اثر آب پیوندی در این نوع خاک‌ها قابل توجه می‌شود (جاکوبسن و شوئینگ، ۱۹۹۳).

توکا و همکاران (۲۰۱۹) تأثیر کود نیتروژن در خاک را بر دقت اندازه‌گیری رطوبت به روش TDR بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که افزودن کود نیتروژن به خاک باعث افزایش غلظت نمک در خاک شده و دقت اندازه‌گیری رطوبت خاک به روش TDR کاهش می‌یابد بنابراین لازم است که در اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک مورد نظر به روش TDR عمل واسنجی صورت گیرد. اسکندری (۱۳۸۲) با اندازه‌گیری شوری بر روی چهار نوع نمونه خاک با شوری‌های مختلف به روش TDR، به مقایسه نتایج حاصله با روش متداول رسانایی‌سنج الکتریکی پرداخت. نتایج او نشان داد که اندازه‌گیری در خاک‌هایی با رسانایی الکتریکی بیش از پنج دسی‌زیمنس بر متر به روش TDR به دلیل افت زیاد موج بازگشتی، باعث خطا در ارزیابی ضریب دی‌الکتریک شده و به دنبال آن درصد رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده خاک با خطا مواجه می‌شود. ضیا او و همکاران (۲۰۱۷) در مورد اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک‌های بسیار شور پژوهش‌هایی انجام دادند. آن‌ها توانستند با روکش‌دار نمودن یکی از میله‌های حسگر دفنی با مواد پلاستیکی، رطوبت خاک‌های شور را به روش TDR اندازه‌گیری نمایند. پژوهش‌های نیک‌نژاد و همکاران (۱۳۹۶) نشان داد که برای خاک‌های ریزبافت در

که در آن  $\theta_v$  رطوبت حجمی خاک بر حسب  $m^3 m^{-3}$  و  $k$  ثابت دی‌الکتریک خاک است.

رابطه دیگر که پایه فیزیکی دارد بر اساس ترکیبی از ثابت دی‌الکتریک سه فاز تشکیل دهنده توده خاک استوار است. این مدل تحت عنوان مدل ترکیبی<sup>۱</sup> شناخته شده و توسط دابسون و همکاران (۱۹۸۵) و راس و همکاران (۱۹۹۰) ارائه شده است. بر اساس این روش رطوبت حجمی خاک با معادله (۲) محاسبه می‌شود.

$$\theta_v = \frac{k^B - (1-n)k_s^B - nk_a^B}{k_w^B - k_a^B} \quad (2)$$

که در آن  $n$  تخلخل خاک ( $m^3 m^{-3}$ )،  $k_s$ ،  $k_a$  و  $k_w$  به ترتیب ثابت دی‌الکتریک هوا، خاک خشک و آب است.  $\theta$  پارامتر هندسی است که به چگونگی قرارگیری حسگر دستگاه در خاک بستگی دارد.

پژوهش‌های انجام‌شده توسط برخی پژوهشگران نشان می‌دهد که شوری زیاد خاک باعث پراکنده شدن سیگنال منعکس شده در خاک گردیده و در نتیجه باعث افزایش زمان برگشت امواج و خطا در اندازه‌گیری مقدار رطوبت حجمی خاک توسط دستگاه TDR می‌شود. این شوری زیاد (به دلیل زیاد بودن ثابت دی‌الکتریک نمک مرطوب نسبت به نمک خشک) ضریب دی‌الکتریک خاک را افزایش می‌دهد و منجر به تخمین زیادتر مقدار رطوبت خاک می‌شود (هوک و لونگستون، ۱۹۹۵؛ وایت و همکاران، ۱۹۹۴؛ سان و همکاران، ۲۰۰۰؛ وایزر ۱۹۹۷؛ رودس و همکاران ۱۹۸۹؛ نامدار خجسته و همکاران، ۱۳۹۰)

قطبی بودن مولکول‌های آب عامل اصلی ضریب دی‌الکتریک بزرگ (۸۰) این ماده است و هر عاملی که باعث تغییر در میزان قطبی شدن آب باشد باعث تغییر در ضریب دی‌الکتریک آب نیز می‌شود. کاهش قطبیت و گشتاور در یک میدان مغناطیسی باعث کاهش ضریب دی‌الکتریک آب می‌شود. برای آب پیوندی که به‌طور مستقیم به سطح ذرات خاک چسبیده است، ضریب

ریزبافت به روش TDR است تا بتوان بر اساس آن برنامه‌ریزی‌های لازم را در این خصوص انجام داد.

### مواد و روش‌ها

#### معرفی دستگاه TDR و حسگر رطوبتی مورد استفاده

دستگاه TDR که به آن بازتاب زمانی امواج گفته می‌شود از نوع Trase مدل 6050X1 ساخت شرکت Soil Moisture است. اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک با این دستگاه که به روش بازتاب زمانی امواج مشهور است بر پایه ارسال امواج الکترومغناطیس در طول میله حسگر و دریافت امواج برگشتی استوار است.

با توجه به منحنی‌های تبدیل که بر اساس نوع حسگر در ساختار نرم‌افزار داخلی دستگاه توسط شرکت سازنده قرار داده شده است ثابت دی‌الکتریک به مقدار رطوبت حجمی خاک تبدیل می‌شود و یا بر اساس مدل‌های مختلفی که توسط پژوهشگران ارائه شده‌اند می‌توان ثابت دی‌الکتریک قرائت شده با دستگاه TDR را به مقدار رطوبت حجمی خاک تبدیل نمود.

دستگاه TDR دارای حسگر دفنی سه شاخه‌ای به طول میله‌های ۲۰ سانتیمتر و حسگرهای اتصالی دو شاخه‌ای با طول میله‌های ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۰ سانتیمتر است. این دستگاه دارای سه پنجره زمانی اندازه‌گیری ۱۰، ۲۰ و ۴۰ نانوثانیه است که پنجره ۱۰ نانوثانیه برای حسگرهای با طول میله‌های ۱۵ الی ۳۰ سانتیمتر از طرف کارخانه سازنده پیشنهاد شده و برای حسگرهای با طول میله‌های بیشتر از ۳۰ سانتیمتر بهتر است از پنجره زمانی بزرگ‌تر استفاده شود. (راهنمای دستگاه TDR مدل TRASE، ۱۹۹۶).

در این پژوهش از حسگر تدفینی ساده مدل 6005L استفاده شده که دارای سه میله است میله وسطی حسگر به‌عنوان فرستنده امواج و دو میله کناری به‌عنوان گیرنده امواج عمل می‌نمایند. حسگر دفنی مورد استفاده در این پژوهش بر اساس مهندسی معکوس توسط پژوهشگران پژوهشکده حفاظت خاک و آب از روی نمونه

مقادیر رسانایی الکتریکی ۸ و ۱۶ دسی‌زیمنس بر متر اندازه‌گیری مقدار رطوبت به روش TDR به ترتیب در رطوبت‌های بیشتر از ۳۸ و ۳۱ درصد حجمی با استفاده از حسگر دفنی مدل 6005L که میله‌های آن بدون پوشش پلیمری است ممکن نیست و برای خاک‌های درشت‌بافت و متوسط‌بافت در شوری ۱۶ دسی‌زیمنس بر متر به ترتیب در رطوبت‌های بیشتر از ۱۱ و ۳۷ درصد حجمی نمی‌توان مقدار رطوبت خاک را به روش مذکور تعیین نمود. عبدالله و همکاران (۲۰۲۰) در مورد اندازه‌گیری رطوبت خاک به روش TDR این نتیجه رسیدند که در خاک‌های ریزبافت و در دامنه مرطوب دقت دستگاه TDR در اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک کاهش می‌یابد.

پژوهش‌هایی که تاکنون صورت گرفته، نشان می‌دهد که اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک به روش TDR با استفاده از حسگرهای دفنی و اتصالی که دارای میله‌های بدون پوشش پلیمری بوده است، در خاک‌های با شوری زیاد دارای محدودیت بوده و به دلیل ایجاد اختلال در دستگاه امکان اندازه‌گیری مقدار رطوبت در خاک‌های شور و خیلی شور میسر نیست.

در پژوهش‌های انجام شده با توجه به منابع موجود از حسگرهای معمولی بدون پوشش پلیمری استفاده شده که تمامی آن‌ها در خاک‌های شور به محدودیت اندازه‌گیری اشاره نمودند و بررسی‌های صورت گرفته در ایران نشان می‌دهد که اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک‌های شور به روش TDR با حسگرهای دارای پوشش پلیمری بررسی نشده و به همین دلیل واسنجی این روش نیز با حسگر پوشش‌دار مورد پژوهش قرار نگرفته است و حتی در منابع خارجی نیز موردی در این خصوص یافت نشد بنابراین پژوهش در این خصوص لازم و ضروری بوده که در صورت محقق شدن می‌توان مقدار رطوبت خاک‌های شور را با دقت مناسب اندازه‌گیری کرده و برنامه‌ریزی‌های لازم را در موارد مرتبط با رطوبت خاک انجام داد. بنابراین هدف از این پژوهش ساخت و واسنجی حسگر رطوبتی دفنی و امکان اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک‌های شور

خارجی آن مشابه‌سازی شده که طول میله‌های حسگر ۲۰ سانتی‌متر و طول کابل آن‌ها دو متر بودند.

## چگونگی ایجاد شوری مشخص در خاک

از آنجایی که در شرایط طبیعی و برای خاک‌های مختلف ترکیب املاح موجود در خاک‌ها متفاوت است بنابراین برای کاهش خطا و استفاده از نتایج آزمایشگاهی برای شرایط صحرایی بهتر است تا حد امکان شرایط آزمایشگاهی خاک را از نظر شوری و درجه تراکم به حالت طبیعی نزدیک‌تر ساخت. با توجه به نتایج پژوهش اصغرزاد (۱۳۷۹) درصد وزنی نمک‌های غالب در خاک‌های استان مشخص شده است. این نمک‌ها عبارت بودند از سولفات منیزیم (۱۴/۹۱ درصد وزنی)، سولفات سدیم (۳۰/۶۲ درصد وزنی)، کلرید سدیم (۲۷/۷۰ درصد وزنی) و کلرید کلسیم (۲۶/۷۷ درصد وزنی). در این پژوهش نیز از همین درصدهای وزنی استفاده شد.

برای ایجاد شوری‌های مختلف در خاک مورد نظر، به ازای مقدار مشخصی از وزن خاک خشک آماده شده، مقداری نمک مطابق درصدهای مذکور افزوده شد بعد از اینکه مقادیر وزنی نمک‌ها مشخص شد آن‌ها را به نمونه خاک‌هایی که از قبل آماده شده بودند افزوده و آن‌قدر به هم زده شد تا نمونه یکنواخت به دست آید. خاک مورد استفاده ریزبافت و غیرشور بوده که از زمین‌های اطراف شهرستان تیکمه‌داش واقع در استان آذربایجان شرقی تهیه شد. خاک مذکور از الک شماره ۵ با اندازه چشمه ۴ میلی‌متر عبور داده شد و به حالت رطوبت هواخشک رسانده شد.

برای به دست آوردن رابطه تجربی وزن نمک و رسانایی الکتریکی در خاک با فرض یک وزن ثابت ترکیب خاک و نمک، مقادیر مختلفی از نمک به خاک مورد نظر افزوده شد و رسانایی الکتریکی ترکیب‌های به دست آمده اندازه‌گیری شد بدین ترتیب برای خاک مذکور ۱۸ مورد رسانایی الکتریکی به ازای مقادیر مختلف متناظر نمک به دست آمد این داده‌ها وارد نرم‌افزار Excel گردیده و نمودار تجربی مربوط به آن ترسیم شد به‌طوری که محور افقی نمودار،

وزن نمک بر حسب گرم و محور عمودی آن را رسانایی الکتریکی بر حسب دسی‌زیمنس بر متر تشکیل می‌داد. از روی نمودار یا معادله رگرسیونی به دست آمده می‌توان مقدار نمک مورد نیاز برای رسانایی الکتریکی مشخص در خاک مورد نظر را محاسبه نمود.

## انتخاب پوشش مناسب برای روکش‌دار کردن

### حسگر رطوبتی

از آنجایی که حسگر دفنی معمولی برای اندازه‌گیری رطوبت خاک در شرایط متعارف مورد استفاده قرار می‌گیرد و برای خاک‌های با شوری زیاد دستگاه TDR در موقع اندازه‌گیری رطوبت خاک با خطا مواجه می‌شود. برای رفع این مشکل حسگر دفنی پوشش‌دار پیش‌بینی شده است که میله وسطی آن دارای نوعی پوشش پلیمری است اما با توجه به اندازه‌گیری‌های صورت گرفته، رطوبت اندازه‌گیری شده با این حسگر توسط دستگاه TDR، دیگر با پیام خطا مواجه نمی‌شود منتها مقدار رطوبت خاک را گاهی بیش از دو برابر نشان می‌داد که قابل اعتماد نبود. در نتیجه با استفاده از مهندسی معکوس در ساخت این حسگر از نمونه اصلی که ساخت شرکت Equipment Soil moisture Corp آمریکا است عملاً به جواب نمی‌رسید. به همین منظور از تعدادی حسگر دفنی معمولی بدون پوشش که قبلاً توسط پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری از طریق مهندسی معکوس مشابه‌سازی شده بودند استفاده شد و برای روکش‌دار کردن میله وسطی حسگر مواد مختلف پلیمری از جمله پلاستیک، سیلیکون و پلی‌الفین مورد استفاده قرار گرفت. به منظور تعیین روکش مناسب میله وسطی حسگر ابتدا یک سری آزمایش مقدماتی صورت گرفت تا بتوان از میان پوشش‌های موجود، پوشش مناسب را انتخاب نمود. سادگی نصب، مقاوم بودن در برابر گرما و عوامل شیمیایی، ارزان بودن و دقت در نتایج از اولویت‌های انتخاب پوشش برای روکش‌دار کردن میله وسطی حسگر بود. با توجه به آزمایش‌های مقدماتی مشخص شد که نوعی پوشش به نام شیرینگ یا وارنیش که

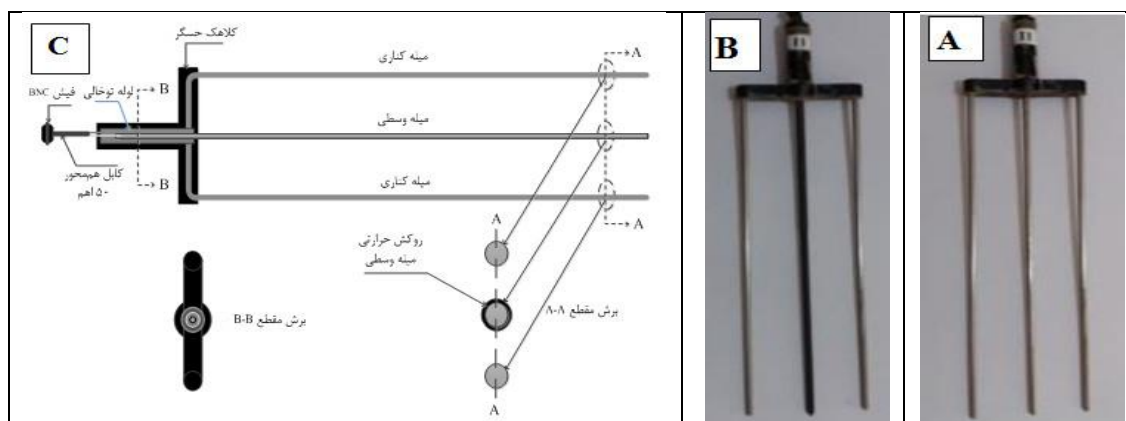
به روکش حرارتی معروف است و از نوعی پلی‌الفین جمع‌شونده یا انعطاف‌پذیر تهیه شده است برای روکش کردن میله حسگر مناسب است.

شیرینگ‌های حرارتی مورد استفاده در این پژوهش تک لایه و مشکی رنگ بوده که از پلی‌الفین ویژه پیوند متقابل<sup>۱</sup> شده تولید می‌شود. ماده تشکیل دهنده آن پلی‌الفین انعطاف‌پذیر، بدون هالوژن، ضد شعله، خود خاموش شونده و پیوند متقابل شده است. دمای کاری ۴۵- تا ۱۲۵+ درجه سلسیوس بوده و دمای مورد نیاز برای جمع شوندگی حداقل و حداکثر به ترتیب برابر ۷۰ تا ۱۲۰ درجه سلسیوس با ضریب جمع‌شوندگی یک به دو است یعنی پس از گرمادهی مناسب، قطر روکش حرارتی به نصف قطر اولیه کاهش می‌یابد (شرکت آژاکس، بدون تاریخ).

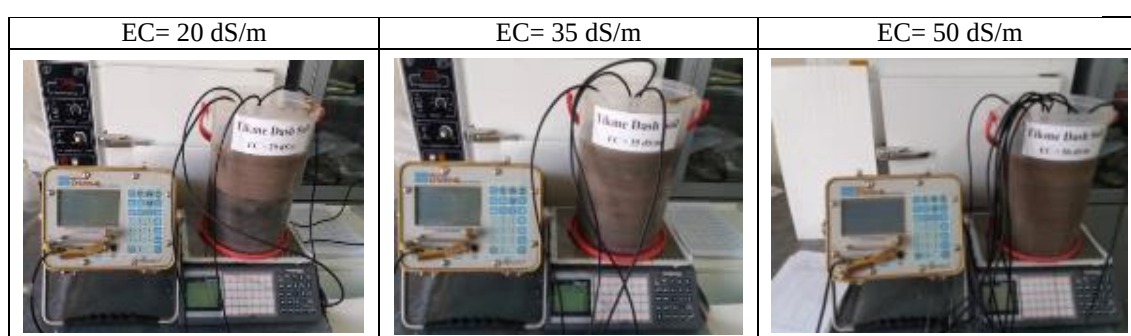
### ساخت حسگر رطوبتی روکش‌دار

با توجه به پیش‌آزمایش‌های صورت گرفته از میان گزینه‌های موجود بهترین گزینه برای روکش‌دار کردن میله وسطی حسگر دفنی، استفاده از روکش حرارتی تک لایه با قطر سه میلی‌متر بود. حسگر دفنی رطوبتی از طریق مهندسی معکوس توسط پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری از روی نمونه خارجی مشابه‌سازی گردید اما این حسگر با استفاده از دستگاه TDR قادر به اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک در شرایط متعارف بود و در خاک‌های با ریزبافت که شور بودند به دلیل داشتن رسانایی الکتریکی زیاد در بین میله‌های حسگر، دستگاه TDR در اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک با خطا مواجه شد. به همین دلیل میله وسطی حسگر با طول و تعداد لایه‌های متفاوت از روکش حرارتی پوشش داده شدند و با نصب آن در خاک ریزبافت با شوری‌های متفاوت، مقدار رطوبت خاک با دستگاه TDR اندازه‌گیری شد. مقدار روکش استفاده‌شده زمانی بهینه می‌شد که مقدار رطوبت خاک اندازه‌گیری شده به روش TDR برابر یا نزدیک به مقدار رطوبت واقعی می‌شد. (شکل

۱) نمونه‌ای از حسگر دفنی بدون روکش، با روکش میله وسطی و جزئیات آن را با میله وسطی روکش‌دار شده نشان می‌دهد. ظرف خاک مورد استفاده برای این قسمت از پژوهش، ظروف استوانه‌ای پلاستیکی به عمق ۳۰ سانتی‌متر و قطر ۲۱ سانتی‌متر بود که برای زهکشی یا اشباع نمودن خاک داخل آن، در قسمت تحتانی دارای زهکش و فیلتر شنی بود. با توجه به طول میله حسگر (۲۰ سانتی‌متر) ۲۱ سانتی‌متر از عمق ظرف پر از خاک گردید و به حدی متراکم گردید که چگالی ظاهری آن به حد طبیعی در شرایط مزرعه (۱/۲۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب) برسد. سه استوانه خاک با مقادیر رسانایی الکتریکی ۲۰، ۳۵ و ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر تهیه شده و خاک داخل آن‌ها اشباع شدند. حسگر دفنی روکش‌دار شده در خاک ریزبافت با رطوبت و شوری مشخص نصب شده و رطوبت خاک با دستگاه TDR از طریق حسگر قابل اندازه‌گیری بود. مقادیر رطوبت واقعی خاک نیز به روش وزنی توسط ترازوی دیجیتالی اندازه‌گیری می‌شد و با مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده به روش TDR مورد مقایسه قرار می‌گرفت. با توجه به اینکه سه سطح شوری در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت و برای هر سطح شوری سه تکرار در نظر گرفته شد در نتیجه نه عدد حسگر رطوبتی دفنی روکش‌دار برای یک رطوبت حجمی مشخص (مثلاً رطوبت ۴۷/۷ درصد حجمی برای خاک با رسانایی الکتریکی ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر) ساخته شده و واسنجی شدند اما رفتار این حسگرها برای رطوبت‌های دیگر خاک (مانند ۱۵، ۳۰ و ۵۰ درصد حجمی) نامعلوم بود و بایستی برای سایر مقادیر رطوبت خاک نیز عمل واسنجی صورت می‌گرفت تا در صورت تغییر رطوبت از مقدار واقعی، این تغییر در معادله واسنجی لحاظ شود. (شکل ۲) چگونگی توزین ظرف خاک و قرائت رطوبت از طریق حسگر رطوبتی به روش TDR را در سه سطح شوری نشان می‌دهد.



شکل ۱- حسگر رطوبتی دفنی بدون پوشش میلۀ وسطی (A)، حسگر دفنی رطوبتی با میلۀ وسطی روکش شده (B) و جزئیات حسگر رطوبتی دفنی با میلۀ وسطی روکش شده (C)



شکل ۲- تعیین مقدار روکش حسگر رطوبتی از طریق آزمون و خطا به روش TDR در خاک تیکمه‌داس (ریزبافت) در مقادیر رسانایی الکتریکی ۲۰، ۳۵ و ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر

### واسنجی حسگرهای رطوبتی روکش‌دار شده

از آنجایی که حسگرهای روکش‌دار شده در موقع ساخت از طریق آزمون و خطا برای یک مقدار رطوبت مشخص (رطوبت زیاد) واسنجی شده بود و رفتار آن‌ها برای سایر رطوبت‌ها (رطوبت‌های کم) نامعلوم بود به همین علت حسگرهای ساخته شده باید نسبت به حداکثر دامنه رطوبتی بافت‌های مختلف خاک‌ها (اشباع تا هواخشک) در سطوح مختلف شوری واسنجی می‌شدند تا بتوان با استفاده از نتایج واسنجی‌ها با کمترین خطا به رطوبت واقعی خاک دست یافت.

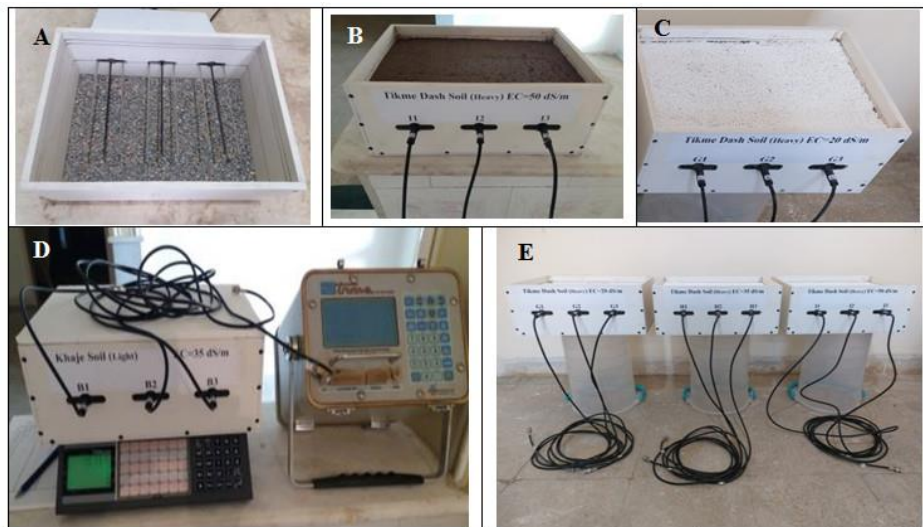
برای این منظور از جعبه‌هایی از جنس عایق استفاده شد که به ترتیب دارای طول، عرض و عمق ۳۵، ۲۵ و ۱۴ سانتی‌متر بود. با توجه به اینکه قرار بود در هر ظرف سه عدد حسگر رطوبتی نصب شود و برای هر سطح شوری یک ظرف در نظر گرفته شود سه عدد جعبه با ابعاد

مذکور ساخته شد و بعد از ایجاد زهکش و قرار دادن فیلتر شنی در قسمت تحتانی، خاک ریزبافت با شوری‌های ۲۰، ۳۵ و ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر به عمق ۱۰ سانتیمتر در داخل ظروف ریخته و در حد چگالی ظاهری طبیعی متراکم گردیده و پس از اشباع شدن، حسگرهای رطوبتی به‌طور افقی در خاک نصب شدند. برای جلوگیری از ترک خوردن سطح خاک در اثر خشک شدن سریع و امکان تماس میلۀ حسگر با هوا، لایه‌ای به ضخامت یک سانتیمتر از دانه‌های یونولیتی بر روی خاک پخش گردید. (شکل ۳).

برای تهیه مدل واسنجی نیاز به اندازه‌گیری مقدار رطوبت واقعی خاک بود که دقیق‌ترین روش برای اندازه‌گیری مقدار رطوبت واقعی خاک، روش وزنی است. بدین ترتیب پس از این‌که رطوبت حجمی خاک به روش TDR اندازه‌گیری شد برای مقایسه با رطوبت واقعی و تهیه

مدل واسنجی مناسب، به‌طور هم‌زمان رطوبت وزنی خاک

نیز اندازه‌گیری می‌شد (شکل ۳).



شکل ۳- فیلتر شنی و چگونگی قرار گرفتن حسگر رطوبتی در ظرف (A)، ظرف پر شده از خاک همراه با نصب حسگرهای رطوبتی (B)، پخش دانه‌های یونولیتی بر روی سطح خاک (C) اندازه‌گیری هم‌زمان مقدار رطوبت خاک به روش TDR و وزنی (D) و ظروف خاک همراه با متعلقات آماده برای اندازه‌گیری رطوبت (E)

## نتایج و بحث

### ویژگی‌های خاک

جدول یک برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده را نشان می‌دهد.

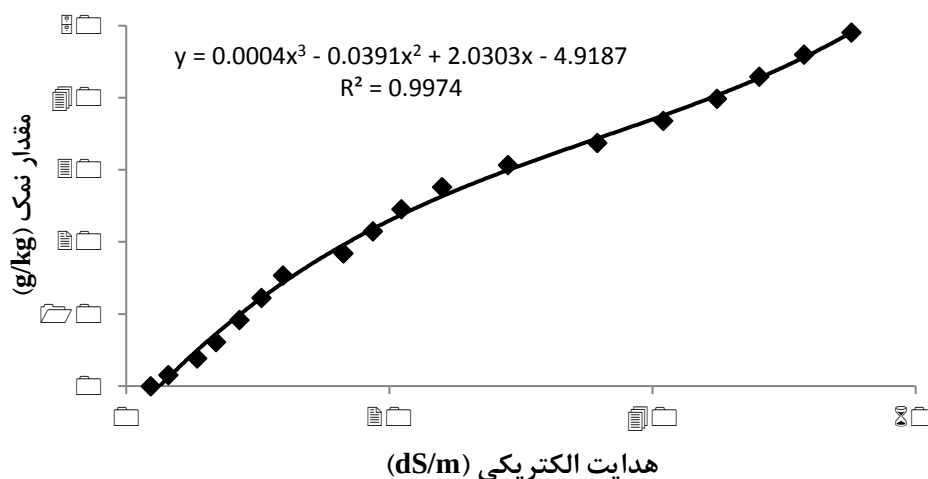
### محاسبه مقدار نمک به ازای رسانایی الکتریکی مشخص

با توجه به نمودار تجربی (شکل ۴) که مقدار نمک بر حسب گرم بر کیلوگرم خاک تابعی از رسانایی الکتریکی خاک بر حسب دسی‌زیمنس بر متر است می‌توان با فرض یک رسانایی الکتریکی مشخص خاک، مقدار نمک مورد نیاز را برآورد نمود.

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

| ردیف | مختصات محل (UTM) | عمق m | EC dS/m | pH | کربن آلی %O.C | $\rho_b$ g/cm <sup>3</sup> | $\rho_s$ g/cm <sup>3</sup> | FC % وزنی | PWP % وزنی | Sand % | Silt % | Clay % | بافت    |
|------|------------------|-------|---------|----|---------------|----------------------------|----------------------------|-----------|------------|--------|--------|--------|---------|
|      |                  |       |         |    |               |                            |                            |           |            |        |        |        |         |
| ۱    | ۴۱۸۹۱۸۲          | ۲۰    | ۲۰      | ۲۰ | ۰.۵           | ۱.۲۸                       | ۲.۵۴                       | ۳۷/۶۷     | ۲۰/۱       | ۳۷     | ۲۹     | ۳۴     | لوم رسی |





شکل ۴- منحنی هدایت الکتریکی به ازای مقادیر مختلف نمک برای خاک ریزبافت

= خاک خشک + نمک) مطابق (جدول ۲) است. حال بر اساس داده‌های این جدول به ازای هر مقدار جرم خاک (خاک خشک + نمک) می‌توان برای رسانایی الکتریکی مورد نظر، مقدار نمک را از طریق یک نسبت ساده محاسبه نمود.

در این پژوهش برای خاک مورد نظر سه سطح شوری انتخاب شد که رسانایی الکتریکی عصاره اشباع آن‌ها برابر ۲۰، ۳۵ و ۵۰ دسی زیمنس بر متر بودند. مقادیر نمک به دست آمده و درصد‌های آن‌ها در خاک برای شوری‌های مذکور به ازای مقدار مشخصی از جرم خاک (یک کیلوگرم

جدول ۲- محاسبه جرم و درصد نمک و خاک خشک مدل برای مقادیر رسانایی الکتریکی عصاره اشباع مختلف در خاک ریزبافت

| رسانایی الکتریکی (dS/m) |           |      |           |       |           |
|-------------------------|-----------|------|-----------|-------|-----------|
| ۵۰                      |           | ۳۵   |           | ۲۰    |           |
| درصد                    | جرم (گرم) | درصد | جرم (گرم) | درصد  | جرم (گرم) |
| ۴/۹                     | ۴۸/۸      | ۳/۵  | ۳۵/۴      | ۲/۳۲  | ۲۳/۲      |
| ۹۵/۱                    | ۹۵۱/۲     | ۹۶/۵ | ۹۶۴/۶     | ۹۷/۶۸ | ۹۷۶/۸     |
| ۱۰۰                     | ۱۰۰۰      | ۱۰۰  | ۱۰۰۰      | ۱۰۰   | ۱۰۰۰      |
| جمع (نمک + خاک خشک)     |           |      |           |       |           |

حجمی قرائت شده از دستگاه TDR با مقدار رطوبت واقعی یکسان یا نزدیک به هم بودند مثلاً با یک لایه کامل روکش حرارتی بر روی میله وسطی حسگر مقادیر دو تا رطوبت (رطوبت واقعی و رطوبت قرائت شده از دستگاه TDR) به هم نزدیک می‌شدند هر سه تا حسگر یا سه تکرار با یک لایه روکش حرارتی پوشش‌دار می‌شد که در این پژوهش مطابق (جدول ۳) برای خاک مورد نظر در هر سه سطح شوری از یک لایه پوشش کامل (معادل ۲۰ سانتی‌متر) برای روکش‌دار کردن میله وسطی استفاده شد.

#### مقدار روکش حرارتی مورد استفاده

در این پژوهش با توجه به نوع خاک و سطوح شوری سه تیمار وجود داشت. از آنجایی که هر کدام از تیمارها دارای سه تکرار است بنابراین با توجه به سه تیمار و سه تکرار نه عدد حسگر رطوبتی باید با روکش حرارتی، پوشش‌دار و هرکدام از حسگرها با طول روکش‌های مختلف چندین بار در خاک نصب و میزان رطوبت خاک با دستگاه TDR اندازه‌گیری می‌شد هرگاه مقدار رطوبت

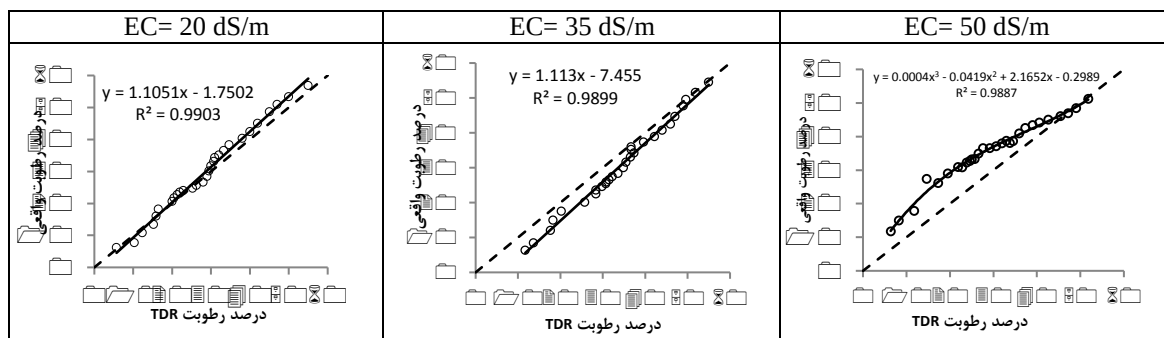
جدول ۳- مشخصات نمونه‌های خاک مورد استفاده برای روکش دار نمودن حسگرهای رطوبتی

| محل نمونه‌برداری خاک | بافت خاک | رسانایی الکتریکی (dS/m) | مقدار روکش حرارتی نصب شده برای میله وسطی حسگر |
|----------------------|----------|-------------------------|-----------------------------------------------|
| ایستگاه<br>تیکمه‌داش | ریزبافت  | ۲۰                      | یک لایه کامل                                  |
|                      |          | ۳۵                      | یک لایه کامل                                  |
|                      |          | ۵۰                      | یک لایه کامل                                  |

### رابطه بین مقادیر رطوبت واقعی خاک و اندازه‌گیری شده به روش TDR

برای این منظور اندازه‌گیری مقادیر رطوبت خاک به روش وزنی و روش TDR در سه سطح شوری با مقادیر رسانایی الکتریکی ۲۰، ۳۵ و ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر صورت گرفت و داده‌ها مطابق شکل ۵ در محورهای مختصات پیاده گردید. سپس روش‌های رگرسیون نمایی، خطی، لگاریتمی، چندجمله‌ای و توانی بر روی نقاط برازش داده شد. از میان روش‌های مذکور، معادله‌های رگرسیونی مناسب که از برازش خوبی بر نقاط برخوردار بودند و از نظر آماری

دارای ضریب تبیین ( $R^2$ ) بالایی بودند برای خاک با مقادیر رسانایی الکتریکی ۲۰ و ۳۵ dS/m از معادله رگرسیون خطی و برای خاک با رسانایی الکتریکی ۵۰ dS/m از معادله رگرسیونی درجه سه استفاده شد. در صورتیکه مقادیر رطوبت‌های اندازه‌گیری شده به روش TDR با مقادیر رطوبت واقعی یکسان باشند نمودارهای مربوط به شکل ۵ عملاً به صورت یک خط مستقیم با زاویه ۴۵ درجه خواهند بود که به صورت خط‌چین در شکل مذکور رسم شده‌اند. مقایسه روابط واسنجی نشان می‌دهد با افزایش شوری خاک، روابط از خط ۱:۱ دور شده‌اند.



شکل ۵- رابطه تجربی بین مقادیر رطوبت واقعی و اندازه‌گیری شده به روش TDR در شوری‌های ۲۰، ۳۵ و ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر

نیک‌نژاد و همکاران (۱۳۹۶) نشان داد که برای خاک‌های ریزبافت با مقادیر رسانایی الکتریکی برابر ۸ و ۱۶ دسی‌زیمنس بر متر اندازه‌گیری رطوبت خاک به روش TDR به ترتیب در مقادیر رطوبت حجمی بیشتر از ۳۸ و ۳۱ درصد با استفاده از حسگر دفنی مدل 6005L که میله‌های آن بدون پوشش پلیمری است ممکن نیست و برای خاک‌های با بافت درشت و متوسط در رسانایی الکتریکی ۱۶ دسی‌زیمنس بر متر به ترتیب در مقادیر

رطوبت حجمی بیشتر از ۱۱ و ۳۷ درصد نمی‌توان رطوبت خاک را به روش مذکور تعیین نمود؛ اما با پوشش‌دار کردن میله وسطی حسگر دفنی با مواد پلی‌الفین جمع شونده می‌توان بدون محدودیت، رطوبت خاک‌های شور را حتی در رسانایی الکتریکی بیش از ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر با استفاده از دستگاه TDR اندازه‌گیری نموده و برای دقت بیشتر می‌توان از مدل‌های واسنجی استفاده نمود.

## مقایسه مقدار رطوبت واقعی با رطوبت اندازه‌گیری شده به روش TDR

با توجه به (جدول ۴) برای خاک ریزبافت (خاک تیکمه‌داش) با مقادیر رسانایی الکتریکی ۲۰، ۳۵ و ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر، مقادیر رطوبت واقعی خاک به ترتیب برابر ۴۹/۸، ۵۰/۱ و ۴۷/۷ درصد حجمی و رطوبت‌های قرائت شده با دستگاه TDR و حسگر شرکت سازنده (حسگر موجود) در پنجره زمانی ۱۰ نانوثانیه به ترتیب برابر ۶۱/۷، ۹۳/۵ و ۶۷/۴ درصد حجمی بودند؛ اما رطوبت‌های قرائت شده از دستگاه TDR با استفاده از حسگرهای ساخته شده به ترتیب برابر ۴۷/۳، ۴۹/۲ و ۴۷/۱ درصد حجمی به دست آمد که به مقادیر رطوبت واقعی نزدیک‌تر بودند. طول

روکش مورد استفاده برای میله وسطی حسگر ساخته شده در مقادیر رسانایی الکتریکی مذکور، ۲۰ سانتی‌متر یا به عبارتی دیگر یک لایه کامل بود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود رطوبت‌های به دست آمده از طریق حسگر شرکت سازنده اختلاف فاحشی با مقادیر رطوبت واقعی دارد. به همین دلیل نتایج اندازه‌گیری‌های به دست آمده با این حسگر قابل اعتماد نبود. در صورتیکه مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده به روش TDR با حسگر رطوبتی ساخته شده تفاوت جزئی با مقادیر رطوبت واقعی داشت که آن هم یک امر طبیعی است و می‌توان آن را به دقت در ساخت حسگر، نصب آن در خاک و تغییرات دمای محیط آزمایشگاه نسبت داد.

جدول ۴- مقایسه مقادیر رطوبت واقعی با رطوبت اندازه‌گیری شده به روش TDR در خاک ریزبافت با مقادیر رسانایی الکتریکی (شوری) متفاوت

| رسانایی الکتریکی خاک (دسی‌زیمنس بر متر)    | ۲۰   | ۳۵   | ۵۰   |
|--------------------------------------------|------|------|------|
| درصد رطوبت حجمی واقعی                      | ۴۹/۸ | ۵۰/۱ | ۴۷/۷ |
| درصد رطوبت حجمی با حسگر روکش‌دار ساخته شده | ۶۱/۷ | ۹۳/۵ | ۴۷/۱ |
| درصد رطوبت حجمی با حسگر روکش‌دار موجود     | ۶۷/۴ | ۹۳/۵ | ۴۷/۱ |

## نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد مناسب‌ترین مواد برای تبدیل حسگر دفنی رطوبتی مدل 6005L (حسگر دفنی کفشی بدون روکش میله وسطی) به مدل 6005L (حسگر دفنی کفشی با میله وسطی روکش‌دار) استفاده از نوعی پوشش پلیمر به نام پلی‌الفین جمع شونده با پیوند متقابل است که به روکش حرارتی جمع شونده، شیرینگ یا وارنیش نیز مشهور است، از مزایای این نوع روکش می‌توان به کم بودن ثابت دی‌الکتریک، مقاوم بودن در برابر گرما و عوامل شیمیایی، نصب آسان و ارزان بودن آن اشاره نمود. طول بهینه روکش حرارتی مورد استفاده برای پوشش دادن میله وسطی حسگر رطوبتی برابر طول میله حسگر (۲۰ سانتیمتر) بود که به روش آزمون و خطا به دست آمد. حسگر رطوبتی مدل 6005CL که توسط شرکت سازنده دستگاه TDR برای اندازه‌گیری رطوبت خاک‌های شور تا رسانایی الکتریکی ۵۰ دسی‌زیمنس ساخته

شده است دارای میله وسطی روکش‌دار از جنس پلیمر است اما با توجه به آزمایش‌های راست‌آزمایی انجام شده خطای خیلی زیادی داشت که قابل قبول نبود. رطوبت قرائت شده توسط دستگاه TDR با استفاده از این نوع حسگر گاه‌بیش از دو برابر مقدار واقعی بود. بنابراین، با توجه به توضیحات مذکور امکان اندازه‌گیری رطوبت خاک‌های شور و خیلی شور (حتی بیش از ۵۰ dS/m) با استفاده از دستگاه TDR برای اولین بار در ایران فراهم شده و حسگر رطوبتی ساخته شده مانند حسگرهای معمولی متناسب با تغییر رطوبت خاک در اندازه‌گیری رطوبت خاک به روش TDR واکنش نشان می‌داد. در صورتی که بر اساس پژوهش‌های انجام شده اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک‌های شور و خیلی شور با استفاده از حسگر دفنی بدون پوشش امکان‌پذیر نبوده و حتی در شوری‌های پایین، دستگاه TDR دچار اختلال شده و یا مقدار رطوبت خاک را کمتر یا بیشتر از مقدار واقعی نشان می‌داد.

## فهرست منابع

۱. اسکندری، ذ و بهمن‌پور، م. ۱۳۸۲. تعیین هدایت الکتریکی آب و خاک با استفاده از TDR، مجموعه مقالات سومین همایش آبخوانداری، ارومیه. صفحه ۱۴ - ۲.
۲. شرکت آژاکش. بی تا. روکش حرارتی تک لایه مورد مصرف عمومی. (<http://woer.ir>).
۳. علی اصغرزاد، ناصر. ۱۳۷۹. بررسی پراکنش و تراکم جمعیت قارچ‌های میکوریز آربوسکولار در خاکهای شور دشت تبریز و تعیین اثرات تلقیح آن‌ها در بهبود تحمل پیاز و جو به تنش شوری، رساله دکتری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، ایران.
۴. کشاورز، م. ناظمی، ا. م. صدرالدینی، س. ع. ا. نیشابوری، م. ر. ناصری، ا. و فاخری فرد، ا. ۱۳۹۲. تاثیر بافت خاک بر دقت روش انعکاس سنجی حوزه زمانی در برآورد رطوبت خاک، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال سوم، شماره ۱۱.
۵. نامدار خجسته، د. شرفا، م. اسکندری، ذ. و فاضلی سنگانی، م. ۱۳۹۰. تأثیر میزان رس و شوری خاک در رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده با انعکاس سنج زمانی، مجله پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب) / الف / جلد ۲۵ / شماره ۲.
۶. نیک‌نژاد، د. روغنی، م. کلاتری اسکوئی، ع. کمالی، ک. خانی، م. میرمحمدی، ه. ۱۳۹۶. واسنجی حسگرهای رطوبتی تدفینی ساخت داخل کشور برای دستگاه TDR مدل 1X6050-TRASE در بافت‌ها و شوری‌های مختلف خاک، گزارش نهایی، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، شماره فروست ۵۲۵۸۵.
7. Abdullah, N. H. H., Kuan, N. W., Ibrahim, A., Ismail, B. N., Majid, M. R. A., Ramli, R. and Mansor, N. S. 2020. Determination of Soil Water Content Using Time Domain Reflectometer (TDR) for Clayey Soil AIP Conference Proceedings (<https://doi.org/10.1063/1.5062642>).
8. Dobson, M.C., Ulaby, F.T., Hallikainen, M.T. and El-Rayes M. A., 1985. Microwave dielectric behaviour of wet soil. Part II: Dielectric mixing models. Institution of Electrical and Electronic Engineers Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 23:35-46.
9. Hook, W.R. and Livingston, N.J., 1995. Propagating Velocity Errors in Time Domain Reflectometry Measurement of Soil Water. Soil Sci. Soc. Am. J. 59:92-96.
10. Hunduma, S. and Kebede, G. 2020. Indirect Methods of Measuring Soil Moisture Content Using Different Sensors, African Journal of Basic & Applied Sciences 12 (3): 37-55.
11. Jacobsen, O.J. and Schjonning, P., 1993. A laboratory calibration of time domain reflectometry for soil water measurement including effects of bulk density and texture. J. Hydrol. , 5: 147-157.
12. Pandey, G., Robert, J. and Ratnesh, K. 2018. Agricultural Cyber-Physical System: In-Situ Soil Moisture and Salinity Estimation by Dielectric Mixing, IEEE, Volume 6.
13. Or, D., Wraith, J.M., 1999. Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: a physical model. Water Resour. Res. 35: 371-833.
14. Rhoades, J.D., Manteghi, N.A., Shouse, P.J. and Alves, W.J., 1989. Soil electrical conductivity and salinity: new formulations and calibrations. Soil Sci. Soc. Am. J. 53: 433-439.

15. Roth, K., Schulin, R., Fluhler, H. and Attinger, W., 1990. Calibration of TDR for water content measurement using a composite dielectric approach . *Water Resour Res.* 26(10): 2267– 2273.
16. Shang, J. Q. 1994. Quantitative determination of Potential Distribution in Stern-Gouy Double layer Model. *Can. Geotech. J.* 31: 624-636.
17. Sun, Z.J., Young G.D., McFarlane R., Chambers B.M., 2000. The effect of soil electrical conductivity on moisture determination using time domain-reflectometry in sandy soil. *Can. J. Soil Sc.* 80(1): 13–22.
18. TE, 2016. Technology of shrinkable products. (<http://woer.ir>).
19. Topp, G.C., Davis, J.L., and Annan, A.P., 1980. Electromagnetic determination of soil watercontent: Measurement in coaxial transmission lines. *Water Res. Res.* 16:574- 5 82.
20. White, I., Knight, J.H., Zegelin, S.J., and Topp, G.C. 1994, Comments on ‘Consideration on the use of time-domain reflectometry (TDR) for measuring soil water content’ by W.R. Whalley. *Euroe. J. Soil Sci.* 45: 503-508.
21. Wyseure, G.C.L., Mojid, M.A., Malik, M.A., 1997. Measurement of volumetric water content by TDR in saline soils. *Eur. J. Soil Sci.* 48: 347–354.
22. Tokova, L., Dušan Igaz, D. Elena Aydin, E. 2019. Measurement of volumetric water content by gaavimetric and time domain reflectometry methods at field experiment with biochar and N fertilizer, *Acta Horticulturae et Regiotecturae* 2, Nitra, Slovaca Universitas Agriculturae Nitriae, pp. 61–64.
23. TRASE SYSTEM manual (1996) For Soil Moisture Measurement Version 2000Software(e-mail:sales@soilmoisture.comWeb: <http://www.soilmoisture.com>)

## Possibility of Measuring Water Content of Fine Textured Saline Soils by Time Domain Reflectometry

**D.Niknezhad\***

Research and Education Center for Agricultural and Natural Resources of East Azarbaijan, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Tabriz, Iran: Niknezhad2005@yahoo.com,

Received: September 10, 2023 and Accepted: June 2, 2024

### Abstract

Soil water content is measured by different methods, such as oven, gamma ray, and time reflectometry methods. Direct methods are time-consuming and lead to disturbance of the soil sample, and some indirect methods have risks of radioactive materials. Among these methods, the TDR method, which is one of the reflectometry methods, is a quick and safe method, and has received attention for this reason and gives acceptable results in soils with normal conditions. However, for saline soils, this method cannot measure water content accurately. The objective of this research was to make TDR sensors that can measure the water content of saline and fine-textured soils. By making these sensors, it would be possible to measure water content of saline soils by a TDR; and if an error is observed, the actual amount of soil water content can be obtained by providing suitable calibration models. For this purpose, a fine-textured soil was obtained from Tikmehdash Research Station and by adding different amounts of salt, soil samples with electrical conductivity of 20, 35 and 50 dS/m with natural density were prepared. Through trial and error, the type of coating suitable for covering the moisture sensor rod, which is a polymer material, was determined. Then, the length of the coating used in the middle moisture sensor rod was determined for the mentioned soil that had the prescribed salinities and water content. This length was equal to the length of the moisture sensor rod. Then, the coated sensors were tested to measure other soil water contents, and suitable calibration models were presented. Thus, by entering into the models the volumetric moisture content measured by TDR, the moisture content of fine-textured saline soils can be estimated with good accuracy.

**Keywords:** Coating, Moisture sensor, Calibration, Reflectometry

---

\*- Corresponding author's email: Niknezhad2005@yahoo.com



## Using kNN, RF and SVM and their Combination Using GR for Soil Texture Modeling

F. Mirzaei, A. Amirian Chakan\*, R. Taghizadeh Mehrjardi, and H.R. Matinfar

Ph.D. Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran. E-mail: f.mirzaie1374@gmail.com,

Assistant Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran. E-mail: amirian.ar@lu.ac.ir

Assistant Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Ardakan, Ardakan, Iran. E-mail: rtaghizadeh@ardakan.ac.ir

Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran. E-mail: matinfar.h@lu.ac.ir

Received: December 9, 2023 and Accepted: May 11, 2024

### Abstract

Soil texture is one of the most important soil properties that govern soil physical, chemical and biological behaviors. In modeling soil textural fractions, different models are used. To combine the benefits from different models, one approach is combining their predictions. Since soil texture is a compositional data, when its fractions are estimated separately there is no guarantee that the estimates will sum to 100. Log-ratio transformations before modeling are ways to deal with the problem. Little is known about modeling transformed and untransformed (UT) soil texture data using a combination of different models. In the present study, 200 surface soil samples (0-30 cm) were collected from Kuhdasht region. Random forest (RF), k-nearest neighbors (kNN) and support vector machines (SVM) and their combination using Granger-Ramanathan (GR) method were used to model soil texture data. Additive log-ratio (alr), centroid log-ratio (clr) and isometric log-ratio (ilr) transformations were used to transform texture data. Environmental variables derived from Landsat 8 and Sentinel-2 images and a digital elevation model (DEM) were used as input for all models. Results indicated that covariates derived from DEM were more important in modeling soil texture. All models improved the estimates of soil texture fractions when alr transformed data was compared to UT, clr, and ilr transformed data. The combined model (i.e. GR) did not show superiority over other models. Using GR model RMSE values for alr, clr, ilr transformed clay data and UT were 5.07%, 4.21%, 5.81%, and 6.09%, respectively. For silt RMSE values (in the same order as clay) were 7.11%, 5.15%, 9.04%, and 6.70%, and for sand were 9.20%, 7.67%, 11.69% and 8.74%, respectively. Generally, SVM using alr transformed data showed a slightly higher potential for modeling soil texture. Generally, results indicated that combining different machine learning algorithms did not necessarily improve the estimates. Therefore, it is possible to use a single appropriate model for modeling soil texture.

**Keywords:** Compositional data, Ensemble model, Log-ratio transformation, Random forest

---

\*Corresponding author's email: amirian.ar@lu.ac.ir



## Identifying Effective Factors on Morphology of South West of Nazar Abad Gullies Using UAV

R. Bayat<sup>1</sup>, A. Alinejadian Bidabadi <sup>2\*</sup>, M.Soufi<sup>3</sup>, A.Maleki<sup>4</sup> and O.A.Akbarpour<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Assistant Prof., Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Iran  
bayat52@gmail.com

<sup>2</sup>Associate Prof., Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Iran  
alinejadian@yahoo.com

<sup>3</sup> Associate Prof., Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Iran  
majidsoufi2@gmail.com

<sup>4</sup> Associate Prof., Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Iran  
dr.maleki38@yahoo.com

<sup>5</sup> Assistant Prof., Agronomy and Plant Breeding Department, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Iran  
omidakbarpour@gmail.com

Received: April 8, 2023 and Accepted: December 11, 2023

### Abstract

Gully erosion is one of the most important and destructive forms of water erosion, and there are ambiguities regarding its initiation and development. The study aimed to identify the soil properties and other factors affecting gullies of South Nazar Abad in 2021. After the field survey, based on the Google Earth images, gullied area boundary draw, 32 gullies were selected, and their location was recorded with the GPS. A surface soil sample was taken from head cut wall of each gully and general analyses were done. The gullies watershed boundaries and morphological characteristics including area, perimeter, and slope were extracted from the DM obtained from unmanned aerial vehicle (UAV) images. The general characteristics of the soil surface in the watershed of the gullies including canopy, bare soil, and residual percent were determined by 1 m x1 m plot. The gully length, width, and depth were measured and volumes were calculated. Modeling of factors affecting gullies was done using a multivariable linear regression model (step-by-step method) in MINITAB on 70% of observations. The relationship between the volume of gullies with gullies soil properties and watershed characteristics were investigated and a suitable gully development model (soil loss) was introduced. Also, in this research, 30% of the measured samples that were not used in the model construction were used for model validation. Percentage, RMSE, CRM, NSE, CD, MAE and  $d_{rel}$  statistics were used to determine model efficiency. Principal component analysis showed that EC,  $Na^+$ ,  $Cl^-$ ,  $K^+$ , Erodibility,  $Mg^{++}$ , canopy, bare soil, and SP characteristics had noticeable effect on gullies volume. Based on the results of the research and especially based on the Nash-Shutcliffe efficiency coefficient, no reliable model has been developed. Also, the presented model is valid based on the regression at the five percent significant level and according to the validation coefficients. The model with a correlation coefficient of 0.59 and four factors  $K^+$ , bulk density, crop residues, and percent bare soil could explain 35% of the changes.

Strengthening and restoring crop cover in the area is recommended.

**Keywords:** Model efficiency, Soil erosion, Gully headcut, Soil loss, Watershed

---

\*- Corresponding author's email: alinejadian@yahoo.com





# Monitoring of Dehydrogenase and Lipase Activity Changes in a Light Naphtha-Contaminated Soil under Different Bioremediation Treatments

**Z. Afiat, M. Norozpoor, M.R. Sarikhani\*, and N. Aliasgharzad**

MSc Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz ; E-mail:  
zakieh.afiat1994@gmail.com

MSc Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz ; E-mail:  
Maryamnoroopoor72@gmail.com

Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz ; E-mail:  
rsarikhani@yahoo.com

Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz ; E-mail:  
n-aliasghar@tabrizu.ac.ir

Received: June 26, 2023 and Accepted: August 13, 2024

## Abstract

Enzyme activity measurement is one of the significant methods in the bioremediation of soils contaminated with petroleum compounds. Biostimulation, bioaugmentation and their integration are among the types of bioremediation methods used in this experiment. For this purpose, to reduce light naphtha pollution (1%) in a sandy loam soil, a variety of bioremediation treatments, including providing NP elements, adding cow manure and Tween 80 surfactant, bioaugmentation, and integrated treatment were used. This experiment was carried out in a pot (containing 3 kg soil) based on split plot factorial design (pollution factor, bioremediation factor and time) with 3 replications, at room temperature, for 120 days. On days 0, 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90 and 120, subsamples were taken from each pot to measure the activity of dehydrogenase and lipase enzymes. The results of the experiment showed that bioremediation treatments led to the reduction of oil pollutants. Likewise, dehydrogenase activity had a completely downward trend from the beginning of the experiment, and the changes of lipase activity in contaminated soil increased until day 10, decreased slightly from day 10 to 15, then, progressed with slight fluctuations until day 60 and decreased again from day 60 onward. Dehydrogenase activity changes in cow manure treatment during the experiment was from 3.39 to 0.35 ( $\mu\text{g TPF g}^{-1} \text{h}^{-1}$ ), and lipase activity in integrated treatment dropped from 57 to 33.56 ( $\text{mU g}^{-1}$ ). In addition to increasing the active microbial population involved in the decomposition of petroleum compounds and providing optimal conditions for their activity, the use of integrated treatments and cow manure is a suitable method to reduce the concentration of light naphtha.

**Keywords:** Bioaugmentation, Bioremediation, Biostimulation, Enzyme activity, Petroleum pollution

---

\* Corresponding author's email: rsarikhani@yahoo.com



## Integrated Soil and Water Management at Farm Level in Honam Sub-Catchment (Part II: Soil and Water Recommended Packages for Homogenous Units)

M. R. Balali <sup>1\*</sup>, S. Mallah <sup>1</sup>, K. Eftekhari <sup>1</sup>, H. Rezaei <sup>1</sup>, K. Bazargan <sup>1</sup>, V. Nangia <sup>2</sup>, F. Moshiri <sup>1</sup>, M. Panahi <sup>1</sup>, M. Sepahvand <sup>3</sup>, A. Momvandi, M. A. Ghanbarpouri <sup>3</sup>, S. Abdi <sup>3</sup>, M. Matinkia <sup>4</sup>, M. Sepahvand <sup>4</sup> and M. Azizollahi <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Researcher, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

<sup>2</sup> International Center for Agricultural Research in Dry Areas, Rabat, 6299, Morocco

<sup>3</sup> Researcher, Agricultural and Natural Resources Research Center of Lorestan, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Khoramabad, Iran

<sup>4</sup> Extension, Agricultural and Natural Resources Research Center of Lorestan, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Khoramabad, Iran

<sup>4</sup> Extension of Aliabad Agricultural Jihad Center, Alashtar, Lorestan, Iran

<sup>5</sup> Local facilitator

\*Corresponding author: [mrbalali68@gmail.com](mailto:mrbalali68@gmail.com)

Received: April 8, 2023 and Accepted: July 31, 2024

### Abstract

In the first part of this paper, multi-dimensional understanding of the soil and water management of agricultural lands of Honam Sub-catchment was provided by determining the 53 homogeneous soil and water management units (HSWMUs), current behavior assessment of the farmers, and the yield gap analysis. It was found that efficiency of water and fertilizer consumption in the region was relatively low. Therefore, soil and water management packages including soil fertility management, irrigation management and land degradation prevention were prepared for each HSWMUs. The method of preparation and validation steps of management packages is the subject of this paper. To transfer the achieved knowledge and technology and to evaluate and validate the recommended packages, Aliabad Agricultural Jihad Center of Lorestan was selected as an innovation platform. Scaling-up was carried out by active cooperation of multi-level local to national experts to hold a technology exhibition including management of optimal use of chemical, organic and biological fertilizers, and irrigation methods to test the research results. To this end, the selected technologies and recommendations were implemented at volunteer farmers' fields. The pilots were separated into two treatments of farmers' conventional practice and integrated recommendation in the beet-wheat rotation. The results of the best bet showed that, on average, crop production of winter wheat increased from 5 to 7.5 t/ha and water use efficiency improved by 13%. These results were displayed to other farmers on the field day, which matched up with the time of wheat harvest. By proofing the effectiveness of the results in the farmers' fields, the soil and water management packages of the region were prepared. Despite holding workshops for farmers, results were not scaled to others. We found that the out-scaling of soil and water management packages within HSWMUs and improvement of the average yield along with the principles of sustainability is rooted in three gaps: yield, research and development, and value chain gap. In other words, the awareness and motivation of the farmers, the ability to implement recommendations, and the availability of facilities are the basic conditions for filling crop yield gap in the region. Therefore, one-year pilots are not effective enough and should be continued for several years. Afterward, the capacity building of local extensions at the Soil and Water Research Institute (SWRI) was carried out to show the different stages of preparing HSWMUs, recommendations and instructions. All data were transferred to the innovation platform in digital and printed format. Receiving feedback and to continue scaling-out under spiral proses method, a number of farmers of HSWMUs who volunteered to test the recommended packages in their farms were selected, and the pilots was designed based on participatory research. It is expected that with the establishment of long-term demonstration farms and the provision of various requirements such as the existence of various fertilizers and other agricultural inputs by the collaboration of public and private sectors, the transfer of recommendations to other farmers as well as decision makers of the sub-basin is facilitated.

**Keywords:** Recommended packages, Community capacity building, Collective action, Innovation platform, Demand-driven research.

\* Corresponding author's email: [mrbalali68@gmail.com](mailto:mrbalali68@gmail.com)



# Investigating Spatial Variability of Saturated Hydraulic Conductivity and the Factors Affecting It in Different Layers of Soil Profile of Paddy Fields

**N. Davatgar\*, M. R. Neyshabouri, A. R. Sepaskhah and L. Rezaee**

Associated Professor, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj; E-mail: n\_davatgar@yahoo.com

Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Tabriz University, Tabriz; E-mail: neyshmr@hotmail.com

Professor, Department of Irrigation Science, College of Agriculture, Shiraz University; E-mail: sepas@shirazu.ac.ir

Ph.D., Soil Physic Lab, Rice Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rasht; E-mail: l.rezaee77@gmail.com

Received: November 22, 2023 and Accepted: July 30, 2024

## Abstract

Spatial variability of soil hydraulic properties is important for soil-water balance and irrigation management in paddy fields. The objective of this study was to determine the spatial variability of saturated hydraulic conductivity (Ks) and the factors affecting it. Soil samples from 120 profiles were collected using random stratified sampling scheme. Soil samples were taken from top soil, compacted plow pan, and non-saturated subsoil. In these samples, soil texture, organic carbon, bulk density, saturated moisture, and saturated hydraulic conductivity were measured (by the falling head method). The most heterogeneity with a maximum coefficient of variation (CV), positive skewness, and lognormal frequency distribution for Ks indicated preferential flow caused by the presence of biological pores and cracks from previous drought stress. The results of the geostatistical analysis showed that hydraulic conductivity followed spherical and exponent semi-variogram model in puddled top soil and the non-saturated subsoil, respectively. This variable followed linear semi-variogram model with low slope in plow pan. The CV of Ks in plow pan (299%) was 121% and 284% higher than, respectively, the upper and the lower layers. The closeness of the behavior of Ks to random variables in this layer was mainly due to the existence of biological pores and root channels and the movement of animals, which lead to preferential flow. Despite the weak and moderate spatial structure of the variables, the kriging interpolation method was more accurate for Ks compared to inverse distance weighting. The spatial distribution pattern of Ks in puddled top layer was inversely related to clay content. Despite the high clay content in the west half of the study area, the Ks values in this region were high due to the presence of biopores. These results indicate that the compacted plow pan cannot play its key role for reducing hydraulic conductivity and retaining water in the soil. The magnitude and spatial variability of soil hydraulic conductivity and the factors affecting it depend on the site-specific irrigation management.

**Keywords:** Biopores, Kriging, Paddy fields, Puddled layer

---

\* - Corresponding author's email n\_davatgar@yahoo.com



## **Contents**

### **Subject**

### **Page**

#### **Investigating Spatial Variability of Saturated Hydraulic Conductivity and the Factors Affecting It in Different Layers of Soil Profile of Paddy Fields.....1**

N. Davatgar, M. R. Neyshabouri, A. R. Sepaskhah and L. Rezaee

#### **Integrated Soil and Water Management at Farm Level in Honam Sub-Catchment (Part II: Soil and Water Recommended Packages for Homogenous Units).....2**

M. R. Balali, S. Mallah, K. Eftekhari, H. Rezaei, K. Bazargan, V. Nangia, F. Moshiri, M. Panahi, M. Sepahvand, A. Momvandi, M. A. Ghanbarpouri, S. Abdi, M. Matinkia, M. Sepahvand and M. Azizollahi

#### **Monitoring of Dehydrogenase and Lipase Activity Changes in a Light Naphtha-Contaminated Soil under Different Bioremediation Treatments.....3**

Z. Afiat, M. Norozpoor, M.R. Sarikhani, and N. Aliasgharzad

#### **Identifying Effective Factors on Morphology of South West of Nazar Abad Gullies Using UAV**

.....4

R. Bayat, A. Alinejadian Bidabadi, M.Soufi, A.Maleki and O.A.Akbarpour

#### **Using kNN, RF and SVM and their Combination Using GR for Soil Texture Modeling.....5**

F. Mirzaei, A. Amirian Chakan, R. Taghizadeh Mehrjardi, and H.R. Matinfar

#### **Possibility of Measuring Water Content of Fine Textured Saline Soils by Time Domain Reflectometry.....6**

D.Niknezhad

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. 38, No. 1  
2024**

***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, PhD    | Assistant Professor (Research), Soil and Water Research Institute               |
| Kambiz bazargan, PhD         | Associate Professor, 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, PhD |
| Type and design: | Kiana Khomehchi   |

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





Soil and Water Research Institute



Soil Science Society of Iran

# Iranian Journal of Soil Research

(Soil and Water Sciences)

Volume 38 \ No.1 \ 2024

ISSN: 2228 -7124

| Subject                                                                                                                                                                                              | <u>Contents</u> | Page |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------|
| Investigating Spatial Variability of Saturated Hydraulic Conductivity and the Factors Affecting It in Different Layers of Soil Profile of Paddy Fields.....                                          | 1               |      |
| N. Davatgar, M. R. Neyshabouri, A. R. Sepaskhah and L. Rezaee                                                                                                                                        |                 |      |
| Integrated Soil and Water Management at Farm Level in Honam Sub-Catchment (Part II: Soil and Water Recommended Packages for Homogenous Units).....                                                   | 2               |      |
| M. R. Balali, S. Mallah, K. Eftekhari, H. Rezaei, K. Bazargan, V. Nangia, F. Moshiri, M. Panahi, M. Sepahvand, A. Momvandi, M. A. Ghanbarpouri, S. Abdi, M. Matinkia, M. Sepahvand and M. Azizollahi |                 |      |
| Monitoring of Dehydrogenase and Lipase Activity Changes in a Light Naphtha-Contaminated Soil under Different Bioremediation Treatments.....                                                          | 3               |      |
| Z. Afiat, M. Norozpoor, M.R. Sarikhani, and N. Aliasgharzad                                                                                                                                          |                 |      |
| Identifying Effective Factors on Morphology of South West of Nazar Abad Gullies Using UAV.....                                                                                                       | 4               |      |
| R. Bayat, A. Alinejadian Bidabadi, M.Soufi, A.Maleki and O.A.Akbarpour                                                                                                                               |                 |      |
| Using kNN, RF and SVM and their Combination Using GR for Soil Texture Modeling.....                                                                                                                  | 5               |      |
| F. Mirzaei, A. Amirian Chakan, R. Taghizadeh Mehrjardi, and H.R. Matinfar                                                                                                                            |                 |      |
| Possibility of Measuring Water Content of Fine Textured Saline Soils by Time Domain Reflectometry.....                                                                                               | 6               |      |
| D.Niknezhad                                                                                                                                                                                          |                 |      |